

Neuentwicklung von Schaftkurvenmodellen für die wichtigsten Baumarten Deutschlands auf Basis der TapeR-Methodik

Christian Vonderach¹, Gerald Kändler¹, Thomas Riedel²

¹Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

²Thünen-Institut für Waldökosysteme, Eberswalde

Zusammenfassung

Der Holzvorrat von Wäldern lässt sich am genauesten auf Grundlage der Einzelbaumvolumina bestimmen. Zur Ermittlung des Baumvolumens können u.a. baumartenspezifische Schaftkurvenfunktionen eingesetzt werden, so zum Beispiel bei der Bundeswaldinventur (BWI). Auch für die Herleitung des Volumenzuwachses zwischen zwei Zeitpunkten ist über wiederholte Messungen und anschließende Volumenschätzungen mittels baumindividueller Schaftkurvenfunktionen möglich. In Kombination mit zusätzlichen Informationen zu Rindenabzug, Aufarbeitungszöpfen und Verwertbarkeit können genutzte Bäume in Sortimenten aufgeteilt und auf diese Weise die Sortenstruktur des ausgeschiedenen Vorrats dargestellt werden. Auch für Prognosen des Rundholzaufkommens werden Sortieralgorithmen auf der Basis von Schaftkurvenmodellen benötigt. Aktueller Standard der Bundeswaldinventur ist die aus den 1980er Jahren stammende Schaftkurvenbibliothek BDAT. Mit der Entwicklung der Schaftkurvenmethodik TapeR durch Kublin et al (2013) steht ein neuer und verbesserter, statistischer Ansatz zur Verfügung, um Schaftkurvenmodelle zu erstellen. Für die Anpassung der neuentwickelten Schaftkurvenmodelle wurde eine umfangreiche Datenbasis für die Baumarten Fichte, Tanne, Kiefer, Douglasie und Lärche sowie Buche, Eiche und Roteiche zusammengestellt, die auch die BDAT-Urdaten enthält. Zudem wurden neuere Sektionsdaten verschiedener forstlicher Versuchsanstalten ergänzt. Ein separater Validierungsdatensatz wurde genutzt, um unabhängige Gütemaße der neuen Modelle abzuleiten. Damit liegen für diese acht Baumarten mehr als 100.000 sektionsweise vermessene Bäume vor. In diesem Beitrag soll neben einem Vergleich mit BDAT auf Basis der BWI-Daten zur Vorhersage von Durchmesser und Volumen auf verschiedene Aspekte des Modellierungsprozesses eingegangen werden. Es werden Fragen zur Behandlung von Laubholzkronen bei der Schaftkurvenmodellierung und methodische Fragen zur Monotonie des Schaftverlaufs diskutiert. Ein neues R-Paket stellt die Modelle und notwendige Funktionen zu Verfügung und enthält ein zum Programmpaket BDAT vergleichbares Funktionsangebot.

Einleitung

Schaftkurvenmodelle haben ein vielfältiges Anwendungsspektrum. Sie dienen grundsätzlich zur Durchmesserbestimmung entlang des Schafts und damit in erster Linie der Voluminierung des Derbholzes von Einzelbäumen. Sie können damit für die Vorratsschätzung ganzer Bestände auf Basis verschiedener Erhebungsmethoden eingesetzt werden. Dazu zählen Vollerhebungen, Stichproben- und Inventurverfahren aber auch Simulationswerkzeuge. Sind verschiedene zeitliche Zustände der interessierenden Bestände bekannt, kann auch eine Zuwachsschätzung abgeleitet werden. Über weitere Algorithmen und Informationen (u.a. Rindenabzüge, Sortiervorgaben, Raumdichte) können auf Basis der Schaftkurvenmodelle auch das Rundholzaufkommen, verschiedene Sortierungen, Rindenabzüge, Biomasse- und Nährelemententzüge berechnet und/oder simulationstechnisch bestimmt werden.

Für die erste Bundeswaldinventur (BWI) wurde das Schaftkurvenmodell und –programm BDAT entwickelt (Hradetzky et al. 1986) und auch bei den Folgeinventuren eingesetzt. Dieses Modell wurde für die Baumarten Fichte (Fi), Tanne (Ta), Kiefer (Kie), Douglasie (Dgl), Lärche (Lae), Buche (Bu), Eiche (Ei) und Roteiche (REi) kalibriert. Über Zuordnungsvorschriften können in BDAT 36 Baumarten(gruppen) angesprochen werden. Für die Modellanpassung wurden vorgeglättete Sektionsdaten genutzt. Bei Laubholz wurde (unserem Verständnis der Dokumente nach, vgl. u. a. Hradetzky et al 1986, Kublin und Scharnagel, 1988) die Glättung ab dem Kronenansatz unter einer Nebenbedingung durchgeführt, so dass das gemessene Derbholzvolumen durch das Rotationsintegral bis $D = 7$ cm wiedergegeben wird.

Technisch basiert BDAT auf einem linearen, Spline-basierten „varying coefficient“ Modell:

$$D = a(H_{rel}) + b(H_{rel}) * H + c(H_{rel}) * D_{005} + d(H_{rel}) * D_{03}$$

mit den Prädiktoren relative Höhe (H_{rel}), Baumhöhe (H), Durchmesser in 5% der Baumhöhe (D_{005}) und dem Durchmesser in 30% der Baumhöhe (D_{03} , gemessen von der Baumspitze) und den variablen Parametern a , b , c und d . Jeder einzelne dieser vier Parameter wird über einen von der relativen Höhe abhängigen Spline abgebildet. Es wird klar, dass in BDAT alle Bäume auf das Einheitsintervall skaliert verarbeitet werden. In der praktischen Anwendung nutzt BDAT bei Unkenntnis des oberen Durchmessers Formigkeitstarife um eine baumspezifische Schaftkurve ableiten zu können.

Die Programmbibliothek BDAT, programmiert in Fortran, enthält neben den Schaftkurvenmodellen eine umfangreiche Funktionensammlung zur Berechnung von Durchmessern (mit/ohne Rinde), Höhen im Baum bei gegebenen Durchmessern (mit/ohne Rinde), doppeltem Rindenabzug, Volumina (Vorratsfestmaß, Erntefestmaß, Abschnittsvolumen mit/ohne Rinde) und Sortimenten (nach HKS/RVR). Daneben kann die Formigkeit bzw. Formigkeitsverteilung verschiedener Inventurzeitpunkte (BWI1, BWI2 – nur neue Bundesländer, Inventurstudie 2008, BWI3) ausgegeben werden sowie, seit der Version 3, die oberirdische Biomasse (Riedel und Kändler 2017). Das Programmpaket (verfügbar als DLL-Library und exe-Programm) wird in verschiedenen Simulationswerkzeugen (z.B. WEHAM, Holzernte) eingesetzt und ist frei verfügbar⁴. Seit Januar 2021 ist das R-Paket rBDAT auf CRAN⁵ verfügbar und stellt die BDAT-Funktionalitäten über definierte Schnittstellen für die Programmiersprache R bereit.

Mit der Entwicklung der Schaftkurvenmethodik TapeR durch Kublin et al. (2013) steht ein neuer und verbesserter, statistischer Ansatz zur Verfügung, um Schaftkurvenmodelle zu erstellen. Der Vorteil gegenüber BDAT ist

- (i) die Möglichkeit einen neuen Baum mit einer beliebigen Anzahl ($n \geq 1$) an Durchmessern in beliebiger Messhöhe kalibrieren zu können
- (ii) die Ausgabe von Konfidenzbereichen für die Durchmesser- und Volumenprognosen
- (iii) die Flexibilität, Unsicherheiten für die Durchmesser und Höhenangabe angeben zu können.

Um diese Vorteile nutzen zu können, wurden neue Schaftkurvenmodelle auf Basis von TapeR für die gleiche Baumartenauswahl und auf einer erweiterten Datenbasis angepasst. Das Vorgehen mit Datenerhebung, -aufbereitung und -analyse, Schaftkurvenmodellierung sowie Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

⁴ <https://www.fva-bw.de/daten-und-tools/tools/das-sorten-volumenprogramm-bdat>

⁵ <https://cran.r-project.org/package=rBDAT>

Material

Zur Anpassung der Schaftkurvenmodelle mit TapeR wurde eine umfangreiche Datensammlung angefertigt. Datenlieferantinnen waren neben der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA-BW) die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA), das Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE), die Technische Universität München (TUM) bzw. die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) sowie das französische Office national des forêts (ONF). Zur Plausibilisierung wurde ein Datensatz der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) genutzt (Forrester et al., 2021). Im finalen Datensatz enthalten sind auch die aus Altarchiven rekonstruierten Sektionsdaten, die zur Kalibrierung von BDAT genutzt wurden.

Die Daten wurden visuell und über Kennwerte zu Exzentrizität, Abholzigkeit und HD-Verhältnis auf Plausibilität geprüft. Des Weiteren wurden die Bhd-Höhen-Verteilung, die Altersverteilung, die maximalen Segmenthöhen im Verhältnis zur Baumhöhe inspiziert sowie die Daten auf Ausreißer kontrolliert.

Die Baumhöhe (H) als wichtiges Attribut musste für alle Bäume gemessen vorliegen, fehlende Brusthöhendurchmesser (Bhd bzw. Durchmesser in 1,3 m über Grund) wurden aus den Sektionsmessungen rekonstruiert, ebenso fehlende Kronenansatzhöhen bei Laubbaumarten. Zwar wird der Bhd für die Modellierung nicht benötigt, allerdings vereinfacht diese Information eine stratifizierte Auswertung der Ergebnisse. Die Kronenansatzhöhe wiederum wurde im Laubholz genutzt, um zwischen Krone und Stammbereich zu trennen. Die Daten beinhalten sehr kleine Bäume unterhalb der Derbholzgrenze bis hin zu sehr starken Exemplaren, die je nach Baumart 70 bis 120 cm Bhd erreichen. Bei allen Baumarten konnte der Dimensionsumfang im Vergleich zu BDAT leicht bis deutlich erweitert werden. Insbesondere bei der Baumart Buche sind nun fast doppelt so starke Bäume enthalten. Eine Übersicht über die Parameter Bhd und H gibt Tab. 1.

Tab. 1: Bhd-Höhenverteilung der akquirierten und plausibilisierten Daten für die Schaftkurvenmodellierung für die acht untersuchten Baumarten.

Baumart	n	Bhd			H		
		Minimum	Mittel	Maximum	Minimum	Mittel	Maximum
Fichte	29991	2,9	25,1	108,2	2,8	22,3	48,6
Tanne	13804	5,4	32,8	119,0	6,0	23,8	52,3
Kiefer	13596	2,4	22,8	70,5	3,4	18,9	39,5
Douglasie	12602	2,6	22,2	83,5	3,0	20,4	49,4
Lärche	10351	1,3	19,7	83,0	7,0	18,6	47,2
Buche	23611	2,8	29,2	112,7	7,0	24,0	45,0
Eiche	14103	3,2	28,7	113,6	6,4	20,6	38,4
Roteiche	5411	5,2	19,0	69,8	8,0	20,6	39,0

Methoden

Für die Entwicklung der neuen Schaftkurvenmodelle wurde die Methodik nach Kublin et al. (2013) genutzt. Diese Methodik sowie Funktionen zur Anwendung der grundlegenden Schaftkurvenfunktionen (Durchmesser- und Volumenschätzung) werden im R-Paket TapeR (Kublin und Breidenbach 2015; CRAN Version 0.3.3) bereitgestellt. Jede der acht Baumarten wird separat modelliert. Auch im Fall von

TapeR werden die Schaftmodelle auf dem Einheitsintervall $[0; 1]$ entwickelt, d.h. alle Höhenangaben (Messhöhen und Baumhöhen) wurden entsprechend mit der absoluten Baumhöhe skaliert. Im Fall der Laubhölzer wurden nur die Sektionsdaten bis zum Kronenansatz verwendet.

Das Schaftkurvenmodell von Kublin et al (2013) basiert auf einem linearen, semi-parametrischen, gemischten B-Spline Modell. Die B-Spline-Matrizen werden dabei so konstruiert, dass die Durchmesser-schätzung in Höhe H (d. h. Baumhöhe) immer Null ist. Die Durchmesserschätzung basiert folglich auf dem Modell:

$$D(H_{rel}) = f(H_{rel}) + g(H_{rel}) + \varepsilon$$

bzw.

$$D(H_{rel}) = X\beta + Z\gamma + \varepsilon$$

mit den B-Spline Designmatrizen X (fester Effekte) und Z (zufälliger Effekt), den Parametervektoren β und γ sowie dem Fehlerterm ε . Das Modell beruht damit nur noch auf dem Prädiktor H_{rel} . Zur Schätzung von $\hat{\beta}$ sind selbstverständlich die Durchmesser-messungen D aller Probestämme notwendig (mit $\Sigma = \text{cov}(D)$):

$$\hat{\beta} = (\sum_{i=1}^n X_i^T \Sigma_i^{-1} X_i)^{-1} \sum_{i=1}^n X_i^T \Sigma_i^{-1} D_i.$$

Für die Kalibrierung einer Schaftkurve für einen spezifischen (neuen) Baum anhand vorliegender Durchmesser an den Messstellen m muss der baumspezifische Zufallseffekt-Parametervektor $\hat{\gamma}$ bestimmt werden (mit $\hat{G} = \text{cov}(\gamma)$):

$$\hat{\gamma} = \hat{G} Z_m^T \hat{\Sigma}_m^{-1} (D_m - X_m \hat{\beta})$$

Dazu wird die Abweichung der vorliegenden Messdaten vom geschätzten Populationsmittelwert bestimmt und mit der geschätzten Kovarianz-Matrix \hat{G} der Zufallseffekte, der geschätzten Kovarianz-matrix $\hat{\Sigma}$ der festen Effekte sowie der Designmatrizen X und Z verrechnet. Für eine detailliertere Darstellung des Modells, der Parameterschätzungen sowie der Konstruktion der verschiedenen Kovarianz-matrizen und der darauf aufbauenden Volumenschätzungen verweisen wir auf Kublin et al. (2013).

Das Modell erlaubt in der Anwendung die Definition der Ordnung der verwendeten B-Splines (empfohlen: kubische Splines) sowie die Position der Knoten sowohl für die Designmatrix der festen als auch der zufälligen Effekte. Aus langjähriger Erfahrung der Autoren schlagen diese vor, die Knotenpunkte für X auf die Positionen (0, 0.1, 0.75 und 1) und für Z auf (0, 0.1 und 1) zu setzen. Umfangreiche Tests mit der Baumart Fichte haben diese Positionen bestätigt (eine differenzierte Darstellung findet sich in Vonderach und Kändler, 2021). Ein weiterer, zu bestimmender Funktionsparameter ist die Art der Kovarianzmatrix der Zufallseffekte. Wie in der Dokumentation des TapeR-Pakets empfohlen, wurde hier eine allgemeine, positiv-definite Matrix genutzt (*pdSymm()* aus R-Paket nlme; Pinheiro und Bates, 2021). Als Optimierer wurde aufgrund besserer Konvergenz im intern aufgerufenen nlme-Paket *optim()* anstelle *nlminb()* eingesetzt.

Die entwickelten Schaftkurvenmodelle wurden mit unabhängigen Daten validiert und auf die Bäume der Winkelzählprobe der BWI 2012 angewandt. Im ersten Fall werden die gemessenen mit den prognostizierten Sektionsmessungen und beobachtete mit geschätzten Volumina verglichen, im zweiten Fall wurden die geschätzten Volumina nach BDAT mit den geschätzten Volumina der neuen Modelle verglichen.

Ergebnisse und Diskussion

Die erzeugten Modelle sind lineare, gemischte Modelle mit B-Spline-Designmatrix. Es wird hier darauf verzichtet Modelloutput oder (nicht interpretierbare) Parameterschätzungen zu diskutieren. Stattdessen wird im ersten Schritt auf die Vorhersagegüte mit den Kenngrößen RMSE und BIAS fokussiert (vgl. Tab. 2) und im zweiten Schritt ein Vergleich zu BDAT im Kontext der BWI-Winkelzählprobe gezogen.

Tab. 2: RMSE und BIAS der Durchmesserschätzungen (in cm) der neu entwickelten Modelle.

	Fi	Ta	Kie	Dgl	Lae	Bu	Ei	REi
RMSE	0.3938	0.5709	0.4643	0.3970	0.3690	0.4675	0.4975	0.3348
BIAS	0.0018	-0.0004	-0.0011	0.0011	-0.0001	0.0010	0.0009	0.0004

Die Durchmesserschätzungen weisen im Mittel eine hohe Präzision auf, der BIAS liegt für alle Baumarten unter 0,01 cm. Die Reststreuung (RMSE) für alle Baumarten liegt unter 0,5 cm (Ausnahme Ta: 0,57 cm).

Die Validierung der Modelle mit unabhängigen Daten wurde unter zwei Szenarien durchgeführt: (i) Kalibrierung der baumindividuellen Schaftkurve mit Bhd und H sowie (ii) Kalibrierung der baumindividuellen Schaftkurve mit Bhd, D03 (Durchmesser in 30% der Baumhöhe) und H. In beiden Fällen wurde zu Vergleichszwecken eine Kalibrierung mit BDAT durchgeführt (BDAT unterstellt dabei immer eine bestimmte Formigkeit, hier die BWI 1987-Formigkeit). Der Vergleich zu BDAT auf Basis der BWI 2012-Daten wurde direkt auf Basis der Messdaten Bhd, D03 und H durchgeführt.

Die Kalibrierung mit unabhängigen Daten und Analyse nach Lage im Schaft zeigt insgesamt wenig Abweichung zu BDAT. Im Fall der Kalibrierung der Fichtendaten mit Bhd und H zeigen sich für BDAT eine leichte Unterschätzung in der unteren Schafthälfte (die vermutlich auf die angenommene BWI 1987-Formigkeit zurückgeht, die sich von der Formigkeit der Probestämme unterscheidet). Dies ist für die neuen Schaftkurvenmodelle nicht feststellbar. Allerdings zeigt sich ein größerer Unterschied zwischen einer Kalibrierung mit Bhd und H und einer Kalibrierung mit Bhd, D03 und H. Hier zeigen sowohl die neuen Modelle als auch BDAT eine verbesserte Anpassung, insbesondere im unteren Schaftteil (erklärbar durch die zusätzliche Information des D03). Während die neuen Schaftkurvenmodelle auch in diesem Fall über den gesamten Schaftbereich nur geringe mittlere Abweichungen aufweisen, zeigt sich in BDAT eine leichte Überschätzung der gemessenen Durchmesser (vgl. Abb. 1). Der Effekt der Berücksichtigung eines oberen Durchmessers (hier D03) zeigt insbesondere eine deutlich verbesserte Volumenschätzung, gerade bei Bäumen mit Bhd > 50cm (ohne D03 wird das Derbholzvolumen zunehmend überschätzt).

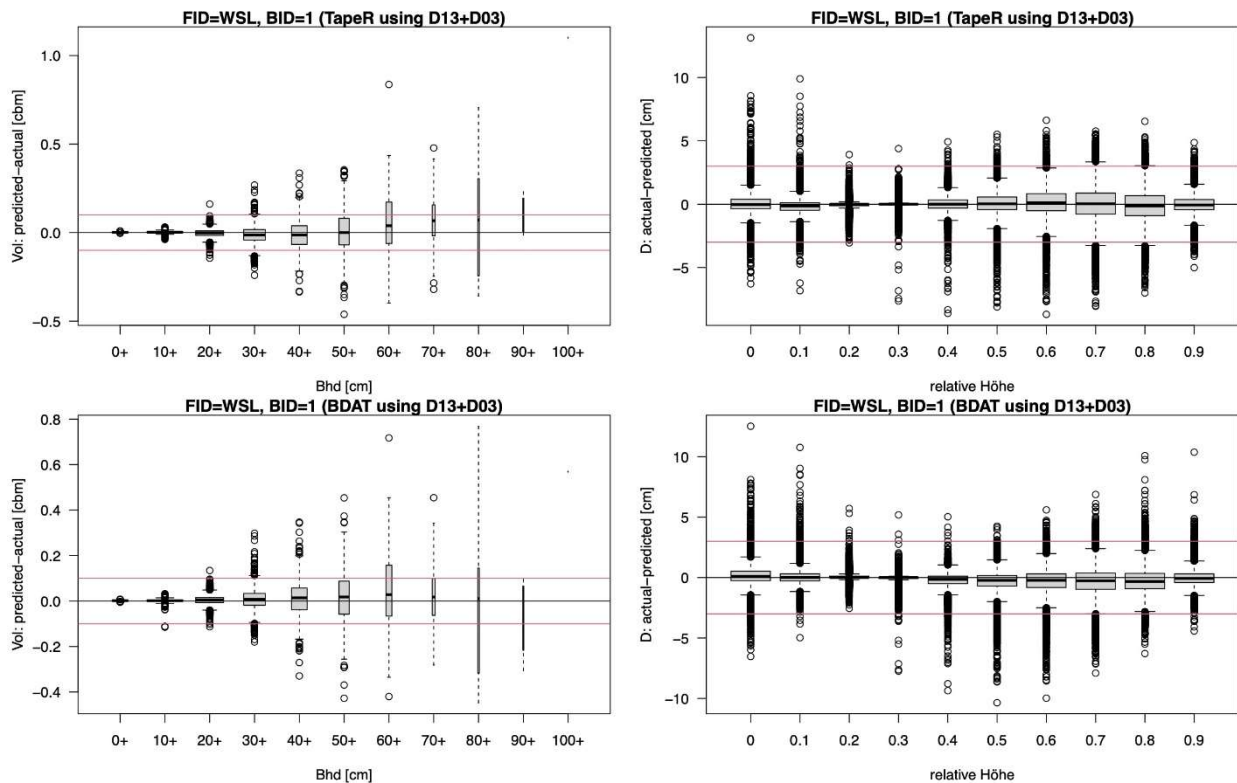


Abb. 1: Validierungsergebnisse für Fichte. Oben: Volumenschätzung (links) und Durchmesserschätzung entlang der relativen Lage im Schaft (rechts) mit neuem Schaftkurvenmodell unter Verwendung von Bhd (hier D13 bezeichnet), D03 und H. Unten: Kennwerte wie oben, berechnet mit dem BDAT-Schaftkurvenmodell.

Die Ergebnisse für die anderen Baumarten sind qualitativ vergleichbar, unterscheiden sich aber in Details von denen der Fichte. Im Folgenden wird die Kalibrierung mit Bhd, D03 und H dargestellt. Bei der Tanne muss konstatiert werden, dass BDAT die Durchmesser im oberen Schaftbereich überschätzt. Die neuen Modelle sind hier fast erwartungstreu und zeigen auch bei extremen Abweichungen geringere absolute Fehler. Dementsprechend zeigen sich auch deutlich bessere Volumenschätzungen, insbesondere im Starkholzbereich. Bei Kiefer unterscheiden sich die Ergebnisse zu BDAT nur geringfügig. Eine leichte Unterschätzung der Durchmesser im obersten Schaftbereich ist feststellbar. Die Ergebnisse für Douglasie zeigen deutlich stabilere Durchmesserschätzungen entlang der Stammachse im Vergleich zu BDAT. Leichte Unterschätzungen treten auch hier auf. Aussagen zur Volumenschätzung im Starkholzbereich sind schwierig, da nur wenige Beobachtungen vorliegen. Das neue Lärchenmodell zeigt ähnliche Ergebnisse wie BDAT mit einer sehr guten Durchmesserprognose entlang der Schaftachse. Allerdings werden stärkere Bäume leicht überschätzt, wobei auch hier eher wenige Beobachtungen vorliegen.

Bei den Laubhölzern (Buche und Eiche; Roteiche ohne Validierungsdaten) kann eine Interpretation der Durchmesserschätzung nur bis zur Kronenansatzhöhe erfolgen, da oberhalb die Durchmesser der Schaftkurven nicht mehr als Durchmesser-Höhen-Relation interpretiert werden können. Im Bereich bis ca. 50 % der Baumhöhe sind die Durchmesserschätzungen im Mittel erwartungstreu und zeigen wenig Abweichung von den Messdaten. Die Volumenschätzungen liegen für Buche bei ca. 30 cm leicht mit steigender Tendenz über dem gemessenen 2 m-Sektionsvolumen (ca. +1 m³ für Bhd 80 cm). BDAT

zeigt allerdings bei starken Dimensionen, mit ebenfalls wenigen beobachteten Exemplaren, eine noch stärkere Überschätzung. Das gleiche Ergebnis kann auch für die Eichen-Modelle festgehalten werden.

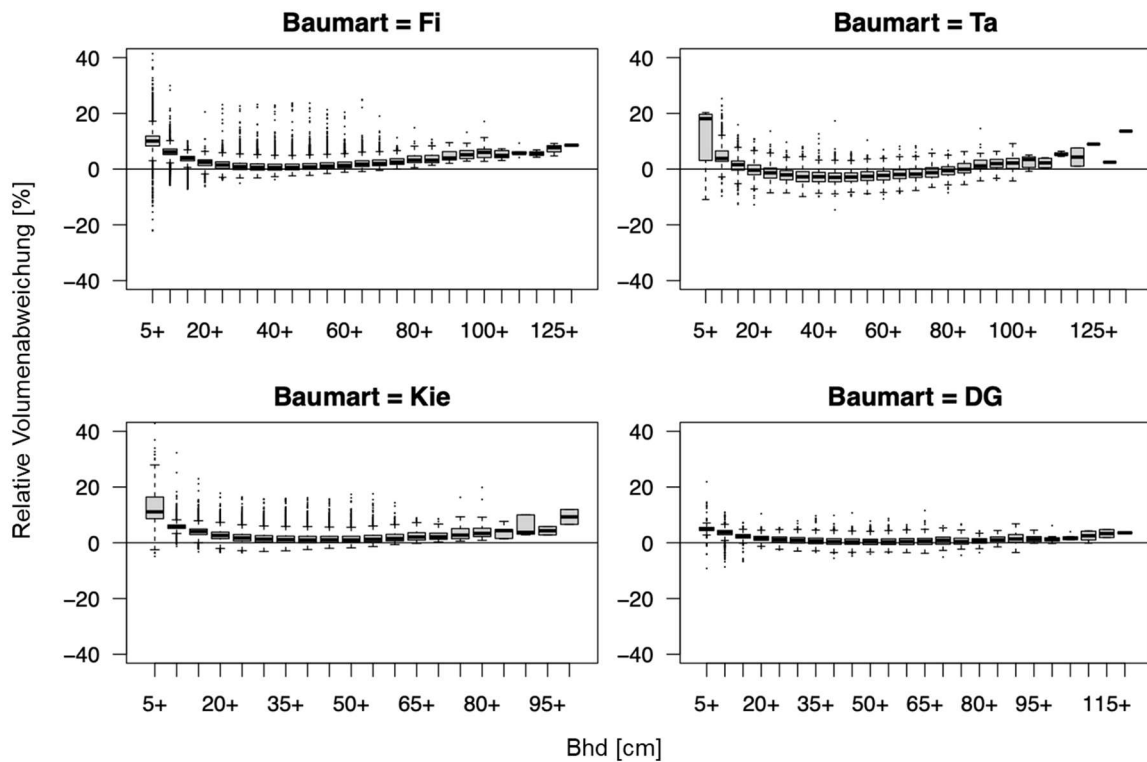


Abb. 2: Vergleich der Derbholz-Volumenschätzung zwischen BDAT und den neuen TapeR-Modellen, hier für Fichte (links oben), Tanne, (rechts oben), Kiefer (links unten) und Douglasie (rechts unten). Auf der Abszisse ist die Dimension der Bäume in 5 cm-Bhd-Klassen abgebildet, auf der Ordinate ist die prozentuale Abweichung zwischen den neuen Schaftkurvenmodellen und BDAT angegeben.

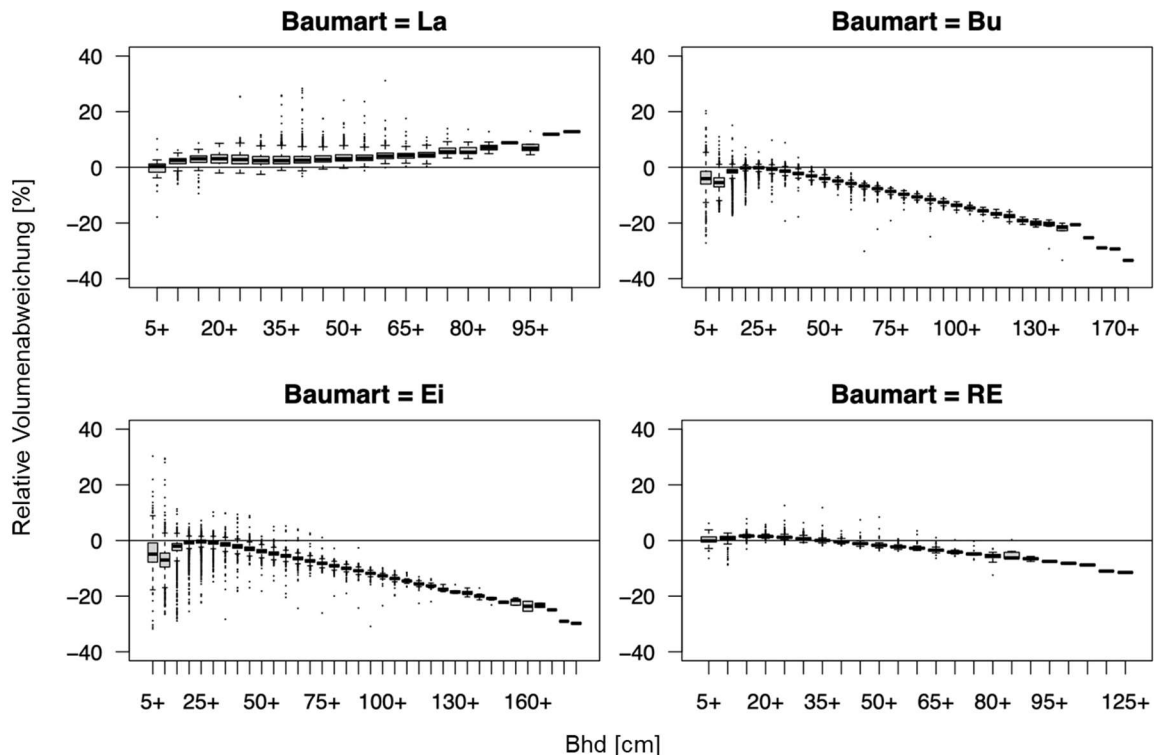


Abb 3: Vergleich der Derbholz-Volumenschätzung zwischen BDAT und den neuen TapeR-Modellen, hier für Lärche (links oben), Buche, (rechts oben), Eiche (links unten) und Roteiche (rechts unten). Auf der Abszisse ist die Dimension der Bäume in 5 cm-Bhd-Klassen abgebildet, auf der Ordinate ist die prozentuale Abweichung zwischen den neuen Schaftkurvenmodellen und BDAT angegeben.

Ein direkter Vergleich der Derbholz-Volumenschätzung zwischen BDAT und den neuen Schaftkurvenmodellen wurde auf Basis der BWI 2012-Winkelzählprobe durchgeführt. Damit werden relevante Unterschiede zwischen beiden Modellansätzen sichtbar. Für Fichte und Kiefer zeigt sich dabei eine leicht höhere Schätzung der Derbholzvolumina durch die neuen Modelle im Vergleich zu BDAT. Im mittleren Bhd-Bereich (ca. 25 bis 60 cm) beträgt die Differenz nur wenige Prozentpunkte. Bei geringeren bzw. stärkeren Dimensionen steigt der Unterschied auf bis zu 10 % (Bäume mit Dimension kleiner 10 cm Bhd werden in BDAT durch Volumentafeln abgebildet und können also nicht direkt verglichen werden). Das gleiche Ergebnis kann auch für Douglasie festgehalten werden, wobei im mittleren Bhd-Bereich die Schätzungen kaum Differenzen aufweisen und die maximale mittlere Überschätzung im Vergleich zu BDAT nur ca. 5 % erreicht. Bei Tanne ist das qualitative Bild ebenfalls ähnlich, allerdings unterschätzen die TapeR-Modelle das BDAT Volumen im mittleren Bhd-Bereich um bis zu ca. 5 %; sehr starke bzw. schwache Dimensionen werden aber auch hier höher geschätzt (vgl. Abb. 2 für eine graphische Aufbereitung).

Im Fall der Baumart Lärche zeigt sich ab 10 cm Bhd eine mittlere Überschätzung im Vergleich zu BDAT von bis 5 %. Für stärkere Dimensionen ab ca. 70 cm Bhd steigt die Differenz auf fast 15 %. Bei den Laubhölzern zeigt sich demgegenüber ein gänzlich anderes Bild. Für Dimensionen bis ca. 20 cm Bhd bleiben die TapeR-Schätzungen für Buche und Eiche hinter den BDAT-Schätzungen zurück. Im folgenden Bereich bis ca. 35 cm liegen die Schätzungen sehr nahe beisammen. Für stärkere Dimensionen gilt: je größer der Bhd, desto größer die Differenz zwischen TapeR und BDAT. Bei starken (aber selten auftretenden) Dimensionen von bis zu 150 cm Bhd unterschätzt TapeR um bis zu 20 % im Vergleich zu BDAT. Größere Dimensionen steigern diesen Unterschied noch. Bei der Baumart Roteiche zeigt sich

das gleiche strukturelle Bild, allerdings tritt eine leichte Überschätzung um wenige Prozentpunkte im mittleren Bhd-Bereich auf, gefolgt von einer auch hier kontinuierlich ansteigenden Unterschätzung des Volumens im Vergleich zu BDAT.

Eine Einordnung der hochgerechneten, summarischen Volumenschätzung mit den neuen TapeR-basierten Schaftkurvenmodellen im Vergleich zur bisherigen Referenz BDAT wird in Tab. 3 gegeben. Dazu wurde – im Gegensatz zur Datengrundlage der Abb. 2 und Abb 3 – eine Hochrechnung der geschätzten Baumvolumina auf die gesamte Waldfläche vorgenommen. Demzufolge werden die einzelnen bei der Winkelzählprobe erfassten Probestämme mit ihrer Häufigkeit (N_{ha}) und einem Flächenrepräsentationsfaktor (RFaktor) multipliziert. Das gezeichnete Bild aus der Einzelbaumbetrachtung (Abb. 2 und Abb 3) wird durch die summarische, nach Durchmesserklassen differenzierte Betrachtung bestätigt. Die mittlere Abweichung über alle Baumdimensionen zwischen den neuen Schaftkurvenmodellen von der BDAT-Schätzung liegt für die einzelnen Baumarten zwischen -4,4 % und +1,1 %. Die größten Unterschiede treten bei den Laubhölzern und Tanne auf, die Baumarten Fichte, Kiefer, Douglasie und Lärche liegen im Mittel über alle Dimensionen sehr nah an den Schätzungen durch BDAT. Größte Abweichungen treten bei den starken bis sehr starken Dimensionen auf. Mögliche Ursachen der Differenzen der beiden Modelle werden im folgenden Abschnitt erörtert und diskutiert.

Tab. 3: Prozentuale Abweichung der Volumenschätzung zwischen TapeR vs. BDAT auf der Winkelzählprobe der BWI 2012, hochgerechnet auf die Gesamtfläche Deutschlands. Positive Werte bedeuten höhere Schätzungen durch TapeR im Vergleich zu BDAT, negative Werte eine geringere Schätzung. Aggregationen sind differenziert nach Bhd-Bereiche dargestellt.

Bhd	Fi	Kie	Ta	Dgl	Lae	Bu	Ei	REi
10 – 19	1,7	0,2	7,1	2,0	1,2	-1,9	-2,7	0,7
20 – 29	0,0	-0,1	-0,8	0,4	0,8	-0,2	-0,7	0,2
30 – 39	-0,4	-0,3	-3,5	-0,1	0,7	-1,4	-1,8	-0,6
40 – 49	-0,3	0,0	-4,2	-0,4	1,1	-3,1	-3,5	-1,9
50 – 59	0,2	0,4	-4,2	-0,5	1,7	-4,9	-5,2	-2,9
60 – 69	0,8	1,2	-3,5	-0,4	2,5	-6,7	-6,9	-4,1
70 – 79	1,6	1,8	-2,8	-0,1	3,6	-8,6	-8,7	-4,6
80 – 89	2,6	3,7	-1,2	0,1	4,5	-10,5	-10,4	-5,9
90 – 99	4,2	5,5	0,9	1,3	6,2	-12,4	-12,2	-8,0
100 – 149	4,9	10,1	2,4	1,5	10,4	-16,0	-15,7	-9,1
150+			16,6			-27,2	-25,1	
10 – 79	0,1	-0,1	-2,9	0,0	1,1	-3,3	-3,9	-1,1
10 – 150+	0,1	-0,1	-2,8	0,0	1,1	-3,6	-4,4	-1,2

Die Voluminierung der Einzelbäume wird über die aus den Schaftkurven abgeleiteten Durchmesser für 2 m-Sektionen realisiert. Größte Volumenabweichungen treten bei sehr starken Bäumen auf. Ein Vergleich der Fichten-Schaftkurven für sehr starke, im Extrapolationsbereich liegende Bäume zeigt, dass bei BDAT die vorgegebene Höhe (z. B. 40 m) nicht erreicht wird, da die Durchmesserschätzung ab ca. 37 m Null wird. Gleichzeitig zeigt sich zwischen $D_{1.3}$ und $D_{0.3}$ eine etwas schlankere Form als bei den neuen Schaftkurvenmodellen. Demzufolge liegt die Volumenschätzung etwas niedriger. Dieser Effekt fällt umso stärker aus, je größer der betrachtete Baum ist; gleiches gilt auch für Douglasie und Lärche. Für Kiefer und Tanne kommt es nicht zu einer de-facto Reduzierung der Baumhöhe (aufgrund einer Durchmesserschätzung von Null). Bei der Tanne zeigt BDAT insgesamt eine höhere Vollformigkeit im Stammfußbereich als auch im oberen Schaftbereich, bei der Kiefer sind die Abweichungen insgesamt gering, eine größere Schlankheit im oberen Schaftbereich trifft auch hier zu. Bei den Laubhölzern, insbesondere bei Buche und Eiche, zeigt BDAT bei Dimensionen ab ca. 50 cm eine höher Formigkeit in der oberen Stammhälfte. Mit zunehmender Dimension vergrößert sich die Durchmesserdivergenz bis hin zu einer Aufwölbung der Schaftkurve. Es ist klar, dass in diesem Bereich der Schaftkurve a) keine Durchmesser mehr abgeleitet werden können und b) die Konstruktion der Schaftkurve darauf ausgelegt ist, das Gesamtderbholz als Rotationsintegral der Schaftkurve bis $D=7$ cm zu modellieren. Durch die Aufwölbung, die bei den neuen Schaftkurven nicht auftritt, entsteht natürlich auch eine zunehmende Divergenz der geschätzten Volumina. Der Effekt der Aufwölbung ist bei Roteiche nicht ganz so stark ausgeprägt. Hier entsteht bei starken Dimensionen eine eher sehr vollformige Schaftkurve, ohne ansteigende Durchmesser. Die Divergenz zwischen den Volumina ist demnach deutlich geringer.

Sondersituation Laubholz

Durch die Auswahl der Sektionsmessungen für die Ableitung der TapeR-Schaftkurvenmodelle im Laubholz („nur bis Kronenansatz“) wird bei den neuen Schaftkurvenmodellen letztendlich eine Art Hauptachsen-Schaftkurve erzeugt, da im oberen Schaftbereich nur Probestämme ohne dezidierten Kronenansatz vertreten sind (vgl. Einleitung für die genutzte Methodik bei BDAT). Es stellt sich die Frage, ob damit das Derbholz vollständig abgebildet werden kann, oder die im Vergleich zu BDAT beobachtete Unterschätzung plausibel ist. Dazu wurden mit Derbholz-Biomassefunktionen (vgl. Vonderach et al

2018, allometrisches Modell, und Riedel und Kändler 2017, Marklund-Modell mit linearisiertem Biomasseanstieg im Starkholzbereich) und den geschätzten Volumina (BDAT- und TapeR-Modelle) für exemplarische Bäume mit steigender Dimension die spezifische Raumdichte [kg / m^3] ermittelt. Zwar kann damit nicht definitiv festgestellt werden, welches der Modelle „richtig“ und welches „falsch“ ist, aber Hinweise zur Interpretation können abgeleitet werden. Beim Nadelholz zeigt sich für alle fünf betrachteten Nadelholzbaumarten ab einem Bhd von ca. 20 cm eine relativ stabile und plausible Raumdichte über den betrachteten Durchmesserbereich, sofern die allometrischen Funktionen mit TapeR kombiniert werden. Im weitesten Sinne gilt das auch bei Einsatz von BDAT, allerdings zeigt sich hier mehr Variation. Für die Laubhölzer zeigt sich bei Einsatz der allometrischen Funktionen und den TapeR-Modellen demgegenüber ein deutlicher, kontinuierlicher Anstieg der spezifischen Raumdichte, d. h. entweder zu hohes Gewicht für gegebenes Volumen oder zu wenig Volumen für gegebenes Gewicht. Die Kombination der allometrischen Modelle mit BDAT führen dagegen zu deutlich konstanteren Verhältnissen zwischen Biomasse und Volumen. Dies deutet darauf hin – bei Annahme plausibler Biomasseschätzungen – dass die TapeR-Schaftkurven das Derbholzvolumen insbesondere bei starken Bäumen unterschätzen, die Volumenschätzung durch BDAT besser zur Biomasseschätzung passt. Tatsächlich kann auch der Fall vorliegen, dass sowohl Biomasse als auch Volumenschätzung in gleichem Maße verzerrt sind, die abgeleitete Raumdichte dennoch plausibel erscheint. Aufgrund des Mangels an beobachteten Daten im Starkholzbereich kann eine definitive Einordnung nicht erfolgen.

Versuche, das vermutlich fehlende Astderbholz modellbasiert zu ergänzen, konnten bisher (noch) nicht zufriedenstellend zu Ende geführt werden. Zwar liegen differenziert erfasste Probestämme vor, doch auch hier sind sehr starke Bäume mit Bhd > 80 cm nicht vorhanden. Aktuelle Arbeiten zielen darauf ab, das Gesamtderbholz als Integral der Schaftkurve darzustellen (vgl. BDAT). Erste Zwischenergebnisse deuten darauf hin, dass eine Aufwölbung der Schaftkurve im Kontext der Volumenallokation entlang der Schaftachse durchaus auftreten kann und nicht nur ein Modellartefakt im Extrapolationsbereich von BDAT ist. Die Ableitung von im Extrapolationsbereich stabilen Schaftkurven mit TapeR ist in Arbeit.

Monotonie der Schaftkurven

Schaftkurven sind Funktionen mit der gewünschten Eigenschaft, zumindest für Nadelholz, monoton zu fallen. Dies bedeutet, dass Durchmesserschätzungen entlang des Schaftes zur Baumspitze kontinuierlich abnehmen. Durch die Konstruktion der Splinebasis ist sichergestellt, dass eine Durchmesserschätzung von Null an der Baumspitze gegeben ist. Am Stammfuß gibt es bisher keine konstruktiven oder einschränkende Nebenbedingungen die eine monoton fallende Kurve erzwingen. Bei der Kalibrierung eines neuen Baumes werden vielmehr die Kovarianzmatrizen der geschätzten Parameter ausgewertet. In Extrembereichen (sehr kleine, sehr voll- bzw. abformige Bäume) kann es zu nicht-monoton fallenden Kurvenverläufen im Stammfuß bzw. mittleren Schaftbereich kommen. Während im letzteren Fall nur minimalste Durchmesseranstiege bei extrem vollformigen Fichten ($q_{03} > 0.9$, Datensatz BWI 2012) auftreten, die praktisch keinen Einfluss auf die Durchmesser- und Volumenschätzung haben, ist der erste Fall schwieriger zu behandeln. Der Durchmesseranstieg im Stammfußbereich kann beträchtlich sein und gerade bei kleinen Bäumen zu einer signifikanten Durchmesserdifférenz führen, die auch Auswirkung auf die Voluminierung und Sortierung hat. Betroffen ist insbesondere die Baumart Tanne, aber auch Kiefer, Lärche, Buche und Eiche. Tatsächlich treten solche Effekte auch bei BDAT auf. Dort wird mit einer Linearisierung des unteren Durchmessers darauf reagiert. Auf TapeR ist dies nicht übertragbar, da es keinen festen unteren Durchmesser gibt (Messhöhe der Durchmesser frei wählbar). Würde

das Maximum der geschätzten Durchmesser entlang der Schaftkurve linearisiert, muss einerseits eine aufwändige Suche innerhalb der Schaftkurve (wiederholt) stattfinden und andererseits kann dies dazu führen, dass ein sehr langes Linearisierungsintervall auftritt.

Zur Lösung dieses (zum Vortragszeitpunkt ungelösten) Problems wird nun für nicht-monotone Schaftkurven eine zusätzliche Stützstelle (Durchmessermessung) bei der Kalibrierung ergänzt. Diese Stützstelle wird aus dem Verhältnis von D001 (Durchmesser in 1 % der Baumhöhe) und D1.3 aus dem Populationsmittelwert und dem ermittelten Bhd bestimmt. Sie liegt damit in 1 % der Baumhöhe und erzwingt einen monoton fallenden Schaftkurvenverlauf. Der Quotient ($\frac{D_{001}}{D_{1.3}}$), der direkt nach der Modelanpassung im Schaftkurvenobjekt abgelegt wird, beträgt je nach Baumart zwischen 1,1287 und 1,2297. Damit wird für alle Baumarten ein monoton fallender Schaftanlauf sichergestellt.

R-Paket *TapeS*

Die neuen Schaftkurvenmodelle inkl. Auswertefunktionen wurden für eine einfache Verwendung in eine Funktionensammlung für die Programmiersprache R gepackt. In diesem R-Paket sind alle notwendigen Funktionen zur Evaluierung der Schaftkurven für das gleiche Baumartenspektrum wie in BDAT hinterlegt. Es können äquivalent Durchmesser (mit/ohne Rinde), Höhen von gegebenen Durchmesser (mit/ohne Rinde), verschieden definierte Volumina (Vfm, Efm, Abschnittsvolumen mit/ohne Rinde), Rindenabzug, Biomasse und Sortimente berechnet werden. Auch die BWI-Biomassefunktionen sowie eine Biomassekompartimentierung nach Vonderach et al. (2018) sind hinterlegt. Es gibt Funktionen um BDAT-Datensätze (definiert durch Baumart, D1, D2, H1, H2 und H, vgl. R-Paket rBDAT), Inventur- und Sektionsdaten direkt für die neuen Schaftfunktionen aufzubereiten. Das R-Paket liefert neben dem Erwartungswert zusätzlich Konfidenzbereiche für die Durchmesser und Volumenfunktionen. Das R-Paket *TapeS* ist als Entwicklungsversion verfügbar unter <https://gitlab.com/vochr/tapes>.

Schlussfolgerungen

Mit dieser Arbeit wurde die Entwicklung neuer Schaftkurvenmodelle für die häufigsten Baumarten Deutschlands dargelegt. Dazu wurde die durch Kublin et al. (2013) erarbeitete Methodik und das R-Paket „TapeR“ genutzt. Mit den Modellen können nun für neue Bäume mit Durchmessermessungen an beliebiger Stelle und in beliebiger Anzahl baumspezifische Schaftkurven kalibriert werden. Zusätzlich erlaubt die Methodik die Ableitung von Konfidenzintervallen.

Die vorgestellten Schaftkurvenmodelle für Nadelholz zeigen eine gute Performance und erscheinen stabiler im Kurvenverlauf entlang der Schaftachse als BDAT, insbesondere im Extrapolationsbereich. Sie liefern im summarischen Mittel über die BWI 2012 praktisch identische Vorhersagen wie BDAT (Ausnahme Tanne mit einer leichten Unterschätzung). Die Schaftkurvenmodelle für Laubholzbaumarten scheinen das Derbholzvolumen im Vergleich zu BDAT zu unterschätzen. Es wurde eine mittlere Unterschätzung des Derbholzvolumens (vs. BDAT) über alle Bäume der BWI-Winkelzählprobe für Buche und Eiche von 3,6 bzw. 4,4 % festgestellt. Sehr große und mit der Dimension zunehmende Differenzen treten dabei im Starkholzbereich auf. Dabei ist nach wie vor der Zusammenhang zwischen Volumen und Dimension für Bäume im extrem starken Bereich jenseits von 100 cm Bhd unklar, da keine Beobachtungsdaten vorliegen. Bisherige Versuche, eine Astderbholzergänzung durchzuführen, haben noch nicht zum Erfolg geführt und müssen weiterverfolgt werden, idealerweise mit zusätzlichen Erhebungen im Starkholzbereich. Auch wenn diese Bäume derzeit noch eher selten auftreten, so werden diese

Bäume aber immer (häufiger) älter und dicker und damit wird dieses Problem in der Zukunft relevanter. In dieser Hinsicht besteht eine große Kenntnislücke für die im Ökosystem oftmals wichtigen alten und starken Bäume.

Die neuen Modelle und dazugehörige Funktionen sind in Form eines R-Pakets verfügbar.

Danksagung

Ein herzliches Dankeschön geht an die datenbereitstellenden Personen und Institutionen, namentlich, Susanne Sprauer von der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA), Annett Degenhardt vom Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE), Michael Heym von der Technischen Universität München (TUM) bzw. der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Christine Deleuze und Jean-Pierre Renaud vom Office national des forêts (ONF) sowie Elke Lenk und Pensionär Bernhard Bösch von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. Der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), namentlich Andreas Zingg (Pensionär) und David Forrester, sei gedankt für die Bereitstellung und Nutzungsmöglichkeit von Sektionsdaten für die Validierung der Modelle.

Literatur

- David, I. F., S. Hubert and N. Jens (2021). The Experimental Forest Management network, EnviDat. <https://www.envidat.ch/dataset/the-experimental-forest-management-network>
- Hradetzky, J., E. Kublin, G. Scharnagl and W. Schöpfer (1986). "Volumen- und Sortenermittlung bei der Bundeswaldinventur (BWI)." AFZ 41(32): 804-807.
- Kublin, E. und G. Scharnagl (1988). Verfahrens- und Programmbeschreibung zum BWI-Unterprogramm BDAT. Abschlußbericht zum Forschungsauftrag: Biometrische Lösungen für die Berechnung des Volumens, der Sortierung, der Rindenabzüge und der Ernteverluste im Rahmen der Bundeswaldinventur. Freiburg i.Br., FVA-BW.
- Kublin, E. und Breidenbach, J. (2015). TapeR: Flexible tree taper curves based on Semiparametric Mixed Models. R-Paket Version 0.3.3., <https://CRAN.R-project.org/package=TapeR>
- Kublin, E., J. Breidenbach and G. Kaendler (2013). "A flexible stem taper and volume prediction method based on mixed-effects B-spline regression." European Journal of forest research 132(5-6): 983-997.
- Pinheiro, J., D. Bates, S. DebRoy, D. Sarkar, R Core Team (2021). nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-152, <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>
- Riedel, T. and G. Kaendler (2017). "Nationale Treibhausgasberichterstattung: Neue Funktionen zur Schätzung der oberirdischen Biomasse am Einzelbaum." Forstarchiv 88(2): 31-38.
- Vonderach, C., G. Kändler and C. F. Dormann (2018). "Consistent set of additive biomass functions for eight tree species in Germany fit by nonlinear seemingly unrelated regression." Annals of Forest Science 75(2): 49.
- Vonderach, C., Kändler, G. (2021). Neuentwicklung von Schaftkurven- und Biomassemodellen für die Bundeswaldinventur auf Basis des TapeR-Pakets. Abschlussbericht zum Projekt BWI-TapeR im Auftrag des Thünen-Instituts für Waldökosysteme. Laufzeit: 01.12.2019 bis 30.11.2020. 150 Seiten. Unveröffentlicht, kann vom Autor angefordert werden.