SROVNÁNÍ MODELŮ PRO ODHAD PODZEMNÍ BIOMASY HLAVNÍCH LESNÍCH DŘEVIN V PODMÍNKÁCH ČESKÉ REPUBLIKY

COMPARISON OF MODELS FOR ESTIMATION OF BELOWGROUND BIOMASS OF MAIN FOREST TREE SPECIES IN THE CZECH REPUBLIC

Monika Vejpustková[1)] ✉ – Emil Cienciala[2)] – Tomáš Čihák[1)]

[1)]Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i., Strnady 136, 252 02 Jíloviště, Czech Republic

[2)]IFER – Ústav pro výzkum lesních ekosystémů, s. r. o., Čs. armády 655, 254 01 Jílové u Prahy, Czech Republic

✉ *e-mail: vejpustkova@vulhm.cz*

ORCID: M. Vejpustková 0000-0002-6645-7674

E. Cienciala 0000-0002-1254-4254

ABSTRACT

The root biomass represents a significant carbon pool in forest ecosystems. However, directly determining belowground biomass is challenging, and using allometric equations or root-to-shoot ratios is associated with a high degree of uncertainty. This study aimed to review available models for estimating root biomass and based on a comparative analysis, identify suitable allometric equations for quantifying the belowground biomass of major forest tree species in the Czech Republic. A total of 49 models from across Europe were tested for spruce, pine, beech, and oak. Among the equations derived from empirical data, the suitable models for our coniferous species are those by Repola (2009); for beech, the models by Huet et al. (2004) are recommended, and for oak, the model by Offenthaler, Hochbichler (2006) is preferred. The models by Forrester et al. (2017), based on pseudo-data generated from available European models, are applicable to all the tree species studied. The selected equations can be recommended for national forestry reporting (e.g. Forest Europe, UNFCCC).

For more information see Summary at the end of the article.

Klíčová slova: biomasa kořenů; alometrický model; smrk ztepilý; borovice lesní; buk lesní; dub sp.; lesy mírného pásma

Key words: root biomass; alometric model; Norway spruce; Scots pine; European beech; oak sp.; temperate forest

ÚVOD

Informace o množství biomasy lesních porostů, včetně biomasy podzemní, slouží jako primární vstupní veličina při kvantifikaci uhlíku alokovaného v lesních ekosystémech (IPCC 2006; Petersson et al. 2012). Kořenové systémy dřevin představují významnou zásobárnu uhlíku (Offenthaler, Hochbichler 2006; Forrester et al. 2017) a zároveň hrají důležitou roli v dynamice přeměn půdního uhlíku (Rasse et al. 2001).

Kořenovou biomasu je možné zjišťovat experimentálně, nicméně se jedná o technicky a časově velmi náročný výzkum (Addo-Danso et al. 2016; Mauer et al. 2009) a počet analyzovaných vzorníků se pohybuje v jednotkách či desítkách stromů, výjimečně více. Proto se množství podzemní biomasy a alokovaného uhlíku v ní určuje téměř výhradně výpočty založenými na empiricky zjištěných rovnicích a/nebo faktorech (Somogyi et al. 2007). Kořenová biomasa se obvykle odhaduje z parametrů nadzemních částí stromu následujícími způsoby: (1) alometrickými funkcemi, které modelují kořenovou biomasu dané dřeviny na základě dendrometrických charakteristik stromu (výčetní tloušťka, výška) a případně dalších prediktorů (věk, výčetní kruhová základna porostu apod.), (2) jako podíl k nadzemní biomase nazývaný root-shoot ratio (R-poměr; Levy et al. 2004). R-poměry jsou často odvozeny na vyšší agregační úrovni (porost, region, nebo i větší územní celek) než alometrické funkce. Také závisí na menším počtu prediktorů (porostní zásoba, dimenze stromu, věk), případně jsou uváděny generalizované R-poměry pro listnáče a jehličnany. IPCC (2006) doporučuje používat R-poměry jako osvědčený postup pro výpočet změn v zásobách uhlíku pro účely národních inventur skleníkových plynů v sektoru „Využívání krajiny, změny ve využívání krajiny a lesnictví" (LULUCF – Land use, Land-use Change and Forestry).

V případě kořenové biomasy je problematické porovnání výsledků různých studií. Většina prací se zabývá pouze hrubými kořeny (coarse

roots) a biomasu jemných kořenů (fine roots) zanedbává. Rozdělení kořenů mezi hrubé a jemné se děje na základě prahové hodnoty tloušťky kořenů, která však není jednotná. Nejčastěji se používá hodnota 2 mm (např. Bolte et al. 2004; Röhling et al. 2019; Skovsgaard, Nord-Larsen 2012), méně často pak 5 mm (Curiel Yuste et al. 2005; Petersson, Ståhl 2006) nebo 1 mm (Le Goff, Ottorini 2001). Podíl jemných kořenů je velmi variabilní v závislosti na stáří a velikosti stromu. U velkých stromů je podíl biomasy jemných kořenů na celkové biomase stromu přibližně 2 %, naproti tomu u mladých stromků může být až 15 % (Helmisaari et al. 2002). Pokud uvedené hodnoty přepočteme na podíl jemných kořenů na podzemní biomase, pak se pohybují od 15 % do 60 %. Offenthaler a Hochbichler (2006) na základě provedené literární rešerše doporučují používat podíl jemných kořenů na podzemní biomase v rozsahu 15–25 %, což odpovídá 3–5 % z celkové biomasy stromu. Jemné kořeny tedy tvoří nezanedbatelnou část podzemní biomasy. Nejednotný je i přístup k biomase pařezu, kterou některé práce kompletně zahrnují do podzemní biomasy (Bolte et al. 2004; Minerbi, Cescatti 2015; Liepiņš et al. 2018), jiné pouze její podzemní část (Konôpka et al. 2011; Röhling et al. 2019) a některé práce tuto informaci vůbec neuvádí (Mund et al. 2002; Ruiz-Peinado et al. 2011).

Úplně jiná je situace, pokud hodnotíme nikoliv zásobu biomasy jemných kořenů, ale jejich produkci. V tomto případě mohou jemné kořeny tvořit i více než polovinu z celkové produkce biomasy stromu (Helmisaari et al. 2002). Jemné kořeny jsou na rozdíl od ostatních dřevních částí stromu velmi dynamické, jejich životnost se pohybuje od 27 do 656 dní (Hou et al. 2024). Spolu s asimilačními orgány představují pouze krátkodobé zásobníky uhlíku v živé biomase, přičemž po jejich odumření obvykle dochází k rychlé dekompozici a následnému zapojení uhlíku do dalších procesů uhlíkového cyklu. Jemné kořeny tedy mají relativně nízký podíl na celkové biomase stromu, ale velký podíl na čisté primární produkci (Helmisaari et al. 2002; Curiel Yuste et al. 2005).

Cílem této studie bylo (i) získat přehled o dostupných modelech pro kvantifikaci biomasy kořenů, (ii) porovnat mezi sebou výsledky modelů pro podzemní biomasu s využitím reprezentativního souboru vstupních dendrometrických údajů z prvního cyklu Národní inventarizace lesů (NIL 1) a (iii) na základě výsledků komparativní analýzy vytipovat vhodné alometrické rovnice pro kvantifikaci podzemní biomasy hlavních lesních dřevin, které budou využitelné v rámci národního reportingu, zahrnující lesnictví (např. Forest Europe, UNFCCC). Do rešerše byly zahrnuty rovnice a/nebo faktory pro kvantifikaci podzemní biomasy na úrovni jednotlivých stromů nebo porostů.

MATERIÁL A METODIKA

Při výběru alometrických rovnic pro výpočet podzemní biomasy byla zohledněna tato základní kritéria: (1) rovnice musela popisovat alometrický vztah pro jednu z hlavních lesních dřevin v ČR: smrk ztepilý (*Picea abies* L. Karst.), borovice lesní (*Pinus sylvestris* L.), buk lesní (*Fagus sylvatica* L.), dub letní (*Quercus robur* L.) a dub zimní (*Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl.), (2) minimální velikost datového souboru byla 7 stromů a (3) data pocházela z oblasti Evropy (mírný a boreální pás). Do výběru byly zařazeny jak lokální studie, tak meta-analýzy (Wirth et al. 2004; Wutzler et al. 2008). Kromě rovnic odvozených z experimentálně stanovených dat byly též zahrnuty rovnice parametrizované na pseudodatech (Forrester et al. 2017).

Pro vzájemné porovnání odhadů jednotlivými modely jsme využili data NIL 1 (ÚHÚL 2003). Pro všechny dřeviny (smrk, borovici, buk a dub) tak byl k dispozici dostatečně široký soubor měřených stromů (Tab. 1). Pro každý strom s údaji o výčetní tloušťce, výšce, věku a kruhové výčetní základně porostu bylo spočítáno množství podzemní biomasy v kg sušiny podle všech dostupných modelů. Pro každou dřevinu byla testována shoda mezi modely jednofaktorovou analýzou rozptylu (ANOVA). Následný post-hoc test určil, které modely se od sebe významně liší. Testována byla i podobnost daného modelu s průměrnými hodnotami kořenové biomasy, tj. s průměrem hodnot podzemní biomasy vypočtené aplikovanými jednoparametrovými modely pro danou dřevinu s vyloučením modelů s extrémními a odlehlými hodnotami.

R-poměr udává vztah mezi množstvím biomasy kořenů k nadzemní biomase (Levy et al. 2004). Ačkoliv může být tento poměr vyjádřen jak na úrovni stromů, tak na úrovni porostní, mnohem častější je druhá prostorová úroveň (Somogyi et al. 2007). Je to především z toho důvodu, že na úrovni jednotlivých stromů jsou vhodněji uplatněny alometrické rovnice, jejichž odvození je zatíženo menší nejistotou než v případě rozšíření na porostní úroveň. IPCC pro potřeby standardizovaného výkaznictví emisí skleníkových plynů pro sektor Krajiny a lesnictví (LULUCF) připravil doporučené hodnoty R-poměru pro země, které nemají vlastní národně-specifické údaje. Doporučené hodnoty pro R-poměr byly vydány v roce 2006 a následně revidovány v roce 2019 (IPCC 2006, 2019).

VÝSLEDKY A DISKUSE

Přehled vybraných alometrických modelů popisujících vztah mezi dendrometrickými charakteristikami stromu/porostu a biomasou kořenů pro hlavní lesní dřeviny ČR, které splňují výše uvedená základní kritéria pro výběr rovnice, uvádí Tab. 2.

Pro kvantifikaci podzemní biomasy smrku bylo k dispozici celkem 9 prací prezentujících 14 rovnic (Tab. 2). Z oblasti střední Evropy pochází čtyři práce (Mund et al. 2002; Bolte et al. 2004; Wirth et al. 2004; Konôpka et al. 2011), tři práce jsou ze skandinávských zemí a Pobaltí (Petersson, Ståhl 2006; Repola 2009; Liepiņš et al. 2018) a jedna je z jižního Tyrolska (Minerbi, Cescatti 2015). Pro smrk stejně jako pro další dřeviny jsou navíc k dispozici rovnice, jež odvodili Forrester et al. (2017); ty byly parametrizované na pseudodatech generovaných rovnicemi pro podzemní biomasu z oblasti Evropy. Mezi modely pro smrk nebyla prokázána statisticky významná podobnost ($\alpha = 0{,}05$) s výjimkou jednoparametrových modelů Forrester et al. (2017) a Wirth et al. (2004). Statisticky významná podobnost s průměrnými hodnotami byla zjištěna u modelu Repola (2009) (Obr. 1).

Pro borovici bylo k dispozici 9 prací a v nich 12 vhodných alometrických rovnic pro kořenovou biomasu. Nejvíce jsou zastoupeny práce ze Skandinávie a Pobaltí (Laiho, Finér 1996; Vanninen, Mäkelä 2005; Petersson, Ståhl 2006; Repola 2009; Liepins et al. 2018), méně ze střední a západní Evropy (Curiel Yuste et al. 2005; Ruiz-Peinado et al. 2011; Röhling et al. 2019). Mezi modely nebyla prokázána žádná statisticky významná podobnost. Při výpočtu průměrných hodnot biomasy byl vyloučen model Laiho, Finér (1996), který odhaduje vysoké hodnoty podzemní biomasy zejména pro stromy s výčetní tloušťkou nad 30 cm. Průměrným hodnotám se statisticky významně blížily hodnoty modelu Repola (2009) (Obr. 2).

Pro buk v oblasti Evropy bylo nalezeno 8 prací se 14 vhodnými rovnicemi. Převažují práce ze střední a západní Evropy (LeGoff, Ottorini 2001; Bolte et al. 2004; Huet et al. 2004; Wutzler et al. 2008; Ruiz-Peinado et al. 2012; LeGoff, Ottorini 2022), pouze jedna pochází ze Skandinávie (Skovsgaard, Nord-Larsen 2012). V případě buku byla prokázána statisticky významná podobnost mezi modely Forrester et al. (2017), Huet et al. (2004) (pro věk 25 a 145 let) a Wutzler et al. (2008). U rovnic Bolte et al. (2004), Huet et al. (2004) (věk 8 a 81 let) a LeGoff, Ottorini (2001) nebyla na hladině významnosti $\alpha = 0{,}05$ zaznamenána shoda s ostatními modely.

 https://doi.org/10.59269/ZLV/2025/2/758

Tab. 1.
Charakteristika podkladového souboru dat Národní inventarizace lesů.
Characteristics of the National Forest Inventory background data for spruce (smrk), pine (borovice), oak (dub) and beech (buk).

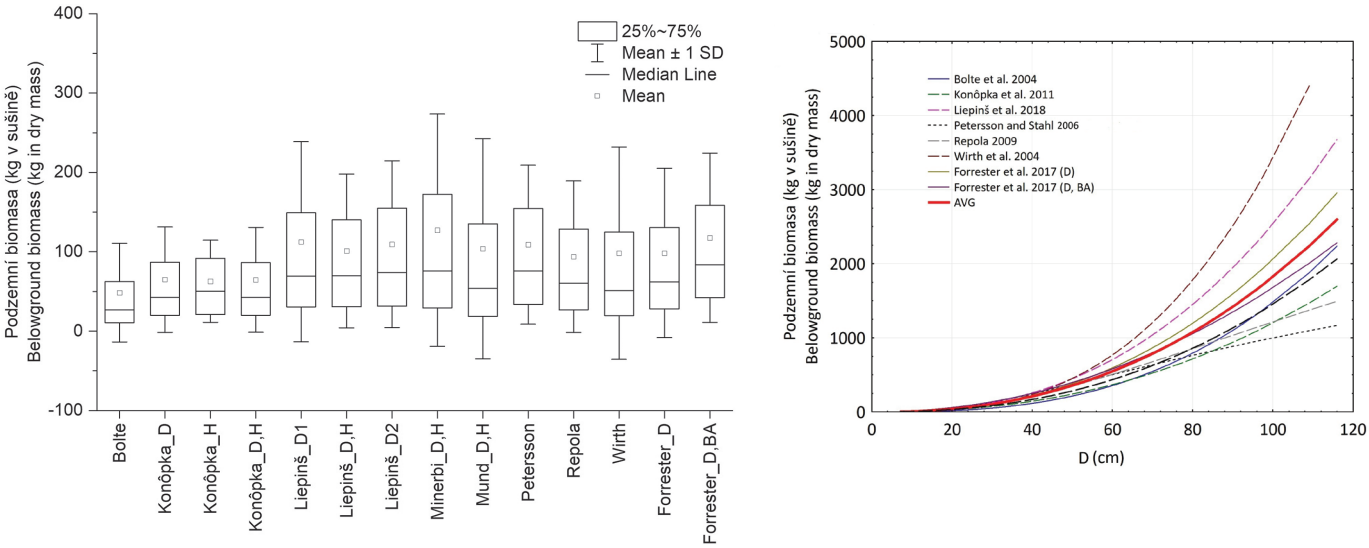
Dřevina/ Species	Počet stromů/ Number of trees	Věk [roky]/ Age [years]	Výčetní tloušťka průměr/max / Diameter at breast height mean/max [cm]	Výška/ Tree height [m]
smrk	172 969	7–265	25,60/116,00	2,30–47,80
borovice	52 248	7–196	24,61/71,00	3,30–41,80
dub	16 651	10–225	25,28/99,90	3,40–45,50
buk	14 822	10–245	26,33/134,00	4,40–54,30

Tab. 2.
Přehled alometrických modelů pro výpočet podzemní biomasy v sušině.
Overview of allometric models for estimating belowground biomass (dry mass) for spruce (smrk), pine (bor), beech (buk) and oak (dub).

Dřevina/ Species	N	Min D (cm)	Max D (cm)	Prediktory/ Predictors	Výpočtový tvar alometrické rovnice/ Computational form of the allometric equation	Autor/Author
smrk	42	16	74	D	Y=EXP(-5.59+2.79*LN(D))*1.04	Bolte et al. 2004
smrk	77	2,6	33,5	D	Y=EXP(-3.634+2.319*LN(D))*1.046	Konôpka et al. 2011
smrk	77	2,6	33,5	H	Y=EXP(-4.555+2.737*LN(H))*1.075	Konôpka et al. 2011
smrk	77	2,6	33,5	D,H	Y=EXP(-3.639+2.306*LN(D)+0.015*LN(H))*1.046	Konôpka et al. 2011
smrk	29	4	30,5	D	Y=EXP(-3.6785+2.5007*LN(D))	Liepinš et al. 2018
smrk	29	4	30,5	D,H	Y=EXP(-3.7973+1.63*LN(D)+0.942*LN(H))	Liepinš et al. 2018
smrk	29	4	30,5	D	Y=EXP(-2.4967+10.8184*(D/(D+14)))	Liepinš et al. 2018
smrk	11	15	70	D,H	Y=0.00632*D^2*H	Minerbi, Cescatti 2015
smrk	25	4,9	47,8	D,H	Y=1.13*(H*(D/100)^2)^0.926+7.33*(H*(D/100)^2)^1.383+35.47*(H*(D/100)^2)^1.063	Mund et al. 2002
smrk	339	0,42	37,7	D	Y=EXP(4.58761+10.44035*((D*10)/((D*10)+138))+0.32308^2/2)/1000	Petersson, Ståhl 2006
smrk	31	1,7	41,7	D	Y=EXP((0.065+0.058)/2-3.964+11.73*((2+1.25*D)/(2+1.25*D+26))) + EXP((0.105+0.114)/2-2.294+10.646*((2+1.25*D)/(2+1.25*D+24)))	Repola 2009
smrk		3,5	52,8	D	Y=EXP(-5.37891+2.92111*LN(D))*1.0554*1.0098	Wirth et al. 2004
smrk	pseudodata	0,4	74	D	Y=EXP(-3.7387+2.4323*LN(D))*1.18250040821357	Forrester et al. 2017
smrk	pseudodata	1,7	41,7	D,BA	Y=EXP(-2.2381+2.0883*LN(D)-0.0104*BA)*1.05547579492479	Forrester et al. 2017
bor	9	18	44	D	Y=0.0035*D^2.8618	Curiel Yuste et al. 2005
bor	16	3	20	D	Y=0.013*D^2.74	Laiho, Finér 1996
bor	37	1,5	45,3	D	Y=EXP(-3.9617+2.4668*LN(D))	Liepinš et al. 2018
bor	37	1,5	45,3	D,H	Y=EXP(-3.9583+1.6686*LN(D)+0.8635*LN(H))	Liepinš et al. 2018
bor	37	1,5	45,3	D,H	Y=EXP(-3.2937+9.0334*(D/(D+14))+0.5353*LN(H))	Liepinš et al. 2018
bor	338	1	45	D	Y=EXP(3.44275+11.06537*((D*10)/((D*10)+113))+0.35449^2/2)/1000	Petersson, Ståhl 2006
bor	35	1,5	38,5	D	Y=EXP((0.01+0.044)/2-6.753+12.681*((2+1.25*D)/(2+1.25*D+12))) + EXP((0.079)/2-5.55+13.468*((2+1.25*D)/(2+1.25*D+15)))	Repola 2009
bor	54	7,2	53,2	D	Y=0.010617*D^2.593122	Röhling et al. 2019
bor	14	6,2	76	D	Y=0.13*D^2	Ruiz-Peinado et al. 2011
bor	117	1,8	42	D,H,A	Y=0.22*(EXP(-11.578+0.814*LN(H*100*(D*10)^2*PI()/4)+0.424*LN(A)))+PRŮMĚR(0.66*EXP(-2.357-1.409*LN(H*100*(D*10)^2*PI()/4)+2.846*LN((D*10)^2*PI()/4))+0.36*EXP(-2.357-1.409*LN(H*100*(D*10)^2*PI()/4)+2.846*LN((D*10)^2*PI()/4)))	Vanninen, Mäkelä 2005
bor	pseudodata	1	76	D	Y=EXP(-3.3713+2.3038*LN(D))*0.950649723440268	Forrester et al. 2017
bor	pseudodata	1,8	44	D,A	Y=EXP(-4.9898+2.1433*LN(D)+0.4428*LN(A))*1.05159154273599	Forrester et al. 2017
buk	27	4	46	D	Y=EXP(-4+2.32*LN(D))*1.08	Bolte et al. 2004
buk	9	0,5	4,7	D	Y=0.00005986* (PI()*D*10)^2.02681	Huet et al. 2004 (age 8)
buk	9	2,2	27,9	D	Y=0.0001303*(PI()*D*10)^2-0.01112*(PI()*D*10)+0.2401	Huet et al. 2004 (age 25)

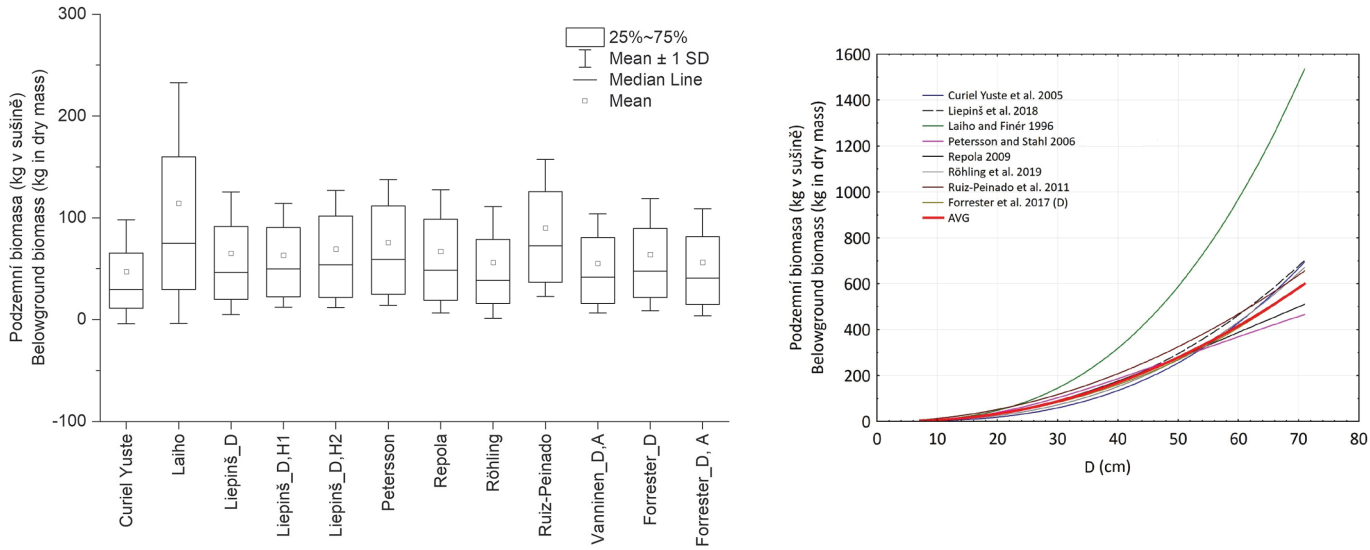
Tab. 2. – pokračování
Přehled alometrických modelů pro výpočet podzemní biomasy v sušině.
Overview of allometric models for estimating belowground biomass (dry mass) for spruce (smrk), pine (bor), beech (buk) and oak (dub).

buk	9	1,4	43,1	D	Y=0.00002* (PI()*D*10)^2.2396	Huet et al. 2004 (age 50)
buk	7	8,6	53,7	D	Y=0.00001641* (PI()*D*10)^2.3141	Huet et al. 2004 (age 81)
buk	7	24,4	79,4	D	Y=10^(-4.5221+2.1985*LOG(PI()*D*10))	Huet et al. 2004 (age 145)
buk	16	3	22	D	Y=EXP(-3.8219+2.5382*LN(D))*EXP(0.1316/2)	LeGoff, Ottorini 2001
buk	40	1,1	63	D,H	Y=EXP(-12.868)*EXP(9.638*(D^2*H)^0.05948)	LeGoff, Ottorini 2022
buk	14	9,5	78,4	D	Y=0.106*D^2	Ruiz-Peinado et al. 2012
buk	66	1	71	D,H	Y=EXP((0.013708+0.040102)/2+8.7695+2.6724*LN(D/100)-0.287*LN(H))	Skovsgaard, Nord-Larsen 2012
buk	48	3	38	D	Y=0.0282*D^2.39	Wutzler et al. 2008
buk	pseudodata	0,5	79,4	D	Y=EXP(-3.3713+2.3424*LN(D))*0.997693174	Forrester et al. 2017
buk	pseudodata	0,5	79,4	D, BA	Y=EXP(-3.1432+2.3794*LN(D)-0.0125*BA)*1.016773849	Forrester et al. 2017
buk	pseudodata	0,5	79,4	D,A	Y=EXP(-2.6182+2.3752*LN(D)-0.2142*LN(A))*1.017010027	Forrester et al. 2017
dub	11	14,6	67,48	D	Y=0.0851* D^2.151	Balboa-Murias et al. 2006
dub	9	8	44	D	Y=0.0103*D^2.5443+1.8984*EXP(0.0856*D)	Curiel Yuste et al. 2005
dub	71	7	17	D	Y=10^(-1.56+2.44*LOG(D))	Drexhage, Colin 2001 and Drexhage et al. 1999
dub	13	20	70	D	Y=19.004922*EXP(0.052544*D)	Krejza et al. 2017
dub	13	20	70	D,H	Y=-83.299156+0.60814*D^2+(-0.014293*D^2*H)	Krejza et al. 2017
dub	47	9,7	49,5	D	Y=EXP(-3.97478+2.52317*LN(D))*1.0517	Offenthaler, Hochbichler 2006
dub	39	7,4	42	D	Y=0.040113*D^2.227842	Röhling et al. 2019
dub	pseudodata	7	67,5	D	Y=EXP(-3.2831+2.3275*LN(D))*0.988154231654512	Forrester et al. 2017
dub	pseudodata	8	67,5	D, BA	Y=EXP(-3.8223+2.2076*LN(D)+0.0275*BA)*0.996828349095421	Forrester et al. 2017

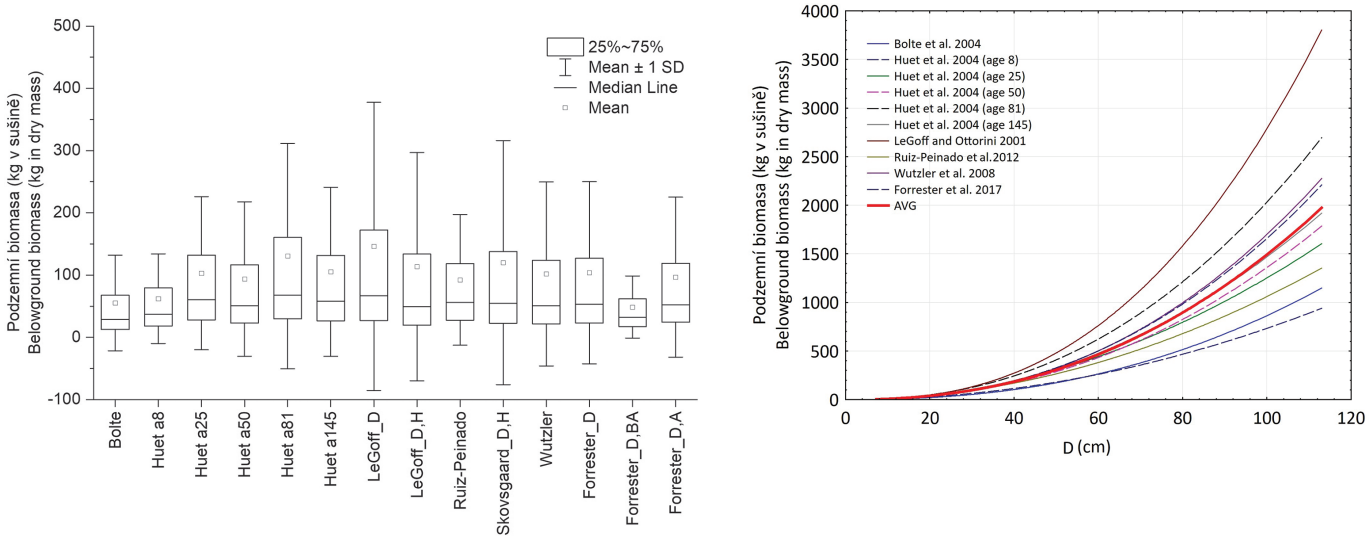


Obr. 1.
Porovnání modelových odhadů podzemní biomasy pro smrk (a) box plot pro všechny modely, (b) porovnání vypočtených hodnot jednoparametrovými modely v závislosti na výčetní tloušťce (D) a průměrná hodnota všech modelů (AVG).
Fig. 1.
Comparison of model estimates for belowground biomass for spruce (a) box plot for all models, (b) comparison of estimated values using single-parameter models based on diameter at breast height (D) and the average value of all models (AVG).

https://doi.org/10.59269/ZLV/2025/2/758



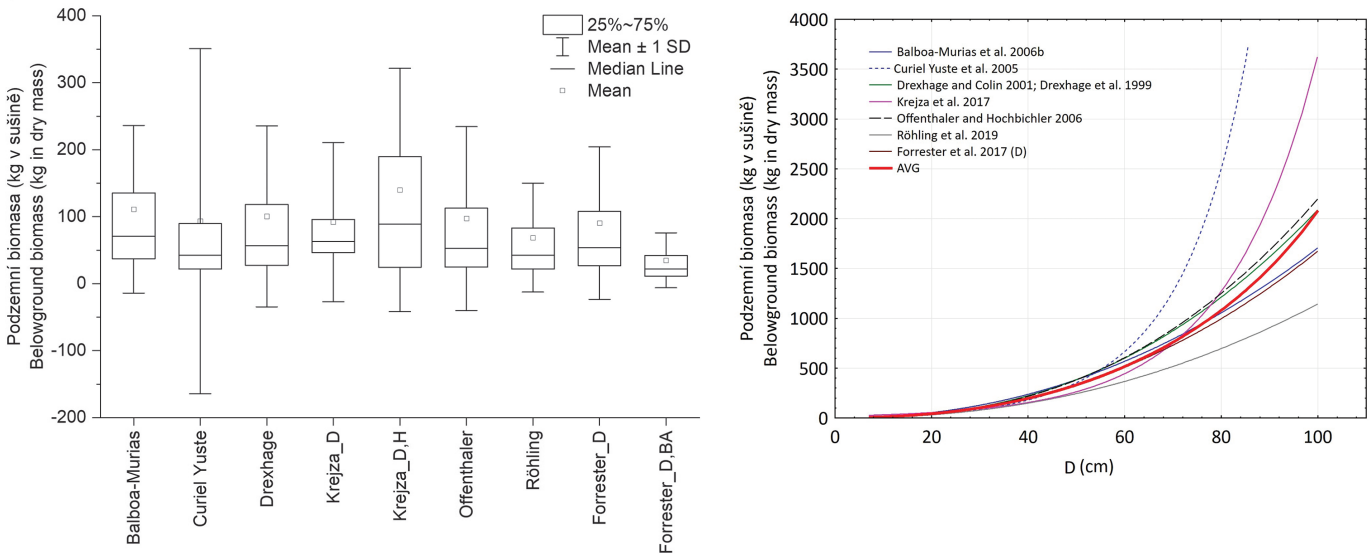
Obr. 2.
Porovnání modelových odhadů podzemní biomasy pro borovici (a) box plot pro všechny modely, (b) porovnání vypočtených hodnot jednoparametrovými modely v závislosti na výčetní tloušťce (D) a průměrná hodnota všech modelů (AVG) s vyloučením modelu Laiho, Finér (1996).
Fig. 2.
Comparison of model estimates for belowground biomass for pine (a) box plot for all models, (b) comparison of estimated values using single-parameter models based on diameter at breast height (D) and the average value of all models (AVG) excluding the model Laiho, Finér (1996).



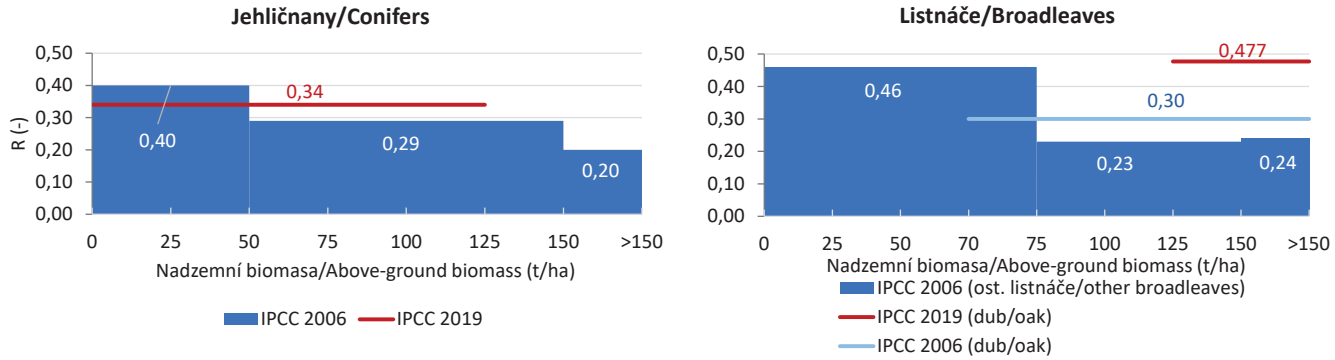
Obr. 3.
Porovnání modelových odhadů podzemní biomasy pro buk (a) box plot pro všechny modely, (b) porovnání vypočtených hodnot jednoparametrovými modely v závislosti na výčetní tloušťce (D) a průměrná hodnota všech modelů (AVG).
Fig. 3.
Comparison of model estimates for belowground biomass for beech (a) box plot for all models, (b) comparison of calculated values using single-parameter models based on diameter at breast height (D) and the average value of all models (AVG).

Průměrnému množství biomasy se nejvíce blížily modely Huet et al. (2004) (pro věk 25 a 145 let) a modely Forrester et al. (2017) a Wutzler et al. (2008) (Obr. 3).

Nejméně zdrojů bylo nalezeno pro dub, a to 7 prací (9 rovnic), z toho tři práce z oblasti střední Evropy (Offenthaler, Hochbichler 2006; Krejza et al. 2017; Röhling et al. 2019) a tři ze západní Evropy (Drexhage, Colin 2001; Curiel Yuste et al. 2005; Balboa-Murias et al. 2006). Průměrné hodnoty biomasy byly u dubu vypočteny s vyloučením modelu Curiel Yuste et al. (2005), který zejména pro stromy větších dimenzí odhaduje vysoce nadprůměrné hodnoty biomasy. Statisticky významná podobnost s průměrnými hodnotami podzemní biomasy byla zjištěna u modelů Krejza et al. (2017), Offenthaler, Hochbichler (2006) a Forrester et al. (2017) (Obr. 4). S žádným z ostatních modelů se neshodují rovnice Balboa-Murias et al. 2006 a Röhling et al. 2019.



Obr. 4.
Porovnání modelových odhadů podzemní biomasy pro dub (a) box plot pro všechny modely, (b) porovnání vypočtených hodnot jednoparametrovými modely v závislosti na výčetní tloušťce (D) a průměrná hodnota všech modelů (AVG) s vyloučením modelu Curiel Yuste et al. (2005).
Fig. 4.
Comparison of model estimates for belowground biomass for oak (a) box plot for all models, (b) comparison of estimated values using single-parameter models based on diameter at breast height (D) and the average value of all models (AVG). excluding the model Curiel Yuste et al. (2005).



Obr. 5.
Doporučené faktory podle zásad dobré praxe IPCC (2006, 2019) v závislosti na zásobě nadzemní biomasy pro jehličnaté (vlevo) a listnaté porosty v oblasti mírného pásma Evropy.
Fig. 5.
Recommended factors according to the IPCC Good Practice Guidelines (2006, 2019) based on aboveground biomass stock for coniferous (left) and broadleaf stands in the temperate zone of Europe.

https://doi.org/10.59269/ZLV/2025/2/758

Většina publikovaných modelů využívá k odhadu podzemní biomasy jediného (nejvýznamnějšího) prediktoru – výčetní tloušťky (D; cm). Někteří autoři odvodili též rovnice s dalšími proměnnými, nejčastěji bývá zahrnuta výška stromu (H; m) a věk (A), méně často výčetní kruhová základna (BA; $m^2.ha^{-1}$). Přidáním dalšího prediktoru však většinou nedochází k významnému zlepšení predikční schopnosti modelů (Konôpka et al. 2011; Forrester et al. 2017).

Vzhledem k neexistenci spolehlivého verifikačního souboru dat pro podzemní biomasu byla při výběru modelu použitelného pro kvantifikaci podzemní biomasy hlavních lesních dřevin v ČR zohledněna podobnost výsledků modelu s průměrnými hodnotami biomasy pro danou dřevinu, odvozenými ze všech dostupných jednoparametrových modelů oproštěných od modelů s extrémními a odlehlými hodnotami a dále počet a dimenze vzorníků, na kterých byl model parametrizován. Vybrány byly modely, pro něž analýza variance prokázala statisticky významnou podobnost s průměrem a které byly parametrizované na co největším počtu vzorníků širokého rozpětí dimenzí. Pro kořenovou biomasu smrku dává výsledky blízké průměru model Repola (2009). Model stejného autora lze doporučit i pro borovici. Pro buk vychází nejblíže průměrným hodnotám modely Huet et al. (2004), pro dub pak model Offenthaler, Hochbichler (2006). Pro všechny dřeviny jsou také použitelné modely Forrester et al. (2017), odvozené na pseudodatech generovaných z dostupných modelů.

Doporučené údaje poměru R (IPCC 2006, 2019), které jsou relevantní pro lesní ekosystémy v oblasti mírného pásma Evropy, tj. jsou použitelné i pro Českou republiku, shrnuje obr. 5. Je zřejmé, že poměry jsou obecně vyšší pro mladší porosty s menší zásobou nadzemní biomasy, zatímco postupem věku a hmotnatosti porostů se poměr R snižuje. Výjimkou je vysoká hodnota R = 0,477 pro listnáče (Obr. 5 vpravo) představující hodnotu pro přirozené porosty dubu, které se u nás téměř nevyskytují.

Je nutno upozornit, že použití standardních poměrů R je podle IPCC pouze pomůckou pro ty případy, kdy nejsou k dispozici národně specifické údaje a studie, které by tyto vztahy zpřesnily. Díky obecné heterogenitě ekosystémů lze při použití standardních faktorů R podle IPCC očekávat značnou nejistotu. Na rozdíl od nadzemní biomasy, přímé empirické údaje k podzemní biomase jsou značně omezené a dokládají především závislost R s věkem a dimenzemi stromů (Marklund 1988; Lehtonen et al. 2004; Peichl, Arain 2007; Krejza et al. 2017). Vliv nezávislých růstových podmínek (mimo věk/dimenze stromů a porostní situaci) v těchto studiích není pro podzemní biomasu explicitně hodnocen. Tyto studie zároveň dokládají i obecně vyšší nejistoty odhadů ve srovnání s komponenty nadzemní biomasy. I z těchto důvodů jsou standardní poměry R podle IPCC (2006, 2019) vhodnou referencí k verifikaci a porovnání údajů z lokálních studií a odhadů na bázi alometrických rovnic meta-studií aplikovatelné v lokálních podmínkách.

ZÁVĚR

Na základě podkladové databáze relevantní literatury byla zpracována komparativní analýza dostupných modelů pro odhad množství podzemní biomasy a uhlíku pro hlavní lesní dřeviny České republiky. Modely byly testovány s využitím aplikační matice dat NIL1, která reprezentativně postihuje biometrii stromů v ČR. Výsledky modelů nebylo možné verifikovat na nezávislém souboru dat k podzemní biomase, byla proto zvolena metoda vzájemného porovnání modelů a srovnání s průměrem. Divergence mezi modely je patrná především u stromů větších dimenzí s výčetní tloušťkou nad 60 cm.

Z modelů odvozených na empirických datech jsou pro smrk a borovici v našich podmínkách využitelné modely Repola (2009), pro buk vychází nejlépe modely autorů Huet et al. (2004), pro dub pak model Offenthaler, Hochbichler (2006). Pro všechny dřeviny je možné použít také rovnice Forrester et al. (2017) odvozené na pseudodatech generovaných evropskými modely na podzemní biomasu. Výše zmíněné rovnice lze doporučit pro národní reporting zahrnující lesnictví (např. Forest Europe, UNFCCC).

Poděkování:

Příspěvek vznikl v rámci řešení výzkumného projektu TAČR SS06010148 a částečně byl financován z poskytnuté institucionální podpory MZe ČR MZE-RO0123.

LITERATURA

Addo-Danso S.D., Prescott C.E., Smith A.R. 2016. Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies: A review. Forest Ecology and Management, 359: 332–351. DOI: 10.1016/j.foreco.2015.08.015

Balboa-Murias M.Á., Rojo A., Álvarez J.G., Merino A. 2006. Carbon and nutrient stocks in mature *Quercus robur* L. stands in NW Spain. Annals of Forest Science, 63: 557–565. DOI: 10.1051/forest:2006038

Bolte A., Rahmann T., Kuhr M., Pogoda P., Murach D., Gadow K.V. 2004. Relationships between tree dimension and coarse root biomass in mixed stands of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.). Plant and Soil, 264: 1–11. DOI: 10.1023/B:PLSO.0000047777.23344.a3

Curiel Yuste J., Konôpka B., Janssens I. A., Coenen K., Xiao C.W., Ceulemans R. 2005. Contrasting net primary productivity and carbon distribution between neighboring stands of *Quercus robur* and *Pinus sylvestris*. Tree Physiology, 25: 701–712. DOI: 10.1093/treephys/25.6.701

Drexhage M., Colin F. 2001. Estimating root system biomass from breast-height diameters. Forestry, 74: 491–497. DOI: 10.1093/forestry/74.5.491

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. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.04.011

Helmisaari H.S., Makkonen K., Kellomäki S., Valtonen E., Mälkönen E. 2002. Below- and above-ground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in eastern Finland. Forest Ecology and Management, 165: 317–326. DOI: 10.1016/S0378-1127(01)00648-X

Hou J., McCormack M.L., Reich P.B., Sun T., Phillips R.P., Lambers H., Chen H.Y.H., Ding Y., Comas L.H., Valverde-Barrantes O.J., Solly E.F., Freschet G.T. 2024. Linking fine root lifespan to root chemical and morphological traits – A global analysis. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), 121: e2320623121. DOI: 10.1073/pnas.2320623121

Huet S., Forgeard F., Nys C. 2004. Above-and belowground distribution of dry matter and carbon biomass of Atlantic beech (*Fagus sylvatica* L.) in a time sequence. Annals of Forest Science, 61: 683–694. DOI: 10.1051/forest:2004063

IPCC 2006. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). IGES: 20 s. Dostupné na/Available on: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/support/Primer_2006GLs.pdf

IPCC 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [online]. The Intergovernmental Panel on Climate Change [cit. 2024-10-04] Dostupné na/Available on: https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/

Konôpka B., Pajtík J., Šebeň V., Lukac M. 2011. Belowground biomass functions and expansion factors in high elevation Norway spruce. Forestry, 84: 41–48. DOI: 10.1093/FORESTRY/CPQ042

Krejza J., Světlík J., Bednář P. 2017. Allometric relationship and biomass expansion factors (BEFs) for above- and below-ground biomass prediction and stem volume estimation for ash (*Fraxinus excelsior* L.) and oak (*Quercus robur* L.). Trees, 31: 1303–1316. DOI: 10.1007/s00468-017-1549-z

Laiho R., Finér L. 1996. Changes in root biomass after water-level drawdown on pine mires in southern Finland. Scandinavian Journal of Forest Research, 11: 251–260. DOI: 10.1080/02827589609382934

Le Goff N., Ottorini J.M. 2001. Root biomass and biomass increment in a beech (*Fagus sylvatica* L.) stand in North-East France. Annals of Forest Science, 58: 1–13.

Le Goff N., Ottorini J. M. 2022. Biomass distribution, allocation and growth efficiency in European beech trees of different ages in pure even-aged stands in northeast France. Central European Forestry Journal, 68: 117–138. DOI:10.2478/forj-2022-0008

Lehtonen A., Mäkipää R., Heikkinen J., Sievänen R., Liski J. 2004. Biomass expansion factors (BEF) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests, Forest Ecology and Management, 188: 211–224. DOI: 10.1016/j.foreco.2003.07.008

Levy P.E., Hale S.E., Nicoll B.C. 2004. Biomass expansion factors and root : shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain. Forestry, 77: 421–430. DOI: 10.1093/forestry/77.5.421

Liepiņš J., Lazdiņš A., Liepiņš K. 2018. Equations for estimating above-and belowground biomass of Norway spruce, Scots pine, birch spp. and European aspen in Latvia. Scandinavian Journal of Forest Research, 33: 58–70. DOI: 10.1080/02827581.2017.1337923

Marklund L.G. 1988. Biomassafunktioner för tall, gran och björk i Sverige. Sveriges Lantbruksuniversitet, Rapporter-Skog 45: 1–73.

Mauer O., Palátová E., Beran F. 2009. Root system development in two provenances of *Picea abies* at two different sites. Dendrobiology, 61 (Supplement): 25–32.

Minerbi S., Cescatti A. 2015. Tree volume and biomass equations for *Picea abies* and *Larix decidua* in South Tyrol. Forest Observer, 7: 5–34.

Mund M., Kummetz E., Hein M., Bauer G. A., Schulze E-D. 2002. Growth and carbon stocks of a spruce forest chronosequence in Central Europe. Forest Ecology and Management, 171 (3): 275–296. DOI: 10.1016/S0378-1127(01)00788-5

Offenthaler I., Hochbichler E. 2006. Estimation of root biomass of Austrian forest tree species. Austrian Journal of Forest Science, 123: 65–86.

Peichl M., Arain M.A. 2007. Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests. Forest Ecology and Management, 253(1–3): 68–80. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.07.003

Petersson H., Ståhl G. 2006. Functions for below-ground biomass of *Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Betula pendula* and *Betula pubescens* in Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research, 21: 84–93. DOI: 10.1080/14004080500486864

Petersson H., Holm S., Ståhl G., Alger D., Fridman J., Lehtonen A., Lundström A., Mäkipää R. 2012. Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study. Forest Ecology and Management, 270: 78–84. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.01.004

Rasse D.P., Longdoz B., Ceulemans R. 2001. TRAP: a modelling approach to below-ground carbon allocation in temperate forests. Plant and Soil, 229: 281–293. DOI: 10.1023/A:1004832119820

Repola J. 2009. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland. Silva Fennica, 43: 625–647. DOI: 10.14214/sf.184

Röhling S., Demant B., Dunger K., Neubauer M., Oehmichen K., Riedel T., Stümer W. 2019. Equations for estimating belowground biomass of silver birch, oak and Scots pine in Germany. iForest, 12: 166–172. DOI: 10.3832/ifor2862-012

Ruiz-Peinado R., Rio M.del, Montero G. 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. Forest Systems, 20: 176–188. DOI: 10.5424/fs/2011201-11643

Ruiz-Peinado R., Montero G., Rio M. del 2012. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. Forest Systems, 21: 42–52. DOI: 10.5424/fs/2112211-02193

Skovsgaard J.P., Nord-Larsen T. 2012. Biomass, basic density and biomass expansion factor functions for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in Denmark. European Journal of Forest Research, 131: 1035–1053. DOI: 10.1007/s10342-011-0575-4

Somogyi Z., Cienciala E., Mäkipää R., Muukkonen P., Lehtonen A., Weiss P. 2007. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. European Journal of Forest Research, 126: 197–207. DOI: 10.1007/s10342-006-0125-7

ÚHÚL 2003. Inventarizace lesů v České republice 2001–2004: Inventarizace lesů v České republice, Metodika venkovního sběru dat, Verze: 6.0; platnost od 1.7.2003 [online]. Brandýs nad Labem: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem [cit. 2024-01-18]. Dostupné na/Available on: https://nil.uhul.cz/ke-stazeni

Vanninen P., Mäkelä A. 2005. Carbon budget for Scots pine trees: effects of size, competition and site fertility on growth allocation and production. Tree Physiology, 25: 17–30. DOI: 10.1093/treephys/25.1.17

Wirth Ch., Schumacher J., Schulze E. 2004. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. Tree Physiology, 24: 121–139. DOI: 10.1093/treephys/24.2.121

Wutzler T., Wirth C., Schumacher J. 2008. Generic biomass function for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Central Europe: predictions and components of uncertainty. Canadian Journal of Forest Research, 38: 1661–1675. DOI: 10.1139/X07-194

COMPARISON OF MODELS FOR ESTIMATION OF BELOWGROUND BIOMASS OF MAIN FOREST TREE SPECIES IN THE CZECH REPUBLIC

SUMMARY

Information on forest biomass, including belowground biomass, serves as a primary input variable for estimating carbon allocated in forest ecosystems (IPCC 2006; Petersson et al. 2012). Tree root systems represent a significant carbon pool (Offenthaler, Hochbichler 2006; Forrester et al. 2017) and play an important role in the dynamics of soil carbon transformation (Rasse et al. 2001). Root biomass can be determined experimentally, though this research is both technically demanding and time-consuming (Mauer et al. 2009; Addo-Danso et al. 2016). Therefore, the amount of belowground biomass and the allocated carbon is almost exclusively determined through calculations based on allometric equations and/or factors (Somogyi et al. 2007).

The aim of this study was (i) to review the available models for quantifying root biomass, (ii) to compare the results of belowground biomass models using a representative dataset of dendrometric inputs from the first cycle of the National Forest Inventory (NFI 1), and (iii) to identify suitable allometric equations for quantifying the belowground biomass of the main forest tree species in the Czech Republic.

The following basic criteria were considered when selecting allometric equations for calculating belowground biomass: (1) the equation had to describe an allometric relationship for one of the main forest tree species in the Czech Republic (spruce, pine, beech, oak), (2) the minimum dataset size was seven trees, and (3) the data originated from Europe (temperate and boreal zones). In addition to equations derived from experimental data, equations parameterized on pseudo-data (Forrester et al. 2017) were also included.

For comparing estimates across models, data from NFI 1 (ÚHÚL 2003) were used (Table 1). For each tree, with data on diameter at breast height, height, age, and stand basal area, the amount of belowground biomass in kilograms of dry matter was calculated using all available models. Due to the absence of a reliable verification dataset for belowground biomass, the best model for each tree species was selected by testing the agreement between models and the similarity of a given model with the average root biomass values, i.e. the average belowground biomass values calculated from all applied single-parameter models for the given species excluding models that produce extreme and outlier values.

Summary of the selected allometric models for estimating belowground biomass is provided in Table 2. For spruce, a total of 14 equations were selected. No statistically significant similarity was found between spruce models ($\alpha = 0.05$), except for the single-parameter models by Forrester et al. (2017) and Wirth et al. (2004). A statistically significant similarity with average values was found for the Repola (2009) model (Fig. 1). For pine, 12 suitable allometric equations for root biomass were available. No statistically significant similarity was found between the models. The Laiho, Finér (1996) model, which provides extreme outliers, was excluded from the average biomass calculations. The Repola (2009) model's estimates were significantly close to the average values (Fig. 2). For beech, 14 equations were found across Europe. The models by Forrester et al. (2017), Huet et al. (2004) (for ages 25 and 145 years), and Wutzler et al. (2008) provided similar results. The Huet et al. (2004) models (for ages 25 and 145 years) and the Forrester et al. (2017) and Wutzler et al. (2008) models were closest to the average biomass amounts (Fig. 3). The fewest literary sources were found for oak, with 9 equations. Average biomass values for oak were calculated after excluding the Curiel Yuste et al. (2005) model, which gives highly outlying values for trees of larger dimensions. Statistically significant similarity with average belowground biomass values was found for the models by Krejza et al. (2017), Offenthaler, Hochbichler (2006), and Forrester et al. (2017) (Fig. 4).

In addition to biomass equations, root-to-shoot ratios (R-ratios) are presented (Fig. 5). R-ratios are often derived at higher aggregate levels (stand, region, or even larger geographical areas) than allometric functions. They also depend on fewer predictors (stand stock, tree dimensions, age), or generalized R-ratios are reported for broadleaves and conifers. The IPCC (2006) recommends using R-ratios as best practice for calculating changes in carbon stocks for national greenhouse gas inventories in the Land Use, Land-Use Change, and Forestry (LULUCF) sector.

Our study shows that the Repola (2009) model appears to be suitable for estimating the root biomass of spruce. The model by the same author is usable for pine. For quantifying the belowground biomass of beech, the Huet et al. (2004) models are recommended while for oak, the Offenthaler, Hochbichler (2006) model is appropriate. The models by Forrester et al. (2017), based on pseudo-data generated from available European models, are applicable for all tree species. The selected equations can be recommended for national forestry reporting (e.g. Forest Europe, UNFCCC).

Zasláno/Received: 12.11.2024

Přijato do tisku/Accepted: 24. 05. 2025