

CHYBA ODHADU NADZEMNÍ BIOMASY V PŘÍPADĚ POUŽITÍ LOKÁLNÍCH ALOMETRICKÝCH ROVNIC NA PŘÍKLADU DVOU MLADÝCH SMRKOVÝCH POROSTŮ

ERROR OF ABOVE-GROUND BIOMASS ESTIMATION BY USING SITE SPECIFIC ALLOMETRIC EQUATIONS ON THE EXAMPLE OF TWO YOUNG SPRUCE STANDS

MICHAL BELLAN^{1, 2)} - JAN SVĚTLÍK¹⁾ ✉ - JAN KREJZA^{1, 2)} - JIŘÍ ROSÍK¹⁾ - IRENA MARKOVÁ¹⁾

¹⁾Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Centrum MendelGlobe - Změna klimatu a řízené ekosystémy, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Czech Republic

²⁾Global Change Research Institute CAS, Bělidla 4a, 603 00 Brno, Czech Republic

✉ e-mail: jan.svetlik@mendelu.cz

ABSTRACT

The paper presents differences in estimation of biomass of individual aboveground organs (stem, living branches, dead branches, needles and tree crown) and differences in selected dendrometric parameters of sample trees between young spruce stand growing on the site of acid edaphic categories at the study site of Bedřichov (Českomoravská vrchovina Highland, Czech Republic) and young spruce stand growing on the site of edaphic categories fresh at the study site of Rájec, (Drahanská vrchovina Highland, Czech Republic). Although the stands were of the same age, significant differences were observed between the tree components estimated by the allometric equations and also between dendrometric parameters of these stands. The allometric equations determined for the stem volume estimation for the stand at the Rájec moderately overestimated (on average 5.3%) really determined values for the stand at the Bedřichov. The highest mean relative error of estimation (about 50%) was determined for needle – and living branches biomass. Compared young spruce stands were very different in terms of individual organs of living tree crown biomass. This fact was confirmed by comparison of the aggregate “Rájec model” for the living tree crown with the Bedřichov (determined overestimation of values more than 20%). Differences between compared stands were also found for the stem biomass.

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

Klíčová slova: alometrie; odhad biomasy; komponenty stromu; smrk ztepilý; vrchovinná oblast

Key words: allometry; biomass estimation; tree components; Norway spruce; highland region

ÚVOD

Přijetím Kjótského protokolu v roce 1997 a následně Pařížské dohody v roce 2015, v rámci Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu vznikla ratifikujícím zemím (mezi nimi i České republice) povinnost snížit emise skleníkových plynů a zachovávat a zvýšit propady a úložiště atmosférického uhlíku (včetně lesů). Ratifikující země musí dokládat mj. odhady plochy lesů, odhady uhlíkové zásoby v lesích, odhady změn biomasy lesních dřevin a návrhy mitigačních a adaptačních opatření v lesním hospodářství. Nutnost předkládání těchto informací zvýšil zájem o zpřesnění odhadů tvorby nové biomasy lesních dřevin, neboť časové a prostorové změny ukládání uhlíku v lesních porostech s různou strukturou a závislosti mezi dendrometrickými parametry a biomasou lesních dřevin jsou i dnes řešeny nedostatečně (LÖWE et al. 2000; LEHTONEN et al. 2007; ALBAUGH et al. 2009; MAREK et al. 2011).

Růstové či výnosové tabulky jsou v řadě evropských zemí zpravidla odvozovány pouze pro hlavní hospodářské dřeviny, které většinou rostou v lesních porostech rozdělených do věkových tříd (ZIANIS et al. 2005). Nejpřesnější metodou pro stanovení nadzemní biomasy lesních dřevin je destruktivní metoda, tedy pokácení a následné zvážení všech stromů. To je ovšem velmi pracné a časově i finančně náročné (LIU, WESTMAN 2009). Pro odhad zásob nadzemní biomasy se proto často využívají alometrické rovnice (např. MARKLUND 1987, 1988; ZIANIS et al. 2005; MAREK et al. 2011; ČIHÁK et al. 2012; SVĚTLÍK et al. 2016) nebo expanzní faktory (např. LEHTONEN et al. 2004; PETERSSON et al. 2012). Alometrie se obecně zabývá studiem proměnlivých proporcí rozměrů živých organismů, spojených se změnou jeho velikosti (LANDE 1979; WEHNER et al. 2007; WEST 2009). Na základě podrobného rozboru vzorníkových stromů se stanovují algoritmy (regresní rovnice), které umožňují časově, finančně a technicky méně náročný odhad

tvorby nové nadzemní biomasy lesních dřevin (WEST 2009). Alometrické rovnice popisují nejčastěji vztah mezi jednoduše měřitelnými dendrometrickými parametry kmene či koruny stromu a biomasou jednotlivých orgánů stromu, případně biomasou celého stromu. Nejčastěji používanými, jednoduše měřitelnými dendrometrickými parametry bývá výčetní tloušťka stromu s kůrou a výška stromu (SATO 1982; LIU, WESTMAN 2009).

Kvantifikace biomasy lesních dřevin v určité lokalitě je nejpřesnější při použití lokálních alometrických rovnic. Další možností je použití obecných modelů pro odhad biomasy lesních dřevin, které jsou sestavovány z rozsáhlého souboru dat. Jako příklad lze uvést modely podle Wirtha (WIRTH et al. 2004), který seřadil alometrické rovnice od jednoduchých, kde je biomasa odhadována pouze na základě jednoho měřitelného dendrometrického parametru (výčetní tloušťka), po složitější, kde kromě zmíněného parametru vstupují do odhadu zásoby biomasy ještě další parametry (např. výška stromu, délka živé koruny stromu, věk stromu, nadmořská výška nebo bonita stanoviště). Případná nesprávnost a nepřesnost vytvořených algoritmů na lokální, regionální i národní úrovni je považována za jeden z hlavních nedostatků při hodnocení biomasy porostů lesních dřevin a bilance uhlíku v těchto porostech (LEHTONEN et al. 2007). Proto je nutné i nadále stanovovat nové alometrické rovnice pro odhad nadzemní biomasy různých porostů lesních dřevin, aby modelování množství biomasy a bilance uhlíku v těchto porostech bylo co nejpřesnější.

Cílem této práce bylo sestavení sady alometrických rovnic pro odhad jednotlivých složek (kmen, živé a mrtvé větve, jehlice, koruna) nadzemní biomasy mladého smrkového porostu v Rájci (Drahanská vrchovina) a posouzení jejich použitelnosti ve stejně starém smrkovém porostu v Bedřichově (Českomoravská vrchovina), který roste ve stejné nadmořské výšce a podobných klimatických podmínkách, ale na odlišném edafickém stanovišti.

MATERIÁL A METODIKA

Experiment zhodnocení možnosti uplatnění lokálních alometrických rovnic pro odhad nadzemní biomasy (kg sušiny) probíhal na LS Černá Hora, konkrétně ve dvou smrkových porostech ve věku 38 let. Pro tento experiment byl vybrán smrkový porost (49°26'44" N, 16°41'49" E) na výzkumné ploše Rájec (Drahanská vrchovina) zařazené do mezinárodní sítě ILTER (International Long Term Ecological Research Network) a smrkový porost (49°28'58" N, 16°28'17" E) na výzkumné ploše Bedřichov (Českomoravská vrchovina) založené v oblasti původních Mariabrunnských ploch (plochy historicky založené výzkumným ústavem v Mariabrunnu). Smrkový porost „Rájec“ patří do lesního typu S51 (svěží jedlová bučina štavelová) a smrkový porost Bedřichov do lesního typu 5K2 (kyselá jedlová bučina s ostrčí kulonosnou). V tab. 1 jsou uvedeny stanovištní a klimatické podmínky na obou výzkumných plochách. Studované porosty se vyznačují 100% zastoupením smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) Karst.) a téměř shodnou hustotou porostu v době experimentu (1850 stromů.ha⁻¹, respektive 1770 stromů.ha⁻¹). Pro sestavení alometrických rovnic pro odhad nadzemní biomasy mladého smrkového porostu na výzkumné ploše Rájec bylo vybráno a pokáceno 21 vzorníkových stromů a na výzkumné ploše Bedřichov 9 vzorníkových stromů. Vybrané vzorníkové stromy reprezentovaly jednotlivé tloušťkové stupně ve studovaném porostu (MARKOVÁ, POKORNÝ 2011). Tyto vzorníkové stromy byly použity pro zhodnocení použitelnosti sestavené alometrické rovnice z lokality Rájec pro smrkový porost na lokalitě Bedřichov. Základní dendrometrické charakteristiky studovaných smrkových porostů a vzorníkových stromů jsou vedeny v tab. 2.

Po pokácení byly u jednotlivých vzorníkových stromů přímo v lese zváženy živé větve z každého přeslenu. Z každého druhého živého přeslenu byla vybrána reprezentativní větev, která byla zvážena samostatně a byla převezena do laboratoře k vysušení do konstantní hmotnosti

(při teplotě 80 °C). po vysušení byly z reprezentativní větve v laboratoři odděleny jehlice od větvi a suché jehlice a větve byly zváženy samostatně. Následně byl stanoven podíl sušiny jehlic a dřeva větvi v každé reprezentativní větvi v čerstvém stavu. Suché větve byly přímo v lese zváženy samostatně jako celek a do laboratoře byl převezen směsný vzorek k vysušení do konstantní hmotnosti. u vzorníkových stromů byla změřena jejich výčetní tloušťka (ve výšce 1,3 metru nad zemí), obvod kmene v 1metrových segmentech od vrcholu kmene, délka kmene a délka živé koruny. Kmeny jednotlivých vzorníkových stromů byly rozřezány na dvoumetrové segmenty, které byly přímo v lese zváženy. Z každého segmentu byl uříznut kotouč, který byl převezen do laboratoře k vysušení do konstantní hmotnosti a byl následně zvážen.

Poměry čerstvých a suchých hmotností vzorků byly využity pro přepočítání čerstvé hmotnosti na suchou hmotnost studovaných složek biomasy.

Statistické zpracování dat

Byl sestaven seznam běžně používaných tvarů alometrických rovnic (tab. 3), které byly postupně parametrizovány v programu QCEXPERT (2015) pro vzorníkové stromy z výzkumné plochy Rájec. Pro každou zvolenou složku biomasy stromu (jehlice, živé větve, suché větve, kmen, koruna stromu a celková nadzemní biomasa), výtvarnici kmene a objem kmene bylo celkem parametrizováno 25 alometrických rovnic. Těsnost proložení experimentálních dat modelem byla posouzena podle střední kvadratické chyby predikce (MEP), Akaikeho informačního kritéria (AIC) a podle koeficientu determinace (R²). Hodnoty MEP a AIC se s kvalitou modelu snižují, zatímco vyšší hodnoty R² znamenají větší vhodnost použitého modelu. V procesu výběru nejlepšího modelu byla postupně hodnocena kritéria v pořadí MEP, poté AIC, případně R². Pro posouzení výše variability jednotlivých složek biomasy porostu v Rájci bylo náhodně vygenerováno 20 dvojic parametrizačních (vždy n = 15 stromů) a validačních (vždy n = 6 stromů) souborů a provedena křížová validace. Očekávaná chyba odhadu biomasy je následně vyjádřena odmocninou střední kvadratické chyby křížové validace (RMSECV).

Vhodnost a použitelnost lokálních alometrických rovnic stanovených pro odhad nadzemní biomasy mladého smrkového porostu v Rájci byla posouzena pro vzorníkové stromy z mladého smrkového porostu v Bedřichově podle kritéria NSE (NASH, SUTCLIFFE 1970), které dosahuje hodnot -∞ až +1. Hodnota kritéria NSE +1 znamená dosažení úplné shody modelových dat se skutečně naměřenými daty, hodnota NSE větší než 0 je pak obecně pokládána za přijatelnou pro použitelnost daného modelu. Pokud hodnota kritéria NSE dosahuje záporných hodnot, příslušný model je hodnocen jako nevhodný pro modelování naměřených dat. Vzhledem k tomu, že hodnota kritéria NSE není schopna vyjádřit případné systematické nadhodnocení (podhodnocení) odhadu, byla posouzena v programu Statistica 10.0 (StatSoft Inc., USA) i statistická významnost trendu na hladině $\alpha = 0,05$ v relativních rozdílech modelových a skutečně zjištěných dat.

Byla posouzena použitelnost alometrických rovnic stanovených pro odhad nadzemní biomasy mladého smrkového porostu v Rájci pro devět vzorníkových stromů z mladého smrkového porostu v Bedřichově. Porovnáním rozměrů vzorníkových stromů z porostu v Rájci, které byly využity pro stanovení alometrických rovnic, a rozměrů vzorníkových stromů z porostu v Bedřichově bylo zjištěno, že největší vzorníkový strom z porostu v Bedřichově leží mimo interval výčetních tloušťek vzorníkových stromů z porostu v Rájci. Proto bylo provedeno posouzení použitelnosti alometrických rovnic stanovených pro porost v Rájci pro porost v Bedřichově pro všech devět vzorníkových stromů z porostu v Bedřichově a samostatně pro osm vzorníkových stromů, které ležely v tloušťkovém intervalu ověřené platnosti alometrických rovnic pro porost v Rájci. Příslušný počet stromů, pro který platí posuzovaná hodnota, je uveden v indexu označení příslušné charakteristiky.

Tab. 1.
Charakteristika studovaných lokalit
Characteristics of the study sites

	Rájec	Bedřichov
Nadmořská výška/Altitude	610 – 625 m	615 – 620 m
Geologické podloží/Geological subsoil	kyselý granodiorit/acid granodiorite	dvojslídlná biotitická rula/biotite mica gneiss
Půdní typ/Soil type	modální oligotrofní kambizem/ modal oligotrophic cambisol	pseudoglej/ pseudogley
Průměrná roční teplota vzduchu/ Average annual air temperature (ToLASz et al. 2007)	6,5 °C ± 0,5 °C	6,5 °C ± 0,5 °C
Průměrný roční úhrn srážek/ Average annual precipitation total (ToLASz et al. 2007)	675 mm ± 25 mm	625 mm ± 25 mm
Klimatická oblast podle QUITT (1971)/ Climatic region according to QUITT (1971)	MT4	MT4
Lesní vegetační stupeň/Forest vegetation zone	jedlo-bukový/fir-beech	jedlo-bukový/fir-beech

Tab. 2.
Dendrometrické charakteristiky stromů smrkových porostů na výzkumných plochách Rájec a Bedřichov; v závorkách jsou uvedeny hodnoty pro vzorníkové stromy
Dendrometrical characteristics of spruce stands at the Rájec and Bedřichov study sites; values of sampled trees are shown in brackets

	Lokalita/Site	Porost/Forest stand				
		Průměr/Mean	SD	Medián/Median	Min	Max
Výčetní tloušťka stromu/ Diameter at breast height	Rájec	14,8 (15,5)	4,3 (3,8)	15,2 (16,2)	4,6 (10,1)	29,8 (22,0)
	Bedřichov	18,4 (15,5)	4,8 (5,9)	18,5 (19,5)	5,7 (11,8)	31,2 (30,1)
Výška stromu/ Tree height	Rájec	14,7 (14,9)	3,0 (2,3)	15,6 (14,9)	7,0 (10,6)	21,0 (17,9)
	Bedřichov	16,7 (17,7)	2,3 (2,9)	17,1 (18,1)	7,9 (13,9)	22,2 (22,2)
Délka živé koruny/ Length of living crown	Rájec	6,9 (8,9)	1,9 (2,3)	7,0 (8,8)	3,2 (5,3)	13,2 (13,2)
	Bedřichov	10,1 (9,3)	2,5 (3,6)	9,4 (8,5)	4,7 (4,7)	16,7 (16,7)

Tab. 3.
Seznam použitých tvarů alometrických rovnic pro odhad biomasy. A1, A2, A3, A4 – parametry rovnice, B – výška stromu nebo délka živé koruny. DBH – výčetní tloušťka stromu, H – výška stromu, CL – délka živé koruny
List of used types of allometric equations for biomass estimation. A1, A2, A3, A4 – equation parameters, B – tree height or length of living crown. DBH – diameter at the breast height of the tree, H – tree height, CL – length of living crown of the tree

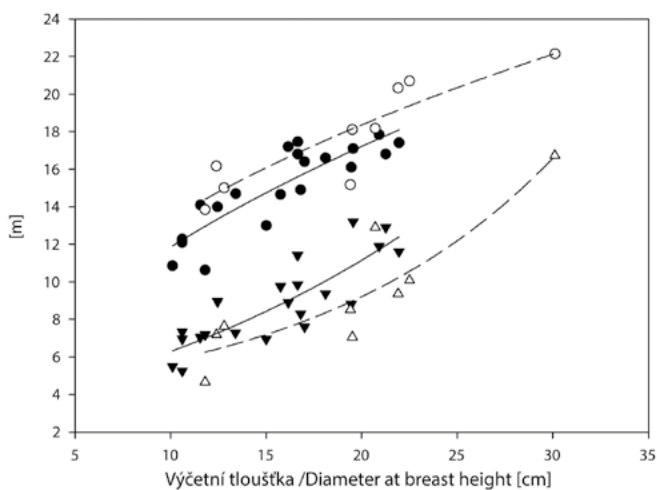
	Tvary testovaných alometrických rovnic/Types of tested allometric equations	Nezávislá proměnná/Independent variable
1	$Y = A1 \cdot DBH^{A2}$	DBH
2	$Y = A1 \cdot DBH + A2$	DBH
3	$Y = A1 \cdot \exp(A2 \cdot DBH)$	DBH
4	$Y = A1 \cdot DBH + A2 \cdot DBH^2$	DBH
5	$Y = A1 \cdot DBH + A2 \cdot DBH^2 + A3$	DBH
6	$Y = A1 \cdot DBH^{A2} \cdot B^{A3}$	DBH a H, DBH a CL
7	$Y = A1 + B \cdot A2 + DBH^{A2} \cdot A3$	DBH a H, DBH a CL
8	$Y = A1 \cdot (DBH + 1)^{(A2 + A3 \cdot \log(DBH))} \cdot B^{A4}$	DBH a H, DBH a CL
9	$Y = A1 \cdot ((DBH^2)^B)^{A2}$	DBH a H, DBH a CL
10	$Y = A1 \cdot ((DBH^2)^B) + A2$	DBH a H, DBH a CL
11	$Y = A1 + A2 \cdot (DBH^2) + A3 \cdot (DBH^2 \cdot B)$	DBH a H, DBH a CL
12	$Y = A1 + A2 \cdot (DBH^2) + A3 \cdot (DBH \cdot B)$	DBH a H, DBH a CL
13	$Y = \exp(A1 \cdot (DBH + 1)^{A2} \cdot B^{A3})$	DBH a H, DBH a CL
14	$Y = \exp(A1 \cdot (DBH)^{A2} \cdot B^{A3})$	DBH a H, DBH a CL
15	$Y = A1 + A2 \cdot DBH^2 \cdot B$	DBH a H, DBH a CL

VÝSLEDKY

Dendrometrické parametry vzorníkových stromů z porostu v Rájci

Závislost výšky stromů na výčetní tloušťce stromů nejlépe vystihovala polynomičká funkce. Výška nasazení živé koruny i délka živé koruny vykazovaly na rozdíl od výšky stromu větší variabilitu. Závislost délky živé koruny na výčetní tloušťce stromu měla exponenciální průběh (obr. 1, tab. 4).

Výtvarnice nepravá (obr. 2), která vyjadřuje poměr mezi skutečným objemem kmene a objemem ideálního válce s podstavou o průměru rovném výčetní tloušťce kmene, mírně klesala se zvyšující se výčetní tloušťkou kmene a její průběh nejlépe vystihovala funkce výčetní tloušťky stromu a výšky stromu (tab. 4).



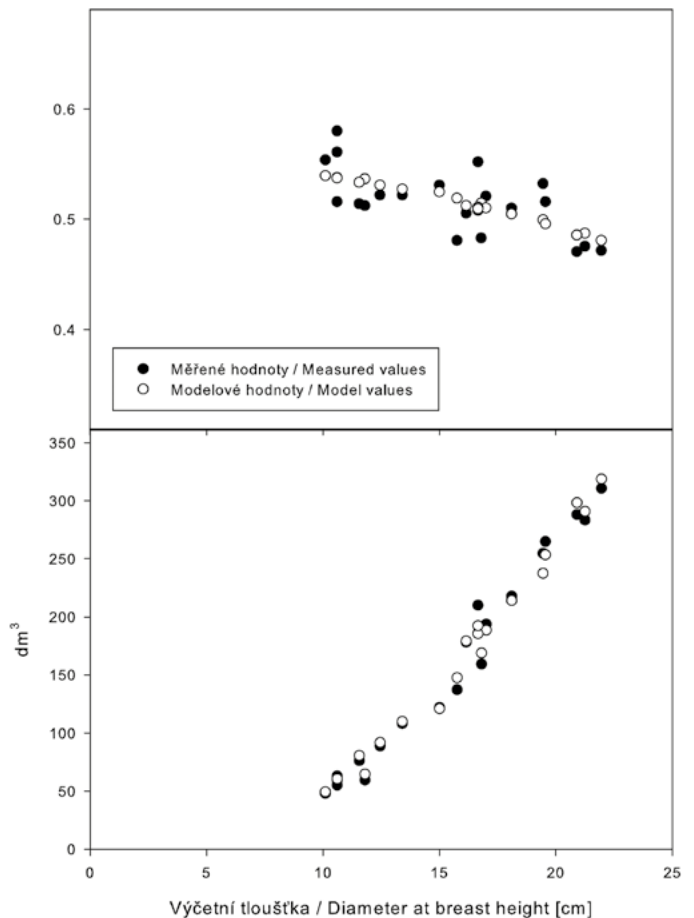
Obr. 1.

Změna hodnoty výšky stromu (○, ●) a délky živé koruny stromu (△, ▼) v závislosti na výčetní tloušťce stromu. Data jsou proložena nejlepší zjištěnou křivkou. Bílé značky představují naměřené hodnoty pro plochu Bedřichov a černé značky pro plochu Rájec

Fig. 1.

Value change of tree height (○, ●) and length of living crown (△, ▼) depending on the tree diameter at the breast height. Data are fitted by the best determined curve. White marks determine values for the Bedřichov plot, black marks determine values for Rájec

Objem kmene vykázal nejvyšší těsnost proložení z modelovaných dendrometrických parametrů stromu (obr. 2). Nejlepší rovnice měla mocninný tvar a vycházela z dosazení výčetní tloušťky a výšky stromu (tab. 4).



Obr. 2

Změna hodnoty výtvarnice nepravé (nahore) a objemu kmene (dole) v závislosti na výčetní tloušťce stromu. Bílé značky jsou modelové hodnoty, černé značky jsou zjištěné hodnoty na lokalitě Rájec

Fig. 2.

Change of the stem form factor (upper) and stem volume (lower) depending on the tree diameter at the breast height. White marks represent model values, black marks are the measured values for Rájec

Tab. 4.

Seznam nejlepších parametrizovaných modelů pro odhad dendrometrických parametrů stromů v mladém smrkovém porostu na ploše Rájec
List of the best parametrized models for estimation of dendrometric parameters of the trees in young spruce stand at the Rájec study site

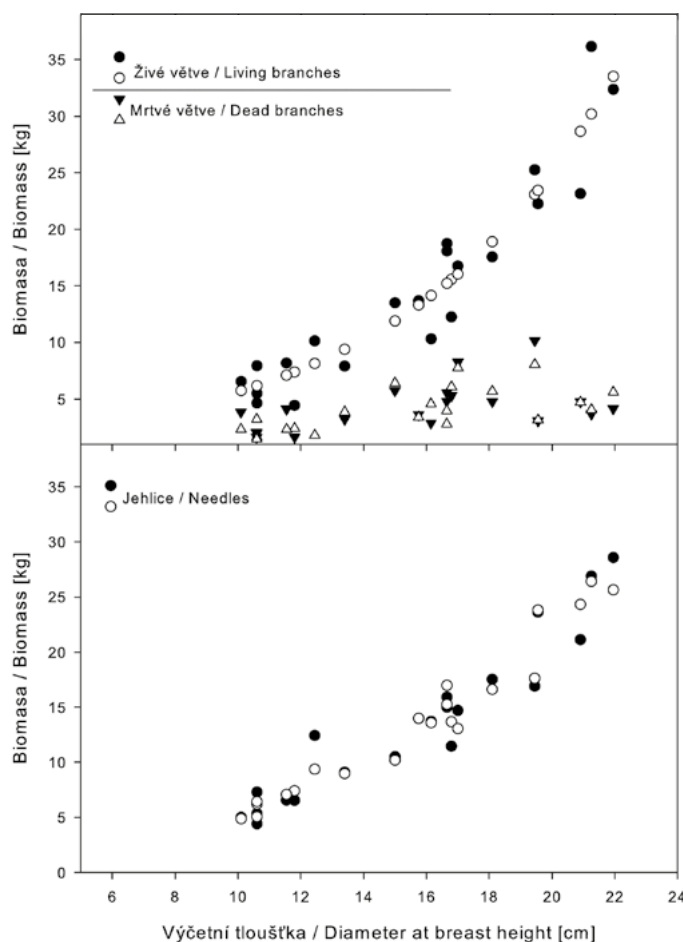
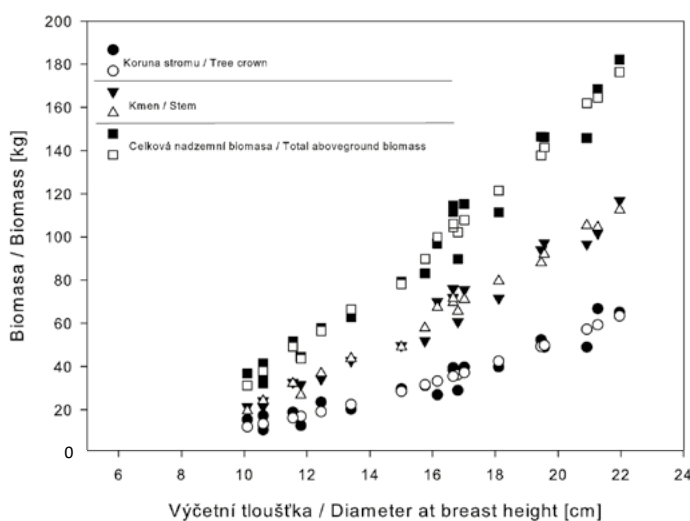
	Regresní rovnice/Regression equation	MEP	AIC	R2
Výška stromu/Tree height	$Y = 1,4454 \cdot DBH - 0,0295 \cdot DBH^2$	1,21	4,69	0,80
Délka živé koruny/Length of living crown	$Y = 3,5938 \cdot EXP(0,0566 \cdot DBH)$	1,73	11,70	0,71
Výtvarnice nepravá/Stem form factor	$Y = -8,054E-06 \cdot (H \cdot DBH^2) + 0,5485$	0,0006	-155,33	0,40
Objem kmene/Stem volume	$Y = 0,0777 \cdot (H \cdot DBH^2)^{0,9208}$	77,1	90,38	0,99

Výsvětlivky/Captions: DBH – výčetní tloušťka stromu/diameter at the breast height of the tree; H – výška stromu/tree height; CL – délka živé koruny stromu/length of living crown of the tree; MEP – střední kvadratická chyba odhadu/mean quadratic error of prediction; AIC – Akaikeho informační kritérium/Akaike information criterion; R² – koeficient determinace/coefficient of determination

Alometrické rovnice pro výpočet kompartmentů nadzemní biomasy

Byla posouzena možnost odhadu biomasy jehlic, živých větví, mrtvých větví, kmene, koruny stromu a celkové nadzemní biomasy z běžně a snadno měřitelných parametrů stromu (výčetní tloušťka stromu, výšky stromu a délky živé koruny). Pro biomasu jehlic bylo dosaženo nejvyšší těsnosti proložení mocninnou funkcí se dvěma nezávisle proměnnými – výčetní tloušťkou a délkou živé koruny (obr. 3, tab. 5). Biomasu živých větví nejlépe predikuje exponenciální funkce po dosažení výčetní tloušťky stromu (tab. 5). Nejnižší těsnost proložení byla zjištěna pro model biomasy mrtvých větví se dvěma nezávisle proměnnými – výčetní tloušťkou stromu a délkou živé koruny. Slabá závislost biomasy suchých větví na zvolených dendrometrických parametrech stromu byla rovněž potvrzena nejvyšší zjištěnou hodnotou odmocniny střední kvadratické chyby křížové validace (RMSECV)

(tab. 5). Nejlepší predikční schopnost pro biomasu mrtvých větví měl nejsložitější typ modelu se čtyřmi koeficienty. Naopak nejvyšší těsnost proložení ze všech modelů pro zvolené složky biomasy vykázal model



Obr. 3

Zjištěné hodnoty biomasy jehlic, živých větví, mrtvých větví, kmene, koruny stromu a celkové nadzemní biomasy (černé značky) na lokalitě Rájec. Bílé značky znázorňují biomasy jehlic podle nejlepšího modelu (Tab. 5)

Fig. 3.

Determined values of needle biomass, living branches biomass, dead branches biomass, stem biomass, crown biomass and total aboveground biomass (black marks) at the study site of Rájec. White marks show estimated values calculated using the best model (Tab. 5)

Tab. 5.

Seznam nejlepších parametrizovaných modelů pro odhad biomasy frakcí vzorníkových stromů v mladém smrkovém porostu na výzkumné ploše Rájec

List of the best parametrized models for an estimation of biomass compartments of sample trees in young spruce stand at the study site of Rájec

	Regresní rovnice/Regression equation	MEP	AIC	R2	RMSECV
Jehlice/Needles	$Y = 0,0504 \cdot (CL \cdot DBH^2)^{0,7222}$	2,89	20,08	0,95	14,40
Živé větve/Living branches	$Y = 1,2712 \cdot \text{EXP}(0,1491 \cdot DBH)$	9,59	44,83	0,91	22,27
Suché větve/Dead branches	$Y = 5,0964 \cdot 10^{-9} \cdot (DBH+1)^{(14,30804 \cdot 3357 \cdot \text{LOG}(DBH)) \cdot CL^{-2,3631}}$	1,56	14,86	0,70	36,10
Kmen/Stem	$Y = -11,7006 + 0,1259 \cdot DBH^2 + 0,1662 \cdot H \cdot DBH$	21,11	68,27	0,98	7,91
Koruna stromu/Tree crown	$Y = -0,2369 \cdot DBH + 0,1425 \cdot DBH^2$	21,78	63,22	0,92	15,65
Celková nadzemní biomasa/ Total aboveground biomass	$Y = -27,9686 + 2,2213 \cdot H + 0,3437 \cdot DBH^2$	63,37	87,33	0,98	8,53

Vysvětlivky/Captions: DBH – výčetní tloušťka stromu/diameter at the breast height of the tree; H – výška stromu/tree height; CL – délka živé koruny stromu/length of living crown of the tree

pro biomasu kmene založený na výčetní tloušťce stromu a výšce stromu. Nejlepší schopnost modelovat zjištěné hodnoty biomasy koruny vzorníkových stromů měla polynomiální funkce druhého řádu vycházející pouze z výčetní tloušťky stromu (tab. 5). Nejlepší odhad celkové nadzemní biomasy byl docílen tříparametrovým modelem s nezávislými proměnnými výčetní tloušťkou a výškou stromu (tab. 5).

Posouzení použitelnosti alometrických rovnic z Rájce pro porost v Bedřichově

Model pro odhad výšky vzorníkových stromů pro porost v Rájci průměrně podhodnocoval výšku všech 9 vzorníkových stromů z porostu v Bedřichově o 10,1 % (tab. 6, obr. 4). Vhodnost "rájeckého modelu" pro výšky vzorníkových stromů z porostu v Bedřichově byla podle kri-

téria NSE_9 poměrně malá. Při vyřazení největšího stromu z analýzy nedošlo k výraznému zlepšení vhodnosti modelu a průměrné podhodnocení bylo 8,3 %. Navíc byl nalezen významný trend v těchto podhodnoceních. Se zvětšováním výčetní tloušťky vzorníkových stromů se současně zvyšovalo relativní podhodnocení odhadu výšky stromu. Lze tedy konstatovat, že stromy s určitou výčetní tloušťkou byly v porostu v Bedřichově vyšší než stromy v Rájci.

Aplikací „rájeckého modelu“ pro délku živé koruny na vzorníkové stromy z porostu v Bedřichově bylo podle kritéria NSE_9 dosaženo významné shody (tab. 6). Avšak při vyřazení největšího stromu z analýzy hodnota NSE výrazně klesla z 0,52 na 0,03. Průměrné nadhodnocení délky živé koruny všech devíti vzorníkových stromů z porostu v Bedřichově dosáhlo 20,7 %. Relativní chyba odhadu délky živé koruny vykazovala významnou závislost na výčetní tloušťce stromu.

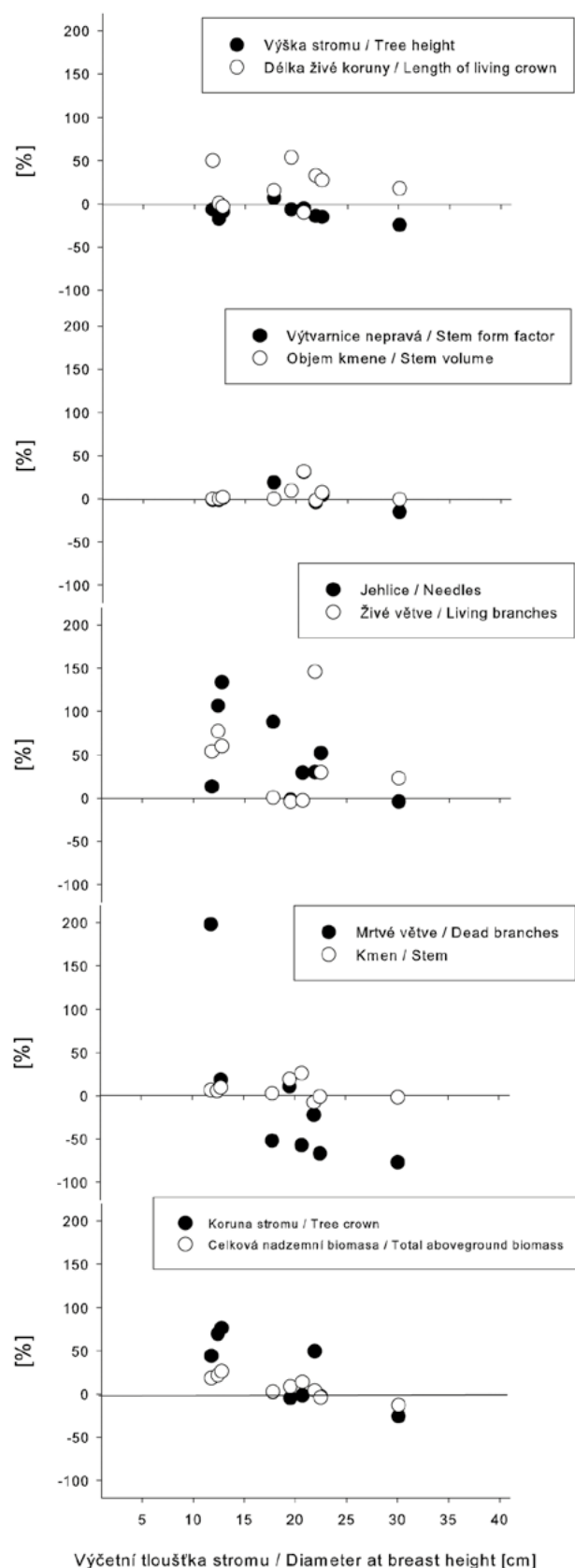
Tab. 6

Srovnání modelových hodnot vypočítaných podle nejlepších alometrických modelů pro mladý smrkový porost na výzkumné ploše Rájec se zjištěnými hodnotami vzorníkových stromů z mladého smrkového porostu na výzkumné ploše Bedřichov. Uvedené hodnoty odpovídají modelům sestaveným na základě všech 9 stromů (NSE_9) a v závorkách sestaveným modelům po odstranění největšího stromu (NSE_8)

Comparison of the estimated values calculated using the best allometric equations for the young spruce stand at the study site of Rájec with sample trees values from the young spruce stand at the study site of Bedřichov. Presented values correspond with the models based on all of nine trees (NSE_9) and in parentheses represented models created after removal of the largest tree (NSE_8)

	NSE	Nadhodnocení (+), podhodnocení (-)/ Overestimation (+), underestimation (-)			SD	F
		C (%)	D (%)	E (%)		
Výška stromu/Tree height	0,08 (0,29)	-10,1 (-8,3)	-24,4 (-17,3)	7 (7)	9 (7,7)	0,006 (0,028)
Délka živé koruny/Length of living crown	0,52 (0,03)	20,7 (21)	-10 (-10)	53,7 (53,7)	22,6 (24,1)	0,034 (0,048)
Výtvarnice nepravá/Stem form factor	-0,08 (0,09)	4,9 (7,4)	-14,9 (-3,7)	31,2 (31,2)	13,5 (12,1)	0,403 (0,09)
Objem kmene/Stem volume	0,98 (0,93)	5,3 (6)	-2 (-2)	31,6 (31,6)	10,6 (11)	0,161 (0,113)
Jehlice/Needles	0,89 (0,28)	49,6 (56,3)	-3,8 (-2,1)	133,8 (133,8)	49,4 (48,2)	0,094 (0,045)
Živé větve/Living branches	0,84 (0,35)	42,6 (45,1)	-3,9 (-3,9)	146,1 (146,1)	48,6 (51,3)	0,064 (0,066)
Suché větve/Dead branches	-0,2 (0,08)	-4,6 (4,4)	-76,7 (-66,8)	198 (198)	83,9 (84,9)	0,038 (0,054)
Kmen/Stem	0,97 (0,93)	6,7 (7,7)	-7,4 (-7,4)	26,3 (26,3)	10,6 (10,8)	0,172 (0,109)
Koruna stromu/Tree crown	0,87 (0,83)	23,1 (29,2)	-25,6 (-4,5)	76,7 (76,7)	37,2 (34,6)	0,089 (0,051)
Celková nadzemní biomasa/ Total aboveground biomass	0,96 (0,96)	8,9 (11,6)	-12,6 (-3,7)	26,5 (26,5)	12,6 (10,4)	0,001 (0,009)

Vysvětlivky/Captions: NSE – dosažená hodnota kritéria NSE/achieved value of criteria NSE; C – průměrná procentuální odchylka odhadu pro vzorníkové stromy z porostu v Bedřichově/mean percentage deviation of estimation for the sample trees from the stand at Bedřichov; D – nejvyšší zjištěné podhodnocení odhadu parametru pro vzorníkové stromy z porostu v Bedřichově/the highest determined underestimation of parameter estimation for sample trees from the stand at Bedřichov; E – nejvyšší zjištěné nadhodnocení odhadu parametru pro vzorníkové stromy z porostu v Bedřichově/the highest determined overestimation of parameter estimation for sample trees from the stand at Bedřichov; SD – směrodatná odchylka průměrné procentuální odchylky (C)/standard deviation of mean percentage deviation (C); F – hodnota statistiky na hladině významnosti $\alpha < 0,05$ pro test významnosti trendu v procentuálních odchylkách/statistics value on level of significance $\alpha < 0,05$ for trend significance test in percentage deviations



Obr. 4.

Procentuální rozdíl mezi odhadem biomasy pomocí vybraných alometrických rovnic pro smrkový porost v Rájci, aplikovaných na vzorníkové stromy z Bedřichova a skutečně zjištěnými hodnotami pro vzorníkové stromy na ploše Bedřichov. Hodnoty nad osou x značí procentuální nadhodnocení modelu pro Rájec oproti skutečně zjištěným hodnotám vzorníkových stromů z Bedřichova

Fig. 4.

The percentage difference between estimation of selected allometric equations for spruce stand at the Rájec study site applied to the sample trees at the Bedřichov study site and really determined values for the sample trees at the Bedřichov. Values above the x-axis represent the percentage overestimation of the Rájec model versus really determined values of sample trees at the Bedřichov

Se zvětšující se výčetní tloušťkou stromu se nadhodnocení délky živé koruny zvyšovalo.

„Rájecký model“ pro nepravou výtvarnici kmene z porostu v Rájci byl vyhodnocen podle kritéria NSE_9 i NSE_8 jako nevyhovující pro porost v Bedřichově (tab. 6).

„Rájecký model“ pro odhad objemu kmene stromu byl podle kritéria NSE_9 vyhovující. Trend v relativních odchylkách odhadu nebyl prokázán a odchylky od modelových hodnot byly tedy nezávislé na velikosti stromu.

„Rájecký model“ pro odhad biomasy jehlic vykázal dobrou shodu se vzorníkovými stromy z porostu v Bedřichově. Nicméně tato shoda byla dána především vysokou shodou modelové a skutečně zjištěné hodnoty největšího stromu, pro který bylo zjištěné podhodnocení pouze 3,8 % (tab. 6, obr. 4). Po redukcii na osm použitých vzorníkových stromů z porostu v Bedřichově hodnota NSE výrazně klesla z 0,89 na 0,28. Průměrné nadhodnocení se pohybovalo okolo 50 % a navíc byl v datech zjištěn významný trend, kdy nadhodnocení biomasy jehlic klesalo se vzrůstající výčetní tloušťkou stromu.

Velmi podobné výsledky byly zjištěny i u biomasy živých větví (tab. 6, obr. 4). NSE_9 indikuje dobrou shodu modelových dat se skutečně zjištěnými, nicméně po redukcii počtu vzorníkových stromů na osm hodnota kritéria NSE výrazně klesla z 0,84 na 0,35. Průměrné nadhodnocení odhadu přesáhlo 40 % a nejvyšší zjištěné nadhodnocení bylo téměř 150 %.

Podle parametru NSE „rájecký model“ pro odhad biomasy suchých větví neposkytl adekvátně přesné hodnoty pro porost v Bedřichově. Ani při zohlednění tloušťkového intervalu, pro který byly sestaveny alometrické rovnice pro porost v Rájci, nedošlo k uspokojivé shodě mezi modelovými a skutečně zjištěnými hodnotami. Modelové hodnoty se pohybovaly od 76,7% podhodnocení po téměř 200% nadhodnocení skutečně zjištěných hodnot biomasy mrtvých větví vzorníkových stromů z porostu v Bedřichově (tab. 6, obr. 4).

„Rájecký model“ pro odhad biomasy kmene stromu dosáhl vysoké hodnoty kritéria NSE_9 i NSE_8 . Modelové hodnoty byly průměrně o 6,7 % vyšší proti zjištěným hodnotám. V relativních chybách odhadu nebyl nalezen významný trend se změnou výčetní tloušťky stromu (tab. 6, obr. 4).

Rovněž biomasa koruny stromu dosahovala poměrně vysokých hodnot kritéria NSE_9 i NSE_8 . „Rájecký model“ tak poměrně dobře odpovídal i vzorníkovým stromům z porostu v Bedřichově. Největší nadhodnocení bylo zaznamenáno u nejmenších stromů, největší podhodnocení naopak u největšího vzorníkového stromu (tab. 6, obr. 4). Nicméně průkazný trend v relativních změnách se změnou výčetní tloušťky stromu nebyl prokázán.

„Rájecký model“ pro odhad celkové nadzemní biomasy stromu dosáhl vysokých hodnot kritérií NSE_9 i NSE_8 . Pro vzorníkové stromy z porostu v Bedřichově bylo zjištěno průměrné nadhodnocení odhadu 8,9 %. Ve změně relativní chyby odhadu byl nalezen významný trend – se zvětšováním výčetní tloušťky stromu klesala kladná relativní chyba odhadu pro nejmenší stromy do záporných hodnot pro stromy největší (obr. 4).

DISKUSE

Modelům pro odhad zásoby nadzemní biomasy a modelům pro kvantifikaci uhlíku uloženého v lesních dřevinách je věnována značná pozornost (KAUPPI et al. 1992; KARJALAINEN 1996; MARTIN et al. 1998; GOODALE et al. 2002), a to hlavně z důvodu schopnosti lesů poutat atmosférický uhlík (MAREK et al. 2011). Proto také vznikají nové práce, které poskytují parametry lokálních alometrických modelů (CHROUST, TESAŘOVÁ 1985; ČERNÝ 1990; POKORNÝ, TOMÁŠKOVÁ 2007; PAJTÍK et al. 2008; MARKOVÁ, POKORNÝ 2011; KREJZA et al. 2013), nebo jsou tyto práce spojovány do větších datových sad pro parametrizaci obecných

modelů (WIRTH et al. 2004). Existence lokálních alometrických rovnic pro odvození složek biomasy lesních porostů na dané lokalitě představuje nejpřesnější způsob odhadu zásoby biomasy (BOHLMAN, O'BRIEN 2006; DIETZE et al. 2008). Přesnější metodou je už jen celková destrukce jedinců na určité lokalitě (MAREK et al. 2011). Nicméně použitelnosti těchto modelů a stanovení jejich chyby přímo na experimentálních datech již taková pozornost věnována není (SVĚTLÍK et al. 2016). Předložené víceparametrové rovnice dávají předpoklad vzniku přesnějšímu nástroji pro kvantifikaci biomasy. Zpřesnění predikční schopnosti modelu pomocí přidání další nezávislé proměnné prezentují například práce CIENCIALA et al. (2008) a KREJZA et al. (2015). Výčetní tloušťka stromu je v mnoha studiích, zabývajících se alometrickými vztahy, prezentována jako jediný dostatečný parametr pro odhad jednotlivých složek biomasy stromu (MARKLUND 1987; ČERNÝ 1990; WIRTH et al. 2004; MARKOVÁ, POKORNÝ 2011; KREJZA et al. 2013). Použitelnost takových alometrických rovnic je podpořena skutečností, že výčetní tloušťka stromu je nejčastějším a nejsnáze měřitelným parametrem stromu.

Při odhadu biomasy živých větví a biomasy koruny stromu nebylo prokázáno zpřesnění odhadu, pokud se do alometrické rovnice přidal další z testovaných parametrů. Obdobné výsledky prezentují pro biomasu živých větví například MARKLUND (1987), SCHWARZMEIER (2000), WIRTH et al. (2004) a HOCHBICHLER et al. (2006). Biomasa mrtvých větví dosáhla pro vzorníkové stromy z porostu v Rájci poměrně vysoké shody s modelem založeným na dosazení výčetní tloušťky a délky živé koruny stromu. ČERNÝ (1990) uvádí pro model vycházející pouze z výčetní tloušťky stromu obdobný výsledek ($R^2 = 0,66$). Odhad biomasy mrtvých větví vzorníkových stromů z porostu v Bedřichově nedosáhl významnou shodu s „rájeckým modelem“. Zjištěná průměrná relativní chyba odhadu sice byla menší než 5 %, ale variabilita okolo modelových hodnot byla vysoká. Mrtvé větve tvořily asi 5 % z celkové nadzemní biomasy vzorníkových stromů, takže se variabilita relativních rozdílů jednotlivých vzorníkových stromů významně neprojevila ve variabilitě množství celkové nadzemní biomasy. Důležité bylo srovnání biomasy kmene stromů z obou studovaných mladých smrkových porostů, neboť biomasa kmene představuje největší podíl z celkové nadzemní biomasy a je nejčastějším předmětem obchodu v lesním hospodářství (KUPČÁK 2003). „Rájecký model“ hodnotu biomasy kmene průměrně nadhodnocoval o 6,7 %, nicméně pro největší extrapolovaný strom byla relativní chyba odhadu biomasy kmene pouze 1,6 %. Z pohledu hodnocení biomasy kmene lze tedy „rájecký model“, i přes nutnou extrapolaci, považovat za vhodný i pro porost v Bedřichově.

Závislost objemu kmene na výčetní tloušťce a výšce stromu je obecně považována za vysokou (ČERNÝ 1990; MUND et al. 2002). Naopak v podrobném seznamu alometrických rovnic publikovaném Wirthem (WIRTH et al. 2004) není uveden model pro odhad biomasy kmene dosazením kombinace výčetní tloušťky a výšky stromu. Nicméně závislost biomasy kmene na výčetní tloušťce stromu ($R^2 = 0,99$), uvedená v této práci, potvrzuje předpoklad dobré predikční schopnosti pro odhad biomasy kmene. Podle Černého (ČERNÝ 1990) lze také celkovou nadzemní biomasu stromu velmi dobře odvodit ($R^2 = 0,99$) z alometrické rovnice založené na dosazení výčetní tloušťky a výšky stromu.

Metodou počítání letokruhů na pařezu bylo zjištěno, že věk mladých smrkových porostů v Rájci a Bedřichově byl shodný, což umožnilo vyřadit z analýz vliv věku porostu a bylo možné hodnotit výšku porostu jako porovnatelný ukazatel bonity stanoviště. Podle Halaje (HALAJ 1978) se bonita stanoviště nejvýrazněji projevuje výškou stromů v porostu a je jen velmi málo závislá na výchovných zásazích. Z tohoto pohledu lze tedy považovat výzkumnou plochu v Bedřichově za stanoviště s vyšší bonitou, protože model vycházející z výšek stromů porostu v Rájci podhodnocoval průměrně o 10 % výšky stromů porostu v Bedřichově.

Jako jeden z možných faktorů, ovlivňujících množství biomasy a zároveň růst každého stromu, lze považovat vzájemnou kompetici stromů (PRETZSCH 2009; KREJZA et al. 2015). Celá řada autorů uvádí kompetiční indexy jako vhodnou možnost odhadu budoucího růstu stromů (DANIELS et al. 1986; TOMÉ, BURKHART 1989; BIGING, DOBBERTIN 1995). Podle těchto autorů kompetiční indexy vysvětlují podstatnou část v proměnlivostech růstu stromů v porostu. V literatuře se jen sporadicky objevují alometrické rovnice pro odhad biomasy, které by zohledňovaly sociální postavení stromu v porostu nebo jinak vyjádřenou sílu kompetice působící na vzorníkový strom (GROTE, REITER 2004). Například podle Wirtha (WIRTH et al. 2004) je délka živé koruny dostatečnou proměnnou, která vyjadřuje sílu kompetice působící na strom. Srovnáním alometrických rovnic stanovených pro porost v Rájci se vzorníkovými stromy z porostu v Bedřichově bylo zjištěno, že délka živé koruny byla „rájeckým modelem“ nadhodnocována.

Znalost nepravé výtvarnice kmenů může být vhodným nástrojem pro odhad jejich objemu. Důvodem rozdílné alometrie pro stanovení biomasy kmene jsou i rozdílné tvary kmenů na studovaných lokalitách. V posledních desetiletích se v lesnické literatuře objevilo několik studií zabývajících se tvarem kmene a modelováním jeho průběhu od paty až po vrchol (CLARK et al. 1991; MAGUIRE, BATISTA 1996; LEITES, ROBINSON 2004; JIANG et al. 2007). Důvodem tohoto zájmu bylo především odvození přesnějších hodnot objemu kmene, než nám poskytují objemové tabulky. Vlastní měření kmenových profilů a z nich odvozené vlastní objemové tabulky jen potvrzují hypotézu, že lokální modely poskytují přesnější informace pro danou lokalitu a použití převzatých modelů by mělo vždy předcházet ověření jejich relevance pro danou lokalitu (SVĚTLÍK et al. 2016).

ZÁVĚR

Předkládaná práce se zabývá posouzením rozdílů v odhadu jednotlivých složek nadzemní biomasy a vybraných dendrometrických parametrů vzorníkových stromů mezi mladým smrkovým porostem rostoucím na stanovišti s edafickou kategorií kyselou (Bedřichov, Českomoravská vrchovina) a mladým smrkovým porostem na stanovišti s edafickou kategorií svěží (Rájec, Dražanská vrchovina) pomocí alometrických rovnic. Ačkoliv jsou porosty shodného věku, byly zaznamenány významné rozdíly mezi odhady parametrů stromu z alometrických rovnic a skutečně zjištěnými hodnotami. Při srovnání bonity stanoviště pomocí dosažené výšky vzorníkových stromů lze považovat mladý smrkový porost v Bedřichově za stanoviště s intenzivnější produkcí. Naproti tomu srovnáním produkce mladého smrkového porostu podle objemu kmene bylo zjištěno, že „rájecký model“ pro odhad objemu kmene mírně nadhodnocoval (průměrně 5,3 %) skutečně zjištěnou hodnotu pro porost v Bedřichově. Nejvyšší průměrná relativní chyba odhadu (okolo 50 %) byla prokázána pro biomasu jehlic a biomasu živých větví. Srovnávané mladé smrkové porosty lze tedy považovat za velmi odlišné z pohledu jednotlivých složek biomasy živých korun. Tato skutečnost byla potvrzena i srovnáním souhrnného „rájeckého modelu“ pro korunu stromu s porostem v Bedřichově se zjištěným nadhodnocením hodnot o více než 20 %. Odlišnosti mezi srovnávanými porosty byly zjištěny také v případě biomasy kmene stromu. Provedené srovnání rozdílů v odhadu jednotlivých složek nadzemní biomasy mladého smrkového porostu prokázalo, že alometrické rovnice stanovené pro daný porost mají lokální význam a použitelnost modelů pro výpočet některých komponentů (zejména biomasa jehlic, živých větví) na jiné lokality je velmi diskutabilní. Proto je nutné dostupné (publikované) a nově získávané alometrické rovnice generalizovat, aby byly použitelné pro rozsáhlejší území.

Poděkování:

Práce byla finančně podpořena MŠMT ČR (projekt COST CZ LD15022), Lesy ČR, s. p., (Smlouva č. 01/2016/144/SU) a projektem TAČR TJ01000309 „Stanovení stresu smrku ztepilého přímými metodami“.

LITERATURA

- ALBAUGH T.J., BERGH J., LUNDMARK T., NILSSON U., STAPE J., ALLEN H.L., LINDER S. 2009. Do biological expansion factors adequately estimate stand-scale aboveground component biomass for Norway spruce? *Forest Ecology and Management*, 258: 2628–2637. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.021
- BIGING G.S., DOBBERTIN M. 1995. Evaluation of competition indices in individual tree growth models. *Forest Science*, 41 (2): 360–377.
- BOHLMAN S., O'BRIEN S. 2006. Allometry, adult stature and regeneration requirement of 65 tree species on Barro Colorado Island, Panama. *Journal of Tropical Ecology*, 22 (2): 123–136. DOI: 10.1017/S0266467405003019
- CIENCIALA E., EXNEROVÁ Z., SCHELHAAS M.-J. 2008. Development of forest carbon budget and wood production in the Czech Republic until 2060. *Annals of Forest Science*, 65, 603: 1–10.
- CLARK A.C.III, SOUTER R.A., SCHLAEGEL B.E. 1991. Stem profile equations for southern tree species. Asheville, NC, USDA Forest Service Southeastern Forest Experimental Station: 113 s. Research Paper. SE-282
- ČERNÝ M. 1990. Biomass of *Picea abies* (L.) KARST. in Midwestern Bohemia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 5: 83–95.
- 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*, 57(3): 257–265.
- DANIELS R.F., BURKHART H.E., CLASON T.R. 1986. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. *Canadian Journal of Forest Research* 16 (6), 1230–1237.
- DIETZE M.C., WOLOSIN M.S., CLARK J.S. 2008. Capturing diversity and interspecific variability in allometries: a hierarchical approach. *Forest Ecology and Management*, 256 (11): 1939–1948. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.07.034
- GOODALE C., APPS M.J., BIRDSEY R.A., FIELD C.H.B., HEATH L.S., HOUGHTON R.A., JENKINS J.C., KOHLMAIER G.H., KURZ W., LIU S., NABUURS G.-J., NILSSON S., SHVIDENKO A.Z. 2002. Forest carbon sinks in the Northern hemisphere. *Ecological Applications*, 12: 891–899.
- GROTE R., REITER I.M. 2004. Competition – dependent modelling of foliage biomass in forest stand. *Trees*, 18: 596–607.
- HALAJ J. 1978. Výškový rast a štruktúra porastov. Bratislava, Veda: 283 s.
- HOCHBICHLER E., BELLOS P., LICK E. 2006. Biomass functions for estimating needle and branch biomass of spruce (*Picea abies*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*) and branch biomass of beech (*Fagus sylvatica*) and oak (*Quercus robur and petraea*). *Austrian Journal of Forest Science*, 123: 35–46.
- CHROUST L., TESAŘOVÁ, J. 1985. Quantification of above-ground components of 20 years old Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karsten). *Communicationes Instituti Forestalis Cechosloveniae*, 14: 111–126.
- JIANG L., BROOKS J.R., HOBBS G.R. 2007. Using crown ratio in yellow-poplar compatible taper and volume equations. *Northern Journal of Applied Forestry*, 24: 271–275.

- KARJALAINEN T. 1996. Model computations on sequestration of carbon in managed forests and wood products under changing climatic conditions in Finland. *Journal of Environmental Management*, 47 (4): 311–328.
- KAUPPI P.E., MIELIKÄINEN K., KUUSELA K. 1992. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. *Science*, 256: 70–74.
- KREJZA J., POKORNÝ R., MARKOVÁ I. 2013. Is allometry for aboveground organ's mass estimation in young Norway spruce stands affected by different type of thinning? *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, LXI (6): 1755–1761.
- KREJZA J., SVĚTLÍK J., POKORNÝ R. 2015. Spatially explicit basal area growth of Norway spruce. *Trees*, 29: 1545–1558.
- KUPČÁK V. 2003. Economic analysis of forest joint – stock companies in the Czech Republic in 1992–2000. *Journal of Forest Science*, 49: 27–36.
- LANDE R. 1979. Quantitative genetic analysis of multivariate evolution, applied to brain: Body size allometry. *Evolution*, 33 (1): 402–416.
- LEHTONEN A., MÄKIPÄÄ R., HEIKKINEN J., SIEVÄNEN R., LISKI J. 2004. Biomass expansion factors (BEFs) 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
- LEHTONEN A., CIENCIALA E., TATARINOV F., MÄKIPÄÄ R. 2007. Uncertainty estimation of biomass factors for Norway spruce in the Czech Republic. *Annals of Forest Science*, 64: 133–140.
- LEITES L.P., ROBINSON A.P. 2004. Improving taper equations of loblolly pine with crown dimensions in a mixed-effects modeling framework. *Forest Science* 50, 204–212.
- LIU CH., WESTMAN C.J. 2009. Biomass in a Norway spruce–Scots pine forests: a comparison of estimation methods. *Boreal Environment Research*, 14: 875–888.
- LÖWE H., SEUFERT G., RAES F. 2000. Comparison of methods used within member states for estimating CO₂ emissions and sinks to UNFCCC and UE monitoring mechanism: forest and other wooded land. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 4 (4): 315–319.
- MAGUIRE D.A., BATISTA J.L.F. 1996. Sapwood taper models and implied sapwood volume and foliage profiles for coastal Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research*, 26: 849–863.
- MAREK V.M. et al. 2011. Uhlík v ekosystémech České republiky v měnícím se klimatu. Praha, Academia: 255 s.
- MARKLUND L.G. 1987. Biomass functions for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in Sweden (Biomassfunktioner för gran i Sverige). Umeå: Department of Forest Survey, Swedish University of Agricultural Sciences, Report 43: 132 s.
- MARKLUND L.G. 1988. Biomassfunktioner för tall, gran, björk i Sverige. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogstaxering, Rapport 45: 73 s.
- MARKOVÁ I., POKORNÝ R. 2011. Allometric relationship for the estimation of dry mass of aboveground organs in young highlands Norway spruce stand. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, LIX (28): 217–223.
- MARTIN M.E., NEWMAN S.D., ABER J.D., CONGALTON, R.G. 1998. Determining forest species using high spectral resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 65: 249–254.
- 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
- NASH J.E., SUTCLIFFE J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual model. Part I – a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3): 282–290.
- PAJTÍK J., KONŮPKA B., LUKAC M. 2008. Biomass functions and expansion factors in young Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) trees. *Forest Ecology and Management*, 256 (5): 1096–1103. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.06.013
- 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.
- POKORNÝ R., TOMÁŠKOVÁ I. 2007. Allometric relationships for surface area and dry mass of young Norway spruce aboveground organs. *Journal of Forest Science*, 53 (12): 548–554.
- PRETZSCH H. 2009. Forest dynamics, growth and yield. From measurement to model. Berlin, Springer: 664 s.
- QCExpert. Trilobite Statistical Software – QCExpert 3.3 Staré Hradiště (CZ). Trilobite.cz. 2015.
- QUITT E. 1971. Klimatické oblasti Československa. Brno, Geografický ústav ČSAV: 37 s. *Studia Geographica*, sv. 16.
- SATOO T. 1982. Forest biomass. The Hague, M. Nijhoff: 152 s.
- SCHWARZMEIER M. 2000. Erhebung der oberirdischen Biomassevorräte von Fichtenbeständen (*Picea abies* (L.) Karst.) im Bereich der Waldklimastationen Ebersberg und Flossenbürg. Diploma Thesis. Fachhochschule Weihenstephan, Fachbereich Forstwirtschaft, Germany: 155 s.
- StatSoft Inc. (2011) STATISTICA (data analysis software system), version 10, www.statsoft.com.
- SVĚTLÍK J., KREJZA J., MENŠÍK L., POKORNÝ R., MAZAL P., KULHAVÝ J. 2016. Sekvestrace uhlíku smrkovým porostem (*Picea abies* (L.) Karst.) v oblasti Dražanské vrchoviny. *Zprávy lesnického výzkumu*, 61 (1): 42–53.
- TOLASZ R., BRÁZDIL R., BULÍŘ O. et al. 2007. Atlas podnebí Česka. Praha, Český hydrometeorologický ústav; Olomouc, Univerzita Palackého v Olomouci: 256 s.
- TOMÉ M., BURKHART H.E. 1989. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *Forest Science*, 35 (3): 816–831.
- WEHNER R., FUKUSHI T., ISLER K. 2007. On being small: Brain allometry in ants. *Brain Behavior and Evolution*, 69 (3): 220–228.
- WEST P.W. 2009. Tree and forest measurement. Berlin, Springer-Verlag: 190 s.
- WIRTH C., SCHUMACHER J., SCHULZE E.D. 2004. Generic biomass functions for Norway spruce in central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology*, 24: 121–139.
- ZIANIS D., MUUKKONEN P., MÄKIPÄÄ R., MENCUCCINI M. 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. Helsinki: The Finnish Society of Forest Science, The Finnish Forest Research Institute: 63 s. *Silva Fennica, Monographs*, 4.

ERROR OF ABOVE-GROUND BIOMASS ESTIMATION BY USING SITE SPECIFIC ALLOMETRIC EQUATIONS ON THE EXAMPLE OF TWO YOUNG SPRUCE STANDS

SUMMARY

The estimation of biomass amount by allometric relationships is currently considered as the most accurate method for determining biomass in forest ecosystems, but this approach has its own limitations and requirements. One of these presumptions is the usage of appropriate allometric equations for a given location. This paper presents differences in estimation of biomass of individual aboveground organs (stem, branches, needles etc.) and differences in selected dendrometric parameters of sample trees between young spruce stand growing on the site of acid edaphic category at the Bedřichov study site (Českomoravská vrchovina Highland, Czech Republic) and young spruce stand growing on the site of fresh edaphic category at the Rájec study site (Drahanská vrchovina Highland, Czech Republic) (Tab. 1 and 2) using allometric equations (Tab. 5). The 21 sampled trees for Rájec and 9 sampled trees for Bedřichov were cut down to quantify total aboveground biomass and its components. The sampled trees from Rájec were used for the estimation of parameters of biomass functions using simple and frequently measured tree parameters (diameter at breast height, tree height and length of living crown) as the independent variables. The sampled trees from Bedřichov were used to evaluate the usability of these allometric equations.

Although the stands are of the same age, significant differences were observed between the tree parameters estimated from the allometric equations and really determined values (Tab. 6). Young spruce stand at the study site of Bedřichov (edaphic category acid) can be considered the site with more intensive production. In contrast, the "Rájec model" for stem volume estimation moderately overestimated (on average 5.3 %) really determined value for the stand at the Bedřichov.

The highest mean relative error of estimation (about 50%) was determined for needle biomass and living branches biomass. Compared young spruce stands can be considered very different from the point of view of individual compartments of living crowns biomass. This fact was confirmed by comparison of the aggregate "Rájec model" for the tree crown with the stand at the Bedřichov (determined overestimation of values more than 20%). Differences were also found in the case of stem biomass (Tab. 6). These results confirmed assumption that allometric equations usually have local applicability. The application of site specific allometric equations on other forest stand without verification can be questionable. Thus it is essential to connect already available (published) and newly created allometric equations into generic biomass functions. The advantage of local allometric equations is their high accuracy for biomass estimation only for investigated forest stand. On the other hand, generic models might perform lower accuracy for one specific forest stand but their applications are wider for forest stands with different characteristics (diameter at the breast height, tree height, site index etc.).

Zasláno/Received: 31. 01. 2018

Přijato do tisku/Accepted: 11. 06. 2018