

## Modellierung von asymmetrischen Kronenformen als Voraussetzung für verbesserte Schätzungen des Dickenwachstums

Susanne Sprauer, Matthias Schmidt und Jürgen Nagel

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Abteilung Waldwachstum, Grätzelstraße 2, 37079 Göttingen

### Zusammenfassung

Die Modellierung des Dickenwachstums von Einzelbäumen erfolgt vielfach unter Berücksichtigung von Kronenparametern, die aufgrund des hohen Erhebungsaufwands in der Regel modellbasiert hergeleitet werden. Die unterstellten Kronenmodelle vereinfachen die in der Realität häufig auftretenden asymmetrischen Kronenformen stark. Im Rahmen dieses Beitrags wird ein Verfahren zur Konstruktion potentiell asymmetrischer Kronenformen vorgestellt. Die Validierung anhand von Kronenablötungen zeigt allerdings, dass die auf diese Weise konstruierten Kronen die Messwerte nicht besser beschreiben als Modelle, die runde Kronenformen unterstellen. Im zweiten Teil des Beitrags wird die Bedeutung potentiell asymmetrischer Kronenformen für die Prognose des Dickenzuwachs von Einzelbäumen dargestellt.

### Einleitung

Aus wachstumkundlicher Sicht ist die Modellierung der Baumkrone insbesondere für die Beschreibung des Einzelbaumzuwachses, von Astmerkmalen sowie zur Beschreibung der Konkurrenzsituation von Bedeutung. Dabei haben sich speziell für die Beschreibung der Konkurrenz Kronenparameter wie die Kronenmantelfläche gegenüber einfachen Dimensionsparametern wie dem BHD als überlegen erwiesen (BACHMANN 1998). So ermöglicht die Verwendung von Kronenparametern und die damit einhergehende Berücksichtigung artspezifischer Kronendimensionen bei sonst gleichen biometrischen Kenngrößen eine realistischere Beschreibung der Konkurrenz in Mischbeständen. Zahlreiche aus der Literatur bekannte Modelle zur Vorhersage des Einzelbaumwachstums nutzen daher Kronenparameter als Prädiktoren (HASENAUER 1994; MONSERUD & STERBA 1996; PRETZSCH 2002; NAGEL & SCHMIDT 2006).

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 unterstellt werden. Tatsächlich besitzen jedoch die meisten Bäume eine mehr oder weniger asymmetrische Krone. Auch treten häufig exzentrische Kronen auf, deren Schwerpunkt zum Teil deutlich von der Position des Stammfußpunktes abweicht.

Das Dickenwachstum von Bäumen wird vor allem durch drei Arten von Einflussgrößen bestimmt. Diese sind a) Parameter auf der Ebene des Standortes, die Witterung, Klima aber auch Bodeneigenschaften beschreiben, b) Zustandsgrößen des Einzelbaumes wie die Dimension oder das Alter sowie c) die Wuchskonstellation des Baumes innerhalb des Bestandes. Die Erfassung des Effektes der Wuchskonstellation auf den Zuwachs ist entscheidend für die Sensitivität des Modells gegenüber waldbaulichen Maßnahmen wie Durchforstungen oder die Wahl des Ausgangsverbandes. Sie ist somit die unabdingbare Voraussetzung für waldbauliche Szenariosimulationen.

Dieser Beitrag gliedert sich im Folgenden in zwei Teile. Zunächst wird ein Ansatz vorgestellt, der es ermöglicht umgebungssensitive und damit potentiell asymmetrische Modellkronen zu konstruieren. Dabei wird die Form der Kronenschirmfläche der Einzelbäume so aufgebaut, dass sich die Kronen unter Einhaltung bestimmter Grenzwerte möglichst wenig überlappen so dass die verfügbare Strahlungsmenge maximiert wird. Die resultierenden Kronenschirmflächen werden mit bisher verwendeten Modellkronen verglichen und anhand von Kronenablötungen ertragskundlicher Versuchsflächen validiert.

Der zweite Teil dieses Beitrags erläutert die Bedeutung potentiell asymmetrischer Modellkronen für die Zuwachsprognose. Mithilfe dieser Modellkronen ist es möglich, die Konkurrenzsituation von Einzelbäumen im Kronenraum individuell zu beschreiben und beispielsweise die schirmfreie Kronenmantelfläche der Modellkronen zu bestimmen. Es soll gezeigt werden, dass die individuell verfügbare Strahlungsmenge über den reinen Konkurrenzeffekt hinaus einen Einfluss auf das Dickenwachstum der Bäume hat.

### Material und Methoden

#### Kronenkonstruktion

Die Konstruktion von umgebungssensitiven potentiell asymmetrischen Modellkronen erfolgt bestandesweise. Für jeden Bestand wird mithilfe der BWinPro-Routine zur Generierung neuer Bestände (NAGEL 2009) ein Randstreifen generiert, der ähnliche Bestockungsverhältnisse wie die eigentliche Versuchsfläche aufweist, um Randeffekte auf die Form der konstruierten Kronenschirmflächen zu vermeiden. Die Grundlage bildet die mittlere Kronenbreite, die für jeden Baum des Bestandes mithilfe eines statistischen Modells (SPRAUER ET AL. 2011) geschätzt wird. Daraus ergibt sich die Größe der jeweiligen Kronenschirmfläche. Um extreme Kronenformen zu vermeiden werden Grenzwerte festgelegt, die die maximale Länge der Radien und die Asymmetrie der Kronen (Verhältnis des maximalen zum mittleren Kronenradius eines Baumes) beschränken. Als maximale Länge für einzelne Radien

dienen in der Literatur beschriebene Höchstwerte. Die Asymmetriegrenze basiert auf Kronenablotungen in jeweils acht Kardinalrichtungen von 243 Versuchspartzen (Tabelle 1).

**Tabelle 1:** Grenzwerte für Kronenradien

	Maximaler Kronenradius		Asymmetrie	
	Wert [m]	Quelle	99%-Quantil	Anzahl Messungen
Buche	30.2	UHL ET AL. 2006	2.61	8931
Eiche	29.3	UHL ET AL. 2006	2.62	2202
Fichte	16.2	HASENAUER 1997	2.07	1963
Kiefer	15.0	HASENAUER 1997	2.23	1122

In Anlehnung an PRETZSCH (1992, 2002) wird die Form der Lichtkrone eines Baumes mithilfe von acht paraboloiden Vertikalprofilen je Baum dargestellt. In einem iterativen Prozess wird für jeden Baum eines Bestandes eine Kronenform konstruiert, indem die acht Radien, die die Kronenschirmfläche aufspannen, schrittweise gestreckt werden:

1. Jeder Baum erhält zunächst ausgehend von der Baumposition und unter Berücksichtigung seiner Höhe und der Kronenansatzhöhe eine Minimalkrone aus acht gleichgroßen Radien deren Schirmfläche einen Bruchteil der individuellen Ziel-Kronenschirmfläche ausmacht.
2. Beginnend beim stärksten Baum erfolgt eine schrittweise Streckung jedes einzelnen Radius, wenn
3. die Kronenausdehnung nicht zu einer Kollision mit bereits vorhandenen Kronen führt,
4. die Kronenausdehnung nicht unterhalb (im Schatten) einer bereits vorhandenen Krone stattfindet,
5. die Ziel-Kronenschirmfläche noch nicht erreicht ist
6. und weitere Grenzen (maximaler Radius in jeder Richtung und ein maximaler Grad der Asymmetrie der Krone, siehe Tabelle 1) eingehalten werden.
7. Abschließend werden alle Radien proportional zu ihrer bereits erreichten Länge gestreckt bzw. gestaucht sodass die exakte Ziel-Kronenschirmfläche erreicht wird.

Ergebnis dieses Prozesses sind positions- und nachbarschaftssensitive Kronenformen. Diese können in Wachstumssimulationen nach einem ähnlichen Verfahren fortgeschrieben werden. Die Umsetzung des Konstruktionsverfahrens erfolgt auf der Basis des Java Software Pakets TreeGrOSS (NAGEL 2009).

Zur Validierung des beschriebenen Verfahrens dienen Kronenablotungen von 8383 Bäumen verschiedener Baumarten in jeweils acht Kardinalrichtungen von 102 Versuchflächen mit vollständig erhobenen Einzelbaumpositionen. Aus den abgeloteten Kronenradien werden mittels kubischer Splines glatte Kronenumrisse erstellt. Die Fläche dieser Kronenumrisse wird als gemessene Kronenschirmfläche bezeichnet. Es wird für jeden Baum der Anteil der gemessenen Kronenschirmfläche berechnet, der sich mit der konstruierten Kronenschirmfläche überschneidet. Als Vergleichsmaßstab dienen jeweils gleich große runde Kronen, für die ebenfalls der deckungsgleiche Anteil der gemessenen Kronenschirmfläche berechnet wird.

### Zuwachs

Die Untersuchung des Einflusses der Kronenraumsituation auf den Einzelbaumzuwachs erfolgt am Beispiel der Baumart Buche. Dafür stehen 27623 beobachtete Zuwächse von 97 Versuchspartzen mit vollständigen Einzelbaumpositionen zur Verfügung, wobei von den meisten Partzen zwischen ein und drei Zuwachsperioden (vier bis sechs Jahre) berücksichtigt werden. Das Datenkollektiv umfasst ein breites Spektrum von Baumdimensionen mit Brusthöhendurchmessern (BHD) von 7,1 bis 88,8 cm. Das Alter variiert zwischen 28 und 180 Jahren. Die Verhältnisse im Kronenraum werden abstrahierend durch den Kronenkonkurrenzindex  $c66xy$  charakterisiert. Dieser ergibt sich aus der Summe der Kronenquerschnittsflächen aller Bäume innerhalb einer Einflusszone (Kreis mit Radius doppelter Kronenbreite) um den Bezugsbaum in einer Höhe von 66% der Kronenlänge des Bezugsbaumes. Der Freistellungsindex eines Baumes  $\Delta c66xy$  errechnet sich aus der Veränderung des Kronenkonkurrenzindex zu Beginn einer Zuwachsperiode durch die Entnahme von Bäumen innerhalb der Einflusszone. Das Datenmaterial deckt ein breites Spektrum von Konkurrenzsituationen und Freistellungsintensitäten ab (Tabelle 2).

**Tabelle 2:** Kennzahlen der Modellparameter

	Mittelwert (Extreme)
BHD [cm]	15,91 (7,10 – 88,80)
Alter [Jahre]	55,40 (28 – 180)
Kronenmantelfläche [m <sup>2</sup> ]	81,25 (12,94 – 703,40)
Konkurrenzindex c66xy	1,26 (0,06 – 3,11)
Freistellungsindex Δc66xy	0,15 (0 – 1,91)

Die Grundlage für die Beschreibung des Einzelbaum-Grundflächenzuwachses bildet das derzeit verwendete Zuwachsimmodell des Wachstumssimulators BWinPro (NAGEL 2009) erweitert um Zufallseffekte auf Parzellen- und Aufnahmeebene. Es beschreibt den Grundflächenzuwachs in Abhängigkeit von der Kronenmantelfläche, dem Alter, dem Kronenkonkurrenzindex, dem Freistellungsindex sowie Zufallseffekten auf Parzellen- und Aufnahmeebene. Die Zufallseffekte auf Parzellenebene berücksichtigen zusammenfassend alle parzellenbezogenen Einflussgrößen (Standort, Klima usw.).

$$\log(E[ig_{ijk}]) = \beta_0 + \beta_1 \log(km_{ijk}) + \beta_2 \log(alt_{ijk}) + \beta_3 konk_{ijk} + \beta_4 frei_{ijk} + a_i + a_{ij}, \quad [1]$$

$$\text{mit } ig_{ijk} \sim \text{Gamma} \text{ und } a = (a_i, a_{ij}) \sim N(0, G)$$

$ig_{ijk}$	Grundflächenzuwachs des Baumes $k$ der Parzelle $i$ zum Aufnahmezeitpunkt $j$
$\beta_0 \dots \beta_4$	Modellkoeffizienten
$km_{ijk}$	Kronenmantelfläche des Baumes $k$ der Parzelle $i$ zum Aufnahmezeitpunkt $j$
$alt_{ijk}$	Alter des Baumes $k$ der Parzelle $i$ zum Aufnahmezeitpunkt $j$
$konk_{ijk}$	Kronenkonkurrenzindex des Baumes $k$ der Parzelle $i$ zum Aufnahmezeitpunkt $j$
$frei_{ijk}$	Freistellungsindex des Baumes $k$ der Parzelle $i$ zum Aufnahmezeitpunkt $j$
$a_i, a_{ij}$	Zufallseffekt der Parzelle $i$ , Zufallseffekt der Parzelle $i$ zum Aufnahmezeitpunkt $j$
$G$	Positiv-definite Kovarianzmatrix

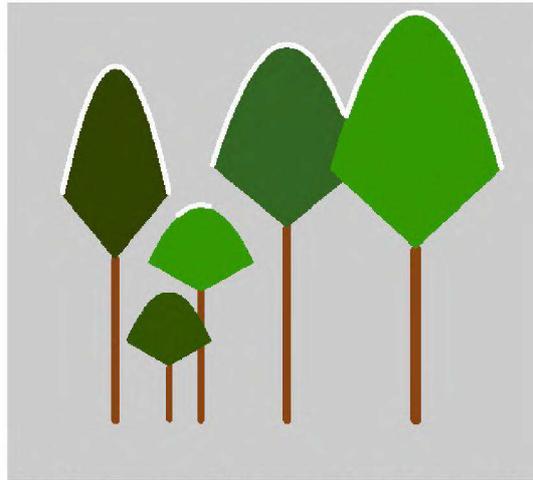
Die Neuparametrisierung dieses Modells anhand von Daten mit vollständig eingemessenen Einzelbaumpositionen ermöglicht eine verbesserte Einschätzung der individuellen Konkurrenzsituation gegenüber der bisherigen Parametrisierung, für die die Konkurrenzsituation aufgrund fehlender Einzelbaumpositionen positionsunabhängig berechnet wurde.

Die Analyse des neu angepassten Modells zeigt Probleme bei der Erwartungstreue (s. Ergebnisse), 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:

$$\log(E[y_{ijk}]) = \beta_0 + f_1(x_{1_{jk}}) + \dots + f_n(x_{n_{jk}}) + a_i + a_{ij}, \quad [2]$$

$$\text{mit } y_{ijk} \sim \text{Gamma} \text{ und } a = (a_i, a_{ij}) \sim N(0, G)$$

$y_{ijk}$	Zielgröße des Modells am Baum $k$ der Parzelle $i$ zum Aufnahmezeitpunkt $j$
$\beta_0$	globales Interzept
$x_{1_{jk}} \dots x_{n_{jk}}$	erklärende Variablen
$f_1(\cdot) \dots f_n(\cdot)$	glättende Funktionen, die als penalisierte „thin plate“-Regressionssplines spezifiziert werden
$a_i, a_{ij}$	Zufallseffekte der Parzelle $i$ bzw. der Aufnahme $j$ innerhalb der Parzelle $i$
$G$	Positiv-definite Kovarianzmatrix



**Abbildung 1:** Schirmfreier Anteil der Kronenmantelfläche (weiß markiert) - schematische Darstellung.

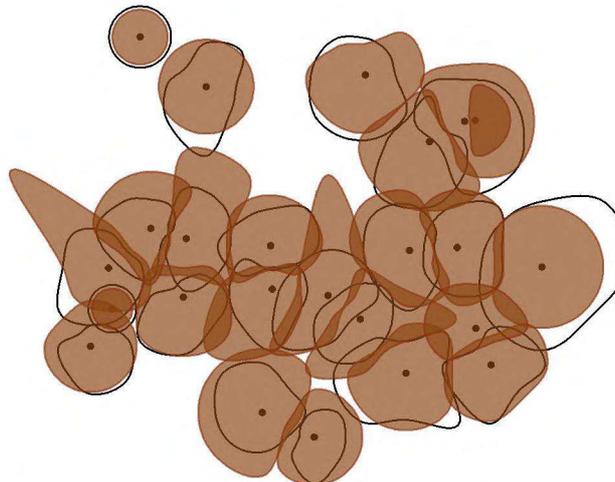
Neben den bereits genannten Prädiktoren (Formel 1) werden zusätzlich der BHD, die Baumhöhe sowie der mithilfe der Modellkronen berechnete schirmfreie Anteil der Kronenmantelfläche (Fehler: Referenz nicht gefunden) getestet. Aufgrund der Ergebnisse der Validierung der asymmetrisch modellierten Kronen werden für die Bestimmung der schirmfreien Anteile der Kronenmantelfläche runde Modellkronen verwendet.

Datenverarbeitung und Modellbildung erfolgen unter Verwendung des Statistikpakets *R* (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2009) sowie der Bibliotheken *mgcv* (WOOD 2006), *nlme* (PINHEIRO ET AL. 2010) und *MASS* (VENABLES & RIPLEY 2002).

## Ergebnisse

### Kronenkonstruktion

Das Verfahren erzeugt unter Berücksichtigung der Nachbarschaftsverhältnisse für jeden Baum eines Bestandes eine Kronenschirmfläche. Abbildung 2 stellt die Ergebnisse beispielhaft für einen 153jährigen Buchenbestand dar und zeigt die Orientierung der Kronenformen an den Nachbarkronen: In Richtung von Nachbarn mit geringer Distanz weisen die Kronen deutlich geringere Radien auf als in Bereichen, in denen die Distanz zum nächsten Nachbarn größer ist.



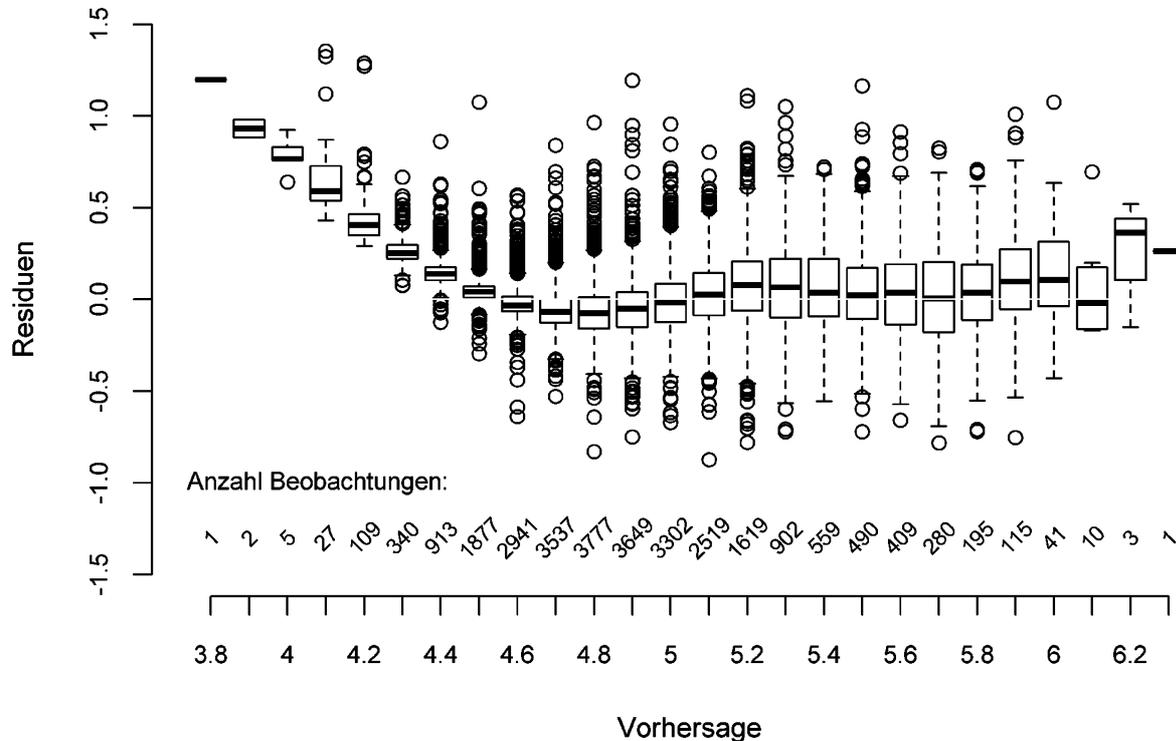
**Abbildung 2:** Unter Berücksichtigung der Wuchskonstellation konstruierte Kronenschirmflächen am Beispiel eines 153jährigen Buchenbestandes im Vergleich zu gemessenen Kronenschirmflächen (schwarze Umrisse)

Der Vergleich der konstruierten Kronenschirmflächen mit Schirmflächen aus Kronenablotungen ergibt im Mittel eine Übereinstimmung der Schirmflächen von 70 %. Runde Kronen decken dagegen rund 72 % der gemessenen Kronenschirmfläche ab. Es zeigt sich insbesondere, dass der Anteil runder oder annähernd runder Kronen durch das Konstruktionsverfahren unterschätzt wird.

### Zuwachs

Die Ergebnisse der Neuparametrisierung des Ausgangsmodells (Wachstumssimulator BWinPro, Formel [1]) zeigen Probleme bei der Anpassung des Modells. Im Bereich geringer Modellvorhersagewerte ( $\log(E[ig_{jk}]) < 4,6$ ) wird der

Grundflächenzuwachs unterschätzt, für mittlere Modellvorhersagewerte zeigt sich eine leichte Überschätzung, während für hohe Modellvorhersagewerte ( $\log(E[ig_{ijk}]) > 5$ ) erneut eine leichte Unterschätzung zu verzeichnen ist. Die hohen Abweichungen im Bereich sehr geringer und sehr hoher Vorhersagewerte basieren jeweils auf sehr wenigen Messungen und sollten daher nicht überbewertet werden (Abbildung 3). Das Modell erreicht ohne Berücksichtigung der Zufallseffekte einen korrigierten  $r^2$ -Wert von 0,65. Umgerechnet auf den jährlichen Radialzuwachs ist das Gesamtmodell mit einem Fehler von 1,08 mm ohne Zufallseffekte bzw. 0,9 mm mit Zufallseffekten behaftet.



**Abbildung 3:** Residuen des neuparametrierten des BWinPro-Modells (Residuen und Vorhersage auf Ebene des linearen Prädiktors)

Für das Alternativmodell (Formel [3]) werden wie im BWinPro-Modell das Alter, sowie Kronenkonkurrenz- und Freistellungsindex des Baumes als erklärende Variable verwendet. Als Dimensionsgröße geht als vergleichsweise einfach zu messende Größe der BHD anstelle der Kronenmantelfläche ein. Zusätzlich wird die Baumhöhe sowie der schirmfreie Anteil der Kronenmantelfläche berücksichtigt. Das resultierende Modell lässt sich wie folgt beschreiben:

$$\log(E[ig_{ijk}]) = \beta_0 + f_1(BHD_{ijk}) + \beta_2 alt_{ijk} + f_3(h_{ijk}) + z_4 \beta_4 konk_{ijk} + z_5 \beta_5 sfk_{ijk} + \beta_6 frei_{ijk} + a_i + a_{ij} \quad [3]$$

mit  $ig_{ijk} \sim \text{Gamma}$  und  $a = (a_i, a_{ij}) \sim N(0, G)$

$ig_{ijk}$  Grundflächenzuwachs des Baumes  $k$  der Parzelle  $i$  zum Aufnahmezeitpunkt  $j$

$BHD_{ijk}$ ,  $alt_{ijk}$ ,  $h_{ijk}$ , erklärende Variablen: BHD, Alter, Baumhöhe, Kronenkonkurrenzindex,  
 $konk_{ijk}$ ,  $sfk_{ijk}$ ,  $frei_{ijk}$  Anteil schirmfreier Kronenmantelfläche, Freistellungsindex des Baumes  $k$  der Parzelle  $i$  zum Aufnahmezeitpunkt  $j$

$\beta_0, \beta_4, \beta_5$  Modellparameter

$f_1(\cdot), f_3(\cdot)$  glättende Funktionen, die als penalisierte „thin plate“-Regressionssplines spezifiziert werden

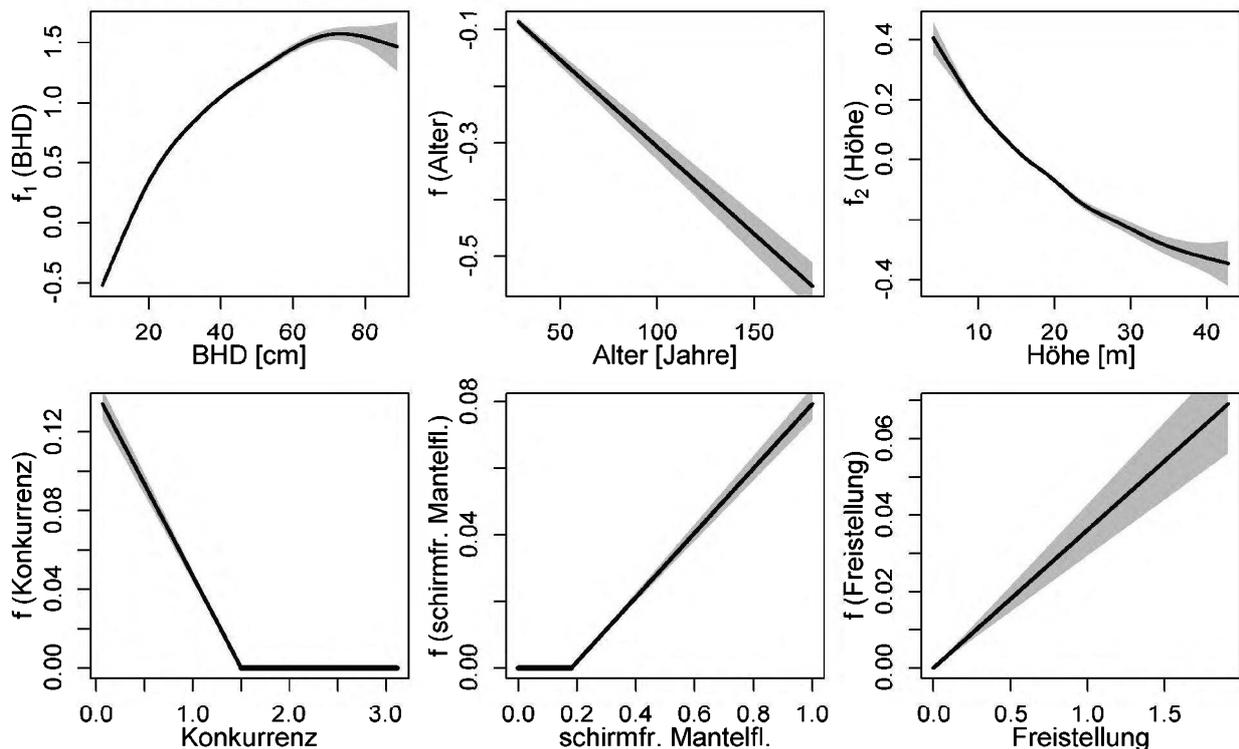
$$z_4 = \begin{cases} 1, & \text{wenn } konk_{ijk} \leq 1,5 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$z_5 = \begin{cases} 1, & \text{wenn } sfk_{ijk} \geq 0,18 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$a_i, a_j$  Zufallseffekte der Parzelle  $i$  bzw. der Aufnahme  $j$  innerhalb der Parzelle  $i$

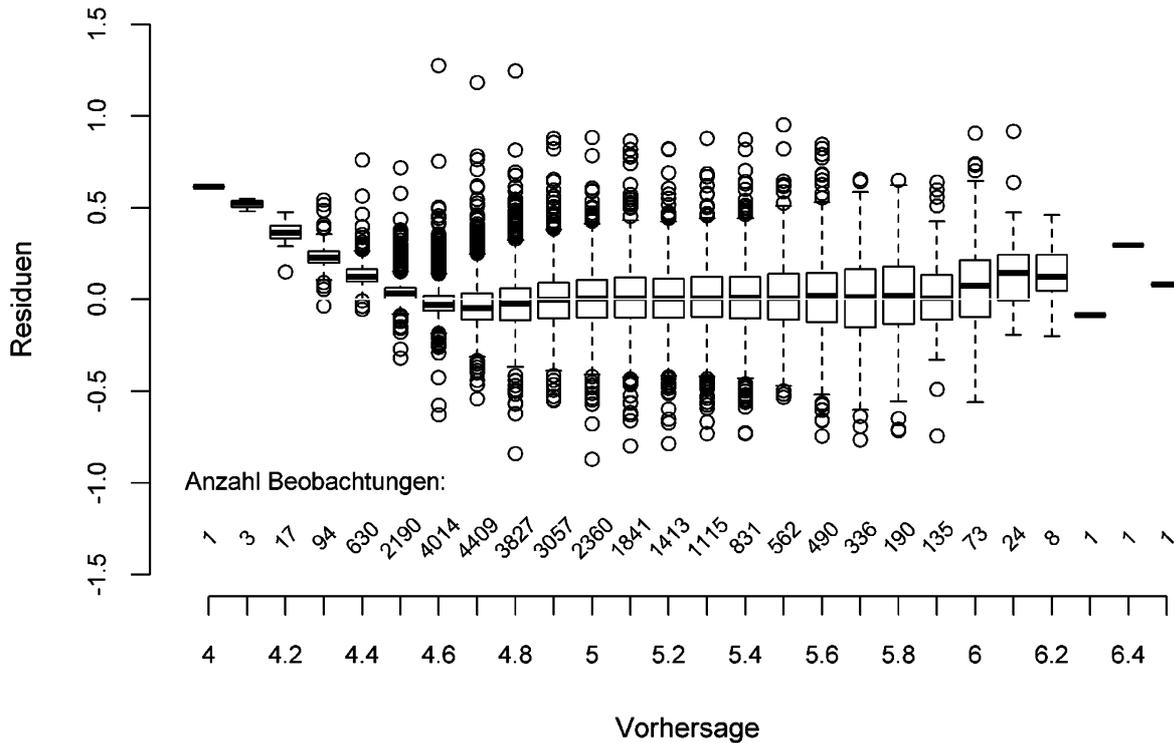
$G$  Positiv-definite Kovarianzmatrix

Die Effekte des Alters und des Freistellungsindex sind linear. Die übrigen festen Effekte sind nicht-linear, wobei die Effekte des Kronenkonkurrenzindex und des schirmfreien Anteils der Kronenmantelfläche in einem weiteren Modellierungsschritt durch segmentierte Funktionen approximiert werden. Alle festen Effekte sind hochsignifikant ( $p < 0,001$ ) und zeigen einen biologisch plausiblen Verlauf. Abbildung 4 zeigt ceteris paribus die einzelnen Effekte. Mit steigendem BHD nimmt der Grundflächenzuwachs zu. Gleichzeitig sinkt der Grundflächenzuwachs eines Baumes bei gegebenem Durchmesser mit dem Alter. Je länger ein Baum also gebraucht hat um einen bestimmten BHD zu erreichen, desto geringer ist der vorhergesagte Zuwachs. Auch die Höhe hat – bei gegebenem BHD und Alter – einen negativen Einfluss auf den Grundflächenzuwachs: schlanke Bäume lassen einen geringeren Grundflächenzuwachs erwarten als solche mit geringerem hd-Verhältnis. Im Vergleich zum BHD-Effekt haben Alters- und Höheneffekt 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. Der Verlauf des Konkurrenzeffekts deutet darauf hin, dass der Grundflächenzuwachs bis zu Konkurrenzintensitäten von einer 1,5-fachen Überschirmung der Fläche abnimmt. Noch höhere Konkurrenzindizes verringern den Zuwachs nicht weiter. Das Modell beschreibt eine lineare Zunahme des Grundflächenzuwachses mit steigendem schirmfreiem Kronenmantelanteil ab einem Wert von 0,18. Die Freistellung eines Baumes hat einen positiven Effekt auf den Grundflächenzuwachs. Die Zufallseffekte auf Parzellen- und Aufnahmeebene sind ebenfalls signifikant. Insgesamt erreicht das Modell ohne Berücksichtigung der Zufallseffekte einen korrigierten  $r^2$ -Wert von 0,70. Der auf den jährlichen Radialzuwachs umgerechnete Fehler des Modells beträgt ohne Zufallseffekte 0,9 mm bzw. 0,77 mm bei zusätzlicher Berücksichtigung der Zufallseffekte. Gegenüber dem Vergleichsmodell bedeutet dies eine Verringerung des Fehlers um 0,18 bzw. 0,2 mm.



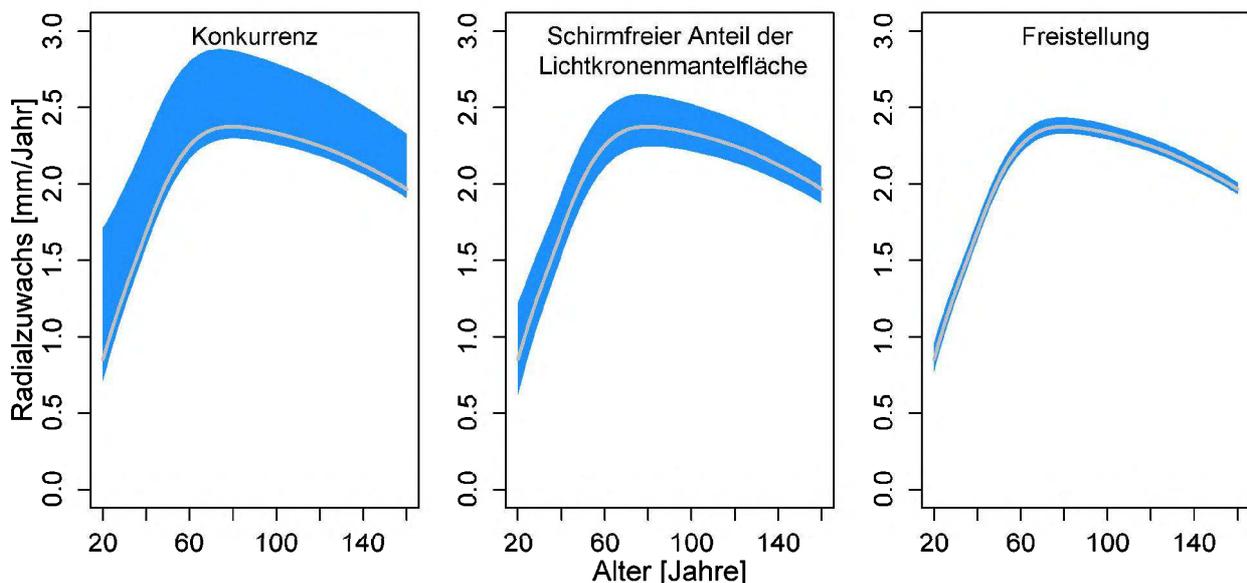
**Abbildung 4:** Effekte der Prädiktoren auf den Grundflächenzuwachs

Auch die Residuen des Modells zeigen eine deutliche Verbesserung gegenüber dem neuparametrisierten Modell aus BWinPro (Formel [1]) (Abbildung 5). Außer im Bereich extremer Vorhersagewerte mit geringer Datenbesetzung zeigt das Modell sehr geringe Abweichungen von den gemessenen Werten und ist somit nahezu unverzerrt.



**Abbildung 5:** Residuen des Alternativmodells (GAMM) (Residuen und Vorhersage auf Ebene des linearen Prädiktors)

In Abbildung 6 wird die Sensitivität des Modells im Hinblick auf Änderungen der kronenbezogenen Parameter demonstriert. Die Grundlage sind mittlere Werte von Durchmesser und Höhe als Funktion des Alters, sowie mittlere Werte für Konkurrenz (1,3), den schirmfreien Anteil der Kronenmantelfläche (0,5) und eine Freistellung um 0,3. Ausgehend von diesen „mittleren“ Verhältnissen wurde 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 2, der schirmfreie Anteil der Kronenmantelfläche zwischen 0 und 1 und für den Freistellungsindex werden Werte zwischen 0 und 1 untersucht. In Abhängigkeit vom Alter zeigt das Modell konkurrenzbedingte Unterschiede des Radialzuwachs von bis zu 0,6 mm/Jahr. Der schirmfreie Anteil der Kronenmantelfläche modifiziert den vorhergesagten jährlichen Radialzuwachs um bis zu 0,3 mm und der Freistellungsindex verursacht Unterschiede von bis zu 0,1 mm/Jahr.



**Abbildung 6:** Sensitivitätsanalyse der Modellschätzungen des Alternativmodells (GAMM) in Bezug auf die kronenbezogenen Prädiktoren

## Diskussion

### Kronenkonstruktion

Die Form der Kronen und ihre räumliche Anordnung spielen eine wichtige Rolle für die Lichtaufnahme und die Photosyntheseleistung eines Baumes. Eine vor diesem Hintergrund optimale Kronenanordnung und Ausformung impliziert möglichst geringe Überlappungen der Kronen. Dies kann bei gegebenen Baumpositionen durch asymmetrische Kronenformen erreicht werden. Zahlreiche Studien bestätigen diesen Zusammenhang zwischen der horizontalen Ausformung und Positionierung der Krone einerseits und der Konkurrenzsituation eines Baumes andererseits (z.B. MITSCHERLICH 1970). So stellte BRISSON (2001) fest, dass konkurrenzfrei erwachsene Zuckerahorne (*Acer saccharum* Marsh.) symmetrischere Kronenschirmflächen aufweisen als vergleichbare Bestandesbäume. An Individuen am Bestandesrand wurden noch stärker asymmetrisch ausgeprägte Kronen gefunden. Die Richtung der Abweichung des Schwerpunktes der Kronenprojektionsfläche vom Stammfußpunkt zeigte einen deutlichen Zusammenhang mit der Richtung der Konkurrenzeinwirkung auf den Bezugsbaum (BRISSON 2001). Ähnliche Ergebnisse lieferten Untersuchungen in kühl-gemäßigten Hartholzwäldern in Japan (UMEKI 1995) sowie in einem Laubmischwald in Massachusetts (USA) (MUTH & BAZZAZ 2003). Andere Untersuchungen stellen umgekehrt einen positiven Zusammenhang zwischen der Richtung der Kronenverlagerung und der Richtung von Bestandeslücken fest (YOUNG & HUBBELL 1991; MUTH & BAZZAZ 2002). Andere Autoren konnten zeigen, dass neben der Konkurrenz um Licht auch eine gegenseitige mechanische Beeinträchtigung die Kronenformen prägt (MENG ET AL. 2006).

Die konstruierten potentiell asymmetrischen Kronenschirmflächen zeigen erwartungsgemäß geringe Überlappungen mit Nachbarkronen und erhöhen gegenüber runden Modellkronen im Mittel den schirmfreien Anteil der Kronenmantelfläche. Überlappungen in Kronenrandbereichen können auch bei tatsächlich überlappungsfreien Kronen durch die Projektion in die Ebene entstehen. Durch die Glättung der Kronenumrisse kommen in geringem Umfang auch tatsächliche Überlappungen im Raum zustande.

Im Vergleich zur Annahme runder Kronen zeigen die konstruierten potentiell asymmetrischen Kronen eine geringere Übereinstimmung mit gemessenen Werten, sodass sie im Vergleich mit runden Kronen als weniger gute Approximationen beurteilt werden müssen. Das Verfahren basiert auf der Ausbildung der Kronenformen in Abhängigkeit von Nachbarkronen. Dabei konnten nur im Bestand verbleibende und seit der vorangegangenen Aufnahme (Aufnahmeintervall zwischen 4 und 6 Jahre) ausgeschiedene Nachbarn berücksichtigt werden. Dennoch ist davon auszugehen, dass auch früher ausgeschiedene Nachbarn, insbesondere große Nachbarn in geringem Abstand, die richtungsspezifische Ausdehnung der Krone längerfristig beeinflusst haben. Darüber hinaus berücksichtigt das Verfahren andere Faktoren, die ebenfalls mit der horizontalen Kronenausformung in Verbindung gebracht werden nicht. Dazu gehören die Hangneigung (z.B. UMEKI 1995) und die Richtung der Sonneneinstrahlung (z.B. GUERICKE 2001). 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. Dazu zählen biomechanische (Stabilität, Wind), hydraulische und entwicklungsbedingte Beschränkungen sowie die Funktion in Bezug auf Konkurrenzfähigkeit und Reproduktion (PEARCY ET AL. 2005).

Unabhängig von der Eignung des vorgestellten Verfahrens zur Beschreibung gemessener Kronenformen, eröffnet es die Möglichkeit Kronenformen in die Zukunft fortzuschreiben. Für diese Anwendung ist der Mangel an Information über die Bestandesgeschichte und mögliche frühere Nachbarn eines Baumes unerheblich. Andere Einflussfaktoren wie die Hangneigung können leicht einbezogen werden. Aufgrund mangelnder Daten (Zeitreihen von Kronenablotungen) ist eine Validierung jedoch derzeit nicht möglich.

### Zuwachs

Das Zuwachsmodells des Wachstumssimulators BWinPro führt zu Prognosen, die in bestimmten Bereichen verzerrt sind d.h. gerichtete Abweichungen aufweisen. Dies ist zumindest teilweise darauf zurückzuführen, dass die Annahme linearer Modelleffekte eine zu starke Vereinfachung darstellt. Die Verwendung glättender Splines bzw. die Verwendung von verallgemeinerten additiven Modellen erlaubt eine deutliche Verbesserung und liefert plausible Vorhersagen des Grundflächenzuwachses speziell auch für die Extrapolationsbereiche. Die grundsätzliche qualitative Wirkungsrichtung der Effekte ändert sich jedoch nicht. So wirken sich die Dimension des Baumes (Kronenmantelfläche bzw. BHD) und der Freistellungsindex positiv auf den Zuwachs aus, wohingegen Alter und Konkurrenz in beiden Modellen einen negativen Einfluss haben.

Die Ergebnisse zeigen die Bedeutung der Wuchskonstellation für das Dickenwachstum des Einzelbaumes. So hat die Konstellation im Kronenraum auf unterschiedlicher räumlicher Skalenebene einen Einfluss auf das Dickenwachstum. Konkurrenz- und Freistellungsindex quantifizieren die Übershirmung innerhalb einer Einflusszone (im Umkreis der doppelten Kronenbreite) eines Baumes bzw. deren Änderung und beschreiben damit die allgemeine Stellung des Baumes im Wettbewerb um die Ressourcen Licht und Raum. Der schirmfreie Anteil der Kronenmantelfläche bezieht darüber hinaus die direkt verfügbare Strahlungsmenge auf Ebene der Einzelkrone in die Zuwachsschätzung ein. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass neben der Größe auch die konkrete Position und Ausformung einer Nachbarkrone innerhalb der Einflusszone einen Einfluss auf den Zuwachs hat. Die Effekte auf beiden räumlichen Skalenebenen haben jeweils einen signifikanten Einfluss auf den Zuwachs, wobei der Konkurrenzindex den größten Einfluss auf den Grundflächenzuwachs hat. Doch auch der schirmfreie Anteil der

Kronenmantelfläche führt zu Unterschieden der Zuwachsprognose in nicht zu vernachlässigender Größenordnung. Der schirmfreie Anteil der Kronenmantelfläche ist noch stärker als die verwendeten Indizes für Konkurrenz und Freistellung abhängig von der räumlichen Lage und der horizontalen Ausformung der Kronen. Vor diesem Hintergrund ist es wünschenswert, die Kronen genauer als durch das vorgestellte Konstruktionsverfahren bzw. die Annahme runder über dem Stammfußpunkt zentrierter Kronen beschreiben zu können.

### Literatur

- BACHMANN, M.: Indizes zur Erfassung der Konkurrenz von Einzelbäumen: Methodische Untersuchung in Bergmischwäldern. Forstliche Forschungsberichte München 171, 1998
- BRISSON, J.: Neighborhood competition and crown asymmetry in *Acer saccharum*. Canadian Journal of Forest Research 31 (12): 2151–2159, 2001
- GUERICKE, M.: Untersuchungen zur Wuchsdynamik von Mischbeständen aus Buche und Europ. Lärche (*Larix decidua*, Mill.) als Grundlage für ein abstandsabhängiges Einzelbaumwachstumsmodell. Dissertation, Universität Göttingen, 2001
- HASENAUER, H.: Ein Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Fichten-Kiefern-und Buchen-Fichtenmischbestände. Forstliche Schriftenreihe der Universität für Bodenkultur Wien 8, 1994
- HASENAUER, H.: Dimensional relationships of open-grown trees in Austria. Forest Ecology and Management 96 (3): 197–206, 1997
- MENG, S. X., RUDNICKI, M., LIEFFERS, V. J., REID, D. E. B. & SILINS, U.: Preventing crown collisions increases the crown cover and leaf area of maturing lodgepole pine. Journal of Ecology 94 (3): 681–686, 2006
- MITSCHERLICH, G.: Wald, Wachstum und Umwelt. Sauerländers Verlag, Frankfurt am Main, 1970
- MONSERUD, R. A. & STERBA, H.: 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): 57–80, 1996
- MUTH, C. C. & BAZZAZ, F. A.: Tree canopy displacement at forest gap edges. Canadian Journal of Forest Research 32 (2): 247–254, 2002
- MUTH, C. C. & BAZZAZ, F. A.: Tree canopy displacement and neighborhood interactions. Canadian Journal of Forest Research 33 (7): 1323–1330, 2003
- NAGEL, J.: Waldwachstumssimulation mit dem Java Software Paket TreeGroSS - Vorläufiges Handbuch. URL: <http://www.nw-fva.de/?id=194#524>, heruntergeladen am 21.10.2010, 2009
- NAGEL, J. & SCHMIDT, M.: The Silvicultural Decision Support System BWINPro. In: HASENAUER, H.: Sustainable Forest Management, Growth Models for Europe. Springer, Berlin/Heidelberg, 2006
- PEARCY, R. W., MURAOKA, H. & VALLADARES, F.: Crown architecture in sun and shade environments: assessing function and trade-offs with a three-dimensional simulation model. New Phytologist 166 (3): 791–800, 2005
- PINHEIRO, J., BATES, D., DEBROY, S., SARKAR, D., & R DEVELOPMENT CORE TEAM: nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models., 2010
- PRETZSCH, H.: Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände. Forstliche Forschungsberichte München 115, 1992
- PRETZSCH, H.: Grundlagen der Waldwachstumsforschung. Parey, Berlin/Wien, 2002
- R DEVELOPMENT CORE TEAM: R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2009
- SPRAUER, S., SCHMIDT, M. & NAGEL, J.: Quantitative Grundlagen zur Ableitung asymmetrischer Kronen in Nordwestdeutschland. Jahrestagung der Sektion Ertragskunde des Deutschen Verbands Forstlicher Forschungsanstalten in Cottbus, 2011
- UHL, E., METZGER, H. G. & SEIFERT, T.: Dimension und Wachstum von solitären Buchen und Eichen. Jahrestagung der Sektion Ertragskunde des Deutschen Verbands Forstlicher Forschungsanstalten in Staufen, 2006
- UMEKI, K.: Modeling the relationship between the asymmetry in crown display and local environment. Ecological Modelling 82 (1): 11–20, 1995
- VENABLES, W. N. & RIPLEY, B. D.: Modern applied statistics with S. Springer Verlag, New York, USA, 2002
- WOOD, S. N.: Generalized Additive Models: An Introduction with R. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, Florida, USA, 383 S., 2006
- YOUNG, T. P. & HUBBELL, S. P.: Crown Asymmetry, Treefalls, and Repeat Disturbance of Broad-Leaved Forest Gaps. Ecology 72 (4): 1464–1471, 1991