

SEKVESTRACE UHLÍKU SMRKOVÝM POROSTEM (*PICEA ABIES* (L.) KARST.) V OBLASTI DRAHANSKÉ VRCHOVINY

CARBON SEQUESTRATION INTO A SPRUCE STAND (*PICEA ABIES* (L.) KARST.) IN THE DRAHANSKÁ VRCHOVINA UPLAND (CZECH REPUBLIC)

JAN SVĚTLÍK¹⁾ ✉ - JAN KREJZA^{2,3)} - LADISLAV MENŠÍK⁴⁾ - RADEK POKORNÝ^{2,3)} - PAVEL MAZAL⁵⁾ - JIŘÍ KULHAVÝ⁴⁾

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

²⁾Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav zakládání a pěstění lesů, Zemědělská 3,
CZ - 613 00 Brno, Czech Republic

³⁾Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i., Bělidla 986/4a, CZ - 613 00 Brno, Czech Republic

⁴⁾Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav ekologie lesa, Zemědělská 3,
CZ - 613 00 Brno, Czech Republic

⁵⁾Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta,
Ústav hospodářské úpravy lesů a aplikované geoinformatiky, Zemědělská 3, CZ - 613 00 Brno, Czech Republic

✉ e-mail: svetlikj@seznam.cz

ABSTRACT

The three-year monitoring of the basal area increment showed an annual dynamic response of a carbon sequestration into the tree biomass. The destructive analysis of the nine sample trees created the data source for selection of the best model to estimate all fractions of the tree biomass. Since the beginning of investigation (i.e. in 2010), the total biomass of trees in the mature stand (age of 106 years) reached 462.7 t.ha⁻¹, where 16.0 t.ha⁻¹ (i.e. 3.4%) accounts for needles, 42.9 t.ha⁻¹ (i.e. 9.3%) for branches, 1.8 t.ha⁻¹ (i.e. 0.4%) for dead branches, 323.9 t.ha⁻¹ (i.e. 70.0%) for stems, and 78.1 t.ha⁻¹ (i.e. 16.9%) for roots. Considering the different carbon content in the particular biomass fractions, the total carbon stock in trees amounted to 236.2 t.ha⁻¹ (from that ca 83% in above- and 17% in below-ground), when 150.5 t.ha⁻¹ of carbon is accumulated in the soil up to the depth of 1 m (19% was fixed in the humus layer and 81% was found in mineral horizons). The total amount of carbon annually sequestered into tree biomass reached 3.23 t.ha⁻¹ during a "normal-like" year, whereas one year after the selection cut from below (even considerably dry year) trees sequestered about 4.36 t.ha⁻¹ of carbon. Therefore, investigated spruce forest stand performed still as a positive carbon storage despite of its age being close to the harvest time.

Klíčová slova: uhlík, sekvestrace, smrk ztepilý, nadzemní a podzemní biomasa, alometrické vztahy, expanzní faktory, nadložní humus, půda, Dra-hanská vrchovina, Česká republika

Key words: carbon, sequestration, Norway spruce, above- and below-ground biomass, allometric relationships, biomass expansion factors, forest floor, soil, Dra-hanská vrchovina upland, Czech Republic

ÚVOD

V lesních ekosystémech je uloženo více než 50% z celkového uhlíku (C) na Zemi, přičemž tyto ekosystémy mají velký potenciál pro ukládání atmosférického CO₂/snížení emisí/ (LAL 2005; LORENZ, LAL 2010). Lesy mírného pásma pokrývají pouze 8% celkové plochy souše, ale mají zásadní vliv na ukládání uhlíku v globálním měřítku. Odhaduje se, že cca 40% uhlíku se ukládá v oblasti Evropy (NABUURS et al. 1997; LAL et al. 2008; SCHRÖDER, PESCH 2011; WIESMEIER et al. 2013). Problematika kvantifikace zásob a ukládání uhlíku v lesních ekosystémech je spojena na jedné straně se sekvestrací uhlíku do půdy (SCHRÖDER, PESCH 2011; WIESMEIER et al. 2012, 2013; RUIZ-PEINADO et al. 2014; Ni et al. 2015) a na straně druhé do biomasy

dřevin lesních porostů (nadzemní a podzemní) (WIRTH et al. 2004). Otázka časových a prostorových změn ukládání uhlíku porosty různých struktur, zjišťování přesných relací mezi dendrometrickými parametry a biomasou pomocí alometrických rovnic nebo konverzních a expanzních faktorů stanovujících přímo obsah uhlíku je i dnes řešena nedostatečně (LEHTONEN et al. 2007). Řada růstových či výnosových tabulek je odvozována v řadě evropských zemí pouze pro hlavní hospodářské dřeviny, rostoucí navíc v porostních strukturách lesa věkových tříd – monokulturně (ZIANIS et al. 2005). Není zohledněna zvláště různá dynamika růstu dřevin a alokace biomasy do jednotlivých orgánů stromů rostoucích ve směsi s jinými dřevinami, v měnících se podmínkách prostředí, vliv způsobu výchovy, způsobu

hospodaření apod., což ovlivňuje časové i prostorové měřítko v alokaci biomasy, a to nejen ve vertikálním profilu koruny a kmene, ale i půdy. Jednou z nejproblematictějších oblastí v procesu odhadu zásob a sekvestrace uhlíku je přesná kvantifikace celkové zásoby biomasy dřevin a její změny v čase (LÖWE et al. 2000; ALBAUGH et al. 2009; MAREK et al. 2011). Při vlastním odhadu zásoby biomasy se nejčastěji postupuje buď pomocí: (a) alometrických rovnic (např. MARKLUND 1987; ZIANIS et al. 2005; MAREK et al. 2011; ČIHÁK et al. 2012), nebo (b) expanzních faktorů (např. LEHTONEN et al. 2004; MAREK et al. 2011). Alometrické rovnice popisují vztah mezi jednoduše měřitelnými dendrometrickými parametry kmene či koruny a biomasou jednotlivých orgánů, případně celého stromu. Kvantifikace biomasy v určité lokalitě je nepřesnější právě v případě použití lokálních alometrických rovnic; příklad těchto rovnic pro mladou vrchovinnou a horskou smrčinu uvádí MARKOVÁ a POKORNÝ (2011) nebo POKORNÝ a TOMÁŠKOVÁ (2007). Další možností je použití obecných modelů pro výpočet biomasy, které jsou konstruovány z rozsáhlého souboru dat. Jako příklad lze uvést modely dle WIRTH et al. (2004), kteří sestavili a seřadili alometrické rovnice od jednoduchých, kde je biomasa odvozována pouze na základě dendrometrických veličin (výčetní tloušťka, výška stromu) až po složitější, kde kromě zmíněných veličin vstupují i parametry jako je délka koruny stromu, věk, nadmořská výška a bonita stanoviště. Dalším způsobem pro odhad biomasy porostu je využití expanzních faktorů (BEFs). Expanzní faktory slouží k odhadu celkové biomasy na úrovni stromu, porostu z dat národních inventarizací lesů (LEHTONEN et al. 2004; TOBIN, NIEUWENHUIS 2007; MAREK et al. 2011). Používané BEFs vyjadřují násobek celkové biomasy, případně jejích složek (např. jehlice, větve, kořeny) k objemu nebo hmotnosti kmene stromu.

Cílem této studie bylo kvantifikovat zásobu a ukládání (sekvestraci) uhlíku na úrovni lesního porostu – dospělé smrkové monokultury v první generaci po původním smíšeném lese ve věku 106–108 let v oblasti Dražanské vrchoviny na kambizemi modální oligotrofní jedlo-bukového lesního vegetačního stupně v nadmořské výšce 620–630 m n. m.

MATERIÁL A METODIKA

Charakteristika zájmové oblasti a lesních porostů výzkumné stanice

Výzkum probíhal na ekosystémové stanici Rájec – Němčice (49°26'37''s.š., 16°41'48''v.d.) zařazené do mezinárodní sítěILTER (www.ilternet.edu). Stanice leží v oblasti Dražanské vrchoviny, která se rozprostírá v délce asi 50 km mezi Brnem a Chornicí (SKOŘEPA 2006). Nachází se v přírodní lesní oblasti (30) – Dražanská vrchovina, která je značně lesnatá (55%; NIKL 2000) a její rozloha činí 2,74% rozlohy České republiky. Byla zkoumána smrková monokultura (SM) v první generaci na stanovišti původně smíšeného porostu v nadmořské výšce 620–630 m n. m. (KLIMO, MARŠÁLEK 1992). Podrobnou charakteristiku studovaného porostu včetně základních dendrometrických charakteristik uvádí tab. 1, obr. 1.

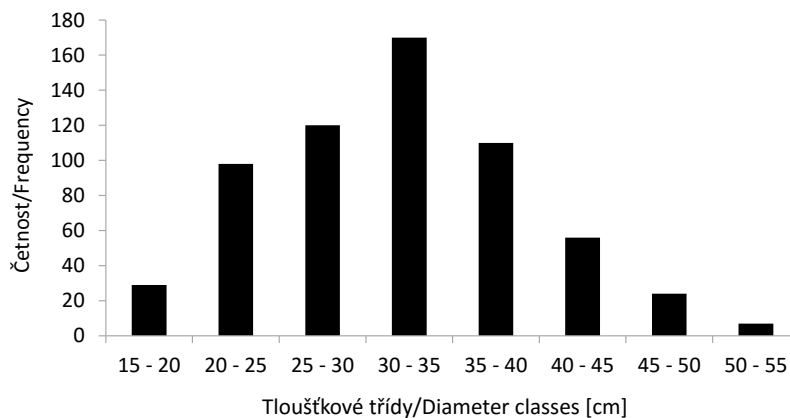
Mateční horninou je hlubinná hornina kyselý granodiorit (KLIMO, MARŠÁLEK 1992). Půdním typem je kambizem modální oligotrofní (NĚMEČEK et al. 2011).

Podle Quitta (QUITT 1971) se výzkumná plocha nachází v klimatické oblasti MT3. Průměrná roční teplota vzduchu činí 6,3 °C (stanice Protivanov), s nejvyšší teplotou v červenci (15,8 °C) a nejnižší v lednu (- 4,1 °C), průměrný roční úhrn srážek je 638 mm (CHMI 2014).

Tab. 1.

Základní charakteristiky smrkového porostu ekosystémové stanice Rájec – Němčice z roku 2010
Basic spruce stand characteristics in the ecosystem station Rájec – Němčice in 2010

Porost/ Stand	Věk/ Age	Dřevinné složení/ Tree species composition (%)	N.ha ⁻¹	Průměrné DBH/Mean DBH (cm)	Průměrná H/ Mean height (m)	Průměrná délka živé koruny/Mean living crown length (m)	Zakmenění/ Stocking	Forma nadložního humusu/Form of humus layer
Smrkový porost/ Spruce stand	106	SM 100	614	31,9	31,3	10,1	1	moder



Obr. 1.

Četnosti rozdělení stromů dle tloušťkových tříd ve smrkovém porostu v ekosystémové stanici Rájec – Němčice v roce 2010

Fig. 1.

Trees frequency per diameter classes in the ecosystem station Rájec – Němčice in 2010

Konkrétní mikroklimatické charakteristiky v zájmovém období v letech 2010–2012 uvádí tab. 2.

Smrkovou monokulturu lze zařadit do skupiny typů geobiocény (STG) 4AB3 – *Fageta quercino abietina* až 5AB3 – *Abieti fageta* (ŠTYKAR 2002). Podle typologického systému Ústavu pro hospodářskou úpravu lesa je výzkumná plocha zařazena do lesního typu 5S1 – svěží jedlová bučina šťavelová. Tloušťková struktura porostu se pohybovala v intervalu od 16,4 cm do 53,2 cm. Nejpočetnější tloušťkovou třídou v roce 2010 byla třída 30–35 cm s počtem 170 stromů z celkového množství 614 stromů (obr. 1).

Dendrometrické charakteristiky

Dendrometrické charakteristiky stromů byly zjišťovány elektronickou průměrkou (Haglöf Sweden AB) a výškoměrem Vertex (Haglöf Sweden AB) standardními postupy. Měřena byla výčetní tloušťka kmene (DBH) všech stromů na ploše. Tloušťkový přírůst, resp. objemové změny kmene byly monitorovány pomocí páskových dendrometrů (EMS Brno). Manuální odečítání dendrometrů bylo prováděno v týdenních intervalech s výjimkou roku 2012, kdy bylo provedeno pouze osm záznamů. Celkový počet dendrometrů byl 42. Jejich umístění bylo rovnoměrné do tří základních tříd sociálního postavení stromů (stromy nadúrovňové, úrovňové a podúrovňové).

Efektivní (nekorigované) hodnoty indexu listové plochy (LAI) lesního porostu byly stanoveny nepřímou metodou měřením tzv. transmitance sluneční radiace pomocí přístroje ALAI-02D (Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i.). Měření na volné ploše i na měřičských stanovištích pod korunovou vrstvou (22 měřičích bodů) bylo prováděno za stálé synoptické situace, resp. za podmínek rovnoměrně zatažené oblohy cca 1× za 14 dní. Podrobný popis a stanovení LAI tímto přístrojem popisuje POKORNÝ et al. (2001) a POKORNÝ (2015).

Stanovení biomasy (jehlice, větve, kmene)

Pro zjištění biomasy jednotlivých frakcí bylo vybráno devět vzorníkových stromů rostoucích na výzkumné ploše reprezentujících hlavní sociální třídy. Kácení vzorníků proběhlo v únoru 2010. Hlavními zjišťovanými parametry vzorníkových stromů byly vedle biomasy kmene, jehlic, živých a suchých větví také výčetní tloušťka kmene (DBH), tloušťka kmene ve 3 (D3) a v 5 metrech od paty stromu (D5), výška stromu (H), délka koruny (CL), maximální poloměr koruny (CR), věk vzorníku (A), dále tloušťkový přírůst za posledních 5 let (I5), tloušťka kůry (BT) a věk (T) ve výšce 1,3 m od paty kmene. Pro celý 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 na ploše (DBH_{max}), nadmořskou výšku porostu (HSL) a souřadnice plochy (NC).

Stanovení expanzních faktorů bylo provedeno na základě měření při stanovení biomasy vzorníkových stromů. Pro výpočet byly použity rovnice:

$$BEF(V)_i = \frac{W_i}{V} \quad BEF(m)_i = \frac{W_i}{V \cdot \rho} \quad (1, 2)$$

kde W_i – představuje biomasu frakce i , V – objem kmene, ρ – hustotu dřeva 0,4 g.cm⁻³ (MAREK et al. 2011).

Odběry vzorků nadložního humusu a půdy

Vzorky pro zjištění zásoby uhlíku v povrchovém (nadložním) humusu (vrstvy L, F, H) byly odebrány vždy na podzim (říjen/listopad) let 2007, 2008 a 2009 za pomoci kovového rámu (MENŠÍK et al. 2009) o ploše 0,1 m² v deseti opakováních v každém jednotlivém roce pro jednotlivé vrstvy nadložního humusu (NĚMEČEK et al. 2011). Vzorky pro chemické analýzy nadložního humusu (vrstvy L, F, H) a půdy (horizonty Ah, Bv) se odebíraly ve stejných obdobích, a to ve třech opakováních v každé jednotlivé vrstvě, resp. půdním horizontu. Odumřelá biomasa (mrtvé dřevo) se na ploše v hodnoceném období nenacházela, a proto není zahrnuta v celkové uhlíkové bilanci dle IPCC (2006).

Uhlík v biomase, nadložním humusu a půdě

Uhlík v biomase, nadložním humusu a v půdě byl stanoven jako C_{total} na analyzátoru LECO TruSpec (MI USA), dle ZBÍRAL et al. (2011). Výpočet celkové zásoby uhlíku v biomase na porostní úrovni byl proveden podle nejvhodnější zjištěné alometrické rovnice a průměrného obsahu uhlíku dle jednotlivých frakcí.

Modely pro odhad frakcí biomasy

Bylo vybráno celkem 104 publikovaných alometrických rovnic, z toho 28 pro biomasu jehlic, 29 pro větve, 15 pro suché větve, 15 pro kmen a 17 pro biomasu kořenů. Pro testování všech zvolených rovnic bylo nutné dosazení 15 parametrů vzorníků a porostu uvedených výše v různých kombinacích. Pro výběr nejvhodnější alometrické rovnice dané frakce bylo hlavním posuzovacím kritériem NSE (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient; NASH, SUTCLIFFE 1970). NSE při vzájemném porovnávání modelových a skutečných hodnot dosahuje hodnot $-\infty$ až +1. NSE indikuje těsnost proložení modelových a skutečných hodnot na přímce 1:1, 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 hodnot NSE < 0 dosahují modely, kde prostý průměr naměřených hodnot je lepší hodnota než odhad příslušného modelu (MORIASI et al. 2007).

Tab. 2.

Roční průměrné hodnoty teplot vzduchu a půdy, vlhkosti půdy a celkový roční úhrn srážek nad a pod porostem na ekosystémové stanici Rájec – Němčice v letech 2010–2012

Annual means of air and soil temperatures, soil moisture and annual amount of precipitation above and below the canopy in the ecosystem station Rájec – Němčice during the years 2010–2012

Parametr/Parameter	2010	2011	2012
Průměrná roční teplota vzduchu/Mean annual air temperature (°C)	6,16	7,61	7,38
Teplota půdy v 10 cm/Mean annual soil temperature in the depth of 10 cm below the surface (°C)	6,36	6,24	6,32
Teplota půdy ve 30 cm/Mean annual soil temperature in the depth of 30 cm below the surface (°C)	6,32	6,29	6,27
Vlhkost půdy 0–30 cm/Mean annual soil moisture in the layer of 0-30 cm from the surface (%)	23,77	19,4	19,2
Roční úhrn srážek/Annual precipitation above the canopy (mm)	847,1	552,7	525,9
Roční úhrn podkorunových srážek/Annual precipitations below the canopy (mm)	638,0	316,6	369,7

Biomasa kořenů

Biomasa kořenů nebyla stanovena u pokácených vzorníků z výzkumné plochy. Pro posouzení vhodnosti stávajících modelů byly použity rozborů 30 vzorníků ve věku 50–72 let rostoucích v těsné blízkosti hodnocené plochy (Rájec nad Svitavou – porosty 813b2 a 810d1) z práce Vyskota (VYSKOT 1981). Předpokládáme, že alometrické rovnice odhadu biomasy kořenů vyhovující těmto předmýtním porostům jsou vhodné i pro současný věk a dimenze stromů výzkumné plochy. V případě alometrických rovnic pro kořeny prezentovaných Marklundem (MARKLUND 1988) byl vždy použit součet ze dvou rovnic. Ten ve své práci totiž rozděluje biomasu kořenů na kořeny větší a menší tloušťky než 5 cm. Pro každou frakci uvádí 3 rovnice, proto bylo testováno celkem 9 modelů (všechny kombinace) odhadu biomasy kořenů.

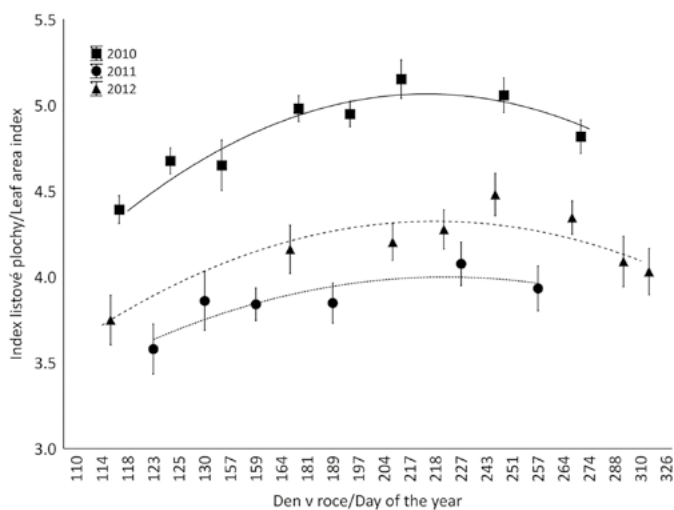
VÝSLEDKY

Index listové plochy

Nejvyšších hodnot indexu listové plochy ve sledované smrkové monokultuře bylo dosaženo v roce 2010. Pokles v roce 2011 byl způsoben předmýtní těžbou provedenou v zimním období 2010/2011 (obr. 2). V každoroční kulminaci indexu listové plochy nebyl zaznamenán větší rozdíl v rámci sledovaného období a tento index vždy kulminoval mezi 217. až 227. dnem v roce sledovaného období. Tímto kulminacním bodem končí pozitivní nárůst indexu listové plochy a sekvestrace uhlíku do biomasy jehlic je tak ukončena.

Kumulativní přírůst kruhové výčetní základny

Průměrný kumulativní přírůst výčetní kruhové základny znázorňuje obr. 3. V letech 2010–2012 začínal 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. až 241. dnem v roce. U stromů podúrovňových byl tloušťkový



Obr. 2.

Vývoj indexu listové plochy (LAI) smrkového porostu v ekosystémové stanici Rájec – Němčice v období let 2010–2012

Fig. 2.

Leaf area index (LAI) development of the spruce stand in the ecosystem station Rájec – Němčice during the years 2010–2012



Obr. 3.

Průměrný kumulativní přírůst výčetní kruhové základny stromů různých sociálních tříd na ekosystémové stanici Rájec – Němčice v období let 2010–2012

Fig. 3.

Mean cumulative increment of stem basal area at the breast height per different social-status classes in the ecosystem station Rájec – Němčice during the years 2010–2012

přírůst minimální. Z toho vyplývá, že převážná část ukládání uhlíku do biomasy kmene se uskutečňuje v průběhu 100 až 120 dní v roce.

Celkový roční přírůst kruhové výčetní základny kmene v roce 2010 byl nejnižší a činil 0,27 dm² u průměrného nadúrovňového, 0,14 dm² úrovňového a 0,01 dm² podúrovňového stromu. Naopak největší přírůst byl zaznamenán v roce 2012 a dosáhl 0,35 dm² u průměrného nadúrovňového, 0,21 dm² úrovňového a 0,06 dm² podúrovňového stromu. Ve výsledcích roku 2012 je patrná pozitivní reakce stromů na uvolnění z důvodu předemtní těžby. Tato reakce byla nejpozitivnější u stromů podúrovňových, u kterých byl zaznamenán zřetelně vyšší přírůst kruhové základny.

Stromová biomasa (jehlice, větve, kmeny, kořeny)

Jednotlivé složky biomasy byly porovnány s modelovými hodnotami vybraných alometrických rovnic. Typy modelů a nejvyšší hodnoty NSE jsou uvedeny v tab. 3.

Nejvhodnější použitý model pro dané stanoviště pro výpočet sušiny jehličí podle NSE byl sledován model typu DHA+C podle Wirtha (WIRTH et al. 2004, tab. 4). Tento model jako vstupní parametry vyžaduje DBH, H, A, a CL pro všechny stromy v porostu.

Nelepší shodu se zjištěným množstvím větví vzorníkových stromů vykazoval model podle Hochbichlera (HOCHBICHLER et al. 2006). Pro

Tab. 3.

Porovnání vybraných modelů s frakcemi vzorníkových stromů z ekosystémové stanice Rájec – Němčice. NSE (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient) 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

Comparison of chosen biomass models and sampled trees biomass fractions in the ecosystem station in Rájec – Němčice. NSE (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient) represents the highest value within a fraction and the particular study. The best models for the given fraction are in bold

Frakce/ Fraction		Wirth et al. (2004)	Marklund (1987)	Marklund (1988)	Johansson (1999)	Černý (1990)	Briggs, Cunia (1982)	Cienciala et al. (2005)	Schwarzmeier (2000)	Hochbichler et al. (2006)	Ilg (2002)	Dietrich et al. (2002)	Hakila (1991)	Lehtonen (2005)	Schöpfer (1961)	Mund et al. (2002)	Drexhage, Gruber (1999)	Lee (1998)	Drexhage, Collin (2001)	Lee (2001)	počet/count	
Jehlice/ Needles	M1	6	3	4	3	2	2		2	1	1		1	1	1	1						28
	NSE2	0,85	0,78	0,77	0,22	0,47	-0,94		0,59	-0,66	0,06		-1,13	-0,62	0,22	-0,52						
Větve/ Branches	M	4	3	4	3	2	6		4	1	1					1						29
	NSE	0,83	0,87	0,83	0,77	0,86	0,91		0,02	0,92	-0,64					0,79						
Mrtvé větve/dead branches	M	4	3	4				2	1				1									15
	NSE	0,62	-0,18	0,32				0,42	-0,29				-1,56									
Kmen/ Stem	M	3	3	3	3				2			1										15
	NSE	0,96	0,97	0,95	0,24				0,81			0,94										
Kořeny/ Roots	M	4		9													1	1	1	1		17
	NSE	0,83		0,83													0,62	-0,61	0,65	-0,09		

¹M – počet modelů/number of models, ²NSE – kritérium podle NASH, SUTCLIFFE (1970)/Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NASH, SUTCLIFFE 1970)

Tab. 4.

Seznam nejlepších a použitých modelů pro odhad biomasy frakcí smrkového porostu v ekosystémové stanici Rájec – Němčice
The list of the best and used models for estimation biomass fractions in the spruce stand at the ecosystem station Rájec – Němčice

Frakce/ Fraction		Nejlepší modely/The best models	Autor/Author
Jehlice/ Needles	B,U	$\ln(W) = -1,18863 + 3,33792 \cdot \ln(DBH) - 0,24482 \cdot (\ln(DBH))^2 - 3,31885 \cdot \ln(H) + 0,49368 \cdot (\ln(H)) - 2 \cdot 0,13463 \cdot \ln(A) + 0,85797 \cdot \ln(CL)$	Wirth et al. (2004)
	B,U	$\ln(W) = -5,04936 + 2,73927 \cdot \ln(DBH) - 0,0886 \cdot \ln(H)$	Hochbichler et al. (2006)
Mrtvé větve/Dead branches	B,U	$\ln(W) = -1,21969 + 1,49138 \cdot \ln(DBH) - 1,25928 \cdot \ln(H) + 0,18222 \cdot \ln(A \cdot DBH)$	Wirth et al. (2004)
	B	$\ln(W) = (-2,3389 + 7,4471 \cdot DBH / (DBH + 14) + 0,0203 \cdot H + 0,7256 \cdot \ln(H) + 0,0517 \cdot \ln(T)) \cdot 1,023$	Marklund (1987)
Kmeny/ Stems	U	$\ln(W) = -2,83958 + 2,55203 \cdot \ln(DBH) - 0,14991 \cdot (\ln(DBH))^2 - 0,19172 \cdot \ln(H) + 0,25739 \cdot (\ln(H)) - 2 \cdot 0,08278 \cdot \ln(A)$	Wirth et al. (2004)
	B,U	$\ln(W) = -8,15491 + 4,08262 \cdot \ln(DBH) - 0,28378 \cdot (\ln(DBH))^2 + 0,34963 \cdot \ln(A) + 0,2452 \cdot \ln(CL)$	Wirth et al. (2004)

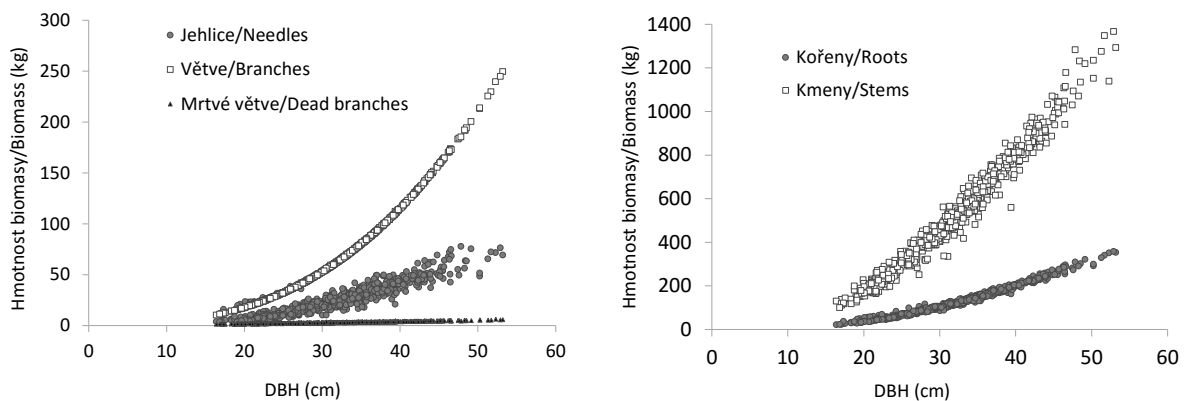
B – nejlepší model podle NSE/the best model with highest NSE; U – použitý model k odhadu biomasy/model used for the biomass estimation

tento model bylo zapotřebí dosadit pouze hodnoty DBH a H. Mrtvé větve celkově dosahovaly nejnižších hodnot NSE. Pouze u sedmi zvolených modelů z 15 testovaných dosahovala NSE hodnot vyšších než nula. Nejlépe pak vyhovovala funkce s DBH, H a A podle Wirtha (WIRTH et al. 2004) s NSE = 0,62.

Biomasu kmene vzorníků nejlépe (NSE = 0,9676) vystihovala funkce DBH, H a T podle Marklunda (MARKLUND 1987). Nicméně vzhledem k potřebě vložení těžce měřitelného a pro celý studovaný porost neznámého parametru T (věk stromu ve výčetní výšce) do alometrické rovnice byla nakonec použita rovnice podle Wirtha (WIRTH et al. 2004) s nepatrně nižším NSE (0,9646). Vypočítané hodnoty frakcí podle použitých modelů jsou znázorněny na obr. 4.

Celková biomasa stromů smrkového porostu v roce 2010 na ekosystémové stanici Rájec – Němčice dosahovala 462,7 t.ha⁻¹, z toho tvořili 16,0 t.ha⁻¹ jehlice; 42,9 t.ha⁻¹ větve; 1,8 t.ha⁻¹ mrtvé větve; 323,9 t.ha⁻¹ kmeny a 78,1 t.ha⁻¹ kořeny. Rozložení zásoby biomasy stromů dle tloušťkových tříd je znázorněno na obr. 5.

Pro devět vzorníkových stromů byly vypočítány expanzní faktory podle vzorců (1, 2). Hodnoty BEF(V) se pohybovaly v intervalu od 0,48 do 0,56 v případě stanovení nadzemní biomasy a v intervalu od 0,57 do 0,65 pro celkovou biomasu. Pro odhad nadzemní biomasy z objemu kmene a hustoty dřeva se BEF(m) pohyboval v intervalech 1,20–1,41 a 1,43–1,63 pro celkovou biomasu.

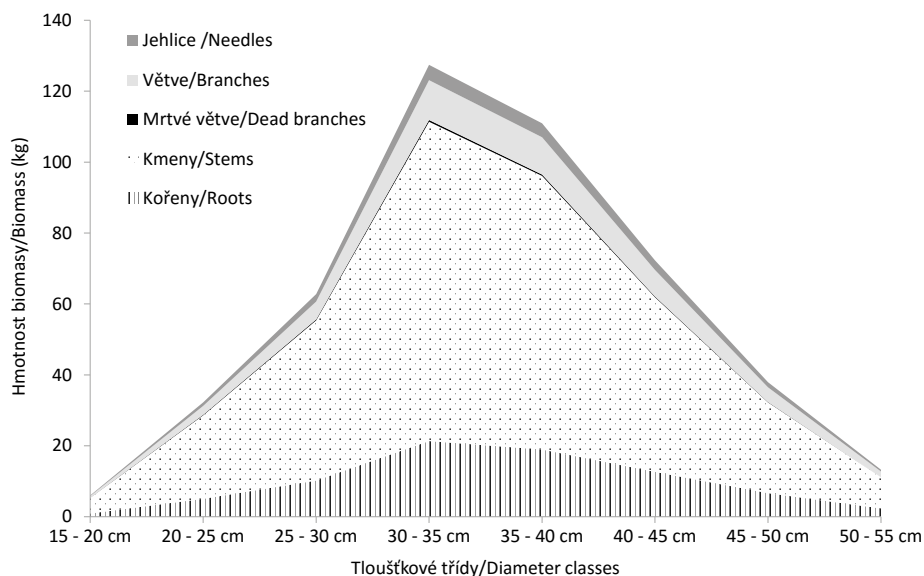


Obr. 4.

Modelové hodnoty frakcí biomasy jednotlivých stromů v ekosystémové stanici Rájec – Němčice

Fig. 4.

Estimated biomass fractions of the single tree at the ecosystem station Rájec – Němčice



Obr. 5.

Modelová zásoba biomasy stromů pro jednotlivé tloušťkové třídy a frakce ve smrkovém porostu v ekosystémové stanici Rájec – Němčice v roce 2010

Fig. 5.

Simulated biomass of trees according to individual stem fractions and diameter classes and fractions in spruce stand at the ecosystem station Rájec – Němčice in 2010

V důsledku užití konstantní hustoty dřeva ($0,4 \text{ g.cm}^{-3}$) se v tomto případě neliší celkový odhad biomasy dle vzorce BEF(V) a BEF(m). Aplikací expanzních faktorů na sledovanou smrkovou monokulturu byla stanovena nadzemní biomasa na $404,8 \text{ t.ha}^{-1}$ a celková biomasa $478,1 \text{ t.ha}^{-1}$.

Uhlík v jednotlivých frakcích biomasy (jehlice, větve, dřevo, kůra, kořeny)

Vážený průměr obsahu uhlíku v suché biomase porostu byl zjištěn ve výši 51,1 %. Hodnoty obsahu uhlíku pro jednotlivé frakce uvádí tab. 5. Největší podíl uhlíku v suché biomase byl zaznamenán u živých větví a naopak nejmenší podíl u mrtvých větví.

Množství uhlíku vázaného v biomase (nadzemní i pozemní) dle jednotlivých frakcí je uveden v tab. 6. Nejvíce uhlíku je vázáno v biomase kmenů, a to 69,92 % z celkového uhlíku uloženého v biomase. S podílem 16,80 % následují kořeny. Naopak v mrtvých větvích je vázáno nejméně uhlíku z celkové biomasy stromu, a to pouze 0,39 %. Celkem je ve sledovaném porostu v biomase stromů podle modelových výpočtů vázáno 236,16 t uhlíku. Nejvíce je ho akumulováno v kmenech nejčtetnější tloušťkové třídy 30–35 cm a následně ve třídě 35–40 cm.

Průměrná roční sekvestrace uhlíku dospělou smřčinou v období 2010–2012 byla $3,47 \text{ t.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ do biomasy. Propad v roce 2011 byl způsoben předmýtní úmyslnou těžbou provedenou během zimy 2010–2011 s intenzitou tvořící v celkové zásobě uhlíku $21,54 \text{ t.ha}^{-1}$ vázaného ve 119 vytěžených stromech. Po uvolnění zbývajících stromů předmýtní těžbou se pozitivně projevilo v roce 2012, kde byla sekvestrace uhlíku nejvyšší a to $4,36 \text{ t.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ (obr. 6).

Tab. 5.

Průměrný obsah uhlíku v biomase jednotlivých orgánů stromů ve smrkovém lese v ekosystémové stanici Rájec – Němčice v roce 2010
Mean carbon content in the biomass fractions of spruce stand at the ecosystem station Rájec – Němčice in 2010

	Jehlice/Needles	Větve/Branches	Mrtvé větve/ Dead branches	Kmen/Stems	Kořeny/Roots*
Obsah uhlíku/Carbon content (%)	50,45	52,04	50,20	50,98	50,8

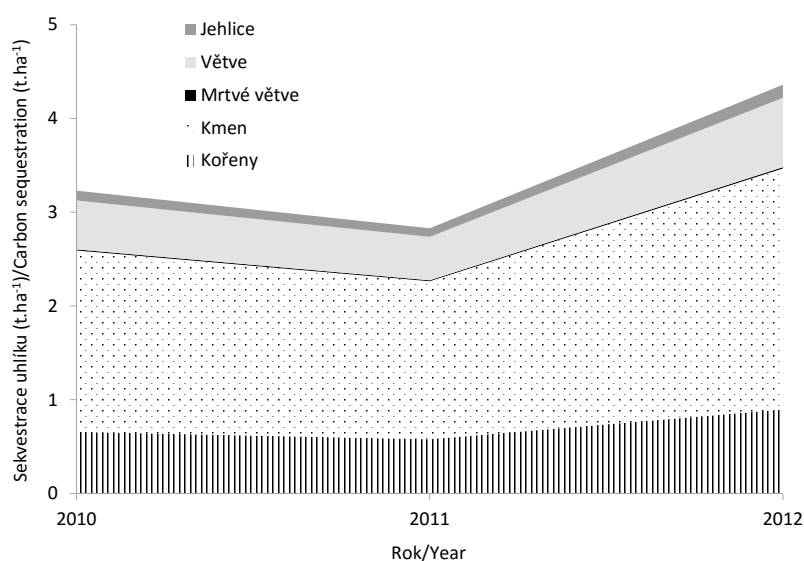
*Obsah uhlíku v kořenech byl převzat z literatury podle GORDON et al. (2005)/Mean carbon content in roots according to GORDON et al. (2005)

Tab. 6.

Absolutní a procentuální podíl zásob uhlíku ve stromech podle stromových frakcí ve smrkovém porostu v ekosystémové stanici Rájec – Němčice v roce 2010

Absolute and relative carbon stock in the fractions of trees in the spruce stand at the ecosystem station Rájec – Němčice in 2010

	Jehlice/Needles	Větve/Branches	Mrtvé větve/ Dead branches	Kmen/Stems	Kořeny/Roots	Celkem/Total
Zásoba uhlíku/Carbon stock (t.ha^{-1})	8,09	22,34	0,92	165,13	39,68	236,16
%	3,43	9,46	0,39	69,92	16,80	100,00



Obr. 6.

Sekvestrace uhlíku dospělou smřčinou v ekosystémové stanici Rájec – Němčice v letech 2010–2012 dle frakcí

Fig. 6.

Carbon sequestration of the mature spruce forest per the particular fractions at the Ecosystem station Rájec – Němčice in 2010–2012

Uhlík v půdě

Obsah uhlíku byl ve smrkovém porostu v období 2007–2009 stanoven v povrchovém humusu ve vrstvách L, F a H a činil ve shodném pořadí 49,3 %, 45,9 % a 32,2 %. V organo-minerálním horizontu půdy (Ah) byl obsah uhlíku 5,7 % a v horizontu Bv 1,7 % (tab. 7). Zásoba uhlíku v nadložním humusu dosahovala 28,8 t.ha⁻¹, v minerální půdě do hloubky 100 cm dosáhla 121,7 t.ha⁻¹. Celková zásoba uhlíku v nadložním humusu a půdě do hloubky 100 cm v porostu smrku tak byla 150,5 t.ha⁻¹ (podrobně viz tab. 7.).

vytrváním a opadem listoví (Vose et al. 1994). Výsledky potvrdily pozitivní vliv redukce počtu stromů na nárůst efektivní listové plochy stimující tvorbu biomasy (HARRINGTON, REUKEMA 1983; WANG 1988; POKORNÝ et al. 2008). Změnou struktury porostu předmýtní těžbou došlo ke zvýšení tloušťkového přírůstu ponechaných stromů všech sociálních tříd. Dle Pretzsch (PRETZSCH 2009) je tloušťkový růst kmene ovlivněn převážně věkem, sociálním postavením stromu, výchovou, strukturou porostu a klimatickými podmínkami. Tuto skutečnost dokládají i meziroční změny v dynamice přírůstu sledovaných stromů.

Tab. 7.

Koncentrace a zásoba uhlíku v nadložním humusu a minerální půdě (2007–2009)
Carbon concentration and carbon content in the humus layer and mineral soil horizon (2007–2009)

Vrstva, horizont/ Layer, horizon	Mocnost vrstvy, horizontu/Layer, horizont thickness	Zásoba nadložního humusu/Mass of humus layers	Objemová hmotnost půdy/Soil density	Obsah skeletu/ Skeleton content	Obsah uhlíku/ Carbon content	Zásoba uhlíku podle vrstev a horizontů/ carbon stock in layers and horizons	Zásoba uhlíku v nadložním humusu a v půdě/Carbon stock in humus layer and mineral soil	Celková zásoba uhlíku/Total carbon stock
L	1	12,6	-	-	49,3	6,2		
F	3	25,5	-	-	45,9	11,7	28,8	
H	3	33,8	-	-	32,2	10,9		
Ah	1	-	1173	-	5,7	6,7		150,5
Bv	50	-	1476	20	1,7	91,8	121,7	
Cd	50	-	1658	30	0,4	23,2		

Pozn: počet odebraných vzorků pro stanovení obsahu uhlíku v každé vrstvě/horizontu půdy byl v každém roce tři; obsah uhlíku v Cd horizontu byl převzat z literatury (ve výši 0,4 % ze stejné plochy; KLIMO 1992); objemová hmotnost půdy stanovená v roce 2009 byla převzata z práce ROČEN (2009).

DISKUSE

Stanovení zásoby uhlíku z pohledu evropského a světového lesnictví je často diskutovaná problematika, což dokládá i množství vědeckých prací zaměřených na toto téma (např. KAUPPI et al. 1992; KARJALAINEN 1996; MARTIN et al. 1998; GOODALE et al. 2002). V českém lesnictví existuje pouze omezené množství zdrojů, jako např. SVOBODA et al. (2006), CIENCIALA et al. (2008) či MAREK et al. (2011). Podobně dosud nebylo publikováno mnoho výstupů s obecnými alometrickými rovnicemi pro odvození nadzemní a především podzemní biomasy dřevin v oblasti České republiky. K dispozici jsou pouze lokální rovnice, a to spíše pro mladší smrkové porosty (ČERNÝ 1990; POKORNÝ, TOMÁŠKOVÁ 2007; MARKOVÁ, POKORNÝ 2011; KREJZA et al. 2013). Při stanovení biomasy se tak používají obecné modely, které jsou parametrizované pro evropské podmínky (MARKLUND 1988; WIRTH et al. 2004). Jak však ukazují závěry této studie, přesto může použití těchto modelů přinášet poměrně přesné výsledky. Nutné je však posouzení vhodnosti použitého modelu.

Validace modelů v této studii proběhla na základě destrukční analýzy devíti vzorníkových stromů ve sledovaném porostu. Pomocí kritéria NSE (NASH, SUTCLIFFE 1970) byly vybrány nejvhodnější rovnice, podle kterých se následně odhadovala celková zásoba biomasy a uhlíku a změny zásob v několika vybraných letech. Roční dynamiku sekvestrace uhlíku do biomasy listoví a kmene lze pozorovat na základě pravidelného stanovení hodnoty LAI a sledování vývoje tloušťky kmene stromů přírůstovými dendrometry. Dynamika vývoje LAI koresponduje s vývojem porostu (zvětšováním korun) a tvorbou korunového zápoje, v důsledku rozvoje listoví a větví, resp. fenologií – rašením,

Analýza dílčích alometrických rovnic ukázala, že modely uvedené Wirthem (WIRTH et al. 2004) lze považovat za velmi vhodné pro daný porost. Pouze v případě odhadu biomasy větví bylo i přes vysokou hodnotu NSE (0,83) nalezeno dalších pět rovnic s vyšším NSE. Odhad biomasy větví byl proto proveden podle Hochbichlera (HOCHBICHLER et al. 2006). Modely odhadu biomasy suchých větví celkově dosahovaly nejnižších hodnot NSE při porovnání se vzorníkovými stromy. Nicméně hodnota NSE 0,62, kterou dosáhl Wirthův model (WIRTH et al. 2004) splňuje použitelnost pro danou lokalitu. Nejvhodnější model pro odhad biomasy kmenů se jeví Marklundův (MARKLUND 1988) s NSE = 0,9676, nicméně jeho použitelnost ztěžuje požadovaný parametr věku stromu ve výčetní výšce, který nelze zjistit pro všechny stromy na ploše. Proto byl vyhodnocen jako vhodnější model podle Wirtha (WIRTH et al. 2004), i přes nepatrně nižší hodnotu NSE (0,9646), kde vstupuje parametr věku celého porostu. Model pro biomasu kořenů byl ověřen daty z dřívějšího vzorkování (VYSKOT 1981). Jako nejlepší byl indikován Wirthův model (WIRTH et al. 2004) s NSE = 0,8298. Avšak i model podle Marklunda (MARKLUND 1988) vykazoval poměrně vysokou shodu s daty (NSE = 0,8280).

Expanzní faktory biomasy mají větší potenciální využití zejména pro odhad biomasy stromů rozsáhlých území se stejnověkými porosty. Protože vstupujícím parametrem je objem kmene, případně právě věk a BEF figuruje jako konstanta, lze tento přepočít používat na úrovni celých porostů bez nutnosti zjišťování tloušťkové struktury porostu, což je potřebné v případě alometrických vztahů. U biomasy devíti vzorníkových stromů byl průměrný BEF pro nadzemní biomasu 1,3, což plně koresponduje se závěry práce MAREK et al. (2011). ČIHÁK

et al. (2012) uskutečnili v oblasti Orlických hor obdobnou studii. Podíl dřeva v celkové nadzemní biomase smrků s věkem 139 let tvořil 79,7%, čemuž odpovídá BEF 1,25, tedy nepatrně nižší hodnota než byla zjištěna na ekosystémové stanici Rájec – Němčice. Stanovení biomasy kořenů nebylo součástí porostního šetření, nicméně reciproční odvození expanzních faktorů biomasy kořenů z alometrických rovnic podle Wirtha (WIRTH et al. 2004) i koeficient pro podzemní biomasu MAREK et al. (2011) udává shodně hodnotu 1,2. Vzhledem k vysoké korelaci nadzemní biomasy vzorků s nejlepšími modelovými hodnotami a shodě BEF pro nadzemní biomasu (MAREK et al. 2011) předpokládáme, že zde uváděný odhad biomasy kořenů odráží reálnou skutečnost. Rovněž odhad celkové biomasy porostu podle expanzních faktorů ($478,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) byl pouze o 3,3% vyšší než odhad pomocí nejlepších alometrických rovnic.

Lesy významně přispívají k celkové uhlíkové bilanci. Změny v příjmu uhlíku lesními ekosystémy mohou působit jako důležitá zpětná vazba na současné zvyšování koncentrace atmosférického oxidu uhličitého (MALHI et al. 1999). Studovaná smrková monokultura ve věku 106–108 navázala do biomasy průměrně $3,47 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ uhlíku ročně. Největší množství uhlíku bylo fixovaného v roce 2012 ($4,36 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$), kdy se projevilo zvýšení fixace uhlíku díky předchozí těžbě v zimním období 2010/2011. Srovnatelné výsledky jsou uváděny i v ostatních evropských pracích ve starších smrkových porostech, např. GRÜNWALD, BERNHOFER (2007) $4\text{--}7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, BERNHOFER et al. (2003) uvádí pro rok 1997 sekvestraci na lokalitách Solling $4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ a Aberfeldy $6,24 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$.

Nadložní organické horizonty (nadložní humus) jsou specifickou součástí půdního profilu lesních porostů, které vznikají akumulací odumřelé biomasy (KONŠEL 1931; MAŘAN, KÁŠ 1948 aj.). Zásoba a mocnost nadložního humusu ve smrkovém porostu byla zjištěna ve výši $71,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (L $12,6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, F $25,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ a H $33,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$). V šetřené ploše zjistil KLIMO (1992) celkovou zásobu povrchového humusu ve výši $49,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ v roce 1975 (ve vrstvách L $12,4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, F $15,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, H $21,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$). Dále v roce 1982 uvádí $11 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ve vrstvě L, $15,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ve vrstvě F a $22,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ve vrstvě H. V porovnání s předchozími výzkumy je patrný nárůst biologického materiálu, a to hlavně ve vrstvě H ve smrkovém porostu. Zásoba uhlíku v nadložním humusu pod porostem smrku činí $28,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (vrstva L – $6,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$; F – $11,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$; H – $10,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$), zásoba uhlíku v půdě v horizontech Ah, Bv a Cd (do hloubky 100 cm) pak $150,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Pro porost smrku ve věku 70–80 let (KLIMO, KULHAVÝ 2009; KLIMO et al. 2010) činila zásoba uhlíku v nadložním humusu v letech 1977–1980 ca $25 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (vrstva L – $5,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$; F – $7,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$; H – $11,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$). V půdě do hloubky 35 cm byla zásoba uhlíku $85 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Z výsledků je patrné, že se zvyšujícím se stářím porostu se zvyšuje zásoba uhlíku jak v nadložním humusu, tak v půdě. Podobné výsledky udává v projektu Solling v Německu v roce 1980 i REICHLÉ (1981), kdy v 87letém smrkovém porostu vykazuje zásobu uhlíku v nadložním humusu ve výši $24,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ a v půdě $95 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. KLIMO, KULHAVÝ (2006) uvádějí na pseudogleji ve třech smrkových porostech starých 80–100 let zásobu uhlíku v nadložním humusu od $17,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ do $33,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ a také ve dvou porostech smrku ve výši $51,5\text{--}56,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$.

ZÁVĚR

Z výsledků sledování přírůstu a ukládání uhlíku do jednotlivých nadzemních i podzemních orgánů stromů v porostu, stejně tak i půdy (do 1 m hloubky) vyplývá, že dospělý smrkový porost v oblasti Drahanské vrchoviny (s limitním množstvím ročního úhrnu srážek pro jeho zdárné odrůstání, tj. ca $600\text{--}700 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$) je stále uložištěm atmosférického uhlíku (ca $3,2\text{--}4,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$). Z hlediska proporcí mezi biomasou jednotlivých orgánů stromů v dospělé smrčině a v nich uloženém uhlíku připadá největší podíl na kmeny ca 70%, pak kořeny ca 17%, živé větve ca 9%, jehličí ca 4% a nejméně na mrtvé vět-

ve (do 1% C). Celkem je uloženo v biomase stromů ca 61% uhlíku, v půdě 39%. Z toho je v půdě ca 19% uhlíku uloženo v humusové vrstvě a zbylých 81% v hloubce do 1 m.

Výsledky vlastní destrukční analýzy byly srovnány se sadou 104 alometrických rovnic, z nichž byly shledány jako nejvíce srovnatelné rovnice pro stanovení biomasy jehlic, suchých větví, kmenů a kořenů podle Wirtha (WIRTH et al. 2004) a pro živé větve podle Hochbichlera (HOCHBICHLER et al. 2006). Odhad zásoby jednotlivých frakcí biomasy podle Marklunda (MARKLUND 1987, 1988) byl rovněž ve velmi dobré shodě s pokácenými vzorníky. Obsah uhlíku v jednotlivých orgánech (frakcích) stromu se pohyboval v úzkém rozmezí ca 50–52%. Práce také dokazuje, že i dospělý smrkový porost je schopný pozitivně reagovat na probírkový zásah zvýšeným přírůstem, a to u stromů všech sociálních tříd, obzvláště u podúrovňových stromů.

Poděkování:

Výzkum byl finančně podpořen z institucionálních prostředků projektu IGA 28/2012 „Sekvestrace uhlíku dospělou smrčinou“ a projektem IGA 7/2013 „Sezónní dynamika respirace nadzemních částí biomasy smrkové monokultury“.

LITERATURA

- ALBAUGH T.J., BERGH J., LUNDMARK T., NILSSON U., STAPE J., ALLEN H.L., LINDER S. 2009. Do biological expansion factors adequately estimate stand-scale aboveground component biomass for Norway spruce? *Forest Ecology and Management*, 258: 2628–2637.
- BERNHOFER C., AUBINET M., CLEMENT R., GRELE A., GRÜNWALD T., IBROM A., JARVIS P., REBMAN C., SCHULZE E.D., TENHUNEN J.D. 2003. Spruce forests (Norway and sitka spruce, including Douglas-fir): Carbon and water fluxes and balances, ecological and ecophysiological determinants. In: Valentini R. (ed.): *Fluxes of carbon, water and energy of European forests: with 46 tables*. Berlin, Springer: 99–124. *Ecological Studies*, 163.
- CIENCIALA E., EXNEROVA Z., SCHELHAAS M.J. 2008. Development of forest carbon stock and wood production in the Czech Republic until 2060. *Annals of Forest Science*, 65: 603p1–603p10. DOI: 10.1051/forest:2008043
- CHMI. 2014. National greenhouse gas inventory report of the Czech Republic. Submission under the UNFCCC and under the Kyoto Protocol reported inventories 1990–2012. April 2014. Prague, Czech Hydrometeorological Institute: 285 s. Dostupné na/ Available on: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/nis/NIR/CZE_NIR-2014_UNFCCC_final.pdf
- ČERNÝ M. 1990. Biomass of *Picea abies* (L.) KARST. in Midwestern Bohemia. *Scandinavian Journal of Forestry Research*, 5: 83–95.
- ČIHÁK T., VEJPUŠKOVÁ M., ŠRÁMEK V., MARUŠÁK R. 2012. Vyhodnocení alometrických funkcí pro stanovení nadzemní biomasy smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) KARST.) z oblasti Orlických hor. *Zprávy lesnického výzkumu*, 57 (3): 257–265.
- GOODALE C., APPS M.J., BIRDSEY R.A. et al. 2002. Forest carbon sinks in the northern hemisphere. *Ecological Applications*, 12: 891–899.
- GORDON A.M., NARESH R.P.F., THEVATHASAN V. 2005. How much carbon can be stored in Canadian agroecosystems using a silvopastoral approach? In: Mosquera-Losada, M.R. et al. (eds.): *Silvopastoralism and sustainable land management. Proceedings of an international congress on silvopastoralism and sustainable management held in Lugo, Spain, in April 2004*. Wallingford, CABI: 210–218. Dostupné na/ Available on: <http://www.cabi.org/cabebooks/FullTextPDF/2006/20063019710.pdf>

- GRÜNWARD T., BERNHOFER C. 2007. A decade of carbon, water and energy flux measurements of an old spruce forest at the Anchor Station Tharandt. *Tellus B*, 59: 387–396.
- HARRINGTON C.A., REUKEMA D.L. 1983. Initial shock and long-term stand development following thinning in a Douglas-fir plantation. *Forest Science*, 29: 33–46.
- HOCHBICHLER E., BELLOS P., LICK E. 2006. Biomass functions for estimating needle and branch biomass of spruce (*Picea abies*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*) and branch biomass of beech (*Fagus sylvatica*) and oak (*Quercus robur* and *petraea*). *Austrian Journal of Forest Science*, 123: 35–46.
- IPCC 2006. IPCC 2006 Guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4 Agriculture, forestry and other land use. Chapter 5. Dostupné na/Available on: http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_04_Ch4_Forest_Land.pdf
- KARJALAINEN T. 1996. Dynamics of the carbon flow through forest ecosystem and the potential of carbon sequestration in forests and wood products in Finland. Joensuu, University of Joensuu: 1 v. (various pagination).
- KAUPPI P.E., MIELIKAINEN K., KUUSELA K. 1992. Biomass and carbon budget of European forests, 1971 to 1990. *Science*, 256: 70–74.
- KLIMO E. 1992. Geographical and soil conditions. In: Klimo E., Maršálek J. (eds.): *Manmade spruce ecosystem (structure, functions, production, processes)*. Report from Project Rájec. Brno, Institute of Forest Ecology, Agriculture University Brno, 4–8.
- KLIMO E., MARŠÁLEK J. (eds.) 1992. *Manmade spruce ecosystem (structure, functions, production, processes)*. Report from Project Rájec, Institute of Forest Ecology, Agriculture University Brno: 178 s.
- KLIMO E., KULHAVÝ J. 2006. Norway spruce monocultures and their transformation to close-to-nature forests from point of view soil changes in the Czech Republic. *Ekológia (Bratislava)*, 25 (1): 27–45.
- KLIMO E., KULHAVÝ J. 2009. Carbon stock in an even-aged Norway spruce stand on the original beech site and its changes during clear-cutting regeneration. *Ekológia (Bratislava)*, 28: 363–375.
- KLIMO E., PRAX A., HYBLER V., ŠTYKAR J. 2010. The changes of the forest environment and biodiversity in a Norway spruce ecosystem with clearcutting regeneration on the original beech site. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, LVIII (4): 1–25.
- KONŠEL J. 1931. *Stručný nástin tvorby a pěstění lesů v biologickém ponětí*. Písek, Československá matice lesnická: 552 s.
- KREJZA J., POKORNÝ R., MARKOVÁ I. 2013. Is allometry for aboveground organ's mass estimation in young Norway spruce stands affected by different type of thinning? *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 61 (6): 1755–1761.
- LAL R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220: 242–258.
- LAL R., FOLLETT R., STEWART B.A., KIMBLE J. M. 2008. Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. *Soil Science*, 172: 943–956. DOI: 10.1097/ss.0b013e31815cc498
- LEHTONEN A., MAKIPAA R., HEIKKINEN J., SIEVANEN R., LISKI J. 2004. Biomass expansion factors (BEF's) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management*, 188: 211–224.
- LEHTONEN A., CIENCIALA E., TATARINOV F., MAKIPAA R. 2007. Uncertainty estimation of biomass expansion factors for Norway spruce in the Czech Republic. *Annals of Forest Science*, 64: 133–140.
- LORENZ K., LAL R. 2010. *Carbon sequestration in forest ecosystems*. Dordrecht, Springer: 279 s.
- LÖWE H., SEUFERT G., RAES F. 2000. Comparison of methods used within member states for estimating CO₂ emissions and sinks to UNFCCC and UE monitoring mechanism: forest and other wooded land. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 4: 315–319.
- MALHI Y., BALDOCCHI D.D., JARVIS P.G. 1999. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant Cell Environment*, 22: 715–740.
- MAREK V.M. et al. 2011. *Uhlík v ekosystémech České republiky v měnícím se klimatu*. Praha, Academia: 253 s.
- MARKLUND L.G. 1987. Biomass functions for Norway spruce (*Picea abies* (L.) KARST.) in Sweden. Umeå, Sveriges lantbruksuniversitet: 127 s.
- MARKLUND L.G. 1988. Biomass functions for pine, spruce and birch in Sweden. Umeå, Sveriges lantbruksuniversitet: 73 s.
- MARKOVÁ I., POKORNÝ R. 2011. Allometric relationships for dry mass of aboveground organs estimation in young highland Norway spruce stand. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 6: 217–224.
- MARTIN M.E., NEWMAN S.D., ABER J.D., CONGALTON R.G. 1998. Determining forest species using high spectral resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 65: 249–254.
- MAŘAN B., KÁŠ V. 1948. *Biologie lesa. První díl: Pedologie a mikrobiologie lesních půd*. Praha, Melantrich: 596 s.
- MENŠÍK L., KULHAVÝ J., KANTOR P., REMEŠ M. 2009. Humus conditions of stands with the different proportion of Douglas-fir in training forest district Hürky and the Křtiny Forest Training Enterprise. *Journal of Forest Science*, 55 (8): 345–356.
- MORIASI D.N., ARNOLD J.G., VAN LIEW M.W., BINGNER R.L., HARMEL R.D., VEITH T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50 (3): 885–900. DOI: 10.13031/2013.23153
- NABUURS G.J., PÄIVINEN R., SIKKEMA R., MOHREN G.M.J. 1997. The role of European forests in the global carbon cycle – a review. *Biomass and Bioenergy*, 13: 345–358. DOI: 10.1016/S0961-9534(97)00036-6
- NASH J.E., SUTCLIFFE J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3): 282–290.
- NĚMEČEK J. et al. 2011. *Taxonomický klasifikační systém půd České republiky*. Praha, ČZU: 94 s.
- NI X., YANG W., TAN B., HE J., XU L., LI H., WU F. 2015. Accelerated foliar litter humification in forest gaps: Dual feedbacks of carbon sequestration during winter and the growing season in an alpine forest. *Geoderma*, 241–242: 136–144. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.11.018
- NIKL J. 2000. *Oblastní plán rozvoje lesů – Přírodní lesní oblast 30 Dražanská vrchovina. Platnost 2010–2020*. Brandýs nad Labem, ÚHÚL – pobočka Brno: 240 s.
- POKORNÝ R., ŠALANSKÁ P., JANOUŠ D., PAVELKA M. 2001. ALAI-02D – a new instrument for forest practice. *Journal of Forest Science*, 47: 164–169.
- POKORNÝ R., TOMÁŠKOVÁ I. 2007. Allometric relationship for surface area and dry mass of young Norway spruce aboveground organs. *Journal of Forest Science*, 53: 548–554.
- POKORNÝ R., TOMÁŠKOVÁ I., HAVRÁNKOVÁ K. 2008. Temporal variation and efficiency of leaf area index in young mountain

- Norway spruce stand. *European Journal of Forest Research*, 127: 359–367.
- POKORNÝ R. 2015. Stanovení indexu listové plochy v nesmíšených porostech lesních dřevin. Certifikovaná metodika. Brno, Centrum výzkumu globální změny AV ČR: 38 s.
- PRETZSCH H. 2009. Forest dynamics, growth and yield. From measurement to model. Berlin, Springer: 664 s.
- QUITT E. 1971. Klimatické oblasti Československa. Brno: ČSAV-GU: 80 s. *Studia geographica*, 16.
- REICHLÉ D.E. (ed.) 1981. Dynamic properties of forest ecosystems. Cambridge, Cambridge University Press: 683 s.
- ROČEŇ V. 2009. Vlhkostní režim lesních půd pod porosty s různou dřevinnou skladbou. Diplomová práce. Brno, MZLU v Brně: 86 s.
- RUIZ-PEINADO R., BRAVO-OVIEDO A., MONTERO G., RÍO M. DEL 2014. Carbon stocks in a Scots pine afforestation under different thinning intensities management. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. DOI: 10.1007/s11027-014-9585-0.
- SCHRÖDER W., PESCH R. 2011. Mapping carbon sequestration in forests at the regional scale - a climate biomonitoring approach by example of Germany. *Environmental Sciences Europe*, 23 (31): 16 s. Dostupné na/Available on: <http://www.enveurope.com/content/pdf/2190-4715-23-31.pdf>
- SKOŘEPA H. 2006. Lesy Dražanské vrchoviny. Boskovice, Albert: 153 s.
- SVOBODA M., KOPÁČEK J., MATEJKA K., PODRÁZSKÝ V., SLÁDKOVÁ L. 2006. Carbon pools in mountain Norway spruce ecosystem in the Bohemian forest (Czech Republic). *Lesnický časopis – Forestry Journal*, 52 (1–2): 79–87.
- ŠTYKAR J. 2002. Biodiverzita rostlinné složky stadií smrkového lesa skupiny geobiocénů *Fageta abietino-quercina* na výzkumném objektu Ústavu ekologie lesa MZLU v Brně „Rájec“. *Ekológia (Bratislava)*, 21 (Supplement 1): 45–68.
- TOBIN B., NIEUWENHUIS M. 2007. Biomass expansion factors for Sitka spruce (*Picea sitchensis* (BONG.) CARR.) in Ireland. *European Journal of Forest Research*, 126: 189–196.
- VOSE J.M., DOUGHERTY P.M., LONG J.N., SMITH F.W., GHOLZ H.L., CURRAN P.J. 1994. Factors influencing the amount and distribution of leaf area of pine stands. In: Gholz H.L. et al. (eds.): Environmental constraints on the structure and productivity of pine forest ecosystems: a comparative analysis. Copenhagen, Munksgaard: 102–114. *Ecological bulletins*, 43.
- VYSKOT M. 1981. Biomass of the tree layer of spruce forest in the Bohemian Uplands. Praha, Academia: 396 s.
- WANG Y.P. 1988. Crown structure, radiation, absorption, photosynthesis and transpiration. Ph.D. Thesis. Edingurgh, University of Edinburgh.
- WIESMEIER M., SPÖRLEIN P., GEUSS U., HANGEN E., HAUG S., REISCHL A., SCHILLING B., LÜTZOW M., KÖGEL-KNABNER I. 2012. Soil organic carbon stocks in southeast Germany (Bavaria) as affected by land use, soil type and sampling depth. *Global Change Biology*, 18: 2233–2245. DOI:10.1111/j.1365-2486.2012.02699.x
- WIESMEIER M., PRIETZEL J., BARTHOLD E., SPÖRLEIN P., GEUSS U., HANGEN E., REISCHL A., SCHILLING B., LÜTZOW M. VON, KÖGEL-KNABNER I. 2013. Storage and drivers of organic carbon in forest soils of southeast Germany (Bavaria) – Implications for carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 295: 162–172. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.01.025
- WIRTH C., SCHUMACHER J., SCHULZE E.D. 2004. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe – a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology*, 24: 121–139.
- ZBÍRAL J. et al. 2011. Analýza půd III. Brno, ÚKZÚZ: 253 s.
- ZIANIS D., MUUKKONEN P., MÄKIPÄÄ R., MENCUCCINI M. 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. Helsinki, Finnish Society of Forest Science, Finnish Forest Research Institute: 63 s. *Silva Fennica monographs*, 4.

CARBON SEQUESTRATION INTO A SPRUCE STAND (*PICEA ABIES* (L.) KARST.) IN THE DRAHANSKÁ VRCHOVINA UPLAND (CZECH REPUBLIC)

SUMMARY

The aim of our study was to estimate carbon stock and carbon sequestration in a 106–108-year-old mature spruce stand growing after the generation of mixed forest. The forest stand is located in the upland of Drahanská vrchovina (the Czech Republic) with a cambisol modal oligotrophic soil type in a fir-beech forest vegetation zone at an elevation of 620–630 m.

Destructive analysis of 9 sample trees provides data for assessing the most appropriate site-specific allometric equation. The best model for each biomass fraction was selected by comparing values of NSE (Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient) of 104 known allometric equations (Tab. 3). The most appropriate models to estimate biomass of needles, dry branches, stems and roots were those of Wirth (WIRTH et al. 2004), while the model of HOCHBICHLER et al. (2006) (Tab. 4) showed the best accordance with living branches. A very good correlation with sampled trees was also provided by Marklund's models (MARKLUND 1987, 1988) (Tab. 3).

Use of the best allometric equations determined that the mean annual amount of carbon sequestration into the tree biomass was 3.47 t.ha⁻¹. However, the forest management and changes in microclimatic conditions strikingly influenced not only the first leaf area index, but also the amount of carbon annually sequestered into the tree biomass (Fig. 2 and 6). In 2010 the carbon stock was estimated to amount to 236.16 t.ha⁻¹ in tree biomass (Tab. 6) and 150.5 t.ha⁻¹ in the upper 100 cm layer of the soil (Tab. 7). To provide more detail, the quantity of carbon fixed in the tree biomass was 69.92% in stems, 16.80% in roots, 9.46% in living branches, 3.43% in needles, and 0.39% in dry branches (Tab. 6). As regards the carbon content in the upper 100 cm of the soil, 19% was fixed in the humus layer and 81% was found in mineral horizons. Our study showed a positive growing response to enlarging the individual tree growing area by thinning, which even applied to old spruce forest. Such response was registered in trees of all social levels, particularly in sub-dominant trees (Fig. 3). The presented results may contribute to the models designed to evaluate the carbon cycle.

Zasláno/Received: 21. 05. 2015

Přijato do tisku/Accepted: 15. 10. 2015