

# Methodenentwicklung für die 3. Bundeswaldinventur: Modul 3 Überprüfung und Neukonzeption einer Biomassefunktion

---

*Abschlussbericht Version 2b*

von

Gerald Kändler und Bernhard Bösch

Durchgeführt im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz in Zusammenarbeit mit dem Institut für Waldökologie und Waldinventur des Johann Heinrich von Thünen-Instituts

**Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt  
Baden-Württemberg  
Abt. Biometrie und Informatik  
Wonnhaldestraße 4  
79100 Freiburg**

## Inhaltsverzeichnis

0	Kurzfassung .....	7
1	Einführung.....	9
1.1	Problemstellung .....	9
1.2	Ausgangssituation, Datenlage.....	9
1.3	Zielsetzung.....	9
2	Datenmaterial.....	10
3	Analysen .....	13
3.1	Überprüfung des Konzepts der „synthetischen“ Biomassefunktion .....	13
3.1.1	Raumdichte.....	14
3.1.2	Zusammenhang zwischen Raumdichte und mittlerer Jahrringbreite.....	16
3.1.3	Raumdichte der Äste.....	17
3.2	Derbholzvolumenschätzung von BDAT .....	19
3.3	Überprüfung der dendrometrischen Grundlagen .....	20
3.3.1	Analyse der Derbholzvolumenschätzung am Beispiel der Fichte.....	20
3.3.2	Verfahren und Definitionen zur Berechnung des Derbholzvolumens.....	21
3.3.3	Erfassung der Formigkeit für die Voluminierung mit BDAT .....	23
3.4	Vom Derbholz zum Baumholz: Baumholzexpansionsfunktion .....	28
3.4.1	Korrektur der Grundner-Schwappach-Volumina .....	30
3.4.2	Kalibrierung der segmentierten Baumholzvolumenexpansionsfunktion .....	30
3.4.3	Überprüfung der Baumholzexpansionsfunktion .....	31
3.5	Überprüfung der synthetischen Biomassefunktion.....	33
3.5.1	Fichte .....	33
3.5.2	Kiefer .....	35
3.5.3	Buche.....	37
3.5.4	Eiche.....	38
3.6	Zusammenfassende Wertung und Schlussfolgerung.....	40
3.7	Anpassung neuer Biomassefunktionen .....	41
3.7.1	Biomassefunktionen für die Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche.....	45
3.7.2	Biomassefunktionen für Baumarten ohne empirische Datengrundlagen.....	50
3.7.3	Biomassefunktion für das Derbholz-Kollektiv aller Baumarten.....	50
3.8	Erweiterung des Gültigkeitsbereichs – „Integrierte Biomassefunktion“ .....	53
3.8.1	Erweiterung um Nicht-Derbholz.....	53
3.8.2	Oberer Extrapolationsbereich.....	57
3.8.3	Gesamtmodell als abschnittsweise definierte Funktion.....	59
3.8.4	Überprüfung der neuen Biomassefunktion .....	61
4	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	64
	Literatur.....	68

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Anzahl der Probestämme der bundesweiten Messkampagne nach Baumarten und $d_{1,3}$ -Stärkeklassen.....	10
Tabelle 2. Anzahl der Probestämme aus Baden-Württemberg nach Baumarten und $d_{1,3}$ -Stärkeklassen.....	11
Tabelle 3. Gemessene Raumdichten [ $\text{kg m}^{-3}$ ] des Derbholzes im Vergleich mit Literaturwerten (Kollmann, 1987). Bei den Nadelbäumen handelt es sich um Schaftderbholz, bei den Laubbäumen sind auch Derbholzäste einbezogen.....	15
Tabelle 4. Vergleich der Raumdichten von Derbholz ( $> 7 \text{ cm m. R.}$ ) und Reisholz .....	18
Tabelle 5. Ast-Raumdichten in $\text{kg m}^{-3}$ nach Ledermann und Neumann (2006) .....	19
Tabelle 6. Umrechnungsfaktoren zur Korrektur der Grundner-Schwappach-Volumina .....	30
Tabelle 7. Koeffizienten der 3 Abschnittsfunktionen für die „Expansions-Baumarten“ .....	30
Tabelle 8. Knoten der 3 Abschnittsfunktionen sowie der gültige maximale Wert für das Derbholzvolumen und der maximale Expansionsfaktor für alle Derbholzvolumina, welche diesen Wert überschreiten („Extrapolationsbereich“) .....	31
Tabelle 9. Kennwerte des linearen Ausgleichs zwischen den von den synthetischen Biomassefunktionen vorhergesagten und beobachteten Biomassewerten bei der Fichte .....	34
Tabelle 10. Kennwerte des linearen Ausgleichs zwischen den von den synthetischen Biomassefunktionen vorhergesagten und beobachteten Biomassewerten bei der Kiefer .....	35
Tabelle 11. Kennwerte des linearen Ausgleichs zwischen den von den synthetischen Biomassefunktionen vorhergesagten und beobachteten Biomassewerten bei der Buche.....	37
Tabelle 12. Kennwerte des linearen Ausgleichs zwischen den von den synthetischen Biomassefunktionen vorhergesagten und beobachteten Biomassewerten bei der Eiche.....	39
Tabelle 13. Koeffizienten und Kennwerte der auf Marklund-Modellen basierenden Biomassefunktionen der Fichte: M0: ohne $d_{03}$ ; M1/M1a: $d_{1,3}$ , $d_{03}$ , $h$ ; M2: mit Alterseinfluss (in Form des mittleren jährlichen $d_{1,3}$ -Zuwachses = $d_{1,3}/A$ ); M3: mit Alter und Höhe über NN....	46
Tabelle 14. Koeffizienten und Kennwerte der auf allometrischen Modellen basierenden Biomassefunktionen der Fichte: A0: ohne $d_{03}$ ; A1: $d_{1,3}$ , $d_{03}$ , $h$ ; A2: mit Alterseinfluss (in Form des mittleren jährlichen $d_{1,3}$ -Zuwachses); A3: mit Alter und Höhe über NN.....	47
Tabelle 15. Koeffizienten und Kennwerte der auf Marklund-Modellen basierenden Biomassefunktionen der Kiefer: M0: ohne $d_{03}$ ; M1/M1a: $d_{1,3}$ , $d_{03}$ , $h$ ; M2: mit Alter (in Form des mittleren jährlichen $d_{1,3}$ -Zuwachses = $d_{1,3}/A$ ).....	47
Tabelle 16. Koeffizienten und Kennwerte der auf allometrischen Modellen basierenden Biomassefunktionen der Kiefer: A0: ohne $d_{03}$ ; A1: $d_{1,3}$ , $d_{03}$ , $h$ ; A2: mit Alter (in Form des mittleren jährlichen $d_{1,3}$ -Zuwachses) .....	48
Tabelle 17. Koeffizienten und Kennwerte der auf dem Marklund-Modell basierenden Biomassefunktionen der Buche: M0: ohne $d_{03}$ ; M1/M1a: $d_{1,3}$ , $d_{03}$ , $h$ .....	48
Tabelle 18. Koeffizienten und Kennwerte der auf allometrischen Modellen basierenden Biomassefunktionen der Buche: A0: ohne $d_{03}$ ; A1: $d_{1,3}$ , $d_{03}$ , $h$ .....	49
Tabelle 19. Koeffizienten und Kennwerte der auf dem Marklund-Modell basierenden Biomassefunktionen der Eiche: M0: ohne $d_{03}$ ; M1/M1a: $d_{1,3}$ , $d_{03}$ , $h$ .....	49
Tabelle 20. Koeffizienten und Kennwerte der auf allometrischen Modellen basierenden Biomassefunktionen der Eiche: A0: ohne $d_{03}$ ; A1: $d_{1,3}$ , $d_{03}$ , $h$ ; A3: mit Alterseinfluss und Höhe über NN.....	50

Tabelle 21. Zuordnung der BWI-Nadelbaumarten zu den 5 Raumdichte-Nadelbaumarten...	51
Tabelle 22. Zuordnung der BWI-Laubbaumarten zu den Raumdichte-Laubbaumarten der Baumartengruppe Buche, Eiche, Andere Laubbäume hoher Lebensdauer .....	51
Tabelle 23. Zuordnung der BWI-Laubbaumarten zu den Raumdichte-Laubbaumarten der Baumartengruppe Andere Laubbäume niedriger Lebensdauer .....	52
Tabelle 24. Koeffizienten des Marklund-Modells M1a für alle 18 Raumdichte-Baumarten ....	52
Tabelle 25. Koeffizienten der Biomassefunktion für Bäume unter 1,3 m Höhe mit der Höhe als Prädiktor .....	53
Tabelle 26. Tariffunktionen für $d_{0,3}$ und Höhe in Abhängigkeit vom $d_{1,3}$ .....	54
Tabelle 27. Koeffizienten der Biomassefunktion in Abhängigkeit vom $d_{1,3}$ für den $d_{1,3}$ -Bereich von 0 bis 10 cm sowie Koeffizienten der Tariffunktionen; $r^2$ ist das Bestimmtheitsmaß der Biomassefunktion. ....	56
Tabelle 28. Obere $d_{1,3}$ -Schwellenwerte für den Extrapolationsbereich (gerundete 99-Perzentile der $d_{1,3}$ -Verteilung der 2. Bundeswaldinventur) .....	59
Tabelle 29. Übersicht über die Abschnitte und Modelle der integrierten Biomassefunktion...	59
Tabelle 30. Koeffizienten der Abschnittsmodelle der integrierten Biomassefunktion (Zusammenfassung der Tabellen 25, 27 und 24) .....	60
Tabelle 31. Vergleich der Biomassevorratsschätzung bei BWI 1 und 2 für Fichte und Buche .....	61
Tabelle 32. Vergleich der Biomassevorratsschätzung bei BWI 1 und 2 für Kiefer und Eiche .....	62
Tabelle 33. Vergleich der Biomassevorratsschätzung bei BWI 1 und 2 für die sonstigen Nadelbaumartengruppen Tanne, Douglasie und Lärche.....	62
Tabelle 34. Vergleich der Biomassevorratsschätzung bei BWI 1 und 2 für die Baumartengruppen Andere Laubbäume mit höherer Lebensdauer (ALH) bzw. Andere Laubbäume mit niedriger Lebensdauer (ALN) .....	63
Tabelle 35. Vergleich der Biomassevorratsschätzung bei BWI 1 und 2 für den Gesamtvorrat .....	63

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Oberirdische Biomasse über dem $d_{1,3}$ bei Fichte und Buche: die Daten der bundesweiten Erhebung liegen im Streuband des Gesamtdatenbestands .....	11
Abbildung 2. Verteilung der an den Nadelbaumarten erhobenen oberirdischen Biomassewerte [kg] .....	12
Abbildung 3. Verteilung der an den Laubbaumarten erhobenen oberirdischen Biomassewerte [kg] .....	13
Abbildung 4. Verteilung der Schaftholz-Raumdichten der Fichtenprobebäume .....	15
Abbildung 5. Zusammenhang zwischen Derbholzraumdicke und mittlerer Jahrringbreite des $d_{1,3}$ bei den Nadelbaumarten .....	16
Abbildung 6. Zusammenhang zwischen Derbholzraumdicke und mittlerer Jahrringbreite des $d_{1,3}$ bei den Laubbaumarten .....	17
Abbildung 7. Definition des oberirdischen Volumens bzw. der Biomasse an Bäumen am Hang; bodeneben ist die waagrechte Ebene, welche durch den hangoberseitigen „Bodenberührungspunkt“ des Stammfußes geht, von welchem aus der $d_{1,3}$ gemessen wird. ....	22
Abbildung 8. Volumentafel-konformes Verfahren der Berechnung des Derbholzvolumens eines Schafts anhand von 2m-Sektionen (oben) im Unterschied zur exakteren Voluminierung („Biomasse-konform“) mit variierenden Sektionslängen im Wurzelanlauf (unten).....	23
Abbildung 9. Vergleich der Derbholzvolumina der unterschiedlichen Voluminierungsverfahren „Biomasse“- versus „Volumentafel“-konform bei der Fichte .....	24
Abbildung 10. Für eine Fichte mit $d_{1,3} = 50,5$ cm und Höhe = 31,5 m ergeben sich unterschiedliche BDAT-Schaftkurven, je nachdem, ob die Schaftkurve (rot) über den $d_7$ (= 40,9 cm) oder (blau) den $d_{03}$ (= 37,6 cm) eingehängt wird. ....	25
Abbildung 11. Für eine Fichte mit $d_{1,3} = 42$ cm und Höhe = 31,7 m ergeben sich recht gut übereinstimmende BDAT-Schaftkurven, je nachdem, ob die Schaftkurve (rot) über den $d_7$ (= 32,3 cm) oder (blau) den $d_{03}$ (= 30,8 cm) eingehängt wird. Die modellierten Schaftkurven reproduzieren die beobachtete Kurve gut.....	26
Abbildung 12. Anteil des Abschnittsvolumens bis zur Höhe von 30% der Scheitelhöhe über dem $d_{1,3}$ für Fichten .....	27
Abbildung 13. Volumenanteil von 30% der Scheitelhöhe bis zur Höhe der Derbholzgrenze für Fichten .....	27
Abbildung 14. Gegenüberstellung des modellierten und des beobachteten Baumholzvolumens bei der Buche .....	32
Abbildung 15. Gegenüberstellung des modellierten und des beobachteten Baumholzvolumens bei der Eiche .....	32
Abbildung 16. Gegenüberstellung des modellierten und des beobachteten Baumholzvolumens bei der Kiefer (nur RBS-Aufnahmen) .....	33
Abbildung 17. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der bisherigen synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Fichte aufgetragen über $d_{1,3}$ -Klassen .....	34
Abbildung 18. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der neuen synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Fichte aufgetragen über $d_{1,3}$ -Klassen .....	35

Abbildung 19. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der alten synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Kiefer aufgetragen über $d_{1,3}$ -Klassen .....	36
Abbildung 20. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der neuen synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Kiefer aufgetragen über $d_{1,3}$ -Klassen .....	36
Abbildung 21. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der alten synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Buche aufgetragen über $d_{1,3}$ -Klassen .....	38
Abbildung 22. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der neuen synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Buche aufgetragen über $d_{1,3}$ -Klassen .....	38
Abbildung 23. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der alten synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Eiche aufgetragen über $d_{1,3}$ -Klassen .....	39
Abbildung 24. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der neuen synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Eiche aufgetragen über $d_{1,3}$ -Klassen .....	40
Abbildung 25. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der neuen synthetischen Funktion in der Fassung mit Berücksichtigung des Alterseinflusses und den beobachteten Werten bei der Eiche aufgetragen über $d_{1,3}$ -Klassen .....	40
Abbildung 26. Oberirdische Biomasse über dem $d_{1,3}$ bei der Fichte. Die Marklund-Funktion stimmt im $d_{1,3}$ -Bereich über 50 cm mit dem nicht-parametrischen „daten-getriebenen“ Ausgleich durch eine LOESS-Funktion besser überein als die allometrische Funktion. ....	43
Abbildung 27. Oberirdische Biomasse über dem $d_{03}$ bei der Fichte. Die Marklund-Funktion stimmt im $d_{03}$ -Bereich oberhalb 45 cm mit dem nicht-parametrischen „daten-getriebenen“ Ausgleich durch eine LOESS-Funktion besser überein als die allometrische Funktion. ....	43
Abbildung 28. Oberirdische Biomasse über der Höhe bei der Fichte. Die Marklund-Funktion stimmt ab einer Höhe von 33 m mit dem nicht-parametrischen „daten-getriebenen“ Ausgleich durch eine LOESS-Funktion besser überein als die allometrische Funktion. ....	44
Abbildung 29. Oberirdische Biomasse in Abhängigkeit von der Baumhöhe bei kleinen Bäumen mit einer Höhe $\leq 1,3$ m. Es werden nur Nadel- und Laubbäume unterschieden. ....	54
Abbildung 30. Oberirdische Biomasse in Abhängigkeit vom $d_{1,3}$ bei Bäumen im Bereich $0 < d_{1,3} \leq 10$ cm. Es werden 18 Baumarten unterschieden entsprechend den in der synthetischen Biomassefunktion angewandten „Raumdichte-Baumarten“. ....	56
Abbildung 31. Vergleich der Biomassefunktion mit und ohne Begrenzung im Extrapolationsbereich für Fichte und Buche .....	59

## 0 Kurzfassung

Die Ermittlung der Biomassevorräte, die in Deutschlands Wäldern stocken, ist eine wesentliche Grundlage für die Erstellung des Treibhausgasberichts für den Wald im Rahmen des Kyoto-Protokolls. Die vorliegende Untersuchung befasst sich (1) mit der Überprüfung der bisherigen Verfahren zur Ermittlung der oberirdischen Biomasse aus Waldinventuren sowie (2) der Konzeption eines überarbeiteten einheitlichen Schätzverfahrens, das im Wesentlichen auf neuen, im Bundesgebiet erhobenen Daten basiert sowie Schwächen der bisherigen Methodik beseitigt.

Zu diesem Zweck wurden die bundesweit für die vier Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche erhobenen Biomassedaten analysiert und für die Konzeption eines überarbeiteten Biomasseschätzverfahrens für die Auswertung der Bundeswaldinventur verwendet. Anhand der gewonnenen Daten wurde zunächst das bisherige Verfahren überprüft und analysiert, vor allem in Bezug auf die getroffenen Annahmen und unterstellten Grundbeziehungen. Insbesondere wurden die dendrometrischen Grundlagen näher untersucht. Denn die bisher verwendeten, so genannten synthetischen Biomassefunktionen basieren nicht auf aktuellen empirischen Daten, sondern im Wesentlichen auf Expansionsfunktionen und Raumdichten für 18 Leit-Baumarten. Die Expansionsfunktion für die Herleitung des Baumholzvolumens, des gesamten oberirdischen Baumvolumens, aus dem Derbholzvolumen wurde anhand der Grundner-Schwappach-Volumen tafeln mit einem einfachen linearen Modell kalibriert. Die Raumdichtewerte stammen aus Standardwerken der Literatur. Aus methodischer Sicht bestand die Notwendigkeit die Expansionsfunktion zu verbessern, da die unterstellte einfache lineare Beziehung den Zusammenhang im unteren Bereich nur unzulänglich beschreibt. Diese Funktion wurde daher überarbeitet und durch ein abschnittsweise definiertes nicht-lineares Modell ersetzt. Für die Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche wurden anschließend beide Versionen der synthetischen Biomassefunktion anhand des neuen Datenmaterials validiert. Der Vergleich ergab für die Fichte eine recht gute Übereinstimmung mit einer leichten Überlegenheit der neuen synthetischen Funktion. Bei der Kiefer zeigten beide Versionen eine systematische Überschätzung der beobachteten Werte, was im Wesentlichen auf die in der synthetischen Funktion angenommenen Raumdichte zurückzuführen ist, welche deutlich höher ist als die aktuell ermittelte Raumdichte. Der Vergleich der synthetischen Funktionen mit den beobachteten Biomasse ergab bei der Buche für beide Versionen eine systematische Unterschätzung, die vor allem im  $d_{1,3}$ -Bereich über 40 cm ausgeprägt ist. Bei der Eiche zeigten die synthetischen Funktionen dagegen systematische Überschätzungen, was wie bei der Kiefer hauptsächlich mit dem Literaturwert für die Raumdichte erklärbar ist, denn auch bei der Eiche liegen die beobachteten Raumdichtewerte um ca. 9% unter dem Literaturwert.

Aufgrund dieser Befunde ergab sich die Notwendigkeit, eine neue Funktion an das gewonnene Datenmaterial anzupassen und das gesamte Verfahren auf eine einheitliche Basis zu stellen.

Das der neuen Biomassefunktion zugrundeliegende Modell basiert auf einer Modifikation des Marklund-Modells. Eine wesentliche Erweiterung ist die Einbeziehung eines oberen Schaftdurchmessers in Form des  $d_{03}$  (in 30% der Scheitelhöhe gemessener Durchmesser). Zu Vergleichszwecken wurden in dieser Untersuchung verschiedene allometrische und Marklund-Modelle angepasst und bezüglich ihrer Anpassungsgüte verglichen. Als Kompromiss zwischen Anpassungsgüte und Modellkomplexität wurde das so genannte modifizierte

Marklund-Modell M1a als einheitlicher Modelltyp für den Derbholzbereich mit  $d_{1,3} \geq 10$  cm festgelegt. Im Sinne einer einheitlichen Methodik wurde außer für die vier Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche, für die aktuelle Messdaten vorliegen, dasselbe Modell auch für die übrigen 14 Raumdichte-Baumarten angepasst. Hierzu wurde mit der überarbeiteten synthetische Biomassefunktion für jeden Probebaum aus dem Kollektiv der Bäume mit  $d_{1,3} \geq 10$  cm des Datenmaterials der 1. und 2. Bundeswaldinventur die oberirdische Biomasse geschätzt, um die Marklund-Funktion anzupassen. Verwendet wurden hierzu alle Bäume der 1. und 2. BWI mit gemessener Höhe und oberem Durchmesser (mit der Einschränkung, dass bei der 1. BWI der obere Durchmesser erst ab einem  $d_{1,3}$  von 20 cm gemessen worden ist). Auf diese Weise wurde die synthetische Biomassefunktion in Form des Marklund-Modells „reparametrisiert“.

Die neue Biomassefunktion trägt ferner der Anforderung Rechnung, dass es die gesamte Dimensionsbandbreite der bei der BWI erfassten Probebäume abdeckt werden muss. Hierzu wurden erstmals für den Bereich des Nicht-Derbholzes empirische Daten herangezogen, was bei der bisherigen synthetischen Biomassefunktion nicht der Fall ist. Da für den Nicht-Derbholzbereich aus messtechnischen Gründen nicht dieselben Prädiktoren zur Verfügung stehen, wurde das Konzept einer abschnittsweise definierten Funktion realisiert, welches zumindest näherungsweise Stetigkeit an den Übergängen von einem Abschnitt in den anderen gewährleistet. Des Weiteren wird das Verhalten der Biomassefunktion im Bereich sehr starker Bäume kontrolliert, um zu verhindern, dass aufgrund der nichtlinearen Eigenschaft des Marklund-Modells für extreme Baumdimensionen unrealistisch hohe Werte geschätzt werden. Hierzu wurde ein eigener Funktionsabschnitt oberhalb baumartenspezifischer Schwellenwerte für den  $d_{1,3}$  definiert, in welchem das Marklund-Modell nach dem Prinzip einer Taylor-Linearisierung 1. Ordnung linearisiert wird, wodurch der Anstieg der Schätzwerte limitiert wird.

Die neu entwickelte Biomassefunktion wurde software-technisch in Form einer R-Funktion sowie einer VBA-Funktion (MS- ACCESS) implementiert und am Datenmaterial der beiden Bundeswaldinventuren überprüft. Es zeigt sich, dass die neue Biomassefunktion mit Ausnahme der Buche für alle anderen Baumarten niedrigere Gesamtvorräte als die alte Schätzfunktion liefert. Die Abweichungen fallen vor allem im Bereich des Nicht-Derbholzes deutlich aus, eine Folge davon, dass die neuen Funktionen für das Nicht-Derbholz-Kollektiv empirisch abgesichert deutlich niedrigere Biomassewerte ergeben. Systematische Unterschätzungen durch die neue Funktion treten mit Ausnahme der Buche noch bis zu mittelstarken Dimensionen auf, nähern sich aber mit zunehmender Stärke der Bäume immer mehr an. Insgesamt liegt der von der neuen Biomassefunktion geschätzte Gesamtvorrat um gut 4 % unter dem Wert der alten Funktion. Wie sich das neue Verfahren auf die Abschätzung der Vorratsänderungen auswirkt, konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht näher analysiert werden.

Aus methodischer Sicht ist die vorgenommene Überarbeitung und Neukonzeption der Biomassefunktion begründet, insbesondere vor dem Hintergrund, dass das neue Verfahren durch empirische Daten wesentlich besser abgesichert ist als das bisherige.



# **1 Einführung**

## **1.1 Problemstellung**

Nationale Waldinventuren bilden die Grundlage für die Erstellung des Treibhausgasinventars für den Wald. Der im Wald gespeicherte Kohlenstoffvorrat wird aus der im lebenden Holzvorrat gebundenen Biomasse (Trockensubstanz) durch einfache Umrechnung hergeleitet. Voraussetzung für die Berechnung des C-Vorrats ist daher die Ermittlung des Biomassevorrats anhand der bei Waldinventuren erhobenen Einzelbaumgrößen. Biomassefunktionen werden empirisch anhand von Daten kalibriert, die aus der destruktiven Vermessung von Einzelbäumen gewonnen werden. Der notwendige Messaufwand limitiert die Anzahl der Beobachtungen. Zwar gibt es inzwischen zahlreiche Studien, in denen Biomassedaten erhoben worden sind. Die Zusammenführung der Daten verschiedener Studien und die Auswertung in Form einer Meta-Analyse ist bisher nur in begrenztem Umfang erfolgt (Wirth et al., 2006). Darüber hinaus existieren Zusammenstellungen einer Fülle publizierter Funktionen für etliche Baumarten (Jenkins et al., 2003, Lambert et al., 2005, Zianis et al., 2005) sowie Ansätze, aus publizierten Funktionen generalisierte Biomassefunktionen herzuleiten (z. B. Muukkonen, 2007).

## **1.2 Ausgangssituation, Datenlage**

Für die Auswertung der Bundeswaldinventur-Daten zur Erstellung des Treibhausgasinventars für den Wald wurden von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg so genannte synthetische Biomassefunktionen auf der Basis der Grundner-Schwappach-Volumen tafeln (1952) entwickelt (Zell und Pistorius, 2006; Zell, 2008). Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden in einer bundesweiten Messkampagne in den Jahren 2009 und 2010 oberirdische Einzelbaumbiomassen für die vier Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche an insgesamt 504 Bäumen erhoben. Des Weiteren stehen für die Baumarten Fichte, Tanne, Douglasie und Buche fast ebenso viele (478) Einzelbaumbiomassen aus dem Land Baden-Württemberg zur Verfügung. Die bundesweite Datenerhebung ist in einem gesonderten Bericht beschrieben (Kändler, 2010).

## **1.3 Zielsetzung**

Hauptziel dieser Untersuchung ist es, die bisher genutzten synthetischen Biomassefunktionen zu überprüfen und erforderlichenfalls Modifikationen vorzunehmen. Diese betreffen in erster Linie das bisherige einfache Modell zur Expansion des Derbholzvolumens zum Baumholzvolumen. Außerdem sind die Raumdichtefaktoren, differenziert nach Schaft- und Astholz (bzw. Derb- und Reisholz) zu betrachten und mit den bisher verwendeten Literaturwerten zu vergleichen. Des Weiteren werden für das vorliegende neue Datenmaterial neue Schätzgleichungen auf der Basis allometrischer bzw. alternativer Funktionstypen angepasst. Auf der Grundlage dieser Analysen war schließlich eine neue Biomassefunktion zu konzipieren.

Die Modellkonzeption erfolgte in Abstimmung mit dem für die Auswertung der Bundeswaldinventur zuständigen Institut für Waldökologie und Waldinventuren des Johann Heinrich von Thünen-Instituts. Für die Auswertung der Bundeswaldinventur als Grundlage für die Erstellung des Treibhausgasinventars für den Wald sind möglichst einheitliche und transparente Verfahren zu verwenden. Mit dem Vorliegen aktuellen empirischen Datenmaterials für die vier Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche, welche zusammen gut 80% des Gesamtvorrats ausmachen, liegt es nahe, eine an diese Daten angepasste Biomassefunktion

zu verwenden, welche den Vorteil einer klaren Gleichungsstruktur hat. Eine zusätzliche Anforderung ist, Funktionen für den gesamten vorkommenden Dimensionsbereich von den kleinsten Bäumchen bis hin zu extrem starken Individuen abzudecken. Aufgrund der großen Wertebandbreite (von wenigen Gramm bis zu weit über 10 Tonnen Biomasse, also Faktor  $10^6$  bis  $10^7$ ) ist eine einzige Funktion für den gesamten Dimensionsbereich nicht realisierbar. Daher muss ein aus verschiedenen Dimensionsbereichen zusammengesetztes Modell, welches einen möglichst stetigen Übergang zwischen den Dimensionsbereichen gewährleistet, entwickelt werden.

## 2 Datenmaterial

Im Rahmen der bundesweiten Messkampagne wurden insgesamt 504 Bäume destruktiv beprobt. Die Verteilung der Probebäume nach  $d_{1,3}$ -Klassen ist in Tabelle 1 wiedergegeben

**Tabelle 1. Anzahl der Probebäume der bundesweiten Messkampagne nach Baumarten und  $d_{1,3}$ -Stärkeklassen**

$d_{1,3}$ -Klasse	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche	Insgesamt
10 bis 19,9 cm	22	26	24	22	94
20 bis 29,9 cm	32	26	26	25	119
30 bis 39,9 cm	30	30	30	24	114
40 bis 49,9 cm	30	25	22	17	94
50 bis 59,9 cm	19	18	10	12	59
60 bis 69,9 cm	3	5	11	6	25
$\geq 70$ cm	2	2	4	1	9
<b>Summe</b>	<b>138</b>	<b>132</b>	<b>127</b>	<b>107</b>	<b>504</b>

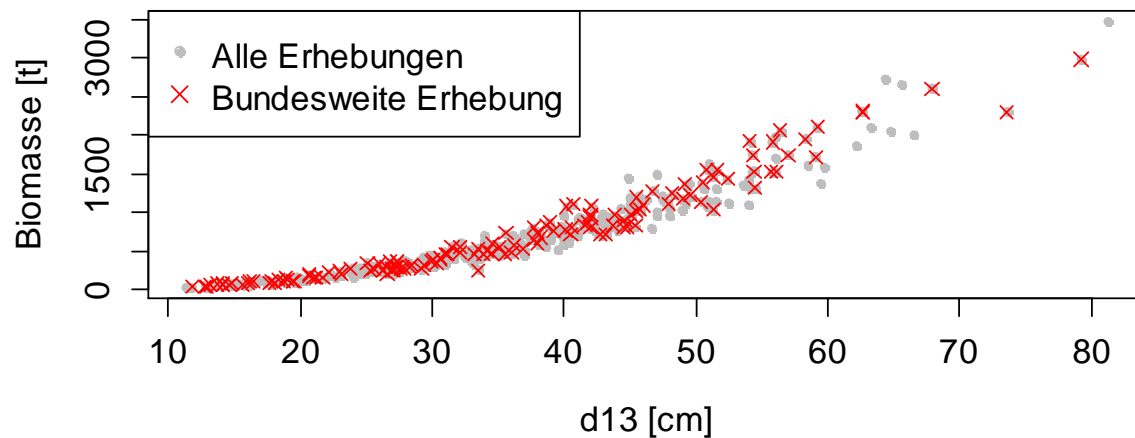
Zusätzlich wurden im Land Baden-Württemberg im Rahmen von drei Studien erhobene Probebaumdaten in diese Analyse einbezogen (Tabelle 2). Insgesamt steht ein Datensatz von 982 Probeebäumen zur Verfügung, bestehend aus 394 Fichten, 278 Buchen, 133 Kiefern, 107 Eichen sowie nur aus Baden-Württemberg stammenden 41 Douglasien und 29 Tannen. Bei der Auswahl der Probebäume wurde ein relativ großer Anteil an Starkholzbäumen mit einem  $d_{1,3}$  über 50 cm angestrebt; insgesamt 163 Probeebäume stammen aus diesem Stärkebereich (knapp 17% des Gesamtkollektivs). Aufgrund des höheren Mess- und Zeitaufwands zur Beprobung stärkerer Bäume war ein höherer Anteil nicht zu realisieren. Die Messmethodik ist in einem gesonderten Bericht dargestellt (Kändler, 2010). Um den Messaufwand in Grenzen zu halten, wurde ein Stichprobenverfahren angewandt, bei den Laubbäumen das so genannte Randomized Branch Sampling (Gregoire u. Valentine, 2008), bei den Nadelbäumen eine sektionsweise Kubierung des Schafts und für die Äste ein Stichprobenverfahren, welches auf einer Regressionsschätzung basiert.

In Abbildung 1 werden für Fichte und Buche die Beobachtungen der Bundesweiten Kampagne innerhalb der jeweiligen Gesamtkollektive dargestellt; man erkennt, dass die bundesweiten Daten das gesamte Dimensionsspektrum in etwa abdecken. Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen die Häufigkeitsverteilung der oberirdischen Biomassewerte der Probeebäume getrennt nach Baumarten.

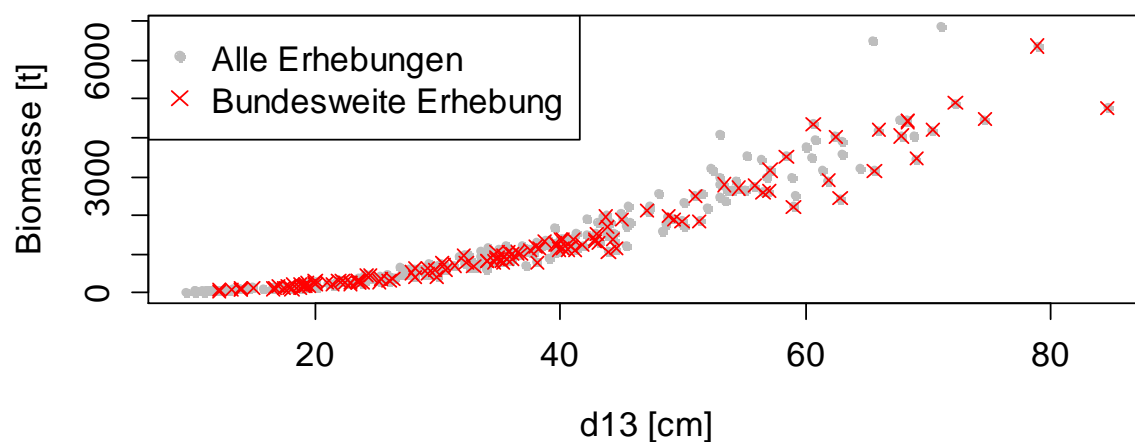
**Tabelle 2. Anzahl der Prohebäume aus Baden-Württemberg nach Baumarten und  $d_{1,3}$ -Stärkeklassen**

$d_{1,3}$ -Klasse	Fichte	Tanne	Douglasie	Kiefer	Buche	insgesamt
< 10 cm			1		1	2
10 bis 19,9 cm	25	5	10		22	62
20 bis 29,9 cm	63	5	8	1	30	107
30 bis 39,9 cm	92	7	10		44	153
40 bis 49,9 cm	52	4	5		23	84
50 bis 59,9 cm	17		5		20	42
60 bis 69,9 cm	6	3	1		10	20
$\geq 70$ cm	1	5	1		1	8
<b>Summe</b>	<b>256</b>	<b>29</b>	<b>41</b>	<b>1</b>	<b>151</b>	<b>478</b>

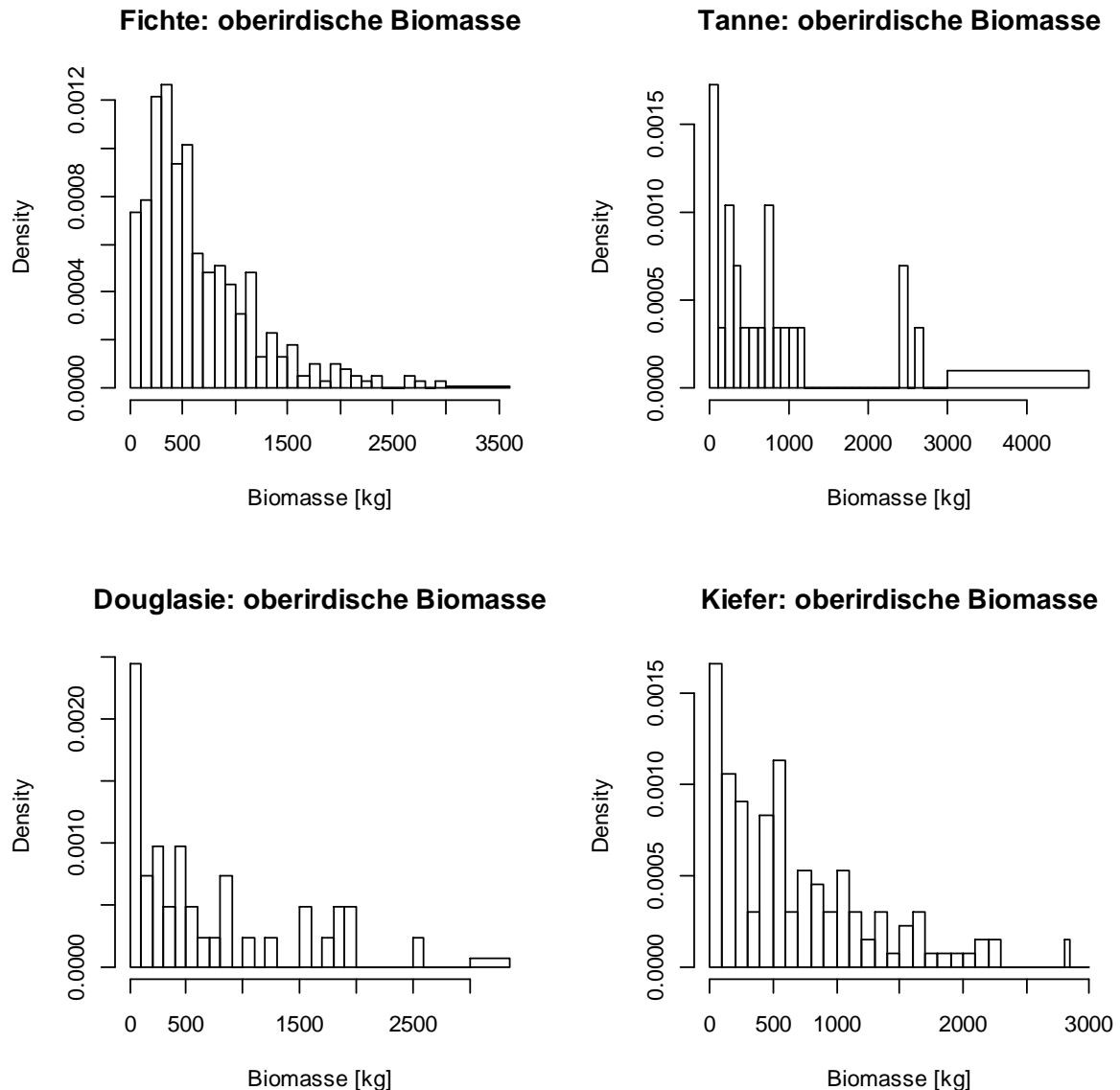
### Fichte: oberirdische Biomasse über $d_{13}$



### Buche: oberirdische Biomasse über $d_{13}$

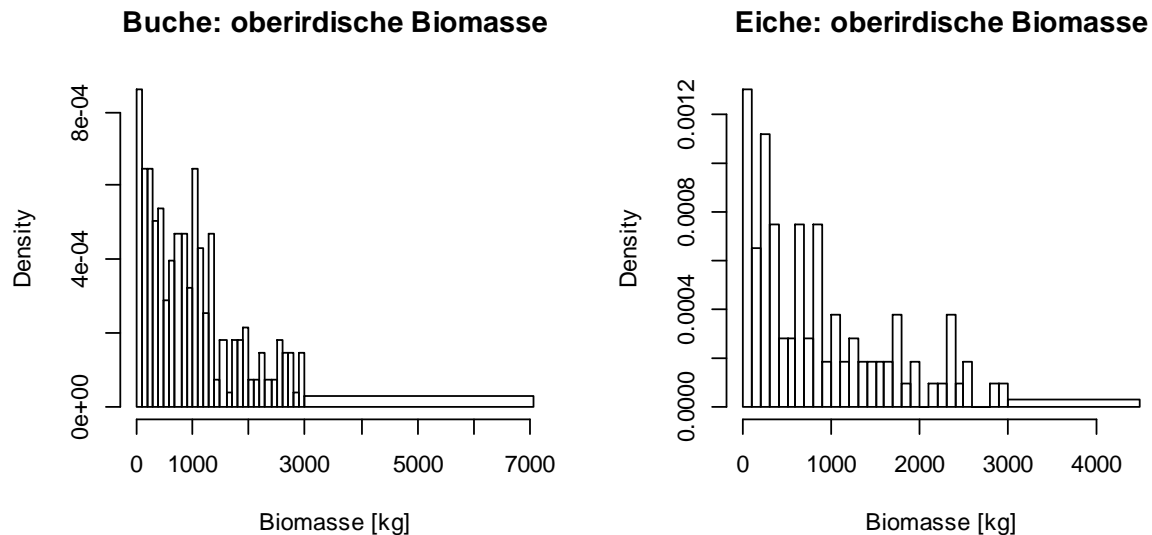


**Abbildung 1. Oberirdische Biomasse über dem  $d_{1,3}$  bei Fichte und Buche: die Daten der bundesweiten Erhebung liegen im Streuband des Gesamtdatenbestands**



**Abbildung 2. Verteilung der an den Nadelbaumarten erhobenen oberirdischen Biomassewerte [kg]**

Die Biomassewerte zeigen typische linkssteile Verteilungsmuster; die Spannweite der Biomassewerte liegt bei den Nadelbaumarten in einem Bereich bis ca. 4.000 kg Trockenmasse, die höchsten Werte erzielt die Buche mit gut 7.000 kg. Die Masse bewegt sich bei den Nadelbäumen in einem Bereich bis 1.000 kg, bei den Laubbäumen ist auch ein nennenswerter Anteil von Individuen mit Massen bis zu 2.000 kg vorhanden.



**Abbildung 3. Verteilung der an den Laubbaumarten erhobenen oberirdischen Biomassewerte [kg]**

### 3 Analysen

#### 3.1 Überprüfung des Konzepts der „synthetischen“ Biomassefunktion

Die so genannte synthetische Biomassefunktion liefert eine einzelbaumweise Schätzung der oberirdischen Biomasse, indem ausgehend vom Derbholz mit einer Expansions-Funktion das Baumholz geschätzt und anschließend dieses Volumen mit Hilfe von Raumdichtefaktoren in Biomasse umgerechnet wird. Dabei wird zwischen Schaft- und Astholz unterschieden, da bei den meisten Baumarten die Raumdichte des Astholzes höher ist als die des Schaftholzes. Da eine genaue Trennung nach Schaft- und Astholz nicht möglich ist, wird das Schaftholzvolumen mit dem Derbholzvolumen gleichgesetzt und die Differenz zwischen Baum- und Derbholzvolumen als Astholzvolumen betrachtet. Diese Vereinfachung dürfte für Nadelbäume weitgehend zutreffen, bei Laubbäumen tritt insbesondere bei stärkeren Bäumen auch Derbholz in der Krone und im Astwerk auf, so dass die Abgrenzung hier nicht ganz realistisch ist. Allerdings ist der Unterschied zwischen der Ast- und Schaftholzraum-dichte bei Laubbäumen auch nicht so hoch wie bei Nadelbäumen.

Das synthetische Biomassemodell lautet:

$$B = (V_{Dh} + (V_{Bh} - V_{Dh}) \cdot r) \cdot RD$$

$V_{Dh}$  = Derbholzvolumen [ $m^3$ ]

$V_{Bh}$  = Derbholzvolumen [ $m^3$ ]

$r$  = Verhältnis Ast- zu Schaftholzraum-dichte

$RD$  = Raumdichte [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$V_{Bh} = f(V_{Dh})$

Im Folgenden werden die Komponenten dieser Funktion anhand des erhobenen Datenmaterials überprüft.

### 3.1.1 Raumdichte

Die Raumdichte wurde beim Schafftholz anhand von Stammscheiben bestimmt. Die Stammscheiben wurden vor dem Trocknen geometrisch vermessen, um deren Frischvolumen zu bestimmen; die Stammscheiben wurden frisch gewogen, anschließend wurde eine Probe (mit Rinde) entnommen, ebenfalls frisch gewogen und dann bei 103° C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anhand des aus der Probe bestimmten Verhältnisses Trocken- zu Frischgewicht wurde das Frischgewicht der Stammscheibe in ihr Trockengewicht umgerechnet, welches zu deren Frischvolumen ins Verhältnis gesetzt wurde, um die Raumdichte zu bestimmen (stereometrische Berechnung). Bei den Laubbäumen wurden auch im Astbereich (Reisig) Stammscheiben entnommen, die voluminiert wurden, während bei den Nadelbäumen die Astproben nicht voluminiert wurden, sondern nur gewogen (frisch bzw. nach Trocknung bis zur Gewichtskonstanz); über das Trocken-zu-Frisch-Gewichtsverhältnis wurde anhand des Frischgewichts des Astes auf dessen Trockengewicht geschlossen. Ferner wurden für die Nadelbaumäste Regressionsbeziehungen (Allometrien) zwischen Trockengewicht und Astbasisdurchmesser angepasst, welche für die Schätzung der Asttrockenmasse anhand der gemessenen Astbasis-Durchmesser verwendet wurden.

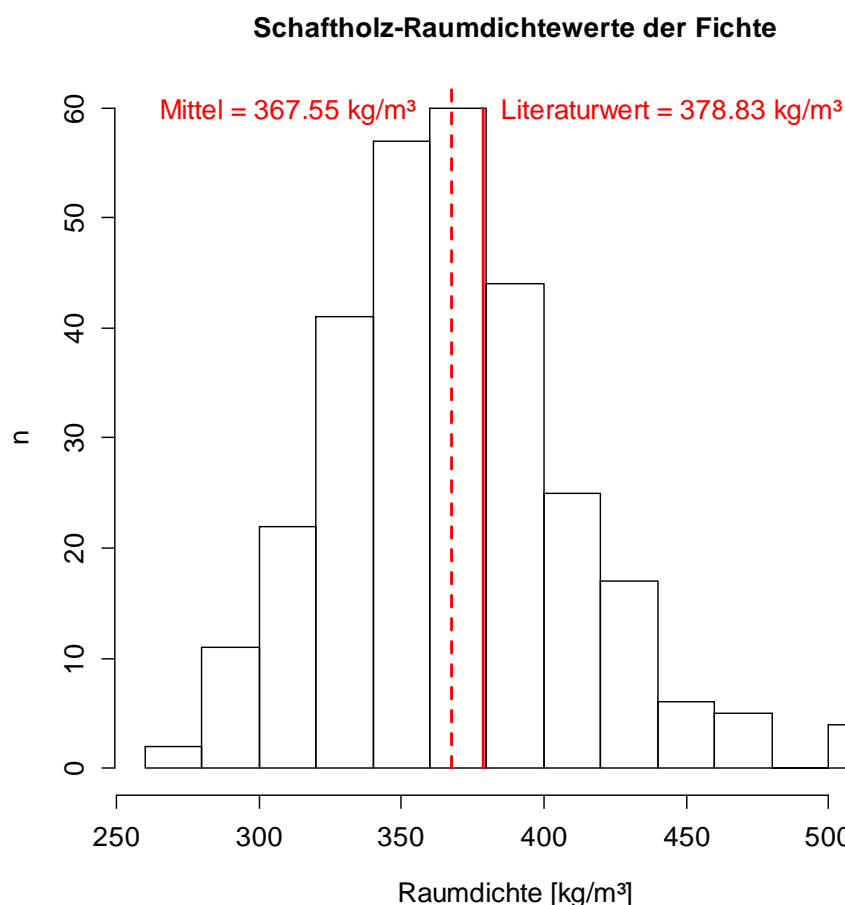
Der Vergleich mit den Raumdichte-Literaturwerten (Kollmann, 1987) zeigt erwartungsgemäß Abweichungen. Im Falle der Kiefer (-8 %) und insbesondere der Eiche (- 9%) fallen sie deutlich aus, während bei Buche und Douglasie die Übereinstimmung sehr gut ist. Der für die Fichte ermittelte Wert liegt etwa 3 % unter dem entsprechenden Literaturwert, während bei der Tanne (bei allerdings kleinem Stichprobenumfang) der Literaturwert um 6 % übertroffen wird. Bei der Fichte wurde geprüft, ob sich die Raumdichte regional unterscheidet, da der größere Teil der Beobachtungen aus Baden-Württemberg stammt. In der Tat ist die Raumdichte der Probestämme aus der bundesweiten Kampagne signifikant höher als die Raumdichte der Fichte aus Baden-Württemberg und liegt mit 379,75 kg m<sup>-3</sup> ziemlich genau beim Literaturwert von 378,83 kg m<sup>-3</sup>, während die Fichten aus Baden-Württemberg eine mittlere Raumdichte von 354,18 kg m<sup>-3</sup> aufweisen. Die Abweichung zwischen den bundesweiten und den in Baden-Württemberg erhobenen Datensatz lässt sich mit dem Alter der Fichten erklären. Wie im folgenden Abschnitt gezeigt, besteht nämlich bei der Fichte zwischen der Raumdichte und der mittleren Jahrringbreite ein negativer Zusammenhang, d. h. je schmaler der Jahrring, umso höher die Dichte. Tatsächlich sind die Fichten aus Baden-Württemberg im Mittel jünger bzw. weisen eine signifikant höhere mittlere Jahrringbreite (im  $d_{1,3}$ ) auf (was letztlich Ausdruck eines rascheren Wachstums ist). Bei der Buche, von der ebenfalls ein erheblicher Teil der Beobachtungen aus Baden-Württemberg stammt, lässt sich dagegen kein signifikanter Unterschied zwischen den bundesweiten und den baden-württembergischen Daten feststellen. Auch hier liegt der Mittelwert der bundesweiten Daten mit 558,99 kg m<sup>-3</sup> fast exakt beim Literaturwert (558,28 kg m<sup>-3</sup>). Wenn man innerhalb Baden-Württembergs regional differenziert, zeigt sich, dass in der Region Oberschwaben die Raumdichte signifikant ( $p= 0,0377$ ) höher ist als der Bundesdurchschnitt. Auch die Buchen aus Baden-Württemberg sind bei gleichem  $d_{1,3}$  etwas jünger und weisen daher größere mittlere Jahrringbreiten auf. Im Unterschied zur Fichte haben die Buchen aus Baden-Württemberg im Mittel jedoch eine etwas höhere Raumdichte (565,79 kg m<sup>3</sup>), da bei der Buche die Raumdichte mit der Jahrringbreite positiv korreliert (wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird). Diese Befunde belegen, dass die Raumdichten durchaus standörtlich bedingt regional variieren. Berücksichtigt man jedoch das Alter bzw. die mittlere Jahrringbreite (die dem mittleren jährli-

chen Durchmesserzuwachs entspricht), lassen sich diese standörtlich bedingten Unterschiede gut erklären.

**Tabelle 3. Gemessene Raumdichten [ $\text{kg m}^{-3}$ ] des Derbholzes im Vergleich mit Literaturwerten (Kollmann, 1987). Bei den Nadelbäumen handelt es sich um Schaftderbholz, bei den Laubbäumen sind auch Derbholzäste einbezogen**

Baumart	Mittel	Standardabweichung	n	RD Literaturwert
FI	367,55	42,06	294	378,83
TA	385,05	39,14	28	362,85
DGL	420,34	43,86	41	414,07
KI	398,02	36,87	131	430,71
BU	562,73	34,09	269	558,28
EI	518,82	34,65	107	570,70

Der Vergleich mit den Literaturwerten (Tabelle 3) zeigt somit, dass bundesweit die Raumdichten bei Fichte und Buche im Probematerial gut repräsentiert sind, wenn man den Literaturwert als Referenz betrachtet und den Einfluss des Alters bzw. der mittleren Jahrringbreite berücksichtigt. Die Verteilung der Raumdichte ist beispielhaft für die Fichte in Abbildung 4 dargestellt.



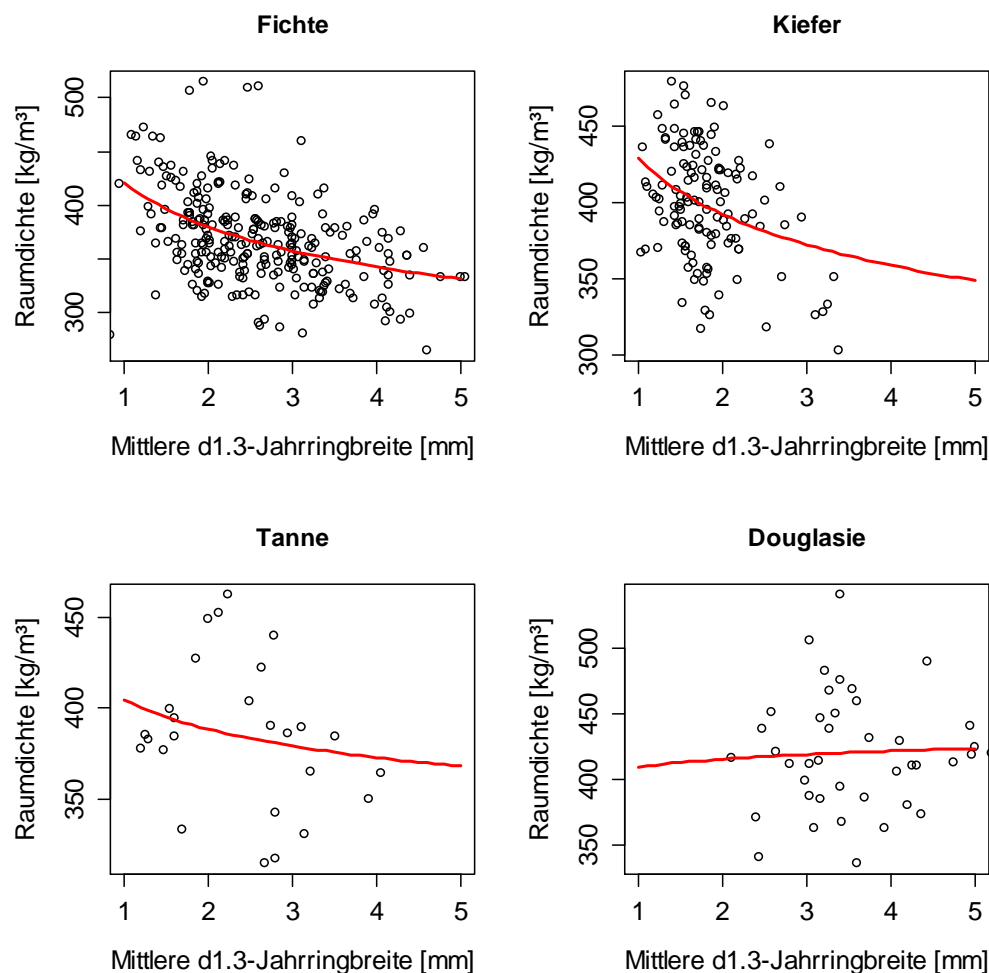
**Abbildung 4. Verteilung der Schaftholz-Raumdwichten der Fichtenprobabäume**

Bei Kiefer und Eiche finden sich, wie oben bereits erwähnt, größere Abweichungen zwischen den beobachteten Mittelwerten des Datenmaterials und den entsprechenden Literaturwerten:

mit rund  $398 \text{ kg m}^{-3}$  weicht der Mittelwert der beprobten Kiefern deutlich vom Literaturwert von  $430,7 \text{ kg m}^{-3}$  ab; bei der Eiche ist der Unterschied mit  $518,8$  zu  $570,7 \text{ kg m}^{-3}$  noch größer. Auch hier ist zu vermuten, dass ein Alterseinfluss vorliegt, allerdings kann dies nicht überprüft werden, da die Altersverteilung der Referenzwerte aus der Literatur nicht bekannt ist.

### 3.1.2 Zusammenhang zwischen Raumdichte und mittlerer Jahrringbreite

Wie im vorigen Abschnitt bereits erwähnt, wurde geprüft, inwieweit die Raumdichte von der mittleren Jahrringbreite (bzw. dem mittleren jährlichen Durchmesserzuwachs) abhängt. Eine Untersuchung an den gewonnenen Proben (Stammscheiben) war aus Kostengründen nicht möglich. Statt dessen wurde die für einen Baum ermittelte Derbholzraumdichte über der mittleren Jahrringbreite des  $d_{1,3}$  aufgetragen. Das Alter selbst wurde auf etwa 10 Jahre genau anhand des Stocks bestimmt und trifft daher streng genommen für den  $d_{1,3}$  nicht ganz zu, daher ist die auf diese Weise hergeleitete mittlere Jahrringbreite des  $d_{1,3}$  nur als Näherung zu betrachten.

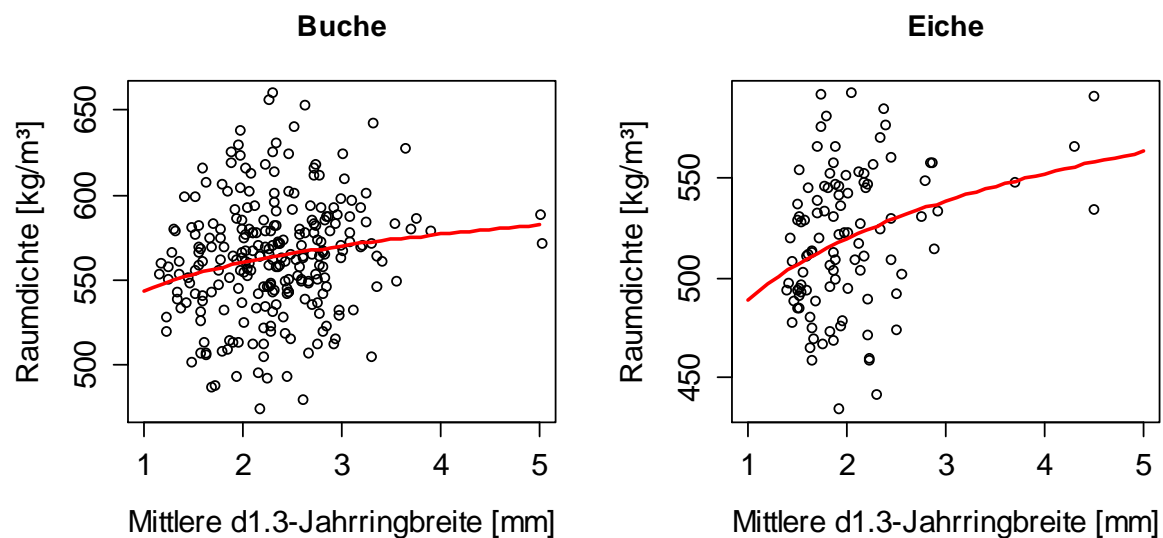


**Abbildung 5. Zusammenhang zwischen Derbholzraumdichte und mittlerer Jahrringbreite des  $d_{1,3}$  bei den Nadelbaumarten**

Bei Fichte und Kiefer (Abbildung 5) findet sich die erwartete Abhängigkeit, dass die Raumdichte mit zunehmender mittlerer Jahrringbreite abnimmt; allerdings zeigt die große unerklärte Reststreuung, dass dieser Zusammenhang nicht sehr straff ist. Bei Tanne und Douglasie ist (vermutlich aufgrund der geringen Fallzahl) der Zusammenhang statistisch nicht gesi-



chert. Bei Buche und Eiche (Abbildung 6) verhält es sich umgekehrt: hier nimmt die Raumdichte tendenziell mit der mittleren Jahrringbreite zu. Ein Einfluss des Alters auf die Raumdichte ist offensichtlich gegeben, wenngleich überwiegend schwach ausgeprägt und bei Nadel- und Laubbäumen nicht einheitlich. Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, erklärt der Zusammenhang zwischen Jahrringbreite und Raumdichte regionale Variationen. Inwieweit das Alter als Prädiktor der Biomassefunktion relevant ist, wird im Abschnitt über die Anpassung von Biomassefunktionen näher behandelt.



**Abbildung 6. Zusammenhang zwischen Derbholzraumdichte und mittlerer Jahrringbreite des  $d_{1,3}$  bei den Laubbaumarten**

### 3.1.3 Raumdichte der Äste

Aus der Literatur ist bekannt, dass sich die Astaumichten von den Schaftholz-Raumichten unterscheiden; im Allgemeinen besitzen Äste höhere Raumichten. Astaumichten wurden verfahrensbedingt bei den Nadelbäumen im Rahmen dieser Studie nicht bestimmt. Daher konnte das Astvolumen der Nadelbaum-Probeebäume nicht berechnet werden. Eine Unterscheidung der Raumichten nach Derb- und Reisholz an Nadelbäumen ist lediglich innerhalb des Schafts möglich, während bei Laubbäumen Reisholz auch aus den Ästen beprobt wurde. In Tabelle 4 sind die verschiedenen Raumdichtewerte zusammengestellt. Es zeigt sich generell, dass das Reisholz höhere Dichten aufweist als das Derbholz, allerdings gilt dies primär für die zusätzliche Unterscheidung nach Schaft- und Astholz. Deutlich belegt ist dies nur für die Laubbäume sowie die Kiefer, die mit demselben Verfahren (RBS) aufgenommen worden ist, wo getrennte Proben nach Schaft- und Astholz gewonnen wurden. Bei den Nadelbäumen stammen alle Holzproben, an denen die Raumdichte bestimmt wurde, nur aus dem Schaft. Bei Fichte und Tanne zeigen sich auch hier Unterschiede (nämlich höhere Raumichten des Reisholzes), wobei wegen des unterschiedlichen Stichprobenumfangs diese Differenz nur bei der Fichte signifikant ist. Bei der Douglasie ist das Verhältnis jedoch umgekehrt: das Reisholz im Schaft hat hier eine (signifikant) niedrigere Raumdichte als das Derbholz. Auch bei der Kiefer, die nach dem Nadelbaumverfahren aufgenommen wurden, ist die Raumdichte des Reisholzes im Schaft tendenziell geringer als die des Derbholzes, jedoch ist dieser Unterschied nicht gesichert. Bei der Kiefer, für die auch Raumichten aus den

Ästen bestimmt wurden, bestätigt sich dagegen, dass Astholz dichter ist als Schaftderbholz. Allerdings ist zu beachten, dass sich bei der Kiefer die zwei Teilkollektive (Nadelbaumverfahren, RBS-Verfahren) insofern unterscheiden, als es sich bei den mit dem Nadelbaumverfahren aufgenommenen Kiefern um schwächere Exemplare handelt (mit einem mittleren  $d_{1,3}$  von 20,5 cm und einer mittleren oberirdischen Biomasse von 185 kg), während die RBS-Kiefern im Mittel deutlich stärker sind (mittlerer  $d_{1,3}$  = 40,9 cm und mittlere oberirdische Biomasse = 875 kg). Daher sind die schwächeren Probestämme mit einer niedrigeren Raumdichte auch überwiegend jünger. Inwieweit ein Alterseffekt vorliegt oder Einflüsse unterschiedlicher Wachstumsbedingungen wirksam sind, kann hier nicht geklärt werden.

**Tabelle 4. Vergleich der Raumdichten von Derbholz (> 7 cm m. R.) und Reisholz**

Baumart	Mittlere Raumdichte [kg m <sup>-3</sup> ]		N	Verhältnis RD Reisholz zu Derbholz	t-Wert	p	
	Derbholz	Reisholz					
FI	365,70	404,73	271	1,107	-13,18	7,33E-31	***
TA	385,39	400,61	26	1,040	-1,77	0,08967239	.
DGL	420,34	408,47	41	0,972	2,09	0,04335533	*
KI (NB)	363,49	355,60	38	0,978	1,34	0,18693972	
KI (RBS)	408,52	443,08	92	1,085	-6,88	7,48E-10	***
BU	563,09	600,01	258	1,066	-13,62	3,66E-32	***
EI	518,87	568,72	105	1,096	-12,94	2,11E-23	***

*Hinweis: Zu beachten ist, dass bei den Nadelbäumen nur Reisholz im Schaft, nicht jedoch in den Ästen beprobt wurde. Die Kiefer stellt einen Sonderfall dar, da sie teilweise wie ein Nadelbaum (bei entsprechender Morphologie) oder wie ein Laubbaum (mit dem RBS-Verfahren) aufgenommen wurde. Es sind nur Beobachtungen von Bäumen berücksichtigt, für die beide Messwerte erhoben wurden. Daher wurde ein paariger t-Test durchgeführt.*

Da im Rahmen dieser Untersuchung keine Ast-Raumdichten für die Nadelbäume ermittelt werden konnten, kann die Korrektheit der aus der Literatur (Hakkila, 1989) entnommenen Verhältnisse zwischen Ast- und Schafttraumdichte nicht überprüft werden. Neueres Datenmaterial über Ast-Raumdichten liegt aus österreichischen Untersuchungen vor (Tabelle 5, Ledermann und Neumann, 2006). Die Äste wurden in drei Größenklassen eingeteilt (Astbasisdurchmesser über 7 cm; zwischen 3 und 7 cm und unter 3 cm). Die Raumdichten wurden aus den atro-Rohdichten unter Berücksichtigung des Volumenschwindmaßes umgerechnet. In der Untersuchung von Ledermann und Neumann (2006) wurden jedoch keine korrespondierenden Schaftderbholz-Raumdichten bestimmt, so dass das Verhältnis Astholz-Raumdichte zu Schaftderbholz-Raumdichte nicht direkt dargestellt werden kann. Unterstellt man für die österreichischen Daten die bekannten Literaturwerte für die Schaft-Derbholztraumdichte, z. B. 378,83 für die Fichte, so ergibt sich für die Fichte aus den österreichischen Asttraumdichten (gemittelt ca. 654) ein Quotient von ca. 1,73, welcher deutlich über dem von Hakkila (1989) mitgeteilten Wert für Nadelbäume von 1,3444 liegt. Dieser Befund deutet an, dass die bisher verwendeten Verhältnisfaktoren eine weitere Unsicherheit in der synthetischen Biomassefunktion darstellen.

**Tabelle 5. Ast-Raumdichten in kg m<sup>-3</sup> nach Ledermann und Neumann (2006)**

Baumart	Aststärkeklasse (Basisdurchmesser)		
	> 7 cm	3 bis 7 cm	< 3 cm
Fichte ( <i>Picea abies</i> L.)	-	652,8	655,5
Tanne ( <i>Abies alba</i> )	581,4	588,2	540,7
Buche ( <i>Fagus sylvatica</i> )	692,1	646,9	590,3
Eiche ( <i>Quercus spec.</i> )	625,1	661,1	550,5
Hainbuche ( <i>Carpinus betulus</i> )	695,9	686,1	620,4

### 3.2 Derbholzvolumenschätzung von BDAT

Für jeden Probebaum wurde das Derbholzvolumen mit BDAT in zwei Varianten berechnet: mit dem  $d_{03}$  bzw. den  $d_7$  als oberem Durchmesser. Vergleicht man das gemessene („beobachtete“) Derbholzvolumen mit den jeweiligen BDAT-Derbholzvolumina, lässt sich Folgendes feststellen.

Bei der Fichte unterschätzen beide Varianten des BDAT-Derbholzvolumens das beobachtete Derbholzvolumen. Dabei unterschätzt das  $d_7$ -abhängige BDAT-Derbholzvolumen geringfügig weniger als das  $d_{03}$ -abhängige BDAT-Derbholzvolumen. Betrachtet man jedoch die Residuen, so zeigt sich, dass das  $d_{03}$ -abhängige BDAT-Derbholzvolumen das gemessene Derbholzvolumen besser schätzt. Offensichtlich ist der Bias (systematische Abweichung) beim  $d_{03}$ -abhängigen BDAT-Derbholzvolumen größer, die Reststreuung jedoch geringer, was so interpretiert werden kann, dass mit dem  $d_{03}$  als oberem Durchmesser die Formigkeit etwas besser erfasst wird als mit dem  $d_7$ . Die Unterschätzung des wahren Derbholzvolumens durch BDAT liegt bei etwa 2,5 %. Für die Kiefer ergibt sich folgendes Bild: die systematische Unterschätzung des „wahren“ Derbholzvolumens durch BDAT ist im Unterschied zur Fichte beim  $d_7$ -abhängigen Derbholzvolumen mit rund 5 % stärker ausgeprägt als beim  $d_{03}$ -abhängigen (4,1 %). Auch hier ist die Formigkeitserfassung durch den  $d_{03}$  trotz systematischer Abweichung besser als durch den  $d_7$ . Bei der Buche ist die systematische Abweichung mit ca. 4,2 % etwa so hoch wie bei der Kiefer; auch hier schneidet das  $d_{03}$ -abhängige BDAT-Derbholzvolumen im Vergleich zum  $d_7$ -abhängigen etwas besser ab. Die Eiche zeigt schließlich die größten systematischen Abweichungen zwischen dem BDAT-Derbholzvolumen und dem beobachteten: sie liegen in der Größenordnung von etwa 10,5 % Unterschätzung durch BDAT.

Offensichtlich liegen die aktuell erfassten Derbholzvolumina bei allen vier untersuchten Baumarten in unterschiedlichem Ausmaß systematisch höher als die von BDAT geschätzten Werte. Am Beispiel der Fichte wird der Ursache im Folgenden noch näher nachgegangen. Bei den Laubbäumen Buche und Eiche liegt eine mögliche Erklärung darin, dass bei den aktuell beprobten Bäumen mehr Derbholz in der Krone enthalten ist als dies bei Probebäumen der historischen Volumenerhebungen der Fall war, welche die Datenbasis von BDAT bilden. Dieser Sachverhalt ist auch damit zu erklären, dass in dieser Untersuchung durchaus herrschende Bäume enthalten sind, während das historische Datenmaterial vielfach aus Durchforstungsversuchen stammt, bei denen vorwiegend kleinkronige Bäume geerntet wurden.

### 3.3 Überprüfung der dendrometrischen Grundlagen

Die bisherige Analyse der Komponenten des „synthetischen“ Biomassemodells zeigt, dass eine Reihe von Annahmen zu hinterfragen ist. Die wesentliche Begründung für die Konzeption des synthetischen Biomassemodells waren (1) das Fehlen von Biomassefunktionen, welche großräumig für Deutschland als gültig betrachtet werden können, und (2) die Überlegung, dass das Derbholzvolumen eine relativ genaue Eingangsgröße für die Biomasseschätzung darstellt. Will man die oberirdische Biomasse eines Einzelbaums anhand des Derbholzvolumens herleiten, sind folgende Faktoren bzw. Relationen relevant: die angenommenen Raumdichten sowie das Verhältnis der Raumdichten des Schaft- und des Astholzes, die Expansion des Derbholzes zum gesamten oberirdischen Baumholz sowie die Derbholzschätzung selbst. Anhand des gewonnenen Datenmaterials konnte zudem geprüft werden, wie gut die Derbholzschätzung mit BDAT ist. Hier zeigen sich insbesondere bei den Laubbäumen Buche und Eiche bei den Bäumen stärkerer Dimensionen ( $d_{1,3} > 40 \text{ cm}$ ) die Tendenz einer systematischen Unterschätzung. Dieser Befund ist mit dem Datenmaterial erklärbar, welches für die Kalibrierung der BDAT-Schaftkurvenmodelle herangezogen worden ist, im Grunde sind es dendrometrische Aufnahmen aus dem frühen 20. Jahrhundert, welches auch die Grundlage der gängigen Volumentafeln darstellt. Es ist sehr wahrscheinlich, dass stark dimensionierte Bäume im historischen Datenmaterial weniger stark repräsentiert sind, während bei der Auswahl der Bäume in dieser Untersuchung bewusst auch stärkere Bäume einbezogen worden sind, wenngleich auch hier die Zielvorgaben nur bedingt erfüllt worden sind, weil stärkere Bäume schwieriger zu beproben sind.

#### 3.3.1 Analyse der Derbholzvolumenschätzung am Beispiel der Fichte

Da das Derbholzvolumen eine zentrale Rolle spielt, wird im Folgenden die Herleitung des Derbholzvolumens am Beispiel der Fichte eingehender analysiert. Eine wesentliche Erklärung des Unterschieds zwischen dem gemessenen und dem mit BDAT modellierten Derbholzvolumens liegt in der Art der Volumenberechnung. Beim vorliegenden Datenmaterial wurde versucht, das Volumen möglichst genau zu bestimmen, da die Biomasse über die Umrechnung des Volumens mit Raumdichtefaktoren berechnet wurde. Daher wurde das Volumen einschließlich des Wurzelstocks (also bodeneben) unter Messung eines weiteren Durchmessers in 0,5 m Höhe über Grund (also im Bereich des Wurzelanlaufs) erfasst. Bei den historischen Daten liegt der tiefste Durchmesser bei 1 m über Grund. Außerdem ist laut Angaben in den Grundner-Schwappach'schen Volumentafeln das Wurzelstockvolumen im Derbholz nicht mit enthalten; ob das Baumholz das Wurzelstockholz einschließt, ist indes nicht ganz klar.<sup>1</sup> Beim BDAT-Derbholzvolumen ist der Wurzelstock allerdings wie in dieser Untersuchung ebenfalls eingeschlossen, da bei der Voluminierung des untersten Abschnitts die volle 2-m-Sektion unterstellt wird. Ein wesentlicher Teil der Unterschätzung des Volumens lässt sich mit der sektionsweisen Kubierung in 2 m Sektionen erklären.

---

<sup>1</sup> Grundner-Schwappach (1952) S. 10: „Derbholz ist die oberirdische Holzmasse des Baumschaftes und der Äste von über 7 cm Durchmesser (am schwächeren Ende) mit Rinde unter Ausschluß des bei der Fällung am Wurzelstock bleibenden Schaftholzes. Unter Baumholz versteht man dagegen die gesamte oberirdischen Holzmasse eines Stammes, d. h. das Derbholz (über 7 cm) und das Reisholz (unter 7 cm).“

### 3.3.2 Verfahren und Definitionen zur Berechnung des Derbholzvolumens

Das Derbholzvolumen [ $\text{m}^3$  mit Rinde] umfasst alle oberirdischen Sprosskomponenten mit einem Minstdurchmesser von 7 cm mit Rinde. Im Unterschied zu Grundner-Schwappach wird das Wurzelstockholz mit einbezogen. Denkbar wäre auch eine weitere Untergliederung in Derbholz einschließlich Wurzelstock und solches ohne Wurzelstock.

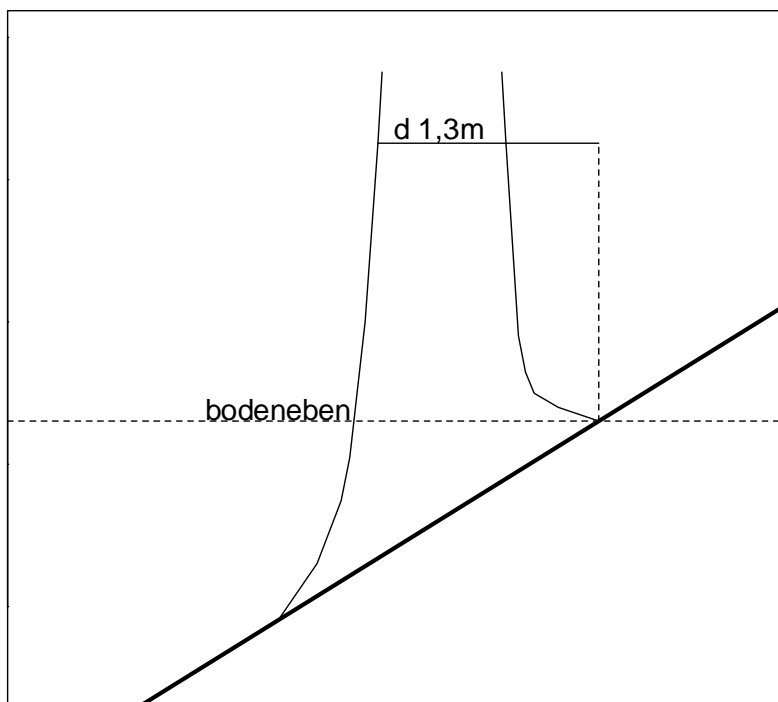
Je nach Vermessung und Voluminierung wird die Bestimmung des Derbholzvolumens unterschieden in:

- (1) Volumentafel- bzw. BDAT-konform: hergeleitet aus 2m-Sektionen, kubiert mit Mittenflächenformel (in Sektionsmitte gemessener Schaftdurchmesser) (Kublin & Scharnagl, 1988, S. 54): die Schaftkurve wird über die Durchmesser in 1, 3, 5, ... m Schafthöhe gemessen. Die Messung endet in Höhe des Derbholzdurchmessers von 7 cm m. R.; das ggf. zwischen der letzten ganzen 2m-Sektion und der Derbholzhöhe vorkommende Reststück wird ebenfalls nach Mittenflächenformel voluminiert. Bei diesem Verfahren ist in der ersten 2m-Sektion der Wurzelstock einbezogen, wenngleich die genaue Form im Wurzelanlauf nicht berücksichtigt wird, da auch die unterste 2m-Sektion als Zylinder mit dem Durchmesser in 1 m Schafthöhe voluminiert wird. Bei der Voluminierung von BDAT wird daher konsequenterweise das Volumen der modellierten Schaftkurve nach dem Volumentafelverfahren in 2m-Sektionen berechnet.<sup>2</sup>
- (2) Biomasse-konform: möglichst exakte Bestimmung des Derbholzvolumens, unter Berücksichtigung des Wurzelanlaufs, einschließlich des Wurzelstocks, indem der untere Schaftbereich durch eine engere Abfolge von Schaftdurchmessern besser erfasst wird. Die Voluminierung der Sektionen erfolgt als Kegelstumpf.

Bei der Vermessung wurde versucht, den Wurzelstock möglichst gut zu approximieren, was bei Bäumen am Hang zu relativ aufwändigen Messungen und Berechnungen führt. Im Rahmen der Auswertung wurden im Wurzelstockbereich zwei Volumina berechnet, die bei Bäumen am Hang teilweise deutlich unterschiedlich sind. Da Bäume am Hang grundsätzlich bei der stehenden Vermessung von der Hangoberseite erfasst werden, ergeben sich für den Wurzelstock in Hanglagen zwei Teile (siehe Abbildung 7): der Teil, der sich bei ebenem Boden ergibt und der Teil, der sich hangseitig darunter befindet. Da die Bäume aus Stabilitätsgründen am Hang den Stammfuß besonders ausbilden, finden sich entsprechend relativ große Volumina (bzw. Biomassen) in diesem unteren Bereich, die allerdings aus messtechnischen Gründen mit gewissen Unsicherheiten behaftet sind. Für die Biomasseberechnung wird daher folgende Volumendefinition vorgeschlagen: es wird grundsätzlich das „boden-ebene“ Volumen berechnet; bei Bäumen am Hang gilt als Bodenebene die waagrechte Ebene, welche durch den hangoberseitigen „Bodenberührungspunkt“ des Stammfußes geht. Der darunter befindliche, hangunterseitige Teil des Wurzelstocks wird somit nicht in die oberirdische Biomasse miteinbezogen.

---

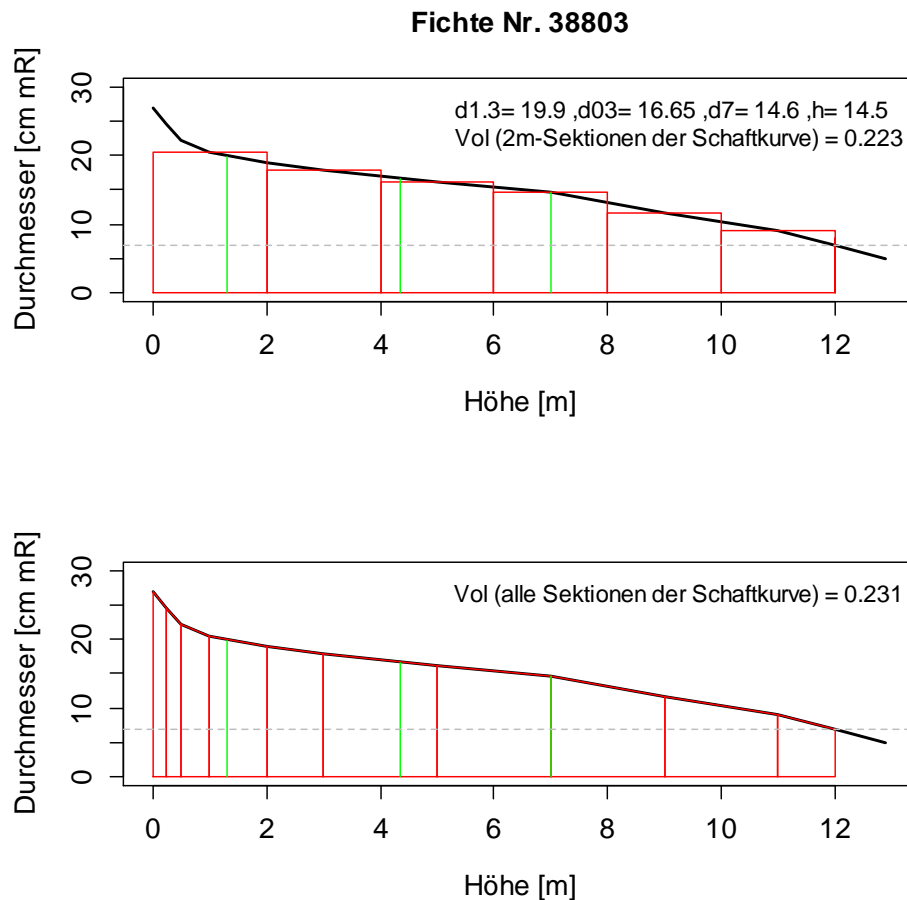
<sup>2</sup> In Prodan (1965) wird das Problem der Sektionierung im Bereich des Wurzelanlaufs ausführlich erörtert und die Notwendigkeit einer „engmaschigeren“ Vermessung im Erststammbereich betont; im praktischen Versuchswesen wurden bei der Stammvermessung allerdings weit überwiegend 2m-Sektionen aufgenommen; genauere Vermessungen im Wurzelanlauf waren sehr selten bzw. standen nicht in ausreichendem Umfang zur Verfügung, so dass für die Entwicklung der BDAT-Schaftkurven ausschließlich Stammdaten aus 2m-Sektionen verwendet worden sind (Kublin, pers. Mitteilung, 25.04.2012)



**Abbildung 7. Definition des oberirdischen Volumens bzw. der Biomasse an Bäumen am Hang; bodeneben ist die waagrechte Ebene, welche durch den hangoberseitigen „Bodenberührungspunkt“ des Stammfußes geht, von welchem aus der  $d_{1,3}$  gemessen wird.**

Anhand der erfassten Schaftkurven lassen sich die Unterschiede der zwei Voluminierungsverfahren darstellen, wie an einem Beispiel in Abbildung 8 dargestellt ist. Das volumentafelkonforme Verfahren unterschätzt das „wahre“ Derbholzvolumen systematisch, weil im Wurzelanlauf die Schaftform durch die unterste 2m-Sektion nur grob approximiert wird. Aus Sicht der Holzverwendung ist diese Konvention durchaus nachvollziehbar, nicht jedoch, wenn es darum geht, das Volumen möglichst genau zu bestimmen, wie es für die Ermittlung der oberirdischen Biomasse erforderlich ist. Daher liefert BDAT ein Derbholzvolumen, welches systematisch niedriger als das „wahre“ Volumen ist.

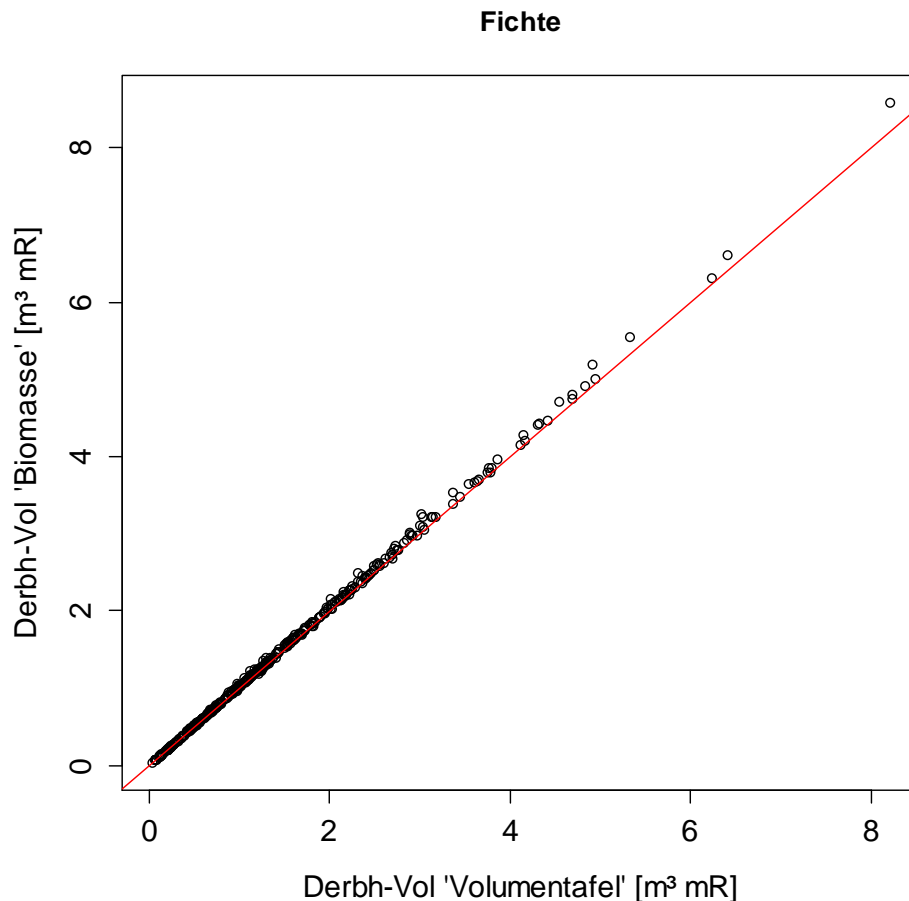
Im Mittel ist bei der Fichte das biomasse-konforme Derbholzvolumen um ca. 2,5% größer als das volumentafel-konforme (Abbildung 9). Bei Kiefer, Buche und Eiche wurden diese Vergleichsrechnungen nur für den Stamm bis zum Kronenansatz durchgeführt, da oberhalb des Kronenansatzes die Derbholzhöhe nicht mehr eindeutig definiert ist. Für die nach dem Nadelbaumverfahren erfassten Kiefern (in der Regel schwächere Exemplare bis zu einem  $d_{1,3}$  von ca. 35 cm) liegt die Abweichung bei 0,8 %. Die Abweichungen zwischen „exakter“ und Volumentafel-konformer Voluminierung liegen bei der Buche bei fast 3 %, bei der Eiche bei etwa 2,5 %; für die nach RBS (wie Laubbäume) aufgenommen Kiefern beträgt die Abweichung nicht ganz 1 %, was mit dem Wert für die mit dem Nadelbaumverfahren erfassten Kiefern gut übereinstimmt. Vergleicht man dagegen bei Buche und Eiche das gesamte Derbholzvolumen zwischen BDAT und den beobachteten Werten, zeigen sich noch deutlichere Abweichungen; so unterschätzt BDAT das gesamte Derbholzvolumen bei der Buche um rund 5 %, bei der Eiche sogar um fast 11 %. Bei der Kiefer liegt bezogen auf das gesamte Derbholzvolumen die Unterschätzung durch BDAT bei gut 4 %. Diese systematische Unterschätzung des Derbholzvolumens durch BDAT muss sich daher auf die Schätzung der oberirdischen Biomasse auswirken, wenn das BDAT-Volumen die Eingangsgröße darstellt.



**Abbildung 8. Volumentafel-konformes Verfahren der Berechnung des Derbholzvolumens eines Schafts anhand von 2m-Sektionen (oben) im Unterschied zur exakteren Voluminierung („Biomasse-konform“) mit variierenden Sektionslängen im Wurzelanlauf (unten)**

### 3.3.3 Erfassung der Formigkeit für die Voluminierung mit BDAT

Bei der 1. und 2. Bundeswaldinventur wurde aus messtechnischen Gründen (Hochkluppe) der obere Durchmesser in 7 m über Grund gemessen ( $d_7$ ); bei der 3. Bundeswaldinventur wird als oberer Durchmesser der Durchmesser in 30% der Scheitelhöhe empfohlen, wobei auch die Option der Messung des  $d_7$  weiter besteht. Auch ist die Messung in exakt 30% der Scheitelhöhe nicht zwingend, wenn aus messtechnischen Gründen (Sichtbarkeit, Störung am Schaft) eine abweichende Messhöhe erforderlich ist (die dann natürlich zu erfassen ist). Theoretisch sollten beide Arten oberer Durchmesser (in fixer oder relativer Höhe) die Schaftform gleichermaßen beschreiben. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde daher geprüft, ob die Derbholzschätzung mit BDAT in Abhängigkeit vom gewählten oberen Durchmesser systematische Unterschiede aufweist. Hierzu wurde für jeden Probebaum das Derbholzvolumen mit BDAT jeweils für die Formigkeitserfassung mit dem  $d_7$  bzw. den  $d_{0.3}$  berechnet und die zwei Werte paarweise verglichen.



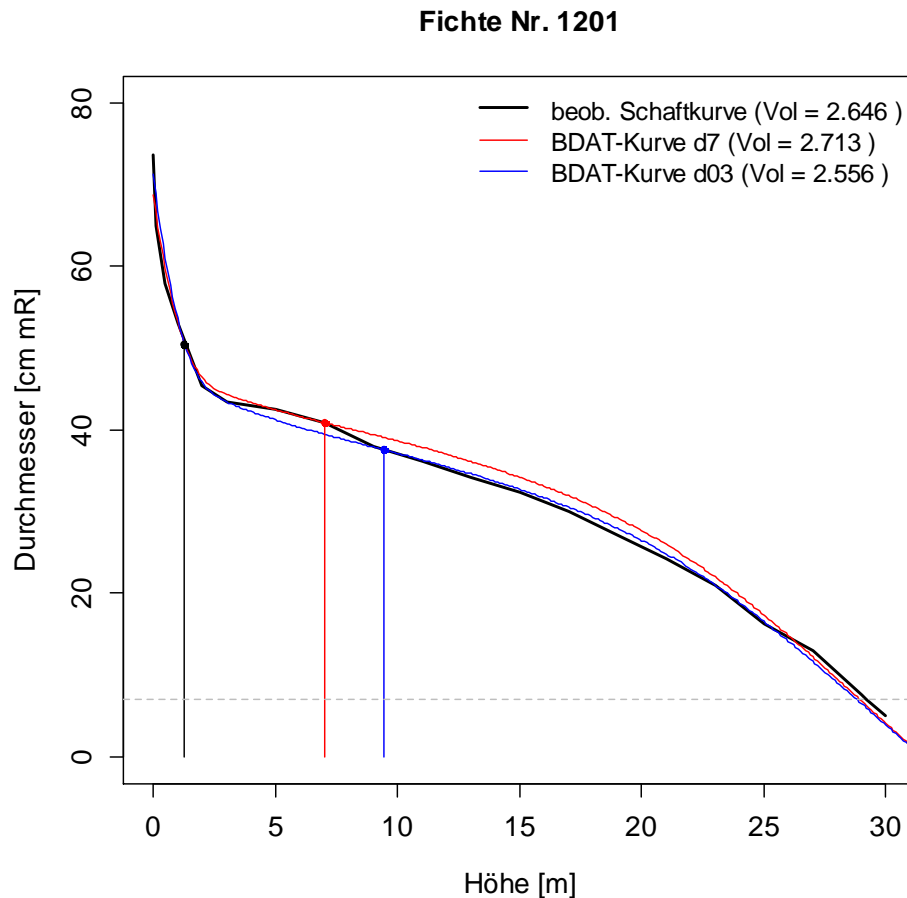
**Abbildung 9. Vergleich der Derbholzvolumina der unterschiedlichen Voluminierungsverfahren „Biomasse“- versus „Volumen tafel“-konform bei der Fichte**

Tatsächlich zeigt sich bei der Fichte, dass die Derbholzvolumenberechnung mit der Formigkeitserfassung durch den  $d_7$  systematisch höhere Werte ergibt als die Berechnung, bei der die Formigkeit mit dem  $d_{03}$  erfasst wird. Offensichtlich führt der  $d_7$  zu einer Schaftkurve, die über derjenigen liegt, welche vom  $d_{03}$  bestimmt wird. Beispielhaft ist dies in Abbildung 10 zu sehen. Es treten zwar auch umgekehrte Fälle auf, bei denen die durch  $d_{03}$  bestimmte Schaftkurve systematisch über derjenigen liegt, die im  $d_7$  eingehängt ist, und es gibt auch die Beispiele, dass beide Schaftkurven nahezu identisch sind. Eine gute Übereinstimmung ist in Abbildung 11 dargestellt. Hier liegen beide Schaftkurven fast genau übereinander. Außerdem zeigt sich eine weitgehend gute Übereinstimmung zwischen der von BDAT modellierten und der beobachteten Schaftkurve. Die Volumenberechnung zeigt allerdings, dass die im  $d_{03}$  eingehängte Kurve ein etwas höheres Volumen erbringt. Das tatsächliche Volumen der beobachteten Kurve ist noch höher, weil der Wurzelanlauf genauer erfasst wird.

Vergleicht man das BDAT-Derbholzvolumen mit dem tatsächlich gemessenen, so liegen beide Varianten ( $d_7$ - bzw.  $d_{03}$ -abhängiges BDAT-Volumen) systematisch niedriger als das tatsächliche „exakt“ vermessene Derbholzvolumen, was wie bereits ausgeführt daran liegt, dass BDAT die Schaftkurve volumentafelkonform in 2m-Sektionen integriert. Die systematische Abweichung vom wahren Volumen ist für das  $d_{03}$ -abhängige BDAT-Volumen größer als für das  $d_7$ -abhängige. Trägt man das wahre Derbholzvolumen über dem BDAT-Volumen auf und führt man einen linearen Ausgleich durch, so zeigt sich, dass die unerklärte Varianz (ausgedrückt durch den RMSE) beim  $d_{03}$ -abhängigen BDAT-Volumen niedriger ist als beim



$d_7$ -abhängigen BDAT-Volumen. Daraus lässt sich schließen, dass die im  $d_{03}$  eingehängte Schaftkurve die tatsächliche Form im Mittel besser approximiert.

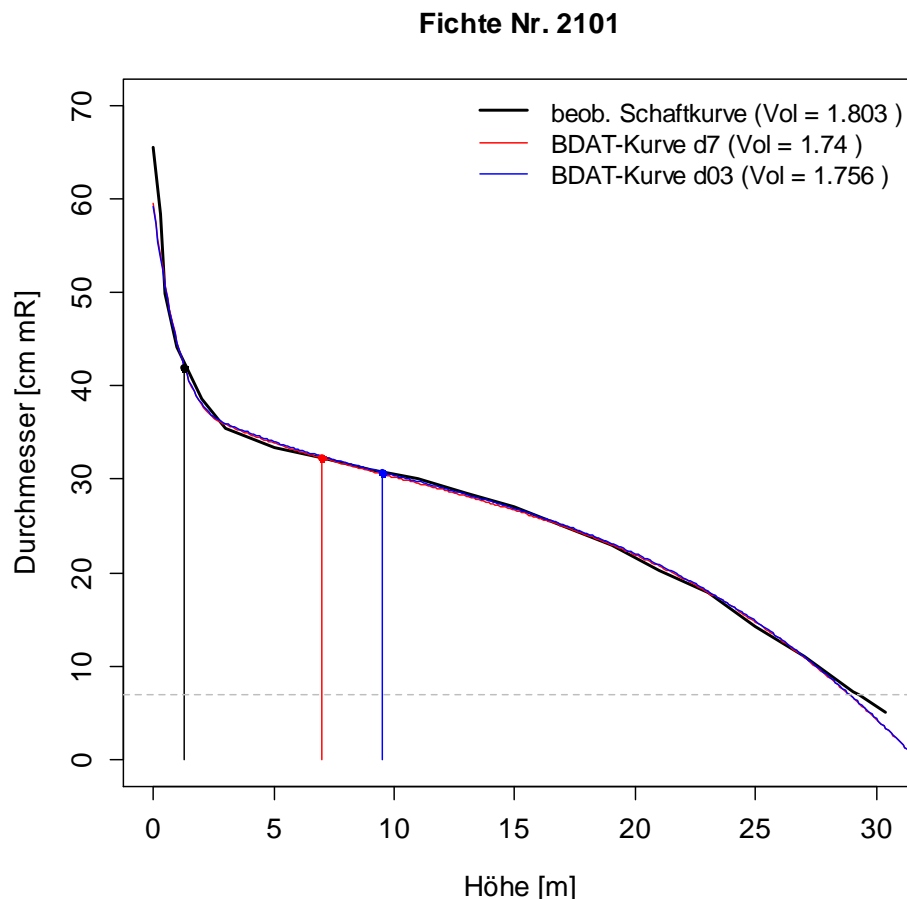


**Abbildung 10.** Für eine Fichte mit  $d_{1,3} = 50,5$  cm und Höhe = 31,5 m ergeben sich unterschiedliche BDAT-Schaftkurven, je nachdem, ob die Schaftkurve (rot) über den  $d_7$  (= 40,9 cm) oder (blau) den  $d_{03}$  (= 37,6 cm) eingehängt wird.

Die Überprüfung der BDAT-Schaftkurven anhand beobachteter Schaftformen liefert Hinweise darauf, dass die beobachteten Schäfte tendenziell im oberen Bereich abholziger verlaufen. Voluminiert man die vermessenen Schaftkurven volumentafel-konform wie bei BDAT, so zeigt sich zwar, dass zwischen diesem beobachteten Derbholzvolumen und dem  $d_{03}$ -abhängigen BDAT-Volumen kein gesicherter Unterschied besteht (der paarige t-Test liefert bei der Fichte einen t-Wert von 1.568 mit  $p = 0,11$ ), das  $d_7$ -abhängige BDAT-Volumen überschätzt jedoch signifikant das beobachtete Volumentafel-konforme Derbholzvolumen.

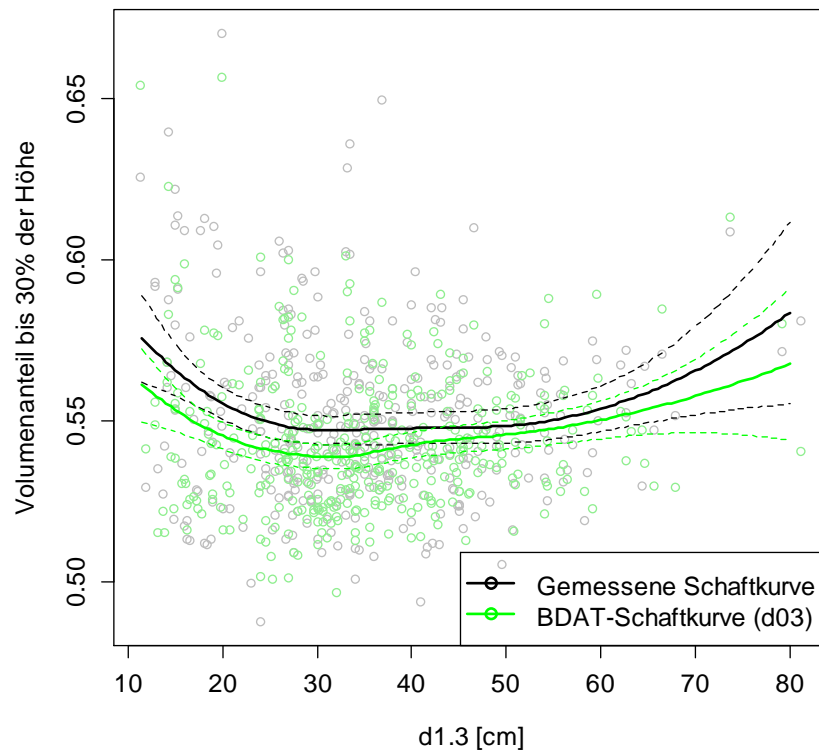
Daraus lässt sich die Hypothese formulieren, dass die BDAT-Schaftkurven Formen repräsentieren, die von Bäumen stammen, die insgesamt weniger abholzige (bzw. vollformiger) waren als die Bäume, die aktuell gemessen wurden. Um diese mögliche Verschiebung der Formverhältnisse zu überprüfen, wurden für die Probestämme Abschnittsvolumina berechnet, und zwar das untere Schaftderbholz bis zur Schafthöhe von 30% der Scheitelhöhe sowie das obere Schaftvolumen zwischen 30% der Scheitelhöhe und der Derbholzhöhe. Diese Abschnittsvolumina wurden für folgende Schaftkurven berechnet: BDAT mit  $d_{03}$ -Einhängung, BDAT mit  $d_7$ -Einhängung sowie die tatsächlich vermessene Schaftkurve mit volumentafel-

konformer Voluminierung in 2m-Sektionen. In Abbildung 12 wird für die Fichte der Anteil des Abschnittsvolumens bis zur Höhe von 30% der Scheitelhöhe über dem  $d_{1,3}$  dargestellt, in Abbildung 13 der Volumenanteil von 30% der Scheitelhöhe bis zur Höhe der Derbholzgrenze. Diese Werte werden in grau für die tatsächlich vermessene Schaftkurve sowie in grün für die mit BDAT modellierte ( $d_{03}$ -eingehängt) Schaftkurve dargestellt und jeweils non-parametrisch mit einer lokalen Polynom-Regression ausgeglichen. Neben der Mittelwertskurve ist das 95%-Konfidenzband (gestrichelte Kurve) eingezeichnet.

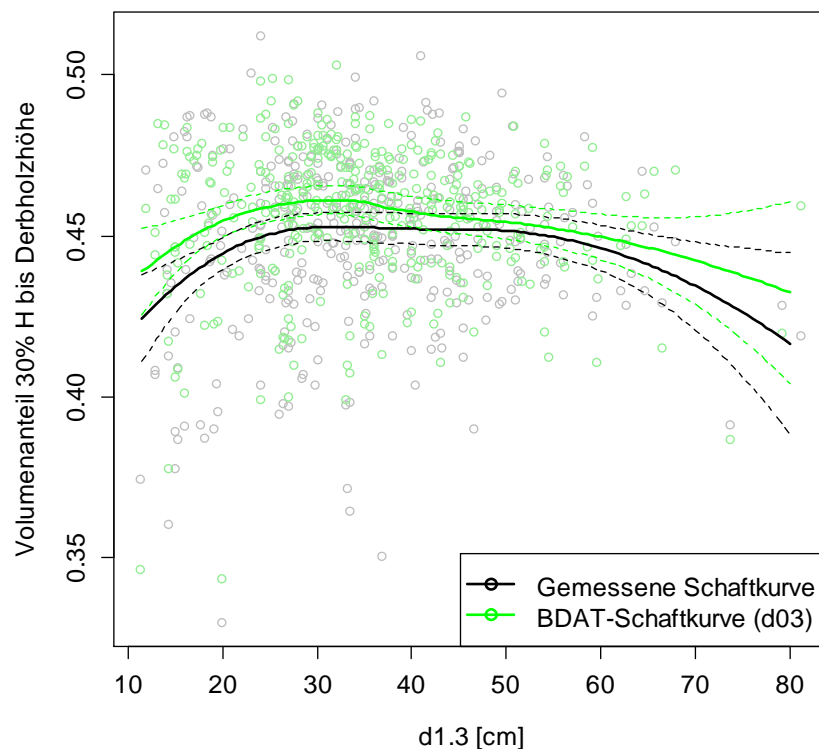


**Abbildung 11.** Für eine Fichte mit  $d_{1,3} = 42$  cm und Höhe = 31,7 m ergeben sich recht gut übereinstimmende BDAT-Schaftkurven, je nachdem, ob die Schaftkurve (rot) über den  $d_7$  (= 32,3 cm) oder (blau) den  $d_{03}$  (= 30,8 cm) eingehängt wird. Die modellierten Schaftkurven reproduzieren die beobachtete Kurve gut.

Für die Fichte sind folgende Trends zu finden: demnach unterschätzt die BDAT-Schaftkurve systematisch das untere Schaftvolumen bis 30% der Scheitelhöhe (die grüne Mittelwertskurve der BDAT-Volumina in Abbildung 12 liegt unterhalb der schwarzen Mittelwertskurve der Volumina der vermessenen Schäfte) und überschätzt das obere Schaftvolumen ab 30% der Scheitelhöhe bis Derbholzhöhe (die grüne Mittelwertskurve der BDAT-Volumina in Abbildung 13 liegt oberhalb der schwarzen Mittelwertskurve der Volumina der vermessenen Schäfte). Dieser Befund gilt für beide Varianten der BDAT-Schaftkurve ( $d_{03}$  bzw.  $d_7$ -Einhängung, die nicht dargestellt ist).



**Abbildung 12. Anteil des Abschnittsvolumens bis zur Höhe von 30% der Scheitelhöhe über dem  $d_{1,3}$  für Fichten**



**Abbildung 13. Volumenanteil von 30% der Scheitelhöhe bis zur Höhe der Derbholzgrenze für Fichten**

Dagegen wird, wie oben bereits erwähnt, das Gesamtvolumen der in 2m-Sektionen gemessenen Schaftkurven von BDAT mit  $d_{03}$ -Einhängung ohne gesicherte systematische Abweichung geschätzt, von BDAT mit  $d_7$ -Einhängung jedoch systematisch überschätzt. An dieser Stelle ist in Erinnerung zu rufen, dass das „exakte“ gemessene Volumen tatsächlich höher

ist, und zwar ausschließlich aufgrund einer genaueren Erfassung des Schafts im Bereich des Erdstammstücks (Wurzelanlauf und Wurzelstock), und daher von BDAT unterschätzt wird.

Die Vermutung, dass die BDAT-Schaftmodelle im oberen Schaftbereich zu vollformig sind, lässt sich durch den Vergleich des gemessenen  $d_{05}$  (Durchmesser in 50% der Scheitelhöhe) mit dem mit der BDAT-Schaftkurve modellierten  $d_{05}$  (in zwei Varianten: BDAT-Schaftkurve mit  $d_{03}$ - bzw.  $d_7$ -Einhängung) überprüfen. Bei der Fichte zeigt sich auch hier ein systematischer Unterschied zwischen den beobachteten und den modellierten  $d_{05}$ -Werten: die  $d_{03}$ -Schaftkurve überschätzt den „wahren“  $d_{05}$  im Mittel um 0,37 cm, die  $d_7$ -Schaftkurve um 0,4 cm.

Als Alternative zu BDAT lassen sich neue Schaftkurvenmodelle auf der Grundlage von B-Splines anpassen; das Verfahren wird von Kublin (2011) beschrieben. Tatsächlich zeigt dieses Modell, wenn man es an das Datenmaterial der Fichten-Biomasse-Probeebäume anpasst, erwartungsgemäß eine bessere Anpassung als die BDAT-Kurven. Dieser Befund muss als Hinweis gesehen werden, dass die BDAT-Modelle an einem größeren aktuellen Datenmaterial überprüft werden sollten. Die vorliegenden Daten reichen jedoch nicht aus, um einen Ersatz für BDAT zu kalibrieren. Der Befund unterstreicht allerdings die Notwendigkeit, obere Durchmesser zu erheben, um Formveränderungen zu berücksichtigen. Auf die mathematisch-statistischen Vorteile alternativer Modelle wird im Bericht von Kublin (2011) näher eingegangen.

### **3.4 Vom Derbholz zum Baumholz: Baumholzexpansionsfunktion**

Im Rahmen der Methodenentwicklung für die Auswertung der Bundeswaldinventur für den Treibhausgasbericht (Zell und Pistorius, 2006) wurde eine als „vorläufig“ bezeichnete Expansionsfunktion anhand der Grundner-Schwappach'schen Volumentafeln in Form einfacher linearer Modelle (Geraden) mit dem Derbholzvolumen als einzigem Prädiktor hergeleitet. Ein Ziel dieser Untersuchung ist es nun, bessere Modelle zu finden, welche dem nicht-linearen Charakter des Zusammenhangs zwischen Baumholzvolumen und Derbholzvolumen Rechnung tragen. Hinzu kommt, dass für die Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche die Volumentafeln nach zwei oder (bei der Buche) drei Altersklassen getrennt sind, was bei dem vorläufigen linearen Modell berücksichtigt wurde, indem nach Altersklassen getrennte Geraden angepasst worden sind. Dieses Vorgehen hat aber den Nachteil, dass beim Wechsel von einer Altersklasse zur nächsten Sprünge auftreten können. Im neuen Ansatz wurde außerdem geprüft, inwieweit die Einbeziehung von  $d_{1,3}$  und Höhe als Kovariablen neben dem Derbholzvolumen die Anpassung verbessert.

Bereits Zell hat sich in seiner Dissertation (2008) mit der Verbesserung der Expansionsfunktionen befasst und nicht-lineare Funktionen mit den Prädiktoren Derbholzvolumen,  $d_{1,3}$  und Höhe aufgestellt. Wenngleich die Modelle einen recht guten Ausgleich der Volumentafelwerte aufweisen, ist ihre Überlegenheit in der praktischen Anwendung begrenzt; zudem ist ihr Verhalten im Extrapolationsbereich problematisch.

Da das Datenmaterial keine Originalbeobachtungen darstellt, sondern aus geglätteten Mittelwertskurven hergeleitet worden ist, erfolgt die Anpassung der Expansionsfunktion zwar technisch als Regression, nicht jedoch im eigentlichen statistischen Sinne, da die tatsächliche Residualvarianz nicht erfasst wird. Vielmehr handelt es sich um eine Interpolation, welche die vorgegeben Glättung im besten Fall reproduziert, jedoch keine Möglichkeit hat, even-

tuelle Fehler der Glättung festzustellen.<sup>3</sup> Gleichzeitig sollte auf die Berücksichtigung des Alters verzichtet werden, um das erwähnte Problem an den Altersklassenübergängen zu vermeiden. In der Tat ist es zwar gelungen, mit einer nichtlinearen Funktion, welche die drei Prädiktoren Derbholtzvolumen,  $d_{1,3}$  und Höhe enthält, eine bestmögliche Anpassung zu erzielen, was jedoch mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist. Die optimale Anpassung war nur mit Hilfe einer Segmentierung, also einer getrennten Anpassung in zwei Abschnitten möglich. Dadurch verdoppelte sich die Anzahl der Parameter, und es kamen noch weitere Parameter hinzu, welche die Knoten bestimmen. Und schließlich war es wegen des nichtlinearen Charakters erforderlich, das Verhalten im Extrapolationsbereich zu beschränken, um unrealistische Größenordnung der Baumholzvolumenschätzung zu verhindern. Insgesamt erforderte dieses Modell 20 Parameter und war daher schon aus Sicht des Sparsamkeits-Prinzips kritisch zu sehen. Entscheidend aber war die Feststellung, dass sich bei der Anwendung der Expansionsfunktion in der synthetischen Biomasseschätzung keine wesentliche Verbesserung gegenüber dem alten Ansatz ergab. Daher wurde nach kritischer Prüfung einem einfacheren nicht-linearen Modell der Vorzug gegeben. Zunächst wurde ein allometrisches Modell mit einem zusätzlichen nichtlinearen Term getestet. Wenngleich dieser Modelltyp eine recht gute Anpassung an das Datenmaterial zeigte, ergab eine detaillierte Residuenanalyse, dass die Anpassung im Schwachholzbereich ( $d_{1,3} < 10$  cm) nach wie vor unbefriedigend war und eine systematische Überschätzung aufwies. Aus diesem Grunde wurde schließlich eine in 3 Abschnitten segmentierte Funktion angepasst. Als Ausgleichsfunktion wurde für jeden Abschnitt folgendes allometrisches Modell mit Konstante verwendet:

$$V_{Bh} = b_{0s} + b_{1s} V_{Dh}^{b_{2s}}$$

$s$  : Segment (Abschnitt)

Wegen der Stetigkeitsbedingung an den Knoten ( $V_1$  und  $V_2$ ) müssen von den insgesamt 9 Koeffizienten nur 7 bestimmt werden, da sich die Konstanten des 2. und 3. Abschnitts aufgrund der Stetigkeitsbedingung ergeben. Sie berechnen sich aus den übrigen Koeffizienten folgendermaßen:

$$b_{02} = b_{01} + b_{11} V_1^{b_{21}} - b_{12} V_1^{b_{22}}$$

$$b_{03} = b_{02} + b_{12} V_2^{b_{22}} - b_{13} V_2^{b_{23}}$$

$V_1$  : 1. Knoten

$V_2$  : 2. Knoten

$b_{01}, b_{11}, b_{21}, b_{12}, b_{22}, b_{13}, b_{23}$  : frei zu bestimmende Koeffizienten

Die Anpassung erfolgte als Optimierungsproblem mit Minimierung der Abweichungsquadrate. Verwendet wurde die R-Prozedur „optim“ mit der Methode „BFGS“.

---

<sup>3</sup> Da das Datenmaterial aus frühen Perioden stammt und der Ausgleich zur damaligen Zeit nur mit einfachen Hilfsmitteln möglich war und oft nur grafisch erfolgt ist, ist eine optimale Anpassung nicht gewährleistet.

### 3.4.1 Korrektur der Grundner-Schwappach-Volumina

Für die Anpassung der Baumholzexpansionsfunktion wurde zunächst der von BDAT abweichenden Derbholzdefinition von Grundner-Schwappach Rechnung getragen (siehe Abschnitt 3.3.1), wonach das Stockholz beim Derbholz (und vermutlich auch beim Baumholz) nicht enthalten ist. Daher wurden die Volumina der Grundner-Schwappach-Tafeln korrigiert.

Grundlage hierfür war die Bestimmung des Stockvolumens bei den Probestämmen. Das Stockvolumen ist definiert als der Stammfußabschnitt von bodeneben bis zu einer Höhe von 1% der Scheitelhöhe. Für jeden Probestaum wurde das Derbholzvolumen gemäß Grundner-Schwappach bestimmt, indem das geschätzte Stockholzvolumen abgezogen wurde. Anschließend wurde eine lineare Beziehung zwischen biomasse-konformem und Grundner-Schwappach'schen Derbholzvolumen kalibriert. Das Stockholzvolumen macht je nach Baumart zwischen 3 und 4,5% des gesamten Derbholzvolumens aus. Aus Gründen der Vereinfachung wurde ein streng proportionaler linearer Zusammenhang (ohne Interzept) unterstellt. Für die Umrechnung von Grundner-Schwappach-Derbholz (ohne Stock) bzw. Baumholz in das hier zugrundeliegende Derbholz bzw. Baumholz (einschließlich Stock) wurden entsprechende Faktoren hergeleitet (Tabelle 6), anhand derer das „wahre“ Volumen einschließlich Stock geschätzt werden kann:

$$V_{Dh} = c \cdot V_{Dh}^{(GS)}$$

$$V_{Bh} = V_{Bh}^{(GS)} + V_{Dh}^{(GS)} \cdot (c - 1)$$

Beim Grundner-Schwappach-Baumholz wurde ebenfalls unterstellt, dass der Stock nicht enthalten ist.

**Tabelle 6. Umrechnungsfaktoren zur Korrektur der Grundner-Schwappach-Volumina**

Baumart	Korrekturfaktor	Baumart	Korrekturfaktor
Fichte	1,0474	Buche	1,0313
Tanne	1,0395	Eiche	1,0327
Kiefer	1,0311	Birke	1,0327
Lärche	1,0474	Erle	1,0327

### 3.4.2 Kalibrierung der segmentierten Baumholzvolumenexpansionsfunktion

Wie oben dargestellt, wurde als Ersatz für den ursprünglichen linearen Ansatz ein segmentiertes Modell aus allometrischen Funktionen konzipiert und mit Hilfe einer Optimierung an die korrigierten Grundner-Schwappach-Daten angepasst. Bei der Optimierung wurden die insgesamt 7 Koeffizienten der Abschnittsfunktionen sowie die Knoten ( $V_1$  und  $V_2$ ) bestimmt.

**Tabelle 7. Koeffizienten der 3 Abschnittsfunktionen für die „Expansions-Baumarten“**

BA	$a_{01}$	$a_{11}$	$a_{21}$	$a_{12}$	$a_{22}$	$a_{13}$	$a_{23}$
Fichte	0,00666516	1,154148	0,9505454	0,9443887	1,1141037	0,6669671	1,1969899
Tanne	0,01213071	1,151533	1,0078651	0,9647849	1,0931459	47,5766434	0,1971868
Kiefer	0,0214554	1,152608	1,0344601	1,1109031	0,9698781	3,6612262	0,5518027
Lärche	0,01178922	1,117968	0,9516923	1,0613672	0,9952743	1,2081944	0,9543931
Buche	0,01660383	1,15896	0,9980612	1,5014673	0,8534533	1,433144	0,9057832
Eiche	0,01705493	1,111077	1,0078288	1,0780146	0,9988383	1,28316	0,9298965
Birke	0,01536446	1,152492	1,0118881	1,0711615	1,0490689	1,3060148	0,9000512
Erle	0,01053825	1,027142	1,0014604	1,0734081	0,9880413	0,8087876	1,2104384

Tabelle 7 enthält die Koeffizienten der drei Abschnitte, Tabelle 8 gibt die Knoten  $V_1$  bzw.  $V_2$  sowie den maximalen Definitionsbereich für das Derbholzvolumen an ( $\text{Max. } V_{Dh}$ ), für die die Anpassung gültig ist. Für alle Derbholzvolumina größer als  $\text{Max. } V_{Dh}$  wird ein konstanter Expansionsfaktor „Max. Exp“ festgelegt, um im Extrapolationsbereich unplausible Werte zu vermeiden, wodurch das Verhalten der Funktion im Bereich extrem starker Bäume beschränkt wird.

**Tabelle 8. Knoten der 3 Abschnittsfunktionen sowie der gültige maximale Wert für das Derbholzvolumen und der maximale Expansionsfaktor für alle Derbholzvolumina, welche diesen Wert überschreiten („Extrapolationsbereich“)**

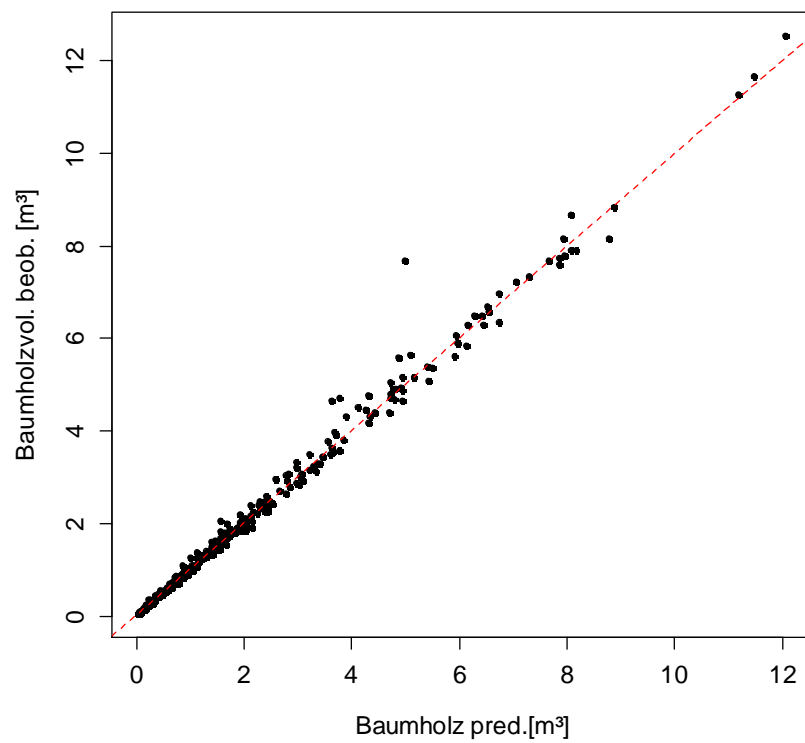
BA	$V_1$	$V_2$	Max $V_{Dh}$	Max. Exp
Fichte	0,6981074	5,50781	12,39263	1,20583
Tanne	2,0374741	10,343314	22,53502	1,117967
Kiefer	0,4821344	3,026626	6,88887	1,036759
Lärche	0,9862442	5,236944	13,050268	1,05288
Buche	2,4421715	3,811709	9,52707	1,107847
Eiche	0,740129	2,645968	18,137387	1,031655
Birke	0,3850009	1,461136	2,253111	1,123285
Erle	0,2	1,5	2,476136	1,090969

### 3.4.3 Überprüfung der Baumholzexpansionsfunktion

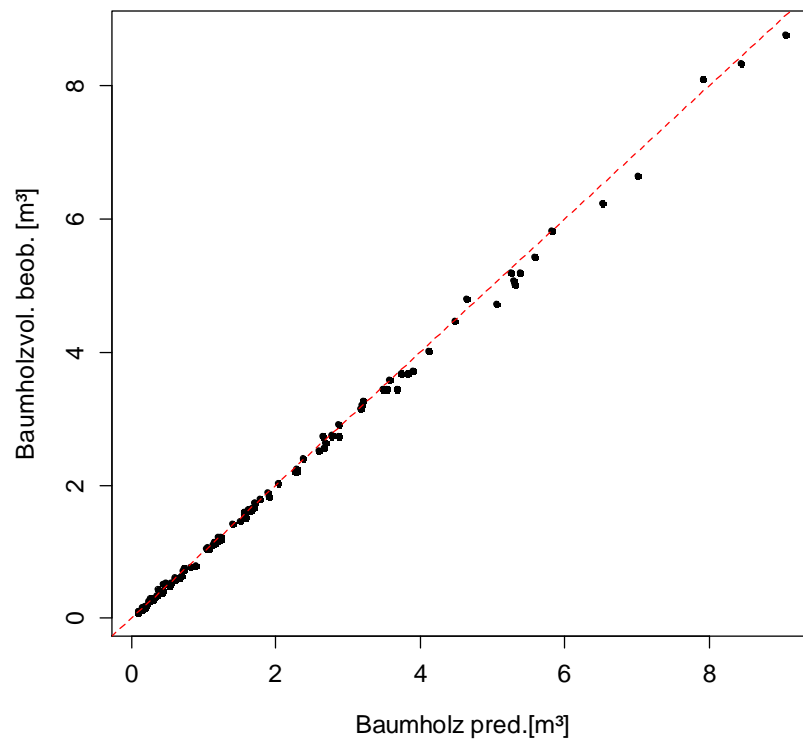
Anhand der mit dem RBS-Verfahren aufgenommen Buchen, Eichen und Kiefern konnte die Expansionsfunktion überprüft werden, da für diese Bäume das Baum- und Derbholzvolumen gemessen worden ist, während bei den mit dem Nadelbaum-Verfahren beprobten Fichten und Kiefern das Baumholzvolumen nicht direkt bestimmt worden ist. Die neue Expansionsfunktion wurde auf die Biomasse-Probeebäume angewendet, so dass das modellierte (vorhergesagte) dem beobachteten Baumholzvolumen gegenübergestellt werden konnte. Eine statistische Überprüfung war anhand des linearen Ausgleichs sowie mit Hilfe eines paarigen t-Tests möglich.

Bei der Buche wies der t-Test auf eine leichte systematische Unterschätzung des wahren Baumholzvolumens von ca. 2,2 % hin. Beim linearen Ausgleich (Abbildung 14) unterschied sich dagegen die Steigung nicht signifikant von 1, das positive Interzept deutet aber ebenfalls auf eine Unterschätzung hin, wies allerdings nur eine Signifikanz von  $p = 0,0763$  auf.

Bei der Eiche (Abbildung 15) lag dagegen eine leichte systematische Überschätzung durch die Expansionsfunktion in der Größenordnung von ca. 1,5 % vor. Ohne signifikante systematische Abweichung war die Schätzung des Baumholzvolumens bei der Kiefer (Abbildung 16).

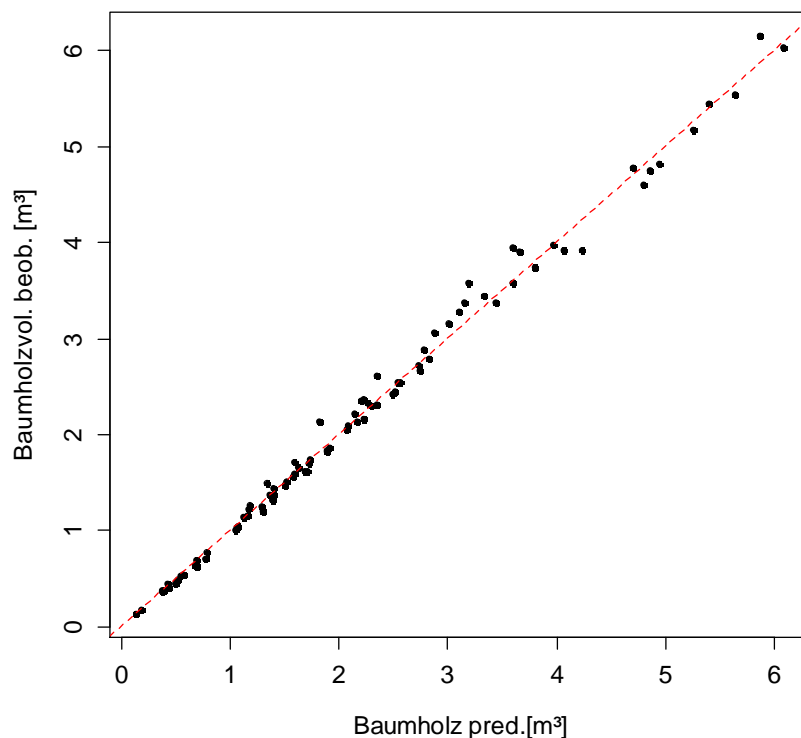


**Abbildung 14. Gegenüberstellung des modellierten und des beobachteten Baumholzvolumens bei der Buche**



**Abbildung 15. Gegenüberstellung des modellierten und des beobachteten Baumholzvolumens bei der Eiche**





**Abbildung 16. Gegenüberstellung des modellierten und des beobachteten Baumholzvolumens bei der Kiefer (nur RBS-Aufnahmen)**

### 3.5 Überprüfung der synthetischen Biomassefunktion

Nachdem die dendrometrischen Grundlagen und Komponenten der synthetischen Biomassefunktion eingehend analysiert worden sind, sollen die Schätzungen der synthetischen Biomassefunktionen mit den an den Probestämme ermittelten „wahren“ Werten verglichen werden. Für jeden Probestaum wurde daher mit Hilfe der synthetischen Biomassefunktionen die oberirdische Biomasse geschätzt. Bei den synthetischen Funktionen wurden zwei Varianten verwendet: die alte „vorläufige“ und die neue Version, die sich durch die verwendete Expansionsfunktion unterscheiden. Für die Umrechnung des Volumens in Biomasse verwenden beide Versionen dieselben Raumdichten und Ast- zu Schaftholz-Verhältnisse. Das Derbholz wurde aus den Baumattributen  $d_{1,3}$ ,  $d_{03}$  und  $h$  mit Hilfe von BDAT geschätzt. Zu Vergleichszwecken gibt es für beide Versionen noch eine Variante, bei der das tatsächlich gemessene Derbholzvolumen verwendet wird.

Die Anpassung der Schätzwerte der synthetischen Biomassefunktionen an die beobachteten Werte wurde anhand von Residuen bewertet, die folgendermaßen berechnet werden:

$$res_i = B_{obs.i} - B_{gesch.i}$$

Um das Residuen-Muster besser erkennbar zu machen, erfolgt die grafische Darstellung mit Boxplots nach Durchmesserklassen.

#### 3.5.1 Fichte

Bei der Fichte passt bereits die alte synthetische Funktion recht gut zur beobachteten oberirdischen Biomasse, allerdings mit einer durchweg leichten systematischen Überschätzung; dieser Trend zur Überschätzung wird an der Boxplot-Grafik (Abbildung 16) ersichtlich. Die

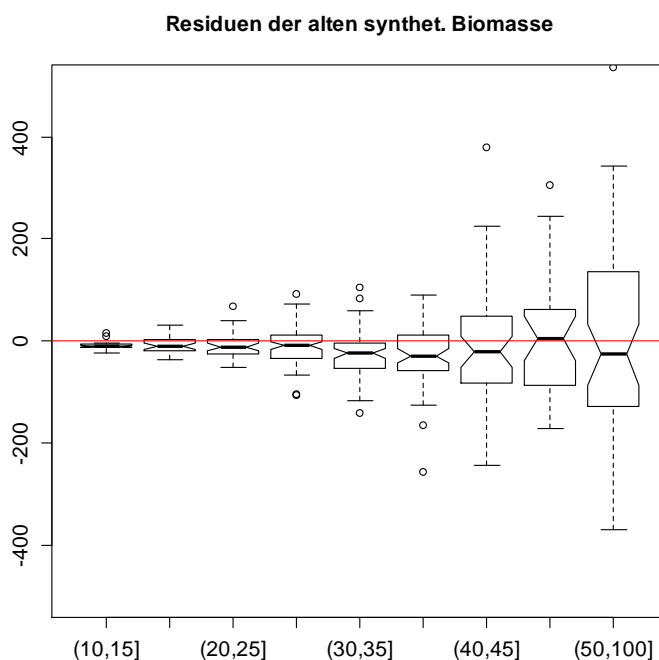
neue synthetische Funktion ist etwas besser, insbesondere ist der Trend zur Überschätzung weniger stark erkennbar (Abbildung 17).

Die Regression  $B_{obs} = b_0 + b_1 B_{gesch}$  zwischen beobachteter und mit den jeweiligen Funktionen geschätzter Biomasse ergibt folgendes Bild:

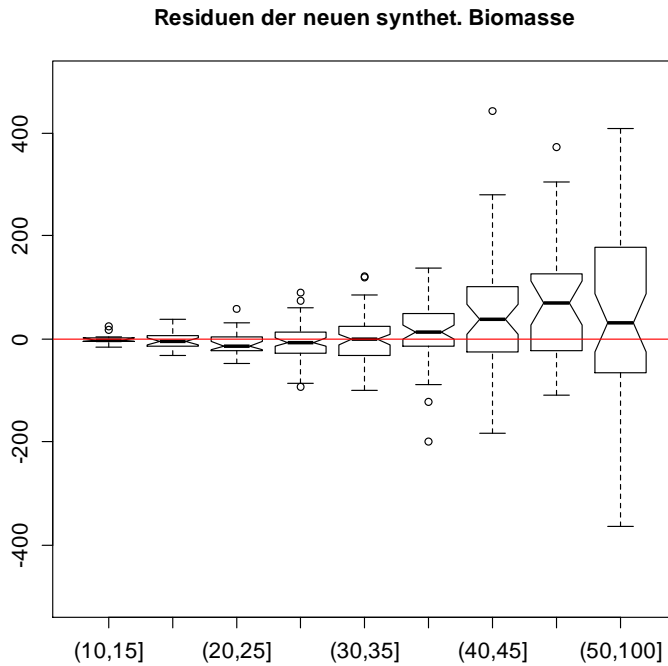
**Tabelle 9. Kennwerte des linearen Ausgleichs zwischen den von den synthetischen Biomassefunktionen vorhergesagten und beobachteten Biomassewerten bei der Fichte**

Biomassefunktion	$b_0$	se ( $b_0$ )	$b_1$	se ( $b_1$ )	RMSE	n
alt	-7,129115	7,295339	0,989861	0,008486	90,93	394
neu	3,661963	7,427339	1,016907	0,008966	93,45	394

Das Interzept ist bei beiden Schätzfunktionen nicht signifikant von 0 verschieden, die Steigungskoeffizienten liegen fast bei 1; bei der alten Version deutet der Wert  $< 1$  auf eine leichte systematische Überschätzung (d.h. der Schätzwert muss etwas reduziert werden). Auch bei der alten Funktion liegt der Sollwert 1 noch im Konfidenzbereich (2 Standardfehler) des geschätzten Steigungskoeffizienten. Interessanterweise ist der RMSE des Ausgleichs bei der neuen Schätzfunktion etwas größer als bei der alten. Der paarige t-Test zur Prüfung, ob zwischen mit den jeweiligen Funktionen geschätzter Biomasse und der beobachteten Biomasse ein systematischer Unterschied besteht, weist für die alte synthetische Funktion eine signifikante Überschätzung nach, während für die neue eine Tendenz zur Unterschätzung besteht.



**Abbildung 17. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der bisherigen synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Fichte aufgetragen über  $d_{1,3}$ -Klassen**



**Abbildung 18. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der neuen synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Fichte aufgetragen über  $d_{1,3}$ -Klassen**

Die Boxplot-Darstellung der Residuen für die alte synthetische Biomassefunktion in Abbildung 17 lässt bis zum  $d_{1,3}$  von 40 cm eine leichte systematische Überschätzung erkennen (die Mediane liegen durchweg im negativen Bereich), ab einem  $d_{1,3}$  von 40 cm sind die Abweichungen nicht mehr signifikant. Die neue Schätzfunktion (Abbildung 18) beseitigt die Überschätzung vor allem im  $d_{1,3}$ -Bereich zwischen 30 und 45 cm. Darunter bleibt eine Überschätzung erhalten, die allerdings schwach ausgeprägt ist. Offensichtlich wirkt sich die Unterschätzung des Derbholzvolumens durch BDAT aus, welche in einer Größenordnung von etwa 2,5 % liegt. Setzt man nämlich in die synthetische Biomassefunktion das beobachtete Derbholzvolumen ein, verschwindet diese systematische Abweichung (nicht dargestellt).

### 3.5.2 Kiefer

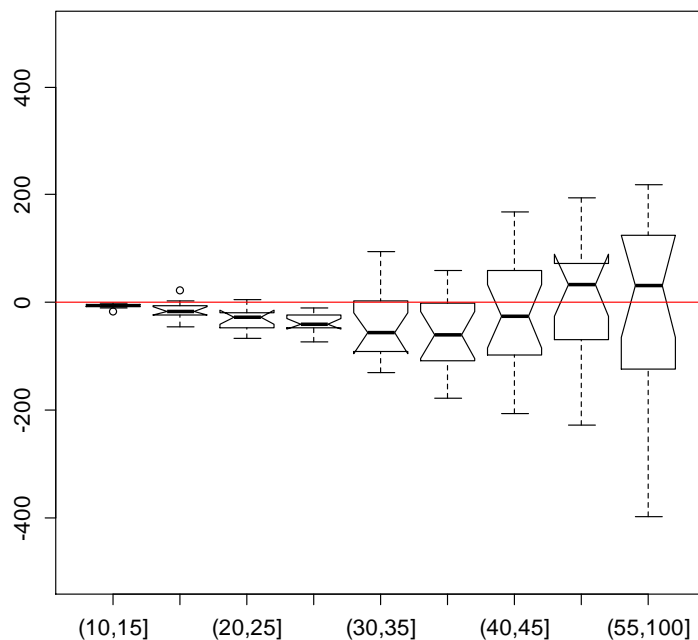
Bei der Kiefer zeigt die Regression  $B_{obs} = b_0 + b_1 B_{gesch}$  zwischen beobachteter und mit den jeweiligen Funktionen geschätzter Biomasse folgendes Bild:

**Tabelle 10. Kennwerte des linearen Ausgleichs zwischen den von den synthetischen Biomassefunktionen vorhergesagten und beobachteten Biomassewerten bei der Kiefer**

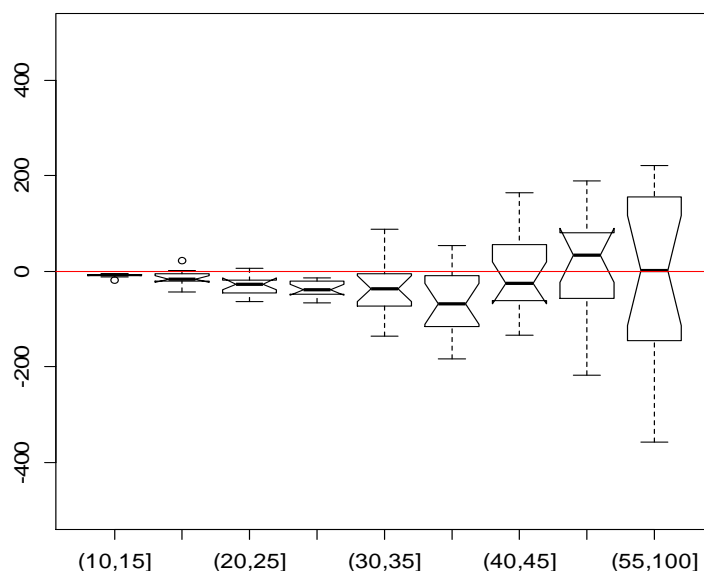
Biomassefunktion	$b_0$	se ( $b_0$ )	$b_1$	se ( $b_1$ )	RMSE	n
alt	-7,34461	12,22127	0,97312	0,01323	92,49	133
neu	-6,68911	11,96131	0,97401	0,01297	90,60	133

Beide Versionen (alt und neu) zeigen gleichermaßen einen Trend zur Überschätzung von im Mittel knapp 3 %. Wo die systematischen Abweichungen auftreten, zeigen die Residuen-Boxplots über dem  $d_{1,3}$  (Abbildung 19 bzw. Abbildung 20). In beiden Fällen tritt eine systematische Überschätzung im Durchmesserbereich bis 40 cm auf. Insofern bringt die neue Version bei der Kiefer keine Verbesserung bezüglich systematischer Abweichungen, lediglich das RMSE ist bei der neuen Funktion etwas niedriger. Der paarige t-Test bestätigt für beide Ver-

sionen eine systematische Überschätzung. Auch die (hier nicht gezeigte) Berücksichtigung des Alterseinflusses auf die mittlere Raumdichte bringt keine Verbesserung, im Gegenteil, es kommt bei dieser Variante im stärkeren Durchmesserbereich sogar zu einer Unterschätzung.



**Abbildung 19. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der alten synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Kiefer aufgetragen über  $d_{1,3}$ -Klassen**



**Abbildung 20. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der neuen synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Kiefer aufgetragen über  $d_{1,3}$ -Klassen**

Der Grund dafür, dass bei der Kiefer die synthetischen Funktionen weniger gut passen, liegt im Wesentlichen daran, dass die beobachtete mittlere Raumdichte der Probebäume ca. 8 % niedriger ist als der Literaturwert, welcher bei den synthetischen Funktionen verwendet wird. Auch der an den Probebäumen ermittelte Raumdichte-Expansionsfaktor (1,058) für

Ast(Reis)holz zu Schaft(Derb)holz ist deutlich niedriger als der Literaturwert (1,3444). Die Unterschätzung des Derbholzvolumens durch BDAT fällt bei der Kiefer dagegen mit rund 4% aus und gleicht somit die Überschätzung durch die Raumdichte etwas aus. Die Überschätzung der Biomasse durch die synthetische Biomassefunktion ist demnach auf die verwendete Raumdichte zurückzuführen, welche durch die Unterschätzung des Derbholzvolumens nur zu einem sehr geringeren Teil ausgeglichen wird.

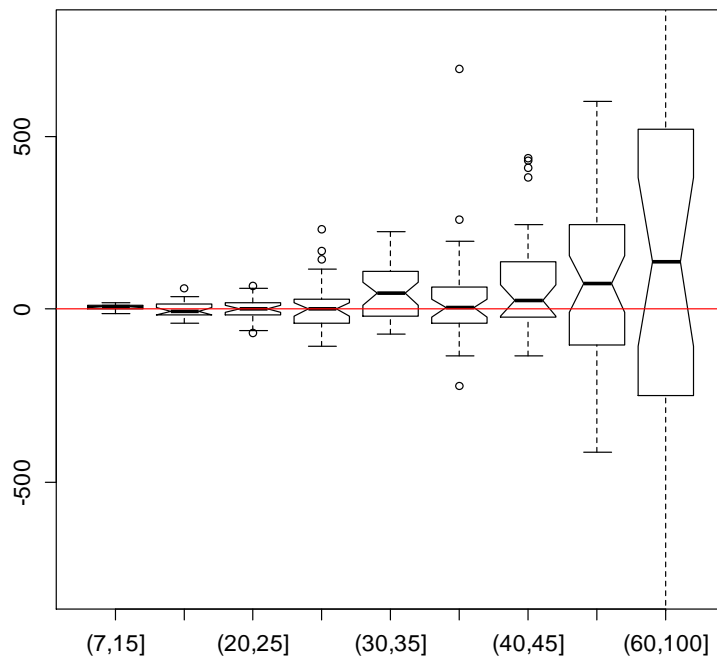
### 3.5.3 Buche

Im Unterschied zur Kiefer unterschätzen bei der Buche die synthetischen Funktionen in beiden Versionen die beobachteten Biomassen, im Mittel in einer Größenordnung von ca. 4 %. Die Regression zwischen beobachteter und mit den jeweiligen Funktionen geschätzter Biomasse  $B_{obs} = b_0 + b_1 B_{gesch}$  liefert folgende Koeffizientenschätzungen:

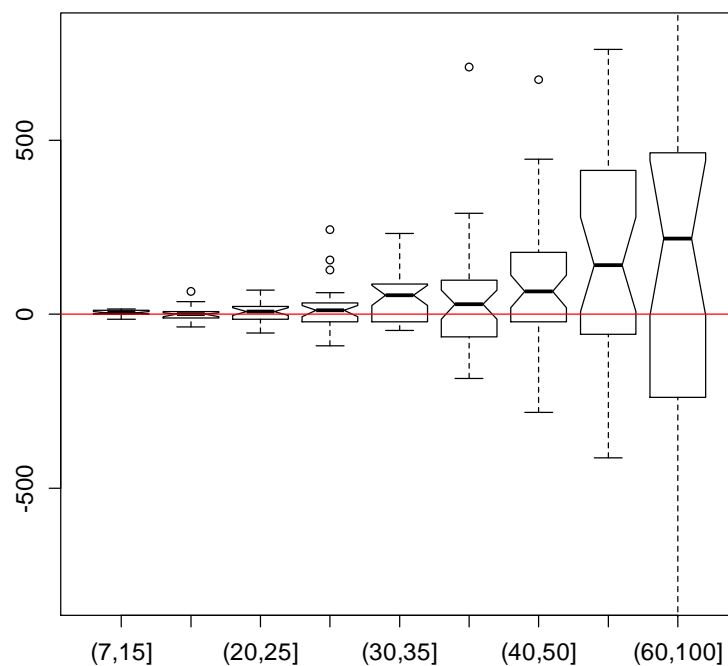
**Tabelle 11. Kennwerte des linearen Ausgleichs zwischen den von den synthetischen Biomassefunktionen vorhergesagten und beobachteten Biomassewerten bei der Buche**

Biomassefunktion	$b_0$	se ( $b_0$ )	$b_1$	se ( $b_1$ )	RMSE	n
alt	11,44556	26,68672	1,04145	0,01548	306,6	278
neu	11,14200	23,09321	1,04441	0,01338	266,3	278

Die neue Funktion ist der alten lediglich beim RMSE überlegen, welches mit 266,3 kg deutlich niedriger ist als die 306,6 kg der alten Version. Im Vergleich zur Fichte und Kiefer ist bei der Buche das RMSE erheblich größer, was daran liegt, dass die Biomassewerte insgesamt einen wesentlich weiteren Bereich umfassen und insbesondere am stärkeren Ende eine starke Streuung auftritt. Die Residuen-Boxplots über dem  $d_{1,3}$  (Abbildung 21 bzw. Abbildung 22) zeigen, dass die systematischen Unterschätzungen ab einem  $d_{1,3}$  von etwa 40 cm erkennbar sind, darunter passen beide Versionen sehr gut (eine Ausnahme bildet die  $d_{1,3}$ -Klasse 30 bis 35 cm). Führt man den linearen Ausgleich zwischen beobachteten und geschätzten Biomassewerten getrennt nach den zwei Teilkollektiven ( $d_{1,3} \leq 40$  und  $d_{1,3} > 40$ ) durch, so liegen die Steigungskoeffizienten durchweg recht nahe bei 1, größere Unterschiede ergeben sich dagegen beim Interzept. Das heißt, die relative große mittlere systematische Unterschätzung stammt im Wesentlichen von den starken Bäumen. Dieser Trend zur Unterschätzung ist bei der neuen Version sogar geringfügig stärker. Hauptgrund ist, dass BDAT das Derbholzvolumen vor allem im stärkeren  $d_{1,3}$ -Bereich unterschätzt. Bezüglich der Raumdichte gibt es bei der Buche dagegen keine großen Abweichungen zwischen Literaturwert und dem an den Probestämmen ermittelten Wert. Auch die (hier nicht gezeigte) Berücksichtigung der mittleren Jahrringbreite (bzw. des mittleren jährlichen  $d_{1,3}$ -Zuwachses) bringt keine substanzielle Verbesserung.



**Abbildung 21. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der alten synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Buche aufgetragen über  $d_{1,3}$ -Klassen**



**Abbildung 22. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der neuen synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Buche aufgetragen über  $d_{1,3}$ -Klassen**

### 3.5.4 Eiche

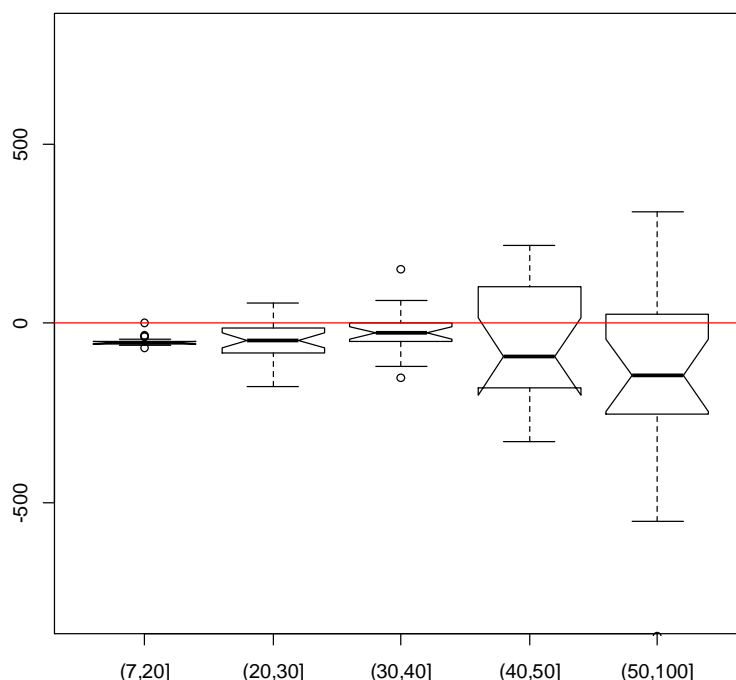
Bei der Eiche überschätzen (wie bei der Kiefer) die synthetischen Biomassefunktionen die beobachtete Biomasse systematisch. Die Regression  $B_{obs} = b_0 + b_1 B_{gesch}$  zwischen be-

obachteter und mit den jeweiligen Versionen der Funktionen geschätzter Biomasse ergibt folgendes Bild:

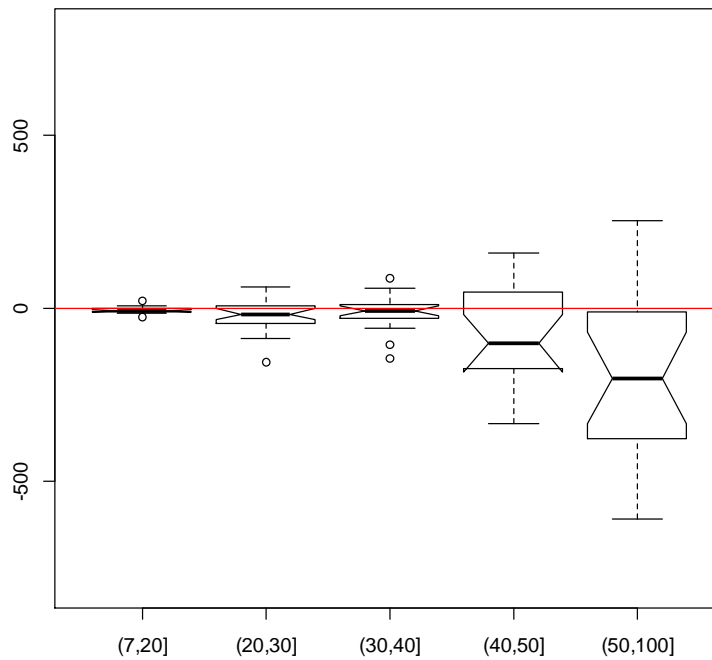
**Tabelle 12. Kennwerte des linearen Ausgleichs zwischen den von den synthetischen Biomassefunktionen vorhergesagten und beobachteten Biomassewerten bei der Eiche**

Biomassefunktion	$b_0$	se ( $b_0$ )	$b_1$	se ( $b_1$ )	RMSE	n
alt	-32,43836	25,43500	0,98284	0,01793	179,7	107
neu	13,54163	25,95929	0,93879	0,01792	187,7	107

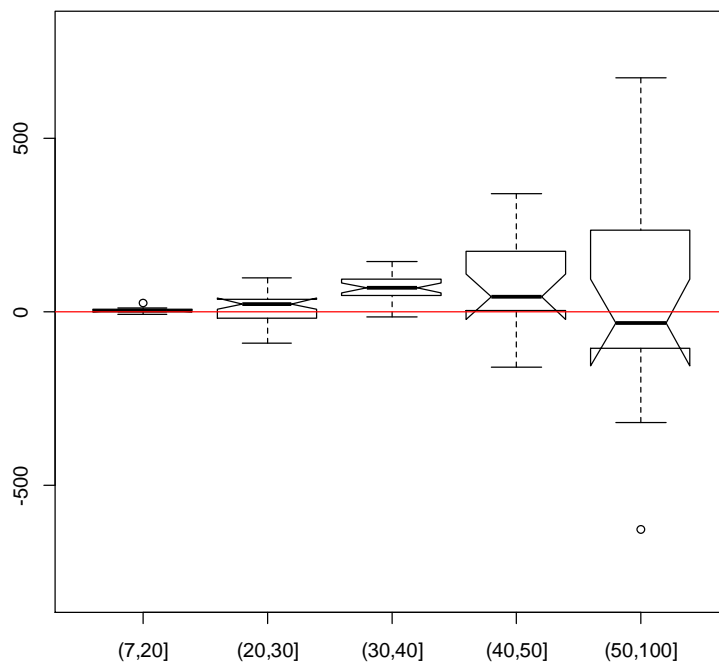
Der t-Test bestätigt für beide Versionen die systematische Überschätzung. Anhand der Residuen-Boxplots (Abbildung 23 bzw. Abbildung 24) über  $d_{1,3}$ -Klassen ist zu erkennen, dass die neue Funktion lediglich eine signifikante Verbesserung für die Durchmesserklasse 30 bis 40 cm bringt und die systematische Überschätzung im Durchmesserbereich bis 30 deutlich reduziert; oberhalb des  $d_{1,3}$  von 40 cm ist die Überschätzung allerdings eher noch stärker. Zum einen wird durch BDAT das Derbholzvolumen um ca. 11% unterschätzt, und damit auch das daraus abgeleitete Baumholzvolumen; die mittlere Raumdichte der Probestämme ist jedoch deutlich (-9%) niedriger als der Literaturwert; der Raumdichte-Expansionsfaktor (1,096) für Ast(Reis)holz zu Schaft(Derb)holz ist bei den Probestämmen jedoch höher als der Literaturwert (1,0611). Offensichtlich tritt jedoch keine Kompensation dieser gegenläufigen Trends auf. Die neue synthetische Funktion ist folglich nicht wesentlich besser als die alte. Die systematische Überschätzung lässt sich jedoch verringern, wenn man den Alterseffekt auf die Raumdichte berücksichtigt (Abbildung 25). Allerdings tritt dann hier im Stärkebereich 30 bis 40 cm eine systematische Unterschätzung auf. Hinzu kommt, dass das Alter grundsätzlich eine problematische Größe ist und möglichst nicht als Prädiktor verwendet werden sollte.



**Abbildung 23. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der alten synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Eiche aufgetragen über  $d_{1,3}$ -Klassen**



**Abbildung 24. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der neuen synthetischen Funktion und den beobachteten Werten bei der Eiche aufgetragen über  $d_{1,3}$ -Klassen**



**Abbildung 25. Boxplot der Abweichungen zwischen Biomasseschätzwerten der neuen synthetischen Funktion in der Fassung mit Berücksichtigung des Alterseinflusses und den beobachteten Werten bei der Eiche aufgetragen über  $d_{1,3}$ -Klassen**

### 3.6 Zusammenfassende Wertung und Schlussfolgerung

Der Vergleich der beobachteten Biomassewerte mit den entsprechenden Schätzungen anhand der alten und neuen synthetischen Biomassefunktionen ergibt ein uneinheitliches Bild.



Am besten geeignet ist die synthetische Funktion bei der Fichte, wo auch die neue Version mit überarbeiteter Volumenexpansionsfunktion eine Verbesserung bringt. Bei der Buche kommt es zu einer Unterschätzung, die insbesondere im Kollektiv der Bäume mit einem  $d_{1,3}$  von über 40 cm ausgeprägt ist. Umgekehrt überschätzen die synthetischen Funktionen bei Kiefer und Eiche. Bei der Eiche liegt eine erhebliche systematische Überschätzung vor allem bei stärkeren Bäumen ab einem  $d_{1,3}$  von 40 cm vor. Hier sollte eine Korrektur erwogen werden. Bei der Kiefer tritt die systematische Überschätzung im  $d_{1,3}$ -Bereich unter 40 cm vor, auch hier erscheint eine Korrektur angebracht.

Ursächlich für die Abweichungen sind Unterschiede bei den Komponenten der synthetischen Biomassefunktionen (Derbholz, Baumholz, Raumdichte, Verhältnis der Raumdichte von Nichtderbholz zu Derbholz). Bei Buche und Fichte passt die ermittelte mittlere Raumdichte gut zu den entsprechenden Literaturwerten: Fichte -2,6%, Buche + 0,8%; bei Kiefer und Eiche weichen die hier ermittelten mittleren Raumdichten jedoch deutlich nach unten ab: Kiefer: -8,3%, Eiche: -9,1%. Bei der Raumdichte gibt es zudem einen Effekt der mittleren Jahringbreite (mittlerer jährlicher Zuwachs): bei der Fichte und Kiefer ist der Zusammenhang negativ, bei Eiche und Buche positiv. Zu hinterfragen sind auch die bisher unterstellten Raumdichteverhältnisse zwischen Ast- und Schaft(Derb)holz, da die beobachteten Verhältnisse deutlich von den Literaturwerten abweichen.

Beim Vergleich der beobachteten Derbholzvolumina mit den mit BDAT unter Berücksichtigung der Formigkeit ( $d_{03}$ ) hergeleiteten Werten zeigt sich eine Unterschätzung durch BDAT vor allem bei den stärkeren Bäumen: dies gilt ausgeprägt für Buche und Eiche, etwas abgeschwächt für die Kiefer und geringfügig auch für die Fichte.

Aufgrund dieser Inkonsistenzen wurde ein alternatives Schätzverfahren konzipiert, welches auf Schätzgleichungen basiert, welche die oberirdische Biomasse direkt angeben, also ohne Expansion und Konversion auskommen wie bei den synthetischen Funktionen. Für die vier Hauptbaumarten konnten diese Schätzgleichungen an aktuellem für das Bundesgebiet gültigem Datenmaterial angepasst werden.

### 3.7 Anpassung neuer Biomassefunktionen

Aus den vorher genannten Gründen wurden an die beobachteten Biomassedaten eigene Biomassefunktionen angepasst. Typischerweise handelt es sich um nicht-lineare Modelle. Am häufigsten verwendet wird eine allometrische Beziehung zwischen der Biomasse und Baumattributen, wie dem  $d_{1,3}$ , der Höhe, oder andere Variablen wie einem oberen Durchmesser, die Kronenlänge oder das Alter. Neben der Allometrie findet sich in der Literatur das Modell von Marklund (1987), welches einen Exponential- mit einem Potenzterm verbindet.

Allometrische Modelle verknüpfen die erklärenden Variablen multiplikativ und gewichten sie mit Exponenten. Dieses Produkt wird mit einem Proportionalitätsfaktor multipliziert. Mit den konventionellen Prädiktoren  $d_{1,3}$  und Höhe lautet die Gleichung folgendermaßen

$$B = b_0 \cdot d_{1,3}^{b_1} \cdot h^{b_2} \quad [A0]$$

Das Modell kann um weitere Prädiktoren erweitert werden, z. B. wird in dieser Analyse der Durchmesser in 30% der Scheitelhöhe  $d_{03}$  verwendet:

$$B = b_0 \cdot d_{1,3}^{b_1} \cdot d_{03}^{b_2} \cdot h^{b_3} \quad [A1]$$

Die Einbeziehung eines oberen Durchmessers in Biomassefunktionen ist bisher in der Literatur nicht zu finden, allerdings weisen Fehrmann und Kleinn (2006) auf die Bedeutung eines in relativer Höhe gemessenen Durchmessers für die Allometrie hin: demnach kann eine al-

lometrische Beziehung zu einem in fixer Höhe gemessenen Durchmesser wie dem  $d_{1,3}$  streng genommen nicht unterstellt werden. Diese Feststellung wird im Rahmen dieser Untersuchung bestätigt.

Das Alter als weiterer Prädiktor führt zu folgendem Modell:

$$B = b_0 \cdot d_{1,3}^{b_1} \cdot d_{03}^{b_2} \cdot h^{b_3} \cdot A^{b_4} \quad [A2]$$

bzw. mit Alter und Höhe über NN zu:

$$B = b_0 \cdot d_{1,3}^{b_1} \cdot d_{03}^{b_2} \cdot h^{b_3} \cdot A^{b_4} \cdot H_{NN}^{b_5} \quad [A3]$$

Eine Alternative zum allometrischen Modell sind die von Marklund (1987) verwendeten Gleichungen. Die ursprüngliche Formulierung von Marklund lautet:

$$B = e^{b_0 + b_1 \frac{d_{1,3}}{d_{1,3} + k} + b_2 \cdot h} \cdot h^{b_3}$$

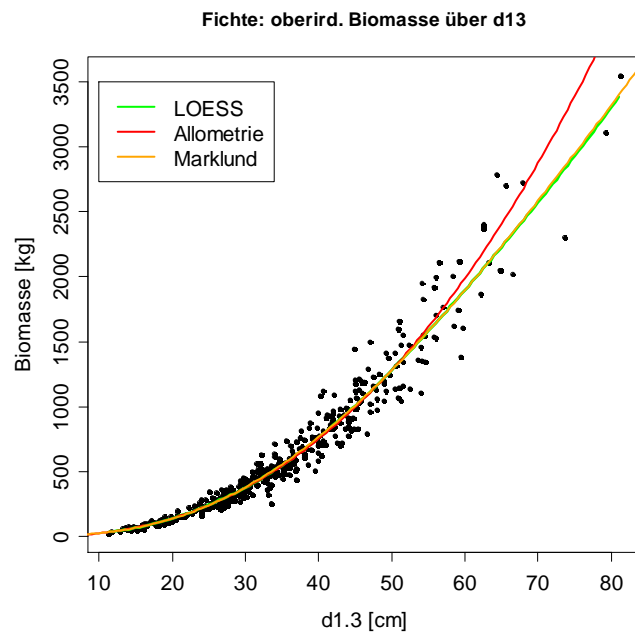
Das Besondere am Marklund-Modell ist die Transformation des  $d_{1,3}$  im Term  $\frac{d_{1,3}}{d_{1,3} + k}$ .

Diese Parametrisierung führt dazu, dass der Einfluss des  $d_{1,3}$  mit dessen Größe nicht-linear abnimmt. Der Einfluss der Höhe wird in der ursprünglichen Form der Marklund-Funktion zusätzlich noch mit einer allometrische Relation formuliert. In dieser Untersuchung wurde das Marklund-Modell gegenüber der ursprünglichen Fassung modifiziert, indem alle Prädiktoren transformiert in einem Exponential-Term vorkommen und multiplikativ verknüpft wurden.

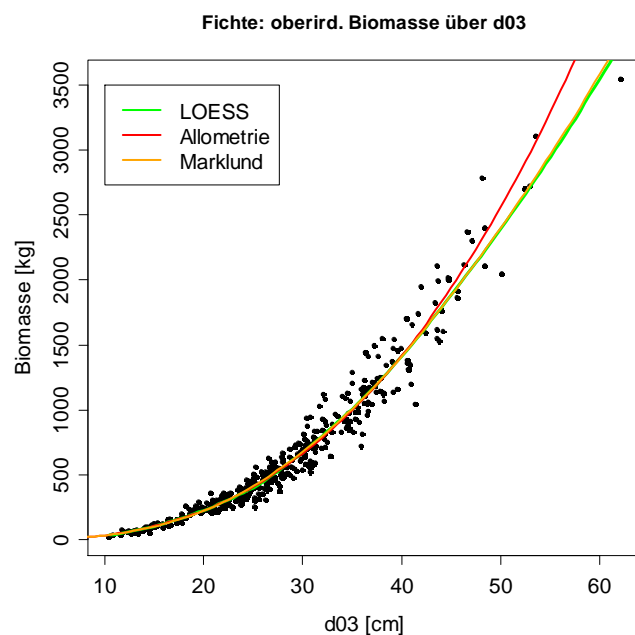
$$B = b_0 \cdot e^{b_1 \frac{d_{1,3}}{d_{1,3} + k_1}} \cdot e^{b_3 \frac{h}{h + k_3}} \quad [M0]$$

$$B = b_0 \cdot e^{b_1 \frac{d_{1,3}}{d_{1,3} + k_1}} \cdot e^{b_2 \frac{d_{03}}{d_{03} + k_2}} \cdot e^{b_3 \frac{h}{h + k_3}} \quad [M1]$$

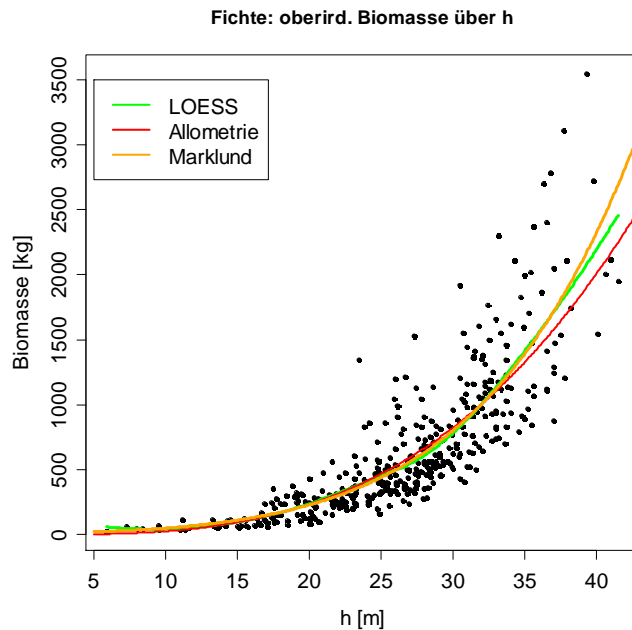
Die Eignung des Marklund-Modells zur Beschreibung des Einflusses der drei Prädiktoren wurde am Datenmaterial überprüft. Zur Kontrolle wurde jeweils auch eine non-parametrische Glättung mit der LOESS-Funktion (lokale gewichtete Regression) durchgeführt, die als rein Daten-getriebenes Modell eine sehr gute Übereinstimmung mit dem parametrischen Marklund-Modell zeigt, wie am Beispiel der Fichte in den nachfolgenden Darstellungen (Abbildung 26, Abbildung 27, Abbildung 28) zu sehen ist.



**Abbildung 26.** Oberirdische Biomasse über dem  $d_{1,3}$  bei der Fichte. Die Marklund-Funktion stimmt im  $d_{1,3}$ -Bereich über 50 cm mit dem nicht-parametrischen „daten-getriebenen“ Ausgleich durch eine LOESS-Funktion besser überein als die allometrische Funktion.



**Abbildung 27.** Oberirdische Biomasse über dem  $d_{03}$  bei der Fichte. Die Marklund-Funktion stimmt im  $d_{03}$ -Bereich oberhalb 45 cm mit dem nicht-parametrischen „daten-getriebenen“ Ausgleich durch eine LOESS-Funktion besser überein als die allometrische Funktion.



**Abbildung 28. Oberirdische Biomasse über der Höhe bei der Fichte. Die Marklund-Funktion stimmt ab einer Höhe von 33 m mit dem nicht-parametrischen „daten-getriebenen“ Ausgleich durch eine LOESS-Funktion besser überein als die allometrische Funktion.**

Bei der Anpassung des Marklund-Modells M1 traten bei der verwendeten R-Prozedur (nlme, R Core Team, 2012) u. U. numerische Probleme auf, wenn alle 7 Parameter ( $b_0$  bis  $b_3$  sowie  $k_1$  bis  $k_3$ ) geschätzt werden sollten. Die Anpassung erfolgte fallweise in Kombination der nicht-linearen Regression mit einer Optimierung, bei der die Parameter  $k_1$  bis  $k_3$  unter Minimierung der Devianz (= Summe der Residuenquadrate) des Modells bestimmt werden. Verwendet wurde hierfür die R-Prozedur „optim“. Allerdings konvergierten auch diese Verfahren nicht immer, so dass zur Reduktion der Modell-Komplexität das Modell M1a formuliert wurde, welches den Einfluss der Höhe in einem Potenzterm erfasst, was auch der ursprünglichen Formulierung von Marklund entspricht.

$$B = b_0 \cdot e^{\frac{b_1 \cdot d_{1,3}}{d_{1,3} + k_1}} \cdot e^{\frac{b_2 \cdot d_{03}}{d_{03} + k_2}} \cdot h^{b_3} \quad [\text{M1a}]$$

Da das Datenmaterial aus verschiedenen Regionen stammt, wurde auch geprüft, ob sich regionale oder lokale Effekte finden lassen, die als zufällige Effekte modelliert werden. Der Aufnahme- oder Beprobungsort erwies sich bei den Modellen M1, M2 und M3 als durchweg signifikanter zufälliger Effekt, so dass diese Schätzfunktionen als gemischtes nicht-lineares Modell mit dem Aufnahmeort als zufälligen Effekt angepasst wurden. Verwendet wurde die R-Prozedur „nlme“ aus der nlme-Library (R Core Team, 2012). Der zufällige Effekt wurde auf einen Prädiktor beschränkt (Höhe bzw. in Modellen mit dem Alter als Prädiktor auf den Prädiktor  $d_{1,3}/\text{Alter}$ ). Beim Modell M1a erwies sich der zufällige Effekt als wesentlich schwächer, so dass aus Gründen der Modellvereinfachung die endgültige Anpassung als generalisiertes nicht-lineares Modell ohne zufälligen Effekt erfolgte.

Der Einfluss des Alters wirkte sich bei Fichte und Kiefer, wie bereits im Abschnitt über die Raumdichte angedeutet, in Kombination mit dem  $d_{1,3}$  aus, und zwar als Quotient  $d_{1,3}/\text{Alter}$ , der als mittlerer jährlicher Zuwachs des  $d_{1,3}$  als Proxy für die mittlere Jahrringbreite betrachtet werden kann. Dies führte zu folgendem erweiterten Marklund-Modell:

$$B = b_0 \cdot e^{b_1 \frac{d_{1,3}}{d_{1,3}+k_1}} \cdot e^{b_2 \frac{d_{03}}{d_{03}+k_2}} \cdot e^{b_3 \frac{h}{h+k_3}} \cdot \left( \frac{d_{1,3}}{A} \right)^{b_4} \quad [\text{M2}]$$

In dieser Funktion geht der mittlere jährliche  $d_{1,3}$ -Zuwachs ( $d_{1,3}$  / Alter) nicht als transformierter Wert ein, sondern steht zur Biomasse in einer allometrischen Beziehung.

Den Einfluss der Höhenlage berücksichtigt folgendes Modell:

$$B = b_0 \cdot e^{b_1 \frac{d_{1,3}}{d_{1,3}+k_1}} \cdot e^{b_2 \frac{d_{03}}{d_{03}+k_2}} \cdot e^{b_3 \frac{h}{h+k_3}} \cdot \left( \frac{d_{1,3}}{A} \right)^{b_4} \cdot H_{NN}^{b_5} \quad [\text{M3}]$$

Wegen der Heteroskedastizität wurde in der Prozedur nlme (R Core Team, 2012) die Residualvarianz mit der Potenzfunktion  $\sigma^2 \cdot \hat{B}^{2\delta}$  mit  $\hat{B}$  als geschätzte Biomasse (Option „weights = varPower()“) modelliert.

### 3.7.1 Biomassefunktionen für die Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche

Im Folgenden werden die oben skizzierten Modelle mit ihren wichtigsten Kenngrößen beschrieben. Ziel dieser Untersuchung war es, ein praktikables Schätzverfahren für die Herleitung der oberirdischen Biomasse aus Waldinventuren zu entwickeln, welches für die Auswertung der Bundeswaldinventur leicht implementierbar ist und so für die Berechnung der natürlichen Grundlagen der Treibhausgasberichterstattung für den Wald genutzt werden kann. Eine wesentliche Anforderung war ein möglichst einheitliches Modell für alle Baumartengruppen. Nachdem empirisch begründete Modelle für die Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche vorlagen, die etwa 80 % des Gesamtvorrats ausmachen, mussten für die übrigen Baumarten entsprechende Modelle bzw. Schätzfunktionen aufgestellt werden. Im ursprünglichen Konzept der „synthetischen“ Modelle wurden anhand der publizierten Raumdichten (Kollmann, 1982) 18 Baumartengruppen festgelegt. An dieser Aufteilung wurde auch im neuen Konzept festgehalten. Daher mussten zusätzlich zu den vier Hauptbaumarten für 14 weitere „Raumdichte“-Baumarten Schätzgleichungen hergeleitet werden. Aus Gründen der Einheitlichkeit und Transparenz sollte für alle 18 Baumarten derselbe Funktionstyp verwendet werden, so dass ein einheitliches Modell mit einem entsprechenden Parametersatz vorlag, mit welchem für alle Baumarten die oberirdische Biomasse für die 18 Baumarten geschätzt werden kann. Alle übrigen Baumarten wurden gutachterlich einer der 18 Baumarten zugeordnet.

Als Standardmodell wurden Schätzfunktionen für die oberirdische Biomasse in kg mit den Prädiktoren  $d_{1,3}$  [cm],  $d_{03}$  [cm] und Höhe [m] kalibriert, da die Erfassung der Formigkeit, ausgedrückt durch den  $d_{03}$ , für die Bundeswaldinventur das Regelverfahren der Ermittlung des stehenden Holzvorrats darstellt. Zum Vergleich mit publizierten Gleichungen wurden auch Modelle angepasst, die nur  $d_{1,3}$  und der Höhe als Prädiktoren verwenden. Des Weiteren wurde neben den Marklund-Funktionen jeweils die entsprechende allometrische Gleichung als Referenz kalibriert. Anhand der Kennwerte ließ sich jeweils die Überlegenheit der Marklund-Funktionen belegen. Bei der Fichte und Kiefer wurde zusätzlich eine Funktion angepasst, welche den Alterseffekt einbezieht, ausgedrückt durch den mittleren jährlichen Zuwachs des  $d_{1,3}$  [cm/a]. Für die praktische Anwendung wird jedoch als Kompromiss zwischen Anpassungsgüte und Modell-Komplexität das Modell M1a empfohlen, welches eine Vereinfachung des Modells M1 darstellt.

### 3.7.1.1 Fichte

Für die Fichte sind die Koeffizienten der fünf auf dem Marklund-Modell basierenden Funktionen in Tabelle 13 zusammengefasst. Die Koeffizienten der entsprechenden allometrischen Funktionen finden sich in Tabelle 14.

**Tabelle 13. Koeffizienten und Kennwerte der auf Marklund-Modellen basierenden Biomassefunktionen der Fichte: M0: ohne  $d_{03}$ ; M1/M1a:  $d_{1,3}$ ,  $d_{03}$ ,  $h$ ; M2: mit Alterseinfluss (in Form des mittleren jährlichen  $d_{1,3}$ -Zuwachses =  $d_{1,3}/A$ ); M3: mit Alter und Höhe über NN**

		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	RMSE	$r^2$	AIC
Prädiktor			$d_{1,3}$	$d_{03}$	$h$	$d_{1,3}/A$	$H_{NN}$			
M0		<b>2,486948</b>	<b>8,148358</b>		<b>3,430206</b>			104,8	0,9623	4346,3
	s. e.	0,102908	0,155868		0,272624					
			$k_1$		$k_3$					
			<b>29,5</b>		<b>68,7</b>					
M1		<b>1,931687</b>	<b>2,416992</b>	<b>6,20352</b>	<b>2,819174</b>			84,3	0,9756	4197,5
	s. e.	0,10009	0,414625	0,437915	0,175184					
			$k_1$	$k_2$	$k_3$					
			<b>36,5</b>	<b>29</b>	<b>27</b>					
M1a		<b>0,752848</b>	<b>2,849848</b>	<b>6,030355</b>	<b>0,621878</b>			83,6	0,9760	4207,8
		0,075115	0,407864	0,434552	0,038964					
			$k_1$	$k_2$						
			<b>42</b>	<b>24</b>						
M2		<b>1,465609</b>	<b>2,579259</b>	<b>6,488984</b>	<b>2,586831</b>	<b>-0,124239</b>		81,5	0,9772	4153
	s. e.	0,091485	0,384043	0,408704	0,198896	0,02161				
			$k_1$	$k_2$	$k_3$					
			<b>37,2</b>	<b>22,4</b>	<b>44,5</b>					
M3		<b>1,680418</b>	<b>2,577783</b>	<b>6,490337</b>	<b>2,958956</b>	<b>-0,130538</b>	<b>-0,022093</b>	78,3	0,9789	4148
	s. e.	0,128629	0,383864	0,408502	0,223476	0,021106	0,007987			
			$k_1$	$k_2$	$k_3$					
			<b>35,5</b>	<b>21,8</b>	<b>62</b>					

**Anzahl Beobachtungen = 394 (s. e. = Standard Error, RMSE = Root Mean Square Error, AIC = Aikaike Information Criterion: beim Modellvergleich hat das überlegene Modell einen kleineren AIC-Wert)**

Anhand der Gütemaße RMSE,  $r^2$  und AIC ist erkennbar, dass die Berücksichtigung zusätzlicher Prädiktoren bei der Fichte zu einer Modellverbesserung führt. Der deutlichste Sprung wird durch die Einbeziehung des  $d_{03}$  erzielt, indem die Formigkeit berücksichtigt wird. Aber auch der Alterseffekt ist signifikant, ebenso die Höhe über NN. Bei den Modellen M1 und M1a zeigen sich bezüglich der Gütemaße geringfügige Unterschiede. Zu beachten ist, dass beim Modell M1a keine zufälligen Effekte des Aufnahmeorts berücksichtigt werden. Ein Vergleich mit dem entsprechenden Modell mit zufälligem Effekt ergab keine signifikanten Unterschiede, so dass das einfachere Modell ohne zufälligen Effekt bevorzugt wurde.

Die entsprechenden allometrischen Modelle (Tabelle 14) sind den Marklund-Modellen jeweils unterlegen. Erst durch die Berücksichtigung des Alters und der Höhe über NN ist das allometrische Modell A3 dem Marklund-Modell M1 bzgl. des RMSE in etwa ebenbürtig.

**Tabelle 14. Koeffizienten und Kennwerte der auf allometrischen Modellen basierenden Biomassefunktionen der Fichte: A0: ohne  $d_{03}$ ; A1:  $d_{1,3}$ ,  $d_{03}$ ,  $h$ ; A2: mit Alterseinfluss (in Form des mittleren jährlichen  $d_{1,3}$ -Zuwachses); A3: mit Alter und Höhe über NN**

		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	RMSE	$r^2$	AIC
Prädiktor		$d_{1,3}$	$d_{03}$	$h$	A	$H_{NN}$				
A0		<b>0,063417</b>	<b>2,024664</b>		<b>0,565025</b>			108,7	0,9594	4348,8
	s. e.	0,004699	0,034313		0,04468					
A1		<b>0,049787</b>	<b>0,600133</b>	<b>1,516773</b>	<b>0,641857</b>			87	0,974	4198
	s. e.	0,003734	0,10056	0,106812	0,042196					
A2		<b>0,045432</b>	<b>0,519315</b>	<b>1,551204</b>	<b>0,557744</b>	<b>0,126521</b>		86,1	0,9745	4159,9
	s. e.	0,003305	0,096829	0,101996	0,042187	0,021099				
A3		<b>0,049897</b>	<b>0,517511</b>	<b>1,551136</b>	<b>0,56051</b>	<b>0,129262</b>	<b>-0,017339</b>	83,3	0,9762	4158,5
	s. e.	0,004383	0,096684	0,101782	0,041774	0,020838	0,008678			

**Anzahl Beobachtungen = 394 (s. e. = Standard Error, RMSE = Root Mean Square Error, AIC = Aikake Information Criterion: beim Modellvergleich hat das überlegene Modell einen kleineren AIC-Wert)**

### 3.7.1.2 Kiefer

Bei der Kiefer führte die Einbeziehung des  $d_{03}$  ebenfalls zu einer deutlichen Verbesserung gegenüber dem Modell mit den Prädiktoren  $d_{1,3}$  und Höhe ( $M_0$ ). Demgegenüber brachte die Berücksichtigung des Alters nur noch eine geringfügige Verbesserung, der Effekt in Form des mittleren jährlichen  $d_{1,3}$ -Zuwachses ist signifikant, während ein signifikanter Einfluss der Höhe über NN nicht mehr festzustellen ist. Die Koeffizienten finden sich in Tabelle 15.

**Tabelle 15. Koeffizienten und Kennwerte der auf Marklund-Modellen basierenden Biomassefunktionen der Kiefer: M0: ohne  $d_{03}$ ; M1/M1a:  $d_{1,3}$ ,  $d_{03}$ ,  $h$ ; M2: mit Alter (in Form des mittleren jährlichen  $d_{1,3}$ -Zuwachses =  $d_{1,3}/A$ )**

		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	RMSE	$r^2$	AIC
Prädiktor		$d_{1,3}$	$d_{03}$	$h$	$d_{1,3}/A$				
M0		<b>0,526156</b>	<b>8,989698</b>		<b>2,412</b>		105,7	0,9686	1425,1
	s. e.	0,070442	0,183087		0,315944				
			$k_1$		$k_3$				
			23,7		13,3				
M1		<b>0,684639</b>	<b>2,780448</b>	<b>6,421893</b>	<b>2,676817</b>		78,2	0,9828	1368,8
	s. e.	0,068745	0,70356	0,643729	0,243453				
			$k_1$	$k_2$	$k_3$				
			16,7	22,9	28,1				
M1a		<b>0,3377827</b>	<b>2,8405525</b>	<b>6,3496385</b>	<b>0,6275549</b>		78,2	0,9828	1368,9
	s.e.	0,0415589	0,7209862	0,6713221	0,0577834				
			$k_1$	$k_2$					
			18	23					
M2		0,722986	3,956966	5,710327	3,153783	-0,129631	75,7	0,9839	1364
	s. e.	0,121056	0,631405	0,54195	0,391317	0,044628			
			$k_1$	$k_2$	$k_3$				
			14	28,9	68,9				

**Anzahl Beobachtungen = 133; (s. e. = Standard Error, RMSE = Root Mean Square Error, AIC = Aikake Information Criterion: beim Modellvergleich hat das überlegene Modell einen kleineren AIC-Wert)**

Die entsprechenden allometrischen Modelle für die Kiefer sind in Tabelle 16 wiedergegeben. Sie sind durchweg den entsprechenden Marklund-Modellen unterlegen.

**Tabelle 16. Koeffizienten und Kennwerte der auf allometrischen Modellen basierenden Biomassefunktionen der Kiefer: A0: ohne  $d_{03}$ ; A1:  $d_{1,3}$ ,  $d_{03}$ ,  $h$ ; A2: mit Alter (in Form des mittleren jährlichen  $d_{1,3}$ -Zuwachses)**

		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	RMSE	$r^2$	AIC
Prädiktor			$d_{1,3}$	$d_{03}$	$h$	A			
A0		<b>0,037101</b>	<b>2,112047</b>		<b>0,63628</b>		120,5	0,9593	1426
	s. e.	0,00578	0,045073		0,077527				
A1		<b>0,039512</b>	<b>0,59613</b>	<b>1,550124</b>	<b>0,690125</b>		87,6	0,9785	1369,8
	s. e.	0,004625	0,177426	0,176038	0,061084				
A2		<b>0,03849</b>	<b>0,602442</b>	<b>1,472234</b>	<b>0,606901</b>	<b>0,115507</b>	82,1	0,9811	1365,9
	s. e.	0,004691	0,173409	0,172854	0,069774	0,047442			

Anzahl Beobachtungen = 133 (s. e. = Standard Error, RMSE = Root Mean Square Error, AIC = Aikake Information Criterion: beim Modellvergleich hat das überlegene Modell einen kleineren AIC-Wert)

### 3.7.1.3 Buche

Bei der Buche wurden nur die Modelle M0 ( $d_{1,3}$  und Höhe) und M1 bzw. M1a ( $d_{1,3}$ ,  $d_{03}$  und Höhe) angepasst (Tabelle 17), da die Einbeziehung des Alterseffekts und der Höhe über NN keine Modellverbesserung erbrachten.

**Tabelle 17. Koeffizienten und Kennwerte der auf dem Marklund-Modell basierenden Biomassefunktionen der Buche: M0: ohne  $d_{03}$ ; M1/M1a:  $d_{1,3}$ ,  $d_{03}$ ,  $h$**

		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	RMSE	$r^2$	AIC
Prädiktor			$d_{1,3}$	$d_{03}$	$h$			
M0		<b>1,101282</b>	<b>8,743062</b>		<b>3,50276</b>	340,7	0,9285	3364,1
	s. e.	0,078293	0,14122		0,21451			
			$k_1$		$k_3$			
			<b>31,7</b>		<b>17,2</b>			
M1		<b>0,719</b>	<b>6,391743</b>	<b>6,045524</b>	<b>3,508909</b>	271,7	0,9546	3328,5
	s. e.	0,067532	0,295239	0,421324	0,233997			
			$k_1$	$k_2$	$k_3$			
			<b>14</b>	<b>153,8</b>	<b>31,6</b>			
M1a		<b>0,1678714</b>	<b>6,2545221</b>	<b>6,6475227</b>	<b>0,8074514</b>	263,8	0,9572	3337,5
	s. e.	0,0205491	0,3212083	0,3758114	0,0572881			
			$k_1$	$k_2$				
			<b>11</b>	<b>135</b>				

Anzahl Beobachtungen = 278; (s. e. = Standard Error, RMSE = Root Mean Square Error, AIC = Aikake Information Criterion: beim Modellvergleich hat das überlegene Modell einen kleineren AIC-Wert)

Modell M1a weist ein kleineres RMSE auf als Modell M1, während dieses bezüglich des AIC dem Modell M1a überlegen erscheint. Die entsprechenden allometrischen Modelle finden sich in Tabelle 18; sie zeigen insgesamt im Vergleich zu den Marklund-Modellen durchweg schlechtere Gütemaße, was am RMSE deutlich zu erkennen ist.



**Tabelle 18. Koeffizienten und Kennwerte der auf allometrischen Modellen basierenden Biomassefunktionen der Buche: A0: ohne  $d_{03}$ ; A1:  $d_{1,3}$ ,  $d_{03}$ ,  $h$**

		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	RMSE	$r^2$	AIC
Prädiktor			$d_{1,3}$	$d_{03}$	$h$			
A0		<b>0,038739</b>	<b>2,109346</b>		<b>0,781695</b>	356,5	0,9217	3377,7
	s. e.	0,003287	0,033826		0,052687			
A1		<b>0,051866</b>	<b>1,471471</b>	<b>0,660573</b>	<b>0,699242</b>	300,9	0,9442	3335,3
	s. e.	0,00489	0,101717	0,099494	0,054206			

**Anzahl Beobachtungen = 278 (s. e. = Standard Error, RMSE = Root Mean Square Error, AIC = Aikake Information Criterion: beim Modellvergleich hat das überlegene Modell einen kleineren AIC-Wert)**

### 3.7.1.4 Eiche

Für die Eiche lieferte das Marklund-Modell mit den drei Prädiktoren  $d_{1,3}$ ,  $d_{03}$  und Höhe die relativ beste Schätzfunktion, wenngleich die Erweiterung um den Alterseinfluss (mittlerer jährlicher  $d_{1,3}$ -Zuwachs) und Höhe über NN eine geringfügig bessere Funktion ergeben würde. In Tabelle 19 sind nur die Modelle M0, M1 bzw. M1a dargestellt. Das favorisierte Modell M1a weist zwar geringfügig schlechtere Gütemaße als das entsprechende Modell M1 auf, die Unterschiede können aber als marginal betrachtet werden und sind im Sinne eines einheitlichen Verfahrens akzeptabel.

**Tabelle 19. Koeffizienten und Kennwerte der auf dem Marklund-Modell basierenden Biomassefunktionen der Eiche: M0: ohne  $d_{03}$ ; M1/M1a:  $d_{1,3}$ ,  $d_{03}$ ,  $h$**

		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	RMSE	$r^2$	AIC
Prädiktor			$d_{1,3}$	$d_{03}$	$h$			
M0		<b>1,10692</b>	<b>9,428693</b>		<b>1,736712</b>	192,4	0,9606	1196,7
	s. e.	0,146262	0,210929		0,463572			
			$k_1$		$k_3$			
			22		28			
M1		<b>0,28622</b>	<b>6,374033</b>	<b>7,921187</b>	<b>4,817535</b>	177,2	0,9665	1159,3
	s. e.	0,049428	0,583282	0,356871	0,722696			
			$k_1$	$k_2$	$k_3$			
			200	8	140			
M1a		<b>0,0942792</b>	<b>10,269984</b>	<b>8,1389360</b>	<b>0,5584491</b>	179,7	0,9656	1163,2
	s. e.	0,0177512	0,8492277	0,3121643	0,0733798			
			$k_1$	$k_2$				
			400	8				

**Anzahl Beobachtungen = 107; (s. e. = Standard Error, RMSE = Root Mean Square Error, AIC = Aikake Information Criterion: beim Modellvergleich hat das überlegene Modell einen kleineren AIC-Wert)**

Die allometrischen Funktionen sind in Tabelle 20 wiedergegeben. Hier führte die Erweiterung um den Alterseinfluss kombiniert mit der Höhe über NN zu einer leichten Modellverbesserung. Das Marklund-Modell mit den drei Prädiktoren (M1) ist allerdings in etwa gleich gut zu beurteilen wie dieses allometrische Modell (A3) mit insgesamt fünf Prädiktoren.

**Tabelle 20. Koeffizienten und Kennwerte der auf allometrischen Modellen basierenden Biomassefunktionen der Eiche: A0: ohne  $d_{03}$ ; A1:  $d_{1,3}$ ,  $d_{03}$ ,  $h$ ; A3: mit Alterseinfluss und Höhe über NN**

		$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	RMSE	$r^2$	AIC
Prädiktor			$d_{1,3}$	$d_{03}$	$h$	$A$	$H_{NN}$			
A0		<b>0,058301</b>	<b>2,182372</b>		<b>0,543643</b>			190,1	0,9615	1201,3
	s. e.	0,014145	0,049725		0,113677					
A1		<b>0,062343</b>	<b>0,632533</b>	<b>1,540644</b>	<b>0,609326</b>			189,4	0,9618	1166,2
	s. e.	0,012171	0,229773	0,222083	0,09579					
A3		<b>0,042944</b>	<b>0,762234</b>	<b>1,472276</b>	<b>0,755072</b>	<b>-0,102741</b>	<b>0,026662</b>	176,3	0,9669	1163,6
	s. e.	0,010174	0,232612	0,222133	0,110689	0,053641	0,01304			

**Anzahl Beobachtungen = 107 (s. e. = Standard Error, RMSE = Root Mean Square Error, AIC = Aikake Information Criterion: beim Modellvergleich hat das überlegene Modell einen kleineren AIC-Wert)**

### 3.7.2 Biomassefunktionen für Baumarten ohne empirische Datengrundlagen

Da nur für die vier häufigsten Baumarten empirische Daten für die Anpassung von Biomassefunktionen verfügbar sind, musste für die Aufstellung der Biomassefunktionen für die übrigen 14 „Raumdichte“-Baumarten ein anderer Weg beschritten werden. Für diese Baumarten liegt lediglich die synthetische Biomassefunktion vor, welche im Rahmen dieser Studie überarbeitet wurde. Da jedoch ein einheitliches auf einem Modelltyp basierendes Verfahren gefordert ist, wird auch für diese Baumarten ein Modell des Typs M1a benötigt. Um dieses Modell anpassen zu können, wurde anhand des Datenmaterials der 1. und 2. Bundeswaldinventur für alle Probestämme der verbliebenen 14 Baumarten die oberirdische Biomasse mit der überarbeiteten synthetischen Biomassefunktion berechnet. Damit waren so genannte „Pseudo“-Beobachtungen der oberirdischen Biomasse für eine große Zahl Probestämme verfügbar, anhand derer das Modell M1a angepasst werden konnte. Es wurden jedoch (mit einer Einschränkung) nur Probestämme mit „vollständiger“ Dendrometrie verwendet, also nur die Bäume, an denen neben dem  $d_{1,3}$  ein oberer Durchmesser und die Höhe gemessen sind. Für das alte Bundesgebiet sind das alle Bäume der 1. Bundeswaldinventur, für die Neuen Länder die Aufnahmen der 2. Bundeswaldinventur, die allerdings nur eine Unterstichprobe darstellt. Als oberer Durchmesser wurde der Durchmesser in 7 m über Grund erfasst. Mittels BDAT wurde aus diesen Werten der entsprechende  $d_{03}$  berechnet. Zum Datenmaterial der 1. Bundeswaldinventur ist anzumerken, dass der obere Durchmesser nur von Bäumen ab einem  $d_{1,3}$  von 20 cm erfasst worden ist. Da aber alle Probestämme der 1. BWI ab einem  $d_{1,3}$  von 10 cm einbezogen wurden, hat ein kleinerer Teil dieses Kollektivs ( $d_{1,3} < 20$  cm) de facto keinen gemessenen oberen Durchmesser, sondern einen der mittleren Formigkeit entsprechenden modellierten Wert für den  $d_{03}$ .

Die Anpassung erfolgte analog zu den vier Hauptbaumarten mit der Prozedur eines generalisierten nicht-linearen Modells („gnlms“ im R-Package „nlme“, R Core Team, 2012) mit einer Modellierung der Residuen, wie in Abschnitt 3.7 beschrieben. Die ermittelten Koeffizienten sind in Tabelle 24 des folgenden Abschnitts wiedergegeben.

### 3.7.3 Biomassefunktion für das Derbholz-Kollektiv aller Baumarten

Aus den vorangehenden Schritten steht nun eine für alle 18 „Raumdichte“-Baumarten kalibrierte Biomassefunktion für das Derbholzkollektiv zur Verfügung, welche über eine Zuordnung der verbliebenen Baumarten zu einer jeweils passenden Raumdichte-Baumart für alle

Baumarten anwendbar ist. In Tabelle 21 findet sich die Zuordnung der BWI-Nadelbaumarten zu den 5 Raumdichte-Nadelbaumarten.

**Tabelle 21. Zuordnung der BWI-Nadelbaumarten zu den 5 Raumdichte-Nadelbaumarten**

BWI-Baumart		RD-Baumart		BWI-BA-Gruppe	BWI-Baumart		RD-Baumart		BWI-BA-Gruppe
Code	Kurzbez.	Bez.	Code		Code	Kurzbez.	Bez.	Code	
10	GFI	Fichte	1	Fichte	30	WTA	Tanne	2	Tanne
11	OFI	Fichte	1	Fichte	31	ATA	Tanne	2	Tanne
12	SFI	Fichte	1	Fichte	32	CTA	Tanne	2	Tanne
13	SWFI	Fichte	1	Fichte	33	KTA	Tanne	2	Tanne
14	EFI	Fichte	1	Fichte	34	NITA	Tanne	2	Tanne
15	BFI	Fichte	1	Fichte	35	NOTA	Tanne	2	Tanne
16	WFI	Fichte	1	Fichte	36	VTA	Tanne	2	Tanne
19	SOFI	Fichte	1	Fichte	39	SOTA	Tanne	2	Tanne
20	KI	Kiefer	4	Kiefer	40	DGL	Dougl.	3	Dougl.
21	BKI	Kiefer	4	Kiefer	50	ELA	Lärche	5	Lärche
22	SKI	Kiefer	4	Kiefer	51	JLA	Lärche	5	Lärche
23	RKI	Kiefer	4	Kiefer	90	SONB	Fichte	1	Fichte
24	ZKI	Kiefer	4	Kiefer	91	LB	Fichte	1	Fichte
25	WKI	Kiefer	4	Kiefer	92	HT	Fichte	1	Fichte
26	MKI	Kiefer	4	Kiefer	93	MAM	Fichte	1	Fichte
27	GKI	Kiefer	4	Kiefer	94	EIB	Fichte	1	Fichte
29	SOKI	Kiefer	4	Kiefer	95	SZ	Fichte	1	Fichte
					99	ANB	Fichte	1	Fichte

Tabelle 22 und Tabelle 23 geben die Zuordnung der BWI-Laubbbaumarten zu den 13 Raumdichte-Laubbbaumarten.

**Tabelle 22. Zuordnung der BWI-Laubbbaumarten zu den Raumdichte-Laubbbaumarten der Baumartengruppe Buche, Eiche, Andere Laubbäume hoher Lebensdauer**

BWI-Baumart		RD-Baumart		BWI-BA-Gruppe	BWI-Baumart		RD-Baumart		BWI-BA-Gruppe
Code	Kurzbez.	Bez.	Code		Code	Kurzbez.	Bez.	Code	
100	BU	Buche	6	Buche	150	LI	Linde	12	ALH
110	SEI	Eiche	7	Eiche	160	ROB	Robinie	13	ALH
111	TEI	Eiche	7	Eiche	170	UL	Ulme	14	ALH
112	REI	Eiche	7	Eiche	180	RKA	Buche	6	ALH
113	ZEI	Eiche	7	Eiche	181	EKA	Buche	6	ALH
114	SUEI	Eiche	7	Eiche	190	SOLH	Buche	6	ALH
120	ES	Esche	8	ALH	191	SPE	Buche	6	ALH
121	WES	Esche	8	ALH	192	MAU	Buche	6	ALH
130	HBU	Hainbuche	9	ALH	193	MEB	Buche	6	ALH
140	BAH	Bergahorn	10	ALH	194	NUS	Buche	6	ALH
141	SAH	Spitzahorn	11	ALH	195	STE	Buche	6	ALH
142	FAH	Bergahorn	10	ALH	196	PLA	Buche	6	ALH
143	EAH	Bergahorn	10	ALH	199	ÜLH	Buche	6	ALH
144	SIAH	Bergahorn	10	ALH					

ALH: Andere Laubbäume hoher Lebensdauer

**Tabelle 23. Zuordnung der BWI-Laubbaumarten zu den Raumdichte-Laubbaumarten der Baumartengruppe Andere Laubbäume niedriger Lebensdauer**

BWI-Baumart		RD-Baumart		BWI-BA-Gruppe	BWI-Baumart		RD-Baumart		BWI-BA-Gruppe
Code	Kurzbez.	Bez.	Code		Code	Kurzbez.	Bez.	Code	
200	BI	Birke	15	ALN	240	WEI	Weide	18	ALN
201	MBI	Birke	15	ALN	250	GTK	Buche	6	ALN
210	ERL	Erle	16	ALN	251	VK	Buche	6	ALN
211	SER	Erle	16	ALN	252	STK	Buche	6	ALN
212	WER	Erle	16	ALN	290	SOLN	Buche	6	ALN
213	GER	Erle	16	ALN	291	FAU	Buche	6	ALN
220	ZPA	Pappel	17	ALN	292	WAP	Buche	6	ALN
221	SPA	Pappel	17	ALN	293	WBI	Buche	6	ALN
222	GPA	Pappel	17	ALN	294	HAS	Buche	6	ALN
223	WPA	Pappel	17	ALN	295	ELS	Buche	6	ALN
224	BPA	Pappel	17	ALN	296	GOT	Buche	6	ALN
230	VB	Buche	6	ALN	299	ÜLN	Buche	6	ALN

ALN: Andere Laubbäume niedriger Lebensdauer

Tabelle 24 gibt die Koeffizienten des Marklund-Modells M1a für alle 18 Raumdichte-Baumarten wieder. Sie enthält für die auf echten Beobachtungen basierenden Funktionen zusätzlich die Kenngrößen der Residuen-Modellierung  $\delta$  und  $\sigma$  (siehe Abschnitt 3.7).

**Tabelle 24. Koeffizienten des Marklund-Modells M1a für alle 18 Raumdichte-Baumarten**

Raumdichte-Baumart		b0	b1	b2	b3	k1	k2	$\delta$	$\sigma$
Nr.	Kürzel								
1	FI	<b>0,7528482</b>	<b>2,8498488</b>	<b>6,0303554</b>	<b>0,6218775</b>	<b>42,0</b>	<b>24,0</b>	<b>0,8867</b>	<b>0,2160</b>
2	TA	0,0639428	4,1127711	6,6927786	1,0586850	6,0	62,7		
3	DGL	0,0542670	5,5312112	9,2598976	0,8900834	5,5	139,2		
4	KI	<b>0,3377827</b>	<b>2,8405525</b>	<b>6,3496385</b>	<b>0,6275549</b>	<b>18,0</b>	<b>23,0</b>	<b>0,9979</b>	<b>0,1021</b>
5	LAE	0,1412634	4,4192519	6,2944238	0,8834091	6,4	68,6		
6	BU	<b>0,1678714</b>	<b>6,2545221</b>	<b>6,6475227</b>	<b>0,8074514</b>	<b>11,0</b>	<b>135,0</b>	<b>1,0453</b>	<b>0,0953</b>
7	EI	<b>0,0942792</b>	<b>10,2699838</b>	<b>8,1389360</b>	<b>0,5584491</b>	<b>400,0</b>	<b>8,0</b>	<b>1,1451</b>	<b>0,0375</b>
8	ES	0,1401135	4,9170997	6,2856232	0,9052138	9,0	70,6		
9	HBU	0,3480539	5,5121902	5,8299898	0,8844637	157,6	13,0		
10	BAH	0,2078300	4,3792021	6,2941223	0,8593124	10,0	61,5		
11	SAH	0,2066954	3,9442978	6,1135036	0,8629615	9,4	46,3		
12	LI	0,1107556	5,1760431	6,9650500	0,8528893	8,7	90,9		
13	ROB	0,6277484	3,9710934	5,1358988	0,8709408	67,6	18,6		
14	UL	0,1917100	4,2020652	6,6561693	0,7799419	8,2	53,1		
15	BI	0,2104189	4,3872108	5,4398294	0,8060966	68,4	10,1		
16	ER	0,1383050	4,4635951	5,9477189	0,8509720	11,1	50,7		
17	PA	0,2727780	4,1924023	5,9629757	0,8103122	13,7	66,8		
18	WEI	0,2997827	4,7553049	6,3658692	0,7869334	13,2	85,8		

### 3.8 Erweiterung des Gültigkeitsbereichs – „Integrierte Biomassefunktion“

Die im vorigen Abschnitt beschriebene Biomassefunktion gilt nur für den durch das zugrundeliegende Material abgedeckten Dimensionsbereich. Ausgedrückt durch den  $d_{1,3}$  reicht dieser bei den vier Hauptbaumarten bis 84,6 cm bei der Buche, 81,2 cm bei der Fichte, 72,6 cm bei der Eiche und 70,5 cm bei der Kiefer. Der untere Wert liegt bei allen vier Baumarten bei etwa 10 cm. Die Bundeswaldinventur erfasst Bäume jedoch ab einer Mindesthöhe von 20 cm, so dass auch für dieses Baumkollektiv Biomasseschätzungen erforderlich sind. Für diesen unteren Dimensionsbereich der Nicht-Derbholz-Bäume musste die Biomassefunktion erweitert werden. Des Weiteren tritt im stärkeren Bereich ebenfalls ein Extrapolationsproblem auf, da für alle Bäume, die stärker sind als der bei der Kalibrierung abgedeckte Wertebereich, die Schätzwerte zunehmend unsicher werden; dies gilt vor allem für extrem starke Bäume mit einem  $d_{1,3}$  über 100 cm.

#### 3.8.1 Erweiterung um Nicht-Derbholz

Die ursprünglich für die 2. Bundeswaldinventur entwickelte synthetische Biomassefunktion liefert auch für diese kleinen Bäume Biomassewerte, allerdings auf der Grundlage rein gutachterlicher Annahmen ohne empirisch gesicherte Daten. Neuere Biomassedaten für Nicht-Derbholzbäume, die zur Anpassung geeigneter Funktionen verwendet werden können, wurden von der FVA erhoben (Kändler et al. 2006) und nun zur Überarbeitung des Biomasseschätzverfahren herangezogen. Das Datenmaterial umfasst 621 Bäume der Baumarten Fichte, Tanne, Kiefer, Buche, Eiche, Esche und Bergahorn.

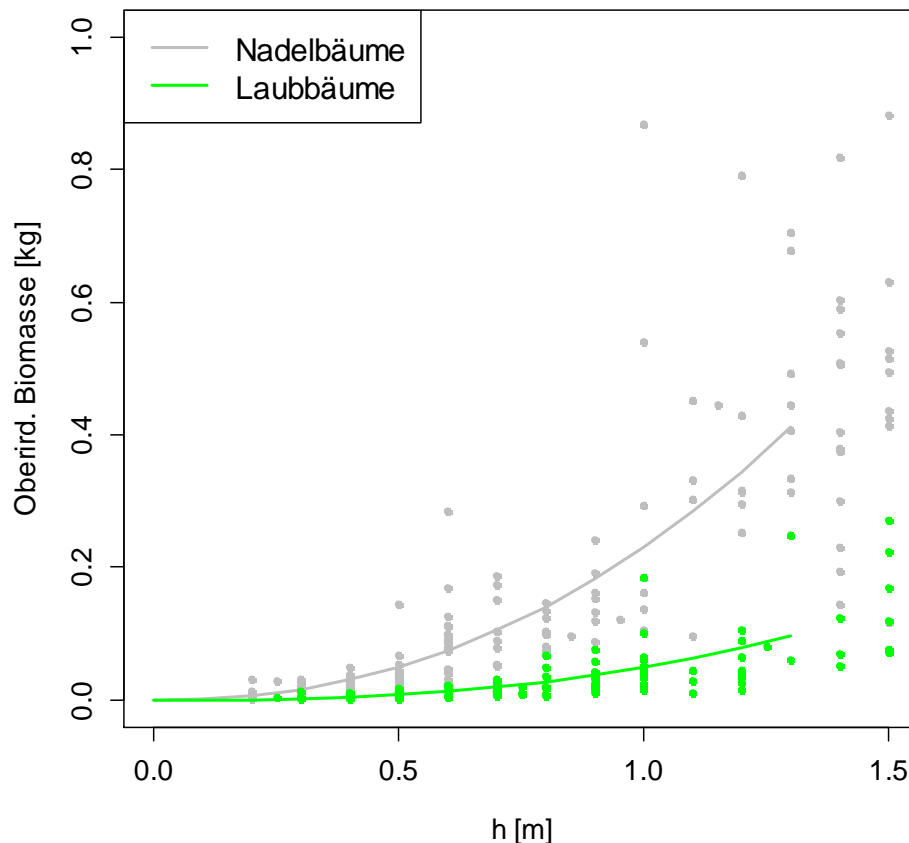
Die integrierte Biomassefunktion deckt im unteren Extrapolationsbereich des Nicht-Derbholzes bzw. im Übergang zum Derbholz zwei Dimensionskategorien ab: (1) die kleinsten bei der Bundeswaldinventur erfassten Bäume unter 1,3 m Höhe, in den Höhenklassen 0,2 bis 0,5 m sowie > 0,5 bis 1,3 m, deren mittlere Höhe auf 0,35 bzw. 0,9 m gesetzt wird, und (2) die Bäume mit einem  $d_{1,3}$  im Bereich von 0 bis 10 cm<sup>4</sup>.

Für die Bäume unter 1,3 m Höhe wurde anhand der Nicht-Derbholz-Biomassedaten eine Biomassefunktion in Form eines allometrischen Modells angepasst, welches die Höhe als Prädiktor nutzt, wobei nur zwischen Nadel- und Laubbäumen unterschieden wird, da die Nadelbäume deutlich höhere Biomassewerte als die Laubbäume aufweisen (Abbildung 29). Artspezifische Unterschiede lassen sich zwar erkennen, wegen des insgesamt geringen Datenumfangs (253 Bäume, verteilt auf 7 Baumarten) erschien eine weitere Differenzierung nach Baumarten nicht vertretbar.

**Tabelle 25. Koeffizienten der Biomassefunktion für Bäume unter 1,3 m Höhe mit der Höhe als Prädiktor**

Baumartengruppe	$b_0$	$b_1$
Nadelbäume	0,2305890	2,2010099
Laubbäume	0,0494022	2,5494617
<b>Modell</b> $B = b_0 \cdot h^{b_1}$		

<sup>4</sup> Die Begründung für 10 cm anstelle von 7 cm als Schwellenwert für das Derbholz wird weiter unten gegeben.



**Abbildung 29. Oberirdische Biomasse in Abhängigkeit von der Baumhöhe bei kleinen Bäumen mit einer Höhe  $\leq 1,3$  m. Es werden nur Nadel- und Laubbäume unterschieden.**

Sobald die Bäume eine Höhe über 1,3 m erreichen, kann der  $d_{1,3}$  gemessen werden. Bei der Bundeswaldinventur wird der  $d_{1,3}$  jedoch erst ab 7 cm gemessen, schwächere Bäume werden lediglich nach Größenklassen erfasst, denen ein mittlerer  $d_{1,3}$  zugewiesen wird. Da die Biomassedaten des Nicht-Derbholz-Kollektivs etwa bis zu einem  $d_{1,3}$  von 8 cm reichen und bei den stärkeren Biomassebäume Beobachtungen erst ab einem  $d_{1,3}$  von etwa 10 cm vorliegen, besteht eine „Daten-Lücke“ im Bereich zwischen 8 und 10 cm. Der Gültigkeitsbereich für die Biomassefunktion der Derbholzbäume wurde daher erst ab einem  $d_{1,3}$  von 10 cm festgelegt. Für den Bereich  $0 < d_{1,3} \leq 10$  cm wurde eine eigene Funktion aufgestellt, welche nur den  $d_{1,3}$  als Prädiktor benötigt und sozusagen zwischen den Beobachtungen im Nicht-Derbholz-Bereich ( $0 < d_{1,3} < 8$  cm) und dem Beginn der Beobachtungen im stärkeren Bereich ab  $d_{1,3}$  10 cm „interpoliert“. Als unterer Stützwert wurde die Biomasse bei einer Höhe von 1,3 m (getrennt nach Nadel- und Laubbäumen) verwendet, den oberen Stützwert bildete für jede Raumdichte-Baumart der jeweilige Wert der Biomassefunktion bei mittlerer Höhe und mittlerer Formigkeit. Die Mittelwerte für  $d_{03}$  und Höhe an der Stelle  $d_{1,3} = 10$  cm wurden über Tarife für den  $d_{03}$  bzw. die Höhe bestimmt (Tabelle 26), welche an den BWI-1-Daten kalibriert wurden. Die Koeffizienten des  $d_{03}$ - und Höhen-Tarifs finden sich in Tabelle 26.

**Tabelle 26. Tariffunktionen für  $d_{03}$  und Höhe in Abhängigkeit vom  $d_{1,3}$**

Tariffunktionen

$$d_{03} = c_0 \cdot d_{1,3}^{c_1}$$

$$d_{03} = c_0 \cdot d_{1,3}^{c_1}$$

Die interpolierende Funktion wird durch ein Polynom 3. Grades beschrieben, welches neben den Randbedingungen (unterer und oberer Stützwert) der Bedingung genügt, dass am unteren Stützwert die Steigung 0 beträgt, um einen monotonen Anstieg zu erzwingen. Somit bleibt ein freier Parameter übrig, der nach der Methode der kleinsten Quadrate anhand der Daten des Nicht-Derbholz-Kollektivs bestimmt wird. Die Bestimmung der Koeffizienten des interpolierenden Polynoms 3. Grades erfolgt unter Berücksichtigung der Randbedingungen folgendermaßen:

$$B = b_0 + b_1 d_{1,3} + b_2 d_{1,3}^2 + b_3 d_{1,3}^3$$

$$B' = b_1 + 2b_2 d_{1,3} + 3b_3 d_{1,3}^2$$

Randbedingungen:

$$B(d_{1,3} = 0) = B_0$$

$$B(d_{1,3} = d_s) = B_s$$

$$B'(d_{1,3} = 0) = 0$$

$\Rightarrow$

$$b_0 = B_0$$

$$b_1 = 0$$

$$b_2 = \frac{B_s - B_0}{d_s^2} - b_3 d_s$$

$\Rightarrow$

$$B = B_0 + \left[ \frac{B_s - B_0}{d_s^2} + b_3 (d_{1,3} - d_s) \right] d_{1,3}^2$$

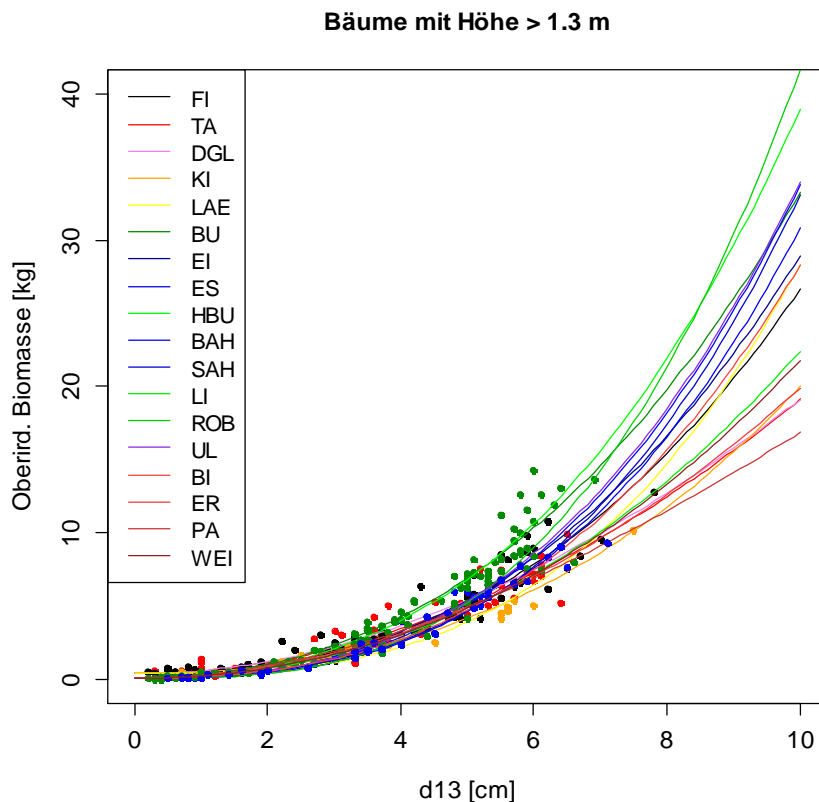
$$d_s = 10$$

Das an die Beobachtungen im  $d_{1,3}$ -Bereich zwischen 0 und 10 cm anzupassende Polynom 3. Grades wurde unter Beachtung der festgelegten Randbedingungen folgendermaßen hergeleitet. Der untere Stützwert  $B_0$  nimmt getrennt nach Nadel- und Laubbäumen die Werte 0,0964 kg für Laubbäume bzw. 0,4108 kg für die Nadelbäume an (entsprechend der Schätzfunktion für die Bäume bis 1,3 m Höhe für  $h = 1,3$  m). Die oberen Stützwerte  $B_s$  wurden für die 18 Raumdichte-Baumarten aus der Biomassefunktion (Modell M1a) geschätzt und sind zusammen mit dem Koeffizienten  $b_3$  in Tabelle 27 wiedergegeben.

Die Funktionsverläufe für die 18 Baumarten sind zusammen mit den beobachteten Werten in Abbildung 30 dargestellt. Mit zunehmendem  $d_{1,3}$  differenzieren sich die verschiedenen Baumarten, wobei die Laubbäume, obgleich von einem deutlich niedrigeren Wert ausgehend, am Ende des Abschnitts größere Biomassen aufweisen als die Nadelbäume.

**Tabelle 27. Koeffizienten der Biomassefunktion in Abhängigkeit vom  $d_{1,3}$  für den  $d_{1,3}$ -Bereich von 0 bis 10 cm sowie Koeffizienten der Tariffunktionen;  $r^2$  ist das Bestimmtheitsmaß der Biomassefunktion.**

Baumart	$B_0$	$B_s$	$b_3$	$r^2$	$d_{03}$ -Tarif		Höhentarif	
	[kg]	[kg]			$c_0$	$c_1$	a	b
FI	0,4108	26,6312	0,0136956	0,9157	1,07843	0,91204	0,27407	2,22031
TA	0,4108	19,1223	-0,0007102	0,9079	1,17372	0,89811	0,27724	2,39746
DGL	0,4108	19,1171	-0,0027533	0,9221	1,06871	0,90606	0,25940	2,92883
KI	0,4108	19,9994	0,0091576	0,9252	0,89009	0,95747	0,29722	1,98688
LAE	0,4108	28,3391	0,0276856	0,8686	1,20044	0,88028	0,27632	2,45994
BU	0,0964	33,2233	0,0116212	0,9481	0,84014	0,98970	0,29397	1,76894
EI	0,0964	28,9478	0,0150089	0,9343	0,87633	0,98279	0,31567	1,63335
ES	0,0964	33,7489	0,0267947	0,9440	0,82820	0,99111	0,30039	1,53531
HBU	0,0964	38,9495	0,0238613	0,9515	0,80180	1,00054	0,33218	1,28124
BAH	0,0964	30,7955	0,0246965	0,9553	0,86427	0,97514	0,31404	1,53200
SAH	0,0964	33,0909	0,0296720	0,9422	0,74894	1,02187	0,31739	1,34420
LI	0,0964	22,4146	0,0065296	0,9751	0,83080	0,99051	0,31178	1,72939
ROB	0,0964	41,6565	0,0419329	0,8676	0,98061	0,93544	0,32244	1,49008
UL	0,0964	33,9757	0,0256607	0,9150	1,03545	0,92655	0,32655	1,29245
BI	0,0964	28,2896	0,0192646	0,9658	1,03098	0,90441	0,32172	1,57566
ER	0,0964	19,8880	0,0010528	0,9724	0,93691	0,94447	0,32270	1,49658
PA	0,0964	16,8610	-0,0055086	0,9639	0,86720	0,96154	0,28064	2,40288
WEI	0,0964	21,7851	0,0051651	0,9748	0,82871	0,98686	0,34524	1,69563



**Abbildung 30. Oberirdische Biomasse in Abhängigkeit vom  $d_{1,3}$  bei Bäumen im Bereich  $0 < d_{1,3} \leq 10$  cm. Es werden 18 Baumarten unterschieden entsprechend den in der synthetischen Biomassefunktion angewandten „Raumdichte-Baumarten“.**



### 3.8.2 Oberer Extrapolationsbereich

Wie bereits erwähnt, sind die Biomassefunktionen für den Derbholzbereich empirisch nur bis zu bestimmten Dimensionen gesichert. Wegen der nicht-linearen Natur der Biomassefunktionen besteht daher das Risiko, dass bei extrem starken Bäumen die Biomasseschätzung unrealistisch hohe Werte erreicht. Dies gilt für beide Teilkollektive, die vier Hauptbaumarten, welche an die tatsächlich gemessenen Biomassedaten angepasst wurden, also auch die übrigen Baumarten, für welche das entsprechende Modell anhand der mit der überarbeiteten synthetischen Funktion berechneten „Pseudo“-Beobachtungen kalibriert wurde. Um den Effekt einer Überschätzung im Extrapolationsbereich oberhalb eines baumartenspezifischen Schwellendurchmessers zu reduzieren, wird das nicht-lineare Marklund-Modell M1a linearisiert. Die Linearisierung erfolgt folgendermaßen:

- (1) Für das Modell M1a werden die partiellen Ableitungen nach den drei Prädiktoren  $d_{1,3}$ ,  $d_{03}$  und  $h$  gebildet:

$$B = b_0 \cdot e^{b_1 \cdot \frac{d_{1,3}}{d_{1,3}+k_1}} \cdot e^{b_2 \cdot \frac{d_{03}}{d_{03}+k_2}} \cdot h^{b_3}$$

$$\frac{\partial B}{\partial d_{1,3}} = B \cdot \frac{b_1 \cdot k_1}{(d_{1,3} + k_1)^2}; \frac{\partial B}{\partial d_{03}} = B \cdot \frac{b_2 \cdot k_2}{(d_{03} + k_2)^2}; \frac{\partial B}{\partial h} = B \cdot \frac{b_3}{h}$$

- (2) Für einen Baum mit einem  $d_{1,3}$  oberhalb des Schwellenwerts  $d_{1,3}^*$  werden an der Stelle des Schwellenwerts die Werte für die zwei anderen Prädiktoren  $d_{03}$  und  $h$  mit Hilfe der Tarife (Tabelle 26) folgendermaßen geschätzt:

$$d_{03}^* = d_{03} + c_0 \cdot d_{1,3}^{*c_1} - c_0 \cdot d_{1,3}^{c_1}$$

$$h^* = h + \left( a + \frac{b}{d_{1,3}^*} \right)^{-3} - \left( a + \frac{b}{d_{1,3}} \right)^{-3}$$

- (3) Mit diesen Größen lassen sich die Biomasse  $B^*$  an der Stelle  $(d_{1,3}^*, d_{03}^*, h^*)$  und die jeweiligen partiellen Ableitungen berechnen:

$$B^* = b_0 \cdot e^{b_1 \cdot \frac{d_{1,3}^*}{d_{1,3}^*+k_1}} \cdot e^{b_2 \cdot \frac{d_{03}^*}{d_{03}^*+k_2}} \cdot h^{*b_3}$$

$$\left[ \frac{\partial B}{\partial d_{1,3}} \right]^* = B^* \cdot \frac{b_1 \cdot k_1}{(d_{1,3}^* + k_1)^2}; \left[ \frac{\partial B}{\partial d_{03}} \right]^* = B^* \cdot \frac{b_2 \cdot k_2}{(d_{03}^* + k_2)^2}; \left[ \frac{\partial B}{\partial h} \right]^* = B^* \cdot \frac{b_3}{h^*}$$

Das linearisierte Modell lautet dann:

$$B = B^* + \left[ \frac{\partial B}{\partial d_{1,3}} \right]^* (d_{1,3} - d_{1,3}^*) + \left[ \frac{\partial B}{\partial d_{03}} \right]^* (d_{03} - d_{03}^*) + \left[ \frac{\partial B}{\partial h} \right]^* (h - h^*)$$

bzw. nach Einsetzen der partiellen Ableitungen:

$$B = B^* \cdot \left[ 1 + \frac{b_1 k_1}{(d_{1,3}^* + k_1)^2} (d_{1,3} - d_{1,3}^*) + \frac{b_2 k_2}{(d_{03}^* + k_2)^2} (d_{03} - d_{03}^*) + \frac{b_3}{h^*} (h - h^*) \right]$$

Der Effekt lässt sich an folgenden zwei Beispielen für eine Fichte verdeutlichen: Für die Fichte gilt ein oberer Schwellen- $d_{1,3}$  von 69 cm, was in etwa dem 99 Perzentil der  $d_{1,3}$ -Verteilung der Fichte bei der 2. Bundeswaldinventur entspricht (Tabelle 28). Zunächst werden der  $d_{03}$  und die Höhe für die Stelle des Schwellenwerts  $d_{1,3}^*$  berechnet, indem die jeweilige Tarif-Abweichung berücksichtigt wird.<sup>5</sup> Anschließend wird der daraus resultierende Biomassewert berechnet (aus der Marklund-Funktion) sowie die unlimitierte Biomasse für die gegebenen Dimensionen und der schließlich der aus der Linearisierung der Marklund-Funktion sich ergebende limitierte Biomassewert. Bei einer geringfügigen Überschreitung ( $d_{1,3} = 70$  cm) fällt, wie die Beispielrechnung 1 zeigt, die Differenz sehr klein aus; bei einem  $d_{1,3}$  von 80 cm (Beispiel 2) wird der Unterschied etwas deutlicher, liegt aber noch im Bereich von lediglich 1,4 % Abweichung.

Beispiel 1:

$$d_{1,3} = 70; d_{03} = 55; h = 38$$

$$d_{1,3}^* = 69$$

$$d_{03}^* = 55 + 51,274 - 51,951 = 54,323$$

$$h^* = 38 + 36,115 - 36,272 = 37,843$$

$$B^* = B(d_{1,3}^*, d_{03}^*, h^* | Fi) = 2778,583$$

$$B = B(d_{1,3}, d_{03}, h | Fi) = 2857,624$$

$$B^{(xtr)} = 2857,157$$

$$\Delta B = 2857,157 - 2857,624 = -0,466$$

Beispiel 2:

$$d_{1,3} = 80; d_{03} = 62; h = 39$$

$$d_{03}^* = 62 + 51,274 - 58,680 = 54,594$$

$$h^* = 39 + 36,115 - 37,669 = 37,446$$

$$B^* = B(d_{1,3}^*, d_{03}^*, h^* | Fi) = 2778,135$$

$$B = B(d_{1,3}, d_{03}, h | Fi) = 3679,801$$

$$B^{(xtr)} = 3628,734$$

$$\Delta B = 3628,734 - 3679,801 = -51,067$$

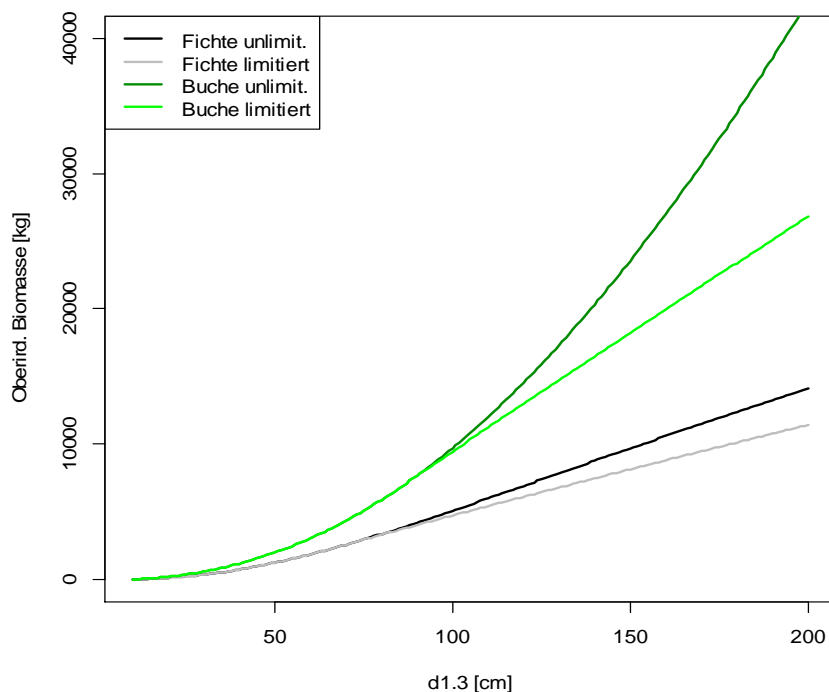
Erst bei sehr starken, äußerst selten vorkommenden Individuen wirkt sich die Begrenzung deutlicher aus, wie aus Abbildung 31 hervorgeht, in welcher beispielhaft für Fichte und Buche der Verlauf der Biomassekurven über dem  $d_{1,3}$  bis zu 200 cm dargestellt ist. Der Kurvenverlauf zeigt, dass vor allem bei der Buche ohne Limitierung extrem hohe Biomassewerte geschätzt würden, deren Realitätsnähe nicht beurteilt werden kann, so dass eine Begrenzung im Sinne einer konservativen Schätzung angemessen erscheint.

Die Festlegung der baumartenspezifischen oberen Schwellendurchmesser  $d_{1,3}^*$  erfolgte im Anhalt an die  $d_{1,3}$ -Verteilung der Baumarten bei der 2. Bundeswaldinventur, und zwar als das 99er-Perzentil der  $d_{1,3}$ -Verteilung. Für die 18 Raumdichte-Baumarten ergeben sich folgende Werte:

<sup>5</sup> Da der  $d_{03}$  bzw. die Höhe beim Schwellen- $d_{1,3}$  individuell verschieden ist, werden die Werte über die Differenzen zum Tarif-Wert korrigiert: z.B. für die Höhe: Tarif-Höhe ( $d_{1,3}^*$ ) +  $h$  – Tarif-Höhe( $d_{1,3}$ ); das heißt, man schätzt die Höhe an der Stelle  $d_{1,3}^*$  über den Tarif und addiert dann die Abweichung der tatsächlichen Höhe  $h$  von der Tarif-Höhe an der Stelle des gegebenen  $d_{1,3}$ .

**Tabelle 28. Obere  $d_{1,3}$ -Schwellenwerte für den Extrapolationsbereich (gerundete 99-Perzentile der  $d_{1,3}$ -Verteilung der 2. Bundeswaldinventur)**

Baumart	$d_{1,3}^*$ [cm]	Baumart	$d_{1,3}^*$ [cm]	Baumart	$d_{1,3}^*$ [cm]	Baumart	$d_{1,3}^*$ [cm]
FI	69	BU	86	BAH	68	BI	53
TA	90	EI	94	SAH	69	ER	58
DGL	82	ES	77	LI	84	PA	113
KI	59	HBU	55	ROB	75	WEI	102
LAE	70			UL	85		



**Abbildung 31. Vergleich der Biomassefunktion mit und ohne Begrenzung im Extrapolationsbereich für Fichte und Buche**

### 3.8.3 Gesamtmodell als abschnittsweise definierte Funktion

Die integrierte Biomassefunktion umfasst somit vier Abschnitte, die sind in folgender Tabelle 29 zusammengestellt sind:

**Tabelle 29. Übersicht über die Abschnitte und Modelle der integrierten Biomassefunktion**

Abschnitt	Modell
(1): $h < 1,3$ m	$B = b_0 \cdot h^{b_1}$
(2): $0 < d_{1,3} < 10$ cm	$B = B_0 + \left[ \frac{B_s - B_0}{d_s^2} + b_3 (d_{1,3} - d_s) \right] d_{1,3}^2 \quad d_s = 10$ cm
(3): $10 \leq d_{1,3} \leq d_{1,3}^*$	$B = b_0 \cdot e^{\frac{b_1 d_{1,3}}{d_{1,3} + k_1}} \cdot e^{\frac{b_2 d_{03}}{d_{03} + k_2}} \cdot h^{b_3}$ (Marklund-Funktion M1a)
(4) $d_{1,3} > d_{1,3}^*$	$B = B^* \cdot \left[ 1 + \frac{b_1 k_1}{(d_{1,3}^* + k_1)^2} (d_{1,3} - d_{1,3}^*) + \frac{b_2 k_2}{(d_{03}^* + k_2)^2} (d_{03} - d_{03}^*) + \frac{b_3}{h^*} (h - h^*) \right]$

Die Koeffizienten und Parameter für die integrierte Funktion finden sich in Tabelle 30. Für die Tariffunktionen (Tabelle 26) sind die Koeffizienten in Tabelle 27 wiedergegeben. Die Koeffizienten für den Abschnitt (4) oberhalb des jeweiligen  $d_{1,3}^*$  sind dieselben wie für Abschnitt (3), die Marklund-Funktion M1a.

**Tabelle 30. Koeffizienten der Abschnittsmodelle der integrierten Biomassefunktion (Zusammenfassung der Tabellen 25, 27 und 24)**

RD-BA		(1): $h < 1,3 \text{ m}$		(2): $0 < d_{13} < 10 \text{ cm}$		
Nr.	Kürzel	$b_0^h$	$b_1^h$	$B_0$	$B_s$	$b_3^{(2)}$
1	FI	0,23059	2,20101	0,41080	26,63122	0,01370
2	TA	0,23059	2,20101	0,41080	19,12231	-0,00071
3	DGL	0,23059	2,20101	0,41080	19,11711	-0,00275
4	KI	0,23059	2,20101	0,41080	19,99943	0,00916
5	LAE	0,23059	2,20101	0,41080	28,33905	0,02769
6	BU	0,04940	2,54946	0,09644	33,22328	0,01162
7	EI	0,04940	2,54946	0,09644	28,94782	0,01501
8	ES	0,04940	2,54946	0,09644	33,74893	0,02679
9	HBU	0,04940	2,54946	0,09644	38,94948	0,02386
10	BAH	0,04940	2,54946	0,09644	30,79551	0,02470
11	SAH	0,04940	2,54946	0,09644	33,09086	0,02967
12	LI	0,04940	2,54946	0,09644	22,41460	0,00653
13	ROB	0,04940	2,54946	0,09644	41,65650	0,04193
14	UL	0,04940	2,54946	0,09644	33,97568	0,02566
15	BI	0,04940	2,54946	0,09644	28,28964	0,01926
16	ER	0,04940	2,54946	0,09644	19,88801	0,00105
17	PA	0,04940	2,54946	0,09644	16,86101	-0,00551
18	WEI	0,04940	2,54946	0,09644	21,78513	0,00517

RD-BA		(3): $10 \leq d_{1,3} < d_{1,3}^*$					$d_{1,3}^*$
Nr.	Kürzel	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$k_1$	
1	FI	0,75285	2,84985	6,03036	0,62188	42,0	69
2	TA	0,06394	4,11277	6,69278	1,05869	6,0	90
3	DGL	0,05427	5,53121	9,25990	0,89008	5,5	82
4	KI	0,33778	2,84055	6,34964	0,62755	18,0	59
5	LAE	0,14126	4,41925	6,29442	0,88341	6,4	70
6	BU	0,16787	6,25452	6,64752	0,80745	11,0	86
7	EI	0,09428	10,26998	8,13894	0,55845	400,0	94
8	ES	0,14011	4,91710	6,28562	0,90521	9,0	77
9	HBU	0,34805	5,51219	5,82999	0,88446	157,6	55
10	BAH	0,20783	4,37920	6,29412	0,85931	10,0	68
11	SAH	0,20670	3,94430	6,11350	0,86296	9,4	69
12	LI	0,11076	5,17604	6,96505	0,85289	8,7	84
13	ROB	0,62775	3,97109	5,13590	0,87094	67,6	75
14	UL	0,19171	4,20207	6,65617	0,77994	8,2	85
15	BI	0,21042	4,38721	5,43983	0,80610	68,4	53
16	ER	0,13831	4,46360	5,94772	0,85097	11,1	58
17	PA	0,27278	4,19240	5,96298	0,81031	13,7	113
18	WEI	0,29978	4,75530	6,36587	0,78693	13,2	102

### 3.8.4 Überprüfung der neuen Biomassefunktion

Anhand der Daten der 1. und 2. Bundeswaldinventur wurde die neue integrierte Biomassefunktion überprüft und mit den Schätzungen der bisherigen synthetischen Biomassefunktion verglichen. Beim Vergleich der Gesamtvorräte ist zu beachten, dass es sich um zwei verschiedene Kollektive handelt: die BWI 1 gilt nur für das alte Bundesgebiet, die BWI 2 schließt die Neuen Länder mit ein.

**Tabelle 31. Vergleich der Biomassevorratsschätzung bei BWI 1 und 2 für Fichte und Buche**

<b>Fichte</b>				
D-Klasse	<b>BWI 1</b>		<b>BWI 2</b>	
	neu	alt	neu	alt
t Biomasse				
0 bis 9.9 cm	19.273.766	25.028.565	15.682.485	19.712.883
10 bis 19.9 cm	81.021.089	91.020.308	72.181.779	80.458.767
20 bis 29.9 cm	119.824.046	126.421.761	137.114.393	144.218.137
30 bis 39.9 cm	130.388.239	134.942.046	162.781.331	167.724.767
40 bis 49.9 cm	81.947.933	83.379.406	120.496.607	122.690.547
über 50 cm	43.930.472	44.041.976	84.080.968	84.920.805
<b>Insgesamt</b>	<b>476.385.545</b>	<b>504.834.061</b>	<b>592.337.562</b>	<b>619.725.905</b>
	94,4%		95,6%	

<b>Buche</b>				
D-Klasse	<b>BWI 1</b>		<b>BWI 2</b>	
	neu	alt	neu	alt
t Biomasse				
0 bis 9.9 cm	10.993.891	12.232.369	17.588.736	21.356.470
10 bis 19.9 cm	35.614.331	32.937.653	40.048.406	37.001.794
20 bis 29.9 cm	54.118.813	51.106.116	67.645.226	64.083.652
30 bis 39.9 cm	63.412.309	59.943.924	86.821.112	82.672.372
40 bis 49.9 cm	58.643.656	55.105.488	85.458.239	80.782.986
über 50 cm	69.826.281	65.880.534	130.171.310	123.672.954
<b>Insgesamt</b>	<b>292.609.283</b>	<b>277.206.084</b>	<b>427.733.028</b>	<b>409.570.227</b>
	105,6%		104,4%	

Bei der Fichte zeigt sich, dass die neue Biomassefunktion im Vergleich zur alten Version der synthetischen Biomassefunktion insgesamt zu niedrigeren Gesamtvorräten führt, während sich bei der Buche höhere Vorräte ergeben. Allerdings gibt es Unterschiede zwischen den Stärkeklassen: Besonders deutliche niedrigere Vorräte finden sich in den schwächsten Durchmesserklassen, wobei sich die Unterschiede bei der Fichte mit zunehmender Stärkeklasse verringern und sich im Starkholz ( $d_{1,3} \geq 50$  cm) fast annähern. Bei der Buche zeigt sich dagegen nur im schwächsten Bereich  $d_{1,3} < 10$  cm eine Unterschätzung durch die neue Funktion, während in allen anderen Durchmesserklassen die neue Funktion deutlich höhere Vorräte liefert. Die Buche bildet damit im Vergleich mit allen anderen Baumartengruppen die Ausnahme. Besonders deutlich fällt der Unterschied zwischen neuer und alter Funktion bei der Eiche und Kiefer auf: so ist bei der Kiefer der neue Biomassevorrat insgesamt um 7 bis 8 % niedriger, bei der Eiche sogar um 10 bis fast 11 %.

**Tabelle 32. Vergleich der Biomassevorratsschätzung bei BWI 1 und 2 für Kiefer und Eiche**

<b>Kiefer</b>				
D-Klasse	<b>BWI 1</b>		<b>BWI 2</b>	
	neu	alt	neu	alt
t Biomasse				
0 bis 9.9 cm	4.626.953	5.140.225	11.614.000	12.844.512
10 bis 19.9 cm	23.931.627	27.670.570	53.479.571	62.380.828
20 bis 29.9 cm	49.735.888	55.361.824	101.746.599	114.592.096
30 bis 39.9 cm	53.895.267	56.684.500	109.412.478	115.918.769
40 bis 49.9 cm	24.591.624	24.848.003	52.462.425	53.491.342
über 50 cm	7.393.062	7.416.464	16.660.074	16.828.909
<b>Insgesamt</b>	<b>164.174.420</b>	<b>177.121.586</b>	<b>345.375.147</b>	<b>376.056.457</b>
	92,7%		91,8%	

<b>Eiche</b>				
D-Klasse	<b>BWI 1</b>		<b>BWI 2</b>	
	neu	alt	neu	alt
t Biomasse				
0 bis 9.9 cm	3.025.604	8.144.686	4.327.756	11.451.041
10 bis 19.9 cm	13.877.075	22.456.337	15.895.432	26.215.453
20 bis 29.9 cm	23.206.934	25.475.535	32.507.696	36.069.053
30 bis 39.9 cm	28.529.304	28.696.121	40.136.201	41.062.599
40 bis 49.9 cm	24.109.033	23.726.775	38.271.663	38.504.147
über 50 cm	30.319.356	29.671.433	65.556.048	65.017.508
<b>Insgesamt</b>	<b>123.067.306</b>	<b>138.170.888</b>	<b>196.694.796</b>	<b>218.319.802</b>
	89,1%		90,1%	

Auch bei den übrigen Baumartengruppen zeigt sich dieselbe Tendenz mit Vorratsunterschieden von mindestens 5 % bis zu 8 % bezogen auf das alte Schätzverfahren, so dass sich über alle Baumarten eine Unterschätzung von gut 4 % durch die neue Biomassefunktion ergibt.

**Tabelle 33. Vergleich der Biomassevorratsschätzung bei BWI 1 und 2 für die sonstigen Nadelbaumartengruppen Tanne, Douglasie und Lärche**

<b>SNB (Ta, Dgl, Lä)</b>				
D-Klasse	<b>BWI 1</b>		<b>BWI 2</b>	
	neu	alt	neu	alt
t Biomasse				
0 bis 9.9 cm	1.895.969	3.203.974	1.981.977	3.189.307
10 bis 19.9 cm	12.116.382	14.372.751	11.665.766	13.390.471
20 bis 29.9 cm	19.171.570	19.746.899	26.022.783	26.627.778
30 bis 39.9 cm	16.930.689	17.405.848	29.949.834	30.477.448
40 bis 49.9 cm	13.320.071	13.838.423	21.531.204	22.193.414
über 50 cm	13.497.871	13.999.645	25.880.837	26.763.193
<b>Insgesamt</b>	<b>76.932.553</b>	<b>82.567.539</b>	<b>117.032.401</b>	<b>122.641.611</b>
	93,2%		95,4%	

**Tabelle 34. Vergleich der Biomassevorratsschätzung bei BWI 1 und 2 für die Baumartengruppen Andere Laubbäume mit höherer Lebensdauer (ALH) bzw. Andere Laubbäume mit niedriger Lebensdauer (ALN)**

<b>ALH</b>				
D-Klasse	<b>BWI 1</b>		<b>BWI 2</b>	
	neu	alt	neu	alt
t Biomasse				
0 bis 9.9 cm	4.709.983	7.040.476	10.946.156	18.098.785
10 bis 19.9 cm	14.534.995	14.797.866	22.544.491	22.874.824
20 bis 29.9 cm	14.989.294	15.357.840	29.426.125	30.218.699
30 bis 39.9 cm	10.091.453	10.273.322	24.225.191	24.757.524
40 bis 49.9 cm	5.172.642	5.221.467	15.427.601	15.640.457
über 50 cm	3.841.766	3.869.374	14.318.408	14.580.939
<b>Insgesamt</b>	<b>53.340.132</b>	<b>56.560.345</b>	<b>116.887.973</b>	<b>126.171.228</b>
	94,3%		92,6%	

<b>ALN</b>				
D-Klasse	<b>BWI 1</b>		<b>BWI 2</b>	
	neu	alt	neu	alt
t Biomasse				
0 bis 9.9 cm	5.957.441	8.331.706	17.079.155	23.439.479
10 bis 19.9 cm	12.930.246	14.484.486	24.075.609	27.387.917
20 bis 29.9 cm	12.123.326	12.370.490	29.256.377	29.902.438
30 bis 39.9 cm	7.079.532	7.028.581	21.104.064	21.070.743
40 bis 49.9 cm	3.570.166	3.521.036	10.435.590	10.331.953
über 50 cm	3.169.802	3.118.182	9.179.082	9.119.190
<b>Insgesamt</b>	<b>44.830.514</b>	<b>48.854.482</b>	<b>111.129.877</b>	<b>121.251.720</b>
	91,8%		91,7%	

**Tabelle 35. Vergleich der Biomassevorratsschätzung bei BWI 1 und 2 für den Gesamtvorrat**

<b>Alle Baumarten</b>				
D-Klasse	<b>BWI 1</b>		<b>BWI 2</b>	
	neu	alt	neu	alt
t Biomasse				
0 bis 9.9 cm	50.483.607	69.122.000	79.220.265	110.092.476
10 bis 19.9 cm	194.025.745	217.739.971	239.891.054	269.710.054
20 bis 29.9 cm	293.169.872	305.840.465	423.719.199	445.711.852
30 bis 39.9 cm	310.326.794	314.974.343	474.430.212	483.684.222
40 bis 49.9 cm	211.355.126	209.640.599	344.083.328	343.634.847
über 50 cm	171.978.609	167.997.608	345.846.727	340.903.498
<b>Insgesamt</b>	<b>1.231.339.753</b>	<b>1.285.314.985</b>	<b>1.907.190.784</b>	<b>1.993.736.950</b>
	95,8%		95,7%	

## 4 Diskussion und Schlussfolgerungen

In vorliegender Untersuchung wurde das bisherige Verfahren zur Schätzung der oberirdischen Biomasse anhand neuer empirischer Biomassedaten überprüft, die im Rahmen mehrerer Studien erhoben wurden. Etwas mehr als die Hälfte dieser Daten stammt aus einer bundesweiten Messkampagne, der Rest aus Studien der FVA-BW in Baden-Württemberg. Der Gesamtdatenbestand umfasst die oberirdischen Biomassen und andere Kennwerte von insgesamt knapp 1.000 Einzelbäumen und bildet für die Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche, auf welche insgesamt 912 Beobachtungen entfallen, eine brauchbare empirische Grundlage, nicht zuletzt auch angesichts des großen Aufwands für die Messung der oberirdischen Biomasse an Einzelbäumen. Hinzu kommen Einzelbaumdaten über die Biomasse von Bäumen unterhalb der Derbholzgrenze ( $d_{1,3} < 8$  cm bzw. Höhe  $< 1,3$  m), welche erstmals bei der Aufstellung einer Biomassefunktion, die den gesamten Dimensionsbereich abdeckt, genutzt wurden, wenngleich diese Beobachtungen ausschließlich aus Baden-Württemberg stammen.

Aus methodischer Sicht war das bisherige Verfahren der „synthetischen“ Biomassefunktion, die nicht an beobachteten Daten kalibriert worden war, sondern aus einem kombinierten Expansions- und Konversionsverfahren bestand, dringend zu überprüfen, da die zugrundeliegenden Beziehungen, (1) die Expansion des Derbholzvolumens zum gesamten oberirdischen Baumholzvolumen und (2) die Konversion des Volumens über Raumdichtefaktoren in Trockensubstanz, ausschließlich auf Sekundärdaten der Literatur basierte. Zum einen handelt es sich um die Volumentafeln nach Grundner-Schwappach (1952), welche für 8 Baumarten sowohl das Derbholz- als auch das Baumholzvolumen in Abhängigkeit von  $d_{1,3}$  und Höhe wiedergeben. Das zugrundeliegende Datenmaterial ist zwar sehr umfangreich und deckt ein relativ weites Gebiet von Deutschland ab, es stammt jedoch aus einem länger zurückliegenden Zeitraum, für den möglicherweise andere Wachstumsbedingungen und waldbauliche Behandlungskonzepte galten. Zum anderen wurden die Raumdichten ebenfalls der einschlägigen Literatur (Kollmann, 1982, Hakkila, 1989) entnommen.

Beim Verfahren der synthetischen Biomassefunktion war in methodischer Hinsicht die Expansionsfunktion zu überprüfen. Sie besteht in der ursprünglichen Fassung aus einer einfachen linearen Beziehung, welche zwar den überwiegenden Verlauf der Relation Baumholz- zu Derbholzvolumen korrekt wiedergibt, im Bereich schwächerer Bäume aber systematisch abweicht, was je nach Baumart zu unterschiedlichen Effekten führt. Hinzu kommt eine Altersabhängigkeit bei einigen Baumarten in Form von Altersklassen, was in der praktischen Anwendung zu Inkonsistenzen führen kann. Auf diese Schwächen hat z. B. Zell (2008) hingewiesen und alternative Modelle vorgeschlagen. Im Zuge der Überprüfung in dieser Studie wurde letztlich ein segmentiertes Modell, basierend auf einer allometrischen Beziehung, angepasst, welches die Schwächen des bisherigen Ansatzes weitgehend eliminiert, allerdings zum Preis größerer Komplexität mit entsprechenden vielen Parametern (siehe Tabelle 7 und Tabelle 8).

Der Vergleich der Raumdichten aus der Literatur mit den eigenen ermittelten Werten ergab ein differenziertes Bild: während bei Fichte und Buche die Literaturwerte bestätigt werden konnten, zeigten sich bei Eiche und Kiefer systematische Abweichungen: so liegen für diese zwei Baumarten die hier ermittelten Raumdichtewerte systematisch in einer Größenordnung von 9 bis 10 % unter den entsprechenden Literaturwerten. Zu beachten ist, dass es sich um



Mittelwerte handelt, die eine nicht unerhebliche natürliche Variation aufweisen. Eine schlüssige Erklärung für diese Abweichungen ließ sich im Rahmen dieser Untersuchung nicht finden.

Die Überprüfung des Zusammenhangs zwischen Baumholz und Derbholz führte zu einer grundlegenden Betrachtung von Begriffsdefinitionen sowie der Beschreibung dendrometrischer Verfahren der Voluminierung von Bäumen. Hier zeigt sich die Notwendigkeit, die Verfahren und Begriffe klar festzulegen, je nachdem welchem Zweck die Erfassung der oberirdischen Baumbiomasse als Volumen oder Trockensubstanz dient. Die Anlehnung an die praktischen Anforderungen einer verwendungsorientierten Volumenermittlung bringt es mit sich, dass bisherige Verfahren der Volumenermittlung das wahre physikalische Volumen unterschätzen. Ein wesentlicher Aspekt der Voluminierung im Rahmen der Bundeswaldinventur ist die Messung eines oberen Durchmessers. Durch die damit erreichte (näherungsweise) Erfassung der Schaftform wird die Volumenermittlung verbessert, außerdem können räumliche und zeitliche Trends in der Veränderung der Formigkeit automatisch mit erfasst werden.

Eine wesentliche Aufgabe dieser Untersuchung war die Überprüfung der synthetischen Biomassefunktionen in ihrer ursprünglichen und überarbeiteten Version anhand des Datenmaterials für die Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche. Bei der Fichte stimmt die überarbeitete synthetische Funktion recht gut mit den beobachteten Daten überein, wobei auch die alte Version noch akzeptabel ist. Bei der Buche führt die synthetische Biomassefunktion in beiden Versionen (alt und neu) jedoch zu einer systematischen Unterschätzung, während sie bei Kiefer und Eiche die beobachteten Biomassewerte deutlich überschätzt. Bei Kiefer und Eiche liegt die naheliegende Erklärung in der oben erwähnten systematischen Abweichung bei der Raumdichte, wobei sich verschiedene Trends überlagern. Bei der Buche stimmen die Raumdichten zwar überein, aber offensichtlich werden die oberirdischen Volumina unterschätzt, dies gilt sowohl für das Derbholz als auch für die Expansion zum Baumholz.

Da sich für diese vier Hauptbaumarten, welche rund 80 % des oberirdischen Gesamtvorrats an Biomasse ausmachen, abgesehen von der Fichte keine insgesamt befriedigende Übereinstimmung der alten und neuen synthetischen Funktionen mit den erhobenen Daten feststellen ließ, bestand die Notwendigkeit, eine neue Funktion an das gewonnene Datenmaterial anzupassen. Damit bot sich auch die Gelegenheit, das gesamte Verfahren auf eine neue einheitliche Basis zu stellen.

Die in der Literatur vielfach verwendeten Modellansätze basieren überwiegend auf allometrischen Beziehungen zwischen der oberirdischen Biomasse und gängigen dendrometrischen Größen. Ein alternativer Ansatz stammt von Marklund (1987), den er für schwedische Biomassefunktionen formuliert hat. Die hier angepassten Modelle basieren auf einer Modifikation dieses Marklund-Modells. Eine wesentliche Erweiterung, die bisher in der Literatur nicht verwendet wurde, ist die Einbeziehung des oberen Schaftdurchmessers in Form des  $d_{03}$  (in 30% der Scheitelhöhe gemessener Durchmesser). Fehrmann und Kleinn (2006) weisen im Zusammenhang mit dem allometrischen Modell auf die Rolle eines in relativer Höhe gemessenen Schaftdurchmessers hin, welcher streng genommen in einer allometrischen Beziehung gefordert ist. Das Marklund-Modell selbst ist zwar kein allometrisches Modell im engeren Sinne, weist aber eine grundlegende Ähnlichkeit auf und beinhaltet in der originalen Version mit der Höhe als Prädiktor auch eine allometrische Komponente. Charakteristisch ist die multiplikative Verknüpfung der Prädiktoren, wobei die Allometrie die funktionale Beziehung

mit einer Potenzfunktion formuliert, während Marklund zusätzlich eine Exponentialfunktion einführt, die außerdem noch eine Transformation der Prädiktorvariablen in einem Bruchterm enthält. Zu Vergleichszwecken wurden in diesen Untersuchungen für die vier betrachteten Baumarten verschiedene allometrische und Marklund-Modelle angepasst und bezüglich ihrer Anpassungsgüte verglichen. Als Kompromiss zwischen Anpassungsgüte und Modellkomplexität wurde das so genannte modifizierte Marklund-Modell M1a als einheitlicher Modelltyp für den Derbholzbereich mit  $d_{1,3} \geq 10$  cm festgelegt (siehe Abschnitt 3.7).

$$B = b_0 \cdot e^{b_1 \frac{d_{1,3}}{d_{1,3}+k_1}} \cdot e^{b_2 \frac{d_{03}}{d_{03}+k_2}} \cdot h^{b_3}$$

Ogleich gemessene Daten nur für die vier Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche vorlagen, wurde dasselbe Modell für die übrigen 14 Raumdichte-Baumarten angepasst. Der Begriff der Raumdichte-Baumart wurde aus dem Konzept der synthetischen Biomassefunktion übernommen, da neben dem oberirdischen Baumvolumen die Raumdichte der entscheidende Faktor für die Biomassebestimmung ist und Baumartenunterschiede in der Biomasse wesentlich erklärt. Er wurde auch im neuen Konzept beibehalten, um die Bandbreite der Raumdichten abzudecken und um die bisherige Zuordnung der BWI-Baumarten zu „Biomasse-Leitbaumarten“ beibehalten zu können. Dieser Ansatz ist somit die Grundlage für die Anpassung einer Marklund-Funktion des Typs M1a für die übrigen Baumarten. Hierzu wurde mit der überarbeiteten synthetischen Biomassefunktion für jeden Probestaum aus dem Kollektiv der Bäume mit  $d_{1,3} \geq 10$  cm des Datenmaterials der 1. und 2. Bundeswaldinventur die oberirdische Biomasse geschätzt. Anhand dieser Baumdaten, so genannte „Pseudo-Beobachtungen“, wurde anschließend die Marklund-Funktion angepasst. Verwendet wurden hierzu alle Bäume der 1. und 2. BWI mit gemessener Höhe und oberem Durchmesser (mit der Einschränkung, dass bei der 1. BWI der obere Durchmesser erst ab einem  $d_{1,3}$  von 20 cm gemessen worden ist). Durch dieses Vorgehen wurde die überarbeitete synthetische Biomassefunktion in Form des Marklund-Modells „reparametrisiert“. Es wird dabei in Kauf genommen, dass die Raumdichten der betreffenden Baumarten nicht empirisch geprüft werden konnten und dort möglicherweise ähnliche systematische Abweichungen auftreten können, wie sie bei Eiche und Kiefer beobachtet worden sind. Nachdem dieses Kollektiv nur etwa 20 % des Gesamtvorrats ausmacht, wird diese Unschärfe in Kauf genommen, zumal es aktuell keine besseren Alternativen gibt. Im Hinblick darauf, dass die sonstigen Laubbäume künftig vielleicht eine größere Rolle spielen werden, sollte dieser Aspekt bei künftigen Weiterentwicklungen jedoch nicht ganz vernachlässigt werden.

Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Entwicklung eines einheitlichen Biomasseschätzverfahrens ist die Anforderung, dass es die gesamte Dimensionsbandbreite der bei der BWI erfassten Probestämme abdecken muss. Dieses Gebot wurde bereits bei der alten synthetischen Biomassefunktion berücksichtigt, allerdings wurden für den Bereich des Nicht-Derbholzes mangels empirischer Grundlagen gutachterliche Annahmen getroffen. Durch die Einbeziehung empirischer Daten konnten bei der Überarbeitung hier realitätsnähere Modelle angepasst werden. Für den Nicht-Derbholzbereich stehen aus messtechnischen Gründen außerdem nicht dieselben Prädiktoren zur Verfügung, so dass hier einfachere Modellansätze benötigt werden. Dies führte zur Konzeption einer abschnittsweise definierten Funktion, welches zumindest näherungsweise Stetigkeit an den Übergängen von einem Abschnitt in den anderen gewährleistet.

Eine weitere Neuerung ist die Kontrolle der Biomassefunktion im Bereich sehr starker Bäume, also im oberen Extrapolationsbereich. Aufgrund ihrer nichtlinearen Eigenschaft kann das Verhalten des Marklund-Modells für extreme Baumdimensionen unrealistisch hohe Werte liefern, zumal solche Bäume im Datenmaterial zur Anpassung des Modells nicht vertreten waren. Daher wurde mit Hilfe einer Linearisierung des Marklund-Modells der Anstieg der Funktionswerte im oberen Extrapolationsbereich limitiert. Das Vorgehen folgt dem Prinzip einer Taylor-Linearisierung mit Abbruch nach dem Term 1. Ordnung (es wird nur die erste Ableitung berücksichtigt), wobei bewusst in Kauf genommen wird, dass mit zunehmender Dimension die Abweichung von der Originalfunktion stärker wird, und zwar zu tendenziell niedrigeren Werten führt. Zur Definition des „oberen Extrapolationsbereichs“ mussten für den  $d_{1,3}$  Schwellenwerte festgelegt werden. Aus pragmatischen Gründen wurden die dem 99er-Perzentil entsprechenden  $d_{1,3}$ , aus der  $d_{1,3}$ -Verteilung der 2. Bundeswaldinventur verwendet.

Abschließend wurde die neu entwickelte Biomassefunktion software-technisch in Form einer R-Funktion sowie einer VBA-Funktion (MS- ACCESS) implementiert und am Datenmaterial der beiden Bundeswaldinventuren überprüft. Es zeigt sich, dass die neue Biomassefunktion mit Ausnahme der Buche für alle anderen Baumarten niedrigere Gesamtvorräte als die alte Schätzfunktion liefert. Die Abweichungen fallen vor allem im Bereich des Nicht-Derbholzes deutlich auf, die Konsequenz der Tatsache, dass die neue Funktion für das Nicht-Derbholz-Kollektiv erheblich niedrigere Biomassewerte ergibt, die allerdings basierend auf gemessenen Daten realitätsnäher sein müssten. Systematische Unterschätzungen durch die neue Funktion treten allerdings noch bis zu mittelstarken Dimensionen auf, nähern sich aber mit zunehmender Stärke der Bäume immer mehr an. Bei der Eiche und der Gruppe der ALN liegen die neue Schätzwerte im Bereich des stärkeren Dimensionen ab einem  $d_{1,3}$  von 40 cm sogar tendenziell über den alten Werten.

Wie sich das neue Verfahren auf die Abschätzung der Vorratsänderungen auswirkt, konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht näher analysiert werden. Inwieweit sich hier eine Neubewertung der Treibhausganzbilanz ergibt, muss noch eingehender untersucht werden. Aus methodischer Sicht ist die vorgenommene Überarbeitung begründet, insbesondere vor dem Hintergrund, dass das neue Verfahren durch empirische Daten wesentlich besser abgesichert ist als das bisherige.

## Literatur

Fehrmann, L.; C. Kleinn (2006). General considerations about the use of allometric equations for biomass estimation on the example of Norway spruce in central Europe. *Forest Ecol. Manage.* 236; 412-421. [DOI:10.1016/j.foreco.2006.09.026](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.026).

Gregoire, T. G.; H. T. Valentine (2008). *Sampling Strategies for Natural Resources and the Environment*. Chapman & Hall. Boca Raton 474 S.

Grundner, F.; A. Schwappach (1952). *Massentafeln zur Bestimmung des Holzgehaltes stehender Waldbäume und Waldbestände*. Berlin Hamburg, Paul Parey.

Hakkila P. (1989). *Utilisation of residual forest biomass*. Springer Series in Wood Science. Berlin, Germany: Springer Verlag, 568 p.

Jenkins, J. C.; D. C. Chojnacky; L. S. Heath; R. A. Birdsey (2003). "National-Scale Biomass Estimators for United States Tree Species." *Forest Science* **49**(1): 12-35.

Joosten, R.; J. Schumacher; C. Wirth; A. Schulte (2004). Evaluating tree carbon predictions for beech (*Fagus sylvatica* L.) in western Germany. *Forest Ecology and Management* **189**(1/3): 87-96.

Kändler, G.; J. Zell; R. Kruse (2006). Herleitung von Biomassefunktionen für Verjüngungsbäume ("Nicht-Derbholz"-Kollektiv) - Erste Ergebnisse, Tagungsband der Jahrestagung 2006 der Sektion Ertragskunde, Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, 190-196

Kändler, G. (2010). *Methodenentwicklung für die Bundeswaldinventur - Modul 4 „Grundlagedaten: bundesweite Biomasseerhebungskampagne“*. Unveröffentlichter Bericht der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Kollmann, F. (1982). *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Berlin Heidelberg New York, Springer-Verlag.

Kublin, E.; G. Scharnagl (1988). *Verfahrens- und Programmbeschreibung zum BWI-Unterprogramm BDAT*. Unveröffentlichter Bericht der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. 87 S.

Kublin, E. (2011). *Methodenentwicklung für die dritte Bundeswaldinventur (BWI<sup>3</sup>) – Modul 1: Schaffformmodellierung: BDAT-Aktualisierung*. Unveröffentlichter Bericht der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.

Lambert, M.-C.; C.-H. Ung; F. Raulier (2005). Canadian national tree aboveground biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research* **35**(8): 1996–2018.

Ledermann, Th.; M. Neumann (2006). Biomass equations from data of old long-term experimental plots. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*. 123. Jg. Heft 1/2: 47-64

Marklund, L. G. (1987). Biomass functions for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) in Sweden: SLU, Department of Forest Survey, 43. 127 p.

Pistorius, T.; J. Zell (2005). Die Dynamik der Kohlenstoffvorräte in Baden-Württemberg zwischen 1987 und 2002. Veränderungen in der Waldbiomasse und Modellierung der Holzproduktspeicher. AFJZ. JG 176 Heft 6/7: 111 - 120

Prodan, M. (1965). Holzmesslehre. J. D. Sauerländer's Verlag Frankfurt a. Main. 644 S.

Repola, J. (2009). Biomass Equations for Scots Pine and Norway Spruce in Finland. *Silva Fennica* **43**(4): 625-647.

R Core Team (2012). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. <http://www.R-project.org>

Wirth C; J. Schumacher; E-D Schulze (2004). Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe - a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiol.* **24**(2): 121-39.

Zell, J. (2008). Methoden für die Ermittlung, Modellierung und Prognose der Kohlenstoffspeicherung in Wäldern auf Grundlage permanenter Großrauminventuren. Dissertation Universität Freiburg i. Br., 152 S.

Zianis, D.; P. M., R. Makipaa; M. Mencuccini (2005). Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica* **4**(63).