

**Modelle zur Abbildung asymmetrischer Kronen-
formen und zur Beschreibung der Zuwachsleistung
für sechs Baumarten in Nordwestdeutschland**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie

der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

Susanne Sprauer

geboren in Filderstadt

Göttingen, Dezember 2013

1. Gutachter: Prof. Dr. Jürgen Nagel

2. Gutachter: Prof. Dr. Christian Ammer

Tag der mündlichen Prüfung: 28. März 2014

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt allen, die in der ein oder anderen Form zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr. Jürgen Nagel für die Betreuung der Arbeit, für die konstruktiven Diskussionen und die Unterstützung und Motivation in schwierigen Phasen. Dr. Matthias Schmidt danke ich für seine vielfältige Anregungen, für die Unterstützung bei methodischen Schwierigkeiten und für die Geduld, mit der er zahlreiche Fragen beantwortete. Bei Prof. Dr. Christian Ammer bedanke ich mich für die Bereitschaft die Arbeit zu begutachten.

Ohne die vielen fleißigen Kollegen, die im Laufe der Jahre Daten zusammengetragen, bearbeitet und kontrolliert haben, wäre diese Arbeit nicht denkbar gewesen. Ich bedanke mich stellvertretend für alle Beteiligten bei Stefan Fahr, Heiner Heile, Thomas Held, Werner Hiege, Thomas Jansen, Ralf-Volker Nagel, Axel Noltensmeier, Stefan Quitt, Andreas Richter, Dr. Andreas Weller, Michael Wilke und Viktoria Witt für ihren Einsatz bei der Aufnahme und Betreuung der Versuchsfelder; bei Christhilde Bobbert, Natalien Erbach, Brigitte Häseker, Sonja Mollenhauer, die in mühevoller Kleinarbeit die Daten unzähliger Versuchspartien bearbeitet haben und bei Silvia Mangold und Thorsten Möhlenhoff, die mir besonders in der Anfangszeit und später bei der Kontrolle der Stammverteilungspläne behilflich waren.

Für zahlreiche Anregungen, wertvolle Diskussionen und die moralische Unterstützung danke ich Dr. Matthias Albert, Uwe Dickel, Dr. Heidi Döbbeler, Falko Engel, Christoph Fischer, Ulrike Gaertner, Dr. Jan-Hendrik Hansen, Inge Kehr, Ralf-Volker Nagel, Axel Noltensmeier, Robert Nuske, Sabine Rumpf, Dr. Egbert Schönfelder, Sebastian Schoneberg, Prof. Dr. Hermann Spellmann und René Würdehoff. Bei Dr. Hendrik Rumpf und Dr. Ulrike Talkner bedanke ich darüber hinaus für ihre Unterstützung bei der Durchsicht des Manuskripts.

Für ihre Hilfe bei Java-Fragen möchte ich mich bei meinem Bruder und bei Michael Henke bedanken und für die Unterstützung in technischen Belangen gilt mein Dank Jochen Eggemann und Martina Franßen.

Meinem Freund und meiner Familie danke ich für die Unterstützung beim Korrekturlesen, im Kampf gegen das Textverarbeitungsprogramm und für die moralische Unterstützung, ohne die diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Zielsetzung	10
3	Grundlagen	12
3.1	Krone und Zuwachs	12
3.2	Kronendimension	15
3.2.1	Kronenbreite	15
3.2.2	Kronenlänge	17
3.3	Kronenmorphologie	21
3.3.1	Konkurrenz und Lücken	22
3.3.2	Hangneigung	28
3.3.3	Richtung der Sonneneinstrahlung	29
3.3.4	Artspezifische Unterschiede	31
3.3.5	Wind	32
3.3.6	Grenzen horizontaler Asymmetrie	32
3.4	Kronenformmodelle	33
4	Datengrundlage	36
4.1	Datenerhebung	37
4.2	Datengrundlage: Kronenlänge	38
4.3	Datengrundlage: Kronenbreite	42
4.4	Datengrundlage: Lichtkronenlänge	47
4.5	Horizontale Asymmetrie	47
4.6	Validierung der Modellkronen	48
4.7	Zuwachs	50
4.8	Vergleichsdaten	51
5	Methoden	52
5.1	Modellkronen	52
5.1.1	Kronenlänge	53
5.1.2	Kronenbreite	59
5.1.3	Lichtkronenlänge	61
5.1.4	Repräsentation der Krone	62
5.1.5	Aufbau der individuellen Kronenform	65
5.1.6	Beschränkung der horizontalen Asymmetrie	68
5.1.7	Generierung von Randbäumen	69

5.1.8	Validierung	69
5.2	Krone und Zuwachs	71
5.2.1	Referenzmodell	72
5.2.2	Baumartspezifische Zuwachsmodelle	74
5.2.3	Einheitliches Zuwachsmodell	77
6	Ergebnisse	78
6.1	Modellkronen	78
6.1.1	Kronenlänge	78
6.1.2	Kronenbreite	88
6.1.3	Lichtkronenlänge	98
6.1.4	Beschränkung der horizontalen Asymmetrie	100
6.1.5	Kronenkonstruktion	101
6.1.5.1	Validierung der Kronenform	102
6.1.5.2	Validierung der räumlichen Übereinstimmung	103
6.2	Krone und Zuwachs	106
6.2.1	Referenzmodell	106
6.2.2	Baumartspezifische Modelle	107
6.2.3	Sensitivitätsanalyse am Beispiel der Buche	111
6.2.4	Einheitliches Zuwachsmodell	112
7	Diskussion	117
7.1	Modellkronen	117
7.1.1	Kronenlänge	117
7.1.1.1	Effekte der erklärenden Variablen	117
7.1.1.2	Sensitivitätsanalyse am Beispiel der Buche	120
7.1.1.3	Zufallseffekte	122
7.1.1.4	Anwendung des Modells	123
7.1.2	Kronenbreite	124
7.1.2.1	Sensitivitätsanalyse am Beispiel der Buche	129
7.1.2.2	Modellvergleich	131
7.1.3	Lichtkronenlänge	131
7.1.4	Beschränkung der horizontalen Asymmetrie	132
7.1.5	Aufbau der Kronenform	133
7.1.5.1	Kronenform	134
7.1.5.2	Räumlichen Übereinstimmung	134
7.2	Krone und Zuwachs	140

7.2.1	Referenzmodell	140
7.2.2	BHD und (Licht-)Kronenmantelfläche	141
7.2.3	Konkurrenz und Freistellung	144
7.2.4	Sensitivitätsanalyse am Beispiel der Buche	147
8	Schlussfolgerungen und Ausblick	148
9	Zusammenfassung	153
10	Abstract	159
11	Literatur	164
12	Anhang	180
12.1	Kronenlänge	180
12.2	Kronenbreite	192
12.3	Zuwachs	198
12.3.1	Referenzmodell	198
12.3.2	Baumartspezifische Modelle	202

1 Einleitung

Kronen stellen die Schnittstelle zwischen 90% der terrestrischen Biomasse und der Atmosphäre dar (OZANNE ET AL. 2003). Und auch für Waldökosysteme selbst spielen die Kronen von Einzelbäumen und das Kronendach insgesamt eine große Rolle. Das Kronendach ist der Ort von Photosynthese, Respiration und Evapotranspiration, die für die Funktion von Waldökosystemen von zentraler Bedeutung sind. Die Struktur des Kronendaches bestimmt im Wesentlichen das Lichtangebot für die Unterschicht und die Verjüngung und beeinflusst darüber hinaus weitere Wachstumsbedingungen. Die Größe der Kronen – häufig charakterisiert anhand von Kronenbreite und Kronenlänge – und deren räumliche Verteilung sind die wichtigsten Kriterien zur Beschreibung der räumlichen Variation der Lichtverhältnisse unter dem Kronendach (BRUNNER 1998; CANHAM ET AL. 1999; AMEZTEGUI ET AL. 2012). Auch die individuelle Variabilität der Kronendimension beeinflusst die Lichtverhältnisse am Boden (VIEILLEDENT ET AL. 2010). Darüber hinaus wurde ein Einfluss der Geometrie der Krone – insbesondere der unterschiedlichen Architektur zwischen Laub- und Nadelbäumen – gefunden (CANHAM ET AL. 1999). Ein Vergleich der prognostizierten Lichtintensität mit gemessenen Werten an Douglasien in Kanada ergab deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Kronenrepräsentation (BRUNNER 1998).

Aus wachstumkundlicher Sicht sind Kronen besonders vor dem Hintergrund ihres Einflusses auf den Zuwachs von Einzelbäumen von großer Bedeutung. Zum einen wirkt sich die Krone als Assimilationsorgan auf das Wachstum aus. Zahlreiche aus der Literatur bekannte Modelle zur Vorhersage des Einzelbaumwachstums nutzen Kronenparameter als Prädiktoren. Darüber hinaus hat die Nachbarschaft des Baumes einen großen Einfluss auf das Wachstum, sodass häufig auch Indikatoren für die individuelle Konkurrenzsituation in Zuwachsmodellen Verwendung finden (MONSERUD & STERBA 1996; PRETZSCH ET AL. 2002; HASENAUER ET AL. 2006; NAGEL & SCHMIDT 2006). Dabei haben sich kronenbezogene Konkurrenzindizes als besonders wirkungsvoll erwiesen (BACHMANN 1998). Die Verwendung von Kronenparametern führt durch die Berücksichtigung artspezifischer Kronendimensionen bei sonst glei-

1 Einleitung

chen biometrischen Kenngrößen zu einer realistischeren Beschreibung der Konkurrenz in Mischbeständen.

Da die Erfassung von Kronen im Bestand sehr aufwändig ist, müssen Kronenparameter wie der Kronenansatz und die Kronenbreite aus einfachen biometrischen Parametern wie dem BHD geschätzt werden. Daraus lassen sich unter der Annahme einfacher geometrischer Kronenformen Modellkronen konstruieren, wobei in der Regel stark vereinfachend horizontal symmetrische Kronenformen und eine über dem Stammfuß zentrierte Position unterstellt werden (z.B. NAGEL ET AL. 2002; PRETZSCH ET AL. 2002).

Tatsächlich besitzen jedoch die meisten Bäume eine mehr oder weniger asymmetrische Krone (YOUNG & HUBBELL 1991; ROUVINEN & KUULUVAINEN 1997; MUTH & BAZZAZ 2002, 2003; GETZIN & WIEGAND 2007; OLESEN 2001; PURVES ET AL. 2007; GUERICKE 2001). Auch treten häufig exzentrische Kronen auf, deren Schwerpunkt zum Teil deutlich von der Position des Stammfußpunktes abweicht (YOUNG & HUBBELL 1991; UMEKI 1995a; ROUVINEN & KUULUVAINEN 1997). Daher gibt es Ansätze zur Beschreibung von Kronen, die horizontal asymmetrische Kronenformen und eine Abweichung des Schwerpunktes der Kronenschirmfläche vom Stammfußpunkt abbilden können (z.B. MITCHELL 1975; PRETZSCH 1992a; CESCATTI 1997; GROTE 2003; PIBOULE ET AL. 2005).

Die Berücksichtigung der horizontalen Kronenform sowie der räumlichen Lage der Kronen ist in mehrfacher Hinsicht bedeutsam. So kann die vereinfachende Annahme kreisrunder über dem Stammfuß zentrierter Kronen zu einer systematischen Verzerrung der geschätzten Lichtinterzeption führen, die auf der Überschätzung der Kronenüberlappung und der räumlichen Variabilität der Strahlungsintensität basiert (OKER-BLOM & KELLOMÄKI 1983; GUERICKE 2001; PIBOULE ET AL. 2005). Dies führt zu einer Fehleinschätzung der Lichtverhältnisse unter dem Kronendach, die für das Wachstum der nachfolgenden Bestandesgeneration eine entscheidende Rolle spielen. Eine treffende Einschätzung der Lichtverhältnisse ist auch bei der Beschreibung von Holzqualitätsmerkmalen (z.B. Astigkeit, Position von Seitenästen) von Bedeutung (KELLOMÄKI ET AL. 1999; SEIFERT 2003; ROCK ET AL. 2004). Darüber hinaus ist die individuelle Kronenausformung auch für andere Fragestellungen interessant. So unterscheidet sich die mechanische Stabilität gegenüber Wind in Abhängigkeit von

der Kronenform (YOUNG & HUBBELL 1991; SKATTER & KUCERA 2000; SELLIER & FOURCAUD 2009).

Auch für das Wachstum der Einzelbäume und die Entwicklung des Bestandes ist die individuelle Kronenausformung und die räumliche Lage der Krone im Gefüge der Nachbarkronen von Bedeutung. Ganz allgemein beeinflusst die Stärke der Konkurrenz neben anderen Faktoren die Zuwachsleistung des Einzelbaumes. Simulationsstudien zeigen jedoch, dass eine plastische Kronenausformung die Konkurrenzwirkung vermindern kann. Insbesondere unter- oder zwischenständige Individuen können durch die Ausbildung asymmetrischer Kronenformen auf die gegebene Situation im Kronenraum reagieren und so den Konkurrenzdruck vermindern (UMEKI 1997). Dies führt zu veränderten Wachstumsbedingungen, die sich auf den Zuwachs von Einzelbäumen auswirken. Auf Bestandesebene wird mit einer Verringerung der Mortalität, einer geringeren Größendifferenzierung und höherer mittlerer Größe gerechnet (SORRENSEN-COTHERN ET AL. 1993; UMEKI 1997; YOKOZAWA 1999).

Es erscheint darüber hinaus plausibel, dass die Wachstumsleistung nicht nur von der Stärke der Konkurrenz abhängt, sondern dass auch ihre räumliche Verteilung um die Krone des Einzelbaumes eine Rolle spielt. Im Allgemeinen wird für Bäume, die am Bestandesrand (Gasse, Wege, Waldrand) stocken und deren Wachstumssituation daher durch eine stark ungleichmäßige räumliche Verteilung der Konkurrenz geprägt ist, ein deutlich höherer Durchmesserzuwachs erwartet als für Bäume im Bestandesinneren (KRAMER 1958a; b).

Vor diesem Hintergrund erscheint die Berücksichtigung asymmetrischer Kronenformen und der räumlichen Anordnung von Kronen im Rahmen von Zuwachsprognosen unerlässlich.

2 Zielsetzung

Vor dem Hintergrund des engen Zusammenhangs zwischen dem Zuwachs eines Baumes und seiner Krone (BUSSE 1928; ASSMANN 1961; MITSCHERLICH 1970) einerseits und der großen Bedeutung der Kronen unmittelbarer Nachbarbäume für Dimension und Ausformung der Krone (3.3.1) andererseits erscheint eine möglichst realistische Abbildung der Krone in Abhängigkeit von der direkten Umgebung vielversprechend in Bezug auf mögliche Verbesserungen bisheriger Methoden zur Zuwachsprognose.

In diesem Zusammenhang sind die Ziele der Arbeit:

- Entwicklung statistischer Modelle, die eine möglichst treffsichere und differenzierte Prognose wichtiger Kronenparameter auf Einzelbaumebene ermöglichen. Dazu gehören die Kronenlänge, die Kronenbreite und die Höhe der maximalen Kronenbreite bzw. die Lichtkronenlänge.
- Viele einzelbaumbezogene Methoden zur Zuwachsschätzung nutzen Merkmale zur Beschreibung der Kronengröße (3.1). Es stellt sich daher die Frage, ob die Nutzung verbesserter und differenzierterer Schätzungen dieser Kronenparameter die Treffsicherheit von Zuwachsprognosen gegenüber der Verwendung einfacherer Modellansätze zur Schätzung dieser Parameter erhöhen können.
- Häufig werden zum Zweck der Zuwachsschätzung Modellkronen unterstellt, die in der Regel über dem Stammfuß zentriert und horizontal symmetrisch sind (3.4). Im Rahmen dieser Arbeit sollen dagegen einfache räumlich explizite und in Abhängigkeit von der direkten Nachbarschaft im Kronenraum ausgeprägte potentiell asymmetrische Modellkronen entwickelt werden.
 - a) Es soll geprüft werden ob diese potentiell asymmetrischen Modellkronen geeignet sind, das Kronengefüge eines Bestandes zu beschreiben.
 - b) Anschließend wird untersucht, ob die Zuwachsprognose durch die Nutzung der potentiell asymmetrischen Modellkronen im Vergleich zu runden über dem Stammfuß zentrierten Kronen verbessert werden kann.

Die Modelle zur Schätzung der Kronendimension werden artspezifisch für sechs Baumarten in Nordwestdeutschland parametrisiert. Auch die Entwicklung der Modellkronen erfolgt anhand von sechs Baumarten. Unter den vorkommenden Baumarten wurden die folgenden Arten(-gruppen) ausgewählt:

- Eichen, wobei Stieleiche (*Quercus robur* L.) und Traubeneiche (*Quercus petraea* [Mattuschka] Liebl.) zusammengefasst wurden,
- Buche (*Fagus sylvatica* L.),
- Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.),
- Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirbel] Franco),
- Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und
- Europäische Lärche (*Larix decidua* Mill.)

Die Modellkronen sollen für die Verwendung im Rahmen periodischer bestandesweiser oder regionaler Waldwachstumssimulation für ein breites Spektrum von gleich- und ungleichaltrigen Rein- und Mischbeständen geeignet sein. Daraus ergibt sich zum einen die Notwendigkeit, die Zusammenhänge auf Einzelbaumebene zu betrachten, andererseits aber auch die Einschränkung, die Modelle möglichst einfach zu halten, um den Rechenaufwand bei der Fortschreibung einiger Hundert oder mehr Bäume in vertretbarem Rahmen zu halten. Um in jeder Simulationsperiode plausible Zuwachsprognosen zu ermöglichen, werden Modellkronen mit entsprechend plausiblen dynamischen Eigenschaften benötigt.

3 Grundlagen

Dieser Abschnitt soll einen Überblick über den aktuellen Stand des Wissens im Themenbereich der Arbeit geben. Dabei werden die bisherigen Erkenntnisse zur Bedeutung der Baumkronen für den Durchmesserzuwachs des Stammes zusammenfassend dargestellt. Bei der zur Beschreibung dieses Zusammenhangs benötigten Repräsentation der Krone erstrecken sich die angewandten Verfahren von stark verallgemeinernden Quantifizierungen der Kronendimension bis hin zu komplexen Architekturmodellen, die neben der Dimension auch Morphologie und räumliche Lage der Kronen erfassen können. Einen Schwerpunkt bildet die Darstellung von Faktoren, die Ausprägung und Entwicklung der Kronenmorphologie beeinflussen sowie die Beschreibung von Ansätzen zur Modellierung von Baumkronen.

3.1 Krone und Zuwachs

Ergebnisse aus der ökologischen Forschung zeigen für ein breites Spektrum lebender Organismen, dass die Körpergröße in direktem Zusammenhang zur Ressourcenaufnahme steht (McMAHON 1973; BROWN ET AL. 2004; BONNER 2006 zitiert nach; VIELLEDENT ET AL. 2010). Dies zeigt sich bei Baumpopulationen beispielsweise in Bezug auf die Lichtversorgung, auf die die Baumhöhe und die Größe der Krone einen entscheidenden Einfluss ausüben.

Der Zusammenhang zwischen Größe und Lichtzufuhr spielt für Baumpopulationen, in denen Konkurrenz um Licht herrscht, eine besonders große Rolle, da die Konkurrenz um die Ressource Licht in der Regel asymmetrisch ist (FIRBANK & WATKINSON 1985; SCHWINNING & WEINER 1998). Große Bäume verfügen über einen überproportional großen Anteil an Ressourcen im Verhältnis zu ihrer Größe (WEINER 1990). Der asymmetrische Charakter der Konkurrenz um Licht wird darauf zurückgeführt, dass die Größe der Krone neben ihrer Bedeutung für die eigene Ressourcenaufnahme zugleich die verfügbaren Ressourcen der Nachbarkronen beeinflusst (TREMMELE & BAZZAZ 1995; SCHWINNING & WEINER 1998). Die Kronen herrschender Bäume erhalten die unverminderte Sonneneinstrahlung und beschatten mit ihrer Krone Bäume mit

geringerer Höhe oder Kronenteile von Nachbarn, deren Lichtzufuhr dadurch reduziert wird.

Neben Größe und relativer Lage der Krone spielt auch die Kronenarchitektur eine wichtige Rolle für die verfügbare Lichtmenge (STENBERG ET AL. 1994). Im Extremfall zeigt sich dies anhand des Unterschieds zwischen den langen schlanken Kronen (Nadelbäume) und stärker horizontal ausgerichteten Kronen (Laubbäume). Je nach Winkel der Sonneneinstrahlung erreichen die einen oder die anderen eine größere Lichtzufuhr (KUULUVAINEN & PUKKALA 1987).

Die Lichtmenge spielt wiederum eine wichtige Rolle für den Zuwachs. Es wird angenommen, dass die Menge des aufgenommenen Lichtes proportional zum Biomassezuwachs des Baumes ist (GRACE ET AL. 1987). Da die Lichtinterzeption aber nur schwer zu bestimmen ist, werden ersatzweise häufig Kronenparameter als Eingangsgrößen für die Zuwachsmodellierung verwendet (z.B. PRETZSCH 1992b; HASENAUER 1994; BIBER 1996; BACHMANN 1998; NAGEL 1999; FREISE 2005; BURKHART & TOMÉ 2012). Über die Grenze von Baumarten hinweg besteht ein enger Zusammenhang zwischen Kronenparametern und dem Zuwachs eines Baumes, der in den Forstwissenschaften schon lange bekannt ist (BUSSE 1928; BURGER 1939a; ASSMANN 1961; MITSCHERLICH 1970). Biber (1996) und Nagel (1999) verwenden die Kronenmantelfläche als erklärende Variable für ihre Grundflächenzuwachsfunktionen. Spathelf (1999) betont ebenso wie einige Arbeiten aus den USA (EK & MONSERUD 1974; MONSERUD 1975) den engen Zusammenhang zwischen Durchmesserzuwachs und Bekronungsgrad für Fichten und Tannen und vermutet, dass für diese Nadelbäume aufgrund ihrer Architektur die Kronenlänge eine größere Bedeutung für den Zuwachs hat als für Laubbaumarten. Auch die Funktionen der Wachstumsmodelle *PrognAus* (MONSERUD & STERBA 1996; STERBA ET AL. 2002) und *MOSES* (HASENAUER ET AL. 2006) verwenden die relative Kronenlänge und beziehen zusätzlich einen Konkurrenzindex ein, der auf der potentiellen Kronenbreite der Einzelbäume beruht. In das Durchmesserzuwachsmodell des Simulators *SILVA* gehen sowohl Kronenmantelfläche als auch die Kronenquerschnittsfläche in verschiedenen Höhen ein (KAHN & PRETZSCH 1997; PRETZSCH ET AL. 2002). Andere Arbeiten setzten den Zuwachs in Beziehung zum Volumen der Krone (ITÔ ET AL. 1997) oder zum Blattvolumen (OTTORINI ET AL. 1996).

3 Grundlagen

Biologisch bedeutsam ist dabei vor allem die Lichtkrone als der Teil der Krone, dessen Blätter eine günstige Stellung zum Licht haben (z.B. ASSMANN 1961).

Welche Größen besonders einflussreich sind, scheint unter anderem eine Frage der Baumart zu sein. So konnte für Wälder in Österreich ein signifikant positiver Einfluss des Bekronungsgrades auf den Grundflächenzuwachs eines Baumes nachgewiesen werden. Dabei erwies sich der Zuwachs von Fichte, Tanne und Kiefer als sehr sensitiv gegenüber Änderungen des Bekronungsgrades, wohingegen Eiche und Buche eine deutlich geringere Zuwachsreaktion auf veränderte Bekronungsgrade zeigten (MONSERUD & STERBA 1996). Die Autoren vermuten, dass für letztere Arten die Kronenbreite eine wichtigere Rolle spielen könnte. So zeigen andere Untersuchungen, einen starken Zusammenhang zwischen Kronenlänge und -breite einerseits und dem Volumenzuwachs von Eichen andererseits (EBERT & RIEGER 2000). Es erscheint daher sinnvoll, sowohl Kronenlänge als auch Kronenbreite für die Schätzung des Zuwachses heranzuziehen. Kramer und Akça (2002) empfehlen zusätzlich die Kronenmantelfläche, die sich insbesondere bei der Zuwachsermittlung bewährt habe. Insbesondere die Lichtkrone spielt für die Zuwachsleistung eine Rolle, da sie einen größeren Beitrag zum Assimilationsergebnis leistet als die Schattenkrone, für die der Überschuss aus Assimilationsleistung und Respirationsverlusten geringer ist (ASSMANN 1961). Es gibt jedoch Hinweise, dass der Zusammenhang zwischen der Kronengröße und dem Zuwachs nicht in allen Fällen gleich eng ist und beispielsweise für dichte unbehandelte Buchenbestände eine geringere Rolle spielt (FICHTNER ET AL. 2013).

Die meisten der genannten Kronenparameter können nicht oder nur mit großem Aufwand direkt erhoben werden. Sie werden in der Regel modellbasiert hergeleitet. Daher ist ein Kronenmodell zur Ableitung der nötigen Kronenparameter für die Zuwachsschätzung nötig. Möglicherweise lässt sich die Qualität der Zuwachsschätzung steigern, wenn das verwendete Kronenmodell neben der Größe und arttypischen Form der Kronen auch die Variabilität der Kronenmorphologie innerhalb des Bestandes berücksichtigt.

3.2 Kronendimension

Die Dimension von Kronen in ihrer räumlichen Ausdehnung ist vergleichsweise schwierig zu erheben und bedeutet in der Regel einen hohen zeitlichen und/oder technischen Aufwand. So werden in jüngerer Zeit luftgestützte und terrestrische Laserscanner zur zerstörungsfreien Erfassung von Kronenparametern verwendet (z.B. NÆSSET & ØKLAND 2002; PERSSON ET AL. 2002; PRETZSCH ET AL. 2011). Häufig wird die Kronendimension vereinfachend und unabhängig voneinander nach vertikaler und horizontaler Ausdehnung erfasst. So ist für die vertikale Kronenausdehnung die Kronenlänge oder der Bekronungsgrad leicht zu bestimmen während zur Quantifizierung der horizontalen Ausdehnung Kronenradius, die Kronenbreite oder die Kronenschirmfläche herangezogen werden können.

3.2.1 Kronenbreite

Viele Untersuchungen belegen den engen allometrischen Zusammenhang zwischen Kronenbreite und dem BHD für verschiedene Baumarten (z.B. KRAJICEK ET AL. 1961; BIBER 1996; GUERICKE 2001). So lassen sich bei Unterstellung einer linearen Abhängigkeit der Kronenbreite vom BHD Bestimmtheitsmaße über 0,7 für Buche und Lärche (GUERICKE 2001) bzw. 0,9 für Buchen und Fichten im Solling (BIBER 1996) erreichen.

Allerdings wird ein rein linearer Zusammenhang der Realität nicht immer gerecht (ASSMANN 1961). Andere Ansätze zur Erklärung der Kronenbreite verwenden daher nicht lineare Funktionen, die insbesondere im Bereich geringer Baumdimensionen zu plausibleren Ergebnissen führen (SCHMIDT ET AL. 2001; NAGEL ET AL. 2002), oder den quadratischen BHD als zusätzlichen Term innerhalb des linearen Modells (z.B. GILL ET AL. 2000), was die Vorhersagen für große Durchmesser verbessern kann.

Gill und Kollegen (2000) modellieren Kronenradien mehrerer Nadelbaumarten, darunter Douglasie, in Kalifornien und kommen zu dem Ergebnis, dass für viele Baumarten ein lineares Modell in Abhängigkeit vom BHD zu geeigneten Vorhersagen führt. Zusätzlich einbezogene Variablen (Oberstand/Unterstand, Kronenansatzhöhe, Bestandesgrundfläche und Geländehöhe) führten nur bei wenigen Baumarten zu einer Modellverbesserung.

Anhand von Inventurdaten aus dem Westen der USA untersucht Bechtold (2004) weitere Einflussfaktoren für 53 Baumarten mittels linearer Modelle und bestätigt zunächst die übergeordnete Bedeutung des BHD (linear und tlw. quadratisch) als Prädiktor für die Vorhersage der Kronenbreite. Anders als bei Gill und Kollegen (2000) verbessert sich für viele Arten die Schätzung durch die zusätzliche Berücksichtigung des Kronenprozents, der Bestandesgrundfläche sowie eines Index zur Charakterisierung der bioklimatischen Bedingungen. Andere Studien bestätigen einen Einfluss der Bestandesgrundfläche mithilfe von Modellen, in die ansonsten nur der BHD eingeht (BRAGG 2001).

Andere Ansätze nutzen neben dem BHD die Baumhöhe zur Erklärung der Kronenbreite (PRETZSCH ET AL. 2002; CONDÉS & STERBA 2005; SCHRÖDER ET AL. 2005; GOUDIE ET AL. 2009). Schröder und Kollegen (2005) untersuchen Kronenbreiten für Fichte, Kiefer, Eiche und Buche in Sachsen. Die Ergebnisse zeigen neben einem guten Zusammenhang zum BHD eine deutliche Abhängigkeit der Kronenbreite dieser Baumarten von dem zusätzlich herangezogenen Quotienten aus BHD und Baumhöhe (d/h-Quotient). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass schlanke Bäume eine geringere horizontale Kronenausdehnung besitzen als solche mit höherem d/h-Quotienten. In Bayern konnte ebenfalls ein Einfluss der Baumhöhe bzw. des h/d-Wertes neben dem BHD bestätigt werden (PRETZSCH ET AL. 2002). Für die Baumarten Eiche, Buche und Fichte sagen die beschriebenen Funktionen in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Sachsen geringere Kronenbreiten für schlankere Bäume vorher. Für Kiefer (und Tanne) ist der Einfluss der Höhe sehr viel geringer und entgegengesetzt gerichtet (vgl. CONDÉS & STERBA 2005). Auch Untersuchungen an Küsten-Kiefer (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud.) ergaben geringere Kronenschirmflächen für schlankere Bäume und zeigen die Bedeutung von BHD, Höhe und darüber hinaus der Höhe des Kronenansatzes für die Beschreibung der Kronenschirmfläche (GOUDIE ET AL. 2009). Sattler und LeMay (2011) betonen den engen physiologischen Zusammenhang zwischen Kronenlänge und Kronenbreite und gehen sogar soweit, beide Größen simultan zu schätzen.

Weitere Untersuchungen zeigen Unterschiede in der Kronenbreite von Solitären bei mehreren Baumarten in Abhängigkeit von der geographischen Lage (PAINE & HANN

1982) bzw. Standortfaktoren wie die Geländehöhe, Hangneigung und Exposition. Für Bestandesbäume kann Bechtold (2004) indirekt über die Verwendung eines Bioklima-Index den Einfluss der geographischen Lage auf die horizontale Kronenausdehnung zeigen. Die erreichten Modellverbesserungen sind jedoch gering. Von Untersuchungen in den Pyrenäen gibt es Hinweise, dass die Kronenbreite von der Richtung der Hangneigung beeinflusst werden kann (AMEZTEGUI ET AL. 2012). Auch die Qualität des Standorts könnte eine Rolle spielen, da bei höherer Bonität höhere Stammzahlen erwartet werden (SCHÖBER 1967), sodass die Kronen schmaler sein müssen oder stärker ineinander greifen.

Untersuchungen im Hainich, an Fichten und Birken in Wales bzw. in Nadelmischbeständen in Kanada ergaben einen Zusammenhang zwischen der Kronenschirmfläche und der Konkurrenzsituation eines Baumes (FRECH 2006; DAVIES & POMMERENING 2008; THORPE ET AL. 2010). An Buchen in Bayern wurden bei gleichem BHD und gleicher Konkurrenzsituation unterschiedliche Kronenbreiten beobachtet je nachdem ob die Bäume in Rein- oder Mischbeständen erwachsen waren. Buchen zeigten in Mischung mit Fichte, Eiche und Kiefer größere Kronenbreiten als unter intraspezifischer Konkurrenz im Reinbestand (DIELER & PRETZSCH 2013), während die Kronenbreiten von Fichten in Mischung mit Buche im Vergleich zum Reinbestand geringer waren (DIELER 2011).

Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung der Kronenbreite bietet der Potential-Ansatz, der die potentielle Kronenbreite (Kronenbreite von Solitären) in Abhängigkeit von Einzelbaumvariablen reduziert (HANN 1997; CRECENTE-CAMPO ET AL. 2009; RUSSELL & WEISKITTEL 2011). Dabei erfolgt die Reduktion in Abhängigkeit von der Kronenlänge und/oder des Bekronungsgrades. Für einige Baumarten erweisen sich weitere Parameter wie der BHD, der d/h-Quotient oder die Baumhöhe als geeignete Prädiktoren. GOUDIE ET AL. (2009) verwenden die Fläche von Voronoi Polygonen als potentielle Kronenschirmfläche. Die Größe der Polygone bildet anschließend die Basis zur Vorhersage der tatsächlichen Kronenschirmfläche.

3.2.2 Kronenlänge

In vertikaler Hinsicht erstreckt sich die Krone vom Kronenansatz bis zur Baumspitze (Kronenlänge). Oft werden auch relative Größen wie der Bekronungsgrad (oder

Kronenprozent), der als Verhältnis der Kronenlänge zur Baumhöhe definiert wird (KRAMER & AKÇA 2002), verwendet. Während die Lage der Baumspitze als höchster Punkt eines Baumes relativ eindeutig definiert ist, wurden insbesondere bei Koniferen verschiedene Definitionen der Kronenansatzhöhe vorgeschlagen. Teilweise wird eine zusammenhängende Krone betont, indem der Kronenansatz als Ansatzhöhe des untersten grünen Astes, der von weniger als zwei Totast-Quirlen von der lebenden Krone getrennt ist, definiert wird (z.B. LEDERMANN 2010). Andere Definitionen legen die Höhe des untersten Quirls, der eine bestimmte Mindestanzahl grüner Äste aufweist, als Kronenansatzhöhe fest (CANHAM ET AL. 1999; NIEDERSÄCHSISCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT 2005; FISH ET AL. 2006).

Grundsätzlich lassen sich drei Ansätze zur Modellierung des Bekronungsgrades (bzw. der Kronenlänge) unterscheiden: statische Modelle zur Vorhersage des Bekronungsgrades oder der Kronenlänge, ein dynamischer Ansatz zur Vorhersage der Veränderung dieser Größen und Modelle, die auf mechanistischen oder physiologischen Überlegungen beruhen (HASENAUER & MONSERUD 1996). Für die Datenergänzung bei gleichzeitiger Beschränkung möglicher Prädiktoren auf Einzelbaumgrößen und Bestandeswerte bieten sich statische Modelle auf der Basis allometrischer Beziehungen an.

Definitionsgemäß ist der Bekronungsgrad ein Anteil der Baumhöhe und ist damit zwischen null und eins beschränkt, sodass bei der Modellierung des Bekronungsgrades nach dem statischen Ansatz häufig generalisierte lineare Modelle mit entsprechenden Linkfunktionen verwendet werden (DUCEY 2009). Zahlreiche Autoren verwenden eine logistische Funktion (RITCHIE & HANN 1987; HASENAUER & MONSERUD 1996; DUCEY 2009 und andere dort zitierte Untersuchungen). Andere Studien verwenden weitere kumulative Verteilungsfunktionen wie exponentielle Funktionen, Richards- und Weibull-Funktionen, wobei letztere häufig Konvergenzprobleme haben (PETER & OLUWAFEMI 2008). Auch verschiedene nicht-lineare Funktionen wurden vorgeschlagen (SCHMIDT 2001; NAGEL ET AL. 2002; PRETZSCH ET AL. 2002; HANN & HANUS 2004).

Die stammaufwärts gerichtete Verschiebung des Kronenansatzes geschieht infolge von langfristiger Ausdunkelung der unteren Äste durch Selbstbeschattung sowie

Beschattung durch die Kronen benachbarter Bäume (PROTZ ET AL. 2000; RÖHRIG ET AL. 2006). Je größer der Konkurrenzdruck auf einen Baum bzw. je größer die Bestandesdichte desto höher der Kronenansatz und desto kürzer infolge dessen die Kronenlänge (z.B. HASENAUER & MONSERUD 1996; ROUVINEN & KUULUVAINEN 1997; KANTOLA & MÄKELÄ 2004; RÖHRIG ET AL. 2006; DAVIES & POMMERENING 2008). Auch an Verjüngungspflanzen werden mit zunehmender Lichtzufuhr längere Kronen beobachtet (WILLIAMS ET AL. 1999; PETRIȚAN ET AL. 2009).

Anders als beispielsweise der Durchmesserzuwachs reagiert die Kronenansatzhöhe träger auf die Konkurrenzsituation. Aufgrund der Bedeutung von langfristiger Konkurrenzsituation bzw. Bestandesdichte für die Kronenansatzhöhe verwenden viele statistische Modelle zur Vorhersage von Kronenlänge oder Bekronungsgrad den h/d -Wert des Einzelbaumes (oder dessen Reziprokwert) als erklärende Variable (DYER & BURKHART 1987; HASENAUER & MONSERUD 1996; NAGEL 1999; GUERICKE 2001; SCHMIDT 2001; NAGEL ET AL. 2002; PRETZSCH ET AL. 2002; HANN & HANUS 2004; TEMESGEN ET AL. 2005; FISH ET AL. 2006), da dieser ebenfalls auf die Bestandesdichte reagiert (ABETZ 1976; HASENAUER & MONSERUD 1996; RÖHRIG ET AL. 2006). Folgerichtig werden mit steigendem h/d -Wert geringere Bekronungsgrade beobachtet (z.B. HASENAUER & MONSERUD 1996). Es gibt jedoch auch Untersuchungen, in denen kein Einfluss des h/d -Wertes auf den Bekronungsgrad gefunden werden konnte (PETER & OLUWAFEMI 2008).

Der Bekronungsgrad verändert sich darüber hinaus mit dem Entwicklungsstadium eines Baumes im Laufe der Zeit. Während junge Bäume häufig Bekronungsgrade nahe eins aufweisen, liegen die Werte in älteren Beständen deutlich niedriger. Dies zeigt sich auch anhand unterschiedlicher Kronenlängen bei solitär erwachsenen Bäumen, für die Konkurrenz als Ursache ausgeschlossen werden kann (HASENAUER 1997). Dieser allgemeine Entwicklungstrend kann anhand des Alters (DYER & BURKHART 1987) oder mithilfe anderer Indikatoren für das Entwicklungsstadium wie der Spitzenhöhe oder der Baumhöhe beschrieben werden. So ergibt sich bei der Modellierung der Kronenlänge z.B. bei Hasenauer und Monserud (1996) ein Absinken des Bekronungsgrades mit zunehmender Baumhöhe oder übereinstimmend eine Zunahme der Kronenansatzhöhe mit der Baumhöhe (HANN & HANUS 2004). Auch die

3 Grundlagen

Berücksichtigung der Spitzenhöhe ergibt übereinstimmende Effekte, sodass der Bekronungsgrad mit steigender Spitzenhöhe abnimmt (HYNYNEN 1995; NAGEL ET AL. 2002).

Darüber hinaus wird in einigen Untersuchungen zusätzlich der BHD zur Erklärung der Kronenlänge herangezogen (HASENAUER & MONSERUD 1996; NAGEL ET AL. 2002; PRETZSCH ET AL. 2002). Dadurch kann ein Anstieg des Bekronungsgrades mit dem BHD innerhalb gleichaltriger Bestände gezeigt werden (NAGEL ET AL. 2002; vgl. SCHMIDT 2001).

Es gibt auch Hinweise auf Unterschiede in Mischbeständen. So ergaben Untersuchungen in Bayern, dass Buchen mit gleichem BHD und mit gleicher Bestandesdichte in Mischung mit Fichte längere Kronen aufwiesen als vergleichbare Bäume im Reinbestand (DIELER 2011).

Umfangreiche Untersuchungen in Österreich weisen darauf hin, dass die Kronenlänge über die genannten Einflussfaktoren hinaus von der aktuellen Konkurrenzsituation und Standortfaktoren wie der Höhenlage, der Hangneigung und Exposition abhängt (HASENAUER & MONSERUD 1996). Ähnliche Ergebnisse sind für die Bekronungsgrade mehrerer Baumarten in Kanada und den Pyrenäen bekannt (TEMESGEN ET AL. 2005; AMEZTEGUI ET AL. 2012). Nach der Untersuchung in Österreich steigt der Bekronungsgrad für Fichte, Tanne, Lärche und zwei Kiefernarten mit der Geländehöhe, während für Buche das Gegenteil zutrifft. An Südhängen steigt der Bekronungsgrad mit der Hangneigung, während die Kronenlängen an nördlich ausgerichteten Hängen mit der Hangneigung abnehmen. Dies kann direkt mit der Sonneneinstrahlung in Verbindung gebracht werden (HASENAUER & MONSERUD 1996).

Mithilfe derartiger statischer Modelle kann die Veränderung des Bekronungsgrades indirekt über die Differenz zweier Schätzungen unter Berücksichtigung der Veränderung bei den Eingangsgrößen geschehen. Dynamische Modelle zielen direkt auf die Vorhersage der Veränderung des Bekronungsgrades ab und benötigen Daten mit Wiederholungsmessung zur Parametrisierung. Beispiele solcher Modelle finden sich in der Literatur (MAGUIRE & HANN 1990; SHORT & BURKHART 1992; HASENAUER 1994; SPATHELF 2003; LEDERMANN 2010). Zur Parametrisierung dynamischer Modelle werden wiederholte Messungen benötigt wohingegen statische Modelle mit einzelnen

Messungen parametrisiert werden können. Es gibt Hinweise darauf, dass die Dynamik des Bekronungsgrades in mit den Ergebnissen dynamischer Modelle vergleichbarer Genauigkeit auf Basis eines statischen Modells mithilfe fortgeschriebener Eingangsgrößen geschätzt werden kann (LIU ET AL. 1995).

Die bisher vorgestellten Modelle ermöglichen jeweils die Schätzung einer Kronenansatzhöhe pro Baum. Unter stark asymmetrischen Konkurrenzverhältnissen treten jedoch Bäume auf, deren unterste grüne Äste in Richtung des Bestandes deutlich höher ansetzen als in Richtung des Weges oder der Freifläche (MUTH & BAZZAZ 2002). Um dies abbilden zu können werden Modelle benötigt, die die Konkurrenzsituation eines Baumes richtungsspezifisch unterscheiden.

3.3 Kronenmorphologie

Der Begriff „Kronenmorphologie“ umfasst Struktur und Form der Baumkrone. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Schwerpunkt auf die Form der Krone gelegt. Betrachtet werden insbesondere die horizontale Ausdehnung der Krone in verschiedene Richtungen.

Pflanzen sind durch ihre Verwurzelung im Boden ortsgebunden, können aber die Position ihrer Organe im Rahmen arttypischer Grenzen verändern. So kann die Kronenform und die Position der Krone relativ zum Stammfußpunkt zwischen den Individuen eines Bestandes sehr unterschiedlich sein. Die Entwicklung der Morphologie von Bäumen in Reaktion auf ihre Umweltbedingungen geschieht entweder durch Überleben und Wachstum einzelner Kronenteile in günstigen Positionen bzw. umgekehrt durch Absterben und Wachstumsausfall oder sogar einer Reduktion der Ausdehnung unter ungünstigen Bedingungen oder aber durch Neigung des ganzen Stammes (Phototropismus) (YOUNG & HUBBELL 1991; STOLL & SCHMID 1998; MUTH & BAZZAZ 2002; KAITANIEMI & LINTUNEN 2010). Über die Jahre bildet sich eine individuelle Krone aus, die sowohl die aktuellen als auch die Bedingungen in der Vergangenheit widerspiegelt (ROUVINEN & KUULUVAINEN 1997). Unabhängig von äußeren Einflüssen verändert sich auch die Reaktionsfähigkeit auf diese Einflüsse mit dem Alter. Die laterale Ausdehnung im Kronenraum nimmt mit zunehmendem Alter ab (MITSCHERLICH 1970; ROLOFF 2001), sodass angenommen werden kann, dass die Ausprägung der

individuellen Kronenform insbesondere durch die Bedingungen in jungen Jahren geprägt wird.

Die Form der Krone wird während ihrer Entwicklung von zahlreichen Faktoren beeinflusst (s.u.), die darüber hinaus in Wechselwirkung miteinander stehen (vgl. FRANCO 1986). Es wird vermutet, dass sich die tatsächliche Ausprägung der Krone infolge eines Ausgleichs zwischen verschiedenen Funktionen wie der Lichtinterzeption oder der mechanischen Stabilität ergeben (LONGUETAUD ET AL. 2008). Im Folgenden werden Faktoren beschrieben, die die Kronenfunktionen beeinflussen können.

3.3.1 Konkurrenz und Lücken

Im Vergleich zu konkurrenzfrei erwachsenen Bäumen haben Bäume in geschlossenen Beständen eine deutlich geringere Kronenausdehnung aber auch veränderte Kronenformen. Zahlreiche Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Kronenausdehnung in einer bestimmten Richtung in erster Linie durch die Konkurrenz in der direkten Umgebung der Krone bestimmt wird (MITSCHERLICH 1970; PETRI 1972).

So stellte Brisson (2001) fest, dass konkurrenzfrei erwachsene Zucker-Ahorne (*Acer saccharum* Marsh.) symmetrischere Kronenschirmflächen aufweisen als Bestandesbäume der gleichen Art. An Individuen am Bestandesrand wurden noch stärker asymmetrisch ausgeprägte Kronen gefunden. Die Richtung der Abweichung des Schwerpunktes der Kronenschirmfläche vom Stammfußpunkt zeigte einen deutlichen Zusammenhang mit der resultierenden Richtung der Konkurrenzeinwirkung aller Nachbarbäume auf den Bezugsbaum (BRISSON 2001). Ähnliche Ergebnisse lieferten Untersuchungen in einem Laubmischwald im Nationalpark Hainich (SEIDEL ET AL. 2011), in einem alten Buchenwald im Nationalpark Müritz (SCHRÖTER ET AL. 2012), an Korkeichen (*Quercus suber* L.) in Portugal (PAULO ET AL. 2002), in kühl-gemäßigten Hartholzwäldern in Japan (UMEKI 1995a), in einem Laubmischwald in Massachusetts (USA) (MUTH & BAZZAZ 2003) sowie an getopften einjährigen Pflanzen (*Kochia spec.*) (FRANCO 1986). Andere Untersuchungen stellen umgekehrt einen positiven Zusammenhang zwischen der Richtung der Kronenverlagerung und der Richtung von Bestandeslücken fest (YOUNG & HUBBELL 1991; MUTH & BAZZAZ 2002). Ein Versuch mit Lochhieben in einem Buchen-Edellaubholz-Mischbestand zeigt, dass sich die Kronen im Randbereich vorwiegend in Richtung der Lücke ausdehnen (GUERICKE 1999).

Auch gibt es Hinweise darauf, dass die Verlagerung des Kronenschwerpunktes und das Ausmaß der Korrelation zwischen der Richtung der Konkurrenzeinwirkung und der Richtung der Kronenschwerpunktverschiebung mit zunehmenden Asymmetriegrad des Konkurrenzdruckes steigt (BRISSON 2001; MUTH & BAZZAZ 2003; SCHRÖTER ET AL. 2012). Neben der Asymmetrie der Konkurrenz spielt auch die Stärke des Konkurrenzdruckes bzw. die soziale Stellung des Einzelbaumes eine Rolle. Mitscherlich (1970) beobachtete, dass gering mitherrschende und zwischenständige Bäume besonders asymmetrisch ausgeprägte Kronen aufweisen. Übereinstimmend fanden Muth und Bazzaz (2002) eine geringere Kronenverlagerung als Reaktion auf asymmetrische Lichtverhältnisse bei Bäumen, deren Kronen mindestens zur Hälfte schirmfrei waren im Vergleich zu stärker überschirmten Individuen. Bei Untersuchungen in Panama wurden symmetrischere Kronenformen an Bäumen gefunden, die mehr als einen Meter über alle Nachbarn in 10 m-Umkreis hinausragten als an niedrigeren Bäumen (YOUNG & HUBBELL 1991). Ähnliche Ergebnisse ergaben Untersuchungen in einem artenreichen subtropischen Wald in China (LANG ET AL. 2010).

Auch bei den Experimenten mit Topfpflanzen von Franco (1986) zeigte von zwei benachbarten Pflanzen die kleinere eine stärkere Asymmetrie.

Buchenbestände im Lahn-Dill-Bergland zeigten einen deutlichen Einfluss der Bestandesbehandlung auf die Kronenausformung. Annähernd runde Kronen wurden auf Nullflächen gefunden, in denen ein mehr oder weniger gleichmäßig hoher Konkurrenzdruck von allen Seiten zu erwarten ist. Auch die Schnellwuchsfläche mit im Vergleich zur üblichen Stammzahlhaltung deutlich reduzierten Stammzahlen und somit beinahe konkurrenzfrei erwachsenen Bäumen wies relativ symmetrische Kronenformen auf. Die Behandlungsvarianten zwischen diesen beiden Extremen zeigten stärker asymmetrisch ausgeprägte Kronen (GUERICKE 2001). Zahlreiche weitere Autoren erbrachten ähnliche Belege für die Abhängigkeit der Kronenausformung von den Konkurrenzverhältnissen (MITSCHERLICH 1970; PETRI 1972; ROUVINEN & KUULUVAINEN 1997; FRECH 2006).

Auf Bestandesebene implizieren die dargestellten Ergebnisse eine im Vergleich zur Verteilung der Stammfußpunkte regelmäßigerere Verteilung der Kronenschwerpunkte, die dadurch entsteht, dass die Kronen voneinander weg und auf Lücken zu wachsen.

Ein solcher Unterschied in der räumlichen Verteilung von Kronen in der Oberschicht wurde für verschiedene natürliche Mischwälder in Japan berichtet (ISHIZUKA 1984). Auch bei Untersuchungen an waldbaulich unbeeinflussten Buchen ergab eine regelmäßige Verteilung der Kronenschwerpunkte im Vergleich zu den Stammfußpunkten (SCHRÖTER ET AL. 2012). Allerdings wenden Getzin und Wiegand (2007) zu Recht ein, dass die beschriebene Regelmäßigkeit der Kronen sehr wohl auch ein so genannter Softcore-Effekt sein könnte. Dieser entsteht dadurch, dass große Kronen einen bestimmten Raum beanspruchen, der in der Regel die Anwesenheit einer zweiten großen Krone in geringem Abstand zur ersten verhindert, sodass das resultierende räumliche Muster auf geringer Skalenebene zunächst regelmäßig erscheint, in Wirklichkeit aber nur einen Effekt der Kronengröße darstellt. In vier Laubmischwald- bzw. Nadelmischwaldparzellen in Thüringen konnten Getzin und Wiegand (2007) jenseits einer geringen Skalenebene in der Größenordnung der Kronenradien keine Regelmäßigkeit in der Verteilung der Kronen feststellen. Sie fanden auch keine direkte Abhängigkeit der Ausprägung und Richtung der Kronenasymmetrie von der Entfernung der nächsten Nachbarbäume oder der Direktionalität/Intensität der Bündelung des Einflusses der nächsten Nachbarn. Auch in einem undurchforsteten Eichenbestand in Rheinland-Pfalz wurde bei Kronenschwerpunkten keine höhere Regelmäßigkeit festgestellt als an Stammfußpunkten (LONGUETAUD ET AL. 2008). Möglicherweise können Unterschiede zwischen den Baumarten zur Erklärung dieser scheinbar gegensätzlichen Ergebnisse beitragen. Darüber hinaus könnte insbesondere in dichten Beständen die mechanische Stabilität der Bäume eine Rolle spielen (3.3.6).

Es wird angenommen, dass Licht eine wichtige Ursache für den häufig gefundenen Zusammenhang zwischen der Kronenausformung des Einzelbaumes und seiner Position im Gefüge der Nachbarbäume ist. In Waldbeständen werden die Lichtverhältnisse, unter denen die Kronenbildung stattfindet, zu einem wesentlichen Teil direkt und indirekt durch die Interaktion mit umstehenden Bäumen derselben oder einer anderen Art bestimmt (ENDLER 1993). Es erscheint daher wahrscheinlich, dass die individuelle Kronenausprägung von derzeitiger und vergangener Konkurrenzsituation eines Baumes beeinflusst wird.

Beobachtungen zeigen, dass Bäume sehr unterschiedliche Kronenformen aufweisen können. Durch eine hohe Plastizität der Krone können negative Auswirkungen der Beschattung durch Nachbarn gemindert und die Ressourcenversorgung durch die Positionierung der Krone in günstigen Lichtbedingungen verbessert werden (BONSER & AARSEN 1994; STOLL & SCHMID 1998; MUTH & BAZZAZ 2002). So verbessert sich die Lichtzufuhr eines Baumes unter starkem Konkurrenzdruck aus einer bestimmten Richtung, wenn er eine einseitig ausgeprägte Krone in die entgegengesetzte Richtung aufweist. Ob diese Beobachtungen jedoch als aktive „Nahrungssuche“ (SUTHERLAND & STILLMAN 1988) in Analogie zu bekannten Verhaltensweisen aus der Tierwelt interpretiert werden können ist offen. Eine alternative Erklärung bietet die Hypothese der „branch autonomy“, wonach ein Kronenteil, der mehr Licht erhält, auch mehr Biomasse und damit ein größeres Wachstum erzeugen kann (STOLL & SCHMID 1998). Allerdings zeigen Ergebnisse von Henriksson (2001) an Birken, deren einzelne beschattete Äste signifikant höhere Überlebensraten aufwiesen, wenn der ganze Baum beschattet wurde gegenüber einer gezielten Beschattung des Astes, dass diese Hypothese nicht uneingeschränkt gilt.

Der Zusammenhang zwischen Licht und Kronenform zeigt sich besonders deutlich beim Wachstum und der Morphologie von Verjüngungspflanzen, die mit dem Lichtangebot variieren. Besonders bekannt ist dieser Effekt bei Buchensämlingen (*Fagus sylvatica* L.), die auf Beschirmung und geringes Lichtangebot mit plagiotropem Triebwachstum reagieren (z. B. ROLOFF 2001). In geringerem Ausmaß wurden zunehmende Winkel zwischen der Vertikalen und der Stammachse bei abnehmender Lichtintensität auch für Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und Ahorn (*Acer pseudoplatanus* L.) gefunden (PETRIȚAN ET AL. 2009). Alle drei untersuchten Arten wiesen unter zunehmender Lichtzufuhr signifikant längere und breitere Kronen auf (PETRIȚAN ET AL. 2009). Ähnliche Ergebnisse wurden auch bei jungen Bäumen anderer Arten beobachtet (O'CONNELL & KELTY 1994).

Allerdings dürfen Ergebnisse zur Kronenentwicklung aus Verjüngungsuntersuchungen nicht ohne weiteres auf ältere Bäume übertragen werden wie eine Studie aus einem tropischen Regenwald zeigt (STERCK & BONGERS 2001). Auch für die Kronen älterer Bäume wird jedoch eine Anpassung des Wachstums einzelner Äste und damit

im Laufe der Zeit eine Anpassung der Kronenmorphologie an die Lichtverhältnisse beschrieben. So ergaben Untersuchungen an Buchen und Fichten in Rein- und Mischbeständen, dass das richtungsspezifische seitliche Wachstum der Krone mit zunehmender Annäherung an eine Nachbarkrone abnimmt und dass diese Abnahme von der Artzugehörigkeit des Nachbarbaumes abhängt (PRETZSCH 1992a). Auch Mitchell (1975) stellt an Weiß-Fichten (*Picea glauca* (Moench) Voss) in Kanada ein nachlassendes Längenwachstum der Seitenäste bei zunehmender Annäherung an Nachbarkronen fest. Für das Längenwachstum von Seitentrieben in den Kronen von Buchen sowie drei weiteren Laubbaumarten konnte Frech (2006) einen Zusammenhang mit der Lichtintensität herstellen, ein Einstellen des Wachstums noch vor Kronenberührung konnte aber nicht gefunden werden.

Brisson (2001) fand Hinweise darauf, dass das laterale Kronenwachstum in Bäumen unter stark asymmetrischen Lichtverhältnissen zugunsten stärker belichteter Kronenteile verlagert werden könnte, wobei beschattete Kronenteile geringere Zuwächse leisten als vergleichbare Äste in allseits beschatteten Kronen. Umgekehrt reagieren Kronen auf angrenzende Kronendachlücken mit erhöhtem lateralem Kronenradienzuwachs (RUNKLE & YETTER 1987).

Andere Autoren konnten zeigen, dass gegenseitige mechanische Beeinträchtigung die Kronenformen prägt (MENG ET AL. 2006). Im Kronendach von Beständen werden bei Windstille häufig unüberschirmte schmale Zwischenräume zwischen den Kronen beobachtet. Dieses Phänomen wird als „Kronenscheu“ („crown shyness“) bezeichnet (PUTZ ET AL. 1984) und ist insbesondere für Drehkiefer (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud.) gut dokumentiert. Die Hauptursache scheinen mechanisch verursachte Verluste von Knospen und Kronenteilen durch gegenseitiges Aneinanderschlagen der Kronen bei Windbewegungen zu sein (PUTZ ET AL. 1984; ROLOFF 2001; RUDNICKI ET AL. 2001; FISH ET AL. 2006; MENG ET AL. 2006). Dafür sprechen auch Ergebnisse aus Untersuchungen der Seitentriebe im Kronenraum eines Buchen-Edellaubholz-Mischbestandes im Nationalpark Hainich. Hier wurden an über der Hälfte der Triebe aller untersuchten Baumarten teilweise mehrere Unterbrechungen in der Triebachse festgestellt (FRECH 2006). Kronenscheu tritt erst mit zunehmender Bestandeshöhe auf (MITSCHERLICH 1970; RUDNICKI ET AL. 2004). Smith und Long (2001) bringen den Beginn

dieser Entwicklung in Zusammenhang mit der Zeit der höchsten Bestandesblattfläche und der Kulmination des Zuwachses. Die Breite der Zwischenräume zwischen den Kronen verändert sich also im Laufe der Bestandesentwicklung. Auch das Höhe-Durchmesser-Verhältnis und die Bestandesdichte könnten eine Rolle spielen (GOUDIE ET AL. 2009; WEBB ET AL. 2013). Je schlanker die Bäume sind, desto größer ist die Verlagerung der Kronen unter Windeinwirkung (RUDNICKI ET AL. 2003). So wurde für Bestände über einer Höhe von 15 m ein positiver Zusammenhang zwischen dem Anteil unüberschirmter Bestandesfläche und dem Schlankheitsgrad der Bäume gefunden (RUDNICKI ET AL. 2004).

Solche Kronenzwischenräume werden allerdings nicht überall beobachtet. Gerade in einheimischen Laub- und Mischwäldern greifen die Kronen häufig ineinander (PRETZSCH 1992a; GUERICKE 2001; FRECH ET AL. 2003). Möglicherweise spielt hier die Beteiligung verschiedener Arten eine Rolle. So konnte gezeigt werden, dass Eschen (*Fraxinus excelsior* L.), Winterlinden (*Tilia cordata* Mill.) und Hainbuchen (*Carpinus betulus* L.) von ähnlicher Baumhöhe in einem artenreichen Laubmischwald ihre maximalen Kronenausdehnungen in verschiedenen Höhen erreichen (FRECH ET AL. 2003). Durch die Besetzung verschiedener Höhengschichten verringern sich zwar die direkten Kontaktzonen, dennoch wurden je nach beteiligten Baumarten verschieden große Überlappungsbereiche bzw. unbesetzte Zwischenräume im Kronenraum gefunden. So besetzten Eschen und Hainbuchen sehr unterschiedliche Höhengschichten und weisen folglich auch große gemeinsam überschirmte Bereiche auf. Als Ursache werden neben der Besetzung unterschiedlicher Höhengschichten artspezifische Charakteristika der Endtriebe vermutet (FRECH 2006). So besitzt die Linde beispielsweise relativ dünne, flexible Triebe, die bei Kollisionen möglicherweise weniger starke Schäden verursachen als die vergleichsweise dicken, starren Endtriebe der Esche, die andere Zweige stärker beschädigen können, aber auch selbst leicht brechen (FRECH 2006).

Es gibt Hinweise, dass auch die Artzugehörigkeit von Nachbarn durch zwischenartliche Unterschiede bezüglich Wachstum, Nutzung von Ressourcen, Kronenprofilen, der Art der Lichtinterzeption und der Fähigkeit zu mechanischer Störung einen Einfluss auf die richtungsspezifische Kronenausdehnung hat (KAITANIEMI & LINTUNEN

2010). Bei Untersuchungen im Nationalpark Hainich ergab sich eine signifikant größere Kronenausdehnung der untersuchten Winterlinden in Richtung benachbarter Eschen als in Richtung benachbarter Hainbuchen oder artgleicher Nachbarn. Auch die Ausdehnung einer Hainbuchen-Krone war signifikant größer in Richtung eines artfremden als in Richtung eines artgleichen Nachbarn (FRECH ET AL. 2003). Übereinstimmend wurden an Buchen und Fichten größere Überlappungsbereiche der Kronen von Buchen und Fichten gefunden als bei gleichartigen Paaren (PRETZSCH 1992a). Ähnliche Ergebnisse liegen von Untersuchungen an Japanischen Kastanien (*Castanea crenata* Siebold & ZUCC.) vor (SUMIDA ET AL. 2002).

3.3.2 Hangneigung

Neben dem direkten Einfluss von Nachbarbäumen auf die richtungsspezifische Kronenausdehnung und die Form der Kronen gibt es Beobachtungen, dass dieser Einfluss in Zusammenhang zur Hangneigung stehen kann. Mitscherlich (1970) beschreibt für Bestände am Hang eine allgemeine Tendenz zur Verlagerung der Kronenschwerpunkte nach der Talseite und erklärt dies mit der neigungsbedingten Veränderung der Licht- und Konkurrenzverhältnisse: Bergseitige Nachbarn üben wegen ihres erhöhten Standes einen stärkeren Seitendruck aus als Nachbarn in der Ebene oder sogar auf der Talseite, sodass die Kronen sich vorwiegend zur Talseite hin entwickeln.

Diese Beobachtungen lassen sich durch neuere Untersuchungen belegen. Bei Kronenuntersuchungen in Buchen-Douglasien-Mischbeständen im Solling (Niedersachsen) wurde eine stärkere ost-südöstliche Verlagerung der Kronenschwerpunkte von Buchen an einem ebenso ausgerichteten Hang (Hangneigung 30-40%) gefunden als auf ebenem Standort (VORREYER 1997). Untersuchungen an für mehrere Jahrzehnte nicht durchforsteten Beständen in Thüringen, ergaben für drei der vier Untersuchungsbestände einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Richtung der Verschiebung des Kronenschwerpunktes mit der Richtung der Hangneigung (14-40% in Richtung West bis Nord-Nordwest). Ein Zusammenhang mit der Richtung der Sonneneinstrahlung konnte nicht nachgewiesen werden (GETZIN & WIEGAND 2007). Auch bei Untersuchungen an Buchen im Nationalpark Müritz wurde ein Zusammenhang zwischen der Richtung der Hangneigung und der Kronenverlagerung gefunden,

dessen Bedeutung allerdings deutlich hinter der der Konkurrenzverhältnisse zurück blieb (SCHRÖTER ET AL. 2012). Auch Ergebnisse aus einem kühl-temperierten und einem warm-temperierten immergrünen Laubmischbestand in Japan (UMEKI 1995a) und an vier japanischen Reinbeständen mit unterschiedlichen Baumarten in nördlich bis nordwestlich exponierter Lage (MATSUZAKI ET AL. 2006) sowie aus einem Untersuchungsgebiet im kühl-temperierten Regenwald in Tasmanien (OLESEN 2001) bestätigen neben anderen Einflussgrößen den Zusammenhang zwischen der Richtung der Verlagerung des Kronenschwerpunktes und der Richtung der Hangneigung. Untersuchungen in einem artenreichen subtropischen Wald in China zeigen einen Zusammenhang der Hangneigung mit der Kronenverlagerung: je steiler der Hang, desto größer war die Distanz zwischen Stammfußpunkten und Kronenschwerpunkten (LANG ET AL. 2010).

Dieser Zusammenhang konnte allerdings nicht in allen Untersuchungen belegt werden. So ergaben Untersuchungen in einem Laubmischbestand in Massachusetts (USA) keine Übereinstimmung zwischen der Richtung der Kronenverlagerung und der Hangneigung. Allerdings ist der Hang des Untersuchungsbestandes nach Norden ausgerichtet und die Autoren vermuten deutlichere Lichtgradienten an südlich ausgerichteten Hängen oder bei stärkerer Hangneigung (MUTH & BAZZAZ 2003).

3.3.3 Richtung der Sonneneinstrahlung

In Bezug auf einen möglichen Zusammenhang zwischen der Richtung bevorzugten Kronenwachstums und der Richtung der Hauptsonneneinstrahlung ergibt sich ein uneinheitliches Bild: Im Rahmen von Untersuchungen an Buchen- und Eichensolitären in Bayern wurde eine überwiegend ovale Form der Kronenschirmfläche beobachtet, deren größte Ausdehnung in Richtung Süden zu verzeichnen war (UHL ET AL. 2006).

An solitär erwachsenen Zucker-Ahornen in Kanada konnten die auftretenden Verlagerungen des Kronenschwerpunktes von einer Position direkt über dem Stammfußpunkt keiner eindeutigen Richtung zugeordnet werden (BRISSON 2001).

An Bestandesbäumen ergeben sich ebenso differenzierte Ergebnisse: Bei Kronenuntersuchungen an überwiegend ebenen und in westliche Richtungen (WSW bis

NW) exponierten Buchen-Lärchen-Mischbeständen im Solling (Niedersachsen) beobachtet Guericke (2001) für Buchen im Oberstand eine verstärkte Ausdehnung der Kronen in südlicher bis westlicher Richtung, während umgekehrt die Ausdehnung in nordöstlicher bis östlicher Richtung besonders gering ausfällt. Auch für die ebenfalls untersuchten Lärchenkronen ergibt sich eine stärkere Ausdehnung in südlicher bis südwestlicher Richtung, während die Kronen in Richtung Norden bis Osten geringer ausgeprägt sind (GUERICKE 2001). Dagegen ergeben andere Untersuchungen an Buchen in derselben Region eine größere Kronenausdehnung in östlicher bis südöstlicher Richtung, was jedoch auf die exponierte Lage und den Faktor Wind zurückgeführt wird (VORREYER 1997). Auch bei Untersuchungen in je zwei über mehrere Jahrzehnte undurchforsteten in westliche Richtungen (14-40% in Richtung WSW bis NW) exponierten Laubmisch- und Nadelbaumbeständen in Thüringen sowie an Eschen, Winterlinden und Hainbuchen in einem ebenen Laubmischwald im Nationalpark Hainich (Thüringen) konnte keine signifikante Verschiebung der Kronenschwerpunkte in Richtung der Sonneneinstrahlung festgestellt werden (GETZIN & WIEGAND 2007; FRECH ET AL. 2003). Die beiden Untersuchungen in Thüringen fanden jeweils an Beständen statt, die längere Zeit ohne Eingriffe geblieben waren, während die Ergebnisse aus Niedersachsen aus regelmäßig durchforsteten Beständen stammen. Ein Einfluss der Bestandesbehandlung auf die Kronenform ist daher anzunehmen, wobei ein richtungsspezifischer Effekt auf die Kronenform jedoch unwahrscheinlich erscheint.

Es wurde vorgeschlagen, dass die Form von Kronen in nördlichen Breiten plastisch auf die dort vorherrschende asymmetrische Geometrie der Sonneneinstrahlung reagiert (ILVESSALO 1967 zitiert nach ROUVINEN & KUULUVAINEN 1997). Diese Hypothese erklärt jedoch nicht die unterschiedlichen Ergebnisse der genannten Untersuchungen an Bestandesbäumen, die sich in Bezug auf die geografische Breite im engen Rahmen zwischen 50° und 52° nördlicher Breite bewegen. Darüber hinaus ergaben Untersuchungen in höheren Breiten (Finnland) eine größere Kronenausdehnung in südlicher bis westlicher Richtung in undurchforsteten Kiefernbeständen (ROUVINEN & KUULUVAINEN 1997) und an Fichten und Kiefern eine Betonung der südlich ausgerichteten Kronenteile (RAUTIAINEN ET AL. 2008). Aber auch in geringerer nördlicher Breite (ca. 39° N) wurde an relativ freistehenden Korkeichen (*Quercus suber* L.) eine

größere Ausdehnung der Krone in südlicher Richtung im Vergleich zu den übrigen Himmelsrichtungen beobachtet (PAULO ET AL. 2002).

3.3.4 Artspezifische Unterschiede

Neben der direkten Auswirkung äußerer Einflüsse, die durch die lokalen Konkurrenzverhältnisse, die Richtung der Sonneneinstrahlung oder die Hangneigung entstehen, hängt die ausgebildete Kronenform auch von der Reaktion des Einzelbaumes auf diese Einflüsse ab. Diese unterscheidet sich zwischen verschiedenen Baumarten (RUNKLE & YETTER 1987; MUTH & BAZZAZ 2002).

Häufig werden grundsätzliche Unterschiede zwischen Laub- und Nadelbäumen beschrieben: Laubbäume reagieren stärker auf unterschiedliche Beleuchtung als Nadelbäume und bilden daher stärker an die individuellen Bedingungen angepasste Kronenformen aus (MITSCHERLICH 1970). Dies wird durch Untersuchungen an je zwei Laub- und Nadelmischbeständen in Thüringen bestätigt, für die an Laubbäumen im Mittel eine signifikant größere horizontale Abweichung des Kronenschwerpunktes vom Stammfußpunkt gefunden wurde als für Nadelbäume (GETZIN & WIEGAND 2007). Auch bei Kronenuntersuchungen an einem artenreichen Bestand in Massachusetts (USA) zeigten die Nadelbaumarten geringe Kronenverlagerungen im Vergleich zu den untersuchten Laubbaumarten (MUTH & BAZZAZ 2002). Ähnliche Ergebnisse sind aus dem Norden Japans für Fichten und Birken bekannt (UMEKI 1995b). Dennoch wurden auch für Kiefern in Finnland deutliche Kronenverschiebungen gefunden (ROUVINEN & KUULUVAINEN 1997). Zur Begründung der weniger großen Plastizität von Nadelbäumen im Vergleich zu Laubbäumen wurde die Hypothese vertreten, dass Nadelbaumarten in Regionen dominieren, in denen sie weniger Konkurrenten und häufigeren Feuern ausgesetzt sind. Beides führt zu homogeneren Lichtintensitäten rund um die Krone und macht eine asymmetrische Kronenentwicklung weniger notwendig als bei Laubholzkronen (WALLER 1986 zitiert nach GETZIN & WIEGAND 2007).

Des Weiteren wird die Reaktionsfähigkeit auf asymmetrische Lichtverhältnisse mit der Schattentoleranz der Baumarten bzw. mit der Einordnung als Pionier- bzw. Klimaxbaumart in Verbindung gebracht. Ergebnisse aus der Untersuchung eines artenreichen Bestandes in Massachusetts (USA) deuten auf vergleichsweise große Kronenverschiebungen bei Lichtbaumarten im Vergleich zu Schattbaumarten hin (MUTH &

BAZZAZ 2002). Als Gegenbeispiel kann jedoch die Baumart Buche dienen, deren hohe Plastizität bei der Kronenausformung seit langem bekannt ist (BADOUX 1939; GUERICKE 1999; SCHRÖTER ET AL. 2012) und die auf diese Weise in der Lage ist gegenüber dem Stammfußpunkt verschobene Lücken zu erschließen (KATO & MÜLDER 1998). Die Ergebnisse der genannten Untersuchungen deuten darauf hin, dass es Unterschiede sowohl zwischen Laub- und Nadelbaumarten als auch zwischen Baumarten innerhalb dieser Gruppen gibt. In Bezug auf einen generellen Unterschied zwischen Licht- und Schattbaumarten sind die Ergebnisse uneindeutig. Darüber hinaus sind auch innerhalb derselben Art genetisch bedingte Unterschiede zu erwarten (z.B. AICHMÜLLER 1962; RICHTER 1999; LIESEBACH 2012).

3.3.5 Wind

In exponierten Lagen kann der Wind einen Einfluss auf die Form der Baumkronen ausüben. Bei Untersuchungen in Buchen-Douglasien-Mischbeständen im Solling, in denen die Douglasie aufgrund ihrer Vorwüchsigkeit über das Kronendach der Buchen hinausragt, wurde eine Verlagerung ihrer Kronenschwerpunkte in östliche Richtungen beobachtet, die mit der vorherrschenden westlichen Windrichtung in Zusammenhang gebracht wird (VORREYER 1997). Auch für Japanlärchen wurde ein Zusammenhang zwischen der Kronenausformung und der vorherrschenden Windrichtung gefunden. So zeigten Bestände in windexponierter Lage stärkere Kronenausprägungen in nördlicher bis südöstlicher Richtung, während die Bäume eines nicht windexponierten Mischbestandes eine stärkere Kronenausdehnung in süd- bis südwestliche Richtung aufwiesen (GUERICKE 2001).

3.3.6 Grenzen horizontaler Asymmetrie

Viele Untersuchungen betonen die Bedeutung der Kronenmorphologie für die Lichtaufnahme und ihren Einfluss auf die Photosyntheseleistung der Individuen (BONSER & AARSSSEN 1994; STOLL & SCHMID 1998; MUTH & BAZZAZ 2002). Über ihre Funktion als Organ zur Lichtrezeption hinaus haben Kronen noch weitere Funktionen und unterliegen verschiedenen Beschränkungen, die ihre Form und Anordnung bestimmen. Dazu zählen biomechanische (Stabilität, Wind), hydraulische und entwicklungs-

bedingte Beschränkungen sowie die Funktion in Bezug auf Konkurrenzfähigkeit und Reproduktion (PEARCY ET AL. 2005).

In symmetrischen Nachbarschaftsverhältnissen mit Konkurrenzdruck von allen Seiten bringt eine Kronenverlagerung keinen Vorteil. Aber unter asymmetrischen Konkurrenzverhältnissen, die durch die räumliche Anordnung von Nachbarbäumen, die Hangneigung oder den Winkel der Sonneneinstrahlung entstehen können, erscheint die Ausbildung angepasster horizontal asymmetrischer Kronenformen im Hinblick auf die Lichtzufuhr sinnvoll. Unter diesen Bedingungen kann die Verlagerung der Krone zu einer Verringerung des Konkurrenzdruckes und einer Verbesserung der Ressourcenverfügbarkeit (MUTH & BAZZAZ 2003) und somit zu Vorteilen gegenüber weniger plastischen Bäumen führen (VINCENT & HARJA 2008). Aber die Kronenverlagerung sowie die Plastizität der Krone insgesamt birgt auch Risiken und erfordert den Einsatz von Ressourcen. Sie erhöht möglicherweise die mechanische Instabilität und das Risiko von Astbruch sowie Windbruch oder -wurf (YOUNG & HUBBELL 1991; YOUNG & PERKOCHA 1994). Bei Untersuchungen in einem tropischen Laubwald in Panama zeigte sich, dass Bäume mit stärker asymmetrischer Krone eine erhöhte Ausfall-Wahrscheinlichkeit besaßen (YOUNG & PERKOCHA 1994). Rudnicki und Kollegen (2003) vermuten für einen dichten Küsten-Kiefern-Bestand (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud.) mit sehr schlanken Bäumen, die starke Windbewegungen der Krone zur Folge haben, einen Mechanismus gegenseitiger Stabilisierung im Kronenbereich. Stark asymmetrisch ausgebildete Kronen würden die Stabilität verringern. Weitere negative Auswirkungen plastischer Kronenausformung, die diese begrenzen können, finden sich bei Valladares und Kollegen (2007).

3.4 Kronenformmodelle

Kronenformmodelle dienen der vereinfachten räumlichen Repräsentation der Baumkrone. Zahlreiche Ansätze wurden vorgeschlagen. Sie unterscheiden sich je nach Ziel der Untersuchung und im Hinblick auf das Abstraktionsniveau sowie in Bezug auf die Anforderungen an die Daten, die zur Parametrisierung benötigt werden.

Die Art der Repräsentation von Baumkronen in der Literatur kann grob in zwei Klassen unterteilt werden: Architekturmodelle, die die Krone als System untergeord-

nerer Struktureinheiten wie Ästen, Zweigen, Blättern beschreiben und allgemeinere Modelle, die sich darauf beschränken, die Form der Krone als vereinfachende umhüllende Form darzustellen.

Architekturmodelle beschreiben die Morphologie über die Anzahl, Ausrichtung und räumliche Anordnung der Untereinheiten eines Individuums (z.B. SORRENSEN-COTHERN ET AL. 1993). Diese Art von Modellen erfordert neben Angaben auf Individuen-Ebene auch detaillierte Daten beispielsweise über die Verzweigungsstruktur des Einzelbaumes. Zusätzlich ergibt sich ein hoher Rechenaufwand, sodass die Simulation ganzer Bestände oder Gebiete sehr zeit- und rechenintensiv wird.

Die zweite Klasse von Kronenformmodellen beschreibt die umhüllende Form der Krone und umfasst die Anwendung von Kronenprofil-Funktionen, die die Kronenrandpunkte in Abhängigkeit von der Höhe innerhalb der Kronen beschreiben (DUBRASICH ET AL. 1997; z.B. SONG ET AL. 1997; HANN 1999; GROTE 2003; MARSHALL ET AL. 2003; CRECENTE-CAMPO ET AL. 2009) oder einfacher mittels verschiedener, teilweise zusammengesetzter geometrischer Körper (VAN PELT & NORTH 1996). Dazu gehört die Darstellung der Krone durch einfache Zylinder (PACALA ET AL. 1996; CANHAM ET AL. 1999) oder Ellipsoide (WEST & WELLS 1992). Zusammengesetzte Körper bestehen beispielsweise aus einem Kegelstumpf (unten) und einem Kegel oder Paraboloid im oberen Teil der Krone (PRETZSCH 1992b).

Viele der genannten Ansätze zur Repräsentation der Kronen mittels Beschreibung der umhüllenden Form unterscheiden einen oberen von einem unteren Kronenteil (z.B. PRETZSCH 1992b; BRUNNER 1998; HANN 1999; MARSHALL ET AL. 2003; CRECENTE-CAMPO ET AL. 2009). Diese Unterteilung in Licht- und Schattenkrone geht zurück auf Untersuchungen zur Kronenmorphologie von Burger (1939b) an Fichten und Badoux (1939) an Buchen und unterteilt die Kronen in Höhe ihrer größten lateralen Ausdehnung. Diese kann in Abhängigkeit von Baumhöhe und Kronenansatzhöhe geschätzt werden (CRECENTE-CAMPO ET AL. 2009). Auch andere Arbeiten, die die Höhe der maximalen lateralen Ausdehnung beschreiben, geben diese artspezifisch in Abhängigkeit von Baumhöhe und Kronenansatzhöhe an (PRETZSCH 1992b; GUERICKE 2001).

In der Regel basieren die Kronenrepräsentationen auf der Annahme gleicher Kronenausdehnung in alle Richtungen, sodass die resultierenden Modellkronen symme-

trisch zur Stammachse sind. Um die asymmetrische Ausprägung vieler Kronen flexibler beschreiben zu können werden die Modellkörper gelegentlich in vier oder acht Sektoren zerlegt, die jeweils unterschiedliche Radien besitzen können (PRETZSCH 1992a; CESCATTI 1997; BRUNNER 1998; GROTE 2003; GROTE & REITER 2004).

Während isotrope Kronenformmodelle zur Parametrisierung Angaben zu Breite und Länge sowie teilweise der Höhe der Grenze zwischen Licht- und Schattenkrone benötigen, werden für flexiblere potentielle asymmetrische Kronenformen detailliertere Daten in Bezug auf die horizontale Ausdehnung der Krone benötigt. Daher wurden Algorithmen vorgeschlagen, die die Rekonstruktion dieser Daten aus einfacher messbaren Größen ermöglichen sollen: Mitchell (1975) definiert die potentielle Krone über eine gewichtete dreidimensionale Tessellation. Die resultierenden Kronen sind dabei durch den Anteil der potentiellen Kronen gegeben, der höher ist als die potentiellen Kronen aller anderen Bäume. Piboule und Kollegen (2005) entwickeln unter der Annahme einer Kronenprofil-Funktion ein Verfahren, das jedem Baum der Größe (BHD) nach durch schrittweise Expansion von je 32 Radien eine Krone zuordnet, die sich im Raum möglichst wenig mit bereits vorhandenen Nachbarkronen überschneidet. Eine ähnliche Methode beschreibt Grote (2003), der vier Radien verwendet, deren Länge hauptsächlich durch die Anwesenheit von Nachbarbäumen beschränkt wird. Andere beschreiben die Struktur des Kronendaches unter der Annahme vollständiger Plastizität und lückenloser Überschirmung räumlich implizit auf Bestandesebene und leiten daraus z.B. den unüberschirmten Teil einzelner Kronen ab (PURVES ET AL. 2007; STRIGUL ET AL. 2008). Ein weiterer Ansatz bildet die Verlagerung des Kronenschwerpunktes von der Position direkt über dem Stammfußpunkt eines Baumes in Abhängigkeit vom Grad der Asymmetrie der Konkurrenzeinwirkung (UMEKI 1995a).

4 Datengrundlage

Für die Entwicklung der Kronenmodelle sowie die Untersuchung ihres Einflusses auf den Zuwachs von Einzelbäumen stehen Messwerte zahlreicher Parzellen von ertragskundlichen Versuchen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) zur Verfügung. Die Flächen verteilen sich über den Nordwesten Deutschlands und liegen in den Bundesländern Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Hessen, Rheinland-Pfalz und Saarland (Abbildung 1).

Das Kollektiv umfasst Rein- und Mischbestände verschiedener Baumarten von Jungbeständen bis zu über 200jährigen Altholz-Parzellen, die in den Jahren zwischen 1966 und 2010 in der Regel mehrfach untersucht wurden. Die Bestandesbehandlung erfolgt nach sehr unterschiedlichen Konzepten und reicht von Nullflächen ohne Eingriffe über Hoch-, Nieder-, Struktur- oder Auslesedurchforstungen unterschiedlicher Stärke bis hin zu extremer Freistellung. Grundsätzlich ausgeschlossen wurden dagegen Provenienzversuche und Versuche, in denen Düngung eine Rolle spielt.

Im Hinblick auf die Standortverhältnisse decken die ausgewählten Versuchsflächen ein breites Spektrum ökologischer Bedingungen ab. Die Charakterisierung des Wasserhaushalts reicht von trocken bis grundfeucht und die Nährstoffversorgung umfasst das ganze Spektrum von ziemlich armen bis zu reichen Verhältnissen nach dem bundesweiten Schlüssel zur Kennzeichnung des Wasserhaushalts und der Nährstoffversorgung im

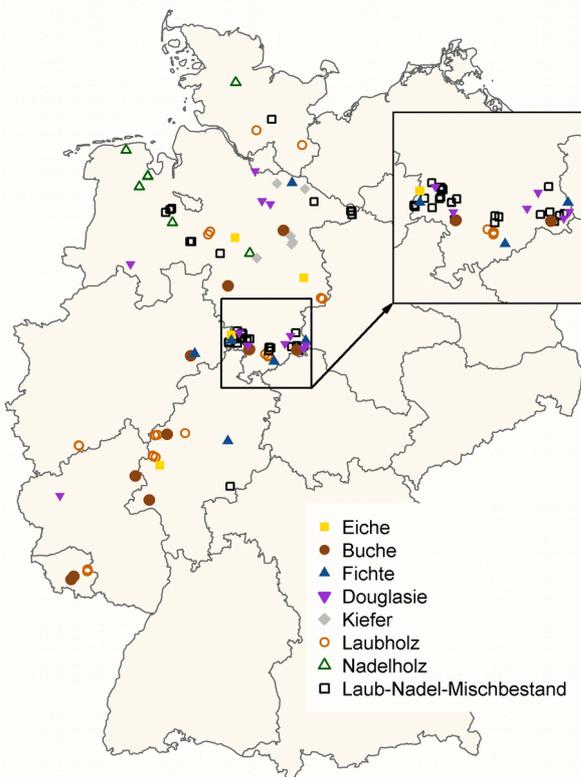


Abbildung 1: Geografische Lage der verwendeten Versuchsflächen in Nordwestdeutschland nach Baumarten bzw. Baumartengruppen

Rahmen der forstlichen Standortaufnahme (WOLFF ET AL. 1998). Die klimatischen Bedingungen werden durch Jahresmitteltemperaturen zwischen 6 und 9,5 °C charakterisiert. Die mittleren Jahresniederschläge schwanken zwischen 500 und über 1100 mm.

Daneben konnten für Teilbereiche dieser Arbeit zusätzlich Messwerte aus der Betriebsinventur der Niedersächsischen Landesforsten verwendet werden (4.2).

4.1 Datenerhebung

Die Versuchspartzen werden in Intervallen von einigen (meist fünf) Jahren aufgenommen. Dabei wird in der Regel der BHD (Brusthöhendurchmesser, gemessen in 1,3 m Höhe) aller Bäume sowie die Baum- und Kronenansatzhöhe (h bzw. ka) jeweils eines Teilkollektivs erhoben. Die Kronenansatzhöhe wird als Ansatzhöhe der Primärkrone verstanden. Bei Laubholz ist das die Höhe des untersten lebenden Primärastes, bei Nadelholz ist dies die Höhe des untersten Astquirls mit mindestens drei grünen Ästen. Zur Messung wurden verschiedene technische Hilfsmittel verwendet (NIEDERSÄCHSISCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT 2005). Diese Definition des Kronenansatzes hat zur Folge, dass sich der Kronenansatz nur stammaufwärts, in der Regel jedoch nicht stammabwärts – wie es beispielsweise durch die Bildung von Wasserreisern denkbar wäre – bewegen kann.

Auf einem Teil der Flächen wurden Kronenablotungen im festen Winkelsystem in acht Kardinalrichtungen zur Erfassung der horizontalen Kronenausdehnung durchgeführt. In jeder der Richtungen wurde mithilfe eines Kronenspiegels die Vertikalprojektion des Kronenrandpunktes auf den Boden ermittelt und anschließend dessen Entfernung zur Mitte des Stammes mithilfe eines Ultraschall-Entfernungsmessers bestimmt (vgl. GUERICKE 1999). Bei Abweichung des Kronenmittelpunktes (Schwerpunkt der Projektionsfläche) um mehr als 1 m von der Position oberhalb des Stammfußpunktes erfolgt die Messung ausgehend vom einer Position unterhalb des (gutachterlich geschätzten) Kronenmittelpunktes.

Wiederum für ein Teilkollektiv der abgeloteten Flächen liegen Messungen der Höhe der maximalen Kronenbreite (h_{maxkb}) vor. Dazu wurde gutachterlich jeweils die hori-

zontale Schnittebene in Höhe der breitesten Stelle ermittelt der Krone und deren Höhe gemessen.

Für einen Teil der Flächen wurden die Koordinaten der Stammfußpunkte eingemessen (Stammverteilungsplan). Die Aufnahmen erfolgten im Lauf der Jahre mithilfe unterschiedlicher Verfahren. Eine Beschreibung der Verfahren sowie Einzelheiten zur Aufnahme der übrigen Parameter finden sich in der Anweisung zur Aufnahme ertragskundlicher Versuchsflächen (NIEDERSÄCHSISCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT 2005).

Neben den einzelbaumbezogenen Messwerten liegen parzellenbezogene Metainformationen wie die Geländehöhe in m über NHN (*hnn*) vor. Auch Bestandeswerte wie *d100* (BHD des Grundflächenmittelstammes der 100 stärksten Bäume pro Hektar) und die Spitzenhöhe (*h100*, Höhe des Grundflächenmittelstammes der 100 stärksten Bäume pro Hektar) des Bestandes und der Baumart sowie die absolute Höhenbonität (*si*) nach Nagel (1999) wurden berechnet. Alle Parzellen und Inventurpunkte sind im Gauß-Krüger-Koordinatensystem (3. Meridianstreifen) verortet.

4.2 Datengrundlage: Kronenlänge

Aus Versuchsflächendaten stehen knapp 250 000 gemessene Kronenansatzhöhen der sechs Baumarten(-gruppen) Eichen (Stiel- und Traubeneiche), Buche, Fichte, Douglasie, Kiefer und Lärche von 2394 Versuchspartellen zur Verfügung. Darüber hinaus konnten weitere rund 84 000 Messungen aus der Betriebsinventur in Niedersachsen verwendet werden. Insgesamt können so 330 401 gemessene Kronenansatzhöhen zur Entwicklung und Parametrisierung des Kronenansatzmodells eingesetzt werden.

Darunter sind 37 375 Eichen mit gemessenen Kronenansatzhöhen zwischen 0,3 und 32 m (Abbildung 2). Das BHD-Spektrum reicht von 0,5 bis 160,8 cm. Im Mittel liegt der BHD bei 32,1 cm. Die Höhe der Bäume reicht von 1,3 bis 45,7 m und das Alter variiert zwischen 9 und 250 Jahren, einzelne Bäume sind bis zu etwa 500 Jahre alt. Die Höhenlage reicht vom Tiefland bis in Höhen von 583 m über NHN.

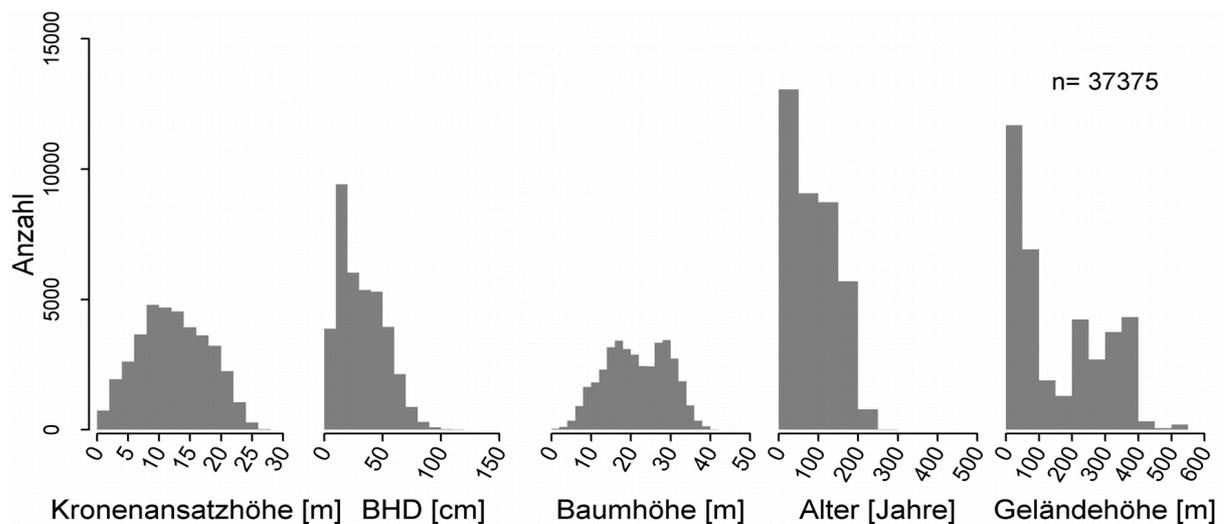


Abbildung 2: Verteilung wichtiger Kenngrößen für die Baumart Eiche

Auf die Baumart Buche entfallen 75 501 Messwerte mit Kronenansatzhöhen zwischen 0,1 und 37,7 m. Das Kollektiv umfasst ein breites BHD-Spektrum von 0,1 bis 134,8 cm (Mittel 29,7 cm). Die Baumhöhen reichen von 1,3 bis 49 m und das Alter variiert zwischen 10 und 280 Jahren. Es kommen Höhenlagen zwischen 0 m im niedersächsischen Tiefland und 930 m über NHN im Harz vor (Abbildung 3).

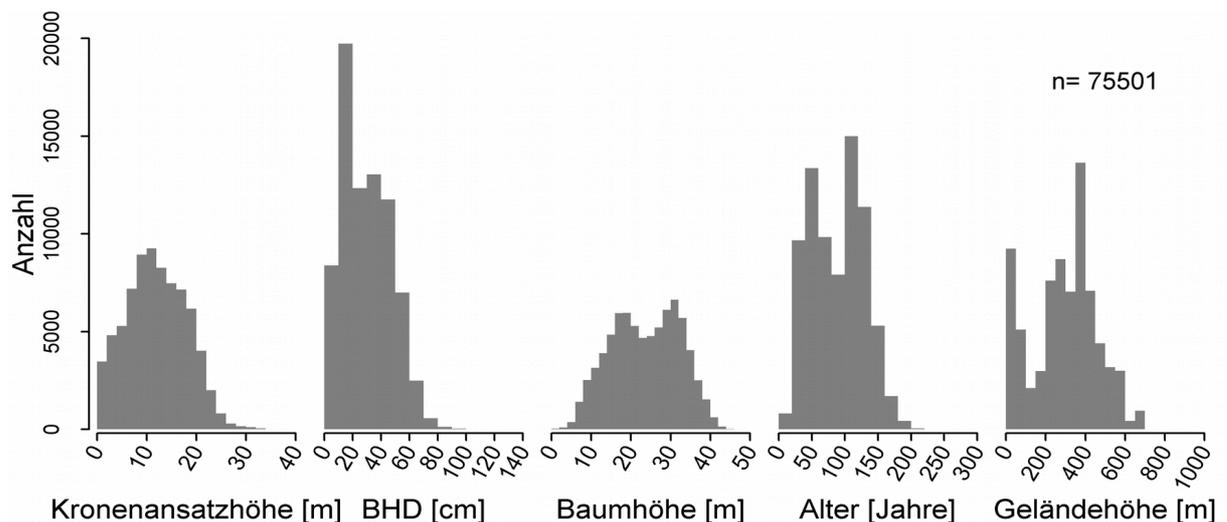


Abbildung 3: Verteilung wichtiger Kenngrößen für die Baumart Buche

Das Modell für Fichten basiert auf 94 144 gemessenen Kronenansatzhöhen zwischen 0,1 und 35,7 m. Der BHD liegt im Mittel bei 28,9 cm und reicht von 0,2 bis rund 105 cm. Die Baumhöhe variiert zwischen 1,3 und 47,3 m. Die Bäume sind zwischen 10 und 208 Jahren alt. Die Höhenlage schwankt zwischen 0 und 947 m über NHN (Abbildung 4).

4 Datengrundlage

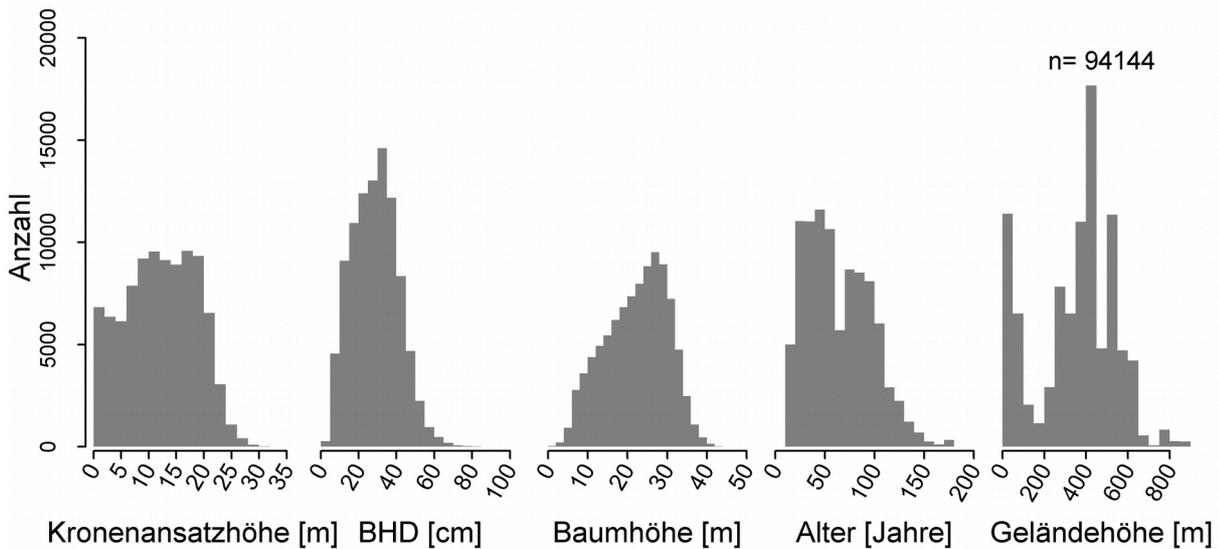


Abbildung 4: Verteilung wichtiger Kenngrößen für die Baumart Fichte

Der Datensatz enthält 53 348 Douglasien, deren Kronenansatzhöhen zwischen 0,1 und rund 40 m variiert. Das Kollektiv umfasst BHDs zwischen 1,9 und 127,3 cm; der mittlere BHD liegt bei 31,2 cm. Das Spektrum erfasster Baumhöhen reicht von 2,5 bis 51,7 m. Das Alter liegt zwischen knapp 10 und 139 Jahren. Es sind Bäume aus Höhenlagen zwischen 0 und rund 680 m vertreten (Abbildung 5).

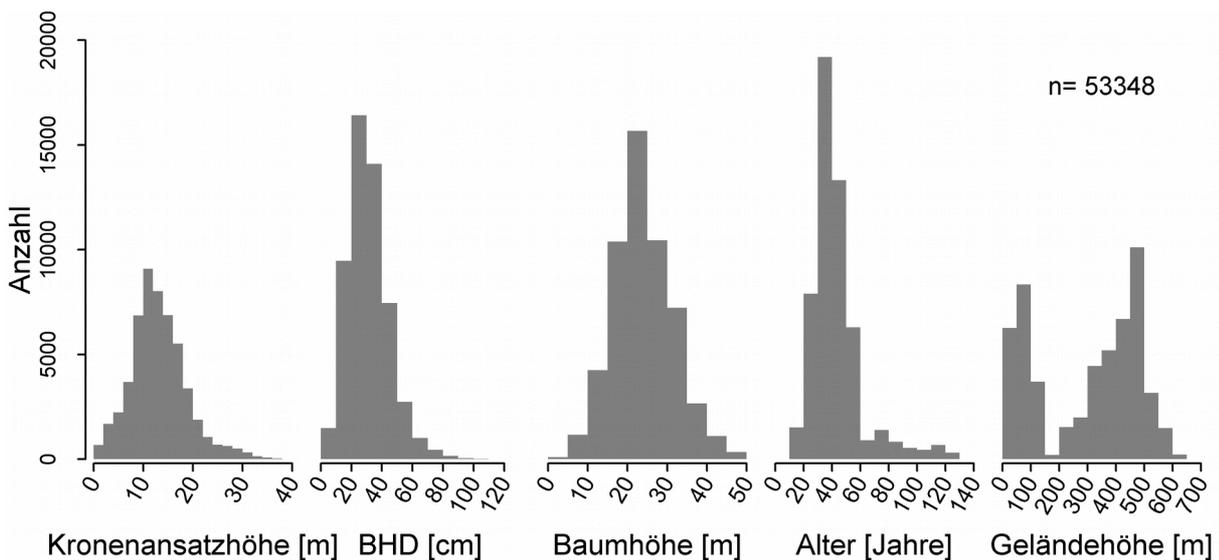


Abbildung 5: Verteilung wichtiger Kenngrößen für die Baumart Douglasie

Die Baumart Kiefer ist mit 42 320 Individuen vertreten, für die Kronenansatzhöhen zwischen 0,1 und 31,6 m erfasst wurden. Das BHD-Spektrum reicht von 1,5 bis 76,7 cm. Der mittlere BHD beträgt 27,3 cm. Die Baumhöhen variieren zwischen 2,7

und knapp 40 m. Es kommen Bäume im Alter zwischen 10 und 209 Jahren vor und die Geländehöhe liegt zwischen 0 und rund 580 m über NHN (Abbildung 6).

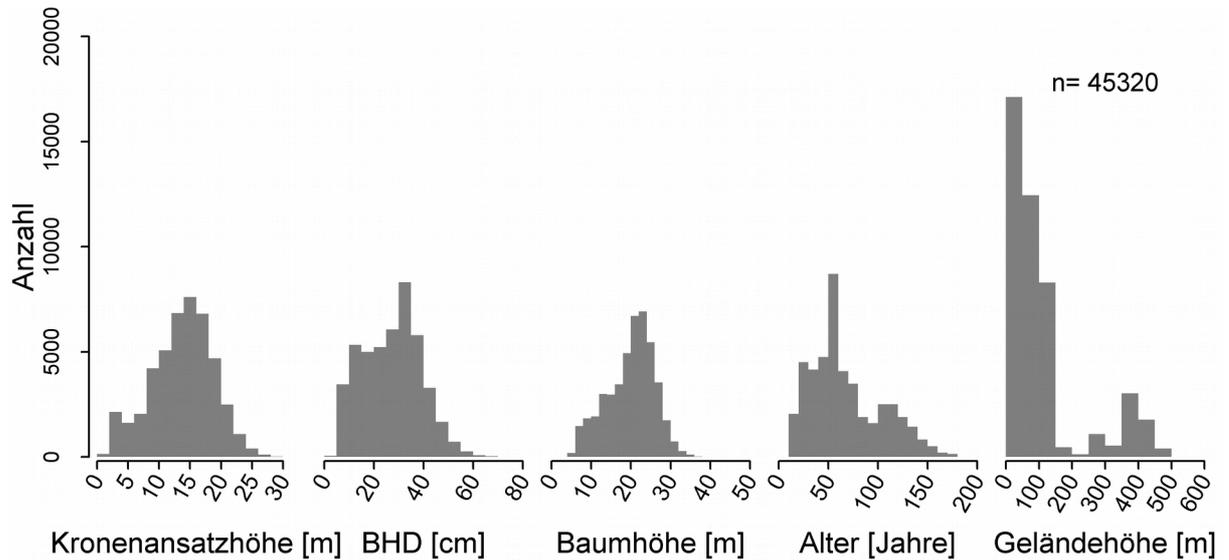


Abbildung 6: Verteilung wichtiger Kenngrößen für die Baumart Kiefer

Für die Lärche stehen 27 713 gemessene Kronenansatzhöhen zwischen 0,3 und 39,1 m zur Verfügung. Der BHD beträgt zwischen 31,2 cm; das Spektrum erstreckt sich von 4,4 bis rund 100 cm. Die Baumhöhe variiert zwischen 5,7 und 48 m und das Alter reicht von 10 bis 228 Jahre. Die Bäume stocken in Höhenlagen zwischen 0 und 610 m über NHN (Abbildung 7).

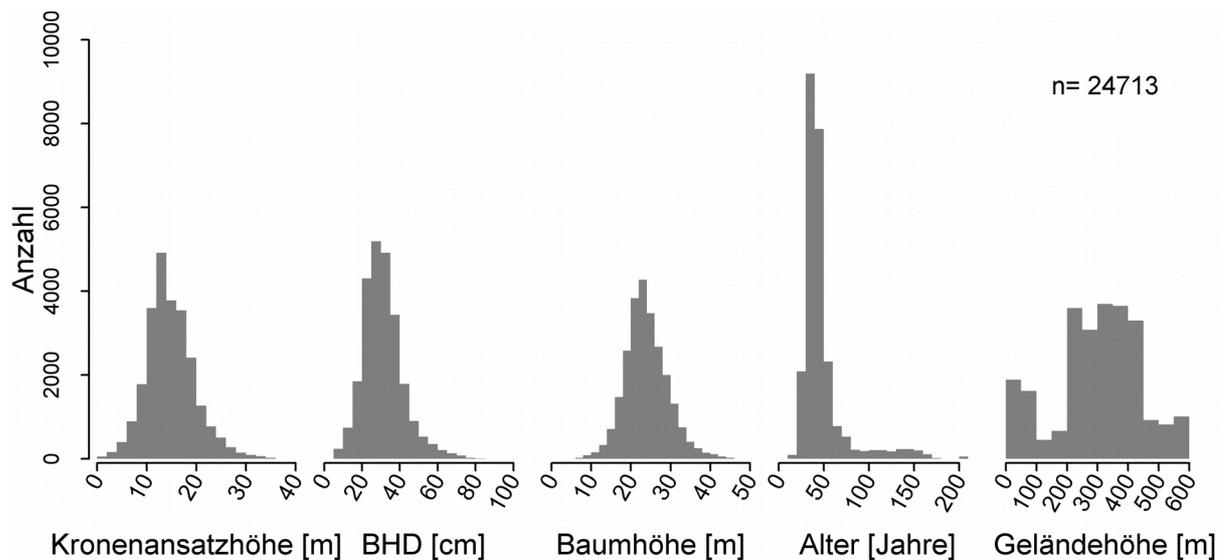


Abbildung 7: Verteilung wichtiger Kenngrößen für die Lärche

4.3 Datengrundlage: Kronenbreite

Zur Modellierung der Kronenbreite stehen Kronenablotungen von 282 Versuchspartellen zur Verfügung. Für die Baumarten Eiche, Buche, Fichte, Douglasie, Kiefer und Lärche kommen insgesamt 18 486 Ablotungen zusammen, für die gleichzeitig eine Höhenmessung vorliegt. Aus den am Einzelbaum erhobenen acht Kronenradien wird mithilfe des Teilkreismodells (RÖHLE 1983; KRAMER & AKÇA 2002) die Kronenschirmfläche berechnet, aus der sich die mittlere Kronenbreite ergibt.

Die Messungen für die Eichen verteilen sich auf 100 Parzellen in Höhenlagen zwischen 15 und knapp 400 m über NHN. In Bezug auf die geografische Lage sind Flächen im Nordwesten Deutschlands zwischen Schleswig-Holstein im Norden und dem Saarland im Süden vertreten. Neben Eichen-Reinbeständen sind auch Mischbestände mit Eichen enthalten, sowie Bestände in denen die Eiche als Nebenbaumart vorkommt. Es handelt sich um 1733 Kronenablotungen von 1709 Einzelbäumen. Von 24 Bäumen ist eine Wiederholungsmessung nach einigen Jahren vorhanden. Die mittlere Kronenbreite variiert zwischen 1 und 19,5 m. Darüber hinaus decken die Daten ein breites BHD-, Höhen- und Altersspektrum ab. Der Bekronungsgrad liegt zwischen 0,19 und 0,85 (Abbildung 8).

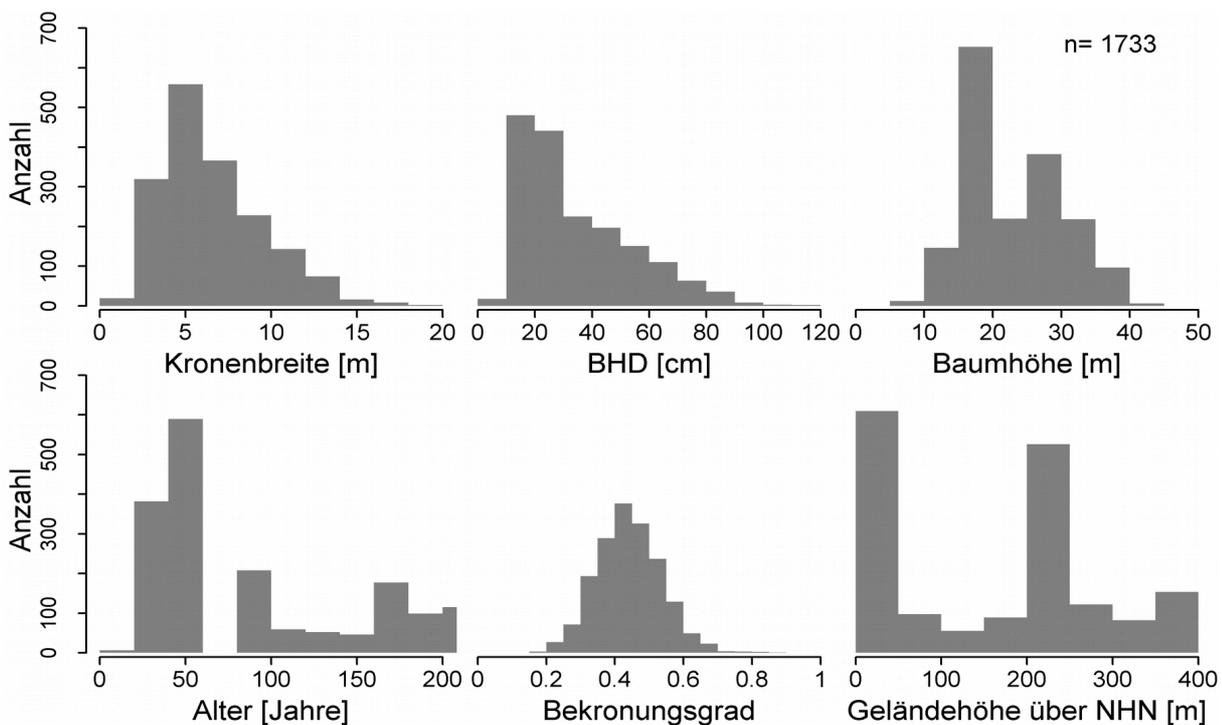


Abbildung 8: Datengrundlage für das Kronenbreitenmodell für Eiche

Für die Baumart Buche stehen 9338 Kronenablotungen an 7795 Einzelbäumen von 137 verschiedenen Parzellen zur Verfügung. Geografisch verteilen sich die Parzellen auf den Nordwesten Deutschlands zwischen Schleswig-Holstein im Norden und dem Saarland im Süden. Die Geländehöhe erstreckt sich vom Flachland bis in Höhenlagen von knapp 600 m über NHN. Dabei stammen etwa 12% der abgeloteten Buchen aus Reinbeständen, die übrigen aus verschiedenen Mischbeständen mit Buche. Einige Bäume wurden im Abstand von wenigen Jahren bis zu vier mal abgelotet. Die Daten umfassen mittlere Kronenbreiten von 0,2 bis 19,4 m sowie ein breites Spektrum in Bezug auf weitere Messgrößen (Abbildung 9).

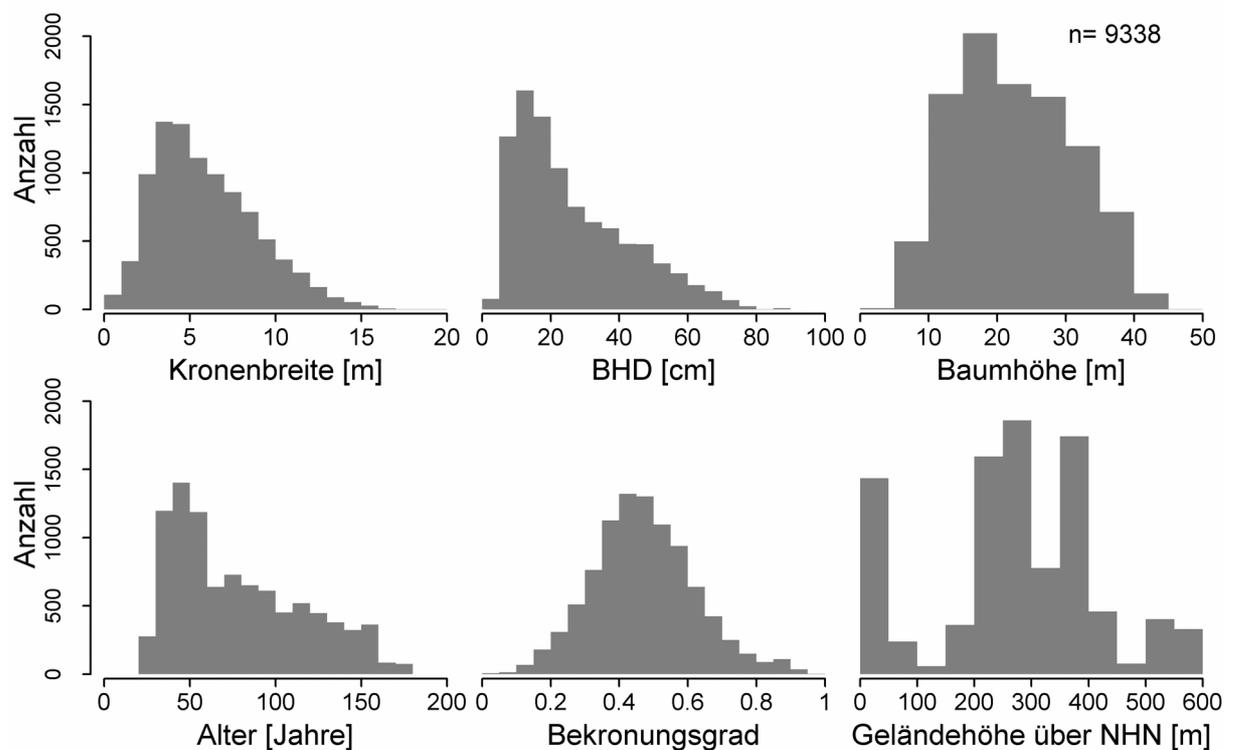


Abbildung 9: Datengrundlage für das Kronenbreitenmodell für Buche

Für das Kronenbreitenmodell der Baumart Fichte stehen 1245 Ablotungen von 1124 Einzelbäumen aus 54 Parzellen zur Verfügung. Die Parzellen liegen überwiegend in den Bundesländern Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen in Höhenlagen zwischen 0 und knapp 600 m. Es handelt sich um Rein- und Mischbestände mit verschiedenen anderen Baumarten. Die Daten enthalten für 101 Bäume bis zu zwei Wiederholungsmessungen. Die mittlere Kronenbreite erstreckt sich von 1,2 bis 12,5 m (Abbildung 10).

4 Datengrundlage

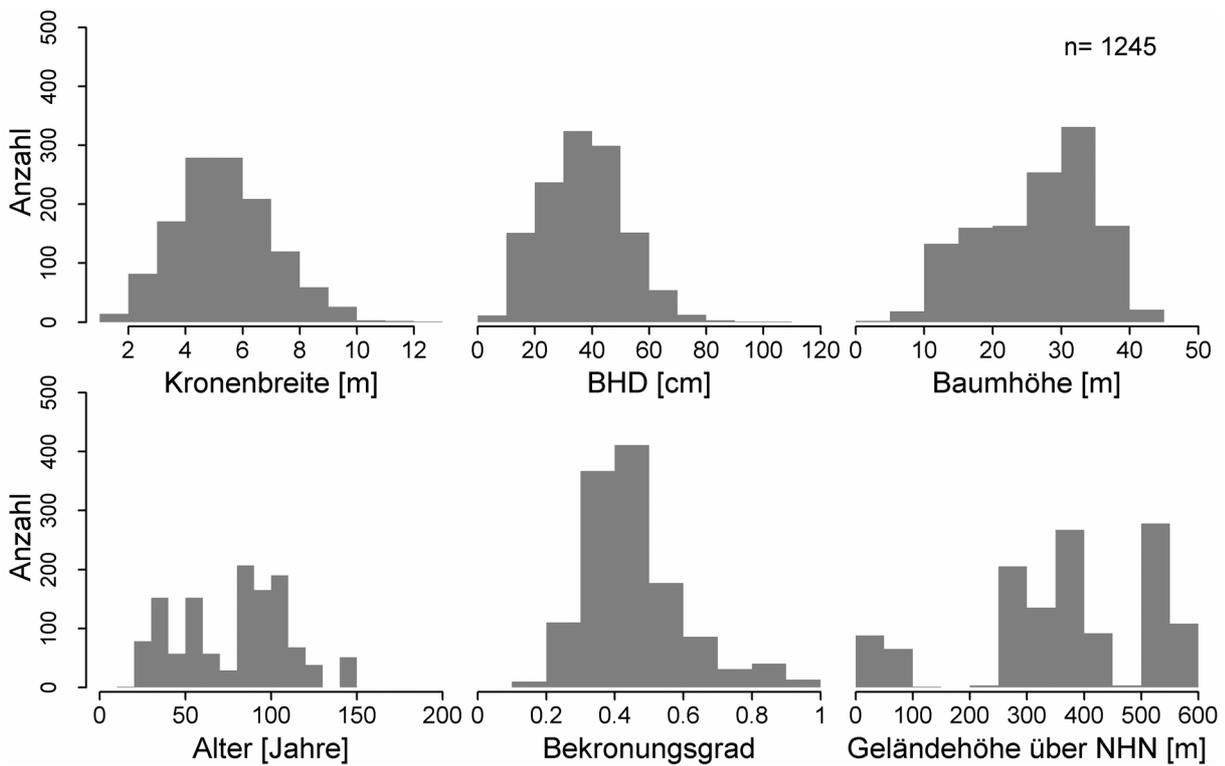


Abbildung 10: Datengrundlage für das Kronenbreitenmodell für Fichte

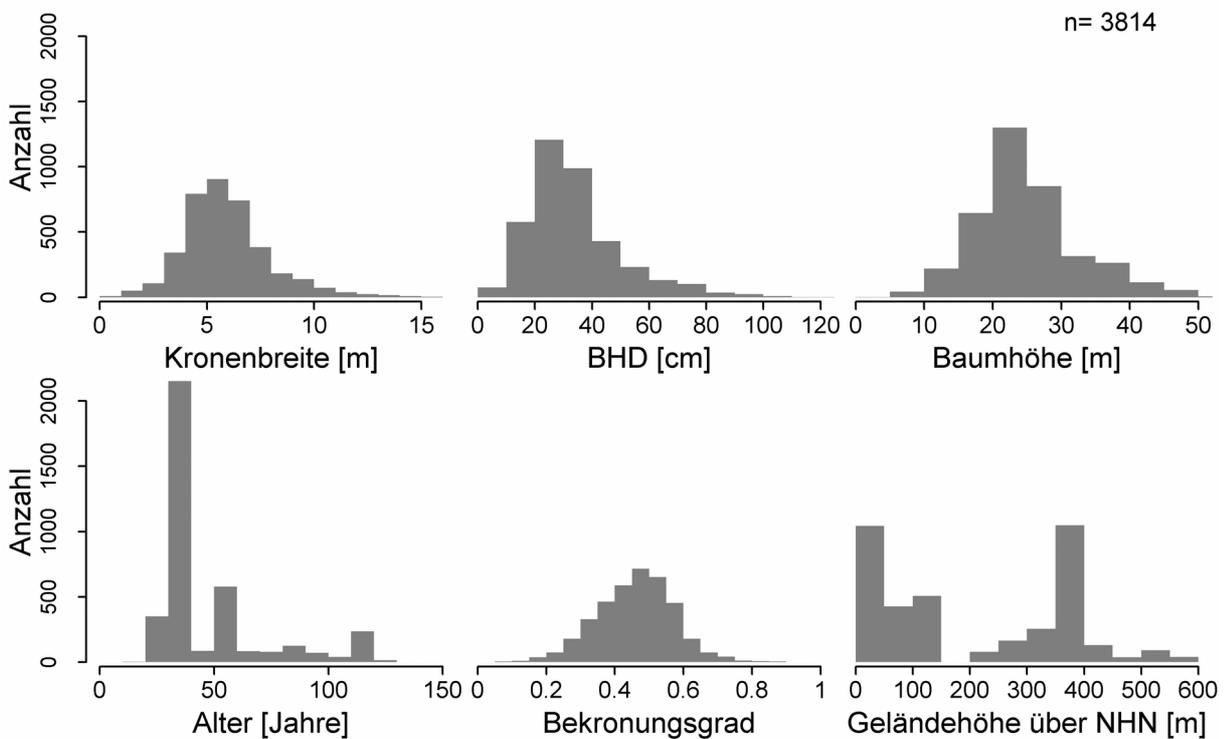


Abbildung 11: Datengrundlage für das Kronenbreitenmodell für Douglasie

Die verfügbaren Kronenablotungen an Douglasien stammen von 73 Parzellen, die überwiegend in Niedersachsen, aber auch in Rheinland-Pfalz und Schleswig-Holstein liegen. Sie liegen in Höhenlagen zwischen 20 und knapp 600 m über NHN. Die meisten Ablotungen stammen aus Reinbeständen (64%), Buchen-Douglasien-Mischbeständen sowie weiteren Mischungen mit Douglasie. Der Datensatz umfasst 3814 Messwerte von 3486 Einzelbäumen, von denen 328 Bäume nach einigen Jahren erneut gemessen wurden. Die mittlere Kronenbreite deckt ein breites Spektrum zwischen 0,5 und 15,9 m ab. Über die Hälfte der Messwerte stammt von jungen Bäumen bis 40 Jahre, darüber sind Alter bis 128 Jahre vertreten (Abbildung 11).

Der Datensatz für die Baumart Kiefer umfasst 668 Ablotungen, davon wurde ein Baum wiederholt gemessen. Die Messwerte stammen von 37 Parzellen in Niedersachsen in Höhenlagen zwischen 15 und knapp 120 m über NHN. Es handelt sich überwiegend um Reinbestände und verschiedenen Mischbestände mit Kiefer. Die Daten enthalten mittlere Kronenbreiten von 1,6 bis 11,1 m. Auch die Kieferndaten zeigen einen deutlichen Altersschwerpunkt. Fast die Hälfte der untersuchten Bäume fällt in die Altersklasse zwischen 40 und 50 Jahren. Ältere und jüngere Bäume sind in geringerem Umfang mit Altern zwischen 25 und 174 Jahren vertreten (Abbildung 12).

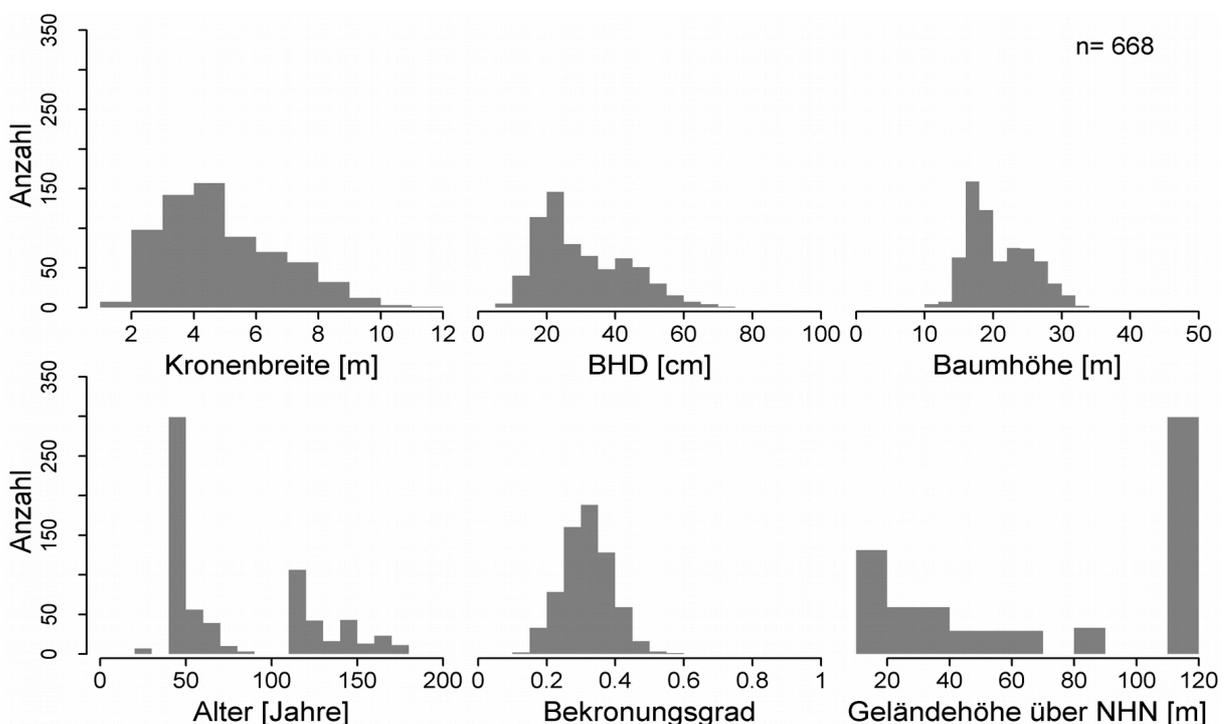


Abbildung 12: Datengrundlage für das Kronenbreitenmodell für Kiefer

4 Datengrundlage

Für die Lärchen stehen 743 Ablotungen von 427 Einzelbäumen auf 31 Parzellen zur Verfügung. Diese liegen ausschließlich in Niedersachsen in Höhenlagen bis zu gut 400 m über NHN. Die Ablotungen stammen aus Buchen-Lärchen-Mischbeständen. Für einzelne Bäume liegen bis zu drei Wiederholungsmessungen vor. Die mittlere Kronenbreite liegt zwischen 1,2 und 11,9 m (Abbildung 13).

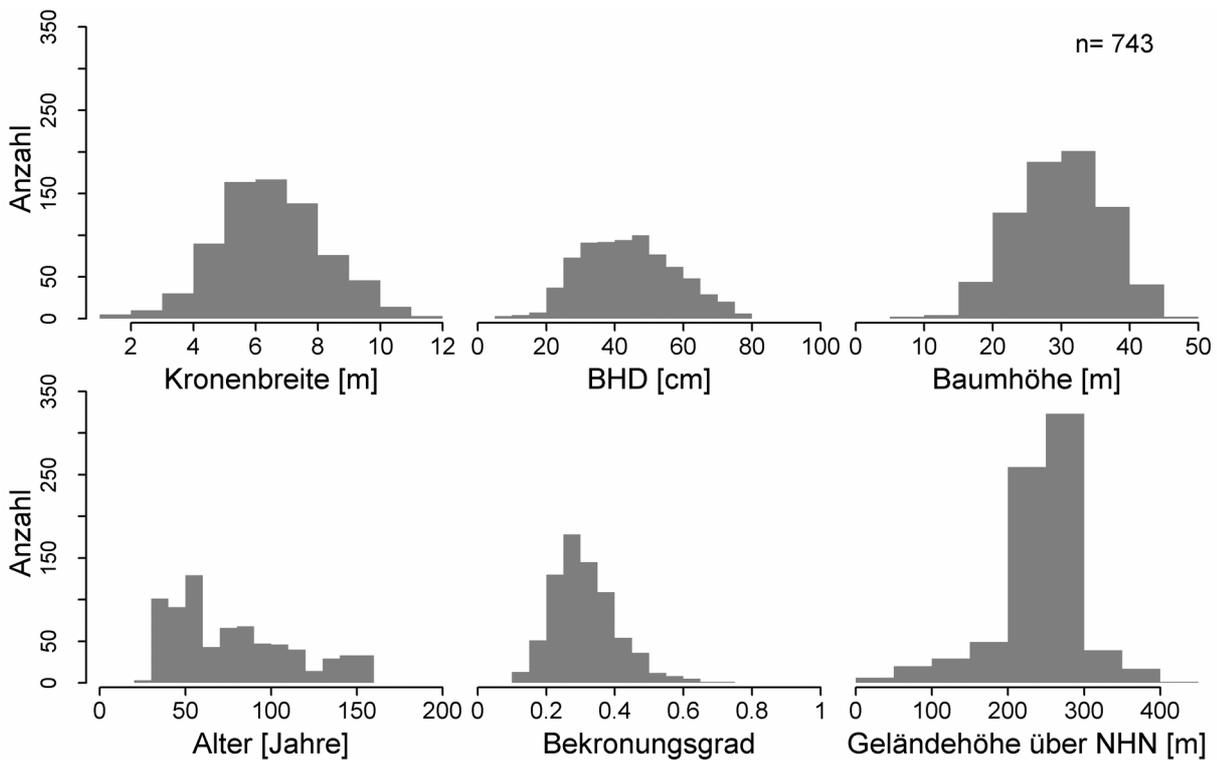


Abbildung 13: Datengrundlage für das Kronenbreitenmodell für Lärche

4.4 Datengrundlage: Lichtkronenlänge

Die horizontale Ausdehnung der Kronen verändert sich mit der Höhe innerhalb der Krone. Unter der Annahme, dass die Höhe der maximalen Kronenbreite die Grenze zwischen Licht- und Schattenkrone darstellt (vgl. 3.4), ergibt sich die Länge der Lichtkrone aus der Differenz zwischen Baumhöhe und der Höhe der maximalen Kronenbreite. Diese Größen liegen für 3642 Bäume der sechs betrachteten Baumarten(-gruppen) vor. Die Datenbasis ist für Buche, Fichte und Lärche mit jeweils einigen hundert Messungen innerhalb eines breiten BHD-Spektrums relativ gut, während bei Eichen und Kiefer eine deutlich geringere Zahl von Messwerten verfügbar ist, die zudem den Bereich starker Dimensionen nicht abdecken. Der Datensatz enthält nur eine Messung an Douglasie (Tabelle 1).

Tabelle 1: Datengrundlage für die Schätzung der Lichtkronenlänge

	Eiche	Buche	Fichte	Douglasie	Kiefer	Lärche
Anzahl	52	2694	282	1	20	593
BHD: Mittel	28,1	28,8	38,7	20,3	22,3	46,8
(Min. - Max.)	(8,9 - 56,7)	(5,5 - 77,7)	(11,5 - 68,9)		(1,5 - 51,2)	(20,6 - 99,5)

4.5 Horizontale Asymmetrie

Zur Ableitung einer baumartspezifischen maximalen Asymmetrie in Bezug auf die Form der Kronenschirmfläche konnten Kronenablotungen von 298 Versuchspartzellen verwendet werden. Die meisten Ablotungen entfallen mit 11807 Messungen auf die Baumart Buche. Für die Eichen stehen 3329 Kronenablotungen zur Verfügung. Die untersuchten Nadelbaumarten sind mit 2000 Ablotungen an Fichten, 4595 an Douglasien, 1302 an Kiefern und 794 an Lärchen vertreten.

4.6 Validierung der Modellkronen

Zur Validierung werden die konstruierten, potentiell asymmetrischen Modellkronen mit Ergebnissen von Kronenablotungen verglichen. Der Vergleich erfolgt zum einen auf Ebene der Einzelkronen und in einem zweiten Schritt auf Bestandesebene.

Zum Vergleich an Einzelbäumen wird ein Teilkollektiv von Aufnahmen auf Parzellen mit vollständig erhobenen Einzelbaumpositionen verwendet, sodass die räumliche Anordnung der Bäume zueinander für die Konstruktion der Modellkronen bekannt ist. Die Validierung erfolgt anhand der Kronenschirmflächen von Bäumen für die Kronenablotungen vorliegen. Zur Datenergänzung an Bäumen ohne Ablotungen wird die Kronenbreite mithilfe des im Wachstumssimulator *BWINPro* angewandten Modells (NAGEL ET AL. 2002) geschätzt und eine kreisrunde Form der Kronenschirmfläche unterstellt. Derart ergänzte Bäume werden nur als Nachbarbäume für die Kronenkonstruktion benötigt, darüber hinaus jedoch von der Validierung ausgeschlossen.

Es werden Aufnahmen ausgewählt, die neben einem vollständigem Stammverteilungsplan und Kronenablotungen, die als Referenz für die Validierung herangezogen werden können, Angaben zum Alter der Bäume und Messungen der Baumhöhe an mindestens einem Teil der Bäume beinhalten. Unter dieser Vorgabe kommen

Tabelle 2: Verteilung der Kronenablotungen an vollständig eingemessenen Parzellen auf die Baumarten(-gruppen)

Baumarten(-gruppe)	Anzahl
Eichen	239
Buche	4793
Fichte	782
Douglasie	956
Kiefer	394
Lärche	214
andere	1005
	8383

Aufnahmen auf 102 Versuchsparzellen zusammen, auf denen zum Zeitpunkt der jeweiligen Aufnahme insgesamt 8383 Bäume registriert wurden. Davon sind über die Hälfte Buchen. Douglasie und Fichte sind ebenfalls mit je über 700 Bäumen vertreten, während die übrigen in diesem Rahmen untersuchten Arten bzw. Artengruppen in deutlich geringerem Umfang vertreten sind (Tabelle 2).

Der Vergleich auf Bestandesebene zielt auf die Beurteilung der Gesamtüberschirmung bzw. des Anteils unüberschirmter Bestandesfläche und erfordert nicht nur vollständig erhobene Einzelbaumpositionen, sondern auch möglichst vollständig abgelotete Bestände. Es werden daher Aufnahmen verwendet, für die Kronenablotungen von mindestens 90% der Bäume innerhalb der Parzelle vorliegen. Bei den nach diesen Kriterien ausgewählten Aufnahmen handelt es sich um 12 Aufnahmen in Reinbeständen (Roteiche, Buche, Douglasie) und 22 Aufnahmen in Mischbeständen (Buche-Edellaubholz, Buche-Lärche, Buche-Douglasie, Birke-Fichte und Fichte-Buche) verschiedener Altersstufen (Tabelle 3). Zur Ergänzung fehlender Kronenablotungen werden runde Kronen unterstellt, deren Breite wie im Fall des Einzelbaumvergleichs mithilfe der *BWINPro*-Modelle geschätzt wird.

Tabelle 3: Übersicht über die für die Validierung auf Bestandesebene ausgewählten Parzellen und Aufnahmen

Baumart	Anzahl Aufnahmen	Anzahl Parzellen	Alter
Roteiche	1	1	102
Buche	8	8	99 – 153
Buche-Edellaubholz	2	2	Buche 49 – 77, Mischbaumarten gleichaltrig oder einige Jahre jünger
Buche-Lärche	1	1	116
Buche-Douglasie	9	8	Buche 30 – 128, Douglasie gleichaltrig oder einige Jahr jünger
Birke-Fichte	6	3	Birke 19 – 60, Fichte gleichaltrig oder einige Jahre älter
Fichte-Buche	4	4	Fichte 85 – 142, Buche gleichaltrig oder einige Jahre älter
Douglasie	3	3	110 – 117
	34	30	

4.7 Zuwachs

Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Modellkrone und Zuwachs wird der Grundflächenzuwachs als biologisch bedeutsame Größe gewählt. Die Grundfläche ergibt sich bei Unterstellung kreisförmiger Stammquerschnitte aus gemessenen BHD-Werten. Der periodische Grundflächenzuwachs ergibt sich als Grundflächendifferenz aus zwei aufeinander folgenden Aufnahmezeitpunkten, die in der Regel (ca. 66% der Werte) rund fünf Jahre auseinander liegen. Darüber hinaus werden Zeitintervalle zwischen rund vier und sechs Jahren berücksichtigt, längere und kürzere Zuwachsperioden werden von der Untersuchung ausgeschlossen. Der fünfjährige Grundflächenzuwachs (*ig*) ergibt sich ggf. durch Normierung auf die fünfjährige Zuwachsperiode. Die Beobachtungen stammen überwiegend (über 90%) aus den Jahren 1990 bis 2006, die älteste Aufnahme fand im Jahr 1966 statt.

Nach Ausschluss einiger Extremwerte für jede Baumart liegen 60 505 gemessene Zuwächse von 217 Parzellen vor. Darunter sind auch negative Zuwächse, die in der Regel auf Messfehler zurückzuführen sind, jedoch nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden um eine systematische Verzerrung der Datengrundlage zu vermeiden. Von jeder Parzelle gehen zwischen einer und fünf, für die Kiefer bis zu sechs Zuwachsperioden ein. Knapp die Hälfte der Messwerte entfällt auf die Baumart Buche. Dagegen ist die Datenlage für die Lärchen mit 1270 Messwerten vergleichsweise schmal. Weitere Einzelheiten zur Datengrundlage finden sich in Tabelle 4.

Tabelle 4: Datengrundlage zur Zuwachsuntersuchung

Baumart	Anzahl gemessener Zuwächse	Anzahl Parzellen	BHD [cm]*	Grundflächenzuwachs [cm ² /a] *
Eichen	3852	45	22,1 (7,2 – 80,1)	70,5 (29,0 – 396,4)
Buche	27617	97	15,9 (7,1 – 88,8)	47,8 (-54,7 – 599,2)
Fichte	10264	85	30,3 (7,1 – 72,5)	120,0 (-25,3 – 748,0)
Douglasie	8033	37	24,1 (7,1 – 115,5)	138,0 (-26,0 – 1135,0)
Kiefer	9441	38	16,0 (7,1 – 66,8)	44,5 (-20,3 – 348,1)
Lärche	1270	26	32,5 (7,5 – 78,8)	168,3 (16,7 – 481,8)
	60505	217	20,2 (7,1 – 115,5)	75,5 (-54,7 – 1135,0)

* angegeben sind jeweils: Mittelwert (Min. - Max.)

4.8 Vergleichsdaten

Um die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modelle auf ihre Sensitivität zu untersuchen und Modellansätze beispielhaft miteinander vergleichen zu können, wird eine Datengrundlage benötigt, die realistische Kombinationen der Eingangsparameter enthält. Zu diesem Zweck wird auf Basis der Daten, die zur Parametrisierung der Modelle zur Schätzung der Kronenlänge verwendet werden (4.2) der BHD über dem Alter für die Baumart Buche ausgeglichen sowie eine mittlere Baumhöhe in Abhängigkeit vom BHD geschätzt. Es resultieren Alterstrends für BHD und Baumhöhe für einen „mittleren Baum“ (Abbildung 14), die für Vergleiche genutzt werden können.

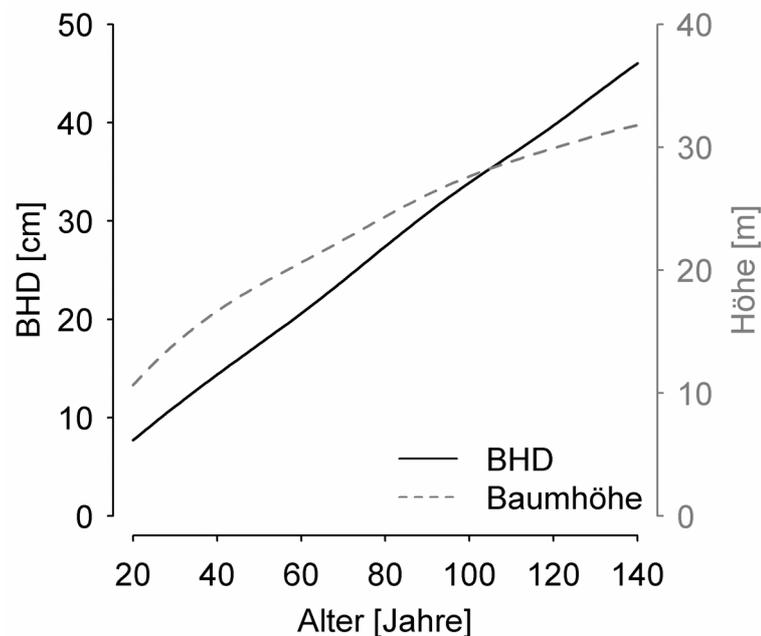


Abbildung 14: Alterstrend von BHD und Baumhöhe für Buche

5 Methoden

Biometrische Modelle verwenden häufig Parameter der Kronendimension (Kronenlänge, Kronenbreite) oder daraus abgeleitete Größen (beispielsweise bestimmte Konkurrenzindizes) zur Beschreibung des Einzelbaumzuwachses (vgl. Grundlagen). Daher erscheint es sinnvoll, Kronenlänge und -breite in einem ersten Schritt zu modellieren und die konkrete räumliche Lage und Form der Krone erst anschließend aufzubauen. So werden zunächst baumartspezifische Modelle zur Schätzung der vertikalen und horizontalen Kronenausdehnung entwickelt (5.1.1 und 5.1.2). Anschließend erfolgt die Konstruktion der konkreten potentiell asymmetrischen Modellkronen (5.1.3 - 5.1.8) und die Untersuchung der vorgestellten Modellkronen hinsichtlich ihrer Eignung für die Zuwachsprognose (5.2).

Datenverarbeitung und Modellbildung erfolgen unter Verwendung des Statistikpakets *R* (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2009) sowie der Bibliotheken *mgcv* (WOOD 2006), *scam* (PYA 2012), *nlme* (PINHEIRO ET AL. 2010) und *MASS* (VENABLES & RIPLEY 2002). Die Konstruktion der Modellkronen basiert auf den Algorithmen des ForestSimulator *BWINPro* (NAGEL 2009) und dem Softwarepaket *TreeGrOSS* (NAGEL 2005). Auch die Berechnungen auf Modellkronen basierender Parameter (z.B. Lichtkronenmantelfläche, Kronenkonkurrenzindex, schirmfreier Anteil der Lichtkronenmantelfläche) für die Zuwachsschätzung basieren auf deren Programmroutinen.

5.1 Modellkronen

Die Kronenansatzhöhe wird nur in seltenen Fällen, wie in der Bundeswaldinventur oder in den Betriebsinventuren repräsentativ und die Kronenbreite nur in Sonderuntersuchungen erfasst. Daher werden zur uneingeschränkten Initialisierung von Wachstumsmodellen Schätzungen der Kronenansatzhöhe und -breite auf Einzelbaumebene aus flächendeckend verfügbaren Prädiktoren benötigt (5.1.1 und 5.1.2).

Weit mehr als Kronenlänge und -breite hängt die konkrete räumliche Form der Krone von der direkten Konkurrenzsituation ab (3.3.1), sodass eine Betrachtung im Bestandeszusammenhang und unter Berücksichtigung der konkreten Raumstruktur unerlässlich ist. Die Modellkronen werden daher bestandesweise in einem iterativen

Prozess aufgebaut, der die räumliche Verteilung der Nachbarkronen um jeden Einzelbaum einbezieht (5.1.5).

5.1.1 Kronenlänge

Die Kronenlänge ist eine wichtige Kenngröße der Krone. Da der Aufbau der Modellkronen bestandesweise erfolgt, wird diese für alle Bäume eines Bestandes als Ausgangspunkt für die Konstruktion der Modellkronen benötigt. Darüber hinaus ist die Kronenlänge ein Weiser für die astfreie Schaftlänge (SCHMIDT 2001) und beeinflusst damit die Holzqualität und den zu erwartenden wirtschaftlichen Nutzen eines Stammes. Auch für die Assimilationsleistung eines Baumes und den Zuwachs spielt die Kronenlänge eine große Rolle (3.1). Im Folgenden werden baumartspezifische statistische Modelle entwickelt, die zur Schätzung dieser Größe verwendet werden können.

Die Schätzung der Kronenansatzhöhe erfolgt indirekt über den Bekronungsgrad. Dieser kann definitionsgemäß nur Werte zwischen null und eins annehmen. Die Beschränkung auf den Definitionsbereich kann bei der Modellierung durch die Verwendung eines verallgemeinerten Regressionsmodells mit Logit-Linkfunktion und die Annahme einer quasibinomial verteilten Zielgröße erreicht werden. Dieses Vorgehen bietet gegenüber einer direkten Schätzung der Kronenlänge oder der Kronenansatzhöhe den Vorteil, dass die resultierenden Kronenansatzhöhen im Wertebereich zwischen null und der jeweiligen Baumhöhe liegen. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass keine unplausiblen Kronenlängen geschätzt werden. Die Verteilungsannahme entspricht einer Binomialverteilung, jedoch ohne die Festlegung des Dispersionsparameters auf den Wert eins, sodass auch Daten mit größerer (oder geringerer) Streuung als durch die Annahme einer Binomialverteilung vorausgesetzt wird abgebildet werden können. In der Regel wird die Binomialverteilung bzw. Quasi-Binomialverteilung für diskrete Zielgrößen unterstellt; eine Anwendung ist aber auch für kontinuierliche Variablen wie den Bekronungsgrad möglich (PIEPHO 1998).

Der Bekronungsgrad wird mithilfe eines zweistufigen Verfahrens geschätzt, das die optimale Nutzung unterschiedlich strukturierter Daten aus Versuchspartzen und Betriebsinventuren ermöglicht und die Vorteile beider Datensätze nutzbar macht. Die Daten der Betriebsinventuren sind räumlich systematisch verteilt und beinhalten in

der Regel eine Messung je Baumart an einem Inventurpunkt. Sie repräsentieren daher die realen Waldverhältnisse. Die Versuchsflächendaten enthalten eine vergleichsweise hohe Anzahl Messungen je Messzeitpunkt in unmittelbarer räumlicher Nähe. Während die systematisch verteilten Messungen der Betriebsinventur geeignet erscheinen, regionale Unterschiede sowie bestandesübergreifende Zusammenhänge abzubilden, können die Messungen aus den Versuchsflächen genutzt werden um Unterschiede zwischen den Einzelbäumen innerhalb von Beständen zu quantifizieren. Durch die Kombination beider Datensätze werden große Datenbereiche der Kovariablen sowie ihrer Kombinationen abgedeckt (vgl. 4.2), sodass stabile und kausal plausible Modelleffekte geschätzt werden können.

Als erklärende Variablen werden der Brusthöhendurchmesser (d), die Baumhöhe (h), das Alter (alt) und die Geländehöhe (hnn) getestet. Zur Charakterisierung von langfristiger Konkurrenz und sozialer Stellung wird das Verhältnis von d zum $d100$ des Bestandes ($reld100$) berechnet. Die Spitzenhöhe als möglicher Indikator der Entwicklungsstufe eines Bestandes oder einer Art natürlicher Altersstufe bleibt bei der Modellierung unberücksichtigt, da sie in der Anwendung auf ungleichaltrige Bestände problematisch erscheint. Darüber hinaus kommt es infolge von Durchforstungen zu einer rechnerischen Verschiebung der Spitzenhöhe, sodass die Berücksichtigung dieser Größe zu unplausiblen sprunghaften Änderungen der Vorhersagen führen kann.

Darüber hinaus können räumliche Effekte eine Rolle spielen, die auf unbeobachtete Einflussgrößen zurückzuführen sind. Untersuchungen anderer Autoren zeigen zum Beispiel, dass neben Einzelbaumvariablen, wie dem BHD und der Baumhöhe auch topographische Unterschiede wie die Hangneigung und Exposition eine Rolle spielen (vgl. 3.2.2). Solche Einflussgrößen können eine starke räumliche Korrelation aufweisen oder nur lokal auftreten. Der räumliche Effekt kann entsprechend in einen strukturierten (räumlich korrelierten) und einen unstrukturierten (nicht räumliche korrelierten) Teil unterteilt werden (FAHRMEIR ET AL. 2004; BREZGER & LANG 2006).

Bleiben unbeobachtete räumlich korrelierte Einflussgrößen bei der Modellierung unberücksichtigt, kann dies zu Problemen (räumliche Autokorrelation) führen, weil dadurch die für viele statistische Methoden benötigte Annahme der Unabhängigkeit

der Beobachtungen verletzt wird (FAHRMEIR ET AL. 2007). Im vorliegenden Fall sind die einzelnen Beobachtungen über die Koordinaten im Gauß-Krüger-Koordinatensystem (rw und hw) der Versuchspartellen und Stichprobenpunkte verortet, so dass die räumliche Autokorrelation mithilfe einer räumlichen Trendfunktion modelliert werden kann, die durch einen zweidimensionalen Spline beschrieben wird (WOOD 2006). Neben der Gewährleistung der Unabhängigkeitsannahme für die Modellresiduen werden über diese Quantifizierung regionaler Unterschiede, die sich nicht mittels kausaler Effekte beschreiben lassen, eine Erhöhung der Prognosegenauigkeit und regional unverzerrte Schätzungen erreicht.

Darüber hinaus wird die Unabhängigkeitsannahme aufgrund der Datenstruktur der Versuchsflächendaten mit Messungen, die innerhalb von Partellen (unstrukturierter räumlicher Effekt) und innerhalb von Aufnahmen auf derselben Partelle korreliert sind, in Frage gestellt. Da jedoch durch die zusätzliche Nutzung der Betriebsinventurdaten die Anzahl der Cluster (Versuchspartellen bzw. Inventurpunkte) sehr groß ist und gleichzeitig an der überwiegenden Zahl der Inventurpunkte nur jeweils eine Messung pro Baumart zu einem einzigen Aufnahmezeitpunkt vorliegt, erscheint es zulässig, diese Effekte zunächst nicht in das Modell aufzunehmen und erst in einem zweiten Schritt mithilfe von Zufallseffekten zu beschreiben.

Im ersten Schritt wird daher auf Grundlage der vereinigten Datenbasis aus Versuchsflächen und Inventurpunkten ein verallgemeinertes additives Modell (GAM) parametrisiert. Das Modell umfasst neben den – ggf. nicht linearen – Effekten erklärender Variablen eine räumliche Trendfunktion und wird daher auch als geadditives Regressionsmodell bezeichnet (KAMMANN & WAND 2003). Die allgemeine Form des Modells lässt sich wie folgt beschreiben:

$$p = \text{logit}(E[y_{ijk}]) = \alpha + f_1(xI_{ijk}) + \dots + f_n(xn_{ijk}) + f_r(rw_i, hw_i) \quad , \quad (1)$$

$y_{ijk} \sim \text{Quasibinomial}$

y_{ijk}	Zielgröße des Modells am Baum k der Partelle i zum Aufnahmezeitpunkt j
α	globales Interzept
$xI_{ijk} \dots xn_{ijk}, rw_i, hw_i$	erklärende Variablen
$f_1(\cdot) \dots f_n(\cdot), f_r(\cdot)$	glättende Funktionen (Details im Text, s.u.)

Dabei werden die möglicherweise nicht linearen Effekte der erklärenden Variablen (d , h , alt , hnn , $reld100$) mithilfe glättender Funktionen $f(\cdot)$ beschrieben und zunächst als penalisierte „thin plate“ Regressionssplines spezifiziert. Um in allen Fällen biologisch plausible Effekte der erklärenden Variablen sicherzustellen erfolgt ggf. alternativ die Anwendung penalisierter P-Splines unter Verwendung der B-Spline-Basis nach Eilers und Marx (1996) mit zusätzlicher Monotonie-Beschränkung (P_{YA} 2012). Zusätzlich zu den Haupteffekten der Variablen auf den linearen Prädiktor (vgl. Gleichung 1) werden Wechselwirkungen zwischen den Variablen untersucht. Der räumliche Trend $f_r(rw_i, hw_i)$ wird als zweidimensionale Funktion, die als bivariater isotroper penalisierter „thin plate“ Regressionsspline spezifiziert wird, in das Modell integriert (vgl. WOOD 2006).

Mithilfe dieses zweidimensionalen Splines kann der räumliche Trend in Abhängigkeit von der Stärke der Autokorrelation flexibel und unruhig oder stärker geglättet beschrieben werden. Die optimale Glättung wird grundsätzlich im Rahmen der Modellparametrisierung für alle Effekte mittels generalisierter Kreuzvalidierung geschätzt. Voraussetzung für dieses Verfahren ist eine ausreichend hoch gewählte Dimension. Diese bedingt die Obergrenze und damit die maximal mögliche Flexibilität für die Schätzung der Glättungsparameter. Für die Versuchsflächendaten kann eine Korrelation der Messungen innerhalb der Parzellen nicht ausgeschlossen werden, kann aber im Rahmen dieser ersten Modellstufe auch nicht z.B. mithilfe von Zufallseffekten berücksichtigt werden. Um dennoch eine mögliche Überparametrisierung zu vermeiden, wird eine zusätzliche 20-fache Kreuzvalidierung mit wiederholter Modellparametrisierung durchgeführt, wobei die Dimension der Splinebasis von 0 (ohne räumlichen Trend) bis 340 (sehr flexibler räumlicher Trend) schrittweise erhöht wird. Für die übrigen (eindimensionalen) Effekte wird die Standardeinstellung der Software für die Dimension mit einem Wert von 10 übernommen.

Als Kriterien für die Modellselektion wurde die statistische Signifikanz (Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$) der Effekte und deren biologische Plausibilität herangezogen.

Auf diese erste Modellstufe folgt in einem zweiten Schritt ein weiteres Modell, das die Anpassung bzw. Kalibrierung der Schätzung an die Besonderheiten einzelner Flächen erlaubt. Im Gegensatz zur ersten Stufe werden dabei ausschließlich Daten aus Versuchspartzen verwendet. Da aufgrund der Datenstruktur mit räumlich

zusammenhängenden Beobachtungen innerhalb der Versuchspartellen und zeitlich korrelierten Messungen innerhalb von Aufnahmen nicht von einer Unabhängigkeit der Beobachtungen ausgegangen werden kann, ist die Berücksichtigung von Zufallseffekten auf Ebene der Partellen sowie der Aufnahmen geschachtelt in Partellen geboten. Es wird daher ein verallgemeinertes lineares gemischtes Modell (GLMM) verwendet, in das der geschätzte Bekronungsgrad auf Logit-Ebene (\hat{p}_{ijk}) der ersten Modellstufe als Vorschätzung eingeht:

$$\text{logit}(E[y_{ijk}]) = \alpha + \beta \hat{p}_{ijk} + Z_i b_i + Z_{ij} b_{ij} \quad , \quad (2)$$

$$y_{ijk} \sim \text{Quasibinomial und } b = (b_i, b_{ij}) \sim N(0, G)$$

y_{ijk}	Zielgröße des Modells am Baum k der Partelle i zum Aufnahmezeitpunkt j
α, β	globale Parameter
Z_i	Design-Matrix der Zufallseffekte der Partelle i
$b_i = (b_{i0}, b_{i1})$	Vektor der Zufallseffekte der Partelle i
Z_{ij}	Design-Matrix der Zufallseffekte der Aufnahme j innerhalb der Partelle i
$b_{ij} = (b_{ij0}, b_{ij1})$	Vektor der Zufallseffekte der Aufnahme j innerhalb der Partelle i
\hat{p}_{ijk}	Vorschätzung für Baum k der Partelle i bei der Aufnahme j aus der ersten Modellstufe (Gleichung 1) auf der Logit-Ebene
G	Positiv definite Kovarianzmatrix

Die Vorschätzung aus der ersten Modellstufe soll die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen den zur Verfügung stehenden erklärenden Variablen und der Zielgröße abbilden. Die zweite Modellstufe ermöglicht durch die Schätzung eines globalen Interzepts (α) und eines globalen Steigungsparameters (β) eine leichte Modifizierung dieses Zusammenhangs in Bezug auf die veränderte Datenbasis (nur Versuchsfächendaten) bzw. auf die veränderte Gewichtung der einzelnen Messwerte infolge der Berücksichtigung von Zufallseffekten. Darüber hinaus werden für jede Partelle und für jede Aufnahme einer Partelle Zu- oder Abschläge (Zufallseffekte) auf die globalen Parameter Interzept und Steigung geschätzt. Diese ermöglichen die summarische Berücksichtigung nicht erfasster lokaler Einflussgrößen (z.B. Bestandesbehandlung, genetische Variabilität), sodass eine optimale Anpassung des

Modells an die lokalen parzellen- und aufnahmespezifischen Besonderheiten erreicht wird. Im Hinblick auf eine Anwendung des Modells zur Datenergänzung auf Flächen, deren gemessene Bekronungsgrade für die Parametrisierung verwendet werden, kann die Berücksichtigung der geschätzten Zufallseffekte die Treffsicherheit der Prognose verbessern. Auch für Flächen, die nicht im Parametrisierungsdatensatz enthalten sind, für die jedoch gemessene Bekronungsgrade vorliegen, lässt sich das Modell mithilfe der zweiten Modellstufe kalibrieren (7.1.1.4).

Neben dem beschriebenen zweistufigen Modell zur Schätzung des Bekronungsgrades kommt alternativ das im Wachstumssimulator *BWINPro* verwendeten Modell (NAGEL ET AL. 2002) zum Einsatz. Dieses schätzt die Kronenansatzhöhe (ka) als Funktion von BHD (d), h/d -Wert und Spitzenhöhe ($h100$) in Relation zur Baumhöhe (h) wie folgt:

$$ka = h \left(1 - e^{-\left| p_0 + p_1 \frac{h}{d} + p_2 d + p_3 \ln(h100) \right|} \right) \quad (3)$$

Dabei bezeichnen p_0 , p_1 , p_2 und p_3 die Regressionskoeffizienten des Modells.

5.1.2 Kronenbreite

Die Schätzung der Kronenbreite von Einzelbäumen erfolgt anhand eines verallgemeinerte additiven gemischten Modells (GAMM), das die Zielgröße mithilfe erklärender Variablen auf Einzelbaumebene sowie von Zufallseffekten auf Parzellenebene modelliert. Für Baumarten mit nennenswerter Anzahl wiederholt gemessener Bäume (alle außer Kiefer) werden darüber hinaus Zufallseffekte auf Aufnahmeebene innerhalb von Parzellen geschätzt.

$$y_{ijk} = \alpha + f_1(x_{1ijk}) + \dots + f_n(x_{nijk}) + Z_i * b_i + Z_{ij} * b_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{ik} \sim N(0, \sigma^2 |v_{ijk}|^{2\delta}) \quad \text{und} \quad b = (b_i, b_{ij}) \sim N(0, G)$$

y_{ik}	Zielgröße des Modells am Baum k der Parzelle i zum Aufnahmezeitpunkt j
α	globales Interzept
$x_{1ijk} \dots x_{nijk}$	erklärende Variablen
$f_1(\cdot) \dots f_n(\cdot)$	glättende Funktionen, die als penalisierte „thin plate“-Regressionssplines spezifiziert werden
Z_i	Design-Matrix der Zufallseffekte der Parzelle i
$b_i = (b_{i0}, b_{i1})$	Vektor der Zufallseffekte der Parzelle i ,
Z_{ij}	Design-Matrix der Zufallseffekte der Aufnahme j innerhalb der Parzelle i
$b_{ij} = (b_{ij0}, b_{ij1})$	Vektor der Zufallseffekte der Aufnahme j innerhalb der Parzelle i
$\sigma^2, v_{ijk}, \delta$	Varianz, Varianzkovariable am Baum k der Parzelle i zum Aufnahmezeitpunkt j , Varianzparameter
G	Positiv definite Kovarianzmatrix

Zur Beschreibung der Kronenbreite der Einzelbäume werden verschiedene Einzelbaumvariablen getestet: der BHD (d), die Baumhöhe (h), das Alter (alt), der Bekronungsgrad (bg), sowie verschiedene Konkurrenzindizes, die Geländehöhe (hnn) und der Site-Index (si) nach Nagel (1999). Im Gegensatz zu der Situation bei der Modellierung der Kronenlänge, für die räumlich systematisch verteilte Daten aus der Betriebsinventur zur Verfügung standen, liegen Kronenablotungen nur für Versuchsflächen vor. Die geographische Lage kann aufgrund der geklumpten und lückenhaften räumlichen Verteilung der Messungen auf Versuchsflächen nicht über

die Geländehöhe hinausgehend berücksichtigt werden. Aus der Vielzahl verfügbarer Konkurrenzindizes scheiden kronenbasierte Indikatoren aus, da sie die Kronendimension voraussetzen, deren horizontale Komponente hier die Zielgröße darstellt. Auch erscheint es sinnvoll Konkurrenzmaße zu betrachten, die die langfristige Konkurrenzsituation abbilden, da unterstellt werden kann, dass die Kronenbreite eines Baumes eine vergleichsweise träge reagierende Größe ist. Es werden daher mehrere Varianten des BHD-basierten Konkurrenzindex nach Hegyi (1974) (*heg*) mit verschiedenen Suchradien bzw. Randkorrekturverfahren berechnet. Bei der Berechnung des Konkurrenzindex werden nur Flächen mit vollständigem Stammverteilungsplan berücksichtigt, sodass die Modelle, die einen Konkurrenzindex berücksichtigen, auf Grundlage einer verringerten Datenbasis parametrisiert werden. Als Alternativen zur Beschreibung der Konkurrenzsituation bzw. der sozialen Stellung innerhalb des Bestandes werden der *h/d*-Wert (*hd*) sowie das Verhältnis der Baumhöhe zur Baumhöhe des Grundflächenmittelstammes der 100 stärksten Bäume des Bestandes (*relh100*) und das Verhältnis des BHD zum BHD des Grundflächenmittelstammes der 100 stärksten Bäume des Bestandes (*reld100*) getestet.

Da die Annahme der Varianzhomogenität verworfen werden muss, werden im Rahmen der Modellselektion verschiedene Funktionen zur Modellierung der Varianz getestet (vgl. PINHEIRO & BATES 2000). Als Auswahlkriterium wird der AIC verwendet.

Als Alternative kommt – wie für die Kronenlänge – das im Wachstumssimulator *BWINPro* verwendete Modell (NAGEL ET AL. 2002) zum Einsatz. Das Modell schätzt die Kronenbreite mithilfe nichtlinearer Regression in Abhängigkeit vom BHD (*d*) wie folgt:

$$kb = (p_0 + p_1 d) \left(1 - e^{-\left(\frac{d}{p_2}\right)^{p_3}} \right) \quad (5)$$

Dabei sind p_0 , b_1 und p_2 Regressionskoeffizienten, die im Rahmen der Modellparametrisierung geschätzt wurden (NAGEL ET AL. 2002).

5.1.3 Lichtkronenlänge

Die Lichtkrone bildet einen Teil der Gesamtkrone, deren Länge sich aus der Differenz zwischen Baumhöhe und Kronenansatzhöhe ergibt. Es liegt daher nahe, die Lichtkronenlänge im Verhältnis zur Kronenlänge zu beschreiben. Die Lichtkronenlänge im Verhältnis zur Kronenlänge (rlk_{kl}) wird daher wie folgt definiert:

$$rlk_{kl} = \frac{h - h_{maxkb}}{h - ka}, \quad (6)$$

wobei h_{maxkb} die Höhe der maximalen Kronenbreite, ka die Kronenansatzhöhe und h die Baumhöhe ist.

Diese Beschreibung basiert unter anderem auf der Kronenansatzhöhe, die bei der Messung nicht immer eindeutig bestimmbar (LEITES ET AL. 2009; BURKHART & TOMÉ 2012) und – aufgrund von Unterschieden bei der Definition – zwischen verschiedenen Datensätzen häufig nicht vergleichbar ist. Darüber hinaus sind modellbasierte Schätzungen der Kronenansatzhöhe mit vergleichsweise großer Ungenauigkeit behaftet (vgl. 6.1.1). Es wird daher untersucht, ob der Bezug auf die Kronenansatzhöhe zur Beschreibung der Lichtkronenlänge vermieden werden kann. Die Lichtkronenlänge wird somit als Alternative zum oben beschriebenen Vorgehen im Verhältnis zur Baumhöhe (rlk_h) folgendermaßen definiert:

$$rlk_h = \frac{h - h_{maxkb}}{h} \quad (7)$$

Im Rahmen von Voruntersuchungen konnten keine signifikanten Zusammenhänge zwischen rlk_{kl} bzw. rlk_h und weiteren Einzelbaumgrößen gefunden werden, sodass die Größe für alle Bäume mithilfe artspezifischer Mittelwerte geschätzt wird.

Die beiden Verfahren zur Beschreibung der Lichtkronenlänge (relativ zur Kronenlänge oder relativ zur Baumhöhe) werden in Bezug auf ihre Eignung zur Schätzung der h_{maxkb} , die zum Aufbau von Modellkronen benötigt wird (5.1.4), verglichen. Als Kriterium dient die Streuung (Standardabweichung) der gemessenen h_{maxkb} um den Wert, der sich aus der geschätzten Lichtkronenlänge ergibt.

5.1.4 Repräsentation der Krone

Um die Krone in ihrer Ausdehnung auch im räumlichen Kontext zu betrachten, werden dreidimensionale Modellkronen benötigt. Im Rahmen von Wachstumssimulationen mit einer großen Zahl fortzuschreibender Bäume bieten sich individuenbasierte Modellkronen, die als stark abstrahierende umhüllende Formen der Krone zu verstehen sind, im Gegensatz zu detaillierteren Architekturmodellen an. Die hier verwendeten Modellkronen folgen der Unterteilung der Krone in Licht- und Schattenkrone (vgl. 3.4).

Es werden verschiedene dreidimensionale Modellkronenformen untersucht. Dabei werden Vertikalprofile verwendet, die den Kronenradius (r_{hx}) in Abhängigkeit von der Höhe innerhalb der Krone (hx) getrennt für Licht- und Schattenkrone wie folgt definieren:

$$r_{hx} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{r_{max}}{(h-h_{maxkb})^b} * (h-hx)^b & , \text{wenn } hx \geq h_{maxkb} \\ r_{max} + \frac{r_{max}}{ka-h_{maxkb}} * (h_{maxkb}-hx) & , \text{sonst} \end{array} \right\} \quad \text{für } h \geq hx \geq ka \quad (8)$$

Dabei ist r_{max} der maximale Kronenradius in einer bestimmten Himmelsrichtung wie er mittels Kronenablotung erhoben wird (horizontale Entfernung des Kronenrandpunktes vom Stamm bzw. vom Kronenmittelpunkt, vgl. 4.1), h die Baumhöhe, h_{maxkb} die Höhe der maximalen Kronenbreite, ka die Kronenansatzhöhe und b ein Formparameter. Es werden zwei Varianten definiert:

Die Standardvariante (Kronenprofil „*BWINPro*“) orientiert sich an der Kronenrepräsentation im Wachstumssimulator *BWINPro* (NAGEL 2009). Der Formparameter wird für alle Baumarten auf $b=0,5$ festgelegt. Für die Form der Lichtkrone wird damit bei horizontal symmetrischen Kronen ein quadratisches Paraboloid unterstellt. Die Höhe der maximalen Kronenbreite entspricht bei allen Baumarten einer einheitlichen Lichtkronenlänge von 66% der Gesamtkronenlänge.

In einer zweiten Variante (Kronenprofil „Artengruppe + kl“) wird der Formparameter differenziert nach Baumartengruppen in Anlehnung an Pretzsch (1992b, 2002) gutachtlich auf $b=0,33$ für alle Laubbaumarten, $b=1$ für Fichte und $b=0,5$ für die übrigen Nadelbaumarten festgelegt. Damit entspricht die Lichtkrone einer Fichte bei gleichem maximalen Kronenradius in alle Himmelsrichtungen einem Kegel. Die Form für die anderen Nadelbaumarten entspricht wie für alle Arten in der Standardvariante einem quadratischen und die für die Laubbaumarten einem kubischen Paraboloiden (Abbildung 15). Die Lichtkronenlänge wird in dieser Variante baumartspezifisch und relativ zur Kronenlänge und somit in Abhängigkeit von Kronenansatz- und Baumhöhe definiert (vgl. 5.1.3).

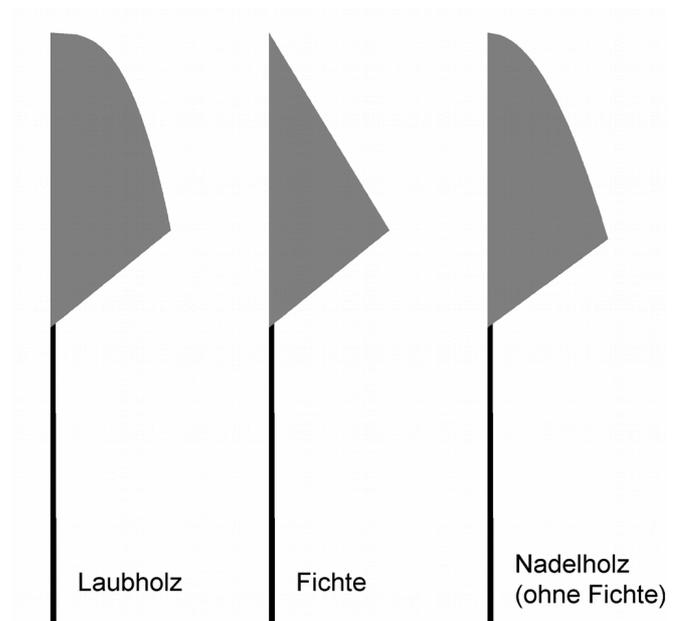


Abbildung 15: Unterschiedliche Form der Kronenprofile bei angenommener Lichtkronenlänge von 66% der Kronenlänge bzw. 33% der Baumhöhe (Kronenprofil „Artengruppe + kl“ bzw. „Artengruppe + h“). Für die Variante Kronenprofil „BWINPro“ wird baumartübergreifend das für Nadelholz abgebildete Vertikalprofil mit einer Lichtkronenlänge von 66% der Kronenlänge verwendet.

Die dritte Variante (Kronenprofil „Artengruppe + h“) unterscheidet sich nur in Bezug auf die Herleitung der Lichtkronenlänge von der vorhergehenden Variante und legt die Lichtkronenlänge ebenfalls baumartspezifisch aber relativ zur Baumhöhe fest (vgl. 5.1.3).

Innerhalb der Schattenkronen nimmt der Kronenradius für alle drei Varianten von r_{max} in der Höhe h_{maxkb} mit abnehmender Höhe linear ab und beträgt in Höhe des Kronenansatzes null.

Über die Form des Kronenprofils hinaus unterscheiden sich die untersuchten Modellkronen hinsichtlich der Form der Kronenschirmflächen. Zur Abbildung horizontal asymmetrischer Kronenformen werden die Modellkronen im Anhalt an die gemess-

5 Methoden

senen Größen (Kronenradien in acht Himmelsrichtungen, Baumhöhe und Kronenansatzhöhe) in acht Sektoren unterteilt (im Folgenden: *Kronenform asymmetrisch*), die jeweils verschiedene horizontale Ausdehnung besitzen können und so in der Lage sind horizontal asymmetrische Kronen näherungsweise darzustellen. Alternativ zu dieser horizontal differenzierten Abbildung werden horizontal symmetrische und über dem Stammfuß zentrierte Modellkronen verwendet (*Kronenform rund*) (Abbildung 16).

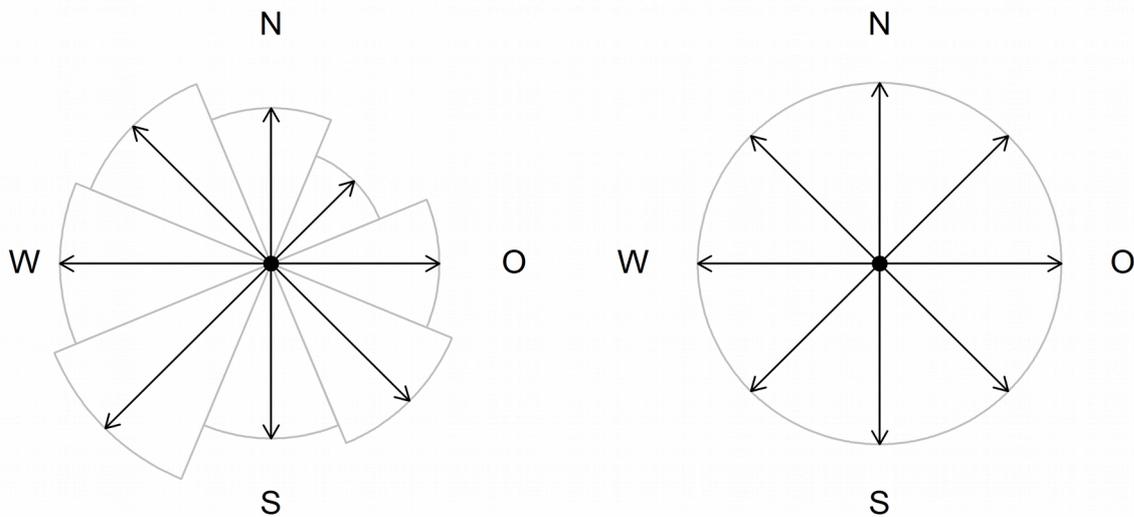


Abbildung 16: Kronenschirmfläche der Modellkronen aus acht Segmenten mit verschiedenen Radien (links) oder kreisförmig mit mittlerem Radius

5.1.5 Aufbau der individuellen Kronenform

Zum Aufbau der Modellkronen für einen Bestand werden für jeden Baum Eingangsdaten gemäß der beschriebenen Kronenrepräsentationen benötigt. Dazu gehören Baumhöhe, ggf. Kronenansatzhöhe und der mittlere Kronenradius für runde Kronenformen sowie Kronenradien in acht Richtungen für potentiell asymmetrische Kronenformen. Da Kronenablotungen nur in seltenen Fällen vorliegen, wird im Folgenden ein Verfahren zur Konstruktion der acht Radien für die Darstellung potentiell asymmetrischer Kronenformen vorgestellt. Die zu entwickelnden Modellkronen sind in ihrer Flexibilität an die gewählte Repräsentation der Kronen mithilfe der acht Segmente sowie der Unterteilung in Licht- und Schattenkrone gebunden (vgl. 5.1.4, Abbildung 17). Auf dieser Grundlage wird mithilfe eines iterativen Algorithmus (*Radienexpansion*) die konkrete Form der Kronenschirmfläche für die Modellkrone entwickelt. Eine Unterscheidung zwischen asymmetrischer Kronenform und exzentrischer Kronenlage ist aufgrund der Messmethodik nicht möglich, sodass hier beides zusammenfassend betrachtet wird.

Es hat sich gezeigt, dass die Kronenbreite mithilfe statistischer Modelle mit vergleichsweise niedriger Reststreuung vorhergesagt werden kann (6.1.2), sodass diese Größe für den Aufbau der Form als gegeben vorausgesetzt wird. Aus der Kronenbreite ergibt sich bei Unterstellung kreisrunder Kronenformen für jeden Baum die Größe der Ziel-Kronenschirmfläche, das heißt die Größe der Kronenschirmfläche, die nach Abschluss des Kronenaufbaus erreicht werden soll.

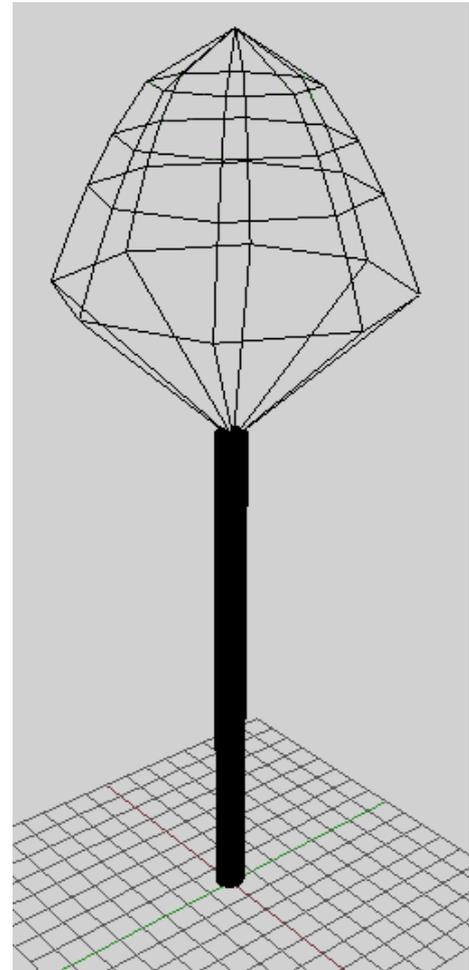


Abbildung 17: Modellkrone mit acht Sektoren und beispielhafter Darstellung der Kronenschnittfläche in verschiedenen Höhen

Die Ergebnisse von Untersuchungen der Kronenmorphologie zeigen, dass die meisten Kronen in ihrer horizontalen Ausdehnung mehr oder weniger asymmetrisch ausgeprägt sind und dass diese Form zwar durch zahlreiche Faktoren beeinflusst wird, die direkte Nachbarschaft und das richtungsspezifische Licht- und Raumangebot im Kronenraum jedoch eine übergeordnete Rolle spielen (3.3). Vor dem Hintergrund einer möglichst großen individuellen Lichtzufuhr erscheint eine Kronenausdehnung insbesondere in Bereiche geringer Konkurrenz vorteilhaft. Das Verfahren der Radienexpansion bildet dies vereinfachend ab, indem die Kronenausdehnung in jeder Richtung von den Kronenteilen benachbarter Bäume beeinflusst wird, die in gleicher oder größerer Höhe angesiedelt sind: Jeder Baum „versucht“, seine Krone in unbesetzte und unüberschirmte Bereiche auszudehnen. Um extreme Kronenformen zu vermeiden, wird eine artspezifische maximale Asymmetrie unterstellt, die für jeden Baum eingehalten werden muss.

Anders als die Kronendimensionen kann die räumliche Ausprägung der Kronen somit nicht durch die isolierte Betrachtung von Einzelbäumen hergeleitet werden, da sie wesentlich von Größe und räumlicher Verteilung der Nachbarkronen abhängt. Es ist daher eine bestandesweise Betrachtung erforderlich, die die Position der Nachbarn jedes Baumes berücksichtigt. Für Individuen am Bestandesrand sind die Nachbarn außerhalb des Bestandes unbekannt. Um in diesen Fällen Randeffekte auf die Kronenausformung zu vermeiden, können Randbäume generiert werden, die als imaginäre Nachbarn für die äußeren Bestandesbäume dienen (5.1.7).

Der Kronenaufbau mittels Radienexpansion ordnet zunächst jedem Baum eine Minimalkrone zu, deren acht Kronenradien schrittweise gestreckt werden mit dem Ziel am Ende die vorgegebene Ziel-Kronenschirmfläche zu erreichen. Folgende Schritte werden nacheinander ggf. wiederholt ausgeführt:

1. Aufbau einer Minimalkrone

Für jeden Baum eines Bestandes wird zunächst mit acht gleichen Kronenradien von je 0,1 m Länge eine horizontal symmetrische Minimalkrone aufgebaut. Die Länge der Krone und daraus in Kombination mit der Baumhöhe die Kronenansatzhöhe ergeben sich als Vorhersage des statistischen Modells

(5.1.1). Die Höhe der Grenze zwischen Licht- und Schattenkrone richtet sich nach dem verwendeten Kronenprofil (5.1.4).

2. Schrittweise Streckung der Radien

Beginnend beim stärksten Baum erfolgt für alle Bäume wiederholt eine schrittweise Streckung jedes einzelnen Radius, wenn

- a) die Kronenausdehnung nicht zu einer Kollision mit bereits vorhandenen Nachbarkronen führt,
- b) die Ziel-Kronenschirmfläche noch nicht erreicht ist und
- c) die artspezifisch definierte maximale horizontale Asymmetrie der Krone (5.1.6) nicht überschritten wird.

Zur Überprüfung auf Kollisionen zwischen den Kronen erfolgt ein Abgleich des potentiellen neuen Kronenrandpunktes mit allen Nachbarkronen in der bis dahin erreichten Ausdehnung. Als Kollision wird dabei sowohl die räumliche Überlappung mit einer bestehenden Krone als auch die Überlappung mit Bereichen, die bereits von einer Nachbarkrone überschirmt werden, gewertet. Zur Ermittlung möglicher Kollisionen wird die Kronenschnittfläche jedes Nachbarn in Höhe der maximalen Kronenbreite des Zentralbaumes berechnet. Die Kronenschnittfläche wird vereinfachend als Polygon aus den Kronenrandpunkten, die sich aus den acht Radien in der entsprechenden Höhe ergeben, gebildet. Befindet sich die maximale Kronenbreite des Zentralbaumes unterhalb der maximalen Kronenbreite des betrachteten Nachbarbaumes so wird die Kronenschnittfläche in Höhe der maximalen Breite des Nachbarbaumes verwendet. Kollisionen können also nur mit benachbarten Kronenteilen auftreten, die sich in Höhe der maximalen Kronenbreite des Zentralbaumes oder darüber befinden. Fällt der potentiellen neue Kronenrandpunkt des Zentralbaumes in dieses Polygon der Kronenschnittfläche, wird dies als Kollision gewertet und die Radienexpansion unterbleibt für die betrachtete Richtung.

3. Korrektur der Radien

Abschließend werden alle Radien gewichtet mit ihrer Länge gestreckt bzw. gestaucht damit die exakte Ziel-Kronenschirmfläche erreicht wird. Eine Ausdehnung der Krone ist bei diesem Schritt unabhängig von möglichen Nachbarkronen, sodass einander überlappende Modellkronen entstehen können.

Ergebnis dieses Prozesses sind einfache positions- und nachbarschaftssensitive Kronenformen. Diese können in Wachstumssimulationen nach einem ähnlichen Verfahren fortgeschrieben werden. Zur grafischen Darstellung der Kronenschirmflächen werden die aus den acht Kronenrandpunkten gebildeten Polygone mithilfe kubischer Splines geglättet.

5.1.6 Beschränkung der horizontalen Asymmetrie

Die horizontale Asymmetrie einer Krone wird auf Basis von Kronendurchmessern definiert. Aus den acht gemessenen Kronenradien werden vier Kronenbreiten berechnet. Die horizontale Asymmetrie (*asym*) ergibt sich aus der größten Kronenbreite (kb_{max}) im Verhältnis zu der dazu senkrechten Kronenbreite (kb_{orth}) (Abbildung 18):

$$asym = \frac{kb_{max}}{kb_{orth}} \quad (9)$$

Voruntersuchungen weisen auf einen Zusammenhang der horizontalen Asymmetrie mit der Baumdimension hin. Da die Datengrundlage überwiegend aus bewirtschafteten Beständen stammt, ist anzunehmen, dass die abnehmende Asymmetrie mit zunehmender Baumdimension ein Effekt einer ggf. wiederholten Freistellung im Rahmen von Durchforstungsmaßnahmen ist. Um diesen Pflegeeffekt nicht von vornherein für alle Bestände vorzugeben, wird auf eine Beschreibung der Asymmetrie

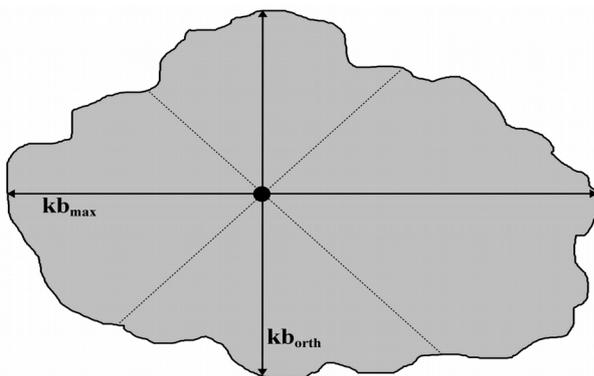


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Berechnung der Asymmetrie als Verhältnis zwischen der größten Kronenbreite kb_{max} und der dazu senkrechten Kronenbreite kb_{orth}

auf eine Beschreibung der Asymmetrie

in Abhängigkeit von der Baumdimension verzichtet. Statt dessen werden einfache baumartspezifische Obergrenzen definiert. Als Obergrenze für realistische Kronenformen in Bezug auf die horizontale Asymmetrie wird baumartspezifisch jeweils das 95%-Quantil der Asymmetrie (Gleichung 9) der abgeloteten Kronen definiert.

5.1.7 Generierung von Randbäumen

Der Aufbau der Kronenform erfolgt in Abhängigkeit von Nachbarkronen. Um Randeffekte auf die Kronenausformung zu vermeiden, die darauf beruhen, dass die Bäume jenseits der Parzellengrenze unbekannt sind, und um dennoch einen Kronenaufbau für ganze Bestände zu ermöglichen, werden auf einem 10 m breiten Randstreifen um jede Parzelle herum Bäume generiert, deren Kronen die Modellkronen der äußeren Parzellenbäume beeinflussen.

Die Bestockung des Randstreifens wird mithilfe der *BWINPro*-Routine zur Generierung neuer Bestände (NAGEL 2009) erzeugt und entspricht in Bezug auf Baumart(en), Grundfläche, den mittleren und maximalen BHD und die Mittelhöhe den Bestockungsverhältnissen der eigentlichen Versuchsfläche (Abbildung 19).

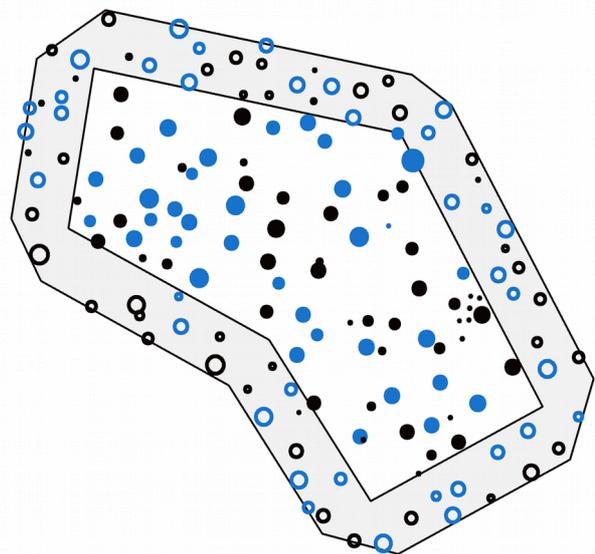


Abbildung 19: Versuchsparzelle (weißer Hintergrund) mit einem Bestand aus zwei Baumarten (blaue und schwarze Kreise mit Radius relativ zum BHD) und Randstreifen (grauer Hintergrund) mit generierten Randbäumen der beiden Baumarten (blaue und schwarze Ringe)

5.1.8 Validierung

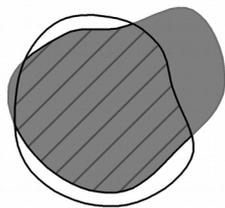
Zur Validierung der erstellten Modellkronen werden diese mit Ergebnissen von Kronenablotungen verglichen. Der Vergleich bezieht sich explizit auf Form und räumliche Lage der Kronenschirmfläche und nicht auf deren Dimension. Daher wird in diesem Fall – abweichend von dem oben beschriebenen Verfahren zur Kronen-

konstruktion – die aus den Ablotungen berechnete Größe der Kronenschirmfläche als Zielgröße für die Radienexpansion als bekannt vorgegeben.

Der Vergleich zielt zunächst auf die Form der Kronenschirmfläche. Dabei soll untersucht werden, ob das Verfahren der Kronenkonstruktion mittels Radienexpansion in der Lage ist, die beobachtete asymmetrische Form der Kronenschirmflächen nachzubilden. Dazu wird die Asymmetrie der Kronenschirmfläche (Verhältnis zwischen größter Kronenbreite zur dazu senkrecht gemessenen Kronenbreite) aus Ablotungen mit der aus Modellkronen berechneten Asymmetrie verglichen.

In einem weiteren Schritt wird die räumliche Übereinstimmung der Kronenschirmflächen von Modellkronen mit Kronenschirmflächen aus Kronenablotungen ausgewertet. Dies geschieht sowohl auf Ebene von Einzelbäumen als auch für den Gesamtbestand.

Aus Ablotungen und Modellkronen werden jeweils mittels kubischer Splines glatte Kronenumrisse erstellt. Die Fläche dieser Kronenumrisse wird im Folgenden als



Kronenschirmfläche

- Modell
- gemessen
- ▨ Überschneidung

Abbildung 20: Schematische Darstellung der Überschneidung der gemessenen mit der konstruierten Kronenschirmfläche

gemessene bzw. konstruierte Kronenschirmfläche bezeichnet. Anschließend wird für jeden Baum der Anteil der gemessenen Kronenschirmfläche $a_{schnitt}$ in Prozent berechnet, der sich mit der konstruierten Kronenschirmfläche überschneidet (Abbildung 20).

Als Vergleichsmaßstab dienen jeweils gleich große über dem Stammfuß zentrierte runde Kronen, deren Kronenschirmfläche sich in alle Richtungen gleich weit ausdehnt. Für diese wird ebenfalls der deckungsgleiche Anteil mit der gemessenen Kronenschirmfläche $a_{schnitt}$ berechnet. Je größer die Werte für $a_{schnitt}$ desto

besser beschreiben die Schirmflächen der Modellkronen die Messwerte. Gleichzeitig zeigt der Vergleich mit runden Kronen, ob das Verfahren in der Lage ist, die Richtung einer Mehr- bzw. Minderausdehnung der Krone im Verhältnis zur mittleren Ausdehnung richtig vorherzusagen.

Jenseits von der Beschreibung von Einzelkronen ist es wünschenswert, die Überschirmung (bzw. die unüberschirmte Fläche) von Beständen richtig einschätzen zu können, da diese unter Verwendung von runden über dem Stammfuß zentrierten Kronenschirmflächen systematisch zu niedrig eingeschätzt wird (vgl. 1). Bei der Validierung auf Bestandesebene soll daher überprüft werden, ob die Gesamtüberschirmung bzw. die unüberschirmte Bestandesfläche mithilfe der Modellkronen treffend vorhergesagt werden kann. Als Vergleichsmaßstab dient die unüberschirmte Bestandesfläche, die sich aus der Bestandesfläche abzüglich der Vereinigungsmenge der Kronenschirmflächen (Bestandesfläche, die von mindestens einer Krone überschirmt ist) ergibt. Die unüberschirmte Bestandesfläche wird erstens mithilfe der potentiell asymmetrischen Kronenschirmflächen, zweitens mithilfe konzentrischer runder Kronenschirmflächen und drittens mithilfe gemessener Kronenschirmflächen berechnet und verglichen. Dies soll die in anderen Untersuchungen festgestellte systematische Unterschätzung der unüberschirmten Bestandesfläche durch die Annahme runder Kronenformen (z.B. GUERICKE 2001) überprüfen und zeigen, ob die Messwerte mithilfe der potentiell asymmetrischen Modellkronen treffender abgebildet werden können.

5.2 Krone und Zuwachs

Nach der Erstellung der Modellkronen sollen diese in ihrer Eignung für die Prognose des fünfjährigen Grundflächenzuwachs (*ig*) untersucht werden. In der Literatur wird die Zuwachsleistung des Stammes häufig anhand des Grundflächenzuwachses beschrieben, da dieser in seiner biologischen Aussagefähigkeit höher bewertet wird als beispielsweise der Durchmesserzuwachs (WYKOFF 1990; PRETZSCH 1992b; BIBER 1996; MONSERUD & STERBA 1996; NAGEL 1999; GUERICKE 2001), für den die jeweils beziferte Zuwachsleistung vom Ausgangszustand abhängt: So ist eine bestimmte Durchmesserzunahme bei einem starken Baum mit einer höheren Biomassezunahme verbunden als bei einem geringer dimensionierten Stamm. Ausgehend von einem in Anlehnung an bereits bestehende Modelle definierten Ausgangsmodell (Referenzmodell, 5.2.1) werden mehrere Gruppen von Variablen z.T. unter Verwendung verschiedener Modellkronen-Varianten als Prädiktoren getestet. Das Ergebnis dieser Variablenselektion führt zu baumartspezifischen Zuwachsmodellen (5.2.2), die sich

jedoch zwischen den Baumarten sowie im Hinblick auf die Modellkronen-Varianten unterscheiden können. Zur Vereinfachung der Anwendung werden die Modelle daher im Anschluss vereinheitlicht und ggf. vereinfacht (einheitliches Zuwachsmmodell, 5.2.3).

Für die Parametrisierung der Zuwachsmmodelle werden ausschließlich nach 5.1.1 und 5.1.2 modellierte Kronenlängen und -breiten sowie nach 5.1.3 geschätzte Lichtkronenlängen verwendet, da davon auszugehen ist, dass für die Anwendung der Modelle im Rahmen von Wachstumssimulationen wegen häufig nicht verfügbarer Messwerte in der Regel ebenfalls Modellwerte verwendet werden müssen.

5.2.1 Referenzmodell

Die Grundlage für die Beschreibung des Einzelbaum-Grundflächenzuwachses bildet ein Referenzmodell, das in Anlehnung an das derzeit verwendete Zuwachsmmodell des Wachstumssimulators *BWINPro* (NAGEL 2009) definiert wird. Das verwendete Modell entspricht einem verallgemeinerten linearen Modell mit logarithmischer Verknüpfungsfunktion, mit dem sich der fünfjährige Grundflächenzuwachs auf Einzelbaumebene schätzen lässt. Wie im Falle der Modelle zur Schätzung von Kronenlänge und -breite handelt es sich auch bei den Zuwachswerten um Daten, die aggregiert in Parzellen und zu einheitlichen Aufnahmezeitpunkten erfasst werden, woraus in der Modellbildung eine Verletzung der Unabhängigkeitsannahme resultiert. Somit ist die Berücksichtigung der Korrelationsstrukturen über die Schätzung entsprechender Zufallseffekte erforderlich. Das Modell wird daher um entsprechende Zufallseffekte auf Parzellen- und Aufnahmeebene erweitert.

Die verwendete logarithmische Verknüpfungsfunktion bietet den Vorteil, dass das Modell ausschließlich einen grundsätzlich plausiblen positiven Zuwachs vorhersagt. Nachteil ist jedoch, dass auch für die Parametrisierung nur positive Werte verwendet werden können. Da der Datensatz neben Null-Zuwächsen auch (vermutlich auf Messfehler zurückzuführende) negative Zuwächse enthält, müssen die Werte transformiert werden. Als Zielgröße des Modells wird somit ein positiver fünfjähriger Grundflächenzuwachs (*igpos*) verwendet, der sich durch Addition einer Konstanten ergibt:

$$igpos_i = ig_i + igmin \quad (10)$$

Dabei bezeichnet $igpos_i$ den transformierten fünfjährigen Grundflächenzuwachs des Baumes i , ig_i den fünfjährigen Grundflächenzuwachs des Baumes i und $igmin$ eine baumartspezifische ganzzahlige Konstante, die möglichst gering und so gewählt wird, dass sich nur positive Werte für alle $igpos_i$ ergeben (Tabelle 5).

Voruntersuchungen zeigen Probleme bei der Erwartungstreue des Modells (s. Anhang 12.3.1), weshalb eine Überprüfung der Modelleffekte auf Nicht-Linearität sinnvoll erscheint. Es wird daher ein verallgemeinertes additives gemischtes Modell (GAMM) verwendet, dessen allgemeine Form sich wie folgt beschreiben lässt:

$$\log(E[y_{ijk}]) = \alpha + f_1(x_{1ijk}) + \dots + f_n(x_{nijk}) + Z_i * b_i + Z_{ij} * b_{ij} \quad (11)$$

$$y_{ijk} \sim \text{Gamma} \text{ und } b = (b_i, b_{ij}) \sim N(0, G)$$

y_{ik}	Zielgröße des Modells am Baum k der Parzelle i zum Aufnahmezeitpunkt j
α	globales Interzept
$x_{1ijk} \dots x_{nijk}$	erklärende Variablen
$f_1(\cdot) \dots f_n(\cdot)$	glättende Funktionen, die als penalisierte „thin plate“-Regressionssplines spezifiziert werden
Z_i	Design-Matrix der Zufallseffekte der Parzelle i
$b_i = (b_{i0}, b_{i1})$	Vektor der Zufallseffekte der Parzelle i
Z_{ij}	Design-Matrix der Zufallseffekte der Aufnahme j innerhalb der Parzelle i
$b_{ij} = (b_{ij0}, b_{ij1})$	Vektor der Zufallseffekte der Aufnahme j innerhalb der Parzelle i
G	Positiv definite Kovarianzmatrix

Das Referenzmodell beschreibt den Grundflächenzuwachs in Abhängigkeit von der Kronenmantelfläche, dem Alter, dem Kronenkonkurrenzindex (Berechnung s. 5.2.2), einem Freistellungsindex sowie den genannten Zufallseffekten auf Parzellen- und

Aufnahmeebene. Die Zufallseffekte auf Parzellenebene können so interpretiert werden, dass sie die Effekte aller nicht bekannten oder nicht ausreichend erfassten Bestandesparameter und Standortvariablen (Boden, Klima usw.) subsummieren. Das Modell kann somit folgendermaßen beschrieben werden:

$$\log(E[igpos_{ijk}]) = \alpha + f_1(km_{ijk}) + f_2(alt_{ijk}) + f_3(k_{ijk}) + f_4(\Delta k_{ijk}) + b_i + b_{ij} \quad (12)$$

$$igpos_{ijk} \sim Gamma \quad \text{und} \quad b = (b_i, b_{ij}) \sim N(0, G)$$

wobei *km* die Kronenmantelfläche, *alt* das Alter, *k* den Kronenkonkurrenzindex und Δk den Freistellungsindex bezeichnet (allgemeine Bezeichnungen s. Erläuterung zu Gleichung 12). Die Kronenmantelfläche *km* wird nach Nagel (2009) als Oberfläche eines quadratischen Paraboloiden zwischen Baumhöhe und Kronenansatzhöhe berechnet.

5.2.2 Baumartspezifische Zuwachsmodelle

In Anlehnung an dieses Referenzmodell werden vier Gruppen von erklärenden Variablen für die Zuwachsprognose getestet:

1. Größen zur Beschreibung der **Dimension** des Baumes: Zu dieser Gruppe gehören die Kronenmantelfläche (*km*), die Lichtkronenmantelfläche (*lkm*), die entsprechend der unterstellten Kronenform zwischen der Baumhöhe und der Höhe der maximalen Kronenbreite berechnet wird, und der BHD. Die Variablen dieser Gruppe sind eng korreliert, sodass zunächst jeweils nur ein Element dieser Gruppe in das Modell aufgenommen wird.
2. Maße zur Charakterisierung der **Konkurrenzsituation**: Das Referenzmodell beschreibt die Konkurrenzverhältnisse mithilfe des Kronenkonkurrenzindex (*k*). Dieser ergibt sich aus der Summe der Kronenquerschnittsflächen aller Bäume innerhalb einer Einflusszone (Kreis mit Radius

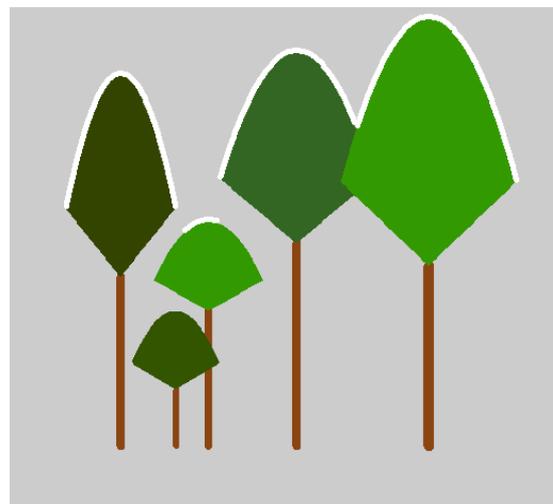


Abbildung 21: Schirmfreie Kronenmantelfläche (weiß markiert) - schematische Darstellung

doppelter Kronenbreite) um den Bezugsbaum in Höhe der maximalen Kronenbreite des Bezugsbaumes. Als Alternative wird der schirmfreie Anteil der Kronenmantelfläche (Abbildung 21) an der Kronenmantelfläche des Einzelbaumes (*asfm*) aus den Modellkronen hergeleitet und als Prädiktor getestet.

3. Beschreibung der **Freistellung**: Um eine Behandlungssensitivität des Modells zu erreichen ist die Berücksichtigung einer Größe zur Beschreibung der Konkurrenzänderung (z.B. infolge einer Durchforstung) erforderlich. Diese ergibt sich als Differenz der Konkurrenz vor dem Eingriff abzüglich der Konkurrenz nach dem Eingriff. In Bezug auf die beiden verwendeten Konkurrenzindikatoren ist dies die Änderung des Kronenkonkurrenzindex (Δk) und des Anteils der schirmfreien Kronenmantelfläche ($\Delta asmf$).
4. **Weitere** wichtige Größen: Neben den bereits genannten Einflussfaktoren werden auch Alter und Baumhöhe berücksichtigt. Darüber hinaus wird nach Auswahl der übrigen Variablen die Berücksichtigung einer zweiten Dimensionsgröße, also z.B. der *lkm* wenn bereits der BHD eingeht oder des BHD, wenn die *lkm* unter 1. ausgewählt wurde, getestet.

Für Größen, die auf der Grundlage von Kronenparametern berechnet werden (*lkm* und die Variablen der Gruppen 2 und 3), werden verschiedene Varianten getestet, für die unterschiedliche Modellkronen unterstellt werden (Tabelle 6). Die Modellkronen unterscheiden sich in Bezug auf die Schätzung der Eingangsgrößen Kronenlänge und Kronenbreite und hinsichtlich der unterstellten Kronenform (rund oder potentiell asymmetrisch) und des Kronenprofils (5.1.4). Die Eingangsgrößen werden mittels der beschriebenen Modelle (GLMM bzw. GAMM, Gleichung 1 und 2 bzw. 4) geschätzt oder alternativ mit den im Wachstumssimulator *BWINPro* verwendeten Modellen (Gleichung 3 bzw. 5) vorhergesagt.

Die näherungsweise Parameterschätzung für die Modelle erfolgt mittels „Penalized Quasi Likelihood“ (PQL), sodass „Likelihood“-basierte Methoden zur Modellselektion wie der AIC nicht verwendet werden können (WOOD 2006). Statt dessen könnte die Signifikanz der einzelnen Variablen als Kriterium dienen. Auf diese Weise kann jedoch nicht entschieden werden, welche Variante einer Variablen (z.B. lkm_{A11} oder lkm_{B13}) für die Zuwachsbeschreibung besser geeignet ist, wenn der Einfluss auf die

5 Methoden

Tabelle 6: Bezeichnung der Varianten von Modellkronen

Bezeichnung	Kronenlänge u. Kronenbreite		Kronenform		Kronenprofil	
A11	A	BWINPro	1	rund	1	BWINPro
A22	A	BWINPro	2	asymmetrisch	2	Artengruppe + kl
B11	B	GLMM bzw. GAMM	1	rund	1	BWINPro
B12	B	GLMM bzw. GAMM	1	rund	2	Artengruppe + kl
B13	B	GLMM bzw. GAMM	1	rund	3	Artengruppe + h
B22	B	GLMM bzw. GAMM	2	asymmetrisch	2	Artengruppe + kl
B23	B	GLMM bzw. GAMM	2	asymmetrisch	3	Artengruppe + h

Zielgröße für beide signifikant ist. Zur Variablenselektion werden daher zunächst vereinfachte Modelle ohne Zufallseffekte (GAM) angepasst, für die der AIC korrekt berechnet werden kann. Der AIC dient als Kriterium für die Wahl zwischen Modellen mit verschiedenen erklärenden Variablen. Das Verfahren unterstellt, dass die Zufallseffekte die Entscheidung zwischen den Variablen einer Gruppe (Dimension, Konkurrenz usw.) nicht beeinflussen.

Ausgehend von dem beschriebenen Referenzmodell wird nach einem im Hinblick auf die Variablenselektion optimalen Modell für die Zuwachsprognose gesucht. Dafür werden die Prädiktoren des Referenzmodells nacheinander durch die alternativen Variablen in der entsprechenden Gruppe ausgetauscht und beibehalten, wenn sich dadurch eine Modellverbesserung (AIC, biologisch plausibler Verlauf der Effekte) ergibt. In der Gruppe 2 wird zunächst nach dem besten Konkurrenzindikator gesucht, anschließend wird der zusätzliche Nutzen einer weiteren Variablen aus dieser Gruppe untersucht. Aufgrund des im Vergleich zu den anderen Größen geringen Einflusses der Freistellungsvariablen wird für diese Gruppe nur die wichtigste Variable berücksichtigt. Anschließend werden Alter und/oder Baumhöhe als Prädiktoren untersucht.

Nach Abschluss der Variablenselektion werden die jeweils ausgewählten Modelle erneut unter Berücksichtigung von Zufallseffekten (GAMM) auf Ebene von Parzelle und Aufnahme angepasst und nicht signifikante Prädiktoren und solche mit unplausiblem Verlauf der Effekte ggf. entfernt.

5.2.3 Einheitliches Zuwachsmodell

Die Ergebnisse der baumartspezifischen Variablenselektion können zu Ergebnissen führen, die sich zwischen den Baumarten unterscheiden. So kann eine Variable für eine Baumart in das Modell aufgenommen werden, während sie für eine andere Baumart durch eine andere Variable ersetzt oder ganz verworfen wird. Darüber hinaus können Unterschiede im Hinblick auf die am besten beurteilte Variante einer Variablen auftreten. Selbst innerhalb eines Modells können Variablen ausgewählt werden, die auf verschiedenen Modellkronen-Varianten basieren. Zur Vereinfachung der Anwendung im Rahmen von Wachstumssimulationen ist es jedoch sinnvoll, eine einheitliche Variante der Kronenrepräsentation (z.B. runde oder potentiell asymmetrische Kronenformen als Berechnungsgrundlage für alle kronenbasierten Variablen) zu verwenden. Auch eine Vereinheitlichung der Modelle in Bezug auf die verwendeten Variablen (z.B. Kronenmantelfläche oder BHD für alle Baumarten) erscheint wünschenswert um die Simulationsergebnisse leichter interpretieren zu können. Auf Grundlage der baumartspezifischen Modelle sollen daher in Bezug auf die verwendeten Variablen und die zugrundeliegende Kronenrepräsentation einheitliche Modelle für alle Baumarten entwickelt werden.

Die Vereinheitlichung der Modelle orientiert sich insbesondere in Bezug auf die Auswahl der berücksichtigten Variablen an den baumartspezifischen Modellen und erfolgt mit dem Ziel einer möglichst plausiblen und anschaulichen Abbildung der Kronen, die aber auch möglichst einfach und stabil im Hinblick auf die Anwendung im Rahmen von Wachstumssimulationen sein soll.

Da ein direkter Vergleich der zur Vereinheitlichung veränderten Modelle mit den baumartspezifischen Modellen etwa anhand eines mittleren Fehlers beider Modelle aufgrund der Modellstruktur wenig aussagekräftig ist, werden die Differenzen zwischen den Vorhersagen beider Modelle zur ungefähren Einordnung der Unterschiede verwendet.

6 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Modelle zur Beschreibung der Kronenlänge und Kronenbreite sowie weiterer Kroneneigenschaften dargestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Kronenkonstruktion erläutert und deren Verwendung im Rahmen der Zuwachsprognose beschrieben.

6.1 Modellkronen

6.1.1 Kronenlänge

Auf der ersten Stufe gehen in das Modell zur Schätzung der Kronenansatzhöhe erklärende Variablen auf der Einzelbaumebene sowie auf Parzellen- bzw. Inventurpunkt-Ebene ein.

Von den Einzelbaumvariablen haben d , h und alt bei allen untersuchten Baumarten einen hochsignifikanten ($p < 0,001$) Einfluss auf den Bekronungsgrad. Darüber hinaus liefert auch die räumliche Trendfunktion, die die Veränderung der Zielgröße mit der geografischen Lage (rw und hw) beschreibt, einen hochsignifikanten Erklärungsbeitrag. Die Geländehöhe hnn wird nur für die Baumart Buche als erklärende Variable in das Modell aufgenommen. Für die übrigen Baumarten sind die resultierenden Effekte nicht signifikant oder unplausibel. Der ebenfalls als Prädiktor getestete $reld100$ wird verworfen, da die erreichte marginale Verbesserung des Modells Aufwand und Unsicherheit bei der Berechnung dieser Größe nicht gerechtfertigt erscheinen lassen. Neben den rein additiven Effekten der Prädiktoren werden auch Wechselwirkungen zwischen den erklärenden Variablen untersucht, jedoch aufgrund geringer Modellverbesserung sowie teilweise unplausibler Effekte ebenfalls nicht in die Modelle aufgenommen. Alle einbezogenen Effekte sind nicht-linear. Das resultierende Modell lässt sich folgendermaßen beschreiben:

Buche:

$$p = \text{logit}(E[bg_{ijk}]) = \alpha + f_1(d_{ijk}) + f_2(h_{ijk}) + f_3(alt_{ijk}) + f_4(hnn_i) + f_5(rw_i, hw_i) \quad , \quad (13)$$

$bg_{ijk} \sim \text{Quasibinomial}$

Übrige Baumarten:

$$p = \text{logit}(E[bg_{ijk}]) = \alpha + f_1(d_{ijk}) + f_2(h_{ijk}) + f_3(alt_{ijk}) + f_4(rw_i, hw_i) \quad , \quad (14)$$

$bg_{ijk} \sim \text{Quasibinomial}$

Die Effekte der einzelnen Variablen zeigen jeweils einen biologisch plausiblen Verlauf und sind für alle Baumarten grundsätzlich ähnlich (Abbildungen 22 bis 27). Es ist zu beachten, dass jeweils die erklärenden Variablen auf der Abszisse gegen die abstrakten Effekte auf der Ebene der logittransformierten Zielgröße auf der Ordinate aufgetragen sind. Die Ordinaten sind für die einzelnen Effekte zur besseren Übersicht verschieden skaliert. Die Markierungen entlang der Abszisse („rugs“) zeigen jeweils die Verteilung der Messwerte. Die Abbildungen lassen sich wie folgt interpretieren: Mit steigendem Durchmesser nimmt der Bekronungsgrad bei allen Baumarten zu. Gleichzeitig sinkt der Bekronungsgrad eines Baumes bei gegebenem Durchmesser mit der Baumhöhe. Das Modell schätzt für einen Baum bei gegebener Dimension (BHD und Baumhöhe) Bekronungsgrade, die mit zunehmendem Alter abnehmen. Im Umkehrschluss wird für langsam gewachsene Bäume ein niedrigerer Bekronungsgrad vorhergesagt als für Bäume die dieselbe Dimension schneller erreicht haben. Für die Effekte von BHD, Baumhöhe und Alter zeigt der Verlauf zunächst hohe Veränderungsraten, die mit zunehmenden Werten der Prädiktoren abnehmen. Im Bereich hoher BHD, Baumhöhen und Alter führt eine Zunahme dieser Werte kaum noch zu Änderungen des geschätzten Bekronungsgrades.

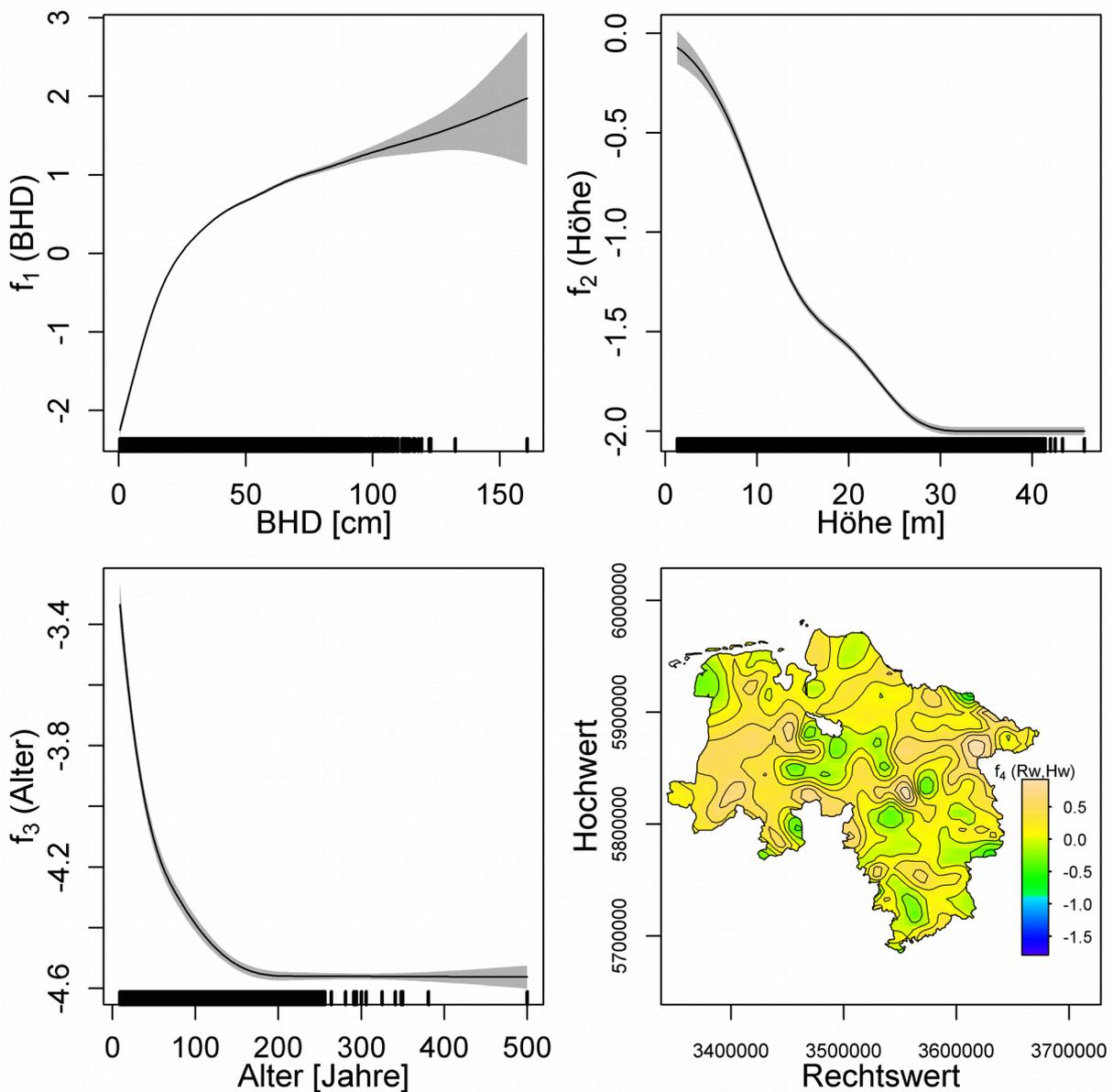


Abbildung 22: Effekte der erklärenden Variablen auf den Bekronungsgrad der Eichen

Für die Baumart Buche wirkt sich die Geländehöhe hochsignifikant auf den Bekronungsgrad aus. Dieser nimmt bis zu einer Höhe von rund 400 m über NHN mit der Geländehöhe ab. Weiter zunehmende Geländehöhen lassen keinen zusätzlichen Effekt auf den Bekronungsgrad mehr erkennen (Abbildung 23). Der räumliche Trend des Bekronungsgrades spiegelt die örtliche Variation des Bekronungsgrades im Bereich des Landes Niedersachsen wieder.

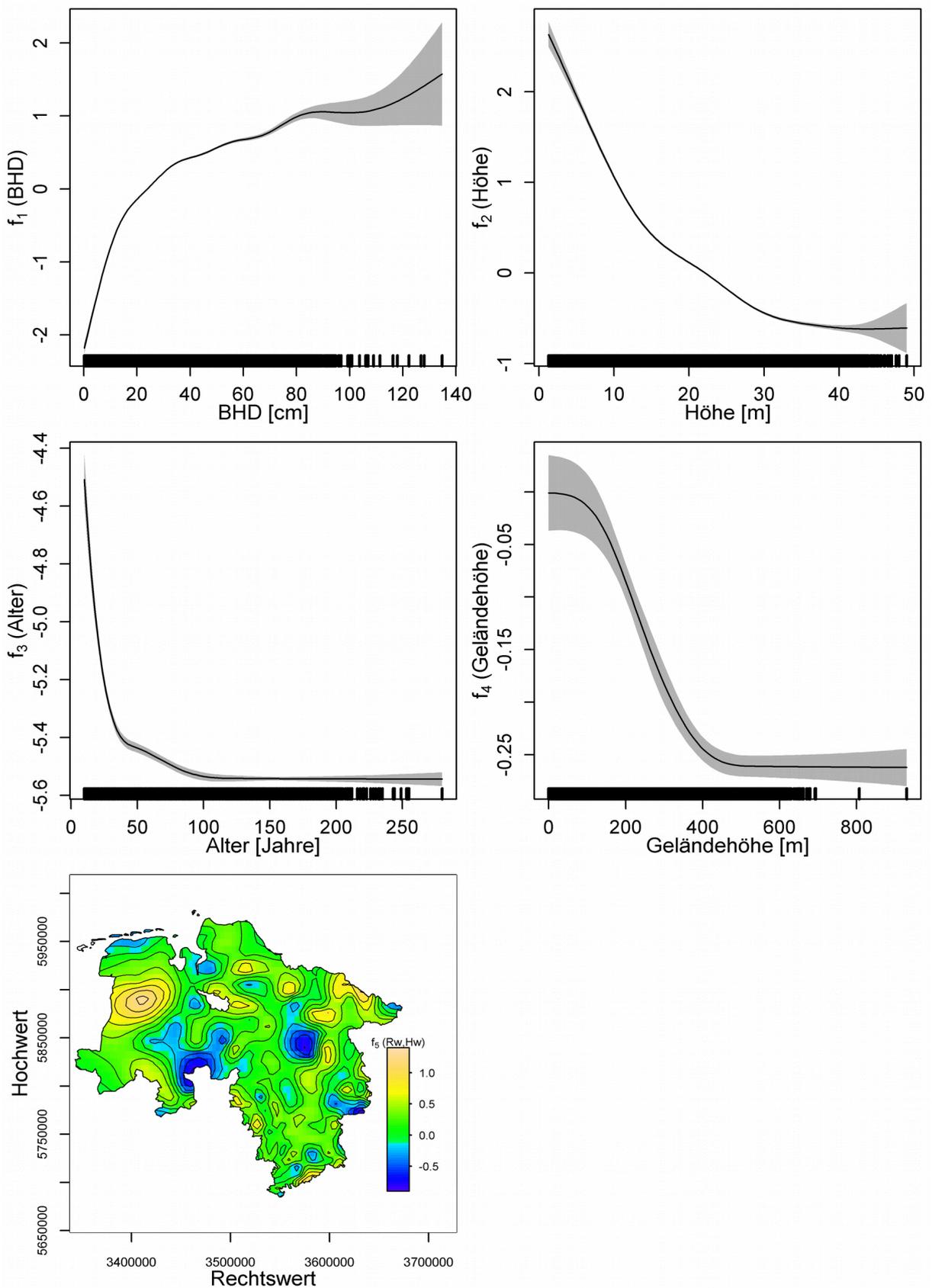


Abbildung 23: Effekte der erklärenden Variablen auf den Bekronungsgrad der Buche

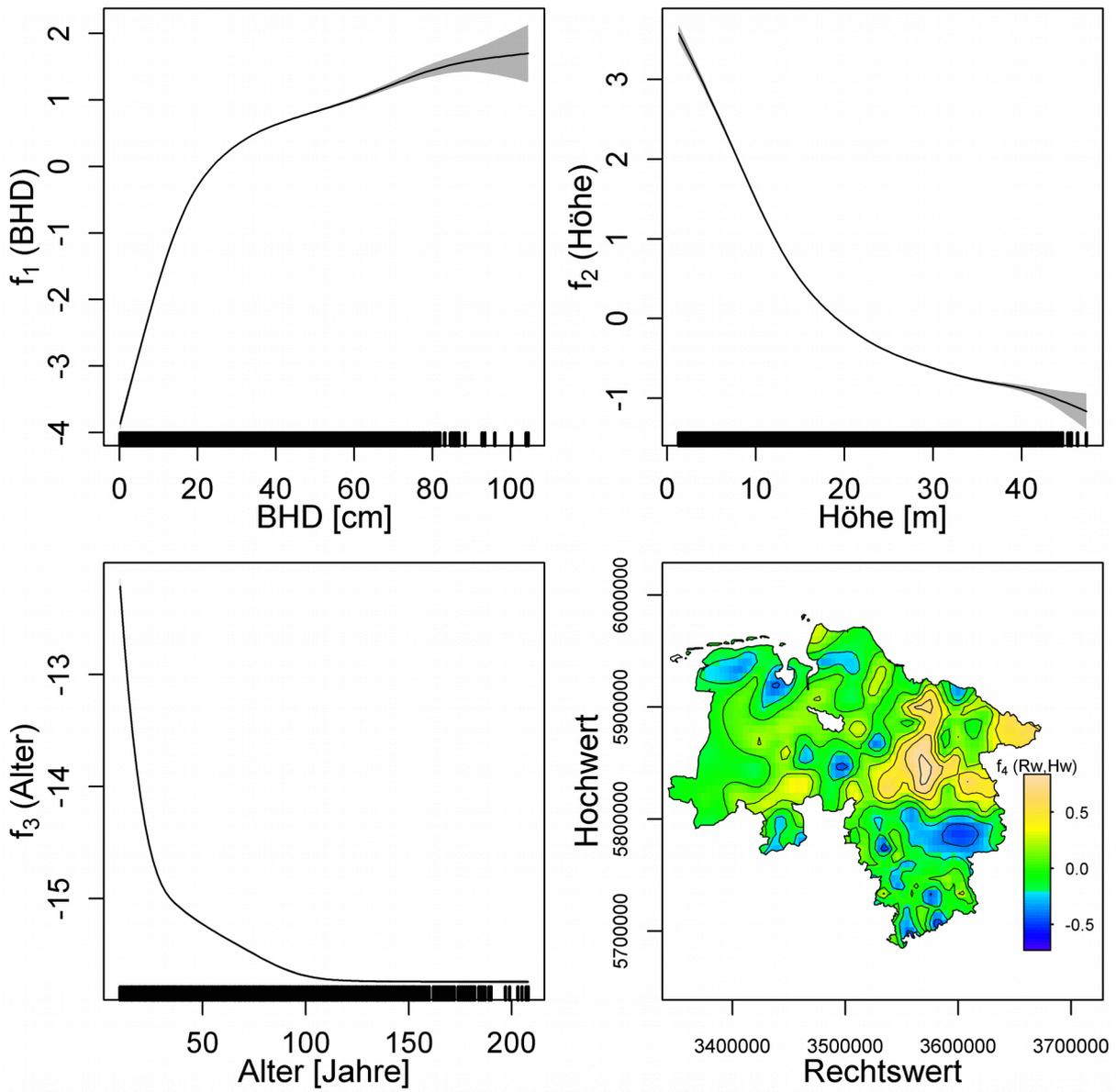


Abbildung 24: Effekte der erklärenden Variablen auf den Bekronungsgrad der Fichte

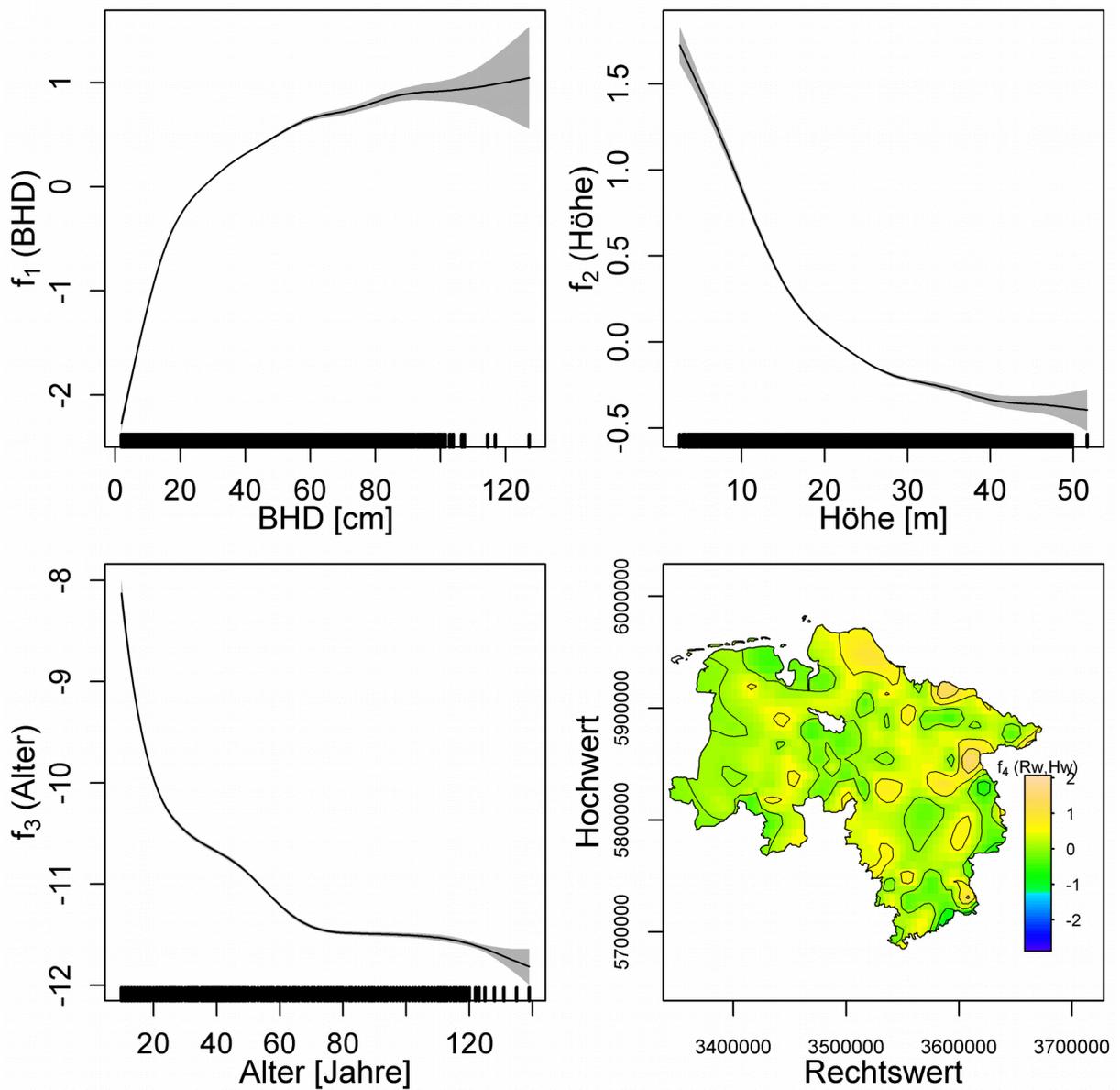


Abbildung 25: Effekte der erklärenden Variablen auf den Bekronungsgrad der Douglasie

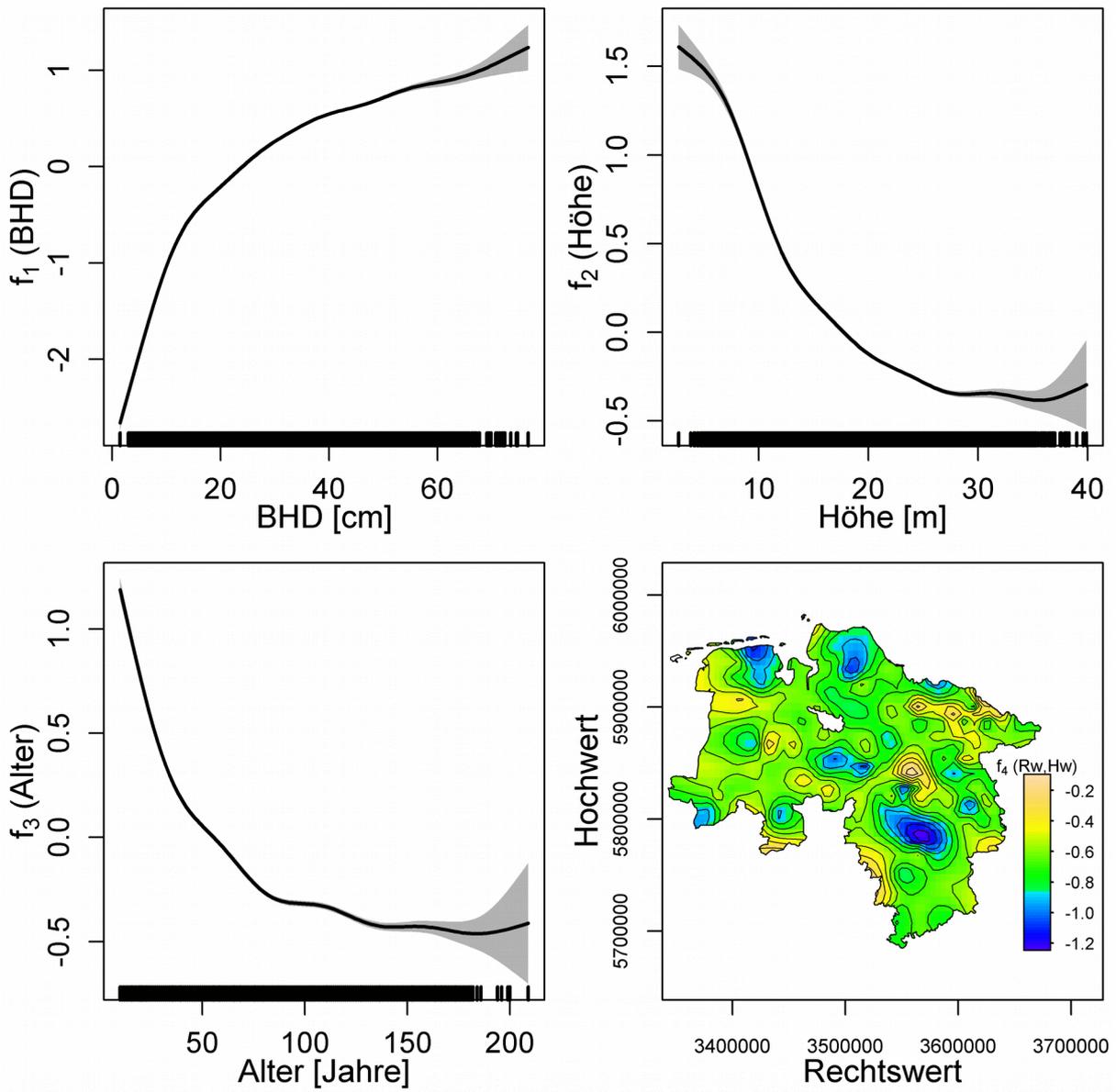


Abbildung 26: Effekte der erklärenden Variablen auf den Bekronungsgrad der Kiefer

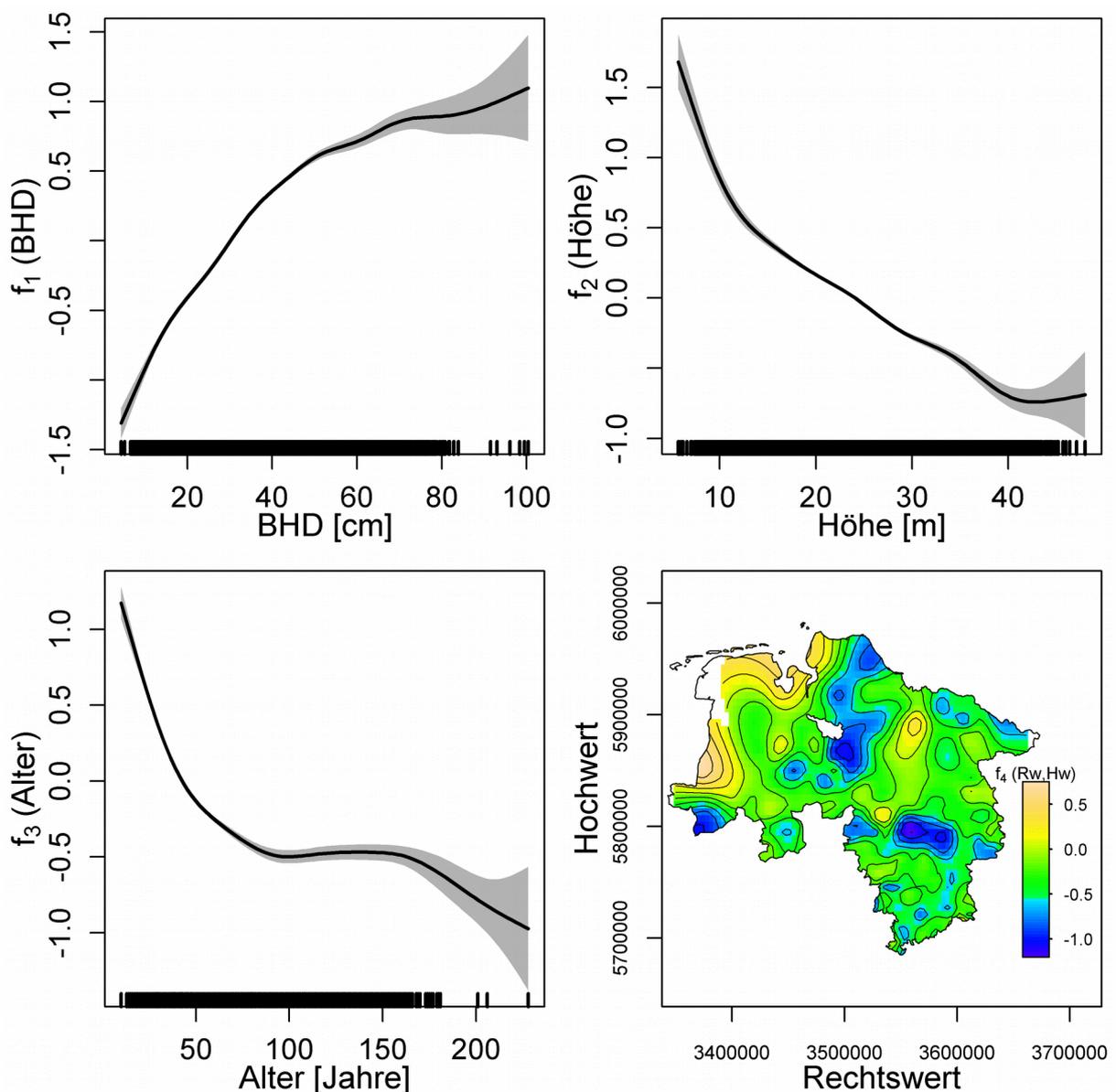


Abbildung 27: Effekte der erklärenden Variablen auf den Bekronungsgrad der Lärche

Die Kreuzvalidierung zur Bestimmung der optimalen Dimension (k) des 2-dimensionalen Splines zur Beschreibung des räumlichen Trends zeigt eine Abnahme des Modellfehlers mit Zunahme der Dimension, wobei der Betrag der Fehlerabnahme mit zunehmender Dimension geringer wird (Abbildung 28). Bis zu einer Dimension von $k=340$ ist kein Optimum zu erkennen. Die Modelle wurden mit $k=220$ parametrisiert. Dies stellt einen Kompromiss zwischen Fehler und Rechenzeit dar. Eine weitere

6 Ergebnisse

Erhöhung der Dimension um 40 würde den Fehler bei allen Baumarten um weniger als 1 cm senken.

Insgesamt sind die Ergebnisse dieser ersten Modellstufe verzerrungsfrei und erklären zwischen 39,6 (Buche) und 68,3% (Fichte) der Varianz innerhalb des Datenkollektivs. Darüber hinaus sind weitere statistische Eigenschaften der Modelle im Anhang (12.1) dargestellt.

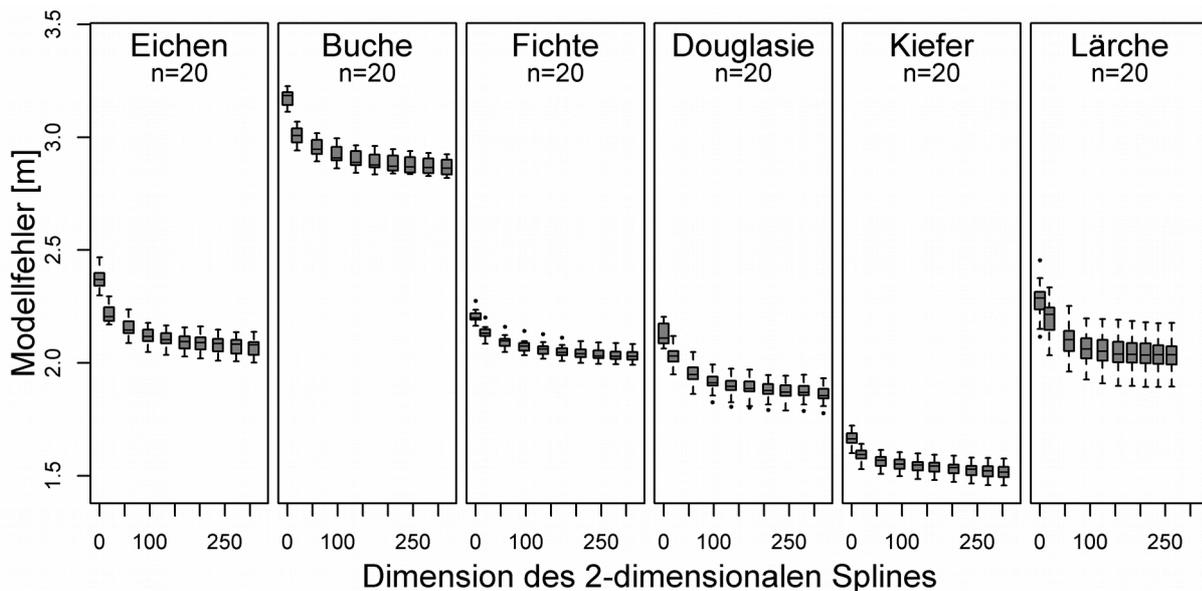


Abbildung 28: Abhängigkeit des Modellfehlers von der Spline-Dimension der räumlichen Trendfunktion

Am Beispiel der Eichen zeigt sich, dass ein Großteil der erklärten Varianz des Modells (39 von insgesamt 51,9%) allein mithilfe des räumlichen Trends erklärt werden kann. Die zusätzliche Berücksichtigung von d und h erhöht die erklärte Varianz auf 42,4 bzw. 49,4%. Die Variable alt liefert mit zusätzlichen 2,5 Prozentpunkten den geringsten Erklärungsbeitrag.

Die beschriebenen Modelle erfordern geografische Koordinaten für die Schätzung der Bekronungsgrade. Da diese häufig nicht verfügbar sind, wurden vergleichbare Modelle für alle sechs Baumarten ohne räumlichen Trend und im Fall der Buche auch ohne Geländehöhe parametrisiert. Der Verlauf der Effekte der verbleibenden Prädiktoren stimmen mit den entsprechenden Effekten aus den Modellen mit geografischen Informationen überein und sind nicht dargestellt. Ohne geografische

Informationen erklären die Modelle deutlich geringere Anteile der Varianz (Anhang 12.1).

Für Eichen, Douglasie und Lärche erreicht das Modell ohne geografische Informationen noch rund 70% (36,7 statt 51,9%; 41,8 statt 55,9% bzw. 31,0 statt 44,2%) der durch das vollständige Modell erklärten Varianz. Dieser Anteil liegt für Buche mit unter 60% (22,8 statt 39,6%) deutlich niedriger. Bei Fichte und Kiefer erklärt das Modell ohne geografische Informationen hingegen rund 90% (62,8 statt 68,3% bzw. 49,5 statt 56,4%) der erklärten Varianz des vollständigen Modells.

In der zweiten Modellstufe (GLMM) werden die parzellen- und aufnahmespezifischen Abweichungen mithilfe eines gemischten Modells einbezogen. Die Zufallseffekte umfassen bei allen Baumarten außer der Lärche Interzepte und Steigungen für Parzellen und Aufnahmen:

$$\text{logit}(E[b_{g_{ijk}}]) = \alpha + \beta \hat{p}_{ijk} + b_{i0} + b_{i1} \hat{p}_{ijk} + b_{ij0} + b_{ij1} \hat{p}_{ijk} , \quad b_{g_{ijk}} \sim \text{Quasibinomial} \quad (15)$$

Das Modell für die Baumart Lärche lautet entsprechend:

$$\text{logit}(E[b_{g_{ijk}}]) = \alpha + \beta \hat{p}_{ijk} + b_{i0} + b_{ij0} + b_{ij1} \hat{p}_{ijk} , \quad b_{g_{ijk}} \sim \text{Quasibinomial} \quad (16)$$

Die Untersuchung der Residuen ergab keine nennenswerten Probleme, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Modelle verzerrungsfrei Schätzungen liefern. Zunächst könnte erwartet werden, dass der Zusammenhang zwischen dem (gemessenen) Bekronungsgrad und der Vorschätzung im globalen Modell (ohne Berücksichtigung der Zufallseffekte) linear mit einer Steigung $\beta=1$ ist und durch den Ursprung verläuft ($\alpha=0$). Dies wäre der Fall, wenn die Vorschätzung im Mittel der Zielgröße entspräche. Zwar liefert die Vorschätzung erwartungsgemäß für alle Baumarten einen signifikanten Beitrag zur Erklärung des Bekronungsgrades auf Logitebene, die Schätzung für den Parameter β des globalen Modells liegt jedoch mit Werten von 0,66 (Fichte) bis 0,98 (Douglasie und Lärche) zum Teil deutlich unter eins. Auch das globale Interzept α ist teilweise (für die Baumarten Eiche, Kiefer und Lärche) signifikant von null verschieden. Modellparameter sowie weitere statistische Eigenschaften der Modelle sind im Anhang dargestellt.

Ein Blick auf die Residuen der Modelle zeigt, dass die unerklärte Reststreuung für die beiden Laubbaumarten Eiche und Buche über denen für die Nadelbaumarten liegt, wobei die der Buche mit 0,19 (Anteil der Kronenlänge an der Baumhöhe) noch deutlich höher liegt als die der Eiche mit 0,15. Bei den Nadelbaumarten weisen Modelle für Fichte, Douglasie und Lärche bezüglich ihrer Reststreuung geringe Unterschiede auf. Die Werte liegen zwischen 0,125 und 0,136. Für Kiefer liegt der Wert dagegen mit 0,11 deutlich unter den Werten der anderen Nadelbaumarten (Anhang 12.1).

6.1.2 Kronenbreite

Die resultierenden Modelle zur Beschreibung der Kronenbreite unterscheiden sich hinsichtlich der erklärenden Variablen, der Form der Effekte und der Varianzmodellierung zwischen den Baumarten. Von den untersuchten möglichen Prädiktoren wurden der BHD, die Baumhöhe, der Bekronungsgrad und teilweise das Alter in die Modelle aufgenommen. Der Site-Index erwies sich für alle Baumarten als zur Erklärung der Kronenbreite nicht signifikant. Die im Folgenden zu beschreibenden Kronenbreitenmodelle bilden die Konkurrenzsituation des Einzelbaumes indirekt über die simultane Schätzung der Effekte des BHD und der Baumhöhe ab. Auf eine konkretere Beschreibung der individuellen Konkurrenzsituation durch die Verwendung des Hegyi-Index wird verzichtet. Dieser hätte zwar für vier der sechs untersuchten Baumarten einen signifikanten Einfluss auf die Kronenbreite, würde jedoch wegen des notwendigen Ausschlusses von Randbäumen eine starke Reduzierung des Datensatzes (um bis zu 4/5 je nach Baumart) bedeuten. Darüber hinaus sollen die hier entwickelten Kronenmodelle insbesondere für die Zuwachsprognose von Einzelbäumen Verwendung finden. Um die Effekte der Kronengröße auf den Zuwachs möglichst weitgehend von Konkurrenzeffekten trennen zu können, wird die Konkurrenzsituation der Einzelbäume nicht über diesen generellen Zusammenhang hinaus zur Modellierung der Kronenbreite herangezogen.

Zur Darstellung der festen Effekte sind die erklärenden Variablen auf der Abszisse gegen die abstrakten Effekte auf der Ordinate aufgetragen. Die Abszissen sind für die einzelnen Effekte zur besseren Übersicht verschieden skaliert. Die Markierungen entlang der Abszisse zeigen jeweils die Verteilung der Messwerte.

Das Modell für die Baumart Eiche beschreibt die Kronenbreite mithilfe des Durchmessers, der Baumhöhe, des Bekronungsgrades, des Alters und der Geländehöhe. Die Effekte der beiden ersteren sind nicht-linear (Abbildung 28). Neben den festen Effekten werden Zufallseffekte auf Ebene der Parzelle berücksichtigt, wobei die zufällige Abweichung zwischen den Parzellen mithilfe eines Zu- bzw. Abschlages auf das Interzept sowie eines Zu- bzw. Abschlages in Abhängigkeit vom Durchmesser des Einzelbaumes quantifiziert wird.

$$kb_{ik} = \alpha + f_1(d_{ik}) + f_2(h_{ik}) + \beta_3 bg_{ik} + \beta_4 alt_{ik} + \beta_5 hnn_i + b_{i0} + b_{i1} d_{ik} + \varepsilon_{ik} \quad , \quad (17)$$

$$\varepsilon_{ik} \sim N(0, \sigma^2 \exp(2\delta v_{ik}))$$

Die Modellierung der Varianz erfolgt mithilfe der Varianzfunktion, wobei die Varianzkovariable v_{ik} in diesem Fall der geschätzte Erwartungswert der Kronenbreite und δ ein Varianzparameter ist.

Die festen Effekte des Modells erklären rund 83% der Streuung der Kronenbreite von Eichen. Weitere statistische Eigenschaften sowie die Koeffizienten für die linearen Effekte sind im Anhang (12.2) zusammengefasst.

Für die Baumart Buche wird die Kronenbreite ebenfalls in Abhängigkeit von d , h , bg , alt und hnn modelliert. In diesem Fall sind alle Effekte mit Ausnahme des Effekts für die Geländehöhe nicht-linear (Abbildung 31). Neben Zufallseffekten auf Parzellenebene werden auch zufällige Abweichungen auf Ebene der Aufnahme berücksichtigt. Auf beiden Ebenen sind neben Zu- und Abschlägen auf das Interzept auch durchmesserabhängige Abweichungen enthalten.

$$kb_{ijk} = \alpha + f_1(d_{ijk}) + f_2(h_{ijk}) + f_3(bg_{ijk}) + f_4(alt_{ijk}) + \beta_5 hnn_i + b_{i0} + b_{i1} d_{ijk} + b_{ij0} + b_{ij1} d_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad (18)$$

$$\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2 |v_{ijk}|^{2\delta})$$

Die besten Ergebnisse lieferte die Varianzfunktion ("power-of-the-mean"), wobei die Varianzkovariable v_{ijk} wie für das Eichenmodell der geschätzte Erwartungswert der Kronenbreite, und δ ein Varianzparameter ist.

Das Modell erklärt rund 84% der Varianz innerhalb der gemessenen Kronenbreiten mithilfe der festen Effekte. Weitere statistische Kennzahlen finden sich im Anhang (12.2).

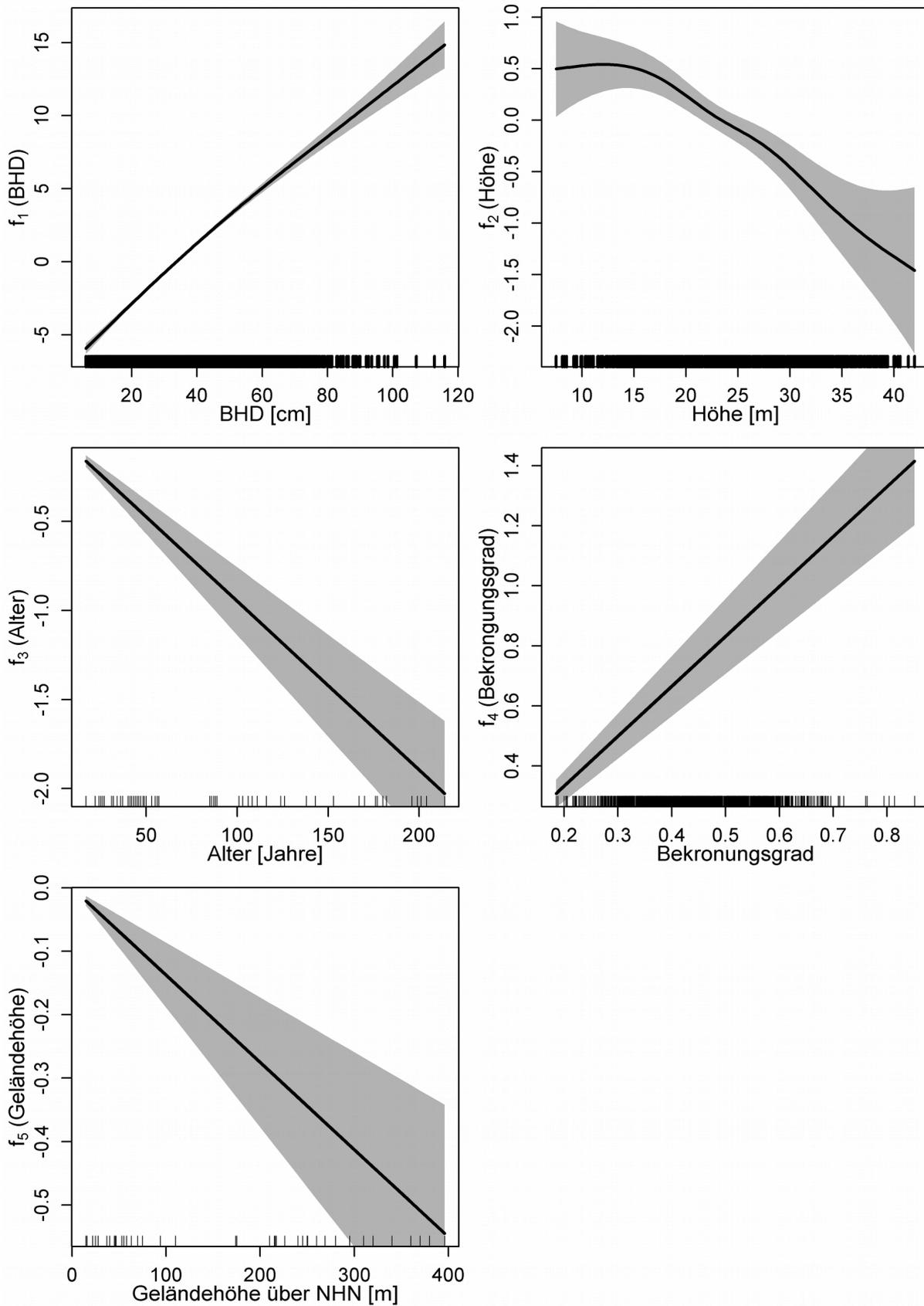


Abbildung 29: Effekte der erklärenden Variablen auf die Kronenbreite der Eichen

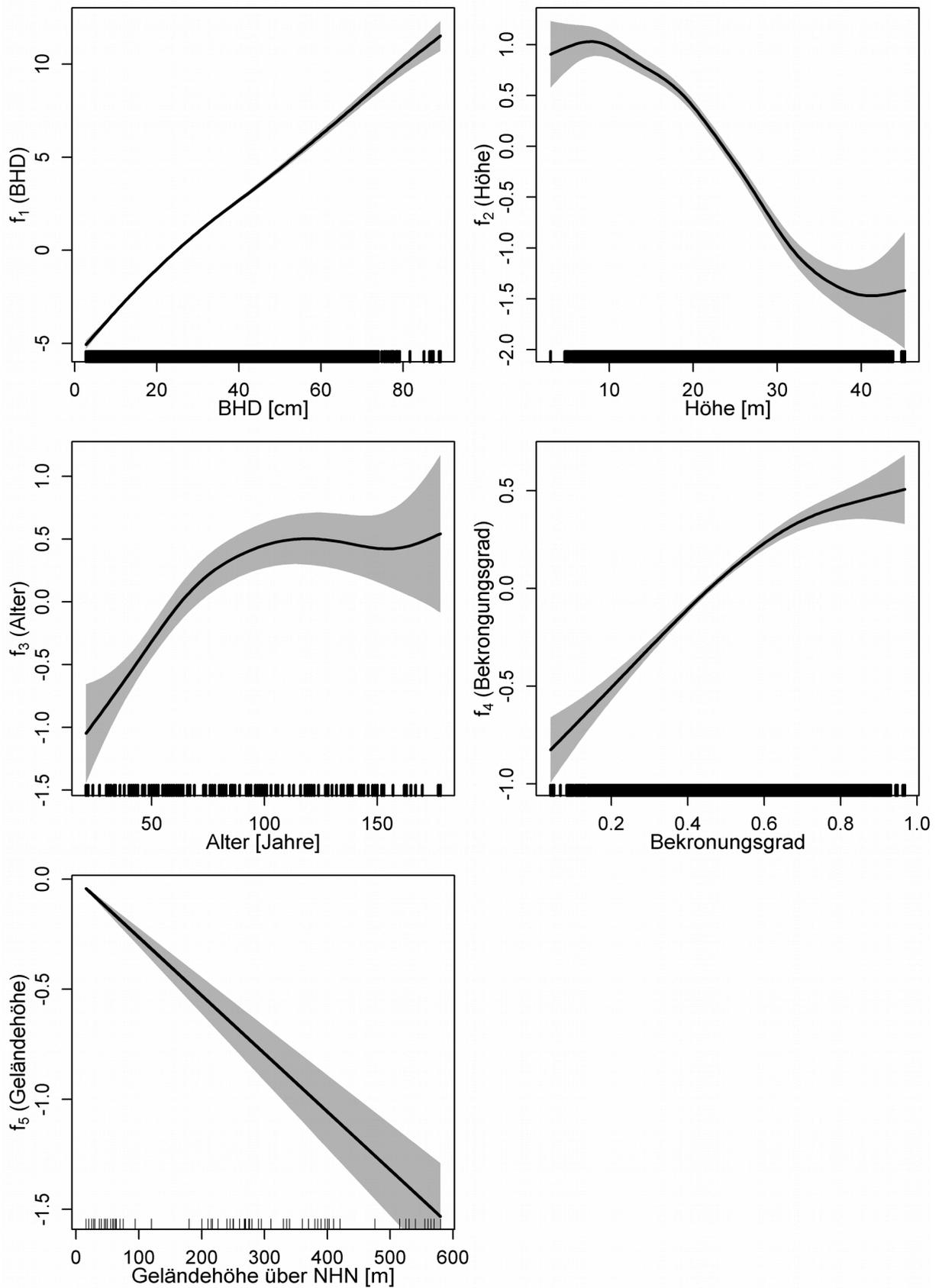


Abbildung 30: Effekte der erklärenden Variablen auf die Kronenbreite der Buche

6 Ergebnisse

Für die Kronenbreite der Baumart Fichte leisten ebenfalls die Größen d , h , bg , alt und hnn jeweils einen signifikanten Erklärungsbeitrag. Der Zusammenhang mit der Zielgröße ist für alle unabhängigen Variablen linear (Abbildung 29). Es werden Zufallseffekte auf Parzellen- und Aufnahmeebene berücksichtigt. Im Unterschied zum Modell für die Baumart Buche berücksichtigt das Fichten-Modell beim Zufallseffekt auf Aufnahmeebene nur einen Zu- oder Abschlag auf das Interzept. Bei der Modellierung erweist sich die Varianzfunktion $g(d_{ijk}) = \sqrt{d_{ijk}}$ als die beste Variante der Varianzmodellierung.

$$kb_{ijk} = \alpha + \beta_1 d_{ijk} + \beta_2 h_{ijk} + \beta_3 bg_{ijk} + \beta_4 alt_{ijk} + \beta_5 hnn_i + b_{i0} + b_{i1} d_{ijk} + b_{ij0} + \varepsilon_{ijk}, \quad (19)$$
$$\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2 d_{ijk})$$

Das Modell zur Schätzung der Kronenbreite von Fichten erklärt rund 83% der auftretenden Varianz mithilfe der festen Effekte. Weitere statistische Kennzahlen sind im Anhang (12.2) dargestellt.

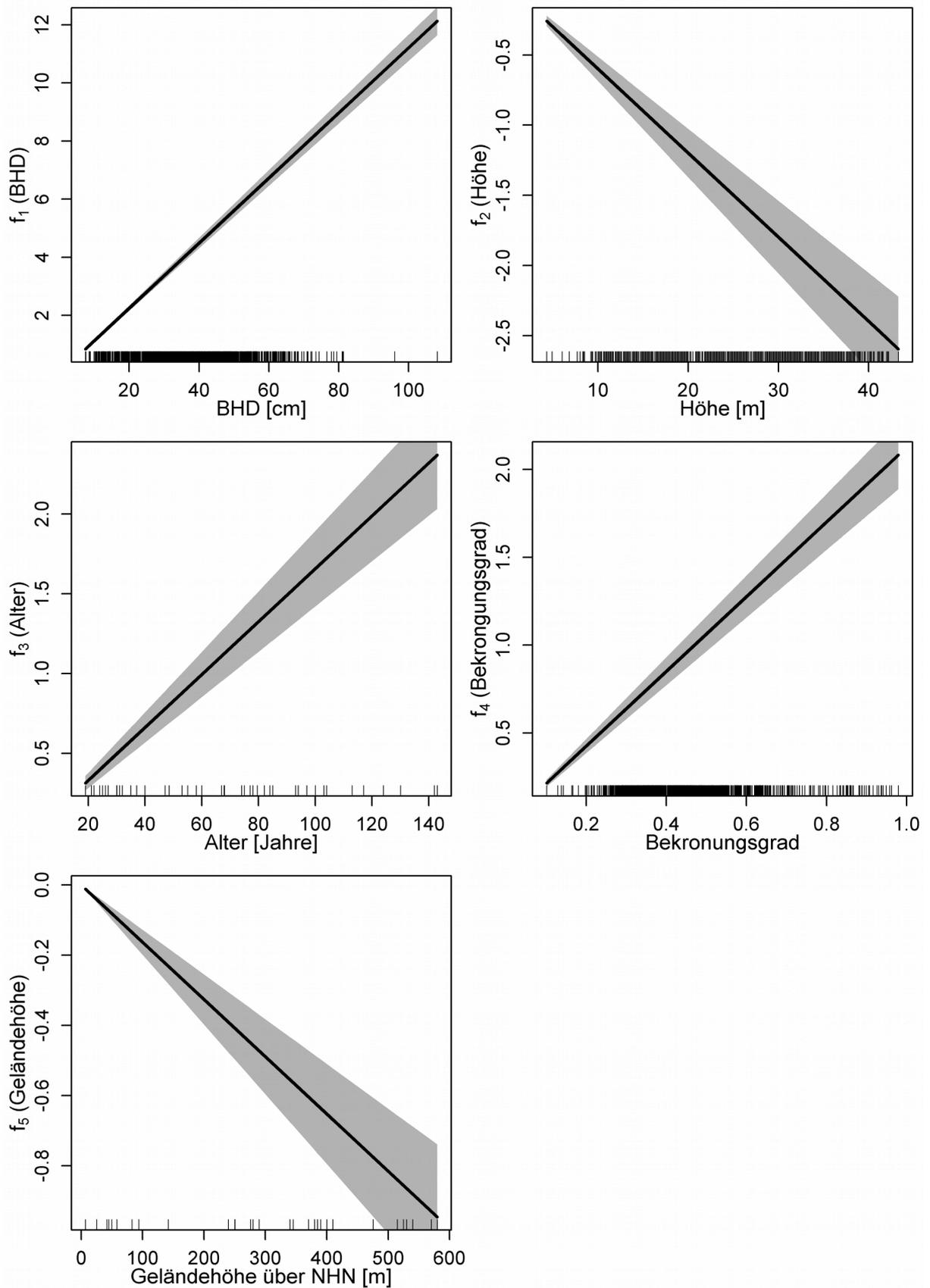


Abbildung 31: Effekte der erklärenden Variablen auf die Kronenbreite der Fichte

6 Ergebnisse

Die Kronenbreite der Douglasie wird mithilfe nicht-linearer Effekte des Durchmessers (d) sowie linearer Effekte von h und bg geschätzt (Abbildung 32). Anders als für Buche, Eiche und Fichte haben Alter und Geländehöhe keinen signifikanten Einfluss auf die Kronenbreite. Darüber hinaus erweisen sich zufällige Abweichungen auf Ebene von Parzelle und Aufnahme als signifikant. Die Varianzmodellierung erfolgt mithilfe der Varianzfunktion $g(v_{ijk}, \delta) = \exp(\delta, v_{ijk})$, wobei die Varianzkovariable v_{ijk} hier der geschätzte Erwartungswert der Kronenbreite und δ ein Varianzparameter ist.

$$kb_{ijk} = \alpha + f_1(d_{ijk}) + \beta_2 h_{ijk} + \beta_4 bg_{ijk} + b_{i0} + b_{i1} d_{ijk} + b_{ij0} + \varepsilon_{ijk}, \quad (20)$$

$$\varepsilon_{ik} \sim N(0, \sigma^2 \exp(2\delta v_{ijk}))$$

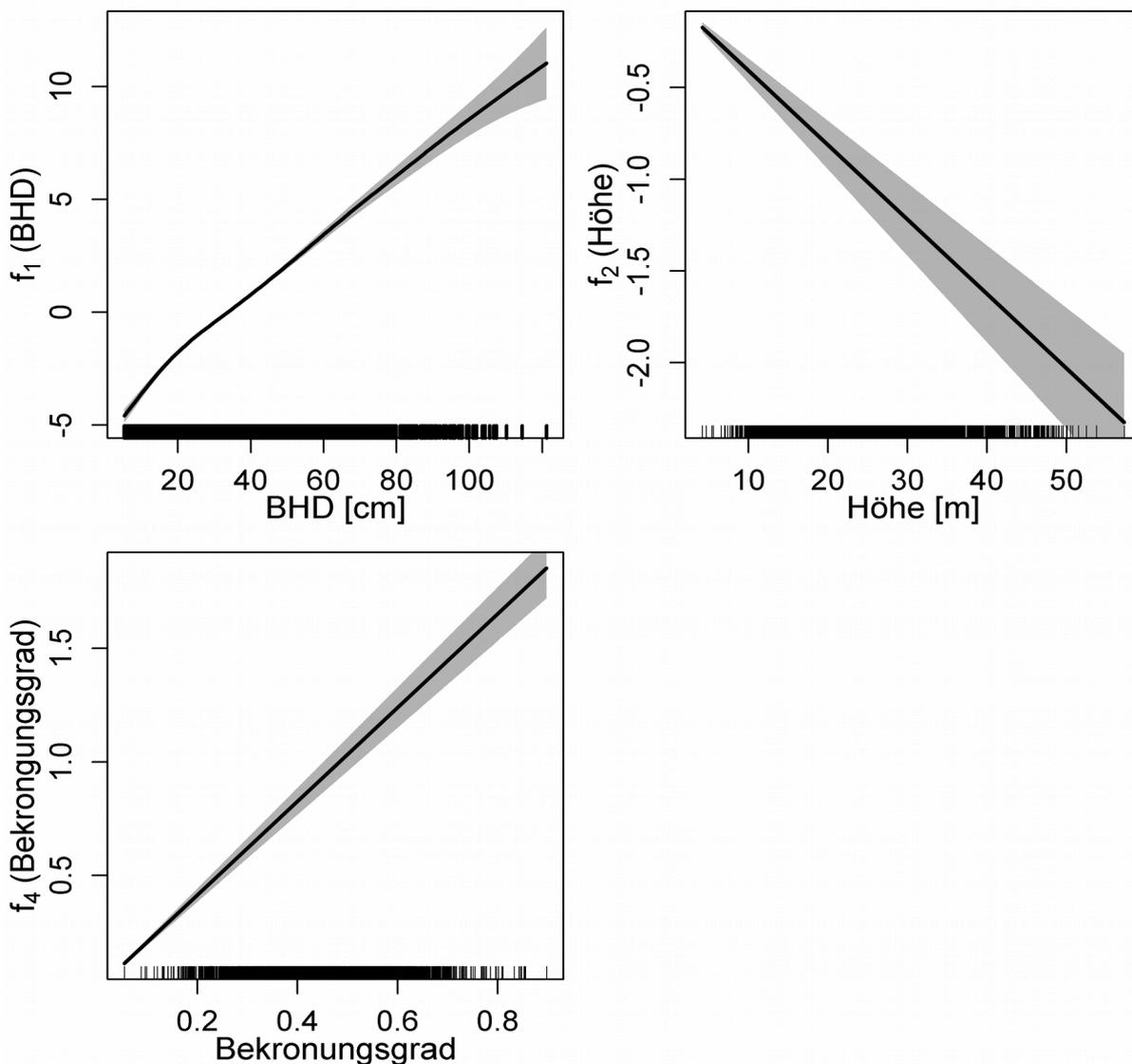


Abbildung 32: Effekte der erklärenden Variablen auf die Kronenbreite der Douglasie

Für die Douglasie erklären die festen Effekte des Kronenbreitenmodells rund 78% der auftretenden Varianz. Weitere statistische Kennzahlen siehe Anhang (12.2).

Für die Kronenbreite der Kiefer zeigen d , h und bg im Gegensatz zum Alter und der Geländehöhe jeweils einen signifikanten Einfluss. Dabei ist nur der Durchmesser-effekt nicht-linear (Abbildung 33). Wie auch für die Baumart Eiche werden nur Zufallseffekte auf Ebene der Parzelle berücksichtigt. Die Varianzmodellierung erfolgt mithilfe der Funktion $g(d_{ik}, \delta) = |d_{ik}|^\delta$, wobei δ ein Varianzparameter ist.

$$kb_{ik} = \alpha + f_1(d_{ik}) + \beta_2 h_{ik} + \beta_4 bg_{ik} + b_{i,0} + b_{i,1} d_{ik} + \varepsilon_{ik}, \quad (21)$$

$$\varepsilon_{ik} \sim N(0, \sigma^2 |d_{ik}|^{2\delta})$$

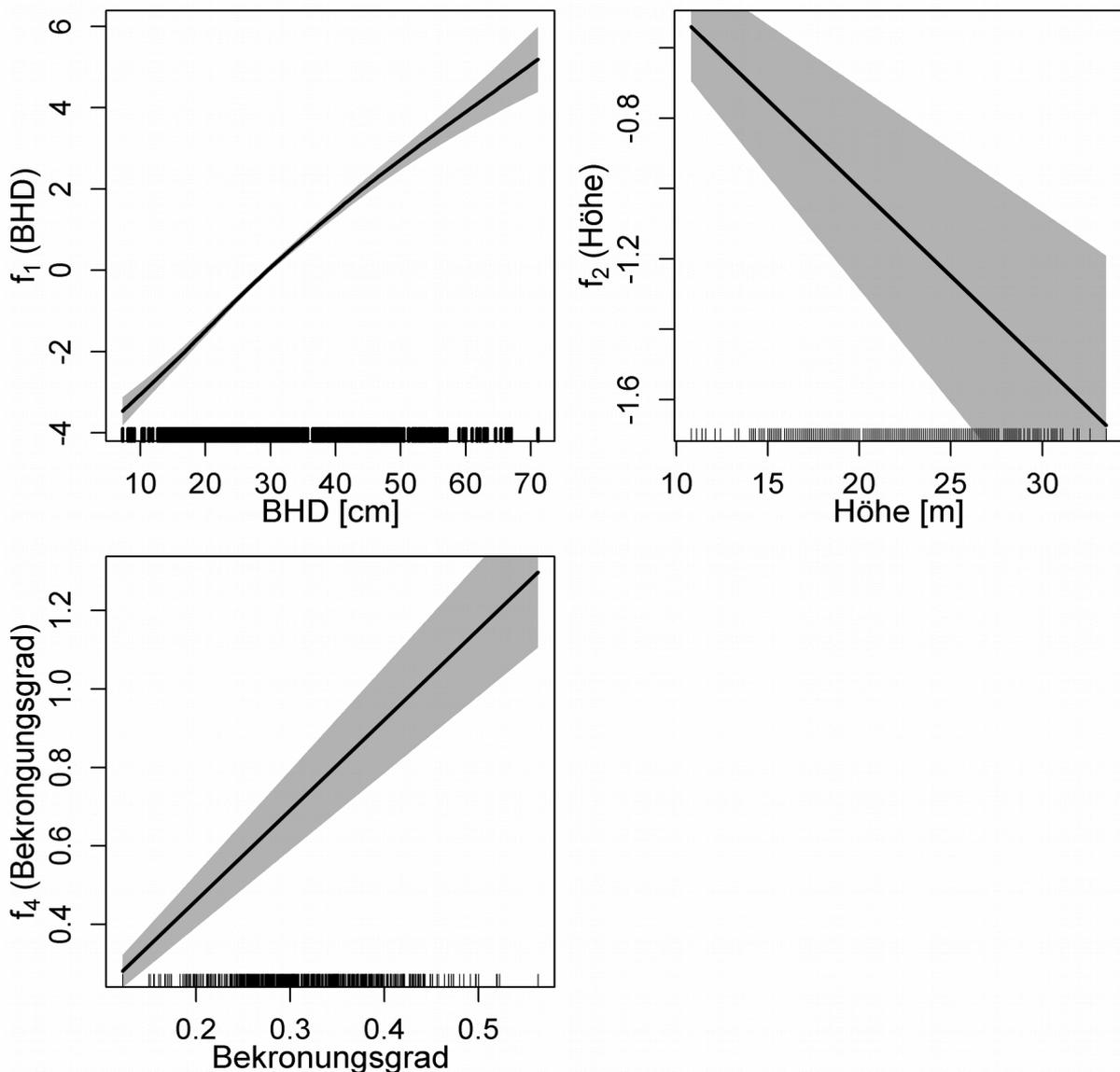


Abbildung 33: Effekte der erklärenden Variablen auf die Kronenbreite der Kiefer

6 Ergebnisse

Die Varianz der Kronenbreiten für die Baumart Kiefer wird zu rund 83% durch die festen Effekte des Modells erklärt. Weitere statistische Kennzeichen und die Schätzungen der Modellparameter sind im Anhang (12.2) gegeben.

Das Modell für die Lärche beschreibt die Kronenbreite in Abhängigkeit von d , h und bg . Alter und Geländehöhe sind nicht signifikant. Alle Effekte sind linear (Abbildung 34). Es werden Zufallseffekte auf Parzellen- und Aufnahmeebene einbezogen.

$$kb_{ijk} = \alpha + \beta_1 d_{ijk} + \beta_2 h_{ijk} + \beta_4 bg_{ijk} + b_{i0} + b_{i1} d_{ijk} + b_{ij0} + \varepsilon_{ijk} \quad , \quad (22)$$
$$\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2 |v_{ijk}|^{2\delta})$$

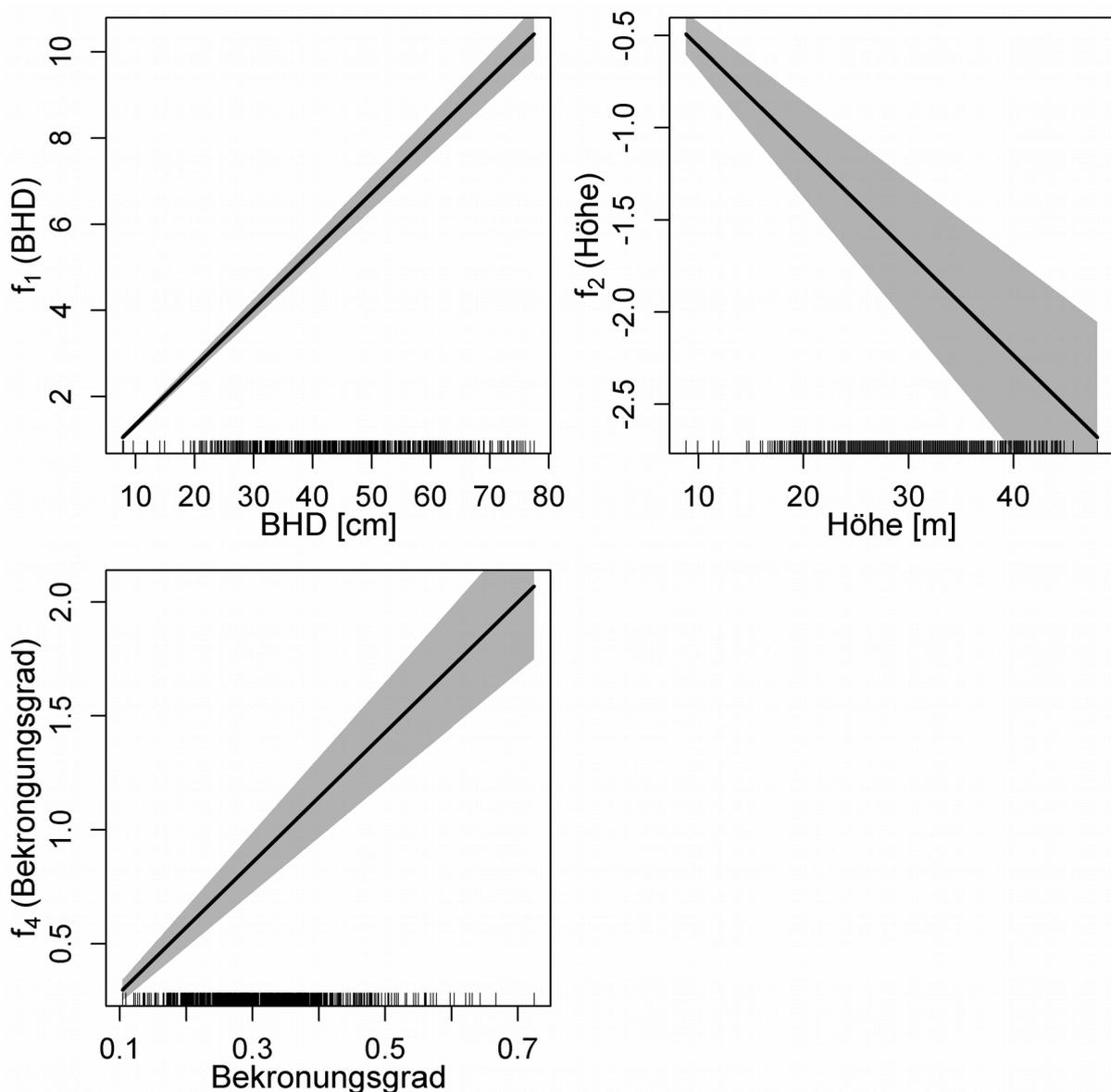


Abbildung 34: Effekte der erklärenden Variablen auf die Kronenbreite der Lärche

Die Varianzmodellierung erfolgt wie im Modell für die Baumart Buche mithilfe der Varianzfunktion “power-of-the-mean“, wobei die Varianzkovariable v_{ijk} der geschätzte Erwartungswert der Kronenbreite und δ ein Varianzparameter ist.

Für die Lärche werden rund 72% der auftretenden Streuung der gemessenen Kronenbreiten mithilfe der festen Effekte erklärt. Weitere statistische Kennzahlen sowie die Schätzungen für die Modellkoeffizienten finde sich im Anhang (12.2).

Die Abbildungen 29 bis 34 zeigen die abstrakten Effekte der Prädiktoren auf die Zielgröße. Die Kronenbreite steigt über alle betrachteten Baumarten mit dem BHD an.

Dabei ist der Effekt für Fichte und Lärche linear, wohingegen die Zunahme der Kronenbreite für die Baumarten Douglasie, Kiefer und die beiden Laubbaumarten mit steigendem BHD rückläufig ist.

Gleichzeitig sinkt die Kronenbreite eines Baumes bei gegebenem Durchmesser mit der Baumhöhe. Das heißt, dass für schlankere Bäume geringere Kronenbreiten vorhergesagt werden als für solche mit geringerem h/d-Wert. Für die Baumarten Buche und Eiche ist der Höheneffekt nicht linear, sodass Höhenunterschiede im Bereich sehr geringer und für Buchen auch sehr großer Höhen nur geringe Änderungen der geschätzten Kronenbreite bewirken. Im Vergleich zu anderen Baumarten und Effekten ist der Höheneffekt für die Kiefer mit relativ großer Unsicherheit behaftet.

In Bezug auf das Alter schätzen die Modelle für Buche und Fichte steigende Effekte, sodass die vorhergesagte Kronenbreite bei gegebener Dimension (BHD und Baumhöhe) mit zunehmendem Alter steigt. Im Umkehrschluss werden für langsam gewachsene Bäume höhere Kronenbreiten vorhergesagt als für Bäume die die gleiche Dimension schneller erreicht haben. Für Fichte ist der Alterseffekt linear, für Buche führen Altersunterschiede für Bäume ab etwa 80 Jahren nur noch zu geringen Änderungen der vorhergesagten Kronenbreite. Während für Douglasie, Kiefer und Lärche keine Effekte des Alters auf die Kronenbreite abgesichert werden können, zeigt der Alterseffekt für die Eichen einen fallenden Verlauf. Anders als im Fall von Fichte und Buche nimmt die prognostizierte Kronenbreite von Eichen bei gegebener Dimension mit dem Alter ab. Für langsam gewachsene Eichen werden somit geringere Kronenbreiten vorhergesagt, als für Eichen, die die gleiche Dimension nach geringerer Zeit erreicht haben.

Der Bekronungsgrad liefert bei allen untersuchten Baumarten einen signifikanten Beitrag zur Erklärung der Kronenbreite. Je höher der Bekronungsgrad eines Baumes bei gegebenem BHD, Höhe und Alter desto größer die vorhergesagte Kronenbreite. Außer für Buchen, für die die Zunahme der Kronenbreite mit dem Bekronungsgrad oberhalb von Werten ab etwa 0,6 stark zurück geht, sind alle Effekte linear.

In Bezug auf die Geländehöhe können für die Baumarten Eiche, Buche und Fichte Effekte auf die Kronenbreite abgesichert werden. In allen drei Fälle zeigen die linear

fallenden Effekte eine Abnahme der Kronenbreite mit der Geländehöhe bei gleichen Werten für Dimension, Alter und Bekronungsgrad.

Der Effekt des Durchmesser auf die Kronenbreite erklärt für alle Baumarten den größten Anteil der Variation der gemessenen Kronenbreiten. Die Effekte von Baumhöhe, Alter und Bekronungsgrad spielen eine wesentlich geringere Rolle.

6.1.3 Lichtkronenlänge

Die Länge der Lichtkrone im Verhältnis zur Kronenlänge (rlk_{kl}) bzw. zur Baumhöhe (rlk_h) zeigt artspezifische Unterschiede, sowie Unterschiede zwischen den berücksichtigten Laub- und Nadelbaumarten in Bezug auf die Kronenform (Abbildung 35).

Die Lichtkrone nimmt für Eichen und Buche im Mittel 42,3% ($\pm 19,2$) bzw. 40,8% ($\pm 18,0$) der Kronenlänge ein. Für die untersuchten Nadelbaumarten liegen die Werte mit 72,4% ($\pm 14,7$) für Fichte, 75,3% ($\pm 19,5$) für Kiefer und 76,7% ($\pm 15,9$) für die Lärche deutlich höher. Die einzige Messung an einer Douglasie ergab eine Lichtkronenlänge von 66,7% der Gesamtkronenlänge. Auffällig ist, dass die Werte für Fichte und Lärche deutlich geringere Standardabweichungen aufweisen als die der übrigen Baumarten.

Bezogen auf die Baumhöhe liegt die Länge der Lichtkrone bei Fichte mit im Mittel 29,0% ($\pm 8,1$) am höchsten. Für Douglasie wurde eine Lichtkronenlänge von 11,7% der Baumhöhe ermittelt. Die Werte der übrigen Baumarten liegen dazwischen und unterscheiden sich mit relativen Lichtkronenlängen von 19,3% ($\pm 8,2$) für die Eichen, 21,6% ($\pm 10,2$) für Buche, 22,9% ($\pm 6,7$) für die Lärche und 24,2% ($\pm 10,4$) für die Kiefern vergleichsweise wenig zwischen den Baumarten. Bezogen auf die Baumhöhe weisen die Kronenlängen von Fichte und Lärche, aber auch der Eichen eine geringe Streuung der Werte im Vergleich zu denen bei Buche und Kiefer auf.

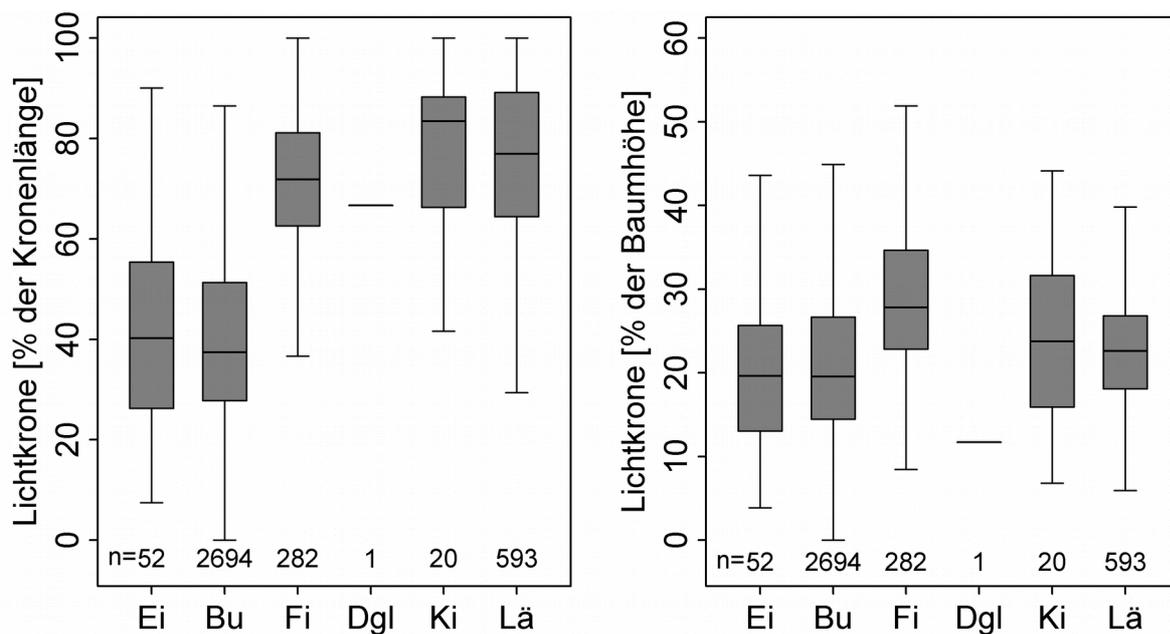


Abbildung 35: Artspezifische Länge der Lichtkrone relativ zur Kronenlänge (links) und relativ zur Baumhöhe (rechts)

Tabelle 7 stellt die Streuung der gemessenen h_{maxkb} um die im Verhältnis zur Kronenlänge bzw. Baumhöhe berechneten Mittelwerte dar und zeigt, dass sich die Streuung der Residuen für Eichen und Buche nur geringfügig unterscheidet; für Fichte, Kiefer und Lärche sind die Fehler für die auf die Baumhöhe bezogene Schätzung um 0,47 bis 0,84 cm größer als die der Alternative.

Tabelle 7: Höhe der maximalen Kronenbreite: Streuung der Messwerte (Standardabweichung [m]) um den relativ zur Kronenlänge bzw. Baumhöhe berechneten Mittelwert

Standardabweichung	Eichen	Buche	Fichte	Dougl.	Kiefer	Lärche
bezogen auf die Kronenlänge	1,87	2,58	1,64	-	1,04	1,55
bezogen auf die Baumhöhe	1,84	2,61	2,23	-	1,88	2,02

6.1.4 Beschränkung der horizontalen Asymmetrie

Auf der Grundlage von Kronenablotungen auf Versuchsflächen zeigen sich folgende Ergebnisse in Bezug auf die horizontale Asymmetrie (Verhältnis der größten Kronenbreite zur senkrecht dazu gemessenen Kronenbreite): Bei den Laubbaumarten treten

stärker asymmetrisch ausgeprägte Kronen auf als bei den Nadelbaumarten. Für Eiche und Buche liegt die Asymmetrie (*asym*) für 95% der erfassten Kronen unterhalb von 1,85 bzw. 1,93. Das heißt, dass für den Großteil der Kronen die größte Kronenbreite weniger als das 1,85 bzw. 1,93-fache der dazu senkrecht ermittelten Kronenbreite beträgt. Die Kronen der Nadelbaumarten sind mit Werten zwischen 1,57 für Lärche und 1,75 für Kiefer deutlich runder (Abbildung 36).

6.1.5 Kronenkonstruktion

Das beschriebene Verfahren zur Kronenkonstruktion führt zu dreidimensionalen Modellkronen für alle Bäume eines Bestandes. Von Interesse sind dabei insbesondere die Kronenschirmflächen. Abbildung 37 stellt diese beispielhaft für einen 153-jährigen Buchenbestand dar und zeigt die Orientierung der Kronenformen an den Nachbarkronen: In Richtung von Nachbarn mit geringer Distanz weisen die Kronen eine deutlich geringere Ausdehnung auf als in Bereichen, in denen der Abstand zum nächsten Nachbarn größer ist.

Anhand der Randbäume (nicht abgebildet), die selbst nach außen hin keine Nachbarn haben, zeigt sich eine deutlich größere Kronenausdehnung nach außen als in Richtung vorhandener Nachbarn. Für Bäume mit im Vergleich zur Kronenbreite großem Abstand zum nächsten Nachbarn resultieren kreisrunde Kronenschirmflächen.

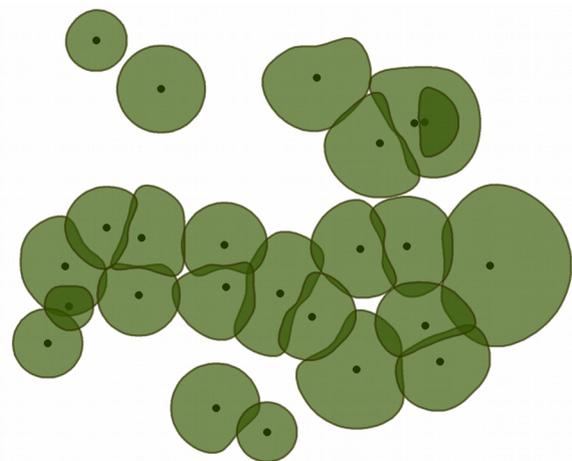


Abbildung 37: Konstruierte Kronenschirmflächen am Beispiel eines 153-jährigen Buchenbestandes

Der Vergleich der konstruierten mit den gemessenen Kronenschirmflächen soll zeigen, inwieweit das Verfahren geeignet ist, die gemessenen Schirmflächen nachzubilden. Es ist zunächst festzustellen, dass die Kronenschirmfläche der konstruierten Kronen aufgrund des gewählten Abbruchkriteriums für die Kronenexpansion

6 Ergebnisse

geringfügig über den gemessenen Werten liegt. Im Mittel sind die so erstellten Kronenschirmflächen jedoch nur um 0,36% größer. Dieser Unterschied wird jedoch als vernachlässigbar gering angesehen.

Im Folgenden sind die Ergebnisse eines Vergleichs der Schirmflächen der erstellten Modellkronen mit den aus Ablotungen hergeleiteten Kronenschirmflächen dargestellt.

6.1.5.1 Validierung der Kronenform

In Bezug auf die Asymmetrie zeigt sich, dass ein großer Teil der konstruierte Kronenschirmflächen jeder der untersuchten Baumarten rund oder fast rund (das heißt mit einem Verhältnis zwischen der größten Kronenbreite und der dazu senkrecht gemessenen Breite der Kronen von zwischen 1 und 1,05) ausgeprägt ist (Abbildung 38).

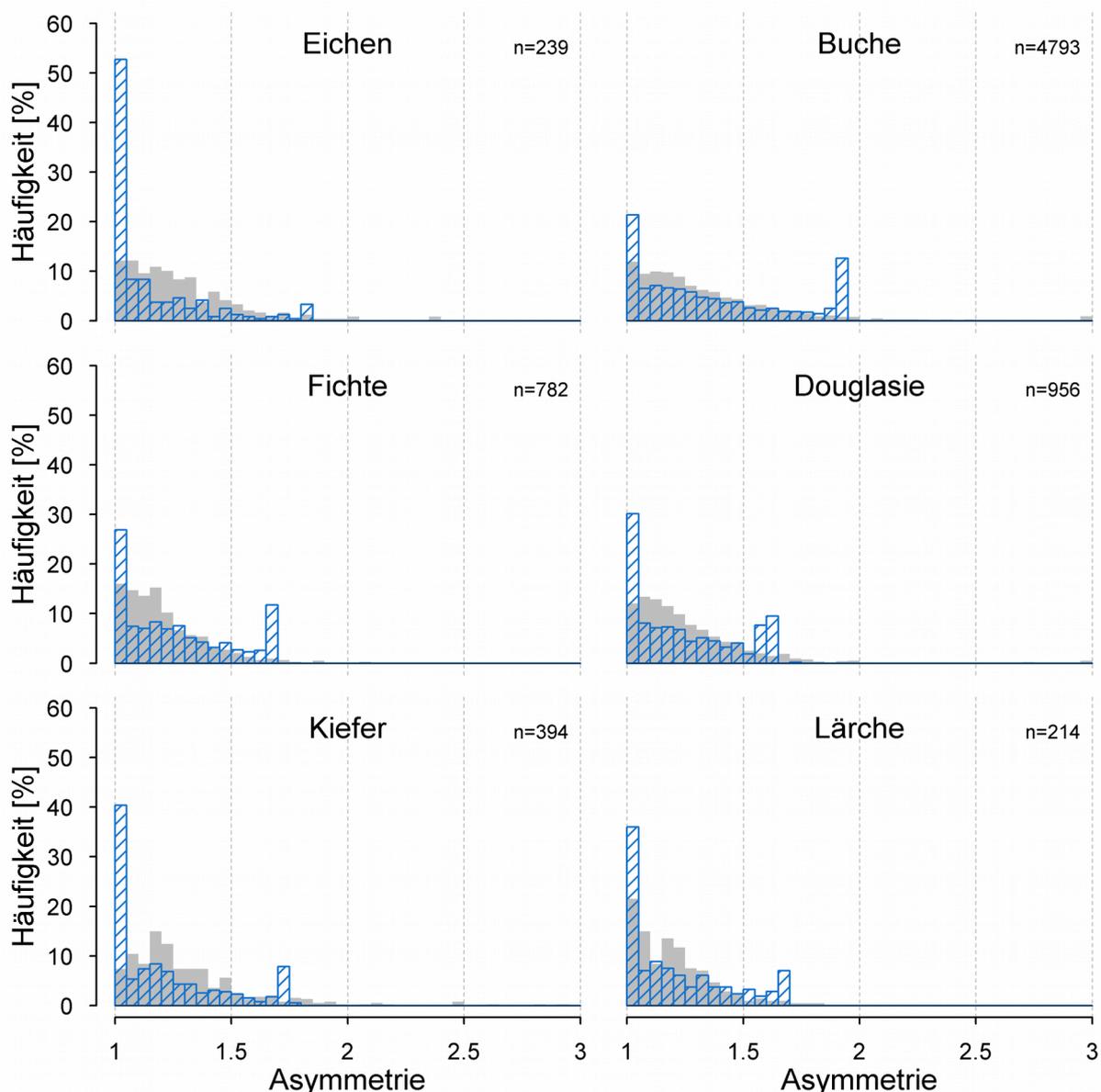


Abbildung 38: Häufigkeitsverteilung der Asymmetrie der Kronenschirmflächen, grau basierend auf Ablotungen, schraffiert für mittels Kronenexpansion erstellte Modellkronen. (Asymmetrie-Werte über dem Maximalwert sind im letzten Balken enthalten.)

Insbesondere für die Eichen und Kiefer liegt der Anteil dieser Kronen mit 53 und 40% im Vergleich zu den anderen Baumarten hoch. Für die Baumart Buche kommen mit rund 21% deutlich weniger runde oder fast runde Kronenformen vor. Stärker asymmetrische Kronenausformungen kommen im Vergleich zu runden Kronen zunehmend selten vor. Allerdings resultiert das Vorgehen bei der Kronenkonstruktion in einer auffälligen Häufung von Asymmetriewerten im Bereich der maximalen Asymmetrie der konstruierten Kronen der jeweiligen Baumart. Im Vergleich zur Verteilung der Asymmetriewerte aus Kronenablotungen überschätzt das angewandte Verfahren den Anteil runder oder nahezu runder sowie den Anteil stark asymmetrischer Kronenausformungen je nach Baumart mehr oder weniger stark. Im Gegenzug wird der Anteil von Kronen mit geringer Asymmetrie (1,05 bis ca. 1,3) unterschätzt. Trotz der Abweichungen bezüglich der Häufigkeit bestimmter Asymmetriewerte kann festgestellt werden, dass das Spektrum vorkommender Kronenformen in Bezug auf die Asymmetrie bis auf Ausnahmen im Bereich extremer Werte durch das Verfahren der Kronenexpansion erreicht werden kann.

Zum Vergleich der Asymmetrie der gemessenen und der konstruierten Kronenschirmfläche auf Einzelbaumebene wird der Pearson'sche Korrelationskoeffizient berechnet. Es resultieren Werte zwischen -0,02 für Eiche und 0,12 für Fichte, sodass kein Zusammenhang zwischen den gemessenen und den aus dem Modell abgeleiteten Asymmetriewerten zu erkennen ist.

6.1.5.2 Validierung der räumlichen Übereinstimmung

Für alle zur Verfügung stehenden Kronenablotungen ergibt der Vergleich der konstruierten Kronenschirmflächen mit den Messwerten im Mittel eine Übereinstimmung der Schirmflächen ($a_{schnitt}$) von 70%. Am Beispiel des bereits dargestellten Buchenbestandes (6.1.5) werden die Übereinstimmungen und Unterschiede

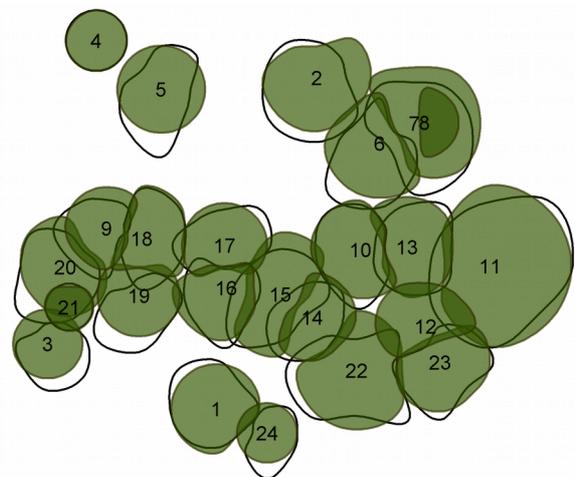
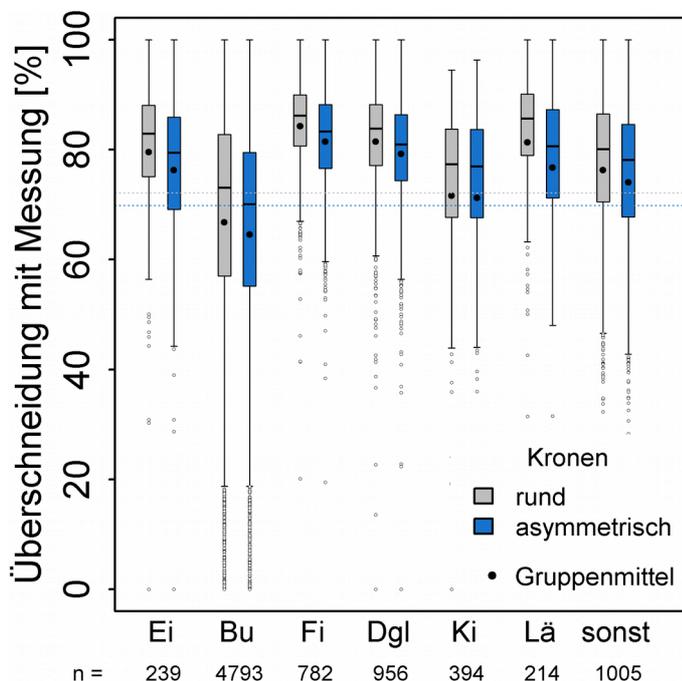


Abbildung 39: Vergleich: Konstruierte (farbige Polygone) und gemessene (schwarze Umrisse) Kronenschirmflächen am Beispiel eines 153-jährigen Buchenbestandes

6 Ergebnisse

auf Einzelbaumbene deutlich (Abbildung 39). Dargestellt sind neben den konstruierten Kronenschirmflächen die aus Kronenablotungen erstellten gemessenen Kronenschirmflächen. Es zeigt sich, dass die Kronenschirmflächen einiger Individuen eine hohe Übereinstimmung mit den Messwerten aufweisen und somit gut abgebildet werden können. Darunter befinden sich sowohl kreisförmige über dem Stammfuß zentrierte Kronen (z.B. Nummer 4 und 21) als auch solche mit asymmetrischer Kronenschirmfläche (z.B. Nummer 10, 13 und 23). Für andere Kronen weichen die konstruierten Kronenschirmflächen relativ weit von den gemessenen ab und weisen eine deutlich unterschiedliche Form auf (z.B. Nummer 19).

Als Alternative dienen kreisrunde über dem Stammfuß zentrierte Kronenschirmflächen. Diese decken im Mittel mit rund 72% einen um 2 Prozentpunkte größeren Anteil der gemessenen Kronenschirmflächen ab als die konstruierten potentiell asymmetrischen Kronen (Abbildung 40). Auch bei einer Betrachtung getrennt nach Baumarten ergibt sich ein ähnliches Bild: Außer für die Baumart Kiefer, für die die Unterschiede deutlich unter einem Prozentpunkt liegen, decken die runden Kronen



jeweils einen um rund 2,2 bis 4,6 Prozentpunkte höheren Anteil der gemessenen Kronenschirmflächen ab. Es fällt auf, dass die Buche im Vergleich zu den anderen Baumarten die geringste Übereinstimmung und die größte Streuung der Werte für beide Arten von Modellkronen aufweist. Wird der Vergleich nur für das Kollektiv der Bäume im Oberstand durchgeführt, so ergeben sich höhere Überschneidungen für beide Verfahren, der Unterschied zwischen den Verfahren bleibt jedoch etwa gleich.

Abbildung 40: Überschneidung der Modellkronenschirmfläche mit gemessenen Schirmflächen - Boxplots mit Whiskern bis maximal zum 1,5fachen des Interquartilsabstandes. Punktierte Linien bezeichnen jeweils das Mittel über alle Baumarten.

Bei der Betrachtung der unüberschirmten Bestandesfläche erfolgt die Auswertung bestandesweise, sodass die Ergebnisse nach Baumartenzusammensetzung des Bestandes statt nach Baumarten gegliedert sind. Abbildung 41 stellt die Abweichung der unter Verwendung runder bzw. potentiell asymmetrischer Modellkronen berechneten unüberschirmten Fläche von aus Kronenablotungen berechneten Werten dar. Positive Abweichungen bedeuten eine Unterschätzung während negative Abweichungen auf eine Überschätzung der unüberschirmten Bestandesfläche hindeuten. Die Ergebnisse bestätigen zunächst im Mittel die Überschätzung der unüberschirmten Fläche bei Anwendung runder Modellkronen. Es ist jedoch eine erhebliche Streuung zu verzeichnen, sodass die Schätzungen für einige Flächen sehr geringe Abweichungen von den aus Ablotungen hergeleiteten Werten ergeben. Insbesondere für die drei zur Verfügung stehenden Douglasienbestände ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Für die sechs untersuchten Birken-Fichten-Mischbestände treten sowohl Abweichungen nach oben wie nach unten auf, sodass die Streuung zwar beträchtlich ist, die Werte jedoch im Mittel zu den Messwerten passen.

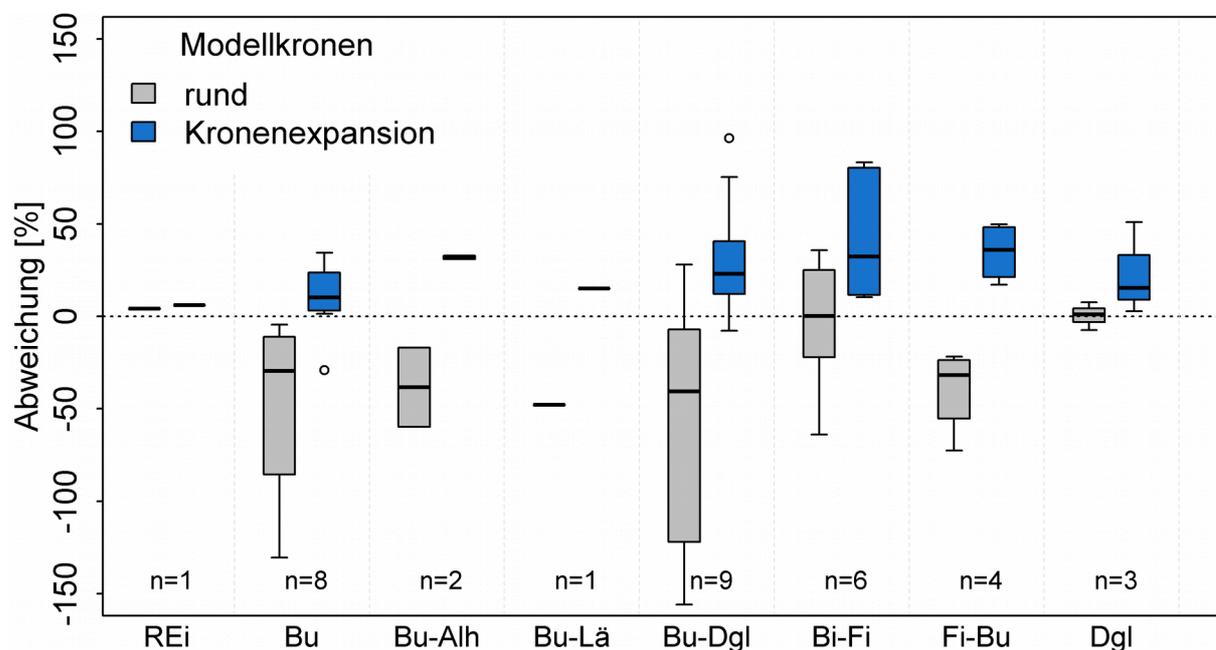


Abbildung 41: Unüberschirmte Bestandesfläche. Abweichung der aus Modellkronen abgeleiteten Werte von auf Kronenablotungen basierenden Werten nach Baumartenzusammensetzung (REi – Roteiche, Bu – Buche, Bu-Alh – Buche-Edellaubholz, Bu-Lä – Buche-Lärche, Bu-Dgl – Buche-Douglasie, Bi-Fi – Birke-Fichte und Dgl – Douglasie)

Die aus potentiell asymmetrischen Kronenschirmflächen abgeleitete unüberschirmte Fläche liegt dagegen im Mittel unter den Werten aus Ablotungen, sodass die unüberschirmte Fläche für fast alle Bestände unterschätzt wird. Besonders große Abweichungen treten bei den Buchen-Douglasien-Mischbeständen sowie für Birken-Fichten-Mischbestände auf. Dagegen ergibt sich für alle acht untersuchten Buchen-Reinbestände eine im Vergleich zu auf runden Kronen basierenden Ergebnissen geringe Abweichung. Insgesamt betrachtet wird die unüberschirmte Bestandesfläche mithilfe der runden Kronen um 37% überschätzt während die auf potentiell asymmetrischen Kronenschirmflächen basierende unüberschirmte Fläche rund 27% unter dem Referenzwert aus Kronenablotungen liegt.

6.2 Krone und Zuwachs

Der Zusammenhang zwischen dem Grundflächenzuwachs und der Krone eines Baumes spiegelt sich über alle Baumarten hinweg durch die Bestätigung signifikanter Einflüsse verschiedener Kronenparameter in den Zuwachsmodellen wieder. Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der baumartspezifischen Anpassung des Referenzmodells kurz erläutert. Anschließend sind die Ergebnisse der Variablen-selektion sowie die Vereinheitlichung der Zuwachsmodelle zwischen den Baumarten dargestellt.

6.2.1 Referenzmodell

Die Parametrisierung des Referenzmodells ergibt für alle Baumarten signifikant von Null verschiedene Zufallseffekte auf Ebene der Parzelle und der Aufnahme. Unter den festen Effekten zeigen die Kronenmantelfläche km , das Alter und der Kronenkonzurrenzindex k_{A11} für alle Baumarten jeweils einen hochsignifikanten ($p < 0,001$) Einfluss auf die Zielgröße. Für den Freistellungsindex Δk_{A11} trifft dies nur im Fall von Buche und Douglasie zu, für Kiefer ist der Einfluss noch signifikant ($p < 0,01$); für Eichen, Fichte und Lärche lässt sich kein signifikanter Einfluss nachweisen. Die Effekte sind in ihrem Verlauf teilweise nicht linear und – in einigen Fällen mit Ausnahme des Freistellungsindex – biologisch grundsätzlich plausibel (für Buche siehe Abbildung 42, übrige Baumarten im Anhang 12.3.1). Die flexible Modellierung der einzelnen Effekte durch Splines führt zu erwartungstreuen Vorhersagen (Anhang Abbildung 52).

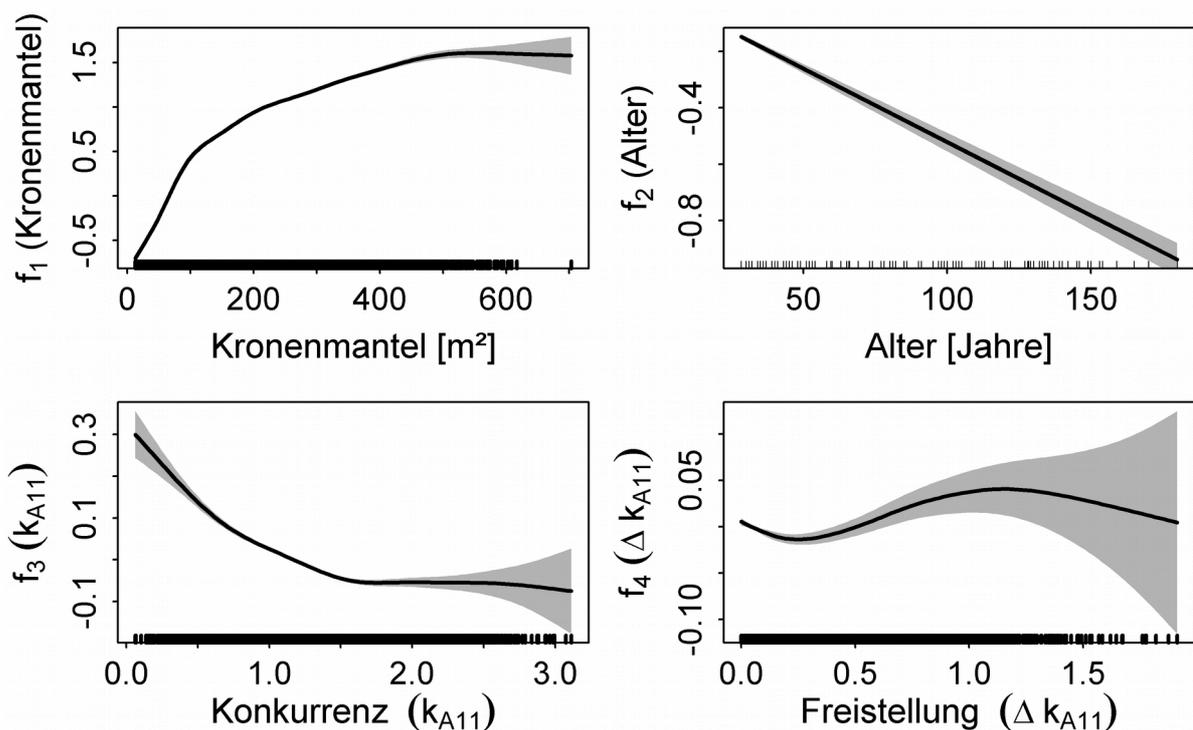


Abbildung 42: Effekte der erklärenden Variablen auf den Grundflächenzuwachs der Buche

6.2.2 Baumartspezifische Modelle

Die nach Abschluss der Variablenselektion zusätzlich berücksichtigten Zufallseffekte auf Parzellen- und Aufnahmeebene sind für alle Baumarten signifikant von Null verschieden. Die resultierenden Modelle sind näherungsweise unverzerrt und liefern plausible Vorhersagen. Die Ergebnisse der Variablenselektion unterscheidet sich zum Teil deutlich zwischen den Baumarten (Tabelle 8): Im Vergleich zum Referenzmodell erweist sich für die Baumarten Eiche, Buche, Douglasie und Lärche der BHD gegenüber der dort angenommenen Kronenmantelfläche in Bezug auf die Zuwachsmodellierung als überlegen. Für Fichte und Kiefer erzielt die Lichtkronenmantelfläche die besten Ergebnisse, wobei jeweils verschiedene Modellkronen-Varianten ausgewählt werden: Für Fichten führen auf der Basis von nach *BWINPro* geschätzten Eingangsgrößen (Kronenlänge, Kronenbreite) erstellte Modellkronen zum besten Ergebnis, während die neu entwickelten Modelle zur Schätzung dieser Größen für Kiefer zu besseren Ergebnissen führen. In beiden Fällen werden runde, auf dem Kronenprofil *BWINPro* basierende Modellkronen ausgewählt. Daneben erweist sich für Buche und Douglasie die Lichtkronenmantelfläche und für Kiefer der BHD als signifikant und plausibel.

Tabelle 8: Ergebnis der Variablenselektion zur Zuwachsprognose nach Baumarten(-gruppen)

	Dimension 1	Dimension 2	Alter	Höhe	Konkurrenz 1	Konkurrenz 2	Freistellung
Eichen	d	-	alt	h	asfm _{A22}	k _{A22}	Δk_{B11}
Buche	d	lkm _{B12}	alt	h	k _{A22}	asfm _{A22}	$\Delta asfm_{B12}$
Fichte	lkm _{A11}	-	alt	h	k _{A11}	asfm _{B11}	-
Douglasie	d	lkm _{B11}	alt	h	k _{A11}	asfm _{A11}	$\Delta asfm_{B11}$
Kiefer	lkm _{B11}	d	alt	-	k _{B13} oder k _{B23}	-	-
Lärche	d	-	alt	h	k _{A11}	-	-

Von den untersuchten Möglichkeiten zur Beschreibung der Konkurrenz (k , $asfm$) erweist sich mit Ausnahme der Eichen die Kronenkonkurrenz als überlegenes Konkurrenzmaß. Für die Eichen ist dagegen der schirmfreie Anteil der Kronenmantelfläche besser für die Zuwachsprognose geeignet. Die zur Berechnung unterstellten Kronenmodelle basieren außer für die Kiefer auf Kronenlänge und Kronenbreite nach *BWINPro*. Da die Kronenkonkurrenz aus der Summe der Kronenquerschnittsflächen

der Bäume innerhalb eines bestimmten Suchradius gebildet wird, spielt die Form (rund oder asymmetrisch) der Kronenschirmfläche dabei keine Rolle. In Bezug auf das Kronenprofil scheint für Fichte, Douglasie und Lärche das Kronenprofil „*BWINPro*“ vorteilhaft zu sein, für die Kiefer die Variante Kronenprofil „*Artengruppe + h*“ und für die Laubbaumarten das Kronenprofil „*Artengruppe + kl*“.

Eine zusätzliche Größe zur Beschreibung der Konkurrenz findet für die Eichen, die Buche, die Fichte und die Douglasie Eingang ins Modell. Auch hier werden verschiedene Modellkronen-Varianten ausgewählt, sowie verschiedene Variablen: k im Fall der Eiche, $asfm$ für Buche, Douglasie und Fichte.

Der Einfluss einer ggf. erfolgten Freistellung lässt sich für Fichte, Kiefer und Lärche nicht nachweisen. Für Eiche wird dieser Einfluss am besten mittels Δk beschrieben, während für Buche und Douglasie $\Delta asfm$ besser geeignet ist. Dabei kommen ausschließlich Modellkronen zur Anwendung, die auf den neu entwickelten Kronenlängen- und -breitenmodellen (GLMM bzw. GAMM) basieren. Diese verwenden für zwei Baumarten das Kronenprofil „*BWINPro*“, für Buche dagegen Kronenprofil „*Artengruppe + kl*“.

Das Alter trägt zur Verbesserung der Modelle für alle Baumarten bei. Auch die Baumhöhe wird mit Ausnahme des Modells für Kiefer in die Zuwachsmodelle aufgenommen.

Der Verlauf der Effekte ist grundsätzlich plausibel und teilweise nicht linear (12.3.2). Der Grundflächenzuwachs steigt mit zunehmendem BHD (Eichen, Buche, Douglasie, Lärche) bzw. mit zunehmender Lichtkronenmantelfläche (Fichte, Kiefer) zunächst steil aber mit rückläufiger Tendenz an. Für Fichte und Douglasie zeigt sich im Bereich großer Dimensionen (Lichtkronenmantelfläche $> 170 \text{ m}^2$ bzw. BHD $> 70 \text{ cm}$) kein Einfluss auf den Grundflächenzuwachs mehr. Im Fall von Eichen und Buche fällt der Effekt des BHD auf den Grundflächenzuwachs für sehr große BHD ($> 70 \text{ cm}$) wieder unter den Maximalwert, der im Bereich von etwa 70 cm erreicht wird. Neben den genannten wichtigsten Effekten steigt der Grundflächenzuwachs für Buche und Douglasie bei gegebenem BHD mit der Lichtkronenmantelfläche. Dieser Effekt ist für Buche linear während im Fall der Douglasie ab einer Mantelfläche von etwa 100 m^2 ein Plateau erreicht wird. Im Fall von Eiche und Lärche, deren wichtigste Einfluss-

größe ebenfalls der BHD ist, ergibt die zusätzliche Berücksichtigung der Lichtkronenmantelfläche keine Modellverbesserung. Für die Kiefer nimmt der Grundflächenzuwachs bei gegebener Lichtkronenmantelfläche mit steigendem BHD zunächst stark, ab etwa 30 cm geringer zu. Im Gegensatz dazu kann für die Fichte kein signifikanter und plausibler Einfluss des BHD neben der Lichtkronenmantelfläche nachgewiesen werden.

Der Alterseffekt zeigt bei gegebener Dimension (BHD oder Lichtkronenmantelfläche) mit zunehmendem Alter abnehmende Grundflächenzuwächse für alle Baumarten. Je länger ein Baum also gebraucht hat um eine bestimmte Dimension zu erreichen, desto geringer ist der vorhergesagte Zuwachs. Der Effekt ist linear außer im Fall der Fichte, für die der Effekt mit zunehmendem Alter nachlässt, sodass sich ab einem Alter von etwa 100 Jahren kein weiterer Zuwachsrückgang mit weiter steigendem Alter nachweisen lässt.

Auch die Baumhöhe (alle Baumarten außer Kiefer) hat – bei gegebener Dimension und gegebenem Alter – einen negativen Effekt auf den Grundflächenzuwachs, sodass für schlankere Bäume, die bei gegebener Dimension höher sind, geringere Zuwächse vorhergesagt werden als für Bäume gleicher Dimension mit geringerer Höhe. Im Detail zeigt der Verlauf der Effekte teilweise unplausible Schwankungen.

Im Vergleich zum Dimensions-Effekt (Dimension 1) haben Alters- und Höheneffekt, sowie eine ggf. berücksichtigte weitere Dimensionsgröße eine deutlich geringere Amplitude, was auf einen geringeren Effekt auf den Grundflächenzuwachs schließen lässt. Die Effekte von Kronenkonkurrenzindex, schirmfreiem Anteil der Kronenmantelfläche und Freistellungsindex sind noch geringer aber dennoch hochsignifikant.

Erwartungsgemäß sagen die Modelle aller Baumarten abnehmende Zuwächse mit zunehmendem Kronenkonkurrenzindex voraus. Dabei ist der Effekt des Kronenkonkurrenzindex für die meisten Baumarten linear. Für Douglasie geht der Einfluss der Konkurrenz ab einem Wert von einer etwa 1,1-fachen Überschirmung der Fläche zurück, bleibt aber negativ. Für die Buche lässt sich jenseits eines Wertes von 1,5 kein weiterer negativer Einfluss mehr nachweisen. Dagegen bleibt der negative Einfluss zunehmender Konkurrenz für die übrigen (weniger schattentoleranten) Baumarten unabhängig von der Konkurrenzintensität gleich.

Ein zweiter Konkurrenzindikator wird für vier Baumarten in die Modelle aufgenommen und weist auf mit dem schirmfreien Anteil der Lichtkronenmantelfläche (*asfm*) ansteigende Zuwächse hin. Für Buche scheint sich die Zunahme des *asfm* im Bereich geringer Werte (bis 0,1 – 0,15) jedoch zunächst negativ auf den Zuwachs auszuwirken. Für die Lärche ist der Datensatz vergleichsweise klein, sodass ein Einfluss der schirmfreien Lichtkronenmantelfläche nicht nachgewiesen werden kann. Auch für Kiefer ergibt sich kein solcher Einfluss auf den Zuwachs.

Die Freistellung eines Baumes, ausgedrückt jeweils durch eine der untersuchten Variablen, wirkt sich positiv auf den Grundflächenzuwachs aus: Je stärker die Freistellung desto größer der Zuwachs. Für Eiche deutet sich eine Zunahme dieses positiven Effekts mit zunehmender Freistellung an, während für Buche eine abnehmende Tendenz zu verzeichnen ist. Der Effekt für Douglasie verläuft linear. Für Fichte, Kiefer und Lärche kann kein Einfluss der Freistellung abgesichert werden.

6.2.3 Sensitivitätsanalyse am Beispiel der Buche

In Abbildung 43 wird die Sensitivität des baumartspezifischen Modells im Hinblick auf Änderungen der kronenbasierten Parameter (ohne Lichtkronenmantelfläche) demonstriert. Die Grundlage sind mittlere Werte von Durchmesser und Höhe als Funktion des Alters (4.8), sowie mittlere Werte für Konkurrenz ($k_{A22}=0,7$), den schirmfreien Anteil der Kronenmantelfläche ($asfm_{A22}=0,5$) und eine Freistellung von $\Delta asfm_{B12}=0,3$. Ausgehend von diesen „mittleren“ Verhältnissen wird jeweils einer der Prädiktoren variiert, sodass der Effekt auf den in den jährlichen Radialzuwachs umgerechneten Grundflächenzuwachs deutlich wird. Dabei variiert der Kronenkonkurrenzindex zwischen 0 und 1,5 und der schirmfreie Anteil der Kronenmantelfläche ebenso wie die Freistellung zwischen 0 und 1.

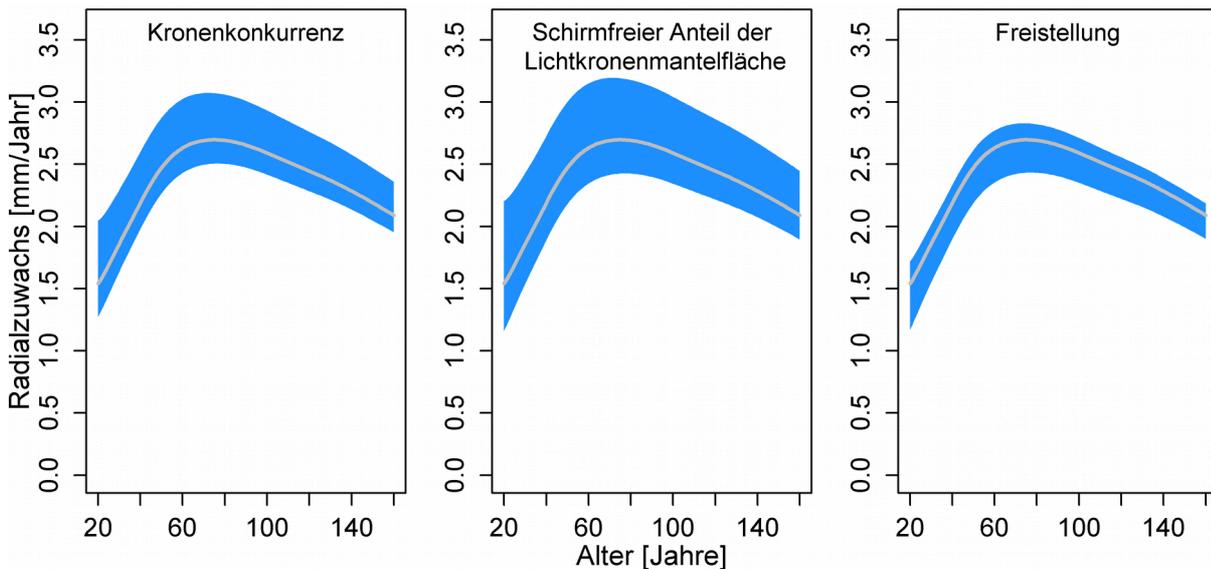


Abbildung 43: Sensitivitätsanalyse der Modellschätzungen des Alternativmodells (GAMM) in Bezug auf die kronenbezogenen Prädiktoren

Insgesamt sagt das Modell mit dem Alter zunächst steil ansteigende jährliche Radialzuwächse voraus, die im Alter zwischen 60 und 80 Jahren bei etwa 2,7 mm/Jahr kulminieren und mit weiter steigendem Alter langsam abnehmen. Aufgrund der Eingangsdaten, die typische Dimensionen eines „mittleren“ verbleibenden Baumes über dem Alter abbilden, ist dieser Verlauf jedoch nur bedingt als Entwicklungskurven eines Einzelbaumes zu interpretieren. In Abhängigkeit vom Alter zeigt das Modell konkurrenzbedingte Unterschiede des Radialzuwachs von bis zu 0,77 mm/Jahr. Der schirmfreie Anteil der Kronenmantelfläche modifiziert den vorhergesagten jährlichen Radialzuwachs um bis zu 1,04 mm und der Freistellungsindex verursacht Unterschiede von bis zu 0,55 mm/Jahr. Für alle drei untersuchten Prädiktoren zeigt sich in jüngeren Jahren eine deutlich größere Sensitivität als in höherem Alter.

6.2.4 Einheitliches Zuwachsmodell

Ausgehend von den baumartspezifischen Modellen werden die Modelle vereinheitlicht. Dazu werden zunächst für alle Baumarten die verwendeten Einflussgrößen vereinheitlicht, sofern sie für die jeweilige Baumart signifikant sind.

Zur Beschreibung der Dimension bietet sich als einheitliche Größe der BHD an, da dieser den Grundflächenzuwachs für vier von sechs Baumarten besser beschreibt,

als die Alternativen in dieser Variablen­gruppe, sodass nur die Modelle für Fichte und Kiefer dahingehend angepasst werden müssen. Die zusätzliche Berücksichtigung der Kronendimension bzw. des BHD entfällt, da diese nur für drei der sechs Arten in die Modelle eingehen.

Das Alter geht in jedes der baumartspezifischen Modelle als erklärende Variable ein, sodass diese Größe auch für das einheitliche Zuwachsmo­dell verwendet wird. Die Baumhöhe bleibt ebenso erhalten, da für diese bei fünf der sechs Baumarten (Ausnahme Kiefer) ein signifikanter Einfluss auf den Zuwachs nachgewiesen werden konnte.

In Bezug auf die Konkurrenz wird der Kronenkonkurrenzindex für alle Baumarten in das Modell aufgenommen, sodass diesbezüglich lediglich die zugrundeliegende Kronenrepräsentation vereinheitlicht werden muss.

Zur Beschreibung der Freistellung geht $\Delta asfm$ (in verschiedenen Varianten) für zwei der drei Baumarten ein, für die ein Effekt der Freistellung mithilfe der getesteten Variablen nachweisbar war. Auch für die Eiche lässt sich die Freistellung mithilfe dieser Größe zeigen. Obwohl sich für Fichte, Kiefer und Lärche kein Einfluss der Freistellung auf den Grundflächenzuwachs zeigen lässt, wird $\Delta asfm$ für die übrigen Baumarten beibehalten und nur bezüglich der Variante vereinheitlicht, da die dadurch bedingte Sensitivität der Modelle gegenüber einer Bestandesbehandlung im Rahmen von Waldwachstumssimulationen eine wichtige Rolle spielt.

Darüber hinaus berücksichtigen die Modelle von drei Baumarten den $asfm$ als zweiten Konkurrenzindikator. Da der Verlauf der Effekte dieser Variablen in allen Fällen nur in der Tendenz grundsätzlich plausibel, im Einzelnen jedoch durchaus problematisch erscheint und diese Probleme bei der Wahl suboptimaler Varianten noch zunehmen, wird auf eine Berücksichtigung dieser Variablen für die einheitlichen Zuwachsmo­delle verzichtet.

Als einheitliches Modell für die Kronenrepräsentation wird die Variante $B23$ verwendet, für die Kronenbreite und -länge auf Basis der neu entwickelten Modelle (GLMM bzw. GAMM) berechnet wird. Diese Variante berücksichtigt asymmetrische Kronenschirmflächen und unterstellt nach Artengruppen unterschiedene Kronenpro-

file, für die die Lichtkronenlänge in Abhängigkeit von der Baumhöhe geschätzt wird (vgl. 5.1.4).

Um zu einem für alle untersuchten Baumarten in Bezug auf die berücksichtigten Variablen einheitlichen Zuwachsmo­dell zu gelangen, ist in einzelnen Punkten eine Abweichung vom jeweiligen baumartspezifischen Modell nötig. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, abzuschätzen, wie stark sich diese Abweichungen auf die resul­tierende Zuwachsprognose auswirken. Abbildung 44 vermittelt einen Eindruck von der Auswirkungen dieser Abweichung für einzelne Variablen im Vergleich zueinander. Dazu werden für Fichte und Kiefer Modelle angepasst, die statt der Lichtkronen­mantelfläche den BHD berücksichtigen. Ebenso werden die Änderungen für die anderen Baumarten schrittweise veranschaulicht. Die Abbildung zeigt die Auswirkung der Modelländerung auf die Prognose im Vergleich zum baumartspezifischen Modell (6.2.2). Beispielsweise führt eine Änderung des Modells im Vergleich zum baumart­spezifischen Modell für Fichte (BHD statt lkm_{A11}) zu einer Veränderung des prognosti­zierten Grundflächenzuwachs von im Mittel rund 2% der Vorhersage nach dem baumartspezifischen Modell. Für die Kiefer bewirkt die Berücksichtigung des BHD statt der laut baumartspezifischem Modell bevorzugten lkm_{A11} deutlich größere Unter­schiede der Prognose von im Mittel rund 7% des nach baumartspezifischem Modell vorhergesagten Zuwachs.

Es zeigt sich, dass die Änderungen insgesamt zu Unterschieden in der Zuwachs­prognose führen, die mit Ausnahme der Kiefer (13,6%) deutlich unter 10% (6,0 – 8,5%) des nach baumartspezifischem Modell vorhergesagten Zuwachs liegen (nicht abgebildet). Die vergleichsweise großen Unterschiede zwischen den Vorhersagen der Kiefernmodelle sind hauptsächlich auf den Wechsel von der Lichtkronenmantel­fläche zum BHD zurückzuführen, der sich für Kiefer deutlich stärker auswirkt als im Falle der Fichte.

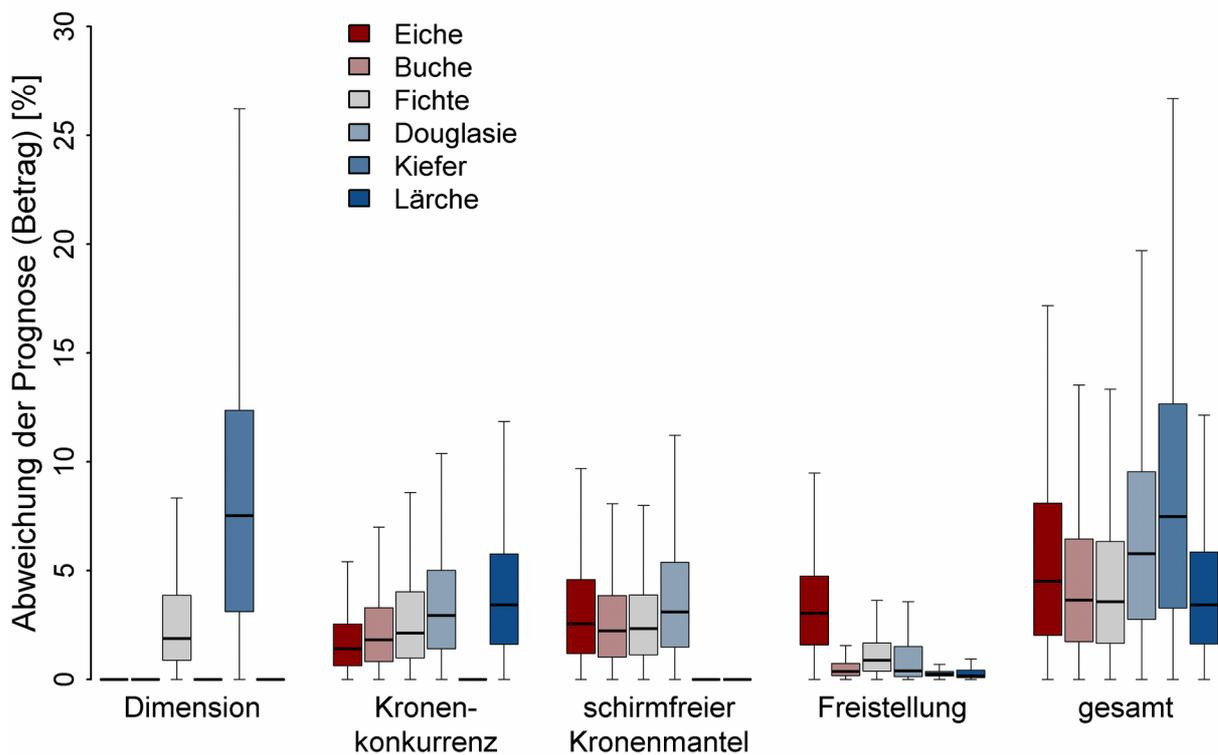


Abbildung 44: Auswirkung der Modellvereinheitlichung je Baumart auf die Zuwachsprognose. Aufgetragen ist die relative Abweichung der Prognose mit verändertem Modell (Verwendung des Prädiktors wie im einheitlichen Zuwachsmodell) von der Prognose des baumartsspezifischen Modells (Ordinate). Die vorgenommene Veränderung der Modelle ergibt sich aus der Beschriftung der Abszisse. Die relative Abweichung ist null, wenn das baumartsspezifische Modell bezüglich eines Prädiktors mit dem einheitlichen Zuwachsmodell übereinstimmt.

Da in die baumartsspezifischen Modelle aller Baumarten verschiedene Varianten des Kronenkonkurrenzindex eingehen, ändert sich ggf. nur die der Berechnung zugrundeliegende Modellkronen-Variante. Die Umstellung auf die gemeinsame Modellkronen-Variante bewirkt – unter Beibehaltung der übrigen Variablen in der jeweils für das baumartsspezifische Modell ausgewählten Variante – Veränderungen im Bereich zwischen 0 (Kiefer) und 6,3% (Lärche) der Zuwachsprognose nach dem baumartsspezifischen Modell. Die Modellkronen-Varianten unterscheiden sich in Bezug auf Kronenprofile und die Methode zur Schätzung von Kronenbreite und -länge. Da sich der Kronenkonkurrenzindex aus der Summe der Kronenquerschnittsflächen innerhalb einer Einflusszone mit Radius doppelte Kronenbreite um den Zentralbaum berechnet, hängt er maßgeblich von Kronenprofil und Kronenbreite des Zentralbaumes ab.

Neben der Wahl der Prädiktoren hat auch die zur Berechnung der Konkurrenz unterstellte Modellkronen-Variante einen Einfluss auf die Zuwachsprognose. Ein Vergleich der Vorhersage von Modellen, die auf Basis verschiedener Modellkronen-Varianten berechnete Kronenkonkurrenzindizes verwenden, soll zeigen, in welchem Umfang die Zuwachsprognose von der Schätzung der Kronenbreite bzw. der unterstellten Kronenprofile abhängt. Dafür wird für jede Baumart ein Modell parametrisiert, das den Konkurrenzeinfluss mittels Kronenkonkurrenz in der Variante k_{B11} beschreibt (übrige Variablen wie im baumartspezifischen Modell). Die Prognosen dieses Modells werden mit Prognosen von Modellen verglichen, die sich davon nur hinsichtlich der für die Berechnung des Kronenkonkurrenzindex unterstellte Modellkronen-Variante unterscheiden. Die Varianten k_{B12} und k_{B13} unterscheiden sich von k_{B11} durch die Unterstellung anderer Kronenprofile („*Artengruppe + kl*“ bzw. „*Artengruppe + h*“ statt der Standardvariante *BWINPro*), während die Variante k_{A11} sich hinsichtlich der Schätzung der Kronenbreite von k_{B11} unterscheidet.

Abbildung 45 vergleicht die Zuwachsprognosen dieser Modelle. Dargestellt ist jeweils die relative Abweichung der Prognose von der Prognose mit der Modellkronen-Variante k_{B11} . Mit Ausnahme der Lärche sind die Abweichungen der Prognose durch die Unterstellung eines anderen Kronenprofils („*Artengruppe + kl*“ bzw. „*Artengruppe + h*“) geringer als die Abweichungen, die durch die abweichende Schätzung der Kronenbreite (*GAMM* statt *BWINPro*) verursacht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl des Kronenprofils in fast allen Fällen eine deutlich geringere Bedeutung für die Zuwachsprognose hat als die Berechnung der Kronenbreite, die ihrerseits den Suchradius bestimmt. Eine Ausnahme bildet die Lärche, für die die Änderung des Kronenprofils ähnlich große Auswirkungen auf die Zuwachsprognose hat wie die Veränderung der geschätzten Kronenbreite.

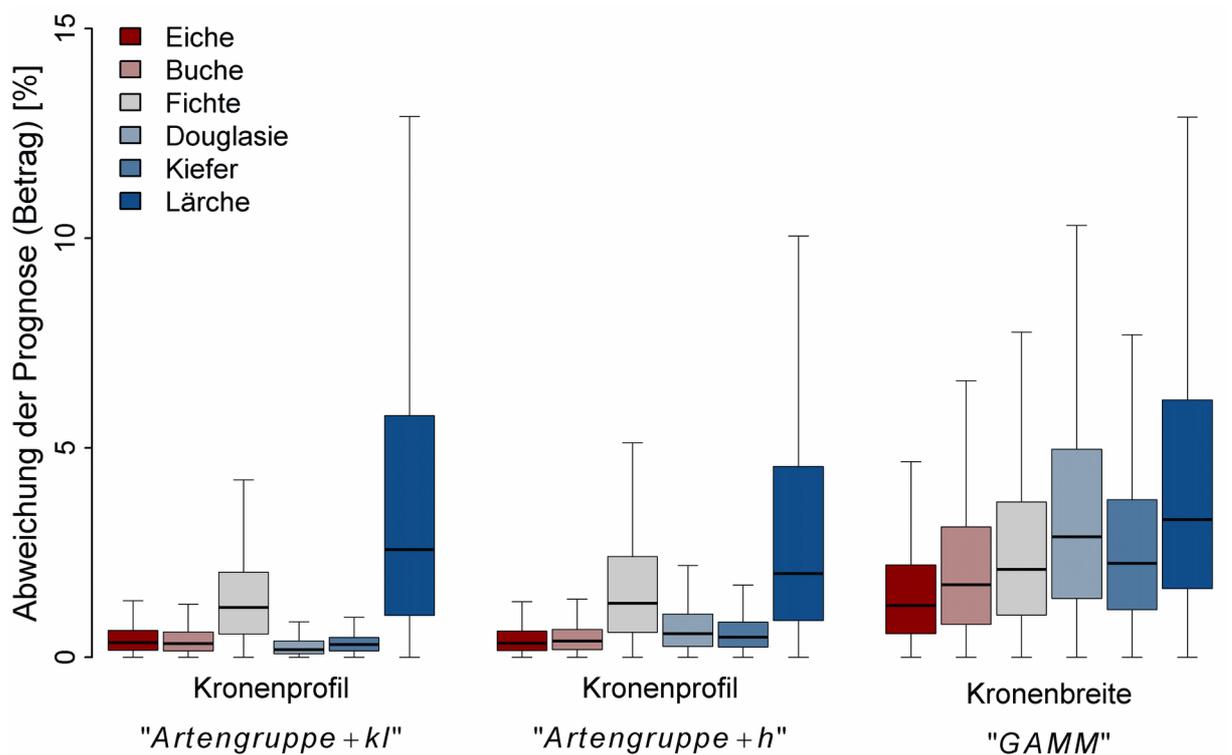


Abbildung 45: Auswirkung der Modellkronen-Variante zur Berechnung des Kronenkonzurrenzindex auf die Zuwachsprognose. Relative Abweichung der Prognose von der Prognose bei Unterstellung der Modellkronen-Variante k_{B11} (Kronenprofil „BWINPro“ und Kronenbreite nach BWINPro). Die Beschriftung entlang der Abszisse bezeichnet jeweils den Unterschied zwischen der unterstellten Modellkronen-Variante und der Modellkronen-Variante k_{B11} .

7 Diskussion

In diesem Abschnitt erfolgt eine kritische Betrachtung der Ergebnisse, wobei zunächst auf die Modellkronen und die dafür benötigten Modelle zur Schätzung der Kronendimensionen eingegangen wird. Anschließend werden die Modellkronen in Bezug auf die Zuwachsprognose näher beleuchtet.

7.1 Modellkronen

Für den Aufbau der vorgestellten Modellkronen sind Informationen zu Kronenlänge und Kronenbreite auf Einzelbaumebene erforderlich. Da diese Daten nicht an allen Bäumen der Versuchsflächen erhoben wurden, werden sie mittels statistischer Modelle geschätzt.

7.1.1 Kronenlänge

Das Modell zur Schätzung der Kronenlänge umfasst zwei Modellstufen. Die erste Modellstufe berücksichtigt kausal erklärende Variablen, deren Einfluss im folgenden Abschnitt diskutiert wird. Eine Sensitivitätsanalyse verdeutlicht dies am Beispiel der Baumart Buche (7.1.1.2). Anschließend werden die Zufallseffekte (7.1.1.3) und die Möglichkeiten der Anwendung des Modells in Abhängigkeit von der Datenlage diskutiert (7.1.1.4).

7.1.1.1 Effekte der erklärenden Variablen

Die erste Stufe des Modells zur Schätzung des Bekronungsgrades beschreibt die Effekte erklärender Variablen. Der Einfluss der Bestandesdichte auf den Bekronungsgrad wird anhand der Effekte von BHD und Baumhöhe abgebildet. Diese ergeben zusammen betrachtet den h/d-Wert eines Baumes, der als Indikator der langfristigen Bestandesdichte gelten kann (ABETZ 1976; KRAMER & KÄTSCH 1994). Das Modell sagt für alle betrachteten Baumarten eine Abnahme des Bekronungsgrades mit zunehmendem h/d-Verhältnis voraus. Dieser grundsätzliche Zusammenhang ist aus zahlreichen anderen Untersuchungen bereits bekannt (HYNYNEN 1995; HASENAUER & MONSERUD 1996; SCHMIDT 2001).

Für alle betrachteten Baumarten ergibt sich eine Abnahme des Bekronungsgrades bei konstantem BHD mit dem Alter und mit der Höhe und zwar zunächst rasch und später langsamer bis hin zu sehr geringen Veränderungen in hohem Alter und bei großen Baumhöhen. Dies spiegelt die hohe Dynamik des Bekronungsgrades junger, niedriger Bäume im Vergleich zu älteren Bäumen, die bereits größere Höhen erreicht haben, wider (z.B. MITSCHERLICH 1970). Ein gleichgerichteter Trend wurde für mehrere Baumarten in Österreich und für Douglasie in Nordamerika anhand der Baumhöhe und für Nordwestdeutschland anhand der Spitzenhöhe nachgewiesen (HASENAUER & MONSERUD 1996; HANN & HANUS 2004; NAGEL ET AL. 2002).

Unter den einbezogenen Baumarten konnte allein für die Buche ein signifikanter und plausibler Effekt der Geländehöhe quantifiziert werden. Die vorhergesagte Abnahme des Bekronungsgrades mit zunehmender Geländehöhe stimmt von der Tendenz her mit den Ergebnissen von Hasenauer und Monserud (1996) überein. Ein Zusammenhang des Bekronungsgrades mit der Geländehöhe scheint für die anderen Baumarten weniger deutlich zu sein. Dennoch werden möglicherweise vorhandene derartige Effekte über den räumlichen Trend in Verbindung mit anderen Einflussgrößen berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen in doppelter Hinsicht die räumliche bedingte Variation des Bekronungsgrades. Die Zufallseffekte auf Ebene von Parzellen in der zweiten Modellstufe zeigen die räumlichen Korrelation auf kleiner räumlicher Skalenebene. Darüber hinaus erbringt die Berücksichtigung eines räumlichen Trends, also die räumliche Korrelation auf größerer Skalenebene, signifikante Modellverbesserungen für alle Baumarten. Dabei erscheint die vorhergesagte Abnahme des Bekronungsgrades mit zunehmender Geländehöhe plausibel. Ein gleichgerichteter Effekt wurde auch bei österreichischen Buchen gefunden (HASENAUER & MONSERUD 1996). Die geografische Koordinaten können hier als summarische Quantifizierung räumlich korrelierter Einflussfaktoren gewertet werden, die mithilfe der übrigen berücksichtigten Variablen nicht oder nicht ausreichend abgebildet werden können. Dazu gehören topografische Charakteristika, Standortseigenschaften, (regional-, forstamts- oder revierspezifische) Behandlungs- und Herkunftseffekte, klimatische Einflüsse, sowie Unterschiede in Bezug auf häufige Mischungsformen, das Vorkommen histori-

scher Waldformen und die Häufigkeit von Waldrandlagen. Leider liegen zu diesen möglichen Einflussgrößen keine Daten vor, sodass diese nicht voneinander getrennt werden können.

Dass eine Berücksichtigung solcher räumlich korrelierter Einflüsse sinnvoll sein kann, zeigen Studien wie die umfangreichen Untersuchungen in Österreich, die belegen, dass die Berücksichtigung topographischer Informationen die Vorhersage von Bekronungsgraden verbessern kann (HASENAUER & MONSERUD 1996). Dieses Ergebnis konnte für mehrere Baumarten im Südosten von Kanada bestätigt werden (TEMESGEN ET AL. 2005). Der Anteil der auftretenden Varianz, der durch die Geländehöhe, sowie Hangneigung und Exposition erklärt werden konnte lag je nach Baumart bei bis zu 9,4% bzw. bei 5 bis 23%. Eine Modellanpassung ohne räumlichen Trend und Geländehöhe im Rahmen dieser Arbeit führt zu einer Reduktion der jeweils insgesamt durch das Modell erklärten Varianz von 5,5 und 6,9 Prozentpunkten für Fichte und Kiefer bis zu 16,8 Prozentpunkten für Buche. Die Werte für die Baumarten Eiche (15,2), Douglasie (14,1) und Lärche (13,2) liegen dazwischen. Insgesamt liegen die Werte für viele Baumarten über den in der Literatur genannten Werte, was plausibel erscheint, da der räumliche Trend neben den topografischen Einflussgrößen noch andere räumliche Faktoren berücksichtigt. Allerdings unterscheiden sich die Ergebnisse deutlich hinsichtlich der Baumarten. Während räumlicher Trend und Geländehöhe den vorgestellten Modelle zufolge insbesondere für die Baumart Buche ein beträchtliches Erklärungspotential bieten, stellten Hasenauer und Monserud (1996) für diese Baumart eine nur geringe Reaktion auf die berücksichtigten topografischen Größen fest und die ihren Ergebnissen zufolge besonders sensitive Lärche liegt bei den hier untersuchten Daten nur im Mittelfeld. Leider ist aufgrund der methodischen Unterschiede ein direkter Vergleich nicht möglich.

Insgesamt betrachtet erklären die Modelle, die unter Berücksichtigung von Koordinaten und ggf. der Geländehöhe angepasst wurden vergleichsweise hohe Anteile der auftretenden Varianz. In der Literatur liegt der Anteil der erklärten Varianz von Modelle zur Schätzung des Bekronungsgrades mit Werten zwischen 18,8 und 23,9% für Eiche und Buche und 48,8% für Lärche (HASENAUER & MONSERUD 1996) bzw. Werten zwischen 29 und 57% zum Teil deutlich niedriger (TEMESGEN ET AL. 2005; DUCEY 2009).

Im Vergleich dazu erklären die Modelle der ersten Modellstufe zwischen 39,6 (Buche) und 68,3% (Fichte) der auftretenden Varianz. Übereinstimmend werden jeweils für die Buche die geringsten Erklärungsprozente gefunden.

In Bezug auf die Fortschreibung von Beständen ist nicht nur eine möglichst treffende Schätzung des Bekronungsgrades für einen bestimmten Zeitpunkt nötig, sondern es wird auch eine plausible Dynamik dieser Größe benötigt um beispielsweise Zuwachssprünge infolge sprunghafter Änderungen von Kronenparametern zu vermeiden. Die hier entwickelten Modelle berücksichtigen neben zeitlich konstanten Größen drei variable Prädiktoren: den BHD, die Baumhöhe und das Alter. Für diese drei Prädiktoren kann eine stetige Dynamik unterstellt werden, sodass die Modelle geeignet sind plausible Veränderungen vorherzusagen. Im Gegensatz dazu kann die Berücksichtigung anderer möglicher Prädiktoren zu Problemen in Bezug auf eine plausible Dynamik führen. So unterliegen bestandesbezogene Größen wie die Spitzenhöhe einer rechnerischen Verschiebungen infolge von Durchforstungen oder bei Räumung eines Überhalts, die zu einer unplausiblen sprunghaften Veränderung des Bekronungsgrades und in folge dessen des Zuwachses führen könnte.

7.1.1.2 Sensitivitätsanalyse am Beispiel der Buche

Die Sensitivitätsanalyse soll einen Eindruck von der Größenordnung der Effekte der Prädiktoren auf den Bekronungsgrad vermitteln. Die Vorhersagen erfolgen auf Basis der ersten Modellstufe um die grundsätzlichen kausalen Zusammenhänge zu verdeutlichen. Als Vergleichsgrundlage dienen mittlere BHD und Höhen über dem Alter für Buche (vgl. 4.8). Die Vorhersage unter konstanter geografischer Lage (Göttinger Wald, Geländehöhe 270 m über NHN) zeigt den Alterstrend des Bekronungsgrades (Abbildung 46): Die zeitliche Entwicklung verläuft bei mittlerem BHD von Bekronungsgraden von rund 0,65 bei 20-jährigen Buchen zu kürzeren relativen Kronenlängen von deutlich unter 0,6 im Alter 30 bis 40. Bei der unterstellten gleichzeitigen Höhenentwicklung von 10 auf 17 m ergibt sich eine Verlagerung der Kronenansatzhöhe von 3,5 auf gut 7 m. Für Bäume deren BHD um 10% über bzw. unter dem zu erwartenden mittleren Wert liegt, verändert sich die vorhergesagte Kronenansatzhöhe in jedem Alter um bis zu 0,6 m. Auf diese Weise können für Bäume im oberen bzw. unteren Bereich der Durchmesservertelung höhere bzw.

geringere Kronenansatzhöhen prognostiziert werden. Auch bestandesübergreifend werden für stärker dimensionierte Bestände (z.B. infolge stärkerer Freistellung) höhere Bekronungsgrade und damit geringere Kronenansatzhöhen vorhergesagt als für gleichaltrige Bäume geringerer Durchmesser. Auf diese Weise ermöglicht das Modell die indirekte Berücksichtigung von Behandlungseffekten.

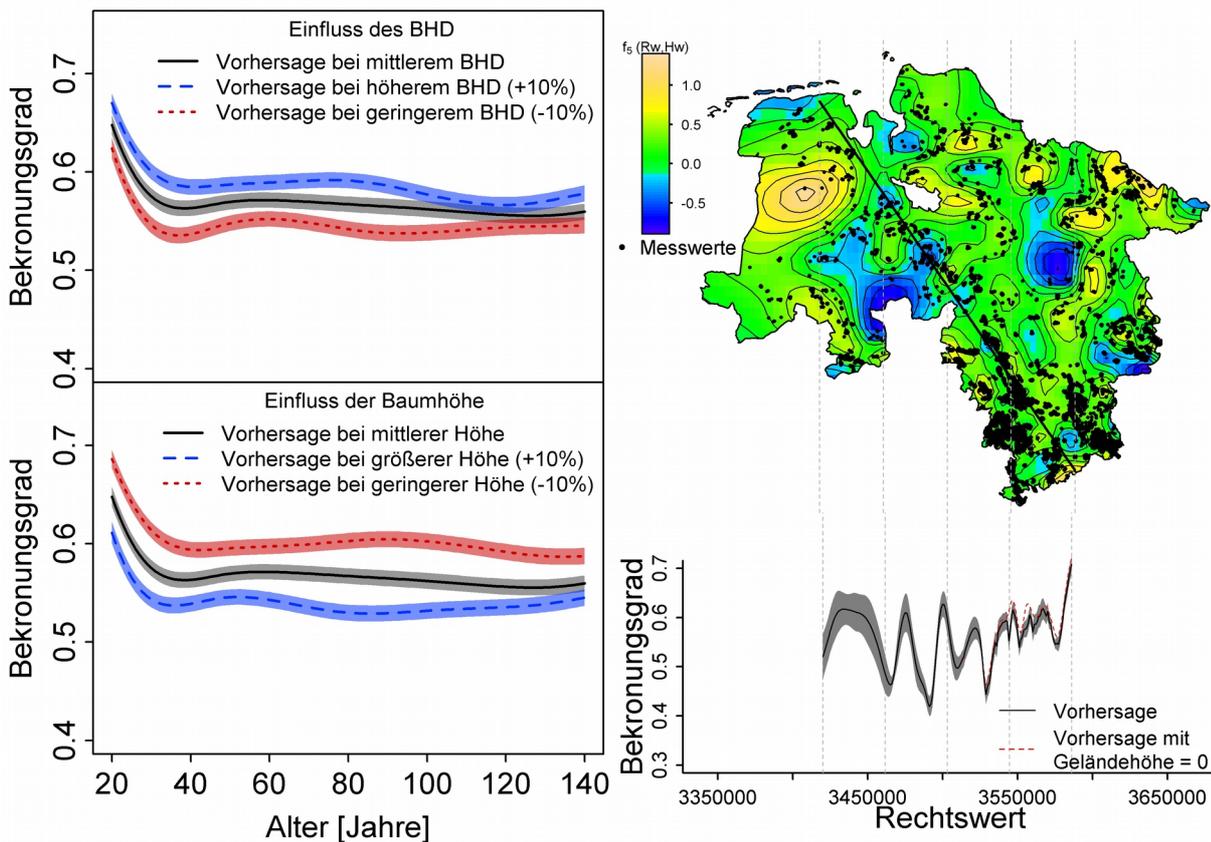


Abbildung 46: Einfluss der Prädiktoren auf den vorhergesagten Bekronungsgrad von Buchen: Vorhersagte Bekronungsgrade \pm doppelte Standardabweichung

Die vorhergesagten Unterschiede infolge angenommener um 10% größerer bzw. geringerer Höhen liegen im Bereich von bis zu 0,8 m. Im Vergleich zum Einfluss des Alters, des BHD und der Baumhöhe bewirkt die geografische Lage deutlich größere Unterschiede des Bekronungsgrades und infolge dessen der Kronenansatzhöhe. Die Vorhersage des Bekronungsgrades für 80-jährige Buche (BHD 27,4 cm, Höhe 24,3 m) entlang eines beispielhaft gewählten Transekts durch Niedersachsen verdeutlicht den Zusammenhang. Die resultierenden Vorhersagen liegen bei Kronenansatzhöhen zwischen 10,7 und 16,6 (bei auf 0 m über NHN fixierter Geländehöhe) bzw. 10,7 und 16,9 bei zusätzlicher Berücksichtigung der Geländehöhe. Die

Unsicherheit der Vorhersage – dargestellt anhand der doppelten Standardabweichung – variiert in Abhängigkeit von Anzahl und räumlicher Nähe der berücksichtigten Messwerte. Dabei zeigt sich, dass die Unsicherheit in vielen Bereichen gering ist im Verhältnis zur räumlich bedingten Variation der Vorhersagen.

Auffällig ist in diesem Zusammenhang die hohe Sensitivität des Modells bezüglich der geografischen Lage. In diese Richtung deutet auch der deutliche Rückgang des Anteils erklärter Varianz zwischen Modellen, die geografische Informationen berücksichtigen und den ohne Koordinaten und Geländehöhe parametrisierten Varianten.

Der große Einfluss des räumlichen Trends ist in gewisser Hinsicht unbefriedigend, da eine Zuordnung konkreter kausaler Einflussfaktoren nicht möglich ist. Er zeigt, dass bedeutende Einflussgrößen möglicherweise fehlen und ein großer Teil der Variation der Bekronungsgrade durch BHD, Alter und Höhe unerklärt bleibt. Der räumliche Trend bietet zwar keine kausale Erklärung, ermöglicht aber dennoch die Quantifizierung von räumlich bedingten Unterschieden des Bekronungsgrades. Für das Verständnis von Zusammenhängen sind kausal erklärbarere Einflussfaktoren unerlässlich. Für den hier vorliegenden Zweck einer möglichst präzisen Vorhersage der Kronenlänge zur Beschreibung der Kronen und als möglicher Prädiktor im Rahmen der Zuwachsmoellierung ist jedoch auch der nicht direkt kausal erklärbarere räumliche Trend hilfreich, da er die Prognose der Kronenlänge deutlich verbessert und daher eine Verbesserung der Zuwachsschätzung bedingen könnte.

7.1.1.3 Zufallseffekte

Die Schätzung aus der ersten Modellstufe geht in die Modelle der zweiten Modellstufe ein, die darüber hinaus Zufallseffekte auf der Ebene von Parzelle und Aufnahme berücksichtigen. Dabei wird der Zusammenhang zwischen der Schätzung aus der ersten Modellstufe, die die Effekte der Einzelbaumvariablen BHD, Baumhöhe und Alter sowie der Geländehöhe (nur Buche) berücksichtigt, und der Zielgröße des Modells mithilfe der Zufallseffekte modifiziert. Die Modelle der ersten Modellstufe beruhen auf der kombinierten Datenbasis aus Versuchsflächen- und Betriebsinventurdaten. Für die zweite Modellstufe werden nur Versuchsflächendaten verwendet, deren Messwerte durch die Berücksichtigung der Zufallseffekte nicht – wie in der ersten Modellstufe – als unabhängige Beobachtungen gewertet werden. Dies führt

dazu, dass die Schätzungen der ersten Modellstufe in den Modellen der zweiten Modellstufe modifiziert werden müssen (Parameter α und β) statt direkt als Offset einbezogen zu werden.

Der Vergleich der Modelle der zweiten Modellstufe zwischen den Baumarten bestätigt die bereits beschriebenen Ergebnisse dahingehend, dass für Buche die höchste unerklärte Reststreuung zu verzeichnen ist. Dies deutet auf eine vergleichsweise hohe Variabilität der Bekronungsgrade von Buchen gleicher Dimension und gleichen Alters innerhalb desselben Bestandes und zum gleichen Messzeitpunkt hin, während Individuen anderer hier betrachteter Baumarten im Hinblick auf den Bekronungsgrad geringere Unterschiede aufweisen.

7.1.1.4 Anwendung des Modells

Die Verwendung eines gemischten Modells zur Schätzung des Bekronungsgrades ist schon wegen der räumlich und zeitlich korrelierten Beobachtungen aus statistischer Sicht erforderlich, bietet jedoch noch weitere Vorteile und ermöglicht eine flexible Anwendung in Abhängigkeit von der Datenlage.

Für alle Parzellen und Aufnahmen innerhalb des Parametrisierungsdatensatzes werden Zufallseffekte geschätzt und können für die Prognose des Bekronungsgrades eingesetzt werden. Für neue Aufnahmen auf diesen Parzellen kann zumindest die zufällige Abweichung der Parzelle vom globalen Mittel berücksichtigt werden. Diese Anpassung der Schätzung an die Besonderheiten einzelner Flächen oder Aufnahmen kann sogar für nicht im Parametrisierungsdatensatz vorhandene Flächen oder Inventurpunkte mithilfe einiger Messwerte erreicht werden. Sind von einer neuen Fläche neben den Eingangsgrößen zur Schätzung des Bekronungsgrades ein oder mehrere gemessene Bekronungsgrade vorhanden, lässt sich das Modell mithilfe dieser Messwerte kalibrieren, sodass auch in diesem Fall eine Verbesserung der Schätzungen gegenüber einer Schätzung allein aus den festen Effekten zu erwarten ist. Die Methodik zur Kalibrierung findet sich bei Lappi (1997) und Mehtätalo (2004, 2005). Fehlen die Messwerte für die Kalibrierung des Modells kann die Schätzung auf Basis der festen Effekte erfolgen. Das Modell ist daher je nach Datenlage flexibel einsetzbar.

In Bezug auf die meisten Prädiktoren deckt der Parametrisierungsdatensatz ein breites Spektrum der in Nordwestdeutschland zu erwartenden Werte ab, so dass unter vielfältigen Anwendungssituationen plausible Schätzungen des Bekronungsgrades erreicht werden können. Für die räumliche Komponente des Modells ist die allgemeine Anwendbarkeit eingeschränkt, da nur innerhalb von Niedersachsen eine ausreichende Zahl räumlich unabhängiger Beobachtungen zur Quantifizierung des räumlichen Effekts eingesetzt werden konnte. Für Flächen außerhalb von Niedersachsen sollte daher auf eine Berücksichtigung des räumlichen Trends verzichtet werden. Hier können die ohne Verwendung geografischer Informationen parametrisierten Modellvarianten eingesetzt werden (Anhang).

7.1.2 Kronenbreite

Aus der Literatur sind zahlreiche Modelle zur Schätzung der horizontalen Kronenausdehnung bekannt (3.2.1). Der enge positive Zusammenhang der Kronenbreite mit dem BHD (z.B. GUERICKE 2001; BECHTOLD 2004) bestätigt sich auch im Rahmen dieser Arbeit für alle untersuchten Baumarten. Für die Baumarten Fichte und Lärche konnte keine Abweichung von einem rein linearen Zusammenhang festgestellt werden, was für die Lärche möglicherweise in der im Bereich geringer BHD-Werte schmalen Datenbasis begründet ist. Für die übrigen Baumarten steigt die Kronenbreite mit zunehmendem BHD zunächst steil und im weiteren Verlauf langsamer an. Dies ist biologisch durchaus plausibel und deckt sich mit Beobachtungen anderer Autoren (GILL ET AL. 2000; SCHMIDT ET AL. 2001).

Durch die simultane Berücksichtigung der Effekte von BHD und Baumhöhe bilden die Kronenbreitenmodelle die Wirkung der langfristigen Standraumsituation ab: Eng erwachsene Bestände oder Einzelbäume in beherrschter soziologischer Stellung erreichen bei vergleichbarer Höhe geringere BHD-Dimensionen und damit hohe h/d-Werte im Vergleich zu herrschenden oder gar solitär erwachsenen Bäumen mit geringeren Schlankheitsgraden (vgl. ABETZ 1976). Die negativen Effekte der Baumhöhe führen daher zu plausiblen Ergebnissen, indem für bedrängt erwachsene Bäume geringere Kronenbreiten zu erwarten sind als für Bäume in weniger dichten Beständen. Vergleichbare Ergebnisse sind für Eiche, Buche und Fichte in Sachsen und Bayern bekannt (PRETZSCH ET AL. 2002; SCHRÖDER ET AL. 2005). Auch für die Kiefer

in Sachsen, Monterey-Kiefern (*Pinus radiata* D. Don) in Spanien und Küsten-Kiefern (*Pinus contorta* Dougl. ex Loud.) in Kanada deuten Untersuchungen auf einen gleichgerichteten Effekt hin (SCHRÖDER ET AL. 2005; CRECENTE-CAMPO ET AL. 2009; GOUDIE ET AL. 2009), während dieser aus den auf bayrischen Kieferndaten basierenden Funktionen nicht hervorgeht bzw. tendenziell sogar entgegengesetzt gerichtet ist (PRETZSCH ET AL. 2002; CONDÉS & STERBA 2005). Die im Vergleich zu den anderen Baumarten große Unsicherheit des Höheneffekts bei der Kiefer ist auf eine relativ schmale Datenbasis in Verbindung mit einem vergleichsweise geringen Spektrum vorkommender Baumhöhen (vgl. Abbildung 12) zurückzuführen. Die Berücksichtigung der Bestandesdichte bzw. indirekt des h/d-Wertes erscheint insbesondere für die Vorhersage der Lichtverhältnisse unter dem Kronendach bedeutsam, da von der Bestandesdichte unabhängige Kronenbreiten in dichten Beständen eine Unterschätzung der Lichtverfügbarkeit erwarten lassen, während sie bei weitständig erwachsenen Bäumen zu einer Überschätzung der Lichtverfügbarkeit führen können (ASTRUP 2006).

In Bezug auf den Bekronungsgrad deuten die Ergebnisse auf mit dieser Größe zunehmende Kronenbreiten für alle untersuchten Baumarten hin (Abbildung 29 - 34). Für Buche kann neben einer generellen Zunahme der Kronenbreite mit dem Bekronungsgrad auch ein Abflachen des Effekts bei sehr langen Kronen (Bekronungsgrad > 0,7) abgesichert werden. Dies erscheint durchaus plausibel. Für die anderen Baumarten, für die deutlich weniger Beobachtungen vorliegen, ist dieser Rückgang bei langen Kronen nicht nachzuweisen. Ein gleichgerichteter Zusammenhang zwischen Kronenbreite und dem Bekronungsgrad wird auch für 39 von 53 untersuchten Baumarten im Westen der USA, eine Kiefernart in Spanien und für 15 Laub- und Nadelbaumarten in Maine (USA) beschrieben (BECHTOLD 2004; CRECENTE-CAMPO ET AL. 2009; RUSSELL & WEISKITTEL 2011). Auch der Bekronungsgrad lässt sich im Zusammenhang mit der Dimension des Baumes mit der Konkurrenzsituation bzw. der Bestandesdichte in Verbindung bringen, da unter stärkerem Konkurrenzinfluss erwachsene Bäume größere astfreie Schaftlängen erreichen, als Bäume in weniger dichten Beständen (RÖHRIG ET AL. 2006). Daher ergibt sich wiederum eine indirekte Abhängigkeit der Kronenbreite von der Konkurrenz indem Bäume mit geringeren Bekronungsgraden schmalere Kronen haben als solche mit längeren Kronen.

Gegenüber der ausdrücklichen Berücksichtigung eines Maßes der Bestandesdichte (z. B. Grundfläche) oder einer Größe zur Charakterisierung der Konkurrenz bietet die hier angewandte indirekte und über den Werdegang des Baumes integrierte Berücksichtigung der Standraumsituation die Möglichkeit, die eher langsame Dynamik der Kronenbreite plausibel abzubilden. Aufgrund der vergleichsweise trägen Veränderung der horizontalen Kronenausdehnung sind sprunghafte Änderungen dieser Größe nicht plausibel. Derartige Sprünge der vorhergesagten Kronenbreite können aber auftreten, wenn Grundfläche oder die aktuelle Konkurrenz als Prädiktoren eingehen und sich z.B. infolge einer Durchforstung ändern. Darüber hinaus führen bestandesbezogene Werte im Vergleich zu Einzelbaumvariablen zu undifferenzierteren Vorhersagen für räumlich heterogene Bestände, was sie für die Anwendung im Rahmen von Einzelbaummodellen nachteilig erscheinen lässt.

Der Alterseffekt ist weniger eindeutig interpretierbar. Er beschreibt die Unterschiede zwischen schnell und langsamer erwachsenen Bäumen bezüglich ihrer Kronenbreite. Die Unterschiede in der Wachstumsgeschwindigkeit einzelner Bäume kann jedoch verschiedene Ursachen haben. Bäume auf besseren Standorten oder unter günstigeren bioklimatischen Bedingungen erreichen eine bestimmte Dimension in jüngerem Alter als vergleichbare Bäume unter ungünstigeren Wachstumsbedingungen. Bei Untersuchungen zur maximalen Dichte (Stammzahl pro ha) von Beständen werden bei gleichem mittlerem BHD unter besseren Wachstumsbedingungen höhere Bestandesdichten erwartet als an ungünstigeren Standorten (DÖBBELER & SPELLMANN 2002; vgl. auch SCHÖBER 1967). Daraus folgt, dass Bäume unter besseren Wachstumsbedingungen unabhängig von waldbaulichen Eingriffen Kronen von geringerer horizontaler Ausdehnung haben könnten. Vor diesem Hintergrund könnten für Bäume, die eine bestimmte Dimension schneller erreicht haben, geringere Kronenbreiten erwartet werden als für langsamer erwachsene Vergleichsbäume. In dieser Richtung ausgeprägte Effekte zeigen die Ergebnisse für Buche und Fichte. Neben den allgemeinen Wachstumsbedingungen von Beständen spielen auch Unterschiede innerhalb eines Bestandes eine Rolle und können die Wachstumsgeschwindigkeit von Einzelbäumen beeinflussen. So ist es denkbar, dass die Konkurrenzsituation sich über das Maß hinaus, in dem sie über das h/d -Verhältnis bereits berücksichtigt ist, bemerkbar macht, sodass wiederum für enger stehende

Bäume geringere Kronenbreiten zu erwarten wären, als für Bäume die freier erwachsen sind. Einen derart gerichteten Effekt zeigt das Modell für die Baumart Eiche.

Unterschiede können aber auch auf kleinstandörtliche Variabilität, die genetische Veranlagung, durch Schädlingsbefall oder Schäden an einzelnen Bäumen zurückzuführen sein. In dieser Hinsicht benachteiligte Bäume brauchen länger eine bestimmte Dimension zu erreichen als Bäume unter günstigeren Bedingungen. Ein Effekt solcher Unterschiede auf die Kronenbreite erscheint wahrscheinlich.

Leider lässt sich der Alterseffekt anhand der vorliegenden Daten keiner eindeutigen Ursache zuweisen, sodass nur ein baumartspezifischer resultierender Gesamteffekt verbleibt, der für Buche und Fichte mit dem Alter steigende horizontale Kronenausdehnungen vorhersagt, während für Eichen die Kronenbreiten mit steigendem Alter abnehmen (Abbildung 29 bis 34).

Für die anderen Baumarten lässt sich anhand der vorliegenden Daten kein Einfluss des Alters zeigen. Dies hängt möglicherweise mit der vergleichsweise geringen Datenbasis bei Kiefer und Lärche zusammen. Problematisch ist auch, dass das Datenmaterial überwiegend Bestände umfasst, in denen alle Bäume einer Art gleichaltrig sind, wodurch eine Trennung des Alterseffekts von den Zufallseffekten auf Ebene der Parzelle oder der Aufnahme erschwert wird. Gleichzeitig ist die Verteilung der erhobenen Alter insbesondere bei Kiefer und Douglasie stark auf bestimmte Werte konzentriert. So ist knapp die Hälfte der Kiefern als 43jährig und etwa 40% der Douglasien als 38jährig angesprochen.

Der negative Effekt der Geländehöhe auf die Kronenbreite von Eiche, Buche und Fichte stimmt mit anderen Untersuchungen überein, die diesen Effekt indirekt beobachteten. So konnte zum Beispiel ein Einfluss der geographischen Lage (Länge und Breite) auf die Kronenbreite gezeigt werden. Die Autoren deuten diesen u.a. als Indikator der Geländehöhe (PAINE & HANN 1982). Des weiteren konnte für zahlreiche Baumarten im Westen der USA ein Zusammenhang der Kronenbreite mit einem Bioklima-Index hergestellt werden, der die Verzögerung des Frühlingsbeginns mit der Geländehöhe und der geografischen Lage beschreibt. Die meisten Baumarten

zeigten einen negativen Zusammenhang der Kronenbreite mit der Verzögerung des Frühlingsbeginns (BECHTOLD 2004).

Für die Baumarten Douglasie, Kiefer und Lärche ist kein Effekt der Geländehöhe nachweisbar. Im Falle der Kiefer ist dies mit Blick auf das geringe Spektrum der Geländehöhe mit Werten nicht über 120 m über NHN auch nicht zu erwarten. Der Douglasien-Datensatz umfasst immerhin Ablotungen in Höhen bis fast 600 m über NHN. Es bleibt offen, ob die Kronenbreite der Douglasien tatsächlich unabhängig von der Geländehöhe ist oder ob der Effekt durch weitere hier nicht berücksichtigte Faktoren wie z.B. die Provenienz überprägt wird. Im Falle der Lärche stehen vergleichsweise wenige Messungen zur Verfügung deren Geländehöhe sich überwiegend im Bereich zwischen 200 und 400 m über NHN bewegen, sodass auch hier die Datenlage nicht ausreichend ist, einen möglichen Effekt der Geländehöhe zu quantifizieren.

Mit Anteilen erklärter Varianz (nur feste Effekte) zwischen 72% für Lärche und 84% für Buche sind die Kronenbreitenmodelle mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichbar (GUERICKE 2001; BECHTOLD 2004).

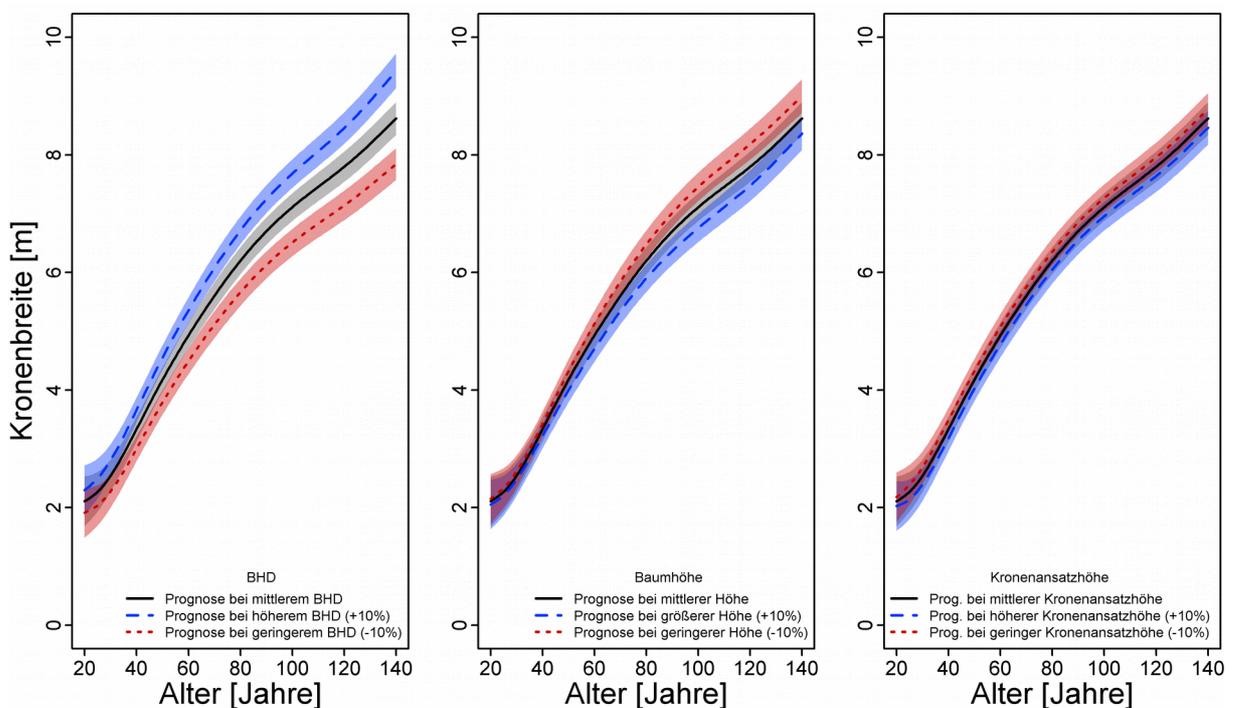


Abbildung 47: Einfluss der Prädiktoren auf die vorhergesagte Kronenbreite von Buchen: Vorhersagte Kronenbreite \pm doppelte Standardabweichung

Im Gegensatz zu vielen anderen Kronenbreitenmodellen berücksichtigen die hier vorgestellten Modelle über BHD und Baumhöhe hinaus weitere erklärende Variablen. Dies stellt häufig nachteilig beurteilte erhöhte Anforderungen an das Datenmaterial. Ein Vorteil ist jedoch die erhöhte Treffsicherheit der Prognose auch wenn die aufgrund anderer Untersuchungen zu erwartenden Steigerungen des Anteils erklärter Varianz im Bereich weniger Prozentpunkte liegen (BECHTOLD 2004). Gleichzeitig verbessert sich die Möglichkeit einzelne Bäume innerhalb von Beständen differenzierter zu beschreiben. So können unterschiedliche Wachstumsbedingungen beispielsweise zwischen Rein- und verschiedenen Mischbeständen über Unterschiede bezüglich weiterer Prädiktoren auch auf die Kronenbreite wirken. Untersuchungen der Kronenlänge bei Buche und Fichte in Bayern ergaben, dass Buchen in Mischung mit Fichte bei gleichem BHD und gleicher Konkurrenzsituation längere Kronen aufweisen als in Reinbeständen. Eine ähnliche Tendenz war bei Fichten in Mischung mit Buche erkennbar (DIELER 2011). Die Anwendung der beschriebenen Modelle zur Schätzung der Kronenbreite würde daher unter ansonsten gleichen Eingangsgrößen für Mischbestände breitere Kronen vorhersagen als für Reinbestände. Das Modell ist somit in größerem Umfang in der Lage die Wirkung verschiedener Wachstumsbedingungen auf die Kronenbreite abzubilden, als vergleichbare Modelle, die die Kronenbreite allein mithilfe des BHD vorhersagen.

7.1.2.1 Sensitivitätsanalyse am Beispiel der Buche

Die beispielhafte Untersuchung des Kronenbreitenmodells anhand der Baumart Buche erfolgt wie für das Kronenlängenmodell mithilfe eines Vergleichsdatensatzes, der Alter, BHD und Höhen für Buchen enthält (vgl. 4.8).

Der Alterstrend der Kronenbreite zeigt unter der Annahme mittlerer BHD und Baumhöhen eine Zunahme der Kronenbreite von rund 2 m im Alter 20 auf über 8 m bei 140-jährigen Buchen (Abbildung 47). Bei Unterstellung von um 10% höheren BHD-Werten ergeben sich im Vergleich zu Schätzungen mit mittleren Werten Zunahmen der Kronenbreite zwischen 0,2 und 0,8 m. Bei 10-prozentiger Verringerung des BHD gegenüber dem mittleren Verlauf ergeben sich Abnahmen der vorhergesagten Kronenbreite in ähnlicher Größenordnung. Eine Veränderung der Baumhöhe um 10% bewirkt um bis zu 0,4 m geringere Kronenbreiten bei größerer Baumhöhe und

höhere Kronenbreiten bei geringerer Baumhöhe. Die Variation der Kronenansatzhöhe ergibt vergleichsweise geringe Veränderungen der vorhergesagten Kronenbreite im Bereich von bis zu 0,15 m.

Extrem niedrige Kronenansatzhöhen (von zum Beispiel 3 m), wie sie bei Solitären vorkommen, führen zu Kronenbreiten, die bis zu etwa 1 m über der Vorhersage bei mittlerer Kronenansatzhöhe liegen (nicht abgebildet), sodass bei einem BHD von 50 cm eine Kronenbreite von rund 10 m vorhergesagt wird. Für 30-60 cm starke Buchensolitäre werden in Bayern Kronendurchmesser zwischen 10 und 14 m beobachtet (UHL ET AL. 2006). Für Österreich werden für Buchen mit 50 cm BHD Kronenbreiten von rund 14 m vorhergesagt (HASENAUER 1997). Dies zeigt, dass das Modell zwar nicht in der Lage ist die Kronendimensionen solitär erwachsener Buchen abzubilden, dass die Prognosen aber durchaus an die Kronenbreiten der bayrischen Solitäre heranreichen.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass das Modell in der Lage ist, die Ausdehnung der Krone mit dem Alter abzubilden. Darüber hinaus reagiert es sensitiv auf Unterschiede in Bezug auf den BHD, die Höhe und die Kronenansatzhöhe des Einzelbaumes. Die Größenordnung in der sich die hier betrachteten Unterschiede bei den Prädiktoren auf die Kronenbreite auswirken zeigt, dass die neben dem BHD berücksichtigten Prädiktoren im Vergleich deutlich geringere Veränderungen der Prognose bedingen. Dennoch erhöhen sie die Behandlungssensitivität des Modells indem zum Beispiel für Bäume mit niedrigem Kronenansatz, wie sie bei besonders weitständig erwachsenen Bäumen vorkommen, größere Kronenbreiten geschätzt werden.

7.1.2.2 Modellvergleich

Ein Vergleich der Vorhersagen des Kronenbreitenmodells für die Baumart Buche mit den Ergebnissen anderer Kronenbreitenmodelle zeigt eine gute Übereinstimmung (Abbildung 48). Der Vergleich erfolgt anhand einer „mittleren“ Buche (4.8). Der Bekronungsgrad wird mithilfe der neu entwickelten Modelle (6.1.1) geschätzt. Es wird eine Position im Göttinger Wald bei einer Höhenlage von 270 m über NHN angenommen. Zufallseffekte werden nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine gute Übereinstimmung des Modells mit anderen Ansätzen bzw. mit den Daten aus anderen Regionen in Deutschland besteht. Im Vergleich zu den übrigen Funktionen werden mithilfe des neu entwickelten Modells im Bereich geringer Dimensionen geringere Kronenbreiten vorhergesagt.

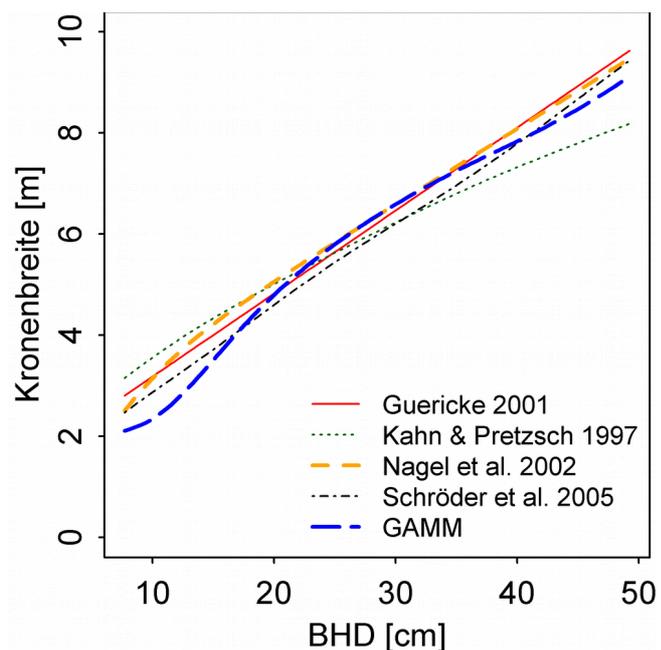


Abbildung 48: Vergleich der vorhergesagten Kronenbreite über dem BHD für verschiedene Modellansätze

7.1.3 Lichtkronenlänge

Die Länge der Lichtkrone kann als relative Größe im Verhältnis zur Kronenlänge oder im Verhältnis zur Baumhöhe betrachtet werden. Im ersten Fall zeigt sich einen grundsätzlichen Unterschied zwischen den untersuchten Laubholzarten auf der einen und den Nadelholzarten auf der anderen Seite. Während die breiteste Stelle der Krone bei Eichen und Buche bei rund 60% der Gesamtkronenlänge vom Kronenansatz ausgehend betrachtet liegt, weisen die Werte für Fichte, (Douglasie,) Kiefer und Lärche auf eine im Mittel deutlich niedrigere Lage der breitesten Stelle innerhalb der Krone. Übereinstimmende Ergebnisse finden sich bei (PRETZSCH 2002), der für Eiche

und Buche Werte von 0,61 bzw. 0,60 angibt, während seine Werte für die hier betrachteten Nadelbaumarten zwischen 0,32 (Kiefer) und 0,34 (Fichte, Douglasie und Lärche) schwanken. Für Fichte, Kiefer und Lärche liegen die Vergleichswerte damit im Mittel um etwa 0,08 höher als die im Rahmen dieser Arbeit errechneten Werte. Ein Zusammenhang zwischen der relativen Höhe der maximalen Kronenbreite bzw. der Lichtkronenlänge und weiteren Einzelbaumvariablen konnte nicht gefunden werden. Übereinstimmende Ergebnisse werden von Untersuchungen in Kiefernbeständen in Finnland beschrieben (RAUTIAINEN & STENBERG 2005).

Der beschriebene Unterschied zwischen Laub- und Nadelholzarten relativiert sich, wenn die Länge der Lichtkrone auf die Baumhöhe bezogen wird. Die Schätzung der Lichtkronenlänge im Verhältnis zur Baumhöhe hat den Vorteil, dass die vergleichsweise unsichere Kronenansatzhöhe dafür nicht benötigt wird. In Bezug auf die Vorhersage der Höhe der maximalen Kronenbreite schneidet dieses Vorgehen für Eiche und Buche nicht wesentlich schlechter (Unterschied bei der Streuung der Messwerte um den Mittelwert im Bereich weniger Zentimeter) ab als die Schätzung mittels auf die Kronenlänge bezogener relativer Lichtkronenlänge. Für Fichte, Kiefer und Lärche liegt die Zunahme der Streuung für die Schätzung im Verhältnis zur Baumhöhe höher. Die Streuung ist jedoch weniger als 1 m höher, was vor dem Hintergrund der hohen Unsicherheit bei der Erhebung der Höhe der maximalen Kronenbreite akzeptiert werden kann.

7.1.4 Beschränkung der horizontalen Asymmetrie

Guericke (2001) definiert die „von der Kreisform in der horizontalen Kronenprojektion abweichende Ausdehnung der Baumkrone in bestimmten Himmelsrichtungen“ als Kronenexzentrizität, die er auf der Basis von acht Ablotungen als Verhältnis zwischen dem maximalen und dem mittleren Radius einer Krone berechnet. In Bezug auf die hier vorliegenden Daten ist dieses Verfahren nicht anwendbar, da nicht alle Bäume ausgehend vom Stammfußpunkt des Baumes abgelotet wurden (4.1). Die Verlagerung des Ausgangspunktes der Ablotungen erfolgte insbesondere bei stark asymmetrisch ausgebildeten Kronen zum Schwerpunkt der Kronenschirmfläche, sodass die Charakterisierung der Asymmetrie als Kronenexzentrizität im oben genannten Sinne auf Basis der Radien in diesem Fall zu einer Verzerrung (zu runde Kronen) führen

würde. Die Nutzung von Kronenbreiten in der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Definition der horizontalen Asymmetrie ist gegenüber der Verwendung von Radien weniger anfällig für Veränderungen des Ausgangspunktes der Kronenablotungen.

Die Festlegung einer Obergrenze für die horizontale Asymmetrie der einzelnen Baumarten dient der Vermeidung unrealistischer extremer Kronenformen, wie sie ohne Beschränkung bei der angewandten Methode des Aufbaus von Modellkronen entstehen könnten und nicht etwa der Beschreibung der horizontalen Asymmetrie.

Dennoch stimmen die Ergebnisse mit empirischen Beobachtungen überein, wonach Buche und Eiche häufig weniger runde Kronen aufweisen als beispielsweise die Fichte. Ähnliche Ergebnisse wurden auch bei einer Untersuchung in Nordamerika gefunden, wo Laubbäume größere Abweichungen der Kronen von einer über dem Stammfuß zentrierten Lage aufwiesen als Koniferen (MUTH & BAZZAZ 2002) sowie in Japan für Fichte im Vergleich mit einer Birkenart (UMEKI 1995b).

Die deutlichen Unterschiede zwischen Laub- und Nadelbaumarten aber auch zwischen den Arten innerhalb dieser Gruppen zeigen die Unterschiede in der Plastizität der Kronenausformung, die insbesondere bei der Betrachtung der Wachstumsverhältnisse in Mischbeständen von Bedeutung sein dürften.

7.1.5 Aufbau der Kronenform

Der Algorithmus zum Aufbau der Kronenform führt zu dreidimensionalen Kronen, deren Lage und Ausformung unter den gegebenen Restriktionen (maximale Asymmetrie, Stammfußpunkte) durch Position und relative Größe der Nachbarbäume bestimmt wird.

Für jede Krone wird die Position des Stammfußes als Ausgangspunkt für die Radienexpansion verwendet. Es können daher prinzipiell nur Kronenschirmflächen resultieren, die den Stammfußpunkt beinhalten. Die verfügbaren Kronenablotungen enthalten eine geringe Anzahl von Bäumen, deren Kronen so stark verlagert waren, dass der Stammfußpunkt außerhalb der Kronenschirmfläche lag. Dies kann mithilfe des Konstruktionsverfahrens jedoch nicht abgebildet werden.

7.1.5.1 Kronenform

In Bezug auf die Form der Kronenschirmfläche zeigt der Vergleich mit gemessenen Kronenschirmflächen, dass das vorgestellte Verfahren zur Konstruktion potentiell asymmetrischer Kronen in der Lage ist einen großen Teil der Bandbreite vorkommender Asymmetriewerte abzubilden. Im Gegensatz dazu besitzen runde Modellkronen immer eine Asymmetrie von eins, sodass die potentiell asymmetrischen Modellkronen der Realität in diesem Punkt deutlich näher kommen. Dabei ist die vergleichsweise große Häufigkeit stark asymmetrisch ausgeprägter Kronenformen bei den Modellkronen ein Artefakt des zugrundeliegenden Konstruktionsalgorithmus. Dieser beschränkt die Asymmetrie auf die artspezifisch definierte Obergrenze, wodurch das Auftreten noch stärker asymmetrischer Kronenformen vermieden wird.

Der mangelnde Zusammenhang zwischen gemessenen und modellbasiert hergeleiteten Asymmetriewerten auf Einzelbaumebene zeigt, dass es zwar gelingt, verschieden stark asymmetrische Kronen zu erstellen, dass das Verfahren dagegen nicht in der Lage ist, vorherzusagen, welche Bäume runde und welche stärker asymmetrisch ausgeprägte Kronen haben.

Zusammenfassend betrachtet erlaubt das Verfahren der Kronenexpansion die Entwicklung von Modellkronen, die die Variabilität vorkommender Kronenformen deutlich besser beschreiben als die Annahme runder Kronenschirmflächen. Dagegen ist die Modellierung der Form konkreter Einzelbäume nicht möglich.

7.1.5.2 Räumlichen Übereinstimmung

Auf Ebene einzelner Bäume zeigt der Vergleich zwischen gemessenen und konstruierten Kronenschirmflächen, dass das angewandte Verfahren der Kronenkonstruktion nur bedingt in der Lage ist, die gemessenen Kronenschirmflächen treffend abzubilden. Wie das Beispiel (Abbildung 39) zeigt, weisen einige Kronen große Übereinstimmungen der konstruierten mit den gemessenen Kronenschirmflächen auf, während die räumliche Übereinstimmung der Kronenschirmflächen für andere Bäume deutlich schlechter ist. Auch für runde über dem Stammfuß zentrierte Modellkronen ergibt sich in Bezug auf die räumliche Übereinstimmung mit gemessenen Kronenschirmflächen eine große Streuung. Doch im Mittel ist die räumliche Überein-

stimmung der runden Kronen für alle Baumarten größer als für die gleichgroßen potentiell asymmetrischen Modellkronen.

Auf Bestandesebene bedingt die Verwendung der konstruierten Modellkronen eine Überschätzung der Gesamtüberschirmung, während die Annahme der runden Kronen zu einer Unterschätzung führt. Im ersten Fall ist die Überlappung der Kronen bzw. die Mehrfachüberschirmung insgesamt zu gering. Runde über dem Stammfuß zentrierte Kronen führen dagegen zu einer zu hohen Mehrfachüberschirmung.

Das angewandte Verfahren zur Konstruktion der konkreten Kronenform und ihrer räumlichen Lage orientiert sich in erster Linie an der direkten Umgebung der Einzelbäume und den herrschenden Konkurrenzverhältnissen. Dabei wird angenommen, dass die Kronen in Richtung direkter Nachbarn eine geringere Ausdehnung haben als in konkurrenzfreie Bereiche oder in Richtung geringeren Konkurrenzdrucks. Zahlreiche Studien bestätigen diesen Zusammenhang zwischen der horizontalen Ausformung und Positionierung der Krone einerseits und der Konkurrenzsituation eines Baumes andererseits (z.B. MITSCHERLICH 1970; YOUNG & HUBBELL 1991; UMEKI 1995a; BRISSON 2001; MUTH & BAZZAZ 2002, 2003). Neben anderen Einflussfaktoren werden die Konkurrenzverhältnisse als wichtigste Größe für die Ausbildung der horizontalen Kronenform angesehen (MITSCHERLICH 1970).

Vor diesem Hintergrund hätte eine gute Übereinstimmung der konstruierten Kronenformen mit den gemessenen Kronenschirmflächen erwartet werden können. Im Gegensatz dazu zeigt sich die Annahme runder über dem Stammfuß zentrierter Kronen in Bezug auf die räumliche Übereinstimmung als überlegen. Diese Überlegenheit zeigt, dass das Konstruktionsverfahren nicht in der Lage ist richtig vorherzusagen, in welche Richtung die horizontale Kronenausdehnung größer bzw. kleiner ist als im Mittel für die Gesamtkrone. Wenn aber die Richtung der Kronenverlagerung bzw. die Richtung einer lateralen Mehr- oder Minderausdehnung nicht zuverlässig bestimmbar ist, führt die Annahme isotroper Kronen zu besseren Ergebnissen in Bezug auf die räumliche Übereinstimmung der Kronenschirmflächen mit gemessenen Werten.

Die Gründe für die geringe Treffsicherheit des Konstruktionsverfahrens bei der Vorhersage der horizontalen Kronenform können vielfältig sein. Das Verfahren

basiert auf der Ausbildung der Kronenformen in Abhängigkeit von Nachbarkronen. Dabei konnten jedoch nur im Bestand verbleibende und seit der vorangegangenen Aufnahme (Aufnahmeintervall zwischen 4 und 6 Jahre) ausgeschiedene Nachbarn berücksichtigt werden. Die aktuelle laterale Kronenausdehnung und die Form der Krone ergeben sich aus der Veränderung über die Jahre, wobei die Änderungsraten für die als besonders plastisch geltende Buche im Bereich von 10 – 30 cm pro Jahr liegen (GUERICKE 1999, 2001), sodass eine Veränderung der Konkurrenzsituation sich erst verzögert auf die Kronenform auswirken kann. Auch nimmt das laterale Kronenwachstum mit dem Alter ab (z.B. GUERICKE 2001), sodass in jungem Alter eine größere Anpassungsfähigkeit der Kronenform zu erwarten ist, als in späteren Jahren. Es ist daher davon auszugehen, dass auch früher ausgeschiedene Nachbarn, insbesondere große Nachbarn in geringem Abstand zum Zielbaum, die richtungsspezifische Ausdehnung der Krone beeinflusst haben.

Um das Verfahren unabhängig vom Einfluss unbekannter früherer Konkurrenten zu betrachten und zu überprüfen, wird die räumliche Übereinstimmung mit gemessenen Kronenschirmflächen an drei unbehandelten Kontrollflächen evaluiert. Es handelt

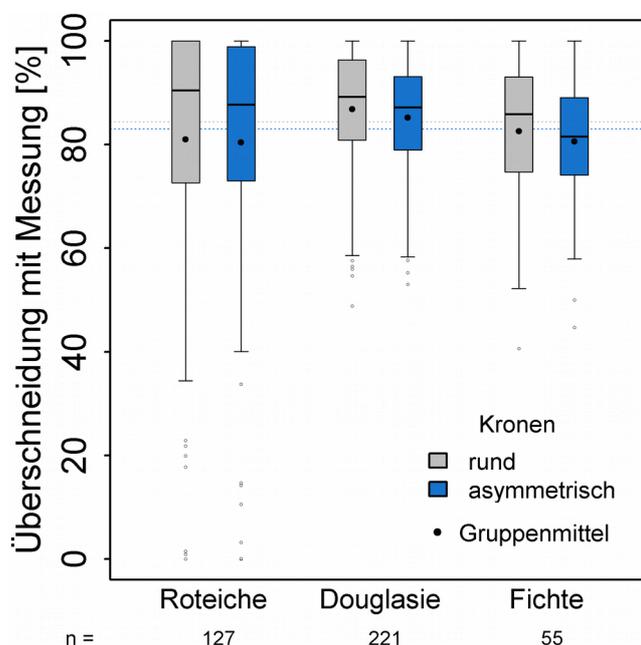


Abbildung 49: Räumliche Übereinstimmung der Kronenschirmflächen von konstruierten potentiell asymmetrischen und runden Modellkronen mit gemessenen Kronenschirmflächen in drei unbehandelten Reinbeständen

sich dabei um unbehandelte Reinbestände aus Roteiche, Douglasie und Fichte in nahezu ebener Lage, sodass auch ein möglicher Einfluss von Hangneigung und Exposition unwahrscheinlich ist. Der Vergleich der räumlichen Übereinstimmung runder bzw. potentiell asymmetrischer Kronenschirmflächen mit den gemessenen Werten zeigt, dass auch für die drei unbehandelten Flächen die Variante runder Modellkronen eine geringfügig bessere räumliche Übereinstimmung mit den gemessenen

Kronenschirmflächen aufweist (Abbildung 49), obwohl der Unterschied für die Roteichen-Fläche sehr gering ist.

Die Ergebnisse anhand dieser drei Bestände zeigen, dass der nicht abgebildete Einfluss früher entnommener Konkurrenten nicht die alleinige Ursache für die im Vergleich zu runden Modellkronen geringere räumliche Übereinstimmung der Modell-Kronenschirmflächen ist. Die relative Lage der Kronenschwerpunkte zum Stammfußpunkt des jeweiligen Einzelbaumes zeigt weitere Unterschiede zwischen Messungen und potentiell asymmetrischen Modellkronen (Abbildung 50): Auffällig sind zunächst Unterschiede zwischen den gemessenen Werten der verschiedenen Flächen. So treten bei den Roteichen deutlich größere Distanzen zwischen Kronenschwerpunkt und Stammfußpunkt auf als für Douglasie. In dem Fichtenbestand wurden die geringsten Distanzen gemessen. Die mittlere Verlagerung des Kronenschwerpunktes weist für alle drei Bestände auf eine jeweils unterschiedliche bevorzugte

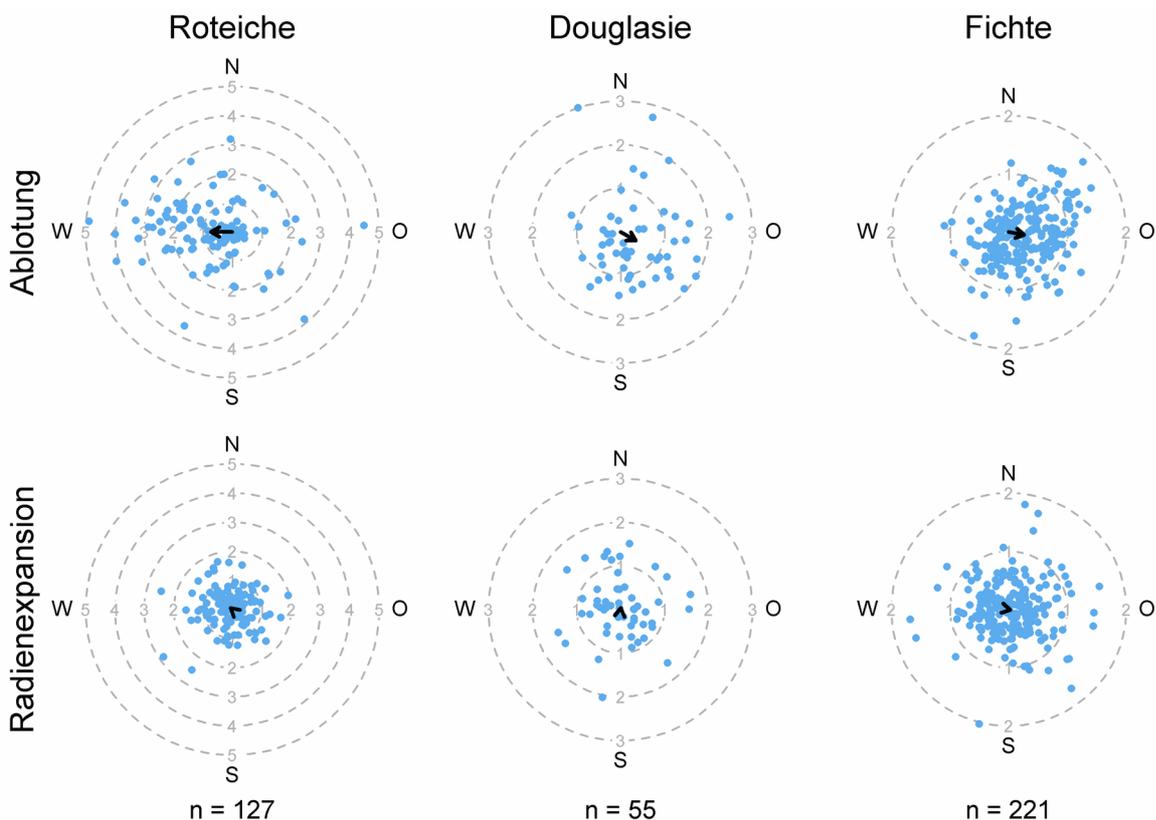


Abbildung 50: Relative Lage der Kronenschwerpunkte zum Stammfußpunkt für drei unbehandelte Reinbestände - Vergleich zwischen Messwerten und Modellkronen. Die Punkte markieren die Lage der Kronenschwerpunkte im Verhältnis zum Stammfußpunkt. Der schwarze Pfeil entspricht der mittleren Kronenverlagerung des Bestandes.

Verlagerungsrichtung hin. Dagegen zeigen die konstruierten Kronen keine augenfälligen Unterschiede hinsichtlich der Verlagerungsdistanzen und weisen keine bevorzugte Richtung auf. Darüber hinaus berücksichtigt das Verfahren neben konkurrenzbedingten Faktoren andere Einflussgrößen, die ebenfalls mit der horizontalen Kronenausformung in Verbindung gebracht werden nicht. Dazu gehören die Hangneigung (z.B. UMEKI 1995a) und die Richtung der Sonneneinstrahlung (z.B. GUERICKE 2001). Unterschiede zwischen verschiedenen Arten in Bezug auf die Plastizität werden insofern berücksichtigt, als die Asymmetrie-Obergrenze artspezifisch definiert ist. Die Reaktion auf den Einfluss eines Nachbarn ist jedoch für alle Arten gleich. Dies könnte ein weiterer Grund für die Unterschiede sein.

Die geringe Übereinstimmung der konstruierten Kronen mit gemessenen Werten deutet darauf hin, dass neben konkurrenzbedingten Faktoren andere Einflussgrößen eine Rolle spielen. Über ihre Funktion als Organ zur Lichtrezeption hinaus haben Kronen noch zahlreiche andere Funktionen und unterliegen verschiedenen Beschränkungen, die ihre Form und Anordnung bestimmen (vgl. 3.3.6).

Andere Versuche, die Kronenform in Abhängigkeit von Position und relativer Größe der Nachbarbäume zu konstruieren erwiesen sich ebenfalls als problematisch. So entwickeln Grote et al. (2003) ein Verfahren, das auf potentiell unterschiedlichen Kronenradien in die vier Himmelsrichtungen basiert. Dabei werden die einzelnen Radien im Wesentlichen von räumlicher Lage und relativer Größe der Nachbarn in der jeweiligen Richtung bestimmt. Der Vergleich mit gemessenen Kronenradien ergibt sich eine große Streuung der Residuen sowie eine Verzerrung der geschätzten Radien für kleine und große Werte. Auch auf Bestandesebene zeigt sich wie für das hier vorgestellte Verfahren im Mittel eine zu geringe Überschneidung der Kronen und damit eine zu große Gesamtüberschirmung (GROTE ET AL. 2003).

Piboule et al. (2005) verwenden 32 Radien zum Aufbau asymmetrischer Kronenformen. Ähnlich dem hier vorgestellten Verfahren wird ein Ziel-Kronenvolumen definiert, dass durch schrittweise Expansion der Einzelradien bei möglichst geringer Überlappung mit Nachbarkronen erreicht wird. Die konstruierten Kronen liefern in Verbindung mit einem Lichtmodell gute Ergebnisse in Bezug auf die Vorhersage der

Lichtintensität. Leider erfolgte keine Evaluierung mit gemessenen Werten (PIBOULE ET AL. 2005).

In Bezug auf die Schätzung der Gesamtüberschirmung der Bestandesfläche mithilfe von Modellkronen bestätigen zahlreiche Untersuchungen die systematische Unterschätzung der Überschirmung durch eine Überschätzung der Mehrfachüberschirmung (GUERICKE 2001; PIBOULE ET AL. 2005). Auch für von der Position oberhalb des Stammfußpunktes verlagerte runde Kronen am Beispiel eines über Jahrzehnte undurchforsteten Buchenaltbestandes bleibt die Gesamtüberschirmung hinter der aus Kronenablotungen ermittelten zurück (SCHRÖTER ET AL. 2012).

Unabhängig von der Eignung des vorgestellten Verfahrens zur Beschreibung gemessener Kronenformen, können die potentiell asymmetrischen Modellkronen als Ausgangspunkt für die Fortschreibung von Kronen im Rahmen von Wachstumssimulationen verwendet werden. Im Rahmen einer solchen Simulation sind die jeweiligen Nachbarbäume sowie der Zeitpunkt eines möglichen Ausscheidens bekannt, sodass diese Einschränkung entfällt. Durch die Berücksichtigung eines richtungsspezifischen Kronenwachstums, das die Himmelsrichtung, Abstände zu den Nachbarn und ggf. die Baumart der Nachbarbäume berücksichtigt, könnten realistischere Kronenformen und eine treffendere Gesamtüberschirmung erreicht werden als dies mithilfe des beschriebenen Verfahren möglich ist.

7.2 Krone und Zuwachs

Die Ergebnisse zeigen, dass auf Basis von Modellkronen berechnete Parameter für die Zuwachsprognose aller untersuchten Baumarten relevant sind.

7.2.1 Referenzmodell

Die Ergebnisse der Modellparametrisierung für das Referenzmodell zeigen, dass die Daten innerhalb von Parzellen und Aufnahmen nicht unabhängig sind. Neben anderen möglichen Einflussfaktoren auf Parzellen- und Aufnahmeebene ist zu erwarten, dass parzellenbezogene Kovariablen wie Standortseigenschaften oder zwischen den Zuwachsperioden variierende Faktoren wie die Witterung einen Einfluss auf den Grundflächenzuwachs haben.

Im Vergleich zum Zuwachsmo­dell des Wachstumssimulators *BWINPro* (NAGEL 2009) können die festen Effekte durch die Verwendung von Splines deutlich flexibler spezifiziert werden. Die Anpassung einer – ggf. nicht linearen – Funktion impliziert Annahmen über die Art des Zusammenhangs zwischen Zuwachs und erklärenden Variablen. Dies bietet die Möglichkeit, für biologische plausibel erachtete Eigenschaften in Bezug auf die Form des Zusammenhangs durch die Wahl einer Funktion vorzugeben, sodass ein entsprechendes Modellverhalten sicher gestellt werden kann. In der Notwendigkeit, Annahmen über die funktionale Form des Zusammenhangs zu treffen, liegt aber auch die Gefahr, Einzelheiten oder Unterschiede zwischen den Baumarten zu verschleiern. Durch die Anwendung von Splines kann auf die Annahme einer bestimmten funktionalen Form verzichtet werden. In diesem Fall zeigt sich, dass die flexible Beschreibung der Zusammenhänge mithilfe von Splines zu Verbesserungen der Erwartungstreue der Schätzungen führt (Anhang 12.3.1) und es wird deutlich, dass der Verlauf der Effekte (beispielsweise des Alters, Anhang 12.3.1) zwischen den Baumarten durchaus unterschiedlich und teilweise nicht linear ist.

Die grundsätzliche qualitative Wirkungsrichtung der Effekte des angepassten Modells ändert sich jedoch nicht im Vergleich zum Zuwachsmo­dell aus *BWINPro*. So wirken sich die Dimension des Baumes (Kronenmantelfläche bzw. BHD) und der Freistel-

lungsindex positiv auf den Zuwachs aus, wohingegen Alter und Konkurrenz in beiden Modellen einen negativen Einfluss haben. Im Falle der Eichen ist der Zuwachsrückgang für sehr große Kronenmantelflächen biologisch nicht plausibel. Dieser Rückgang ist möglicherweise auf einen Ausreißer mit einer im Vergleich zum übrigen Datenkollektiv besonders großen Kronenmantelfläche von über 350 m² zurückzuführen.

7.2.2 BHD und (Licht-)Kronenmantelfläche

Die Variablenselektion beleuchtet – ausgehend vom Referenzmodell – mögliche Verbesserungen des Modells durch die Berücksichtigung weiterer oder anderer erklärender Variablen. Die Ergebnisse zeigen, welche der untersuchten Einflussgrößen bzw. welche der möglichen Varianten sich am besten zur Beschreibung des Grundflächenzuwachs der Baumarten eignet. Als wichtigste Größe wird je nach Baumart der BHD oder die Lichtkronenmantelfläche berücksichtigt. Es fällt auf, dass für die meisten Baumarten der BHD als wichtigster Prädiktor in die Modelle aufgenommen wird, während für Fichte und Kiefer statt dessen die Lichtkronenmantelfläche eingeht.

Zur Berechnung der Lichtkronenmantelfläche geht neben der Kronenbreite, die in recht engem Zusammenhang zum BHD steht, die Kronenlänge ein, wodurch das Erklärungspotential sich gegenüber dem BHD deutlich ändert. Es kann daher vermutet werden, dass sich die Kronenlänge insbesondere für Kiefer und Fichte auf den Grundflächenzuwachs auswirkt. Dies stimmt mit Ergebnissen aus Österreich überein, für die bei Fichte, Kiefer und Tanne eine vergleichsweise hohe Sensitivität des Grundflächenzuwachs auf den Bekronungsgrad festgestellt wurde, während diese bei Buchen und Eichen deutlich geringer war (MONSERUD & STERBA 1996). Die Autoren vermuten für die Laubbaumarten einen größeren Einfluss der Kronenbreite anstelle der Kronenlänge. Auch in einer weiteren Untersuchung, bei der der Bekronungsgrad einen signifikanten Einfluss auf den Durchmesserzuwachs von Kiefer und Fichte hat, während dieser Einfluss für Buche nicht nachzuweisen war, ergaben sich ähnliche Zusammenhänge (HASENAUER 1994).

Die Beschreibung des Grundflächenzuwachs in Abhängigkeit vom BHD und somit die Berücksichtigung des Ausgangszustands, also der Grundfläche zu Beginn der

Zuwachsperiode (oder gleichbedeutend der BHD) erscheint durchaus sinnvoll, da derselbe Grundflächenzuwachs bei gering dimensionierten Bäumen anders zu bewerten ist als bei stärkeren Stämmen. Der BHD kann in vielen Fällen leicht gemessen werden, während die Kronenmantelfläche oder die Lichtkronenmantelfläche in der Regel modellbasiert hergeleitet werden muss. Dafür sind stark vereinfachende Annahmen (Kronenprofil) nötig, sowie Modelle für Kronenbreite und Kronenlänge. Insbesondere die Kronenlänge ist jedoch aufgrund teilweise unterschiedlicher Definitionen sowie Schwierigkeiten bei der eindeutigen Ansprache des Kronenansatzes im Bestand schon bei der Messung mit großen Unsicherheiten behaftet. Zusätzlich erklären die Modelle zur Schätzung der Kronenlänge nur einen vergleichsweise geringen Anteil der auftretenden Varianz (7.1.1.1), sodass die Berücksichtigung geschätzter Kronenansatzhöhen die Unsicherheit der Zuwachsprognose erhöht.

Bei Untersuchungen in Laubmischbeständen in Wisconsin ergab ein direkter Vergleich von Kronenparametern und dem BHD hinsichtlich ihrer Eignung zur Erklärung des Grundflächenzuwachs ebenfalls uneinheitliche Ergebnisse zwischen den untersuchten Baumarten (COLE & LORIMER 1994). Im Gegensatz dazu nutzen andere im Hinblick auf den Einsatz zur Wachstumssimulation gewählte Modellansätze häufig die Mantelfläche oder die Lichtkronenmantelfläche anstelle des BHD zur Beschreibung der Baumdimension (BIBER 1996; GUERICKE 2001; PRETZSCH ET AL. 2002; NAGEL 2009). Vor dem Hintergrund der Bedeutung der Krone für die Lichtaufnahme einerseits und die Konkurrenzfähigkeit andererseits spielt die Krone eine große Rolle für den Zuwachs eines Baumes (3.1). Es erscheint daher plausibel, die Größe der Krone z.B. in Form der Kronenmantelfläche für die Zuwachsprognose zu verwenden. Dagegen sprechen allerdings die Ergebnisse der Variablenselektion, die darauf hindeuten, dass für vier der sechs Baumarten der BHD besser für die Zuwachsprognose geeignet ist als die (Licht-)Kronenmantelfläche. Für die Fichte berücksichtigt das baumartspezifische Modell die Lichtkronenmantelfläche, die sich bei Unterstellung einer einfachen artübergreifenden Kronenform (Kronenprofil *BWINPro*) und mithilfe der nach *BWINPro* geschätzten Eingangsgrößen (Kronenlänge und Kronenbreite) ergeben. Die Kronenbreite geht daher ausschließlich auf den BHD zurück, während für die Schätzung der Kronenlänge darüber hinaus h/d -Wert, h und $h100$

berücksichtigt werden. Interessant ist, dass die ebenfalls als Prädiktor getestete Lichtkronenmantelfläche, deren Eingangsgrößen statt der *BWINPro*-Funktionen auf den neu entwickelten Kronenbreiten- und -längenmodellen basiert, keine Modellverbesserung bewirkt, obwohl die verwendeten Eingangsgrößen im Mittel weniger von den gemessenen Werten abweichen als die *BWINPro*-Werte. Dies lässt für die Baumart Fichte fraglich erscheinen, ob eine ggf. genauer bestimmte oder gemessene Lichtkronenmantelfläche das Zuwachsmo­dell verbessern würde. Somit bleibt allein die Kiefer als Baumart, für die die Lichtkronenmantelfläche (ausgewählt in der Version *B11*) in Bezug auf die Zuwachsprognose eindeutig wichtiger zu sein scheint als der BHD. Dafür spricht auch, dass die Berücksichtigung des BHD statt der Lichtkronenmantelfläche für Fichte zu deutlich geringeren Unterschieden in der Prognose führt als für Kiefer.

Grundsätzlich besteht ein enger Zusammenhang zwischen dem BHD, der Kronenmantelfläche und der Lichtkronenmantelfläche in allen berechneten Varianten. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Eingangsparameter zur Bestimmung der Lichtkronenmantelfläche oder ggf. der Kronenmantelfläche im Wesentlichen vom BHD abhängen, also für Kronenparameter, die unter Verwendung der *BWINPro*-Funktionen für Kronenbreite und -länge berechnet werden (km , lkm_{A11} und lkm_{A22}), da erstere ausschließlich mithilfe des BHD geschätzt wird. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass die gleichzeitige Berücksichtigung von BHD und Lichtkronenmantelfläche bei Verwendung differenzierterer Modelle zur Schätzung der Eingangsgrößen der Modellkronen für Buche, Douglasie und Kiefer zu sinnvollen Ergebnissen führt. Neben der Kiefer und der Fichte kann somit auch für Buche und Douglasie belegt werden, dass der Grundflächenzuwachs bei gegebenem BHD, Höhe und Alter und unter gleichen Konkurrenzbedingungen mit der Lichtkronenmantelfläche ansteigt, während dies für Eiche und Lärche nicht nachzuweisen ist. Hintergrund einer unterschiedlichen Lichtkronenmantelfläche bei gleichem BHD, Höhe und Alter können räumliche Unterschiede sein. So hängt die Kronenlänge, die zur Berechnung der Lichtkronenmantelfläche eingeht, in großem Maße von der räumlichen Lage und für die Buche zusätzlich von der Geländehöhe ab. Dadurch werden für räumliche getrennte Bäume bei ansonsten gleichen Eingangsgrößen verschieden große Lichtkronenmantelflächen vorhergesagt. Dies zeigt, dass zwar für die meisten Baumarten

der BHD für die Zuwachsprognose die wichtigste Rolle spielt, dass sich aber trotz des engen Zusammenhangs mit diesem ein unabhängiger positiver Einfluss der Lichtkronenmantelfläche auf den Grundflächenzuwachs nachweisen lässt.

7.2.3 Konkurrenz und Freistellung

Die Zuwachsmodelle berücksichtigen teilweise zwei verschiedene Maße zur Beschreibung der aktuellen Konkurrenz. Der Kronenkonkurrenzindex quantifiziert die Überschirmung innerhalb einer Einflusszone (im Umkreis der doppelten Kronenbreite) eines Baumes und beschreibt damit die allgemeine Stellung des Baumes im Wettbewerb um die Ressourcen Licht und Raum. Entsprechend charakterisiert die Veränderung des Kronenkonkurrenzindex die Freistellung eines Baumes.

Der schirmfreie Anteil der Lichtkronenmantelfläche (*asfm*, vgl. 5.2.2) beschreibt dagegen die Beschattung der Kronen und bezieht dadurch die direkt verfügbare Strahlungsmenge auf Ebene der Einzelkrone in die Zuwachsschätzung ein. Ebenso kann über die Veränderung dieser Größe die Verbesserung der Konkurrenzsituation durch ausscheiden von Nachbarn abgebildet werden.

Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der Konkurrenzsituation für den Grundflächenzuwachs des Einzelbaumes und zeigen, dass dabei Zusammenhänge auf unterschiedlicher räumlicher Skalenebene eine Rolle spielen. Die Effekte auf beiden räumlichen Skalenebenen haben für Eiche, Buche, Fichte und Douglasie jeweils einen signifikanten Einfluss auf den Zuwachs und führen zu Unterschieden der Zuwachsprognose in nicht zu vernachlässigender Größenordnung (6.2.3). Dabei berücksichtigt der Kronenkonkurrenzindex Anzahl und relative Größe von Nachbarbäumen, während durch die Beschreibung der Beschattung auch die Verteilung der direkten Konkurrenten einbezogen wird, sodass die günstigeren Bedingungen einseitig freigestellter Bäume (z.B. am Bestandesrand) abgebildet und in ihrer Wirkung auf den Zuwachs quantifiziert werden können.

Ähnliche Ergebnisse sind aus Untersuchungen des Radialzuwachs an zwei Nadelbaumarten in Kanada bekannt. Dort wurde zwischen dem Einfluss der Konkurrenz innerhalb eines Suchradius („crowding“) und der anhand von Modellkronen hergeleiteten Beschattung einzelner Kronen („shading“) unterschieden. Während für die

Konkurrenz innerhalb des Suchradius eine stark zuwachs-mindernder Einfluss auf beide Baumarten nachgewiesen werden konnte, war die Wirkung der Beschattung deutlich geringer und nur in einem der beiden Fälle statistisch abzusichern (CANHAM ET AL. 2004). Auch für Kiefer in Minnesota, für junge Laubholzbestände in Wisconsin, einen jungen Kiefernbestand in Mississippi und für verschiedene Mischbestände in den südlichen Appalachen konnte ein positiver Einfluss der dem direkten Sonnenlicht ausgesetzten Kronenmantelfläche auf den Zuwachs belegt werden (HATCH ET AL. 1975; HIX & LORIMER 1990; SMITH 1994; WYCKOFF & CLARK 2005).

Andere Untersuchungen berücksichtigen darüber hinaus noch größere räumliche Skalenebenen und verwenden Bestandesmaße (z.B. die Bestandesgrundfläche) zur Beschreibung der Konkurrenz. Diese gehen teilweise neben einem distanz-abhängigen Konkurrenzindex für die Zuwachsschätzung ein (z.B. TOMÉ & BURKHART 1989). Es ergeben sich somit verschieden große räumliche Zusammenhänge innerhalb derer Konkurrenten das Wachstum eines Baumes beeinflussen und die teilweise nebeneinander eine Rolle spielen können. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass die schirmfreie Kronenmantelfläche für die Eiche als einzige Baumart einen größeren Einfluss auf den Zuwachs zeigt als der Kronenkonkurrenzindex. Dies deutet auf Unterschiede zwischen den Baumarten in Bezug auf die räumliche Skalenebene der Konkurrenz.

Neben einer Gliederung der Konkurrenz nach ihrer räumlichen Skalenebene wird auch nach dem Entstehungsort zwischen Wurzelkonkurrenz um Bodenressourcen (Wasser und Nährstoffe) und Konkurrenz im Kronenraum um Licht und Raum unterschieden (z.B. COOMES & ALLEN 2007). Ledermann und Stage (2001) untersuchen die Wirkung der Distanzen zwischen Zentralbaum und Nachbarn auf verschiedene Konkurrenzindizes und vermuten, dass bestandesbezogene Konkurrenzmaße eher die unterirdische Konkurrenz beschreiben, während distanzabhängige Indizes die oberirdische Situation abbilden. Die hier untersuchten Konkurrenzmaße sind aufgrund ihrer Definition auf die Konkurrenz um Licht und Raum für die Krone ausgerichtet. Dennoch bezieht der Kronenkonkurrenzindex aufgrund des zugrunde gelegten Suchradius auch Nachbarbäume ein, die nicht in direktem Kronenkontakt

mit dem Zentralbaum stehen. Es kann somit angenommen werden, dass auch die unterirdische Konkurrenz einen Einfluss auf den Kronenkonkurrenzindex hat.

Im Gegensatz zu vielen Konkurrenzindizes hat die Berücksichtigung der schirmfreien Lichtkronenmantelfläche bei der Zuwachsprognose den Vorteil, direkter der Konkurrenz um Licht zugeordnet werden zu können und bietet somit die Chance den Konkurrenzeinfluss und die zugrundeliegenden Mechanismen im Rahmen von Wachstumssimulationen differenzierter zu betrachten und zu verstehen.

In Bezug auf die Zuwachsbeschreibung zeigen die Ergebnisse, dass der Einfluss des zugrundeliegenden Kronenprofils im Vergleich zum Einfluss des Suchradius für die Berechnung des Kronenkonkurrenzindex gering ist, sodass sich zukünftige Bemühungen um eine verbesserte Beschreibung der Konkurrenz vorrangig auf die Optimierung des Suchradius konzentrieren sollten. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass bei der Variablenselektion hauptsächlich Varianten des Kronenkonkurrenzindex zum Zuge kamen, die auf Basis der *BWINPro*-Funktionen berechnete Eingangsgrößen (Kronenbreite und Kronenlänge) verwenden. Dies wird darauf zurückgeführt, dass der Kronenkonkurrenzindex stark vom Suchradius abhängt und die Verwendung der *BWINPro*-Funktionen diesbezüglich scheinbar besser geeignet ist.

Neben der Berücksichtigung der aktuellen Konkurrenzsituation und deren Veränderung infolge des Ausscheidens von Konkurrenten, bildet das Modell über die Integration der Baumhöhe als Prädiktor auch den Einfluss der vergangenen Konkurrenzsituation ab. So gilt die Höhe bei gegebenem BHD (h/d -Wert) als Ausdruck der kumulativen Konkurrenzbedingungen und die Modelle sagen für alle untersuchten Baumarten geringere Grundflächenzuwächse mit steigender Baumhöhe vorher. Dies deckt sich mit Ergebnissen aus Buchen-Fichten-Mischbeständen im Solling, für die ebenfalls mit zunehmendem Schlankheitsgrad abnehmende Zuwächse gefunden wurden (BIBER 1996).

7.2.4 Sensitivitätsanalyse am Beispiel der Buche

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass der Grundflächenzuwachs der Buche in nicht zu vernachlässigender Größenordnung durch die Konkurrenzverhältnisse auf unterschiedlicher räumlicher Skalenebene beeinflusst wird und dass sich neben der allgemeinen Konkurrenzsituation auch die konkrete räumliche Lage der Kronen zueinander und die dadurch bedingte Beschattung des Einzelbaumes auf den Grundflächenzuwachs auswirkt. Dabei ist zu beachten, dass die Berücksichtigung extremer Werte von Konkurrenz, dem schirmfreien Anteil der Lichtkronenmantelfläche und der Freistellung den grundsätzlichen Rahmen bilden, während die in der Realität zu erwartende Spannbreite dieser Größen häufig deutlich geringer sein wird.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ergebnisse bestätigen die doppelte Bedeutung der Krone für den Zuwachs des Einzelbaumes: Zum einen ist die Größe der Lichtkrone für vier der sechs untersuchten Baumarten von Bedeutung. Dabei kann durch die Berücksichtigung der Lichtkronenmantelfläche zusätzlich zum BHD außer im Fall der Fichte der Einfluss der Kronendimension von der ebenfalls zuwachsrelevanten Dimension des Stammes (BHD) getrennt werden. Die Bedeutung der Krone für den Zuwachs zeigt sich darüber hinaus durch die Berücksichtigung des Einflusses von Konkurrenz und Freistellung, die jeweils mithilfe von Modellkronen der Nachbarbäume quantifiziert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden differenziertere Modellkronen, als die, die bisher für die Zuwachsprognose im Rahmen des Wachstumssimulators *BWINPro* genutzt wurden, untersucht. Die Bemühungen zielen zum einen auf die Beschreibung der Kronendimension (Kronenlänge und Kronenbreite) und im Anschluss daran auf die Form der Krone in ihrer richtungsspezifischen horizontalen Ausdehnung.

Das vorgestellte zweistufige Modell zur Schätzung der Kronenlänge berücksichtigt gegenüber einfacheren Modellen, die sich in der Regel auf Baumhöhe und BHD stützen, weitere Einflussgrößen. Die gleichzeitige Berücksichtigung von BHD und Baumhöhe macht das Modell sensitiv gegenüber der lokalen Bestandesdichte bzw. der Bestandesbehandlung in der Vergangenheit. Darüber hinaus geht ein Alterstrend ein, der die erhöhte Dynamik junger Bäume bei der Entwicklung des Bekronungsgrades in die Prognose einfließen lässt. Für die Buche lässt sich eine Abnahme des Bekronungsgrades mit zunehmender Geländehöhe quantifizieren. Interessant ist in diesem Zusammenhang die im Verhältnis zu den anderen Prädiktoren große räumlich bedingte Variabilität des Bekronungsgrades, die mithilfe eines räumlichen Trends für Niedersachsen abgebildet und so zur Verbesserung der Prognose nutzbar gemacht wird. Das Modell ist flexibel einsetzbar indem ggf. vorhandene Messwerte an einem Teilkollektiv eines Bestandes zur Verbesserung der Prognose für die übrigen Bäume dieses Bestandes verwendet werden können.

Das Modell zur Schätzung der Kronenbreite stützt sich wesentlich auf den BHD als erklärende Variable. Die Berücksichtigung weiterer Prädiktoren wie Baumhöhe, Alter (für drei der untersuchten Baumarten), Bekronungsgrad und Geländehöhe (für vier der untersuchten Baumarten) verbessert die Prognosen für den Einzelbaum und führt zu einer Sensitivität des Modells in Bezug auf Effekte der langfristigen Standraumsituation, des Alters und der Geländehöhe.

Die Modelle zur Schätzung der Kronenlänge und Kronenbreite ermöglichen einzelbaumbezogene, differenzierte Prognosen der jeweiligen Kronendimension mit einer plausiblen Dynamik, die zur Abbildung und Fortschreibung der Bedingungen in strukturreichen Mischbeständen unerlässlich sind.

Zur Schätzung der Lichtkronenlänge, die für die Erstellung der Modellkronen benötigt wird, werden baumartenspezifische Mittelwerte der relativen Länge der Lichtkrone verwendet. Dabei zeigt sich, dass die Schätzung auch ohne die Verwendung der Kronenansatzhöhe ausreichend genau möglich ist indem die Lichtkronenlänge im Verhältnis zur Baumhöhe beschrieben wird.

Die Auswertung der vorliegenden Kronenablotungen im Hinblick auf eine artspezifische Obergrenze der Asymmetrie ergibt deutliche Unterschiede zwischen den Baumarten: Für die Laubbaumarten Eiche und Buche werden größere Quotienten zwischen der größten Kronenbreite und der dazu senkrecht ermittelten Kronenbreite festgestellt als für die Nadelbaumarten.

In einem weiteren Schritt werden potentiell asymmetrische nachbarschaftssensitive Kronenformen abgeleitet. Diese zeigen jedoch eine geringere räumliche Übereinstimmung mit gemessenen Kronenformen als konzentrische runde Kronen. Auf Bestandesebene unterschätzt der beschriebene Ansatz den Anteil unüberschirmter Bestandesfläche, während die Annahme konzentrischer runder Kronen zu einer Überschätzung führt.

In der Anwendung der Modellkronen zur Vorhersage des Grundflächenzuwachs zeigen die Ergebnisse der Variablenselektion zunächst, dass der BHD das Modell für vier der sechs untersuchten Baumarten gegenüber der Verwendung der Kronenmantelfläche verbessert. Für drei Baumarten (Buche, Douglasie und Kiefer) wird die Lichtkronenmantelfläche unter Verwendung der neu entwickelten Kronendimen-

sionen in die Modelle aufgenommen. Dies zeigt deren überlegene Aussagekraft in Bezug auf den Zuwachs. Eine Ausnahme bildet die Baumart Fichte, für die dies nicht gezeigt werden kann. Zur Abbildung der Konkurrenz erweisen sich mithilfe der neuen Kronendimensionen berechnete Maße zur Beschreibung von Konkurrenz und Freistellung in vielen Fällen als unterlegen. Dies ist teilweise auf die Gleichsetzung des Konkurrenten-Suchradius mit der doppelten Kronenbreite zurückzuführen. Für die Abbildung der Effekte von Konkurrenz und Freistellung kann somit keine Verbesserung der Zuwachsprognose durch die differenzierte Schätzung der Kronendimensionen festgestellt werden.

Die Anwendung dieser potentiell asymmetrischen Kronenformen im Rahmen der Zuwachsprognose führt nicht zu einer Verbesserung der Modelle. Die Ergebnisse (baumartspezifische Modelle) zeigen jedoch, dass die Beschattung der Kronen (Eichen, Buche, Fichte und Douglasie) oder der Wegfall von Beschattung durch das Ausscheiden von Konkurrenten (Buche und Douglasie) in Bezug auf den Grundflächenzuwachs eine Rolle spielt. Dies impliziert, dass neben der Größe auch die konkrete Position und Ausformung der Krone und ihrer Nachbarkronen innerhalb der Einflusszone einen Einfluss auf den Zuwachs haben, sodass es wünschenswert erscheint, die Kronen treffender als durch das vorgestellte Konstruktionsverfahren bzw. die Annahme runder über dem Stammfußpunkt zentrierter Kronen beschreiben zu können.

Die beschriebenen Modellkronen, insbesondere die detaillierte Beschreibung möglicher Kronenformen können den Ausgangspunkt für zukünftige Bemühungen um eine realistischere Abbildung der Verhältnisse im Kronenraum bilden. So können die Modellkronen im Rahmen von Wachstumssimulationen fortgeschrieben werden, wobei die richtungsspezifische, ggf. von der Art des jeweiligen Nachbarn beeinflusste Kronenausdehnung schrittweise angepasst wird. Auf diese Weise könnte die Geschichte der individuellen Konkurrenzsituation in ihrer Wirkung auf Form, Lage und Größe der Krone besser berücksichtigt werden.

Ein Ziel bei der Entwicklung von Werkzeugen zur Simulation des Waldwachstums sind plausible und konsistente Zuwachsprognosen für alle denkbaren Wuchskonstellationen. Vor diesem Hintergrund verspricht die Berücksichtigung der individuellen

räumlichen Situation im Kronenraum eine höhere biologische Plausibilität der Modellkronen im Vergleich zu einer räumlich unabhängigen Abbildung der Kronen, die in Extremfällen zu unplausiblen Kronendimensionen und in der Folge zu Fehlern bei der Zuwachsprognose führen kann. Die Berücksichtigung der relativen Lage der Nachbarkronen bildet somit einen Baustein zur Begrenzung des Zuwachs auf eine realistische Größenordnung.

Auf Grundlage der vorliegenden Arbeit lassen sich folgende Empfehlung im Hinblick auf die Verbesserung des Wachstumssimulators *BWINPro* ableiten:

1. Berücksichtigung der vorgestellten Möglichkeiten zur differenzierten Vorhersage der Kronendimensionen (Kronenlänge und Kronenbreite)
2. Modellkronen
 - a) Die Repräsentation der Kronen sollte Unterschiede zwischen den Baumarten bzw. zwischen Laub- und Nadelbäumen berücksichtigen. Die Lichtkronenlänge sollte nach Baumarten getrennt festgelegt werden. Dabei kann die Schätzung in Abhängigkeit von der Baumhöhe mit nur geringfügig höherem Fehler gegenüber einer Schätzung mit zusätzlicher Berücksichtigung der Kronenansatzhöhe erfolgen.
 - b) Die Möglichkeiten, asymmetrische Kronenformen und nach Baumartengruppe unterschiedliche Kronenprofile abzubilden, sind im Hinblick auf eine realistischere Darstellung der Kronen empfehlenswert.
3. Verbesserung der Zuwachsschätzung
 - a) Die Flexibilisierung der Zusammenhänge zwischen der Zielgröße und den erklärenden Variablen mittels Splines führt zu Verbesserungen bei der Erwartungstreue der Schätzungen.
 - b) Berücksichtigung der folgenden erklärenden Variablen: BHD statt der Kronenmantelfläche, Alter, Baumhöhe, Kronenkonkurrenzindex, Freistellung mithilfe von Δs_{fm}
 - c) Von der Kronenbreite unabhängige Definition des Suchradius zur Berechnung des Kronenkonkurrenzindex

Zukünftige Bemühungen um Verbesserungen der Zuwachsprognose sollten neben Verbesserungen bei der Beschreibung der Kronenformen auch auf die Abbildung der Konkurrenz Wirkung zielen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Grundflächenzuwachs von der Konkurrenz auf verschiedenen räumlichen Skalenebenen beeinflusst wird und deuten an, dass Verbesserungen z.B. durch die Optimierung des Suchradius für Konkurrenten möglich sind.

9 Zusammenfassung

In Wäldern spielt das Kronendach eine wichtige Rolle. Die Struktur des Kronendaches, insbesondere Größe und Form der Kronen sowie ihre Lage zueinander, bestimmt die mikroklimatischen Bedingungen am Waldboden, die wiederum die Verjüngung und damit die zukünftige Waldgeneration wesentlich beeinflussen. Für die aktuelle Bestandesgeneration steuert die Krone als Assimilationsorgan die Wachstumsleistung der Bäume. Dabei ist nicht nur die Größe von Bedeutung sondern auch die Stellung der Krone im Gefüge der Nachbarkronen, die wiederum das Ergebnis der Konkurrenz um Licht und Raum darstellt. Daher nutzen viele Modelle zur flexiblen, behandlungssensitiven Prognose des Einzelbaumwachstums für Bestände verschiedener Baumarten- und Alterszusammensetzung Kronenparameter als Eingangsgrößen. Da die Erhebung von Kronenparametern wie z.B. der Kronenmantelfläche im Bestand mit vergleichsweise großen Schwierigkeiten oder hohem Aufwand verbunden ist, müssen diese häufig geschätzt werden, um vielfältige Einsatzmöglichkeiten der Wachstumsmodelle zu gewährleisten. Zu diesem Zweck werden in der Regel Kronenlänge und Kronenbreite mithilfe statistischer Modelle hergeleitet und daraus unter der Annahme einfacher geometrischer Kronenformen Modellkronen konstruiert, die meist stark vereinfachend horizontal symmetrische Kronenformen und eine über dem Stammfuß zentrierte Position unterstellen. Dagegen besitzen Kronen in der Realität häufig horizontal asymmetrische Kronenformen und weichen in ihrer Position mehr oder weniger stark von einer über dem Stammfuß zentrierten Lage ab. Es stellt sich die Frage, ob die Anwendung differenziert geschätzter Kronendimensionen (Kronenlänge und Kronenbreite) und in Bezug auf Form und Lage realistischer Modellkronen zu Verbesserungen der Zuwachsprognosen führen können.

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel der Arbeit, (a) Modellkronen zu entwickeln, die reinen Dimension der Kronen detailliert beschreiben, aber auch ihre potentiell asymmetrische Form und relative Lage abbilden können und (b) zu untersuchen, ob sich Zuwachsprognosen durch die Anwendung dieser Modellkronen verbessern lassen. Die Umsetzung erfolgt anhand von sechs Baumarten in Nordwestdeutschland: Eiche

(*Quercus robur* L. und *Quercus petraea* [Mattuschka] Liebl.), Buche (*Fagus sylvatica* L.), Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirbel] Franco), Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Lärche (*Larix decidua* Mill.).

Für die Erstellung von Modellkronen werden als Eingangsgrößen die Dimension der Krone und die Lichtkronenlänge für jeden Baum eines Bestandes benötigt. Da diese Angaben nur in Ausnahmefällen flächendeckend zur Verfügung stehen, müssen sie in der Regel mittels statistischer Modelle geschätzt werden. Als Datengrundlage stehen Messwerte von zahlreichen ertragskundlichen Versuchsflächen in Nordwestdeutschland zur Verfügung sowie Daten zum Bekronungsgrad aus der Betriebsinventur in Niedersachsen. Bei den Versuchsflächen handelt es sich um Rein- und Mischbestände verschiedener Baumarten und Altersstufen auf verschiedenen Standorten, die sehr unterschiedlichen Bestandesbehandlungen unterworfen sind. Die Aufnahmen erfolgten zwischen 1966 und 2010, wobei die Flächen in der Regel mehrfach untersucht wurden. Dabei wurden u.a. folgende Merkmale erhoben: Brusthöhendurchmesser (BHD), Baum- und Kronenansatzhöhe, Alter, horizontale Kronenausdehnung in acht Himmelsrichtungen, die Höhe der maximalen Kronenbreite und Koordinaten der Einzelbäume.

Die Schätzung der Kronenlänge erfolgt indirekt über den Bekronungsgrad (Kronenlänge im Verhältnis zur Baumhöhe). Es wird ein zweistufiges Verfahren eingesetzt, das der Struktur der kombinierten Datenbasis (330 401 Messwerte) gerecht wird. Diese enthält räumlich systematisch verteilte Messungen aus der Betriebsinventur (in der Regel ein Messwert pro Baumart und Inventurpunkt) und Messungen von den Versuchspartellen, für die mehrere Werte je Parzelle vorliegen. Im ersten Schritt des zweistufigen Verfahrens wird der Bekronungsgrad zunächst mithilfe eines verallgemeinerten additiven Modells (GAM) geschätzt. Als erklärende Variablen gehen der BHD, die Baumhöhe, das Alter und die geografische Lage ein. Für die Baumart Buche wird darüber hinaus die Geländehöhe einbezogen. Im Vergleich mit vielen bekannten Modellen zur Schätzung des Bekronungsgrades oder der Kronenansatzhöhe ermöglicht die Berücksichtigung zusätzlicher erklärender Variablen sowie die flexiblere Quantifizierung ihrer Effekte auf die Zielgröße mittels glättender Splines differenziertere Schätzungen. Im zweiten Schritt werden die Vorhersagen durch die

Schätzung von Zufallseffekten zur Berücksichtigung der auf Ebene der Versuchspartellen und innerhalb der Aufnahmezeitpunkte korrelierten Messungen angepasst (verallgemeinertes lineares gemischtes Modell, GLMM). Der gewählte Ansatz ermöglicht die gleichzeitige Nutzung der Informationen aus Betriebsinventur und Versuchsf lächen und bietet flexible Anwendungsmöglichkeiten in Abhängigkeit von der Datelage: Für räumlich unabhängige Einzelbäume kann die Schätzung allein mithilfe der ersten Modellstufe erfolgen. Sollen Bekronungsgrade für ganze Bestände geschätzt werden, kann eine Anpassung an deren Besonderheiten mithilfe der zweiten Modellstufe erreicht werden. Die dafür benötigten Zufallseffekte können auch für Flächen außerhalb des Parametrisierungsdatensatzes mithilfe weniger Messungen geschätzt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass der Bekronungsgrad der untersuchten Baumarten wesentlich von der geografischen Lage abhängt. Der BHD hat einen positiven Effekt auf den Bekronungsgrad, während der Bekronungsgrad mit zunehmender Baumhöhe (bei gleichem BHD) abnimmt. Der Alterseffekt ist negativ und deutet darauf hin, dass langsam erwachsene Bäume geringere Bekronungsgrade haben als solche, die dieselbe Dimension schneller erreicht haben.

Die Datengrundlage zur Schätzung der Kronenbreite umfasst teilweise wiederholte Messungen an 18 486 Bäumen von Versuchsf lächen in Nordwestdeutschland. Die Schätzung erfolgt mithilfe eines gemischten generalisierten additiven Modells (GAMM), das die Abhängigkeit der Messungen innerhalb von Versuchspartellen und Aufnahmezeitpunkten berücksichtigt. Als Prädiktoren werden der BHD, die Baumhöhe und der Bekronungsgrad für alle sechs untersuchten Baumarten berücksichtigt. Für Eichen, Buche und Fichte kann darüber hinaus ein signifikanter Effekt von Alter und Geländehöhe festgestellt werden. Im Vergleich mit vielen anderen Modellen zur Schätzung der Kronenbreite werden zusätzliche erklärende Variablen einbezogen, deren Effekte auf die Zielgröße flexibel quantifiziert werden können, sodass differenziertere Schätzungen möglich sind. Die Ergebnisse bestätigen den engen positiven Zusammenhang zwischen der Kronenbreite und dem BHD. Für höhere Bäume werden bei sonst gleichen Eingangsgrößen geringere Kronenbreiten geschätzt als für niedrigere. Der positive Effekt des Bekronungsgrades impliziert, dass langkronige Bäume auch breitere Kronen haben als kurzkronige. Der Alterseffekt tendiert uneinheitlich und sagt für Buche und Fichte mit dem Alter steigende Kronenbreiten vorher,

während für Eichen die Kronenbreiten mit steigendem Alter abnehmen. Mit zunehmender Geländehöhe nehmen die Kronenbreiten von Eichen, Buche und Fichte ab.

Zur Schätzung der Lichtkronenlänge werden artspezifische Mittelwerte aus insgesamt 3642 Messungen in zwei Varianten berechnet: das Verhältnis der Lichtkronenlänge relativ zur Kronenlänge bzw. relativ zur Baumhöhe. Ein Vorteil der zweiten Variante ist deren Unabhängigkeit von der Kronenlänge bzw. der Kronenansatzhöhe, die aufgrund von Schwierigkeiten diese Größe eindeutig zu erheben sowie der vergleichsweise hohen Unsicherheit bei der Schätzung als problematisch betrachtet wird. Die Ergebnisse zeigen, dass Eichen und Buche deutlich geringere relative Lichtkronenlängen sowohl in Bezug auf die Kronenlänge als auch im Verhältnis zur Baumhöhe aufweisen als die untersuchten Nadelbaumarten. Der Fehler der auf die Kronenlänge bezogenen Variante ist nur geringfügig kleiner als der der Alternative (Lichtkronenlänge bezogen auf die Baumhöhe).

Neben den beschriebenen Eingangsgrößen für die Erstellung der Modellkronen (Kronenlänge, Kronenbreite und Lichtkronenlänge) wird für jede der untersuchten Baumarten eine Obergrenze für die horizontale Asymmetrie der Kronenprojektionsfläche (Verhältnis der größten Kronenbreite zur dazu senkrechten Kronenbreite) festgelegt, um unrealistische Extreme beim Aufbau der Modellkronen zu vermeiden. Als maximale Asymmetrie wird baumartenspezifisch das 95%-Quantil der Asymmetriewerte von insgesamt 23 827 Bäumen verwendet. Bei Eichen und Buche kommen deutlich asymmetrischere Kronenformen vor als bei den Nadelbaumarten.

Für die Modellkronen werden verschiedene Kronenprofile unterstellt, die in Verbindung mit der Baumhöhe und der Kronenlänge sowie acht potentiell unterschiedlichen Kronenradien zu dreidimensionalen Modellkronen führen. Der Aufbau dieser Modellkronen erfolgt mithilfe eines iterativen Verfahrens, bei dem die acht Kronenradien unter Berücksichtigung von Nachbarkronen und unter Einhaltung der maximalen Asymmetrie schrittweise gestreckt werden bis eine zuvor definierte baumspezifische Kronenprojektionsfläche erreicht ist. Auf diese Weise können Modellkronen aufgebaut werden, deren horizontale Form potentiell asymmetrisch ist und deren Schwerpunkt ggf. von einer Position oberhalb des Stammfußpunktes abweicht. Ein Vergleich der auf diese Weise erstellten Modellkronen mit Ergebnissen von Kronenablotungen

zeigt eine geringere Übereinstimmung als alternativ unterstellte kreisrunde über dem Stammfuß zentrierte Modellkronen. Während kreisrunde Modellkronen die Gesamtüberschirmung auf Bestandesebene unterschätzen, wird diese durch die Unterstellung der beschriebenen potentiell asymmetrischen Modellkronen überschätzt.

Die Anwendung der Modellkronen im Rahmen von Zuwachsprognosen wird anhand eines Datensatzes mit 60 505 Bäumen der sechs untersuchten Baumarten aus zahlreichen Versuchspartzen getestet und mit Modellkronen verglichen wie sie im Wachstumssimulator *BWINPro* (NAGEL 2009) unterstellt werden. Zu diesem Zweck wird das im Rahmen von *BWINPro* verwendete Modell, das den Grundflächenzuwachs in Abhängigkeit von Kronenmantelfläche, Alter, Kronenkonkurrenzindex und Freistellungsindex schätzt, um Zufallseffekte zur Berücksichtigung der Korrelationsstruktur innerhalb des Datensatzes erweitert und die Effekte der erklärenden Variablen mithilfe von Splines flexibilisiert. Ausgehend von diesem Referenzmodell wird untersucht, welche erklärenden Variablen – und insbesondere welche Modellkronen-Variante zur Berechnung der kronenbasierten Größen – am besten geeignet sind, den Grundflächenzuwachs zu beschreiben.

Die Unterstellung der neuen Modellkronen führt nur in Einzelfällen zu Verbesserungen der Zuwachsschätzung. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass die Beschattung der Krone (Eichen, Buche, Fichte und Douglasie) oder der Wegfall von Beschattung durch das Ausscheiden von Konkurrenten (Buche und Douglasie) einen Einfluss auf den Grundflächenzuwachs ausübt. Dies impliziert, dass neben der Größe auch die konkrete Position und Ausformung der Krone und ihrer Nachbarkronen einen Einfluss auf den Zuwachs haben.

Die Berücksichtigung der individuellen räumlichen Situation im Kronenraum sowie von Unterschieden in der Plastizität der Kronenausformung zwischen den Baumarten verspricht eine höhere biologische Plausibilität der Modellkronen im Vergleich zu einer räumlich unabhängigen Abbildung der Kronen. Dies ist insbesondere in räumlich strukturierten oder ungleichaltrigen Mischbeständen von Bedeutung, in denen die Konkurrenz im Kronenraum stark einseitig geprägt sein kann und wo Bäume mit unterschiedlichen Eigenschaften aufeinander treffen. Die beschriebenen Modellkronen, insbesondere die detaillierte Beschreibung möglicher Kronenformen können

daher den Ausgangspunkt für zukünftige Bemühungen um eine realistischere Abbildung der Verhältnisse im Kronenraum bilden.

10 Abstract

The canopy plays an important role in forest ecosystems: its structure, especially size and shape of the crowns and their position in relation to each other, determines the micro-climatic conditions at the forest floor, which in turn essentially influence regeneration and the next forest generation. Concerning the current forest generation, the crown as assimilating organ drives the growth performance of trees. Growth is influenced by crown size but the position between neighboring crowns, which is a result of competition for light and space, is important as well. Hence, many models for flexible treatment-sensitive prediction of single-tree growth in stands with different species and age composition use crown parameters as input variables. As field measurements of crown parameters, like crown surface area, are rather difficult or time-consuming, these parameters often have to be estimated to make growth models generally applicable. For this purposes crown length and width are usually estimated by statistical models. Model crowns are constructed by assuming simple geometric shapes, which often presume greatly simplified horizontally symmetrical crown shapes and a position centered above the stem base. In contrast real crowns are often characterized by horizontally asymmetric crown shapes and their position differs more or less pronounced from a position centered above the stem base. This raises the question of whether the application of detailed estimations of crown dimensions (crown length and crown width) and of crown models that are more realistic concerning shape and position leads to improvements of growth predictions.

Against this background, the aim of this study was (a) the development of crown representations that are based on elaborately derived crown dimensions but describe its potentially asymmetric shape and relative position as well and (b) to investigate their influence on growth predictions. The implementation was carried out for six tree species in Northwest Germany: oaks, including pedunculate and sessile oak (*Quercus robur* L. and *Quercus petraea* [Mattuschka] Liebl.), European beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.), Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirbel] Franco), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European larch (*Larix decidua* Mill.).

For the construction of model crowns, the crown dimension and light crown length were required as input parameters for every tree in a stand. As this information is rarely available for whole stands, it usually has to be predicted using statistical models (details see below). The data set included measurements of numerous plots in long-term experimental areas in Northwest Germany and data about crown ratio from the forest inventory of Lower Saxony State Forests (Betriebsinventur). The experimental plots cover pure and mixed stands of different tree species and age classes on different site types and have been subject to very different stand treatments. Measurements were carried out in the years between 1966 and 2010. Predominantly, plots were remeasured several times. The following parameters were collected amongst others: diameter at breast height (dbh), tree height and height to crown base, tree age, horizontal crown extent in eight cardinal directions, height of maximum crown width and coordinates of all trees on the plot.

Crown length was modeled indirectly via crown ratio (crown length in relation to tree height) using a two-step procedure that accounts for the structure of the combined data set (330 401 measurements). The data included measurements from a spatially systematic sample (plots from the inventory in Lower Saxony, usually one record per tree species and plot) and measurements from the experimental plots with several records clustered at each plot. As first step of the two-step modeling procedure, crown ratio was estimated using a generalized additive model (GAM). The model included dbh, tree height, tree age and geographical position as predictors. For beech the ground level elevation was included additionally. Compared to many well-known models for prediction of crown ratio or height to crown base, here, the consideration of additional predictors and the flexible quantification of their effects on the target variable by smoothing splines facilitates more sophisticated predictions. As second step, predictions were adjusted by estimating random effects to account for correlation between measurements at a given experimental plot and from the same measurement occasion (generalized linear mixed model, GLMM). This approach allows for the simultaneous use of information from experimental areas and inventory plots and provides flexible application possibilities depending on available data: In case of spatially independent single trees, crown ratio can be predicted using the first-step model only; though when predictions are needed for whole stands, an adap-

tation to their characteristics can be achieved by using the second-step model. The random effects needed in the second-step model can be estimated for plots that are not included in the parametrization data set when a few measurements are available. Results showed that crown ratio of the investigated tree species depended considerably on geographical position. While dbh showed a positive effect on the target variable, crown ratio declined with increasing tree height (and constant dbh). The effect of tree age was negative; this implies that slowly grown trees had a lower crown ratio than trees that reached the same dimension faster.

The data set used to derive the crown width model included partly repeated measurements of 18 486 trees on experimental plots in Northwest Germany. Crown width was estimated by a generalized additive mixed model (GAMM) that accounts for the correlation between measurements within plots and measurement occasions. Predictors were dbh, tree height and crown ratio for all six considered tree species. In addition, for oaks, beech and spruce a significant effect of age and elevation was confirmed. In contrast to many other models for crown width prediction, additional predictors were included and their effects on crown width were characterized by flexible splines. Hence, more detailed estimations can be expected. The results confirmed a close relationship between crown width and dbh. For taller trees with otherwise unchanged input parameters narrower crowns were predicted than for smaller ones. The positive effect of crown ratio implies that long-crowned trees also had wider crowns than trees with a shorter crown. The age effect was inconsistent between tree species and predicted increasing crown widths with age for beech and spruce while crown width decreased with age for oaks. With increasing elevation crown width of oaks, beech and spruce decreased.

For predicting light crown length species-specific averages from a total of 3642 measured values were calculated in two variants: the proportion of light crown length to crown length and to tree height, respectively. An advantage of the second variant is its independence from crown length or height to crown base. This variable is considered problematic because its identification during measurements is difficult and predictions involve a rather high uncertainty. Oaks and beech exhibited considerably lower relative light crowns in relation to crown length as well as to tree height than

the considered coniferous tree species. The error of the variant in relation to crown length was only slightly lower than that of the alternative (light crown length in relation to tree height).

Besides the mentioned input variables for crown model construction (crown length, crown width and light crown length), an upper limit for horizontal asymmetry of crown projection areas (ratio of largest crown width and its orthogonally recorded crown width) for all considered tree species was established to prevent unrealistic extremes in the shapes of the constructed model crowns. The maximum asymmetry was defined for each species as 95%-quantile of asymmetry values of a total of 23 827 trees. In oaks and beech the maximum asymmetry was considerably higher than in the coniferous tree species.

Three-dimensional model crowns were constructed from tree height, crown length, eight potentially different crown radii, the species-specific light crown ratio and different crown profiles that describe the crown extend at any height inside the crown. The construction of these model crowns was carried out by means of an iterative procedure: The eight radii were expanded stepwise with regard to neighboring crowns and in compliance with the constraint of maximal asymmetry until a tree-specific preassigned crown projection area was reached. In that way model crowns can be constructed with potentially asymmetric shapes and positions that might differ from a position centered above the stem base. The crown projection area of these model crowns differed more strongly from measured crown projection areas than crown projection areas of circular model crowns that are centered above the stem base. While circular crowns underestimated canopy cover at stand level, it was over-estimated by the assumption of the potentially asymmetric model crowns.

The application of the model crowns for growth predictions was examined on the basis of a data set including 60 505 trees of the six considered tree species from numerous experimental plots and was compared to the model crowns applied in the growth simulator *BWINPro* (NAGEL 2009). For this purpose, the model for growth prediction used in *BWINPro* was modified. The model predicts the basal area increment including crown surface area, tree age, crown competition index and release index. It was modified to include random effects to account for the correlation struc-

ture in the data set. In addition, effects of predicting variables were specified more flexibly by smoothing splines. Based on this reference model, it was examined which predicting variables – and especially which model crown variants for the calculation of crown-based variables – were best suited for the description of basal area increment. The application of the new model crowns caused improvements in increment prediction only in isolated cases. However, results showed that crown shading (oaks, beech, spruce and Douglas-fir) or the reduction of shading by removal or mortality of competitors (beech and Douglas-fir) influenced basal area increment. This implies that besides their size, the precise position and shape of crowns and neighboring crowns had an influence on increment.

Model crowns reflecting the individual spatial situation in the canopy and the differences of horizontal shapes of different species promise higher biological plausibility compared to spatially independent circular crown representations. This is especially important in spatially structured or uneven-aged mixed stands where competition in the canopy can be strongly one-sided and where trees with different characteristics come in close contact. The described model crowns, especially the detailed representation of possible crown shapes, may serve as a starting point for further efforts to describe relationships in the canopy in a more realistic way.

11 Literatur

- ABETZ, P. (1976): Beiträge zum Baumwachstum: Der h/d-Wert - mehr als ein Schlankheitsgrad. *Forst-und Holzwirt* 31 (19): S. 389–393.
- AICHMÜLLER, R. (1962): Der Einfluß von Umwelt und Erbgut auf Stärkenwachstum, Verzweigung und Benadelung der Fichte. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 81 (5-6): S. 156–181.
- AMEZTEGUI, A.; COLL, L.; BENAVIDES, R.; VALLADARES, F. & PAQUETTE, A. (2012): Understory light predictions in mixed conifer mountain forests: Role of aspect-induced variation in crown geometry and openness. *Forest Ecology and Management* 276: S. 52–61.
- ASSMANN, E. (1961): *Waldertragskunde*. BLV Verlagsgesellschaft, München, Bonn, Wien.
- ASTRUP, R. (2006): Modeling growth of understory aspen and spruce in western boreal Canada. Dissertation, University of British Columbia, URL: <https://circle.ubc.ca/handle/2429/18421> [Heruntergeladen am 27. August 2013].
- BACHMANN, M. (1998): Indizes zur Erfassung der Konkurrenz von Einzelbäumen: Methodische Untersuchung in Bergmischwäldern. *Forstliche Forschungsberichte München* 171.
- BADOUX, H. (1939): De l'influence de diverse modes et degrés de claircie dans les hêtres purs. *Mitteilungen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft* 21: S. 58–146.
- BECHTOLD, W. A. (2004): Largest-crown-width prediction models for 53 species in the western United States. *Western Journal of Applied Forestry* 19 (4): S. 245–251.
- BIBER, P. (1996): Konstruktion eines einzelbaumorientierten Wachstumssimulators für Fichten-Buchen-Mischbestände im Solling. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen, Reihe A, Band 142*.
- BONNER, J. T. (2006): *Why size matters: from bacteria to blue whales*. Princeton University Press.
- BONSER, S. P. & AARSEN, L. W. (1994): Plastic Allometry in Young Sugar Maple (*Acer saccharum*): Adaptive Responses to Light Availability. *American Journal of Botany* 81 (4): S. 400–406.
- BRAGG, D. C. (2001): A local basal area adjustment for crown width prediction. *Northern Journal of Applied Forestry* 18 (1): S. 22–28.
- BREZGER, A. & LANG, S. (2006): Generalized structured additive regression based on Bayesian P-splines. *Computational Statistics & Data Analysis* 50 (4): S. 967–991.
- BRISSON, J. (2001): Neighborhood competition and crown asymmetry in *Acer saccharum*. *Canadian Journal of Forest Research* 31 (12): S. 2151–2159.

- BROWN, J. H.; GILLOOLY, J. F.; ALLEN, A. P.; SAVAGE, V. M. & WEST, G. B. (2004): Toward a Metabolic Theory of Ecology. *Ecology* 85 (7): S. 1771–1789.
- BRUNNER, A. (1998): A light model for spatially explicit forest stand models. *Forest Ecology and Management* 107 (1-3): S. 19–46.
- BURGER, H. (1939a): Baumkrone und Zuwachs in zwei hiebsreifen Fichtenbeständen. *Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen* 21: S. 147–176.
- BURGER, H. (1939b): Kronenaufbau gleichaltriger Nadelholzbestände. *Mitteilungen der Eidgenössischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen* 21: S. 5–58.
- BURKHART, H. E. & TOMÉ, M. (2012): *Modeling forest trees and stands*. Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York, London.
- BUSSE, J. (1928): Baumkrone und Durchmesserzuwachs. *Deutsche Forst-Zeitung* 43: S. 920–921.
- CANHAM, C. D.; COATES, K. D.; BARTEMUCCI, P. & QUAGLIA, S. (1999): Measurement and modeling of spatially explicit variation in light transmission through interior cedar-hemlock forests of British Columbia. *Canadian Journal of Forest Research* 29 (11): S. 1775–1783.
- CANHAM, C. D.; LE PAGE, P. T. & COATES, K. D. (2004): A neighborhood analysis of canopy tree competition: effects of shading versus crowding. *Canadian Journal of Forest Research* 34 (4): S. 778–787.
- CESCATTI, A. (1997): Modelling the radiative transfer in discontinuous canopies of asymmetric crowns. I. Model structure and algorithms. *Ecological Modelling* 101 (2-3): S. 263–274.
- COLE, W. G. & LORIMER, C. G. (1994): Predicting tree growth from crown variables in managed northern hardwood stands. *Forest Ecology and Management* 67 (1-3): S. 159–175.
- CONDÉS, S. & STERBA, H. (2005): Derivation of compatible crown width equations for some important tree species of Spain. *Forest Ecology and Management* 217 (2): S. 203–218.
- COOMES, D. A. & ALLEN, R. B. (2007): Effects of size, competition and altitude on tree growth. *Journal of Ecology* 95 (5): S. 1084–1097.
- CRECENTE-CAMPO, F.; MARSHALL, P.; LEMAY, V. & DIÉGUEZ-ARANDA, U. (2009): A crown profile model for *Pinus radiata* D. Don in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management* 257 (12): S. 2370–2379.
- DAVIES, O. & POMMERENING, A. (2008): The contribution of structural indices to the modelling of Sitka spruce (*Picea sitchensis*) and birch (*Betula* spp.) crowns. *Forest Ecology and Management* 256 (1-2): S. 68–77.
- DIELER, J. (2011): Effekt von Mischung und Konkurrenz auf die Kronenmorphologie von Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.). Jahrestagung der Sektion Ertragskunde des Deutschen Verbands Forstlicher Forschungsanstalten in Cottbus.

- DIELER, J. & PRETZSCH, H. (2013): Morphological plasticity of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in pure and mixed-species stands. *Forest Ecology and Management* 295: S. 97–108.
- DÖBBELER, H. & SPELLMANN, H. (2002): Methodological approach to simulate and evaluate silvicultural treatments under climate change. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 121: S. 52–69.
- DUBRASICH, M. E.; HANN, D. W. & TAPPEINER II, J. C. (1997): Methods for evaluating crown area profiles of forest stands. *Canadian Journal of Forest Research* 27 (3): S. 385–392.
- DUCEY, M. J. (2009): Predicting crown size and shape from simple stand variables. *Journal of Sustainable Forestry* 28 (1-2): S. 5–21.
- DYER, M. E. & BURKHART, H. E. (1987): Compatible crown ratio and crown height models. *Canadian Journal of Forest Research* 17 (6): S. 572–574.
- EBERT, H. P. & RIEGER, T. (2000): Die Baumkrone als Maßstab für den Zuwachs von Eiche. *AFZ/Der Wald* 8: S. 403–406.
- EILERS, P. H. C. & MARX, B. D. (1996): Flexible smoothing with B-splines and penalties. *Statistical science*: S. 89–102.
- EK, A. R. & MONSERUD, R. A. (1974): FOREST: a computer model for simulating the growth and reproduction of mixed species forest stands. Research Report R2635. School of Natural Resources, College of Agricultural and Life Sciences, University of Wisconsin, 72 S.
- ENDLER, J. A. (1993): The color of light in forests and its implications. *Ecological Monographs* 63 (1): S. 2–27.
- FAHRMEIR, L.; KNEIB, T. & LANG, S. (2004): Penalized structured additive regression for space-time data: a Bayesian perspective. *Statistica Sinica* 14 (3): S. 731–762.
- FAHRMEIR, L.; KNEIB, T. & LANG, S. M. (2007): *Regression*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- FICHTNER, A.; STURM, K.; RICKERT, C.; OHEIMB, G. VON & HÄRDLE, W. (2013): Crown size-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) are driven by the interplay of disturbance intensity and inter-specific competition. *Forest Ecology and Management* 302: S. 178–184.
- FIRBANK, L. G. & WATKINSON, A. R. (1985): A model of interference within plant monocultures. *Journal of Theoretical Biology* 116 (2): S. 291–311.
- FISH, H.; LIEFFERS, V. J.; SILINS, U. & HALL, R. J. (2006): Crown shyness in lodgepole pine stands of varying stand height, density, and site index in the upper foothills of Alberta. *Canadian Journal of Forest Research* 36 (9): S. 2104–2111.
- FRANCO, M. (1986): The influences of neighbours on the growth of modular organisms with an example from trees. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* (313 B): S. 209–225.
- FRECH, A. (2006): Walddynamik in Mischwäldern des Nationalparks Hainich. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, 120 S.

- FRECH, A.; LEUSCHNER, C.; HAGEMEIERS, M. & HÖLSCHER, D. (2003): Nachbarschaftsbezogene Analyse der Kronenraumbesetzung von Esche, Hainbuche und Winterlinde in einem artenreichen Laubmischwald (Nationalpark Hainich, Thüringen). *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 122 (1): S. 22–35.
- FREISE, C. (2005): Die relative Kronenlänge als Steuerungsparameter des Einzelbaumwachstums der Fichte. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- GETZIN, S. & WIEGAND, K. (2007): Asymmetric tree growth at the stand level: Random crown patterns and the response to slope. *Forest Ecology and Management* 242 (2-3): S. 165–174.
- GILL, S. J.; BIGING, G. S. & MURPHY, E. C. (2000): Modeling conifer tree crown radius and estimating canopy cover. *Forest Ecology and Management* 126 (3): S. 405–416.
- GOUDIE, J. W.; POLSSON, K. R. & OTT, P. K. (2009): An empirical model of crown shyness for lodgepole pine (*Pinus contorta* var. *latifolia* [Engl.] Critch.) in British Columbia. *Forest Ecology and Management* 257 (1): S. 321–331.
- GRACE, J. C.; JARVIS, P. G. & NORMAN, J. M. (1987): Modelling the interception of solar radiant energy in intensively managed stands. *New Zealand Journal of Forestry Science* 17: S. 193–209.
- GROTE, R. (2003): Estimation of crown radii and crown projection area from stem size and tree position. *Annals. Forest Science* 60 (5): S. 393–402.
- GROTE, R. & REITER, I. M. (2004): Competition-dependent modelling of foliage biomass in forest stands. *Trees - Structure and Function* 18 (5): S. 596–607.
- GROTE, R.; SCHUCK, J.; BLOCK, J. & PRETZSCH, H. (2003): Oberirdische holzige Biomasse in Kiefern-/Buchen- und Eichen-/Buchen-Mischbeständen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 122 (5): S. 287–301.
- GUERICKE, M. (1999): Untersuchungen zur Kronenplastizität bei der Buche. Jahrestagung des Deutschen Verbandes forstlicher Forschungsanstalten - Sektion Waldbau.
- GUERICKE, M. (2001): Untersuchungen zur Wuchsdynamik von Mischbeständen aus Buche und Europ. Lärche (*Larix decidua*, Mill.) als Grundlage für ein abstand-sabhängiges Einzelbaumwachstumsmodell. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen.
- HANN, D. W. (1997): Equations for predicting the largest crown width of stand-grown trees in western Oregon. Forest Research Laboratory Oregon State University - Research Contribution 17.
- HANN, D. W. (1999): An adjustable predictor of crown profile for stand-grown Douglas-fir trees. *Forest Science* 45 (2): S. 217–225.
- HANN, D. W. & HANUS, M. L. (2004): Evaluation of nonspatial approaches and equation forms used to predict tree crown recession. *Canadian Journal of Forest Research* 34 (10): S. 1993–2003.

- HASENAUER, H. (1994): Ein Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Fichten-Kiefern- und Buchen-Fichtenmischbestände. Forstliche Schriftenreihe der Universität für Bodenkultur Wien 8.
- HASENAUER, H. (1997): Dimensional relationships of open-grown trees in Austria. *Forest Ecology and Management* 96 (3): S. 197–206.
- HASENAUER, H.; KINDERMANN, G. & STEINMETZ, P. (2006): The tree growth model MOSES 3.0. In: HASENAUER, H. (2006): *Sustainable Forest Management, Growth Models for Europe*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- HASENAUER, H. & MONSERUD, R. A. (1996): A crown ratio model for Austrian forests. *Forest Ecology and Management* 84 (1-3): S. 49–60.
- HATCH, C. R.; GERRARD, D. J. & TAPPEINER II, J. C. (1975): Exposed Crown Surface Area: A Mathematical Index of Individual Tree Growth Potential. *Canadian Journal of Forest Research* 5 (2): S. 224–228.
- HEGYI, F. (1974): A simulation model for managing jack-pine stands. In: FRIES, J. (1974): *Growth models for tree and stand simulation*. Royal College of Forest, Stockholm.
- HENRIKSSON, J. (2001): Differential shading of branches or whole trees: survival, growth, and reproduction. *Oecologia* 126 (4): S. 482–486.
- HIX, D. M. & LORIMER, C. G. (1990): Growth-competition relationships in young hardwood stands on two contrasting sites in southwestern Wisconsin. *Forest Science* 36 (4): S. 1032–1049.
- HYNYNEN, J. (1995): Predicting tree crown ratio for unthinned and thinned Scots pine stands. *Canadian Journal of Forest Research* 25 (1): S. 57–62.
- ILVESSALO, Y. (1967): On the development of natural normal forest stands in southeastern north-Finland. *Acta Forestalia Fennica* 81 (5): S. 1–85.
- ISHIZUKA, M. (1984): Spatial pattern of trees and their crowns in natural mixed forests. *Japanese Journal of Ecology* 34 (4): S. 421–430.
- ITÔ, H.; SUMIDA, A.; ISAGI, Y. & KAMO, K. (1997): The crown shape of an evergreen oak, *Quercus glauca*, in a hardwood community. *Journal of Forest Research* 2 (2): S. 85–88.
- KAHN, M. & PRETZSCH, H. (1997): Das Wuchsmodell SILVA-Parametrisierung der Version 2.1 für Rein- und Mischbestände aus Fichte und Buche. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 168 (6-7): S. 115–123.
- KAITANIEMI, P. & LINTUNEN, A. (2010): Neighbor identity and competition influence tree growth in Scots pine, Siberian larch, and silver birch. *Annals of Forest Science* 67 (6): S. 7.
- KAMMANN, E. E. & WAND, M. P. (2003): Geoaddivitive models. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)* 52 (1): S. 1–18.
- KANTOLA, A. & MÄKELÄ, A. (2004): Crown development in Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.]. *Trees* 18 (4): S. 408–421.

- KATO, F. & MÜLDER, D. (1998): Qualitative Gruppendurchforstung der Buche. Wertentwicklung nach 30 Jahren. *Forst und Holz* 53 (5): S. 131–136.
- KELLOMÄKI, S.; IKONEN, V. P.; PELTOLA, H. & KOLSTRÖM, T. (1999): Modelling the structural growth of Scots pine with implications for wood quality. *Ecological Modelling* 122 (1-2): S. 117–134.
- KRAJICEK, J. E.; BRINKMAN, K. A. & GINGRICH, S. F. (1961): Crown competition—a measure of density. *Forest Science* 7 (1): S. 35–42.
- KRAMER, H. (1958a): Wegebreite und Zuwachs im angrenzenden Bestand. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 129: S. 121–134.
- KRAMER, H. (1958b): Forstwirtschaftliche Betrachtung von Wegebreite und Randwirkung. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 77 (9): S. 295–310.
- KRAMER, H. & AKÇA, A. (2002): Leitfaden zur Waldmesslehre. Sauerländers Verlag, Frankfurt am Main.
- KRAMER, H. & KÄTSCH, C. (1994): Individuelles Wachstum von Waldbäumen in Abhängigkeit von natürlichen und anthropogenen Einflüssen. *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt*, Band 117. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main.
- KUULUVAINEN, T. & PUKKALA, T. (1987): Effect of crown shape and tree distribution on the spatial distribution of shade. *Agricultural and Forest Meteorology* 40 (3): S. 215–231.
- LANG, A. C.; HÄRDTLE, W.; BRUELHEIDE, H.; GEISSLER, C.; NADROWSKI, K.; ET AL. (2010): Tree morphology responds to neighbourhood competition and slope in species-rich forests of subtropical China. *Forest Ecology and Management* 260 (10): S. 1708–1715.
- LAPPI, J. (1997): A longitudinal analysis of height/diameter curves. *Forest Science* 43 (4): S. 555–570.
- LEDERMANN, T. (2010): A non-linear model to predict crown recession of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) in Austria. *European Journal of Forest Research*: S. 1–11.
- LEDERMANN, T. & STAGE, A. R. (2001): Effects of competitor spacing in individual-tree indices of competition. *Canadian Journal of Forest Research* 31 (12): S. 2143–2150.
- LEITES, L. P.; ROBINSON, A. P. & CROOKSTON, N. L. (2009): Accuracy and equivalence testing of crown ratio models and assessment of their impact on diameter growth and basal area increment predictions of two variants of the Forest Vegetation Simulator. *Canadian Journal of Forest Research* 39 (3): S. 655–665.
- LIESEBACH, M. (2012): Wachstum und phänotypische Variation von sechs Herkünften der Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L.) an einem Standort in Schleswig-Holstein. *Landbauforsch* 62 (4): S. 179–192.

- LIU, J.; BURKHART, H. E. & AMATEIS, R. L. (1995): Projecting crown measures for loblolly pine trees using a generalized thinning response function. *Forest science* 41 (1): S. 43–53.
- LONGUETAUD, F.; SEIFERT, T.; LEBAN, J. M. & PRETZSCH, H. (2008): Analysis of long-term dynamics of crowns of sessile oaks at the stand level by means of spatial statistics. *Forest Ecology and Management* 255 (5-6): S. 2007–2019.
- MAGUIRE, D. A. & HANN, D. W. (1990): Constructing models for direct prediction of 5-year crown recession in southwestern Oregon Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research* 20 (7): S. 1044–1052.
- MARSHALL, D. D.; JOHNSON, G. P. & HANN, D. W. (2003): Crown profile equations for stand-grown western hemlock trees in northwestern Oregon. *Canadian Journal of Forest Research* 33 (11): S. 2059–2066.
- MATSUZAKI, J.; MASUMORI, M. & TANGE, T. (2006): Stem phototropism of trees: a possible significant factor in determining stem inclination on forest slopes. *Annals of Botany* 98 (3): S. 573–581.
- McMAHON, T. (1973): Size and shape in biology: elastic criteria impose limits on biological proportions, and consequently on metabolic rates. *Science* 179: S. 1201–1204.
- MEHTÄTALO, L. (2004): A longitudinal height-diameter model for Norway spruce in Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 34 (1): S. 131–140.
- MEHTÄTALO, L. (2005): Height-diameter models for Scots pine and birch in Finland. *Silva Fennica* 39 (1): S. 55–66.
- MENG, S. X.; RUDNICKI, M.; LIEFFERS, V. J.; REID, D. E. B. & SILINS, U. (2006): Preventing crown collisions increases the crown cover and leaf area of maturing lodgepole pine. *Journal of Ecology* 94 (3): S. 681–686.
- MITCHELL, K. J. (1975): Dynamics and Simulated Yield of Douglas-fir. Supplement to *Forest Science* 21 (4).
- MITSCHERLICH, G. (1970): *Wald, Wachstum und Umwelt*, Band 1. Sauerländers Verlag, Frankfurt am Main.
- MONSERUD, R. A. (1975): Methodology for simulating Wisconsin northern hardwood stand dynamics. PhD. Thesis, University of Wisconsin Madison.
- MONSERUD, R. A. & STERBA, H. (1996): A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria. *Forest Ecology and Management* 80 (1-3): S. 57–80.
- MUTH, C. C. & BAZZAZ, F. A. (2002): Tree canopy displacement at forest gap edges. *Canadian Journal of Forest Research* 32 (2): S. 247–254.
- MUTH, C. C. & BAZZAZ, F. A. (2003): Tree canopy displacement and neighborhood interactions. *Canadian Journal of Forest Research* 33 (7): S. 1323–1330.
- NÆSSET, E. & ØKLAND, T. (2002): Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment* 79 (1): S. 105–115.

- NAGEL, J. (1999): Konzeptionelle Überlegungen zum schrittweisen Aufbau eines waldwachstumskundlichen Simulationssystems für Norddeutschland. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt 128.
- NAGEL, J. (2005): TreeGrOSS - eine Java basierte Softwarekomponente zur Waldwachstumsmodellierung für Forschung, Lehre und Praxis. Grüne Reihe. Jahrestagung der Sektion Forstliche Biometrie und Informatik des Deutschen Verbands Forstlicher Forschungsanstalten in Freiburg 9.-10. Oktober 2003.
- NAGEL, J. (2009): Waldwachstumssimulation mit dem Java Software Paket TreeGrOSS - Vorläufiges Handbuch. URL: <http://www.nw-fva.de/?id=194#524> [Heruntergeladen am 21. Oktober 2010].
- NAGEL, J.; ALBERT, M. & SCHMIDT, M. (2002): Das waldbauliche Prognose- und Entscheidungsmodell BWINPro 6.1 - Neuparametrisierung und Modellerweiterungen. Forst und Holz 57 (15/16): S. 486–493.
- NAGEL, J. & SCHMIDT, M. (2006): The Silvicultural Decision Support System BWINPro. In: HASENAUER, H. (2006): Sustainable Forest Management, Growth Models for Europe. Springer, Berlin, Heidelberg.
- NIEDERSÄCHSISCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (2005): Aufnahmeanweisung für ertragskundliche Versuchsflächen. (unveröff.).
- O'CONNELL, B. M. & KELTY, M. J. (1994): Crown architecture of understory and open-grown white pine (*Pinus strobus* L.) saplings. Tree Physiology 14 (1): S. 89–102.
- OKER-BLOM, P. & KELLOMÄKI, S. (1983): Effect of grouping of foliage on the within-stand and within-crown light regime: comparison of random and grouping canopy models. Agricultural Meteorology 28 (2): S. 143–155.
- OLESEN, T. (2001): Architecture of a cool-temperate rain forest canopy. Ecology 82 (10): S. 2719–2730.
- OTTORINI, J. M.; GOFF, N. LE & CLUZEAU, C. (1996): Relationships between crown dimensions and stem development in *Fraxinus excelsior*. Canadian Journal of Forest Research 26 (3): S. 394–401.
- OZANNE, C. M. P.; ANHUF, D.; BOULTER, S. L.; KELLER, M.; KITCHING, R. L.; ET AL. (2003): Biodiversity meets the atmosphere: a global view of forest canopies. Science 301 (5630): S. 183–186.
- PACALA, S. W.; CANHAM, C. D.; SAPONARA, J.; SILANDER JR, J. A.; KOBE, R. K.; ET AL. (1996): Forest models defined by field measurements: estimation, error analysis and dynamics. Ecological monographs 66 (1): S. 1–43.
- PAINE, D. P. & HANN, D. W. (1982): Maximum crown-width equations for southwestern Oregon tree species. Research Paper No. 46. Forest Research Laboratory, Oregon State University.
- PAULO, M. J.; STEIN, A. & TOMÉ, M. (2002): A spatial statistical analysis of cork oak competition in two Portuguese silvopastoral systems. Canadian Journal of Forest Research 32 (11): S. 1893–1903.

- PEARCY, R. W.; MURAOKA, H. & VALLADARES, F. (2005): Crown architecture in sun and shade environments: assessing function and trade-offs with a three-dimensional simulation model. *New Phytologist* 166 (3): S. 791–800.
- PELT, R. VAN & NORTH, M. P. (1996): Analyzing canopy structure in Pacific Northwest old-growth forests with a stand-scale crown model. *Northwest Science* 70: S. 15–30.
- PERSSON, A.; HOLMGREN, J. & SÖDERMAN, U. (2002): Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68 (9): S. 925–932.
- PETER, A. O. & OLUWAFEMI, O. A. (2008): Interim Crown Ratio Models for a Mixed *Tectona grandis* and *Gmelina arborea* Stand in the University of Ibadan, Nigeria. *Research Journal of Forestry* 2 (1): S. 34–42.
- PETRI, H. (1972): Standraumregulierung von Mischbeständen am Beispiel Buche–Fichte. *Forstarchiv* 43 (9): S. 173–179.
- PETRIȚAN, A. M.; LÜPKE, B. VON & PETRIȚAN, I. C. (2009): Influence of light availability on growth, leaf morphology and plant architecture of beech (*Fagus sylvatica* L.), maple (*Acer pseudoplatanus* L.) and ash (*Fraxinus excelsior* L.) saplings. *European Journal of Forest Research* 128 (1): S. 61–74.
- PIBOULE, A.; COLLET, C.; FROCHOT, H. & DHÔTE, J.-F. (2005): Reconstructing crown shape from stem diameter and tree position to supply light models. I. Algorithms and comparison of light simulations. *Annals of Forest Science* 62 (7): S. 645–657.
- PIEPHO, H.-P. (1998): Auswertung von Bonituren des Typs „Prozent Befall“ mit SAS-Prozeduren für Generalisierte Lineare Modelle. *Zeitschrift für Agrarinformatik* (2): S. 26–37.
- PINHEIRO, J.; BATES, D.; DEBROY, S.; SARKAR, D. & R DEVELOPMENT CORE TEAM (2010): nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models - R package version 3.1-105.
- PINHEIRO, J. C. & BATES, D. M. (2000): Mixed-effects models in S and S-PLUS. Springer Verlag, New York, USA.
- PRETZSCH, H. (1992a): Modellierung der Kronenkonkurrenz von Fichte und Buche in Rein- und Mischbeständen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 163 (11/12): S. 203–213.
- PRETZSCH, H. (1992b): Konzeption und Konstruktion von Wachstumsmodellen für Rein- und Mischbestände. *Forstliche Forschungsberichte München* 115.
- PRETZSCH, H. (2002): Grundlagen der Waldwachstumsforschung. Parey, Berlin/Wien, 414 S.
- PRETZSCH, H.; BIBER, P. & ĎURSKÝ, J. (2002): The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management* 162 (1): S. 3–21.

- PRETZSCH, H.; SEIFERT, S. & HUANG, P. (2011): Beitrag des terrestrischen Laserscannings zur Erfassung der Struktur von Baumkronen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 162 (6): S. 186–194.
- PROTZ, C. G.; SILINS, U. & LIEFFERS, V. J. (2000): Reduction in branch sapwood hydraulic permeability as a factor limiting survival of lower branches of lodgepole pine. *Canadian Journal of Forest Research* 30 (7): S. 1088–1095.
- PURVES, D. W.; LICHSTEIN, J. W. & PACALA, S. W. (2007): Crown Plasticity and Competition for Canopy Space: A New Spatially Implicit Model Parameterized for 250 North American Tree Species. *PLoS ONE* 2 (9): S. 1–11.
- PUTZ, F. E.; PARKER, G. G. & ARCHIBALD, R. M. (1984): Mechanical Abrasion and Inter-crown Spacing. *American Midland Naturalist* 112 (1): S. 24–28.
- PYA, N. (2012): scam: Shape constrained additive models. R package version 1.1-4. URL: <http://cran.r-project.org/web/packages/scam/scam.pdf> [Heruntergeladen am 17. Juli 2012].
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2009): R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- RAUTIAINEN, M.; MÖTTUS, M.; STENBERG, P. & ERVASTI, S. (2008): Crown envelope shape measurements and models. *Silva Fennica* 42 (1): S. 19–33.
- RAUTIAINEN, M. & STENBERG, P. (2005): Simplified tree crown model using standard forest mensuration data for Scots pine. *Agricultural and Forest Meteorology* 128 (1-2): S. 123–129.
- RICHTER, J. (1999): In wie weit sind Kronenform und Schaftqualität der Rotbuche genetisch bedingt? *Forst und Holz* 54: S. 460–462.
- RITCHIE, M. W. & HANN, D. W. (1987): Equations for predicting height to crown base for fourteen tree species in southwest Oregon. Research Paper No. 50. Forest Research Laboratory, Oregon State University.
- ROCK, J.; PUETTMANN, K. J.; GOCKEL, H. A. & SCHULTE, A. (2004): Spatial aspects of the influence of silver birch (*Betula pendula* L.) on growth and quality of young oaks (*Quercus* spp.) in central Germany. *Forestry* 77 (3): S. 235–247.
- RÖHLE, H. (1983): Untersuchungen zur Ermittlung der Genauigkeit bei der Ablotung von Kronenradien und der Berechnung von Kronengrundflächen. Jahrestagung des Deutschen Verbandes forstlicher Forschungsanstalten - Sektion Ertragskunde in Neuhaus.
- RÖHRIG, E.; BARTSCH, N. & LÜPKE, B. VON (2006): *Waldbau auf ökologischer Grundlage*. Ulmer, Stuttgart, 479 S.
- ROLOFF, A. (2001): *Baumkronen: Verständnis und praktische Bedeutung eines komplexen Naturphänomens*. Ulmer, Stuttgart, 146 S.
- ROUVINEN, S. & KUULUVAINEN, T. (1997): Structure and asymmetry of tree crowns in relation to local competition in a natural mature Scots pine forest. *Canadian Journal of Forest Research* 27 (6): S. 890–902.

- RUDNICKI, M.; LIEFFERS, V. J. & SILINS, U. (2003): Stand structure governs the crown collisions of lodgepole pine. *Canadian Journal of Forest Research* 33 (7): S. 1238–1244.
- RUDNICKI, M.; SILINS, U. & LIEFFERS, V. J. (2004): Crown cover is correlated with relative density, tree slenderness, and tree height in lodgepole pine. *Forest Science* 50 (3): S. 356–363.
- RUDNICKI, M.; SILINS, U.; LIEFFERS, V. J. & JOSI, G. (2001): Measure of simultaneous tree sways and estimation of crown interactions among a group of trees. *Trees - Structure and Function* 15 (2): S. 83–90.
- RUNKLE, J. R. & YETTER, T. C. (1987): Treefalls Revisited: Gap Dynamics in the Southern Appalachians. *Ecology* 68 (2): S. 417–424.
- RUSSELL, M. B. & WEISKITTEL, A. R. (2011): Maximum and largest crown width equations for 15 tree species in Maine. *Northern Journal of Applied Forestry* 28 (2): S. 84–91.
- SATTLER, D. F. & LEMAY, V. (2011): A system of nonlinear simultaneous equations for crown length and crown radius for the forest dynamics model SORTIE-ND. *Canadian Journal of Forest Research* 41 (8): S. 1567–1576.
- SCHMIDT, M. (2001): Prognosemodelle für ausgewählte Holzqualitätsmerkmale wichtiger Baumarten. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen.
- SCHMIDT, M.; SPELLMANN, H. & NAGEL, J. (2001): Waldwachstumskundliche Entscheidungshilfen zur Ästung der Douglasie. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 172: S. 126–136.
- SCHOBER, R. (1967): Buchen-Ertragstafel für mäßige und starke Durchforstung. In: SCHOBER, R. (1975): Ertragstafeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. Sauerländers Verlag, Frankfurt am Main.
- SCHRÖDER, J.; GEROLD, D. & RÖHLE, H. (2005): Modellierung der Kronenbreite in BWIN-Pro-S für die Anwendung in strukturreichen Beständen. Jahrestagung der Sektion Ertragskunde des Deutschen Verbands Forstlicher Forschungsanstalten in Freising.
- SCHRÖTER, M.; HÄRDLE, W. & OHEIMB, G. VON (2012): Crown plasticity and neighborhood interactions of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in an old-growth forest. *European Journal of Forest Research* 131 (3): S. 787–798.
- SCHWINNING, S. & WEINER, J. (1998): Mechanisms determining the degree of size asymmetry in competition among plants. *Oecologia* 113 (4): S. 447–455.
- SEIDEL, D.; LEUSCHNER, C.; MÜLLER, A. & KRAUSE, B. (2011): Crown plasticity in mixed forests—Quantifying asymmetry as a measure of competition using terrestrial laser scanning. *Forest Ecology and Management* 261: S. 2123–2132.
- SEIFERT, T. (2003): Integration von Holzqualität und Holzsortierung in behandlungssensitive Waldwachstumsmodelle. Dissertation, Technische Universität München.

- SELLIER, D. & FOURCAUD, T. (2009): Crown structure and wood properties: Influence on tree sway and response to high winds. *American Journal of Botany* 96 (5): S. 885–896.
- SHORT, E. A. & BURKHART, H. E. (1992): Predicting Crown-Height Increment for Thinned and Unthinned Loblolly Pine Plantations. *Forest Science* 38: S. 594–610.
- SKATTER, S. & KUCERA, B. (2000): Tree breakage from torsional wind loading due to crown asymmetry. *Forest Ecology and Management* 135 (1-3): S. 97–103.
- SMITH, F. W. & LONG, J. N. (2001): Age-related decline in forest growth: an emergent property. *Forest Ecology and Management* 144 (1-3): S. 175–181.
- SMITH, W. R. (1994): An empirical evaluation of a three-dimensional crown model for predicting volume growth. *Forest Ecology and Management* 69 (1): S. 199–209.
- SONG, B.; CHEN, J.; DESANDER, P. V.; REED, D. D.; BRADSHAW, G. A.; ET AL. (1997): Modeling canopy structure and heterogeneity across scales: From crowns to canopy. *Forest Ecology and Management* 96 (3): S. 217–229.
- SORRENSEN-COTHERN, K. A.; FORD, E. D. & SPRUGEL, D. G. (1993): A Model of Competition Incorporating Plasticity through Modular Foliage and Crown Development. *Ecological Monographs* 63 (3): S. 277–304.
- SPATHELF, P. (1999): Orientierungshilfe zur Prognose und Steuerung des Wachstums von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) und Tannen (*Abies alba* Mill.) in Überführungswäldern mit Hilfe der relativen Kronenlänge. *Freiburger Forstliche Forschung*, Band 4. Forstwissenschaftliche Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- SPATHELF, P. (2003): Reconstruction of crown length of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and Silver fir (*Abies alba* Mill.) – technique, establishment of sample methods and application in forest growth analysis. *Annals of Forest Science* 60 (8): S. 833–842.
- STENBERG, P.; KUULUVAINEN, T.; KELLOMÄKI, S.; GRACE, J. C.; JOKELA, E. J.; ET AL. (1994): Crown structure, light interception and productivity of pine trees and stands. *Ecological Bulletins* 43: S. 20–34.
- STERBA, H.; BLAB, A. & KATZENSTEINER, K. (2002): Adapting an individual tree growth model for Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) in pure and mixed species stands. *Forest Ecology and Management* 159 (1-2): S. 101–110.
- STERCK, F. J. & BONGERS, F. (2001): Crown development in tropical rain forest trees: patterns with tree height and light availability. *Journal of Ecology* 89 (1): S. 1–13.
- STOLL, P. & SCHMID, B. (1998): Plant foraging and dynamic competition between branches of *Pinus sylvestris* in contrasting light environments. *Journal of Ecology* 86 (6): S. 934–945.
- STRIGUL, N.; PRISTINSKI, D.; PURVES, D.; DUSHOFF, J. & PACALA, S. (2008): Scaling from trees to forests: tractable macroscopic equations for forest dynamics. *Ecological Monographs* 78 (4): S. 523–545.

- SUMIDA, A.; TERAZAWA, I.; TOGASHI, A. & KOMIYAMA, A. (2002): Spatial arrangement of branches in relation to slope and neighbourhood competition. *Annals of Botany* 89 (3): S. 301–310.
- SUTHERLAND, W. J. & STILLMAN, R. A. (1988): The foraging tactics of plants. *Oikos* 52: S. 239–244.
- TEMESGEN, H.; LEMAY, V. & MITCHELL, S. J. (2005): Tree crown ratio models for multi-species and multi-layered stands of southeastern British Columbia. *Forestry Chronicle* 81 (1): S. 133–141.
- THORPE, H.; ASTRUP, R.; TROWBRIDGE, A. & COATES, K. (2010): Competition and tree crowns: A neighborhood analysis of three boreal tree species. *Forest Ecology and Management* 259 (8): S. 1586–1596.
- TOMÉ, M. & BURKHART, H. E. (1989): Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *Forest Science* 35 (3): S. 816–831.
- TREMMELE, D. C. & BAZZAZ, F. A. (1995): Plant architecture and allocation in different neighborhoods: implications for competitive success. *Ecology*: S. 262–271.
- UHL, E.; METZGER, H. G. & SEIFERT, T. (2006): Dimension und Wachstum von solitären Buchen und Eichen. Jahrestagung der Sektion Ertragskunde des Deutschen Verbands Forstlicher Forschungsanstalten in Staufen.
- UMEKI, K. (1995a): Modeling the relationship between the asymmetry in crown display and local environment. *Ecological Modelling* 82 (1): S. 11–20.
- UMEKI, K. (1995b): A comparison of crown asymmetry between *Picea abies* and *Betula maximowicziana*. *Canadian Journal of Forest Research* 25 (11): S. 1876–1880.
- UMEKI, K. (1997): Effect of crown asymmetry on size-structure dynamics of plant populations. *Annals of Botany* 79 (6): S. 631–641.
- VALLADARES, F.; GIANOLI, E. & GÓMEZ, J. M. (2007): Ecological limits to plant phenotypic plasticity. *New Phytologist* 176 (4): S. 749–763.
- VENABLES, W. N. & RIPLEY, B. D. (2002): *Modern applied statistics with S*. Springer Verlag, New York, USA.
- VIEILLEDENT, G.; COURBAUD, B.; KUNSTLER, G.; DHÔTE, J. F. & CLARK, J. S. (2010): Individual variability in tree allometry determines light resource allocation in forest ecosystems: a hierarchical Bayesian approach. *Oecologia* 163: S. 759–773.
- VINCENT, G. & HARJA, D. (2008): Exploring Ecological Significance of Tree Crown Plasticity through Three-dimensional Modelling. *Annals of Botany* 101 (8): S. 1221–1231.
- VORREYER, C. (1997): Untersuchung von Buchen- und Douglasienkronen in Mischbeständen. Diplomarbeit, Georg-August-Universität Göttingen.
- WALLER, D. M. (1986): The dynamics of growth and form. In: CRAWLEY, M. J. (1986): *Plant Ecology*. Blackwell, Oxford.

- WEBB, V. A.; RUDNICKI, M. & MUPPA, S. K. (2013): Analysis of tree sway and crown collisions for managed *Pinus resinosa* in southern Maine. *Forest Ecology and Management* 302: S. 193–199.
- WEINER, J. (1990): Asymmetric competition in plant populations. *Trends in Ecology and Evolution* 5 (11): S. 360–364.
- WEST, P. & WELLS, K. F. (1992): Method of application of a model to predict the light environment of individual tree crowns and its use in a eucalypt forest. *Ecological Modelling* 60 (3-4): S. 199–231.
- WILLIAMS, H.; MESSIER, C. & KNEESHAW, D. D. (1999): Effects of light availability and sapling size on the growth and crown morphology of understory Douglas-fir and lodgepole pine. *Canadian Journal of Forest Research* 29 (2): S. 222–231.
- WOLFF, B.; HÖLZER, W.; FRÖMDLING, D. & BONK, S. (1998): Datenaufbereitung für Modellrechnungen aus der Bundeswaldinventur (BWI) und dem Datenspeicher Waldfonds (DSW). Arbeitsbericht Institut für Forstökologie und Walderfassung der BFH 98 (3) URL: <http://www.pik-potsdam.de/topik/t6scs/safe/home/waldstudie/tp6.pdf> [Heruntergeladen am 13. Juli 2012].
- WOOD, S. N. (2006): *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, London, New York, 383 S.
- WYCKOFF, P. H. & CLARK, J. S. (2005): Tree growth prediction using size and exposed crown area. *Canadian Journal of Forest Research* 35 (1): S. 13–20.
- WYCKOFF, W. R. (1990): A basal area increment model for individual conifers in the northern Rocky Mountains. *Forest Science* 36 (4): S. 1077–1104.
- YOKOZAWA, M. (1999): Size hierarchy and stability in competitive plant populations. *Bulletin of mathematical biology* 61 (5): S. 949–961.
- YOUNG, T. P. & HUBBELL, S. P. (1991): Crown Asymmetry, Treefalls, and Repeat Disturbance of Broad-Leaved Forest Gaps. *Ecology* 72 (4): S. 1464–1471.
- YOUNG, T. P. & PERKOCHA, V. (1994): Treefalls, crown asymmetry, and buttresses. *Journal of Ecology* 82 (2): S. 319–324.

12 Anhang

12.1 Kronenlänge

Tabelle 9: Statistische Eigenschaften der Bekronungsgrad-Modelle (1. Stufe) für Eichen und Buche

Baumart	Modelleigenschaften			
Eichen	Parametrische Koeffizienten:			
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert
	Interzept	5,5152	0,2661	< 2e-16
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:			
			Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert
	f ₁ (BHD)		8,584	< 2e-16
	f ₂ (h)		4,000	< 2e-16
	f ₃ (alt)		3,010	< 2e-16
	f ₄ (rw, hw)		218,912	< 2e-16
	R ² (adj.) = 0,519		erklärte Devianz = 50,9%	
GCV score = 0,0426		Scale est. = 0,042346	n = 37375	
Buche	Parametrische Koeffizienten:			
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert
	Interzept	5,6570	0,2830	< 2e-16
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:			
			Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert
	f ₁ (BHD)		8,778	< 2e-16
	f ₂ (h)		8,206	< 2e-16
	f ₃ (alt)		2,539	< 2e-16
	f ₄ (HNN)		2,039	< 2e-16
	f ₅ (rw, hw)		218,626	< 2e-16
R ² (adj.) = 0,396		erklärte Devianz = 38,0%		
GCV score = 0,073884		Scale est. = 0,073648	n = 75501	

12 Anhang

Tabelle 10: Statistische Eigenschaften der Bekronungsgrad-Modelle (1. Stufe) für Fichte und Douglasie

Baumart	Modelleigenschaften			
Fichte	Parametrische Koeffizienten:			
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert
	Interzept	15,2122	0,2538	< 2e-16
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:			
			Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert
	f ₁ (BHD)		8,731	< 2e-16
	f ₂ (h)		8,232	< 2e-16
	f ₃ (alt)		4,943	< 2e-16
	f ₄ (rw, hw)		218,476	< 2e-16
	R ² (adj.) = 0,683		erklärte Devianz = 66,6%	
GCV score = 0,046544		Scale est. = 0,046425	n = 94144	
Douglasie	Parametrische Koeffizienten:			
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert
	Interzept	10,5702	0,4912	< 2e-16
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:			
			Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert
	f ₁ (BHD)		8,723	< 2e-16
	f ₂ (h)		8,038	< 2e-16
	f ₃ (alt)		6,488	< 2e-16
	f ₄ (rw, hw)		210,155	< 2e-16
	R ² (adj.) = 0,559		erklärte Devianz = 54,9%	
GCV score = 0,02828		Scale est. = 0,028156	n = 53348	

Tabelle 11: Statistische Eigenschaften der Bekronungsgrad-Modelle (1. Stufe) für Kiefer und Lärche

Baumart	Modelleigenschaften			
Kiefer	Parametrische Koeffizienten:			
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert
	Interzept	-0,7618	0,0017	< 2e-16
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:			
		Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert	
	f ₁ (BHD)	8,850	< 2e-16	
	f ₂ (h)	8,786	< 2e-16	
	f ₃ (alt)	8,404	< 2e-16	
	f ₄ (rw, hw)	206,458	< 2e-16	
	R ² (adj.) = 0,564	erklärte Devianz = 55,3%		
GCV score = 0,02789	Scale est. = 0,027746	n = 45320		
Lärche	Parametrische Koeffizienten:			
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert
	Interzept	-0,4769	0,0025	< 2e-16
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:			
		Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert	
	f ₁ (BHD)	8,287	< 2e-16	
	f ₂ (h)	8,570	< 2e-16	
	f ₃ (alt)	7,481	< 2e-16	
	f ₄ (rw, hw)	184,426	< 2e-16	
	R ² (adj.) = 0,442	erklärte Devianz = 44,1%		
GCV score = 0,034498	Scale est. = 0,034205	n = 24713		

12 Anhang

Tabelle 12: Statistische Eigenschaften der Bekronungsgrad-Modelle (1. Stufe) ohne geografische Informationen für Eichen und Buche

Baumart	Modelleigenschaften			
Eichen	Parametrische Koeffizienten:			
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert
	Interzept	7,5590	0,2718	< 2e-16
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:			
		Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert	
	f ₁ (BHD)	8,531	< 2e-16	
	f ₂ (h)	5,295	< 2e-16	
	f ₃ (alt)	2,865	< 2e-16	
	R ² (adj.) = 0,367	erklärte Devianz = 35,7%		
	GCV score = 0,055232	Scale est. = 0,055206	n = 37375	
Buche	Parametrische Koeffizienten:			
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert
	Interzept	6,8696	0,3595	< 2e-16
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:			
		Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert	
	f ₁ (BHD)	8,860	< 2e-16	
	f ₂ (h)	5,767	< 2e-16	
	f ₃ (alt)	3,006	< 2e-16	
	R ² (adj.) = 0,228	erklärte Devianz = 21,7%		
	GCV score = 0,092766	Scale est. = 0,092743	n = 75501	

Tabelle 13: Statistische Eigenschaften der Bekronungsgrad-Modelle (1. Stufe) ohne geografische Informationen für Fichte und Douglasie

Baumart	Modelleigenschaften			
Fichte	Parametrische Koeffizienten:			
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert
	Interzept	11,6126	0,1712	< 2e-16
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:			
			Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert
	f ₁ (BHD)		8,846	< 2e-16
	f ₂ (h)		8,413	< 2e-16
	f ₃ (alt)		3,015	< 2e-16
	R ² (adj.) = 0,628	erklärte Devianz = 61,1%		
	GCV score = 0,05397	Scale est. = 0,053958	n = 94144	
Douglasie	Parametrische Koeffizienten:			
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert
	Interzept	16,4220	0,5280	< 2e-16
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:			
			Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert
	f ₁ (BHD)		8,704	< 2e-16
	f ₂ (h)		8,651	< 2e-16
	f ₃ (alt)		4,655	< 2e-16
	R ² (adj.) = 0,418	erklärte Devianz = 40,8%		
	GCV score = 0,036818	Scale est. = 0,036802	n = 53348	

12 Anhang

Tabelle 14: Statistische Eigenschaften der Bekronungsgrad-Modelle (1. Stufe) ohne geografische Informationen für Kiefer und Lärche

Baumart	Modelleigenschaften			
Kiefer	Parametrische Koeffizienten:			
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert
	Interzept	-0,7579	0,0018	< 2e-16
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:			
		Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert	
	f ₁ (BHD)	8,988	< 2e-16	
	f ₂ (h)	8,978	< 2e-16	
	f ₃ (alt)	8,850	< 2e-16	
	R ² (adj.) = 0,495	erklärte Devianz = 48%		
	GCV score = 0,032089	Scale est. = 0,003207	n = 45320	
Lärche	Parametrische Koeffizienten:			
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert
	Interzept	-0,4741	0,0027	< 2e-16
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme:			
		Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert	
	f ₁ (BHD)	8,562	< 2e-16	
	f ₂ (h)	8,479	< 2e-16	
	f ₃ (alt)	8,352	< 2e-16	
	R ² (adj.) = 0,31	erklärte Devianz = 30,7%		
	GCV score = 0,042079	Scale est. = 0,042034	n = 24713	

Tabelle 15: Modellparameter und statistische Eigenschaften des Bekronungsgrad-Modells (2. Stufe) für Eichen

Baumart	Modelleigenschaften				
Eichen	Parametrische Koeffizienten:				
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert	
	α	-0,0340	0,0110	0,0021	
	β	0,8900	0,0190	< 2E-016	
	Anzahl Parzellen: 366		Anzahl Aufnahmen: 1247	n=31 524	
	Zufallseffekte mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen				
			unteres	Schätzung	oberes
	Level: Parzelle	sd(α)	0,0574	0,0906	0,1431
		sd(β)	0,1681	0,2107	0,2641
		cor(α , β)	0,1514	0,6475	0,8831
Level: Aufnahme	sd(α)	0,2330	0,2519	0,2724	
	sd(β)	0,2197	0,2491	0,2825	
	cor(α , β)	0,1827	0,3152	0,4365	
Residuen mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen					
		unteres	Schätzung	oberes	
	sd(res)	0,1485	0,1497	0,1509	

Tabelle 16: Modellparameter und statistische Eigenschaften des Bekronungsgrad-Modells (2. Stufe) für Buche

Baumart	Modelleigenschaften				
	Parametrische Koeffizienten:				
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert	
	α	0,0281	0,0144	0,0520	
	β	0,8254	0,0232	< 2E-016	
	Anzahl Parzellen: 545	Anzahl Aufnahmen: 1774	n=56 865		
	Zufallseffekte mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen				
Buche			unteres	Schätzung	oberes
	Level: Parzelle	sd(α)	0,2150	0,2469	0,2836
		sd(β)	0,3474	0,3901	0,4380
		cor(α , β)	0,0480	0,2279	0,3934
	Level: Aufnahme	sd(α)	0,2150	0,2469	0,2836
		sd(β)	0,3474	0,3901	0,4380
		cor(α , β)	0,0480	0,2279	0,3934
	Residuen mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen				
			unteres	Schätzung	oberes
		sd(res)	0,1909	0,1921	0,1932

Tabelle 17: Modellparameter und statistische Eigenschaften des Bekronungsgrad-Modells (2. Stufe) für Fichte

Baumart	Modelleigenschaften				
	Parametrische Koeffizienten:				
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert	
	α	-0,0164	0,0125	0,1874	
	β	0,6622	0,0126	< 2E-016	
	Anzahl Parzellen: 932	Anzahl Aufnahmen: 2865	n=68 780		
	Zufallseffekte mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen				
Fichte			unteres	Schätzung	oberes
	Level: Parzelle	sd(α)	0,3104	0,3319	0,3550
		sd(β)	0,2282	0,2521	0,2786
		cor(α , β)	-0,2136	-0,1265	-0,0375
	Level: Aufnahme	sd(α)	0,2062	0,2152	0,2247
		sd(β)	0,1571	0,1726	0,1895
		cor(α , β)	0,2027	0,2775	0,3491
		Residuen mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen			
			unteres	Schätzung	oberes
	sd(res)	0,1279	0,1286	0,1293	

Tabelle 18: Modellparameter und statistische Eigenschaften des Bekronungsgrad-Modells (2. Stufe) für Douglasie

Baumart	Modelleigenschaften				
Douglasie	Parametrische Koeffizienten:				
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert	
	α	-0,0104	0,0063	0,0976	
	β	0,9855	0,0125	< 2E-016	
	Anzahl Parzellen: 798		Anzahl Aufnahmen: 2051		
	n=54 329				
	Zufallseffekte mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen				
			unteres	Schätzung	oberes
	Level: Parzelle	sd(α)	0,1122	0,1246	0,1384
		sd(β)	0,2228	0,2466	0,2730
	cor(α, β)	0,3638	0,4974	0,6110	
Level: Aufnahme	sd(α)	0,1514	0,1589	0,1668	
	sd(β)	0,1716	0,1907	0,2120	
	cor(α, β)	-	-	-	
Residuen mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen					
		unteres	Schätzung	oberes	
	sd(res)	0,1245	0,1253	0,1261	

Tabelle 19: Modellparameter und statistische Eigenschaften des Bekronungsgrad-Modells (2. Stufe) für Kiefer

Baumart	Modelleigenschaften				
	Parametrische Koeffizienten:				
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert	
	α	-0,2038	0,0156	0,0000	
	β	0,8103	0,0162	< 2E-016	
	Anzahl Parzellen: 376	Anzahl Aufnahmen: 1160	n=30 283		
	Zufallseffekte mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen				
Kiefer			unteres	Schätzung	oberes
	Level: Parzelle	sd(α)	0,1560	0,1898	0,2309
		sd(β)	0,1711	0,2045	0,2443
		cor(α , β)	0,8080	0,9013	0,9505
	Level: Aufnahme	sd(α)	0,2101	0,2338	0,2601
		sd(β)	0,1754	0,2006	0,2295
		cor(α , β)	0,3086	0,4424	0,5592
		Residuen mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen			
			unteres	Schätzung	oberes
	sd(res)	0,1106	0,1115	0,1124	

Tabelle 20: Modellparameter und statistische Eigenschaften des Bekronungsgrad-Modells (2. Stufe) für Lärche

Baumart	Modelleigenschaften				
Lärche	Parametrische Koeffizienten:				
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert	
	α	-0,0351	0,0106	0,0009	
	β	0,9802	0,0152	0,0000	
	Anzahl Parzellen: 419		Anzahl Aufnahmen: 1146	n=22 950	
	Zufallseffekte mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen				
			unteres	Schätzung	oberes
	Level: Parzelle	sd(α)	0,0000	0,0002	1140,1220
	Level: Aufnahme	sd(α)	0,2458	0,2618	0,2788
		sd(β)	0,2687	0,2990	0,3328
cor(α , β)		0,5361	0,6087	0,6723	
Residuen mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen					
		unteres	Schätzung	oberes	
	sd(res)	0,1343	0,1356	0,1369	

12.2 Kronenbreite

Tabelle 21: Kennzeichen des Kronenbreitenmodells für Eichen

Baumart	Modelleigenschaften				
Eiche	Parametrische Koeffizienten:				
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert	
	Interzept	6,8420	0,2259	< 2E-016	
	bg	1,6629	0,2500	3,89E-011	
	alt	-0,0095	0,0019	7,24E-007	
	hnn	-0,0014	0,0005	0,00727	
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme				
			Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert	
	f ₁ (d)		2,979	< 2E-016	
	f ₂ (h)		3,600	9,04E-006	
	R ² (adj.) = 0,827		Scale est. = 0,13329	n = 1733	
	Zufallseffekte mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen				
			unteres	Schätzung	oberes
	Level: Parzelle	sd(Interzept)	0,2701	0,4559	0,7694
		sd(d)	0,0160	0,0234	0,0341
	cor(Interzept, d)	-0,8286	-0,5788	-0,1368	
Varianzfunktion (Parameter mit 95 % Konfidenzintervall)					
		unteres	Schätzung	oberes	
	σ	0,3326	0,3651	0,4008	
	δ	0,1014	0,1145	0,1276	

Tabelle 22: Kennzeichen des Kronenbreitenmodells für Buche

Baumart	Modelleigenschaften				
Buche	Parametrische Koeffizienten:				
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert	
	Interzept	6,6534	0,1304	< 2E-016	
	hnn	-0,0026	0,0004	2,32E-010	
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme				
			Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert	
	f ₁ (d)		5,927	< 2E-016	
	f ₂ (h)		6,547	< 2E-016	
	f ₃ (alt)		3,079	4,45E-013	
	f ₄ (bg)		3,275	< 2E-016	
	R ² (adj.) = 0,842		Scale est. = 0,22169	n = 9338	
	Zufallseffekte mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen				
			unteres	Schätzung	oberes
	Level: Parzelle	sd(Interzept)	0,5788	0,7850	1,0646
		sd(d)	0,0124	0,0189	0,0288
		cor(Interzept, d)	-0,8791	-0,7217	-0,4225
	Level: Aufnahme	sd(Interzept)	0,4500	0,6185	0,8500
		sd(d)	0,0144	0,0196	0,0266
		cor(Interzept, d)	-0,8569	-0,7060	-0,4434
	Varianzfunktion (Parameter mit 95 % Konfidenzintervall)				
		unteres	Schätzung	oberes	
	σ	0,4475	0,4708	0,4954	
	δ	0,3359	0,3652	0,3945	

Tabelle 23: Kennzeichen des Kronenbreitenmodells für Fichte

Baumart	Modelleigenschaften				
Fichte	Parametrische Koeffizienten:				
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert	
	Interzept	1,2155	0,2345	2,53E-007	
	d	0,1121	0,0045	< 2E-016	
	h	-0,0599	0,0086	5,84E-012	
	bg	2,1254	0,1984	< 2E-016	
	alt	0,0166	0,0024	3,68E-012	
	hnn	-0,0016	0,0004	5,12E-006	
		R ² (adj.) = 0,833	Scale est. = 0,0093266	n = 1245	
	Zufallseffekte mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen				
			unteres	Schätzung	oberes
	Level: Parzelle	sd(Interzept)	0,1940	0,4090	0,8622
		sd(d)	0,0085	0,0139	0,0229
		cor(Interzept, d)	-0,9708	-0,8345	-0,2903
	Level: Aufnahme	sd(Interzept)	0,1849	0,2903	0,4560
Varianzfunktion (Parameter mit 95 % Konfidenzintervall)					
		unteres	Schätzung	oberes	
	σ	0,0927	0,0966	0,1006	

Tabelle 24: Kennzeichen des Kronenbreitenmodells für Douglasie

Baumart	Modelleigenschaften				
Douglasie	Parametrische Koeffizienten:				
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert	
	Interzept	6,0138	0,1861	< 2E-016	
	h	-0,0406	0,0066	7,97E-010	
	bg	2,0642	0,1480	< 2E-016	
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme				
			Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert	
	f ₁ (d)		6,487	< 2E-016	
	R ² (adj.) = 0,777		Scale est. = 0,1479	n = 3814	
	Zufallseffekte mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen				
			unteres	Schätzung	oberes
	Level: Parzelle	sd(Interzept)	0,2344	0,3918	0,6549
		sd(d)	0,0157	0,0201	0,0258
		cor(Interzept, d)	-1,0000	-0,9944	1,0000
	Level: Aufnahme	sd(Interzept)	0,4161	0,5041	0,6105
Varianzfunktion (Parameter mit 95 % Konfidenzintervall)					
		unteres	Schätzung	oberes	
	σ	0,3581	0,3846	0,4130	
	δ	0,0841	0,0955	0,1069	

Tabelle 25: Kennzeichen des Kronenbreitenmodells für Kiefer

Baumart	Modelleigenschaften				
Kiefer	Parametrische Koeffizienten:				
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert	
	Interzept	5,1475	0,3264	< 2E-016	
	h	-0,0500	0,0144	0,00056	
	bg	2,3027	0,3395	2,61E-011	
	Approximierte Signifikanz der glättenden Terme				
			Gesch. Freiheitsgrade	p-Wert	
	f ₁ (d)		2,967	< 2E-016	
	R ² (adj.) = 0,833		Scale est. = 0,0045987	n = 668	
	Zufallseffekte mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen				
			unteres	Schätzung	oberes
	Level: Parzelle	sd(Interzept)	0,3060	0,4966	0,8058
		sd(d)	0,0105	0,0181	0,0315
		cor(Interzept, d)	-0,9466	-0,7933	-0,3476
	Varianzfunktion (Parameter mit 95 % Konfidenzintervall)				
		unteres	Schätzung	oberes	
	σ	0,0439	0,0678	0,1047	
	δ	0,5032	0,6327	0,7621	

Tabelle 26: Kennzeichen des Kronenbreitenmodells für Lärche

Baumart	Modelleigenschaften				
Lärche	Parametrische Koeffizienten:				
		Schätzung	Standardfehler	p-Wert	
	Interzept	1,4017	0,3688	1,56E-004	
	d	0,1344	0,0078	< 2E-016	
	h	-0,0558	0,0131	2,15E-005	
	bg	2,8553	0,4407	1,69E-010	
	R ² (adj.) = 0,718		Scale est. = 0,034138	n = 743	
	Zufallseffekte mit approximierten 95 % Konfidenzintervallen				
			unteres	Schätzung	oberes
	Level: Parzelle	sd(Interzept)	0,4806	0,9251	1,7808
	sd(d)	0,0173	0,0280	0,0453	
	cor(Interzept, d)	-0,9988	-0,9756	-0,6023	
Level: Aufnahme	sd(Interzept)	0,3448	0,4683	0,6361	
Varianzfunktion (Parameter mit 95 % Konfidenzintervall)					
		unteres	Schätzung	oberes	
	σ	0,1231	0,1848	0,2774	
	δ	0,5562	0,7740	0,9917	

12.3 Zuwachs

12.3.1 Referenzmodell

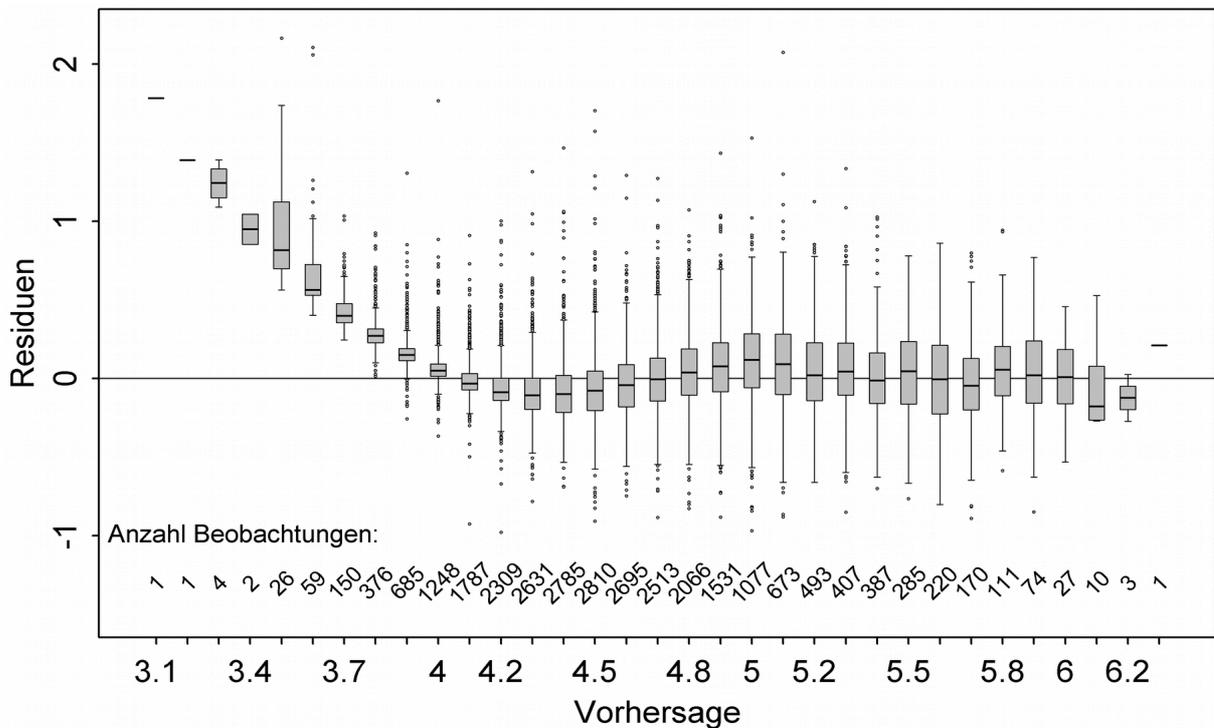


Abbildung 51: Residuen des neu parametrisierten und um Zufallseffekte erweiterten Zuwachsmodells aus BWINPro für die Baumart Buche (Residuen und Vorhersage auf Ebene des linearen Prädiktors)

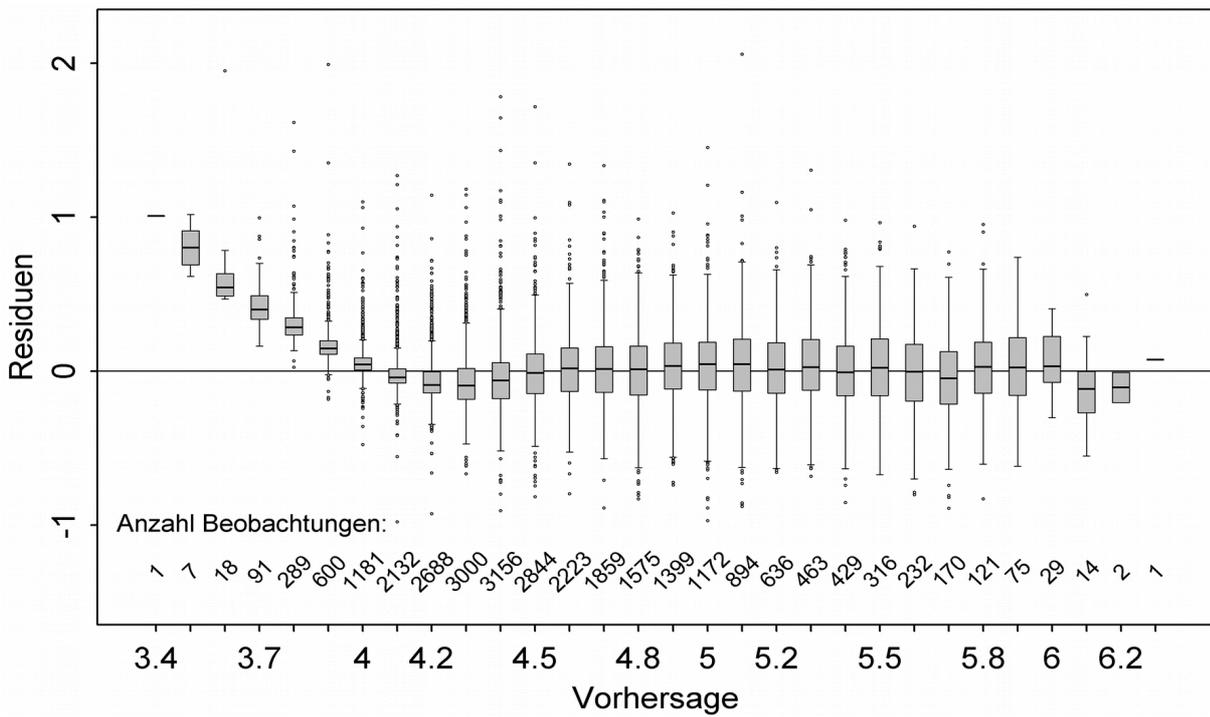


Abbildung 52: Residuen des Referenzmodells für die Baumart Buche (Residuen und Vorhersage auf Ebene des linearen Prädiktors)

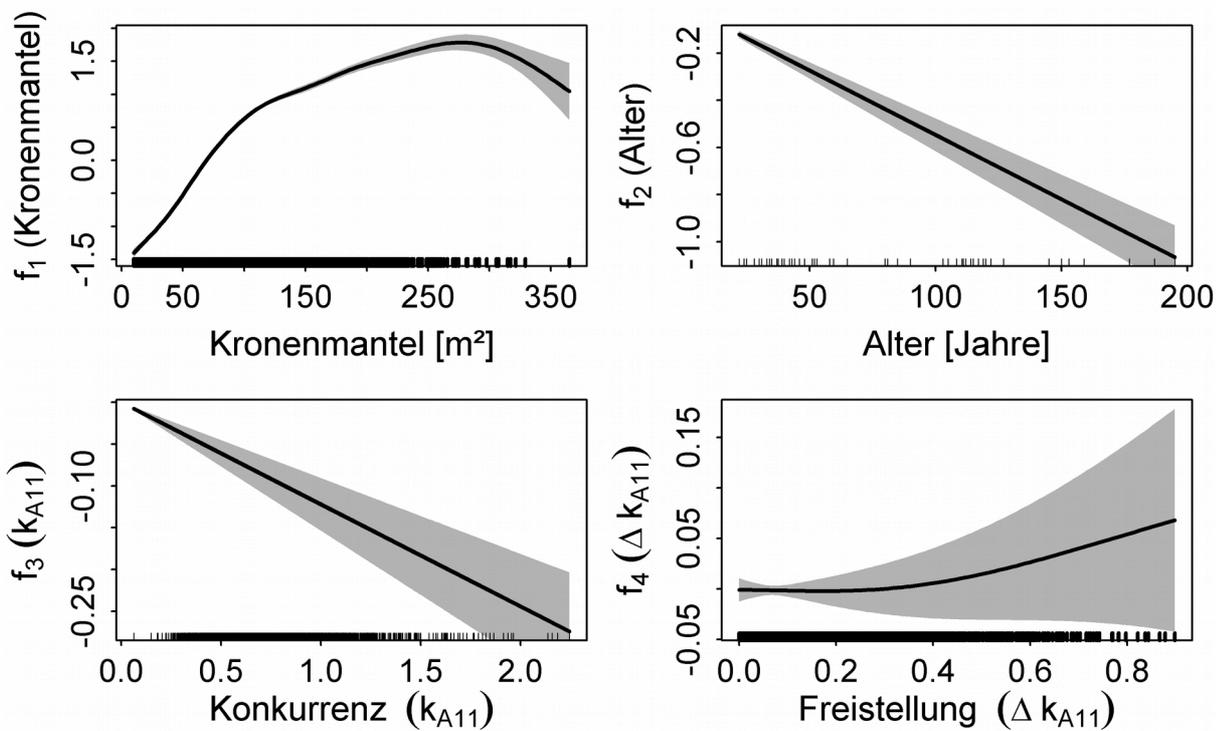


Abbildung 53: Effekte der erklärenden Variablen auf den Grundflächenzuwachs der Eichen

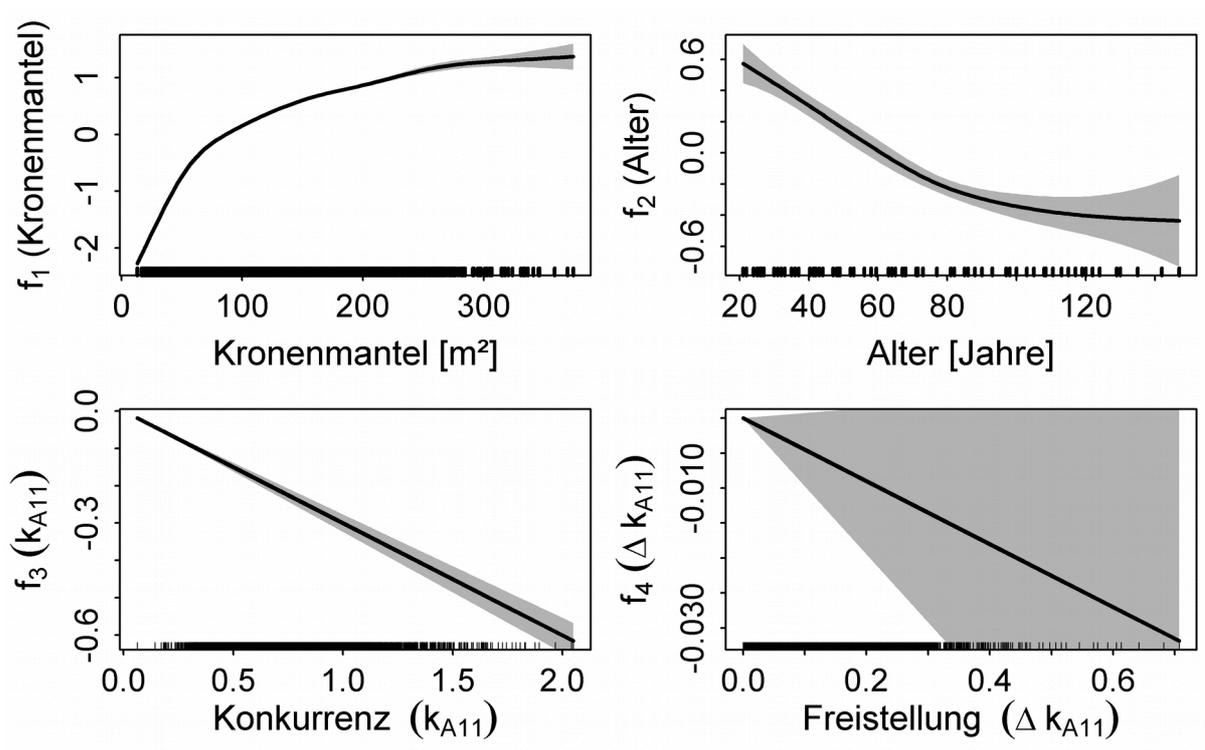


Abbildung 54: Effekte der erklärenden Variablen auf den Grundflächenzuwachs der Fichte

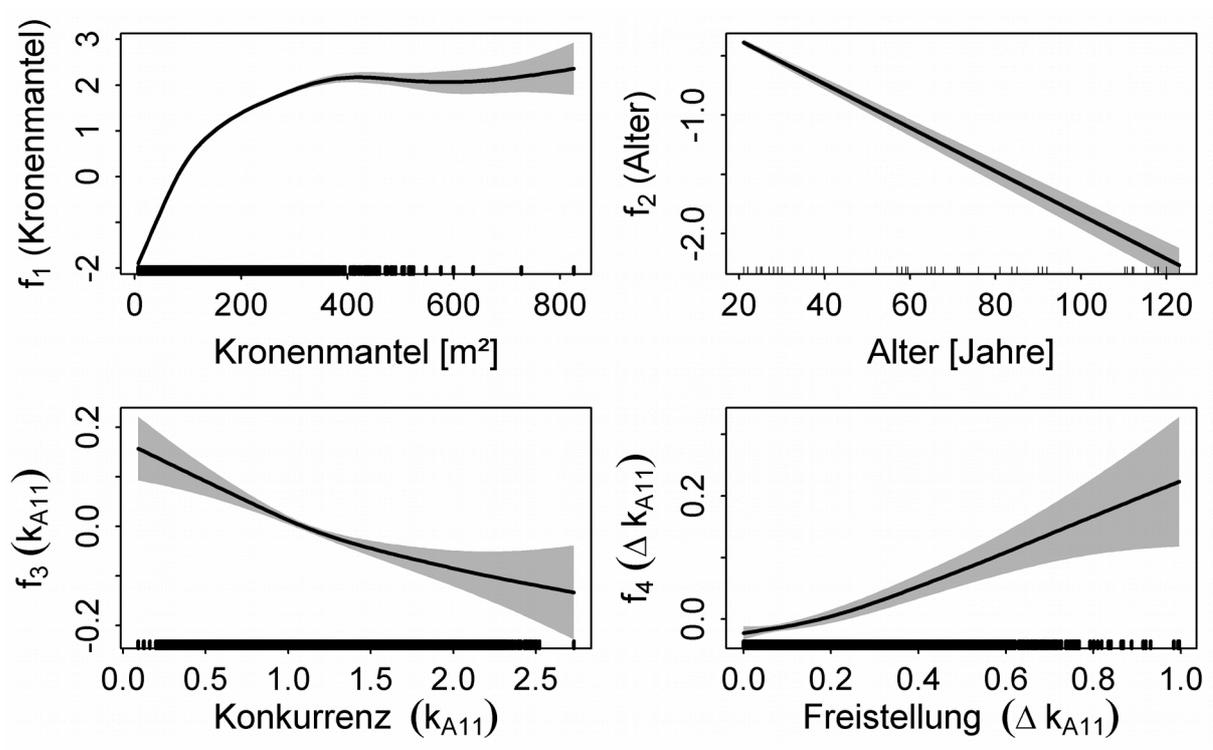


Abbildung 55: Effekte der erklärenden Variablen auf den Grundflächenzuwachs der Douglasie

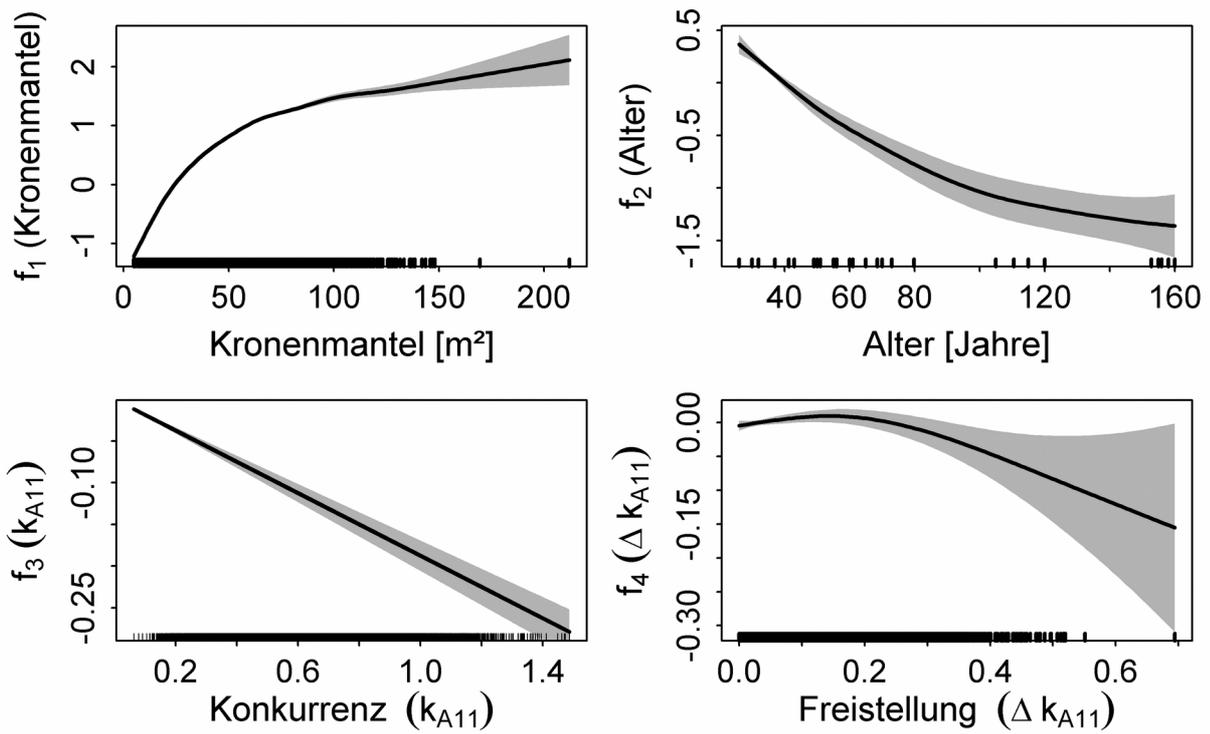


Abbildung 56: Effekte der erklärenden Variablen auf den Grundflächenzuwachs der Kiefer

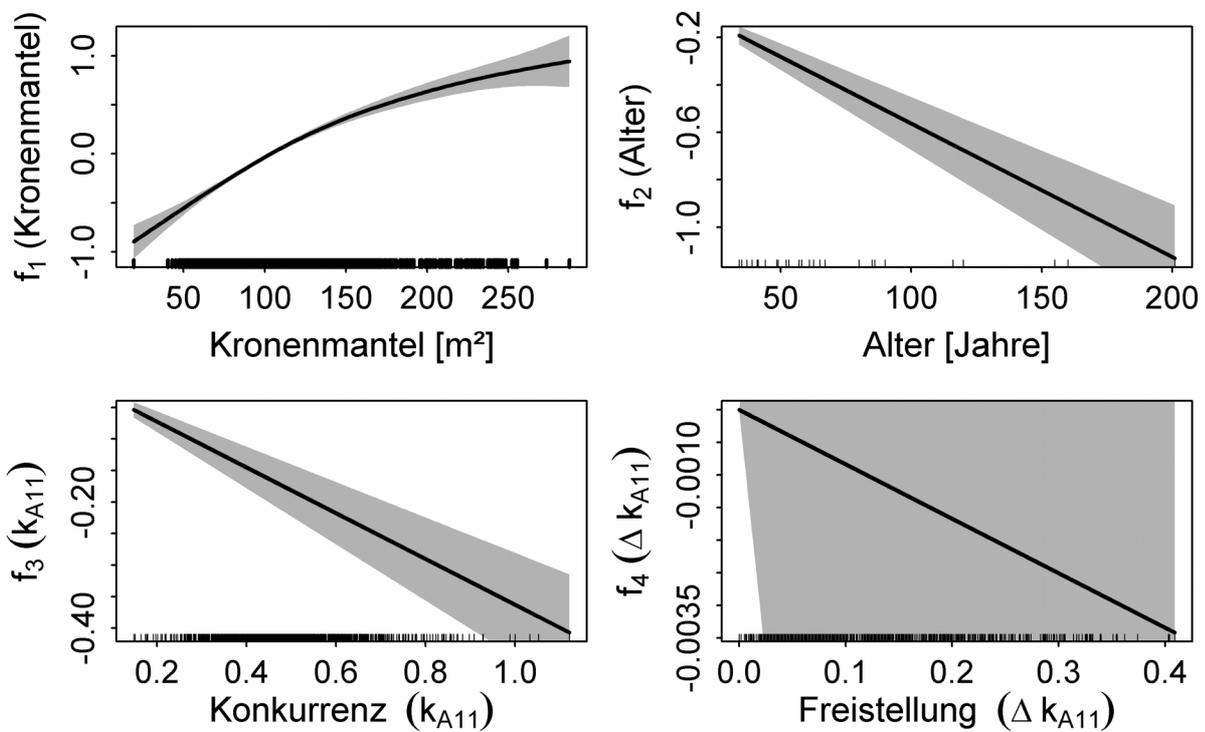


Abbildung 57: Effekte der erklärenden Variablen auf den Grundflächenzuwachs der Lärche

12.3.2 Baumartspezifische Modelle

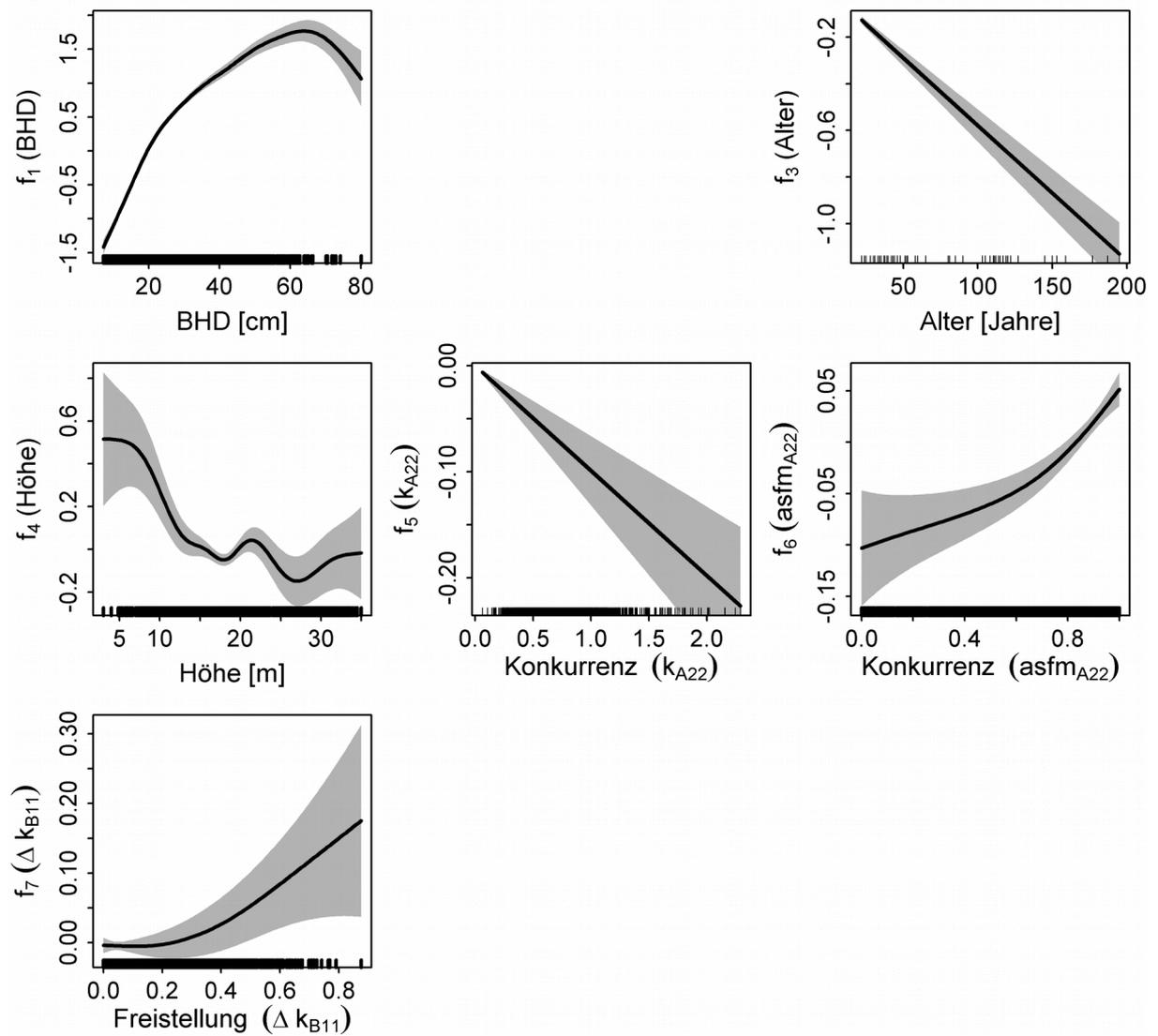


Abbildung 58: Effekte der erklärenden Variablen auf den Grundflächenzuwachs der Eichen

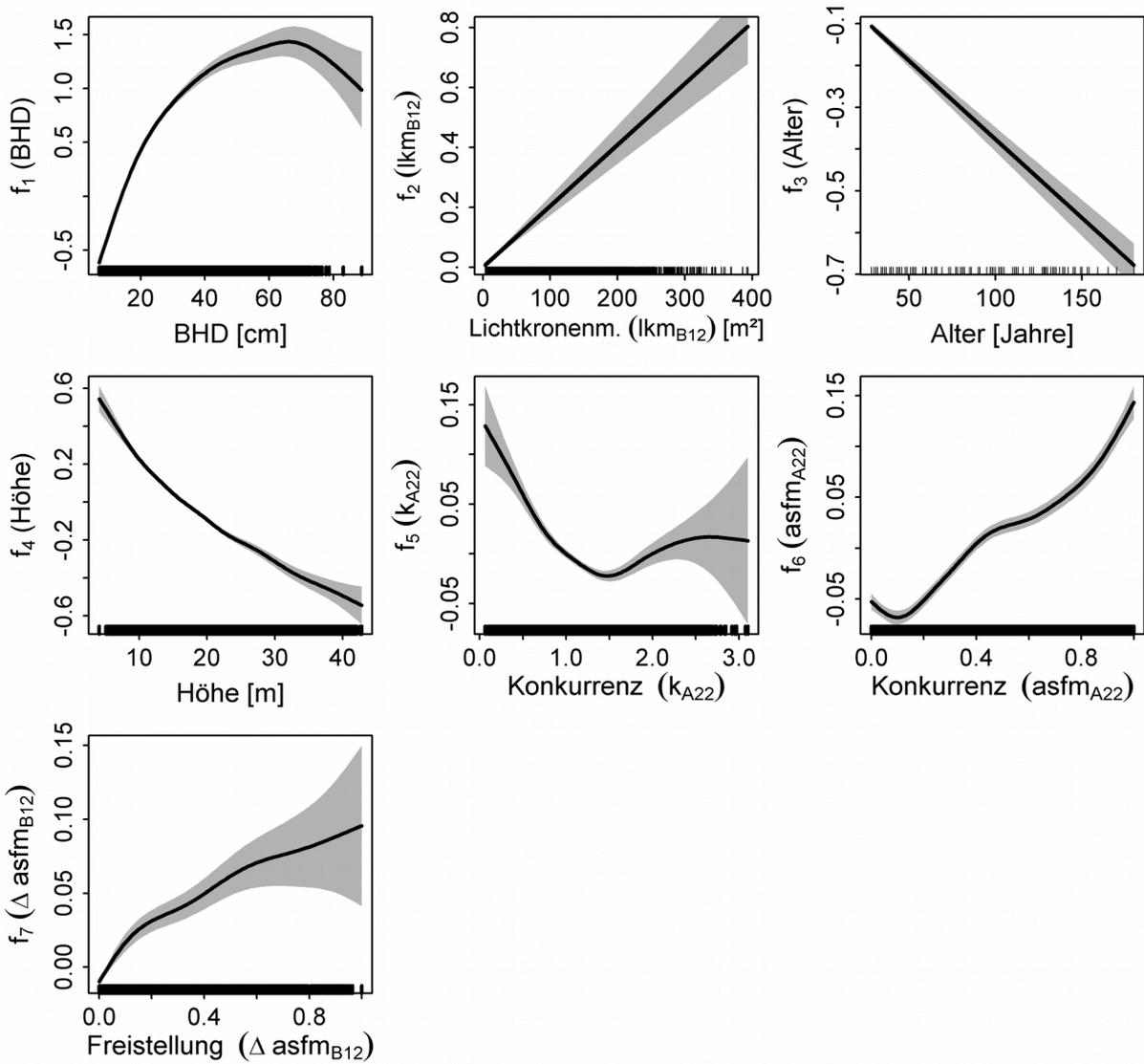


Abbildung 59: Effekte der erklärenden Variablen auf den Grundflächenzuwachs der Buche

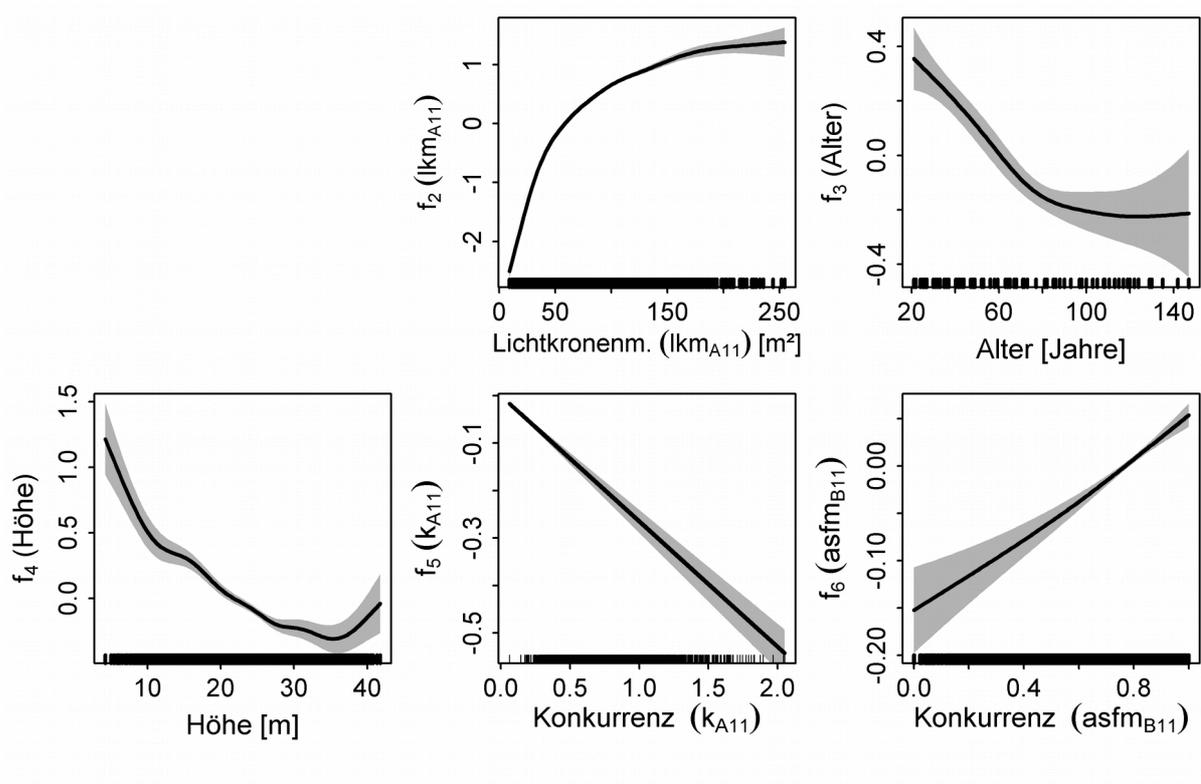


Abbildung 60: Effekte der erklärenden Variablen auf den Grundflächenzuwachs der Fichte

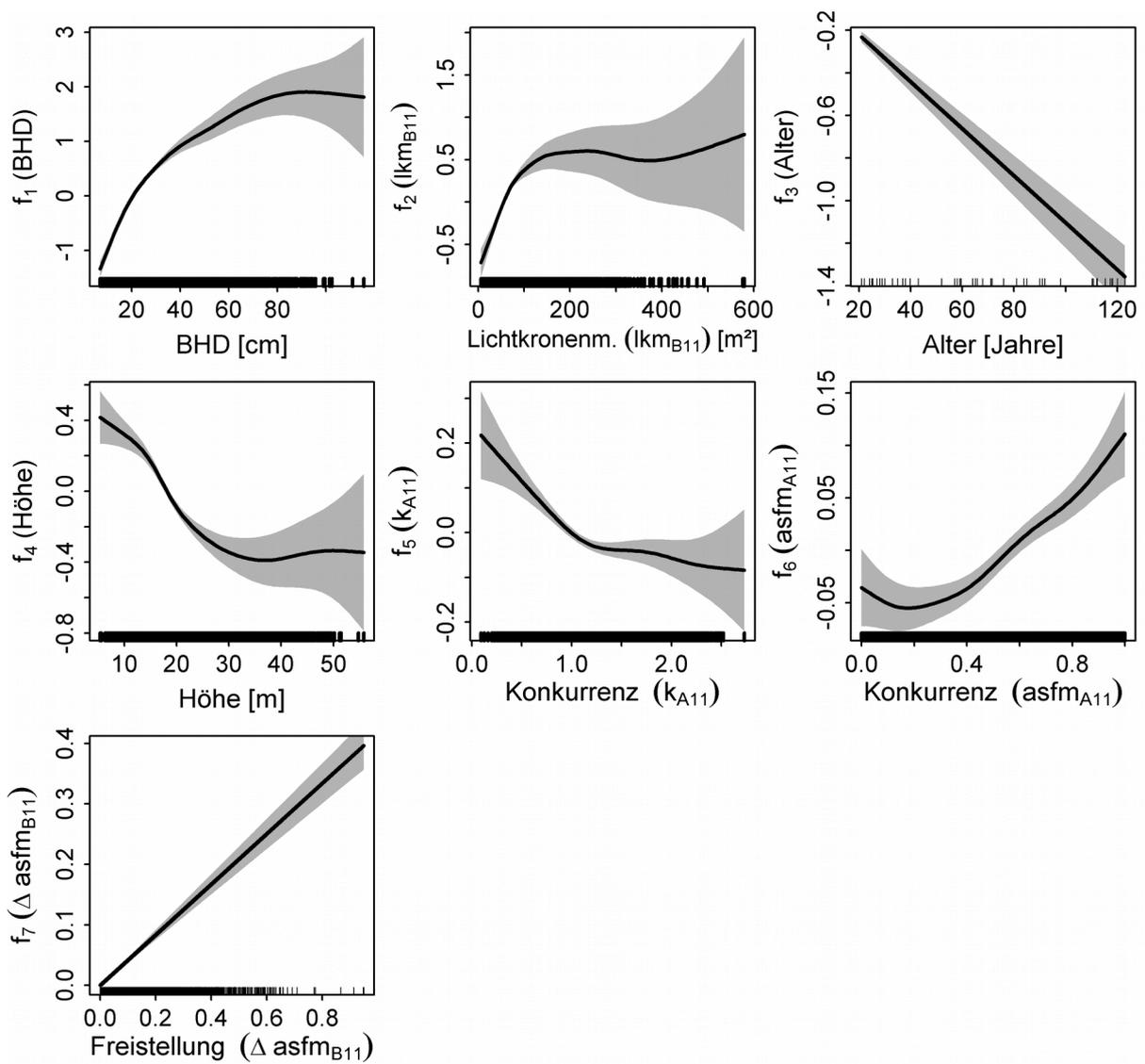


Abbildung 61: Effekte der erklärenden Variablen auf den Grundflächenzuwachs der Douglasie

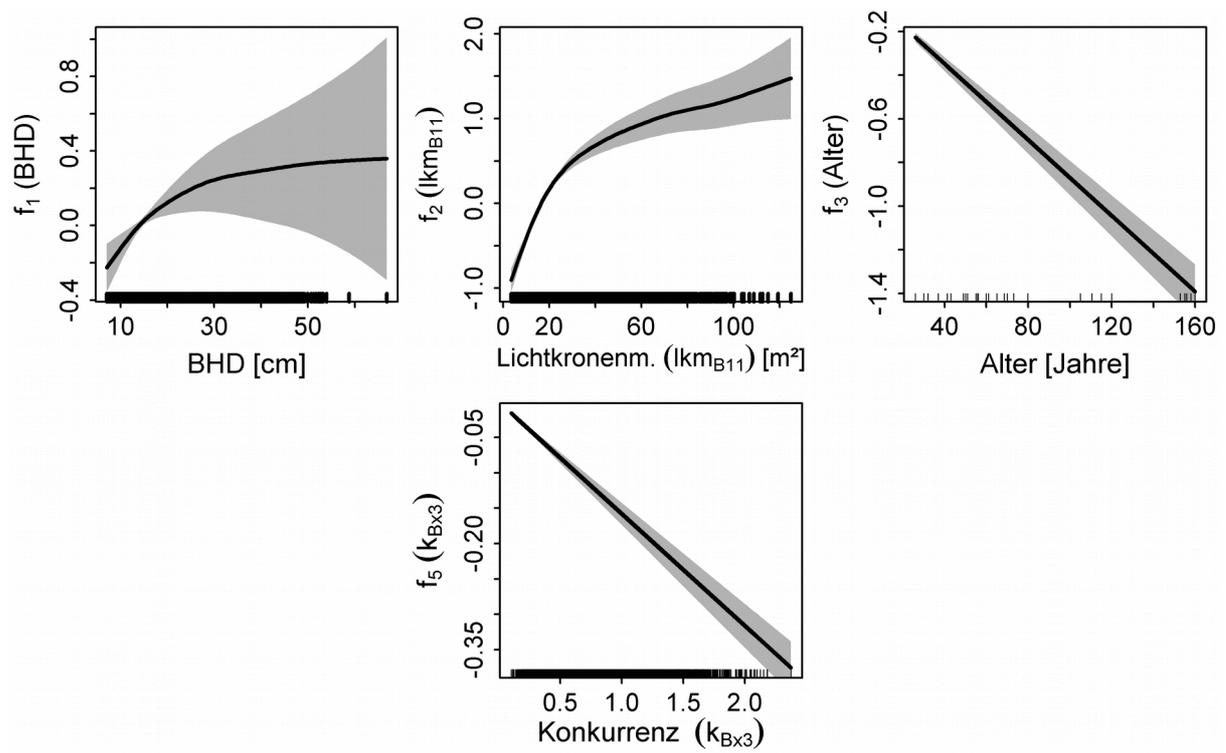


Abbildung 62: Effekte der erklärenden Variablen auf den Grundflächenzuwachs der Kiefer

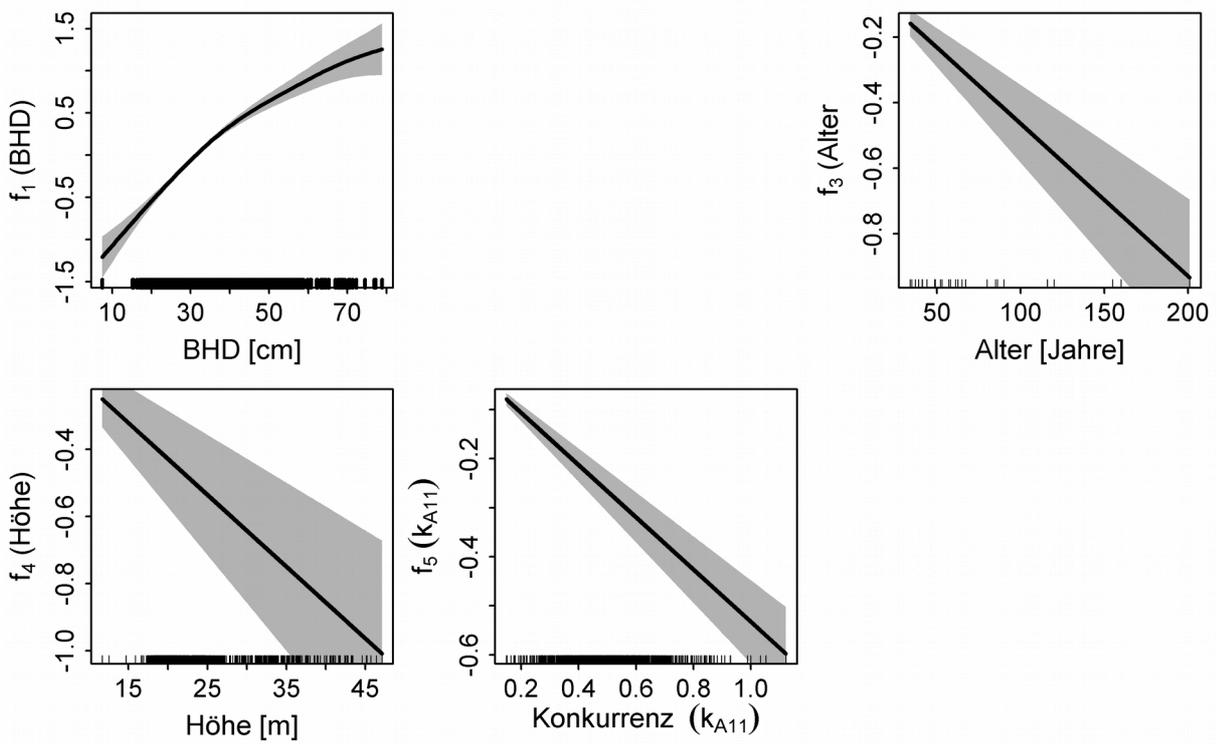


Abbildung 63: Effekte der erklärenden Variablen auf den Grundflächenzuwachs der Lärche