

MODELÝ PRO VÝPOČET NADZEMNÍ BIOMASY DOUGLASKY TISOLISTÉ V ČESKÉ REPUBLICE



Ing. MONIKA VEJPUSTKOVÁ, Ph.D

Ing. TOMÁŠ ČIHÁK, Ph.D



3/2019

Modely pro výpočet nadzemní biomasy douglasky tisolisté v České republice

Certifikovaná metodika

Ing. Monika Vejpustková, Ph.D

Ing. Tomáš Čihák, Ph.D

Strnady 2019

Lesnický průvodce 3/2019

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i.

Strnady 136, 252 02 Jíloviště

www.vulhm.cz

Publikace vydané v řadě Lesnický průvodce jsou dostupné v elektronické verzi na:

http://www.vulhm.cz/lesnicky_pruvodce

Vedoucí redaktor: Ing. Jan Řezáč; e-mail: rezac@vulhm.cz

Výkonná redaktorka: Miroslava Valentová; e-mail: valentova@vulhmop.cz

Grafická úprava a zlom: Klára Šimerová; e-mail: simerova@vulhm.cz

ISBN 978-80-7417-192-5

ISSN 0862-7657

MODELS FOR ESTIMATING ABOVEGROUND BIOMASS OF DOUGLAS FIR IN THE CZECH REPUBLIC

Abstract

Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) is an important introduced tree species in Europe. This tree's value in the coming years is likely to increase further. Due to fast growth and high biomass production, Douglas fir can play an important role in carbon sequestration in the future. Accurate quantification of biomass and captured carbon requires the existence of local allometric models. Such equations have not yet been parameterised in the Czech Republic. All studies published so far come from abroad, whether from North America or Western European countries (e.g. Germany, the Netherlands). The aim of the presented methodology is to provide relevant models for the calculation of Douglas fir biomass parameterised on data from the Czech Republic. The models enable estimation of total aboveground biomass and its basic components - stem, crown, branches and foliage. The derived functions are based on dataset of 33 Douglas fir trees representing a wide range of tree dimensions (diameter at breast height 6.6–66.4 cm; tree height 8.1–44 m) and site conditions (11 stands at 4 different localities). The same data set was further used to verify the applicability of published foreign models in the conditions of the Czech Republic.

Key words: allometry; biomass models; *Pseudotsuga menziesii*; nonlinear regression

Oponenti: prof. Ing. Vilém Podrázský, Ph.D. (FLD ČZU v Praze)
Ing. Miloš Kučera, Ph.D. (UHÚL Brandýs nad Labem)

Adresa autorů:

Ing. Monika Vejpustková, Ph.D

Ing. Tomáš Čihák, Ph.D

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i.

Strnady 136

252 02 Jíloviště

e-mail: vejpustkova@vulhm.cz

cihak@vulhm.cz

Autoři fotografií:

Ing. Monika Vejpustková, Ph.D.

Ing. Radek Novotný, Ph.D.

Obsah

1 ÚVOD	7
2 CÍLE METODIKY	8
3 VLASTNÍ POPIS METODIKY	9
3.1 Zahraniční modely pro výpočet nadzemní biomasy douglasky tisolisté	9
3.1.1 Přehled publikovaných modelů	9
3.1.2 Ověření publikovaných modelů na nezávislém souboru empirických dat z území ČR	20
3.2 Regresní modely pro výpočet nadzemní biomasy douglasky tisolisté parametrizované na datech z území ČR	25
4 SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ	30
5 POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY	30
6 EKONOMICKÉ ASPEKTY	31
7 DEDIKACE	31
8 LITERATURA	32
8.1 Seznam použité související literatury	32
8.2 Seznam publikací, které předcházely metodice	35
SUMMARY	37
PŘÍLOHA	39

1 ÚVOD

Douglaska tisolistá (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) je důležitou introdukovanou dřevinou v lesním hospodářství ČR. V současnosti je evidováno cca 5600 ha douglasky, což je 0,22 % porostní plochy (VAŠÍČEK 2014). V souvislosti s chřadnutím smrku v nižších a středních polohách (ŠRÁMEK et al. 2015) lze očekávat, že její podíl bude v následujících letech stoupat (KUBEČEK et al. 2014). Předurčuje ji k tomu její vyšší odolnost vůči suchu (EILMANN, RIGLING 2012; NADEZHDINA et al. 2014), prokázané meliorační účinky (MENŠÍK et al. 2009; PODRÁZSKÝ et al. 2014) i vysoký produkční potenciál (VINŠ, ŠIKA 1981; KANTOR 2008; KANTOR, MAREŠ 2009; PODRÁZSKÝ et al. 2013). Díky rychlému růstu a vysoké produktivitě může douglaska v budoucnu hrát významnou roli při sekvestraci uhlíku.

Poutání CO₂ dává nový rozměr i studiu biomasy. Spolehlivá kvantifikace biomasy lesních dřevin a v ní vázaného uhlíku je požadována pro účely tzv. národních inventur skleníkových plynů (IPCC 2006; KRŤKOVÁ 2018). Stanovením biomasy douglasky na území ČR se zabývali MARTINÍK a KANTOR (2006). Ve své práci se zaměřili na určení biomasy jednotlivých vzorníků a analýzu chemismu biomasy ve vztahu k případnému vlivu douglasky na půdu. Alometrické modely pro výpočet nadzemní biomasy douglasky nebyly v ČR zatím parametrizovány. Všechny doposud publikované práce pochází ze zahraničí, ať již ze Severní Ameriky (GRIER, LOGAN 1977; GHOLZ et al. 1979; STANDISH et al. 1985; FELLER 1992; HARRISON et al. 2009; POUDEL, TEMESGEN 2016; POUDEL et al. 2019), či ze západoevropských zemí (BARTELINK 1996; NORD-LARSEN, NIELSEN 2015; FORRESTER et al. 2017; VONDERACH et al. 2018).

V rámci projektu NAZV QJ1520299 „Uplatnění douglasky tisolisté v lesním hospodářství ČR“ byla ve Výzkumném ústavu lesního hospodářství a myslivosti (VÚLHM) podrobně analyzována biomasa 33 vzorníků douglasky. Shromážděná data reprezentují široké rozpětí dendrometrických charakteristik (výčetní tloušťka 6,6–66,4 cm; výška 8,1–44 m) a stanovištních podmínek (11 porostů ze 4 oblastí; nadmořská výška 255–670 m n.m.). Tento datový soubor umožnil parametrizaci modelů pro výpočet nadzemní biomasy douglasky tisolisté v České republice. Kromě toho byla na tomto nezávislém souboru dat ověřena použitelnost publikovaných zahraničních modelů v podmínkách ČR.

2 CÍLE METODIKY

Předkládaná metodika má za cíl:

- podat přehled zahraničních modelů pro stanovení nadzemní biomasy douglasky tisolisté a ověřit jejich použití v podmínkách ČR,
- poskytnout praxi relevantní modely pro výpočet nadzemní biomasy douglasky tisolisté parametrizované na datech z území ČR.

Součástí metodiky není návod na empirické stanovení biomasy, neboť postupy jsou shodné s metodikou aplikovanou na smrk (VEJPUŠKOVÁ et al. 2017).



Kmenové kotouče douglasky tisolisté odebrané pro stanovení konvenční hustoty dřeva a kůry kmene.

3 VLASTNÍ POPIS METODIKY

3.1 Zahraniční modely pro výpočet nadzemní biomasy douglasky tisolisté

3.1.1 Přehled publikovaných modelů

V tabulkách 1 až 5 je uveden přehled publikovaných modelů pro výpočet celkové nadzemní biomasy, biomasy kmene, koruny, větví a jehličí pro douglasku tisolistou. Pro každou komponentu biomasy jsou uvedeny modely jak z oblasti Evropy, tak Severní Ameriky. Zahrnuty byly pouze studie parametrizované minimálně na 8 vzornících, pokrývající co nejširší rozpětí dendrometrických charakteristik, respektive k odvození modelů byla použita tzv. pseudodata, tj. data vygenerovaná s použitím existujících alometrických rovnic. Vynechány byly studie, kde analýza biomasy byla součástí manipulativního experimentu, např. pokusů s přihnojováním. V tabulce je uvedena citace studie (první autor a rok publikace), z které byl model převzat, výpočtový tvar modelu, charakteristiky souboru vzorníků, na kterém byl model parametrizován (počet vzorníků N , rozsah výčetních tloušťek D , rozsah výšek H) a dále země původu.

Mezi modely převládají klasické alometrické rovnice s jednou (výčetní tloušťka D) či dvěma nezávislými proměnnými (výčetní tloušťka D a výška stromu H), které mají v praxi nejširší uplatnění, neboť využívají proměnné rutinně zjišťované při taxačních měřeních. Uvedeny jsou i složitější tvary modelů s více proměnnými, zahrnující kromě dendrometrických charakteristik vzorníku i taxační charakteristiky porostu či parametry stanoviště. Základní tvar modelů je nelineární s multiplikativním přiřazováním jednotlivých faktorů. Někteří autoři volí logaritmickou linearizaci modelů, odhad parametrů je poté možno řešit postupy lineární regrese. Nevýhodou tohoto přístupu je nutnost zpětné transformace parametrů, resp. aplikace korekčního faktoru.

Seznam zkratk použitých v tabulkách 1–5:

alt – nadmořská výška/altitude (m n.m.), **BA** – výčetní základna porostu/basal area of the stand (m^2/ha), **CL** – délka koruny/crown length (m), **D** – výčetní tloušťka/diameter at breast height (cm), **H** – výška stromu/tree height (m), **lat** – zeměpisná šířka/latitude ($^\circ$), **N** – počet vzorníků/number of sample trees, **sth** – výška pařezu/stump height (m), **T** – věk/age, **tph** – počet stromů na ha/number of trees per ha, **prec** – průměrný roční úhrn srážek/average sum of annual precipitation (mm), **temp** – průměrná roční teplota/average annual temperature ($^\circ C$), **upd** – průměr kmene v 30 % výšky stromu/upper diameter at 30% of the tree height (cm), **V** – objem kmene bez kůry/stem volume inside the bark (m^3).

Severní Amerika					
Model	Výpočtový tvar modelu	N	D (cm)	H (m)	Země
Feller 1992_dobrá stanoviště, Port Albertini	$\text{EXP}(-4, 146+2, 895*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 493*0, 493/2)+\text{EXP}(-6, 088+2, 853*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 472*0, 472/2)+\text{EXP}(-1, 466+1, 566*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 288*0, 288/2)+\text{EXP}(-10, 595+3, 648*\ln(D))^*\text{EXP}(1, 87*1, 87/2)+\text{EXP}(-1, 239+1, 285*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 22*0, 22/2)$	10	5-56		Kanada
Feller 1992_chudá stanoviště, Port Albertini	$\text{EXP}(-4, 014+2, 927*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 243*0, 243/2)+\text{EXP}(-5, 394+2, 853*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 249*0, 249/2)+\text{EXP}(-2, 946+1, 904*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 59*0, 59/2)+\text{EXP}(-5, 596+1, 866*\ln(D))^*\text{EXP}(1, 148*1, 148/2)+\text{EXP}(-2, 029+1, 46*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 339*0, 339/2)$	8	6-29		Kanada
Feller 1992_dobrá stanoviště, data Standish	$\text{EXP}(-4, 194+2, 827*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 269*0, 269/2)+\text{EXP}(-5, 456+2, 659*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 297*0, 297/2)+\text{EXP}(-2, 829+1, 937*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 504*0, 504/2)+\text{EXP}(-2, 203+1, 636*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 364*0, 364/2)$	46	5-64		Kanada
Feller 1992_chudá stanoviště, data Standish	$\text{EXP}(-4, 291+2, 866*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 28*0, 28/2)+\text{EXP}(-5, 505+2, 678*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 308*0, 308/2)+\text{EXP}(-2, 914+1, 97*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 5*0, 5/2)+\text{EXP}(-2, 515+1, 76*\ln(D))^*\text{EXP}(0, 331*0, 331/2)$	42	5-35		Kanada
Gholz 1979	$\text{EXP}(-3, 0396+\ln(D))^*2, 5951+\text{EXP}(-4, 3103+\ln(D))^*2, 43+\text{EXP}(-3, 6941+\ln(D))^*2, 1382+\text{EXP}(-3, 529+\ln(D))^*1, 7503+\text{EXP}(-2, 8462+1, 7009*\ln(D))$	85	1,8-162		USA
Grier 1977	$\text{EXP}(-2, 656+2, 53*\ln(D))+\text{EXP}(-4, 108+2, 39*\ln(D))+\text{EXP}(-4, 786+2, 389*\ln(D))+\text{EXP}(-2, 455+1, 4*\ln(D))+\text{EXP}(-4, 151+1, 982*\ln(D))$	29	25,9-163		USA
Harrison 2009	$\text{EXP}(-0, 995+2, 0765*\ln(D))$	30	15-80,1		USA
Chojnacký 2014	$\text{EXP}(-2, 4623+2, 4852*\ln(D))$	pseudodata			Sev. Amerika
Jenkins 2003	$\text{EXP}(-2, 2304+2, 4435*\ln(D))$	pseudodata			USA
Nay 2014	$\text{EXP}(-6, 6292+2, 6690*\ln(D))^*1, 066+\text{EXP}(-6, 9137+2, 9506*\ln(D))^*1, 062+\text{EXP}(-3, 77+2, 2783*\ln(D))^*1, 009+\text{EXP}(-2, 0079+2, 2776*\ln(D))^*1, 009$	32	23,1-80,3	22,1-35,9	USA
Poudei 2019_CRM odhad	$\text{EXP}(-2, 8246+1, 6385*\ln(D))+1, 0474*\ln(H))$	424	1,8-114	2,4-64	USA
Poudei 2019_kalibrování	$1, 0274*\text{EXP}(1, 0408+0, 8652*\ln(\text{EXP}(-2, 8246+1, 6385*\ln(D))+1, 0474*\ln(H))))$				USA
Poudei 2019_konverze objemu na biomasu	$1, 0242*\text{EXP}(6, 4313+0, 9589*\ln(\text{EXP}(-9, 5504+1, 742*\ln(D))+1, 0212*\ln(H))))$				USA
Standish 1985_var. menziesii 1	$37, 3+139, 3*(D/100)^*(D/100)^H$	49	4,5-66	4,1-44	Kanada
Standish 1985_var. menziesii 2	$-20+286, 5*V+2737, 9*(D/100)^*(D/100)$	49	4,5-66	4,1-44	Kanada
Standish 1985_var.glauca 1	$61, 9+133, 5*(D/100)^*(D/100)^H$	41	3,1-63,2		Kanada
Standish 1985_var. glauca 2	$-28, 5-242, 4*V+5800, 3*(D/100)^*(D/100)+4, 1*(D/100)^*(D/100)^H*V$	41	3,1-63,2		Kanada
Ter-Mikaelian 1997	$0, 0808*D^2, 5282$	60	5-54		Kanada

Tab. 2: Modely pro výpočet biomasy kmene/Models for stem biomass calculation.

Evropa					
Model	Výpočtový tvar modelu	N	D (cm)	H (m)	Země
Bartelink 1996	$\text{EXP}(-2,535+2,009*\ln(D))+0,709*\ln(H))$	23	3-38	6,7-25,9	Nizozemí
Forrester 2017_model 3	$\text{EXP}(-2,9258+2,598*\ln(D))*0,985014188$	pseudodata	1,8-163		Evropa
Forrester 2017_model 5	$\text{EXP}(-4,1154+2,4523*\ln(D))+0,4635*\ln(T))*0,989264659$	pseudodata	3-80,1		Evropa
Forrester 2017_model 6	$\text{EXP}(-4,244+2,4933*\ln(D))+0,2112*\ln(\text{tph}))*0,976213459$	pseudodata	3-80,1		Evropa
Forrester 2017_model 7	$\text{EXP}(-1,5808+2,6025*\ln(D)-0,0293*\text{lat})*0,984518819$	pseudodata	3-163		Evropa
Forrester 2017_model 8	$\text{EXP}(-2,6263+2,603*\ln(D)-0,0003*\text{prec})*0,985349863$	pseudodata	3-163		Evropa
Forrester 2017_model 9	$\text{EXP}(-2,3382+2,6025*\ln(D)-0,0787*\text{temp})*0,985095747$	pseudodata	3-163		Evropa
Forrester 2017_model 19	$\text{EXP}(-3,5063+2,453*\ln(D))+0,3645*\ln(T)-0,0003*\text{prec})*0,989671946$	pseudodata	3-80,1		Evropa
Nord-Larsen 2015	$\text{EXP}((3,96912 + 0,0163) + 1,71905*\ln(D/100)+(1,14966+0,06693)*\ln(H))$	44	7,4-49,3		Dánsko
Vonderach 2018_úplný model_hroubí	$(0,0084*D^{*0,363}*H^{*1,1578}* \text{upd}^{*1,5364}*T^{*0,1669})+(0,002*H^{*1,4131}* \text{upd}^{*1,7165}*T^{*0,1509}*\text{alt}^{*-0,1548})$	161	7-87	10-45	Německo
Vonderach 2018_jednoduchý model_hroubí	$(0,0131*D^{*1,9299}*H^{*1,0715})+(0,0018*D^{*1,9099}*H^{*1,0306})$	161	7-86	10-45	Německo

Severní Amerika					
Model	Výpočtový tvar modelu	N	D (cm)	H (m)	Země
Feller 1992_dobrá stanoviště, data Standish	$\text{EXP}(-4,194+2,827*\ln(D)) * \text{EXP}(0,269*0,269/2) + \text{EXP}(-5,456+2,659*\ln(D)) *$ $\text{EXP}(0,297*0,297/2)$	46	5-64		Kanada
Feller 1992_dobrá stanoviště, Port Albertini	$\text{EXP}(-4,146+2,895*\ln(D)) * \text{EXP}(0,493*0,493/2) + \text{EXP}(-6,088+2,853*\ln(D)) *$ $\text{EXP}(0,472*0,472/2)$	10	5-56		Kanada
Feller 1992_chudá stanoviště, data Standish	$\text{EXP}(-4,291+2,866*\ln(D)) * \text{EXP}(0,28*0,28/2) + \text{EXP}(-5,505+2,678*\ln(D)) *$ $\text{EXP}(0,308*0,308/2)$	42	5-35		Kanada
Feller 1992_chudá stanoviště, Port Albertini	$\text{EXP}(-4,014+2,927*\ln(D)) * \text{EXP}(0,243*0,243/2) + \text{EXP}(-5,394+2,853*\ln(D)) *$ $\text{EXP}(0,249*0,249/2)$	8	6-29		Kanada
Gholz 1979	$\text{EXP}(-3,0396 + \ln(D)^2,5951) + \text{EXP}(-4,3103 + \ln(D)^2,43)$	99	1.8-162		USA
Grier 1977	$\text{EXP}(-2,656+2,53*\ln(D)) + \text{EXP}(-4,108+2,39*\ln(D))$	29	25.9-163		USA
Harrison 2009	$(\text{EXP}(-0,9388+1,9941*\ln(D))) + (\text{EXP}(-3,9923+2,225*\ln(D)))$	31	15-80.1		USA
Jenkins 2003	$(\text{EXP}(-0,3737+(-1,8055/D)) * \text{EXP}(-2,2304+2,4435*\ln(D))) + (\text{EXP}(-2,098+(-1,14325/D)) * \text{EXP}(-2,2304+2,4435*\ln(D)))$	pseudodata			USA
Nay 2014	$\text{EXP}(-3,77+2,2783*\ln(D)) * 1,009 + \text{EXP}(-2,0079+2,2776*\ln(D)) * 1,009$	32	23.1-80.3	22.1-35.9	USA
Standish 1985_var. glauca 1	$(34,5+85,8*(D/100)^*(D/100)^H) + (3,6+18,2*(D/100)^*(D/100)^H)$	41	3.1-63.2		Kanada
Standish 1985_var. glauca 2	$(-15,2+91,3*V+2315*(D/100)^*(D/100)^{-4,7*}*(D/100)^*(D/100)^H*V) +$ $(-2,5-53,9*V+735*(D/100)^*(D/100)^{-3,5*}*(D/100)^*(D/100)^H*V)$	41	3.1-63.2		Kanada
Standish 1985_var. menziesii 1	$(10,3+110,4*(D/100)^*(D/100)^H) + (3,1+15,6*(D/100)^*(D/100)^H)$	49	4.5-66	4.1-44	Kanada
Standish 1985_var. menziesii 2	$(-1,5+415,4*V+123,1*(D/100)^*(D/100)) + (0,1+51,4*V+99,1*(D/100)^*(D/100))$	49	4.5-66	4.1-44	Kanada
Ter-Mikaelian 1997_data Marshall and Wang 1995	0,0451*D^2,6343	60	5-54		Kanada

Tab. 3: Modely pro výpočet biomasy koruny/Models for crown biomass calculation.

Evropa					
Model	Výpočtový tvar modelu	N	D (cm)	H (m)	Země
Bartelink 1996	$\text{EXP}(-1,345+3,924*\ln(D)-2,514*\ln(H))$	23	3-38	6,7-25,9	Nizozemí
Forrester 2017_model 3	$(\text{EXP}(-3,8258+2,2587*\ln(D))*0,965911306993524)+$ $(\text{EXP}(-3,4687+1,9428*\ln(D))*0,97287177093655)$	pseudodata	1-163		Evropa
Forrester 2017_model 4	$(\text{EXP}(-2,2193+2,5342*\ln(D)-0,0564*BA)^0,912482574911686)+$ $(\text{EXP}(-2,3661+2,2854*\ln(D)-0,053*BA)^0,940597687539453)$	pseudodata	1-163		Evropa
Forrester 2017_model 5	$(\text{EXP}(-1,3664+2,5432*\ln(D)-0,9339*\ln(T))^*1,04465555368524)+$ $(\text{EXP}(-1,406+2,3887*\ln(D)-0,9417*\ln(T))^*1,01672942614623)$	pseudodata	1-86,1		Evropa
Forrester 2017_model 7	$(\text{EXP}(-5,2813+2,2908*\ln(D)+0,0305*\text{lat})^0,991361078784172)+$ $(\text{EXP}(-4,8712+1,9689*\ln(D)+0,0291*\text{lat})^0,973413861626866)$	pseudodata	1-163		Evropa
Forrester 2017_model 10	$(\text{EXP}(-1,1818+2,5554*\ln(D)-0,023*BA-0,7119*\ln(T))^*1,03347929757971)+$ $(\text{EXP}(-1,4968+2,4033*\ln(D)-0,0256*BA-0,6619*\ln(T))^*1,0132841713531)$	pseudodata	1-86,1		Evropa
Nord-Larsen 2015	$\text{EXP}(9,31831 + 0,01636 + 2,56584*\ln(D/100)+(0,03007-0,70519)*\ln(H))$	44	7,4-49,3		Dánsko
Vonderach 2018_jednoduchý model	$(0,2784*D^{*3,1276}*H^{*-1,7984})+(-1,8821+0,2749*D^{*2,4833}*H^{*-1,3051})$	153	7-86	10-45	Německo
Vonderach 2018_úplný model	$(5,3595+0,0446*H^{*-1,6949*\text{upd}}*3,2448*\text{alt}^{*0,3084*CL^{*1,3312}}+(0,1708*H^{*-1,2492*\text{upd}}*2,5884*\text{alt}^{*0,2632*CL^{*0,7698}})$	153	7-86	10-45	Německo

Severní Amerika					
Model	Výpočtový tvar modelu	N	D (cm)	H (m)	Země
Feller 1992_dobrá stanoviště, Port Albertini	$\text{EXP}(-1,466+1,566*\ln(D))*\text{EXP}(0,288*0,288/2)+\text{EXP}(-10,595+3,648*\ln(D))*\text{EXP}(1,87*1,87/2)+\text{EXP}(-1,239+1,285*\ln(D))*\text{EXP}(0,22*0,22/2)$	10	5-56		Kanada
Feller 1992_chudá stanoviště, Port Albertini	$\text{EXP}(-2,946+1,904*\ln(D))*\text{EXP}(0,59*0,59/2)+\text{EXP}(-5,596+1,866*\ln(D))*\text{EXP}(1,148*1,148/2)+\text{EXP}(-2,029+1,46*\ln(D))*\text{EXP}(0,339*0,339/2)$	8	6-29		Kanada
Feller 1992_dobrá stanoviště, data Standish	$\text{EXP}(-2,829+1,937*\ln(D))*\text{EXP}(0,504*0,504/2)+\text{EXP}(-2,203+1,636*\ln(D))*\text{EXP}(0,364*0,364/2)$	43	5-64		Kanada
Feller 1992_chudá stanoviště, data Standish	$\text{EXP}(-2,914+1,97*\ln(D))*\text{EXP}(0,5*0,5/2)+\text{EXP}(-2,515+1,76*\ln(D))*\text{EXP}(0,331*0,331/2)$	39	5-35		Kanada
Gholz 1979	$\text{EXP}(-3,6941+\ln(D)^2,1382) + \text{EXP}(-3,529+\ln(D)^1,7503)+\text{EXP}(-2,8462 + 1,7009*\ln(D))$	123	1,8-162		USA
Grier 1977	$\text{EXP}(-4,786+2,389*\ln(D))+\text{EXP}(-2,455+1,4*\ln(D))+\text{EXP}(-4,151+1,982*\ln(D))$	29	25,9-163		USA
Harrison 2009	$\text{EXP}(-6,511+2,4826*\ln(D))+\text{EXP}(-6,0845+2,7364*\ln(D))+\text{EXP}(-4,9085+2,2536*\ln(D))$	30	15-80,1		USA
Monserud 1999	$(0,6451*D^2,5491*BA^{\wedge}-1,5275)+(0,0155*D^{\wedge}3,3037*BA^{\wedge}-1,0286)$	22	5,3-69,9	4,2-33,1	USA
Nay 2014	$\text{EXP}(-6,6292+2,6690*\ln(D))*1,066+\text{EXP}(-6,9137+2,9506*\ln(D))*1,062$	32	23,1-80,3	22,1-35,9	USA
Standish 1985_var. glauca 1	$(-0,2+11,8*(D/100)^*(D/100)^H)+(10,9+6,4*(D/100)^*(D/100)^H)+(1,9+5,3*(D/100)^*(D/100)^H)+(11,1+6*(D/100)^*(D/100)^H)$	41	3,1-63,2		Kanada
Standish 1985_var. glauca 2	$(-3,3-15,5*V+(D/100)^*(D/100)+1,8*(D/100)^*(D/100)^H*V)+(-3,9-85,7*V+901,9*(D/100)^*(D/100)+0,3*(D/100)^*(D/100)^H*V)+(-0,3-99,1*V+628,9*(D/100)^*(D/100)+4,3*(D/100)^*(D/100)^H*V)+(-3,4-79,5*V+860*(D/100)^*(D/100)+0,6*(D/100)^*(D/100)^H*V)$	41	3,1-63,2		Kanada
Standish 1985_var. menziesii 1	$(1,4+6*(D/100)^*(D/100)^H)+(9+2,2*(D/100)^*(D/100)^H)+(3,2+1,2*(D/100)^*(D/100)^H)+(10,3+3,9*(D/100)^*(D/100)^H)$	49	4,5-66	4,1-44	Kanada
Standish 1985_var. menziesii 2	$(-10,5-39,8*V+686,7*(D/100)^*(D/100)+(-1,3-48,2*V+614*(D/100)^*(D/100))+(-1,3-20,2*V+268,6*(D/100)^*(D/100)+(-5,5-72,1*V+946,4*(D/100)^*(D/100))$	49	4,5-66	4,1-44	Kanada
Ter-Mikaelian 1997_data Brown 1978	$0,2624*D^{\wedge}1,5464+0,3021*D^{\wedge}1,3076$	22	1-86		USA
Ter-Mikaelian 1997_data Marshall and Wang 1995	$0,0088*D^{\wedge}2,584+0,0423*D^{\wedge}1,8619$	60	5-54		Kanada

Tab. 4: Modely pro výpočet biomasy větví. Models for branch biomass calculation.

Evropa					
Model	Výpočtový tvar modelu	N	D (cm)	H (m)	Země
Bartelink 1996	$\text{EXP}(-2,675+4,42*\ln(D)-2,784*\ln(H))$	23	3-38	6,7-25,9	Nizozemí
Forrester 2017_model 10	$\text{EXP}(-1,1818+2,5554*\ln(D)-0,023*BA-0,7119*\ln(T))*1,03347929757971$	pseudodata	1-86,1		Evropa
Forrester 2017_model 18	$\text{EXP}(-9,1952+2,7485*\ln(D)+0,2554*\ln(tph)+0,0427*\ln(T))*1,06115262762762$	pseudodata	3-80,1		Evropa
Forrester 2017_model 3	$\text{EXP}(-3,8258+2,2587*\ln(D))*0,965911306993524$	pseudodata	1-163		Evropa
Forrester 2017_model 4	$\text{EXP}(-2,2193+2,5342*\ln(D)-0,0564*BA)*0,912482574911686$	pseudodata	1-163		Evropa
Forrester 2017_model 5	$\text{EXP}(-1,3664+2,5432*\ln(D)-0,9339*\ln(T))*1,04465555368524$	pseudodata	1-86,1		Evropa
Forrester 2017_model 7	$\text{EXP}(-5,2813+2,2908*\ln(D)+0,0305*\ln(T))*0,991361078784172$	pseudodata	1-163		Evropa
Nord-Larsen 2015	$\text{EXP}(9,31831 + 0,01636 + 2,56584*\ln(D/100))* (0,03007-0,70519)*\ln(H))$	44	7,4-49,3		Dánsko
Vonderach 2018_jednoduchý model_nehroubí	$0,2784*D^{\wedge}3,1276*H^{\wedge}-1,7984$	161	7-86	10-45	Německo
Vonderach 2018_úplný model_nehroubí	$5,3595+0,0446*H^{\wedge}-1,6949*upd^{\wedge}3,2448*alt^{\wedge}-0,3084*CL^{\wedge}1,3312$	161	7-87	10-45	Německo

Severní Amerika				
Model	Výpočtový tvar modelu	N	D (cm)	H (m)
Feller 1992_dobrá stanoviště, data Standish	$\text{EXP}(-2,829+1,937*\ln(D))*\text{EXP}(0,504*0,504/2)$	43	5-64	Kanada
Feller 1992_dobrá stanoviště, Port Albertini	$\text{EXP}(-1,466+1,566*\ln(D))*\text{EXP}(0,288*0,288/2)+\text{EXP}(-10,595+3,648*\ln(D))*\text{EXP}(1,87*1,87/2)$	10	5-56	Kanada
Feller 1992_chudá stanoviště, data Standish	$\text{EXP}(-2,914+1,97*\ln(D))*\text{EXP}(0,5*0,5/2)$	39	5-35	Kanada
Feller 1992_chudá stanoviště, Port Albertini	$\text{EXP}(-2,946+1,904*\ln(D))*\text{EXP}(0,59*0,59/2)+\text{EXP}(-5,596+1,866*\ln(D))*\text{EXP}(1,148*1,148/2)$	8	6-29	Kanada
Gholz 1979	$\text{EXP}(-3,694+\ln(D)^2,1382) + \text{EXP}(-3,529+\ln(D)^*1,7503)$	123	1,8-162	USA
Grier 1977	$\text{EXP}(-4,786+2,389*\ln(D))+\text{EXP}(-2,455+1,4*\ln(D))$	29	25,9-163	USA
Harrison 2009	$\text{EXP}(-6,0845+2,7364*\ln(D))*\text{EXP}(-4,9085+2,2536*\ln(D))$	30	15-80,1	USA
Monserud 1999	$(0,0155*D^3,3037*BA^{\wedge},1,0286)$	22	5,3-69,9	4,2-33,1 USA
Nay 2014	$\text{EXP}(-6,9137+2,9506*\ln(D))*1,062$	32	23,1-80,3	22,1-35,9 USA
Standish 1985_var. glauca 1	$(-0,2+11,8*(D/100)^*(D/100)^H)+((10,9+6,4*(D/100)^*(D/100)^H)+(1,9+5,3*(D/100)^*(D/100)^H)$	41	3,1-63,2	Kanada
Standish 1985_var. glauca 2	$(-3,3-15,5^*V+359,5*(D/100)^*(D/100)+1,8*(D/100)^*(D/100)^H^*V)+(-3,9-85,7^*V+901,9*(D/100)^*(D/100)-0,3*(D/100)^*(D/100)^H^*V)+(-0,3-99,1^*V+628,9*(D/100)^*(D/100)+4,3*(D/100)^*(D/100)^H^*V)$	41	3,1-63,2	Kanada
Standish 1985_var. menziesii 1	$(1,4+6*(D/100)^*(D/100)^H)+(9+2,2*(D/100)^*(D/100)^H)+(3,2+1,2*(D/100)^*(D/100)^H)$	49	4,5-66	4,1-44 Kanada
Standish 1985_var. menziesii 2	$(-10,5-39,8^*V+686,7*(D/100)^*(D/100))+(-1,3-48,2^*V+614*(D/100)^*(D/100))+(-1,3-20,2^*V+268,6*(D/100)^*(D/100))$	49	4,5-66	4,1-44 Kanada
Ter-Mikaelian 1997_data Brown 1978	$0,2624*D^1,5464$	22	1-86	USA
Ter-Mikaelian 1997_data Marshall and Wang 1995	$0,0088*D^2,584$	60	5-54	Kanada

Tab. 5: Modely pro výpočet biomasy jehličí/Models for needle biomass calculation.

Evropa					
Model	Výpočtový tvar modelu	N	D (cm)	H (m)	Země
Bartelink 1996	$\text{EXP}(-1,346+3,351*\ln(D)-2,201*\ln(H))$	23	3-38	6,7-25,9	Nizozemí
Forrester 2017_model 3	$\text{EXP}(-3,4687+1,9428*\ln(D))*0,97287177093655$	pseudodata	1-163		Evropa
Forrester 2017_model 4	$\text{EXP}(-2,3661+2,2854*\ln(D)-0,053*BA)*0,940597687539453$	pseudodata	1-163		Evropa
Forrester 2017_model 5	$\text{EXP}(-1,406+2,3887*\ln(D)-0,9417*\ln(T))*1,01672942614623$	pseudodata	1-86,3		Evropa
Forrester 2017_model 6	$\text{EXP}(-8,7227+2,4791*\ln(D)+0,461*\ln(tph))*1,01208162454721$	pseudodata	3-86,3		Evropa
Forrester 2017_model 7	$\text{EXP}(-4,8712+1,9689*\ln(D)+0,0291*\ln(T))*0,973413861626866$	pseudodata	1-163		Evropa
Forrester 2017_model 8	$\text{EXP}(-3,2485+1,9754*\ln(D)-0,0003*\text{prec})*0,970730637119955$	pseudodata	1-163		Evropa
Forrester 2017_model 10	$\text{EXP}(-1,4968+2,4033*\ln(D)-0,0256*BA-0,6619*\ln(T))*1,0132841713531$	pseudodata	1-86,3		Evropa
Forrester 2017_model 15	$\text{EXP}(-7,2754+2,5183*\ln(D)-0,2246*\ln(T)+0,3566*\ln(tph))*1,00783842489501$	pseudodata	3-86,3		Evropa
Forrester 2017_model 20	$\text{EXP}(1,1216+2,4347*\ln(D)-1,2283*\ln(T)-0,2053*\text{temp})*1,00633643923366$	pseudodata	1-86,1		Evropa
Vonderach 2018_jednoduchý model	$-1,8821+0,2749*D^{\wedge}2,4833*H^{\wedge}-1,3051$	153	7-86	10-45	Německo
Vonderach 2018_úplný model	$0,1708*H^{\wedge}-1,2492*\text{upd}/2,5884*\text{alt}^{\wedge}-0,2632*CL^{\wedge}0,7698$	153	7-86	10-45	Německo

Severní Amerika					
Model	Výpočtový tvar modelu	N	D (cm)	H (m)	Země
Feller 1992_dobrá stanoviště, data Standish	$\text{EXP}(-2,203+1,636*\ln(D))^*\text{EXP}(0,364*0,364/2)$	46	5-64		Kanada
Feller 1992_dobrá stanoviště, Port Albertini	$\text{EXP}(-1,239+1,285*\ln(D))^*\text{EXP}(0,22*0,22/2)$	10	5-56		Kanada
Feller 1992_chudá stanoviště, data Standish	$\text{EXP}(-2,515+1,76*\ln(D))^*\text{EXP}(0,331*0,331/2)$	42	5-35		Kanada
Feller 1992_chudá stanoviště, Port Albertini	$\text{EXP}(-2,029+1,46*\ln(D))^*\text{EXP}(0,339*0,339/2)$	8	6-29		Kanada
Gholz 1979	$\text{EXP}(-2,8462 + 1,7009*\ln(D))$	123	1,8-162		USA
Grier 1977	$\text{EXP}(-4,151+1,982*\ln(D))$	29	25,9-163		USA
Harrison 2009	$\text{EXP}(-6,511+2,4826*\ln(D))$	30	15-80,1		USA
Jenkins 2003	$\text{EXP}(-2,9584+(4,4766/D)^*\text{EXP}(-2,2304+2,4435*\ln(D)))$	pseudodata			USA
Monserud 1999	$0,6451*D^2,5491*BA^{\wedge-1},5275$	22	2,3-69,9		USA
Nay 2014	$\text{EXP}(-6,6292+2,6690*\ln(D))^*1,066$	32	23,1-80,3	22,1-35,9	USA
Standish 1985_var. glauca 1	$11,1+6*(D/100)^*(D/100)^H$	41	3,1-63,2		Kanada
Standish 1985_var. glauca 2	$-3,4-79,5*V+860*(D/100)^*(D/100)-0,6*(D/100)^*(D/100)^H*V$	41	3,1-63,2		Kanada
Standish 1985_var. menziesii 1	$10,3+3,9*(D/100)^*(D/100)^H$	49	4,5-66	4,1-44	Kanada
Standish 1985_var. menziesii 2	$-5,5-72,1*V+946,4*(D/100)^*(D/100)$	49	4,5-66	4,1-44	Kanada
Ter-Mikaelian 1997_data Brown 1978	$0,3021*D^{\wedge}1,3076$	22	1-86		USA
Ter-Mikaelian 1997_data Marshall and Wang 1995	$0,0423*D^{\wedge}1,8619$	60	5-54		Kanada

3.1.2 Ověření publikovaných modelů na nezávislém souboru empirických dat z území ČR

Použitelnost zahraničních modelů (tab. 1–5) pro výpočet nadzemní biomasy douglasky z území České republiky byla testována na nezávislém souboru empirických dat z 33 vzorníků douglasky. Tyto pocházejí ze 4 oblastí ČR (obr. 1) a pokrývají široké rozpětí výčetních tlouštěk a výšek (tab. 6). Vzorníky byly analyzovány ve VÚLHM v letech 2014–2018 v rámci výzkumného projektu NAZV QJ1520299 „Uplatnění douglasky tisolisté v lesním hospodářství ČR“.



Obr. 1: Lokalizace odběrových míst na biomasu douglasky na pozadí mapy přírodních lesních oblastí ČR/Localization of sites with the sampling of Douglas fir biomass on the background of natural forest areas in the Czech Republic.

Tab. 6: Sumární charakteristika lokalit a odebíraných souborů vzorníků douglasky tisolisté na území ČR/Overview of study sites and tree characteristics of Douglas fir trees sampled in the Czech Republic.

Lokalita	Porostní skupina	Věk	SLT	Nadm. výška	Bonita	N	D (cm)	H (m)
Písek	228 B10/1	14	3K5	450	34	3	6,6-6,8	7,9-8,4
	227 C5	50	4S2	440	38	3	34,8-36,3	27,2-30,7
	228 B10/1	102	3K5	460	34	3	41,3-44,7	3,6-34,9
Navarov	7 B3	36	5S6	340	38	3	10-12,9	11,6-15,3
	7 B5	51	5K9	365	38	3	20,9-22,8	26,7-29,8
Opočno	8 A3	26	1M3	255	38	3	10,1-12,8	14,6-15,1
	47 A5	49	3H1	350	36	3	29,5-41,2	27,5-30,5
	44 A14	137	2H1	305	34	3	66,2-66,4	43,8-44,9
Prostějov	317 D3	33	5K1	670	40	3	22,8-23,9	25,6-26,3
	114 D6	58	5K1	595	40	3	41,7-43,2	33,6-36,5
	109 B9	96	5K1	595	34	3	49,5-57,2	39,8-43,3

Hodnoty biomasy predikované jednotlivými modely byly porovnávány s empirickými hodnotami za použití Wilcoxnova párového testu. Modely, jejichž výsledky se významně lišily ($\alpha = 0,01$) od empirických hodnot, byly vyloučeny z dalšího posuzování. Pro zbývající modely byla vyčíslena relativní střední chyba odhadu RME – relative mean error (vzorec 1). Výpočet byl proveden v programu Statistica verze 12 (STATSOFT INC. 2013).

$$RME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (1)$$

kde n je počet vzorníků, y_i empirická hodnota biomasy i -tého vzorníku, $\hat{y}_i$ modelová hodnota biomasy i -tého vzorníku.

Modely s nejnižší hodnotou RME lze doporučit pro použití v podmínkách ČR. V tabulce 7 je uveden přehled nejlepších modelů pro výpočet celkové nadzemní biomasy, biomasy kmene, koruny, větví a jehličí. Pro každou komponentu jsou uvedeny 3 modely. U biomasy kmene byl z praktických důvodů zařazen ještě čtvrtý model, aby přehled obsahoval alespoň jeden jednoduchý model s jedinou nezávislou proměnnou – výčetní tloušťkou.

Tab. 7: Doporučené modely pro výpočet celkové nadzemní biomasy a jejich komponent pro douglasku tisolistou z území České republiky/Recommended biomass functions for the calculation of aboveground biomass and its components for Douglas fir from the area of the Czech Republic.

Komponenta biomasy	Model	Výpočtový tvar modelu	RME (%)
Celková nadzemní biomasa	Nord-Larsen 2015	$\text{EXP}(5,62229 + 0,01636 + 1,89776 \cdot \ln(D/100) + (0,74871 + 0,0772) \cdot \ln(H))$	10,5
	Forrester 2017 model 9	$\text{EXP}(-1,9084 + 2,4724 \cdot \ln(D) - 0,0479 \cdot \text{temp})^{*1,00589974443107}$	11,9
	Forrester 2017 model 3	$\text{EXP}(-2,3298 + 2,4818 \cdot \ln(D))^{*1,00300367137778}$	12,1
	Standish 1985 var. menziesii 2	$(-1,5 + 415,4 \cdot V + 123,1 \cdot (D/100) \cdot (D/100)) \cdot (-0,1 + 51,4 \cdot V + 99,1 \cdot (D/100) \cdot (D/100))$	9,2
Kmen	Vonderach 2018 úplný model_ hroubí	$(0,0084 \cdot D^{*0,363} \cdot H^{*1,1578} \cdot \text{upd}^{*1,5364} \cdot T^{*0,1669}) + (0,002 \cdot H^{*1,4131} \cdot \text{upd}^{*1,7165} \cdot T^{*0,1509} \cdot \text{alt}^{*0,1548})$	10,0
	Nord-Larsen 2015	$\text{EXP}((3,96912 + 0,0163) + 1,71905 \cdot \ln(D/100) + (1,14966 + 0,06693) \cdot \ln(H))$	10,8
	Gholz 1979	$\text{EXP}(-3,0396 + \ln(D)^{*2,5951}) + \text{EXP}(-4,3103 + \ln(D)^{*2,43})$	13,5
	Grier 1977	$\text{EXP}(-4,786 + 2,389 \cdot \ln(D)) + \text{EXP}(-2,455 + 1,4 \cdot \ln(D)) + \text{EXP}(-4,151 + 1,982 \cdot \ln(D))$	23,8
Koruna	Nord-Larsen 2015	$\text{EXP}(9,31831 + 0,01636 + 2,56584 \cdot \ln(D/100) + (0,03007 - 0,70519) \cdot \ln(H))$	25,2
	Harrison 2009	$\text{EXP}(-6,511 + 2,4826 \cdot \ln(D)) + \text{EXP}(-6,0845 + 2,7364 \cdot \ln(D)) + \text{EXP}(-4,9085 + 2,2536 \cdot \ln(D))$	31,3
	Grier 1977	$\text{EXP}(-4,786 + 2,389 \cdot \ln(D)) + \text{EXP}(-2,455 + 1,4 \cdot \ln(D))$	26,9
	Forrester 2017 model 3	$\text{EXP}(-3,8258 + 2,2587 \cdot \ln(D))^{*0,965911306993524}$	29,1
Větve	Harrison 2009	$\text{EXP}(-6,0845 + 2,7364 \cdot \ln(D)) + \text{EXP}(-4,9085 + 2,2536 \cdot \ln(D))$	29,9
	Vonderach 2018 úplný model	$0,1708 \cdot H^{*1,2492} \cdot \text{upd}^{*2,5884} \cdot \text{alt}^{*0,2632} \cdot \text{CL}^{*0,7698}$	31,9
	Grier 1977	$\text{EXP}(-4,151 + 1,982 \cdot \ln(D))$	33,4
	Forrester 2017 model 15	$\text{EXP}(-7,2754 + 2,5183 \cdot \ln(D) - 0,2246 \cdot \ln(T) + 0,3566 \cdot \ln(\text{tph}))^{*1,00783842489501}$	40,2

Význam zkratk je stejný jako v tab. 1–5/ The meaning of abbreviations is the same as in Tab. 1–5.

Pro celkovou nadzemní biomasu bylo testováno 15 modelů z oblasti Evropy a 18 modelů z oblasti Severní Ameriky. Relativní střední chyba odhadu, která vyjadřuje procentickou odchylku modelových hodnot od empiricky zjištěných hodnot biomasy, vychází pro 3 nejlepší modely 10-12%, což indikuje vysokou přesnost stanovení celkové nadzemní biomasy těmito modely. Nejnižší RME (10,5 %) vychází pro model Nord-Larsen 2015, který byl parametrizován na 44 vzornících z oblasti Dánska. K nejlepším modelům patří i dva generalizované modely Forrester 2017 odvozené na pseudodatech generovaných z dostupných alometrických rovnic z oblasti Evropy.

Pro kvantifikaci biomasy kmene vychází z testu nejlépe model Standish 1985_var. Menziesii_2 parametrizovaný na datech ze 49 vzorníků z pobřežních oblastí západní Kanady pokrývajících tloušťkové rozpětí od 4 do 66 cm. Jedná se o model se dvěma nezávisle proměnnými – výčetní tloušťkou a výškou. Další dva vybrané modely pro biomasu kmene jsou z oblasti Evropy. Určitě je možné doporučit model Vonderach 2018, který byl parametrizován na rozsáhlém souboru vzorníků



Vzorky biomasy připravené k transportu do laboratoře.

(N = 161) z oblasti Německa, reprezentující široké spektrum stanovištních podmínek a pokrývající tloušťkové rozpětí od 7 do 87 cm. Jeho nevýhodou je vysoký počet vstupních proměnných – kromě výčetní tloušťky a výšky je potřeba znát také průměr kmene v 30 % výšky stromu, věk stromu a nadmořskou výšku stanoviště. Třetí z vybraných modelů je model Nord-Larsen 2015 z Dánska. Z praktických důvodů byl do přehledu nejlepších modelů zařazen i jednoduchý model Gholz 1979 (USA), s jehož pomocí lze vypočítat biomasu kmene po dosažení pouze výčetní tloušťky. Střední chyba odhadu se pro všechny vybrané modely pohybuje od 9 do 13 %.

Celkovou biomasu koruny odhaduje s nejvyšší přesností americký model Grier 1977 parametrizovaný na datech z 29 vzorníků s tloušťkovým rozpětím 25,9–163 cm z oblasti Kaskádového pohoří v Oregonu (USA). Doporučit lze i další americký model Harrison 2005 odvozený z 30 vzorníků o výčetní tloušťce 15–80 cm z pobřežních oblastí státu Washington. Spolehlivý odhad dává i dánský model Nord-Larsen 2015. Odhad biomasy koruny je zatížen větší chybou, než je tomu u celkové nadzemní biomasy a biomasy kmene. Chyba se u nejlepších modelů pohybuje od 23 do 31 %.

Biomasu větví lze nejpřesněji určit pomocí alometrických rovnic založených pouze na výčetní tloušťce. Nejnižší hodnota RME (26,9 %) byla zjištěna u amerického modelu Grier 1977. Dalšími modely s nízkou hodnotou RME jsou evropský model Forrester 2017 (29,1 %) a severoamerický model Harrison 2005 (29,9 %).

Pro výpočet biomasy jehličí lze v podmínkách ČR doporučit evropské modely Vonderach 2018 a Forrester 2017. Kromě nich pak lze použít také model Grier 1977 (USA). Tento model patří k jednoduchým s výčetní tloušťkou jako jedinou vstupní proměnnou. Odhad biomasy jehličí je zatížen nejvyšší chybou ze všech analyzovaných komponent biomasy. Hodnota RME se u vybraných modelů pohybuje od 31 do 40 %.

3.2 Regresní modely pro výpočet nadzemní biomasy douglasky tisolisté parametrizované na datech z území ČR

Nové modely byly parametrizovány pro celkovou nadzemní biomasu, biomasu kmene, koruny, větví a asimilačních orgánů. Rovnice slouží k výpočtu množství biomasy v kg sušiny. Jednotlivé kompartmenty jsou v rámci této práce definovány takto:

- celková nadzemní biomasa – nadzemní biomasa dřevitých částí (větvě a kmen) a jehličí,
- biomasa kmene – biomasa kmene s vyloučením pařezu,
- biomasa větví – biomasa větví (dřevité části bez zelených větvíček),
- biomasa asimilačních orgánů - biomasa jehličí a zelených větvíček,
- biomasa koruny – biomasa větví a asimilačních orgánů dohromady.

Vstupní datový soubor pro parametrizaci modelů tvořilo 33 vzorníků. Jedná se o stejný soubor, na kterém byly ověřovány publikované zahraniční modely v kap. 3.1. Lokalizace odběrových míst je patrná z obrázku 1, charakteristika lokalit a odebraných souborů vzorníků je sumarizována v tabulce 6.

Pro parametrizaci byl zvolen nelineární alometrický model, jehož obecný tvar uvádí vzorec :

$$y = p_0 x_1^{p_1} x_2^{p_2} \dots x_n^{p_n} \quad (2)$$

kde y je nadzemní celková biomasa, respektive biomasa dané části stromu (kmene, koruny, větví a jehličí), $x_1, x_2, \dots, x_n$ jsou nezávisle proměnné (prediktory) a $p_0, p_1, p_2, \dots, p_n$ parametry.

Za základní tvar modelu byla zvolena rovnice s jedním prediktorem – výčetní tloušťkou D a dvěma parametry:

$$y = p_0 D_1^{p_1} \quad (3)$$

Následně byl prověřen vliv dalších faktorů charakterizujících jak jednotlivé stromové vzorníky – výška stromu (H), délka koruny (CL), objem kmene (V), stáří stromu (T), tak i celý porost – počet stromů na hektar (tph) a výčetní základna porostu (BA). Dodatečné faktory byly k modelu základnímu přidávány formou multiplikační, a to po jednom i po možných kombinacích více faktorů. Celkem bylo testováno 60 modelů pro každou komponentu biomasy.

Parametry modelů byly odhadnuty postupy nelineární regrese metodou nejmenších čtverců. Predikční schopnost výsledných modelů byla posuzována podle hodnot Akaikeho informačního kritéria (AIC), střední kvadratické chyby (RMSE) a koeficientu determinace (R^2). Jak v případě AIC, tak i RMSE nižší hodnota indikuje větší soulad daného modelu s naměřenými daty, v případě koeficientu determinace je tomu naopak, tedy vyšší hodnota ukazuje na lepší proložení dat modelem. Kvalita modelů byla dále posuzována i na základě vizuálního zhodnocení Q-Q-grafů, grafů reziduí a grafů porovnávající odhadnuté a pozorované hodnoty, které patří mezi důležité diagnostiky regresní analýzy. K výpočtu byl použit program Statistica verze 12 (STATSOFT INC. 2013).

Výsledky parametrizace alometrických modelů uvádí tabulka 8. Ke každé komponentě biomasy je vždy uveden nejjednodušší model s jediným prediktorem – výčetní tloušťkou D , pak nejlepší model se dvěma prediktory a dále nejlepší model se třemi a více prediktory. Přesnější odhady dávají modely s více prediktory, nicméně z praktických důvodů jsou uvedeny i jednodušší modely, protože ne vždy jsou pro strom/porost k dispozici všechny vstupní údaje. Pro případnou kontrolu výpočtu je v Příloze 1 této metodiky uvedena tabulka s kontrolními hodnotami biomasy pro modelový vzorník.

Obr. 2 ilustruje vztah mezi biomasou a výčetní tloušťkou pro celkovou nadzemní biomasu, biomasu kmene a koruny. V grafu jsou vyneseny empirické hodnoty biomasy, které jsou proloženy odvozeným jednoduchým modelem. Podobně obr. 3 zobrazuje empirické hodnoty a příslušné modely pro biomasu koruny, větví a jehličí. Z obrázků je možné vyčíst, jaký je vztah mezi biomasou a výčetní tloušťkou a jak se s výčetní tloušťkou mění poměr mezi jednotlivými komponentami.

Modely pro celkovou nadzemní biomasu

Jak jednoduchý model, tak modely s více prediktory velmi dobře vystihují experimentálně zjištěné hodnoty celkové nadzemní biomasy. Procento vysvětlené variability, vyjádřené koeficientem determinace R^2 , se pohybuje od 98,1 do 99,6 %. Zařazení výšky stromu jako druhého prediktoru do jednoduchého modelu nemělo vliv na zvýšení kvality proložení. Naproti tomu zařazení výčetní základny porostu BA významně přispělo ke snížení AIC i RMSE v porovnání s modelem s jediným prediktorem D . Množství vyprodukované nadzemní biomasy je u douglasky tisolisté pravděpodobně významně ovlivněno hustotou porostu, a tedy mírou kompetice, kterou lze do určité míry postihnout právě hodnotou výčetní základny porostu. Nejlepší model ($R^2 = 99,6$ %) zahrnuje 4 prediktory – výčetní tloušťku D , výšku stromu H , délku koruny CL a výčetní základnu porostu BA . Pro výpočet celkové nadzemní biomasy lze kromě tohoto víceparametrického modelu doporučit i další

dva jednodušší modely, neboť i ty vykazují vysokou těsnost proložení, a podíl vysvětlené variability je 98,8 % pro model se dvěma prediktory, respektive 98,1 % pro model s jedním prediktorem.

Modely pro biomasu kmene

Regresní modely pro biomasu kmene mají vysokou vypovídací schopnost srovnatelnou s modely pro celkovou nadzemní biomasu. Nejtěsnějšího proložení bylo dosaženo modelem se 4 prediktory – výčetní tloušťkou D , výškou stromu H , délkou koruny CL a výčetní základnou porostu BA . Podobně jako u celkové biomasy lze pro výpočet biomasy kmene doporučit kromě tohoto víceparametrového modelu i dva jednodušší modely, které také velmi dobře vystihují experimentální data.

Modely pro biomasu koruny

Vypovídací schopnost modelů pro biomasu koruny je o něco nižší v porovnání s modely pro celkovou biomasu a biomasu kmene. Modely vysvětlují 95,6–97,7 % z celkové variability dat. Zařazení délky koruny CL a výčetní základny porostu BA do jednoduchého modelu významně přispělo ke snížení AIC i RMSE. Parametr výška stromu H nebyl v žádném z testovaných tvarů modelů významný. Biomasu koruny tedy nejlépe vystihuje čtyřparametrový model se třemi prediktory D , CL a BA .

Modely pro biomasu větví

Vypovídací schopnost modelů pro biomasu větví je srovnatelná s modely pro biomasu koruny. Kromě výčetní tloušťky stromu D a výčetní základny porostu BA se jako významný prediktor ukázal také věk T . Nejtěsnějšího proložení bylo dosaženo modelem zahrnujícím zmíněné tři prediktory. Tento model vystihuje 97,4 % variability dat.

Modely pro biomasu jehličí

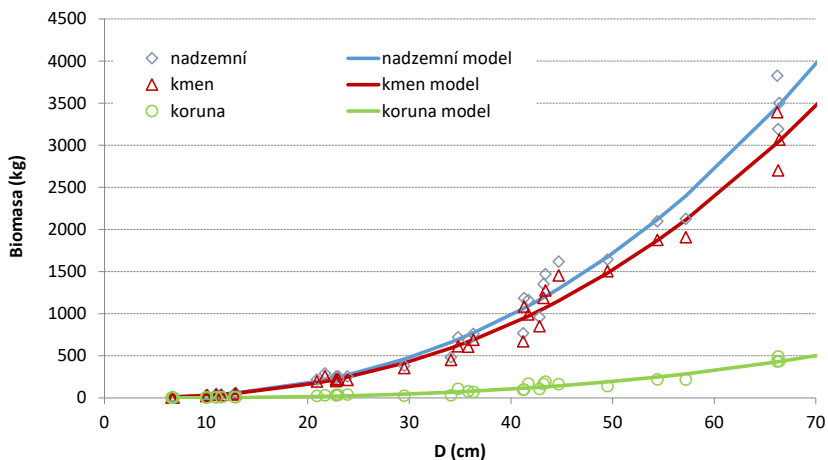
Modely pro biomasu jehličí vykazují nejnižší těsnost proložení empirických dat – koeficient determinace se pohybuje od 81,7 do 89,4 %. Odhad biomasy jehličí jednoduchým modelem je zatížen největší chybou. Přesnější výsledky dává model se dvěma prediktory D a CL . Zařazení výšky stromu H do modelu se dvěma prediktory (D , CL) sice snížilo hodnoty AIC a RMSE, avšak tento pokles již nebyl významný. Biomasu jehličí tedy úspěšně predikuje jak tří- tak čtyřparametrový model se dvěma, resp. třemi prediktory při podobných hodnotách míry těsnosti proložení dat.

Tab. 8: Modely pro výpočet biomasy douglasky tisolisté (v kg sušiny)/Models for biomass estimate of Douglas fir (in kg of dry mass).

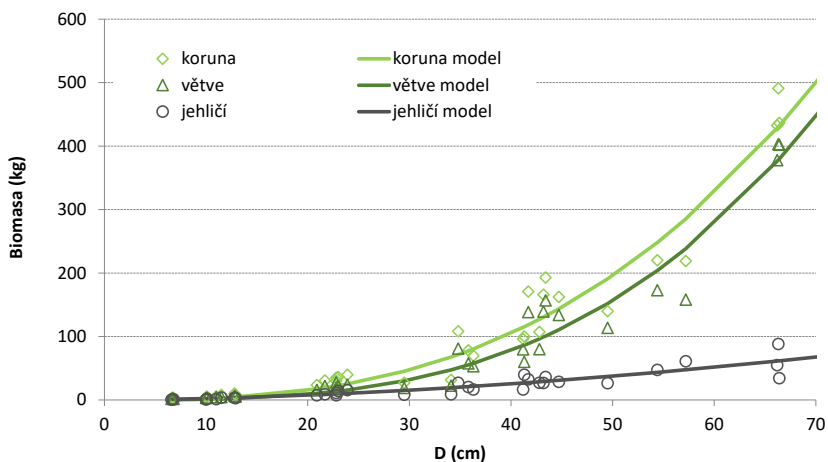
Komponenta biomasy	Model	AIC	RMSE	R ²	Parametry (směrodatná odchylka)				
					P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
Celková nadzemní biomasa	y=P ₀ D ^{P₁}	429,65	148,41	0,981	0,098127 (0,03706)	2,49736 (0,09302)			
	y=P ₀ D ^{P₁} BA ^{P₂}	416,94	118,77	0,988	0,44010 (0,18831)	2,70158 (0,09119)	-0,57823 (0,13137)		
	y=P ₀ D ^{P₁} H ^{P₂} CL ^{P₃} BA ^{P₄}	386,36	70,33	0,996	0,11276 (0,04717)	2,13836 (0,15849)	1,33988 (0,29294)	-0,16163 (0,03113)	-0,79248 (0,08700)
	y=P ₀ D ^{P₁}	425,39	139,14	0,978	0,10091 (0,04010)	2,45879 (0,09795)			
Kmen	y=P ₀ D ^{P₁} BA ^{P₂}	417,54	119,85	0,984	0,40295 (0,19716)	2,64528 (0,10322)	-0,53151 (0,14987)		
	y=P ₀ D ^{P₁} H ^{P₂} CL ^{P₃} BA ^{P₄}	375,73	59,87	0,996	0,08532 (0,03427)	2,00695 (0,15118)	1,54767 (0,28070)	-0,20722 (0,03044)	-0,78149 (0,08351)
	y=P ₀ D ^{P₁}	319,61	28,01	0,956	0,00315 (0,00207)	2,82324 (0,16112)			
	y=P ₀ D ^{P₁} BA ^{P₂}	306,22	22,19	0,973	0,03296 (0,02265)	3,16309 (0,15762)	-0,92579 (0,21509)		
Koruna	y=P ₀ D ^{P₁} CL ^{P₂} BA ^{P₃}	304,48	20,97	0,977	0,02948 (0,01917)	3,03599 (0,16071)	0,15422 (0,07081)	-0,88384 (0,20462)	
	y=P ₀ D ^{P₁}	314,74	26,02	0,949	0,00078 (0,00063)	3,12099 (0,19595)			
	y=P ₀ D ^{P₁} BA ^{P₂}	300,41	20,32	0,970	0,01291 (0,01025)	3,52453 (0,18805)	-1,10357 (0,24984)		
	y=P ₀ D ^{P₁} T ^{P₂} BA ^{P₃}	298,30	19,09	0,974	0,03088 (0,02572)	4,81292 (0,61258)	-0,72245 (0,31725)	-1,77415 (0,38794)	
Jehličí	y=P ₀ D ^{P₁}	243,92	8,90	0,817	0,04063 (0,03466)	1,74592 (0,21418)			
	y=P ₀ D ^{P₁} CL ^{P₂}	229,13	6,90	0,893	0,04227 (0,02640)	1,17386 (0,20742)	0,76013 (0,15654)		
	y=P ₀ (DH) ^{P₁} CL ^{P₂}	228,80	6,87	0,894	0,02091 (0,01507)	0,46179 (0,07972)	0,76077 (0,15449)		

y: biomasa/biomass (kg sušiny); *D*: výčetní tloušťka/diameter at breast height (cm), *H*: výška stromu/tree height (m), *CL*: délka koruny/crown length (m); *T*: věk/age; *BA*: výčetní základna porostu/basal area of the stand (m²/ha); *P*₀, *P*₁, *P*₂, *P*₃, *P*₄: parametry funkce/parameters

Tučně: statisticky významné hodnoty parametrů ($\alpha = 0,05$). Statistically significant values ($\alpha = 0,05$) are **in bold**.



Obr. 2: Celková nadzemní biomasa, biomasa kmene a koruny vynesená proti výčetní tloušťce stromu. Empirické hodnoty biomasy jsou proloženy jednoduchým modelem./ Observed total aboveground, stem and crown biomass plotted against diameter at breast height (scatter graph). Observed biomass is fitted by simple model (displayed as a line).



Obr. 3: Biomasa koruny, větvi a jehličí vynesená proti výčetní tloušťce stromu. Empirické hodnoty biomasy jsou proloženy jednoduchým modelem./ Observed crown, branch and needle biomass plotted against diameter at breast height (scatter graph). Observed biomass is fitted by simple model (displayed as a line).

4 SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ

V České republice nebyly dosud parametrizovány modely pro výpočet nadzemní biomasy douglasky tisolisté. Všechny doposud publikované práce pocházejí ze zahraničí, ať již ze Severní Ameriky, kde je douglaska původním druhem, či z evropských zemí, ve kterých je douglaska sice introdukovanou dřevinou, nicméně je hojněji rozšířena než u nás (např. Německo, Nizozemí). V rámci projektu NAZV QJ1520299 „Uplatnění douglasky tisolisté v lesním hospodářství ČR“ byla ve VÚLHM podrobně analyzována biomasa 33 vzorníků douglasky tisolisté různého věku ze 4 oblastí České republiky. Shromážděná data reprezentují široké rozpětí dendrometrických charakteristik (výčetní tloušťka 6,6–66,4 cm; výška 8,1–44 m) a stanovištních podmínek (11 porostů ze 4 oblastí; nadmořská výška 255–670 m n. m.). Tento datový soubor umožnil parametrizaci modelů pro výpočet nadzemní biomasy douglasky tisolisté v České republice.

5 POPIS UPLATNĚNÍ METODIKY

Metodika bude přímo využita v rámci Národní inventarizace lesů ČR (NIL) při kalkulaci množství biomasy a při odvození zásob uhlíku pro douglasku tisolistou, která patří mezi hospodářsky důležité introdukované dřeviny a její zastoupení na území ČR v následujících letech bude pravděpodobně stoupat. Další uplatnění může metodika nalézt při stanovení množství uhlíku vázaného v biomase lesních porostů pro účely tzv. národních inventur skleníkových plynů, jejichž zpracování je součástí plnění mezinárodních závazků České republiky vyplývajících z Kjótského protokolu (Rámcová úmluva OSN o změně klimatu, 1997). Modely pracují s rutinně zjišťovanými taxačními veličinami a mohou posloužit i v běžné lesnické praxi.

Modely nejsou vhodné pro výpočet biomasy mladých porostů ve stadiu kultur a tyčkovin, neboť tyto nebyly zahrnuty v parametrizačním souboru dat. S nižší přesností odhadu je také nutno počítat pro stromy rostoucí na extrémních stanovištích či solitérní stromy.

6 EKONOMICKÉ ASPEKTY

Ekonomické aspekty využití této metodiky jsou nepřímé a lze je hodnotit především z pohledu užití coby podkladu pro rozhodování v oblasti státní správy. Aplikací odvozených modelů na data NIL bude možné zpřesnit odhad množství biomasy a alokovaného uhlíku v porostech douglasky na území ČR. Výstupy NIL jsou základním podkladem pro státní lesnickou politiku a ovlivňují rozhodování na nejvyšší úrovni státní správy. Spolehlivá kvantifikace biomasy v celostátním měřítku je požadována pro účely tzv. národních inventur skleníkových plynů, což umožňuje České republice dostát mezinárodním závazkům vyplývajícím z Kjótského protokolu.

Rovnice umožňují určit jak celkovou nadzemní biomasu, tak i biomasu jednotlivých komponent, tedy kmene a koruny. Biomasa koruny představuje při běžném způsobu hospodářského využití dřevní hmoty biomasu těžebních zbytků. Právě přesná kvantifikace biomasy těžebních zbytků je významná při kalkulaci odnosu živin z lesních ekosystémů při jejich energetickém využití a pro následné plánování revitalizačních opatření půd, jako jsou biologické či chemické meliorace.

7 DEDIKACE

Metodika je výsledkem řešení výzkumného projektu NAZV QJ1520299 „Uplatnění douglasky tisolisté v lesním hospodářství ČR“. Její zpracování bylo dále podpořeno z institucionální podpory na dlouhodobý rozvoj výzkumné organizace MZE-RO0118.

8 LITERATURA

8.1 Seznam použité související literatury

- BARTELINK H.H. 1996. Allometric relationships on biomass and needle area of Douglas-fir. *Forest Ecology and Management*, 86: 193–203.
- BROADMEADOW M., MATTHEWS R. 2004. Survey methods for Kyoto Protocol monitoring and verification of UK forest carbon stocks. UK Emissions by Sources and Removals by Sinks due to Land Use, Land Use Change and Forestry Activities, Report. CEH, Edinburgh (June 2004).
- EILMANN B., RIGLING A. 2012. Tree-growth analyses to estimate tree species' drought tolerance. *Tree Physiol.*, 32: 178–187.
- FELLER M. C. 1992. Generalized versus site-specific biomass regression equations for *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii* and *Thuja plicata* in Coastal British Columbia. *Bioresource Technology*, 39: 9–16.
- FORRESTER D.I., TACHAUER I.H.H., ANNIGHOEFER P., BARBEITO I., PRETZSCH H., RUIZ-PEINADO R., STARK H., VACCHIANO G., ZLATANOV T., CHAKRABORTY T., SAHA S., SILESHI G.W. 2017. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecology and Management* 396: 160–175
- GHOLZ H. L., GRIER C. C., CAMPBELL A. G., BROWN A. T. 1979. Equations for estimating biomass and leaf area of plants in the Pacific Northwest. Forest Research Laboratory, Oregon State University, Corvallis. Research Paper 41.
- GRIER C. C., LOGAN R. S. 1977. Old-Growth *Pseudotsuga menziesii* communities of a Western Oregon watershed: Biomass distribution and production budgets. *Ecological Monographs*, 47: 373–400.
- HARRISON R. B., TERRY T. A., LICATA C. W., FLAMING B. L., MEADE R., GUERRINI I. A., STRAHM B. D., XUE D., LOLLEY M. R., SIDELL A. R., WAGONER G. L., BRIGGS D., TURNBLOM E. C. 2009. Biomass and stand characteristics of a highly productive mixed Douglas-fir and western hemlock plantation in coastal Washington. *Western Journal of Applied Forestry*, 24: 180–186.
- HEES A.F.M. 2001. Biomass development in unmanaged forests. *Nederlands Bosbouwtijdschrift*, 73(5): 2–5.

- CHOJNACKY D.C., HEATH L.S., JENKINS J.C. 2014. Updated generalized biomass equations for North American tree species. *Forestry*, 87: 129–151.
- IPCC 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. [on-line]. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. [cit. 14. listopadu 2019]. Dostupné na: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- JENKINS C.J., CHOJNACKY D.C., HEATH L.S., BIRDSEY R.A. 2003. National scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science*, 49(1): 12–35
- KANTOR P. 2008. Production potential of Douglas fir at mesotrophic sites of Křtiny training forest enterprise. *Journal of Forest Science*, 54: 321–332.
- KANTOR P., MAREŠ R. 2009. Production potential of Douglas fir in acid sites of Hůrky training forest district, Secondary forestry school in Písek. *Journal of Forest Science*, 55: 312–322.
- KRTKOVÁ E. (ed.) 2018. National greenhouse gas inventory report of the Czech Republic (reported inventories 1990–2016). [on-line]. Prague, Czech Hydrometeorological Institute: 504 s. [cit. 14. listopadu 2019] Dostupné na http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/nis/NIR/CZE_NIR-2018-2016_UNFCCC_ISBN.pdf
- KUBEČEK J., ŠTEFANČÍK I., PODRÁZSKÝ V., LONGAUER R. 2014. Výsledky výzkumu douglasky tisolisté (*Pseudotsuga menziesii*/Mirb./Franco) v České republice a na Slovensku – přehled. *Lesnícky časopis – Forestry Journal*, 60: 116–124.
- MARTINÍK A., KANTOR P. 2006. Výzkum biomasy u douglasky tisolisté – možnosti a cíle. In: Neuhöferová P. (ed.): *Douglaska a jedle obrovská – opomíjené giganti*. Kostelec nad Černými lesy, 12.–13.10.2006, KPL FLE ČZU v Praze a ČZU ŠLP v Kostelci nad Černými lesy, s. 51–55.
- MENGUZZATO G., TABACCHI G. 1986. Prove di diradamento su *Pseudotsuga menziesii* in Calabria. Ambiente, tavole di cubatura e della biomassa epigea. *Ann. Ist. Sper. Selvicoltura*, 17: 255–293.
- MENŠÍK L., KULHAVÝ J., KANTOR P., REMEŠ M. 2009. Humus conditions of stands with the different proportion of Douglas fir in training forest district Hůrky and the Křtiny forest training enterprise. *Journal of Forest Science*, 55: 345–356.
- MONSERUD R. A., MARSHALL J. D. 1999. Allometric crown relations in three northern Idaho conifer species. *Canadian Journal of Forest Research*, 29: 521–535.

- NADEZHDINA N., URBAN J., ČERMÁK J., NADEZHDIN V., KANTOR P. 2014. Comparative study of long-term water uptake of Norway spruce and Douglas-fir in Moravian upland. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62: 1–7.
- NAY S.M., BORMANN B.T. 2014. Site-Specific Douglas-Fir Biomass Equations from the Siskiyou Mountains, Oregon, Compared with Others from the Pacific Northwest. *Forest Science*, 60 (6): 1140–1147.
- NORD-LARSEN T., NIELSEN A. T. 2015. Biomass, stem basic density and expansion factor functions for five exotic conifers grown in Denmark. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 30: 135–153.
- PODRÁZSKÝ V., ČERMÁK R., ZAHRADNÍK D., KOUBA J. 2013. Production of Douglas fir in the Czech Republic based on national forest inventory data. *Journal of Forest Science*, 59: 398–404.
- PODRÁZSKÝ V., KUPKA I., REMEŠ J., KUBEČEK J., PRKNOVÁ H. 2014. Meliorační potenciál douglasky. In: Slodičák M., Novák J. (eds.): *Pěstební postupy pro zavádění douglasky do porostních směsí v podmínkách ČR*. Kostelec n. Černými Lesy, Lesnická práce s.r.o., s. 192–211.
- POUDEL K.P., TEMESGEN H. 2016. Calibration of volume and component biomass equations for Douglas-fir and lodgepole pine in Western Oregon forests. *The Forestry Chronicle*, 92(2): 172–182.
- POUDEL K.P., TEMESGEN H., RADTKE P.J., GRAY A.N. 2019. Estimating individual-tree aboveground biomass of tree species in the western U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research*, 49 (6): 701–714.
- STANDISH J.T., MANNING G.H., DEMAERSCHALK J.K. 1985. Development of biomass equations for British Columbia tree species. Information Report BC-X-264. Pacific Forest Research Centre, 49 s.
- ŠRÁMEK V., NOVOTNÝ R., FADRHOŇSOVÁ V. 2015. Chřadnutí smrkových porostů a stav lesních půd v oblasti severní Moravy a Slezska (PLO 29 a 39). *Zprávy lesnického výzkumu*, 60: 147–153.
- TABACCHI G., COSMO L. D., GASPARINI P. 2011. Aboveground tree volume and phytomass prediction equations for forest species in Italy. *European Journal of Forest Research*, 130: 911–934.
- TER-MIKAELIAN M.T., KORZUKHIN M.D. 1997. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management*, 97: 1–24 (data Marshall and Wang, 1995).

- VÁŠÍČEK J. 2014. Data o douglasce tisolisté v ČR. Lesnická práce, 93: 17.
- VEJPUSTKOVÁ M., ČIHÁK T., ŠRÁMEK V. 2017. Kvantifikace nadzemní biomasy smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) Karst). Lesnický průvodce 3/2017, VÚLHM, 28 s.
- VINŠ B., ŠIKA A. 1981. Srovnání růstové reakce douglasky a smrku na stanovištní faktory v podmínkách ČR. Práce VÚLHM, 58: 7–33.
- VONDERACH CH., KÄNDLER G., DORMANN C.F. 2018. Consistent set of additive biomass functions for eight tree species in Germany fit by nonlinear seemingly unrelated regression. Annals of Forest Science, 75: 49.

8.2 Seznam publikací, které předcházely metodice

- ČIHÁK T., VEJPUSTKOVÁ M., ŠRÁMEK V., MARUŠÁK R. 2012. Vyhodnocení alometrických funkcí pro stanovení nadzemní biomasy smrku ztepilého (*Picea abies* /L./ KARST.) z oblasti Orlických hor. Zprávy lesnického výzkumu, 3: 257–265.
- ČIHÁK T., HLÁSNÝ T., STOLARIKOVÁ R., VEJPUSTKOVÁ M., MARUŠÁK R. 2014. Functions for the aboveground woody biomass in Small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.). Lesnícky časopis - Forestry Journal, 60: 150–158.
- ČIHÁK T., VEJPUSTKOVÁ M. 2017. Parameterisation of allometric equations for quantifying aboveground biomass of Norway spruce (*Picea abies* /L./ KARST.) in the Czech Republic. Journal of Forest Science, 64: 108–117.
- ČIHÁK T., VEJPUSTKOVÁ M., ŠRÁMEK V. 2017. Kvantifikace nadzemní biomasy lesních porostů s pomocí vstupních veličin zjišťovaných bezpilotními letadly. In: Šitková Z., Pavlenda P. (eds.): Dlhodobý ekologický výskum a monitoring lesov: súčasné poznatky a výzvy do budúcnosti. Zborník recenzovaných príspevkov z konferencie, Zvolen 7.-8.11.2017. Národné lesnícke centrum – Lesnícky výskumný ústav Zvolen, s. 37–41.
- VEJPUSTKOVÁ M., ČIHÁK T., ZAHRADNÍK D., ŠRÁMEK V. 2013. Metody stanovení nadzemní biomasy buku (*Fagus sylvatica* L.). Lesnický průvodce 1/2013, VÚLHM, 28 s.

- VEJPUSTKOVÁ M., ZAHRADNÍK D., ČIHÁK T., ŠRÁMEK V. 2015. Models for predicting aboveground biomass of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Czech Republic. *Journal of Forest Science*, 61: 45–54.
- VEJPUSTKOVÁ M., ČIHÁK T., ŠRÁMEK V. 2017. Kvantifikace nadzemní biomasy smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) Karst). *Lesnický průvodce* 3/2017, VÚLHM, 28 s.
- VEJPUSTKOVÁ M., ČIHÁK T., ŠRÁMEK V. 2018. Stanovení nadzemní biomasy smrku ztepilého. *Lesnická práce*, 97(5): 322–325.

MODELS FOR ESTIMATING ABOVEGROUND BIOMASS OF DOUGLAS FIR IN THE CZECH REPUBLIC

Summary

Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) is an important introduced tree species in Europe. Due to fast growth and high biomass production, Douglas fir can play an important role in carbon sequestration in the future. Accurate quantification of biomass and captured carbon requires the existence of local allometric models, which have not yet been parameterised in the Czech Republic.

The biomass of 33 Douglas fir trees was analysed in 2014–2018 within the project “Applying of Douglas fir in forest management of the Czech Republic”. This dataset enabled parameterisation of national models for calculating aboveground biomass of Douglas fir. In addition, the applicability of published foreign models was verified on this independent data set.

An overview of published foreign models for the calculation of total aboveground, stem, crown, branch and needle biomass of Douglas fir is given in tables 1 to 5 in chapter 3.1. For each biomass component, models from both Europe and North America are presented. For each model, the mathematical form of the model, characteristics of the sample trees and country of origin are listed. The applicability of the models in the conditions of the Czech Republic was verified on an independent data of 33 trees collected in the Czech Republic (Fig. 1, Tab. 6). The best models were selected based on results of Wilcoxon pair test and the value of relative mean error of estimate (RME). The models with the lowest RME are recommended for future use (Tab. 7).

The chapter 3.2 provides newly developed national biomass models. The input data file for parameterisation of the models consisted of 33 trees. It is the same set on which published foreign models were verified (see chapter 3.1, Fig. 1, Tab. 6). For each biomass component, we fit an allometric model of the form:

$$y = p_0 x_1^{p_1} x_2^{p_2} \dots x_n^{p_n}$$

Model parameters were estimated by nonlinear least-squares regression procedures. The predictive power of the resulting models was assessed according to the values of the Akaike information criterion (AIC), root mean square error (RMSE) and coefficient of determination (R^2). The results of parameterization are

given in Table 8. For each biomass component, set of three models is presented: (1) the simple model with a single predictor diameter of breast height, (2) the best model with two predictors, and (3) the best model with three or more predictors. Models with more predictors give more accurate estimates, however, for practical reasons, simple models are given, as not all of the necessary input data may always be available. For a possible check of the calculation, a table with control values of the biomass for the model tree is given in Annex 1 of this methodology. Figure 2 illustrates the relationship between biomass and diameter at breast height for total aboveground, stem and crown biomass. The graph plots empirical biomass values, which are interleaved by a derived simple models. Similarly, Figure 3 shows empirical values and corresponding simple models for biomass of crown, branches and needles.

We expect the main application of derived models within the National Forest Inventory and Forest Monitoring Programme of the Czech Republic. However, an accurate estimate cannot be expected for trees growing at extreme sites or for trees growing as solitaires. The models are not recommended for biomass quantification of the youngest trees with a diameter of up to 7 cm.

PŘÍLOHA

Kontrolní výpočet biomasy pro modelový vzorník douglasky při použití modelů z tabulky 8.

Vstupní parametry vzorníku / porostu	
T (roky)	100
D (cm)	45
H (m)	35
CL (m)	15
BA (m ² /ha)	40

Komponenta biomasy	Tvar modelu	Biomasa v sušině (kg)
Celková nadzemní biomasa	$y = p_0 D^{p1}$	1319,6
	$y = p_0 D^{p1} BA^{p2}$	1525,7
	$y = p_0 D^{p1} H^{p2} CL^{p3} BA^{p4}$	1572,2
Biomasa kmene	$y = p_0 D^{p1}$	1171,8
	$y = p_0 D^{p1} BA^{p2}$	1339,5
	$y = p_0 D^{p1} H^{p2} CL^{p3} BA^{p4}$	1389,9
Biomasa koruny	$y = p_0 D^{p1}$	146,5
	$y = p_0 D^{p1} BA^{p2}$	183,7
	$y = p_0 D^{p1} CL^{p2} BA^{p3}$	179,5
Biomasa větví	$y = p_0 D^{p1}$	112,7
	$y = p_0 D^{p1} BA^{p2}$	147,8
	$y = p_0 D^{p1} T^{p2} BA^{p3}$	144,3
Biomasa jehličí	$y = p_0 D^{p1}$	31,3
	$y = p_0 D^{p1} CL^{p2}$	28,9
	$y = p_0 (D^2 H)^{p1} CL^{p2}$	28,5



Sekce odebrané z oddenkové části kmene pro účely stanovení mechanických a fyzikálních vlastností dřeva douglasky. Kmenové kotouče pro určení konvenční hustoty dřeva.



Výzkumný ústav
lesního hospodářství
a myslivosti, v. v. i.

www.vulhm.cz

LESNICKÝ PRŮVODCE 3/2019