

forstarchiv 88, 31-38
(2017)

DOI 10.4432/0300-
4112-88-31

© DLV GmbH

ISSN 0300-4112

Korrespondenzadresse:
thomas.riedel@thuenen.
de

Eingegangen:
04.04.2016

Angenommen:
23.11.2016

Nationale Treibhausgasberichterstattung: Neue Funktionen zur Schätzung der oberirdischen Biomasse am Einzelbaum

National greenhouse gas monitoring: New functions for estimating above-ground biomass at single-tree level

THOMAS RIEDEL¹ und GERALD KÄNDLER²

¹ Thünen-Institut für Waldökosysteme, Alfred-Möller-Straße 1, 16225 Eberswalde, Deutschland

² Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Wonnhaldestraße 4, 79100 Freiburg, Deutschland

Kurzfassung

Deutschlands Wälder binden derzeit rund 52 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr. Für die Schätzung der Senkenleistung müssen die Kohlenstoffvorräte und deren Veränderung mithilfe von Biomassefunktionen quantifiziert werden. Das in der Treibhausgasberichterstattung bisher angewandte Verfahren zur Biomasseschätzung beruhte ausschließlich auf Sekundärdaten der Literatur. Anhand neuer, deutschlandweit erhobener Biomassedaten und dendrometrischer Kenngrößen wurde eine neue, segmentierte Biomassefunktion abgeleitet, welche auch den Nichtderbholz-Bereich und den oberen Extrapolationsbereich abdeckt, für den kein empirisches Datenmaterial vorliegt. Im Vergleich zum bisherigen Verfahren schätzt das segmentierte Modell für Deutschland rund 1,3 % weniger Biomasse. Diese Differenz ist nicht signifikant. Lediglich bei der Buche liefert das neue Verfahren rund 10 % mehr Biomasse.

Schlüsselwörter: Biomassefunktion, synthetische und segmentierte Biomassemodelle, Allometrie, Marklund-Modell, Kohlenstoffvorräte, Bundeswaldinventur

Abstract

Currently, German forests sequester approx. 52 Mio tons CO₂ per year. The estimation of the carbon sequestration rate requires the carbon stocks and their changes to be quantified by means of biomass functions. The model for biomass estimation previously used in the German national greenhouse-gas monitoring system was based on secondary data from literature only. On the basis of new Germany-wide sampled tree biomass and dendrometric data a new segmented biomass function was derived, which allows estimating single tree biomass over a wide range of dimensions. In comparison to the previous model the segmented function estimates in total a 1.3% lower carbon stock for Germany; however, this difference is not significant. Only for beech the new function assess up to 10% higher carbon stocks.

Key words: biomass function, synthetic and segmented biomass models, allometry, Marklund model, carbon stock, German National Forest Inventory

Einleitung

Mit der Einreichung des deutschen Nationalen Inventur-Reports an das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) am 15.04.2014 sind die Senkenleistungen des Waldes in der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls veröffentlicht (Dunger et al. 2014): War der Wald in den 1990er-Jahren eine CO₂-Senke von rund 69 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr, ist die Sequestrierungsrate im Zeitraum 2002 bis 2008 auf jährlich etwa 35 Mio. Tonnen CO₂ gesunken. Ein Treiber hierfür war der Sturm Kyrill im Januar 2007 und das damit verbundene erhöhte Holzaufkommen in dieser Periode. Seit 2009 ist die Senkenleistung des Waldes wiederum auf durchschnittlich rund 52 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr angestiegen. Ursächlich dürfte die Finanz- und Wirtschaftskrise sein, in deren Folge auch der Holzeinschlag zurückging.

Grundlage für die Schätzung der CO₂-Senkenleistung ist die Ermittlung der Biomasseverratsänderung im Wald. Die Biomasse ist mittlerweile nicht nur in der Treibhausgas (THG)-Berichterstattung ein wichtiger Indikator für viele Fragestellungen, die den Wald betreffen. Sie ist bspw. auch die Voraussetzung, um Energieholzpotenziale in der Holznutzung genauer abschätzen zu können.

Erste Ansätze, für Deutschland den im Wald gespeicherten Kohlenstoffvorrat zu bestimmen, stammen von Burschel et al. (1993),

die schon damals für das Gebiet der alten Bundesländer die Daten der ersten Bundeswaldinventur bzw. für die neuen Länder den Datenspeicher Waldfonds nutzten. Da zu dieser Zeit keine für Deutschland allgemeingültigen Biomassefunktionen vorlagen, erfolgte die Herleitung der Biomasse bzw. des Kohlenstoffvorrats auf der Basis des Derbholzvolumens: Die mittleren Hektarvorräte, aufgeteilt nach Baumartengruppen und Altersklassen, wurden zunächst auf das gesamte ober- und unterirdische Holzvolumen expandiert und dann mit Raumdichtefaktoren in Biomasse umgerechnet. Dieses Expansions- und Konversionsverfahren wird auch heute noch angewandt, wenn es keine direkten Biomasseschätzverfahren gibt bzw. wenn nur aggregierte Holzvorratsdaten in Volumeneinheiten vorliegen (Weiss et al. 2000, Wirth et al. 2004a).

Erfolgt die Holzvorratsermittlung durch nationale Waldinventuren auf Stichprobenbasis, bietet sich eine direkte Schätzung der Biomasse von Einzelbäumen analog zur Volumenberechnung an, da die so errechneten Einzelbaumwerte entsprechend dem jeweiligen Inventurdesign auf Region oder Land hochgerechnet werden können.

Daher sind die wichtigste Datengrundlage zur Quantifizierung der Senkenleistungen des Waldes in der THG-Berichterstattung die Bundeswaldinventur (BWI) mit den Stichjahren 1987, 2002, 2012, die Inventurstudie 2008 sowie für die Ausgangssituation 1990 in den neuen Ländern der Datenspeicher Waldfonds.

Bisher erfolgte die Schätzung von Einzelbaumbiomassen und den daraus abgeleiteten Kohlenstoff(C)-Vorräten sowie deren Veränderungen seit dem Stichjahr 1990 anhand von Funktionen, welche auf den Volumentafeln von Grundner und Schwappach (1952) sowie auf Raumdichtefaktoren aus der Literatur (Kollmann 1982, Hakkila 1972) beruhen.

Diese synthetisch hergeleiteten Funktionen (Pistorius et al. 2006) galt es, anhand von empirischen Daten zu prüfen und gegebenenfalls zu überarbeiten. In einer bundesweiten Messkampagne konnten zu diesem Zweck rund 900 Bäume gefällt und vermessen werden. Damit lag ein so umfangreiches empirisches Datenmaterial vor, dass eine neue, bundesweit gültige Biomassefunktion von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA-BW) parametrisiert werden konnte. Sie wurde im Jahr 2014 mit Ende der ersten Verpflichtungsperiode erstmals in das Berichtssystem am Thünen-Institut für Waldökosysteme implementiert (Dunger et al. 2014).

Ziel des Beitrags ist es, das bisherige, sogenannte synthetische und das neue, auf gemessenen Biomassedaten beruhende Verfahren zur Schätzung der oberirdischen Trockenbiomasse zu beschreiben und sie gegenüberzustellen. Verbunden ist damit auch die Erwartung, dass sich das neue empirische Verfahren ebenso als Standard etablieren kann wie das synthetische Modell, welches Wissenschaft und Praxis häufig als Referenz diente – nicht zuletzt, da es von den Gutachtern des IPCC akzeptiert war.

Das synthetische Modell

Um die Bundeswaldinventurdaten für die Treibhausgasberichterstattung nutzen zu können, musste ein Biomasseschätzverfahren für Einzelbäume entwickelt werden. Im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft wurde von der FVA-BW zunächst ein Verfahren konzipiert, welches nicht auf gemessenen Biomassedaten von Einzelbäumen beruhte, da zum Zeitpunkt der 2. Bundeswaldinventur kein ausreichend großer aktueller Datensatz vorlag, der für ganz Deutschland als repräsentativ betrachtet werden konnte.

Ausgangspunkt für die Einzelbaumbiomasseschätzung ist das Derbholzvolumen. Um die gesamte oberirdische Biomasse zu schätzen, muss das Derbholzvolumen auf das gesamte oberirdische Baumvolumen extrapoliert werden.

Die Massentafeln nach Grundner und Schwappach (1952) beinhalten Volumenangaben nach Brusthöhendurchmesser (BHD, in cm-Klassen) und Baumhöhe (H, in m-Klassen) zu Derbholz und Baumholz, getrennt nach den Baumarten Fichte, Kiefer, Lärche, Tanne, Birke, Buche, Eiche und Erle. Aus diesem voraggregierten Datenmaterial wurde für die genannten Baumarten ein einfaches Regressionsmodell zur Volumenexpansion von Derbholz zum Baumholz abgeleitet.

Mit diesen Gleichungen lässt sich das Derbholzvolumen der BWI-Probabäume in Baumholzvolumen umrechnen. Anschließend wird das Derbholzvolumen mittels Raumdichtefaktoren (Kollmann 1982) in Biomasse konvertiert. Die Differenz aus Baumholzvolumen und Derbholzvolumen wird als Astvolumen interpretiert und mit speziellen Dichtefaktoren (Hakkila 1972) für Äste in Astbiomasse umgerechnet. Die Summe aus Derbholzbiomasse und Astholzbiomasse entspricht der gesamten oberirdischen Biomasse. Das Konzept dieses synthetischen Biomasseschätzverfahrens ist bei Pistorius et al. (2006) sowie im Nationalen Treibhausgasbericht (Umweltbundesamt 2011, S. 454–458) beschrieben. Eine Weiterentwicklung der Expansionsfunktion von Derb- zu Baumholz mit nichtlinearen Gleichungen stammt von Zell (2008).

Das synthetische Modell liefert plausible Biomasseschätzungen. Dessen Gültigkeit beruht jedoch auf der Annahme, dass die verwendeten Datengrundlagen für Deutschland zutreffen, wenngleich sie möglicherweise nicht mehr die aktuellen dendrometrischen Verhältnisse widerspiegeln.

Den Massentafeln nach Grundner und Schwappach (1952) liegen etwa 70.000 vermessene Bäume zugrunde. Ein Großteil des Datenmaterials dürfte zu Beginn des 20. Jahrhunderts erfasst worden sein. Leider sind die Originaldaten nicht mehr verfügbar. Damit ist nicht bekannt, wie stark die Klassenwerte in den Tafeln geglättet wurden, und in welchem Maße die BHD- und Höhen-Klassen besetzt waren. Es wird vermutet, dass trotz des damals betriebenen Messaufwandes insbesondere starke BHD- und Höhenklassen unterrepräsentiert sind. Bezüglich der verwendeten Dichtefaktoren ergab eine Metaanalyse der Veröffentlichung von Hakkila (1972), dass einige Werte aus dem Raum Nordamerika stammen.

Auch die Formentwicklung der damals gewonnen Probabäume kann unter den heute gegebenen Wachstums- und Stressbedingungen nicht mehr repräsentativ sein (Pretzsch et al. 2012).

Diese Unwägbarkeiten veranlassten das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft eine Messkampagne in Zusammenarbeit mit den Landesforstverwaltungen zu initiieren, um die synthetischen Biomassefunktionen zu überprüfen. Dazu wurden in den Jahren 2009–2010 bundesweit 504 Bäume der Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche gefällt und vermessen (Kändler 2010). Zusätzlich standen weitere 400 Bäume aus verschiedenen Studien in Baden-Württemberg aus den Jahren 2006 bis 2008 zur Verfügung.

Aus der Analyse dieses Datenmaterials von rund 900 Einzelbaumbiomassen zusammen mit vollständigen dendrometrischen Beschreibungen (Schaftkurven) wurde eine neue empirische Schätzfunktion für die oberirdische Baumbiomasse hergeleitet. Es standen pro untersuchter Baumart zwischen 107 (Eiche) und 394 (Fichte) Probabäume deutschlandweit über ein großes BHD-Spektrum zur Verfügung (Tabelle 1 und Abbildung 1). Diese relativ große Anzahl an Messdaten übertrifft den Stichprobenumfang der meisten Studien zur Ableitung von Biomassefunktionen (Wirth et al. 2004b, Joosten et al. 2004, Cieniala et al. 2005, 2006, 2008, Wutzler et al. 2008).

Empirisches Modell

Eine Biomassefunktion gibt die Biomasse eines Einzelbaums oder für definierte Kompartimente eines Einzelbaums in Abhängigkeit von einfach zu messenden Baumdimensionen, wie z. B. BHD und Baumhöhe an. Diese Prädiktoren können je nach Gleichung additiv (linear) oder multiplikativ (allometrisch, nicht-linear) verknüpft sein. Neben den genannten forstlichen Größen sind noch weitere

Tab. 1. Anzahl der Probabäume nach BHD-Klasse und Baumart. Number of sample trees per dbh class and tree species.

BHD-Klasse [cm]	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche	Insgesamt
	----- Anzahl -----				
10–19,9	47	26	46	22	141
20–29,9	95	27	56	25	203
30–39,9	122	30	74	24	250
40–49,9	82	25	45	17	169
50–59,9	36	18	30	12	96
60–69,9	9	5	21	6	41
≥ 70	3	2	5	1	11
Summe	394	133	277	107	911

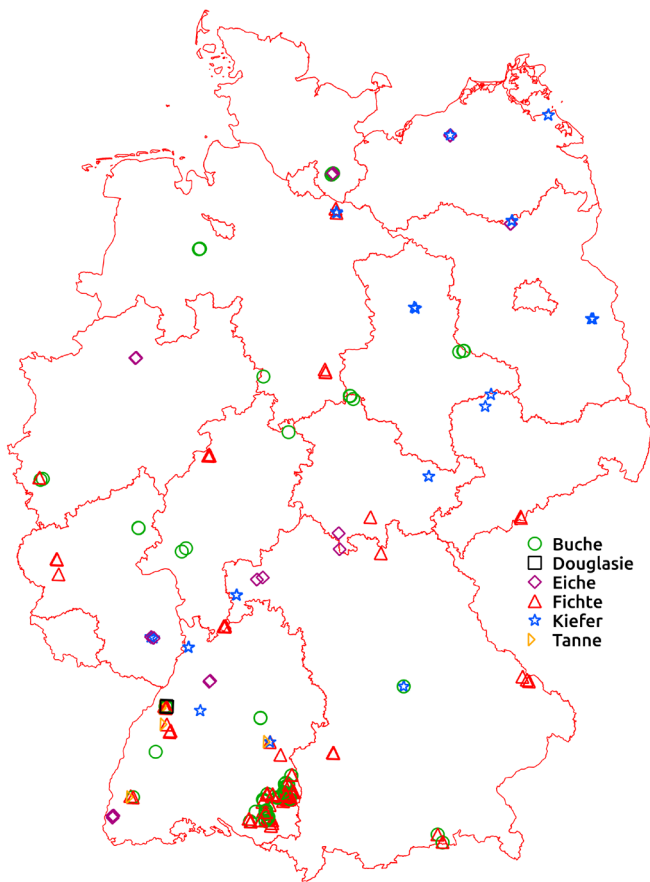


Abb. 1. Verteilung der Biomasse-Probeebäume in Deutschland. Distribution of the biomass sample trees in Germany.

Prädiktoren denkbar, etwa der Durchmesser in 30 % der Baumhöhe ($D_{0.3}$) oder das Baumalter. Da das Baumalter bei der BWI zum Teil auf Schätzungen beruht, ist diese Größe eher als *vage* zu betrachten und für eine Biomasseschätzung ungeeignet.

Die Einbeziehung eines oberen Durchmessers in Biomassefunktionen ist bisher in der Literatur nicht zu finden; allerdings weisen Fehrmann und Kleinn (2006) wie auch Kublin et al. (2013) auf die Bedeutung eines in relativer Höhe gemessenen Durchmessers für die Allometrie hin. Ein oberer Durchmesser in relativer Höhe beschreibt die Formigkeit eines Baumes und erklärt die daraus resultierende Variabilität der Baumbiomasse zusätzlich. So hat die Analyse der vorliegenden empirischen Daten gezeigt, dass neben BHD und Baumhöhe die Einbeziehung des $D_{0.3}$ zu einer signifikanten Steigerung der Modellgüte führt. Die Berücksichtigung eines oberen Schaftdurchmessers ist zudem mit der in der BWI angewandten Volumenermittlung konsistent, welche auf dem Konzept zur Schaftformmodellierung beruht (Kublin 2003).

Eines der am häufigsten verwendeten Modelle für Biomassefunktionen ist die sogenannte Allometrie, ein nicht-lineares Modell, bei dem die Gewichtung der Variablen ($D_{1.3}$ = BHD, $D_{0.3}$, H = Höhe) über die Exponenten b_1 bis b_3 erfolgt:

$$B = b_0 * D_{1.3}^{b_1} * D_{0.3}^{b_2} * H^{b_3} \tag{1}$$

mit B = Einzelbaum-Trockenbiomasse in kg. Allerdings haben nicht-lineare Modelle den Nachteil, dass sie im

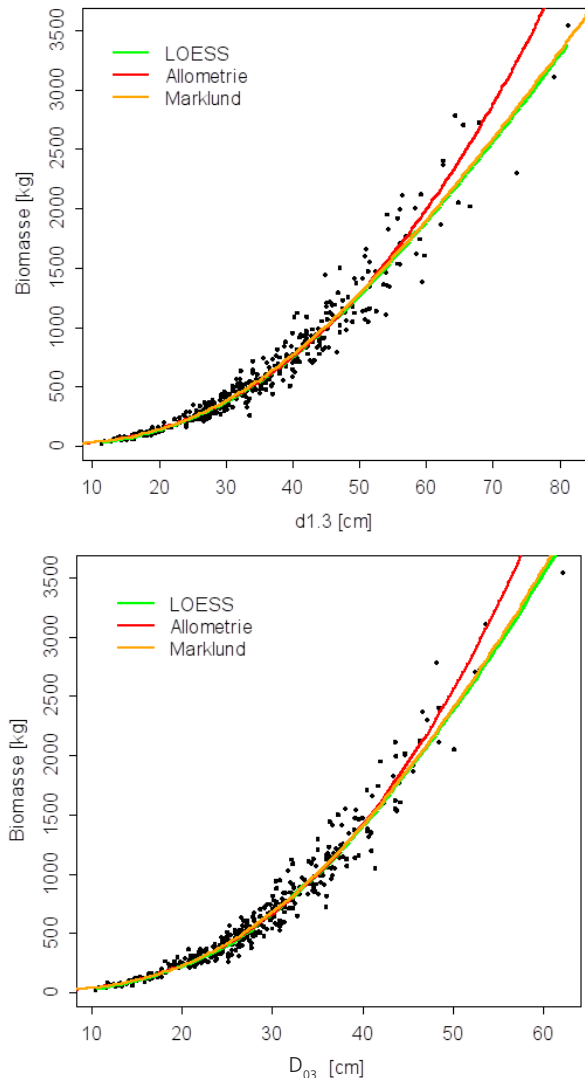


Abb. 2. Verlauf eines allometrischen Modells und einer Marklund-Funktion gegenüber der rein Daten-getriebenen LOESS-Funktion für den BHD und den oberen Durchmesser in 30 % der Baumhöhe ($D_{0.3}$).

Allometric model and Marklund model compared to the data dependent, non parametric LOESS function for dbh and the upper diameter in 30% of tree height ($D_{0.3}$).

Bereich extrem starker Dimensionen zunehmend steiler ansteigen. Diese Neigung zu einem steilen Anstieg kann durch die Wahl eines modifizierten nicht-linearen Modells abgeschwächt werden, wie das von Marklund (1987) verwendete Modell.

$$B = e^{b_0 + b_1 \frac{D_{1.3}}{D_{1.3} + k_1} + b_2 H} * H^{b_3} \tag{2}$$

Im Marklund-Modell geht der BHD als Prädiktor in Form eines Quotienten in den Exponenten der natürlichen Exponentialfunktion unter Zuhilfenahme eines zusätzlichen Koeffizienten k_1 ein. Diese Transformation des BHD führt dazu, dass sich sein Einfluss mit zunehmender Größe verringert: Die Funktion krümmt sich im stärkeren BHD-Bereich, der weniger Beobachtungen umfasst, weniger stark und passt sich somit gut an die Daten an. Dies lässt sich für das vorliegende Datenmaterial, wie ein Vergleich mit der LOESS-Funktion zeigt, gut belegen (Abbildung 2). LOESS steht für Local regrESSion und ist ein nicht-parametrischer Ansatz, der einfache Polynome in kleinen Abschnitten („lokalen“ Subsets) an das vorhan-

Tab. 2. Koeffizienten der Gleichung 3 nach Baumartengruppen.
Coefficients of formula 3 per tree species.

Baumartengruppe	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	k ₁	k ₂	D _{1,3,s} [cm]
Buche	0,16787	6,25452	6,64752	0,80745	11,0	135,0	86
Eiche	0,09428	10,26998	8,13894	0,55845	400,0	8,0	94
Fichte	0,75285	2,84985	6,03036	0,62188	42,0	24,0	69
Kiefer	0,33778	2,84055	6,34964	0,62755	18,0	23,0	59
Pappel	0,27278	4,19240	5,96298	0,81031	13,7	66,8	113

Tab. 3. Gütemaße für das Marklund-Modell nach Baumartengruppen.
Characteristic values of the Marklund model per tree species.

Baumartengruppe	Delta ^a	Sigma ^a	rmse [kg TM]	R ²
Fichte	0,8867	0,2160	83,6	0,9760
Kiefer	0,9979	0,1021	78,2	0,9828
Buche	1,0453	0,0953	263,8	0,9572
Eiche	1,1451	0,0375	179,7	0,9656

^aDelta und sigma sind Parameter der modellierten Residualvarianz, geschätzt mit der Prozedur nlme (Option „weights = varPower()“, R Core Team 2012). Delta and sigma are parameters of the modelled residual variance estimated by the nlme procedure (option „weights = varPower()“, R Core Team 2012)

dene Datenmaterial mit der Methode der kleinsten Quadrate anpasst (Cleveland 1979, Cleveland und Devlin 1988).

Abbildung 2 verdeutlicht, dass die allometrische Funktion im oberen Durchmesserbereich deutlich steiler ansteigt als das Marklund-Modell. Letzteres stimmt dagegen gut mit dem rein „datengetriebenen“ nicht-parametrischen LOESS-Ausgleich überein. Hierdurch werden Verzerrungen bei der Biomasseschätzung vor allem am oberen Ende des vorliegenden Wertebereiches, d. h. in einem weniger gut besetzten Bereich, zumindest verkleinert.

Gleichung 3 zeigt die modifizierte Marklund-Funktion zur Einzelbaum-Biomasseschätzung, welche seit 2013 zur THG-Berichterstattung auf Basis der BWI-Daten genutzt wird (Dunger et al. 2014). Zusätzlich zum BHD und zur Höhe wird der obere Schaftdurchmesser D₀₃ als Prädiktor einbezogen. Dabei gehen der BHD und der D₀₃ in der oben erwähnten transformierten Form in den Exponenten der natürlichen Exponentialfunktion ein, während der Einfluss der Höhe in einem Potenzterm erfasst wird.

$$B = b_0 * e^{b_1 \frac{D_{1,3}}{D_{1,3}+k_1}} * e^{b_2 \frac{D_{03}}{D_{03}+k_2}} * H^{b_3} \quad (3)$$

In Tabelle 2 sind die Koeffizienten für das modifizierte Marklund-Modell nach Baumarten-Gruppen aufgeführt. Tabelle 3 zeigt die entsprechenden Kenngrößen zur Modellgüte.

Als fünfte Baumarten-Gruppe ist in Tabelle 2 die Pappel aufgeführt. Für diese liegen bisher keine empirischen Daten vor. Die Anpassung der Marklund-Funktion an mindestens ein Weichlaubholz war nötig, da sowohl die Funktion der Buche als auch die der Eiche zu deutlichen Überschätzungen der Biomasse von Weichlaubhölzern geführt hätten. Die Anpassung erfolgte mithilfe von sogenannten Pseudobeobachtungen, Einzelbaumbiomassen, die aus BWI-Messdaten für die Pappel mit dem synthetischen Verfahren erzeugt wurden.

Anpassungen für andere nicht empirisch belegte, aber in den Grundner-Schwappach-Tafeln vorhandenen Baumarten durch Pseudobeobachtungen wurden ebenfalls vorgenommen. Diese wurden jedoch nicht in die THG-Berichterstattung integriert: a) um den neu eingeschlagenen Weg, empirisches Datenmaterial zu nutzen, nicht wieder zu verlassen und die genannten Nachteile der Grundner-Schwappach-Tafeln nicht wieder einzuführen sowie b) um konsistent zur Schätzung der unterirdischen Biomasse in der THG-

Berichterstattung zu sein, welche ebenfalls nur nach Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Weichlaubhölzer (Pappel) unterscheidet (Dunger et al. 2014).

Segmentiertes Modell

Die Biomassewerte von Einzelbäumen decken einen enormen Größenbereich ab: Während kleine Bäumchen nur wenige Gramm wiegen, erreichen starke Bäume eine Masse von etlichen Tonnen. Für die THG-Berichterstattung ist die gesamte lebende Baumbiomasse relevant. Die Biomasseschätzung im Rahmen der BWI muss folglich ein weites Dimensionsspektrum von kleinen Bäumen ab 0,2 m Höhe bis hin zu extrem starken Individuen mit Durchmessern von deutlich über 100 cm abdecken. Das bei der Messkampagne gewonnene Datenmaterial umfasst einen BHD-Bereich von etwa 10 bis 80 cm.

Die Extrapolation der Funktion in die BHD-Bereiche unterhalb bzw. oberhalb des empirischen Datenmaterials birgt das Risiko verzerrter Schätzungen. Deshalb wurden abschnittsweise Funktionen abgeleitet und in einem sogenannten segmentierten Modell zusammengeführt (Abbildung 3). Damit liegt nur eine Funktion vor, welche auf die gesamte vorkommende Bandbreite an Baumdimensionen angewandt werden kann.

Das segmentierte Modell deckt im Bereich des Nicht-Derbholzes bzw. im Übergang zum Derbholz zwei Dimensionskategorien ab: (1) die kleinsten bei der BWI erfassten Bäume unter 1,3 m Höhe, in den Höhenklassen 0,2 bis 0,5 m sowie > 0,5 bis 1,3 m, deren Höhe zur Modellierung der Einzelbaumbiomassen auf 0,35 bzw. 0,9 m gesetzt wird, und (2) die Bäume ab 1,3 m Höhe und 0 cm BHD bis zu 10 cm BHD.

Für die Bäume unter 1,3 m Höhe wurde anhand von Nicht-Derbholz-Biomassedaten, erhoben von der FVA-BW, eine Biomassefunktion in Form eines einfachen allometrischen Modells (Koeffizienten in Tabelle 4) mit der Höhe als Prädiktor angepasst (Kändler et al. 2006):

$$B = b_0 * H^{b_1} \quad (4)$$

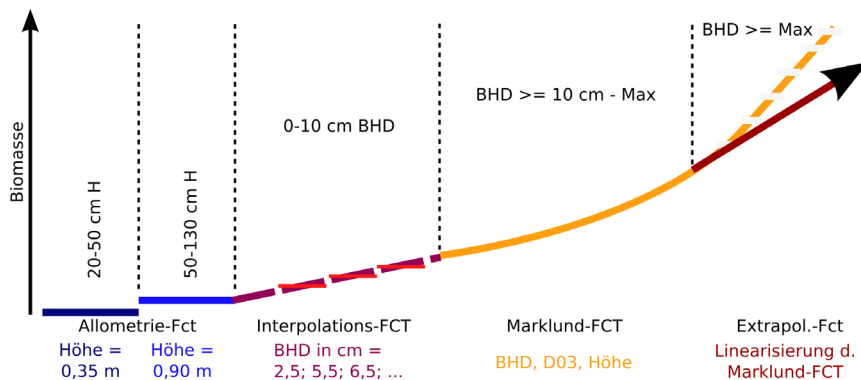


Abb. 3. Abschnittsweise Definition der segmentierten Biomassefunktion.
Definition of the biomass function in each segment.

Tab. 4. Koeffizienten der Biomassefunktion für Bäume unter 1,3 m Höhe.
Coefficients of the biomass function for trees with height < 1.3 m.

Baumartengruppe	b ₀	b ₁
Nadelbäume	0,2305890	2,2010099
Laubbäume	0,0494022	2,5494617

Differenziert werden nur Nadel- und Laubbäume, da Erstere deutlich höhere Biomassewerte als die Laubbaumarten aufweisen. Eine weitere Aufteilung, bspw. nach Baumartengruppen, ließ das Datenmaterial nicht zu. Der Vergleich der hier verwendeten Funktion für Nicht-Derbholz unter 1,3 m Höhe, speziell der Klassenmittelwerte 0,35 m und 0,9 m Höhe, mit Literaturdaten (Annighöfer et al. 2016) zeigt keine deutlichen Unterschiede (Abbildung 4).

Für den Bereich 0 cm < BHD ≤ 10 cm lagen aus den Erhebungen nur wenige Daten vor. Für diesen Bereich wurde eine Funktion angepasst, welche nur den BHD als Prädiktor benötigt und als Interpolationsfunktion für die Subpopulation > 130 cm Höhe und ≤ 10 cm BHD fungiert.

$$B = B_0 + \left[\frac{B_s - B_0}{D_{1.3,10cm}^2} + b_3(D_{1.3} - D_{1.3,10cm}) \right] * D_{1.3}^2 \quad (1) \quad (5)$$

Als unterer Stützwert der Interpolationsfunktion (Gleichung 5) wurde die Biomasse bei einer Baumhöhe von 1,3 m (getrennt nach Nadel- und Laubbäumen, siehe Spalte B₀ in Tabelle 5) verwendet. Der obere Stützwert bei 10 cm BHD wird, getrennt nach Baumarten-Gruppen, mithilfe der mittleren Höhe und der mittleren Förmigkeit bei 10 cm BHD abgeleitet (Spalte B_s in Tabelle 5). Damit ist, zumindest näherungsweise, die Stetigkeit an den Übergängen zwischen den abschnittswisen Funktionen gewahrt. Für Probebäume der BWI unter 7 cm BHD wird je nach Größenklasse (BMELV

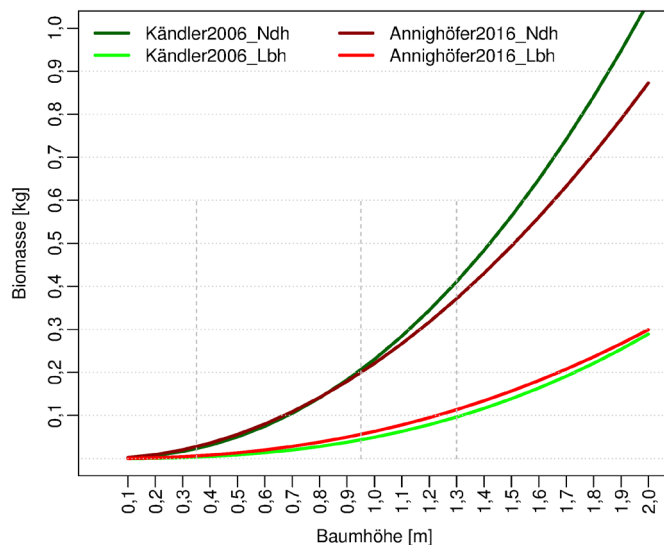


Abb 4. Vergleich der Biomassefunktionen für die Verjüngung nach Kändler et al. (2006, unveröffentlicht) und Annighöfer et al. (2016).
Comparison of two biomass functions for regeneration trees (Kändler et al. 2006 unpublished and Annighöfer et al. 2016).

2011) ein mittlerer BHD zugeordnet; für Bäume ≥ 7 cm BHD liegt eine millimetergenaue Messung des BHD vor.

Wie bereits erwähnt, ist die Biomassefunktion für den Derbholzbereich empirisch nur bis zu bestimmten Dimensionen gesichert. Wegen ihrer nicht-linearen Natur besteht daher das Risiko, dass bei extrem starken Bäumen die Biomasseschätzung unrealistisch hohe Werte erreicht. Um den Effekt einer Überschätzung im Extrapolationsbereich oberhalb eines baumartenspezifischen Schwelendurchmessers zu reduzieren, wird das nicht-lineare Marklund-

Tab 5. Koeffizienten der Biomassefunktion in Abhängigkeit vom BHD für den BHD-Bereich von 0 bis 10 cm.
Coefficients of biomass function for trees with dbh between 0 cm and 10 cm with dbh as independent parameter.

Baumartengruppe	B ₀	B _s	b ₃	D ₀₃		H _s	
	[kg]	[kg]		c0	c1	a	b
Fichte	0,4108	26,6312	0,0136956	1,07843	0,91204	0,27407	2,22031
Kiefer	0,4108	19,9994	0,0091576	0,89009	0,95747	0,29722	1,98688
Buche	0,0964	33,2233	0,0116212	0,84014	0,98970	0,29397	1,76894
Eiche	0,0964	28,9478	0,0150089	0,87633	0,98279	0,31567	1,63335
Pappel	0,0964	16,8610	-0,0055086	0,86720	0,96154	0,28064	2,40288

Modell linearisiert, in dem, bildlich gesprochen, der letzte Anstieg der Marklund-Funktion linear extrapoliert wird (Kändler und Bösch 2012). Dieses Vorgehen entspricht einer Taylor-Linearisierung mit Abbruch nach dem Term erster Ordnung, wobei hier nur die erste Ableitung berücksichtigt wird. Die daraus resultierende Funktion zur Biomasseschätzung im oberen Extrapolationsbereich zeigt Gleichung 6:

$$B = B_s * \left[1 + \frac{b_1 k_1}{(D_{1.3,s} + k_1)^2} (D_{1.3} - D_{1.3,s}) + \frac{b_2 k_2}{(D_{03,s} + k_2)^2} (D_{03} - D_{03,s}) + \frac{b_3}{H_s} (H - H_s) \right] \quad (6)$$

mit B_s = Biomasse am Schwellendurchmesser $D_{1.3,s}$. Der Schwellendurchmesser $D_{1.3,s}$ für die einzelnen Baumartengruppen ist in Tabelle 2 aufgeführt. $D_{03,s}$ und H_s am Schwellendurchmesser werden durch die Gleichungen 7 und 8 abgeleitet. Die entsprechenden Koeffizienten sind in Tabelle 5 gelistet.

$$D_{03,s} = D_{03} + c_0 D_{1.3,s}^{c_1} - c_0 D_{1.3}^{c_1} \quad (7)$$

$$H_s = H + \left(a + \frac{b}{D_{1.3,s}} \right)^{-3} - \left(a + \frac{b}{D_{1.3}} \right)^{-3} \quad (8)$$

Damit lässt sich die Biomasseschätzung, wie sie in der THG-Berichterstattung angewandt wird, vollständig nachvollziehen. Bereits vollständig implementiert ist die segmentierte Biomassefunktion in der Programm-Bibliothek BDAT3.0, welcher neben der Baumart nur die entsprechenden Dimensionen übergeben werden; das Programm wählt dann intern die passende Abschnittsfunktion aus.

Vergleich von neuem und bisherigem Verfahren

Einen Vergleich der einzelbaumbezogenen Biomasseschätzungen zwischen dem alten synthetischen und dem neuen segmentierten Modell zeigt Abbildung 5. Sowohl für die Fichte als auch für die Buche liegen beide Punktwolken gut übereinander, wobei das synthetische Modell eine etwas höhere Streuung aufweist. Für die stärkeren Dimensionen (> 80 cm BHD bei Fichte und > 100 cm BHD bei Buche) wird der Effekt der Taylor-Linearisierung deutlich. Die Biomasseschätzungen an den starken Einzelbäumen fallen mit dem neuen segmentierten Modell aufgrund der Linearisierung geringer aus. Im Mittel schätzt aber auch das Marklund-Modell geringere Biomassen als das synthetische Modell.

Die Biomasseschätzungen pro Hektar sind sowohl für die synthetische als auch für die segmentierte Funktion in Abbildung 6 dargestellt. Über alle Baumarten hinweg ist der Unterschied zwischen beiden Funktionen mit 1,3 % nicht signifikant. Für die Baumartengruppen Fichte, Kiefer, Tanne, Douglasie, Lärche sowie Eiche und andere Laubbaumarten mit niedriger Lebenserwartung (ALN) sind die Biomasseschätzungen mittels der segmentierten Funktion zwischen 2,5 % (Fichte) und 30 % (ALN) geringer bezogen auf das alte, synthetische Verfahren. Die Unterschiede sind jedoch, außer bei ALN, statistisch nicht nachweisbar. Für die Tanne und die Douglasie wurde die Funktion der Fichte verwendet; die Lärche wurde der Kiefer zugeordnet. Für ALN wurde die Funktion der Pappel genutzt.

Ein umgekehrter Trend zeigt sich bei der Buche. Hier werden mit der segmentierten Funktion rund 10 % mehr Biomasse geschätzt. Dieser Unterschied ist signifikant. Gleiches gilt für die anderen Laubbaumarten mit hoher Lebenserwartung, da auch für diese die Funktion der Buche angewandt wurde.

Die Abbildung 7 zeigt die Anteile der modellierten Biomasse am Biomassevorrat pro Hektar in Abhängigkeit der für jedes Segment verwendeten Funktion. Über alle Baumarten hinweg werden mehr als 95 % der Biomasse mithilfe des Marklund-Modells bzw. der Funktion für die Verjüngung abgeleitet, d. h., hierfür werden Modelle angewandt, welche durch empirische Daten abgesichert sind. Bei den Laubhölzern mit niedriger bzw. hoher Lebenserwartung werden rund 5 % der Biomasse mithilfe der Interpolationsfunktion

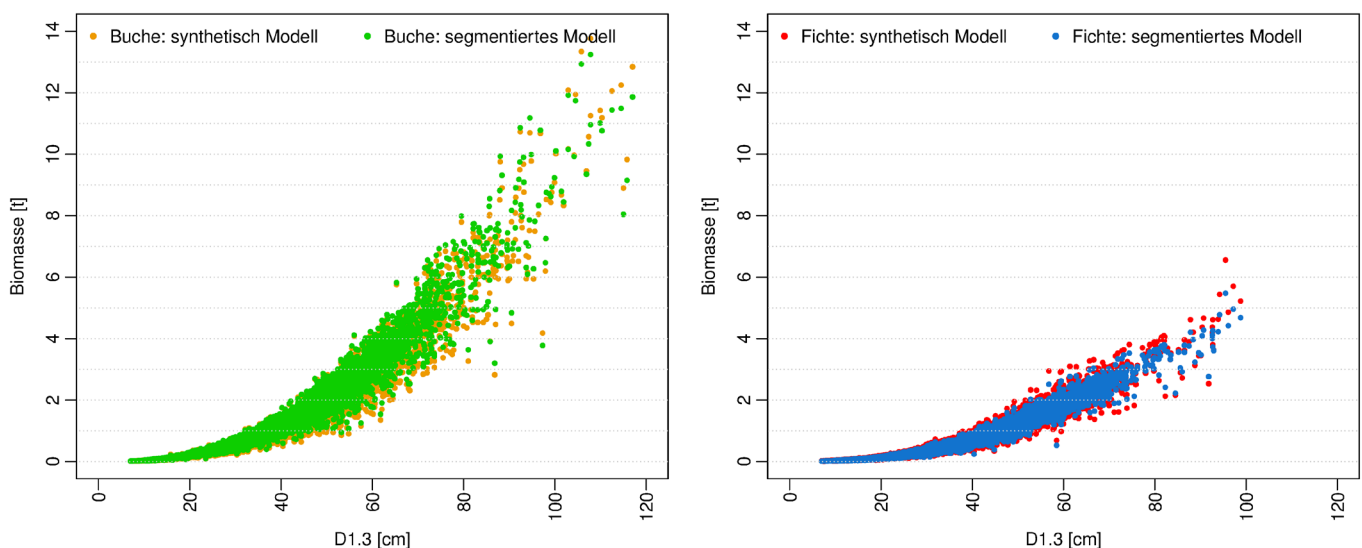


Abb. 5. Gegenüberstellung von Einzelbaumbiomassen des synthetischen und des segmentierten Modells für Buchen (links) und Fichten (rechts). Comparison of single tree biomass estimates according to the old synthetic model and the new segmented model for beech (left side) and spruce (right side).

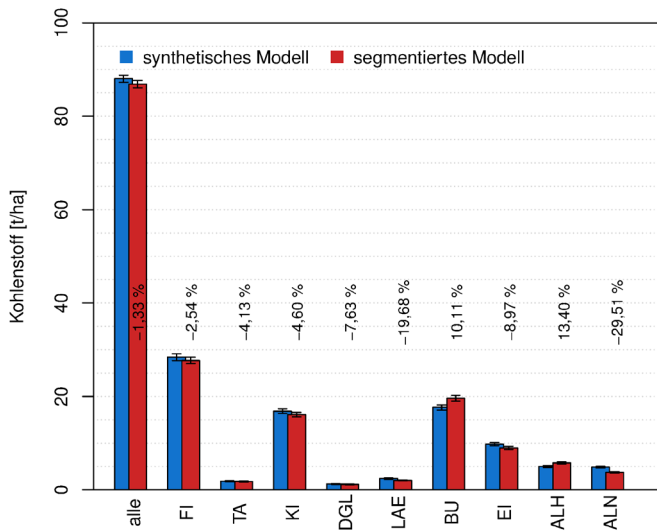


Abb. 6. Vergleich der Kohlenstoff-Vorratsschätzungen nach synthetischem und segmentiertem Modell zum Zeitpunkt der BWI 2012.

Comparison of carbon estimates per hectare from the German National Forest Inventory 2012 according to the old synthetic model and the new segmented model.

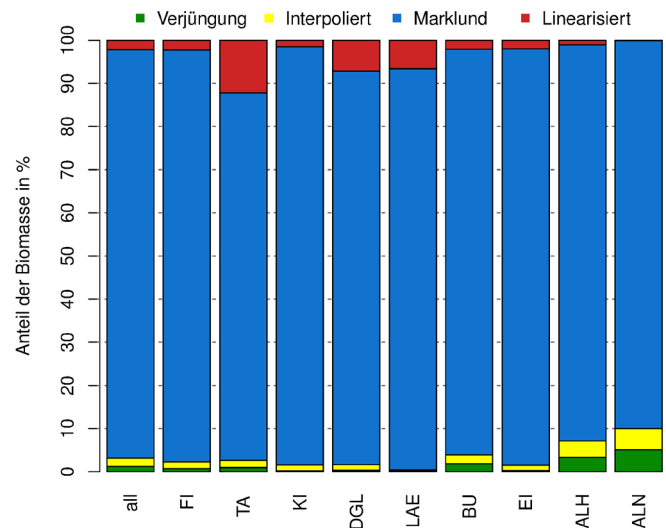


Abb. 7. Prozentualer Anteil der Biomasse pro Hektar Wald in Abhängigkeit von der verwendeten Funktion innerhalb des segmentierten Modells und der Baumart.

Proportion in percent of biomass per hectare depending on the used function within the segmented model and the tree species.

abgeleitet. Bei Douglasie und Lärche leitet sich die Biomasse zu 7 bzw. 6 % und bei Tanne zu mehr als 10 % durch die linearisierte Extrapolationsfunktion ab.

Diskussion

Aus methodischer Sicht war das bisherige, synthetische Verfahren zur Ableitung der Einzelbaumbiomasse, basierend auf den Grundner-Schwappach-Tafeln (1952) sowie den Literatur-Raumdichten, dringend zu überprüfen. Dieses kombinierte Expansions- und Konversionsverfahren beruht ausschließlich auf Sekundärdaten der Literatur. Es besteht aus einer einfachen linearen Beziehung, welche zwar den überwiegenden Verlauf der Relation Baumholz- zu Derbholzvolumen korrekt wiedergibt, im Extrapolationsbereich aber systematisch abweicht, was je nach Baumart zu unterschiedlichen Effekten führt. Hinzu kommt bei einigen Baumarten eine Abhängigkeit von Altersklassen, was in der praktischen Anwendung zu Inkonsistenzen bzw. Unstetigkeiten im Funktionsverlauf führen kann.

Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Entwicklung eines einheitlichen Biomasseschätzverfahrens ist die Anforderung, dass die gesamte Dimensionsbandbreite der bei der BWI erfassten Probestämme abgedeckt wird. Dieses Gebot wurde zwar bei der alten synthetischen Biomassefunktion berücksichtigt, mangels empirischer Grundlagen wurden jedoch für das Nicht-Derbholz gutachterliche Annahmen getroffen. Durch die Einbeziehung neuer, empirischer Daten konnten auch für den Nicht-Derbholzbereich realitätsnähere Modelle angepasst werden. Diese liefern gegenüber den gutachterlichen Annahmen deutlich geringere Biomassen. Gleichzeitig stehen für das Nicht-Derbholz aus messtechnischen Gründen weniger Prädiktoren zur Verfügung als beim Derbholz, sodass hier einfachere Modellansätze benötigt werden. Dies führte zur Konzeption einer abschnittsweise definierten Funktion, welche 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, im Datenmaterial nicht vorhandener Bäume, also im oberen Extrapolationsbereich. Zur Definition des oberen Ex-

trapolationsbereiches mussten für den BHD Schwellenwerte festgelegt werden. Oberhalb dieser Schwelle liefert das Marklund-Modell aufgrund seiner nicht-linearen Eigenschaften für extreme Baumdimensionen unrealistisch hohe Werte. Das Linearisieren des Anstiegs der Funktionswerte im oberen Extrapolationsbereich limitiert diesen Effekt. Das führt mit zunehmender Dimension zu stärkeren Abweichungen von der synthetischen Funktion, d. h. zu tendenziell niedrigeren Biomassewerten. Auch wenn die Abbildung 7 zeigt, dass der Anteil Biomasse, welcher im oberen Extrapolationsbereich geschätzt wird, nicht sehr hoch ist, sollte über eine Erweiterung der empirischen Datenbasis nachgedacht werden. Sowohl das synthetische Modell als auch die nicht linearisierte Marklund-Funktion liefern im oberen Extrapolationsbereich zum Teil unplausibel hohe Biomassen. Inwieweit die Linearisierung die Biomassen erwartungstreu schätzt, kann nicht ohne zusätzliches empirisches Material nachgewiesen werden. Gleichzeitig ist die Fällung von Bäumen mit einem BHD > 60 cm zur Probenahme aus ökonomischen Gesichtspunkten fragwürdig. Alternativ hierzu könnten zerstörungsfreie Messmethoden, wie das Laserscanning oder photogrammetrische Methoden, (weiter-) entwickelt bzw. angewendet werden.

Im Zuge der Biomasseerhebungen wurden auch die Raumdichten an den Probestämmen erfasst. Für die Baumarten Fichte, Kiefer und Eiche wurden am vorliegenden empirischen Datenmaterial im Mittel geringere Raumdichten gegenüber den für das synthetische Modell verwendeten Literaturangaben (Kollmann 1982) ermittelt. Dies stellt vermutlich die Hauptursache für die geringere Biomassenschätzung an den Einzelbäumen mithilfe des neuen segmentierten Modells dar. Lediglich für die Buche wurden im Vergleich zur genannten Literatur nahezu identische Raumdichten gemessen. Da die Buche mit dem neuen, segmentierten Modell höhere Biomassewerte aufweist, liegt die Vermutung nahe, dass sich die aktuellen Einzelbaumbiomassen gegenüber den Erhebungen von Grundner und Schwappach (1952) erhöht haben und die Erfassung neuer empirischer Daten trotz des hohen Aufwands gerechtfertigt war.

Wesentlich an der neuen Biomassefunktion ist, dass für die Anpassung des Marklund-Modells im Dimensionsbereich, in dem sich die große Masse der Waldbäume befindet, aktuelle Biomassedaten deutschlandweit erhoben wurden (siehe Abbildung 1). Somit kann auch eine großräumige Gültigkeit angenommen werden.

Das neue auf einem segmentierten Modell beruhende Verfahren zur Biomasseschätzung eliminiert die Schwächen des bisherigen Ansatzes weitgehend, allerdings zum Preis größerer Komplexität mit entsprechend vielen Parametern.

Zusammenfassend fallen die neuen Biomasseschätzungen gegenüber dem synthetischen Modell um rund 1,3 % geringer aus, was jedoch statistisch nicht signifikant ist. Das Schätzen tendenziell niedrigerer Biomassewerte führt bei der Schätzung von Veränderungen auch zu einer konservativen Schätzung der Sequestrierungsrate. Damit ist eine Überschätzung der CO₂-Senkenleistung des Waldes ausgeschlossen und das Verfahren somit IPCC-konform.

Ausblick

Die neue Biomassefunktion wird aktuell in der THG-Berichterstattung verwendet und ist durch das IPCC akzeptiert. Im bundesweiten Durchschnitt beläuft sich die oberirdische Biomasse pro Hektar auf rund 187 Tonnen. Auch bei der landesspezifischen Auswertung der BWI in Baden-Württemberg wird sie genutzt, wo im Gesamtwald die oberirdische Biomasse im Mittel 213 Tonnen je Hektar erreicht. Aktuell werden die Betriebsinventuren in Baden-Württemberg um die Berechnung der Biomasse mithilfe der neuen Biomassefunktion erweitert. Die Kenntnis der Biomasse ist nicht nur Voraussetzung für die Bestimmung der Kohlenstoffvorräte, sondern auch für die Abschätzung von Energieholzpotenzialen, da der Energiegehalt von der Trockenmasse des Holzes (und der unterstellten Feuchte) abhängt.

Die neue Biomassefunktion ist neben den Volumenfunktionen Bestandteil der Programmbibliothek BDAT3.0. Sie steht auf der Homepage der FVA Baden-Württemberg im Download-Bereich zur Verfügung. Die Funktionalitäten von BDAT3.0 lassen sich recht einfach in alle Auswertungsprogramme für Waldinventuren einbinden, sofern sie Windows(R)-basiert sind.

Literatur

- Annighöfer P., Ameztegui A., Ammer C., Balandier P., Bartsch N., Bolte A., Coll L., Collet C., Ewald J., Frischbier N., Gebereyesus T., Haase J., Hamm T., Hirschfelder B., Huth E., Kändler G., Kahl A., Kawalez H., Kuehne C., Lacoite A., Lin N., Löf M., Malagoli P., Marquier A., Müller S., Promberger S., Provendier D., Röhle H., Sathornkitch J., Schall P., Scherer-Lorenzen M., Schröder J., Seele C., Weidig J., Wirth C., Wolf H., Wollmerstädt J., Mund M. 2016. Species-specific and generic biomass equations for seedlings and saplings of European tree species. *European Journal of Forest Research* 135, 313-329
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) 2011. Aufnahmeanweisung für die dritte Bundeswaldinventur (BWI³) (2011–2012). 2. Aufl. Bonn
- Burschel P., Kürsten E., Larson, B. 1993. Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt – eine Betrachtung für die Bundesrepublik Deutschland. *Forstliche Forschungsberichte München* 135
- Cienciala E., Černý M., Apltauer J., Exnerová Z. 2005. Biomass functions applicable to European beech. *Journal of Forest Science* 51, 147–154
- Cienciala E., Černý M., Tatarinov F., Apltauer J., Exnerová Z. 2006. Biomass functions applicable to Scots pine. *Trees* 20, 483–495
- Cienciala E., Apltauer J., Exnerová Z., Tatarinov F. 2008. Biomass functions applicable to oak trees grown in Central-European forestry. *Journal of Forest Science* 54, 109–120
- Cleveland W.S. 1979. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association* 74, 368, 829–836
- Cleveland W.S., Devlin S.J. 1988. Locally weighted regression: An approach to regression analysis by local fitting. *Journal of the American Statistical Association* 83, 403, 596–610
- Dunger K., Stümer W., Oehmichen K., Riedel T., Ziche D., Grüneberg E., Wellbrock N. 2014. Chapter 7.2: Forest Land (CRF Sector 5). *Climate Change* 28, 517–564
- Fehrmann L., Kleinn C. 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
- Grundner F., Schwappach A. 1952. Massentafeln zur Bestimmung des Holzgehaltes stehender Waldbäume und Waldbestände. 10. Aufl. Paul Parey, Berlin, Hamburg
- Hakkila P. 1972. Utilisation of residual forest biomass. *Springer Series in Wood Science*. Springer, Berlin
- Joosten R., Schumacher J., Wirth C., Schulte A. 2004. Evaluating tree carbon predictions for beech (*Fagus sylvatica* L.) in western Germany. *Forest Ecol. Manage.* 189, 87–96
- Kändler G. 2010. Methodenentwicklung für die dritte Bundeswaldinventur: Modul 4 Grundlagendaten: bundesweite Biomasseerhebungskampagne. Technischer Bericht, FVA Baden-Württemberg, Freiburg (unveröff.)
- Kändler G., Bösch B. 2012. Methodenentwicklung für die 3. Bundeswaldinventur: Modul 3 Überprüfung und Neukonzeption einer Biomassefunktion. Technischer Bericht, Version 2b, FVA Baden-Württemberg, Freiburg
- Kändler G., Zell J., Kruse R. 2006. Herleitung von Biomassefunktionen für Verjüngungs-Bäume („Nicht-Derbholz“-Kollektiv) – erste Ergebnisse. FVA Baden-Württemberg, Freiburg (unveröff.)
- Kollmann F. 1982. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Bd. 1. Springer, Berlin
- Kublin E. 2003. Einheitliche Beschreibung der Schaftform – Methoden und Programme – BDATpro. *Forstw. Cbl.* 122, 183–200
- Kublin E., Breidenbach J., Kändler G. 2013. A flexible stem taper and volume prediction method based on mixed-effects B-spline regression. *European Journal of Forest Research* 132, 983–997
- Marklund L.G. 1987. Biomass functions for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) in Sweden. *SLU, Department of Forest Survey*, 43
- Pistorius T., Zell J., Hartebrodt C. 2006. Untersuchungen zur Rolle des Waldes und der Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt des Landes Baden-Württemberg. Technischer Bericht, FVA Baden-Württemberg, Institut für Forstökonomie, Freiburg
- Pretzsch H., Uhl E., Biber P., Schütze G., Coates D. 2012. Change of allometry between coarse root and shoot of Lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl. ex. Loud.) along a stress gradient in the sub-boreal forest zone of British Columbia. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27, 532–544
- R Core Team 2012. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <http://www.R-project.org> (abgerufen am 22.02.2017)
- Umweltbundesamt 2011. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2011. German greenhouse gas inventory 1990–2009. Technical Report. Federal Environmental Agency. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/submission-under-united-nations-framework-0> (abgerufen am 22.02.2017)
- Weiss P., Schieler K., Schadauer K., Radunsky K., Englisch M. 2000. Die Kohlenstoffbilanz des Österreichischen Waldes und Betrachtungen zum Kyoto-Protokoll. *Umweltbundesamt Österreich*, Wien
- Wirth C., Schulze E.-D., Schwalbe G., Tomczyk S., Weber G., Weller E. 2004a. Dynamik der Kohlenstoffvorräte in den Wäldern Thüringens. TL-WJF Gotha in Zusammenarbeit mit MPI-BGC Jena
- Wirth C., Schumacher J., Schulze E.-D. 2004b. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiol.* 24, 121–139
- Wutzler T., Wirth C., Schumacher J. 2008. Generic biomass functions for Common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Central Europe – predictions and components of uncertainty. *Canadian Journal of Forest Research* 38, 1661–1675
- Zell J. 2008. Methode für die Ermittlung, Modellierung und Prognose der Kohlenstoffspeicherung in Wäldern auf Grundlage permanenter Großrauminventuren. *Dissertation Albert-Ludwigs-Universität Freiburg*