

Mendelova univerzita v Brně
Lesnická a dřevařská fakulta
Ústav ekologie lesa



**STRUKTURA DOSPĚLÉHO
VRCHOVINNÉHO SMRKOVÉHO POROSTU**

Disertační práce

2016

Ing. Jan Světlík

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci “Struktura dospělého vrchovinného smrkového porostu” zpracoval samostatně

a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací. Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona. Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne 23. 09. 2016

Podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl především poděkovat mé školitelce doc. RNDr. Ireně Markové, CSc. za významné usměrnění cílů práce, ujasnění myšlenek, cenné rady a pomoc při zpracování dat a textu disertační práce. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům Ústavu ekologie lesa Lesnické a dřevařské fakulty Mendelovy univerzity v Brně za nenahraditelnou pomoc v počátcích této studie a mým kolegům z Centra MendelGlobe Lesnické a dřevařské fakulty Mendelovy univerzity v Brně. V neposlední řadě bych rád poděkoval rodině a všem blízkým za podporu a pomoc, kterou mi poskytly při přípravě mé práce.

Práce byla zpracována za podpory projektů „Indikátory vitality dřevin“, reg. č. CZ.1.07/2.3.00/20.0265 spolufinancovaný Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem ČR, Výzkumný záměr MSM 6215648902 „Les a dřevo - podpora funkčně integrovaného lesního hospodářství a využívání dřeva jako obnovitelné suroviny“, IGA 27/2010 „Možnosti adaptace lesních ekosystémů na předpokládané změny klimatu“, IGA 28/2012 „Sekvestrace uhlíku dospělou smrčínou“, EHP-CZ02-OV-1-008-2014 „Vytvoření environmentálních vzdělávacích programů pro studium odezvy na změnu klimatu“ a projektem TA 02010945 „ALAI-02DD nový přístroj pro lesnickou praxi“

ABSTRAKT

Iméno: Ing. Jan Světlík

Téma disertační práce: Struktura dospělého vrchovinného smrkového porostu

Klíčová slova: alometrické rovnice, expanzní faktor, kompetice, dendrometrické charakteristiky

V posledních desetiletích začal intenzivní výzkum změn přírůstu biomasy lesních dřevin v kontextu předpokládané globální změny, neboť lesní porosty mají v globálním měřítku zásadní podíl na ukládání uhlíku. Závislosti mezi dendrometrickými parametry stromů a biomasou lesních dřevin pomocí alometrických rovnic nebo expanzních faktorů jsou i dnes řešeny nedostatečně. V předložené práci jsou popsány změny struktury dospělého vrchovinného smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009 – 2012 a jsou uvedeny alometrické rovnice a expanzní faktory pro stanovení nadzemní biomasy a jejích jednotlivých frakcí, které byly pro studovaný porost stanoveny rozbořem vzorníkových stromů. Na základě známých alometrických rovnic byla odhadnuta také podzemní biomasa studovaného porostu. Výčetní tloušťka stromu byla vhodným parametrem pro odhad objemu biomasy kmene (bez borky i s borkou) a ve většině případů také vhodným vstupním parametrem do stanovených alometrických rovnic pro odhad celkové nadzemní biomasy, případně jednotlivých frakcí biomasy, studovaného porostu. Byla prokázána významnost kompetice stromů při odhadu jednotlivých frakcí biomasy stromů. V některých případech je tedy vhodné zařadit parametry kompetice do alometrických rovnic pro odhad biomasy lesních dřevin. Pro odhad nadzemní biomasy porostu byl vypočítán expanzní faktor 1,30 a pro odhad podzemní biomasy 1,18.

ABSTRACT

Name: Ing. Jan Světlík

The name of doctoral thesis: Structure of the adult highland spruce stand

Key words: allometric relationship, expansion factor, competition, dendrometric characteristics

In last decades, intensive research of the forest trees biomass increment changes has realized in the context of the presumed global change because forest stands have shown crucial share on the carbon storage in the global scale. Relationships between tree dendrometric parameters and forest tree biomass using allometric equations or expansion factors are still solved insufficiently. Changes of the structure of the adult highland spruce stand at the study site of Rájec (the Drahanská vrchovina Highland) in 2009–2012 and allometric equations and expansion factors determined for an aboveground biomass of the studied stand (and its single fractions) are described in the present study. Belowground biomass of the studied stand was estimated using known allometric relationship. Diameter at the tree breast height was suitable parameter for the estimation of the stem biomass volume (with and without bark) and it was the suitable input parameter for most allometric equations for the estimation of the aboveground biomass or its single fractions. Significance of tree competition to estimate tree biomass was established. Thus, using competition parameters in allometric

equations is appropriate in some cases. There was calculated expansion factor for the aboveground biomass 1,30 and for the belowground biomass 1,18 in the studied adult spruce stand.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK:

A	průměrný věk celého porostu
a_i	hodnota nejvyšší dosažitelné síly kompetice stromu i a zároveň poloměr kruhu (růstový prostor), ve kterém se hodnotí vliv kompetice sousedních stromů na strom i
AIC	Akaikeho informační kritérium
AT	teplota vzduchu
AV ČR	Akademie věd České republiky
BA	výčetní kruhová základna
BEF(m)	expanzní faktor biomasy vztažený ke hmotnosti dřeva kmene
BEF(V)	expanzní faktor biomasy vztažený k objemu dřeva kmene
B_i	biomasa frakce i
BK	buk lesní (<i>Fagus sylvatica</i> L.)
BO	borovice lesní (<i>Pinus sylvestris</i> L.)
BR	bříza bělokora (<i>Betula pendula</i> Roth)
BT	tloušťka borky kmene ve výčetní výšce
CL	délka živé koruny
cos	goniometrická funkce cosinus
COST	European Cooperation in Science and Technology
CR	maximální radius koruny
DB	dub (zimní a letní) (<i>Quercus robur</i> L., <i>Quercus petraea</i> (Matt.) Liebl.)
DBH	tloušťka stromu ve výčetní výšce (1,3 metru)
DBH _{max}	tloušťka největšího stromu na ploše ve výčetní výšce (1,3 metru)
D(f)	definiční obor platnosti funkce
DHA+C	model vyžadující pro výpočet DBH, H, A a CL
DIST _{i}	vzdálenost od stromu i
DP	disponibilní plocha stromu
D0,2	tloušťka kmene ve výšce 0,2 m od paty kmene
D3	tloušťka kmene ve třech metrech od paty kmene
D5	tloušťka kmene v pěti metrech od paty stromu
e	Eulerovo číslo, základ přirozeného logaritmu
EXTRA	extra-terestrická ozáření dopadající na horní hranici atmosféry na 50° severní zeměpisné délky
f	výtvarnice kmene
GR	globální radiace
H	výška stromu
HB	habr obecný (<i>Carpinus betulus</i> L.)
HCR	výška nasazení živé koruny
H(f)	obor hodnot funkce
HSL	nadmořská výška lesního porostu
IPCC	Mezivládní panel pro klimatickou změnu (Intergovernmental Panel on Climate Change)

i	index označující příslušnou frakci nebo vzorníkový strom
i5	šířka posledních pěti letokruhů
JD	jedle bělokorá (<i>Abies alba</i> Mill.)
JL	jilmy (<i>Ulmus</i> sp.)
JS	jasan ztepilý (<i>Fraxinus excelsior</i> L.)
JV	javory (<i>Acer</i> sp.)
JX	ostatní jehličnany
KF	konverzní faktor
k_t	clearness index
LAI	index listové plochy
Ln	přirozený logaritmus
LP	lípy (<i>Tilia</i> sp.)
LTER	Long-Term Ecological Research
LX	ostatní listnáče
M	hmotnost
MaB	Program člověk a biosféra (Man and the Biosphere Programme)
MD	modřín opadavý
MEP	střední kvadratická chyba predikce
NC	souřadnice výzkumné plochy
NK	síla kompetice
NSE	Nash–Sutcliffe koeficient (Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient)
OL	olše lepkavá (<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.)
P	úhrn srážek
RMSE	celková střední chyba odhadu
R^2	koeficient determinace
SD	směrodatná odchylka
SEE	standardní chyba odhadu
SI	střední výška porostu ve 100 letech
SIS	horní výška porostu (průměrná výška 100 nejvyšších stromů)
SM	smrk ztepilý (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.)
ŠK	štíhlostní kvocient
T	počet letokruhů ve výčetní výšce stromu
UNESCO	Organizace OSN pro výchovu, vědu a kulturu (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)
UNFCCC	Rámcová úmluva OSN o změně klimatu (United Nations Framework Convention on Climate Change)
V	objem
v.v.i.	veřejná vědecká instituce
\tilde{x}	medián
1S–4S	označení tvaru rovnice pro výpočet síly kompetice
5N	označení tvaru rovnice pro výpočet síly kompetice
$\sum NK_i$	součet všech NK okolních stromů na kruhové ploše se stromem ve středu plochy a o poloměru a_i
$\sum NK_i / \sum NK_j$	součet všech NK vzorníkového stromu lomeno součtem všech NK okolních stromů na kruhové ploše se vzorníkovým stromem ve středu plochy a o poloměru a_i

SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ:

- Tab. 1: Procentuální zastoupení jehličnatých dřevin v současné, přirozené a cílové skladbě Dražanské vrchoviny (SM – smrk ztepilý, JD – jedle bělokorá, BO – borovice lesní, MD – modřín opadavý, JX – ostatní jehličnany) (Průša 2001).
- Tab. 2: Procentuální zastoupení listnatých dřevin v současné, přirozené a cílové skladbě Dražanské vrchoviny (DB – dub, BK – buk lesní, HB – habr obecný, JS – jasan ztepilý, JV – javor, JL – jilm, BR – bříza bělokorá, LP – lípa srdčitá, OL – olše lepkavá, LX – ostatní listnáče) (Průša 2001).
- Tab. 3: Acidita půdy ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) na ekosystémové stanici Rájec (Dražanská vrchovina).
- Tab. 4: Tvar rovnic zvolených pro výpočet síly kompetice vzorníkových stromů pro jednotlivé čtverce vytyčeného rastru v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Dražanská vrchovina).
- Tab. 5: Statistické zhodnocení příkonu globální radiace na ekosystémové stanici Rájec (Dražanská vrchovina) v letech 2009 – 2012. Tukeyův test; modrá políčka znamenají statisticky významný rozdíl na hladině významnosti 0,05.
- Tab. 6: Statistické zhodnocení teploty vzduchu na ekosystémové stanici Rájec (Dražanská vrchovina) v letech 2009 – 2012. Tukeyův test; modrá políčka znamenají statisticky významný rozdíl na hladině významnosti 0,05.
- Tab. 7: Roční úhrn srážek naměřený na ekosystémové stanici Rájec (Dražanská vrchovina) v letech 2009–2012 a dlouhodobý průměr ročního úhrnu srážek podle Marková a kol. (2013).
- Tab. 8: Výsledky regresní analýzy a parametry rovnic pro odhad výtvarnice nepravé, pravé a absolutní vypočítané pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Dražanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je výčetní tloušťka kmene (DBH).
- Tab. 9: Výsledky regresní analýzy a parametry rovnic pro odhad štíhlostního kvocientu pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Dražanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je výčetní tloušťka kmene (DBH).
- Tab. 10: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad objemu kmene s borkou a objemu kmene bez borky vypočítané pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Dražanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je výčetní tloušťka kmene (DBH).
- Tab. 11: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Dražanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je výčetní tloušťka stromu (DBH).
- Tab. 12: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Dražanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je výčetní kruhová základna (BA).

- Tab. 13: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je výška stromu (H).
- Tab. 14: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec v roce 2010. Vstupním parametrem je výška nasazení koruny (HCR).
- Tab. 15: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je délka koruny (CL).
- Tab. 16: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je šířka letokruhů za posledních 5 let (i5).
- Tab. 17: Závislost jednotlivých frakcí biomasy na $\sum NK_j$, vypočítaného podle zvolených rovnic (1S – 4S) a podle nastaveného x v rovnici 5. Uvedené koeficienty determinace jsou platné pro rovnice odvozené pro vzorníkové stromy dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Šedě vyplněná buňka značí nejvyšší hodnotu koeficientu determinace v rámci frakce biomasy, tučně jsou vyznačeny modely s nejnižším MEP.
- Tab. 18: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je součet všech NK okolních stromů v definovaném radiusu (a_i) okolo vzorníkového stromu ($\sum NK_j$).
- Tab. 19: Závislost jednotlivých frakcí biomasy na $\sum NK_i / \sum NK_j$, vypočítaného podle zvolených rovnic (1S – 4S) a dle nastaveného x v rovnici 5. Uvedené koeficienty determinace jsou platné pro rovnice odvozené pro vzorníkové stromy na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Šedě vyplněná buňka značí nejvyšší hodnotu koeficientu determinace v rámci frakce biomasy, tučně jsou vyznačeny modely s nejnižším MEP.
- Tab. 20: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je součet všech sil kompetice (NK) vzorníkového stromu lomeno součet všech NK okolních stromů v definovaném radiusu (a_i) okolo vzorníkového stromu ($\sum NK_i / \sum NK_j$).
- Tab. 21: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je disponibilní plocha stromu (DP).
- Tab. 22: Srovnání literárních modelů s jednotlivými frakcemi biomasy vzorníkových stromů z dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina). NSE pro jednotlivé autory a frakce představuje vždy pouze nejvyšší dosaženou hodnotu NSE v rámci studie konkrétního autora. Tučně jsou vyznačeny nejvyšší hodnoty pro danou frakci biomasy.

Tab. 23: Seznam nejlepších modelů pro odhad frakcí nadzemní biomasy dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina).

Tab. 24: Srovnání vybraných modelů pro odhad biomasy kořenů dospělého smrkového porostu s daty získanými pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v minulosti (Vyskot 1981). NSE pro jednotlivé autory představuje vždy pouze nejvyšší dosaženou hodnotu NSE v rámci studie konkrétního autora. Tučně je vyznačena nejvyšší hodnota NSE.

Tab. 25: Nejlepší model pro odhad podzemní biomasy dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina).

Obr. 1: Poloha ekosystémové stanice Rájec na základní mapě České republiky (<https://maps.google.cz/>)

Obr. 2: Poloha ekosystémové stanice Rájec na satelitním snímku střední části Drahanské vrchoviny (<https://maps.google.cz/>)

Obr. 3: Průběh zvolených funkcí pro výpočet síly kompetice (NK) stromů na příkladu stromu i s výčetní tloušťkou 20 cm a dosaženého $x = 1$ (podle rovnice 5).

Obr. 4: Závislost hodnoty nejvyšší dosažitelné síly kompetice a_i (podle rovnice 5) na výčetní tloušťce stromu (DBH_i) v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina).

Obr. 5: Suma extra-terestrické ozáření (EXTRA) a globální radiace (GR) dopadající na dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012.

Obr. 6: Průměrná měsíční teplota vzduchu (AT) naměřená na horní hranici dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012.

Obr. 7: Měsíční úhrn srážek (P) na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012.

Obr. 8: Počet stromů (N) v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012.

Obr. 9: Průměrná výška (H) dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012 (I – směrodatná odchylka).

Obr. 10: Počet stromů (N) v jednotlivých výškových kategoriích v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012.

Obr. 11: Relativní četnosti výšky nasazení živé koruny stromů (vlevo) a délky živé koruny stromů (vpravo) v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2009.

Obr. 12: Průměrná výčetní tloušťka stromů (DBH) v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012 (I – směrodatná odchylka).

Obr. 13: Relativní četnost výčetní tloušťky stromů v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012.

Obr. 14: Průměrná výčetní kruhová základna (BA) dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012.

- Obr. 15: Relativní četnosti výčetní kruhové základny v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v období 2009–2012.
- Obr. 16: Průměrný kumulativní přírůst výčetní kruhové základny v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v období 2010–2012.
- Obr. 17: Závislost výtvarnice nepravé (vlevo), pravé (uprostřed) a absolutní (vpravo) na výčetní tloušťce vzorníkových stromů z dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Hodnoty výtvarnic jsou proloženy nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 8).
- Obr. 18: Závislost štíhlostního kvocientu (ŠK) na výčetní tloušťce vzorníkových stromů na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vypočítané štíhlostní kvocienty kmenů jsou proloženy nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 9).
- Obr. 19: Průběh sbíhavosti kmene vzorníkových stromů v délce kmene pokácených na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010.
- Obr. 20: Závislost objemu kmene bez borky (vlevo) a objemu kmene s borkou (vpravo) na výčetní tloušťce vzorníkových stromů na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovené objemy kmenů jsou proloženy nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 10).
- Obr. 21: Vývoj indexu listové plochy (LAI) dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2010–2012.
- Obr. 22: Dendrometrické charakteristiky vzorníkových stromů na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) pokácených v roce 2010.
- Obr. 23: Nadzemní biomasa (kg) jednotlivých stromových frakcí vzorníkových stromů na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) pokácených v roce 2010.
- Obr. 24: Alometrická závislost mezi biomasou jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky, nadzemní biomasou a výčetní tloušťkou stromu (DBH) pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 11).
- Obr. 25: Alometrická závislost mezi biomasou jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky, nadzemní biomasou a výčetní kruhovou základnou (BA) pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 12).
- Obr. 26: Alometrická závislost mezi biomasou jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky, nadzemní biomasou a výškou stromu (H) pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 13).
- Obr. 27: Alometrická závislost mezi biomasou jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky, nadzemní biomasou a výškou nasazení živé koruny (HCR) pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 14).
- Obr. 28: Alometrická závislost mezi biomasou jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky, nadzemní biomasou a délkou koruny (CL) pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 15).
- Obr. 29: Alometrická závislost biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasou na šířce letokruhů za posledních 5 let (i5) pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 16).

- Obr. 30: Mapy síly kompetice okolo vzorníkového stromu číslo 302 vypočítané podle rovnic 1S (vlevo nahoře), 2S (vpravo nahoře), 3S (vlevo dole) a 4S (vpravo dole) a dosazením $x = 1,5$ pro výpočet a_i (rovnice 5) na ekosystémové stanici Rájec v roce 2010.
- Obr. 31: Mapy síly kompetice okolo vzorníkového stromu číslo 302 vypočítané podle rovnice 2S a dosazením $x = 1$ (vlevo nahoře), $x = 1,5$ (vpravo nahoře) a $x = 2$ (vlevo dole) pro výpočet a_i (rovnice 5) na ekosystémové stanici Rájec v roce 2010. Barvy představují sílu kompetice NK všech stromů pro každý čtverec vytyčeného rastru porostní plochy. Bílý kruh uprostřed značí vzdálenost a_i podle rovnice 5.
- Obr. 32: Alometrická závislost biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy dospělého smrkového porostu na $\sum NK_j$ na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 18).
- Obr. 33: Alometrická závislost biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy dospělého smrkového porostu na $\sum NK_i / \sum NK_j$ na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 20).
- Obr. 34: Mapa síly kompetice okolo vzorníkového stromu číslo 302 vypočítané podle rovnice 5N (vlevo) na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Strom č. 302 je uprostřed kruhové plochy. Barvy představují sílu kompetice (NK) všech stromů pro každý čtverec vytyčeného rastru porostní plochy. V pravé části je černě znázorněna disponibilní plocha (DP) stromu číslo 302 podle Nagela (1999).
- Obr. 35: Alometrická závislost biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy dospělého smrkového porostu na disponibilní ploše stromu (DP) na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 21).
- Obr. 36: Závislost biomasy jehlic vzorníkových stromů dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) na testovaných parametrech. Parametry jsou seřazeny zleva vzestupně podle MEP. Na vedlejší ose jsou vyneseny koeficienty determinace (označené jako R^2).
- Obr. 37: Závislost biomasy větví vzorníkových stromů dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) na testovaných parametrech. Parametry jsou seřazeny zleva vzestupně podle MEP. Na vedlejší ose jsou vyneseny koeficienty determinace (označené jako R^2).
- Obr. 38: Závislost biomasy mrtvých větví vzorníkových stromů dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) na testovaných parametrech. Parametry jsou seřazeny zleva vzestupně podle MEP. Na vedlejší ose jsou vyneseny koeficienty determinace (označené jako R^2).
- Obr. 39: Závislost biomasy borky kmene vzorníkových stromů dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) na testovaných parametrech. Parametry jsou seřazeny zleva vzestupně podle MEP. Na vedlejší ose jsou vyneseny koeficienty determinace (označené jako R^2).
- Obr. 40: Závislost biomasy kmene vzorníkových stromů dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) na testovaných parametrech. Parametry jsou seřazeny zleva vzestupně podle MEP. Na vedlejší ose jsou vyneseny koeficienty determinace (označené jako R^2).
- Obr. 41: Závislost nadzemní biomasy vzorníkových stromů dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) na testovaných parametrech. Parametry jsou seřazeny zleva vzestupně podle MEP. Na vedlejší ose jsou vyneseny koeficienty determinace (označené jako R^2).

- Obr. 42: Alometrická závislost biomasy jehlic, větví a borky na výčetní tloušťce (DBH) vzorníkových stromů v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010 podle modelu stanoveného pro studovanou plochu a podle vybraných literárních modelů (Tab. 23).
- Obr. 43: Alometrická závislost biomasy mrtvých větví koruny stromů a kmene bez borky na výčetní tloušťce (DBH) vzorníkových stromů v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010 podle modelu stanoveného pro studovanou plochu a podle vybraných literárních modelů (Tab. 23).
- Obr. 44: Alometrická závislost biomasy kmene s borkou a nadzemní biomasy na výčetní tloušťce (DBH) vzorníkových stromů v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010 podle modelu stanoveného pro studovanou plochu a podle vybraných literárních modelů (Tab. 23).
- Obr. 45: Modelové hodnoty jednotlivých frakcí biomasy dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010 v závislosti na výčetní tloušťce (DBH) podle vybraných nejvhodnějších modelů uvedených v Tab. 23.
- Obr. 46: Modelové hodnoty jednotlivých frakcí nadzemní biomasy dospělého smrkového porostu rozdělené podle tloušťkových tříd na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010 podle vybraných nejvhodnějších modelů uvedených v Tab. 23.
- Obr. 47: Relativní rozdíly v odhadu biomasy koruny stromu a biomasy kmene s borkou pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) při použití jednoho modelu a při součtu dvou modelů rozdělené podle tloušťkových tříd stromů.
- Obr. 48: Relativní rozdíly v odhadu nadzemní biomasy pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) při použití jednoho modelu a při součtu příslušných dílčích modelů rozdělené podle tloušťkových tříd stromů.
- Obr. 49: Biomasa kořenů dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) stanovená podle Vyskota (1981) a Wirtha a kol. (2004).
- Obr. 50: Modelové hodnoty biomasy kořenů dospělého smrkového porostu rozdělené podle tloušťkových tříd na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010 podle rovnice Wirtha a kol. (2004) uvedené v Tab. 25.
- Obr. 51: Závislost hodnot expanzních faktorů (BEF) nadzemní biomasy stromu (vlevo), celkové biomasy stromu (uprostřed) a závislost hodnot konverzních faktorů (KF) pro biomasu kořenů (vpravo) na objemu kmene pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Expanzní faktory byly vztaženy k objemu dřeva kmene – BEF(V) a ke hmotnosti dřeva kmene – BEF(m).

SEZNAM POUŽITÝCH ROVNIC

$$B_i = a * DBH^b \quad (1)$$

kde B_i – biomasa vybrané frakce i ; a a b – konstanty

$$BEF(V)_i = \frac{B_i}{V} \quad BEF(m)_i = \frac{B_i}{m} \quad (2), (3)$$

kde $BEF(V)_i$ a $BEF(m)_i$ – výsledný expanzní faktor biomasy frakce i vztahovaný buď k objemu kmene (V) nebo hmotnosti kmene (m); B_i – biomasa vybrané frakce

$$BEF_i = a_i + b_i e^{-0,01A} \quad (4)$$

kde a_i , b_i – navržené konstanty specifické pro druh stromu a každou frakci biomasy i ; $e^{-0,01A}$ – nezávisle proměnný faktor věku stromu (Lehtonen a kol. 2004, Cenciala a kol. 2006, Marek a kol. 2011)

$$a_i = BA_i/x \quad (5)$$

kde a_i – definuje poloměr kruhu okolo stromu v metrech, v rámci kterého se posuzuje síla kompetice okolních stromů, a udává nejvyšší možnou hodnotu síly kompetice daného stromu; BA_i – výčetní kruhová základna stromu, v rámci kterého se posuzuje síla kompetice okolních stromů. Hodnoty závislosti a_i na výčetní tloušťce stromu (DBH_i) mají tvar mocninné funkce (Obr. 4)

$$B_i = ax + b \quad (\text{lineární závislost}) \quad (6)$$

$$B_i = ax^b \quad (\text{mocninná závislost}) \quad (7)$$

$$B_i = ae^{bx} \quad (\text{exponenciální závislost}) \quad (8)$$

$$B_i = ax^2 + bx \quad (\text{polynomická závislost}) \quad (9)$$

kde B_i – biomasa vybrané frakce i (jehlice, živé větve, apod.); a a b – konstanty

$$BEF(V)_i = \frac{B_i}{V} \quad BEF(m)_i = \frac{B_i}{m} \quad (10), (11)$$

kde B_i – biomasa vybrané frakce i , V – objem kmene bez borky, m – hmotnost kmene bez borky (Marek a kol. 2011)

OBSAH

1. ÚVOD	1
2. CÍL PRÁCE	3
3. LITERÁRNÍ PŘEHLED	4
3.1 STRUKTURA POROSTU LESNÍCH DŘEVIN	5
3.2 HLAVNÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PRODUKCI BIOMASY LESNÍCH DŘEVIN	8
3.3 HISTORICKÝ VÝVOJ VÝZKUMU BIOMASY POROSTŮ LESNÍCH DŘEVIN	11
3.4 ODHAD ZÁSOBY BIOMASY LESNÍCH DŘEVIN.....	13
3.4.1 Objemové tabulky	14
3.4.2 Jednotné objemové křivky	15
3.4.3 Relaskopování.....	15
3.4.4 Alometrické rovnice.....	16
3.4.5 Expanzní a konverzní faktory	17
4. MATERIÁL A METODY	19
4.1 POPIS LOKALITY	19
4.2 METODY POPISU STRUKTURY DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU.....	26
4.2.1 Klimatické podmínky na studované lokalitě	26
4.2.2 Dendrometrické parametry dospělého smrkového porostu	26
4.2.3 Index listové plochy dospělého smrkového porostu	26
4.2.4 Nadzemní a podzemní biomasa dospělého smrkového porostu	27
4.3 STATISTICKÉ A EMPIRICKÉ HODNOCENÍ DAT	32
5. VÝSLEDKY	34
5.1 KLIMATICKÉ PODMÍNKY NA EKOSYSTÉMOVÉ STANICI RÁJEC.....	34
5.2 DENDROMETRICKÉ PARAMETRY DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU	38
5.2.1 Hustota dospělého smrkového porostu	38
5.2.2 Výška dospělého smrkového porostu	38
5.2.3 Výška nasazení živých korun a délka živých korun dospělého smrkového porostu	40
5.2.4 Výčetní tloušťka dospělého smrkového porostu	40
5.2.5 Výčetní kruhová základna dospělého smrkového porostu.....	42
5.2.6 Tloušťkový přírůst kmenů v dospělém smrkovém porostu.....	43
5.2.7 Výtvarnice kmenů vzorníkových stromů a tvarové kvocienty v dospělém smrkovém porostu	44
5.2.8 Sbíhavost kmenů vzorníkových stromů z dospělého smrkového porostu	46
5.2.9 Objem kmenů vzorníkových stromů z dospělého smrkového porostu.....	47
5.3 INDEX LISTOVÉ PLOCHY DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU.....	49
5.4 NADZEMNÍ BIOMASA VZORNÍKOVÝCH STROMŮ Z DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU.....	49
5.5 KOMPETIČNÍ VZTAHY VZORNÍKOVÝCH STROMŮ Z DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU	60
5.6 ZHODNOCENÍ VHODNOSTI VYUŽITÍ TESTOVANÝCH PARAMETRŮ PRO STANOVENÍ JEDNOTLIVÝCH FRAKČÍ BIOMASY DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU	73
5.6.1 Biomasa jehlic	73
5.6.2 Biomasa živých větví	74

5.6.3 Biomasa mrtvých větví	74
5.6.4 Biomasa borky	75
5.6.5 Biomasa kmene.....	76
5.6.6 Nadzemní biomasa	77
5.7 VÝBĚR ZNÁMÝCH ALOMETRICKÝCH ROVNIC PRO NADZEMNÍ A PODZEMNÍ BIOMASU DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU.....	77
5.7.1 Nadzemní biomasa	77
5.7.2 Podzemní biomasa	86
5.8 EXPANZNÍ A KONVERZNÍ FAKTORY PRO ODHAD BIOMASY DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU.....	89
6. DISKUSE	91
6.1 DENDROMETRICKÉ PARAMETRY DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU	92
6.2 ASIMILAČNÍ APARÁT DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU	94
6.3 NADZEMNÍ A PODZEMNÍ BIOMASA DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU.....	95
6.3.1 Alometrické vztahy odvozené ze vzorníkových stromů z dospělého smrkového porostu	95
6.3.2 Kompetice vzorníkových stromů z dospělého smrkového porostu	100
6.3.3 Výběr známých alometrických rovnic pro nadzemní a podzemní biomasu dospělého smrkového porostu	102
6.3.4 Expanzní a konverzní faktory pro odhad biomasy dospělého smrkového porostu	107
7. ZÁVĚR	108
8. SUMMARY	112
9. PŘÍNOSY PRO PRAXI A DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM	116
10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	117

1. ÚVOD

V lesních ekosystémech je uloženo více než 50 % z celkového uhlíku přítomného na Zemi a lesní ekosystémy mají velký potenciál pro ukládání atmosférického CO₂ (Lal 2005, Lorenz a Lal 2010). Lesy mírného pásma pokrývají pouze 8 % celkové plochy souše, ale v globálním měřítku mají zásadní podíl na ukládání uhlíku. Odhaduje se, že přibližně 40 % uhlíku se ukládá v lesních porostech Evropy (Nabuurs a kol. 1997, Lal a kol. 2007, Schröder a Pesch 2011, Wiesmeier a kol. 2013). Problematika kvantifikace zásob a ukládání uhlíku v lesních ekosystémech je spojena se studiem sekvestrace uhlíku do půdy (Schröder a Pesch 2011, Wiesmeier a kol. 2012, 2013, Ruiz-Peinado a kol. 2014, Ni a kol. 2015) a sekvestrace uhlíku do biomasy dřevin lesních porostů (nadzemní i podzemní) (Wirth a kol. 2004).

Časové a prostorové změny ukládání uhlíku v lesních porostech s různou strukturou a závislosti mezi dendrometrickými parametry a biomasou lesních dřevin pomocí alometrických nebo expanzních a konverzních faktorů jsou i dnes řešeny nedostatečně (Lehtonen a kol. 2007). 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 a kol. 2005). Jednou z nejproblematictějších oblastí v procesu odhadu zásob a sekvestrace uhlíku je přesnost kvantifikace zásob biomasy lesních dřevin a jejich změny v čase (Löwe a kol. 2000, Albaugh a kol. 2009, Marek a kol. 2011). Při odhadu zásob biomasy se nejčastěji využívají alometrické rovnice (např. Marklund 1987, Zianis a kol. 2005, Marek a kol. 2011, Čihák a kol. 2012, Světlík a kol. 2016) nebo expanzní faktory (např. Lehtonen a kol. 2004, Marek a kol. 2011, Petersson a kol. 2012).

Alometrické rovnice popisují nejčastěji vztah mezi jednoduše měřitelnými dendrometrickými parametry kmene či koruny stromu a biomasou jednotlivých orgánů, případně celého stromu. Kvantifikace biomasy lesních dřevin v určité lokalitě je nejpresnější při použití lokálních alometrických rovnic. Další možností je použití obecných modelů pro odhad biomasy lesních dřevin, které jsou konstruovány z rozsáhlého souboru dat. Jako příklad lze uvést modely podle Wirtha a kol. (2004),

kteří seřadili 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). Dalším způsobem pro odhad biomasy porostu lesních dřevin je využití expanzních faktorů. Expanzní faktory slouží k odhadu biomasy stromu nebo daného lesního porostu, a také k odhadu zásoby biomasy lesních porostů v určitém regionu nebo státu (Lehtonen a kol. 2004, Tobin a Nieuwenhuis 2007, Marek a kol. 2011). Používané expanzní faktory vyjadřují násobek celkové biomasy lesních dřevin, případně jejich jednotlivých frakcí (listoví, větve, kmeny, kořeny), k objemu nebo hmotnosti kmene stromu.

V 90. letech minulého století začal výzkum významu biomasy lesních dřevin v kontextu předpokládané globální změny klimatu. Přijetím Kjótského protokolu, v rámci Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu, vznikla ratifikujícím zemím (mezi nimi i České republice) povinnost snížit emise skleníkových plynů. Do Kjótského protokolu byly pro svou důležitost v globálním cyklu skleníkových plynů zahrnuty i údaje o vázání a ukládání uhlíku (přesněji CO_2) v lesních porostech. Ratifikující země musí dokládat odhady plochy lesů, odhady uhlíkové zásoby v lesích a odhady změn biomasy lesních dřevin. Nutnost předkládání těchto informací je patrná z množství vědeckých publikací, které se na toto téma objevují. Většina vědeckých studií, týkajících se této problematiky, vychází z údajů o množství a změnách množství celkové nadzemní biomasy, příp. jejich jednotlivých frakcí, lesních dřevin. Proto je studium struktury porostů lesních dřevin a následný odhad biomasy lesních dřevin stále aktuálním vědeckým tématem.

2. CÍL PRÁCE

Předkládaná práce se zabývá popisem zásoby nadzemní a podzemní biomasy a změny struktury dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009 – 2012.

Pro dospělý smrkový porost byly vypočítány alometrické vztahy a expanzní faktory, které byly využity pro odhad zásoby celkové nadzemní biomasy a jednotlivých frakcí nadzemní biomasy. Odhad zásoby podzemní biomasy byl proveden na základě známých publikovaných alometrických vztahů.

Hodnoty jednotlivých frakcí (jehlice, živé větve, mrtvé větve, kmen s borkou, kmen bez borky, borka) a celkové nadzemní biomasy dospělého smrkového porostu zjištěné rozborem vzorníkových stromů a hodnoty podzemní biomasy převzaté z literatury byly srovnány s publikovanými alometrickými rovnicemi. Vybrané parametry vzorníkových stromů byly posouzeny podle jejich vhodnosti pro odhad biomasy jednotlivých frakcí biomasy stromu.

3. LITERÁRNÍ PŘEHLED

Kvantifikace jednotlivých složek biomasy lesních dřevin je nutná nejen z důvodu vhodného plánování a hospodaření v lesních porostech, ale i z důvodu studia toků energie a látek v nich (Parresol 1999, Zianis a kol. 2005).

Lesy jsou významným zdrojem suroviny v primárním sektoru (prvovýroba). Celková zásoba dřeva v českých lesích byla v roce 2013 odhadnuta na 687,2 mil. m³. V evidenci celkových zásob dřeva v České republice od roku 1930 lze pozorovat jasný stoupající trend, způsobený jednak zpřesňováním způsobu zjišťování porostních zásob, jednak mírným růstem zakmenění porostů, zvětšováním podílu starších porostů a zvyšováním běžného přírůstu. Věková struktura lesů v České republice je nerovnoměrná. V posledních letech například dochází ke zvyšování výměry porostů nad 120 let (přestárlé porosty), což může způsobovat ekonomické ztráty v budoucnu. Celkový běžný přírůst lesních porostů byl v roce 2013 21,7 mil. m³, což představuje průměrně 8,4 m³ na hektar lesní půdy. V roce 2013 se vytěžilo celkem 15,3 mil. m³ dříví, z toho 13,2 mil. m³ jehličnatého a 2,1 mil. m³ listnatého. Surové dříví slouží pro výrobu nábytku, pilařského a impregnovaného dřeva, dých, překližek, aglomerovaných dřevařských výrobků, stavebně truhlářských a tesařských výrobků, dřevěných obalů a ostatních dřevařských výrobků včetně palivového dříví. Negativním faktem na trhu se surovým dřívím v České republice je, že dlouhodobě dochází k exportu surového dříví (zejména do Rakouska a Německa) bez další sofistikované přidané hodnoty. Česká republika proto patří mezi největší vývozce surového dříví na světě v poměru k realizovaným tuzemským těžbám dřeva. Export v roce 2013 dosáhl výše téměř 6,2 mil. m³ surového dříví, přičemž 99,2 % bylo vyvezeno do ostatních zemí Evropské unie. Naopak dovoz surového dříví (3,5 mil. m³) byl z Evropské unie realizován v roce 2013 ve výši 87,3 %, především z Polska a Slovenska (MZe 2013).

V posledních desetiletích stoupá význam lesních porostů v globálním koloběhu uhlíku. Lesní porosty, které váží přibližně 80 % vzdušného terestrického uhlíku (Dixon a kol. 1994), jsou totiž významným úložištěm vzdušného uhlíku (Brown 2002,

Körner 2005). Vzdušný uhlík (oxid uhličitý CO₂) je významným skleníkovým plynem a jeho koncentrace v ovzduší neustále stoupá. Jednou z oblastí studia koloběhu uhlíku je kvantifikace jeho vázání (sekvestrace) a uvolňování z porostů lesních dřevin a z lesních půd a stanovení možností zvýšení vázání uhlíku v lesních porostech. Pro takový komplexnější pohled je nutné mít i) dokonalý systém pro stanovení uhlíkové bilance a zásoby na regionální a národní úrovni, ii) přesné informace o využívání území (identifikace a změny). S tím následně souvisí analýza lesnického hospodaření a nalezení způsobů pro možné navýšení kapacity lesů vázat vzdušný uhlík (Marek a kol. 2011).

Pro studium růstu a vývoje jednotlivých lesních dřevin i celých porostů lesních dřevin jsou nutné údaje, které je často obtížné získat přímým měřením. Proto se na základě podrobného rozboru vzorníkových stromů stanovují algoritmy (regresní rovnice), které umožňují časově, finančně a technicky méně náročný odhad těchto složitě měřitelných údajů (West 2009). Případná nesprávnost a nepřesnost vytvořených algoritmů na lokální, regionální i národní úrovni je však považována za jeden z hlavních nedostatků při hodnocení biomasy porostů lesních dřevin a bilance uhlíku v těchto porostech (Lehtonen a kol. 2007).

3.1 STRUKTURA POROSTU LESNÍCH DŘEVIN

Penner a kol. (1997) definují biomasu jako hmotnost vysušeného organického materiálu ekosystému v určitém čase. Z pohledu rostlinné složky lesních porostů dělí Kivari a kol. (2011) biomasu na:

- nadzemní živou stromovou biomasu (kmen, větve, borka, listoví, plody a květy),
- podzemní živou stromovou biomasu (kořeny stromů, klíčící semena a oddenky),
- nadzemní mrtvý materiál (mrtvé stojící a ležící stromy, mrtvé větve, hrubá dřevní vlákna v různém stádiu rozkladu),
- ostatní vegetační pokryv (malé živé stromy a jejich olistění, keře, byliny, mechy a lišejníky),
- organický půdní materiál (rozkládající se opad, ostatní humusový materiál).

Před samotným odhadem množství biomasy lesních dřevin (stromů) je nutné definovat všechny složky, na které se stromy nejčastěji dělí. Základními pojmy jsou nadzemní a podzemní biomasa stromu, jejichž součet je celková biomasa stromu. Nadzemní a podzemní biomasa jsou od sebe odděleny rovinou půdního povrchu. Někteří autoři (Albrektson a kol. 1984, Marklund 1988) však k podzemní biomase (kořenovému systému) řadí i biomasu pařezů. Podzemní biomasu stromu tvoří kořeny (kořenový systém), nadzemní biomasu kmen, větve, asimilační aparát (listy nebo jehlice) a reprodukční aparát (květy a plody).

Kořenem se rozumí pozemní orgán stromu bez listů a pupenů, který upevňuje strom v půdě, čerpá z ní živiny a může sloužit i jako zásobní orgán (Kubát a kol. 2002). Některé regresní rovnice pro odhad biomasy kořenového systému jsou uváděny pro celý kořenový systém bez ohledu na jeho rozdělení na jednotlivé tloušťkové frakce (Nihlgård 1972, Lee 1998, Drexhage a Gruber 1999, Drexhage a Colin 2001, Do-Hyung 2001, Broadmeadow a Matthews 2004, Wirth a kol. 2004). Běžně se ale biomasa kořenového systému dělí na zvolené tloušťkové frakce (Marklund 1988, Makkonen a Helmisaari 1998, Le Goff a Ottorini 2000, Mund a kol. 2002, Xiao a kol. 2003) – např. frakce kořenů s průměrem větším než 1 cm a menším nebo větším než 5 cm nebo dělení kořenů na jemné (fine roots), malé (small roots) a hrubé (coarse roots) kořeny (Zianis a kol. 2005).

Kmen představuje nevětvenou část dřevnatého stonku stromů (Kubát a kol. 2002). Biomasa kmene se často dělí na část obchodovatelnou a část neobchodovatelnou (ekonomicky nevýznamnou, např. část kmene nebo celý kmen stromu s tloušťkou < 7 cm nebo < 3–4 cm) (Zianis a kol. 2005). Matis a Alifragis (1983–1984) například navíc odlišují část biomasy kmene pod korunou a část biomasy kmene v koruně stromu. Samostatnou monitorovací položku může rovněž představovat biomasa pařezu (Mälkönen 1974, Marklund 1988, Parresol 1999).

Větve jsou dřevnaté části stromu, nesoucí listy (jehlice), květy a plody, spojené s kmenem, avšak nepovažované za jeho součást. Větve stromů se dělí na větve prvního řádu – kosterní větve (auxiblasty), které dávají základ tvaru koruny a nesou větve druhého a dalších řádů (makroblasty) (Kolařík a kol. 2005). Biomasa živých

větví se nejčastěji uvádí jako biomasa dřeva i borky větví stromu (Zianis a kol. 2005). Biomasu větví lze dělit např. na živé a mrtvé (suché) větve (Marklund 1988, Wirth a kol. 2004, Zianis a kol. 2005, Tobin a Nieuwenhuis 2007) nebo na tloušťkové frakce (např. průměr < 1cm, 1–3cm, > 3cm) (Matis a Alifragis 1983–1984). Někdy je část biomasy větví zařazena spolu s biomasou kmene do obchodovatelné části biomasy stromu (Brandini a Tabacchi 1996).

Asimilační aparát stromů tvoří listy nebo jehlice, které obsahují chlorofyl a které jsou schopny absorbovat sluneční energii a přeměňovat jí do energie chemických vazeb (Marek a kol. 2011). Asimilační aparát je nesen makroblasty, případně jejich zkrácenými články (brachyblasty) (Kolařík a kol. 2005). Biomasu asimilačního aparátu (listoví) stromu lze hodnotit jako celek (Marklund 1988, Tobin a Nieuwenhuis 2007), dále lze hodnotit vertikální distribuci biomasy asimilačního aparátu s případným rozdělením na slunné a stinné listoví (Šrámek a Čermák 2012) nebo lze hodnotit biomasu prvního, druhého a ostatních ročníků asimilačního aparátu u jehličnatých dřevin (Bormann 1990, Xiao a kol. 2003).

Květy a plody patří mezi generativní orgány stromů sloužící k pohlavnímu rozmnožování. Květy jsou tvořeny pohlavními orgány (pestík a tyčinky) a květními obaly. Po oplození květu vzniká plod obsahující semena. U jehličnatých lesních dřevin jsou plody zralé samičí šišky nesoucí semena. Rozlišují se vytrvalé (např. borovice, smrk) nebo rozpadavé (jedle) šišky (Hieke 1978, Kubát a kol. 2002). Pro tvorbu a množství semen, respektive šišek, je rozhodující dosažení dospělosti stromu, podíl fotosyntátů transportovaných do generativního orgánu a množství nutně odvedené energie podle velikosti semen. Energetická náročnost tvorby květů, plodů a semen neumožňuje řadě druhů lesních dřevin každoroční kvetení. Proto lze u lesních dřevin pozorovat produkci plodů a semen v tzv. semenných letech. Časový interval mezi jednotlivými semennými roky je dán rostlinným druhem a jeho vnitřními a vnějšími podmínkami. Nárůstem roční teplotní sumy v poslední době dochází k častějšímu kvetení (např. smrk kvete každým druhým až třetím rokem) (Kolařík a kol. 2005). Kvantifikací biomasy šišek se zabýval např. Brække (1986).

3.2 HLAVNÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PRODUKCI BIOMASY LESNÍCH DŘEVIN

Primární produktivita (primární produkce) je rychlost, kterou se v důsledku fotosyntetické činnosti producentů (zelených rostlin) využívá elektromagnetického záření Slunce pro tvorbu organických látek, jež tvoří biomasu stromů. Pokud je primární produkce hodnocena z pohledu celkového množství zachycené a uložené energie nebo uhlíku za určitou časovou jednotku, hovoří se o hrubé primární produkci (Freer-Smith a kol. 2007, Perry a kol. 2008, Marek a kol. 2011). Hrubá primární produkce určuje mohutnost fotosyntetické asimilace (Marek a kol. 2011). Část zachycené a uložené energie je spotřebována na autotrofní respiraci (respirace listoví a nefotosyntetizujících částí rostlin – např. kořeny, lýko, bělové dřevo) nutná pro existenci a růst živé biomasy. Rozdíl hrubé primární produkce a heterotrofní respirace se označuje jako čistá primární produkce (Mäkelä a Valentine 2001, Freer-Smith a kol. 2007, Perry a kol. 2008, Marek a kol. 2011).

Fotosyntéza je tedy proces fixace energie do hmoty a respirace je zpětné uvolňování této uložené energie. Tyto procesy jsou ovlivňovány řadou faktorů, které lze rozdělit do dvou skupin:

1) genetické (vnitřní) faktory:

– jedná se o vlastnosti kódované v sekvenci DNA každé živé buňky organismu. Tyto genetické informace se mohou (ale nemusí) projevit jako znaky. U stromů a ostatních vyšších rostlin se DNA nachází v jádrech buněk a dvou typů organel – chloroplasty a mitochondrie. Dva stromy stejného druhu mají více podobných sekvencí DNA než stromy dvou různých druhů. Dále stromy jednoho druhu, ale dvou různých proveniencí mají více rozdílů v sekvencích DNA než stromy stejné provenience (White a kol. 2007).

2) environmentální (vnější) faktory:

– každý strom potřebuje pro přežití, růst a vývoj vhodnou kombinaci environmentálních faktorů. Environmentální faktory se dělí na abiotické a biotické faktory. Mezi abiotické faktory patří např. klimatické podmínky (sluneční záření, atmosférické srážky, teplota, apod.), chemické složení ovzduší, vlastnosti půdního prostředí, nadmořská výška, svahová expozice. Mezi biotické faktory patří působení biofágů živících se živou potravou nekrofágů, profitujících z rozkladu mrtvé biomasy, a existující vnitrodruhové a mezidruhové vztahy (predace, parazitismus, kompetice,

amenzalismus, mutualismus, komenzalismus a neutralismus) přirozeně se vyvíjející nebo člověkem pozměněné. Navíc každý druh má rozdílné požadavky na soubor těchto faktorů. Změna klimatu, se kterou se zároveň mění environmentální faktory působící na stromy, může vést k výrazným změnám celých lesních ekosystémů (Brown 1977, Haferkamp 1988, White a kol. 2007, Perry a kol. 2008).

Faktory ovlivňující růst stromů vykazují časovou i prostorovou dynamiku. Tyto faktory nepůsobí nezávisle na sobě, ale vzájemně vytváří výsledné růstové podmínky. Stromy nejsou pouze pasivně vegetujícími organismy, ale samy se snaží efektivněji využívat nebo zlepšovat své růstové podmínky (Perry a kol. 2008).

V lesních porostech se vytváří specifický radiační režim. V extrémních případech (například boreální jehličnaté lesy) mohou koruny stromů zachytit nebo odrazit zpět do atmosféry až 97 % dopadajícího slunečního záření, což výrazně omezuje rozvoj podrostu. Spektrum i množství slunečního záření pronikajícího do lesního porostu se liší od spektra a množství slunečního záření dopadajícího na porost. Pod korunami stromů není téměř žádné ultrafialové záření a modrá a červená část spektra je zachycována chlorofylem v zelených orgánech stromů. Proto ve slunečním záření propuštěném korunami stromů převažuje zelená barva. Pohlcením červeného spektra rovněž dochází ke změně poměru červené části slunečního spektra blízkého infračerveného záření. Vzhledem k odlišným radiačním podmínkám pro fotosyntézu pod korunami stromů může být omezen vývoj podrostního patra a nemusí zde docházet k tak rychlé fixaci CO₂ jako v korunové vrstvě lesního porostu (Adams 2008, Perry a kol. 2008).

V lesních porostech se vytváří specifický teplotní režim. Vegetace zmenšuje rozsah denní amplitudy teploty vzduchu. Nejvyšší teploty vzduchu lze v lesních porostech naměřit v prostoru nad korunovou vrstvou, kde jsou díky absorpci slunečního záření koncentrované zdroje tepla. Teplota vzduchu většinou klesá směrem k půdnímu povrchu. Někdy se však v lesních porostech může vyskytovat inverzní gradient teploty vzduchu, kdy je nejvyšší teplota vzduchu zaznamenána u povrchu půdy (Barbosa a Wagner 1989, Hortalová a kol. 2003). Na půdách bez vegetace může maximální teplota v několika svrchních centimetrech půdy dosáhnout přes den i více než 80 °C. Naopak během noci povrch obnažené půdy rapidně chladne, a to až o 20 °C

proti běžným denním teplotám. Fluktuace teploty půdy je vegetačním porostem zřetelně mírněna (Adams 2008).

Lesní porosty významně ovlivňují prostorové rozložení koncentrace CO₂. V korunové vrstvě je koncentrace CO₂ snižována díky fotosyntéze v asimilačním aparátu, zatímco v přízemní vrstvě lesních porostů může být koncentrace CO₂ zvyšována respirací půdy, rozkladnými procesy mrtvé biomasy či dýcháním sekundárních producentů. Koncentrace CO₂ v přízemní vrstvě lesních porostů může dosahovat několikanásobně vyšších hodnot než průměrná atmosférická koncentrace CO₂ (Adams 2008, Perry a kol. 2008).

Lesní porosty mají značný význam v koloběhu vody. Perry a kol. (2008) uvádějí šest hlavních způsobů, jak lesy ovlivňují koloběh vody:

- 1) díky transpiraci se voda dostává do atmosféry, zvyšuje její vlhkost a může ovlivňovat tvorbu oblaků,
- 2) koruny stromů mají nízké albedo (absorbují více sluneční energie, která řídí evaporaci a transpiraci) a jsou aerodynamicky drsné, což ovlivňuje tvorbu oblaků,
- 3) lesní dřeviny produkují aerosoly, které ovlivňují tvorbu oblaků,
- 4) lesní dřeviny usnadňují, díky svým kondenzačním povrchům, přenos vody ze vzduchu do půdy,
- 5) lesní dřeviny díky svým kořenům významně zvyšují vodní kapacitu půdy,
- 6) hlubokokořenící lesní dřeviny jsou schopné díky procesu zvanému hydraulická redistribuce aktivně pumpovat vodu mezi hlubokou podzemní vodou a vrchními půdními horizonty.

Známy je také pozitivní vliv lesů na zmírňování záplav. Andreassian (2004) vyhodnotil 137 párů různých dlouhodobě sledovaných povodí se závěrem, že odlesnění způsobuje jednak zvýšení dosažené hladiny během kulminace, jednak větší celkový objem vody povodně. Lesy rovněž výrazně tlumí erozní činnost vody.

Lesní porosty ovlivňují také proudění vzduchu.

Na primární produkci je závislá produkce sekundární. Heterotrofní organismy konzumují rostlinná pletiva, a tím převádějí část jejich hmoty a energie do své vlastní biomasy. Mezi sekundární producenty patří i dekompozitoři, kteří jsou kriticky důležitými regulátory procesů ve všech ekosystémech, zejména koloběhů živin (Moran a Hodson 1989, Perry a kol. 2008).

3.3 HISTORICKÝ VÝVOJ VÝZKUMU BIOMASY POROSTŮ LESNÍCH DŘEVIN

Od počátku cílevědomého hospodaření v lesích byla člověkem věnována pozornost faktorům ovlivňujícím růst stromů. Mezi prvními, kdo se vědecky zaměřili na hodnocení struktury, růstu a produkce biomasy stromů, byli přírodovědci (Marklund 1987). Již v roce 1876 Ebermayer stanovoval anorganické složení opadu a vyhodnotil vliv odstranění opadu na růst stromů. Určité dělení struktury biomasy a kvantifikaci přírůstu stromů lze nalézt v růstových tabulkách Schwappacha z roku 1896 pro borovici a z roku 1912 souhrnně pro břízu, buk, dub, olši, jasan, smrk, borovici a jedli. Amilon (1925) prezentuje závislost mezi různými stromovými frakcemi a růst stromů popisuje jako funkci biomasy jehličí a její listové plochy. Tirén (1927) odvozuje roční přírůst stromů z pohledu morfologie jehlic a listové plochy stromu. Konšel (1931) popisuje produkční činitele, mezi které řadí dřevinu (druh), podnebí, vzduch (pojato široce ve smyslu chemického složení, obsahu vodních par, tvorby ledovky, působení sněhu, směru větru nebo vzniku elektrických výbojů), sluneční světlo a teplo, podnební pásmo, polohu v zeměpisném rozšíření dřeviny, povrchový útvar země (a jeho vliv na podnebí), anorganické vlastnosti půdy a biochemii lesní půdy. Sychrovský (1933, 1934) poměrně podrobně shrnuje praktické lesnické poznání z přelomu 19. a 20. století. Jako hlavní činitele výškového a tloušťkového přírůstu, přírůstu kruhové základny, změny tvaru kmene, růstu kořenového systému nebo hmotového přírůstu uvádí věk, dřevinu, stanoviště (hodnocení z pohledu „zdatnosti“, a bonity), individualitu neboli osobivost (myšleno z pohledu dědičných vlastností a jakosti semene, ze kterého strom vyrostl), vznik stromu (z pařezin nebo ze semen), výchovu porostu, povětrnost roku, dobu a léta plodnosti, velikost koruny, všeobecné namáhání stromu, tíhu větví, nedostatečný vývojový prostor, jednostranné působení větru, nepravidelný prostorový vývoj stromu a vliv půdy z pohledu fyzikálních a chemických vlastností.

Od 40. let 20. století začalo být studium biomasy stromů součástí mnoha ekologických výzkumů (Marklund 1987). Kittredge (1944) například sledoval závislost mezi biomasou listoví a intercepací dešťové vody, propustností světla stromy, transpirací, opadem a koloběhem organických látek v porostu.

Na přelomu 40. a 50. let 20. století se již řada větších lesních společností v Severní Americe a severní Evropě zabývala kvantifikací lesní biomasy pro obchodní účely (Taras 1967, Parresol 1999). V 50. letech 20. století pokračoval rozvoj ekologického přístupu ve vědě a výzkum biomasy porostů lesních dřevin se začal celosvětově rozšiřovat (Senda a kol. 1952, Satoo a kol. 1955, Ovington a Madgwick 1959, Marklund 1987).

V 60. letech 20. století vznikl pod záštitou UNESCO „Mezinárodní biologický program“ (International Biological Programme), v jehož rámci se významně zvýšil počet vědeckých prací týkajících se biomasy porostů lesních dřevin. V polovině 60. let začal větší ekonomický tlak na lesy. Pro výrobu papíru se využívalo stále více biomasy stromů, např. i vrcholky stromů, větve nebo pařezy (Young a Chase 1965). Do té doby publikované výsledky týkající se stromové biomasy shrnuje v pěti částech Keays (1971).

Ropná krize na začátku 70. let 20. století vedla k přehodnocení situace se zdroji energie a biomasa dřevin se stala zajímavým alternativním a obnovitelným zdrojem energie (Grantham a Ellis 1974, Hall a Moss 1983). To vedlo podle Marklunda (1987) k nevídané publikační aktivitě. Jednak v množství prací, jednak v rozmanitosti publikovaných témat. Příkladem snahy o syntézu vědeckých publikací o biomase lesních dřevin jsou například publikace Hitchcocka a McDonnella (1979) nebo Satooa a Madgwicka (1982).

Od 90. let 20. století se růst a struktura biomasy lesních dřevin hodnotily z pohledu její významné role jako zdroje energie v budoucnu (Hall 1997) a dále v kontextu předpokládané globální změny klimatu, neboť lesy jsou potenciálně velkým úložištěm atmosférického uhlíku (IPCC 1997, Zianis a kol. 2005, Marek a kol. 2011). Přijetím Kjótského protokolu v rámci Rámcové úmluvy OSN o změně klimatu (UNFCCC – United Nations Framework on Climate Change) vznikla ratifikujícím zemím povinnost snížit emise skleníkových plynů (Česká republika o 8 % ekvivalentu CO₂ proti roku 1990) a podepsané státy musejí dokládat odhady plochy lesů a uhlíkových zásob a změn v biomase lesních dřevin (UNFCCC 1998, Einarsson a kol. 2004, Marek a kol. 2011). Propady uhlíku v lesích byly tedy pro svou důležitou roli v globálním cyklu

skleníkových plynů zahrnutý do Kjótského protokolu jako možný nástroj zmírnění klimatických změn

3.4 ODHAD ZÁSOPY BIOMASY LESNÍCH DŘEVIN

Nejpřesnější metodou pro stanovení nadzemní biomasy lesních dřevin je destrukční metoda, tedy pokácení a následné zvažení všech stromů. To je ovšem velmi pracné a časově i finančně náročné (Liu a Westman 2009). Proto jsou data o biomase lesních dřevin publikována nejčastěji formou regresních modelů (alometrických vztahů) založených na změření vzorníkových stromů. Termín alometrie znamená závislost mezi určitou částí organismu a celkem (Lande 1979, Wehner a kol. 2007, West 2009). Celková biomasa stromu nebo její jednotlivé složky se stanovuje dosazením nezávisle proměnných do příslušných regresních rovnic respektujících tyto alometrické závislosti. Nejčastějšími vstupními parametry bývají výčetní tloušťka stromu s borkou (DBH), výška stromu (H) nebo jiné snadno měřitelné parametry (Satoo a Madgwick 1982, Liu a Westman 2009). Obecně lze předpokládat, že čím více parametrů vstupuje do regresních rovnic v rámci jedné studie, tím je získán lepší odhad skutečné hodnoty. Například Marklund (1987) uvádí regresní rovnice, pro které je nutné znát kromě výčetní tloušťky a výšky stromů také délku zelené koruny, maximální radius koruny, tloušťku borky ve výčetní výšce, tloušťkový přírůst kmene ve výčetní výšce za posledních 5 let, počet letokruhů ve výčetní výšce, tloušťku nejsilnějšího kmene s borkou ve výčetní výšce rostoucího na ploše nebo výšku dominantních stromů ve věku 100 let. Odhad biomasy porostu lesních dřevin je pak součtem modelových hodnot jednotlivých stromů. V případně rozdělení lesního porostu na třídy (např. tloušťkové), kdy je znám pouze počet stromů v jednotlivých třídách, se odhad biomasy získá vynásobením modelových hodnot pro třídy počtem stromů v jednotlivých třídách a jejich součtem (Zhai 1982).

Největší podíl publikovaných regresních rovnic pro odhad biomasy lesních dřevin tvoří algoritmy odhadu frakcí nadzemní biomasy. Od měření podzemní biomasy se často upouští z důvodu pracnosti a složitosti měření. Pro odhad sekvestrace uhlíku lesním porostem se využívají spíše odhady celkové nadzemní biomasy než odhady biomasy jednotlivých frakcí. Nicméně pro detailnější popis růstu stromu jsou

odvozovány regresní rovnice pro listoví, větve nebo kmen (Perry a kol. 2008, West 2009). V současné době se odhad zásob biomasy stromů v lesních porostech provádí pomocí alometrických rovnic nebo expanzních faktorů biomasy.

V lesnické praxi je povinnost uvádět porostní zásoby v lesních hospodářských plánech podle Vyhlášky č. 84/1996 Sb., o lesním hospodářském plánování. Podle této vyhlášky je nutné uvádět u každého lesního porostu plochu etáží, výměru, věk, věkový stupeň, věkovou třídu, zakmenění, zastoupení dřevin, střední porostní výšku a střední výčetní tloušťku pro každou zastoupenou dřevinu a porostní zásoby s přesností na celé m³ v objemu bez borky pro kmeny tlustší než 7 cm ve výčetní výšce. Porostní zásoba se v porostech starších než 80 let zjišťuje měřením, v porostech mladších než 80 let měřením nebo odhadem s použitím taxačních tabulek. Nicméně platí zásada, že nejpřesnější odhad zásoby je požadován ve starších, hodnotově a hospodářsky významnějších porostech (Šmelko 2000). Informace o aktuální zásobě hroubí (dřevní hmoty) v lesním porostu neslouží pouze k ekonomickým kalkulacím, ale tento taxační údaj lze rovněž využít pro odhad ostatních frakcí biomasy stromů pomocí expanzních a konverzních faktorů (viz Kap. 3.4.5). Odhad zásoby dřevní hmoty v lesních porostech lze provádět různými způsoby. Tyto metody rozděluje Šmelko (2000) do dvou hlavních skupin, a to na i) metody přímého měření, kam řadí měření celého porostu a měření na zkusných plochách, a ii) metody odhadu zásoby pomocí růstových tabulek, biometrických modelů nebo metody okulární založené na osobních zkušenostech. Existuje celá řada způsobů pro odhad zásoby dřevní hmoty v lesním porostu – níže jsou uvedeny nejčastěji používané metody.

3.4.1 Objemové tabulky

Zjišťování porostních zásob pomocí objemových tabulek je založeno na odvození objemu stromu z výčetní tloušťky a výšky stromu. Lesní porost se vyprůměrkuje naplno, ke každému tloušťkovému stupni se naměří alespoň tři výšky stromů (podle četnosti stromů v tloušťkovém stupni), naměřené výšky se vynesou do grafu, provede se jejich vyrovnání křivkou (výškový grafikon) a z grafu se k jednotlivým tloušťkovým stupňům odečtou výšky. Poté se v objemových tabulkách zjistí k výškám a výčetním tloušťkám objem jednoho kmene, který se vynásobí počtem stromů

v příslušném tloušťkovém stupni. Toto určení zásoby porostu je přesné ($\pm 1 \%$), ale časově náročné. Nejčastěji se používají objemové tabulky dvouargumentové, kde je nutné znát výčetní tloušťku a výšku stromů. V Evropě existují ovšem i přesnější objemové tabulky trojargumentové založené na odhadu objemu kmene pomocí výčetní tloušťky, výšky a jiné tloušťky kmene – například v 7 metrech výšky stromu (Šmelko 2000).

3.4.2 Jednotné objemové křivky

Určení porostních zásob na základě průměrkování naplno nebo na zkusných plochách. Metoda využívá grafikony jednotných výškových křivek (Šmelko 2000). V porostu se průměrkováním zjistí tloušťková distribuce stromů, podle tvaru histogramu se určí tzv. Weiseho procento, tj. kolik procent stromů se nachází před Weiseho středním kmenem, a stanoví se střední průměr kmene. Poté se změří výšky stromů blízkých střednímu průměru kmene (nejméně 10 stromů). Pro tyto stromy se změří i výčetní tloušťky s přesností na 1 cm. Průsečík aritmetického průměru výčetních tlouštěk (střední tloušťka) a výšek (střední výška) těchto stromů udává číslo jednotné objemové křivky v rozřídovacím grafikonu jednotných objemových křivek. Objemy stromů v tloušťkových stupních se odečítají v tabulkách jednotných objemových křivek podle určeného čísla jednotné objemové křivky (Lesprojekt 1982). Metoda je méně přesná ($\pm 5 \%$), ale méně náročná na čas.

3.4.3. Relaskopování

Podstatou metody je zjištění plochy kruhové základny, která se pak vynásobí tzv. výtvarnicovou výškou. Postup vyvinul Walter Bitterlich a nejčastěji se pro rozdělení stromů mezi zaujaté a nezaujaté používá relaskopický klín, relaskopická hůl nebo zrcadlový relaskop. Při terénním šetření se počítají stromy, jejichž výčetní tloušťka je větší než záměrný úhel použitého relaskopu. Z relaskopického měření se odvodí výčetní kruhová základna stromů a vynásobením střední výtvarnicovou výškou se vypočítá zásoba dřevní hmoty v porostu. Relaskopování je u nás nejpoužívanější metodou zjišťování porostních zásob.

3.4.4. Alometrické rovnice

Alometrické rovnice umožňují odhad celkové biomasy lesních dřevin nebo jejich frakcí dosazením snadno měřitelných veličin do rovnic (West 2009, Marek a kol. 2011). Metoda slouží k nedestruktivnímu, nepřímému a rychlému odhadu porostní zásoby (St. Clair 1993, Xiao a Ceulemans 2004). Nejběžnějším tvarem alometrických rovnic je algoritmus mocninného tvaru založený na dosazení výčetní tloušťky dřeviny (*DBH*):

$$B_i = a * DBH^b \quad (1)$$

kde B_i – biomasa vybrané frakce i ; a a b – konstanty.

Popularita tohoto tvaru rovnice je dána kompromisem mezi přesností odhadu a náročností získání potřebných vstupních dat, protože vyžaduje pouze dosazení nejběžněji a nejsnáze měřitelného parametru – výčetní tloušťky stromu. Přidání dalšího parametru, i když statisticky významného, často nevede k podstatnému zvýšení koeficientu determinace (R^2) nebo snížení standardní chyby odhadu (*SEE*) (Ter-Mikaelian a Korzukhin 1997, Jenkins a kol. 2003, West 2009). Dnes existuje celá řada tvarů alometrických rovnic od jednoduchých (Ter-Mikaelian a Korzukhin 1997, Zianis a kol. 2005, Mikšis a kol. 2007, Marková a Pokorný 2011, Lim a kol. 2013) po složitější, víceparametrické, často využívající logaritmické transformace pro eliminaci heteroskedasticity dat (Marklund 1987 a 1988, Parresol 1999, Wirth a kol. 2004, Zianis a kol. 2005, Marek a kol. 2011). Například Freedman a kol. (1982) ale uvádějí, že přidání výšky stromu (druhého nejčastějšího měřeného a dosazovaného parametru stromu) do rovnic, společně s výčetní tloušťkou, nemá požadovaný efekt a vysvětluje navíc jen málo variability oproti regresním rovnicím obsahujícím pouze výčetní tloušťku stromu. Alometrické rovnice již byly vytvořeny pro řadu druhů stromů v rámci různých geografických a ekologických oblastí (Zianis a kol. 2005, Pokorný a Tomášková 2007, Marková a Pokorný 2011). Alometrické vztahy jsou totiž ovlivněny porostně specifickými faktory, jako jsou parametry porostu a stanovištní podmínky (Tatarinov a Cienciala 2009).

3.4.5. Expanzní a konverzní faktory

Expanzní faktory slouží k odhadu celkové biomasy na úrovni stromu, lesního porostu i v rámci dat z národních inventarizací lesů (Lehtonen a kol. 2004, Tobin a Nieuwenhuis 2007, Marek a kol. 2011). Používané expanzní faktory biomasy (BEF) vyjadřují násobek biomasy jednotlivé složky (i) (listoví, větve, vrchní část stromu, borka, pařez, kořeny) k objemu nebo hmotnosti kmene stromu. Jsou tedy poměrem mezi suchou frakcí (B_i) a objemem (V), případně hmotností (m) kmene (Schoene 2002, Lehtonen a kol. 2004, Marek a kol. 2011) :

$$BEF(V)_i = \frac{B_i}{V} \quad (2)$$

$$BEF(m)_i = \frac{B_i}{m} \quad (3)$$

kde $BEF(V)_i$ a $BEF(m)_i$ – výsledný expanzní faktor biomasy frakce i vztažený buď k objemu kmene (V) nebo hmotnosti kmene (m); B_i – biomasa vybrané frakce.

Značné rozšíření tohoto postupu pro odhad biomasy lesních dřevin bylo důsledkem rozvoje a zpřesňování objemových funkcí kmene pro různé druhy stromů, rostoucích v různých stanovištních podmínkách, a aplikací vytvořených objemových funkcí v národních inventarizacích lesů. Tento rozvoj probíhal hlavně v druhé polovině 20. století (Pajtlík a kol. 2008, West 2009). Expanzní faktory biomasy lesních dřevin matematicky zahrnují konverzní faktor hustoty pro přepočet objemu kmene na suchou hmotnost a expanzní faktor pro celkovou biomasu stromu nebo její frakci (Lehtonen a kol. 2004, Marek a kol. 2011). Pokud se expanzní faktor biomasy vztahuje pouze na nadzemní biomasu, lze rovněž hodnotu dodatečně vynásobit koeficientem pro podzemní biomasu (Zatloukal a kol. 2006, Marek a kol. 2011). Při výpočtu množství uhlíku vázaného v biomase lesních dřevin lze rovněž přiřadit koeficient obsahu uhlíku (používá se např. koeficient 0,5) (Marek a kol. 2011). Obecně se expanzní faktory biomasy používají jako konstanty, i když je známá jejich variabilita mezi růstovými podmínkami nebo vývojovými fázemi lesních porostů (Satoo a Madgwick 1982, Lehtonen a kol. 2004). Výpočet expanzních faktorů biomasy

pro jednotlivé frakce (i) v závislosti na věku dřeviny (A) navrhuje např. Lehtonen a kol. (2004):

$$BEF_i = a_i + b_i e^{-0,01A} \quad (4)$$

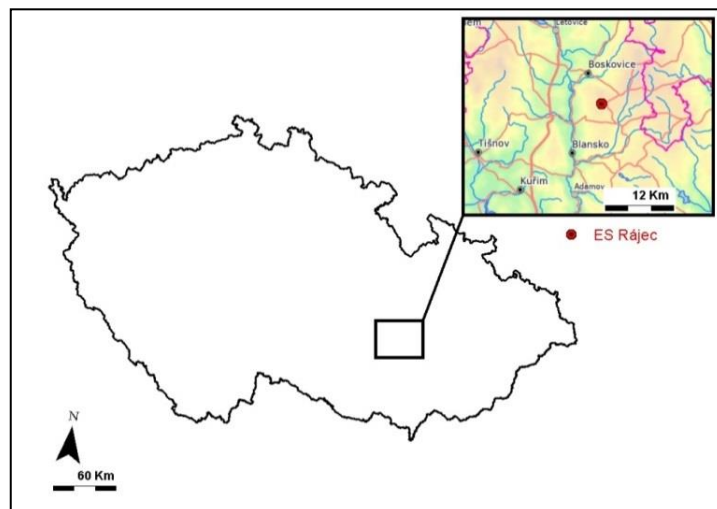
kde a_i , b_i – navržené konstanty specifické pro druh stromu a každou frakci biomasy i ; $e^{-0,01A}$ – nezávisle proměnný faktor věku stromu (Lehtonen a kol. 2004, Cienciala a kol. 2006, Marek a kol. 2011).

4. MATERIÁL A METODY

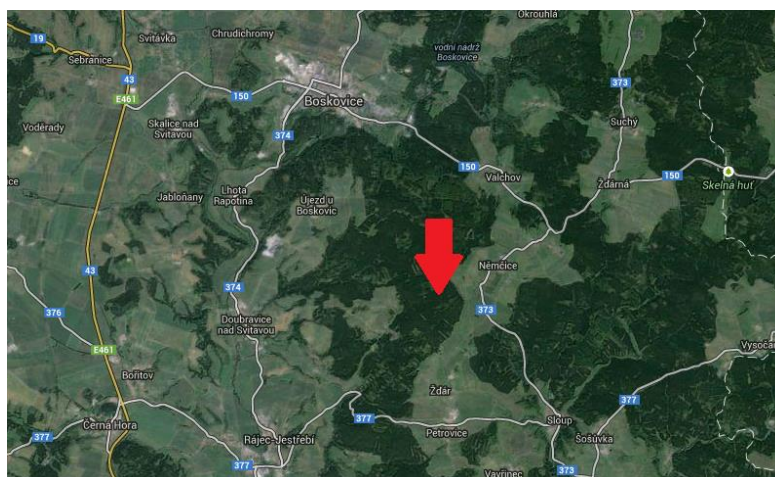
4.1 POPIS LOKALITY

Hodnocení struktury dospělého smrkového porostu probíhalo na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina). Ekosystémová stanice Rájec (Obr. 1 a 2) je umístěna asi 1 km jihozápadně od obce Němčice. Zeměpisná poloha studovaného dospělého smrkového porostu je 49°26'37'' severní zeměpisné šířky a 16°41'48'' východní zeměpisné délky. Horopisný celek Drahanská vrchovina zaujímá asi 50 km dlouhé území mezi Brnem a Chornicemi (Skořepa 2006). Oblast patří do přírodní lesní oblasti 30 – Drahanská vrchovina, jejíž lesnatost (55 %) je nad celorepublikovým průměrem. Přírodní lesní oblast Drahanská vrchovina zaujímá 2,74 % území České republiky (Níkl 2000). Půdní poměry jsou v této přírodní lesní oblasti velmi různorodé z důvodu pestrého geologického podloží. Území je charakteristické střídáním klimatických okrsků od mírně teplých a suchých až po mírně vlhké – pahorkatinné a vrchovinné (Průša 2001). Culek a kol. (2005) zařazuje z pohledu biogeografického členění sledované území do Drahanského bioregionu (1.52). 4SP – Svahy na neutrálních plutonitech 4. vegetačního stupně (Culek 1996, Culek a kol. 2005). Tento typ biochory se vyskytuje na úpatí obvodových pohoří jižních, jihozápadních a východních Čech, Slezska a na okraji Drahanského bioregionu. V segmentu u Boskovic se jedná o květnaté bučiny, variantu boskovickou se strdivkovým typem (*Melico-Fagetum*).

Ekosystémová stanice Rájec se nachází v lesích ve vlastnictví státu pod správou státního podniku Lesy České republiky, lesní správa Černá Hora, revír Kuničky, lesní hospodářský celek 1172. Studovaný dospělý smrkový porost je součástí porostu 512C10 (geoportal1uhul.cz).



Obr. 1: Poloha ekosystémové stanice Rájec (Drahanská vrchovina)



Obr. 2: Poloha ekosystémové stanice Rájec na satelitním snímku střední části Drahanské vrchoviny (<https://maps.google.cz/>)

Současné lesní porosty Drahanské vrchoviny tvoří převážně jehličnany (77 % rozlohy lesů), zatímco v přirozené dřevinné skladbě by měly být zastoupeny necelými 15 %. Naopak listnaté dřeviny tvoří pouze 23 % rozlohy lesů, zatímco v přirozené dřevinné skladbě by měly být zastoupeny téměř 86 %. Přirozená, cílová a současná skladba lesů Drahanské vrchoviny je uvedena v Tab. 1 a 2.

Tab. 1: Procentuální zastoupení jehličnatých dřevin v současné, přirozené a cílové skladbě Dražanské vrchoviny (SM – smrk ztepilý, JD – jedle bělokorá, BO – borovice lesní, MD – modřín opadavý, JX – ostatní jehličnany) (Průša 2001).

Skladba	SM	JD	BO	MD	JX	Jehličnany
Přirozená	1,0	13,4	0,2	–	–	14,6
Cílová	46,4	4,8	9,6	7,7	–	68,5
Současná	54,0	2,5	14,0	6,0	0,5	77,0

Tab. 2: Procentuální zastoupení listnatých dřevin v současné, přirozené a cílové skladbě Dražanské vrchoviny (DB – dub, BK – buk lesní, HB – habr obecný, JS – jasan ztepilý, JV – javor, JL – jilm, BR – bříza bělokorá, LP – lípa srdčitá, OL – olše lepkavá, LX – ostatní listnáče) (Průša 2001).

Skladba	DB	BK	HB	JS	JV	JL	BR	LP	OL	LX	Listnáče
Přirozená	23,6	55,6	2,1	0,4	1,0	–	0,1	2,0	0,3	0,3	85,4
Cílová	6,5	21,8	0,1	0,2	0,5	0,2	–	1,8	0,4	–	31,5
Současná	7,0	9,5	3,0	–	0,5	–	–	–	–	3,0	23,0

a) Poměry geografické a morfologické

Ekosystémová stanice Rájec patří geomorfologicky k provincii Česká vysočina, subprovincii Česko–moravské, oblasti Brněnská vrchovina, celku Dražanská vrchovina, podcelku Adamovská vrchovina a okrsku Škatulatec (Lacina a Quitt 1986). Hromádka (1956) zde odlišuje ještě do jednotné úrovně seříznutou, k jihozápadu nakloněnou Petrovickou plošinu. Studovaný dospělý smrkový porost se nachází na východním svahu rozvodného hřbetu táhnoucího se ve směru sever – jih ve výšce 625 m n. m. Směrem na východ klesá svah pod dospělým smrkovým porostem k údolní nivě Němčického potoka (590–570 m n. m.) (Klím 1978). Petrovická plošina byla součástí předneogenního plochého reliéfu s mocným pláštěm zvětralin. Ty byly sneseny v průběhu neogenní mořské transgrace do depresí a uloženy jako neogenní sedimenty. Místy tedy vznikla odkrytá bazální zvětrávací plocha. Odnos zvětralin pokračoval i po ústupu neogenního moře a po tektonickém zdvihu území. Následné klimatické změny na přelomu neogénu a miocénu a pleistocenní kryoplanační pochody reliéfu terénu výrazně přemodelovaly. Holocenní fluvialní pochody, eroze a denudace byly, a jsou, hlavními modelačními činiteli (Hruška 1978).

b) Poměry geologicko-petrografické

Geologické podloží na ekosystémové stanici Rájec tvoří brněnská vyvřelina táhnoucí se ve směru jihozápadním od Boskovic k Brnu a dále až k Miroslavi. V oblasti ekosystémové stanice je mateční horninou kyselý granodiorit s pokryvem různě mocných svahovin včetně balvanů s velikostí až 1 metr. V odkryvu je patrné dosti hluboké zvětrávání granodioritu bez porušení struktury (Klimo 1985, Hruška 1980). Svah v okolí ekosystémové stanice lze popsat jako kryoplanační terasu s mrazem rozvlečenými, silně mylonitizovanými a zvětralými úlomky granodioritu. Erozní zářezy v okolí studovaného porostu nejsou protékány stálými toky. Voda se místy ztrácí v mocnějších a propustných zvětralinách a opět se objevuje v nižších pramenech, které dále k Němčickému potoku vytváří erozní zářezy. Vodní síť je v současné době hlavním modelačním faktorem v návaznosti na svahovou modelaci (Klimo 1985). Kyselý granodiorit zde má zelenavě šedou barvu, sekundárně zbarvenou hydroxidy železa na foliačních plochách. Horniny tvoří zejména křemen, živce, sericit, chlorit a opakní minerály. Textura mateční horniny je plošně paralelní, s šupinovitou odlučností; některé její složky voštinově vyvětrávají. Struktura horniny je porfyroklastická s lepidoklastickou strukturou základní osnovy (Hruška 1980). Na mateční hornině se tvoří zvětralininy lehčího charakteru, se značnou příměsí matečného skeletu a krupnatého písku. Jsou dobře propustné pro vzduch i vodu, proto v nich často dochází k erozi nebo naopak k akumulaci hromadění, k mrazovým jevům a vnitroprofilovému zvětrávání. Tím vznikají místy hluboké a značně kombinované zvětralinové pokryvy jako mateční materiál pro půdotvorný proces (Hruška 1978).

c) Poměry pedologické

Na ekosystémové stanici Rájec se nachází půdní typ kambizem modální oligotrofní (Němeček a kol. 2001), dříve klasifikovaný jako kyselá hnědá lesní půdy (Klimo 1978). Půdní profil je vytvořen na různě mocných vrstvách svahoviny s vtroušeným granodioritovým šterkem i balvany. Zvětralinina bez porušení struktury zasahuje místy až do hloubky 40–50 cm a je pro vodu dost nepropustná. Následkem toho dochází k občasnému převlhčení celého půdního profilu, místy i oglejení (Klimo 1978). Nadložní humus má charakter silikátového kyselého moderu s výraznou vrstvou drti a měli v A₀ horizontu. Infiltrace humusu do půdního profilu je minimální a horizont A₁

je tak humusem zásoben slabě (Vašíček 1978). Zastoupení jílovité frakce (< 0,01 mm) v jemnozemi se pohybuje v intervalu 38–45 %, a proto ji Klimo (1978) označuje jako půdu hlinitou. Obsah částic menších než 0,002 mm je přibližně 10 %. Mateční hornina i organický opad podmiňují kyselou povahu půdy (Tab. 3).

Tab. 3: Acidita půdy ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina).

	Organická vrstva H	Organominerální horizont Ah	Hlubší minerální horizonty
Klimo (1978)	3,8	3,7	4,5
Grunda (1990)	4,6	3,9	–
Fabiánek a kol. (2009)	3,5	3,7	–

Nasycenost sorpčního komplexu je nízká. Podle Klima (1978) hodnota nasycenosti sorpčního komplexu v horizontu A dosahovala 13 %, v horizontu B činila 16 % a v hlubších horizontech 43 %. Fyziologická hloubka půdy zdola omezená nepropustnou vrstvou granodioritové zvětraliny není optimální z hlediska produkce lesních dřevin. Prostor rhizosféry je omezen na vrstvu poměrně štěrkovité svahoviny (Klimo 1978).

d) Poměry klimatické

Ekosystémová stanice Rájec se podle Quitta (1971) nachází v klimatické oblasti MT3 – mírně teplé a mírně vlhké. Tato klimatická oblast je charakterizována krátkým, mírným až mírně chladným, suchým až mírně suchým létem. Přejídné období je normální až dlouhé, jaro a podzim mírný a zima je normálně dlouhá, mírně chladná, suchá s krátkou sněhovou pokrývkou. Hodnota Langova dešťového faktoru dosahuje hodnot 100 a více, takže se studovaný dospělý smrkový porost nenachází v oblasti s vyšší pravděpodobností meteorologického sucha, které je definováno pro hodnotu Langova dešťového faktoru menší než 70 (Tolasz a kol. 2007).

e) Poměry hydrologické

Ekosystémová stanice Rájec se nachází v povodí řeky Moravy, tvořící severní část mezinárodního povodí Dunaje. Hydrologicky tedy patří k úmoří Černého moře.

Dospělý smrkový porost má východní expozici a nachází se blízko rozvodného hřbetu, který se táhne v přímém směru S – J. Na východní straně (na okraji ekosystémové stanice Rájec), pramení bezejmenný potok, který se spojuje s druhým vodním tokem přítékajícím od Němčic. Před obcí Sloup se vlévají do Němčického potoka, a následně do toku Žďárná. Ta je spolu s potokem Luha jednou ze zdrojnic Sloupského potoka. Tento se za obcí Sloup propadá a za jeho podzemním soutokem s potokem Bílá voda pokračuje jako Punkva, která u města Blansko vtéká do řeky Svitavy. Svitava v Brně vtéká do řeky Svratky, která ústí do vodní nádrže Nové Mlýny. Odtud už vytéká řeka Dyje, která se na hranicích Česka, Slovenska a Rakouska vlévá do řeky Moravy. Z pohledu hydrogeologické rajonizace České republiky patří území ekosystémové stanice Rájec do Krystalinika brněnské jednotky (ČHMÚ, 2016).

f) Historický vývoj lesů

Až na bezlesé skály a rašeliniště pokrývaly téměř celé dnešní území okolo Rájce člověkem neovlivněné smíšené lesy. Nelesní společenstva byla pouze ostrůvkovitého charakteru a malého rozsahu. Od pravěku lidé ovlivňovali nejdříve teplejší části tohoto území, později začali pronikat také do vyšších poloh, hlavně v Moravském krasu, kde využívali jeskyně jako úkrytu. Povrchové výskyty železných rud hojně sloužily k železářskému využití. Až ve 13. století vrcholí kolonizace zbytku území. Za podpory olomouckého biskupa Bruna ze Schaumburku dochází k osídlení, do té doby nevyužité půdy. Na úkor plochy lesa vznikají nová pole a louky (Skořepa 2006). Stručný vývoj druhové skladby místních lesních porostů od 18. století shrnuje Klimo (1978). Lesy bývalého velkostatku Rájec nad Svitavou sloužily dříve výhradně k těžbě dřeva sečí toulavou podle aktuální potřeby, ale také jako zdroj steliva, lesní trávy, žaludů a bukvic pro dobytek. Rovněž sloužily pro pastvu i jako zdroj zvěře. Podrobnější informace o dřevinách v jednotlivých revírech rájeckých lesů jsou až z první poloviny 18. století a jsou popsány v dominikální fasi. Z hlediska škod na lesích Klimo (1978) zmiňuje vichřici z roku 1739, kdy se podle záznamu v dominikální fasi ani do roku 1750 nepodařilo odstranit veškeré vývraty, mnohé spadlé stromy byly zcela shnilé a některé lesy byly stále neprůchodné a bez vyvinuté generace nového lesa. Ve 40. letech 18. století pak rájecké lesy sužovaly velké požáry. Ze záznamu komise přiznávací fase rájecké vrchnosti z roku 1750 vyplývá, že v revíru Obora (Rájec) byla zastoupena hlavně jedle, pak buk a smrk. V Josefském katastru

z roku 1787 je pro vrchnostenské lesy Obora a Přivýšiny, spadající pod katastrální území Němčice, uvedeno, že polovina z 1534 čtverečných sáhů (191,04 ha) byla porostlá bukem a habrem, méně dubem, a druhá polovina jedlí a málo smrkem. Tvrdé listnáče rostly na dobré a prostřední půdě, jehličnany pak na dobré, střední i špatné půdě. V 19. století byly kladeny na místní lesy velké nároky z důvodu výroby dřevěného uhlí. Tím se do roku 1857 vytápěly hamry a vysoké pece v Blansku. Při provádění toulavých sečí se spoléhalo na přirozenou obnovu lesa. Po zavedení holých sečí již přirozená obnova nepostačovala. Jedle, buk a dub byly od počátku 19. století nahrazovány rychleji rostoucími dřevinami. Rychleji rostoucí smrk uměle vytlačoval jedli a buk, borovice lesní a borovice černá nahrazovala dub jako dřevní surovinu na vodní stavby. Ze zachované mapy dřevinné skladby z roku 1830 je patrné, že na ploše dnešní ekosystémové stanice Rájec převládal mladý (10–30 let) bukový porost, což koresponduje s mapou dřevinné skladby z roku 1864 a 1884 uvádějící bukový lesstarý 30–55 let. Pro rok 1933 ovšem Klimo (1978) poukazuje na podstatnou změnu v druhové skladbě výrazně ve prospěch smrku se stářím přibližně 30 let. Bukové porosty rostoucí na původně devastovaných plochách byly tedy na přelomu 18. a 19. století nahrazeny smrkovou monokulturou.

g) Studovaný dospělý smrkový porost

Současný dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec je tedy dospělá monokultura smrku první generace. V současné době jsou na výzkumné ploše v rámci procesu obnovy dospělého smrkového porostu vysazeny bukové a jedlové clonné kotlíky. Probíhají zde rovněž pokusy se sítí douglasky tisolisté.

Studovaný dospělý smrkový porost se nachází uvnitř většího, jihovýchodního, oploceného komplexu ekosystémové stanice Rájec (49°26'37" severní zeměpisné šířky a 16°41'48" východní zeměpisné délky). Studovaný porost, který má tvar čtverce o ploše 1 hektar a pro přehlednost je rozdělen na 100 jednoarových plošek, je obklopen stejně starým (tj. 110–120 let) smrkovým porostem.

4.2 METODY POPISU STRUKTURY DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU

4.2.1 Klimatické podmínky na studované lokalitě

Během období 2009 – 2012 bylo sledováno množství globálního záření dopadajícího na studovaný smrkový porost pomocí bilancoměru umístěného na meteorologické věži nad korunovou vrstvou porostu (Bilancoměr CNR 1, Kipp-Zonen, Holandsko), teplota vzduchu nad korunovou vrstvou studovaného smrkového porostu pomocí teplotního čidla opatřené stínítkem umístěného na meteorologické věži (EMS Brno, Česká republika) a srážkové úhrny pomocí automatického srážkoměru umístěného na meteorologické věži nad korunovou vrstvou studovaného smrkového porostu (Automatický srážkoměr 386 C, MetOne Instruments, USA). Klimatické charakteristiky byly zaznamenávány automaticky každých 30 sekund a z těchto hodnoty byly vypočítány 10 minutové průměrné hodnoty, které byly ukládány do paměti automatické ústředny.

4.2.2 Dendrometrické parametry dospělého smrkového porostu

Dendrometrické parametry stromů byly ve studovaném dospělém smrkovém porostu zjišťovány standardními postupy elektronickou průměrkou (Haglöf AB, Švédsko) a výškoměrem Vertex (Haglöf AB, Švédsko). U všech stromů na ploše byla měřena výčetní tloušťka (DBH) ve výšce 1,3 m nad zemí, výška (H) a výška nasazení živé koruny. Časové změny tloušťkového přírůstu, resp. objemových změn kmene, byly monitorovány pomocí mechanických páskových dendrometrů (EMS, Česká republika), jejichž odečet byl prováděn přibližně 1x za 14 dní.

4.2.3 Index listové plochy dospělého smrkového porostu

Efektivní (nekorigované plochou dřevních částí) hodnoty indexu listové plochy (LAI) dospělého smrkového porostu byly stanoveny nepřímou metodou – měřením transmitance slunečního záření pomocí přístroje ALAI-02D (Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i., Česká republika, Pokorný 2015). Referenční měření na nezalesněné ploše a měření pod korunovou vrstvou studovaného porostu (22 měřících bodů) bylo prováděno za stálé synoptické situace, resp. za podmínek rovnoměrně zatažené oblohy, ca 1x za 14 dní. Podrobný popis a stanovení LAI tímto přístrojem popisuje Pokorný a kol. (2001) a Pokorný (2015).

4.2.4 Nadzemní a podzemní biomasa dospělého smrkového porostu

a) Nadzemní biomasa

Pro zjištění nadzemní biomasy jednotlivých frakcí dospělého smrkového porostu bylo vybráno 9 vzorníkových stromů rostoucích přímo na výzkumné ploše. Kácení vzorníkových stromů proběhlo v únoru 2010. Hlavními zjišťovanými parametry vzorníkových stromů byla biomasa jehlic, živých a suchých větví a kmene. Po pokácení stromů byly přímo v lese váženy a počítány větve v každém přeslenu a byla zaznamenána vzdálenost přeslenu od paty stromu. Z každého druhého přeslenu byla vybrána reprezentativní větev, která byla zvážena samostatně, a byla převezena do laboratoře k vysušení do konstantní hmotnosti. Vrchol stromu (posledních 9 přeslenů) byl vážen jako celek bez odlišení jednotlivých přeslenů a pro určení poměru suché jehlice/suché větve se odebral směsný vzorek s hmotností přibližně 2 kg. Po vysušení reprezentativních větví a směsného vzorku v laboratoři byly odděleny jehlice od větví a byly zváženy. Mrtvé (suché) větve byly váženy jako celek pro každý strom bez zaznamenání vzdálenosti od paty kmene. Tloušťky odvětvených kmenů byly měřeny ve dvou na sebe kolmých směrech každého 0,5 metru od paty stromu (tj. od půdního povrchu). Rovněž byla změřena výška pařezu.

Pro stanovení hustoty dřeva, tloušťky borky a poměru biomasy suchá borka/suché dřevo bylo odebráno 10 dřevních disků – disky byly uříznuty z klády, tj. z čela kmene ve vzdálenosti 1,3 metru od paty stromu, 1 metr od vrcholu stromu, těsně pod živou korunou a relativně v 10, 25, 40, 55, 70 a 85 % výšky stromu.

U každého vzorníkového stromu byly zaznamenány následující parametry:

- výčetní tloušťka (DBH),
- tloušťka kmene ve 3 (D3) a 5 metrech od paty stromu (D5),
- výška stromu (H),
- výška nasazení živé koruny (HCR),
- délka živé koruny (CL),
- maximální radius koruny (CR),
- věk stromu (A),
- šířka posledních pěti letokruhů (i5),
- tloušťka borky ve výšce 1,3 m od paty stromu (BT),

- věk (T) ve výšce 1,3 m od paty stromu.

Měření šířky letokruhů za posledních 5 let (i5) provedl RNDr. P. Mazal, Ph.D. v biometrické laboratoři Ústavu hospodářské úpravy lesů a aplikované geoinformatiky Lesnické a dřevařské fakulty Mendelovy univerzity v Brně pomocí digitální analýzy obrazu vzorků.

Pro celý studovaný porost bylo nutné zjistit:

- střední výšku porostu ve 100 letech (SI),
- horní výšku (SIS) porostu (průměrná výška 100 největších stromů v porostu),
- DBH největšího stromu (DBH_{max}),
- nadmořskou výšku porostu (HSL),
- zeměpisné souřadnice plochy (NC).

Vzhledem k výzkumné povaze a současnému souběhu řady vědeckých a výukových aktivit bylo možné pro destruktivní rozbory stromů využít pouze stromy vybrané pro předvýtní úmyslnou těžbu v zimním období roku 2010/2011, aby nebyla ovlivněna definovaná struktura porostu. Tím bylo omezeno množství dostupných vhodných vzorníkových stromů pro analýzu. Nicméně 9 vzorníkových stromů umožnilo sestavení použitelné alometrické rovnice pro jednotlivé frakce biomasy dospělého smrkového porostu.

Počet analyzovaných stromů neumožnil parametrizovat zcela unikátní lokální alometrickou rovnici kombinující více vstupních proměnných hodnot, například kombinaci DBH a H. Proto byly hodnoty naměřené na vzorníkových stromech (např. DBH, H, CL ...) použity pro výpočet odhadu biomasy podle z literatury dostupných alometrických rovnic. Modelové odhady jednotlivých frakcí biomasy pak byly posuzovány se skutečně zjištěnou biomasou frakce.

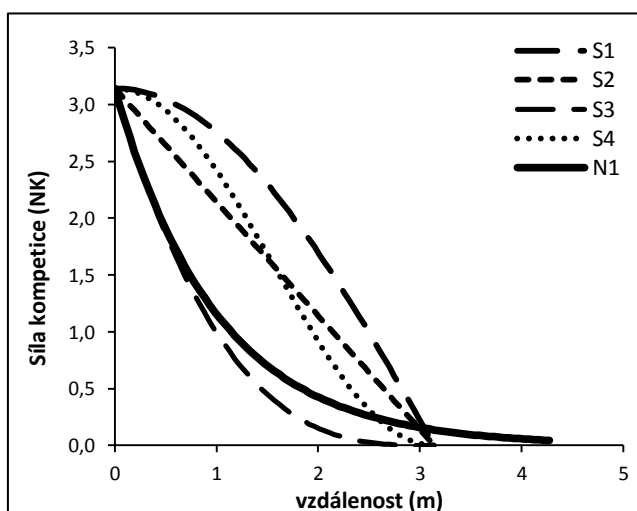
b) Podzemní biomasa

Podzemní biomasa (biomasa kořenů) dospělého smrkového porostu nebyla na vzorníkových stromech pokácených v zimním období roku 2010/2011 měřena. Pro stanovení podzemní biomasy byly použity rozbory 30 vzorníkových stromů ve věku 50–72 let rostoucích v těsné blízkosti studovaného dospělého smrkového porostu (Rájec nad Svitavou – porosty 813b2 a 810d1) (Vyskot 1981). U podzemní biomasy dospělého smrkového porostu tedy nebyly parametrizovány zvolené typy alometrických rovnic přímo jako u složek nadzemní biomasy, ale pouze bylo

provedeno srovnání s dosud publikovanými pracemi. V případě alometrických rovnic pro kořeny prezentované Marklundem (1988) byl vždy použit součet dvou rovnic. Ten ve své práci totiž rozděluje biomasy kořenů na kořeny silnější a slabší než 5 cm. Pro každou frakci uvádí 3 rovnice, proto bylo testováno celkem 9 modelů (využití všech kombinací) odhadu biomasy kořenů.

c) Kompetice

Růstový prostor a kompetice okolních stromů působící na jednotlivé vzorníkové stromy, jako parametr ovlivňující množství biomasy stromu, byly hodnoceny pomocí rastrování lesního porostu (Pretzsch 2009). Růstové okolí vzorníkových stromů bylo touto metodou rozděleno do čtverců o délce strany 2/3 metru a pro každý čtverec byla vypočítána síla kompetice nejbližších stromů. Algoritmus výpočtu síly kompetice pro jednotlivé čtverce plochy porostu vychází z předpokladů, že i) se vzdalováním se od stromu se síla jeho kompetice snižuje, ii) větší strom má větší sílu kompetice a vyžaduje (využívá) větší růstový prostor než menší strom. Takové podmínky splňuje řada matematických rovnic. Ve studovaném dospělém smrkovém porostu bylo zvoleno 5 typů rovnic pro výpočet síly kompetice vzorníkových stromů pro každý čtverec vytyčeného rastru (Tab. 4) a průběhy zvolených funkcí jsou znázorněny na Obr. 3. Síla kompetice (NK) je bezrozměrné číslo, které slouží k relativnímu posouzení vlivu okolních stromů, případně k určení sociální plochy stromu. Výhodou této metody je omezení subjektivního pohledu při určování, zda konkrétní blízký či vzdálenější sousední strom ovlivňuje vzorníkový strom.



Obr. 3: Průběh zvolených funkcí pro výpočet síly kompetice (NK) stromů na příkladu stromu i s výčetní tloušťkou 20 cm a dosazeného $x = 1$ (podle rovnice 5)

Tab. 4: Tvar rovnic zvolených pro výpočet síly kompetice (NK) vzorníkových stromů pro jednotlivé čtverce vytyčeného rastru v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina).

Ozn.	Tvar rovnice pro výpočet síly kompetice (NK)	Autor	Popis	
1S	$NK = a_i * \cos\left(\frac{\pi}{2} * \frac{dist_{i,xy}}{a_i}\right)$	Světlík (nepublikováno)	Kosinusoida v intervalu $\langle 0; \pi/2 \rangle$	$D(f) = \langle 0; a_i \rangle$ $H(f) = \langle 0; a_i \rangle$
2S	$NK = -1 * dist_{i,xy} + a_i$	Světlík (nepublikováno)	Přímka se 100% klesáním (úhel klesání 45 stupňů)	$D(f) = \langle 0; a_i \rangle$ $H(f) = \langle 0; a_i \rangle$
3S	$NK = \left[\left(\frac{dist_{i,xy}}{a_i}\right) - 1\right]^3 * (-a_i)$	Světlík (nepublikováno)	Modifikovaná mocninná funkce (zpočátku strmě klesající se vzdáleností)	$D(f) = \langle 0; a_i \rangle$ $H(f) = \langle 0; a_i \rangle$
4S	$NK = \frac{[a_i * \cos(\pi * dist_{i,xy}/a_i)]}{2}$	Světlík (nepublikováno)	Kosinusoida v intervalu $\langle 0; \pi \rangle$	$D(f) = \langle 0; a_i \rangle$ $H(f) = \langle 0; a_i \rangle$
5N	$NK = ba_{i 1,3} * e^{-dist_{i,xy}}$	Nagel (1999)	Mocninná funkce (zpočátku strmě klesající se vzdáleností)	$D(f) = \langle 0; \infty \rangle$ $H(f) = \langle 0; ba_{i 1,3} \rangle$

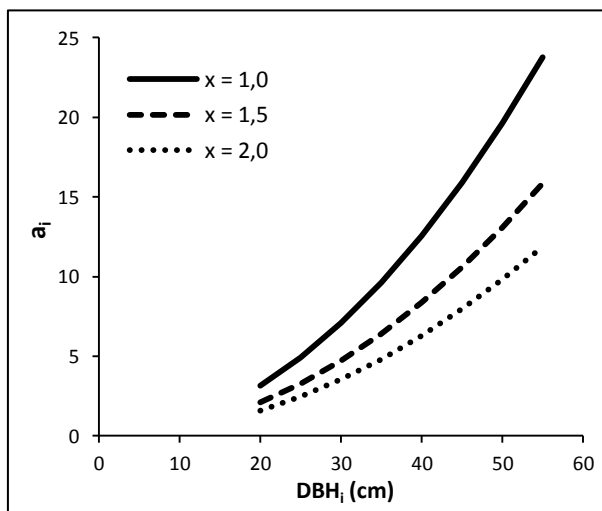
a_i – hodnota nejvyšší dosažitelné síly kompetice (NK) stromu i a zároveň poloměr kruhu (růstový prostor, ve kterém se hodnotí vliv kompetice sousedních stromů na strom i ; $dist_{i,xy}$ – vzdálenost stromu i ke středu čtverce xy ; $D(f)$ – definiční obor platnosti funkce; $H(f)$ – obor hodnot funkce; ba_i – výčetní kruhová základna stromu i .

Parametr a_i pro vzorníkový strom i vstupující do rovnic 1S–4S slouží přímo k vymezení oboru hodnot i definičního oboru funkce (Tab. 4). Zde byla síla kompetice stromů testována s dosazením $x = 1; 1,5$ a 2 do rovnice:

$$a_i = BA_i/x \quad (5)$$

kde a_i – definuje poloměr kruhu okolo stromu v metrech, v rámci kterého se posuzuje síla kompetice okolních stromů, a udává nejvyšší možnou hodnotu síly kompetice daného stromu; BA_i – výčetní kruhová základna stromu, v rámci kterého se posuzuje síla kompetice okolních stromů. Hodnoty závislosti a_i na výčetní tloušťce stromu (DBH_i) mají tvar mocninné funkce (Obr. 4).

Obecně lze říci, že použitím hodnoty $x = 1$ bylo zohledňováno spíše širší okolí stromu, kde i vzdálenější větší stromy mohou výrazněji ovlivnit výslednou hodnotu síly kompetice vzorníkového stromu. V tomto případě je tedy výsledný parametr kompetice odvozen spíše z hustoty porostu v okruhu desítek metrů, zatímco dosazením hodnoty $x = 2$ dostáváme hodnoty kompetice nejvíce ovlivněné přímými sousedy.



Obr. 4: Závislost hodnoty nejvyšší dosažitelné síly kompetice a_i (podle rovnice 5) na výčetní tloušťce stromu (DBH_i) v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina).

Vliv okolních sousedních stromů na vzorníkový strom (podle NK – síla kompetice) byl posouzen třemi empirickými přístupy:

- 1) $\sum NK_{ji}$ → součtem všech hodnot síly kompetice (NK_{ji}) okolních stromů na kruhové ploše o poloměru a_i (rovnice 5) se vzorníkovým stromem ve středu plochy. Tento postup byl proveden pro tvary rovnice pro výpočet síly kompetice 1S–4S (Tab. 4) postupně s dosazením tří variant a_i podle rovnice 5.
- 2) $\frac{\sum NK_i}{\sum NK_{ji}}$ → součet všech hodnot síly kompetice (NK_i) vzorníkového stromu vydělený součtem všech hodnot síly kompetice (NK_{ji}) okolních stromů na kruhové ploše o poloměru a_i (rovnice 5) se vzorníkovým stromem ve středu plochy. Tento postup byl proveden pro tvary rovnice pro výpočet kompetice 1S–4S (Tab. 4) postupně s dosazením tří variant a_i podle rovnice 5.
- 3) DP → určení velikosti disponibilní plochy vzorníkového stromu (DP) podle Nagela (1999). DP představuje součet ploch všech vytýčených čtverců, ve kterých vzorníkový strom uplatňuje nejvyšší sílu kompetice (Pretzsch 2009). Tento postup byl proveden pro tvar rovnice pro výpočet kompetice 5N (Tab. 4)

4.3 STATISTICKÉ A EMPIRICKÉ HODNOCENÍ DAT

Pro statistické hodnocení dat byl použit program Statistica 10.0 (Statsoft Inc., USA) a QCExpert (2015). Matematické výpočty a základní zpracování dat bylo provedeno v programu MS Excel (Microsoft, USA).

Vztah mezi zjištěnými parametry vzorníkových stromů x (BA , DBH , H , HCR , CL , $i5$, DP – vysvětlivky viz Kap. 4.2.4) a biomasou jednotlivých frakcí dospělého smrkového porostu (B_i) byl posouzen parametrizací rovnic ve tvaru:

$$B_i = ax + b \quad (6)$$

$$B_i = ax^b \quad (7)$$

$$B_i = ae^{bx} \quad (8)$$

$$B_i = ax^2 + bx \quad (9)$$

Po parametrizaci rovnic byla kvalita modelů posouzena podle střední kvadratické chyby predikce (MEP), Akaikeho informačního kritéria (AIC) a podle koeficientu

determinace (R^2). MEP a AIC se s kvalitou modelu snižují, zatímco vyšší R^2 značí vhodnější model. Pro parametrizované rovnice jsou rovněž uvedeny celkové střední chyby odhadu (RMSE).

Pro nalezení vhodného tvaru a parametrů známých alometrických rovnic bylo vybráno celkem 172 publikovaných rovnic, z toho 34 pro biomasu jehlic, 33 pro větve, 13 pro borku kmene, 15 pro suché větve, 12 pro kmen bez borky, 19 pro kmen s borkou, 18 pro biomasu koruny stromu, 10 pro celkovou nadzemní biomasu a 18 pro biomasu kořenů smrků. Pro testování všech zvolených rovnic bylo nutné dosazení v různých kombinacích 15 parametrů vzorníkových stromů a dospělého smrkového porostu uvedených výše. Pro výběr nejvhodnější alometrické rovnice dané frakce bylo hlavním posuzovacím kritériem NSE (Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient; Nash a Sutcliffe 1970). NSE při vzájemném porovnávání modelových a skutečných hodnot dosahuje hodnot $-\infty$ až $+1$. NSE indikuje těsnost proložení modelových a skutečných hodnot na 1:1 přímce, přičemž hodnoty $+1$ dosahuje při úplné shodě modelových a naměřených dat. Hodnota NSE větší než 0 je pak obecně pokládána za přijatelnou pro použitelnost daného modelu a hodnoty $NSE < 0$ dosahují modely, kde prostý průměr naměřených hodnot je lepší hodnota než odhad příslušného modelu (Moriasi a kol. 2007).

Stanovení expanzních faktorů bylo rovněž provedeno na základě rozboru vzorníkových stromů. Pro výpočet byly použity rovnice:

$$BEF(V)_i = \frac{B_i}{V} \quad (10)$$

$$BEF(m)_i = \frac{B_i}{m} \quad (11)$$

kde B_i – biomasa vybrané frakce i , V – objem kmene bez borky, m – hmotnost kmene bez borky (Marek a kol. 2011).

5. VÝSLEDKY

5.1 KLIMATICKÉ PODMÍNKY NA EKOSYSTÉMOVÉ STANICI RÁJEC

Při studiu zásob biomasy porostů lesních dřevin a zejména jejich časových změn je nutné sledovat klimatické podmínky na daném stanovišti, neboť klima je parametr, který významně ovlivňuje přírůst nové biomasy. Vybrané klimatické charakteristiky na ekosystémové stanici Rájec v letech 2009 – 2012 jsou uvedeny níže.

a) Globální radiace

Příkon globální radiace byl na ekosystémové stanici Rájec ve sledovaném období 2009 - 2012 rozdílný (Obr. 5). V některých letech a měsících byly zjištěny statisticky významné rozdíly v příkonu globální radiace (Tab. 5). Celkový příkon globální radiace za období květen – říjen byl 2 906 MJ m⁻² v roce 2009, 2 753 MJ m⁻² v roce 2010, 2 915 MJ m⁻² v roce 2011 a 2 755 MJ m⁻² v roce 2012. Z hlediska propustnosti atmosféry pro sluneční záření byly podmínky v období květen – říjen v letech 2009 - 2010 obdobné. Propustnost atmosféry pro sluneční záření lze vyjádřit „clearness indexem“, který je poměrem množství slunečního záření dopadající na horní hranici atmosféry (EXTRA) a množství slunečního záření (globální radiace) dopadající na aktivní povrch (Allen a kol. 1998, Marková 2010). Průměrné hodnoty „clearness indexu“ pro období květen – říjen byly v letech 2009–2012 následující: 0,45; 0,44; 0,47 a 0,44.

Tab. 5: Statistické zhodnocení příkonu globální radiace na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009 – 2012.

Tukeyův test; modrá políčka znamenají statisticky významný rozdíl na hladině významnosti 0,05; číslo v políčku znamená rok s vyšší hodnotou.

květen	2009	2010	2011	2012
2009				
2010	2009			
2011		2011		
2012		2012		

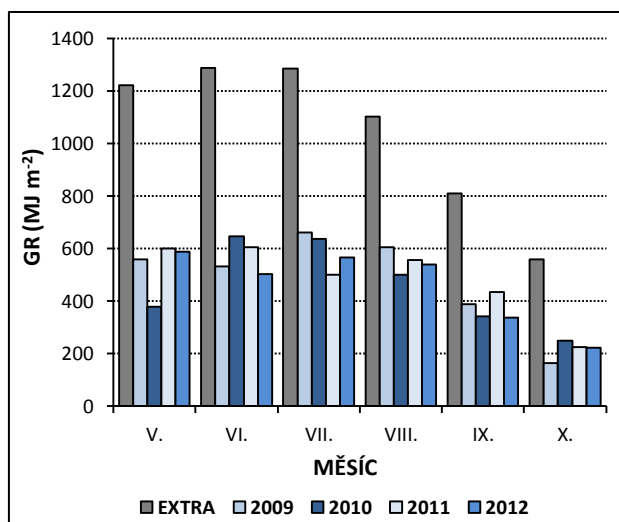
červen	2009	2010	2011	2012
2009				
2010				
2011				
2012				

červenec	2009	2010	2011	2012
2009				
2010	2009			
2011				
2012				

srpen	2009	2010	2011	2012
2009				
2010	2009			
2011		2011		
2012		2012		

září	2009	2010	2011	2012
2009				
2010				
2011		2011		
2012				

říjen	2009	2010	2011	2012
2009				
2010				
2011				
2012				

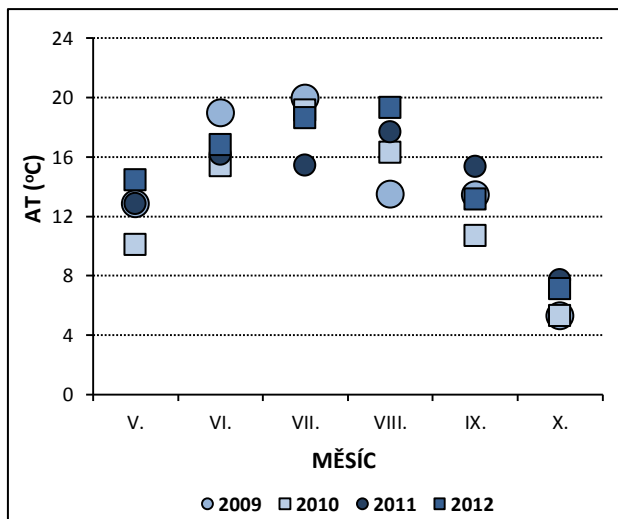


Obr. 5: Suma extra-terestrické ozáření (EXTRA) a globální radiace (GR) dopadající na dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012.

b) Teplota vzduchu

Na ekosystémové stanici Rájec byly v některých letech a měsících zjištěny statisticky významné rozdíly mezi průměrnými denními teplotami vzduchu (Tab. 6). Průměrná teplota vzduchu naměřená na horní hranici dospělého smrkového porostu byla

za období květen – říjen 14,0 °C v roce 2009, 12,8 °C v roce 2010, 14,2 °C v roce 2011 a 14,9 °C v roce 2012 (Obr. 6). Nejteplejším měsícem byl červenec (s výjimkou roku 2011).



Obr. 6: Průměrná měsíční teplota vzduchu (AT) naměřená na horní hranici dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012.

Tab. 6: Statistické zhodnocení teploty vzduchu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009 – 2012.

Tukeyův test; modrá políčka znamenají statisticky významný rozdíl na hladině významnosti 0,05; číslo v políčku znamená rok s vyšší hodnotou.

květen	2009	2010	2011	2012
2009				
2010				
2011				
2012		2012		

červen	2009	2010	2011	2012
2009				
2010				
2011				
2012				

červenec	2009	2010	2011	2012
2009				
2010	2009			
2011	2009	2010		
2012	2009			

srpen	2009	2010	2011	2012
2009				
2010				
2011				
2012				

září	2009	2010	2011	2012
2009				
2010				
2011		2011		
2012				

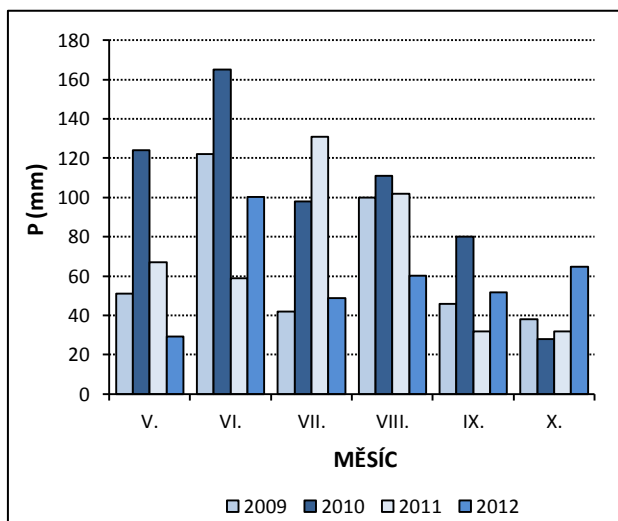
říjen	2009	2010	2011	2012
2009				
2010				
2011				
2012				

c) Úhrn srážek

Na ekosystémové stanici Rájec bylo v letech 2009 – 2012 rozdílné jak množství, tak rozložení srážkových úhrnů v období květen – říjen (Obr. 7). Celkový úhrn srážek byl za období květen – říjen 399 mm v roce 2009, 606 mm v roce 2010, 423 mm v roce 2011 a 355 mm v roce 2012. Ve všech letech (s výjimkou roku 2010) byl zaznamenán nízký úhrn srážek na začátku růstového období (květen), v roce 2011 byl zaznamenán nízký úhrn srážek ještě i v následujícím měsíci červnu. Ve srovnání s dlouhodobým průměrem ročního úhrnu srážek (Marková a kol. 2015) byly roky 2009 a 2011 srážkově podprůměrné a rok 2010 srážkově nadprůměrný (Tab. 7)

	Roční úhrn srážek (mm)
2009	482
2010	928
2011	473
2012	622
1975 – 2012	673 ± 144

Tab. 7: Roční úhrn srážek naměřený na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012 a dlouhodobý průměr ročního úhrnu srážek podle Marková a kol. (2015).

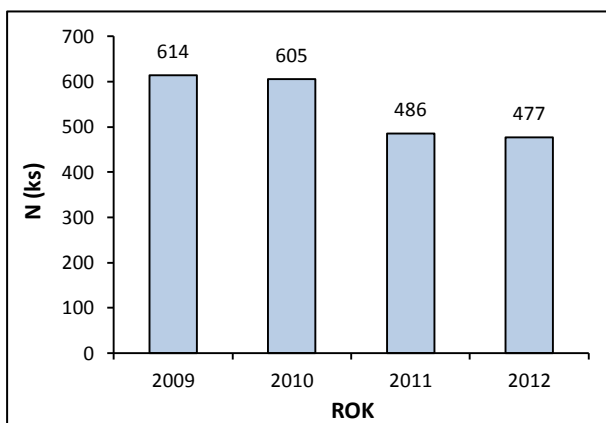


Obr. 7: Měsíční úhrn srážek (P) na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012.

5.2 DENDROMETRICKÉ PARAMETRY DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU

5.2.1 Hustota dospělého smrkového porostu

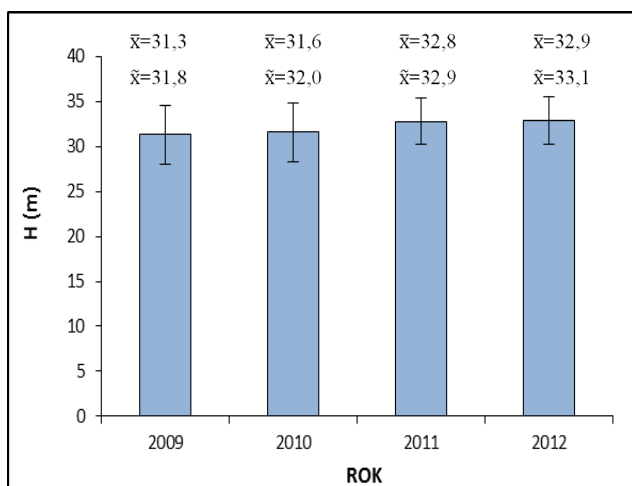
Celkový počet stojících stromů se ve studovaném dospělém smrkovém porostu snížil z 614 stromů v roce 2009 na 477 stromů v roce 2012 (Obr. 8). Předmýtní úmyslnou těžbou bylo v zimním období roku 2010/2011 odstraněno 119 stromů (včetně vzorníkových stromů pro stanovení struktury biomasy stromů). V ostatních letech byla prováděna sanitární těžba odumírajících a odumřelých stromů, převážně stromů menších dimenzí. Ve sledovaném čtyřletém období se tedy počet stromů snížil o více než 22 %.



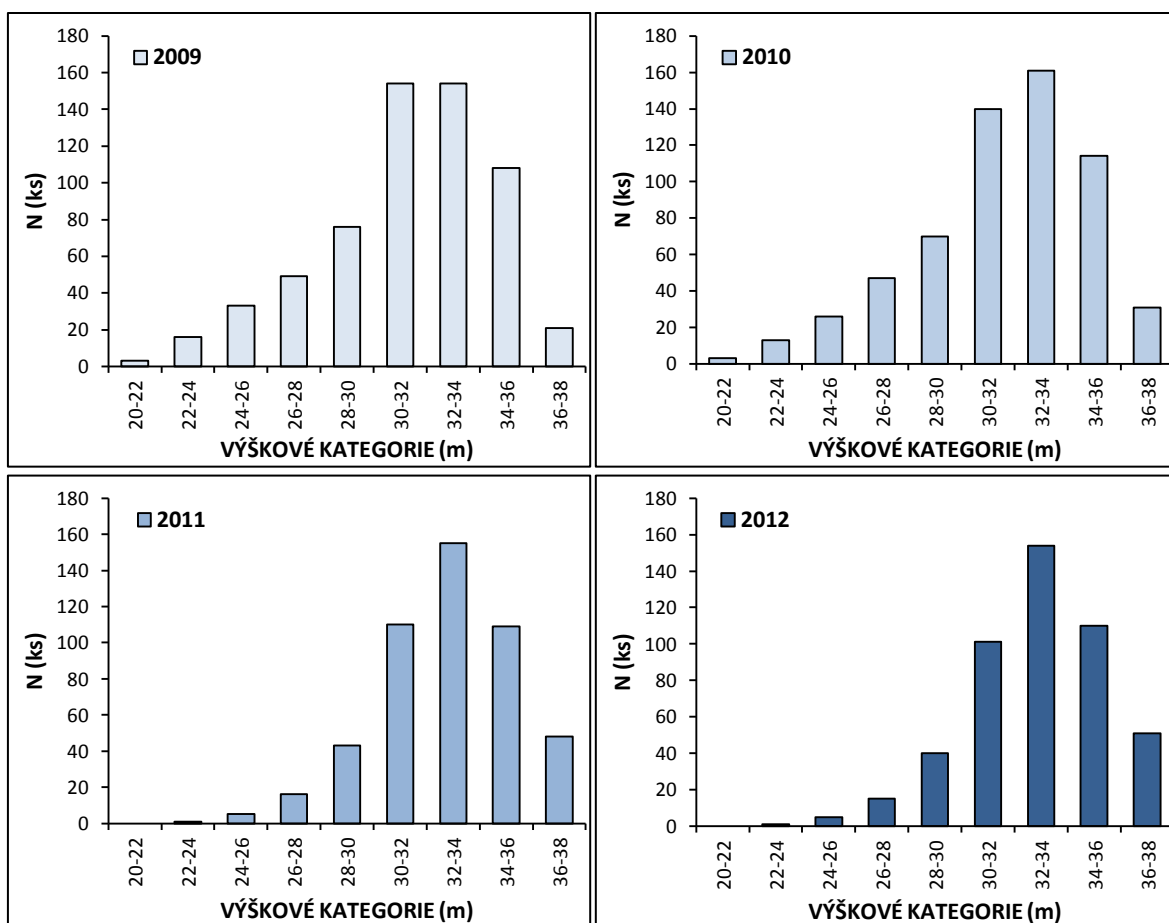
Obr. 8: Počet stromů (N) v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012.

5.2.2 Výška dospělého smrkového porostu

Průměrná výška dospělého smrkového porostu byla v roce 2009 31,3 m. Přírozeným výškovým přírůstem a předmýtní úmyslnou těžbou směřovanou na podúrovňové stromy se průměrná výška porostu zvýšila ve sledovaném období 2009–2012 o 5 % (Obr. 9). Výška stromů se v roce 2009 pohybovala v intervalu 20–38 m a nejvíce stromů bylo ve výškových třídách 30–32 a 32–34 m (25,1 % ze všech stromů v každé uvedené výškové třídě) (Obr. 10). V letech 2010–2012 měly nejvyšší podíl stromy s výškou 32–34 m (v roce 2010 27 %, 2011 32 % a 2012 32 %). Po provedené předmýtní úmyslné těžbě v zimním období roku 2010/2011 a posunem stromů přírůstem do vyšších výškových kategorií se stromy s výškou v intervalu 20–22 m již nevyskytovaly.



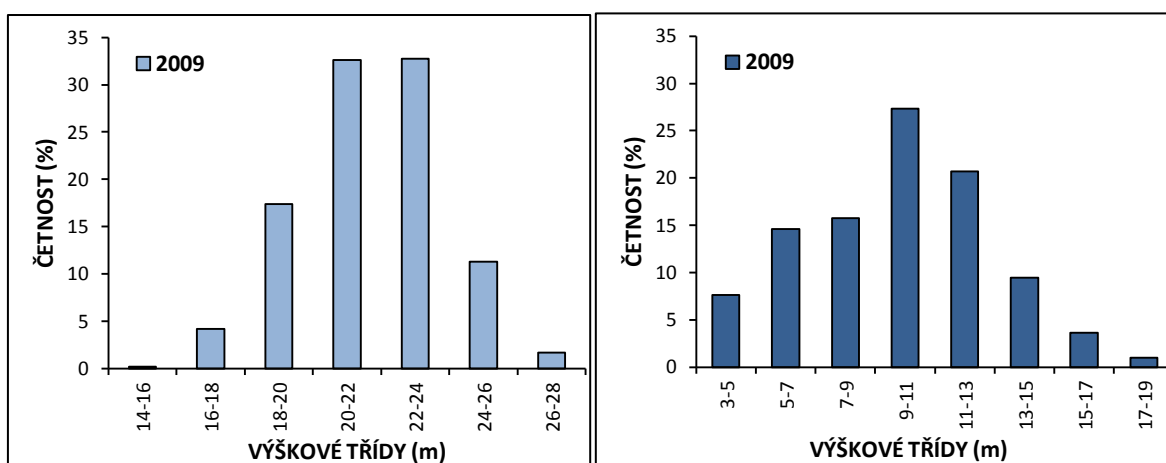
Obr. 9: Průměrná výška (H) dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012 (I – směrodatná odchylka).



Obr. 10: Počet stromů (N) v jednotlivých výškových kategoriích v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012.

5.2.3 Výška nasazení živých korun a délka živých korun dospělého smrkového porostu

Výška nasazení živé koruny byla v roce 2009 průměrně ve 21,7 metrech (medián = 21,8 m; směrodatná odchylka = 2,1 m). Nejčetnější výška nasazení živé koruny byla v intervalu 20–24 m (500 stromů) (Obr. 11). Délky živých korun se v roce 2009 pohybovaly mezi 3–19 m. Průměrná délka živé koruny činila 9,7 m (medián = 9,8 m; směrodatná odchylka = 3,1 m). Nejvíce stromů (165) mělo délku živé koruny v intervalu 9–11 metrů.

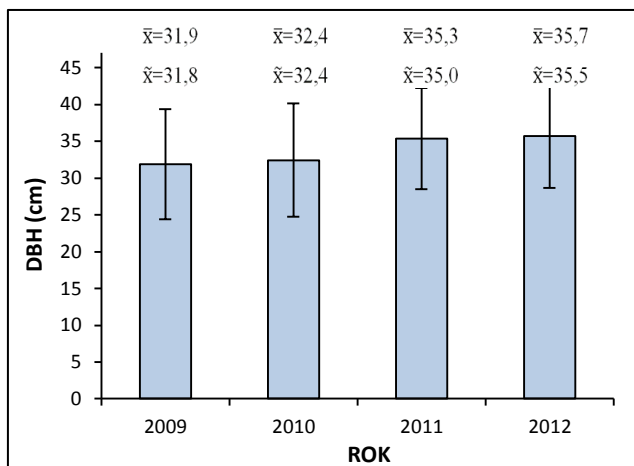


Obr. 11: Relativní četnosti výšky nasazení živé koruny stromů (vlevo) a délky živé koruny stromů (vpravo) v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2009.

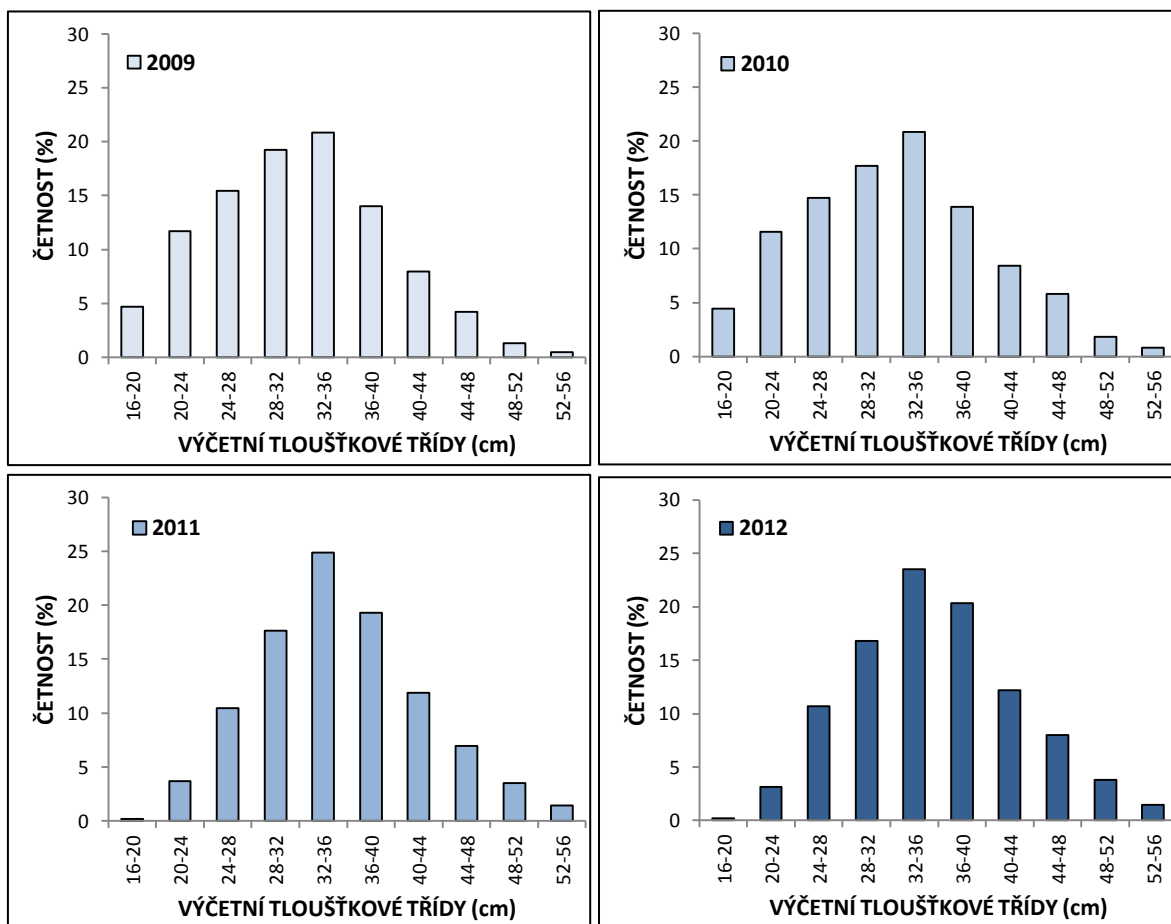
5.2.4 Výčetní tloušťka dospělého smrkového porostu

Průměrná výčetní tloušťka stromů byla v roce 2009 31,9 cm a do roku 2012 se zvýšila o 12 % (Obr. 12). Nárůst průměrné výčetní tloušťky stromů o 2,9 cm mezi roky 2010 a 2011 byl způsoben převážně předmýtní úmyslnou těžbou v zimním období roku 2010/2011, při které byly odstraněny zejména nejmenší podúrovňové stromy.

Výčetní tloušťka stromů se ve studovaném období pohybovala v intervalu 16–56 cm (Obr. 13). Ve všech sledovaných letech (2009–2012) bylo v dospělém smrkovém porostu nejvíce stromů v tloušťkové třídě 32–36 cm. Před předmýtní úmyslnou těžbou v zimním období roku 2010/2011 převažovaly stromy nižších tloušťkových tříd. Po provedené úmyslné těžbě (redukce stromů nejslabších tloušťkových tříd) se změnilo rozložení stromů v tloušťkových třídách – v roce 2009 se v tloušťkovém intervalu 16–28 cm nacházelo 196 stromů, zatímco v roce 2012 pouze 67.



Obr. 12: Průměrná výčetní tloušťka stromů (DBH) v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012 (I – směrodatná odchylka).

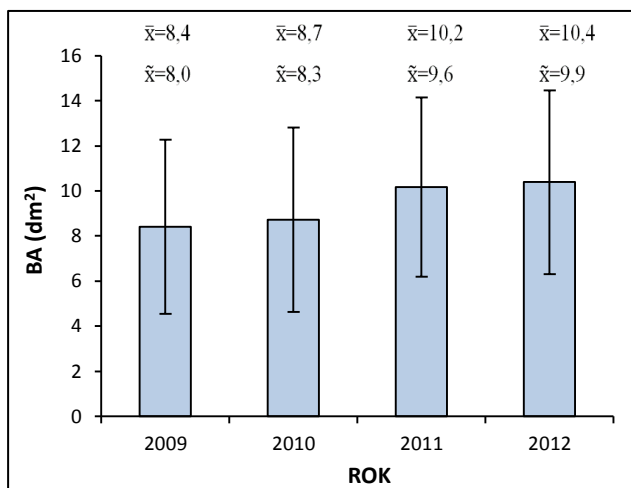


Obr. 13: Relativní četnost výčetní tloušťky stromů v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012.

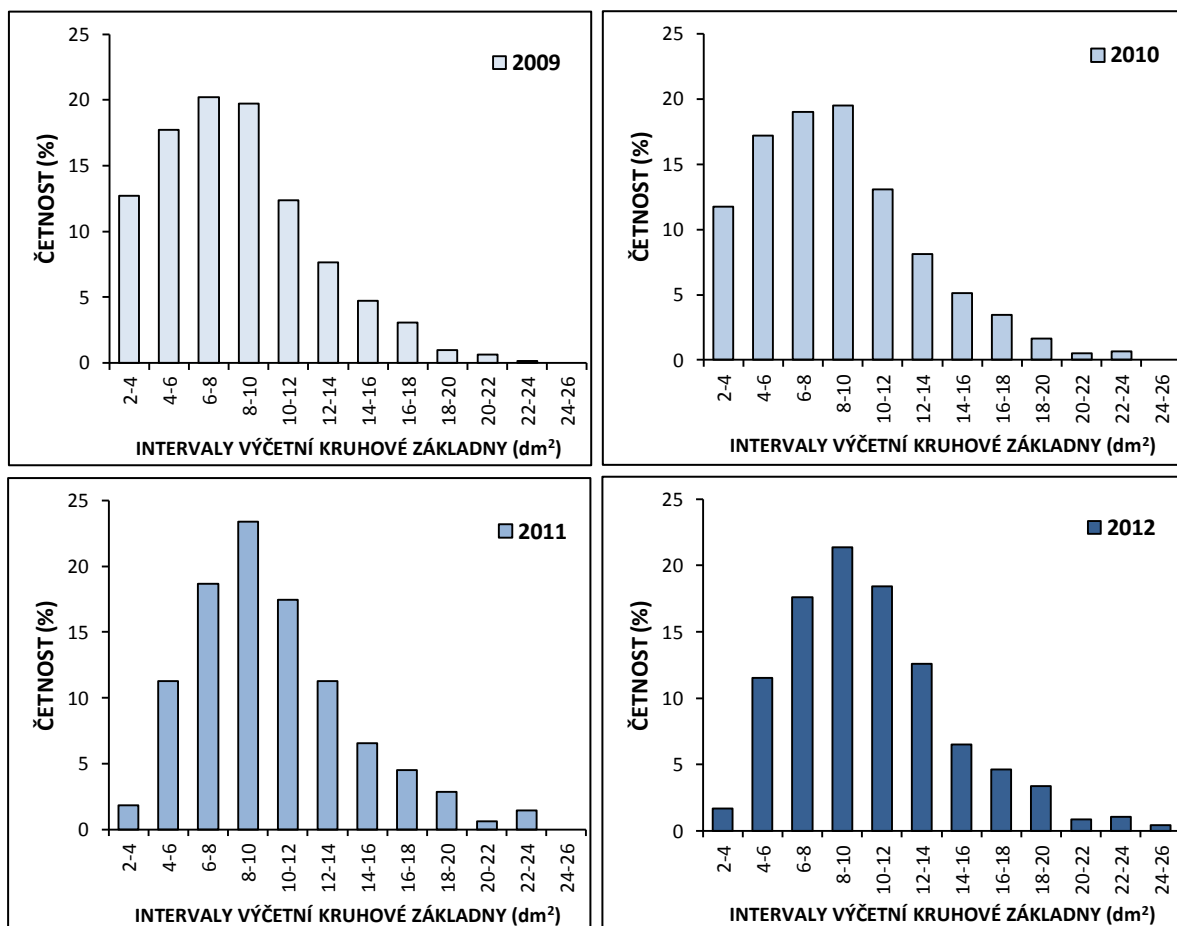
5.2.5 Výčetní kruhová základna dospělého smrkového porostu

Průměrná výčetní kruhová základna dospělého smrkového porostu byla v roce 2009 8,4 dm². Tloušťkovým přírůstem a redukcí podúrovňových stromů se průměrná výčetní kruhová základna zvýšila do konce růstové sezóny roku 2012 o 23,5 % (Obr. 14).

Výčetní kruhová základna stromů se ve studovaném období 2009–2012 pohybovala v intervalu 2–26 dm² (Obr. 15). V roce 2009 mělo nejvíce stromů výčetní kruhovou základnu v intervalu 6–8 dm² (124 stromů) a 8–10 dm² (121 stromů), v roce 2012 v intervalu 8–10 dm² (102 stromů) a 10–12 dm² (88 stromů). V roce 2009 mělo nejmenší výčetní kruhovou základnou (2–4 dm²) 78 stromů a v roce 2012 pouze 8 stromů.



Obr. 14: Průměrná výčetní kruhová základna (BA) dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009–2012 (I – směrodatná odchylka).



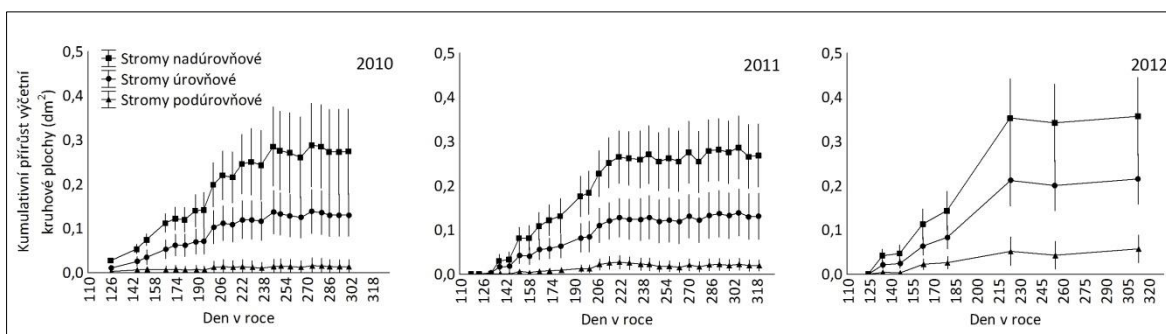
Obr. 15: Relativní četnosti výčetní kruhové základny v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v období 2009–2012.

5.2.6 Tloušťkový přírůst kmenů v dospělém smrkovém porostu

Průměrný kumulativní přírůst výčetní kruhové základny dospělého smrkového porostu je znázorněn na Obr. 16. V letech 2010–2012 začal tloušťkový přírůst mezi 121 až 131 dnem v roce bez rozdílu sociálního postavení stromu v porostu. Tloušťkový přírůst nadúrovňových a úrovňových stromů byl ukončen mezi 221 a 241 dnem v roce. U stromů podúrovňových byl tloušťkový přírůst minimální.

Celkový roční přírůst výčetní kruhové základny stromů byl nejnižší v roce 2010 a činil 0,27 dm² u průměrného nadúrovňového stromu, 0,14 dm² u průměrného úrovňového stromu a 0,01 dm² u průměrného podúrovňového stromu. Největší přírůst byl zaznamenán v roce 2012 a činil 0,35 dm² u průměrného nadúrovňového stromu, 0,21 dm² u průměrného úrovňového stromu a 0,06 dm² u průměrného podúrovňového stromu. Z výsledků z roku 2012 je patrná pozitivní reakce stromů

na uvolnění porostu po předmýtní těžbě. Tato reakce byla nejvíce patrná u stromů podúrovňových, u kterých byl zaznamenán znatelně vyšší přírůst výčetní kruhové základny.



Obr. 16: Průměrný kumulativní přírůst výčetní kruhové základny v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v období 2010–2012.

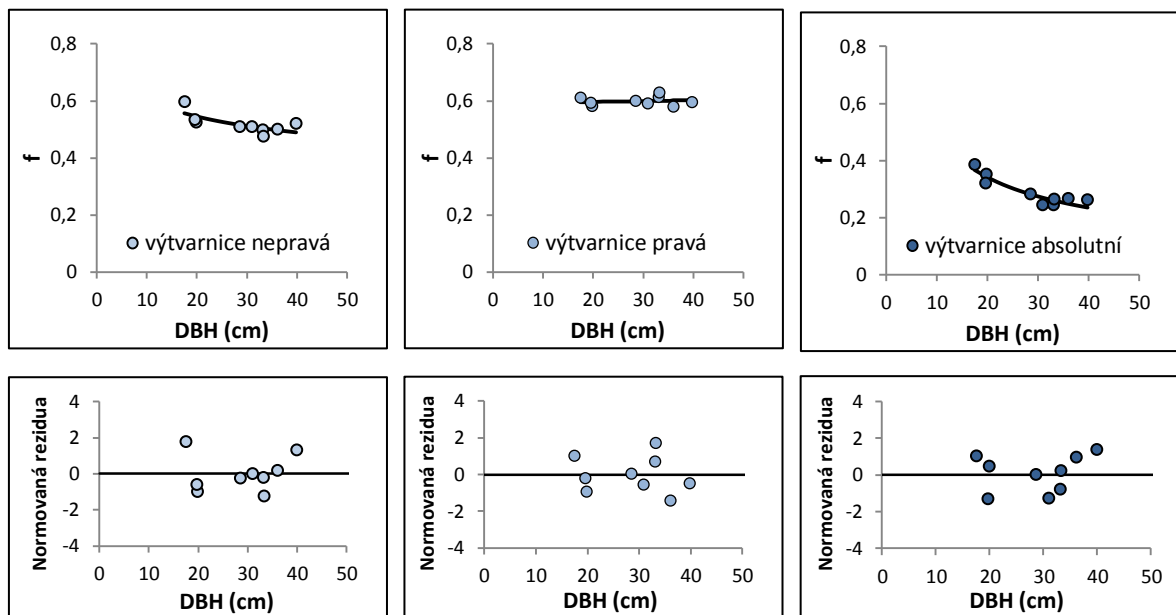
5.2.7 Výtvarnice kmenů vzorníkových stromů a tvarové kvocienty v dospělém smrkovém porostu

Výtvarnice nepravá, vypočítaná z poměru objemu kmene a ideálního válce s průměrem shodným s tloušťkou stromu ve výčetní výšce, se u vzorníkových stromů pohybovala v rozmezí 0,48 (u větších stromů) až 0,60 (u nejmenšího stromu). S rostoucí výčetní tloušťkou stromu se tedy výtvarnice mírně snižovala (Obr. 17). Nejvhodnější proložení daty měla mocninná funkce, která vysvětlovala 52 % rozptylu hodnot ($R^2 = 0,52$; Tab. 8).

Výtvarnice pravá, odvozená z poměru objemu kmene a ideálního válce se základnou shodnou s tloušťkou vzorníkového stromu v relativní výšce ($0,1 \cdot \text{výška stromu}$), se pohybovala v rozmezí 0,58 až 0,63 (Obr. 17). Zřetelná závislost na výčetní tloušťce stromu však nebyla v datech zjištěna, což potvrzuje i koeficient determinace (0,03) nejlepší zjištěné exponenciální křivky (Tab. 8). Záporná hodnota NSE (-0,01) pro tento model dokonce ukázal, že je vhodnější použití prostého průměru (0,60) jako konstanty.

Nejvyšší koeficient determinace ($R^2 = 0,84$) byl zjištěn pro výtvarnici absolutní, tedy pro poměr objemu kmene a ideálního válce se základnou shodnou s tloušťkou vzorníkového stromu na patě kmene. Modelové hodnoty mají, stejně jako výtvarnice nepravá, klesající trend (Obr. 17). S rostoucí výčetní tloušťkou stromu hodnota

absolutní výtvarnice klesá. Zjištěné hodnoty se u vzorníkových stromů pohybovaly v rozmezí 0,24 až 0,39. Nejlepší proložení daty bylo pomocí mocninné funkce (Tab. 8).



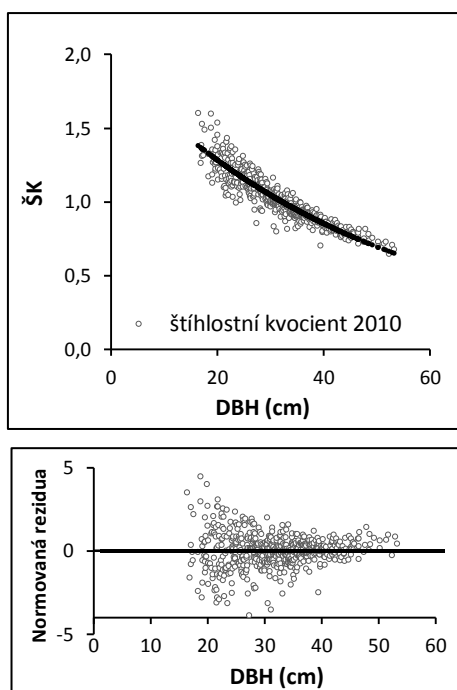
Obr. 17: Závislost výtvarnice nepravé (vlevo), pravé (uprostřed) a absolutní (vpravo) na výčetní tloušťce vzorníkových stromů z dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Hodnoty výtvarnic jsou proloženy nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 8).

Tab. 8: Výsledky regresní analýzy a parametry rovnic pro odhad výtvarnice nepravé, pravé a absolutní vypočítané pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem byla výčetní tloušťka kmene.

Výtvarnice	Závislost	R ²	Parametry rovnice		MEP	AIC	RMSE
			a	b			
Nepravá	mocninná	0,52	0,869481	-0,155818	0,00110	-64,6	0,024
Pravá	exponenciální	0,03	0,589479	0,000551	0,00037	-71,6	0,017
Absolutní	mocninná	0,84	1,722886	-0,540532	0,00073	-66,5	0,021

Štíhlostní kvocient se v roce 2010 pohyboval v rozmezí od 0,65 do 1,60; průměrný štíhlostní kvocient byl 1,02. Nejvyšší hodnoty štíhlostního kvocientu byly zaznamenány u stromů s nejmenší výčetní tloušťkou a se zvyšující se výčetní tloušťkou se jeho hodnota snižovala až k hodnotě 0,65 (Obr. 18). Koeficient determinace nejlepšího modelu byl $R^2 = 0,85$. Parametry exponenciální rovnice a výsledky regresní analýzy jsou pro tuto analýzu uvedeny v Tab. 9. V roce 2013 byla

střední hodnota štíhlostního kvocientu 0,95, což bylo odrazem předmýtní těžby zaměřené na odstranění nejmenších (podúrovňových) stromů.



Obr. 18: Závislost štíhlostního kvocientu (ŠK) na výčetní tloušťce vzorníkových stromů na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vypočítané štíhlostní kvocienty kmenů jsou proloženy nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 9).

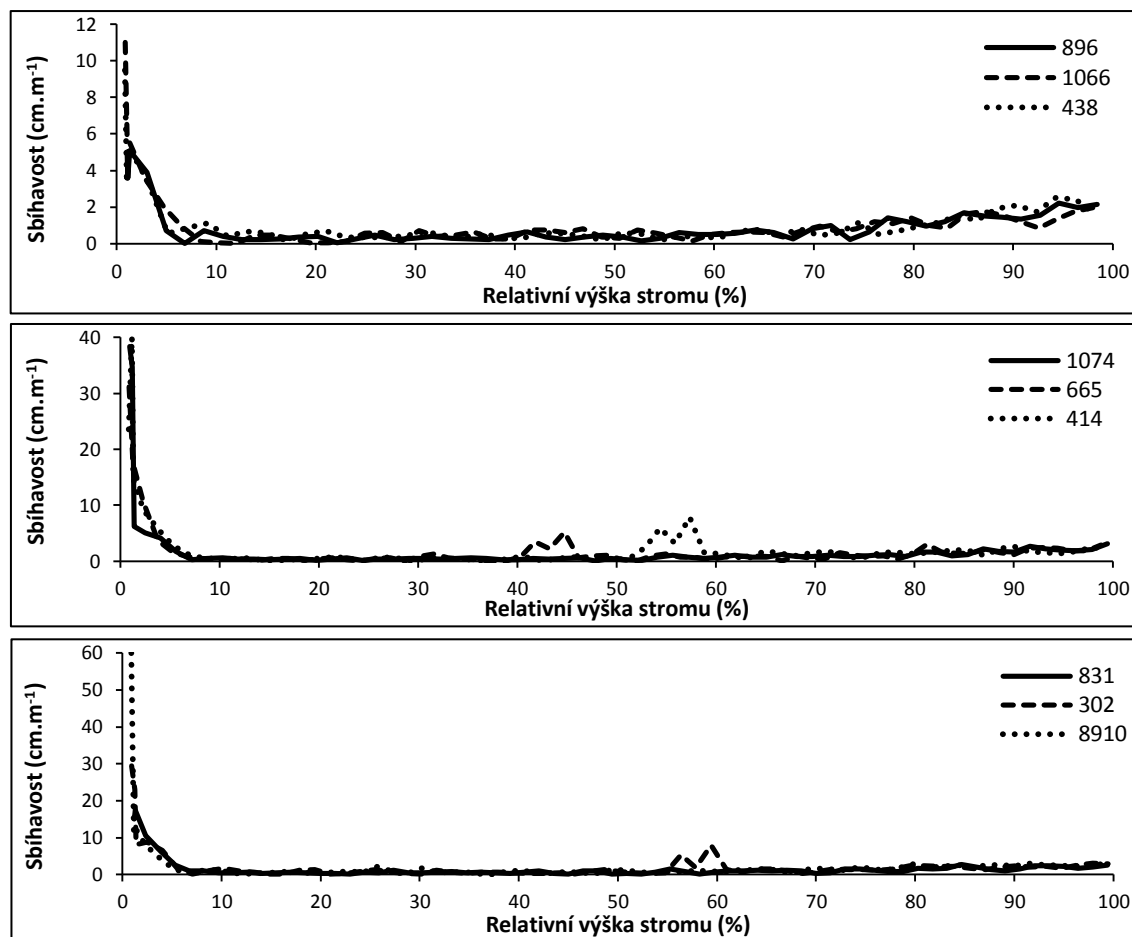
Tab. 9: Výsledky regresní analýzy a parametry rovnic pro odhad štíhlostního kvocientu pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem byla výčetní tloušťka kmene.

	Závislost	R ²	Parametry rovnice				
			a	b	MEP	AIC	RMSE
Štíhlostní kvocient	exponenciální	0,85	1,93089	-0,02045	0,0041	-3341,2	0,064

5.2.8 Sbíhavost kmenů vzorníkových stromů z dospělého smrkového porostu

Z podrobného měření tlouštěk kmenů vzorníkových stromů (půlmetrové sekce a příčné výřezy vzorků kmene) byly odvozeny hodnoty sbíhavosti kmene v podélném profilu. Největší sbíhavost byla zjištěna u paty stromů (u stromu č. 8910 dosáhla dokonce hodnoty 60 cm m⁻¹) (Obr. 19). Maximální hodnoty byly zaznamenány pouze u paty kmenů v sekcích kratších než 0,5 metru. Sbíhavost kmenů s výškou stromu rychle klesala a ustálila se na hodnotě < 1cm m⁻¹ v relativní délce kmene 10–70 %. Od relativní výšky stromu 70 % pak opět sbíhavost kmenů mírně narůstala

až k hodnotám 3 cm m^{-1} u vrcholu stromu. U stromů č. 665, 414 a 302 se v relativních výškách stromu 40–60 % vyskytovaly deformace kmene (bajonety) jako pozůstatek dřívějšího poškození vrcholu stromu. Proto se v podélných profilech sbíhavosti kmenů vyskytují u těchto stromů výrazná lokální maxima.

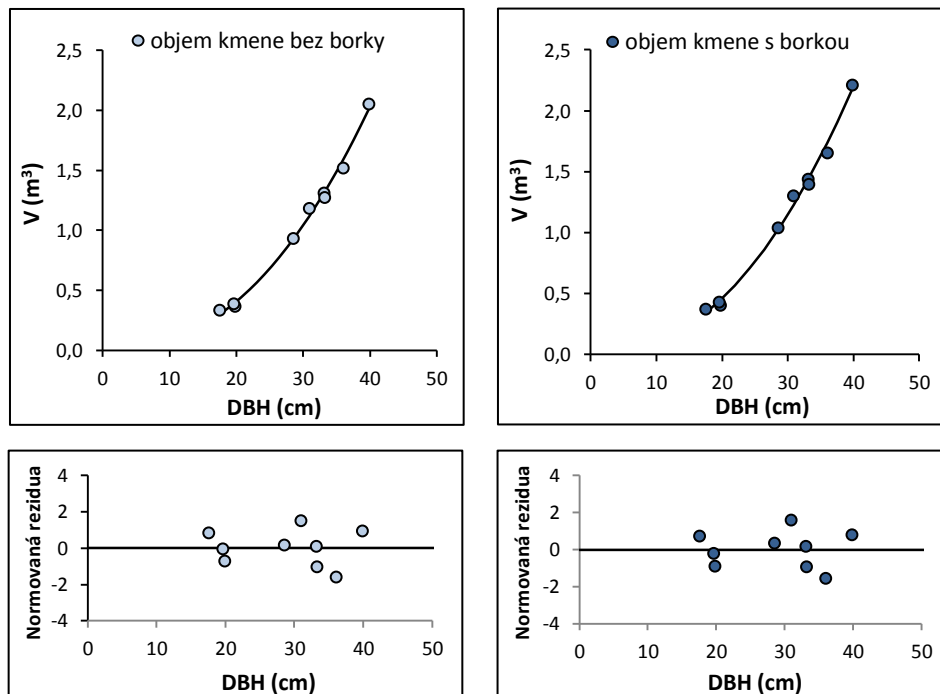


Obr. 19: Průběh sbíhavosti kmene vzorníkových stromů v délce kmene pokácených na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010.

5.2.9 Objem kmenů vzorníkových stromů z dospělého smrkového porostu

Vzorníkové stromy měly objem kmene bez borky v rozmezí $0,34 - 2,05 \text{ m}^3$ a objem kmene s borkou v rozmezí $0,38$ až $2,21 \text{ m}^3$ (Obr. 20). Vypočítané objemy kmene vykazovaly velmi těsnou závislost na výčetní tloušťce kmene. Nejvhodnějším tvarem proložení dat byla mocninná funkce, která dosáhla výše koeficientů determinace

0,994 pro oba testy (objem kmene s borkou i bez borky). Parametrizované rovnice a výsledky regresní analýzy jsou pro tuto analýzu uvedeny v Tab. 10.



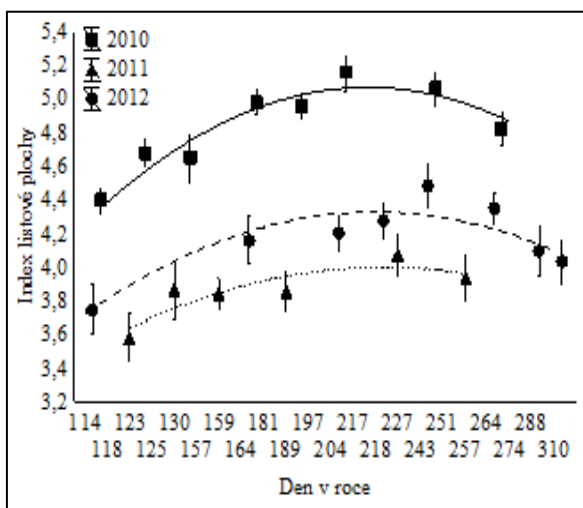
Obr. 20: Závislost objemu kmene bez borky (vlevo) a objemu kmene s borkou (vpravo) na výčetní tloušťce vzorníkových stromů na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovené objemy kmenů jsou proloženy nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 10).

Tab. 10: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad objemu kmene s borkou a objemu kmene bez borky vypočítané pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem byla výčetní tloušťka kmene.

Objem kmene	Závislost	R ²	Parametry rovnice		MEP	AIC	RMSE
			a	b			
Bez borky	mocninná	0,99	0,000389	2,320674	0,0038	-52,9	0,048
S borkou	mocninná	0,99	0,000540	2,253279	0,0040	-51,3	0,052

5.3 INDEX LISTOVÉ PLOCHY DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU

Index listové plochy (LAI) sledovaného dospělého smrkového porostu byl nejvyšší v roce 2010. Pokles hodnot LAI v roce 2011 byl způsoben předmýtní těžbou provedenou v zimním období 2010/2011 (Obr. 21). Ve sledovaném období 2010 – 2012 byly nejvyšší hodnoty LAI zaznamenány mezi 217 a 227 dnem v roce.



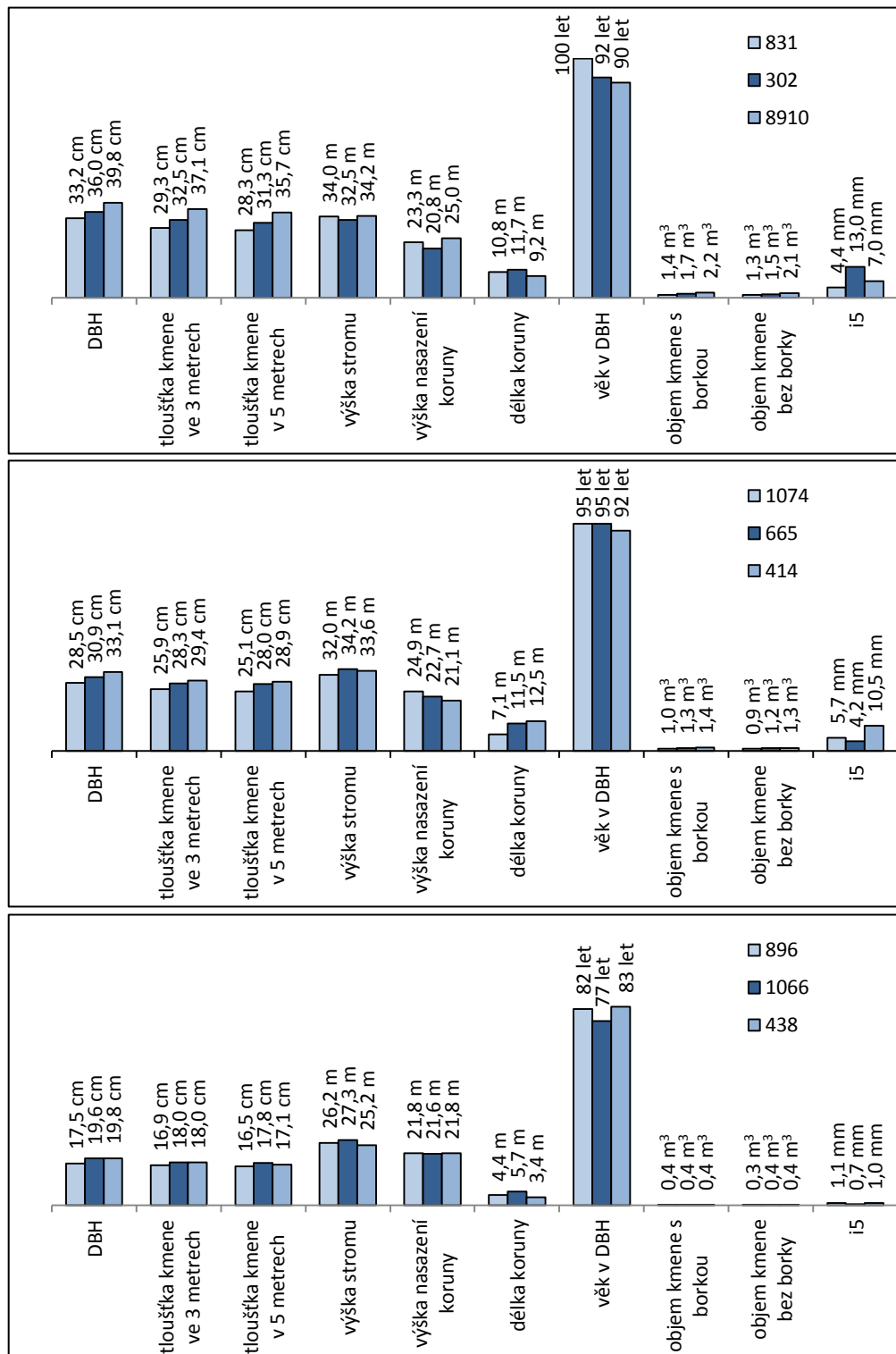
Obr. 21: Vývoj indexu listové plochy (LAI) dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2010–2012.

5.4 NADZEMNÍ BIOMASA VZORNÍKOVÝCH STROMŮ Z DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU

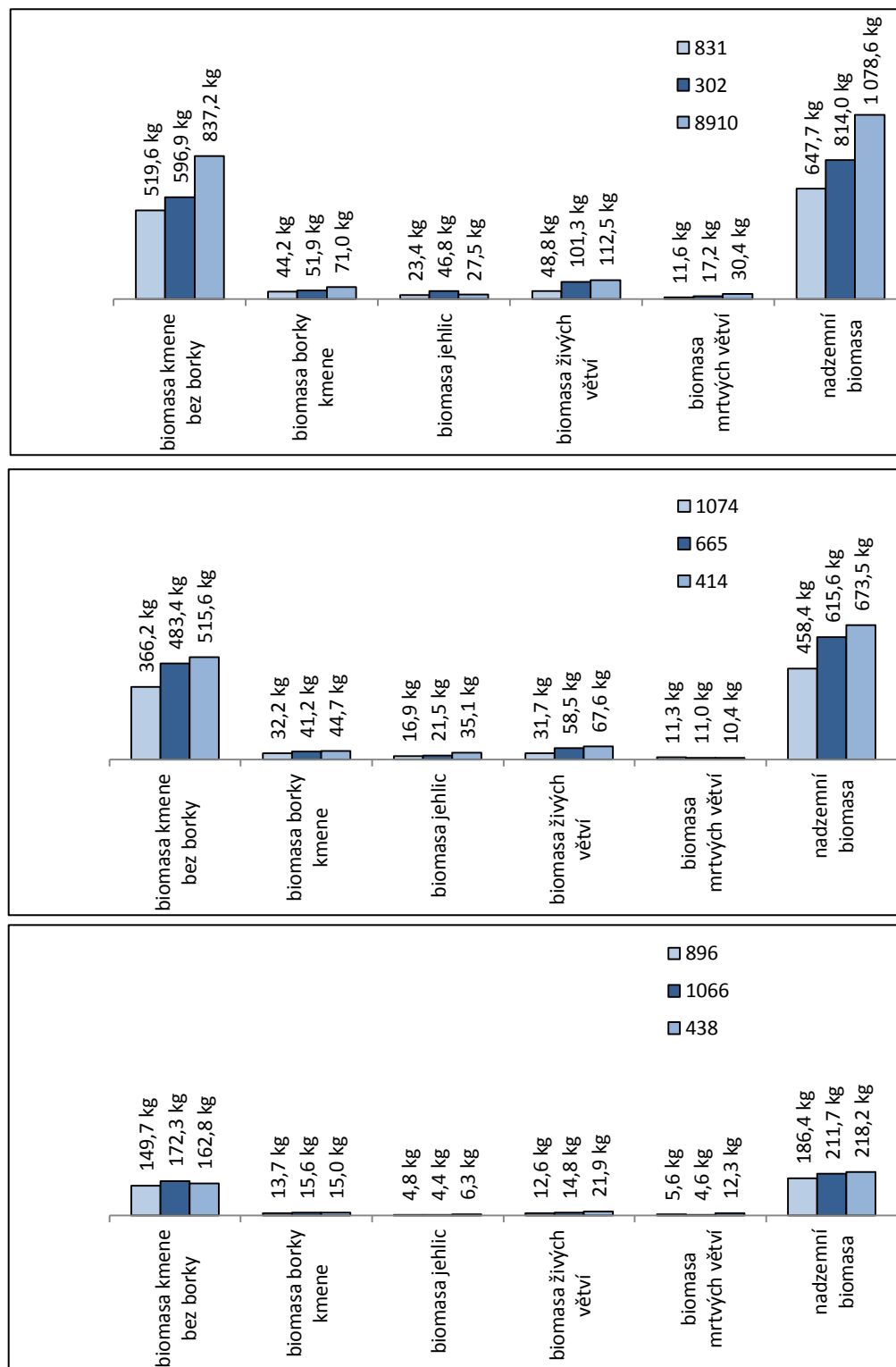
Výčetní tloušťka pokácených vzorníkových stromů se pohybovala od 17,5 do 39,8 cm (průměr = 28,7; směrodatná odchylka = 8,0 cm) a jejich celková výška od 25,2 do 34,2 m (průměr 31,0; směrodatná odchylka = 3,7 cm) (Obr. 22). Výška nasazení koruny vzorníkových stromů byla v rozmezí 20,8 až 25,0 m (průměr 22,6; směrodatná odchylka = 1,6 m). Tloušťka kmene ve výšce 3 a 5 metrů nad zemí byla zaznamenána především jako potřebný vstupní parametr do již známých alometrických rovnic. Objem kmene s borkou se u vzorníkových stromů pohyboval v rozmezí 0,4 m³ (nejmenší strom) až 2,2 m³ (největší strom).

Celková nadzemní biomasa vzorníkových stromů se pohybovala od 187,4 kg (strom č. 896) do 1078,6 kg (strom č. 8910) (Obr. 23). Ze sledovaných frakcí tvořila největší podíl na celkové nadzemní biomase biomasa kmene bez borky. Biomasa borky

vzorníkových stromů se pohybovala od 13,7 do 71,0 kg, biomasa jehlic od 4,4 do 46,8 kg, biomasa živých větví bez jehlic od 12,6 do 112,5 kg a biomasa mrtvých větví od 4,6 do 30,4 kg na strom.



Obr. 22: Dendrometrické charakteristiky vzorníkových stromů na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) pokácených v roce 2010.



Obr. 23: Nadzemní biomasa (kg) jednotlivých stromových frakcí vzorníkových stromů na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) pokácených v roce 2010.

Alometrické vztahy odvozené ze vzorníkových stromů

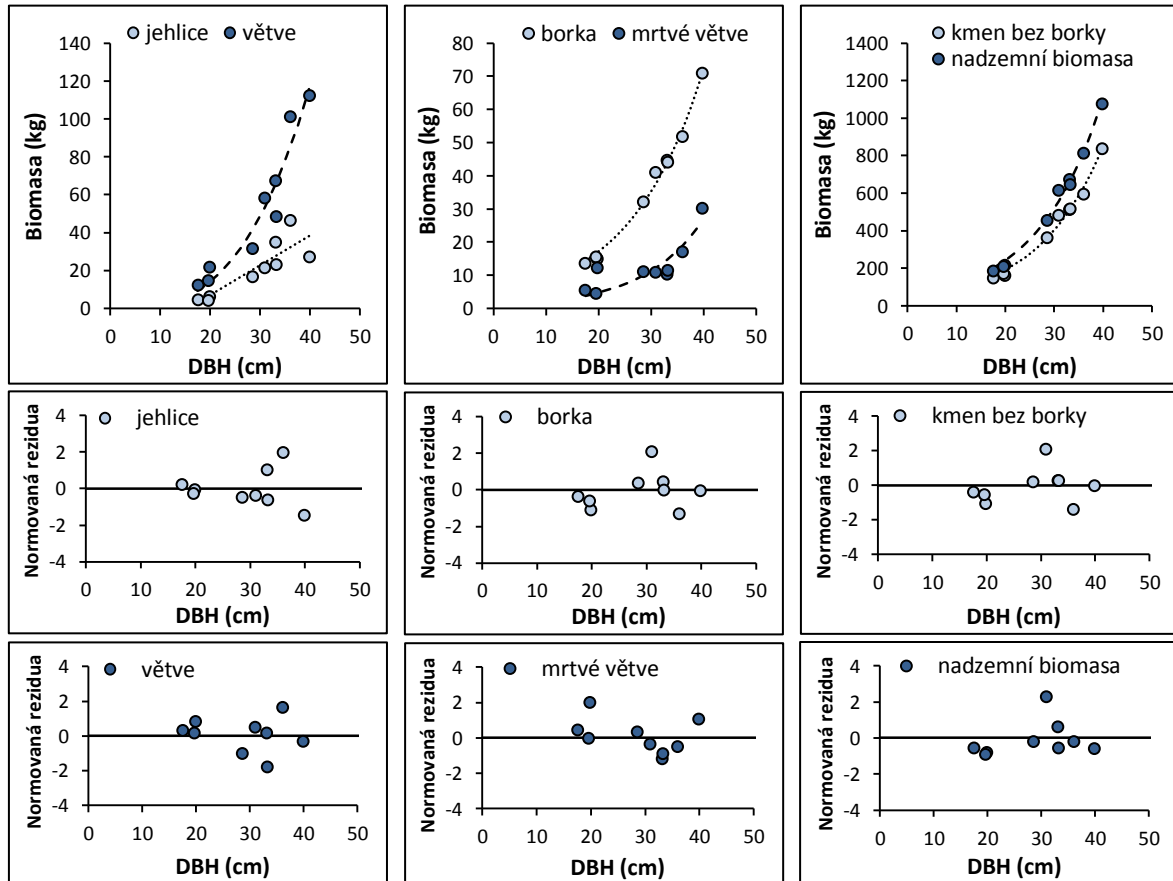
Byla testována závislost jednotlivých frakcí biomasy na snadněji měřitelných parametrech, jako jsou výčetní tloušťka stromu (DBH), výčetní kruhová základna stromu (BA), výška stromu (H), výška nasazení živé koruny (HCR), délka živé koruny (CL), a dále závislost jednotlivých frakcí biomasy na šířce letokruhů za posledních 5 let (i5) a parametrech vyjadřující kompetici stromů.

Parametr: Výčetní tloušťka stromu (DBH)

Výčetní tloušťka stromu (DBH) se pro daný výběr vzorníkových stromů ukázal jako dobrý vstupní parametr pro odhad jednotlivých sledovaných frakcí biomasy (Obr. 24). Nejvyšší hodnoty koeficientu determinace ($R^2 = 0,99$) dosáhla korelace u biomasy borky kmene, kmene bez borky a u celkové nadzemní biomasy. Nižší korelaci s DBH vykazovaly hodnoty biomasy živých větví ($R^2 = 0,93$). Nejnižší korelace pak byla zaznamenána u biomasy jehlic a mrtvých větví (shodně $R^2 = 0,75$). Parametrizované rovnice a výsledky regresní analýzy jsou pro jednotlivé frakce biomasy uvedeny v Tab. 11. Pro odhad biomasy jehlic byla nejlepším průběhem závislosti přímka, pro živé větve mocninná funkce a pro ostatní frakce funkce exponenciální.

Tab. 11: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je výčetní tloušťka stromu (DBH).

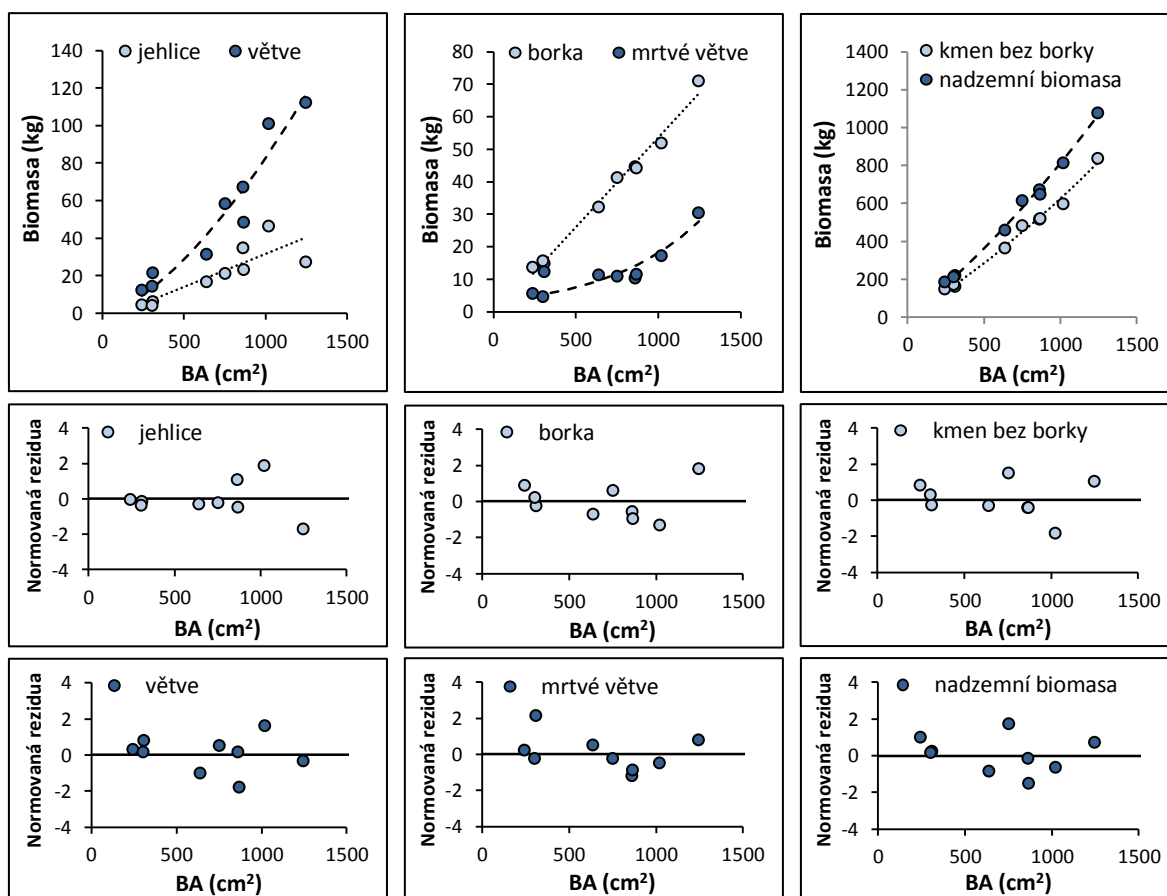
Frakce	Závislost	R^2	Parametry rovnice		MEP	AIC	RMSE
			a	b			
Jehlice	lineární	0,75	1,570689	-24,356222	84,5	38,8	7,8
Větve	mocninná	0,93	0,001460	3,061874	145,1	44,3	10,6
Borka	exponenciální	0,99	4,077891	0,071835	4,0	13,2	1,9
Mrtvé větve	exponenciální	0,75	0,841380	0,086567	40,2	26,8	4,0
Kmen bez borky	exponenciální	0,99	43,230131	0,074481	792,7	60,8	26,5
Nadzemní biomasa	exponenciální	0,99	52,937920	0,076075	1069,3	61,8	28,1



Obr. 24: Alometrická závislost mezi biomasou jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky, nadzemní biomasou a výčetní tloušťkou stromu (DBH) pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 11).

Parametr: Výčetní kruhová základna (BA)

Výčetní kruhová základna (BA) je zcela závislá na výčetní tloušťce stromu (DBH) ($R^2 = 1$), přičemž mezi BA a DBH je mocninná závislost. Výsledky regresní analýzy jsou tedy velmi podobné, jako pro testovaný parametr DBH (Obr. 25). Nejvyšší koeficient determinace s výčetní kruhovou základnou vzorníkových stromů vykazovala borka, kmen a celková nadzemní biomasa ($R^2 = 0,99$). U biomasy mrtvých větví byla zjištěna exponenciální závislost na DBH ($R^2 = 0,82$). Nejnižší závislost na BA pak byla zjištěna u biomasy jehlic ($R^2 = 0,72$). Parametrizované rovnice a výsledky regresní analýzy jsou pro jednotlivé frakce biomasy vzorníkových stromů uvedeny v Tab. 12. U biomasy jehlic a borky kmene byla zjištěna lineární závislost, u biomasy větví mocninná závislost a u biomasy mrtvých větví exponenciální závislost. Polynomická závislost nejlépe vystihovala biomasu kmene a nadzemní biomasu vzorníkových stromů v dospělém smrkovém porostu.



Obr. 25: Alometrická závislost mezi biomasou jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky, nadzemní biomasy a výčetní kruhovou základnou (BA) pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 12).

Tab. 12: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je výčetní kruhová základna (BA).

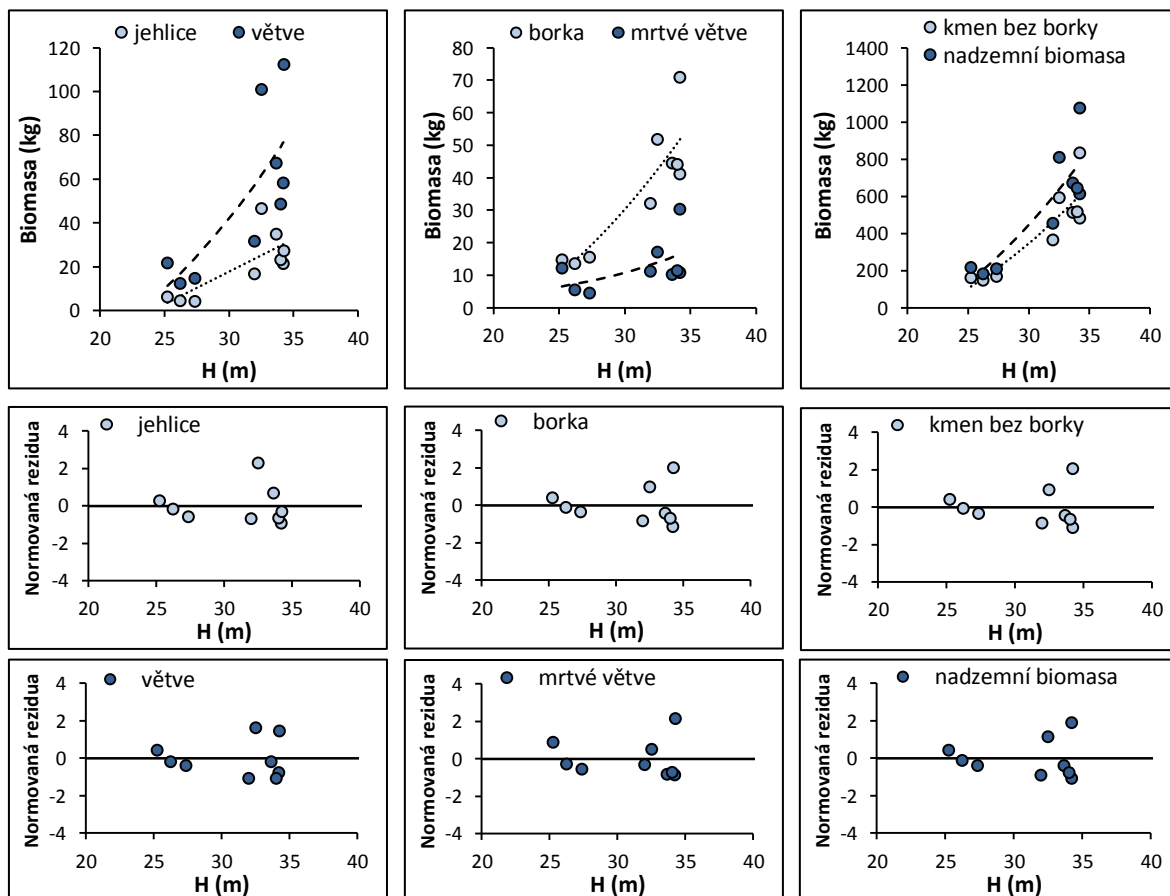
Frakce	Závislost	R ²	Parametry rovnice		MEP	AIC	RMSE
			a	b			
Jehlice	lineární	0,72	0,035194	-3,607154	107,1	39,6	8,2
Větve	mocninná	0,93	0,002114	1,530938	145,1	44,3	10,6
Borka	lineární	0,99	0,055134	-1,516682	9,0	16,7	2,3
Mrtvé větve	exponenciální	0,82	3,134399	0,001753	30,0	24,0	3,4
Kmen bez borky	polynomická	0,99	0,000112	0,513219	1467,2	59,5	24,8
Nadzemní biomasa	polynomická	0,99	0,000174	0,637373	1024,9	59,3	24,5

Parametr: Výška stromu (H)

Výška stromu jako samostatný parametr pro odhad jednotlivých frakcí biomasy stromů nevykazuje tak vysokou korelaci jako výčetní tloušťka a výčetní kruhová základna stromů (Obr. 26). Nejvyšší koeficient determinace byl zaznamenán pro biomasu kmene bez borky a biomasu borky kmene ($R^2 = 0,77$); pro celkovou nadzemní biomasu byl stanoven $R^2 = 0,74$. Nejnižší koeficient determinace ($R^2 = 0,28$) byl zjištěn u biomasy mrtvých větví. Z Obr. 26 je patrné, že poměrně vysoké koeficienty determinace byly ovlivněny zejména výškami třech nejmenších vzorníkových stromů, které „usměrňují“ vlastní funkci. Bez nich totiž hodnoty biomasy jednotlivých frakcí tvoří mrak dat bez zřetelného trendu. Parametrizované rovnice a výsledky regresní analýzy jsou pro jednotlivé frakce biomasy dospělého smrkového porostu uvedeny v Tab. 13. U biomasy jehlic byla zjištěna lineární závislost, u biomasy mrtvých větví exponenciální závislost a u biomasy větví, borky kmene, kmene a u celkové nadzemní biomasy byla zjištěna polynomická závislost.

Tab. 13: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je výška stromu (H).

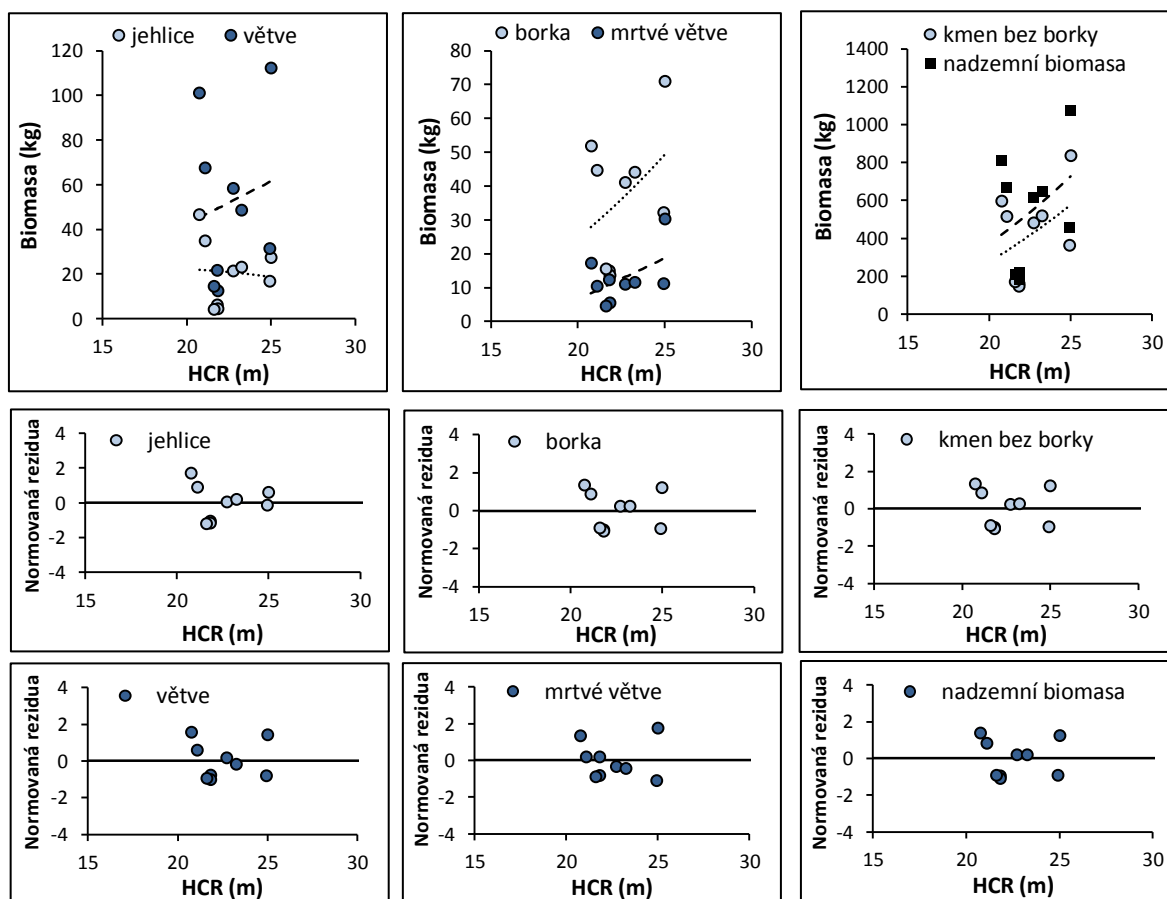
Frakce	Závislost	R^2	Parametry rovnice		MEP	AIC	RMSE
			a	b			
Jehlice	lineární	0,57	2,968958	-71,386756	112,1	43,4	10,1
Větve	polynomická	0,55	0,199641	-4,591918	783,1	60,4	26,0
Borka	polynomická	0,77	0,120339	-2,601287	123,2	43,3	10,0
Mrtvé větve	exponenciální	0,28	0,511830	0,101580	64,0	36,5	6,9
Kmen bez borky	polynomická	0,77	1,463997	-32,385148	17335,4	87,8	119,1
Nadzemní biomasa	polynomická	0,74	1,886885	-41,733751	32904,6	93,6	165,0



Obr. 26: Alometrická závislost mezi biomasou jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky, nadzemní biomasou a výškou stromu (H) pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 13).

Parametr: Výška nasazení živé koruny (HCR)

Závislost jednotlivých frakcí biomasy stromů na výšce nasazení živé koruny nevykazuje prakticky žádný trend (Obr. 27). Data tvoří spíše náhodné shluky hodnot, čemuž odpovídají i příslušné koeficienty determinace. S výškou nasazení živé koruny vykázala nejvyšší korelaci ($R^2 = 0,25$) biomasa mrtvých větví, nejnižší biomasa jehlic ($R^2 = 0,00$). Parametrizované rovnice a výsledky regresní analýzy jsou pro jednotlivé frakce biomasy dospělého smrkového porostu uvedeny v Tab. 14. U biomasy jehlic, borky, kmene bez borky a u celkové nadzemní biomasy byla zjištěna polynomičká závislost, u biomasy větví a mrtvých větví lineární závislost.



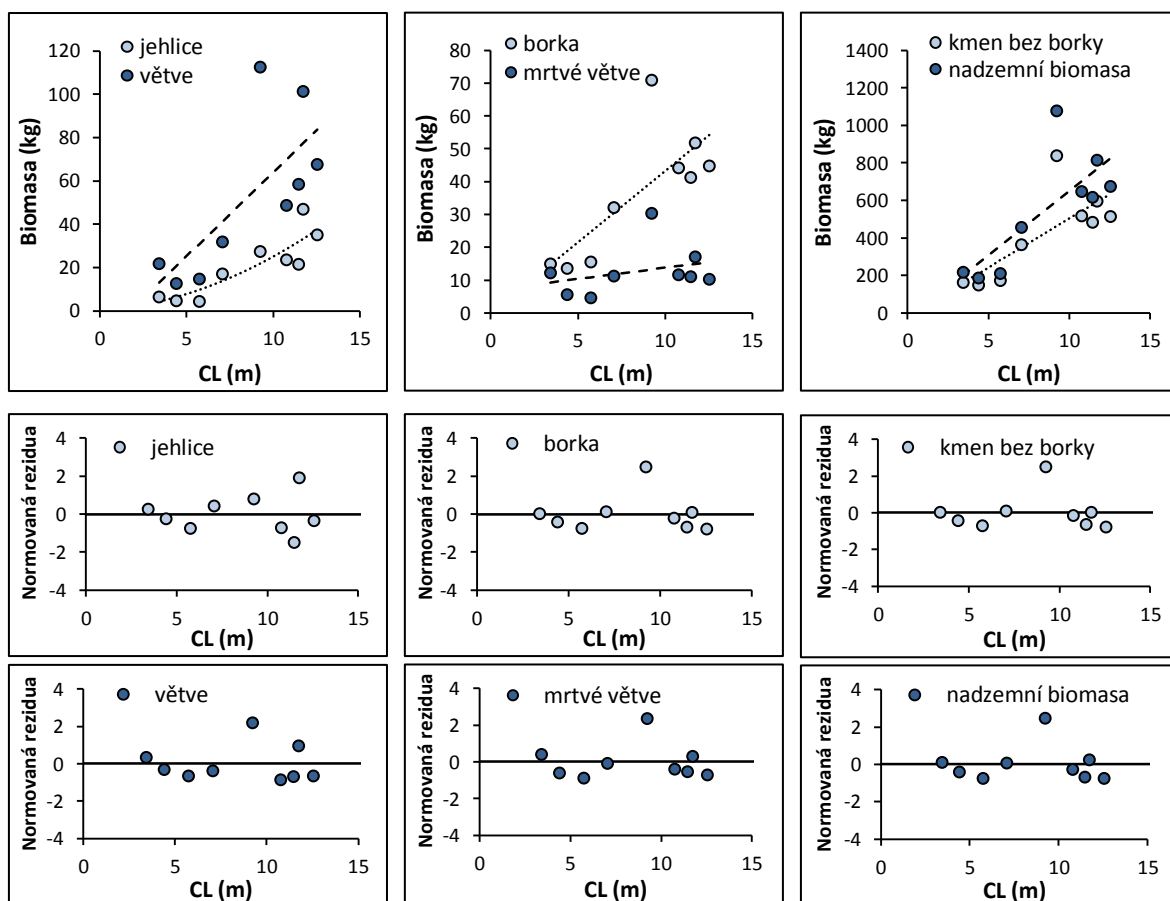
Obr. 27: Alometrická závislost mezi biomasou jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky, nadzemní biomasou a výškou nasazení živé korony (HCR) pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 14).

Tab. 14: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec v roce 2010. Vstupním parametrem je výška nasazení korony (HCR).

Frakce	Závislost	R ²	Parametry rovnice		MEP	AIC	RMSE
			a	b			
Jehlice	polynomická	0,00	-0,072527	2,561030	306,9	51,1	15,5
Větvě	lineární	0,03	3,813844	-33,826430	2375,1	67,4	38,5
Borka	polynomická	0,16	0,147786	-1,723936	558,1	54,7	19,0
Mrtvé větve	lineární	0,25	2,438001	-42,268510	89,6	36,8	7,0
Kmen bez borky	polynomická	0,17	1,841858	-22,983811	79789,6	99,4	226,7
Nadzemní biomasa	polynomická	0,13	2,094575	-23,291339	142728,6	104,6	303,1

Parametr: Délka koruny (CL)

Délka koruny je do určité míry závislá na celkové výšce stromu, a proto byla zjištěna významná závislost jednotlivých složek biomasy dospělého smrkového porostu na tomto parametru (Obr. 28). Největší korelaci s délkou koruny vykazovala biomasa jehlic ($R^2 = 0,76$). Koeficient determinace v intervalu 0,53 – 0,59 byl zjištěn u biomasy větví, borky kmene, kmene bez borky a celkové nadzemní biomasy. Nejmenší závislost na délce koruny vykazovala biomasa mrtvých větví ($R^2 = 0,10$). Parametrizované rovnice a výsledky regresní analýzy jsou pro jednotlivé frakce biomasy uvedeny v Tab. 15. Až na polynomicnou závislost, zjištěnou u biomasy jehlic, byla u ostatních frakcí biomasy zjištěna lineární závislost mezi biomasou a délkou koruny.



Obr. 28: Alometrická závislost mezi biomasou jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky, nadzemní biomasou a délkou koruny (CL) pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 15).

Tab. 15: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je délka koruny (CL).

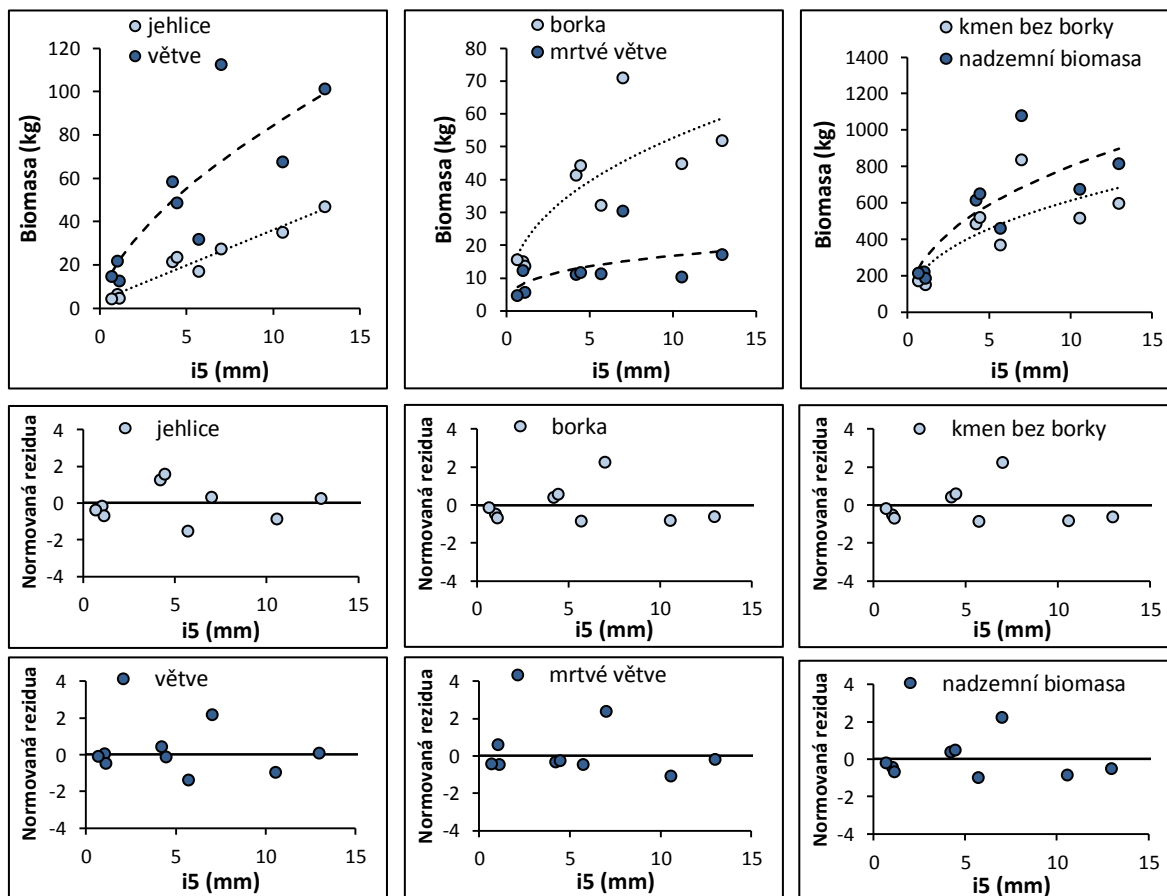
Frakce	Závislost	R ²	Parametry rovnice		MEP	AIC	RMSE
			a	b			
Jehlice	polynomická	0,76	0,189837	0,607392	73,5	38,1	7,6
Větve	lineární	0,53	7,749595	-13,527952	800,8	60,9	26,8
Borka	lineární	0,58	4,339900	-0,172548	192,1	48,4	13,4
Mrtvé větve	lineární	0,10	0,676704	7,004994	66,3	38,5	7,7
Kmen bez borky	lineární	0,58	51,851561	-16,997950	27659,6	93,1	160,5
Nadzemní biomasa	lineární	0,59	68,335175	-34,504584	47179,2	97,9	209,1

Parametr: Šířka letokruhů za posledních 5 let (i5)

Šířka letokruhů za posledních 5 let jako vstupní parametr pro odhad jednotlivých frakcí biomasy dospělého smrkového porostu vykázal nejvyšší korelaci s biomasou jehlic ($R^2 = 0,95$). Biomasa živých větví, borky kmene, kmene bez borky i celková nadzemní biomasa korelovaly s pětiletým přírůstem poloměru kmene ve výčetní výšce v rozmezí $R^2 = 0,64-0,69$ (Obr. 29). Koeficient determinace alometrické rovnice pro zjištěnou biomasu mrtvých větví byl pouze 0,29. Parametrizované rovnice a výsledky regresní analýzy jsou pro jednotlivé frakce biomasy uvedeny v Tab. 16. Mezi biomasou jehlic a pětiletým tloušťkovým přírůstem byla zjištěna lineární závislost. Ostatní hodnocené frakce biomasy vykazovaly mocninnou závislost.

Tab. 16: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je šířka letokruhů za posledních 5 let (i5).

Frakce	Závislost	R ²	Parametry rovnice		MEP	AIC	RMSE
			a	b			
Jehlice	lineární	0,95	3,270605	3,449400	14,3	24,9	3,6
Větve	mocninná	0,69	20,626311	0,611846	546,5	57,3	21,9
Borka	mocninná	0,66	20,305957	0,414018	174,8	46,6	12,1
Mrtvé větve	mocninná	0,29	8,306451	0,307043	54,7	36,3	6,8
Kmen bez borky	mocninná	0,64	231,733283	0,421641	26445,7	91,7	148,4
Nadzemní biomasa	mocninná	0,67	287,487779	0,444854	40964,8	95,9	186,8

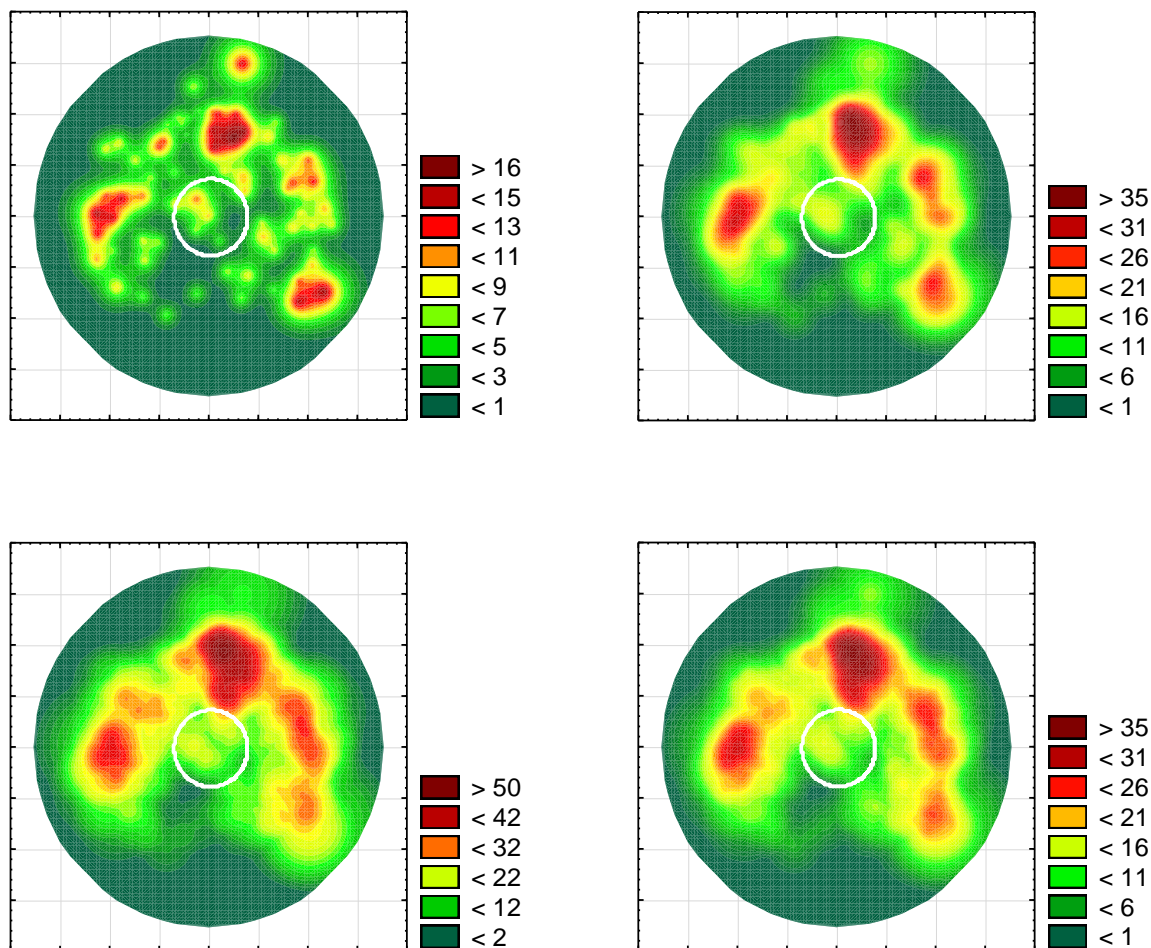


Obr. 29: Alometrická závislost biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy na šířce letokruhů za posledních 5 let (i_5) pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 16).

5.5 KOMPETIČNÍ VZTAHY VZORNÍKOVÝCH STROMŮ Z DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU

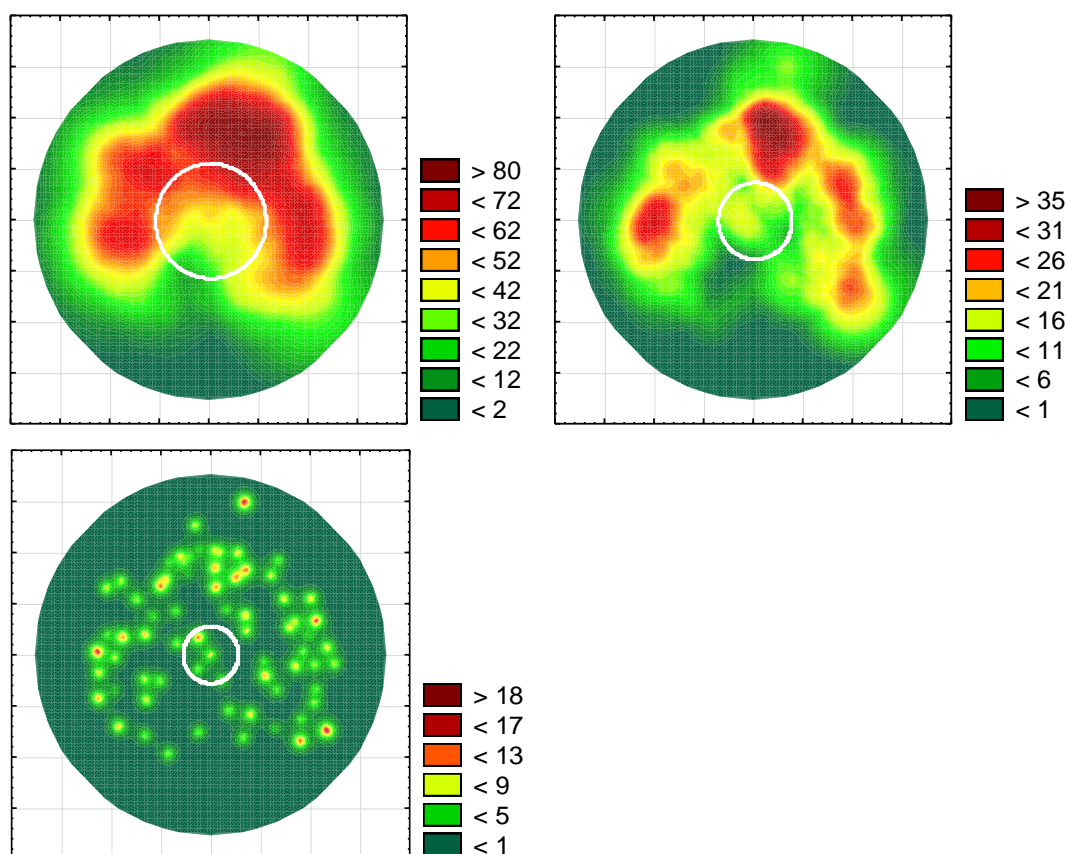
Jednotlivé frakce biomasy každého vzorníkového stromu pokáceného v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec v roce 2010 byly porovnány s 12 variantami výpočtů $\sum NK_{ji}$, 12 variantami výpočtů $\sum NK_i / \sum NK_{ji}$ a s disponibilní plochou stromu podle Nagela (1999). Uvedeného počtu 12 variant výpočtů reprezentujících kompetici stromů je docíleno kombinacemi čtyř tvarů rovnic pro výpočet síly kompetice 1S – 4S (Tab. 4) se třemi zvolenými způsoby výpočtu a_i v rovnici 5 ($x = 1; 1,5 \text{ a } 2$) – viz Kap. 4.2.4 c). Výsledná rozdílnost přístupů pro výpočet síly kompetice podle rovnic 1S – 4S je graficky znázorněna na mapách síly kompetice v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec okolo vzorníkového

stromu číslo 302 (Obr. 30), který je na každé mapě umístěn uprostřed hodnocené kruhové plochy.



Obr. 30: Mapy síly kompetice okolo vzorníkového stromu číslo 302 vypočítané podle rovnic 1S (vlevo nahoře), 2S (vpravo nahoře), 3S (vlevo dole) a 4S (vpravo dole) a dosazením $x = 1,5$ pro výpočet a_i (rovnice 5) na ekosystémové stanici Rájec v roce 2010. Barvy představují sílu kompetice NK všech stromů pro každý čtverec vytyčeného rastru porostní plochy. Bílý kruh uprostřed značí vzdálenost a_i podle rovnice 5.

Grafická ukázka rozdílů při dosazení $x = 1$; 1,5 a 2 pro výpočet a_i (rovnice 5) je znázorněna na Obr. 31. V tomto případě byla pro všechny tři mapy použita rovnice pro výpočet síly kompetice 2S (síla kompetice klesala lineárně po přímce do vzdálenosti a_i podle rovnice 5. V této vzdálenosti a ve vzdálenosti větší od stromu se síla kompetice již rovnala nule. Oblast bez stromů ve vnější části map síly kompetice (patrná hlavně na Obr. 31 vlevo dole) neznamená, že by v této části porostu nebyly stromy, ale že v této části byly stromy, které neměly žádný kompetiční vliv na středový vzorníkový strom podle zvolených podmínek (zvolená velikost x).



Obr. 31: Mapy síly kompetice okolo vzorníkového stromu číslo 302 vypočítané podle rovnice 2S a dosazením $x = 1$ (vlevo nahoře), $x = 1,5$ (vpravo nahoře) a $x = 2$ (vlevo dole) pro výpočet a_i (rovnice 5) na ekosystémové stanici Rájec v roce 2010. Barvy představují sílu kompetice NK všech stromů pro každý čtverec vytyčeného rastru porostní plochy. Bílý kruh uprostřed značí vzdálenost a_i podle rovnice 5.

Parametr: $\sum NK_j$

Prostý součet všech sil kopeticí (NK) okolních stromů v definovaném radiusu (a_i) okolo vzorníkového stromu ($\sum NK_j$) vykázal poměrně vysokou korelaci s biomasou jednotlivých frakcí vzorníkových stromů (Tab. 17). Hodnoty koeficientu determinace se ve studovaném dospělém smrkovém porostu pohybovaly od 0,44 pro biomasu jehlic s dosazením do rovnic 1S, 2S a 4S (Tab. 17) a pro $x = 2$ (rovnice 5) až do 0,99 pro biomasu borky, kmene bez borky a celkové nadzemní biomasy pro různé tvary rovnic výpočtu síly kompetice. Lze pozorovat trend, kdy se zvyšováním koeficientu x v rovnici 5, respektive se zmenšováním okolní plochy vzorníkového stromu, pro kterou se sčítají NK sousedních stromů, dochází ke snižování koeficientu determinace závislosti frakcí biomasy na $\sum NK_j$ (Tab. 17). Výjimkou je frakce biomasy

mrtvých větví, kdy nejmenší kvadratické chyby odhadu (MEP) dosáhl model 3S s dosazením $x = 2$. Mezi jednotlivými metodami výpočtu poklesu síly kompetice s rostoucí vzdáleností od stromu (1S – 4S) nebyl zaznamenán výrazný rozdíl (Tab. 17). Nicméně typ 1S měl celkově nejvyšší koeficient determinace pro 5 frakcí a nejnižší MEP pro 3 frakce biomasy (Tab. 17). Parametrizované rovnice a výsledky regresní analýzy jsou pro jednotlivé frakce biomasy uvedeny v Tab. 18. Až na frakci biomasy mrtvých větví, pro kterou nejlépe vyhovoval exponenciální tvar křivky, byla nejvhodnějším tvarem proložení dat mocninná funkce (Tab. 18, Obr. 32).

Tab. 17: Závislost jednotlivých frakcí biomasy na $\sum NK_j$ vypočítaného podle zvolených rovnic (1S – 4S) a podle nastaveného x v rovnici 5. Uvedené koeficienty determinace jsou platné pro rovnice odvozené pro vzorníkové stromy dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Šedě vyplněná buňka značí nejvyšší hodnotu koeficientu determinace v rámci frakce biomasy, tučně jsou vyznačeny modely s nejnižším MEP.

Frakce	Typ rovnice podle Tab. 4											
	1S	1S	1S	2S	2S	2S	3S	3S	3S	4S	4S	4S
	x podle rovnice 5											
	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2
Jehlice	0,65	0,60	0,44	0,65	0,60	0,44	0,64	0,61	0,47	0,65	0,60	0,44
Větve	0,89	0,86	0,75	0,89	0,86	0,75	0,88	0,87	0,77	0,89	0,86	0,75
Borka	0,99	0,99	0,91	0,99	0,99	0,91	0,98	0,98	0,89	0,99	0,98	0,90
Mrtvé větve	0,89	0,85	0,83	0,89	0,86	0,84	0,87	0,88	0,88	0,88	0,86	0,85
Kmen bez borky	0,99	0,99	0,92	0,99	0,99	0,92	0,98	0,98	0,89	0,99	0,99	0,90
Nadzemní biomasa	0,99	0,98	0,90	0,98	0,98	0,90	0,98	0,97	0,88	0,98	0,98	0,88

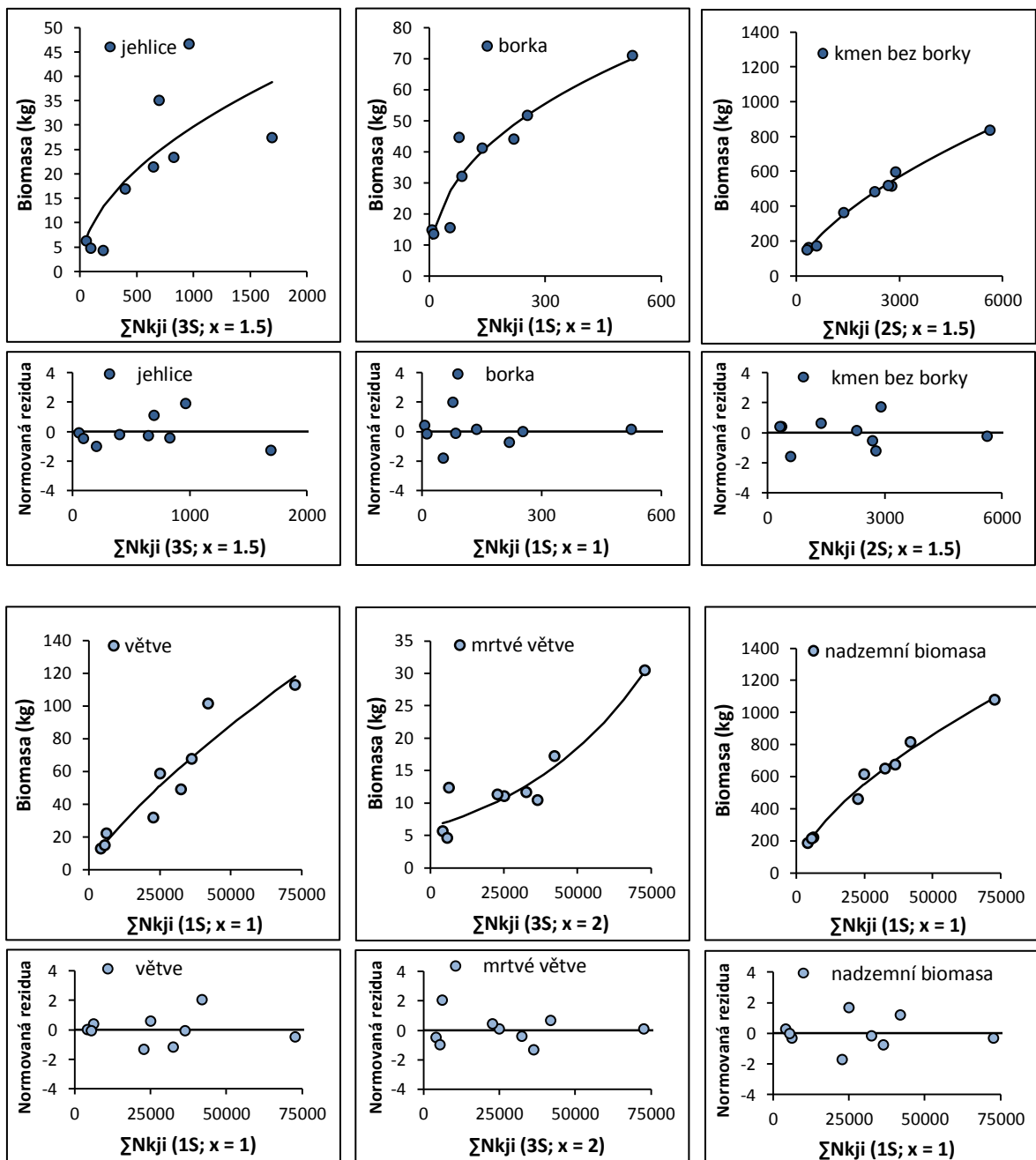
Tab. 18: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je součet všech sil kompetic (NK) okolních stromů v definovaném radiusu (a_i) okolo vzorníkového stromu ($\sum NK_j$).

Frakce	Závislost	R2	Parametry rovnice		MEP	AIC	RMSE	Poznámka
			a	b				
Jehlice	mocninná	0,61	0,883254	0,508800	199,8	42,7	9,7	3S; x = 1,5
Větve	mocninná	0,89	0,018145	0,784389	262,2	47,7	12,8	1S; x = 1
Borka	mocninná	0,99	0,086734	0,599166	5,0	15,4	2,1	1S; x = 1
Mrtvé větve	exponenciální	0,88	7,765361	0,002604	8,7	20,6	2,8	3S; x = 2
Kmen bez borky	mocninná	0,99	3,939578	0,621208	676,0	59,1	24,1	2S; x = 1,5
Nadzemní biomasa	mocninná	0,99	0,897242	0,634463	1870,0	67,9	39,6	1S; x = 1

Poznámka:

1S – 4S označuje tvar rovnice pro výpočet NK (Tab. 4)

x představuje hodnotu nastavenou pro výpočet a_i (rovnice 5)



Obr. 32: Alometrická závislost biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy dospělého smrkového porostu na ΣNK_{ji} na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 18).

Parametr: $\sum NK_i / \sum NK_j$

Parametr $\sum NK_i / \sum NK_j$ popisující poměr síly kompetice vzorníkového stromu k síle kompetice sousedních stromů v definovaném radiusu (a_i) okolo vzorníkového stromu rovněž ukázal silnou korelaci s jednotlivými frakcemi biomasy vzorníkových stromů (Tab. 19). Nejvyššího koeficientu determinace ($R^2 = 0,96$) dosáhla frakce biomasy jehlic. Následovala nadzemní biomasa, biomasa kmene, biomasa borky a biomasa živých větví s koeficientem determinace v intervalu 0,89 až 0,92. Nejnižšího koeficientu determinace ($R^2 = 0,68$) dosáhla biomasa mrtvých větví. Pro frakci biomasy větví, borky kmene, kmene a celkovou nadzemní biomasu dosáhl nejnižšího MEP parametr $\sum NK_i / \sum NK_j$ založený na tvaru rovnice 1S (Tab. 20) a pro $x = 1$. Je to tedy případ, kdy síla kompetice stromů klesá zprvu pozvolně a zároveň se do výpočtů zahrnují okolní stromy v největším hodnoceném radiusu. Zjištěné hodnoty $\sum NK_i / \sum NK_j$ vzorníkových stromů představovaly velmi dobrý parametr pro odhad jejich biomasy jehlic (Obr. 33). Na rozdíl od ostatních frakcí biomasy, biomasa jehlic nejvíce korelovala s $\sum NK_i / \sum NK_j$ stanoveného pro nejbližší okolí vzorníkových stromů, tedy pro $x = 2$ (rovnice 5). Toto neplatilo pro typ rovnice 3S, která neposkytovala dobré výsledky pro odhad biomasy jehlic.

Tab. 19: Závislost jednotlivých frakcí biomasy na $\sum NK_i / \sum NK_j$, vypočítaného podle zvolených rovnic (1S – 4S) a dle nastaveného x v rovnici 5. Uvedené koeficienty determinace jsou platné pro rovnice odvozené pro vzorníkové stromy na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Šedě vyplněná buňka značí nejvyšší hodnotu koeficientu determinace v rámci frakce biomasy, tučně jsou vyznačeny modely s nejnižším MEP.

Frakce	Typ rovnice podle Tab. 4											
	1S	1S	1S	2S	2S	2S	3S	3S	3S	4S	4S	4S
	x podle rovnice 5											
	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2
Jehlice	0,76	0,80	0,95	0,76	0,80	0,96	0,75	0,76	0,45	0,76	0,81	0,96
Větve	0,89	0,87	0,83	0,89	0,87	0,82	0,88	0,90	0,30	0,88	0,88	0,77
Borka	0,91	0,86	0,77	0,91	0,87	0,75	0,89	0,81	0,27	0,91	0,85	0,71
Mrtvé větve	0,66	0,59	0,46	0,65	0,60	0,44	0,61	0,68	0,19	0,59	0,63	0,41
Kmen bez borky	0,91	0,85	0,75	0,91	0,86	0,74	0,88	0,80	0,26	0,90	0,84	0,70
Nadzemní biomasa	0,92	0,87	0,79	0,92	0,88	0,77	0,90	0,84	0,28	0,91	0,87	0,73

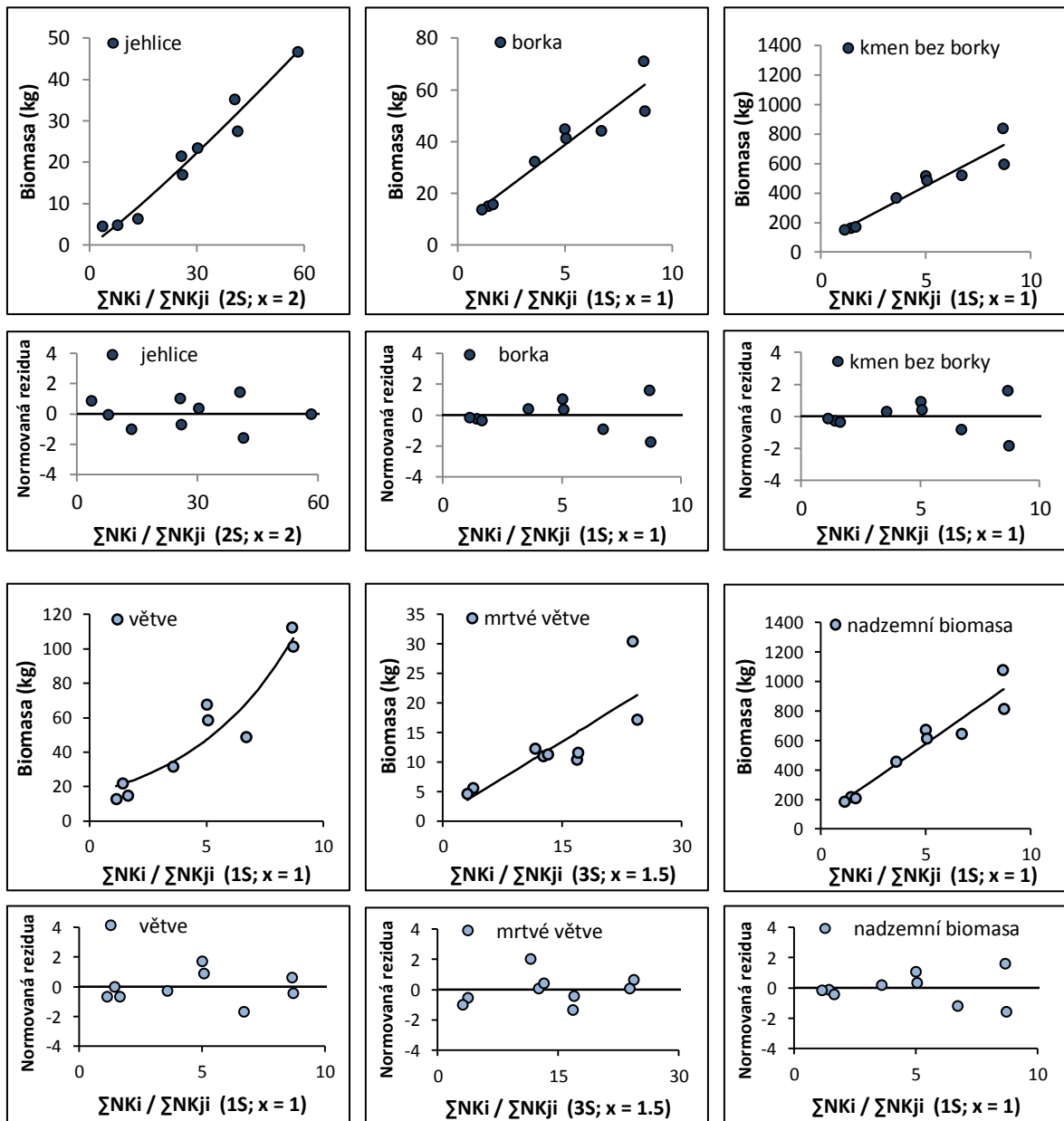
Tab. 20: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy stanovené pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je součet všech sil kompetice (NK) vzorníkového stromu lomeno součet všech NK okolních stromů v definovaném radiusu (a_i) okolo vzorníkového stromu ($\sum NK_i / \sum NK_{j_i}$).

Frakce	Závislost	R ²	Parametry rovnice		MEP	AIC	RMSE	Poznámka
			a	b				
Jehlice	mocninná	0,96	0,491540	1,120575	9,9	21,2	3,0	2S; x = 2
Větve	exponenciální	0,89	15,741552	0,219021	194,7	74,5	12,7	1S; x = 1
Borka	lineární	0,91	6,254848	7,494767	61,1	34,6	6,2	1S; x = 1
Mrtvé větve	lineární	0,68	0,832504	1,000147	32,6	29,2	4,6	3S; x = 1,5
Kmen bez borky	lineární	0,91	74,732216	74,601106	9243,6	79,6	75,6	1S; x = 1
Nadzemní biomasa	lineární	0,92	98,831821	84,619975	12647,8	82,9	90,9	1S; x = 1

Poznámka:

1S–4S značí tvar rovnice pro výpočet NK (Tab. 4)

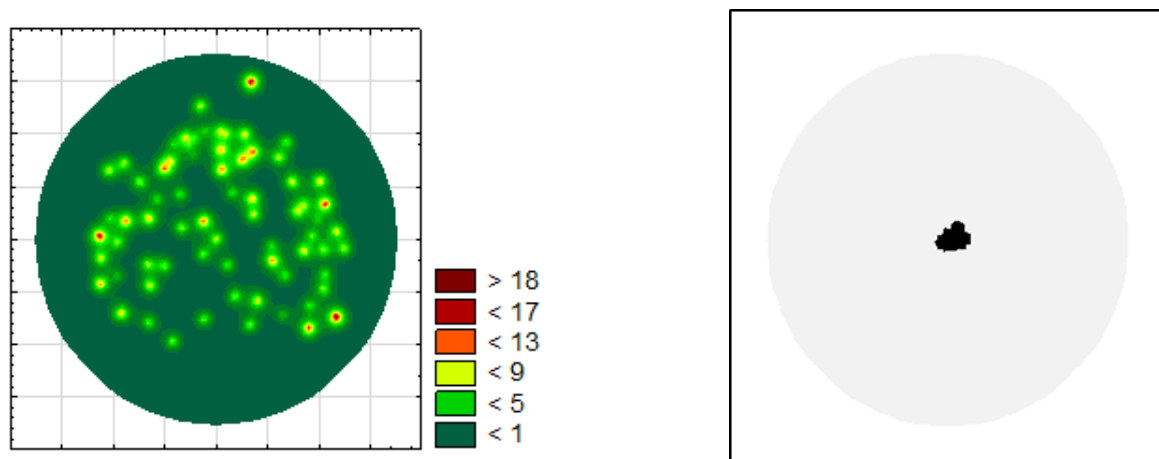
x představuje hodnotu nastavenou pro výpočet a_i (rovnice 5)



Obr. 33: Alometrická závislost biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy dospělého smrkového porostu na $\Sigma N K_i / \Sigma N K_{ji}$ na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 20).

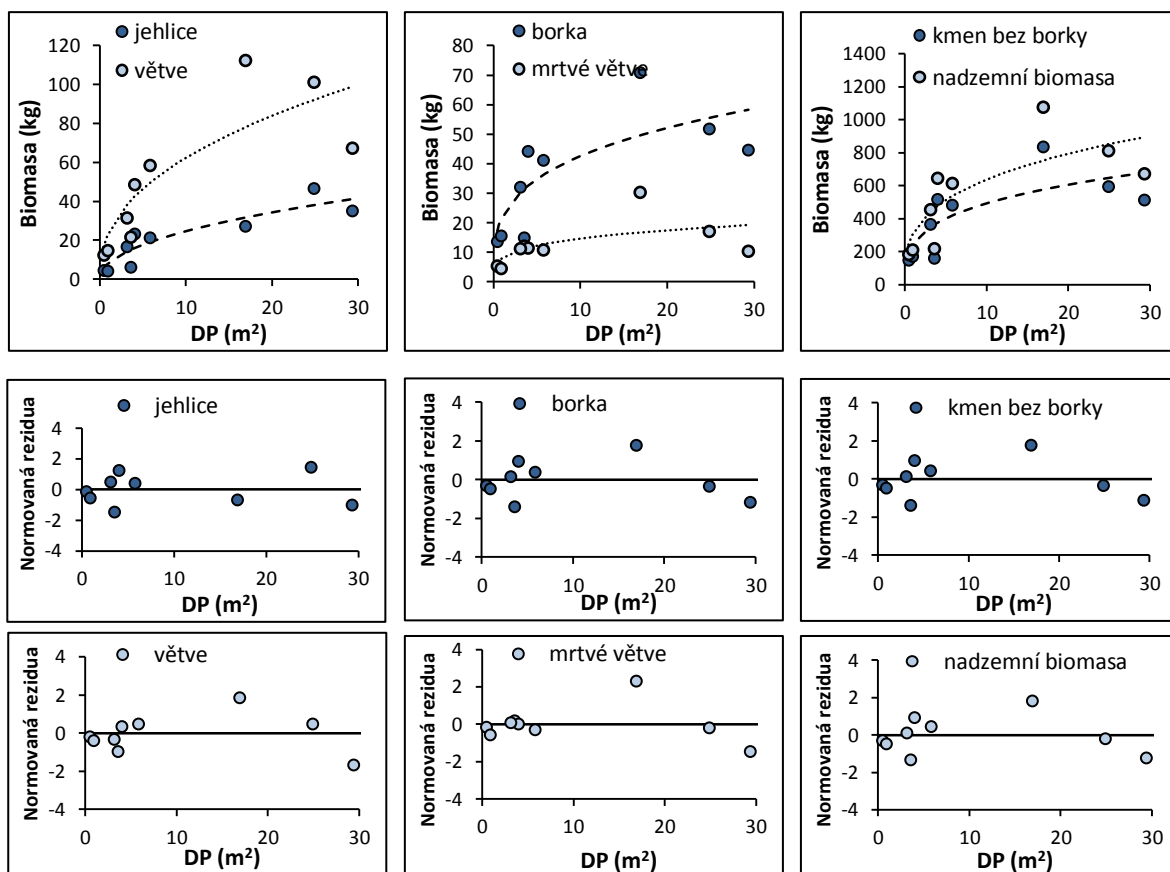
Parametr: Disponibilní plocha stromu (DP)

Při výpočtu disponibilní plochy stromu (DP) se neuvažuje jakákoliv vzdálenost předpokládaného rozsahu vlivu stromů. Plocha porostu je rozdělena mezi stromy tak, že každému stromu připadne plocha všech čtverců vytyčeného rastru, pro které je jeho síla kompetice nejvyšší. I v tomto případě je před výpočtem DP získána mapa síly kompetice v porostu (Obr. 34).



Obr. 34: Mapa síly kompetice okolo vzorníkového stromu číslo 302 vypočítané podle rovnice 5N (vlevo) na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Strom č. 302 je uprostřed kruhové plochy. Barvy představují sílu kompetice (NK) všech stromů pro každý čtverec vytyčeného rastru porostní plochy. V pravé části je černě znázorněna disponibilní plocha (DP) stromu číslo 302 podle Nagela (1999).

Nejvyšší korelaci s disponibilní plochou stromu vykazovala biomasa jehlic vzorníkových stromů ($R^2 = 0,83$) (Obr. 35). Následovala biomasa živých větví ($R^2 = 0,74$) a biomasa borky kmene, biomasa dřeva kmene a celková biomasy (R^2 v rozmezí 0,60 – 0,65). Nejmenší korelaci s disponibilní plochou vzorníkových stromů vykazovala biomasa mrtvých větví ($R^2 = 0,39$). Parametrizované rovnice jsou pro jednotlivé frakce biomasy uvedeny v Tab. 21. Pro popis závislosti studovaných frakcí biomasy na disponibilní ploše stromu se jeví jako nejvhodnější mocninná funkce.



Obr. 35: Alometrická závislost biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy dospělého smrkového porostu na disponibilní ploše stromu (DP) na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Stanovená množství biomasy jsou proložena nejlepší zjištěnou funkcí (Tab. 21).

Tab. 21: Výsledky regresní analýzy a parametry alometrických rovnic pro odhad biomasy jehlic, větví, borky, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy platné pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Vstupním parametrem je disponibilní plocha stromu (DP).

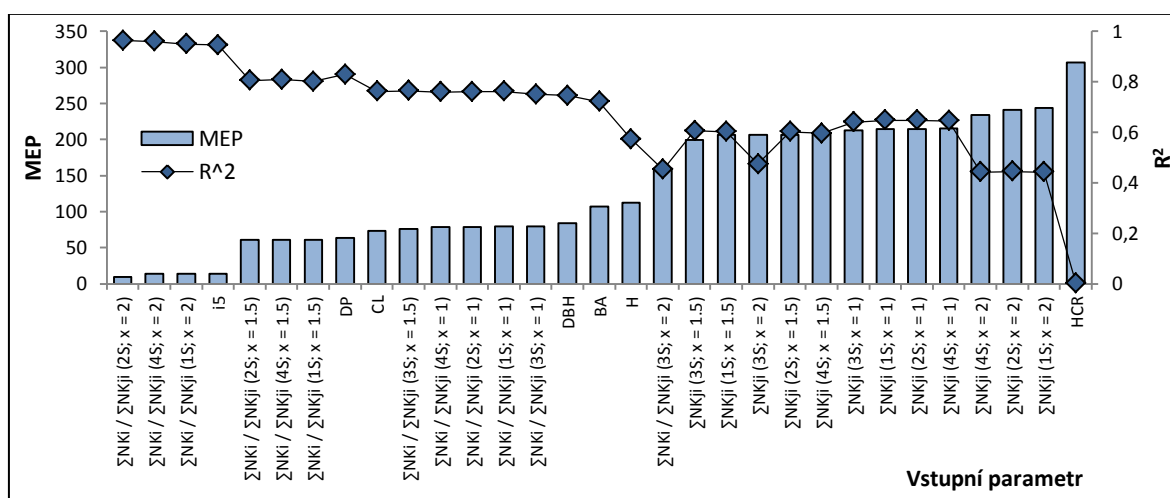
Frakce	Závislost	R ²	Parametry rovnice		MEP	AIC	RMSE
			a	b			
Jehlice	mocninná	0,83	8,213841	0,476730	64,0	35,2	6,4
Větve	mocninná	0,74	23,333363	0,426999	699,4	55,7	20,0
Borka	mocninná	0,62	21,728416	0,291930	220,3	47,5	12,7
Mrtvé větve	mocninná	0,39	8,117968	0,254185	60,9	35,0	6,4
Kmen bez borky	mocninná	0,61	248,009077	0,297728	32842,6	92,6	155,4
Nadzemní biomasa	mocninná	0,65	309,007889	0,314446	52305,1	96,5	193,1

5.6 ZHODNOCENÍ VHODNOSTI VYUŽITÍ TESTOVANÝCH PARAMETRŮ PRO STANOVENÍ JEDNOTLIVÝCH FRAKCIÍ BIOMASY DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU

Podrobný popis blízkého okolí vzorníkových stromů, včetně pozic a dimenzí sousedních stromů, analyzovaných Vyskotem (1981) není k dispozici. Proto se následné vyhodnocení frakcí nadzemní biomasy vztahuje pouze na stromy pokácené v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec v roce 2010.

5.6.1 Biomasa jehlic

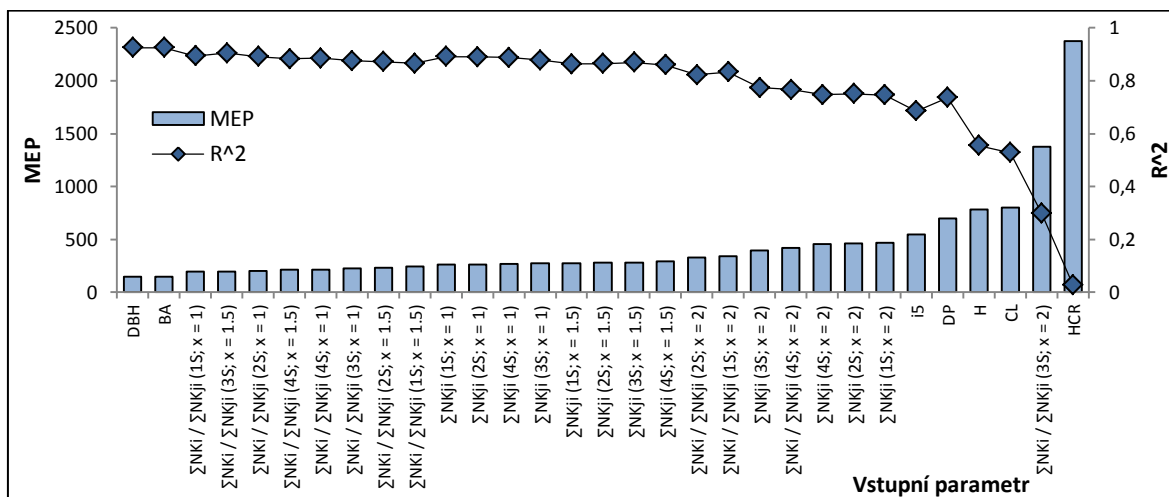
Biomasa jehlic nejvíce korelovala s parametry $\Sigma NK_i / \Sigma NK_j$ vypočítaných podle rovnic 1S, 2S a 4S se zahrnutím pouze nejmenšího hodnoceného radiusu okolo vzorníkového stromu (Obr. 36). Dalším, stejně vhodným, parametrem, nezohledňujícím kompetici stromů, byl pětiletý přírůst stromů ve výčetní výšce (i5). Skokově vyšší MEP a nižší koeficient determinace měly ostatní parametry typu $\Sigma NK_i / \Sigma NK_j$ a také disponibilní plocha stromu (DP), délka koruny (CL), výčetní tloušťka (DBH), bazální plocha ve výčetní výšce (BA) a výška stromu (H). Další skupinu parametrů s ještě výrazně vyšším MEP tvořily všechny parametry typu ΣNK_j a nejméně vhodným parametrem pro odhad biomasy jehlic byla výška nasazení koruny (HCR).



Obr. 36: Závislost biomasy jehlic vzorníkových stromů dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) na testovaných parametrech. Parametry jsou seřazeny zleva vzestupně podle MEP. Na vedlejší ose jsou vyneseny koeficienty determinace (označené jako R²).

5.6.2 Biomasa živých větví

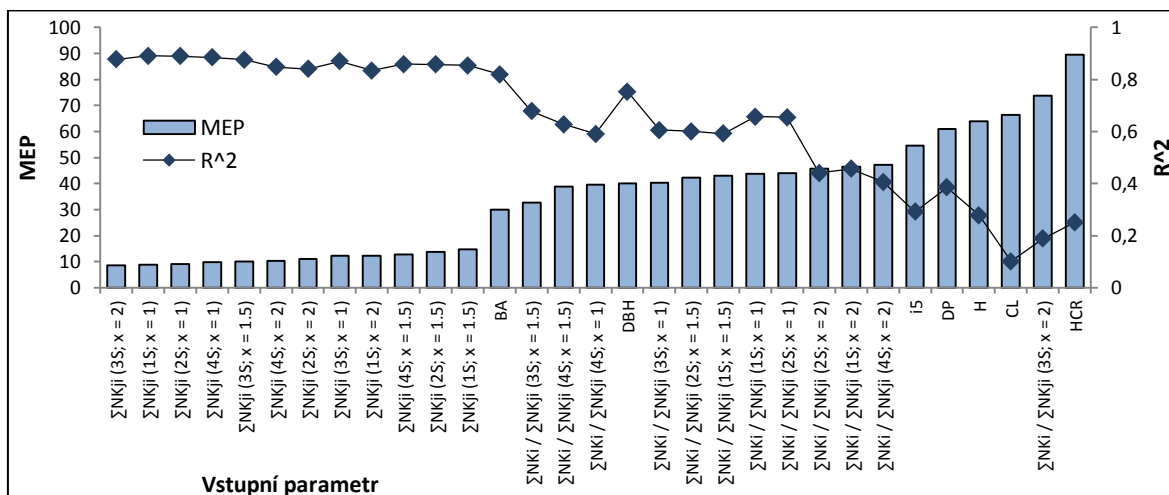
Biomasa živých větví nejvíce korelovala s výčetní tloušťkou (DBH) a bazální plochou ve výčetní výšce stromu (BA). Dále postupně následovaly bez větších rozdílů všechny parametry typu $\sum NK_j$ a $\sum NK_i / \sum NK_j$ s dosazenou hodnotou $x = 1$ a $x = 1,5$, tedy se spíše velkým radiusem uvažovaných sousedních stromů okolo vzorníkového stromu (Obr. 37). Mírné zvýšení MEP pak vykázaly rovnice odvozené z parametrů typu $\sum NK_j$ a $\sum NK_i / \sum NK_j$ (vyjma $\sum NK_i / \sum NK_j$ (3S; $x = 2$)). Parametry jako pětiletý přírůst stromů ve výčetní výšce (i5), disponibilní plocha stromu (DP), výška stromu (H) a délka koruny (CL) následovaly s hodnotou MEP až za těmito parametry zohledňujícími vliv sousedních stromů. Nejméně vhodným parametrem pro odhad biomasy větví byla výška nasazení koruny (HCR).



Obr. 37: Závislost biomasy větví vzorníkových stromů dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) na testovaných parametrech. Parametry jsou seřazeny zleva vzestupně podle MEP. Na vedlejší ose jsou vyneseny koeficienty determinace (označené jako R^2).

5.6.3 Biomasa mrtvých větví

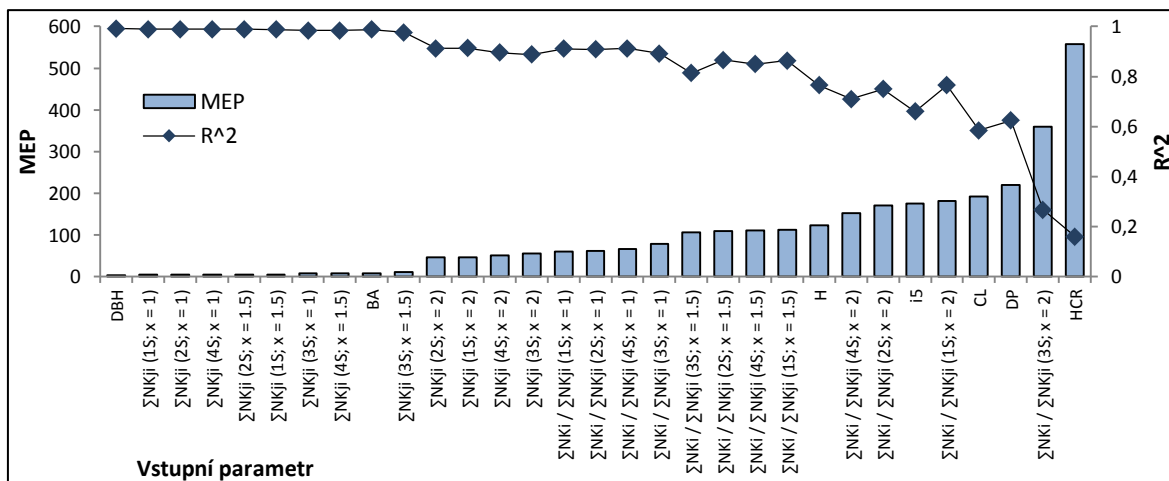
Biomasu mrtvých větví vzorníkových stromů nejlépe popisovaly parametry kompetice typu $\sum NK_j$ (Obr. 38). Až za nimi na 13. místě vhodnosti parametrů, avšak s výrazně vyšším MEP, byla zjištěna bazální plocha ve výčetní výšce stromu (BA). Používanější parametry jako pětiletý přírůst stromů ve výčetní výšce (i5), výška stromu (H) a délka koruny (CL) dosáhly výrazně vyššího MEP oproti nejlepším vstupním parametrům kompetice. Nejméně vhodným testovaným parametrem pro odhad biomasy mrtvých větví byla výška nasazení koruny (HCR).



Obr. 38: Závislost biomasy mrtvých větví vzorníkových stromů dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) na testovaných parametrech. Parametry jsou seřazeny zleva vzestupně podle MEP. Na vedlejší ose jsou vyneseny koeficienty determinace (označené jako R²).

5.6.4 Biomasa borky

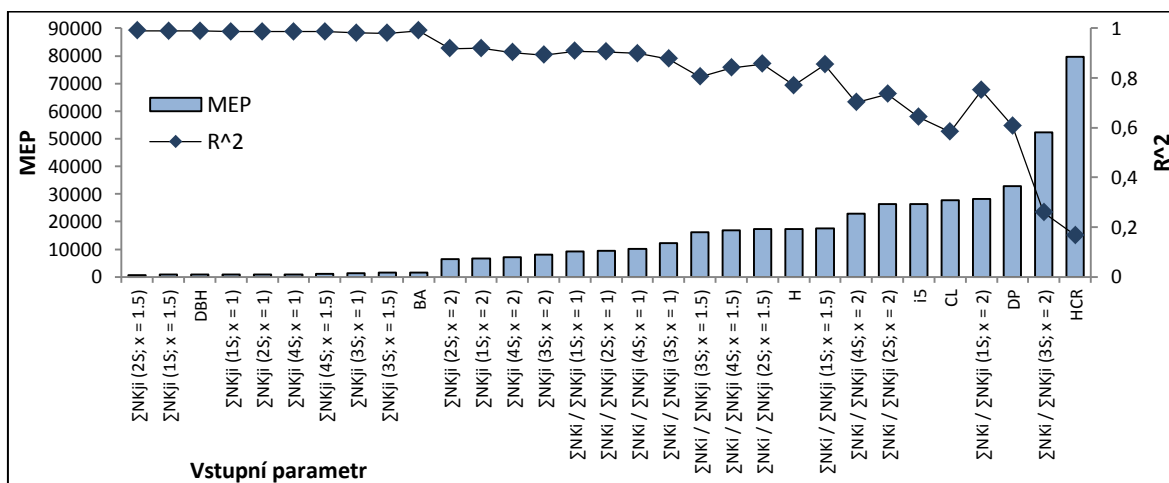
Nejlepším samostatným parametrem pro odhad biomasy borky kmene vzorníkových stromů byla výčetní tloušťka (DBH). Obdobně nízkých MEP dosáhly ještě parametry kompetice typu ΣNK_{j_i} založených na posouzení vlivu širšího okolí vzorníkového stromu ($x = 1$ nebo $1,5$, rovnice 5) a parametr bazální plocha ve výčetní výšce (BA) - Obr. 39. Až za všemi hodnocenými parametry typu ΣNK_{j_i} se sestupně umístily parametry typu $\Sigma NK_i / \Sigma NK_{j_i}$ od $x = 1$ po $x = 2$ (rovnice 5). Parametry výška stromu (H), pětiletý přírůst stromů ve výčetní výšce (i5), délka koruny (CL), disponibilní plocha stromu (DP) byly až v poslední třetině seznamu vhodných nezávisle proměnných pro odhad biomasy borky kmene. Nejméně vhodným testovaným parametrem pro odhad biomasy borky byla výška nasazení koruny (HCR).



Obr. 39: Závislost biomasy borky kmene vzorníkových stromů dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) na testovaných parametrech. Parametry jsou seřazeny zleva vzestupně podle MEP. Na vedlejší ose jsou vyneseny koeficienty determinace (označené jako R^2).

5.6.5 Biomasa kmene

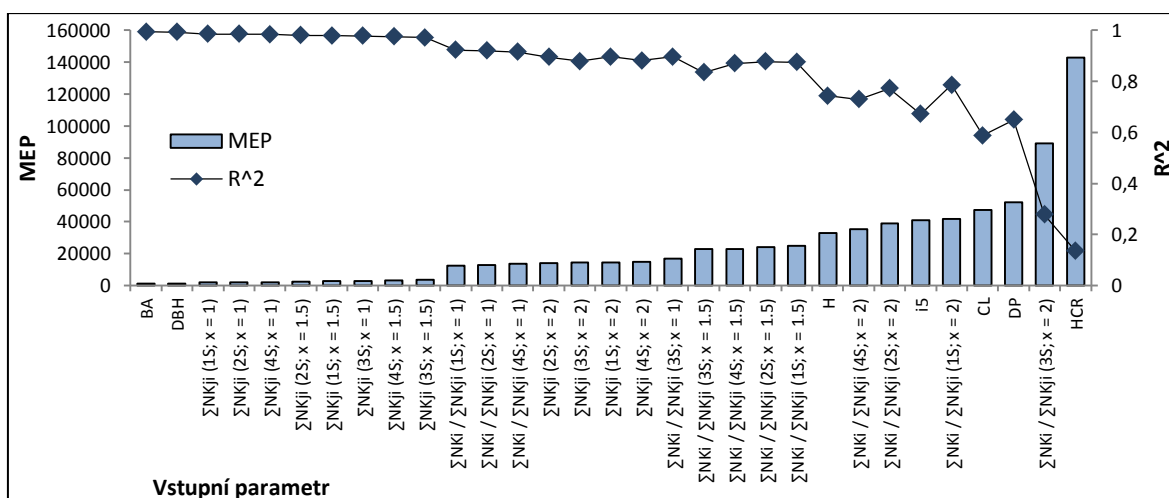
Pro odhad biomasy kmene vzorníkových stromů byly jako nejvhodnější vyhodnoceny parametry kompetice typu ΣNK_j a výčetní tloušťky (DBH) - Obr. 40. Mírně horších výsledků dosáhla parametrizovaná alometrická rovnice založená na dosazení bazální plochy ve výčetní výšce (BA). Následoval seznam většiny parametrů kompetice. Parametry výška stromu (H), pětiletý přírůst stromů ve výčetní výšce (i5), délka koruny stromu (CL), disponibilní plocha stromu (DP) se ukázaly být méně vhodnými testovanými parametry. Nejméně vhodným testovaným parametrem pro odhad biomasy kmene byla výška nasazení koruny (HCR).



Obr. 40: Závislost biomasy kmene vzorníkových stromů dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) na testovaných parametrech. Parametry jsou seřazeny zleva vzestupně podle MEP. Na vedlejší ose jsou vyneseny koeficienty determinace (označené jako R^2).

5.6.6 Nadzemní biomasa

Zcela nejlepším parametrem pro odhad nadzemní biomasy vzorníkových stromů byla bazální plocha ve výčetní výšce (BA), těsně následovaná výčetní tloušťkou stromu (DBH) (Obr. 41). Dále následoval výčet parametrů kompetice typu $\sum NK_j$, založených na velikosti a vzdálenosti sousedních stromů v širokém okolí vzorníkového stromu ($x = 1$ nebo 1,5; rovnice 5). Za těmito parametry následovaly parametry kompetice typu $\sum NK_j$, s $x = 2$ a většina $\sum NK_i / \sum NK_j$, seřazených od největšího uvažovaného radiusu okolo vzorníkového stromu po nejmenší. Výška stromu (H), pětiletý přírůst stromů ve výčetní výšce (i5), délka koruny stromu (CL) a disponibilní plocha stromu (DP) byly zařazeny mezi nejméně vhodné vstupní parametry. Nejméně vhodným testovaným parametrem pro odhad nadzemní biomasy vzorníkových stromů byla výška nasazení koruny (HCR).



Obr. 41: Závislost nadzemní biomasy vzorníkových stromů dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) na testovaných parametrech. Parametry jsou seřazeny zleva vzestupně podle MEP. Na vedlejší ose jsou vyneseny koeficienty determinace (označené jako R^2).

5.7 VÝBĚR ZNÁMÝCH ALOMETRICKÝCH ROVNIC PRO NADZEMNÍ A PODZEMNÍ BIOMASU DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU

5.7.1 Nadzemní biomasa

Jednotlivé frakce biomasy dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec byly porovnány s modelovými hodnotami vybraných známých alometrických

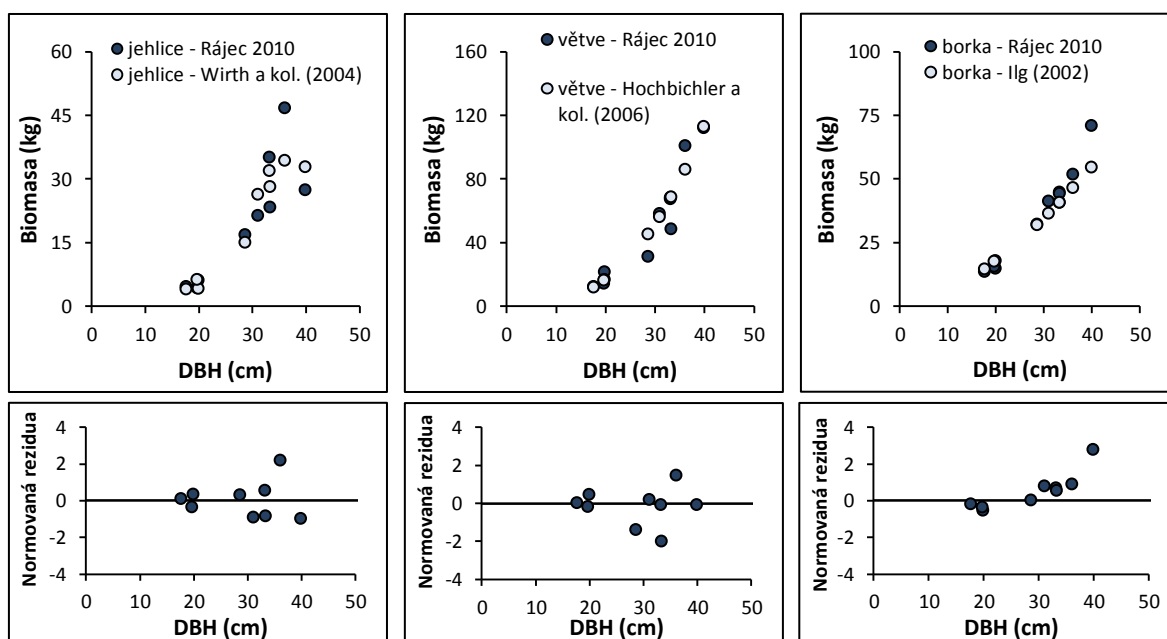
rovníc. Takto byla vedle biomasy jehlic, větví, borky kmene, mrtvých větví, kmene bez borky a nadzemní biomasy zhodnocena ještě biomasa korun stromů (živé větve plus jehlice) a biomasa celého kmene (dřevo kmene plus borka kmene). Počty modelů a nejvyšší dosažené hodnoty NSE alometrických rovnic z každé studie jsou uvedeny v Tab. 22.

Nejvhodnější model pro dané stanoviště pro výpočet biomasy jehličí vzorníkových stromů podle kritéria NSE (hodnota 0,85) je model typu DHA+C podle Wirtha a kol. (2004) – Tab. 23. Ten jako vstupní parametry vyžaduje tloušťku stromu ve výčetní výšce, výšku stromu, věk porostu a délku živé koruny, tedy parametry známé pro všechny stromy studovaného porostu. Nejlepší shodu se zjištěnou biomasou větví vzorníkových stromů vykazoval model podle Hochbichlera a kol. (2006) s NSE = 0,92. Pro tento model bylo nutné dosadit pouze hodnoty výčetní tloušťky a výšky stromů. Nejlepší shoda známého modelu se zjištěnou biomasou borky vzorníkových stromů byla dosažena parametrizovanou mocninnou funkcí výčetní tloušťky podle Ilga (2002). NSE bylo v tomto případě 0,88. Obdobné hodnoty NSE (0,88) vykazoval také model podle Marklunda (1987). Ten ovšem vyžadoval dosazení osmi konstantních parametrů při znalosti výčetní tloušťky, výčetní tloušťky největšího stromu na studované ploše, výšky, počtu letokruhů ve výčetní výšce stromu, tloušťku borky ve výčetní výšce, horní výšky porostu a specifický korekční faktor. Biomasa jehlic, větví a borky zjištěné rozbořem vzorníkových stromů v dospělém smrkovém porostu na studované lokalitě a hodnoty vypočítané podle literárních modelů jsou znázorněny na Obr. 42.

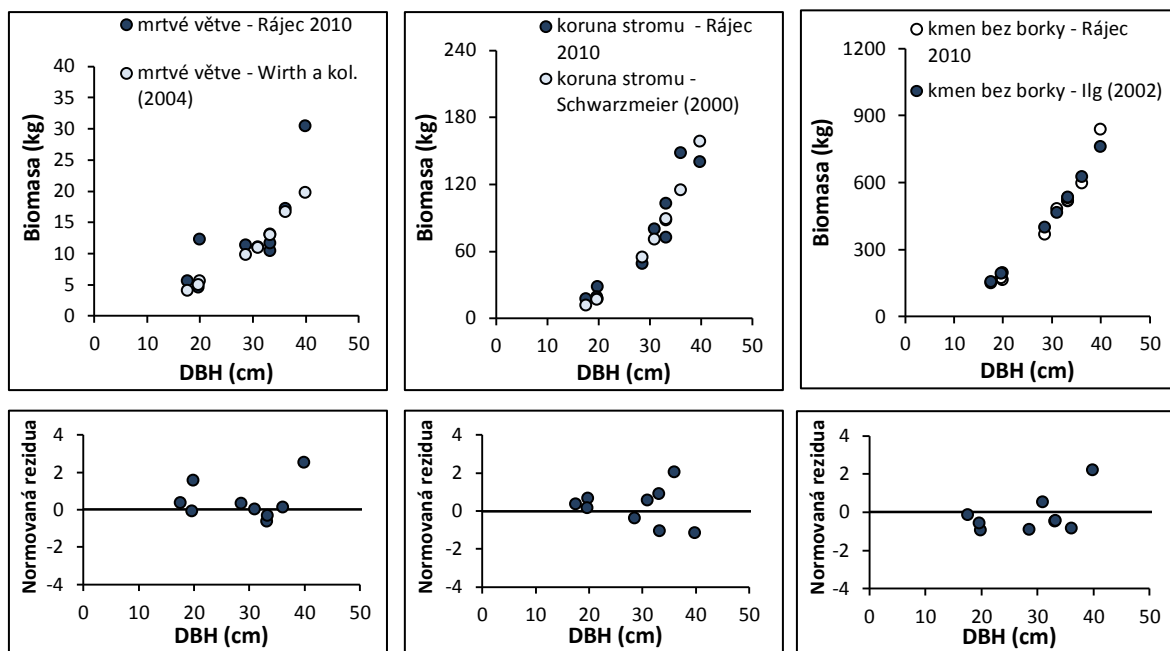
Biomasa mrtvých větví dosahovala celkově nejnižších hodnot NSE. Pouze u 7 z 15 testovaných modelů dosahovala hodnota NSE více než 0. Nejlépe vyhovovala funkce výčetní výšky, výšky a věku stromu podle Wirtha a kol. (2004) s NSE = 0,62. Biomasa korun (živé větve plus jehlice) vzorníkových stromů vypočítaná podle Schwarzmeiera (2000) měla nejlepší shodu se skutečně zjištěnými hodnotami (NSE = 0,89). Obdobné hodnoty NSE byly zjištěny i při výpočtu podle Marklunda (1988). Biomasa dřeva kmene vzorníkových stromů měla hodnotu NSE (nad 0,80) u 5 ze šesti testovaných modelů. Nejvyšší hodnota NSE (0,98) byla pro celkovou biomasu dřeva kmenů zjištěna pro model Ilga (2002), odhadující tuto frakci mocninnou funkcí z výčetní

tloušťky. Biomasa mrtvých větví, koruny stromu a kmene bez borky zjištěné rozborem vzorníkových stromů v dospělém smrkovém porostu na studované lokalitě a hodnoty vypočítané podle literárních modelů jsou znázorněny na Obr. 43.

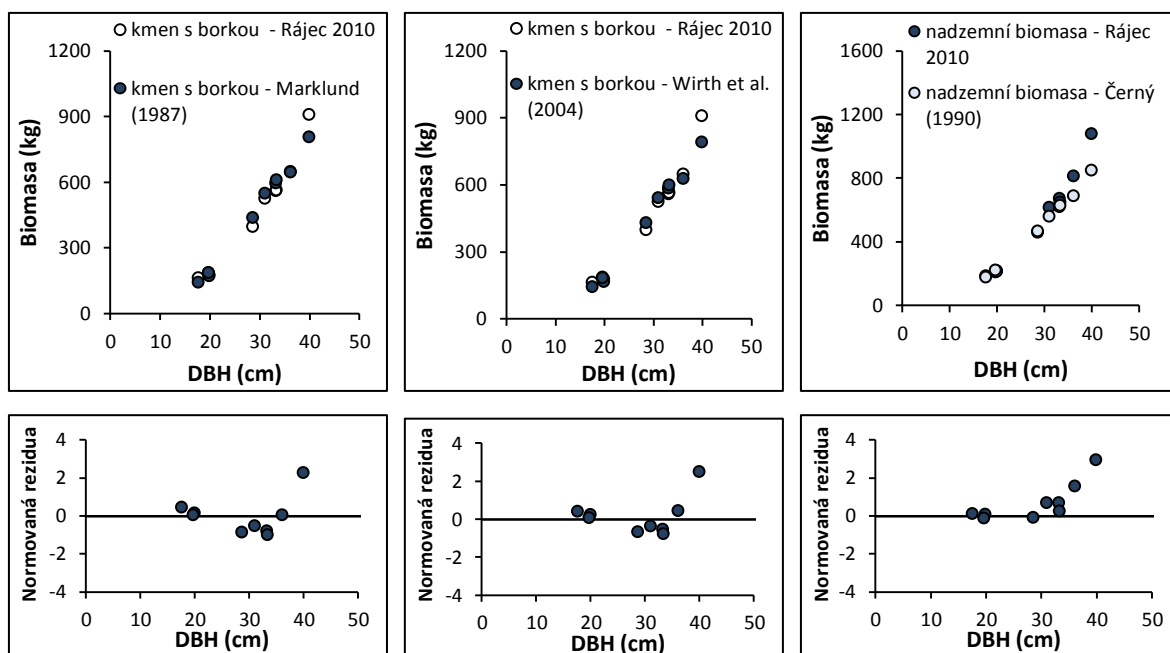
Biomasa kmene s borkou vzorníkových stromů studovaného dospělého smrkového porostu nejlépe vystihovala závislost na výčetní tloušťce, výšce a věku stromu ve výčetní výšce (NSE = 0,97) podle Marklunda (1987). Nicméně vzhledem k potřebě vložení těžce měřitelného a pro celý studovaný porost neznámého parametru věku stromu ve výčetní výšce (počet letokruhů ve výčetní výšce) do alometrické rovnice je uvedena i rovnice podle Wirtha a kol. (2004) s nepatrně nižší hodnotou NSE (0,96). Celková nadzemní biomasa vzorníkových stromů nejlépe korelovala s modelem podle Černého (1990) při použití výčetní tloušťky a výšky stromu (NSE = 0,90). Biomasa kmene s borkou a nadzemní biomasa stromu zjištěné rozborem vzorníkových stromů v dospělém smrkovém porostu na studované lokalitě a hodnoty vypočítané podle literárních modelů jsou znázorněny na Obr. 44.



Obr. 42: Alometrická závislost biomasy jehlic, větví a borky na výčetní tloušťce (DBH) vzorníkových stromů v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010 podle modelu stanoveného pro studovanou plochu a podle vybraných literárních modelů (Tab. 23).



Obr. 43: Alometrická závislost biomasy mrtvých větví koruny stromů a kmene bez borky na výčetní tloušťce (DBH) vzorníkových stromů v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010 podle modelu stanoveného pro studovanou plochu a podle vybraných literárních modelů (Tab. 23).



Obr. 44: Alometrická závislost biomasy kmene s borkou a nadzemní biomasy na výčetní tloušťce (DBH) vzorníkových stromů v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010 podle modelu stanoveného pro studovanou plochu a podle vybraných literárních modelů (Tab. 23).

Tab. 22: Srovnání literárních modelů s jednotlivými frakcemi biomasy vzorníkových stromů z dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina). NSE pro jednotlivé autory a frakce představuje vždy pouze nejvyšší dosaženou hodnotu NSE v rámci studie konkrétního autora. Tučně jsou vyznačeny nejvyšší hodnoty pro danou frakci biomasy.

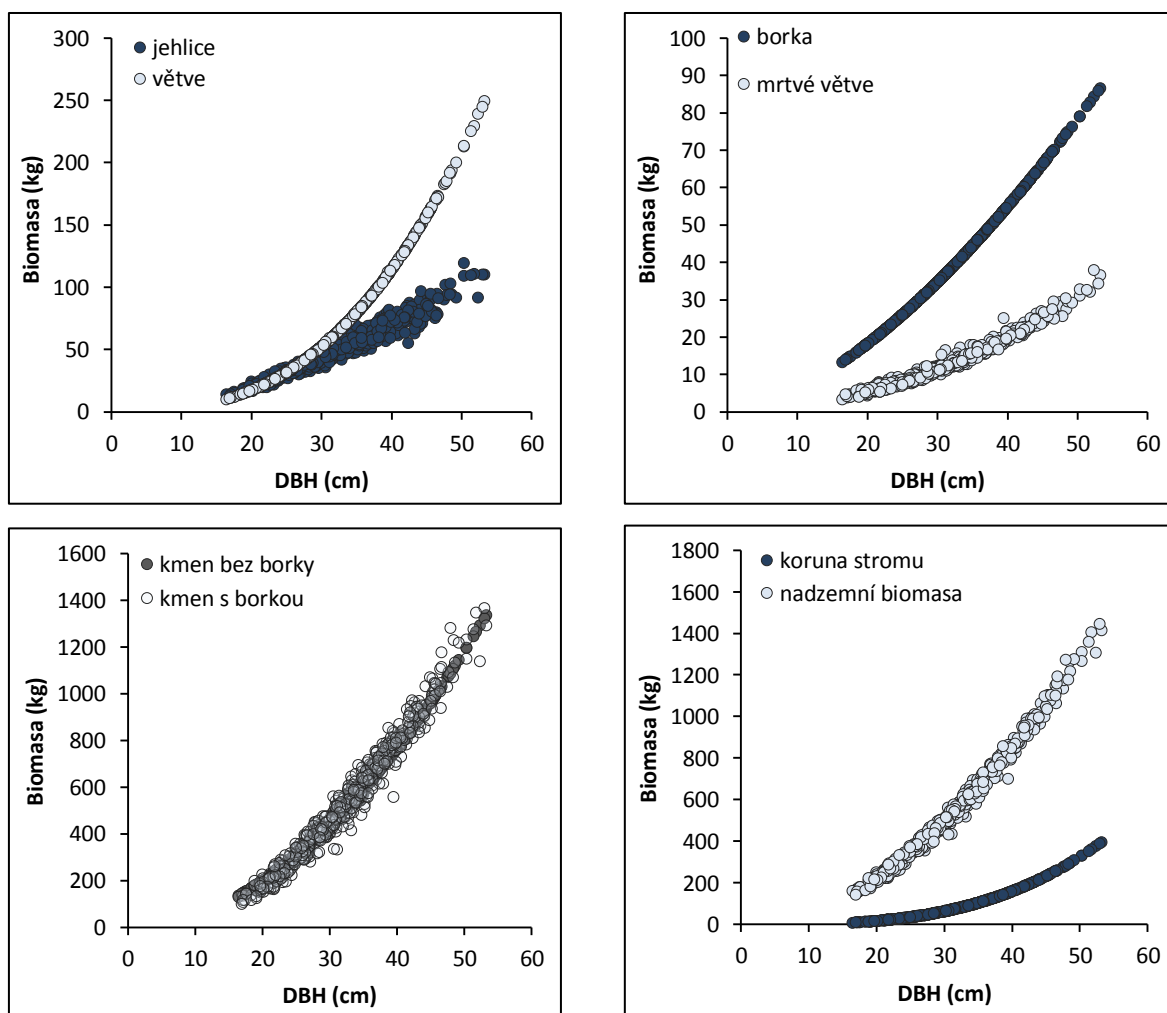
Frakce	Jehlice		Větve		Borka		Mrtvé větve		Kmen bez borky		Kmen s borkou		Koruna stromu (větve + jehlice)		Nadzemní biomasa	
	M ¹	NSE ²	M	NSE	M	NSE	M	NSE	M	NSE	M	NSE	M	NSE	M	NSE
Briggs a Cunia (1982)	4	-0,94	6	0,91							4	0,94	4	0,37	4	0,90
Černý (1990)	4	0,47	4	0,86	2	0,09	2	0,42	2	0,89	2	0,89			2	0,90
Dietrich a kol. (2002)											1	0,94	1	0,41		
Hakkila (1971)							1	-1,56					1	0,66		
Hakkila (1991)	1	-1,13											4	0,41		
Hochbichler a kol. (2006)	2	-0,66	2	0,92									2	0,79		
Ilg (2002)	1	0,06	1	-0,64	1	0,88			1	0,98						
Johansson (1999)	3	0,22	3	0,77							3	0,24			3	0,10
Jokela a kol. (1986)	1	-6,56	1	0,84	1	-0,19			1	-0,13					1	0,36
Ledermann a Neumann (2006)													1	0,49		
Lehtonen (2005)	1	-0,62														
Marklund (1987)	3	0,78	3	0,87	3	0,88	3	-0,18	3	0,87	3	0,97	1	0,63		
Marklund (1988)	4	0,77	4	0,83	4	0,82	4	0,32	3	0,88	3	0,95	2	0,88		
Mund a kol. (2002)	1	-0,52	1	0,79												
Schöpfer (1961)	1	0,22														
Schwarzmeier (2000)	2	0,59	4	0,02	2	0,72	1	-0,29	2	0,81	2	0,81	2	0,89		
Wirth a kol. (2004)	6	0,85	4	0,83			4	0,62			3	0,96				
POČET	34		30		13		15		12		19		18		10	

¹M – počet modelů, ²NSE – kritérium podle Nash a Sutcliffe (1970)

Tab. 23: Seznam nejlepších modelů pro odhad frakcí nadzemní biomasy dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina).

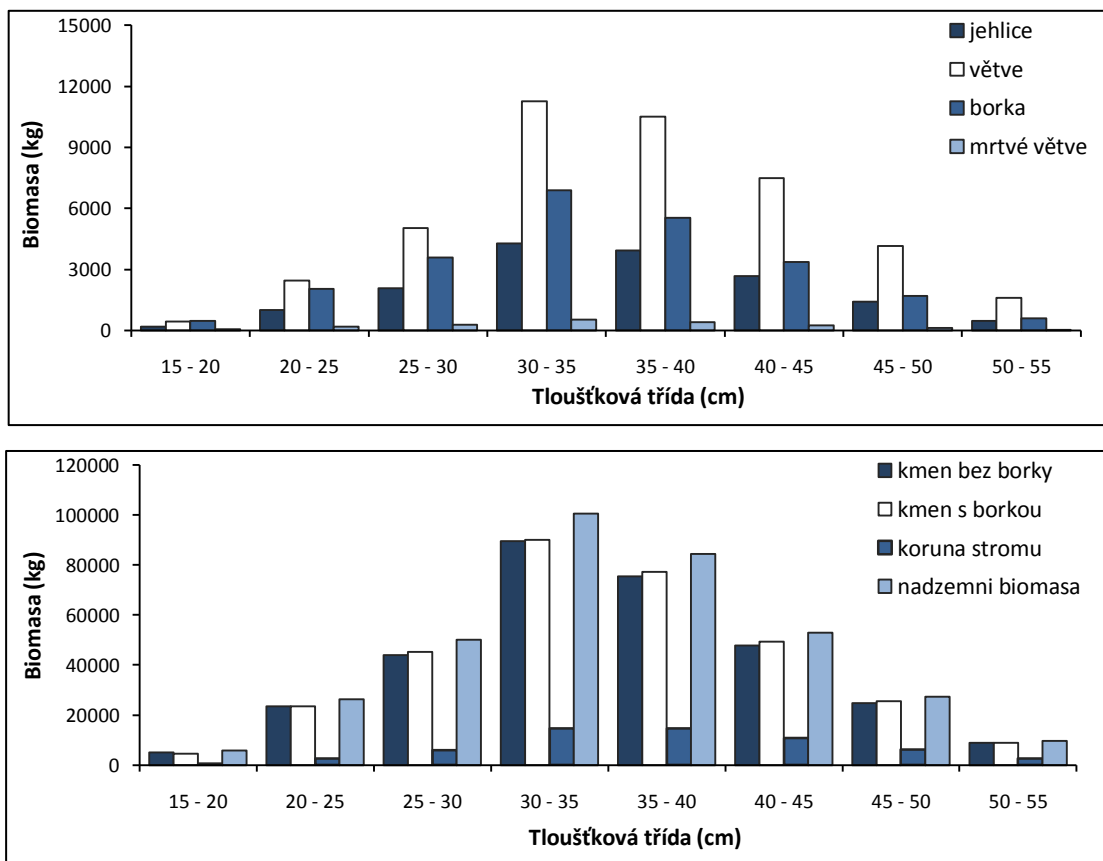
Frakce	Model (podle autora)
Jehlice	$\ln(B) = -1,18863 + 3,3372 \cdot \ln(DBH) - 0,24482 \cdot [\ln(DBH)]^2 - 3,31885 \cdot \ln(H) + 0,49368 \cdot [\ln(H)]^2 - 0,13463 \cdot \ln(A) + 0,85797 \cdot \ln(CL)$ (Wirth a kol. 2004)
Větve	$\ln(B) = -5,04936 + 2,73927 \cdot \ln(DBH) - 0,0886 \cdot \ln(H)$ (Hochbichler a kol. 2006)
Borka	$B = 0,1557 \cdot DBH^{1,5908}$ (Ilg 2002)
Mrtvé větve	$\ln(B) = -1,21969 + 1,49138 \cdot \ln(DBH) - 1,25928 \cdot \ln(H) + 0,18222 \cdot \ln(A \cdot DBH)$ (Wirth a kol. 2004)
Kmen bez borky	$B = 0,5937753 \cdot DBH^{1,9423097}$ (Ilg 2002)
Kmen s borkou	$\ln(B) = [-2,3389 + 7,4471 \cdot DBH / (DBH + 14) + 0,0203 \cdot H + 0,7256 \cdot \ln(H) + 0,0517 \cdot \ln(T)] \cdot 1,023$ (Marklund 1987)
	$\ln(B) = -2,83958 + 2,55203 \cdot \ln(DBH) - 0,14991 \cdot [\ln(DBH)]^2 - 0,19172 \cdot \ln(H) + 0,25739 \cdot [\ln(H)]^2 - 0,08278 \cdot \ln(A)$ (Wirth a kol. 2004)
Koruna stromu (větve+jehlice)	$B = 0,0013 \cdot DBH^{3,1784}$ (Schwarzmeier 2000)
Nadzemní biomasa	$B = 0,11975 \cdot (DBH^2 \cdot H)^{0,81336}$ (Černý 1990)

Podle vybraných nejvhodnějších modelů byla odhadnuta zásoba jednotlivých frakcí nadzemní biomasy studovaného dospělého smrkového porostu pro rok 2010. Modelové hodnoty pro jednotlivé frakce biomasy jsou uvedeny v Obr. 45. Biomasa jehlic byla v roce 2010 16.041 kg podle Wirtha a kol. (2004), větví 42.937 kg podle Hochbichlera a kol. (2006), borky kmenů 24.174 kg podle Ilga (2002), mrtvých větví 1.837 kg podle Wirtha a kol. (2004), dřeva kmenů 319.019 kg podle Ilga (2002), kmenů s borkou 323.904 kg podle Wirtha a kol. (2004), korun stromů 57.464 kg podle Schwarzmeiera (2000) a celková nadzemní biomasa byla 357.020 kg podle Černého (1990).



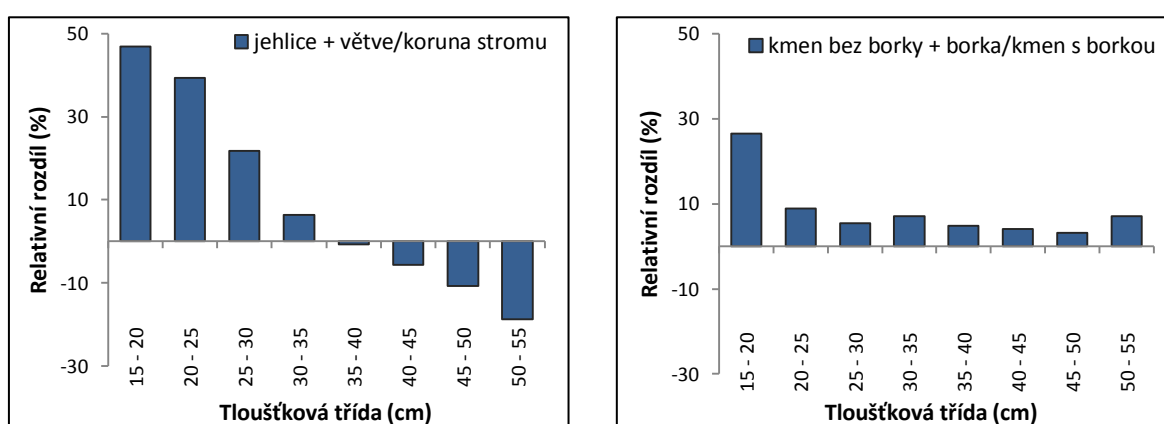
Obr. 45: Modelové hodnoty jednotlivých frakcí biomasy dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010 v závislosti na výčetní tloušťce (DBH) podle vybraných nejvhodnějších modelů uvedených v Tab. 23.

Nejvíce biomasy v jednotlivých frakcích nadzemní biomasy dospělého smrkového porostu bylo zaznamenáno u stromů s výčetní tloušťkou 30 – 35 cm. Podíl jednotlivých frakcí těchto stromů v porostu se pohyboval od 25,4 % součtu biomasy všech korun stromů do 28,5 % u borky kmene (Obr. 46). Druhou tloušťkovou třídou s nejvyšším podílem jednotlivých frakcí biomasy představovaly stromy s výčetní tloušťkou 35 – 40 cm. Stromy s výčetní tloušťkou 30 – 40 cm tak tvořily více než 50 % nadzemní biomasy dospělého smrkového porostu. Pouze u mrtvých větví byl podíl na celkové zásobě mrtvých větví 49,5 %. Nejméně biomasy v jednotlivých frakcích nadzemní biomasy bylo zaznamenáno u stromů s výčetní tloušťkou 15 – 20 cm. Podíl jednotlivých frakcí těchto stromů v porostu se pohyboval od 0,7 % korun stromů do 2,6 % mrtvých větví.

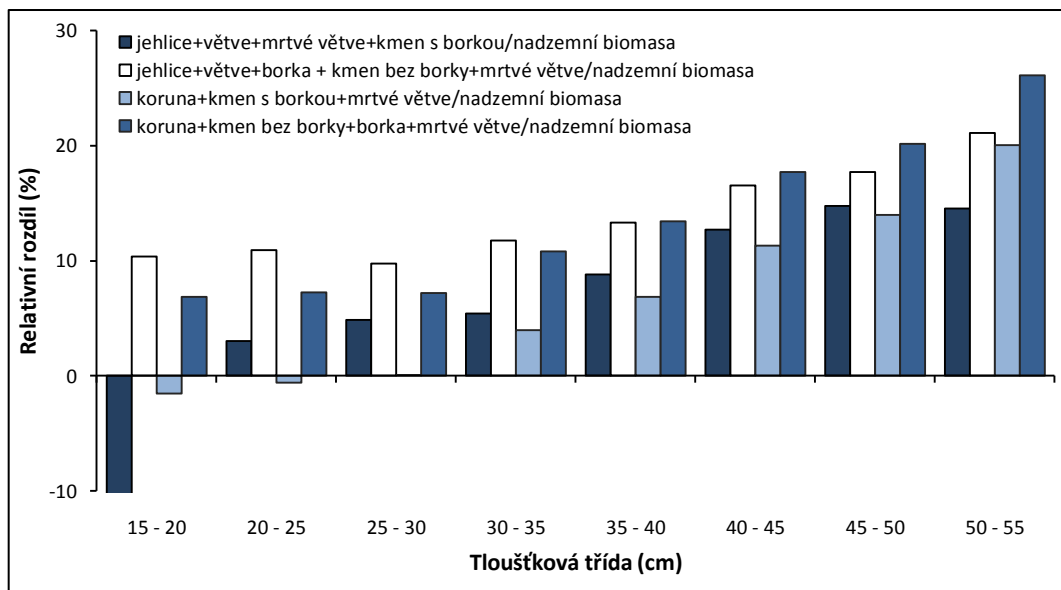


Obr. 46: Modelové hodnoty jednotlivých frakcí nadzemní biomasy dospělého smrkového porostu Rozdělené podle tloušťkových tříd na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010 podle vybraných nejvhodnějších modelů uvedených v Tab. 23.

Srovnání součtu biomasy jehlic a větví s biomasou koruny stromů ukázalo relativní rozdíl + 2,6 %. Odhad biomasy koruny stromů podle Schwarzmeiera (2000) byl celkově nepatrně nižší než odhad biomasy součtem hodnot biomasy jehlic a větví podle Wirtha a kol. (2004) a Hochbichlera kol. (2006). Nicméně při dekompozici těchto rozdílů na jednotlivé tloušťkové třídy bylo zjištěno, že nejmenší stromy v porostu měly o téměř 50 % vyšší odhad získaný součtem biomasy jehlic a větví než odhad biomasy celé koruny stromu (Obr. 47) a největší stromy měly součet odhadů biomasy jehlic a větví o 19 % nižší. Průměrný relativní rozdíl mezi součtem biomasy kmene bez borky a biomasou borky (oba modely podle Ilga 2002) a biomasou kmene s borkou byl 6,0 % ve prospěch součtu frakcí biomasy nad slučujícím modelem podle Wirtha a kol. (2004). I zde byl nejvyšší relativní rozdíl vypočítán u nejmenších stromů v porostu. Na rozdíl od biomasy koruny, v případě biomasy kmene bylo určité kladné nadhodnocení pro všechny tloušťkové třídy v porostu. Model pro nadzemní biomasu podle Černého (1990) byl porovnán se 4 možnostmi součtů modelových hodnot příslušných frakcí biomasy (Obr. 48). Nejmenší relativní rozdíl pro celý porost (5,5 %) byl zaznamenán mezi modelem pro nadzemní biomasu a součtem biomasy koruny a biomasou kmene s borkou. Nejvyšší relativní rozdíl (13,2 %) pak byl zjištěn pro součet biomasy jehlic, větví, mrtvých větví, borky a kmene. Celkový trend byl pro všechny čtyři porovnání vzestupný, tedy že s velikostí tloušťkové třídy stoupal vypočítaný relativní rozdíl. Nejvyšší relativní rozdíl (26,1 %) byl zaznamenán pro zmíněnou variantu součtu pěti frakcí v tloušťkové třídě 50 – 55 cm.



Obr. 47: Relativní rozdíly v odhadu biomasy koruny stromu a biomasou kmene s borkou pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) při použití jednoho modelu a při součtu dvou modelů rozdělené podle tloušťkových tříd stromů.



Obr. 48: Relativní rozdíly v odhadu nadzemní biomasy pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) při použití jednoho modelu a při součtu příslušných dílčích modelů rozdělené podle tloušťkových tříd stromů.

5.7.2 Podzemní biomasa

Na vzorníkových stromech pokácených v dospělém smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec v roce 2010 nebyla stanovena biomasa kořenů. Proto je v práci uvedeno pouze posouzení převzatých dat z literatury podle kritéria NSE. Model pro biomasu kořenů byl ověřen podle dat získaných z dřívějšího vzorkování (Vyskot 1981). Jako nejlepší byl indikován Wirthův model (Wirth a kol. 2004) s NSE = 0,8298, dále rovnice podle Munda a kol. (2002), kde NSE = 0,8292 a Marklundův model (Marklund 1988) s NSE = 0,8272 (Tab. 24).

Tab. 24: Srovnání vybraných modelů pro odhad biomasy kořenů dospělého smrkového porostu s daty získanými pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v minulosti (Vyskot 1981). NSE pro jednotlivé autory představuje vždy pouze nejvyšší dosaženou hodnotu NSE v rámci studie konkrétního autora. Tučně je vyznačena nejvyšší hodnota NSE.

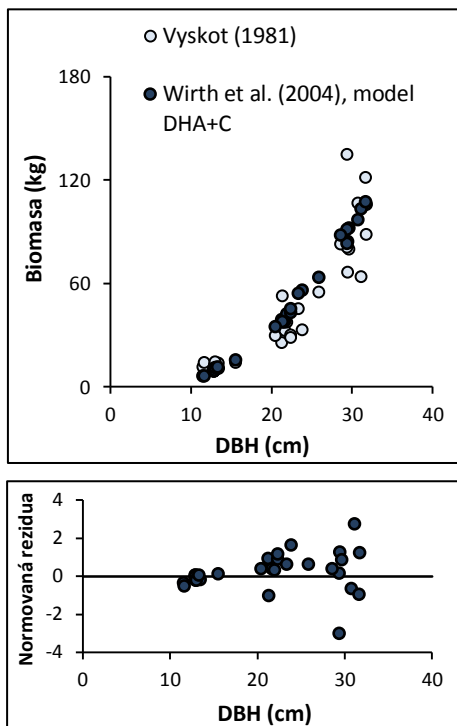
Frakce		Wirth a kol. (2004)	Marklund (1988)	Drexhage a Gruber (1999)	Lee (1998)	Drexhage, Colin (2001)	Do-Hyung (2001)	Mund a kol. (2002)	počet
Kořeny	M	4	9	1	1	1	1	1	18
	NSE	0,83	0,83	0,62	-0,61	0,65	-0,09	0,83	

M – počet modelů, NSE – kritérium podle Nash a Sutcliffe (1970)

Model, který nejlépe popisoval dřívější měření, byl model typu DHA+C podle Wirtha a kol. (2004), tedy model vyžadující dosazení informace o výčetní tloušťce (DBH), věku (A) a délce koruny (CL) stromu (Obr. 49). Parametrizovaný tvar nejlepšího modelu pro odhad biomasy kořenů je uveden v Tab. 25.

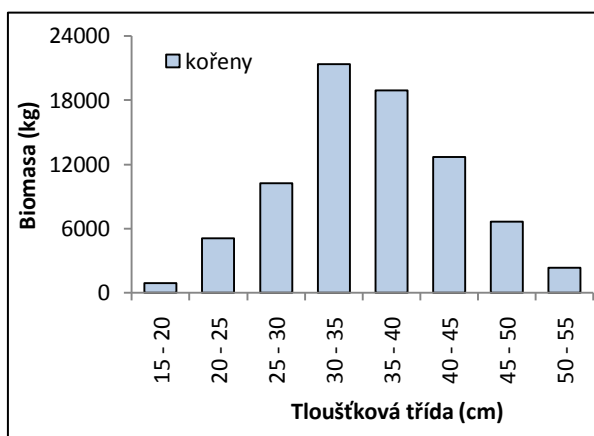
Tab. 25: Nejlepší model pro odhad podzemní biomasy dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina)

Frakce	Model (podle autora)
Kořeny	$\ln(B) = 8,15491 + 4,08262 \cdot \ln(DBH) - 0,28378 \cdot [\ln(DBH)]^2 + 0,34963 \cdot \ln(A) + 0,2452 \cdot \ln(CL)$ (Wirth a kol. 2004)



Obr. 49: Biomasa kořenů dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) stanovená podle Vyskota (1981) a Wirtha a kol. (2004).

Po provedení odhadu biomasy kořenů v celém studovaném porostu pomocí nejlepšího známého modelu (Wirth a kol. 2004) byl největší podíl biomasy kořenů v celkové biomase kořenů dospělého smrkového porostu u stromů v tloušťkové třídě 30 – 35 cm (27,3 %) (Obr. 50). Společně s tloušťkovou třídou 35 – 40 cm byl tento podíl dokonce 51,6 % všech kořenů ve studovaném porostu. Všechny stromy s výčetní tloušťkou 15 – 20 cm měly pouze 1,2 % podíl na porostní biomase kořenů. Celkově bylo v roce 2010 odhadnuto ve smrkovém porostu na ekosystémové stanici Rájec 78.115 kg biomasy kořenů.

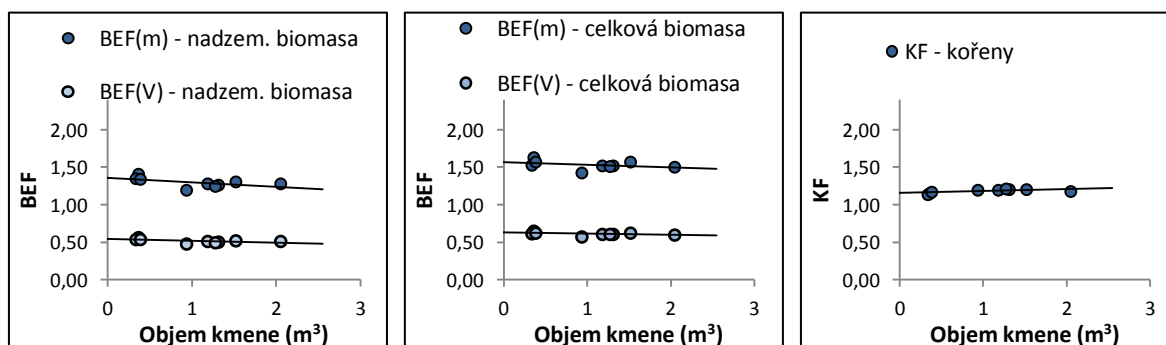


Obr. 50: Modelové hodnoty biomasy kořenů dospělého smrkového porostu rozdělené podle tloušťkových tříd na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010 podle rovnice Wirtha a kol. (2004) uvedené v Tab. 25.

5.8 EXPANZNÍ A KONVERZNÍ FAKTORY PRO ODHAD BIOMASY DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU

Pro devět vzorníkových stromů z dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec byly vypočítány expanzní faktory nadzemní biomasy vzorníkových stromů a expanzní faktory celkové biomasy vzorníkových stromů (nadzemní i podzemní biomasy) podle rovnic 2 a 3. Celkovou biomasou vzorníkových stromů se rozumí nadzemní biomasa zjištěná rozborem stromů v roce 2010 plus modelová hodnota kořenů podle Wirtha a kol. (2004) z rovnice v Tab. 25. Hodnoty expanzních faktorů biomasy vztažené k objemu dřeva kmene se pohybovaly v intervalu 0,48 – 0,56 v případě stanovení nadzemní biomasy a v intervalu 0,57 – 0,65 v případě stanovení celkové biomasy vzorníkových stromů (Obr. 51). Hodnoty expanzních faktorů vztažené k hmotnosti dřeva kmene se pohybovaly v intervalu 1,20 – 1,41 v případě stanovení nadzemní biomasy a v intervalu 1,43 – 1,63 v případě stanovení celkové biomasy vzorníkových stromů.

Statistickým testem významnosti modelů nebyla u obou typů expanzních faktorů (tedy vztažených k objemu dřeva – BEF(V), nebo vztažených k hmotnosti kmene – BEF(m)), nalezena významná regresní rovnice. Významnost F byla pro tyto testy v rozmezí 0,0925 až 0,2760. Průměrné hodnoty expanzních faktorů vztažených k objemu dřeva byly 0,52 pro nadzemní biomasu a 0,61 pro celkovou biomasu; průměrné hodnoty expanzních faktorů vztažených k hmotnosti dřeva kmene byly 1,30 pro nadzemní biomasu a 1,54 pro celkovou biomasu. Tyto hodnoty lze tedy považovat za hodnoty reprezentující všechny stromy sledovaného porostu bez významné závislosti na objemu, hmotnosti nebo výčetní tloušťce kmene.



Obr. 51: Závislost hodnot expanzních faktorů (BEF) nadzemní biomasy stromu (vlevo), celkové biomasy stromu (uprostřed) a závislost hodnot konverzních faktorů (KF) pro biomasu kořenů (vpravo) na objemu kmene pro dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v roce 2010. Expanzní faktory byly vztaženy k objemu dřeva kmene – BEF(V) a ke hmotnosti dřeva kmene – BEF(m).

Konverzní faktory (KF), vyjadřující kolikrát je celková (nadměrná i podzemní) biomasa vyšší než samotná nadzemní biomasa, byly odvozeny ze vzorníkových stromů pokácených v roce 2010 a z modelových hodnot kořenů podle Wirtha a kol. (2004) z rovnice v Tab. 25. Se zvyšujícím se objemem kmene se zvyšovala hodnota konverzního faktoru pro biomasu kořenů (Obr. 51 – vpravo), ale použitý model byl statisticky nevýznamný ($F = 0,0556$). Výsledná průměrná hodnota konverzního faktoru ($KF = 1,18$) pro biomasu kořenů stanovená podle vzorníkových stromů a rovnice podle Wirtha a kol. (2004) je tedy použitelná pro celý dospělý smrkový porost. Aplikací expanzních faktorů na sledovaný dospělý smrkový porost na ekosystémové stanici Rájec byla pro rok 2010 stanovena nadzemní biomasa na $404,8 \text{ t ha}^{-1}$ a celková biomasa $478,1 \text{ t ha}^{-1}$.

6. DISKUSE

Předložená práce se zabývá strukturou dospělého smrkového porostu a odhadem zásob nadzemní a podzemní biomasy tohoto porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina) v letech 2009 - 2012.

V práci jsou analyzovány rovnice popisující závislost vybraných, ekologicky a ekonomicky důležitých, dendrometrických parametrů porostu na různých vstupních proměnných, jejichž měření je různě náročné. Je zde nutné zdůraznit, že se jedná o lokální rovnice, a jejich extrapolace na jiné porosty (např. porosty s odlišným věkem, porosty se stromy s dimenzemi mimo uvedený interval nebo porosty rostoucí na odlišných stanovištích) je možná až po ověření vhodnosti modelů pro takové porosty. Uvedené rovnice a výsledky lze považovat jednak za konečné a platné pro studovaný dospělý smrkový porost, jednak za velmi vhodné pro rozšíření databáze budoucí metaanalýzy řešící obdobnou problematiku, jakou provedl například Palumets (1993), Mund a kol. (2002) nebo Wirth a kol. (2004).

Počet vzorníkových stromů pro stanovení alometrických rovnic byl dostačující pro popis základních závislostí ve studovaném dospělém smrkovém porostu a odpovídal počtu stromů běžně používaných pro obdobné studie (Černý 1990). V případě kombinace více lesních porostů nebo stanovení alometrických rovnic obsahujících více nezávisle proměnných by bylo nutné počet vzorníkových stromů adekvátně zvýšit. Například Smith a kol. (2014) použili celkem 67 vzorníkových stromů z různých lesních porostů pro stanovení podrobných alometrických rovnic, ale z každého vybraného lesního porostu použili pouze 4 vzorníkové stromy. Přestože byl počet vzorníkových stromů pro stanovení vlastních, lokálně specifických a víceparametrických alometrických rovnic malý, bylo možné srovnáním stanovených hodnot Nash-Sutcliffeova koeficientu (Nash a Sutcliffe 1970) vybrat pro studovaný porost nejvhodnější obecné víceparametrické rovnice s určenými konstantami a parametry.

6.1 DENDROMETRICKÉ PARAMETRY DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU

Ve studovaném dospělém smrkovém porostu, jehož plocha je 1 ha, rostlo v roce 2010, tedy v době těžby vzorníkových stromů, 614 stromů. Podle Růstových a taxačních tabulek hlavních dřevin České republiky (Příloha č. 3 Vyhlášky č. 84/1996 Sb.) by bylo možné porost označit jako plně zakmeněný. Na jižní straně porostu však byl v roce 2002 založen jedlobukový clonný kotlík s rozlohou 0,08 ha pro další generaci, v němž bylo ponecháno pouze několik dospělých jedinců smrků jako clona. Lze tedy předpokládat, že studovaný porost byl v roce 2010 mírně přehoustlý se zakmeněním vyšším než 100 % plného tabulkového zakmenění. Předmýtní úmyslnou těžbou (zima 2010/2011) byl počet stromů v porostu zredukován na 486, tedy na plné zakmenění (mimo clonný kotlík).

Podle střední výšky patří studovaný dospělý smrkový porost mezi nadprůměrně produkční porosty. Absolutní výšková bonita byla podle Růstových a taxačních tabulek hlavních dřevin České republiky přibližně 31 m. Tomu odpovídala relativní výšková bonita na hranici druhého a třetího bonitního stupně.

Výška nasazení živé koruny a její délka jsou parametry odrážející vitalitu, stabilitu a sociální postavení stromu v porostu. Jsou to parametry vstupující do výpočtů posuzujících vzájemné vlivy mezi sousedními stromy (kompetice) (Konôpka 1977, Schober 1988, Wirth a kol. 2004, Pretzsch a Schütze 2005, Pretzsch 2009, Valentine a kol. 2012) a vstupující do víceparametrických alometrických rovnic, zejména pro odhad biomasy listoví, větví a kořenů. Parametr délka živé koruny dosazený do rovnic může významně zpřesnit odhad biomasy výše uvedených frakcí (Marklund 1987 a 1988, Wirth a kol. 2004). Podíl délky živé koruny a celkové výšky stromu, případně délky živé koruny a výčetní tloušťky stromu, patří podle Konôpky (1977) mezi nejvýznamnější faktory ovlivňující stabilitu porostu. Studie z Nízkých Tater ukazuje, že stromy s větším podílem délky koruny k celkové výšce stromu jsou odolnější proti zlomům a vývratům.

Přestože bylo v období 2009 – 2012 vytěženo z porostu více jak 22 % stromů, výčetní kruhová základna dospělého smrkového porostu byla v roce 2012 nižší pouze o 4 % proti roku 2010. Toto nepatrné snížení výčetní kruhové základny porostu bylo výsledkem cíleného vytěžení nejmenších stromů a pozitivní růstovou reakcí ponechaných stromů (včetně podúrovňových) na uvolnění.

Štíhlostní kvocient může být ukazatelem stability lesního porostu, zejména odolnosti porostu proti větru, sněhu a námraze (Konôpka 1977, Dušek a kol. 2009). Podle Konôpky (1977) jsou v určitém lesním porostu stromy s vyšším štíhlostním kvocientem zřetelně více náchylné ke zlomům a vývrátům.

Sbíhavost kmene stromu je ukazatelem jednak stability porostu (Konôpka 1977), jednak ukazatelem vad růstu stromu (ČSN 48 0203). Za významnou vadu růstu se považuje sbíhavost, u které například rozdíl tloušťek převyšuje 1 cm na 1 m délky výřezu u nejkvalitnějších sortimentů. U oddenkové části kmene se měří tloušťka výřezu 1 m od čela. Maximální povolenou sbíhavost u jednotlivých sortimentů upravuje norma ČSN 48 0203. Ve studovaném dospělém smrkovém porostu sbíhavost v místech středových výřezů vzorníkových stromů nedosahovala významných hodnot, a lze tedy předpokládat, že ve studovaném porostu byla z pohledu sortimentace nevýznamná. Větší vliv na případnou sortimentaci budou mít spíše bajonety vzniklé dalším růstem po vrcholovém zlomu (výskyt u třech vzorníků). Výskyt bajonetů byl ve studovaném porostu poměrně častý (vizuální hodnocení v terénu). Konôpka (1977) hodnotí sbíhavost kmene z pohledu stability stromů. Zaměřuje se však pouze na podíl výčetní tloušťky kmene a tloušťky kmene ve výšce 0,2 m od paty kmene. Tento parametr se podle Konôpky (1977) s narůstající tloušťkou stromu jen mírně zvyšuje, avšak stromy s vyšší hodnotou výše uvedeného podílu jsou více náchylné ke zlomům a vývrátům. Z průběhu sbíhavosti kmenů vzorníkových stromů v půlmetrových segmentech ve studovaném dospělém smrkovém porostu vyplynulo, že sbíhavost kmene ve výšce 0,2 m nad patou kmene byla díky kořenovým náběhům velmi vysoká. Použití tohoto parametru jako indikátoru stability stromu je tedy velmi silně ovlivněno přesností určení výšky 0,2 m od paty kmene, což může vnášet do výsledků poměrně velkou chybu.

Odhad objemu kmene ze základních měřených parametrů je důležitý nejen při ekonomickém hodnocení dřevní suroviny v lesních porostech, ale také při hodnocení zásob biomasy nebo uhlíku (Zianis a kol. 2005, Snorrason a Einarsson 2006). Nejčastějšími nezávisle proměnnými vstupními parametry zobecněných rovnic pro odhad objemu kmene je kombinace výčetní tloušťky a výšky stromu (Wirth a kol. 2004, Zianis a kol. 2005). Výšku stromu lze v této kombinaci považovat za faktor, který zohledňuje bonitu, tedy informaci o rozdílnosti mezi jednotlivými stanovišti. Vzhledem k tomu, že v předložené práci je hodnocen jen jeden lesní porost, a tudíž stanoviště s prostorově prakticky neměnnou bonitou, použití pouze výčetní tloušťky stromů pro odhad objemu kmene poskytlo velmi přesné odhady ($R^2=0,994$), ale stanovené rovnice jsou lokální. Stanovení objemu kmene z výčetní tloušťky stromu bez zohlednění výšky stromu je méně časté. Například Zianis a kol. (2005) uvádí pro smrk ztepilý 4 rovnice založené pouze na dosazení výčetní tloušťky stromu a ostatních 38 rovnic vyžaduje dosazení kombinace výčetní tloušťky stromu a jeho výšky.

6.2 ASIMILAČNÍ APARÁT DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU

Roční dynamiku sekvestrace uhlíku do nadzemní biomasy lze sledovat na základě pravidelného měření indexu listové plochy lesního porostu a sledování tloušťkového přírůstu kmenů v lesním porostu. Dynamika vývoje indexu listové plochy koresponduje s ontogenetickým vývojem korun stromů – rašení, nárůst nového listoví a větví, opad listoví (Vose a kol. 1994). Studie potvrdily pozitivní vliv redukce počtu stromů na nárůst efektivní listové plochy, což stimuluje tvorbu nové biomasy (Harrington a Reukema 1983, Wang 1988, Pokorný a kol. 2008). Změnou struktury porostu předmytní těžbou došlo ve studovaném dospělém smrkovém porostu ke zvýšení tloušťkového přírůstu ponechaných stromů všech sociálních tříd, což je v souladu s literárními údaji. Například Pretzsch (2009) uvádí, že tloušťkový přírůst kmene je ovlivněn zejména věkem a sociálním postavením stromu, výchovou a strukturou lesního porostu a klimatickými podmínkami. Tato skutečnost byla potvrzena i ve studovaném porostu, což dokládají meziroční změny v dynamice přírůstu sledovaných stromů.

6.3 NADZEMNÍ A PODZEMNÍ BIOMASA DOSPĚLÉHO SMRKOVÉHO POROSTU

6.3.1 Alometrické vztahy odvozené ze vzorníkových stromů z dospělého smrkového porostu

V předložené práci byla posouzena závislost biomasy jehlic, větví, borky kmene, mrtvých větví, dřeva kmene bez borky a celkové nadzemní biomasy dospělého smrkového porostu na snadno měřitelných parametrech. Těmito vybranými, nezávisle proměnnými, parametry byly výčetní tloušťka stromu, výčetní kruhová základna stromu, výška stromu, výška nasazení živé koruny u stromu, délka živé koruny stromu a šířka posledních pěti letokruhů na kmeni stromu. Dále byl posouzen vztah zjištěné biomasy jednotlivých frakcí vzorníkových stromů ke zvoleným kompetičním vztahům. Vzhledem k nižšímu počtu vzorníkových stromů byly vhodné alometrické rovnice parametrizovány po dosažení pouze jednoho parametru.

Biomasa jehlic

Výčetní tloušťka stromu byla v případě odhadu biomasy jehlic ve studovaném dospělém smrkovém porostu středně dobrým parametrem ($R^2 = 0,75$). Řada studií však uvádí, že tento parametr je vhodným parametrem pro odhad biomasy jehlic - Wirth a kol. (2004) uvádí alometrickou závislost biomasy jehlic na výčetní tloušťce stromu odvozenou z rozboru 551 stromů, která dosahuje $R^2 = 0,85$; Marklund (1987) odvodil ze švédské databáze rozboru 544 stromů alometrickou rovnici pro odhad biomasy jehlic z výčetní tloušťky stromu s koeficientem mnohonásobné korelace $R = 0,90$; Černý (1990) uvádí alometrickou rovnici stanovenou rozbohem 25 stromů s korelací $R^2 = 0,97$ a Marková a Pokorný (2011) stanovili pro mladý smrkový porost na stejné lokalitě, na které se nachází studovaný dospělý smrkový porost, alometrickou závislost biomasy jehlic na výčetní tloušťce stromu odvozenou z rozboru 21 stromů s $R^2 = 0,94$. Z dalších autorů zjistil poměrně vysokou závislost biomasy jehlic na výčetní tloušťce stromu Mund a kol. (2002) - pro 43letý porost s $R^2 = 0,87$, pro dospělé smrkové porosty (72 - 142 let) $R^2 = 0,90$ a pro 16letý porost s $R^2 = 0,96$. Biomasa smrku zteplého pro region New York se zabývali Jokela a kol. (1986) - pro 30 vzorníkových stromů vypočítali korelaci biomasy jehlic na výčetní tloušťce stromu $R^2 = 0,91$ pro tradiční mocninný tvar

rovnice. Johansson (1999) provedl rozbor 32 stromů rostoucích na opuštěných zemědělských půdách ve Švédsku. Nejvyšší korelaci ($R^2 = 0,96$) zjistil u exponenciálního tvar funkce výčetní tloušťky stromu se třemi koeficienty. Testoval také mocninný a polynomický tvar rovnice, ale v těchto případech byla výsledná korelace pouze $R^2 = 0,66 - 0,68$. Výčetní kruhovou základnu stromu pro odvození biomasy jehlic používá například Grote (2002). U lineárního proložení dat zjistil hodnotu koeficientu determinace $R^2 = 0,77$, u exponenciálního tvaru rovnice pak $R^2 = 0,84$. Lehtonen (2005) bohužel neuvádí koeficienty determinace, nicméně i jeho více parametrické rovnice vychází ze znalosti výčetní tloušťky stromu. Briggs a Cunia (1982) uvádí pro biomasu jehlic sloučenou s biomasou větví do průměru 1 cm alometrickou rovnici také založenou na výčetní tloušťce stromu (bez uvedení koeficientu determinace) a uvádí i rozšíření rovnice o parametr tloušťka stromu krát výška. Podle modelu Černého (1990) přidáním parametru délka živé koruny k parametru výčetní tloušťka stromu stoupla korelace alometrické rovnice téměř na $R^2 = 0,98$, ale přidáním parametru výška stromu se výsledná korelace biomasy jehlic snížila na $R^2 = 0,96$. Za pozornost stojí model, vycházející z mocninného tvaru, založený pouze na ploše běle ve výčetní výšce stromu, který vykázal pro 17 stromů korelaci ještě nepatrně vyšší. Nicméně použitelnost tohoto modelu je zatížena destruktivním zásahem do stromu (dřevní vývrty) nebo úplným pokácením stromu (kmenové kotouče). Jak ovšem dokazuje Světlík a kol. (2013) nebo Børja a kol. (2016), variabilita tloušťky bělového dřeva smrku může být značná a navíc samotné určení hloubky běle může být rozdílné podle vybraných hraničních kritérií, jako je hloubkový dosah radiálního mízního toku nebo obsah vody ve dřevě (Čermák a Nadezhdina 1998). Model Hochbichlera a kol. (2006), který využívá pouze výčetní tloušťku stromu, je nepatrně lepší než model doplněný o výšku stromu. Jak model využívající pouze výčetní tloušťku stromu, tak model využívající výčetní tloušťku a výšku stromu dosáhly pro 89 stromů korelace téměř $R^2 = 0,84$.

Vzhledem k tomu, že jsou koruny stromu výrazně ovlivňovány sousedními stromy, měla by alometrická rovnice pro odhad biomasy jehlic zahrnovat vedle pouhé výčetní tloušťky stromu parametr zohledňující kompetici stromů, případně parametr více související s vlastní korunou stromu (jehlicemi). Tímto parametrem může být například šířka posledních pěti letokruhů kmene stromu (parametr charakterizující primární produkci a růstové podmínky v určitých obdobích) nebo délka koruny

stromu (parametr charakterizující velikost nosného aparátu pro jehlice). Toto tvrzení podporuje například Wirth a kol. (2004), jehož nejpřesnější rovnice pro odhad biomasy jehlic z prezentovaného seznamu modelů zahrnují právě parametr délka koruny stromu. Marklund (1987) uvádí nejpřesnější rovnici zahrnující vedle výčetní tloušťky stromu také délku a maximální poloměr živé koruny stromu a šířku posledních pěti letokruhů kmene stromu.

Biomasa živých větví

Biomasa živých větví vykazovala ve studovaném dospělém smrkovém porostu mocninnou závislost na výčetní tloušťce stromu (koeficient determinace $R^2 = 0,93$). Marklund (1987) uvádí hodnotu koeficientu mnohonásobné korelace $R = 0,93$ a vyšší pro závislost biomasy živých větví na výčetní tloušťce stromu; Wirth a kol. (2004) uvádí v zobecněných alometrických rovnicích $R^2 = 0,87$; Marková a Pokorný (2011) $R^2 = 0,91$. Stejně jako v případě biomasy jehlic, přidáním parametru živá délka koruny stromu do alometrických rovnic může být konečný odhad biomasy živých větví zpřesněn. Rovnice doplněná podle Wirtha a kol. (2004) o výšku stromu a délku živé koruny dosahuje $R^2 = 0,95$ a podle Marklunda (1987) rovnice doplněná o výšku stromu, délku živé koruny stromu a horní výšku lesního porostu může dosáhnout dokonce $R^2 = 0,96$. Briggs a Cunia (1982) parametrizovali modely pro odhad biomasy větví buď pouze z výčetní tloušťky stromu, nebo doplněné o parametr tloušťka stromu krát jeho výška. Dosaženou korelaci ovšem neuvádí. Černý (1990) publikoval čtyři rovnice pro odhad biomasy živých větví. Rovnice s nejvyšší korelací zahrnovala výčetní tloušťku stromu a délku živé koruny ($R^2 = 0,97$), následuje rovnice zahrnující pouze plochu běle ve výčetní výšce stromu ($R^2 = 0,96$)

a nejnižší korelaci, stejně jako v případě biomasy jehlic, vykazovala rovnice zahrnující výčetní tloušťku a výšku stromu. Hochbichler a kol. (2006) uvádí nižší korelaci biomasy větví na výčetní tloušťce stromu ($R^2 = 0,94$) a nižší hodnotu korelace při doplnění parametru výška stromu do rovnice ($R^2 = 0,93$); Johansson (1999) a Mund a kol. (2002) zjistili vysokou závislost biomasy větví na výčetní tloušťce stromu ($R^2 = 0,96$); Jokela a kol. (1986) uvádí pro frakci větve (bez upřesnění, zda se jedná o živé i mrtvé) mocninnou závislost biomasy větví na výčetní tloušťce stromu ($R^2 = 0,90$). Alometrickou závislost biomasy neolistěných větví na výčetní kruhové

základně stromu uvádí například Grote (2002) - u lineárního proložení dat zjistil hodnotu koeficientu determinace $R^2 = 0,80$, u exponenciálního tvaru rovnice $R^2 = 0,90$.

Biomasa mrtvých větví

Závislost biomasy mrtvých větví byla ve studovaném dospělém smrkovém porostu (stejně jako v případě biomasy jehlic) nejnížší v případě dosazením parametru výčetní tloušťka kmene do alometrické rovnice ($R^2 = 0,75$). Tato frakce obecně vykazuje největší variabilitu mezi sledovanými frakcemi biomasy stromu (Marklund 1987, Wirth a kol. 2004). Při použití samotné výčetní tloušťky stromu zjistil Marklund (1987) mnohonásobnou korelaci $R = 0,85$; přidáním dalších parametrů (výška stromu, délka živé koruny stromu a tloušťka největšího stromu na ploše ve výčetní výšce) dosáhl pouze nepatrného zpřesnění odhadu ($R = 0,87$). Wirth a kol. (2004) uvádí pro model zohledňující pouze výčetní tloušťku stromu korelaci $R^2 = 0,79$, přičemž ostatní modely vyžadující dosazení výšky stromu, věku stromu a bonity porostu vykazaly jen mírné zpřesnění ($R^2 = 0,81$). Také Černý (1990) uvádí nejnížší korelaci biomasy mrtvých větví na vybraných parametrech stromu. Závislost biomasy mrtvých větví na výčetní tloušťce stromu zjistil $R^2 = 0,66$, doplněním rovnice o parametr výška stromu se výsledný koeficient determinace snížil na $R^2 = 0,64$.

Biomasa borky kmene

Biomasa borky kmene vykazala ve studovaném dospělém smrkovém porostu velmi vysokou korelaci s výčetní tloušťkou stromu ($R^2 = 0,99$). Také Marklund (1987) uvádí vysoký koeficient mnohonásobné korelace ($R = 0,97$) při použití pouze výčetní tloušťky stromu jako nezávisle proměnné. Při rozšíření vstupních dat o výšku stromu a horní výšku porostu došlo pouze o nepatrné navýšení výsledné korelace ($R^2 = 0,974$). Také Černý (1990) uvádí vysokou závislost biomasy borky kmene na výčetní tloušťce stromu ($R^2 = 0,96$), v případě doplnění modelu o výšku stromu $R^2 = 0,97$. Ve srovnání s ostatními autory uvádí Jokela a kol. (1986) nižší korelaci biomasy borky kmene na výčetní tloušťce stromu ($R^2 = 0,91$). Většina autorů ovšem sdružuje biomasu borky kmene s biomasou dřeva kmene do jedné frakce, proto je rovnic pro odhad samotné biomasy borky poměrně málo.

Biomasa kmene bez borky

Biomasa kmene bez borky byla ve studovaném dospělém smrkovém porostu vysoce závislá na výčetní tloušťce stromu ($R^2 = 0,99$). Marklund (1987) uvádí mnohonásobnou korelaci $R = 0,99$ při dosazení pouze výčetní tloušťky stromu, takže doplnění dalších vstupních parametrů do rovnice zvýší korelaci už jen nepatrně. Řada autorů neodlišuje v alometrických rovnicích kmen s borkou a kmen bez borky, ale uvádí rovnice pro celý kmen stromu. Například Wirth a kol. (2004) uvádí vysokou korelaci celkové biomasy kmene na výčetní tloušťce stromu ($R^2 = 0,986$), a v případě doplnění modelu o výšku stromu a věk stromu uvádí koeficient determinace $R^2 = 0,995$; Marková a Pokorný (2011) uvádí pro 35letý smrkový porost na stejné lokalitě jako je studovaný dospělý smrkový porost vysokou korelaci biomasy kmene na výčetní tloušťce stromu $R^2 = 0,97$ při užití mocninného tvaru rovnice; Briggs a Cunia (1982) uvádí dvě rovnice vyžadující pouze dosazení parametru výčetní tloušťka kmene a dvě rovnice doplněné o parametr výška stromu (korelace není bohužel uvedena). Také Černý (1990) prezentuje rovnici pro odhad biomasy dřeva kmene založenou na parametru výčetní tloušťka stromu, která dosáhla pro 18 stromů korelaci $R^2 = 0,98$, a doplněním rovnice o parametr výška stromu se korelace zvýšila na $R^2 = 0,99$, a Johansson (1999) uvádí rovnici s korelací exponenciální rovnice $R^2 = 0,97$. Mund a kol. (2002) neuvádí konkrétní rovnice pro odhad biomasy kmene, nicméně koeficienty determinace přesáhly pro porosty všech věků (16 – 142 let) hodnotu $R^2 = 0,99$ jak pro hustotu dřeva odebraných disků, tak i pro objem kmene s borkou. I v tomto případě lze tedy předpokládat vysokou závislost biomasy kmene na výčetní tloušťce stromu. Nejnižší závislost biomasy dřeva kmene na výčetní tloušťce stromu ($R^2 = 0,92$) uvádí Jokela a kol. (1986).

Nadzemní biomasa

Alometrické rovnice stanovené pro celkovou nadzemní biomasu studovaného dospělého smrkového porostu vykazaly velice těsnou exponenciální závislost na výčetní tloušťce stromu ($R^2 = 0,99$). Marková a Pokorný (2011) uvádí pro 35letý smrkový porost na stejné lokalitě mocninnou závislost nadzemní biomasy na výčetní tloušťce stromu ($R^2 = 0,98$). Také Briggs a Cunia (1982) uvádí rovnice pro odhad celkové nadzemní biomasy založené na parametru výčetní tloušťka stromu, případně

doplněné o výšku stromu (bez uvedení dosažené korelace); Černý (1990) uvádí mocninné rovnice využívající jednak samotnou výčetní tloušťku stromu, jednak kombinaci výčetní tloušťky a výšky stromu (korelace v rozmezí $R^2 = 0,98 - 0,99$ s nepatrně vyšším koeficientem determinace pro funkci výčetní tloušťky stromu a jeho výšky); Johansson (1999) a Jokela a kol. (1986) uvádí vysokou korelaci ($R^2 = 0,98$, respektive $R^2 = 0,96$) celkové nadzemní biomasy na výčetní tloušťce stromu.

Výčetní tloušťka stromu je nejčastější a nejsnáze měřitelný parametr stromu. Zároveň se od její hodnoty dobře odhaduje většina zkoumaných parametrů stromu. Výčetní tloušťka stromu proto v naprosté většině alometrických rovnic figuruje jako jediný, případně jako jeden z více vstupních údajů pro odhad různých frakcí biomasy stromu (Chenghui a kol. 1999, Marklund 1987 a 1988, Marková a Pokorný 2011, Wirth a kol. 2004, Neumann a Jandl 2005, Zianis a kol. 2005). Na základě výsledků získaných ze studovaného dospělého smrkového porostu i ze závěrů ostatních autorů lze konstatovat, že výčetní tloušťka stromu může sloužit jako vhodný parametr vstupující do alometrických rovnic pro odhad všech sledovaných frakcí biomasy nejen na ekosystémové stanici Rájec. Doplnění alometrických rovnic o další parametry stromu už ve většině případů nepřináší tak výrazné zpřesnění odhadu.

6.3.2 Kompetice vzorníkových stromů z dospělého smrkového porostu

V literatuře se jen sporadicky objevují alometrické rovnice pro odhad biomasy, které zohledňují sociální postavení stromu v porostu nebo index vyjadřující sílu kompetice okolních stromů na hodnocený strom. Důvodem může být složitější postup pro výpočet kompetičního indexu, který jako parametr vstupuje do alometrické rovnice, nebo časová a přístrojová náročnost při sběru dat pro výpočet kompetičního indexu. Například podle Wirtha a kol. (2004) je délka živé koruny dostatečnou proměnnou vyjadřující kompetici působící na strom. Wirth a kol. (2004) dále uvádí závislost frakce biomasy s ohledem na rozdělení stromů do čtyř skupin podle jejich sociálního postavení (koeficienty rovnic nejsou uvedeny). Jak vyplývá ze zjištěných výsledků této práce, i samotný parametr kompetice může sloužit jako vhodná nezávisle proměnná pro odhad frakcí biomasy.

Prostý součet všech sil kompeticí okolních stromů v definovaném radiusu okolo vzorníkového stromu ($\sum NK_{ji}$), poměr síly kompetice vzorníkového stromu k síle kompetice sousedních stromů ($\sum NK_i/\sum NK_{ji}$) i disponibilní plocha stromu vykazovaly ve studovaném dospělém smrkovém porostu poměrně vysokou korelaci s biomasou jednotlivých frakcí vzorníkových stromů. Tato vysoká zjištěná korelace byla dána především teoretickým faktem, že pokud je k dispozici plošně neomezený lesní porost a hodnota x (v předložené práci zvolená hodnota 1; 1,5 nebo 2) dosazená do rovnice 5 (definovaný radius a_i = výčetní kruhová základna stromu BA_i /parametr x ; Kap. 4.2.4) se blíží nule, pak korelace $\sum NK_{ji}$ i $\sum NK_i/\sum NK_{ji}$ s výčetní tloušťkou stromu se blíží hodnotě $R = 1$. Vysoká zjištěná korelace zvolených parametrů kompetice s biomasou dospělého smrkového porostu tedy vyplývala z dobré korelace biomasy s výčetní tloušťkou stromu. Avšak se zvyšováním dosazené zvolené hodnoty x v rovnici 5 se projevily menší či větší odchylky mezi jednotlivými studovanými vzorníkovými stromy. Tyto odchylky mohou umožnit lepší proložení regresní přímky než jen při použití samotné výčetní tloušťky stromu.

Korelace biomasy jehlic studovaných vzorníkových stromů dosahovala nejvyšších hodnot při použití parametru $\sum NK_i/\sum NK_{ji}$ v případě dosazení $x = 2$ do rovnice 5 ($R^2 = 0,96$), takže se jednalo o hodnoty kompetice vyjadřující spíše vliv velmi blízkých sousedních stromů. Také korelace biomasy jehlic s disponibilní plochou stromu dosáhla vysoké hodnoty ($R^2 = 0,83$), zatímco parametr $\sum NK_{ji}$ měl nejvyšší stanovenou korelaci s biomasou jehlic pouze $R^2 = 0,65$.

Korelace biomasy živých větví studovaných vzorníkových stromů dosahovala obdobných hodnot jak při použití parametru $\sum NK_{ji}$ ($R^2 = 0,89$), tak při použití parametru $\sum NK_i/\sum NK_{ji}$ ($R^2 = 0,90$). Při dosazení parametru disponibilní plocha stromu byla korelace $R^2 = 0,74$. Obecně bylo zjištěno, že u studovaných vzorníkových stromů korelace mírně klesala se zvyšováním hodnoty x v rovnici 5, což může znamenat, že biomasa živých větví stromu závisí na struktuře porostu na větší ploše v okruhu desítek metrů, než jen na vlivu nejbližších sousedních stromů.

V případě biomasy mrtvých větví studovaných vzorníkových stromů bylo zřejmé, že kompetice, bez ohledu na její korelaci s výčetní tloušťkou stromu, skutečně ovlivnila biomasu mrtvých větví na studovaných stromech. Prostý součet všech sil

kompeticí okolních stromů v definovaném radiusu okolo vzorníkového stromu ($\sum NK_{ji}$), zaujímá prvních dvanáct nejlepších proměnných pro odhad biomasy. Až za všemi zvolenými kombinacemi $\sum NK_{ji}$ byla nejvhodnějším parametrem výčetní kruhová základna se skokově vyšší střední kvadratickou chybou predikce (MEP).

Biomasa borky kmene studovaných vzorníkových stromů dosahovala v 15 případech z 25 různých kompetičních ukazatelů ($\sum NK_{ji}$, $\sum NK_i/\sum NK_{ji}$ a disponibilní plocha stromu) korelace větší než $R^2 = 0,90$ a v 5 případech dokonce $R^2 = 0,99$. Na základě zjištěných výsledků lze konstatovat, že se zvyšováním hodnoty x v rovnici 5 (bez výjimky) klesala u studovaných vzorníkových stromů hodnota koeficientu determinace a biomasa borky kmene závisela spíše na výčetní tloušťce stromu než na vlastní kompetici mezi sousedními stromy.

Obdobné závěry, jako v případě biomasy borky kmene studovaných vzorníkových stromů, byly zjištěny také pro biomasu kmene bez borky. Velmi dobrá korelace biomasy kmene bez borky s parametry kompetice ($\sum NK_{ji}$, $\sum NK_i/\sum NK_{ji}$ a disponibilní plocha stromu) je dána spíše její velmi dobrou korelací s parametrem výčetní tloušťka stromu, který byl třetím nejvhodnějším parametrem. Mezi prvními devíti nejvhodnějšími parametry pro odhad biomasy kmene bez borky bylo osm parametrů $\sum NK_{ji}$ zohledňujících větší okolí stromu než pouze nejbližší sousedy (hodnoty $x = 1$ a $1,5$ v rovnici 5).

Pouze u biomasy živých větví a nadzemní biomasy studovaných vzorníkových stromů se mezi prvními dvěma nejlepšími parametry pro jejich odhad neobjevil žádný ukazatel kompetice. Nicméně podle výše střední kvadratické chyby odhadu byly spolu s výčetní kruhovou základnou stromu a výčetní tloušťkou stromu obdobně vhodné ještě parametry $\sum NK_{ji}$ s hodnotami $x = 1$ a $1,5$ dosazenými do rovnice 5 (tedy parametry s vysokou korelací s výčetní tloušťkou stromu).

6.3.3 Výběr známých alometrických rovnic pro nadzemní a podzemní biomasu dospělého smrkového porostu

Počet vzorníkových stromů ze studovaného dospělého smrkového porostu využitých v předložené práci neumožnil porostně specifickou parametrizaci alometrických rovnic pro odhad jednotlivých frakcí nadzemní biomasy s více nezávisle proměnnými

(například odhad biomasy jehličí jako funkci výčetní tloušťky stromu a délky živé koruny).

U vzorníkových stromů nebyla zjišťována podzemní biomasa. Pro odhad podzemní biomasy studovaného dospělého smrkového porostu byla použita databáze rozborů smrků z velmi blízkého okolí studovaného porostu (Vyskot 1981). Nicméně z dostupných dat bylo možné posoudit vhodnost již publikovaných modelů podle výše hodnoty NSE (Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient; Nash a Sutcliffe 1970).

Nadzemní biomasa

Pro jednotlivé frakce nadzemní biomasy studovaného dospělého smrkového porostu bylo možné určit vhodné, a použitelné, již známé alometrické rovnice. Nejvyšší hodnoty NSE (Nash a Sutcliffe 1970) se pohybovaly od 0,62 pro biomasu mrtvých větví do 0,98 pro biomasu kmene bez borky. Hodnoty NSE vyšší než nula znamenají, že pro odhad biomasy je vhodnější příslušný model než použití prostého známého průměru hodnot. Pokud je hodnota NSE záporná, je pro odhad biomasy vhodnější použití konstanty, kterou je zjištěný průměr hodnot, než příslušný model, neboť ten je již značně vychýlený od naměřených dat.

Známa rovnice pro odhad biomasy jehlic podle Wirtha a kol. (2004) dosáhla hodnoty $NSE = 0,85$. Tento model však vyžaduje jako vstupní parametry výčetní tloušťku stromu, výšku stromu, věk porostu a délku živé koruny stromu, což jsou parametry, které se všechny najednou měří zřídka a v lesnické praxi prakticky nikdy. Tato rovnice je tedy nejpřesnější, ale musí být podpořena intenzivním vědeckým monitoringem. Ve studovaném dospělém smrkovém porostu byly všechny tyto vstupní parametry stanoveny, takže rovnici bylo možné použít.

Poměrně překvapující bylo, že rovnice pro odhad biomasy větví podle Hochbichlera a kol. (2006) stanovená rozbořem vzorníkových stromů z jihovýchodního Rakouska, vyžadující pouze dosažení výčetní tloušťky stromu a výšky stromu dosáhla vyšších hodnot NSE (0,92) než rovnice stanovená Wirthem a kol. (2004) pro střední Evropu (obsahující i meta-data z České republiky), jejíž NSE bylo výrazně nižší (0,83).

Odhad biomasy mrtvých větví (pro hodnotu NSE menší než nula) byl podle hodnocených alometrických rovnic většinou nižší než byl odhad provedený ve studovaném dospělém smrkovém porostu podle stanovené alometrické rovnice. Pouze modely podle Marklunda (1988), Černého (1990) a Wirtha a kol. (2004) uspokojivě prokládaly shluk naměřených dat bez viditelného podhodnocení odhadu. Vzhledem k tomu, že podíl biomasy mrtvých větví byl v celkové nadzemní biomase studovaného porostu pouze 0,5 %, lze považovat hodnotu $NSE = 0,62$ jako dobrou shodu s modelem podle Wirtha a kol. (2004) bez výraznějšího zkreslení odhadu celkové biomasy porostu.

V případě alometrických rovnic pro odhad biomasy borky kmene popisuje naměřené hodnoty nejlépe ($NSE = 0,880$) nejjednodušší rovnice podle Ilga (2002) vycházející pouze ze znalosti výčetní tloušťky stromu. Jen nepatrně nižší hodnotu NSE (0,876) má velmi komplikovaná, a sotva běžně použitelná, rovnice podle Marklunda (1987). Ten parametrizoval rovnici pro stromy, u kterých je známá výčetní tloušťka stromu, výčetní tloušťka největšího stromu na studované ploše, výška stromu, počet letokruhů ve výčetní výšce stromu, tloušťka borky kmene ve výčetní výšce stromu, horní výška porostu a specifický korekční faktor.

Bylo nalezeno pouze šest vědeckých prací parametrizujících alometrické rovnice pro odhad biomasy kmene smrků bez borky. Z toho pět dosáhlo hodnoty NSE větší než 0,8. Nejlepší rovnice podle Ilga (2002) vycházející, stejně jako v případě biomasy borky kmene, pouze z dosazení výčetní tloušťky stromu měla vůbec nejvyšší hodnotu NSE (0,98) ze všech posuzovaných alometrických rovnic pro všechny frakce nadzemní biomasy. Je tedy možné usuzovat, že vzorníkové stromy použité pro tvorbu alometrických rovnic ve studii Ilga (2002) byly tvarově i tloušťkově velmi podobné se stromy ze studovaného dospělého smrkového porostu. Wirth a kol. (2004), kteří uvádí nejvhodnější rovnice pro stanovení biomasy jehlic, mrtvých větví a kmene s borkou, rovnici pro stanovení biomasy kmene bez borky neuvádí.

Pro frakci biomasy kmene s borkou se ukázaly jako nejvhodnější dvě rovnice - podle Marklunda (1987) a podle Wirtha a kol. (2004). V obou případech bylo dosaženo velmi podobných hodnot NSE a obě rovnice vyžadují jako vstupní parametr mimo jiné výčetní tloušťku stromu a výšku stromu. Do rovnice Marklunda (1987), která je

nejvhodnější pro odhad biomasy kmene s borkou ve studovaném porostu, je však nutné dosadit do rovnice také počet letokruhů ve výčetní výšce stromu, což je, v lesnické praxi i ve výzkumu, málo sledovaný parametr. Proto je v předložené práci uvedena také rovnice podle Wirtha a kol. (2004), která jako parametr zohledňující věk stromu používá skutečný věk stromu. Tento parametr je pro stejnověké porosty snadno dostupný v lesním hospodářském plánu.

Biomasu korun (jehlice plus živé větve) studovaného dospělého smrkového porostu nejlépe vystihla mocninná rovnice podle Schwarzmeiera (2000) vycházející pouze z dosazení výčetní tloušťky stromu. Další rovnicí podle hodnoty NSE byla rovnice podle Marklunda (1988), do které však jako další parametr vstupuje parametr výška stromu. Schwarzmeierova (2000) mocninná rovnice obsahuje dvě konstanty, zatímco Marklundova (1988) složitější rovnice zahrnuje čtyři konstanty. V případě biomasy celé koruny bylo provedeno také srovnání modelových hodnot podle Schwarzmeiera (2000) se součtem modelových hodnot biomasy jehlic podle Wirtha a kol. (2004) a modelových hodnot biomasy větví podle Hochbichlera a kol. (2006). Toto srovnání ukázalo 47% nadhodnocení biomasy koruny pro nejslabší tloušťkové třídy a 19% podhodnocení biomasy koruny pro nejsilnější tloušťkové třídy při použití součtu modelové biomasy jehlic a větví proti modelu pro celkovou biomasu koruny. Obdobné závěry uvádí také Cunia a Briggs (1984), Parresol (1999) a Picard a kol. (2012), kteří uvádí, že prostý součet modelových hodnot biomasy různých frakcí (např. jehlic a větví) se nemusí rovnat modelové hodnotě sdružující biomasu více frakcí. To může být způsobeno například tím, že každý model má jinou korelaci se vstupními daty, nebo tím, že ne všechny typy modelů jsou „stabilní“, jak uvádí Picard a kol. (2012). Například součet více mocninných funkcí už není mocninná funkce. V případě studovaného dospělého smrkového porostu je zřejmé, že poměrně složité modely využívající logaritmické transformace (Wirth a kol. 2004, Hochbichler a kol. 2006) nemohou vést ke shodným výsledkům při použití nejjednoduššího mocninného modelu (Schwarzmeier 2000). Všeobecně je ale uznáváno, že konečný sdružující model poskytuje lepší odhad biomasy než součet hodnot z více modelů (Picard a kol. 2012).

Celková nadzemní biomasa vzorníkových stromů ze studovaného dospělého smrkového porostu byla nejpřesněji stanovena podle modelu Černého (1990), do kterého vstupuje jako parametr výčetní tloušťka stromu a výška stromu. Stejně jako v případě stanovení celkové biomasy koruny, bylo i v případě stanovení celkové nadzemní biomasy bylo provedeno srovnání modelu podle Černého (1990) s modelovými součty dílčích frakcí biomasy. Celkovou nadzemní biomasu tak bylo možné stanovit, kromě využití modelu Černého (1990), ještě dalšími čtyřmi postupy. Největší nadhodnocení (26 %) bylo zjištěno u součtu jednotlivých frakcí biomasy u největší tloušťkové třídy pro biomasu koruny stromu podle Schwarzmeiera (2000), pro biomasu kmene stromu bez borky a biomasu borky kmene podle Ilga (2002) a biomasu mrtvých větví podle Wirtha a kol. (2004). Naopak největší podhodnocení (10 %) bylo zjištěno u nejslabších stromů pro součet biomasy jehlic a mrtvých větví podle Wirtha a kol. (2004), pro biomasu živých větví podle Hochbichlera a kol. (2006) a pro biomasu kmene s borkou podle Marklunda (1987). Součet modelových frakcí biomasy byl ve studovaném dospělém smrkovém porostu vždy vyšší (o 6 až 13 %) než celkový odhad nadzemní biomasy při použití modelu Černého (1990).

Podzemní biomasa

Vhodnost alometrické rovnice pro stanovení podzemní biomasy ve studovaném dospělém smrkovém porostu byla určována shodnou metodou jako u jednotlivých frakcí nadzemní biomasy, tedy posouzením hodnoty NSE. Skutečné hodnoty byly převzaty z literatury (Vyskot 1981) a modelové hodnoty byly vypočítány podle příslušných publikovaných rovnic. Je třeba poukázat na fakt, že tři autoři ze sedmi parametrizovali rovnice s prakticky totožným $NSE - NSE = 0,8298$ (Wirth a kol. 2004), $NSE = 0,8292$ (Mund a kol. 2002) a $NSE = 0,8280$ (Marklund 1988).

Marklund (1988) neuvádí jednotnou rovnici pro odhad podzemní biomasy jako celku, ale rozděluje ji na 2 frakce. Nicméně i přes předpokládané odchylky způsobené součtem modelů (popsáno výše) byl konečný odhad podzemní biomasy podle Vyskota (1981) velmi přesný. V případě stanovení podzemní biomasy studovaného dospělého smrkového porostu je třeba zdůraznit, že se jedná o hodnoty převzaté z literatury (Vyskot 1981) a nikoliv rovnice sestavené ze vzorníkových

stromů, které byly analyzovány po úmyslné těžbě v zimě 2010/2011. Modely pro stanovení podzemní biomasy studovaného dospělého smrkového porostu jsou vhodné tedy pouze tehdy, pokud je akceptován předpoklad, že alometrické rovnice odhadu biomasy kořenů vyhovující předmýtním porostům (Vyskot 1981) jsou vhodné i pro současný věk a dimenze studovaného dospělého smrkového porostu.

6.3.4 Expanzní a konverzní faktory pro odhad biomasy dospělého smrkového porostu

Expanzní faktory biomasy mají větší potenciální využití zejména pro odhad biomasy stromů ve stejnověkových porostech na rozsáhlých územích. Hodnoty expanzních faktorů biomasy jsou pro určitý lesní porost známe, takže biomasu lze jednoduše stanovit pouze na základě znalosti objemu (případně hmotnosti) kmene, někdy i věku porostu. Využitím evidence porostních zásob v lesních hospodářských plánech je tedy možné odhadovat biomasu v lesním porostu (většinou nadzemní biomasu). Nenahraditelnou roli mají expanzní faktory biomasy při vyhodnocování dat národních inventarizací lesů (IPCC 2003, Lehtonen a kol. 2004, Lehtonen a kol. 2007, Marek a kol. 2011, Petersson a kol. 2012). Předložená práce potvrzuje vhodnost použití expanzních faktorů pro odhad nadzemní biomasy studovaného dospělého smrkového porostu. Expanzní faktor stanovený pro biomasu studovaných vzorníkových stromů byl pro nadzemní biomasu 1,3, což je v souladu s literárními údaji (IPCC 2003, Marek a kol. 2011, Čihák a kol. 2012).

Ve studovaném dospělém smrkovém porostu nebyl proveden rozbor kořenů u vzorníkových stromů, ale expanzní faktory biomasy kořenů byly stanoveny z alometrických rovnic podle Wirtha a kol. (2004). Zjištěný koeficient pro podzemní biomasu (1,2) byl shodný s hodnotou, kterou uvádí Marek a kol. (2011). Vzhledem k vysoké korelaci nadzemní biomasy studovaných vzorníkových stromů s nejlepšími modelovými hodnotami a shodě expanzního faktoru pro nadzemní biomasu (Marek a kol. 2011) lze předpokládat, že odhad biomasy kořenů uvedený v předložené práci je reálný. Odhad celkové nadzemní i podzemní biomasy studovaného dospělého smrkového porostu byl při použití expanzních faktorů pouze o 5 % vyšší než odhad zjištěný součtem nejlepších alometrických rovnic pro jednotlivé frakce biomasy a o 12 % vyšší než nejlepší alometrické rovnice pro nadzemní a podzemní biomasu.

7. ZÁVĚR

Při odhadování zásoby biomasy porostu, případně jejích jednotlivých frakcí, je nutné vybrat snadno měřitelné a vyhovující parametry, které ovlivňují strukturu biomasy lesního porostu. Je tak možné zamezit zbytečnému a časově náročnému sběru dat v lesním porostu, která vstupují do výpočtu zásoby biomasy. Současně se vhodným výběrem stanoví všechny parametry, které jsou nutné pro co nejpřesnější odhad zásoby biomasy lesního porostu.

V předložené práci je popsána struktura dospělého smrkového porostu na ekosystémové stanici Rájec (Drahanská vrchovina). Dále jsou uvedeny a vyhodnoceny lokální, porostně specifické, alometrické rovnice pro studovaný porost a je zhodnocena použitelnost expanzních faktorů biomasy pro odhad biomasy porostu.

Alometrické rovnice pro odhad biomasy lesních dřevin vyžadují dosažení jednoho nebo více vstupních parametrů, přičemž měřitelnost parametrů v podmínkách lesního porostu je různá. Nejčastěji a nejsnadněji měřeným parametrem je výčetní tloušťka stromu. Parametr, kterým je součet všech sil kompetic okolních stromů v definovaném radiusu okolo vzorníkového stromu, nebo parametr popisující poměr síly kompetice vzorníkového stromu k síle kompetice sousedních stromů v definovaném radiusu okolo vzorníkového stromu, jsou naopak parametry, které se stanovují poměrně složitě. Některé parametry (například parametr šířka letokruhů za posledních 5 let) jsou v alometrických rovnicích využívány minimálně.

Ve studovaném dospělém smrkovém porostu byl parametr výčetní tloušťka stromu vhodným parametrem pro odhad objemu kmene bez borky, odhad objemu kmene s borkou i odhad štíhlostního kvocientu stromů. Tento parametr, případně parametr výčetní kruhová základna vypočítaný z hodnoty výčetní tloušťky stromu, byl jedním z nevhodnějších vstupních parametrů do alometrických rovnic stanovených pro studovaný porost pro odhad biomasy živých větví, biomasy borky kmene, biomasy kmene bez borky a nadzemní biomasy. Při srovnání dat naměřených

na vzorníkových stromech ze studovaného porostu s modelovými hodnotami nejlepších vybraných známých alometrických rovnic byl parametr výčetní tloušťka stromu jediným vstupním parametrem alometrické rovnice pro odhad biomasy borky kmene, biomasy kmene bez borky a biomasy koruny stromu. Pro odhad biomasy ostatních frakcí biomasy (jehlice, živé větve, mrtvé větve, kmen s borkou, celková nadzemní biomasa a biomasa kořenů) podle nejlepších vybraných známých alometrických rovnic byl parametr výčetní tloušťka stromu vhodným pouze při použití dalšího vybraného parametru.

Dalšími vhodnými parametry pro odhad biomasy studovaného dospělého smrkového porostu byly hodnoty zohledňující prostorovou porostní strukturu pomocí síly kompetice okolo vzorníkového stromu. Prostý součet všech sil kompeticí okolních stromů v definovaném radiusu okolo vzorníkového stromu ($\sum NK_{ji}$) byl jedním z nejlepších parametrů pro odhad biomasy mrtvých větví, biomasy borky kmene, biomasy kmene s borkou i celkové nadzemní biomasy. Odhad biomasy mrtvých větví pomocí parametru $\sum NK_{ji}$ přitom zohledňoval nejbližší okolí vzorníkového stromu, zatímco odhad biomasy ostatních, výše jmenovaných frakcí biomasy, zohledňoval širší okolí vzorníkového stromu. Parametr popisující poměr síly kompetice vzorníkového stromu k síle kompetice sousedních stromů v definovaném radiusu okolo vzorníkového stromu ($\sum NK_i / \sum NK_{ji}$) ve studovaném porostu velmi dobře koreloval se stanovenou biomasou jehlic a biomasou živých větví. Pro odhad biomasy jehlic byl vhodnější parametr $\sum NK_i / \sum NK_{ji}$ ovlivněný nejbližším okolím stromu, zatímco pro odhad biomasy živých větví parametr $\sum NK_i / \sum NK_{ji}$ odvozený pro širší okolí vzorníkového stromu. Parametr disponibilní plocha vzorníkových stromů nebyl vhodným parametrem pro odhad biomasy studovaného porostu a navíc jeho stanovení bylo náročné. Vzhledem k tomu, že v literatuře nebyly nalezeny alometrické rovnice, které by jako vstupní parametr používaly jakýkoliv kompetiční index, nebo které by zohledňovaly porostní strukturu, nebylo možné srovnat zjištěné výsledky s literárními údaji. Předložená práce však dokumentuje význam studia kompetice stromů jako nástroje pro odhad jednotlivých frakcí biomasy stromů, a podtrhuje případné zařazení tohoto parametru do alometrických rovnic pro odhad zásoby biomasy, zejména na výzkumných plochách, na kterých je struktura porostu a její časové změny intenzivně sledována.

Parametr výška stromu byla středně dobrým parametrem vstupujícím do alometrických rovnic pro odhad biomasy jednotlivých frakcí nadzemní biomasy. Společně s jinými parametry se parametr výška stromu vyskytoval v pěti nejvhodnějších známých alometrických rovnicích pro odhad biomasy jehlic, biomasy živých větví, biomasy mrtvých větví, biomasu kmene s borkou a celkovou nadzemní biomasu. Parametr výška stromu tedy může být vhodným doplňkovým parametrem vstupujícím do alometrických rovnic pro odhad frakcí biomasy stromu.

Pětiletý přírůst stromu ve výčetní výšce je poměrně složitě měřitelný a navíc s většinou sledovaných frakcí biomasy studovaného porostu koreloval poměrně málo. Výjimkou byl odhad biomasy jehlic, u kterého koreloval pětiletý přírůst stromu ve výčetní výšce spolu se třemi parametry kompetice nejlépe. Obdobně nízká korelace, stejně jako u parametru pětiletý přírůst stromu, byla zjištěna i u parametru délka živé koruny. Pouze v případě nejvhodnější známé alometrické rovnice pro odhad biomasy jehlic stromu byl tento parametr vstupním parametrem. Ostatní frakce biomasy studovaného porostu se odhadovaly při použití parametru délka živé koruny poměrně nepřesně. Nejméně vhodným parametrem pro odhad biomasy jednotlivých frakcí biomasy stromu byla výška nasazení živé koruny stromu a tento parametr nebyl uveden jako vstupní parametr v žádné známé alometrické rovnici.

Podzemní biomasa nebyla u vzorníkových stromů studovaného porostu stanovena. Nicméně v předložené práci byly využity literární údaje. Nejlepší alometrickou rovnicí pro odhad biomasy kořenů byla rovnice, která využívá jako vstupní parametry výčetní tloušťku stromu, věk stromu a délku živé koruny stromu.

Předložená práce se rovněž zabývá posouzením vhodnosti užití expanzních a konverzních faktorů pro odhad biomasy stromů. Expanzní faktory biomasy mají větší potenciální využití zejména pro odhad biomasy stromů ve stejnověkých porostech a na rozsáhlých územích. Protože vstupujícím parametrem je objem nebo hmotnost kmene stromu, případně věk stromu, a expanzní faktor biomasy je konstantou pro daný typ lesního porostu, lze tuto metodu použít na úrovni celých lesních porostů bez nutnosti zjišťování tloušťkové struktury porostu, což je nezbytné v případě alometrických rovnic. Na základě evidence porostních zásob v lesních

hospodářských plánech je tedy možné odhadovat zásoby biomasy jednotlivých frakcí biomasy (většinou nadzemní biomasy). Pro nadzemní biomasu studovaného porostu byl stanoven expanzní faktor 1,30, což odpovídá hodnotě běžně používané pro smrk. Pro podzemní biomasu byl stanoven expanzní faktor biomasy 1,18.

Z výsledků předložené práce vyplývá, že struktura biomasy stromů je poměrně dobře odhadnutelná ze snadno měřitelných parametrů. Ale i hůře dostupné parametry stromu nebo lesního porostu mohou mít značný vliv na zpřesnění odhadu konečné biomasy porostu. Bylo prokázáno, že součet hodnot biomasy jednotlivých frakcí stanovených podle různých alometrických rovnic (například rovnice pro odhad biomasy jehlic plus rovnice pro odhad biomasy větví) se nemusí rovnat souhrnné alometrické rovnici (rovnice pro biomasu koruny stromu). Tyto odlišnosti mohou dosahovat pro různé tloušťkové třídy rozdílu v řádu desítek procent. Při studiu porostních struktur a jejich změn v čase je proto nutné používat vhodné alometrické rovnice pro odhad biomasy lesních porostů.

8. SUMMARY

It is necessary to choose easily measured and suitable parameters influencing forest stand structure when estimating the forest stand biomass. Thus, it is possible to prevent unnecessary and time-consuming data collection in the forest stand, which input into the calculation of the biomass stock. At the same time the appropriate choice provides all parameters that are essential for the most accurate estimation of the forest stand biomass stock.

In the present study, the structure of the adult highland spruce stand at the study site of Rájec (the Dražanská vrchovina Highland) is described. Further, local and stand specific allometric equations for the studied stand are presented and the applicability of biomass expansion factors for stand biomass estimation is evaluated.

Allometric equations for the forest trees biomass estimation require substitution of one or more input parameter. Parameters measurability in the forest stands is different. Most often and most easily measured parameter is the diameter at the tree breast height. Parameters, which is the sum of all competition strengths of the surrounding trees in the defined radius around the sample tree, or parameter describing the ratio of competition strength of the sample tree to the competition strength of the surrounding trees in the defined radius around the sample tree, are the parameters that are determined relatively complicated. Some parameters (e.g. tree ring width for the last 5 years) are used minimally in the allometric equations.

Parameter diameter at the breast tree height was the suitable parameter for the estimation of the stem volume without bark, estimation of the stem volume with bark and estimation of the quotient of slenderness. This parameter, or parameter basal area at the breast height calculated from the values of the diameter at the breast height, was one of the best input parameter in many allometric equations determined for the estimation of live branches biomass, stem bark biomass, stem without bark biomass and aboveground biomass in the studied stand. When compared data measured at the sample trees in the studied stand to model values of the best chosen known allometric equations the parameter diameter at the tree breast height was the

best for the estimation of the stem bark biomass, stem biomass without bark and the crown biomass. To estimate the biomass of other biomass fractions (needles, live branches, dead branches, stem with bark, total aboveground biomass and roots biomass) the parameter diameter at the breast height had to be supplemented by other chosen parameter.

Values reflecting spatial stand structure using competition strength were other suitable parameters for the estimation of studied stand biomass. The sum of all competition strengths of the surrounding trees in the defined radius around the sample tree ($\sum NK_j$) was one of the best parameters for the estimation of the dead branches biomass, stem bark biomass, stem biomass with bark and the total aboveground biomass. Whereas estimation of the dead branches biomass using parameter $\sum NK_j$ taking account closer surroundings of the sample tree, estimation of other biomass fractions (cited above) taking account wider surroundings of the sample trees. Parameter describing the ratio of competition strength of the sample tree to the competition strength of the surrounding trees in the defined radius around the sample tree ($\sum NK_i / \sum NK_j$) in the studied stand very well correlated with the determined needle biomass and live branches biomass. Parameter $\sum NK_i / \sum NK_j$ influencing by closer surroundings of the sample trees was preferable for the estimation of needle biomass while parameter $\sum NK_i / \sum NK_j$ influencing by wider surroundings of the sample trees was preferable for the estimation of live branches biomass.

Parameter available area of the sample trees was not a suitable parameter for the biomass estimation of the studied stand and above that its determination was hard. Because no allometric equations, that as input parameter used any competition index, or that would reflect stand structure, have been found in the literature there has not to able to compare determined results with published data. However, presented study documents the importance of the tree competition study.

Parameter tree height was moderately good parameter that input into the allometric equations for the estimation of the single biomass fractions. Together with other parameters, the parameter tree height occurred in the five most suitable known

allometric equations for the estimation of needle biomass, live branches biomass, dead branches biomass, stem biomass with bark and total aboveground biomass. Thus parameter tree height may be supplementary parameter that input into allometric equations for the tree biomass estimation.

Five-year increment of the tree at the breast height is quite difficult measurable and moreover this parameter correlated with most studied biomass fraction relatively little. Similarly low correlation was found for parameter length of the living crown. Only in the most known allometric equation for the estimation of needle biomass was the parameter length of living crown the best. Other biomass fractions were estimated inaccurately when parameter length of living crown was used.

Belowground biomass was not determined at the sample trees in the studied stand. However, published data were used in the present study. Allometric equation, that uses input parameters diameter at the tree breast height, tree age and length of the living crown, was the best for estimation of root biomass.

In the present study, assessments of suitability of expansion factors application for the biomass estimation are introduced. Biomass expansion factors have a greater potential for the biomass estimation of even-age stands or for the stands at large area. This method is suitable for the whole forest stands without necessity of knowledge of stand diameter structure because the input parameter is volume or weight of tree stem, eventually tree age, and biomass conversion factor is a constant for the specific forest stand. Expansion factor of 1,30 was determined for the aboveground biomass of the studied stand. Expansion factor of 1,18 was determined for the belowground biomass.

The structure of tree biomass is relatively well estimated using easily measurable parameter after results presented in this study. But even less available tree parameters may affect refinement of the estimation of forest stand biomass. There has been shown that sums of single fraction biomass values after different allometric equations (for example equation for needle biomass estimation plus equation for

branches biomass estimation) might not be the same as the summary allometric equation (equation for the whole crown biomass estimation).

9. PŘÍNOSY PRO PRAXI A DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM

Při odhadování zásoby biomasy porostu, případně jejích jednotlivých frakcí, je nutné vybrat snadno měřitelné a vyhovující parametry, které ovlivňují strukturu biomasy lesního porostu. Je tak možné zamezit zbytečnému a časově náročnému sběru dat v lesním porostu, která vstupují do výpočtu zásoby biomasy.

Alometrické rovnice pro odhad nadzemní biomasy a jejích jednotlivých frakcí nebo alometrické rovnice pro odhad podzemní biomasy je vhodné vybírat a používat s ohledem na strukturu daného porostu (výčetní tloušťka, věk, výška, apod.).

Sestavovat nové alometrické rovnice pro různé typy lesních porostů a na různých stanovištích, aby se zpřesňovala databáze použitelných alometrických rovnic.

Vhodnou metodou pro odhad nadzemní biomasy lesních porostů je využití expanzních faktorů, jejichž hodnoty stanovené pro určitou lesní dřevinu mívají obecnou platnost.

V podrobných studiích zabývajících se odhadem zásob nadzemní biomasy lesních dřevin by měly být zohledněny kompetiční vztahy v porostu, které významně ovlivňují tvorbu biomasy.

Bylo prokázáno, že součet hodnot biomasy jednotlivých frakcí stanovených podle různých alometrických rovnic (například rovnice pro odhad biomasy jehlic plus rovnice pro odhad biomasy větví) se nemusí rovnat souhrnné alometrické rovnici (rovnice pro biomasu koruny stromu). Tyto odlišnosti mohou dosahovat pro různé tloušťkové třídy rozdílu v řádu desítek procent. Při studiu porostních struktur a jejich změn v čase je proto nutné používat vhodné alometrické rovnice pro odhad biomasy lesních porostů.

10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- Adams, J. *Vegetation–climate interaction: How plants make the global environment*. second edition, Berlin Heidelberg: Springer–Verlag, 2008. 266 s.
- Albaugh, T.J., Bergh, J., Lundmark, T., Nilsson, U., Stape, J., Allen, H.L., Linder, S. Do biological expansion factors adequately estimate stand-scale aboveground component biomass for Norway spruce? *Forest Ecology and Management*. 2009, **258**, 2628–2637.
- Albrektson, A., Valinger, E., Jonson, C. *Några funktioner för bestämning av tallars biomassa i södra Norrland*. Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift. 1984, **82**(6), 5–12.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements*. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy, 1998. 300 s.
- Amilon, J.A. *Barrmassan och stamtillväxten hos mellansvensk tall (Biomass of needles and stem growth of Scots pine in middle Sweden)*. Bonniers, Stockholm, 1925. 47 s.
- Andreassian, V. Water and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*. 2004, **291**, 1–27.
- Barbosa, P., Wagner, M.R. *Introduction to forest and shade tree insects*. Academic Press, USA, 1989. 639 s.
- Bormann, B.T. Diameter–based biomass regression models ignore large sapwood–related variation in Sitka spruce. *Canadian Journal of Forest Research*. 1990, **20**, 1098–1104.
- Brække, F.H. Distribution and yield of biomass from young *Pinus silvestris* and *Picea abies* stands on drained and fertilised peatland. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1986, **1**, 49–66.
- Brandini, P., Tabacchi, G. Biomass and volume equations for holm oak, and strawberry–tree in coppice stands of Southern Sardinia. *ISAF A Comunicazioni di Ricerca*. 1996, **96**(1), 59–69.
- Briggs, E.F., Cunia, T. Effect of cluster sampling in biomass tables construction: linear regression models. *Canadian Journal of Forest Research*. 1982, **12**(2), 255–263.
- Broadmeadow, M., Matthews, R. Survey methods for Kyoto Protocol monitoring and verification of UK forest carbon stock. In: Milne, R., Mobbs, D.C., eds., *UK Emission by Sources and Removals by Sinks due to Land Use, Land Use Change and Forestry Activities*, Section 8, Annual report. DEFRA. 2004, 8/1–8/27.
- Brown, R.W. Water relations of range plants. In: Sosebee, R.E. (ed.), *Rangeland plant physiology*. Range Science Series No. 4. Society for Range Management, Denver, USA, 1977. 97–140 s.
- Brown, S. Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 2002. **116**(3), 363–372.

- Børja, I., Světlík, J., Nadezhdin, V., Rosner, S., Čermák, J., Nadezhdina, N. Sap flux – a real time assessment of health status in Norway spruce. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2016, **31**(5), 450–457.
- Cienciala, E., Henžlík, V., Zatloukal, V. Assessment of carbon stock change in forest-adopting IPCC LULUCF Good Practice Guidance in the Czech Republic. *Forestry Journal*. 2006, **52**, 17–28.
- Culek, M., ed. *Biogeografické členění České republiky I*. Enigma, Praha. 1996. 245 s.
- Culek, M., Buček, A., Grulich, V., Hartl, P., Hrabice, A., Kocián, J., Kyjovský, Š., Lacina, J. *Biogeografické členění České republiky II. díl*. AOPK ČR, Praha, 2005. 590 s.
- Cunia, T., Briggs, R.D. Forcing additivity of biomass tables: some empirical results. *Canadian Journal of Forest Research*. 1984, **14**, 376–384.
- Čermák, J., Nadezhdina, N. Sapwood as the scaling parameter – defining according to xylem water content or radial pattern of sap flow? *Annals of Forest Science*. 1998, **55**, 509–521.
- Černý, M. Biomass of *Picea abies* (L.) Karst. in Midwestern Bohemia. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1990, **5**, 83–95.
- ČHMÚ *Mapový prohlížeč hydrologických sítí* [online]. 2016, Dostupné z: http://hydro.chmi.cz/ismnozstvi/ciselnik.php?id=hgr50&ordrstr=ID&filter=1&fid=6570&_fmm=&ok=Filtruj
- Čihák, T., Vejpusťková, M., Šrámek, V., Marušák, R. Vyhodnocení alometrických funkcí pro stanovení nadzemní biomasy smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) Karst.) z oblasti Orlických hor. *Zprávy lesnického výzkumu*. 2012, **57**(3), 257–265.
- ČSN 48 0203. *Surové dříví – Kulatina – Třídění vad*. Praha: Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1982. 5 s.
- Dietrich, H.P., Raspe, S., Schwarzmeier, M., Ilg, S. Biomasse- und Nährelementinventuren zur Ermittlung von Ernteentzügen an drei bayerischen Fichtenstandorten. *Forstliche Forschungsberichte*. München, 2002. **186**, 59–72.
- Dixon, R.K., Solomon, A.M., Brown, S., Houghton, R.A., Trexler, M.C., Wisniewski, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*. 1994, **263**, 185–190.
- Do-Hyung, L. Relationship between above- and below-ground biomass for Norway spruce (*Picea abies*): estimating root system biomass from breast height diameter. *Journal of Korean Forest Society*. 2001, **90**(3), 338–345.
- Drexhage, M., Colin, F. Estimating root system biomass from breast-height diameters. *Forestry*. 2001, **74**(5), 491–497.
- Drexhage, M., Gruber, F. Above- and below- stump relationship for *Picea abies*: Estimating root system biomass from breast-height diameters. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1999, **14**, 328–333.
- Dušek, D., Slodičák, M., Novák, J. Výchova smrkových porostů a tvorba horizontů nadložního humusu – experiment Vrchmezí v Orlických horách. *Zprávy lesnického výzkumu*. 2009, **54**(4), 293–299.
- Ebermayer, E. Die gesammte Lehre von der Waldstreu mit Rücksicht auf die chemische Statik des Waldbaues. *Verlag von Julius Springer*. Berlin. 1876. 416 s.

- Einarsson, S.F., Sigurdsson, B.D., Snorrason, A. Estimating aboveground biomass for Norway spruce (*Picea abies*) in Iceland. *Icelandic Agricultural Sciences*. 2004, **17/18**, 53–63.
- Fabiánek, T., Menšík, L., Tomášková, I., Kulhavý, J. Effects of spruce, beech and mixed commercial stand on humus conditions of forest soils. *Journal of Forest Science*. 2009, **55**(3), 119–126.
- Freedman, B., Duinker, P.N., Barclay, H., Morash, R., Prager, U. *Forest biomass and nutrient studies in central Nova Scotia*, Aspen Bibliography. Paper 4325. M–X–134, 1982. 100 s.
- Freer–Smith, P.H., Broadmeadows, M.S.J., Lynch, J.M., eds. *Forestry and Climate Change*, CAB International, Wallingford, Oxon, 2007. 253 s.
- Geoportal1.uhul.cz. *Mapový server Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHÚL)*. [online]. 2013, Dostupné y <http://Geoportal1.uhul.cz/OprlMap/>. [online 5/12/2013].
- Grantham, J.B., Ellis, T.H. Potentials of wood for producing energy. *Journal of Forestry*. 1974, **72**(9), 552–556.
- Grote, R. Foliage and branch biomass estimation of coniferous and deciduous tree species. *Silva Fennica*. 2002, **36**(4), 779–788.
- Grunda, B. *Složení humusu a mikroflóry v půdě pod smrkovou monokulturou antropicky ovlivněnou*. Dílčí závěrečná zpráva výzkumného úkolu VI–4–3/02–2b. VŠZ Brno, 1990. 62 s.
- Haferkamp, M.R. Environmental factors affecting plant productivity. s. 27–36. In: White, R.S., Short, R.E., eds., *Achieving efficient use of rangeland resource*. Miles City, USA, 1988. 132 s.
- Hakkila, P. Coniferous branches as a raw material source. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*. 1971, **75**(1), 1–60.
- Hakkila, P. Hakkuupoistuman latvusmassa (Crown mass of trees at the harvesting phase). *Folia Forestalia*. 1991, **773**, 1–24.
- Hall, D.O. Biomass energy in industrialised countries—a view to the future. *Forest Ecology and Management*. 1997, **91**, 17–45.
- Hall, D.O., Moss, P.A. Biomass for energy in developing countries. *GeoJournal*. 1983, **7**(1), 5–14.
- Harrington, C.A., Reukema, D.L. Initial shock and long-term stand development following thinning in a Douglas-fir plantation. *Forest Science*. 1983, **29**(1), 33–46.
- Hieke, K. *Praktická dendrologie*. 1. vydání. Praha: Státní zemědělské nakladatelství. 1978. 533 s.
- Hitchcock, H.C., McDonnell, J.P. Biomass measurement – a synthesis of the literature. In: Frayer, W.E., ed. *Forest Resource Inventories*. Vol. II, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, U.S.A. 1979. 544–595 s.
- Hochbichler, E., Bellos, P., Lick, E. Biomass functions for estimating needle and branch biomass of spruce (*Picea Abies*) and Scots pine (*Pinus Sylvestries*) and branch biomass of beech (*Fagus sylvatica*) and oak (*Quercus robur* and *petrea*). *Austrian Journal of Forest Science*. 2006, **123**, 35–46.

- Hromádka, J. *Orografické třídění Československé republiky*. Sborník Československé společnosti zeměpisné, Praha: Nakladatelství Československé akademie věd. svazek LXI, 1956.
- Hruška, B. *Geologicko – petrografické poměry, zvětrávací procesy, uvolňování živin a klasifikace zvětrávacích procesů v ekosystému smrkového lesa*. Závěrečná zpráva. VŠZ Brno, 1980. 51 s.
- Hruška, B. Geologicko – petrografické poměry a základní charakteristika zvětrávacích procesů na výzkumné ploše v Rájci–Jestřebí. In: *Struktura, Funkce a produktivita lesních ekosystémů, ovlivňovaných uvědomělou antropickou činností (nížinné a pahorkatinné oblasti ČSR)*. Informace o předběžných výsledcích dílčích výzkumných úkolů v projektech MAB v letech 1976–1977. VŠZ v Brně, 1978. 229–244 s.
- Hurtalová, T., Matejka, F., Janouš, D., Rožnovský, J. Vplyv smrekového porastu na prúdenie a vertikálne zvrstvenie teploty a vlhkosti vzduchu. In: Rožnovský, J., Litschmann, T., eds : *Seminář „Mikroklima porostů“*, Brno, 2003. 66–79 s.
- Chenghui, M., Liqiang, M., Zhongliang, Y., Peng, L., Jianfeng, S. Biomass and net productivity for spruce plantation. *Journal of Forestry Research*. 1999, **10**(1), 45–47.
- Ilg, S. *Erhebung der oberirdischen Biomasse- und Elementvorräte eines Fichtenbestandes (Picea abies (L.) Karst.) im Bereich der Waldklimastation Zusmarshausen*. Diplomarbeit. Fachhochschule Weihenstephan, Fachbereich Forstwirtschaft, 2002. 100 s.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories*. IPCC/OECD/IEA, Paris, France. 1997.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, 2003. 590 s.
- Jenkins, J.C., Chojnacky, D.C., Heath, L.S., Birdsey, R.A. National-scale biomass estimator for United States tree species. *Forest Science*. 2003, **49**(1), 12–35.
- Johansson, T. Biomass production of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) growing on abandoned farmland. *Silva Fenica*. 1999, **33**(4), 261–280.
- Jokela, E.J., van Gorp, K.P., Briggs, R.D., White, E.H. Biomass estimation equations for Norway spruce in New York. *Canadian Journal of Forest Research*. 1986, **16**(2), 413–415.
- Keays, J.L. *Complete – tree utilization. An analysis of the literature, Part I–V*. Vancouver: Western Forest Products Laboratory Information reports, VP–X–69, 70, 71, 77, 79. 1971.
- Kittredge, J. Estimation of the amount of foliage of trees and stands. *Journal of Forestry*. 1944, **42**(12), 905–912.
- Kivari, A., Wenli, X., Otukol, S. *Volume to Biomass Conversion for British Columbia Forests (draft)*. British Columbia: Ministry of Forests and Range, Forest Analysis and Inventory Branch, 2011. 27 s.
- Klimo, E. Charakteristika půdních poměrů výzkumné stanice programu Člověk a biosféra, Rájec–Jestřebí. In: *Struktura, Funkce a produktivita lesních ekosystémů, ovlivňovaných uvědomělou antropickou činností (nížinné a pahorkatinné oblasti ČSR)*.

- Informace o předběžných výsledcích dílčích výzkumných úkolů v projektech MAB v letech 1976–1977. VŠZ v Brně, 1978. 215–228 s.
- Klimo, E. *Struktura produkce a procesy uměle založeného smrkového lesa Dražanské vrchoviny*. Závěrečná zpráva, VŠZ Brno, 1985. 143 s.
- Kolařík, J. a kolektiv. *Péče o dřeviny rostoucí mimo les – II*, Metodika Českého svazu ochránců přírody č. 6 (2. doplněné vydání). ČSOP Vlašim, 2005. 710 s.
- Konôpka, J. *Vplyv rastových vlastností smreka na odolnosť lesných porastov proti vetru v oblasti Nízkyh Tatier*. Bratislava: Slovenská spoločnosť pre poľnohospodársku, lesnícke a potravinársku vedu pri SAV, 1977. 80 s.
- Konšel, J. *Stručný nástin tvorby a pěstění lesů v biologickém ponětí*, Svazek 16, Písek: Čs. matice lesnická, tiskl Fr. Podhajský a spol v Písku, 1931. 552 s.
- Körner, C. Slow in, rapid out carbon flux studies and Kyoto targets. *Science*. 2005, **300**(5623), 1242–1243.
- Kubát, K., Hrouda, L., Chrtěk, J., Kaplan, Z., Kirschner, J., Štěpánek, J., eds. *Klíč ke květeně České republiky*. Praha: Academia, 2002. 928 s.
- Lacina, J., Quitt, E. *Geografická diferenciace okresu Blansko*. Brno: GÚ ČSAV Brno, 1986. 210 s.
- Lal, R. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*. 2005, **220**(1–3), 242–258.
- Lal, R., Follett, R., Stewart, B.A., Kimble, J.M. Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. *Soil Science*. 2007, **172**(12), 943–956.
- Lande, R. Quantitative genetic analysis of multivariate evolution, applied to brain: Body size allometry. *Evolution*. 1979, **33**(1), 402–416.
- Ledermann, T., Neumann, M. Biomass equations from data of old long-term experimental plots. *Austrian Journal of Forest Research*. 2006, **123**, 47–64.
- Lee, D.H. *Architektur des Wurzelsystem von Fichten (Picea abies [L.] Karst.) auf unterschiedlich versauerten Standorten*. Ber. Forschungsz. Waldökosyst. A 153, 1998. 147 s.
- Le Goff, N., Ottorini, J.M. *Biomass distributions at tree and stand levels in the beech experimental forest of Hesse (NE France)*. Viterbo (November), 2000. 9–11.
- Lehtonen, A. Estimating foliage biomass for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) plots. *Tree Physiology*. 2005, **25**, 803–811.
- Lehtonen, A., Mäkipää, R., Heikkinen, J., Sievänen, R., Liski, J. Biomass expansion factors (BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management*. 2004, **188**, 211–224.
- Lehtonen, A., Cienciala, E., Tatarinov, F., Mäkipää, R. Uncertainty estimation of biomass factors for Norway spruce in the Czech Republic. *Annals of Forest Science*. 2007, **64**, 133–140.
- Lesprojekt. *Tabuľky jednotných objemových kriviek, Ústav pre hospodársku úpravu lesov ve Zvolene*. Zvolen. 1982.

- Lim, H., Lee, K.H., Lee, K.H., Park, I.H. Biomass expansion factors and allometric equations in an age sequence for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in southern Korea. *Journal of Forest Research*. 2013, **18**(4), 316–322.
- Liu, Ch., Westman, C.J. Biomass in a Norway spruce–Scots pine forests: a comparison of estimation methods. *Boreal Environment Research*. 2009, **14**, 875–888.
- Lorenz, K., Lal, R. *Carbon sequestration in forest ecosystems*. Springer Netherlands, 2010. 279 s.
- Löwe, H., Seufert, G., Raes, F. 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*. 2000, **4**(4), 315–319.
- Mäkelä, A., Valentine, H.T. The ratio of NPP and GPP: evidence of change over the course of stand development. *Tree Physiology*. 2001, **21**, 1015–1030.
- Makkonen, K., Helmisaari, H.S. Seasonal and yearly variations of fine–root biomass and necromass in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand. *Forest Ecology and Management*. 1998, **102**(2–3), 283–290.
- Mälkönen, E. Annual primary production and nutrient cycle in some Scots pine stands. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae*. 1974, **84**(5), 1–87.
- Marek, V.M a kolektiv. *Uhlík v ekosystémech České republiky v měnícím se klimatu*. 1. vydání. Praha: Academia, 2011. 255 s.
- Marklund, L.G. *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, 1987. 132 s.
- Marklund, L.G. *Biomassfunktioner för tall, gran, björk i Sverige*. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen for skogstaxering, Rapport 45, 1988. 73 s.
- Marková, I. *Radiační režim v lesních porostech*. Brno, 2010. Habilitační práce. Mendelova universita v Brně, 75 s.
- Marková, I., Pavelka, M., Krejza, J., Janouš, D. *Ročenka meteorologických měření – Experimentální ekologické pracoviště Bílý Kříž (moravskoslezské Beskydy), Ekosystémová stanice Štítná nad Vláří (Bílé Karpaty), Ekosystémová stanice Rájec (Drahanská vrchovina)*. Brno: Keloc Pc, spol. s r. o., 2015. 167 s.
- Marková, I., Pokorný, R. Allometric relationship for the estimation of dry mass of aboveground organs in young highlands Norway spruce stand. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2011, **LIX**(28), 217–223.
- Matis, G.K., Alifragis, A.D. Aboveground biomass of oaks (*Quercus conferta* Kit.) in Taxiarchis Greece (in Greek). *Scientific Annals of the Department of Forestry and Natural Environment*. 1983–1984, **KOT/KZ**, 399–517.
- Mikšys, V., Varnagiryte–Kabasinskiene, I., Stupak, I., Armolaitis, K., Kukkola, M., Wójcik, J. Above–ground biomass functions for Scots pine in Lithuania. *Biomass and Bioenergy*. 2007, **31**, 685–692.
- Moran, M.A., Hodson, R.E. Bacterial secondary production on vascular plant detritus: Relationship to detritus composition and degradation rate. *Applied and Environmental Microbiology*. 1989, **55**(9), 2178–2189.

- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, **50**(3), 885–900.
- Mund, M., Kummert, E., Hein, M., Bauer, G.A., Schulze, E.D. Growth and carbon stocks of a spruce forest chronosequence in central Europe. *Forest Ecology and Management*. 2002, **171**(3), 275–296.
- MZe. *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2013*, Praha: Ministerstvo zemědělství, 2013. 136 s (dostupné na: http://eagri.cz/public/web/file/337394/Zprava_o_stavu_lesa_2013.pdf), [online 5/8/2016].
- Nabuurs, G.J., Päivinen, R., Sikkema, R., Mohren, G.M.J. The role of European forests in the global carbon cycle – a review. *Biomass and Bioenergy*. 1997, **13**(6), 345–358.
- Nagel, J. *Konzeptionelle Überlegungen zum schrittweisen Aufbau eines waldwachstumskundlichen Simulationssystems für Nordwestdeutschland*. Schriften aus d. Forstl. Fak. D. Univ. Göttingen u. d. Niedersächs. Forstl. Versuchsanst., Band 128, JD Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 1999. 122 s.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 1970, **10**(3), 282–290.
- Němeček, J., Macků, J., Vokoun, J., Vavříček, D., Novák, P. *Taxonomický klasifikační systém půd České Republiky*. Praha: ČZU, 2001. 79 s.
- Neumann, M., Jandl, R. Derivation of locally valid estimators of the aboveground biomass of Norway spruce. *European Journal of Forest Research*. 2005, **124**(2), 125–131.
- Ni, X., Yang, W., Tan, B., He, J., Xu, L., Li, H., Wu, F. Accelerated foliar litter humification in forest gaps: Dual feedbacks of carbon sequestration during winter and the growing season in an alpine forest. *Geoderma*. 2015, **241–242**, 136–144.
- Nihlgård, B. Plant biomass, primary production and distribution of chemical elements in a beech and a planted spruce forest in South Sweden. *Oikos*. 1972, **23**(1), 69–81.
- Nikl, J. *Oblastní plán rozvoje lesů – Přírodní lesní oblast 30 Dražanská vrchovina – textová část + přílohy. Platnost 2010–2020*. Brno: ÚHUL Brandýs nad Labem – pobočka Brno, 2000. 240 s.
- Ovington, J.D., Madgwick, H.A.I. Distribution of organic matter and plant nutrients in a plantation of Scots pine. *Forest Science*. 1959, **5**, 344–355.
- Pajtk, J., Konônopka, B., Lukac, M. Biomass functions and expansion factors in young Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) trees. *Forest Ecology and Management*. 2008, **256**(5), 1096–1103.
- Palumets, J. *Analysis of phytomass partitioning in Norway spruce*. University of Tartu, Estonia: Laboratory of Ecosystems, 1993. 48 s.
- Parresol, B.R. Assessing Tree and Stand Biomass: A Review with Examples and Critical Comparisons. *Forest Science*. 1999, **45**(4), 573–593.
- Penner, M., Power, K., Muhairwe, C., Tellier, R., Wang, Y. *Canada's forest biomass resources: deriving estimates from Canada's forest inventory*. Canada: PFC, Canadian Forest Service, Information Report BC-X-370, 1997. 33 s.

- Perry, D.A., Oren, R., Hart, S.C. *Forest ecosystems*. 2nd edition. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, USA, 2008. 606 s.
- Petersson, H., Holm, S., Ståhl, G., Alger, D., Fridman, J., Lehtonen, A., Lundström, A., Mäkipää, R. Individual tree biomass equations or biomass expansion factors for assessment of carbon stock changes in living biomass – A comparative study. *Forest Ecology and Management*. 2012, **270**, 78–84.
- Picard, N., Saint-André, L., Henry, M. *Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction*. Food and Agricultural Organisation of the United Nations, Rome, and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, 2012. 215 s.
- Pokorný, R. *Stanovení indexu listové plochy v nesmíšených porostech lesních dřevin*. Certifikovaná metodika, Brno: Centrum výzkumu globální změny AV ČR. 2015. 38 s.
- Pokorný, R., Tomášková, I. Allometric relationship for surface area and dry mass of young Norway spruce aboveground organs. *Journal of Forest Science*. 2007, **53**, 548–554.
- Pokorný, R., Tomášková, I., Havránková, K. Temporal variation and efficiency of leaf area index in young mountain Norway spruce stand. *European Journal of Forest Research*. 2008, **127**(5), 359–367.
- Pokorný, R., Šalanská, P., Janouš, D., Pavelka, M. ALAI-02D – A new instrument for forest practice. *Journal of Forest Science*. 2001, **47**, 164–169.
- Pretzsch, H. *Forest dynamics, growth and yield. From measurement to model*. Berlin: Springer, 2009. 664 s.
- Pretzsch, H., Schütze, G. Crown allometry and growing space efficiency of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus silvatica* L.) in pure and mixed stands. *Plant Biology*. 2005, **7**(6), 628–639.
- Průša, E. *Pěstování lesů na typologických základech*. 1. vyd., Kostelec nad Černými lesy: Lesnická práce, 2001. 594 s.
- QCExpert. *TriloByte Statistical Software – QCExpert 3.3*. Staré Hradiště (CZ), trilobyte.cz. 2015.
- Quitt, E. *Klimatické oblasti Československa*. Brno: Studia geographica 16. GÚ-ČSAV, 1971. 73 s.
- Ruiz-Peinado, R., Bravo-Oviedo, A., Montero, G., del Río, M. Carbon stocks in a Scots pine afforestation under different thinning intensities management. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2014, **21**(7), 1059–1072.
- Satoo, T., Madgwick, H.A.I. *Forest biomass*. 1st edition. Martinus Nijhoff / Dr. W. Junk Publisher, Forestry Sciences, The Hauge, 1982. 164 s.
- Satoo, T., Nakamura, K., Senda, M. *Young stands of Japanese red pine of various density, Materials for the studies of growth in forest stands*, Tokyo: Bull. Tokyo Univ. Forests, 1955. **48**, 65–90.
- Senda, M., Nakamura, K., Takahara, S., Satoo, T. *Some aspect of growth in stands: An analysis of pine stands of different spacing*. Tokyo: Bull. Tokyo Univ. Forests. 1952, **52**, 15–31.

- Schober, R. *Von der Niederdurchforstung zu Auslesedurchforstungen im Herrschenden*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung. 1988, **159** (9/10), 208–213.
- Schoene, D. *Terminology in assessing and reporting forest carbon change*, In Second expert meeting on harmonizing forest-related definitions for use by various stakeholders, Rome: FAO. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2002. 193 s.
- Schöpfer, W. *Beiträge zur Erfassung des Assimilationsapparates der Fichte*. Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, 10, 1961. 127 s.
- Schröder, W., Pesch, R. Mapping carbon sequestration in forests at the regional scale - a climate biomonitoring approach by example of Germany. *Environmental Sciences Europe*. 2011, **23**(31), 1–16.
- Schwappach, A. *Normal-Ertragstafel für die Kiefer in der norddeutschen Tiefebene*. Prag: 243-Druckerei Merkur, 1896. 11 s.
- Schwappach, A. *Ertragstafeln der wichtigeren Holzarten in tabellarischer und graphischer Form*, Verlag J Neumann, Neudamn, 1912. 83 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.
- Skořepa, H. *Lesy Dražanské vrchoviny*. 1. vydání. Boskovice: Nakladatelství Albert v Boskovicích, 2006. 156 s.
- Smith, A., Granhus, A., Astrup, R., Bollandsås, O.M., Petersson, H. Functions for estimating aboveground biomass of birch in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2014, **29**(6), 565–578.
- Snorrason, A., Einarsson, S.F. Single-tree biomass and stem volume functions for eleven tree species used in Icelandic forestry, *Icelandic Agricultural Sciencis*. 2006, **19**, 15-24.
- St. Clair, J.B. Family differences in equations for predicting biomass and leaf area in Douglas fir (*pseudotsuga menziesii* ver. *Menziesii*). *Forest Science*. 1993, **39**(4), 743–755.
- Světlík, J., Børja, I., Rosner, S., Čermák, J., Nadezhdin, V., Nadezhdina, N. Differential translucence method as a supplement to sap flow measurement in Norway spruce with symptoms of top dieback. *Acta Horticulturae*. 2013, **991**(28), 285–292.
- Světlík, J., Krejza, J., Menšík, L., Pokorný, R., Mazal, P., Kulhavý, J. Sekvestrace uhlíku smrkovým porostem (*Picea abies* (L.) Karst.) v oblasti Dražanské vrchoviny. *Zprávy lesnického výzkumu*. 2016, **61**(1), 42–53.
- Sychrovský, R. *Hospodářské zřízení lesů (praktická část)*. Svazek 1, Praha, 1933. 216 s.
- Sychrovský, R. *Hospodářské zřízení lesů (část teoretická)*. Svazek 2, Praha, 1934. 489 s.
- Šmelko, Š. *Dendrometria*. Zvolen: Vydavateľstvo TU vo Zvolene, 2000. 399 s.
- Šrámek, M., Čermák, J. The vertical leaf distribution of *Ulmus laevis* Pall. *Trees*. 2012, **26**, 1781–1792.
- Taras, M.A. *Weight scaling: Its past, present and future*. Toronto: Faculty of Forestry, University of Toronto, Wood Measurement Conf., Proc. Tech. Rep. No. 7., 1967.

- Tatarinov, F., Cienciala, E. Long-term simulation of the effect of climate changes on the growth of main Central-European forest tree species. *Ecological Modelling*. 2009, **220**(21), 3081–3088.
- Ter-Mikaelian, M.T., Korzukhin, M.D. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management*. 1997, **97**, 1–24.
- Tirén, L., *Om barrytans storlek hos tallbestånd*. Stockholm: Sveriges landbruksuniversitet. Meddelanden från Statens skogsforsöksanstalt. 1927, **23**, 295–336.
- Tobin, B., Nieuwenhuis, M., Biomass expansion factors for Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) in Ireland. *European Journal of Forest Research*. 2007, **126**(2), 189–196.
- Tolasz, R., Brázdil, R., Bulří, O. a kol. *Atlas podnebí Česka: Climate atlas of Czechia*. 1. vydání. Praha: Český hydrometeorologický ústav, Univerzita Palackého, 2007. 256 s.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Changes) *The Kyoto Protocol – to the Convention on Climate Change*. Geneva: UNEP/IUC/98/9, UNEP/IUC. Geneva Executive Center, Geneva, Switzerland, October, 1998. 34 s.
- Valentine, H.T., Mäkelä, A., Green, E.J., Amateis, R.L., Mäkinen, H., Ducey, M.J. Models relating stem growth to crown length dynamics: application to loblolly pine and Norway spruce. *Trees*. 2012, **26**(2), 469–478.
- Vašíček, F. Typologická klasifikace, struktura a biomasa vrstvy bylin na výzkumné ploše MAB „Rájec–Jestřebí“. In: *Struktura, Funkce a produktivita lesních ekosystémů, ovlivňovaných uvědoměnou antropickou činností (nížinné a pahorkatinné oblasti ČSR). Informace o předběžných výsledcích dílčích výzkumných úkolů v projektech MAB v letech 1976–1977*. Brno: VŠZ v Brně, 1978. 245–254.
- Vose, J.M., Dougherty, P.M., Long, J.N., Smith, F.W., Gholz, H.L., Curran, P.J. Factors influencing the amount and distribution of leaf area of pine stands. In: Gholz H.L. a kolektiv. (eds.): *Environmental constraints on the structure and productivity of pine forest ecosystems: a comparative analysis*. Copenhagen: Munksgaard, Ecological bulletins, 1994. **43**, 102–114.
- Vyskot M. *Biomass of the tree layer of spruce forest in the Bohemian Uplands*. Praha: Academia, 1981. 396 s.
- Wang, Y.P. *Crown structure, radiation, absorption, photosynthesis and transpiration*. Ph.D. Thesis. Edinburgh: University of Edinburgh, 1988. 187 s.
- Wehner, R., Fukushi, T., Isler, K. On being small: Brain allometry in ants, *Brain Behavior and Evolution*. 2007, **69**(3), 220–228.
- West, P.W. *Tree and Forest Measurement*. 2nd edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. 192 s.
- White, T.L., Adams, W.T., Neale, D.B. *Forest genetics*. CAB International, USA, 2007. 682 s.
- Wiesmeier, M., Prietzel, J., Barthold, F., Spörlein, P., Geuss, U., Hangen, E., Reischl, A., Schilling, B., von Lütow, M., Kögel-Knabner, I. Storage and drivers of organic carbon in forest soils of southeast Germany (Bavaria) – Implications for carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*. 2013, **295**, 162–172.

- Wiesmeier, M., Spörlein, P., Geuss, U., Hangen, E., Haug, S., Reischl, A., Schilling, B., Lützow, M., Kögel-Knabner, I. Soil organic carbon stocks in southeast Germany (Bavaria) as affected by land use, soil type and sampling depth. *Global Change Biology*. 2012, **18**, 2233–2245.
- Wirth, C., Schumacher, J., Schulze, E.D. Generic biomass functions for Norway spruce in central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology*. 2004, **24**, 121–139.
- Xiao, C.W., Ceulemans, R. Allometric relationship for below- and aboveground biomass of young Scots pines. *Forest Ecology and Management*. 2004, **203**, 177–186.
- Xiao, C.W., Yuste, J.C., Janssens, I.A., Roskams, P., Nachtergale, L., Carrara, A., Sanchez, B.Y., Ceulemans, R. Above and belowground biomass and net primary production in a 73-year-old Scots pine forest. *Tree Physiology*. 2003, **23**, 505–516.
- Young, H.E., Chase, A.J. *Fiber weight and pulping characteristics of the logging residue of seven tree species in Maine*, Maine Agricultural Experiment Station, University of Maine, Technical Bulletin 17, 1965. 44 s.
- Zatloukal, V., Apltauer, J., Exnerová, Z., Zahálková, H., Černý, M., Cienciala, E., Tatarinov, F. *Adjustace metod ekosystémové inventarizace zásob uhlíku v souladu s doporučením IPCC pro potřeby Národního sdělení na bázi existujících lesnických šetření a modelová analýza scénářů změn zásob uhlíku podle způsobu obhospodařování a využití dřevní hmoty*. Závěrečná zpráva k projektu MŽP VaV/640/14/03, IFER, Jílové u Prahy, 2006.
- Zhai, M., Biomass and nutrient cycling studies in some mixed stands of pine and maple in Xishan area, Beijing. [In Chinese with English summary]. *Journal of Beijing Forestry*. 1982, **4**, 67–79.
- Zianis, D., Muukkonen, P., Mäkipää, R., Mencuccini, M. *Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species in Europe*. Silva Fennica Monographs 4, Tampere, Finland, 2005. 63 s.