





**ACTA
FACULTATIS
FORESTALIS
ZVOLEN**

**(1)
2017**

TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE

Vedecký redaktor / Executive editor:
doc. Ing. Jaroslav Kmeť, PhD.

Predseda redakčnej rady / Editor in Chief:
prof. Dr. Ing. Viliam Pichler

Redakčná rada / Editorial board:
doc. Ing. Marek Fabrika, PhD.
prof. Ing. Peter Garaj, CSc.
prof. Ing. Iveta Hajdúchová, PhD.
prof. Ing. Matúš Jakubis, PhD.
prof. Ing. Valéria Messingerová, CSc.
doc. Ing. Karol Ujházy, PhD.
prof. Ing. Milan Saniga, DrSc.
prof. Ing. Jaroslav Škvarenina, CSc.

ACTA FACULTATIS FORESTALIS ZVOLEN (1) 2017

Vydala Technická univerzita, T. G. Masaryka 2117/24, 960 53 Zvolen, IČO 00397440

Vydanie I. – 2017 – október

Rozsah strán, AH, VH

Náklad 100 výtlačkov

Tlač a grafická úprava: Vydavateľstvo TU vo Zvolene

Rukopis neprešiel jazykovou úpravou

Vydanie publikácie schválené Edičnou radou TU vo Zvolene dňa , číslo

EP /2017

Periodikum s nepravidelnou periodicitou

Evidenčné číslo

© Technická univerzita vo Zvolene

ISSN 0231-5785

Všetky práva vyhradené. Nijaká časť textu ani ilustrácie nemôžu byť použité na ďalšie šírenie akoukoľvek formou bez predchádzajúceho súhlasu autorov alebo vydavateľa.

OBSAH – CONTENTS – INHALT

CHALMOVIANSKÝ, F.: Premennivosť rastových vlastností prirodzených populácií jelše lepkavej (<i>Alnus glutinosa</i> [L.] Gaertn.) v povodí Bienskeho potoka v orografickom celku Kremnické vrchy	7
HÚDOKOVÁ, H., KONÔPKOVÁ, A., KURJAK, D.: Možnosti využitia rýchlej kinetiky fluorescencie chlorofylu a pri hodnotení termostability PSII na príklade buka lesného.	17
PETRÍK, P., KONÔPKOVÁ, A., KURJAK, D.: Prieduchové charakteristiky buka lesného s rôznym pôvodom.....	28
GERE, R., GÖMÖRYOVÁ, E.: Influence of tree species composition to modification of specific physico-chemical and biological properties of soil.	39
ČERŇAVA, J.: Mobilné mapovanie lesa pod hustým korunovým zápojom	50
VÝBOSŤOK, J., MERGANIČ J., BAHÝL, J.: Diskontná sadzba ako faktor ovplyvňujúci plnenie funkcií lesa.	62



PREMENLIVOSŤ RASTOVÝCH VLASTNOSTÍ PRIRODZENÝCH POPULÁCIÍ JELŠE LEPKAVEJ (*ALNUS GLUTINOSA* (L.) GAERTN.) V POVODÍ BIENSKÉHO POTOKA V OROGRAFICKOM CELKU KREMNICKE VRCHY

Bc. Filip CHALMOVIANSKÝ

CHALMOVIANSKÝ, F.: Premenlivosť rastových vlastností prirodzených populácií jelše lepkavej (*Alnus glutinosa* [L.] Gaertn.) v povodí Bienskeho potoka v orografickom celku Kremnické vrchy. Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

Materiál pre predloženú prácu bol získaný z ôsmich trvalých výskumných plôch, ktoré sa nachádzajú v povodí Bienskeho potoka. Výškový gradient medzi jednotlivými plochami bol zvolený 50 m. Prvá výskumná plocha sa nachádzala vo výške 275 m n. m. a posledná ôsma plocha vo výške 625 m n. m. Na jednotlivých plochách boli z troch úrovnových jedincov odobraté vývrty pomocou Presslerovho nebožieca vo výške $d_{1,3}$. Cieľom odobrania vývrtov bolo zistiť vek jedincov, odhaliť trend vývoja *BAL* prírastku pozdĺž gradientu nadmorskej výšky a ich priemerný radiálny prírastok. Na odstránenie biologického trendu ako aj na zostrojenie štandardnej chronológie jelše lepkavej bol zvolený program ARSTAN ver. 41, ktorý bol použitý aj na výpočet základných štatistických parametrov. Na detrendáciu letokruhových rádov bola použitá Hugeschoffova rastová funkcia. Vplyv nadmorskej výšky na rastovú dynamiku jelše lepkavej v povodí Bienskeho potoka bol hodnotený pomocou jednofaktorovej analýzy variancie. Na základe výsledkov autokorelácií a citlivosti môžeme konštatovať, že jelša lepkavá má na území Kremnických vrchov svoje ekologické optimum v rozpätí nadmorských výšok 325 – 375 m n. m., kde hodnoty autokorelácie 1. rádu varirovali od 0,729 po 0,829 a hodnoty citlivosti sa pohybovali v rozmedzí 0,196-0,241. A zároveň na základe výsledkov priemerného ročného prírastku na kruhovej základni ($3363 \pm 928 \text{ mm}^2$) a priemerného objemového prírastku ($9,71 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$) sa v spomínanom rozpätí nadmorských výšok nachádza aj produkčné optimum jelše lepkavej v sledovanej oblasti.

Kľúčové slová: jelša lepkavá, rastové vlastnosti, *BAL*, Kremnické vrchy

ÚVOD A CIEĽ

Problémom v posledných desaťročiach je zhoršenie zdravotného stavu a vitality lesných drevín nielen priamo v porastoch ale aj rozptýlenej zeleni okolitej krajiny, ktorého príčinou je celý komplex faktorov spojených hlavne so znečistením životného prostredia. Dôraz by sa mal aj preto klásť na využívanie aj ostatných funkcií lesa, nakoľko les okrem toho že je základný a stabilný ekosystémový prvok ovplyvňuje aj celkovú stabilitu životného prostredia (BORTEL, JANČOVÁ, SLÁVIKOVÁ 1993). Lesnícky výskum v posledných rokoch začal venovať pozornosť jelši lepkavej (*Alnus glutinosa*), ktorej porasty

okrem plnenia breho-ochrannej a celospoločenských funkcií, sa začína dostávať do pozornosti aj z hospodárskeho hľadiska. Jelša totižto vytvára cenné technické formy (očkové, svalcovité) pre, ktoré je žiadaná v nábytkárskom priemysle (LUKÁČIK, BUGALA 2005). Jelša lepkavá patrí k nenahraditeľným zložkám brehových porastov so značnou retenčnou a regulačnou schopnosťou pri vysokých vodných stavoch. Patrí k významným drevinám s melioračnou funkciou, ktoré priaznivo pôsobia na pôdne vlastnosti. Jelša ako rýchlorastúca drevina sa dožíva 120-170 (200) rokov, čo je dôvodom ktorý má vplyv na dĺžku vývojového cyklu prírodného lesa, ktorý je v porovnaní s iným druhom prírodného lesa pomerne krátky (SANIGA, ZRAK 2010). Pri melioračných zásahoch, reguláciách vodných tokov a pri nerozvážených odstraňovaniach jelšových porastov treba mať na pamäti že tieto zásahy často krát spôsobujú negatívne zmeny v celom ekosystéme toku ale aj dochádza k zníženiu účinnosti funkcií brehových porastov (LUKÁČIK 1997).

SVOBODA a PAGAN (1965) zaradili jelšu lepkavú k drevinám relatívne náročným na svetlo. Najst' ju môžeme vo vlhkých údoliach, luhoch s bažinatou, poprípade humusovou pôdou, kde často vytvára rovníkové porasty. Na rast a kvalitu jelšových porastov má negatívny vplyv príliš vysoká hladina podzemnej vody a dlhodobé zabahnenie (PAGAN 1999). Šály (1988) jelšu lepkavú zaraďuje z hľadiska bohatosti opadanky na obsah dusíka na v poradí prvé miesto z našich drevín. VALTYNI (1996) zaraďuje medzi najvýznamnejšie funkcie brehoochrannú, filtračnú, tieniacu, agromelioračnú, rekreačnú a krajinotvornú pričom niektoré brehové porasty môžu plniť aj niekoľko funkcií súčasne.

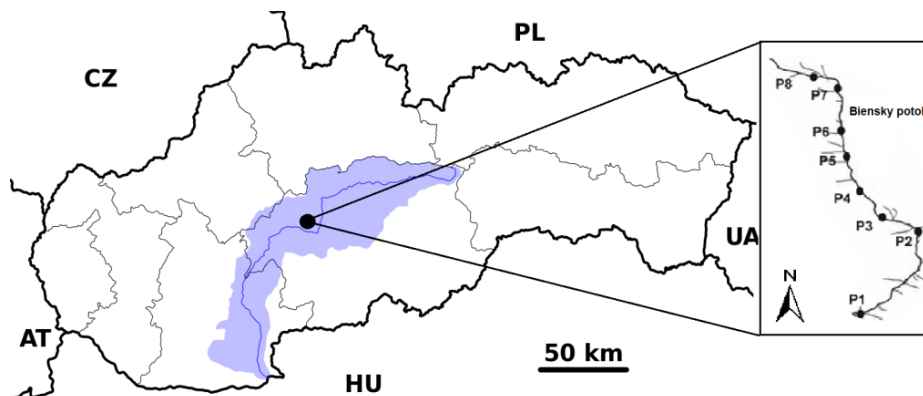
Cieľom práce bolo zhodnotiť rastové vlastnosti a rastový potenciál jelše lepkavej povodí Bienskeho potoka. Zároveň posúdiť zmenu dynamiky prírastku s meniacim sa gradientom nadmorskej výšky.

2. MATERIÁL A METODIKA PRÁCE

Hodnotený materiál bol získaný z 8 lokalít ležiacich na území orografického celku Kremnické vrchy v povodí Bienskeho potoka. Pre odber materiálu bol zvolený krok $\Delta 50$ m od najnižšie položenej plochy 1 – Klinovisko s nadmorskou výškou 275 m až po 8 plochu – Žliebky nachádzajúcej sa v 625 m n. m. Vzdialenosť medzi najnižšie a najvyššie položenou plochou bola približne 12 km s prevýšením 350 výškových metrov. Na každej z týchto plôch sme určili tri úrovňové jedince, z ktorých sme odobrali pomocou Presslerovho nebožieca vývrty vo výške $d_{1,3}$ m.

Digitalizácia vzoriek sa vykonáva za pomoci skenera Epson Expression 10 000 XL s rozlíšením 1200 dpi a samotné spracovanie vzoriek prebieha v programe WinDendro™ 2009 (Régent Instruments, Inc.). Šírka jednotlivých ročných prírastkov sa meria s presnosťou na 0,001 mm. Nakoľko vek väčšiny skúmaných jedincov nepresiahol 50 rokov, bola na krížové datovanie letokruhových sérií zvolená metóda Skeletových diagramov (CROPPER 1970), pre stanovenie miery podobnosti časových rádov neparametricky tzv. Gleichlaufigkeit (GI) sing test (KAENNEL, SCHWEINGRUBER 1995).

Aby mohla byť séria zaradená do priemernej chronológie, musí byť dodržané kritérium, že hodnota koeficientu $GI > 75\%$ (BUGALA 2012).



Obr. 1: Umiestnenie výskumných plôch v povodí Bienskeho potoka
 Fig. 1: Location of research areas in the basin of the Bien creek

Pre odstránenie trendu, ktorý je zapríčinený prirodzeným poklesom rastovej energie jedincov sa použije Hegershoffova rastová funkcia:

$$f(t) = a \cdot t^b \cdot e^{(-c \cdot t)} + d$$

kde: $f(t)$ - šírka letokruhu, t - čas, b - sila, c - exponenciálny argument, d - zvyšok

Na konštrukciu štandardnej chronológie a odstránenie biologického trendu sme použili program ARSTAN ver. 41 (COOK 1985). Na zbavenie sa variability rastu, ktorá vzniká vplyvom odlišnej hrúbky sa pre každého jedinca ešte lepšie vypočítal prírastok na kruhovej základni tzv. BAI index (PHIPPS, WHITON 1988).

$$r_t = r_{(t-1)} + w_t$$

$$BAI_t = \pi(r_t^2 - r_{(t-1)}^2)$$

kde: r_t - polomer stromu vo veku t , t - vek stromu, w_t - šírka letokruhu v t roku

Pre výpočet hodnoty priemerného prírastku porastu (BAI_p) sa uvažovalo s 220 ks úrovňových jedincov (1,2 stromová trieda) na hektár. Na výpočet priemerného ročného objemového prírastku porastu (i_v) bola hodnota BAI_p vynásobená priemernou výškou jedincov na danej ploche a redukovaná nepravou výtvarnicou ($f_{t,3}$) pre drevinu buk (0,47). Rozdiely biometrických veličín na jednotlivých výskumných plochách boli hodnotené jednofaktorovou analýzou variance a výsledky testované Duncanovým testom.

3. DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Najväčší hrúbkový prírastok dosahujú dreviny vo svojich počiatočných vývojových štádiách až do veku kedy nastáva kulminácia, od tohto bodu prírastky pozvoľne klesajú a nadobúdajú približne vyrovnané hodnoty (ŠMELKO a kol. 2003). Postupný pokles šírky letokruhov vykazuje každý skúmaný jedinec. Tento jav COOK a KAIRIUKSTIS (1990) odôvodnili prirodzeným poklesom šírky ročných kruhov s rastúcim vekom stromov, ktorý je zapríčinený aj zväčšovaním jeho priemeru. Medzi najvýznamnejšie faktory ovplyvňujúce ročný radiálny prírastok patria výrazne výkyvy teplôt a úhrn zrážok počas vegetačného obdobia, ako aj obsah živín v pôde. Spomenuté faktory vytvárajú výkyvy dlhodobého priemeru a preto sa vyhotovujú tzv. diagramy ročných prírastkov, ktoré predstavujú grafické znázornenie hodnôt radiálneho prírastku za určité obdobie (BUGALA, PAROBEKOVÁ, 2016).

Tab. 1: Základné štatistické parametre dendrochronologických sérii jelše lepkavej

Plocha	Rok začiatku	Vek	i_{priem} (mm)	$\pm s_x$	Citlivosť priemeru	Autokorelácia 1. rádu	GI index (%)
1. Klinovisko	1952	64	3,224	1,233	0,328	0,552	78,53
2. Širiny	1985	31	4,851	2,389	0,241	0,729	83,33
3. Hájik	1988	28	5,268	2,386	0,196	0,829	86,12
4. Kopanice	1967	49	4,205	1,352	0,256	0,791	77,82
5. Dolný Grausov	1962	54	3,514	1,727	0,271	0,698	88,56
6. Horný Grausov	1978	38	3,196	1,669	0,278	0,629	83,81
7. Danielova chata	1970	46	3,296	0,920	0,281	0,588	76,73
8. Žliebky	1965	51	2,654	1,584	0,296	0,571	81,26

Tab. 1: Basic statistical parameters of the Black Alder dendrochronological series

Area	Year of the beginning	Age	i_{average} (mm)	$\pm s_x$	Sensitivity average	Autocorrelation 1. st regulations	GI index (%)
1. Klinovisko	1952	64	3,224	1,233	0,328	0,552	78,53
2. Širiny	1985	31	4,851	2,389	0,241	0,729	83,33
3. Hájik	1988	28	5,268	2,386	0,196	0,829	86,12
4. Kopanice	1967	49	4,205	1,352	0,256	0,791	77,82
5. Dolný Grausov	1962	54	3,514	1,727	0,271	0,698	88,56
6. Horný Grausov	1978	38	3,196	1,669	0,278	0,629	83,81
7. Danielova chata	1970	46	3,296	0,920	0,281	0,588	76,73
8. Žliebky	1965	51	2,654	1,584	0,296	0,571	81,26

Základne štatistické charakteristiky časových radov sú uvedené v tabuľke 1. V dobe odberu vývrvtov (2016) dosahovali najvyšší priemerný vek 64 rokov jedince na prvej výskumnej ploche, pričom priemerný vek na všetkých výskumných plochách bol 45 rokov. Najvyšší priemerný radiálny prírastok s hodnotou 5,268 mm bol zaznamenaný na ploche 3 nachádzajúcej sa v nadmorskej výške 375 m n. m. Naopak najmenší priemerný hrúbkový prírastok 2,654 mm dosiahli jedince jelše lepkavej na ôsmej ploche. Zaujímavý je fakt, že jedince na ploche 1 a na ploche 7 dosiahli takmer identickú priemernú šírku ročných kruhov, hoci prevýšenie medzi týmito plochami bolo 300 m n. m. Okrem iného spomínané plochy zaznamenali minimálne a maximálne hodnoty $\pm s_x$ spomedzi všetkých skúmaných plôch. Hodnoty autokorelácie prvého rádu medzi jednotlivými výskumnými plochami varíovali od 0,552 po 0,829. Najvyššia hodnota autokorelácie prvého rádu (0,829) spoločne s najmenšou citlivosťou priemeru (0,196) bola zaznamenaná na ploche 3, ako aj najväčšia priemerná šírka ročných kruhov. Zároveň na tejto ploche bola zistená najväčšia variabilita hrúbkových prírastkov $\pm s_x$ 2,386. Naopak najnižšiu hodnotu autokorelácie 0,552 dosiahli jedince na ploche 1. FRITTS (1976) uvádza, že citlivosť priemeru nadobúda hodnoty od 0 po 2,0. Citlivosť priemeru môžeme charakterizovať, ako vyjadrenie citlivosti skúmaných jedincov na vplyv exogénnych faktorov prostredia. V nami sledovanej oblasti sa hodnoty citlivosti priemeru pohybovali v rozmedzí od 0,196 po 0,328. Priemerná hodnota citlivosti všetkých plôch 0,268 predstavuje strednú úroveň citlivosti skúmaných jedincov na vonkajšie faktory prostredia.

Z vyššie uvedených faktov vyplýva, že jedince na ploche 3 najmenej reagovali na vplyv meniacich sa vonkajších faktorov a z uvedených výsledkov môžeme predpokladať, že najvhodnejšie podmienky pre rast má v skúmanej oblasti jelša lepkavá v nadmorskej výške 375 m n. m.

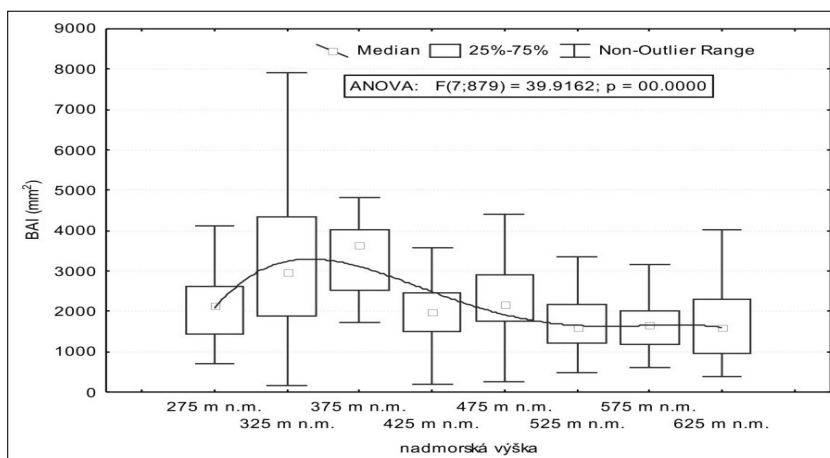
3.1 Zhodnotenie produkčných vlastností taxónu

Z dôvodu vplyvu hrúbok jedincov na zhodnotenie prírastkových možností je vhodnejšie porovnávať ročné prírastky na kruhovej základni porastu alebo porastu, teda *BAI* hodnoty. Aj preto sme navzájom medzi sebou porovnávali všetkých 8 výskumných plôch, účelom testovania bol zistiť trend vývoja *BAI* prírastku pozdĺž gradientu nadmorskej výšky. Zo základných štatistických charakteristík analyzovaných jedincov, ktoré sú uvedené v tab. 3 vidíme, že priemerná hrúbka skúmaných jelší sa pohybovala v intervale 27,53 až 44,30 cm. Priemerné výšky jedincov jelše lepkavej sa pohybovali od 20,03 do 27,93 m a teda hodnoty výšok boli značne vyrovnanejšie. Bez ohľadu na výskumnú plochu bola priemerná nameraná hodnota šírky radiálneho prírastku 3,50 mm. Z pohľadu produkčných možností bola zaujímavá maximálna hodnota šírky ročného kruhu, a to 9,91 mm, ktorú dosiahol jedinec na ploche 5, ale najväčšia nameraná priemerná hodnota šírky letokruhu $4,73 \pm 1,86$ mm bola na ploche 3, kde bol zároveň nameraný druhý maximálny ročný prírastok letokruhu (9,15 mm). Ďalšou zaujímavosťou je, že jelšiny na skúmaných plochách neboli v minulosti pestovateľsky usmerňované. Môžeme skonštatovať, že najvyšší prírastok na kruhovej základni bol zistený na jedincoch jelše lepkavej nachádzajúcich sa v rozpätí nadmorských výšok od 325 do 375 m n. m.

Tab. 2: Základné biometrické charakteristiky jedincov jelše lepkavej podľa jednotlivých plôch
Tab. 2: The basic biometric characteristics of the Black Alder individuals per chosen areas

Plocha	h (m)	$d_{1,3}$ (cm)	w_r (mm)	$w_{r,max}$ (mm)	BAI (mm ²)	$BAIs$ (m ² .ha ⁻¹ .rok ⁻¹)	i_v (m ³ .ha ⁻¹ .rok ⁻¹)
1.	20,03	37,60	2,95±1,45	7,76	2145±497	0,472	4,44
2.	20,73	44,30	3,98±1,74	8,52	2771±1559	0,610	5,94
3.	27,93	36,33	4,73±1,86	9,15	3363±928	0,740	9,71
4.	25,36	34,76	3,47±1,48	7,63	1945±520	0,428	5,10
5.	23,30	27,53	4,68±2,09	9,91	2418±512	0,532	5,83
6.	25,80	31,83	3,02±1,43	8,64	1688±413	0,371	4,50
7.	25,30	33,87	2,77±1,23	7,09	1638±453	0,360	4,28
8.	23,06	34,23	2,39±1,16	5,96	1752±372	0,385	4,17

Konkrétne išlo o plochu 2, kde bola výška BAI ročného prírastku na úrovni 2771±1559 mm². Na tretej výskumnej ploche bol spomedzi všetkých plôch zaznamenaný celkovo najvyšší BAI prírastok s hodnotou 3363±928 mm². Priebeh ročných prírastkov na kruhovej základni alebo porastu môže byť charakterizovaný krivkou. Krivka v prvotnom štádiu vykazuje pozitívny a zároveň stúpajúci trend, kulminuje v nadmorskej výške 375 m n. m. a následne pozvoľne klesá, pričom na úseku od 375 m n. m. až po 625 m n. m. pôsobí na radiálny prírastok analyzovaných jedincov negatívny vplyv stúpajúcej nadmorskej výšky.



Obr. 2: Hodnoty prírastku na kruhovej základni jedincov jelše lepkavej v závislosti od nadmorskej výšky

Fig. 2: The values of the increment on the circular base of the black alder individuals depending on the altitude

Pre modelový porast, ktorý tvorí 220 úrovňových jedincov jelše lepkavej môžeme konštatovať, že po kalkulácii jednotlivých *BAI* hodnôt prírastkov je trend zmeny kruhovej základne zachovaný. Po prepočítaní hodnôt *BAIp* na zásobu porastu za pomoci priemernej výšky skúmaných jedincov jelše lepkavej na jednotlivých plochách sme zistili, že priemerný ročný prírastok zásoby porastu predstavuje $5,50 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, pričom táto hodnota produkčného ukazovateľa neklesá pod úroveň $5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ na plochách 2 až 5, teda v rozpätí nadmorských výšok 325 – 475 m n. m. Z tabuľky a grafu možno pozorovať výraznú prírastkovú kulmináciu jelše lepkavej na ploche 3, ležiacej v nadmorskej výške 375 m n. m. ($9,71 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$).

4. DISKUSIA A ZÁVER

Na základne výsledkov zistených zo skúmania jelše lepkavej v sledovanej oblasti môžeme posúdiť rastové vlastnosti a dynamiku porastov. Na všetkých výskumných plochách boli odobraté vzorky vývrvtov na jedincoch, ktoré sa nachádzali v úrovni a v korunovej vrstve si nijak nekonkurovali. Základnými dendrometrickými veličinami reprezentovali stredný kmeň daného porastu a vplyv sociologického postavenia na rast analyzovaných jedincov bolo možné vylúčiť. Z výsledkov hodnotenia základných štatistických charakteristík skúmaných jedincov možno konštatovať, že jelša lepkavá, ako slnná drevina kontinentálnej klímy, tvorí v oblasti Kremnických vrchov porasty s pomerne nízkou štrukturálnou diverzitou. Jednofaktorová analýza variancie potvrdila, že meniacca sa nadmorská výška ovplyvňuje dynamiku rastu jelše lepkavej, rovnako sa pri zmene nadmorskej výšky plochy mení aj výška a hrúbka skúmaných jedincov. Priemerná hrúbka kmeňa $d_{1,3}$ sa na plochách pohybovala v intervale od 27,5 do 44,3 cm. Hodnoty výšok boli značne vyrovnannejšie od 20,0 do 27,9 m. Nízkou hrúbkovú a výškovú diferenciaciu jelšových porastov v oblasti Kremnických vrchov zistili aj BUGALA a PITTNER (2010) pri hodnotení štrukturálnej diverzity.

Rovnako sa zo zmenou nadmorskej výšky menili aj radiálne prírastky jelše lepkavej. Priemerné radiálne prírastky sa vplyvom stúpajúcej nadmorskej výšky sa zväčšovali až po plochu 3 (325 m n. m.), kde kulminoval priemerný hrúbkový prírastok. Na poslednej ploche 8, ktorá sa nachádzala v nadmorskej výške 625 m n. m dosiahol priemerný radiálny prírastok hodnotu už len 2,654 mm. Nakoľko neexistuje dostatok publikácií, ktoré sa zapodievať skúmaním rastového potenciálu jelše lepkavej na Slovensku sme dosiahnuté výsledky porovnali s výsledkami výskumov populácii jelše sivej (*Alnus incana*). HUSTINOVÁ (2016) vo svojej práci uvádza, že na základe výsledkov výskumu z plôch založených v orografickom celku Veľká Fatra, konkrétne na území Belianskej doliny, od nadmorskej výšky 527 m n. m. po 705 m n. m. priemerné radiálne prírastky jelše sivej s postupne klesajúcou nadmorskou výškou výskumných plôch stúpali až po plochu 5 (605 m n. m.), kde prírastky kulminovali ($i_{\text{priem}} 4,088 \text{ mm}$) a následne prírastky klesali, kde na ploche 7 (555 m n. m.) dosiahol jedinec najnižší ročný prírastok len 0,444 mm, čo autorka odôvodnila prílišným zatienením a teda nepriaznivými ekologickými podmienkami na ploche. Zaujímavé výsledky dosiahli jedince v nadmorskej výške 527 m n. m., kde sa hod-

noty prírastkov približovali k hodnotám plochy vo výške 605 m n.m., ktorá v dosiahnutých výsledkoch reprezentovala produkčné aj ekologické optimum jelše sivej v skúmanej oblasti.

Hodnoty autokorelácie 1. rádu analyzovaných jedincov varírovali v rozpätí 0,552 – 0,829. Na uvedených výskumných plochách bola priemerná hodnota autokorelácie 1. rádu bez ohľadu na plochu dosiahla priemernú hodnotu 0,673. BUGALA (2012) dospel k faktu, že zo zvyšujúcimi sa rozdielmi v striedaní nadpriemerných a podpriemerných rokov sa znižujú hodnoty autokorelácie 1. rádu. Najvyššia hodnota autokorelácie 0,829 spoločne s najmenšou citlivosťou 0,196 bola zaznamenaná na ploche 3, rovnako na tejto ploche bola zaznamenaná najväčšia priemerná hodnota hrúbkového prírastku, z toho vyplýva, že jedince na ploche 3 najmenej reagovali na vplyv meniacich sa exogénnych faktorov prostredia. Naopak minimálne hodnoty autokorelácie dosiahli jedince rastúce na ploche 1. Výsledky z Belianskej doliny preukázali, že hodnoty autokorelácie jelše sivej sa pohybovali od 0,532 po 0,930. Z výsledkov skúmaných jedincov priemerná autokorelácia 1. rádu dosiahla hodnotu 0,761. Maximálne hodnoty autokorelácie (0,930) spojené s nízkou hodnotou citlivosti priemeru dosiahol jedinec na ploche s nadmorskou výškou 527 m n. m. Naopak najvyššiu hodnotu citlivosti zaznamenal jedinec jelše sivej na ploche 5 nachádzajúcej sa v nadmorskej výške 605 m n. m. (HUSTINOVÁ 2016). V podmienkach Kremnických vrchov najvýraznejšie na vonkajšie vplyvy prostredia reagovali jedince na ploche 1 s hodnotou citlivosti 0,328 a na ploche 8 (0,296) čo sa odrazilo aj na ich priemerných hrúbkových prírastkoch. HUSTINOVÁ (2016) uvádza, že najvyššie hodnoty citlivosti zo všetkých plôch založených vo Veľkej Fatre dosiahli jedince na ploche 1, kde okrem najvyššej citlivosti 0,332 bol zaznamenaný aj jedinec s najnižším priemerných radiálnym prírastkom zo všetkých analyzovaných jedincov. Z hodnotenia miery citlivosti prírastku na exogénne faktory vyplýva, že jedince dosahovali nízke hodnoty citlivosti a je zrejmé, že jelša lepkavá dokáže eliminovať negatívny dopad faktorov najmä dostatočnou zásobou podzemnej vody. Pri sledovaní trendu vývoja *BAI* prírastku pozdĺž gradientu nadmorskej výšky sme zistili, že ročný radiálny prírastok na kruhovej základni porastu od počiatkovej hodnoty 2145 ± 497 v nadmorskej výške 275 m n. m. zreteľne stúpa až do výšky 375 m n. m., kde kulminuje a od hodnoty 3363 ± 928 mm² pomaly klesá po nadmorskú výšku 525 m, od ktorej si aj ďalších 100 výškových metrov zachováva pomerne vyrovnané hodnoty. Z uvedených výsledkov vyplýva, že produkčné optimum porastov jelše lepkavej v sledovanej oblasti sa nachádza medzi nadmorskými výškami 325 až 375 m, čo potvrdzujú aj výsledky kalkulácii jednotlivých hodnôt *BAI* prírastkov na hektár pre modelový porast tvorený 220-timi úrovňovými jedincami jelše lepkavej. Po prepočítaní *BAI_p* hodnôt na zásobu porastu s pomocou priemernej výšky stromov na jednotlivých výskumných plochách predstavuje priemerný ročný prírastok na zásobe porastov hodnotenej jelše lepkavej $5,50$ m³.ha⁻¹.rok⁻¹. Výrazná prírastková kulminácia nastala u jedincov vo výške 375 m n. m na úrovni $9,71$ m³.ha⁻¹.rok⁻¹. Ide o porast, ktorý nebol pestovateľsky usmernený, ale je zrejmé, že pri vhodných pestovateľských zásahoch by jednoznačne prekročil hranicu 10 m³.ha⁻¹.rok⁻¹ a teda by spĺňal jednu z podmienok, ktorá v stredoeurópsky podmienkach zaraduje dreviny medzi vysoko produkčné alebo rýchlorastúce. Na prírastku sa pritom nezúčast-

ňujú nadúrovňové a podúrovňové jedince. Prírastok $9,71 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ jelše lepkavej sa vyrovnáva aj iným hospodársky významným drevinám na Slovensku, ktoré sa nachádzajú vo svojom produkčnom optime. V oblasti Belianskej doliny HUSTINOVÁ (2016) uvádza, že po prepočte *BAI* prírastkov na hektár pre modelový porast, ktorý je tvorený 550-timi jedincami jelše sivej, bol priemerný prírastok zásoby porastu $4,59 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. V nadmorskej výške 605 m n. m., ktorá predstavovala produkčné optimum pre jelšu sivú v skúmanej oblasti bol zaznamenaný prírastok $6,41 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, čo je v porovnaní o $3,3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ menej ako dosahuje jelša lepkavá v južnej časti Kremnických vrchov.

5. ZOZNAM LITERATÚRY

- BORTEL, J., JANČOVÁ, M., SLÁVIKOVÁ, D., 1993: Ochrana a tvorba krajiny. Technická univerzita, Zvolen, 135s.
- BUGALA, M., PAROBKOVÁ, Z. 2016: Vplyv gradientu nadmorskej výšky na produkciu jelše sivej (*Alnus incana* (L.) Moench.) v podmienkach Bukovských Vrchov. Zprávy lesnického výzkumu 61 (3): s. 175-180
- CROPPER, J. P., 1970: Tree-ring skeleton plotting by computer, Tree-ring Bulletin 39: 47-59 s.
- BUGALA, M., 2012: Stanovištná chronológia a analýza rastu vybranej populácie jelše lepkavej (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) v oblasti Kremnických vrchov. In: SANIGA, M., JALOVÍAR, P., KUCBEL, S., (eds.) : Pestovanie lesa v strednej Európe. Zvolen s. 136-142
- BUGALA, M., PITTNER, J., 2010: Analýza štruktúrálnej diverzity porastov jelše lepkavej (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) ma území VŠLP TU vo Zvolene. *Acta Facultatis Forestalis* 52, Zvolen (1) s. 43-54
- COOK, E. R., 1985: A time-series analysis approach to tree ring standardization. PhD. Dissertation, University of Arizona, Tucson, 171 s.
- COOK, E., KARIUKSTIS, L., 1990: Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences, 393 s.
- FRITTS, H. C., 1976: Tree rings and climate. London, Academic press, 567 s.
- HUSTINOVÁ, M., 2016: Rastový potenciál a premenlivosť rastových vlastností prirodzených populácií jelše sivej (*Alnus incana* (L.) Moench.) v oblasti Belianskej doliny v orografickom celku Veľká Fatra. Diplomová práca TU Zvolen, 67s.
- KEANNELM, M., SCHWEINGRUBER, F. H., (EDS), 1995: Multilingual Glossary of Dendrochronology. Terms and Definitions in English, German, Franch, Spanish, Italian, Portuguese and Russian. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf, 467 s.
- LUKÁČIK, I., 1997: Jelša lepkavá (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) v ochrane a tvorbe životného prostredia. In: LES-DREVO-ŽIVOTNÉ PROSTREDIE '97, sekcia č.2: Rastové procesy a pestovanie lesov v zmenených ekologických podmienkach, TU Zvolen, s. 13-16
- LUKÁČIK, I., BUGALA, M., 2005: Premennivosť, rastová charakteristika a ekológia jelše lepkavej (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) a jelše sivej (*Alnus incana* (L.) Moench.) na Slovensku. Vedecké a pedagogické aktuality. TU Zvolen, 69 s.
- PAGAN, J., 1999: Lesnícka dendrológia. TU Zvolen, 378 s.
- PHIPPS, R. L., WHITON, J. C., 1988: Decline in long-term growth trends of white oak. Can K For Res18, s. 24-32
- SANIGA, M., ZRAK, J., 2010: Produkčné a rastové charakteristiky disponibilného priestoru jelšového prírodného lesa v NPR Jurský šúr. In: KNOTT, P., PEŇÁZ, J., VANEK, P., (eds): Pestování lesu v nižších vegetačných stupních. Krtiny, s. 121-126
- SVOBODA, P., PAGAN, J., 1965: Lesnícka dendrológia II., Slovenské vydavateľstvo pôdohospodárskej literatúry, Bratislava, 392 s.
- Šály, R., 1988: Pedológia a mikrobiológia, Zvolen, VŠLD, 378 s.
- Šmelko, Š., a kol., 2003: Meranie lesa a dreva. ÚVPP LVH SR Zvolen, 239 s.
- Šmelko, Š., WENK, G., ANTANAITIS, V., 1992: Rast, štruktúra a produkcia lesa. Príroda, 342 s.
- VALÝNI, J., 1996: Brehové porasty v tvorbe poľnohospodárskej krajiny. In: Zborník eferátov z konferencie „Ekológia a tvorba sídelnej a poľnohospodárskej krajiny“, FEE TU Zvolen, s. 90-92

Adresa autora:

Bc. Filip Chalmovianský
Technická univerzita vo Zvolene
Masarykova 24
960 53 Zvolen
Slovenská republika
e-mail: chalmoviansky.filip@gmail.com

Growth characteristics variability of autochthonous Black Alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) populations in Bien creek basin in orographic unit Kremnické vrchy Mts.

SUMMARY

The material for the present work was obtained from eight permanent research areas, which are located in the basin of the stream Bien. Altitude gradient between the individual areas was 50 m. The first research area was located at height of 275 m a.s.l. and the last at height of 625 m a.s.l. In individual areas were selected three level individuals, from which were taken samples from holes of $d_{1,3}$ by Pressler auger. The aim of the sample taking was to detect the age of individuals, the trend in *BAI* increase along the altitudinal gradient and their average radial growth. For removal of biological trend as well as creation of standard chronology of the common alder there was used the program ARSTAN ver. 41, which was also used for the calculation of basic statistical parameters. For detrending of inincrement series was used the Hegershoff curve. The impact of altitude on the growth dynamics of the common alder in the basin of the stream Bien was tested using a one-way analysis of variance. Based on the results of autocorrelations and sensitivity we can evaluate that in the territory of the Kremnické vrchy Mts. the common alder has its ecological optimum in the range of altitudes 325 – 375 m a.s.l., with the 1st order autocorrelation values ranging from 0.729 to 0.829 and sensitivity values ranging from 0.196 to 0.241. Based on the results of the average annual growth of the basal area (3363 ± 928) and average volume increase ($9.71 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$) it can be stated that in the above-mentioned range of altitudes is also located the production optimum of common alder in the studied area.

MOŽNOSTI VYUŽITIA RÝCHLEJ KINETIKY FLUORESCENCIE CHLOROFYLU A PRI HODNOTENÍ TERMOSTABILITY PSII NA PRÍKLADE BUKA LESNÉHO

Hana HÚDOKOVÁ – Alena KONÔPKOVÁ – Daniel KURJAK

Hana HÚDOKOVÁ – Alena KONÔPKOVÁ – Daniel KURJAK: Možnosti využitia rýchlej kinetiky fluorescence chlorofylu *a* pri hodnotení termostability PSII na príklade buka lesného. Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

ABSTRAKT

Meranie fluorescence chlorofylu *a* sa využíva na hodnotenie primárnych fotochemických procesov, často v súvislosti s teplotným stresom. Hodnotenie rýchlej kinetiky fluorescence (tzv. OKJIP kriviek) je relatívne finančne nenáročné a rýchle, čo umožňuje hodnotiť výrazne väčší súbor rastlín v porovnaní s väčšinou fyziologických parametrov. V rámci hodnotenia veľkého počtu vzoriek (v prípade viacerých variantov resp. blokov a pri simulácii rôznych teplôt) však často vzniká potreba hodnotiť zozbieraný materiál počas viacerých dní. Druhou možnosťou je priebežne materiál odoberať každý deň, čo prináša viaceré komplikácie najmä pri odberoch mimo Slovenska. Preto sme zisťovali citlivosť parametrov rýchlej kinetiky fluorescence chlorofylu *a* na stres z vysokej teploty v deň odberu a počas ďalších dvoch dní. Merané boli parametre ako maximálny kvantový výťažok PSII F_v/F_m , bazálna fluorescence F_0 , počet aktívnych reakčných centier RC/ABS , index fotochemickej výkonnosti PI a hodnota K-kroku W_K , pričom sme hodnotili spoľahlivosť meraní pri nestresujúcej teplote (25 °C) a pri supraoptimálnej teplote (48 °C). Porovnávané boli dve proveniencie buka, pochádzajúce z kontrastných regiónov – slovinská proveniencia 55_SL (14°20'60" v. z. d., 45°43'48" s. z. š.; 1040 m n. m.) a poľská proveniencia 39_PL (19°10'12" v. z. d., 49°49'47" s. z. š.; 450 m n. m.). Proveniencie boli pestované na rovnakej proveniencijnej ploche Tále (19°02' v. z. d., 48°38' s. z. š.; 810 m n. m.), aby bolo možné zistiť, či reagujú porovnateľne. Pri meraniach v nestresujúcich podmienkach (25 °C) sme pre žiadny z hodnotených parametrov nezistili štatisticky významné rozdiely ani po dvoch dňoch skladovania. Významné zmeny skladovaním však nastali v odolnosti voči vysokej teplote: pre väčšinu parametrov sme nezistili významný rozdiel jeden deň po odbere. Dva dni po odbere sa však pre všetky parametre potvrdil významný pokles termostability pri bukoch s pôvodom v Slovinsku. Pri bukoch s pôvodom v Poľsku sme zaznamenali miernejší vplyv, pričom zmeny boli štatisticky významné pre dva z piatich hodnotených parametrov. Pokles hodnoty tzv. K-kroku krivky bol identifikovateľný už prvý deň po odbere. Pre testy termostability je preto potrebné vzorky spracovať najneskôr deň po odbere, avšak K-krok možno spoľahlivo hodnotiť len v deň odberu.

Kľúčové slová: *Fagus sylvatica* L., rýchla kinetika fluorescence chlorofylu *a*, OKJIP krivka, teplotný stres

ÚVOD

Podľa scenárov klimatickej zmeny očakávame zvýšený výskyt teplotných extrémov a najmä výskyt supraoptimálnych teplôt (KOPPE ET AL., 2004). Teplota pritom predstavuje významný faktor, ktorý ovplyvňuje rast, výkonnosť a v konečnom dôsledku aj prežívanie rastlín. Dobře zdokumentovaný bol napr. prípad rozsiahlych horúčav spojených so suchom v lete 2003, kedy júlové teploty boli až o 6 °C vyššie ako dlhodobý priemer. Tieto podmienky v Európe spôsobili značný, až 30 %-ný pokles celkovej hrubej primárnej produkcie a niektoré porasty vykazovali redukciiu rastu až o 50 % (BERTINI ET AL., 2011; CIAIS ET AL., 2005). Poznatky o reakcii fyziologických procesov drevín na vysoké teploty môžu preto prispieť k zlepšeniu ich produktivity a vitality a zmierniť nepriaznivé vplyvy klimatických zmien výberom vhodného reprodukčného materiálu pre budúce umelé zalesňovanie (SONG ET AL., 2014)

Viacero autorov považuje fotosyntézu a konkrétne PSII, za najcitlivejší komponent rastlín vo vzťahu k teplotnému stresu. Je teda evidentné, že jedným z vhodných kritérií pre posúdenie citlivosti genetických zdrojov na vysokú teplotu je analýza aktivity PSII a to hlavne prostredníctvom parametrov fluorescence chlorofylu *a*. Meranie rýchlej kinetiky fluorescence chlorofylu je navyše rýchle, efektívne a spoľahlivé a umožňuje zmerať veľké množstvo údajov za kratší čas ako pri iných metódach hodnotenia fyziologických funkcií rastliny (ASHRAF AND HARRIS, 2013; BRESTIČ ET AL., 2010; HALDIMANN AND FELLER, 2004; YAMASAKI ET AL., 2002). Pri meraní veľkého množstva vzoriek je však niekedy nutné spracovávať vzorky dlhšie ako jeden deň, a preto je potrebné ich uskladniť. V prípade vzoriek, ktoré nepochádzajú zo Slovenska a je potrebný ich transport, sa doba skladovania môže predĺžiť. Z tohto dôvodu sme sa v práci zamerali na skúmanie možností využitia rýchlej kinetiky fluorescence chlorofylu *a* pre hodnotenie miery teplotného stresu a hodnotili sme taktiež vplyv skladovania v chladiacom zariadení na spoľahlivosť získaných výsledkov termostability PSII.

Ako experimentálny materiál bol pre prácu vybraný buk lesný, ktorý patrí k našim najvýznamnejším drevinám a s podielom viac ako 32% je aj najrozšírenejšou drevinou. Plocha lesných ekosystémov, kde je prímiesou aj buk, zaberá v súčasnosti viac ako 85% z rozlohy lesného pôdneho fondu na Slovensku (GÖMÖRY, 2011).

MATERIÁL A METÓDY

Rastlinný materiál

Rastlinný materiál bol zozbieraný na provenienčnej ploche Tále (48° 38' s. z. š., 19° 02' v. z. d., 810 m n.m). Provenienčná plocha Tále bola založená v roku 2000 s využitím dvojročných sadeníc 24 proveniencií buka lesného. Plocha zahŕňa tri náhodne usporiadané, kontinuálne bloky, s východiskovým počtom 50 sadeníc na provenienciu (GÖMÖRY ET AL., 2015).

Pre experiment sme použili listy odobrané z poľskej proveniencie 39_PL a slovinskej proveniencie 55_SL, ktoré pochádzajú z kontrastných regiónov. Miesto pôvodu poľskej proveniencie 39_PL sa nachádza v klimatickom optime buka v nadmorskej výške 450 m

n. m. s priemernou ročnou teplotou 6,6 °C, počas vegetačnej sezóny je priemerná teplota 13,9 °C, priemerný ročný úhrn zrážok je 903 mm a v priebehu vegetačného obdobia 533 mm. Naopak, pôvod slovinskej proveniencie 55_SI je lokalizovaný mierne nad klimatickým optimom buka, v nadmorskej výške 1040 m n. m. Priemerná ročná teplota na tejto ploche je 8,1 °C vo vegetačnom období až 14,9 °C. Priemerný ročný úhrn zrážok sa pohybuje okolo 1345 mm, počas vegetačnej sezóny 586 mm.

Test termotolerancie

Vzorky sme odoberali na konci augusta 2016 v poludňajších hodinách. Odbery sme realizovali zo slnnej časti hornej tretiny koruny, pričom sme odoberali vetvy z troch stromov, vždy v dvoch blokoch na provenienciu. Vetvy sme po odobratí uložili do uzatvárateľných igelitových vreciek, aby nestratili vlhkosť a uložili do chladiaceho zariadenia (8°C), aby neboli vystavené vplyvom počasia a podmienkam počas transportu. Odobraté vzorky sme testovali v laboratórnych podmienkach. Pre každého jedinca sme testovali tri listy a to pri izbovej teplote 25°C a teplotnom strese pri 48°C, počas troch dní, vrátane dňa, kedy boli vzorky odobraté.

Sledovali sme parametre rýchlej kinetiky fluorescencie chlorofylu *a*, odvodené z OKJIP krivky ako maximálny kvantový výťažok PSII F_v/F_m , bazálna fluorescencia F_0 , počet aktívnych reakčných centier RC/ABS , index fotochemickej výkonnosti PI a hodnota K-kroku W_K , s použitím fluorimetra Handy PEA (Hanstech Ltd., Veľká Británia). Listy, ktoré neboli vystavené teplotnému stresu (pri izbovej teplote) sme 30 minút adaptovali na tmu pomocou listových klapiek a následne v priebehu jednej sekundy ožiarili saturačným pulzom s intenzitou 3500 $\mu\text{mol e}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Pomocou saturačného pulzu sme indukovali fluorescenciu chlorofylu *a*, ktorá bola počas ožiarenia saturačným pulzom zaznamenávaná každých 10 μs . Druhú časť vzoriek sme vystavili teplote 48 °C. Teplotný stres sme simulovali pomocou vodného kúpeľa WNE22 (Memmert, Nemecko) po dobu 30 minút. Listy sme pred vložením do vodného kúpeľa uzatvorili do sklenených erlenmeyerových baniek. Po vystavení teplotnému stresu sme postupovali rovnako ako v predošlom prípade: vzorky sme adaptovali na tmu a následne zopakovali ožiarenie saturačným pulzom. Pre všetky stromy sme merania robili v dvoch opakovaniach s použitím nového listu, vždy z rovnakej vetvy.

Matematicko-štatistické vyhodnotenie

Štatistické vyhodnotenie nameraných údajov sme robili pomocou programu STATISTICA 12 (StatSoft®, USA). Bola testovaná normalita rozdelenia výberu dát Shapiro-Wilkovým testom. Rozdiely medzi provenienciami a termínmi merania sme testovali jednofaktorovou analýzou variancie. Následne sme stanovili párové kontrasty na hladine významnosti 5% použitím Tukeyovho post-hoc testu.

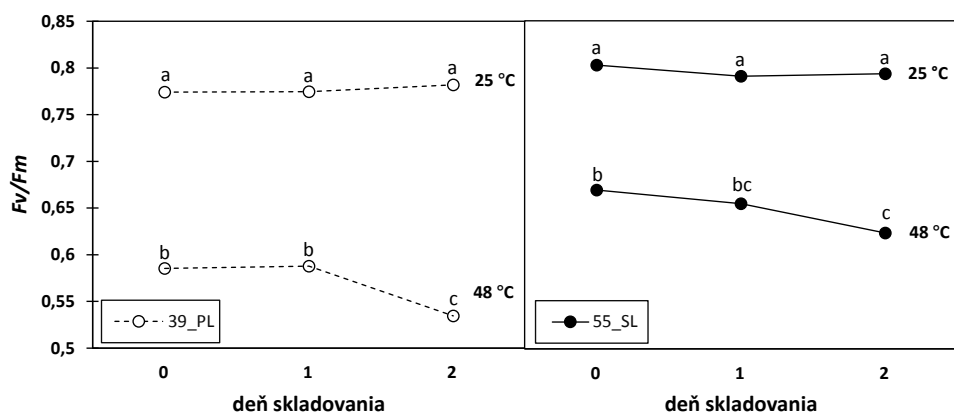
VÝSLEDKY A DISKUSIA

Na základe metódy merania rýchlej kinetiky fluorescence chlorofylu *a* (tzv. OJIP kinetiky) je možné kalkulovať veľké množstvo informácií a parametrov pre hodnotenie miery teplotného stresu u rastlín a ich reakcie na vysokú teplotu ako stresový faktor (BILGER ET AL., 1984; BRESTIČ ET AL., 2013; BRESTIC AND ZIVCAK, 2013). Priebeh OJIP krivky sa totiž vplyvom supraoptimálnych teplôt mení, čo sa pripisuje konformačným zmenám PSII a zmene využitia tepelnej energie: (i) bazálna fluorescencia (F_0) prudko narastá, čo odráža ireverzibilné poškodenie PSII v dôsledku odpojenia svetlozberných komplexov od reakčných centier PSII, (ii) maximálna fluorescencia (F_m) lineárne klesá so stúpajúcou teplotou, čo je pravdepodobne spojené s postupným uzatváraním reakčných centier PSII v dôsledku porušenia transportu elektrónov, pričom tieto zmeny v konečnom dôsledku vedú k (iii) zníženiu maximálneho kvantového výťažku PS II (F_v/F_m) (BRESTIC AND ZIVCAK, 2013; BRIANTAIS ET AL., 1996; PASTENES AND HORTON, 1996; POSPIŠIL ET AL., 1998).

Prvým stanoveným parametrom bol preto maximálny kvantový výťažok PSII (F_v/F_m), ktorý je stále jeden z parametrov najčastejšie využívaných pri hodnotení stavu fotosyntetického aparátu. Ide o pomer medzi variabilnou a maximálnou fluorescenciou chlorofylu *a* pri asimilačných orgánoch adaptovaných na tmu. Pri nestresovaných vzorkách sa hodnoty F_v/F_m pohybujú v rozmedzí od 0,78 až 0,84, avšak pri stresových podmienkach je maximálna fotochemická efektívnosť značne redukovaná (BJÖRKMAN AND DEMMIG-ADAMS, 1995; STIRBET AND GOVINDJEE, 2011). V našom prípade sa pri nestresovaných vzorkách hodnoty F_v/F_m pohybovali u oboch proveniencií okolo 0,77 až 0,8. Hodnoty F_v/F_m boli počas všetkých testovaných dní viac-menej identické, čiže doba skladovania nemala žiadny vplyv na referenčné hodnoty F_v/F_m . Po vystavení teplotnému stresu, síce listy rozdielnych proveniencií reagujú podobne (Obr.1).

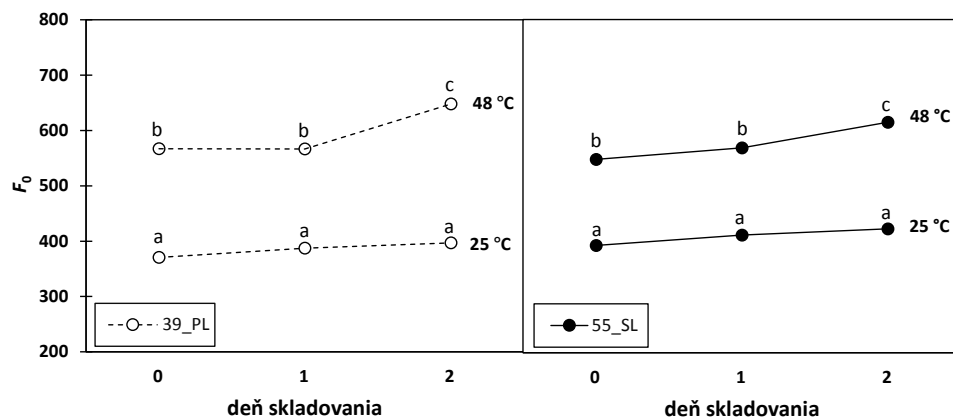
Počas prvých dvoch dní merania sa totiž hodnota tohto parametra signifikantne nemenila a významne klesla až tretí deň merania. Avšak ako vyplýva z Obr.1 poľská proveniencia 39_PL reagovala na teplotný stres citlivejšie ako slovinská proveniencia 55_SI. Hodnoty maximálneho kvantového výťažku PSII pri proveniencii 39_PL sa pohybovali v rozmedzí od 0,59 po 0,53 a pri proveniencii 55_SI od 0,67 po 0,62.

Ďalším stanoveným parametrom bola bazálna fluorescencia chlorofylu *a* (F_0), ktorá predstavuje hodnotu fluorescence nameranej v čase 50 μ s od začiatku saturačného pulzu (OLŠOVSKÁ ET AL., 2013). Ako už bolo spomenuté, hodnota F_0 pri teplotnom strese prudko narastá, čo pravdepodobne odráža nezvratnú súhrnnú dezorganizáciu komplexov PSII v dôsledku oddelenia svetlozberných komplexov od reakčných centier PSII (YAMANE ET AL., 1998; ŽIVČÁK, 2015). Pri nestresujúcich podmienkach sme nezaznamenali výrazné zmeny bazálnej fluorescence počas troch dní meraní a to ani u poľskej ani u slovinskej proveniencie (Obr. 2). Podľa predpokladu však bazálna fluorescencia výrazne vzrástla pri vzorkách, ktoré boli vystavené teplotnému stresu. Počas prvých dvoch dní boli hodnoty F_0 pri stresovaných jedincoch vyrovnané. Tretí deň sme však zaznamenali výrazný nárast pri oboch provenienciách, čo bol pravdepodobne zapríčinené vplyvom skladovania vzoriek. Pri vzorkách skladovaných tri dni sme teda, rovnako ako v prípade parametra F_v/F_m , zaznamenali citlivejšiu reakciu na supraoptimálne teploty ako pri vzorkách, ktoré boli skladované kratší čas prípade spracované hneď po odbere.



Obr. 1 Maximálny kvantový výťažok PSII (F_v/F_m) v deň odberu a 1 resp. 2 dni po odbere. Hodnoty merané pri teplote 25 °C a 48 °C, zvlášť pre provenienciu 39_PL a 55_SI. Odlišné písmená označujú významnosť rozdielov na hladine $\alpha=0,05$.

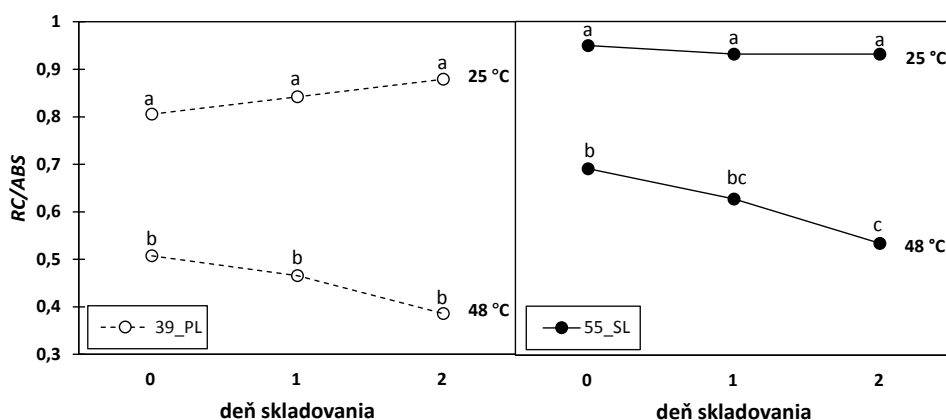
Fig. 1 Maximal quantum yield of PSII (F_v/F_m) measured on the day of sampling, the first and the second day after sampling, respectively. Values were measured at teperature of 25 °C and 48 °C, separately for provenance 39_PL and 55_SI. Different letters indicate the differences at significance level of $\alpha=0,05$.



Obr. 2 Bazálna fluorescencia (F_0) v deň odberu a 1 resp. 2 dni po odbere. Hodnoty merané pri teplote 25 °C a 48 °C, zvlášť pre provenienciu 39_PL a 55_SI. Odlišné písmená označujú významnosť rozdielov na hladine $\alpha=0,05$.

Fig. 2 Basal fluorescence (F_0) measured on the day of sampling, the first and the second day after sampling, respectively. Values were measured at teperature of 25 °C and 48 °C, separately for provenance 39_PL and 55_SI. Different letters indicate the differences at significance level of $\alpha=0,05$.

Ďalšie dva parametre, množstvo aktívnych reakčných centier PSII (RC/ABS) a index výkonnosti (PI), vykazovali rovnaký vzorec odozvy v závislosti od dĺžky uskladnenia pred meraním termostability PSII (Obr. 3 a Obr. 4). Živčák (2015) hodnotí PI ako parameter, ktorý zoskupuje tri navzájom nezávislé parametre: množstvo reakčných centier, ktoré sú plne funkčné, ďalej najvyšší kvantový výťažok PSII a zároveň aj možnosť, že elektrón skutočne vstúpi do transportného elektrónového reťazca. Pri parametri PI zistil, že reagoval na teplotný stres citlivejšie v porovnaní s najčastejšie používaným parametrom F_v/F_m . Pri tomto parametri sú zohľadňované aj zmeny, ktoré zasiahli PSII len nepriamo a vyznačoval sa, aj pri štúdiu s rôznymi odrodami pšenice, veľkou medzigenotypovou variabilitou.



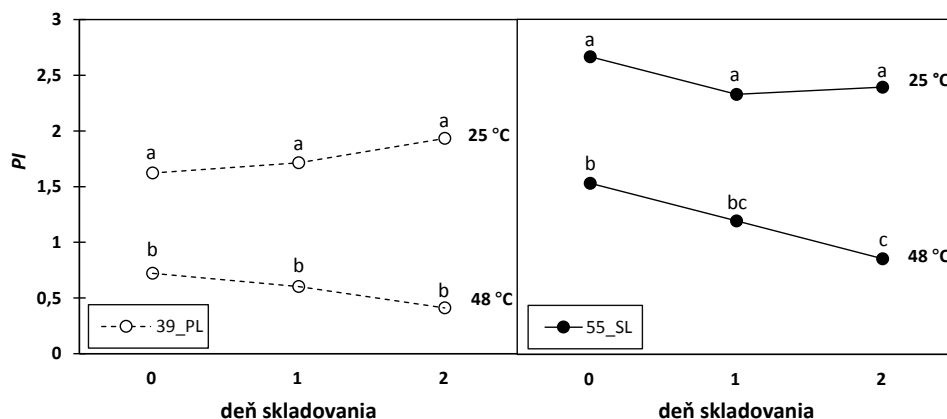
Obr. 3 Počet aktívnych reakčných centier (RC/ABS) v deň odberu a 1 resp. 2 dni po odbere. Hodnoty merané pri teplote 25 °C a 48 °C, zvlášť pre provenienciu 39_PL a 55_SI. Odlišné písmená označujú významnosť rozdielov na hladine $\alpha=0,05$.

Fig. 3 Number of active reaction centers (RC/ABS) measured on the day of sampling, the first and the second day after sampling, respectively. Values were measured at teperature of 25 °C and 48 °C, separately for provenance 39_PL and 55_SI. Different letters indicate the differences at significance level of $\alpha=0,05$.

V nestresujúcich podmienkach sa nenašli štatisticky významné rozdiely v množstve reakčných centier PSII a indexe výkonnosti medzi rôznymi dňami merania. Vplyv skladovania na nestresované vzorky nebol významný a preto by bolo možné realizovať merania dní po odbere. Po vystavení supraoptimálnym teplotám sú však rozdiely v počte aktívnych reakčných centier a indexe výkonnosti medzi prvým a tretím dňom merania markantné. Z Obr. 3 a Obr. 4 rovnako vyplýva, že proveniencia 55_SI prosperovala oveľa lepšie v nestresujúcich podmienkach a takisto vykazovala vyššiu mieru termostability PSII v porovnaní s poľskou provenienciou 39_PL.

Posledným meraným parametrom je W_k , ktorý je špecifický pri meraní termostability PSII. Objavenie sa ďalšieho vrcholu na fluorescenčnej OJIP krivke v čase asi 0,3 ms (tzv. K-kroku) je totiž jedným z hlavných indikátorov teplotného stresu u rastlín. K-krok naznačuje nezvratné, teplom-indukované poškodenie PSII, a to buď modifikáciou svet-

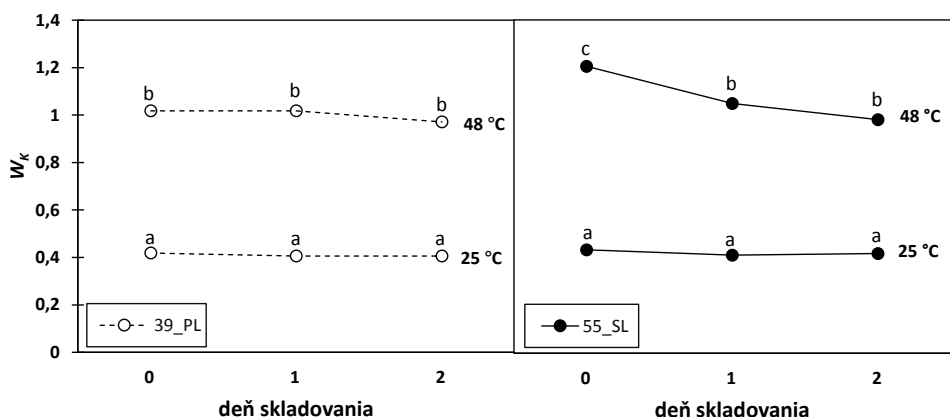
ložerných komplexov, alebo inhibíciou transportu elektrónov z feofytínu na chinón A. Takisto to môže byť spojené s poškodením kyslík-vyvíjajúceho komplexu (LAZÁR ET AL., 1999; SRIVASTAVA ET AL., 1997; STRASSER, 1997). Aj v práci Brestica and Zivcaka (2013) sa tento parameter uvádza ako najvhodnejší pre meranie stresu z vysokej teploty, pretože na ostatné stresové faktory nereaguje tak citlivo ako na teplotný stres.



Obr. 4 Index výkonnosti (PI) v deň odberu a 1 resp. 2 dni po odbere. Hodnoty merané pri teplote 25 °C a 48 °C, zvlášť pre provenienciu 39_PL a 55_SI. Odlišné písmená označujú významnosť rozdielov na hladine $\alpha=0,05$.

Fig. 4 Performance index (PI) measured on the day of sampling, the first and the second day after sampling, respectively. Values were measured at temperature of 25 °C and 48 °C, separately for provenance 39_PL and 55_SI. Different letters indicate the differences at significance level of $\alpha=0,05$.

Výskyt K-kroku je teda špecifickým prejavom teplotného stresu a pomocou neho je možné stanoviť v akej miere je PSII poškodený. Hodnota variabilnej fluorescence v K-vrchole (W_K) sa pri nestresujúcich jedincoch pohybovala v rozmedzí od 0,41–0,44 (Obr. 5), čo korešponduje s hodnotou, ktorú na intaktných jedincoch pšenice popisuje aj BRESTIČ ET AL. (2010). Hodnoty W_K pri nestresovaných vzorkách z oboch proveniencií vykazujú rovnaké hodnoty počas všetkých troch meraných dní, takže ich môžeme v nestresujúcich podmienkach merať aj počas dlhšieho časového intervalu. Po vystavení teplotnému stresu pri vzorkách z poľskej proveniencie parameter W_K značne stúpol, ale jeho hodnoty sa vplyvom skladovania menia len nevýznamne. Avšak pri slovinskej proveniencii sú rozdiely medzi dňami meraní výraznejšie, kedy v prvý deň reagujú vzorky na stresovú teplotu výraznejšie ako počas ostatných dní. Počas druhého aj tretieho dňa sa hodnoty znivelizovali a nenastali takmer žiadne zmeny medzi druhým a tretím dňom merania. Hodnotenie tohto citlivého parametra môžeme teda robiť spoľahlivo v deň odberu, nakoľko už po prvom dni skladovania dochádza k poklesu a vyrovnávaniu hodnôt tohto parametra a tým by mohla byť spôsobená odchýlka od reálnych hodnôt pri testovaní termostability PSII. Pri nestresovaných vzorkách sa hodnoty W_K výrazne nemenia.



Obr. 5 Hodnota variabilnej fluorescence v K-vrchole (W_K) v deň odberu a 1 resp. 2 dni po odbere. Hodnoty merané pri teplote 25 °C a 48 °C, zvlášť pre provenienciu 39_PL a 55_SI. Odlišné písmená označujú významnosť rozdielov na hladine $\alpha=0,05$.

Fig. 5 The value of variable fluorescence in the K-step (W_K) measured on the day of sampling, the first and the second day after sampling, respectively. Values were measured at temperature of 25 °C and 48 °C, separately for provenance 39_PL and 55_SI. Different letters indicate the differences at significance level of $\alpha=0,05$.

ZÁVER

Stres z vysokej teploty je faktorom, ktorý čoraz viac zasahuje do fyziologických procesov drevín. Je preto zaujímavým podnetom pre výskumy a pre hľadanie nových spôsobov, ktorými by bolo možné identifikovať odolnejšie a lepšie adaptované genotypy.

Meranie rýchlej kinetiky fluorescence chlorofylu *a* je v dnešných časoch veľmi využívaná metóda pri posúdení miery teplotného stresu. Je dobre rozvinutá a vhodne zabezpečená technickými prostriedkami a umožňuje teda poskytovať veľké množstvo informácií, ktoré môžeme pri správnom nastavení výskumu a meraní získať. Hoci je používanie metódy rýchlej kinetiky fluorescence chlorofylu *a* bežné, je potrebné, aby sme brali do úvahy aj obmedzenia, ktoré sa týkajú tejto metódy. Jedným z hlavných obmedzení v terénnych podmienkach je to, že mnohokrát je vzorky potrebné analyzovať počas viacerých dní. Zaujímavým aspektom je preto sledovanie vplyvu skladovania asimilačných orgánov na presnosť a dôveryhodnosť získaných výsledkov. V rámci predloženej práce sme sa preto snažili zistiť, ako významne ovplyvňuje skladovanie zmeny hodnôt parametrov rýchlej kinetiky fluorescence chlorofylu *a*. Potvrdilo sa, že pri nestresujúcich podmienkach je možné meranie počas všetkých troch dní, pričom nedochádza k významnej zmene parametrov ani po dvoch dňoch skladovania. Pri stresovaných vzorkách je však spoľahlivé meranie možné maximálne deň po odbere. Zvlášť viditeľné to bolo pri parametri W_{K2} , pri ktorom došlo k takmer úplnému vyrovnaniu hodnôt už po prvom dni skladovania, pričom tieto merania by sa nemohli spoľahlivo realizovať počas viacerých dní.

LITERATÚRA

- ASHRAF, M., HARRIS, P.J.C., 2013. Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica* 51, 163–190. doi:10.1007/s11099-013-0021-6
- BERTINI, G., AMORIELLO, T., FABBIO, G., PIOVOSI, M., 2011. Forest growth and climate change: evidences from the ICP-Forests intensive monitoring in Italy. *IForest - Biogeosciences For.* 4, 262. doi:10.3832/ifor0596-004
- BILGER, H.W., SCHREIBER, U., LANGE, O.L., 1984. Determination of leaf heat resistance: comparative investigation of chlorophyll fluorescence changes and tissue necrosis methods. *Oecologia* 63, 256–262.
- BJÖRKMAN, O., DEMMIG-ADAMS, B., 1995. Regulation of Photosynthetic Light Energy Capture, Conversion, and Dissipation in Leaves of Higher Plants, in: Schulze, P.D.E.-D., Caldwell, P.D.M.M. (Eds.), *Ecophysiology of Photosynthesis*, Springer Study Edition. Springer Berlin Heidelberg, pp. 17–47. doi:10.1007/978-3-642-79354-7_2
- BRESTIČ, M., OLŠOVSKÁ, K., PIVKOVÁ, J., 2010. Bioindikácia termotolerancie fotosyntetického aparátu pšenice ozimnej (*Triticum aestivum* L.). *Acta Phytochemica Zootech.* 67–71.
- BRESTIČ, M., ZIVČAK, M., 2013. PSII Fluorescence Techniques for Measurement of Drought and High Temperature Stress Signal in Crop Plants: Protocols and Applications, in: Rout, G.R., Das, A.B. (Eds.), *Molecular Stress Physiology of Plants*. Springer India, India, pp. 87–131. doi:10.1007/978-81-322-0807-5_4
- BRESTIČ, M., ŽIVČÁK, M., OLŠOVSKÁ, K., REPKOVÁ, J., 2013. Involvement of chlorophyll a fluorescence analyses for identification of sensitiveness of the photosynthetic apparatus to high temperature in selected wheat genotypes, in: Kuang, T., Zhang, L., Lu, C. (Eds.), *Photosynthesis Research for Food, Fuel and the Future*. Zhejiang Univ. Press Springer, Hangzhou.
- BRIANTAIS, J.M., DACOSTA, J., GOULAS, Y., DUCRUET, J.-M., MOYA, I., 1996. Heat stress induces in leaves an increase of the minimum level of chlorophyll fluorescence, Fo: A time-resolved analysis. *Photosynth. Res.* 48, 189–196. doi:10.1007/BF00041008
- CLAIS, P., REICHSTEIN, M., VIOVY, N., GRANIER, A., OGÉE, J., ALLARD, V., AUBINET, M., BUCHMANN, N., BERNHOFER, C., CARRARA, A., CHEVALLIER, F., NOBLET, N.D., FRIEND, A.D., FRIEDLINGSTEIN, P., GRÜNWARD, T., HEINESCH, B., KERONEN, P., KNOHL, A., KRINNER, G., LOUSTAU, D., MANCA, G., MATTEUCCI, G., MIGLIETTA, F., OURCIVAL, J.M., PAPALE, D., PILEGAARD, K., RAMBAL, S., SEUFERT, G., SOUSSANA, J.F., SANZ, M.J., SCHULZE, E.D., VESALA, T., VALENTINI, R., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437, 529–533. doi:10.1038/nature03972
- GÖMÖRY, D., 2011. Súčasný rozšírenie buka lesného v Európe. *Buk Bukové Ekosystémy Slov.* 636.
- GÖMÖRY, D., DITMAROVÁ, L., HRIVNÁK, M., JAMNICKÁ, G., KMEŤ, J., KRAJMEROVÁ, D., KURJAK, D., 2015. Differentiation in phenological and physiological traits in European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Eur. J. For. Res.* 134, 1075–1085. doi:10.1007/s10342-015-0910-2
- HALDIMANN, P., FELLER, U., 2004. Inhibition of photosynthesis by high temperature in oak (*Quercus pubescens* L.) leaves grown under natural conditions closely correlates with a reversible heat-dependent reduction of the activation state of ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase. *Plant Cell Environ.* 27, 1169–1183.
- KOPPE, C., KOVATS, S., JENDRITZKY, G., MENNE, B., 2004. Heat waves: risks and responses, 2nd ed. Regional Office for Europe, World Health Organization.
- LAZÁR, D., POSPÍŠIL, P., NAUŠ, J., 1999. Decrease of fluorescence intensity after the K step in chlorophyll a fluorescence induction is suppressed by electron acceptors and donors to photosystem 2. *Photosynthetica* 2, 255–265.
- OLŠOVSKÁ, K., ŽIVČÁK, M., HUNKOVÁ, E., DREVEŇÁKOVÁ, P., 2013. Assessment of the photosynthesis-related traits and high temperature resistance in tetraploid wheat (*Triticum* L.) genotypes. *J. Cent. Eur. Agric.* 14, 289–302. doi:10.5513/JCEA01/14.2.1261
- PASTENES, C., HORTON, P., 1996. Effect of High Temperature on Photosynthesis in Beans (I. Oxygen Evolution and Chlorophyll Fluorescence). *Plant Physiol.* 112, 1245–1251.
- POSPÍŠIL, P., SKOTNICA, J., NAUŠ, J., 1998. Low and high temperature dependence of minimum F0 and maximum FM chlorophyll fluorescence in vivo. *Biochim. Biophys. Acta BBA - Bioenerg.* 1363, 95–99. doi:10.1016/S0005-2728(97)00095-9

- SONG, Y., CHEN, Q., CI, D., SHAO, X., ZHANG, D., 2014. Effects of high temperature on photosynthesis and related gene expression in poplar. *BMC Plant Biol.* 14, 111. doi:10.1186/1471-2229-14-111
- SRIVASTAVA, A., GUISSÉ, B., GREPPIN, H., STRASSER, R.J., 1997. Regulation of antenna structure and electron transport in Photosystem II of *Pisum sativum* under elevated temperature probed by the fast polyphasic chlorophyll a fluorescence transient: OKJIP. *Biochim. Biophys. Acta BBA - Bioenerg.* 1320, 95–106. doi:10.1016/S0005-2728(97)00017-0
- STIRBET, A., GOVINDJEE, 2011. On the relation between the Kautsky effect (chlorophyll a fluorescence induction) and Photosystem II: Basics and applications of the OJIP fluorescence transient. *J. Photochem. Photobiol. B* 104, 236–257. doi:10.1016/j.jphotobiol.2010.12.010
- STRASSER, B.J., 1997. Donor side capacity of Photosystem II probed by chlorophyll a fluorescence transients. *Photosynth. Res.* 52, 147–155. doi:10.1023/A:1005896029778
- YAMANE, Y., KASHINO, Y., KOIKE, H., SATOH, K., 1998. Effects of high temperatures on the photosynthetic systems in spinach: Oxygen-evolving activities, fluorescence characteristics and the denaturation process. *Photosynth. Res.* 57, 51–59. doi:10.1023/A:1006019102619
- YAMASAKI, T., YAMAKAWA, T., YAMANE, Y., KOIKE, H., SATOH, K., KATOH, S., 2002. Temperature acclimation of photosynthesis and related changes in photosystem II electron transport in winter wheat. *Plant Physiol.* 128, 1087–1097.
- ŽIVČÁK, M., 2015. Využitie nedeštrukčných metód pri štúdiu účinkov sucha a vysokej teploty na fotosyntetický aparát (Habilitačná práca). Slovenská poľnohospodárska univerzita, Nitra.

Uvedená práca vznikla s finančnou podporou projektov *VEGA č. 2/0034/14*, *APVV-0744-12* a *APVV-0480-12*.

Adresa autorov:

Bc. Hana Húdoková
Mgr. Alena Konôpková
Ing. Daniel Kurjak, PhD.
Fakulta integrovanej ochrany lesa a krajiny
Lesnícka fakulta
Technická Univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24
960 01 Zvolen
e-mail: hhudokova@gmail.com
e-mail: alena.konopkova@tuzvo.sk
e-mail: kurjak@tuzvo.sk

The possibilities of using of fast kinetic of chlorophyll *a* fluorescence for the assessment of PSII thermostability, on the example of European beech

SUMMARY

Measuring of chlorophyll *a* fluorescence is used for evaluating primary photochemical processes, often in relation with stress from high temperature. Evaluating of fast kinetics of fluorescence (OJIP curves) is relatively fast and cheap, which allows us to measure larger set of plants in comparison with most other physiological parameters. However, when there is a large number of samples (in case of multiple variants and many different simulated temperatures) the measuring may take over several days. The second option is to collect samples every day, which brings complications, especially when collecting outside of Slovakia. Therefore, we measured the sensibility of fluorescence parameters in the day of sampling and for next two days. We evaluated the reliability of measurements at non-stressing temperature (25°C) and at supraoptimal temperature of 48°C. Leaves of European beech with different origin (two provenances) but growing on the same plot were measured in order to find out, whether they react comparatively. When measuring at non-stressing environment (25°C), we did not detect any statistically significant differences even after two days of storage. However, the changes in thermostability occurred. Although we did not find out many significant changes during the first day after sampling, two days after the sampling, significant decrease of thermostability of individuals with origin in Slovenia was measured. There was just moderate effect on individuals originating from Poland, where only two of five measured parameters were statistically significant. When comparing the provenances, we found out, that differences in thermostability were significant only for the first and second day after collection, but not for the third day. Differences in so-called K-step of curve were identified only in the day of collection. Therefore, we are able to measure the collected material for three days in non-stress conditions. For the test of thermostability, we can measure leaves one day after sampling, but the measurement of K-step have to be done during the day of sampling.

PRIEDUCHOVÉ CHARAKTERISTIKY BUKA LESNÉHO S RÔZNYM PÔVODOM

Peter P E T R Í K , Alena K O N Ô P K O V Á , Daniel K U R J A K

PETER PETRÍK, ALENA KONÔPKOVÁ, DANIEL KURJAK: Prieduchové charakteristiky buka lesného s rôznym pôvodom. Acta Facultatis Forestalis, Zvolen.

Predkladaná práca sa zaoberá hodnotením vnútrodrohových rozdielov prieduchových charakteristík buka lesného (*Fagus sylvatica*). Hodnotených bolo 12 proveniencií pochádzajúcich z viacerých európskych krajín (Nemecko, Francúzsko, Luxembursko, Poľsko, Veľká Británia, Slovinsko a Rakúsko), rastúcich na výskumnej ploche Tále pri Zvolene. Kolooidovou metódou boli odobrané odtlačky, z ktorých bolo stanovených viacero morfológických charakteristík: hustota prieduchov (SD), dĺžka (L_A) a šírka (W_A) zatváracích buniek. Z nameraných údajov bol odvodený index potenciálnej vodivosti (PCI). Následne sme testovali závislosť priemerných hodnôt jednotlivých znakov na geografických a klimatických charakteristikách miesta pôvodu proveniencií. Z výsledkov vyplýva, že potenciálna vodivosť (PCI) stúpa s množstvom zrážok počas najsuchšieho mesiaca v mieste pôvodu (BIO14) a PCI taktiež stúpa s množstvom zrážok počas najsuchšieho štvrtroka (BIO17). Priemerná hustota prieduchov stúpa so zvyšujúcim sa množstvom zrážok za najchladnejší štvrtrok (BIO19). Z výsledkov taktiež vyplýva, že vzdialenosť od postglaciálneho refúgia buka lesného má vplyv na hustotu prieduchov. Porovnávali sme taktiež slnné a tienne listy. Hustota prieduchov na tienných listoch je vo všetkých prípadoch nižšia ako pri slnných listoch. Významné vzťahy s podmienkami v mieste pôvodu sme však zistili len na slnných listoch.

Kľúčové slová: *Fagus sylvatica*, provenienčný pokus, hustota prieduchov, index potenciálnej vodivosti

ÚVOD

Buk lesný (*Fagus sylvatica*) je druh relatívne citlivý na sucho. Vyskytuje sa v strednej a západnej Európe, je rozšírený taktiež na juh do stredomoria, kde je viazaný na horské regióny v ktorých je nedostatok zrážok. Spoločenstvá na týchto stanovištiach môžeme považovať za relikty, ktoré existujú na hranici ekologických potrieb (GARCIA-PLAZAOLA A BECERRIL 2000). V nasledujúcich decéniách očakávame zvýšenie globálnych priemerov teplôt a dlhšie obdobia sucha v letných mesiacoch (SCHÄR et al. 2004). Sucho je jeden z najvýznamnejších limitujúcich faktorov fotosyntézy, pretože spôsobuje uzatváranie prieduchov, ktoré sa nachádzajú na asimilačných orgánoch rastlín. Prieduch je mikroskopický pór na povrchu listov, cez ktorý dochádza k interakcii s vonkajším prostredím a pár špecializovaných buniek, ktoré tento pór ohraničujú. Zatváracie bunky reagujú na prostredie zmenou veľkosti prieduchovej štrbiny a tým regulujú príjem CO_2 aj vodný režim rastliny.

Pri momentálnych globálnych klimatických zmenách je výskum prieduchov veľmi aktuálny. Hustota prieduchov, rozmery jednotlivých prieduchov, ako aj odvodené charakteristiky sú pomerne jednoducho merateľné veličiny s jednotnou metodikou merania. Tieto charakteristiky sa u jednotlivých genotypov buka líšia (DENK 2003). To poukazuje na fakt, že rastliny sa v tomto smere dokážu adaptovať na vplyv prostredia. Napríklad, veľkosť prieduchov je menšia, hustota prieduchov je väčšia a ovládanie prieduchov je oveľa citlivejšie v arídnom prostredí. Taktiež bolo dokázané že hustota prieduchov, ich funkčnosť a fluorescenčné parametre závisia od veku listu (NESTERENKO et al. 2006). Ďalšou stratégiou rastlín pri adaptácii na vlastnosti prostredia je možnosť prispôbiť veľkosť prieduchu a hustotu prieduchov počas vývinu listu (HAMANISHI et al. 2012). Rastliny sú tak schopné kontrolovať vodnú bilanciu a optimalizovať schopnosť fotosyntézy s dostupnou zásobou vody (CASSON AND GRAY 2008). Z tohto pohľadu môžu byť prieduchové charakteristiky indikátorom fyziologického stavu rastliny. Tieto zákonitosti taktiež priamo ovplyvňujú fyziológiu, možnosť adaptácie voči nepriaznivým činiteľom a aj celkovú produkčnú schopnosť dreviny. Prieduchové charakteristiky však vykazujú veľkú variabilitu, pričom sa môže jednať o veľkosť, hustotu a reakciu jednotlivých buniek pri výmene plynov na viacerých úrovniach či už na úrovni listu alebo celého jedinca. Zistenie prieduchových charakteristík je dôležité pre identifikáciu jedincov odolných voči suchu. Pri výbere sadbového materiálu je ťažké nájsť optimálnu rovnováhu medzi charakteristikami, ktoré umožnia rastline šetriť vodu a medzi charakteristikami, ktoré maximalizujú produkciu. Legislatíva zatiaľ prenos rastlinného materiálu nepovoľuje, je to však jedno z najčastejších diskutovaných opatrení zmierňovania dopadov zmeny klímy na lesné porasty. Preto je dôležité získať čo najviac poznatkov o fyziologickej reakcii proveniencií po presune do iných podmienok. Nie je totiž samozrejmé, že odlišné prieduchové charakteristiky si napr. jedince z arídnych oblastí zachovávajú aj po prenose do miernejších podmienok. Cieľom práce preto bolo zistiť, či sa vybrané prieduchové charakteristiky líšia u rôznych proveniencií buka lesného aj po prenose na rovnakú plochu. Hypotézou je, že existuje závislosť medzi hodnotami jednotlivých prieduchových charakteristík a klimatickými resp. geografickými charakteristikami pôvodných stanovišť príslušných proveniencií.

Dospelý strom má veľké množstvo listov, ktoré potrebujú slnečné žiarenie aby na nich mohla prebiehať fotosyntéza. Strom preto organizuje svoje listy tým že mení ich pozíciu, veľkosť a štruktúru (Tab. 1). Typické hodnoty hustoty prieduchov sa môžu pohybovať medzi 100 až 1000 prieduchov na milimeter štvorcový. To závisí od druhu a od podmienok prostredia počas vývinu jedinca. Hustota prieduchov stúpa od bázy listu po vrchol listu a taktiež stúpa od stredovej žilnatiny po okraje listu. Na druhoch kde sa vytvárajú prieduchy na oboch stranách listy je rozmiestenie prieduchov viac uniformné ako u listov kde sú prieduchy len na jednej strane. Hustota prieduchov stúpa od bazálnej časti rastliny po vrchol, resp. po vzdialené konce konárov. Ďalším cieľom bolo preto porovnanie prieduchových charakteristík u slnných a tienných listov.

Tabuľka 1: Rozdiely medzi slnnými a tiennými listami.

Slnné listy	Tienne listy
<ul style="list-style-type: none"> • Menšie listy • Krátke stopky • Listy/stopky s červeným pigmentom • Hrubá kutikula • 2-3 vrstvy palisádového parenchýmu • Hrubé listy • Väčšina chloroplastov v palisádovom parenchýme • Vysoký kompenzačný bod 	<ul style="list-style-type: none"> • Veľké listy • Dlhé stopky • Listy zelené • Tenká kutikula • 1 vrstva palisádového parenchýmu • Tenké listy • Chloroplasty sú rovnomerne rozložené v palisádovom a špongiovitom parenchýme • Nízky kompenzačný bod

MATERIÁL A METÓDY

Rastlinný materiál bol odobratý na provenienčnej výskumnej ploche Tále (48°38' s. z. š, 19°02' v. z. d., 810 m n. m.), ktorá vznikla v roku 2000 ako súčasť európskeho experimentu. V lokalite boli vysadené dvojročné sadenice 32 proveniencií buka lesného z lokalít, ktoré kopírujú areál jeho rozšírenia v Európe. Vysadené boli v troch blokoch s náhodným rozmiestnením plôch. Na každej ploche bolo vysadených 50 jedincov v sponě 2×1 m. Z celkového počtu 32 proveniencií sme v našej práci použili 12 (Tab. 2). Hlavným kritériom pre výber bola nadmorská výška, pričom sme sa snažili rovnomerne pokryť celý rozsah výskytu buka.

Tabuľka 2: Geografické a klimatické údaje pôvodných stanovišť jednotlivých proveniencií (PV).

PV	Long	Lat	Alt	Tavg	T59	Pavg	P59	BIO8	BIO13	BIO14	BIO16	BIO17	BIO19
05FR	1,15	48,37	180	10,02	15,7	670	271	3,9	65	49	189	152	178
03FR	3,1	49,25	140	9,99	15,84	641	283	16,7	59	43	172	135	158
12LX	6,2	49,67	400	8,60	14,92	866	365	1,9	86	57	242	186	221
17UK	-3,42	57,67	10	8,23	12,7	671	303	13,4	76	38	201	125	157
26DE	10,67	53,65	55	8,33	15	678	319	16,5	73	40	209	132	156
30DE	12,42	52,05	140	8,57	15,56	558	282	17,1	65	34	185	109	117
35AT	14,1	47,72	1250	2,35	9,2	1495	779	11,4	184	86	528	287	320
36AT	14,85	47,53	1100	2,94	9,96	1168	648	13	152	61	437	199	203
39PL	19,17	49,83	450	6,31	13,88	903	533	16,1	131	44	360	137	145
43PL	22,82	49,25	900	6,34	14,12	762	433	15,5	105	39	290	123	135
53SI	14,38	45,63	1000	7,53	14,38	1346	577	8,3	143	86	410	264	291
55SI	14,35	45,73	1040	8,07	14,98	1345	586	8,6	141	84	408	260	286

Long zemepisná dĺžka (°), *Lat* zemepisná šírka (°), *Alt* nadmorská výška (m n. m.), *Tavg* priemerná ročná teplota (°C), *T59* priemerná teplota počas vegetačnej sezóny (máj–september) (°C), *Pavg* priemerný ročný úhrn zrážok (mm), *P59* priemerný úhrn zrážok počas vegetačnej sezóny (mm), *BIO8* priemerná teplota počas najvlhšieho štvrťroka (°C), *BIO13* úhrn zrážok počas najvlhšieho mesiaca (mm), *BIO14* úhrn zrážok počas najsuchšieho mesiaca (mm), *BIO16* úhrn zrážok počas najvlhšieho štvrťroka (mm), *BIO17* úhrn zrážok počas najsuchšieho štvrťroka (mm), *BIO19* úhrn zrážok počas najchladnejšieho štvrťroka (mm).

Z každej proveniencie sme vybrali po tri stromy z dvoch blokov. Z každého jedinca sme odobrali list z oslnenej časti koruny a zo spodnej časti koruny. Na spodnú stranu listu sme aplikovali priesvitný lak na nechty s lycrou. Po zaschnutí sme vrstvu laku prelepili priesvitnou lepiacou páskou. Tú sme plynulým rýchlym pohybom strhli a nalepili na podložné sklíčko. Vzorky boli odfotené pod mikroskopom Olympus BX50 pomocou fotoaparátu Canon DS126491 (Canon Inc., Japonsko) a ďalej spracované v programe NIS Elements AR 3.0 (Laboratory Imaging, Česká republika). Hustota prieduchov (*SD*) bola zistená na dvoch plochách 500×500 μm a prepočítaná na 1 mm² pri zväčšení 20×10. Dĺžka (*L_A*) a šírka (*W_A*) zatváracích buniek bola meraná na 15 prieduchoch na jednom odtlačku pri zväčšení 40×10. Z vyššie uvedených charakteristík bol odvodený index potenciálnej vodivosti (potential conductance index):

$$PCI = L_A^2 \times SD \times 10^{-4} \text{ (STOJNÍČ et. al. 2015)}$$

L_A – dĺžka zatváracích buniek

SD – hustota prieduchov

VÝSLEDKY

Regresnú analýzu sme robili pomocou softvéru R 3.1.2 (R Core Team, Austria). Pre zhodnotenie vzťahov sme použili lineárnu a kvadratickú analýzu, hodnotené boli všetky parametre z tab. 2 (geografické a klimatické faktory) voči prieduchovým charakteristikám (*SD*, *LA*, *PCI*). Všetky vzťahy s hladinou významnosti *p* nižšou ako 0,05 sa nachádzajú v tab. 3.

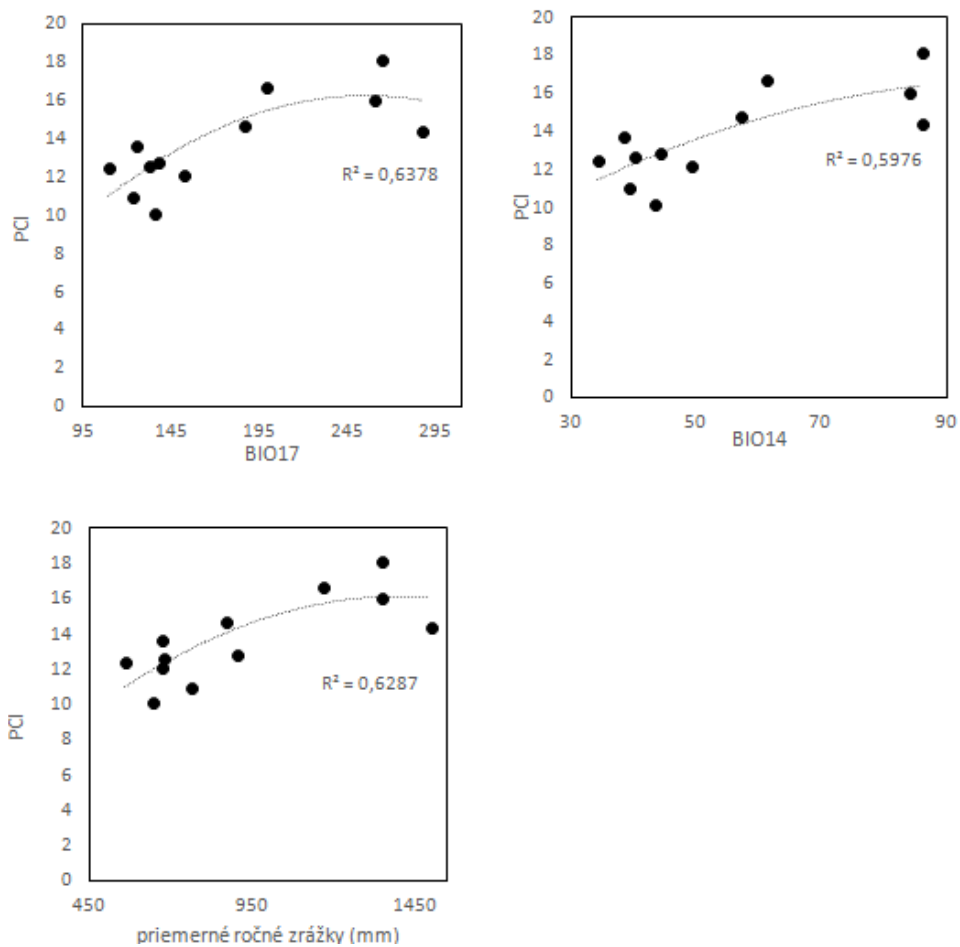
Z rozsiahleho množstva porovnávaných klimatických faktorov sú na obr. 1 prezentované štatisticky významné vzťahy s najvyššími hodnotami *R*². Vzťahy medzi zrážkami v mieste pôvodu proveniencií a prieduchovou vodivosťou majú najvyššiu mieru tesnosti. Z analýzy môžeme vyvodit', že existuje vzťah medzi množstvom zrážok v mieste pôvodu proveniencií a prieduchovou vodivosťou. Buk z oblastí s vyšším množstvom zrážok dokáže vytvoriť viac prieduchov a tým aj zvýšiť svoju potenciálnu vodivosť a to v priemere až o 30%.

Vzťahy medzi teplotnými klimatickými faktormi a prieduchovými charakteristikami neboli štatisticky významné. Taktiež nadmorská výška nie je štatisticky významný faktor vo vzťahu k prieduchovým charakteristikám okrem *LA* (*R*²=0,37).

Tabuľka 3: Lineárne a kvadratické regresie medzi prieduchovými charakteristikami slnných listov a geografickými resp. klimatickými parametrami v mieste pôvodu proveniencií.

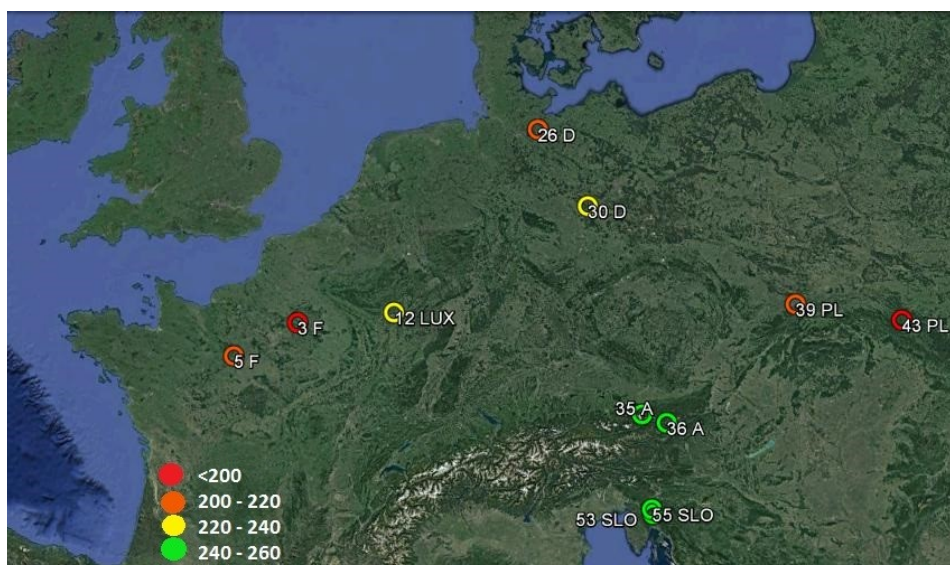
	Lineárny model			Kvadratický model	
	R ²	p	slope	R ²	p
PCI					
BIO17	0,571	0,004	0,028	0,638	0,010
Pavg	0,585	0,004	0,006	0,629	0,012
BIO14	0,585	0,004	0,091	0,598	0,017
BIO19	0,524	0,008	0,025	0,576	0,021
Lat	na	na	na	0,567	0,023
BIO8	na	na	na	0,562	0,024
BIO16	0,440	0,019	0,013	0,492	0,047
BIO13	0,429	0,021	0,037	0,486	0,050
P59	0,397	0,028	0,009	na	na
Z	0,367	0,037	0,003	na	na
SD					
BIO19	0,459	0,016	0,251	na	na
BIO17	0,441	0,018	0,266	na	na
BIO14	0,415	0,024	0,818	na	na
Pavg	0,414	0,024	0,050	na	na
Lat	na	na	na	0,514	0,039
BIO8	na	na	na	0,487	0,049
LA					
precavg	0,381	0,032	0,002	0,527	0,034
Lat	0,380	0,033	-0,198	na	na
Alt	0,371	0,035	0,001	na	na
BIO14	0,370	0,036	0,034	na	na
BIO16	0,332	0,050	0,005	0,519	0,037
P59	na	na	na	0,488	0,049

Buk lesný sa šíril v postglaciáli do celej Európy z refúgia, ktoré sa nachádzalo na území dnešného Slovinska. Na obr. 3 vidieť, že vzdialenosť lokalít pôvodu od refúgia ovplyvňovalo hustotu prieduchov buka. Hustota prieduchov sa znižovala s narastajúcou vzdialenosťou od refúgia. Okrem vzdialenosti môžu hustotu prieduchov ovplyvňovať aj iné parametre (najmä klimatické), čo je predmetom ďalšieho výskumu.



Obrázok 1: Závislosť potenciálnej prieduchovej vodivosti ($p < 0,05$) na BIO17 (úhm zrážok za najsuchší štvrťrok), BIO14 (úhm zrážok za najsuchší mesiac) a na priemerných ročných zrážkach.

Hustota prieduchov je u tiennych listov nižšia ako u slnných listov vo všetkých prípadoch (Tab. 3 a 4). Priemerne je hustota prieduchov na tiennych listoch nižšia o 30% oproti slnným listom. Hustota prieduchov stúpa od bazálnej časti rastliny po vrchol, resp. po vzdialené konce konárov. To je spôsobené zníženým vodným potenciálom. Znížený vodný potenciál stimuluje xerotypické znaky, napr. menšie epidermálne bunky, čo v konečnom dôsledku spôsobí zmenšenie vzdialenosti medzi prieduchmi, čoho výsledkom je zvýšená hustota prieduchov (BEBBINGTON). U tiennych listov sme zaznamenali aj porovnateľne vyššiu variabilitu.



Obrázok 2: Pôvodná lokácia jednotlivých proveniencií a farebne zobrazená hustota prieduchov (SD) nameraná na ploche Tále. Rôzne farby označujú rôzne intervaly hodnôt.

Tabuľka 4: Merané prieduchové charakteristiky na slnných listoch u vybraných proveniencií.

PV	SD	L_A	W_A	PCI
03FR	$164,31 \pm 3,45$	$21,96 \pm 0,23$	$7,14 \pm 0,09$	$8,05 \pm 0,26$
05FR	$206,67 \pm 3,44$	$24,19 \pm 0,25$	$7,47 \pm 0,10$	$12,18 \pm 0,32$
12LX	$241,00 \pm 5,05$	$24,58 \pm 0,26$	$7,13 \pm 0,13$	$14,79 \pm 0,46$
17UK	$256,33 \pm 5,62$	$23,18 \pm 0,29$	$6,92 \pm 0,09$	$13,71 \pm 0,37$
26DE	$216,00 \pm 1,84$	$24,05 \pm 0,21$	$7,22 \pm 0,10$	$12,66 \pm 0,28$
30DE	$221,33 \pm 4,02$	$23,88 \pm 0,29$	$7,30 \pm 0,10$	$12,52 \pm 0,27$
35AT	$250,00 \pm 2,94$	$23,98 \pm 0,27$	$6,74 \pm 0,12$	$14,42 \pm 0,31$
36AT	$244,33 \pm 3,20$	$25,99 \pm 0,32$	$7,85 \pm 0,18$	$16,71 \pm 0,47$
39PL	$215,33 \pm 1,00$	$24,35 \pm 0,26$	$7,41 \pm 0,12$	$12,86 \pm 0,26$
43PL	$186,00 \pm 2,89$	$24,05 \pm 0,36$	$6,86 \pm 0,12$	$11,07 \pm 0,41$
53SI	$248,00 \pm 4,22$	$26,90 \pm 0,34$	$7,28 \pm 0,11$	$18,19 \pm 0,57$
55SI	$258,67 \pm 3,28$	$24,72 \pm 0,31$	$7,39 \pm 0,19$	$16,10 \pm 0,50$
SUM	$225,95 \pm 1,34$	$24,33 \pm 0,09$	$7,22 \pm 0,04$	$13,63 \pm 0,14$

SD – hustota prieduchov, L_A – dĺžka zatváracích buniek, W_A – šírka zatváracích buniek, PCI – index potenciálnej vodivosti.

Tabuľka 5: Merané prieduchové charakteristiky na tiennych listoch vybraných proveniencií.

PV	SD	L _A	W _A	PCI
03FR	191,67 ± 3,47	23,18 ± 0,21	7,30 ± 0,09	10,24 ± 0,21
05FR	152,00 ± 2,32	22,46 ± 0,18	7,18 ± 0,09	7,71 ± 0,17
12LX	145,33 ± 3,12	23,29 ± 0,26	6,87 ± 0,10	8,06 ± 0,29
17UK	138,00 ± 2,47	23,41 ± 0,26	7,18 ± 0,11	7,57 ± 0,18
26DE	134,33 ± 1,43	22,40 ± 0,25	6,67 ± 0,07	6,78 ± 0,16
30DE	126,00 ± 2,04	22,00 ± 0,13	7,00 ± 0,11	6,12 ± 0,13
35AT	174,00 ± 3,45	22,84 ± 0,23	7,07 ± 0,08	9,11 ± 0,24
36AT	157,33 ± 1,06	22,75 ± 0,20	7,21 ± 0,10	8,21 ± 0,15
39PL	169,67 ± 3,48	23,03 ± 0,27	7,09 ± 0,11	9,08 ± 0,27
43PL	164,80 ± 3,88	24,39 ± 0,21	7,37 ± 0,10	9,97 ± 0,34
53SI	170,67 ± 2,43	23,28 ± 0,19	7,04 ± 0,10	9,32 ± 0,22
55SI	163,33 ± 2,46	23,48 ± 0,22	6,70 ± 0,14	9,04 ± 0,20
SUM	157,15 ± 0,96	23,02 ± 0,07	7,05 ± 0,03	8,41 ± 0,07

DISKUSIA

V štúdií na Mt. Moosilauke (44°01' s. z. š., 71°51' v. z. d., 1463 m n.m.) bolo dokázané, že existuje štatisticky významná závislosť medzi PCI a nadmorskou výškou. To platí u dvoch bylenných druhov: *Cornus canadensis*, *Dryopteris carthusiana*. U dvoch drevín (*Sorbus americana*, *Betula papyrifera*) zaznamenali stúpajúci trend PCI s rastúcou nadmorskou výškou, ale nepotvrdil sa štatistický významný vplyv nadmorskej výšky na hodnotu indexu potencionalnej vodivosti. Dĺžka zatváracích buniek bola vo vzťahu s nadmorskou výškou u všetkých štyroch druhov (HOLLAND A RICHARDSON 2007). Podobné výsledky potvrdila aj naša práca. Hustota prieduchov bola veľmi variabilná, podobne ako v našej práci a nepreukázala sa významná závislosť medzi nadmorskou výškou a hustotou prieduchov. Našou cieľovou drevinou bol buk lesný, no vidíme že jednotlivé prieduchové charakteristiky sa správajú podobne aj u iných druhov. Naopak, v štúdií v Kordillerách sa preukázalo, že neexistuje závislosť medzi PCI a nadmorskou výškou. Autori zistili, že závislosť existuje, len ak hodnotia listy s plochou menšou ako 23 cm² a hodnoty u menších listov sú diametrálne odlišné od tých väčších (BARESCH et al. 2010). V našom prípade boli všetky listy približne rovnakej veľkosti a teda výsledky nie sú ovplyvnené nehomogénnou veľkosťou. Štúdia v Číne na Changbai Mountain (41°23'–42°36' s. z. š., 126°55'–129°00' v. z. d.) preukázala, že dĺžka zatváracích buniek koreluje s nadmorskou výškou drevín. Jednotlivé jedince vyberali náhodne, takže hodnotený bol mix drevín: *Quercus mongolic*, *Pinus koraiensis*, *Abies nephrolepis*, *Picea jezoensis*, *Betula ermanii*, *Larix olgensis*. Vyhodnocovali dĺžku zatváracích buniek za rastliny ako celok, ďalej len za dreviny a len

za byliny spolu s krami. U bylín nebola preukázaná korelácia medzi dĺžkou zatváracích buniek a nadmorskou výškou (WANG *et al.* 2014). V našej práci majú vzťahy rovnaký charakter ako u spomínaných prác, ale dôvod prečo to tak je, je rozdielny. Všetky tri štúdie sa zaoberali hodnotením vzoriek z drevín s lokálnym pôvodom, ktoré boli vystavené rozdielnym podmienkam prostredia a to pravdepodobne ovplyvnilo ich fenotyp. V našom prípade boli jedince vystavené rovnakým podmienkam prostredia a napriek tomu sa u nich prejavili rozdiely vo fenotype, ktoré sú podmienené rozdielnou genetickou výbavou. Podrobných fyziologických štúdií na provenienčných plochách je stále pomerne málo a ich prehľad uvádzame nižšie.

SAMPAIO *et al.* (2016) skúmali, či pôvod duba korkového ovplyvní dobu pučania. Zemepisná dĺžka a teplota pôvodného stanovišťa záporne korelovali s obdobím pučania. Proveniencie s pôvodom vo Východnej Európe a v Severnej Afrike boli najcitlivejšie na skorý mráz, pretože pučali ako prvé, ale taktiež mohli využiť dlhšie vegetačné obdobie. Tieto proveniencie by mohli byť využité v mediteránnom pásme kde by obišli suché obdobie cez leto a maximalizovali by produkciu na začiatku vegetačného obdobia. NIELSEN A JØRGENSEN (2003) skúmali fenológiu a hrúbkový prírastok u proveniencií semenáčikov buka lesného ovplyvnené rozdielnymi pôdnymi podmienkami. Opísali trend medzi zvyšujúcou sa adaptibilitou na rôzne pôdne podmienky a narastajúci prírastok v smere od severozápadnej Európy po juhovýchodnú Európu. To naznačuje, že materiál z južnej Európy by mohol byť atraktívny pre severské krajiny. Nemecká štúdia proveniencií buka lesného zistila že väčšina anatomických, odvodených hydraulických znakov dreva, a tiež niektoré znaky listov, sú ovplyvnené genetickými predispozíciami. Tieto predispozície vychádzajú z pôvodného stanovišťa proveniencií a sú ovplyvnené vlhkosťnými pomermi na pôvodných stanovištiach (ROSE *et al.* 2009). V štúdiu tiež zisťovali, ktoré proveniencie buka lesného sú tolerantné voči suchu. Zistili, že proveniencie z kontinentálnej klímy, kde je väčšia pravdepodobnosť na výskyt suchých období, sú lepšie prispôbené na suchu, ako proveniencie z oceánskej klímy centrálného Nemecka. Štúdia, ktorá skúmala reakciu proveniencií buka lesného z okrajových a centrálnych oblastí na suchu potvrdila, že okrajové proveniencie sú lepšie prispôbené na suchu (THIEL *et al.* 2014). GARCÍA A BECERRIL (2000) zistili, že zmeny v biochemickej a fyziologickej reakcii u viacerých proveniencií poukazujú na ich adaptáciu voči suchu. Tolerancia na stres zo sucha je pozorovaná ako morfológická adaptácia: napr. zmenšenie celkovej plochy listov a zvýšenie pomeru celkovej plochy listov ku množstvu koreňových vláskov.

ZÁVER

Štruktúra prieduchov na liste je ovplyvnená geneticky a zmena prieduchovej vodivosti koreluje so zmenou zrážok. Najviac túto zmenu ovplyvňujú zrážky počas najsuchšieho mesiaca. Toto obdobie je kritické pre tvorbu asimilačných orgánov a ovplyvňuje ich štruktúru. Tieto poznatky môžu pomôcť pochopiť, ako sa jedince prispôbia zmenám vyplývajúcim z globálneho otepľovania. Na Slovensku zatiaľ prenos semenného materiálu legislatíva neumožňuje, ale o tejto otázke sa už v niektorých krajinách EÚ

v súčasnosti diskutuje. Spomínané reakcie drevín je však potrebné poznať, ak má byť takéto opatrenie zmierňovania dopadov klimatickej zmeny vôbec zvažované.

Ďalším zistením bolo že hustota prieduchov je na tiennych listoch vo všetkých prípadoch porovnateľne nižšia ako u slnných listov. Variabilita u slnných listov je nižšia a preto sú vhodnejšie pre porovnávanie prieduchových charakteristík medzi jednotlivými provenienciami. Z tohto dôvodu odporúčame pre obdobný výskum uprednostniť odober slnných listov príp. zvýšiť počet hodnotených jedincov a listov.

Pod'akovanie

Uvedená práca vznikla s finančnou podporou projektov VEGA č. 2/0034/14, APVV-0744-12 a APVV-0480-12.

LITERATÚRA

- BARESCH, A., JARAMILLO, C., MADRIÑÁN, S., dostupné na: <http://2010.botanyconference.org/engine/search-index.php?func=detail&aid=195>
- BEBBINGTON, A., dostupné na: <http://www.saps.org.uk/saps-associates/browse-q-and-a/319-why-are-ivy-leaves-grown-in-the-shade-larger-in-area-but-lighter-in-terms-of-weight-than-leaves-grown-in-direct-sunlight>
- CASSON, STUART, AND JULIE E. GRAY. "Influence of Environmental Factors on Stomatal Development." *New Phytologist* 178, no. 1 (April 2008): 9–23. doi:10.1111/j.1469-8137.2007.02351.x.
- DENK, T. "Phylogeny of *Fagus* L. (Fagaceae) Based on Morphological Data." *Plant Systematics and Evolution* 240, no. 1–4 (September 1, 2003): 55–81. doi:10.1007/s00606-003-0018-x.
- GARCÍA-PLAZAOLA, J.I., AND J.M. BECERRIL. "Effects of Drought on Photoprotective Mechanisms in European Beech (*Fagus Sylvatica* L.) Seedlings from Different Provenances." *Trees* 14, no. 8 (August 2000): 485–90. doi:10.1007/s004680000068.
- HAMANISHI, E. T., B. R. THOMAS, AND M. M. CAMPBELL. "Drought Induces Alterations in the Stomatal Development Program in *Populus*." *Journal of Experimental Botany* 63, no. 13 (August 1, 2012): 4959–71. doi:10.1093/jxb/ers177.
- HOLLAND, NICHOLAS, AND ANDREW D. RICHARDSON. "Stomatal Length Correlates with Elevation of Growth in Four Temperate Species †." *Journal of Sustainable Forestry* 28, no. 1–2 (February 11, 2009): 63–73. doi:10.1080/10549810802626142.
- HULTÉN, E. A FRIES, M. (1986) Atlas of North European Vascular Plants: North of the Tropic of Cancer I-III Koeltz Scientific Books, Königstein, Germany.
- NESTERENKO, T. V., A. A. TIKHOMIROV, AND V. N. SHIKHOV. "Ontogenetic Approach to the Assessment of Plant Resistance to Prolonged Stress Using Chlorophyll Fluorescence Induction Method." *Photosynthetica* 44, no. 3 (September 2006): 321–32. doi:10.1007/s11099-006-0031-8.
- NIELSEN, CHRISTIAN NØRGÅRD, AND FINN VANMAN JØRGENSEN. "Phenology and Diameter Increment in Seedlings of European Beech (*Fagus Sylvatica* L.) as Affected by Different Soil Water Contents: Variation between and within Provenances." *Forest Ecology and Management* 174, no. 1–3 (February 2003): 233–49. doi:10.1016/S0378-1127(02)00042-7.
- ROSE, LAURA, CHRISTOPH LEUSCHNER, BENJAMIN KÖCKEMANN, AND HOLGER BUSCHMANN. "Are Marginal Beech (*Fagus Sylvatica* L.) Provenances a Source for Drought Tolerant Ecotypes?" *European Journal of Forest Research* 128, no. 4 (July 2009): 335–43. doi:10.1007/s10342-009-0268-4.
- SAMPAIO, TERESA, MANUELA BRANCO, ERWAN GUICHOUX, RÉMY J. PETIT, JOÃO S. PEREIRA, MARIA C. VARELA, AND MARIA H. ALMEIDA. "Does the Geography of Cork Oak Origin Influence Budburst and Leaf Pest Damage?" *Forest Ecology and Management* 373 (August 2016): 33–43. doi:10.1016/j.foreco.2016.04.019.
- SCHÄR, CHRISTOPH, PIER LUIGI VIDALE, DANIEL LÜTHI, CHRISTOPH FREI, CHRISTIAN HÄBERLI, MARK A. LINIGER, AND CHRISTOF APPENZELLER. "The Role of Increasing Temperature Variability in European Summer Heatwaves." *Nature* 427, no. 6972 (January 22, 2004): 332–36. doi:10.1038/nature02300.

- STOJNIĆ, SRĐAN, SAŠA ORLOVIĆ, BRANISLAV TRUDIĆ, UROŠ ŽIVKOVIĆ, GEORG VON WUEHLISCH, AND DANIJELA MILJKOVIĆ. "Phenotypic Plasticity of European Beech (*Fagus Sylvatica* L.) Stomatal Features under Water Deficit Assessed in Provenance Trial." *Dendrobiology* 73 (March 3, 2015): 163–73. doi:10.12657/denbio.073.017.
- THIEL, DANIEL, JUERGEN KREYLING, SABRINA BACKHAUS, CARL BEIERKUHNLIN, CONSTANZE BUHK, KOLJA EGEN, GERHARD HUBER, MONIKA KONNERT, LAURA NAGY, AND ANKE JENTSCH. "Different Reactions of Central and Marginal Provenances of *Fagus Sylvatica* to Experimental Drought." *European Journal of Forest Research* 133, no. 2 (March 2014): 247–60. doi:10.1007/s10342-013-0750-x.
- WANG, RUILI, GUIRUI YU, NIANPENG HE, QIUFENG WANG, FUCAI XIA, NING ZHAO, ZHIWEI XU, AND JIANPING GE. "Elevation-Related Variation in Leaf Stomatal Traits as a Function of Plant Functional Type: Evidence from Changbai Mountain, China." Edited by Cheng-Sen Li. *PLoS ONE* 9, no. 12 (December 17, 2014): e115395. doi:10.1371/journal.pone.0115395.

Adresa autora:

Bc. Peter Petrik
Katedra integrovanej ochrany lesa a krajiny
Lesnícka fakulta
Technická univerzita vo Zvolene
Masarykova 24
960 53 Zvolen
Slovenská republika
e-mail: peterpetrik94@gmail.com

SUMMARY

This paper presents study of stomatal characteristics on European beech provenances, originating from Germany, France, Luxemburg, Poland, Great Britain, Slovenia and Austria. Seedlings were planted in research location Tále in central Slovakia. Samples were taken using the koloid method. These samples were used for measurement of morphological characteristic as stomatal density (SD), length (L_A) and width (W_A) of stomata guard cell. Potential conductance index (PCI) was calculated from listed characteristics. Subsequently we tested relationship between average values of stomatal characteristics and geographical and climatic conditions of place of origin. The results show that potential conductance increases with higher precipitation during driest month and it also increases with higher amount of precipitation during the driest quarter. Also it seems that distance from postglacial refugium of *Fagus sylvatica* may affect stomatal density. Mean stomatal density is greater with higher amount of precipitation during the coldest quarter of the year. We also compared sunny and shady leaves. Stomatal density of shady leaves is in all cases lower than stomatal density of sunny leaves.

INFLUENCE OF TREE SPECIES COMPOSITION TO MODIFICATION OF SPECIFIC PHYSICO- CHEMICAL AND BIOLOGICAL PROPERTIES OF SOIL

Ing. Richard G E R E – doc. Ing. Erika G Ö M Ö R Y O V Á , PhD.

GERE, R. – GÖMÖRYOVÁ, E.: Influence of tree species composition to modification of specific physico-chemical and biological properties of soil. ActaFacultatisForestralis, Zvolen

The main objective of our research was to evaluate the effect of different tree species on some physico-chemical and biological properties of soil at the locality Vrchdobroč (Central Slovakia). The study was focused on two coniferous trees (*Picea abies* and *Pseudotsuga menziesii*) and two deciduous species (*Acer pseudoplatanus* and *Fagus sylvatica*). Soil samples were taken in three pure stands of each tree species from the O- and A-horizons in five replications. In soil samples, basic physico-chemical (soil acidity and CNS content) as well as microbial characteristics (basal respiration, substrate-induced respiration, catalase activity and microbial carbon biomass) were determined. We observed a significant effect of different tree species on the most soil properties. Interestingly, while *P.menziesii* showed the most distinct effect in the O-horizon, the soil properties in the A-horizon were affected mainly by *A.pseudoplatanus*. In stands with *P.menziesii* we also observed the most distinct fall of microbial characteristics from the O to A soil horizon in comparison with other tree species. In conclusion we can claim that according to our results the effect of tree species cannot be divided simply on the effect of broadleaves and conifer trees because within each group the tree species influence soil properties in a different way.

Keywords: soil, physico-chemical properties, biological properties, interactions, tree species

1. INTRODUCTION

Within the forest stands, soil is under the influence of many factors like intensity of irradiance, differences in water regime of particular location, different composition of tree and herb layer etc. The soil under the influence of a forest changes in its properties that vary spatially with relation to the location of trees (ZINKE, 1962) and also to the main tree species within the evaluated location. Litter of trees represents the biggest source of organic matter input to the soils. Litter from each tree exhibits with specific characteristics and so, it can significantly influence soil properties below their stands. Its decomposition rate is influenced by physical environmental conditions, nature and abundance of decomposers and its own chemical composition (HEAL et al., 1997; ZIMMER, 2002; SARIYILDIZ and ANDERSON, 2003a; SARIYILDIZ and ANDERSON, 2003b). Lodhi (1977) in his research found, that the litter from different tree species has significant effect on soil characteristics

like pH, nitrification and mineralization. According to Zinke (1962) differences in physical and chemical properties are caused by different litter composition. However, they can also influence soil properties through their roots. It involves both, the mechanical effect through the expansion of root system of each tree, and the changes of chemical properties through the root exudates. The chemical composition of exudates differs from one species to another, which results in different number of macroelements in soils beneath forest stands consisted of different tree species. The different amount of exchangeable cations in soil is reflected in different acidity of such soils. The mechanisms by which tree species influence soil acidity and exchangeable cations also include interspecific differences in their uptake (ALBAN 1982), nitrogen fixation and subsequent nitrification (VAN MIEGROET and COLE 1984), the production of litter high in acid components content (OVINGTON 1953) and stimulation of mineral weathering (TICE et al. 1996).

Soil microbial biomass, activity and community structure have been shown to be affected by tree species (BAUHUS et al., 1998; PRIHA and SMOLANDER, 1999; PRIHA et al., 2001). Priha and Smolander (1999) found, that microbial activity was higher in soil beneath pine stand than soil under the spruce stands. Also the differences in soil pH between these two species and chemical composition and decomposition of needle litter (JOHANSSON, 1995; BERG, 1986) support their results. Many observational and manipulative experiments have documented existing positive and negative feedbacks between soil microbial communities and vegetation (BEVER, 2003; EHRENFELD et al., 2005; MIKI et al., 2010; PREGITZER et al., 2010). Every tree species has its own microbial communities in their rhizosphere, which composition can differ from one species to another. STOYAN et al. (2000) found out that trees can influence microbial communities in direct way, via above mentioned root exudates. CHEN et al. (1999) showed that there is also the indirect way of influence of trees on the belowground microbial communities via modifying the access of solar irradiation and precipitation water to the soil. Soil microbial biomass, its activity and community structure are closely related to other soil properties and can vary seasonally (WALLENSTEN M.D., McMAHON S., SCHIMEL J. 2007).

2. MATERIAL AND METHODS

2.1 Sampling location

Plots for soil sampling and analyses are located in Vrchdobroč locality. They were selected mainly due to fact, that 45 years ago, there was no forest stand. The land was agriculturally used as pastures, though rate of human interference was at minimal level. 45 years ago, the stands of several tree species have been planted and used as research plots for National Forest Centre in Zvolen. In particular, 8000 ha of land was forested by deciduous stands and conifers (Mihál, 2005). In our research, aimed to evaluate the influence of tree species to modification of specific physico-chemical and biological properties of soil, it was a brilliant choice, since the influence of each tree species could actually be elucidated at the example of these locations. We presume, that before tree planting, soil

characteristics were approximately the same, so after 45 years, we can find out influence of particular species on some soil characteristics.

2.2 Soil sampling

We chose four tree species for our purposes – *Picea abies* and *Pseudotsuga menziesii* from conifers, and *Acer pseudoplatanus* and *Fagus sylvatica* from deciduous. For every species we had 3 forest stands with approximately same conditions (exposition, elevation etc.), where five sampling locations were established. They were located along the transect with 10 m spacing.

Soil sampling consisted from taking the samples from the O-horizon by using the square template with 20 cm long side, putting it on the soil surface and subsequently dividing humus underneath the template from surrounding one by knife. Afterwards, sample of humus under the template was taken to plastic bags and prepared for transition to laboratory. Sampling was also done from the A-horizon (from 10 cm depth). After the transition to laboratory, they were stored in fridge and subsequently analyzed.

2.3 Determination of soil reaction:

The soil pH reflects whether a soil is *acidic, neutral, basic or alkaline*. The acidity, neutrality or alkalinity of a soil is measured in terms of hydrogen ion activity of the soil water system. The negative logarithm of the H^+ ion activity is called pH and thus pH of a soil is a measure of only the intensity of activity and not the amount of the acid present (<http://vlab.amrita.edu>).

We measured soil reaction using the potentiometric method. This method is essentially based on the measurement of potential, developed across an indicator or the glass electrode on account of the difference activity of H^+ ions in and out of the electrode, i.e., in the bathing solution. The potential difference between the glass electrode and calomel electrode is expressed in pH units (<http://vlab.amrita.edu>).

For this measurements we used beakers, where we put 2.5 g of soil for determination of forest floor acidity and 10 g for determinations of mineral horizon acidity. Subsequently 25 ml of 0.01 M $CaCl_2 \cdot H_2O$ was added and such hydro suspension was stirred for one hour. After the mixing, solution was left for one hour and prepared for measurement. After one hour, electrode of pH-meter was immersed and pH was determined.

2.4 Determination of the amount of C, N and S:

The amount (concentration) of C, N, S was evaluated for both horizons. The dried samples are grinded either in an agate mortar or in a mill. For sulphur measurements samples should be grinded in a mill. Depending on the C/N/S concentration, 3-20mg of sample is weighed into a tin cup (N/C/S) or silver cup for the TOC measurements. Samples from the O-horizon were mince in mixer. Soil samples prepared like this, were put to the CNS VarioMacro analyzer. After the data were obtained, the C/N ratio were calculated.

2.5 Determination of microbial carbon content:

Soil sample was sieved to pass 2-mm mesh to remove stones, roots and large organic residues. It was kept in polyethylene bags under short-term refrigeration at 4°C before analysis. Subsequently, soil sample was added to the microwave and irradiated at 800 J. After irradiation, flush of C was measured by direct extraction of post-microwave soil. (Islam and Weil, 1998).

2.6 Determination of basal respiration

Determination of basal respiration was performed by Isermeyer's method (Alef 1991). We weighted particular amount of soil sample to the glass container: for mineral horizon 50 g and for O-horizon 12.5 g. Subsequently the jar with 25 ml of 0.05 M NaOH was added to the glass container. Glass containers were properly closed, and left by the room temperature for 24 hours. During the incubation period, CO₂ released from soil sample in glass container was caught by 0.05 M NaOH. Next day, the content of NaOH jar was moved to titration bank, where 5 ml of BaCl₂ was added subsequently with 3 or 4 drops of phenolphthalein. When the solution turned pink, it was titrated by 0.05 M HCl, until the solution was white. The consumption of HCl was subsequently measured. The process was repeated, but we used only "blind sample". Next step was calculation of basal respiration via:

$$BR = [(V_0 - V) \times 1.1 \times 100] / [n \times (K/100 \times t)]$$

where V_0 is consumption of HCl (ml) during titration of "blind sample", V is consumption of HCl (ml) during titration of evaluated soil sample, n is weight of evaluated soil sample, K is weight of dry matter (g), t is time of incubation.

2.7 Determination of substrate-induced respiration (SIR)

The soils to be tested using the SIR analysis are generally prepared by sieving to remove living plants and other unwanted organic materials. These materials must be removed in order to prevent the input and output of photosynthesis, like CO₂ absorption and O₂ production, from affecting accurate measurement of microbial respiration. The sieving of the soils to be tested also allows for an even distribution of added substrate which in turn produces a more dispersed release of the produced CO₂.

The chosen substrate needs to be added to the soil sample. This can be done in a liquid form in which the substrate is diluted in water or dry form in which case it is suggested that the substrate be mixed with talc to aid in achieving an even integration with the soil sample). Then soil samples are placed in a gas-tight container. The sample size is dependent on the soil sample being tested, soils low in organic matter require larger sample sizes and soils that are high in organic matter can be done with smaller samples. Several trials should be run using different substrate additions as to determine the minimum amount of substrate needed to produce the greatest rate of respiration. Consequently

soil samples (mixed with the minimal substrate level) are incubated and measurement the rate of respiration over a predetermined time is performed. There are many ways in which soil microbial respiration can be measured and the rate should be measured at its greatest initial respiration level. The measured greatest initial rate of respiration must be used to calculate the rate of respiration per hour. The rate per hour can be used to determine an estimate of microbial carbon. This can be done by either using a previously published factor or by using a calibration curve between SIR response and microbial carbon that you produced prior to conducting the experiment. (bio530.wikispaces.com)

In our experiment, the SIR was measured the same way as the basal respiration except the fact that we added to the soil samples particular amount of easily decomposable substrate (glucose). For the A-horizon (50g) it was 0.5 g of glucose, and for the O-horizon (12.5g), 0.125 g of glucose. Next steps were the same as within the determination of basal respiration. Incubation period was in this case only 5 hours. Titration followed same steps as the basal respiration as well as 'blind sample' evaluation.

2.8 Determination of catalase activity

Catalase is the enzyme that took place in H_2O_2 catalyzing. Its determination was performed by Chazijev's method. The system of linked tubes was used, where decomposition bank was filled by particular amount of soil sample. It was 10 g of soil sample for the A-horizon and 2.5 g for the O-horizon. Subsequently, 20 ml of distilled water was added to the decomposition bank and left by for 5 minutes. Next step was adding the 20 ml 3% hydrogen peroxide to the solution and closing the bank with lid, where the rubber hose was fixed and linked decomposition bank with our system of linked tubes. Released O_2 pushed to the water in the linked containers, what mirrors in changes in water level inside the banks. 10 minutes later, water in both tubes was equalized and its value was subtracted from a scale at the side of tubes. Next step was calculating catalase activity by:

$$\text{Catal} = [V \times 44.5] / [(K/100) \times B \times C]$$

where V – subtracted value of water level from scale at the side of tube, K – weight of dry matter (g), B – incubation period (time until the water level was equalized), C – soil sample weight (g)

3. RESULTS AND DISCUSSION

ANOVA confirmed a significant effect of tree species on nearly all measured chemical properties. In Table 1 and 2 the overview of significance levels on all evaluated chemical properties as well as particular significant differences between horizons and tree species analyzed by Tukey's HSD test are shown.

Table 1 Analysis of variance (*F*-tests) of chemical properties.

Source of Variation	df	pH	C%	N%	S%	C/N
Horizon	1	***	***	***	***	***
Tree species	3	***	***	***	ns	***
Horizon x Tree species	3	*	***	***	ns	***
Error	112					

Significance levels: *** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, ns $P > 0.05$ (not significant), `` - `` not measured; df – degrees of freedom

Table 2 Means, standard deviation and Tukey's HSD test for chemical properties

Source of Variation	pH	C%	N%	S%	C/N
O - <i>P. abies</i>	4,84±0,39 A	32,37±10,05 C	1,65±0,48 B	0,24±0,06 B	19,40±1,41 B
O - <i>P. menziesii</i>	5,08±0,35 A	32,53±8,64 C	1,70±0,4 B	0,24±0,05 B	18,97±2,06 B
O - <i>F. sylvatica</i>	5,05± 0,2 A	22,61±7,8 B	1,22±0,35 D	0,23±0,23 B	18,19±1,46B
O - <i>Acer spp.</i>	5,06±0,36 A	21,42±5,01 B	1,48±0,25 BD	0,21±0,04 B	14,37±1,05 D
A - <i>P. abies</i>	3,73±0,09 B	4,60±0,85 A	0,37±0,05 AC	0,07±0,03 A	12,46±0,92 C
A - <i>P. menziesii</i>	3,94±0,28 B	4,15±1,05 A	0,35±0,08 A	0,07±0,02 A	11,87±1,02 AC
A - <i>F. sylvatica</i>	3,89±0,23 B	3,73±0,71 A	0,34±0,05A	0,06±0,005 A	10,81±0,66 A
A - <i>Acer spp.</i>	4,28±0,26 C	7,19±1,07 A	0,67±0,09 C	0,10±0,02 A	10,82±0,70 A

O hor. – soil horizon O, A hor. – soil horizon A; A B, ... (n) – results divided to groups via Tukey's HSD test (similar letter means, there was no statistically significant difference between particular values).

Soil acidity differed significantly between both soil horizons and stands consisted from different tree species. Interaction between the factors was also significant; however, it was just limited one. While in the O-horizon no significant differences were found in pH among tree species, in the A-horizon soil under *Acer pseudoplatanus* showed significantly different values of soil acidity from other 3 tree species and exhibited the highest mean value of pH among evaluated four tree species. O-horizon had in general less acidic reaction than the A-horizon. Soil acidity depends on many factors like mineralogical composition (Van Breemen et al. 1997), amount of different types of cations in soils etc. but tree species can also have a significant effect on soil pH. For example Zinke (1962) showed, that pH clearly differs in relation to distance from tree trunk, though tree species can influence the soil acidity in a significant way. Finzi (1998) compared the effect of 8 different tree species and found less acidic soils under the *A.pseudoplatanus* what corresponds with results in this study. The variations in soil pH can reflect the composition of parent material under trees (Van Breemen et al. 1997); however, in our study the soils are formed from

the same parent material, thus we suppose that the changes in pH reflect the effect of stand composition.

C content differed significantly between soil horizons and also between soils under stands with different tree species (Table 1). In this case, interactions between these two measured factors were very strong too. Within the A-soil horizon, the soils under *A.pseudoplatanus* had the highest mean carbon content. Loss of carbon under the *A.pseudoplatanus* stands was the lowest among all other species with the soil depth. O-horizon showed significant differences between deciduous and coniferous tree species. The highest carbon content was found within the coniferous stands (about 32% for both), while within the deciduous stands the mean values were about 22%. However, coniferous stands showed large fall of carbon content with depth. Finzi et al. (1998) also concluded that the biggest differences in carbon content for different tree species were found in the upper few centimeters of soil. They also found, that the highest amount of carbon occurs in mineral horizon under the *Acer spp.* stands. In many studies carbon and also nitrogen content and C/N ratio is considered to be linked with litter composition (Ferrari, Sugita 1996; Melillo et al. 1982; Prescott et al. 1993). Litter of coniferous contains waxes, bitumen and other hardly decomposable substances, so the carbon and nitrogen in its structure cannot be released easily. That is why there is such a big fall of carbon and nitrogen content in transition to mineral horizons.

Regarding the nitrogen content, significant differences were found between stands within both, O and A-horizons. It was also higher in the O-horizon than in the A-horizon, but similar groups were no longer divided to coniferous and deciduous trees species. According to Tukey's HSD test, significant differences were found between stands of *P.abies* and *P.menziesii* which differed from stands of *F.sylvatica*. Soil under *A.pseudoplatanus* has not been different from any of them. The highest mean value of nitrogen content within the O-horizon was found inside coniferous stands. In opposite, inside the A-horizon under coniferous stands, nitrogen content was the lowest among evaluated forest stands. Also soil under *F.sylvatica* was approximately the same in this property as under conifers. The highest nitrogen content within the A-horizon was found under the *A.pseudoplatanus*. The coniferous stands showed also the largest decrease with depth (e.g. from 1.7% in the O-horizon to 0.35 in the A-horizon in *P.menziesii* stands). There are many studies (e.g. Ferrari, Sugita 1996; Melillo et al. 1982; Prescott et al. 1993) about the relation of C and N content distribution to litter characteristics. Subtle differences in the rate of litter decomposition can lead to large differences in organic matter accumulation and the C and N content of soils (Parton et al., 1987). In this paper, best conditions in nitrogen distribution were found within the *Acer p.* stands. Sulfur content, on the other hand, was not significantly different between forest stands with different species composition in the O-horizon; on the other hand, soils in *A.pseudoplatanus* stands exhibited higher sulphur content than the other soils. Statistically significant differences were found between evaluated soil horizons. It was higher in the O-horizon than in the A-horizon and its decrease was nearly the same for each evaluated tree stands. Only soils in *A.pseudoplatanus* stands had little bit lower decrease than in soils beneath the other evaluated tree species, but statistically it was not different at all.

Litter with high C/N ratio or high lignin : nitrogen ratio decomposes more slowly than litter with a low C/N ratio (Stump and Binkley, 1993; Prescott 1995). Differences in its values were found to be significant among horizons and tree species, as well as their interactions. In particular, mean values of C/N ratio were higher in the soil horizon O than in the A-horizon. Distinct differences within the O-horizon, as shown in Table 2 above, were found between stands consisted of *P. abies*, *P. menziesii* and *F.sylvatica*, that were different from tree stands consisted of maples with the mean maximum in *Picea a.* stands. Significant differences within the A-horizon were found between deciduous and *P. abies* stands. Soil under *Pseudotsuga menziesii* was according to Tukey's HSD test not different from any of them. Finzi(1998)with his research supports our results, where the lowest C/N ratio was also found within *Acer* stands (he compared 5 hardwood deciduous trees). Even if the soil under the *F. sylvatica* stands showed approximately equal mean value of C/N ratio in the A-horizon, its litter had higher C/N on average than maple. So its litter probably contains more tannic acid contents than the litter within the *A. pseudoplatanus* stands that slows decomposition rate (White, 1991) and decrease also the soil reaction in the A-horizon (Table 2). C/N ratio is considered to be one of the most important characteristics of soil quality, though considering this factor, soil under the stands of maple seems to be of highest quality from evaluated tree stands (the lowest the C/N ratio, the highest quality of soil it is).

The second group of examined soil properties represents biological properties. According to ANOVA (Table 5) there are significant differences in all evaluated biological properties. Differences occurred between soil horizons and between stands of different tree species in all cases. Interaction between these two factors was not confirmed only in the case of catalase activity.

Table 5 Analysis of variance (*F*-test) of biological properties

Source of Variation	df	BR	SIR	Cmic	Catal
Horizon	1	***	***	***	***
Treespecies	3	***	**	***	**
Horizon x Tree species	3	***	***	***	ns
Error	112				

BR – basal respiration, SIR – substrate-induced respiration Cmic – microbial biomass carbon, Catal – catalase activity

Significance levels: *** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, ns $P > 0.05$ (not significant), `` - `` not measured; df– degrees of freedom

Significant differences in basal respiration occurred between soil horizons. While in the O-horizon mean values varied from 1.36 to 4.47 $\mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, in the A-horizon all mean values were from 0.15 to 0.42 $\mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$. This results are supported by Bauhus et al. (1998), which also found lower intensity of respiration in mineral horizon than in the forest floor level. Scheu and Parkinson (1995) found out, that relatively more C, expressed as specific respiration, was released from forest floor under conifers than forest floor under

deciduous trees. This also supports our results, where within the O-horizon, the highest values of basal respiration ($4.47 \mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) were determined inside the *P.menziesii* stands. Its mean values significantly differ from any other tree stands evaluated within our research. A-horizon has much lower intensity of basal respiration. The highest intensity of basal respiration in this horizon was found under the stands of *A. pseudoplatanus*; however, according to Tukey's HSD test, within the A-horizon no significant difference was found between subgroups. Respiration differed only in comparison with the O-horizon. Very interesting is finding about the decrease of basal respiration with depth in soils under *P.menziesii* stands. Basal respiration with transition to the deeper soil horizon decreased from 4.47 to $0.09 \mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, what is quite large reduction. Decrease of basal respiration in soils beneath other tree stands was on average the same. Similar situation was detected in the case of substrate induced respiration (SIR). According to ANOVA, differences occurred between horizons, as well as, between stands with different tree composition; according to Tukey's HSD test, significant difference occurred in the O-horizon of *P.menziesii* stands, where SIR reached on average $21.99 \mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, and so, reached maximum among 4 examined tree species stands. Paradox is that in the A-horizon, soils under *P.menziesii* stands had the lowest average value of SIR ($0.63 \mu\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$). SIR as well as basal respiration showed huge fall of intensity of these two characteristics within such forest stands. The question is, why respiration is at such high levels within forest floor in Douglas fir stands. The answer could be the content of essential oils in needles of *P.menziesii*. According to Sakai (1967) who focused on the effect of essential oils contained in Douglas fir needles to deer rumen microbial activity, essential oils can promote it. We can presume that some combination of such essential volatile oils can promote also the microbial activity of soil under such forest stands. Another hypothesis is that huge respiration and so microbial activity in soil under *P. menziesii* stands is caused by density of ectomycorrhizal root tips that are mostly distributed within litter layer (Goodman and Trofymow, 1998). They exudate low molecular weight carbon sources, that are easily assimilated by soil bacterial community, and so, promote their growth and activity. However, both are just a hypothesis that still needs to be tested.

Table 6 Means, standard deviation and Tukey's HSD test of biological properties

Source of Variation	BR	SIR	Cmic	Catal
O - <i>P. abies</i>	1,37±0,49 ABC	5,02±1,97 A	6439,88±1250,76 CD	5,26±0,93 C
O - <i>P. menziesii</i>	4,47±2,89 D	21,99±23,62 B	7869,26±3339,45 D	6,02±2,26 BC
O - <i>F. sylvatica</i>	1,88±1,51 BC	5,37±2,43 A	4338,27±1047,33 B	6,62±1,26 B
O - <i>Acer spp.</i>	2,61±2,37 C	9,64±6,67 A	4893,88±1747,76 BC	6,76±1,39 B
A - <i>P. abies</i>	0,18±0,04 A	1,09±0,61 A	568,15±568,16 A	0,65±0,2 A
A - <i>P. menziesii</i>	0,16±0,09 A	0,63±0,29 A	420,32±99,17 A	0,56±0,17 A
A - <i>F. sylvatica</i>	0,20±0,09 A	1,11±0,46 A	361,76±105,29 A	0,62±0,21 A
A - <i>Acer spp.</i>	0,42±0,63 AB	2,40±0,82 A	912,41±185,35 A	1,05±0,26 A

BR – basal respiration, SIR – substrate-induced respiration Cmic – microbial biomass carbon, Catal – catalase activity

Amount of microbial biomass carbon (C_{mic}) in soils showed according to ANOVA significant differences between horizons, tree stands with different species composition as well as in interactions between these two factors. Regarding this characteristic, contrast between the O and A- horizons is very obvious. In the O-horizon significant differences were found between stands (Table 6). On average, maximum amount of C_{mic} was found in the O-horizon of *P. menziesii* stands, followed by *P. abies*. Soil under deciduous trees had much lower amount of C_{mic} than soil under the conifers (the highest amount of C_{mic} within deciduous was 4893.88 µg.g⁻¹ on average, while under conifers it was 7869.25 µg.g⁻¹ on average). However, decrease rate of C_{mic} was much bigger under the coniferous trees with maximum under *P. menziesii*. In opposite, the highest C_{mic} in the A-horizon was found in soils under *A. pseudoplatanus* and the lowest one under *F. sylvatica* and *P. menziesii* stands. Bauhaus et al. (1998) also confirmed that microbial carbon content is affected by tree species composition.

Significant differences in catalase activity were found between soil horizons, and between different tree species stands. However, interactions of these two factors were not significant at all. It is obvious from Tukey's HSD test and mean values of catalase activity, that differences between soil horizons really exists, but inside the A-horizon, no significant difference was found between stands with different tree species composition. The only difference in this soil characteristic under different tree species was found between stands of *P. abies* and soil under *A. pseudoplatanus*. Soils in *P. menziesii* and *F. sylvatica* stands do not differ from the other soils. Even decrease rate along soil profile is similar within all tree species stands.

4. CONCLUSIONS

The results showed that the effect of different trees on soil properties is significant already 45 years after the tree planting. During this period, depending on the tree species 0.85-1.45 kg.m⁻² of surface organic matter has been accumulated on the surface of former grassland. Comparing the soils under four tree species, the best quality of soil is developed beneath the *A. pseudoplatanus* stands. The best C:N ratio, and highest pH, lowest loss of carbon and nitrogen in vertical gradient supports our deductions. Microbial activity and microbial biomass, on the other hand, were found to be the highest under *P. menziesii* stands within the O soil horizon. However, there is a huge fall of these characteristics with increasing depth. So, as a conclusion, the best physico-chemical properties among four examined tree species stands were developed under *A. pseudoplatanus*. Douglas fir stands showed very high activity of soil microorganisms, but only within the O-horizon. The highest values of BR, SIR, C_{mic}, activity of catalase and N-mineralization within the A-horizon were found also beneath the *A. pseudoplatanus* stands. What was the reason of that big soil microbial activity under *P. menziesii* stands is still a question.

5. REFERENCES

- ALBAN, D. H. 1981: Effects of nutrient accumulation by Aspen, Spruce and Pine on soil properties. *Soil Science Society of America*, 46: 853 – 861.
- BAUHUS, J. – PARÉ, D. – COTÉ, L. 1998: Effect of tree species, stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 30: 1077 – 1089.
- BERG, B. 1986: Nutrient release from litter and humus in coniferous forest soils – a mini review. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1: 359-369.
- BEVER, J.D. 2003: Soil community feedback and the coexistence of competitors: conceptual frameworks and empirical tests. *New Phytologist*, 157: 465 – 473.
- EHRENFELD, J.G. - RAVIT B. - ELGERSMA, K. 2005: Feedback in the plant-soil system. *Annual Review of Environment and Resources*. 30: 75-115.
- FINZI, C. – CANHAM, CH. D. – VAN BREEMEN, N. 1998: Canopy tree – soil interaction within temperature forests: Special effects on pH and Cations. *Ecological Applications*, 8: 447 – 454.
- ISLAM, K. R. - WEIL, R.R. 1998: Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. *Biology and Fertility of Soils*, 27: 408-416.
- LODHI, M. A. K. 1977: The influence and comparison of individual forest trees on soil properties and possible inhibition of nitrification due to intact vegetation. *American Journal of Botany* 64: 260 – 264.
- OVINGTON, J.D. 1953: Studies of development of woodland conditions under different trees: I. Soils pH. *Journal of Ecology*, 41: 13 – 34.
- PREGITZER, C.C. - BAILEY, J.K. - HART, S.C. - SCHWEITZER, J.A. 2010: Soils as agents of selection: feedbacks between plants and soils alter seedling survival and performance. *Evolutionary Ecology*, 24: 1045 -1059.
- PRIHA, O. – SMOLANDER, A. 1999: Nitrogen transformation in soil under *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* at two forest sites. *Soil Biology and Biochemistry* 31: 965-977.
- PRIHA, O. - GRAYSTON, S.J - HIUKKA, R. - PENNANEN, T. - SMOLANDER, A. 2001: Microbial community structure and characteristics of the organic matter in soils under *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* at two forest sites. *Biology and Fertility of Soils*, 33: 17-24.
- SARIYILDIZ, T. – ANDERSON, J.M. 2003: Interactions between litter quality, decomposition and soil fertility: a laboratory study. *Soil Biology and Biochemistry*, 35: 391 – 399.
- STOYAN, H. - DE-POLLI, H. - BOHM, S. - ROBERTSON, G.F. - ELDOR, A.P. 2000: Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale. *Plant and Soil*, 222: 203 – 214.
- TICE, K. R. - GRAHAM, R.C. - WOOD, H.B. 1996: Transformation of 2:1 phyllosilicates in 41-year-old soils under oak and pine. *Geoderma*, 70: 49-62.
- VAN MIEGROET, H. – COLE, D.W. 1984: The impact of nitrification on soil acidification and cation leaching in Red Alder Ecosystem. *Journal of Environmental Quality* 13: 586 – 590.
- WALLENSTEIN, M.D. – MCMAHON, S. – SCHIMEL, J. 2007: Bacterial and fungal community structure in Arctic tundra tussock and shrub soils. *FEMS: Microbiology and Ecology*, 59: 428 – 435.
- ZINKE, P. J. 1962: The pattern of individual forest trees on soil properties. *Ecology* 43: 130 – 133
<http://www.biolog.com/pdf/milit/00A%20024%20rB%20MicroSystemsBrochure.pdf>
<http://www.environment.nsw.gov.au/resources/soils/testmethods/mc.pdf>
<http://vlab.amrita.edu/?sub=2&brch=193&sim=1549&cnt=1>
<http://vlab.amrita.edu/?sub=2&brch=193&sim=1549&cnt=2>
<https://bio530.wikispaces.com/Substrate-induced+Respiration>

MOBILNÉ MAPOVANIE LESA POD HUSTÝM KORUNOVÝM ZÁPOJOM

Ing. Juraj Č E R Ň A V A

ČERŇAVA, J.: Mobilné mapovanie lesa pod hustým korunovým zápojom

V poslednom období preniká do výskumu v oblasti mapovania lesa technológia mobilného laserového skenovania (MLS). MLS predstavuje progresívnu technológiu zberu geopriestorových údajov. Náročnosť spracovania údajov MLS narastá s narastajúcou dĺžkou výpadku GNSS signálu. Globálny Navigačný Satelitný Systém (GNSS), ktorý je súčasťou systému mobilného laserového skenovania, je potrebný na určenie polohy bodov mračna produkovaného mobilným laserovým skenerom. Hustý korunový zápoj preto môže spracovanie údajov z mobilného mapovacieho systému výrazne skomplikovať. Na druhej strane, pokrok v oblasti fúzie mračien bodov je tak výrazný, že vzniknutý nesúlad medzi objektmi nasnímanými z viacerých pozícií so slabým GNSS signálom je v súčasnosti možné automatizovane odstrániť. Predložená práca opisuje problematiku spracovania údajov z mobilného laserového skenovania zozbieraných pod hustým korunovým zápojom. V práci sú predstavené algoritmy napomáhajúce spracovaniu takýchto údajov. Zhlukovanie bodov mračna na základe histogramu GNSS času bolo použité na zvýšenie správnosti výškovej normalizácie mračna bodov. Okrem toho, zhlukovanie napomohlo zvýšeniu úspešnosti fúzie zhlukov bodov z identického kmeňa z pôvodných 38,80 % na 55,41 %. Zhluky bodov z identického kmeňa z viacerých čiastkových mračien bodov boli automatizovane zatriedené do skupín podľa ich príslušnosti k identickému kmeňu s 96,76 % správnosťou. Na základe výpočtu horizontálneho prekrytu zhlukov bodov bolo možné odhaliť 83,87 % prípadov neúspešnej fúzie a tak zvýšiť automatizáciu spracovania dát.

Kľúčové slová: mobilný mapovací systém, laserové skenovanie, fúzia mračien bodov

1. Úvod

Po viac ako desaťročí výskumu v oblasti aplikácie Pozemného Laserového Skenovania (PLS) na zisťovanie dendrometrických veličín, viacero výskumov uvádza, že najväčšiu nevýhodu tejto technológie predstavuje statický prístup k laserovému skenovaniu (LIANG et al. 2014, LIANG et al. 2016, KELBE et al. 2015). Z tohto dôvodu sa mnohé výskumné inštitúcie začínajú zaoberať problematikou využitia Mobilného Laserového Skenovania (MLS) pre zisťovanie informácií o lese. Viacero výskumov už naznačilo schopnosť MLS poskytnúť presný odhad priemerov kmeňa vo výške 1,3 metra ($d_{1,3}$) (WU et al. 2013, LIANG et al. 2014, FORSMAN et al. 2016). Vhodnosť MLS pre mapovanie rozsiahlych lesných porastov už bola taktiež testovaná (HOLOPAINEN et al. 2013, LIANG et al. 2014).

Viacero pilotných výskumov v oblasti využitia mobilného laserového skenovania pre zber informácií o lese odhliadalo od potreby zberu dát MMS pod hustým korunovým

zápojom (FORSMAN et al. 2016, LIANG et al. 2014, HOLOPAINEN et al. 2013). Na druhej strane niektoré štúdie už venovali zvýšenú pozornosť tejto problematike (TANG et al. 2015, RÖNNHOLM et al. 2016). Niektoré výskumy využili na registráciu dodatočné zariadenia ako napríklad systém na zber laserových a navigačných dát umiestnený vo vzduchu (Rönnholm et al. 2016). V iných prípadoch sa využívajú na tento účel metódy ako Simultánna Lokalizácia A Mapovanie (SLAM z ang. Simultaneous Localization And Mapping) (TANG et al. 2015).

BESL a MC. KAY (1992) vo svojej práci predstavili metódu na vylepšenie translácie a rotácie pohybovaného mračna pri fúzií bodových mračien. Túto metódu nazvali iteratívny najbližší bod (ICP z ang. Iterative Closest Point). Metóda ICP bola už využitá v niekoľkých prípadoch na fúziu mračien bodov z lesného prostredia (TANG et al. 2015, RÖNNHOLM et al. 2016).

GLIRA et al. (2015) predstavil vo svojej práci modifikáciu metódy ICP slúžiacej na fúziu dát z leteckého laserového skenera získaných skenovaním identického územia v rôznych časových okamihoch. Výraznou výhodou tohto algoritmu je schopnosť fúzie viacerých transformovaných mračien bodov s jedným referenčným mračnom.

Niektoré spomenuté výskumy (TANG et al. 2015, RÖNNHOLM et al. 2016) naznačujú, že pre spracovanie údajov MLS získaných pod hustým korunovým zápojom vykazuje pri viacnásobnom nasnímaní objektov rozdiely v polohe pre časti údajov naskenované v odlišnom čase z odlišných pozícií, a teda s odlišnou dostupnosťou GNSS signálu. Cieľom predkladanej práce je predstavenie zberu a spracovania dát z MLS s účelom maximalizácie opisu kmeňa. Predstavujeme komplexnú metodiku na spracovanie takýchto údajov s vysokou mierou automatizácie.

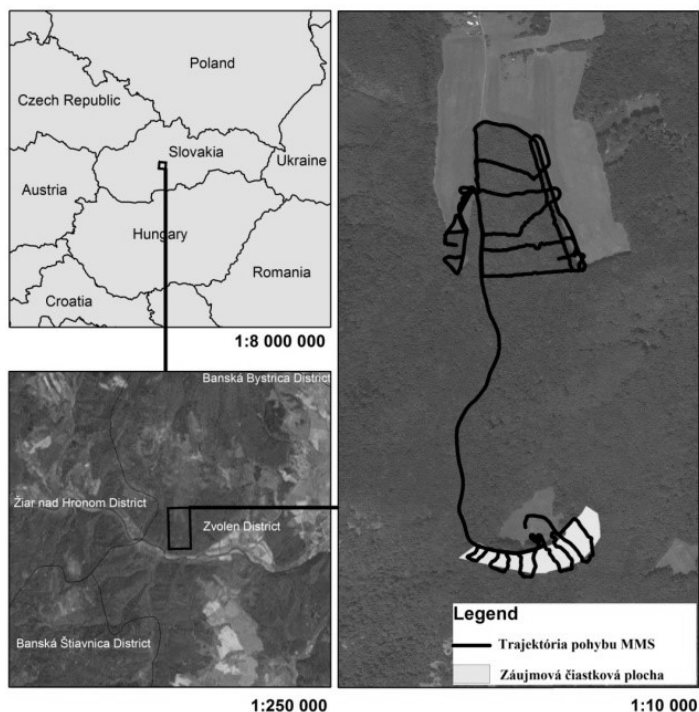
Spracovanie dát v nasledujúcom texte bolo zamerané na jednu konkrétnu čiastkovú plochu. Čiastkovú plochu 619B tvorí 110 ročný porast, zložený prevažne z buka (*Fagus sylvatica* L.), ďalej z duba (*Quercus petraea* L.) a hrabu (*Carpinus betulus* L.) (obr. 1). Zakmenenie porastu bolo v čase mapovania 0,7. Približne 330 m lesnej cesty je umiestnených na severnej hranici čiastkovej plochy. Vo vnútri čiastkovej plochy sa nachádza celkovo cca 964 m približovacích liniek. Tieto hodnoty boli odhadnuté meraním trajektórie pohybu z navigačného systému MMS.

2 MATERIÁL A METÓDY

2.1 Zájmové územie

Zber dát mobilným mapovacím systémom bol vykonaný na území Vysokoškolského Lesníckeho Podniku v júli 2015.

Lesný porast v okolí približne 5,3 km lesných ciest a približovacích liniek bol zmapovaných v priebehu dvoch dní.



Obr. 1: Zaujmová oblasť Hrabiny. Zaujmová čiastková plocha je vymedzená polygónom na pravej časti obrázka.

Fig. 1: Study area – Hrabiny. White polygon in the right part of the figure represents forest stand of interest.

2.2 Mobilný mapovací systém

Na zber údajov bol použitý mobilný mapovací systém Riegl VMX-250 (obr. 10). Systém zahŕňa dva mobilné laserové skenery VQ-250, jednu panoramatickú kameru so zorným poľom 360 stupňov a dve prídavné kamery s vysokým rozlíšením (2452x2056). Navigačný systém pozostáva z GNSS Applanix POS LV 510, inerciálnej meračskej jednotky IMU-31, odometra a kontrolnej jednotky. MMS bol nasadený na Univerzálny Kolesový Traktor (UKT) Zetor Horal 7245.

2.3 Zhlukovanie bodov mračna na základe histogramu GNSS času

Skenovanie z viacerých pozícií malo v niektorých prípadoch za následok multiplikáciu terénu na mračne bodov z MMS. Jeden z takýchto prípadov je demonštrovaný na obrázku 3a. Táto multiplikácia by mohla mať negatívny dopad na výpočet normalizovanej výšky pre niektoré body mračna bodov. Zatiaľ čo body, ktoré sa odvíjajú od najnižšieho súboru

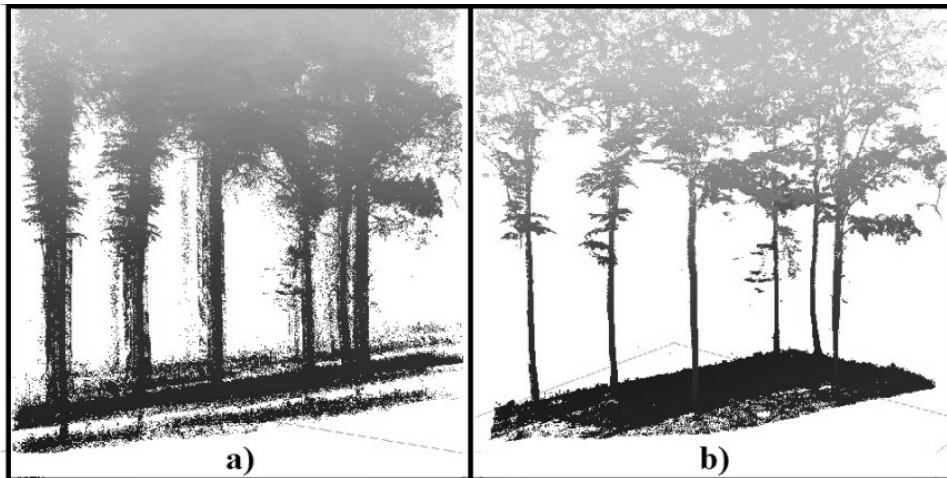
bodov terénu disponujú správnymi hodnotami normalizovanej výšky, normalizovaná výška bodov, ktoré sa odvíjajú od súboru bodov terénu lokalizovaných vyššie je podhodnotená. Rozdelenie takéhoto mračna na základe GNSS času a následný individuálny výpočet normalizovanej výšky pre každé čiastkové mračno dokáže tento nedostatok úplne odstrániť alebo aspoň výrazne zlepšiť (obr. 3b).



Obr. 2: Mobilný mapovací systém Riegl VMX-250 nasadený na UKT Zetor Horal 7245. Dve digitálne kamery (1) a mobilné laserové skenery VQ-250 (2) sú pripevnené stranách meracej hlavy, GNSS anténa (3) je umiestnená na vrchu meracej hlavy a panoramatická kamera (4) je umiestnená nad meracou hlavou mobilného mapovacieho systému.

Fig. 2: Mobile mapping system RIEGL VMX-250 mounted on tractor Zetor Horal 7245. Two digital cameras (1) and mobile laser scanners VQ-250 (2) are placed on the side of the MMS measuring head, GPS antenna (3) is placed on the top and panoramic camera (4) above the MMS measuring head.

V rámci nášho výskumu bol na zhlukovanie bodov mračna použitý histogram s užívateľom zadanou šírkou triedy. Na základe histogramu boli body mračna pridávané do zhluku od minimálnej hodnoty GNSS času smerom k maximálnej až do triedy s nulovou početnosťou. V prípade, že nasledovalo niekoľko tried s nulovou početnosťou za sebou, mračno bolo rozdelené v strede úseku histogramu s triedami s nulovou početnosťou. Šírka triedy histogramu bola nastavená na hodnotu 10 s. Ďalším parametrom, ktorý je potrebný na zníženie redundancie dát je minimálny počet bodov zhluku, ktorý má byť uložený ako samostatné mračno bodov. Minimálny počet bodov bol na základe pozorovania nastavený na hodnotu 15 000. 15 000 bodov vo väčšine prípadov predstavovalo mračno, ktoré malo dostatočnú hustotu bodov terénu na správny výpočet normalizovanej výšky.



Obr. 3: Mračno bodov získané extrakciou bodov pôvodných mračien z MLS na základe priestorového vymedzenia (a). Mračno bodov bolo získané skenovaním z viacerých pozícií. Jedno z mračien vytvorených delením mračna bodov zobrazenom na obrázku 3a na základe GNSS času (b). Mračno bodov má najvyšší počet bodov zo všetkých novovzniknutých mračien.
 Fig. 3: Point cloud generated by extraction of points from raw MLS point cloud using a polygon geometry (a). Point cloud was acquired by scanning from multiple positions. One of the point clouds generated by dividing point cloud shown in figure 3a using GNSS time based clustering. Generated point cloud is one of the multiple point cloud generated using the clustering and consists of greatest number of points.

2.4 Klasifikácia bodov terénu a výpočet normalizovanej výšky bodov

Na klasifikáciu bodov terénu sme použili balík aplikácií LAsTools (ISENBURG 2016). Body terénu sú klasifikované na základe nepravidelnej trojuholníkovej siete vytvorenej z bodov s minimálnou výškou v pravidelnej mriežke. Pomocou zadaných odchýlok od vytvorenej nepravidelnej trojuholníkovej siete sa vyberú ďalšie body, ktoré budú klasifikované ako body terénu.

Výpočet normalizovanej výšky bol následne vykonaný v prostredí systému OPALS (MANDLBURGER et al. 2009, PFEIFER et al. 2014). OPALS vyžaduje pre výpočet normalizovanej výšky Digitálny Model Terénu (DMT) v podobe rastra. Z tohto dôvodu bol z bodov terénu vytvorený raster vo formáte TIFF (Tagged Image File Format).

Normalizovaná výška bola vypočítaná modulom AddInfo systému OPALS. Údaj o normalizovanej výške začína bodmi nachádzajúcimi sa v rovnakej výške ako DMT s hodnotou normalizovanej výšky rovnou nule, a pokračuje vyššie s hodnotou závislou od vertikálnej vzdialenosti bodu od DMT.

Použitím údajov o normalizovanej výške vypočítaných v predchádzajúcom kroku, boli body nachádzajúce sa v normalizovanej výške v intervale od 0,35 m do 1,5 m extrahované z celkového mračna bodov.

Zhluky bodov pochádzajúce zo segmentov bodov z jednotlivých čiastkových mračen bodov získaných pomocou algoritmu spomenutého v kapitole 2.3 je zobrazený na obrázkoch 5a a 5c.

2.5 Identifikácia a extrakcia individuálnych kmeňov z mračna bodov

Metóda priestorového zhlukovania na základe vzdialenosti bodov (DiBSC z ang. Distance Based Spatial Clustering) (KOREŇ 2016) bola použitá na identifikáciu jednotlivých kmeňov v rámci segmentu bodov získaného spracovaním uvedeným v kapitole 2.4. Mračno bolo rozdelené na samostatné súbory reprezentujúce zhluky bodov z individuálnych kmeňov vo výške vo formáte LAS (LASer file format). V niektorých prípadoch na správnu extrakciu individuálnych kmeňov stromov zo segmentu bodov nestačili priestorové vzťahy. Viaceré zhluky bodov z identického kmeňa, ktoré sa prekrývali alebo nachádzali v tesnej blízkosti sme oddelili pomocou algoritmu popísaného v kapitole 2.3.

2.6 Párovanie zhlukov bodov z identického kmeňa

Jednotlivé zhluky boli zaradené do skupín podľa ich príslušnosti k individuálnemu kmeňu stromu na základe troch parametrov. Prvým parametrom bola hodnota maximálnej vzdialenosti medzi centroidmi porovnávaných zhlukov. Ďalší parameter, ktorý sme použili pri párovaní zhlukov bodov z identického kmeňa, bol podiel medzi rozdielmi priemerných GNSS časov a vzdialenosťami centroidov porovnávaných zhlukov bodov. Tento parameter vyplýva z faktu, že zhluky bodov vzniknuté skenovaním z viacerých pozícií pomocou MLS sú od seba významne časovo vzdialené a zároveň je maximálna polohová chyba ich centroidov do cca 1,5 m. Pri zhlukoch z identického kmeňa dosahuje navrhnutá premenná hodnoty do cca 5, zatiaľ čo pri odlišných kmeňoch nachádzajúcich sa blízko seba (do 1,5 m) sa hodnoty pohybujú rádovo v niekoľkých stovkách resp. tisícoch. Tretím použitým parametrom bola hodnota priemeru zhluku z predodhadu. Predodhad je vykonaný použitím metódy maximálnej vzdialenosti. Na predodhad sú vybraté len body nachádzajúce sa v normalizovanej výške väčšej ako 0,65 m (celkovo teda body od 0,65 m po 1,5 m). S použitím uvedeného prístupu odstránime, alebo prinajmenšom minimalizujeme vplyv koreňových nábehov, ktorý by inak spôsobil signifikantné nadhodnotenie predodhadu priemeru kmeňa. V prípade, že boli dva zhluky označené ako zhluky z identického kmeňa aplikácia označí ich príslušnosť k identickému kmeňu tak, aby bolo zhluky možné automatizovane identifikovať a vykonať ich fúziu (e.g. kmen0000_0001 a kmen0001_0000 sú zhluky z identického kmeňa).

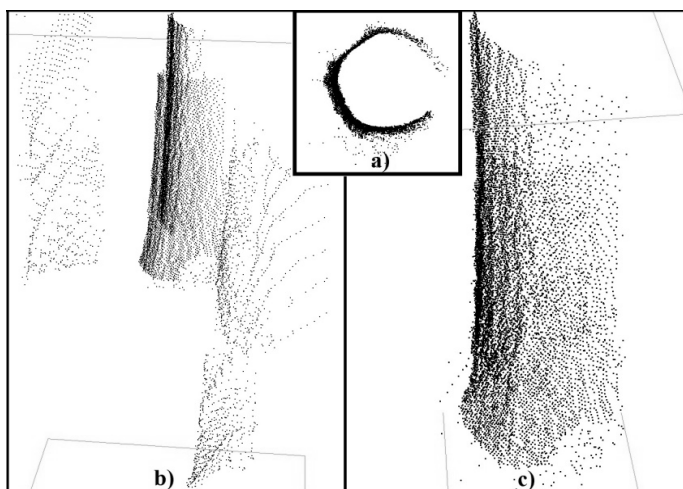
2.7 Odhad horizontálneho prekrytu zhlukov bodov z identického kmeňa

Modul ICP systému OPALS, ktorý bol použitý na fúziu zhlukov bodov vyžaduje určitý prekryt približovaných zhlukov bodov. Nato, aby sme zistili približný horizontálny prekryt, navrhli sme algoritmus, ktorý dokáže vypočítať uhlové rozpätie podľa svetových strán pre jednotlivé zhluky bodov opisujúce kmeň stromu. Algoritmus počítá smerovanie

v stupňoch podľa svetových strán pre všetky body zhľuku na základe trigonometrických vzťahov a následne je z týchto hodnôt vypočítané ich variačné rozpätie. Prekrytí smerovania bodov dvoch zhľukov vyjadruje horizontálny prekrytí, na základe ktorého komplexná aplikácia rozhodne, či zhľuk bude vstupovať do fúzie.

2.8 Fúzia mračien bodov modulom ICP v prostredí modulárneho systému OPALS

Na fúziu zhľukov bodov priradených k individuálnym kmeňom sme použili algoritmus metódy iteratívneho najbližšieho bodu vyvinutý GLIROM et al. (2015). Zdá sa, že táto metóda dokáže previesť fúziu mračien bodov aj pre mračná s relatívne nízkym prekrytím. V prípade, že bol prekrytí spájaných mračien bodov väčší (i. e. cca 25% opisu kmeňa) manipulovali sme len s parametrom určujúcim veľkosť vyhľadávacieho okna v tvare kruhu, na základe ktorého generalizuje algoritmus transformované mračno na rovinu resp. povrch, ktorý následne približuje k referenčnému mračnu bodov. V prípade, že bol prekrytí menší, avšak dostatočný na vykonanie fúzie mračien bodov začali sme manipulovať taktiež s percentuálnym zastúpením bodov použitých na tvorbu generalizovanej roviny či zrejmom využívajúcim variabilitu normál fokálnych povrchov transformovaného mračna. Zhľuky bodov z identického kmeňa pred a po fúzii sú zobrazené na obrázku 4.



Obr. 4: Zhľuky bodov z identického kmeňa spávané pomocou algoritmu opísaného v kapitole 2.6, pred fúziou – z profilu (b). Zhľuky bodov z identického kmeňa po fúzii pohľad zhora (a) a z profilu (c).

Fig. 4: Point clusters from the identical stem grouped by algorithm described in chapter 2.6, before the fusion – from the profile (b). Point clusters after the fusion – from above (a) and from the profile (c).

Uvedená fúzia mračien bodov bola vykonaná prostredníctvom aplikácie v prostredí Pyscripter, ktorý je súčasťou modulárneho programového systému OPALS. Ako referenčné mračno bodov, ku ktorému sa približovalo viacero transformovaných mračien bolo vybrané mračno s najvyšším počtom bodov. Samotná fúzia bola spojená s výpočtom požadovaného horizontálneho prekrytu približovaných mračien bodov (pozri kapitolu 2.7). Po spojení zhlukov bodov z identického kmeňa bolo výsledné mračno použité ako nové referenčné mračno a opätovne boli vypočítané prekryty s mračnami, ktoré neboli približované počas predchádzajúcej fúzie. Výpočet prekrytu a následná fúzia prebiehali až dovtedy, kým neboli všetky mračná, ktoré sa dostatočne prekrývali približené.

3 VÝSLEDKY A VYHODNOTENIE

Zhlukovanie bodov mračna na základe histogramu GNSS času bolo overené na priestorovo vymedzenom mračne bodov. Mračno bolo rozdelené na 15 menších mračien, ktoré bolo možné použiť ako vstup pre výškovú normalizáciu. Jedno z týchto mračien vykazovalo polohový nesúlad pre body z identického kmeňa nasnímaného z viacerých pozícií. Tento nesúlad nebol odstránený ani pri pravidelnom rozdelení mračna na menšie celky nasnímané v rozpätí 10 s GNSS času, pričom sa počet výsledných súborov zvýšil. Spomenutý nesúlad nepôsobil významne na výškovú normalizáciu mračna bodov, a preto sme použili hodnotu 10 s aj pri delení ostatných čiastkových mračien.

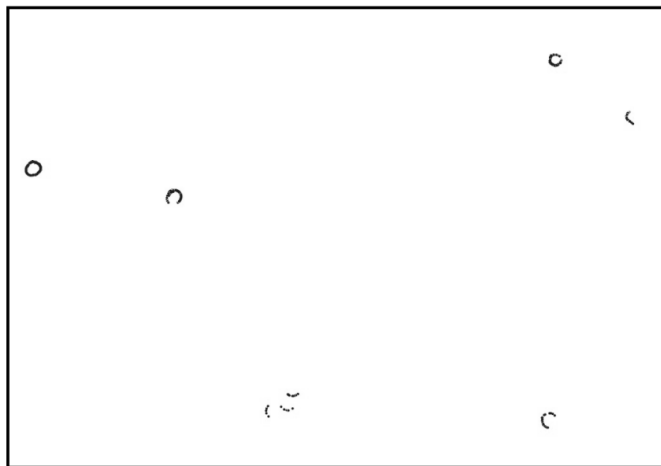
Algoritmus na párovanie zhlukov kmeňov z identického kmeňa popísaný v kapitole 2.6 bol overený na vzorke 370 dvojíc zhlukov, o ktorých bolo potrebné rozhodnúť, či sú alebo nie sú zhlukmi z identického kmeňa. Pri overovaní bol použitý maximálny rozdiel predodhadov priemerov zhlukov bodov 15 cm. Podiel medzi rozdielom priemerných GNSS časov a vzdialenosťami medzi centroidmi porovnávaných zhlukov bodov bol nastavený na hodnotu 10 a maximálna vzdialenosť zhlukov z identického kmeňa na 1,5 m. Algoritmus v 12-tich prípadoch označil zhluky nesprávne ako zhluky z identického kmeňa napriek tomu, že zhluky pochádzali z dvoch rozdielnych kmeňov.

Vstup pre fúziu mračien bodov pozostával zo 148 zhlukov bodov. 82 zhlukov bodov bolo úspešne približených. Aj pre korekciu zhlukov pred fúziou bol použitý algoritmus popísaný v kapitole 2.3. Takáto korekcia bola potrebná pri 33 zo 112 zhlukov a zabezpečila korektnú fúziu pre všetky zhluky bodov z identického kmeňa, ktoré sa viditeľne dostatočne prekrývali. Bez uvedenej korekcie by bola úspešnosť fúzie 38,30 %. Korekcia zvýšila úspešnosť fúzie na 55,41%. Neúspešnosť ostatných zhlukov bodov bola zapríčinená nedostatočným prekrytom. Pre 52 zo 62 prípadov bol nedostatočný prekryt odhalený pomocou algoritmu popísaného v kapitole 2.7. V ostatných 10 prípadoch sme zistili nedostatočný prekryt zhlukov s referenčným mračnom vizuálnym pozorovaním. Konštatovanie, či je prekryt zhlukov dostatočný na vykonanie fúzie, vychádzalo z predchádzajúcej skúsenosti s algoritmom ako aj z princípov, na ktorých je algoritmus fúzie založený.

4 DISKUSIA

Viacero algoritmov na spracovanie údajov MLS zozbieraných v podmienkach zhoršeného GNSS signálu bolo predstavených v tejto práci. Pri použití uvedenej mapovacej techniky a maximálnej automatizácie by bola výsledná úspešnosť fúzie zhlukov bodov z identických kmeňov 55,41 %. Táto úspešnosť je taktiež podmienená správnou voľbou rozpätia tried histogramu potrebného na delenie mračna bodov, ktorou sa výskum detailnejšie nezaoberal. Pri absencii algoritmu popísaného v kapitole 2.3 by bola úspešnosť 38,30 %. Toto zvýšenie úspešnosti fúzie považujeme za najväčší prínos nášho výskumu.

Algoritmus slúžiaci na párovanie zhlukov bodov z identického kmeňa dokázal bez detailnejšieho testovania vstupných parametrov poskytnúť správnosť 96,76 %. Môžeme povedať, že pri nastavení parametra rozdielov maximálnych vzdialeností porovnávaných zhlukov na vyššiu hodnotu, by mohlo dôjsť k zvýšeniu počtu zhlukov predstavujúcich vstup pre následnú fúziu. Príspevok takýchto zhlukov k opisu kmeňa výsledného zhuku po fúzií je však oveľa menší ako pri zhlukoch spĺňajúcich podmienku, tak ako to bolo stanovené v kapitole 2.6 (i.e. 15 cm). Okrem toho je potrebné poukázať na fakt, že na fúziu zhlukov je potrebný určitý prekryt, ktorý by v podmienkach väčšieho rozdielu pravdepodobne nebol dostatočný.



Obr. 5: Rez mračnom bodov s normalizovanou výškou 1,275 m až 1,325 m. Mračno bolo spracované s použitím metodiky uvedenej v kapitole 2.4 a predstavuje úsek s nadpriemerne vysokým opisom kmeňa.

Point cloud cross-section located in normalized height ranging from 1.275 m to 1.325 m. Point cloud was processed using methods described in chapter 2.4. Part of the cloud shown in the figure represents part of the point cloud with above average MLS tree stem coverage rate.

V práci bol taktiež predstavený pomerne primitívny algoritmus na zistenie prekrytu dvoch zhlukov. Tento algoritmus dokázal odhaliť nedostatočný prekryt pre 83,87 % prípadov (z celkovej vzorky 62 porovnávaných zhlukov). Nedostatok tohto algoritmu spočíva najmä v tom, že dokáže zistiť nedostatočný prekryt len na dvojrozmernej úrovni. Nakoľko je však vertikálny nesúlads medzi zhlukmi bodov náhodný, je ťažké uvažovať o algoritme, ktorý by priniesol výrazne zlepšenie vďaka tomu, že by určil prekryt na trojrozmernej úrovni.

Napriek pomerne nízkej úspešnosti fúzie zhlukov bodov z identického kmeňa môžeme povedať, že v prípade zvolenia vhodnejšej mapovacej techniky môžeme dosiahnuť v niektorých prípadoch až 100% opis obvodu kmeňa. Na obrázku 5 takýto príklad uvádzame.

Okrem toho, že je možné dosiahnuť vysoký percentuálny opis kmeňa môžeme povedať, že pri všetkých 28 stromov, z ktorých spájané zhluky pochádzali, sa nám podarilo opis kmeňa zvýšiť.

GLIRA et al. (2016) použili na fúziu mračien bodov rovnaký algoritmus ako ten, ktorý bol uvedený v tejto práci. Autori dosiahli fúziu mračien z leteckého laserového skenovania pomocou diaľkovo ovládaného leteckého systému (RPAS - z ang. Remotely Piloted Aircraft System) s odchýlkou 1,38 cm.

Už prvotné výskumy naznačili, že MLS dokáže poskytnúť relatívne presné odhady priemeru kmeňa stromu vo výške 1,3 m (FORSMAN et al. 2016, LIANG et al. 2014). V týchto prípadoch sa mračno bodov podobalo výstupu, ktorý je schopné poskytnúť PLS pri jednoskenovej metóde. Náš výskum však demonštroval, že MLS dokáže poskytnúť mračno bodov, ktoré je podobné mračnu bodov z PLS pri použití multiskenovej metódy. Veľmi svetlý príklad toho, ako vysokú presnosť dokáže takéto mračno poskytnúť predstavili vo svojej práci You et al. (2016). V rámci tejto práce sa autorom podarilo dosiahnuť submilimetrovú presnosť odhadu priemeru kmeňa stromu vo výške 1,3 m z údajov PLS.

5 ZÁVER

Táto práca poukazuje na potenciál údajov MLS poskytnúť odhady priemerov kmeňov stromov s vysokou presnosťou. Je zrejme, že mobilnosť týchto systémov dokáže prekonať nedostatok časovej náročnosti zberu laserových údajov, ktorý bol pri PLS značný.

Konštatujeme, že pri použití uvedenej metodiky dokážeme výrazne zvýšiť opis kmeňa mračnom bodov. Zároveň je ale potrebné poznamenať, že kvalita mračna bodov z MLS nezávisí len od celkového spracovania, ale aj od mapovacej techniky.

Pre širšie uplatnenie MLS pri zbere informácií o lese je potrebný ešte rozsiahlejší výskum, ktorý by sa venoval najmä problematike vhodného výberu mapovacej techniky na základe aktuálneho stavu mapovaných porastov. Najvýraznejšie zvýšenie úspešnosti fúzie mračien bodov, rovnako ako zjednodušenie spracovania, by pravdepodobne prinieslo mapovanie listnatých porastov počas obdobia vegetačného pokoja. Je potrebné taktiež poznamenať, že údaje spracované v rámci nášho výskumu boli zozbierané v júli, kedy je už olistenie plne rozvinuté, a na základe tohto faktu aj vnímať predložené výsledky. Na druhej strane

bol mapovaný dospelý porast so zakmenením 0,7. Je však málo pravdepodobné, že technológia mobilného laserového skenovania poskytne v blízkej budúcnosti veľmi presné odhady priemerov kmeňov pre porasty v juvenilnom štádiu vývoja.

POĎAKOVANIE

Na tomto mieste by som chcel poďakovať prof. Ing. Jánovi Tučekovi, Csc. za sprostredkovanie veľmi aktuálnych dát. Zber dát mobilným mapovacím systémom bol financovaný z projektu VEGA 1/0953/13.

LITERATÚRA

- BESL, J.P., MCKAY, D.N. (1992) A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12, 2: 239-256. ISSN: 0162-8828.
- ČERŇAVA, J., TUČEK, J. (2016): Využitelnost' mobilných mapovacích systémov pri inventarizácii lesa. *GIS Ost-rava 2016*: 1-7. ISBN 978-80-248-3902-8.
- FORSMAN, M., HOLMGREN J., OLOFSSON, K. (2016): Tree Stem Diameter Estimation from Mobile Laser Scanning Using Line-Wise Intensity-Based Clustering. *Forests*, 7, 206: 1-22.
- GLIRA, P., PFEIFER, N., BRIESE, CH., RESSL, C. (2015): A Correspondence Framework for ALS Strip Adjustments based on Variants of the ICP Algorithm. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, vol. 4: 275-289. ISSN 0275-0289.
- GLIRA, P., PFEIFER, N., MANDLBURGER, G. (2016): Rigorous Strip Adjustment of UAV-based Laserscanning Data Including Time-Dependent Correction of Trajectory Errors. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 82, Special Issue on Mobile Mapping Technologies, 12: 945 – 95. doi: 10.14358/PERS.82.12.945.
- HOLOPAINEN, M., KANKARE, V., VASTARANTA, M., LIANG, X., LIN, Y., VAAJAC, M., YU, X., HYYPPÄ, J., HYYPPÄ, H., KAARTINEN, H., KUKKO, A., TANHUANPÄÄ, T., ALHO, P. (2013): Tree mapping using airborne, terrestrial and mobile laser scanning - A case study in a heterogeneous urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12: 546-553.
- ISENBURG, M. (2016): LAStools - efficient LiDAR processing software (version 160429, unlicensed), dostupné na: <http://rapidlasso.com/LAStools>.
- KELBE, D., VAN ARDT, J., ROMANCZYK, P., VAN LEEUWEN, M., CAWSE-NICHOLSON, K. (2015): Single-Scan Stem Reconstruction Using Low-Resolution Terrestrial Laser Scanner Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8: 3414-3427.
- KOREŇ, M. (2016): DendroCloud (version 1.23.0.0). dostupné na: <http://gis.tuzvo.sk/dendrocloud/>.
- LIANG, X., HYYPPÄ, J., KUKKO, A., KAARTINEN, H., JAAKKOLA, A., YU, X. (2014): The Use of a Mobile Laser Scanning System for Mapping Large Forest Plots. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 11: 1504-1508.
- LIANG, X., KANKARE, V., HYYPPÄ, J., WANG, Y., KUKKO, A., HAGGRÉN, H., YU, X., KAARTINEN, H., JAAKKOLA, A., GUAN, F., HOLOPAINEN, N., VASTARANTA, M. (2016): Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 63-77.
- MANDLBURGER, G., OTEPKA, J., KAREL, W., WAGNER, W., PFEIFER, N. (2009): Orientation and Processing Of Airborne Laser Scanning Data (OPALS) - Concept and first results of a comprehensive ALS software. *IAPRS*, 38, Part 3/W8: 55-60.
- PFEIFER, N., MANDLBURGER, G., OTEPKA, J., KAREL, W. (2014): OPALS – A framework for Airborne Laser Scanning data analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 45: 125-136.
- RÖNNHOLM, P., LIANG, X., KUKKO, A., JAAKKOLA, A., HYYPPÄ, J. (2016): Quality analysis and correction of mobile backpack laser scanning data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume III-1, XXIII ISPRS Congress: 41-47.
- TANG, J., CHEN, Y., KUKKO, A., KAARTINEN, H., JAAKKOLA, A., KHORAMSHAHI, E., HAKALA, T., HYYPPÄ, J., HOLOPAINEN, M., HYYPPÄ, H. (2015): SLAM-Aided Stem Mapping for Forest Inventory with Small-Footprint Mobile LiDAR. *Forests*, 6: 4588-4606.

- WU, B., YU, B., YUE, W., SHU, S., TAN, W., HU, CH., HUANG, Y., WU, J., LIU, H. (2013): A Voxel-Based Method for Automated Identification and Morphological Parameters Estimation of Individual Street Trees from Mobile Laser Scanning Data. *Remote Sensing* 2013, 5(2): 584-611.
- YOU, L., TANG, S., SONG, X., LEI, Y., ZANG, H., I, LOU, M., ZHUANG, CH. (2016): Precise Measurement of Stem Diameter by Simulating the Path of Diameter Tape from Terrestrial Laser Scanning Data. *Remote Sensing* 2016, 8: 1-18.

Adresa autora:

Ing. Juraj Čerňava
Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie
Lesnícka fakulta
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen
Slovenská republika
e-mail: juraj.cernava@tuzvo.sk

Mobile mapping of forest under a heavy forest canopy

SUMMARY

Mobile laser scanning is technology of geospatial data collection. Its use in the field of forest mapping has been discussed in recent years. Difficulty of MLS data processing increases as the GNSS signal outage increases. Global Navigation Satellite System (GNSS), which is the part of MLS, is used for localization of point cloud provided by MLS. Therefore, heavy forest canopy can make MLS data processing very difficult. On the other hand, advancement in the field of point cloud registration is noticeable and we are able to correct discrepancies between the objects scanned from different position in fully automatic manner. Proposed paper describes the issue of processing of MLS data that were collected under a heavy forest canopy. The paper presents algorithms that help to automate processing of such a data. GNSS time histogram based point clustering was used for increasing the accuracy of normalized height calculation for point cloud. Besides this, the clustering increased registration of point clusters from identical tree stem success from 38.80 % to 55.41 %. Point clusters from identical stems scanned from multiple positions were classified into group with 96.76 % accuracy. 83.87 % of unsuccessful registration cases were revealed using calculation of horizontal overlap for compared point clusters. The calculation noticeably improved automation of MMS data processing.

DISKONTNÁ SADZBA AKO FAKTOR OVPLYVŇUJÚCI PLNENIE FUNKCIÍ LESA

Ing. Jozef V Ý B O Š Ť O K – Doc. Ing. Ján M E R G A N I Č , PhD. –
Ing. JÁN B A H Ý L , PhD.

VÝBOSŤOK, J. – MERGANIČ J. – BAHÝL, J.: Diskontná sadzba ako faktor ovplyvňujúci plnenie funkcií lesa. Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

Lesné ekosystémy sú stále viac chápané ako multifunkčné produkčné systémy, ktoré od počiatkov ľudstva až do súčasnosti poskytovali ľuďom širokú škálu tovarov a služieb. Plnenie funkcií lesa výrazným spôsobom ovplyvňuje spôsob obhospodarovania porastu a to predovšetkým variant obnovy. Dôležitým parametrom ovplyvňujúcim plánovanie obnovy porastu je úroveň diskontnej sadzby. Cieľom príspevku je určiť vplyv rozhodovateľa a diskontnej sadzby na optimálny spôsob obnovy porastu v nepôvodnom smrekovom poraste strednej Európy s využitím rastového simulátora SIBYLA a metódy racionálnych cieľov (Reasonable Goals) v kombinácii s Interactive Decision Maps (RGM/IDM). V príspevku sme využívali hodnotu diskontnej sadzby 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 %. Vývoj porastu bol simulovaný v rastovom simulátore SIBYLA pri aplikácii 450 rôznych spôsoboch obnovy porastu. Výsledky rastového simulátora SIBYLA boli využité ako indikátory plnenia výrobných a nevýrobných funkcií lesa. Vybrané indikátory slúžili na vytvorenie 4 dimenzionálnej rozhodovacej mapy, na základe ktorej mohol rozhodovateľ vybrať optimálny spôsob obnovy porastu na základe svojich preferencií. Z výsledkov práce vyplýva, že pri nízkych hodnotách diskontnej sadzby je pre optimálny spôsob obnovy porastu charakteristický jednotlivý výber stromov pre ťažbu, dlhá rubná a obnovná doba. So zvyšovaním hodnoty diskontnej sadzby dochádza k skracovaniu rubnej a obnovnej doby a k preferovaniu pásových foriem obnovy.

Kľúčové slová: hospodárska úprava lesov, SIBYLA, multikriteriálna optimalizácia, interaktívne rozhodovacie mapy, diskontná sadzba, rubná doba

1. ÚVOD A PROBLEMATIKA

Lesné ekosystémy patria medzi najvýznamnejšie ekosystémy na svete (ROSSER, 2013), a sú vysoko cenené pre funkcie a služby, ktoré poskytujú spoločnosti (PAN et al., 2011). V počiatkoch cieľavedomého lesného hospodárstva bola primárne využívaná ich produkčná funkcia, a to najmä produkcia palivového a stavebného dreva (PUETMANN et al., 2009). Trend presadzovania produkčnej funkcie lesov pretrval do polovice 20. storočia (GRILLI et al., 2016). Vývoj ľudskej spoločnosti podmienil postupný prechod k využívaniu iných ekosystémových služieb lesov a les začal byť viac vnímaný ako významný krajinnotvorný prvok (PUETMANN et al., 2009). V súčasnosti je celosvetovým trendom výrazné presadzovanie mimoprodukčných funkcií poskytovaných lesnými ekosystémami (NOTARO AND PALETTO, 2011), pretože lesné ekosystémy poskytujú veľké množstvo rôznych produktov a služieb (GADOW et al., 2007). Optimálny manažment obhospodaro-

vania lesov s cieľom zabezpečenia rôznorodých funkcií lesa predstavuje rastúci problém v mnohých častiach sveta (ROSSER, 2013). Z uvedených trendov vyplýva špecifická požiadavka, ktorou je zosúladenie produkčných a mimoprodukčných funkcií lesných ekosystémov takzvané multikriteriálne riadenie (MCDM) (ANANDA AND HERATH, 2009). Problém multifunkčného riadenia je v súčasnosti veľmi aktuálny a existuje mnoho dôležitých problémov, ktoré je potrebné vyriešiť (SAARIKOSKI et al., 2010). Najvýznamnejším problémom MCDM je minimalizácia konfliktov medzi zainteresovanými stranami (GRITTEN et al., 2013) a hľadanie kompromisov medzi jednotlivými službami (CREUTZBURG et al., 2016).

Najvýznamnejším faktorom ktorý ovplyvňuje plnenie funkcií lesa je spôsob obhospodarovania porastu. Viacero štúdií dokazuje výrazný vplyv diskontnej sadzby na výber vhodného spôsobu obhospodarovania porastu (HAHN et al., 2014). V súčasnosti existujú štúdie o tom, aká je najvhodnejšia diskontná sadzba pre dosiahnutie konkrétneho cieľa, pričom v každom príspevku sa používajú rôzne diskontné sadzby, aj keď ekonomické podmienky daných krajín sú podobné (BRUKAS et al., 2001).

Rast lesa je dlhodobý prírodný proces a pri obhospodarovaní porastov je dôležité poznať dlhodobý efekt obhospodarovania a mať prehľad o vývoji porastov. Pre prognózovanie vývoja porastu pri rôznych spôsoboch obhospodarovania porastu je možné využiť modely rastu lesa, ktoré sú v súčasnosti implementované v počítačových programoch takzvaných rastových simulátoroch (BARREIRO et al., 2016). Na výber vhodného spôsobu obhospodarovania porastu s cieľom zosúladenia vybraných funkcií lesa je možné využiť multikriteriálnu optimalizáciu. Pre riešenie multikriteriálnych problémov v lesníctve sa vhodné javia interaktívne rozhodovacie mapy (IDM) patriace do aposteriori metód (LOTOV et al., 2004). Prostredníctvom IDM môže rozhodovateľ posúdiť kompromisy medzi kritériami a zvoliť optimálnu kombináciu kritérií priamo na obrazovke počítača (GARCIA-GONZALO et al., 2015).

Predkladaný článok sa zaoberá hodnotením vplyvu diskontnej sadzby na plnenie funkcií lesa.

2. MATERIÁL A METÓDY

2.1 Modelový porast

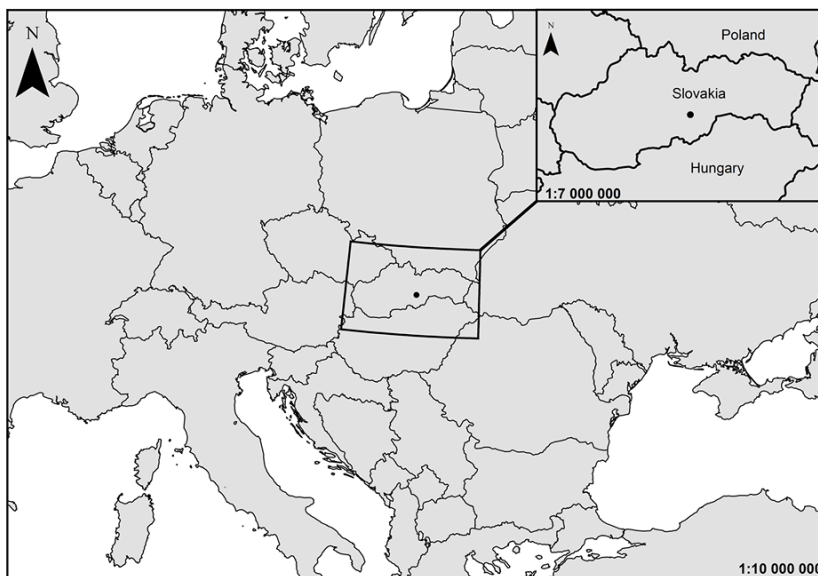
Vybraný porast je typickým predstaviteľom nepôvodných zmiešaných porastov na Slovensku a v strednej Európe. Porast sa nachádza na južnej časti stredného Slovenska (obr. 1). Výmera porastu predstavuje 5,58 hektára, rozpätie nadmorských výšok od 430 do 470 m n. m. Pôda v poraste je mierne kyslá až kyslá, typom pôdy je kambizem. Vek porastu je 60 rokov, zakmenenie 0,8; celková zásoba dielca 2 681 m³.

Stredná výška: BK: 28 m, JH: 27 m, SC: 27 m, SM: 29 m.

Stredná hrúbka: BK: 35 cm, JH: 33 cm, SC: 34 cm, SM: 34 cm.

Bonita: BK: 38, JH: 36, SC: 34, SM: 38 (PSL, 2013).

Zastúpenie drevín: BK: 5%, JH: 5%, SC: 10%, SM: 80%,



Obr. 1: Lokalizácia modelového porastu
 Fig. 1: Localization of studied forest stand

2.2 Spôsoby obnovy porastu

V rámci obhospodarovania lesov pri zohľadnení plnenia cieľov, majitelia lesných porastov stanovujú kritériá, prostredníctvom ktorých chcú dosiahnuť čo najpriaznivejšiu ekonomickú perspektívu zo svojho majetku. Lesníci na základe požiadaviek majiteľov lesa identifikujú najvhodnejší spôsob obhospodarovania porastu, ktorým by sa najefektívnejšie dosiahlo naplnenie jeho požiadaviek (NYLAND, 2002). Pestovné opatrenia obhospodarovania lesných porastov vychádzajú z obnovných metód, ktoré sú klasifikované podľa veku porastu na rovnoveké porasty a rôznoveké porasty (MATTHEW, 1989; SMITH et al., 1997). Metódy obhospodarovania rovnovekých porastov sú založené na odstránení celej skupiny materských jedincov jedným alebo viacerými zásahmi, pričom všetok rastový potenciál je orientovaný na vznik následnej generácie lesa v približne rovnakom veku. Z ekonomického hľadiska, holorubný hospodársky spôsob odstraňuje množstvo biomasy, ktorá je akumulovaná v poraste počas niekoľkých rokov a pretransformuje ju na výnos z ťažby, a z tohto pohľadu sa javí táto metóda ekonomicky veľmi atraktívna (SMITH AND DEBALD, 1978). Podrastový hospodársky spôsob je spôsob, pri ktorom sú obnovné ruby zamerané na odstránenie dospelých jedincov v dvoch alebo viacerých zásahoch postupne, pričom sa ponechávajú niektoré stromy pre zabezpečenie vzniku prirodzenej obnovy a následne jej ochrany (NYLAND, 2002). Na rozdiel od holorubov, pri ktorých následná generácia vzniká najmä z umelej obnovy, podrastový hospodársky spôsob primárne využíva prístup prirodzenej obnovy porastov (SMITH et al., 1997). Pri obhospodovaní

nerovnovekých porastov sa nikdy neodstraňujú všetky dospelé jedince v priebehu regenerácie porastu, ani v krátkych časových periódach. Výberkový hospodársky spôsob predstavuje individuálny výber stromov alebo skupiny stromov vhodných na ťažbu za účelom vytvorenia priestoru pre prirodzenú obnovu resp. pre vznik novej vekovej triedy. Ideálny výberkový systém obhospodarovania je taký, ktorý plnohodnotne využíva disponibilný priestor v lesnom poraste a teda aj rastový potenciál daného stanovišťa (Matthew, 1989). Lesníci musia koordinovať dlhodobé plánovanie a prispôsobiť tieto základné prístupy obhospodarovania špecifickým potrebám a záujmom s hlavným cieľom zabezpečiť trvalo udržateľnosť lesného ekosystému (NYLAND, 2002).

Špecifické formy a varianty hospodárskych spôsobov, ktoré sme aplikovali v praktickej časti výskumu sú znázornené v tab. 1.

2.3 Simulátor biodynamiky lesa (SIBYLA)

Simulátor biodynamiky lesa (SIBYLA) patrí do kategórie empirických stromových rastových simulátorov (FABRIKA AND PRETZSCH, 2011). Cieľom rastového simulátora je napodobňovanie správania stromov v rámci lesného ekosystému, skladá sa zo sady matematických modelov a algoritmov, ktoré boli integrované do komplexného softwarového balíka Sibyla Suite (FABRIKA, 2005). SIBYLA bola založená na modelovom princípe a algoritmoch SILVA 2.2, pričom niektoré časti boli úplne modifikované alebo kompletne preobrané (FABRIKA AND ĎURSKÝ, 2005). SIBYLA bola kalibrovaná na dátach z 1189 permanentných inventarizačných plôch, ktoré nesú informáciu o 9213 bukoch, 7358 smrekoch, 3444 duboch, 1181 boroviciach a 1137 jedliach (BOŠEEA et al., 2013). SIBYLA umožňuje modelovať rovnovkové a rôznovkové porasty, monokultúry, ale aj zmiešané porasty s variabilnou porastovou štruktúrou (HOREMANS et al., 2016). V module kultivátor rastového simulátora SIBYLA je možné prognózovať vývoj lesa pri použití rôznych spôsobov obhospodarovania. Výsledkom rastového simulátora SIBYLA sú údaje o produkcii, biomase, biodiverzite, nákladoch a výnosoch ktoré môžu byť priamo využité ako indikátory plnenia produkčných a mimoprodukčných funkcií lesa.

V našom príspevku bol v rastovom simulátore SIBYLA vygenerovaný virtuálny porast s výmerom 1 hektár (200 × 50m), ktorý je popísaný v kapitole 2.1. V module kultivátor bolo zadefinovaných 450 rôznych spôsobov obnovy porastu (tab. 1). Simulovali sme vývoj lesného ekosystému pri uplatnení alternatívnych spôsobov obnovy.

2.4 Výber indikátorov pre multikriteriálnu optimalizáciu

Na základe štúdia literatúry sme vybrali štyri indikátory pre proces multikriteriálnej optimalizácie obnovy porastu, ktoré popisujú plnenie produkčných ako aj mimoprodukčných funkcií lesa a sú štandardným výstupom rastového simulátora SIBYLA.

Tab. 1: Formy a varianty skúmaných obnovných rubov

Tab. 1: Forms and methods of used harvest-regeneration systems

Hospodársky spôsob	Forma hospodárskeho spôsobu	Kalkulácia a špecifikácia spôsobov obnovy	Počet variantov
Holorubný	Veľkoplošná	× 1 (1 ťažba za decénium) × 5 (obnovná doba: 20, 30, 40, 50, 60 rokov) × 8 (rubná doba: 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150,160 rokov)	40
		× 1 (2 ťažba za decénium) × 4 (obnovná doba: 10,20,30,40 rokov) × 8 (rubná doba: 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150,160 rokov)	32
	Maloplošná	× 1 (2 ťažba za decénium, 2 obnovná doba) × 5 (obnovná doba: 10, 20, 30, 40, 50, 60 rokov) × 8 (obnovná doba: 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 rokov)	40
		× 1 (3 ťažba za decénium, 2 obnovná doba) × 5 (obnovná doba: 10, 20, 30, 40, 50, 60 rokov) × 8 (obnovná doba: 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 rokov)	40
Podrastový	Veľkoplošná	× 1 (2 ťažba za decénium, 2 obnovná doba) × 5 (obnovná doba: 10, 20, 30, 40, 50, 60 rokov) × 8 (obnovná doba: 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 rokov)	40
		× 1 (3 ťažba za decénium, 2 obnovná doba) × 5 (obnovná doba: 10, 20, 30, 40, 50, 60 rokov) × 8 (obnovná doba: 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 rokov)	40
	Maloplošná	× 1 (2 ťažba za decénium, 2 obnovná doba) × 5 (obnovná doba: 10, 20, 30, 40, 50, 60 rokov) × 8 (obnovná doba: 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 rokov)	40
		× 1 (3 ťažba za decénium, 2 obnovná doba) × 5 (obnovná doba: 10, 20, 30, 40, 50, 60 rokov) × 8 (obnovná doba: 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 rokov)	40
	Skupinová	× 1 (2 ťažba za decénium, 2 obnovná doba) × 5 (obnovná doba: 10, 20, 30, 40, 50, 60 rokov) × 8 (obnovná doba: 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 rokov)	40
		× 1 (3 ťažba za decénium, 2 obnovná doba) × 5 (obnovná doba: 10, 20, 30, 40, 50, 60 rokov) × 8 (obnovná doba: 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 rokov)	40
	Cieľová hrúbka*	× 1 (Smrek: 50 cm, Smrekovec: 40 cm, Javor: 45 cm, Buk: 45 cm) × 5 (obnovná doba: 10, 20, 30, 40, 50, 60 rokov) × 8 (rubná doba: 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 rokov)	40
	Výberkový	Stromová**	× 5 (dimenzia rubného typu: 60, 65, 70, 75, 80 cm) × 2 (počet cieľových stromov: 1, 2 na hektár)
Bez zásahový***		× 8 (vek: 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 rokov)	8
			Σ 450

Poznámka: * cieľová hrúbka bola stanovená na základe prírodných podmienok; ** individuálny výber stromov podľa výberkového modelu Liocourta; *** obnova porastu založená na samovývoji
 Note: * target diameter was determined on the base of natural conditions; ** single tree cutting according to Liocourt model of selection system; *** forest regeneration based on self-development

2.4.1 Diverzita porastu

Celková diverzita porastu bola hodnotená na základe indexu celkovej diverzity (B) podľa JAEHNE AND DOHRENBUSCH (1997). Tento index pozostáva zo štyroch častí: α reprezentuje diverzitu druhového zloženia, β je index vertikálnej štruktúry porastu, γ reprezentuje diverzitu priestorového rozmiestnenia stromov, a δ je diverzita korunovej diferenciácie. Celková hodnota diverzity sa potom vypočíta na základe vzťahu (JAEHNE AND DOHRENBUSCH, 1997):

$$B = 4 \cdot \alpha + 3 \cdot \beta + \gamma + \delta \quad [1]$$

2.4.2 Zakmenenie porastu

Vypočíta sa na základe podielu aktuálneho indexu hustoty porastu a maximálneho indexu hustoty porastu:

$$RSDI = \frac{SDI}{SDI_{max}} \quad [2]$$

SDI sa vypočíta na základe počtu stromov na hektár a kvadratickej strednej hrúbky stromov porastovej zložky podľa vzťahu odvodeného (REINEKE, 1933):

$$SDI = N \cdot \left(\frac{25}{d_g}\right)^{-1.6} \quad [3]$$

Vyjadruje teoretický počet stromov na hektár, ak by porastová zložka mala strednú kvadratickú hrúbku rovnú 25 cm.

SDI max znamená maximálny možný počet stromov na hektár pri plnom zakmenení a 100% zastúpení dreviny pri strednej hrúbke 25 cm, na základe modelu rastových tabuliek (HALAJ, 1987): smrek (1220), jedľa (1130), borovica (990), buk (1050) a dub (960).

2.4.3 Stabilita porastu

Stabilita porastu (D/H) bola kalkulovaná ako pomer strednej hrúbky porastu (D) a priemernej výšky porastu (H). Použili sme tento ukazovateľ namiesto bežne používaného pomeru (H/D), z dôvodu lepšej prezentácie indikátora vo väzbe na vznik holín, čo znamená že hodnota blížiacia sa 0 charakterizuje nízku stabilitu, hodnota vyššia ako 1 popisuje vysokú funkciu stability porastu.

2.4.4 Kumulatívna čistá súčasná hodnota (NPVC)

Kumulatívna čistá súčasná hodnota porastu (NPVC) reprezentuje hodnotu čistého výnosu s ťažby kumulovanú od začiatku obnovy až do jej ukončenia:

$$NPVC_t = CO + \frac{c_1}{1+r} + \frac{c_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{c_T}{(1+r)^T} \quad [4]$$

Kde CO= počiatočná investícia, C = cash flow (príjmy-výdavky), r= diskontná sadzba (0-3), T= čas obnovy.

Výnosy (R , vzorec 4) boli kalkulované cena (P) za jeden 1 m^3 v konkrétnej kvalitatívnej triede (I to VI), (CENNÍK LESY SR, 2016) krát objem v konkrétnej kvalitatívnej triede (V) (PETRÁŠ AND NOCIAR, 1991, 1990).

$$R = V_r P_I + V_{II} P_{II} + V_{III} P_{III} + V_{IV} P_{IV} + V_V P_V + V_{VI} P_{VI} + V_R P_R \quad [5]$$

Náklady (CR) boli kalkulované ako náklady na sústredovanie (CR_S) (91/1992-230, 1992), manipuláciu (CR_M), (615-OPaM/88, 1989) a ťažbu (CR_C) (23-2165/234/83-EP, 1992)

$$C = CR_S + CR_M + CR_C \quad [6]$$

2.4.5 Výpočet priemernej hodnoty vybraných indikátorov pre jednotlivé spôsoby obnovy

Minimálna veľkosť virtuálnej plochy porastu, na ktorej bolo možné vykonať všetkých 450 spôsobov obnovy porastu (tab. 1) je 16 hektárov. Tento porast bol výsledkom kombinácie 16 virtuálnych porastov s veľkosťou jedného hektára. Hodnota indikátorov plnenia funkcií lesa pre proces multikriteriálnej optimalizácie bola vypočítaná ako aritmetický priemer percentuálnych hodnôt ich plnenia. Výpočty hodnôt indikátorov plnenia funkcií lesa boli sa vzťahujú len pre materský porast. Z tohoto dôvodu sú hodnoty indikátorov v porastoch, kde došlo k vykonaniu ťažby rovné nule.

2.5 Metóda racionálnych cieľov a interaktívnych rozhodovacích máp (RGM/IDM) technika

Metóda racionálnych cieľov (RGM) je založená na prezentácii rozhodovacích alternatív v podobe bodov kritérií a na aproximáciu konvexného obalu. Lepšie povedané Edgeworth-Pareto obal (EPH) konvexného obalu je aproximovaný (LOTOV et al., 2004). EPH má rovnaké pareto hranice ako konvexný obal bodov, ale môže byť ľahšie vybudovaný a preskúmaný. Vzhľadom k tomu môže byť Pareto hranica vytvorená ako rozhodovacia mapa, v ktorej môže ten kto rozhoduje interaktívne analyzovať kompromisy medzi rôznymi kritériami a vybrať bod, ktorý je optimálny z pohľadu jeho preferencií (GARCIA-GONZALO et al., 2015) these ecosystems provide multiple products and services. Assessing trade-offs between multiple goals is thus critical for the effectiveness of oak ecosystem management planning. This paper focuses on the development of a decision support system for oak ecosystems' scenario analysis including multiple criteria. It includes an innovative decision support systems (DSS). V tejto štúdii boli maximalizované všetky indikátory, pričom bola pri výpočte použitá rovnaká váha indikátorov, ktoré boli kôli možnosti ich vzájomného

porovnania normované, t.j. ich plnenie bolo merané v relatívnej škále (0 až 100%). Technika RGM/IDM bola teda využitá na vytvorenie štvordimenzionálnej rozhodovacej mapy.

3. VÝSLEDKY

3.1 Maximalizácia súčtu hodnôt vybraných indikátorov

3.1.1 Mimoprodukčné funkcie

Najvýznamnejším faktorom ovplyvňujúcim plnenie mimoprodukčných funkcií lesa je dĺžka rubnej a obnovnej doby, zatiaľ čo hodnota diskontnej sadzby nemala vplyv na plnenie mimoprodukčných funkcií.

Maximálna hodnota diverzity porastu B bola dosiahnutá výberkovým rubom s dimenziou rubného typu 75 cm na ha s rubnou dobou 190 rokov a obnovnou dobou 130 rokov. Pri tomto spôsobe obnovy porastu dosiahol indikátor diverzity hodnotu 6,03, čo predstavuje 100% plnenie indikátora. V rámci stanoveného rozpätia 5 najbližších hodnôt od maxima, sa nachádzali spôsoby založené na výberkovom rube, ktorý predstavuje najvhodnejšie riešenie z pohľadu maximálneho plnenia diverzity. S predĺžovaním rubnej doby dochádza k poklesu diverzity (B), dĺžka obnovnej doby nemá výrazný vplyv na hodnotu diverzity.

Najvyššia hodnota indexu hustoty porastu rSDI (100%) bola dosiahnutá bezzásahovým spôsobom obhospodarovania s rubnou dobou 160 rokov, kedy index nadobudol hodnotu 0,87. Päť najbližších možných spôsobov obnovy, ktoré zaručujú najvyššie hodnoty indexu hustoty porastu je rovnako bezzásahový spôsob obhospodarovania. S nárastom dĺžky rubnej doby dochádza k nárastu hodnoty rSDI, dĺžka obnovnej doby sa neukázala ako významný faktor vplyvajúci na hodnotu rSDI.

Index stability dosahuje najvyššiu hodnotu pri použití spôsobu obhospodarovania ťažby podľa cieľovej hrúbky s rubnou dobou 160 a obnovnou dobou 40 rokov. V tomto prípade nadobúda index stability 100% s hodnotou 1,65. Najbližšie vhodné spôsoby obhospodarovania porastu pri zachovaní maximálnej hodnoty indexu stability sú tiež spôsoby založené na ťažbe podľa cieľovej hrúbky. Predĺženie rubnej doby spôsobilo nárast indikátora stability d/h,s narastajúcou dĺžkou obnovnej doby dochádza k poklesu stability.

3.1.2 Produkčné funkcie

Najvýznamnejším faktorom ktorý ovplyvňuje poskytovanie produkčnej funkcie lesa vyjadrenej výnosom z ťažieb (NPVC) za obdobie celej rubnej doby je hodnota diskontnej sadzby, významným spôsobom ju ovplyvňuje aj dĺžka rubnej doby a obnovná doba.

Pri diskontnej sadzbe 0% maximálnu hodnotu výnosu z ťažby 131 989 €, dosiahol spôsob obnovy ťažbou podľa cieľovej hrúbky s rubnou dobou 160 rokov a obnovnou dobou 40 rokov. Pri tejto hodnote diskontnej sadzby boli najvhodnejšie spôsoby obnovy porastu tie, pre ktoré je charakteristická dlhá rubná doba na úrovni 160 rokov, všetky možné varianty obnovnej doby od 10 do 60 rokov a individuálny výber stromov. So zvyšujúcou

sa dĺžkou rubnej doby pri 0% hodnote diskontnej sadzby dochádza k nárastu indikátora NPVC. Zmena dĺžky obnovnej doby pri tejto hodnote diskontnej sadzby nepredstavuje významnú zmenu v plnení tohto indikátora.

Pri diskontnej sadzbe 0,5% dosiahol maximálnu hodnotu výnosu z ťažby spôsob obnovy ťažbou podľa cieľovej hrúbky s rubnou dobou 160 rokov a obnovnou dobou 40 rokov, čo nepredstavuje zmenu oproti diskontnej sadzby 0%. Mení sa však výška výnosu z ťažby, ktorá nadobúda hodnotu 60 997 €. Pre spôsoby obnovy, ktoré dosiahli maximálny výnos z ťažby pri diskontnej sadzbe 0,5% je charakteristická dlhá rubná doba (140-160 rokov) a variabilná obnovná doba (20-60 rokov), pričom prvé tri spôsoby sú založené na individuálnom výbere stromov a ďalšie dva spôsoby sú založené na pásových clonných ruboch. Zvyšujúca sa hodnota rubnej doby sa prejavuje zvýšením indikátora NPVC, dĺžka obnovnej doby sa významným spôsobom neprejavuje na plnení tohto indikátora.

Pri diskontnej sadzbe 1% dosiahol najvyšší výnos z ťažby (30 592 €) spôsob obnovy okrajovým clonným rubom s rubnou dobou 130 rokov a obnovnou dobou 60 rokov. Spôsob obnovy maximalizujúce výnosy z ťažby pri diskontnej sadzbe 1% sú charakteristické stredne dlhou rubnou dobou (130 rokov) a obnovnou dobou od 40 do 60 rokov a sú všetky založené na pásových ruboch, dva z nich sú clonné ruby a tri sú pásové holoruby. So zvyšujúcou sa dĺžkou rubnej doby na hodnotu 130 rokov dochádza k nárastu indikátora NPVC, od hodnoty rubnej doby 130 rokov dochádza k poklesu indikátora. So zvyšujúcou sa dĺžkou obnovnej doby dochádza k miernemu nárastu výnosu z ťažby.

Najvyššia hodnota výnosu z ťažby (17 448 €) pri diskontnej sadzbe 1,5% bola dosiahnutá pri spôsobe obnovy okrajovým clonným rubom s rubnou dobou 100 rokov a obnovnou dobou 60 rokov. Pri tejto hodnote diskontnej sadzby sú spôsoby obnovy porastu dosahujúce maximálne hodnoty výnosov z ťažby charakteristické krátkou rubnou dobou (90-100 rokov) a dlhou obnovnou dobou (50-60 rokov) založené na pásových ruboch, tri sú clonné ruby a dva holoruby. Pri tejto hodnote diskontnej sadzby sa zvyšujúca hodnota rubnej doby prejavila miernym poklesom výnosu z ťažby NPVC, zvyšujúca sa dĺžka obnovnej doby sa prejavila miernym nárastom tohto indikátora.

Hodnota výnosu z ťažby pri diskontnej sadzbe 2% je maximálna (10 392 €) pri spôsobe obnovy maloplošným holorubom s rubnou dobou 90 rokov a obnovnou dobou 50 rokov. Pri hodnote diskontnej sadzby 2% je pre spôsoby obnovy maximalizujúce výnos z ťažby charakteristická krátka rubná doba 90 rokov a dlhá obnovná doba (50 až 60 rokov), a spôsoby sú podobné ako pri diskontnej sadzbe založené na pásových ruboch, pričom tri sú clonné a dva holoruby. So stúpajúcou dĺžkou rubnej doby dochádza k poklesu kumulatívnych výnosov z ťažby, na rozdiel od stúpajúcej dĺžky obnovnej doby kedy dochádza k poklesu výnosov z ťažby.

Pri hodnote diskontnej sadzby 2,5% dosiahol maximálnu hodnotu výnosu z ťažby (5 917 €) spôsob obnovy maloplošným holorubom s rubnou dobou 90 rokov a obnovnou dobou 50 rokov. Pre spôsoby obnovy maximalizujúce výnosy z ťažby pri hodnote diskontnej sadzby 2,5% je charakteristická krátka rubná doba 90 rokov a dlhá obnovná doba 50-60 rokov, pričom 4 spôsoby predstavujú pásové holoruby a jeden spôsob obnovy pásový clonný rub. So zvyšujúcou sa hodnotou rubnej doby dochádza k výraznému

poklesu výnosov z ťažby, zvyšujúca sa dĺžka obnovnej doby sa prejavuje zvýšením hodnoty tohto indikátora.

Najvyššia hodnota výnosu z ťažby (2 968 €) pri diskontnej sadzbe 3% bola dosiahnutá pri maloplošnom holorube s rubnou dobou 90 rokov a obnovnou dobou 60 rokov. Pri tejto diskontnej sadzbe dosahujú maximálne hodnoty výnosu spôsoby obnovy založené na holorube s krátkou rubnou dobou (90 rokov) a vysokou obnovnou dobou (50 – 60 rokov). Rastúca dĺžka rubnej doby sa pri tejto diskontnej sadzbe prejavila poklesom indikátora, s narastajúcou hodnotou obnovnej doby dochádza k nárastu výnosov.

3.1.3 Multikriteriálna optimalizácia

Optimálny spôsob obnovy porastu z hľadiska zosúladenia produkčných a mimoprodukčných funkcií lesa sa mení s hodnotou diskontnej sadzby. Pri diskontnej sadzbe 0% z pohľadu zosúladenia produkčných a mimoprodukčných funkcií lesa je optimálny bezzásahový spôsob obnovy porastu s rubnou dobou 160 rokov. Pri tomto spôsobe obnovy dosiahol indikátor diverzity porastu B hodnotu 4,7 (78%), indikátor stability 1,4 (87%), indikátor rSDI hodnotu 0,9 (100%) a indikátor charakterizujúci produkciu lesa NPVC dosiahol hodnotu 98 184 € na hektár, čo predstavuje 74% plnenie tohoto indikátora. Pre spôsoby obnovy porastu, pri ktorých dochádza k maximalizácii všetkých indikátorov súčasne pri diskontnej sadzbe 0%, je charakteristická dlhá rubná doba 160 rokov, a individuálna ťažba podľa cieľovej hrúbky a bezzásahový spôsob obnovy porastu.

Pri diskontnej sadzbe 0,5% nedošlo z pohľadu zabezpečenia všetkých funkcií lesa k zmene optimálneho riešenia oproti diskontnej sadzbe 0%. Optimálnym spôsobom je tiež bezzásahový spôsob obnovy porastu s rubnou dobou 160 rokov. Pri tejto hodnote diskontnej sadzby sú optimálne spôsoby obnovy charakteristické dlhou rubnou dobou 140-160 rokov a individuálnou ťažbou stromov podľa cieľovej hrúbky a bezzásahovým spôsobom obnovy.

Pri hodnote diskontnej sadzby 1% je optimálnym spôsobom obnovy porastu z pohľadu zabezpečenia všetkých funkcií lesa: ťažba podľa cieľovej hrúbky s rubnou dobou 90 rokov a obnovnou dobou 60 rokov. Pri tomto spôsobe obnovy dosiahol indikátor diverzity porastu B hodnotu 5,6, čo predstavuje 94%, indikátor stability porastu d/h dosiahol hodnotu 1,3 (77%), indikátor rSDI dosiahol hodnotu 0,6 (72%) a indikátor NPVC dosiahol hodnotu 27 648 € na hektár, čo predstavuje 90%. Pri hodnote diskontnej sadzby 1% sú z multikriteriálneho pohľadu optimálne spôsoby obnovy s rubnou dobou 90-140 rokov a obnovnou dobou 60 rokov, individuálnou ťažbou stromov podľa cieľovej hrúbky a bezzásahovým spôsobom obnovy porastu.

Pri hodnote diskontnej sadzby 1,5% a 2% nedochádza k zmene optimálneho spôsobu obnovy z multikriteriálneho hľadiska oproti diskontnej sadzbe 1% (ťažba podľa cieľovej hrúbky s rubnou dobou 90 rokov a obnovnou dobou 60 rokov). Pri hodnote diskontnej sadzby 1,5% sa optimálne spôsoby obnovy vyznačujú krátkou rubnou dobou 90-110 rokov a obnovnou dobou 20-60 rokov a individuálnou ťažbou stromov podľa cieľovej hrúbky. Pri hodnote diskontnej sadzby 2% je pre optimálne spôsoby obnovy

charakteristická krátka rubná doba 90 rokov a obnovná doba 20-60 rokov a individuálna ťažba stromov podľa cieľovej hrúbky.

Pri diskontnej sadzbe 2,5% je optimálnym spôsobom obnovy porastu z multikriteriálneho hľadiska ťažba podľa cieľovej hrúbky s rubnou dobou 90 rokov a obnovnou dobou 20 rokov. Pri tomto spôsobe obnovy dosiahol indikátor diverzity hodnotu 5,4 (90%), indikátor stability porastu dosiahol 1,3 (77%), indikátor rSDI 0,6 (73%) a indikátor produkcie porastu NPVC dosiahol 4 410 € na hektár (75%). Pri tejto hodnote diskontnej sadzby je pre optimálne spôsoby obnovy porastu charakteristická krátka rubná doba 90 rokov a obnovná doba v rozpätí od 20 do 60 rokov, individuálny spôsob ťažby podľa cieľovej hrúbky a bezzásahový spôsob obnovy porastu.

Pri diskontnej sadzbe 3% a viac nedochádza k zmene optimálneho riešenia oproti diskontnej sadzbe 2,5%. Pri tejto hodnote diskontnej sadzby sú optimálne spôsoby obnovy porastu charakteristické krátkou rubnou dobou 90 rokov, krátkou obnovnou dobou 20-30 rokov, individuálnou ťažbou stromov podľa cieľovej hrúbky, ďalej ťažbou podľa modelu výberkového lesa podľa Liocourta a bezzásahovým spôsobom obnovy porastu.

4. DISKUSIA

4.1 Mimoprodukčné funkcie lesa

Maximálna hodnota diverzity porastu vyjadrená indexom celkovej diverzity (B) podľa (JAEHNE AND DOHRENBUSCH, 1997) bola dosiahnutá pri spôsoboch obnovy založených na individuálnej ťažbe stromov, čo je v súlade s tvrdeniami PUKKALA et al., (2011) carbon, and bilberry benefits, all of which can be predicted with reasonable accuracy and quantified in terms of money. Management was optimized by maximizing the total net present value (NPV, podľa ktorých je štruktúrna diverzita spojená s rôznovekým lesom vznikajúcim pri individuálnej ťažbe stromov všeobecne spojená s posilnením druhej rozmanitosti a prístupnosti pre rôzne typy rastlín ako aj živočíchov. Udržiavanie konzistentného zápoja pri individuálnej ťažbe stromov tak prispieva aj k zvyšovaniu biodiverzity lesného ekosystému vo väzbe na vytvorenie vhodných prírodných podmienok (PORTER AND LABISKY, 1986). Individuálna ťažba stromov poskytuje vhodné podmienky pre rôzne druhy drevín a oproti holorubu tak dochádza k zachovaniu genetických zdrojov in situ (BONCINA, 2011).

Najvyššia hodnota indexu hustoty porastu ako indikátora regulačnej funkcie vo väzbe na vznik pôdnej erózie a retencie lesného ekosystému bola dosiahnutá pri jemných spôsoboch obhospodarovania porastu bez zásahu prípadne individuálnou ťažbou stromov. Pri klasických formách obnovy, ktoré sú typické pre les vekových tried, ktorým je holorub často krát dochádza k vzniku erózie z dôvodu neprítomnosti stromovej zložky ako stabilizačného prvku a retencia vody tak podľa DIACIHO (2006) nie je obmedzená porastom a môže vzniknúť nebezpečenstvo povodní v malých povodiach s vysokou mierou erózie. Táto skutočnosť je podľa MATTHEWA (1989) považovaná za významnú nevýhodu holorubu.

Najvyššia odolnosť lesného ekosystému voči veterným disturbanciam vyjadrením indexom d/h bola dosiahnutá pri individuálnej ťažbe stromov podľa cieľovej hrúbky, čo je spôsobené zlepšenou reakciou na rastový priestor a možnosťou vytvárania väčších korún (PRETZSCH, 2009), čo patrí medzi podľa REININGERA (1989) medzi významné výhody individuálnej ťažby stromov.

4.2 Produkčné funkcie lesa

Najvyššia hodnota výnosu z ťažby vyjadrená indikátorom NPVC bola významným spôsobom ovplyvňovaná hodnotou diskontnej sadzby, čo je v súlade s LEECHOM, (2014) podľa ktorého je spôsob obnovy silne závislý na hodnote diskontnej sadzby. Pri nízkej hodnote diskontnej sadzby bol dosiahnutý najvyšší výnos pri individuálnej ťažbe stromov podľa cieľovej hrúbky s dlhou rubnou dobou na úrovni 160 rokov, čo je v súlade s tvrdeniami PALMERA (1994) podľa ktorého je ťažba podľa cieľovej hrúbky z ekonomického hľadiska lepšia ako selektívna ťažba. Príčinou je podľa LÄHDEHO et al.(2010) stabilný objemový prírastok z dôvodu zvýšeného rastového priestoru oproti typickým spôsobom obnovy v lese vekových tried. Pri individuálnej ťažbe stromov s dlhou rubnou dobou boli v ťažbovom procese odstraňované len hrubé sortimenty, ktoré dosahujú vysoké zhodnotenie. Oproti spôsobom obnovy typických pre les vekových tried sa ťaží mala časť stromov malého priemeru (SCHÜTZ, 2001). So zvyšujúcou sa hodnotou diskontnej sadzby dochádzalo k uprednostňovaniu spôsobov obnovy typických pre les vekových tried, ktorými sú pásové clonné ruby. Pri najvyššej hodnote diskontnej sadzby 3% bol dosiahnutý najvyšší výnos z ťažby holorubom s krátkou rubnou dobou 90 rokov. Ani zvýšený objemový prírastok pri individuálnej ťažbe stromov nedokázal nahradiť peňažnú stratu pri tak vysokej hodnote diskontnej sadzby. S narastajúcou hodnotou diskontnej sadzby tak dochádza k poklesu výkonnosti spôsobov obnovy typických pre rôznoveké lesy, čo je v súlade s výskumom (ANDREASSEN AND ØYEN, 2002; LEXERØD AND GOBAKKEN, 2008). Podľa Tahvonena, (2009), tak zmena diskontnej sadzby môže spôsobiť posun od lesa vekových tried k rôznovekým lesom.

4.3 Multikriteriálne riešenie

Maximalizácia vybraných indikátorov predpokladá, že les je riadený zo zameraním na jeden cieľ, ktorým je predovšetkým rentabilita kapitálovej investície do zalesnenia pôdy. Avšak v súčasnej dobe je potrebné zabezpečiť obhospodarovanie lesa s cieľom plnenia širokého spektra funkcií (GADOW et al., 2007). Mapa prípustných riešení zobrazuje všetky prípustné riešenia, ktoré je možné dosiahnuť pri maximalizácii všetkých indikátorov na základe preddefinovanej preferencie.

V našom prípade multikriteriálne plánovanie obnovy bolo realizované tým, že maximalizuje úžitkovú funkciu rovnakými váhami pre NPVC, diverzitu, stabilitu a hustotu porastu. Rozdiely medzi optimálnymi spôsobmi obnovy boli menšie pri multikriteriálnej optimalizácii ako pri maximalizácii jedného cieľa podobne ako v práci PUKKALU (2016).

5. ZÁVER

Výsledky práce týkajúce sa hodnotenia použitých spôsobov obnovy v nepôvodnom poraste strednej Európy sú v súlade so zdravým rozumom a očakávaniami. Pri maximalizácii vybraných indikátorov charakterizujúcich plnenie mimoprodukčných funkcií sa ako najvhodnejšie ukázali spôsoby obnovy založené na individuálnej ťažbe stromov, čo je v súlade s viacerými autormi (MIINA et al., 2009; PUKKALA, 2016), ktorí tvrdia že spôsoby obnovy typické pre podrastový hospodársky spôsob sú v plnení mimoprodukčných funkcií účinnejšie ako holoruby.

Z pohľadu produkcie vyjadrenej výnosom z ťažby sa ukázal výrazný vplyv hodnoty diskontnej sadzby na plnenie tejto funkcie a s nárastom hodnoty diskontnej sadzby dochádza k znižovaniu rubnej doby a preferencii holorubov pred individuálnou ťažbou stromov. Pre potreby multikriteriálneho zosúladenia funkcií lesa bola vytvorená rozhodovacia mapa prípustných riešení, v ktorej je možné vykonať výber optimálneho riešenia na základe požadovaných preferencií. V procese multikriteriálnej optimalizácie s využitím IDM/FGM techniky boli indikátory maximalizované rovnakou váhou.

Rozdiely medzi optimálnymi spôsobmi obnovy z pohľadu zosúladenia všetkých funkcií rovnakou váhou boli menšie ako pri maximalizácii jedného cieľa reprezentovaného vybraným indikátorom.

6. ZOZNAM LITERATÚRY

- 23-2165/234/83-EP, N., 1992. Collection n. 21 - Performance standards for timber cutting. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- 615-OPaM/88, N., 1989. Collection n. 27 – Performance standards for work on the timber yard. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- 91/1992-230, N., 1992. Collection n. 24 – Performance standards for timber skidding by universal, crawler and special wheeled tractor. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- ANANDA, J., HERATH, G., 2009. A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning. *Ecol. Econ.* 68, 2535–2548. doi:10.1016/j.ecolecon.2009.05.010
- ANDREASSEN, K., ØYEN, B.H., 2002. Economic consequences of three silvicultural methods in unevenaged mature coastal spruce forests of central Norway. *Forestry* 75, 483–488. doi:10.1093/forestry/75.4.483
- BARREIRO, S., RUA, J., TOMÉ, M., 2016. StandsSIM-MD: A management driven forest SIMulator. *For. Syst.* 25. doi:10.5424/fs/2016252-08916
- BONCINA, A., 2011. History, current status and future prospects of uneven-aged forest management in the Dinaric region: An overview. *Forestry* 84, 467–478. doi:10.1093/forestry/cpr023
- BOŠEĽA, M., PETRÁŠ, R., ŠEBEŇ, V., MECKO, J., MARUŠÁK, R., 2013. Evaluating competitive interactions between trees in mixed forests in the Western Carpathians: Comparison between long-term experiments and SIBYLA simulations. *For. Ecol. Manage.* 310, 577–588. doi:10.1016/j.foreco.2013.09.005
- BRUKAS, V., JELLESMARK THORSEN, B., HELLES, F., TARP, P., 2001. Discount rate and harvest policy: Implications for Baltic forestry. *For. Policy Econ.* 2, 143–156. doi:10.1016/S1389-9341(01)00050-8
- CREUTZBURG, M.K., SCHELLER, R.M., LUCASH, M.S., LEDUC, S.D., JOHNSON, M.G., 2016. Forest management scenarios in a changing climate: tradeoffs between carbon, timber, and old forest. *Ecol. Appl.* doi:10.1002/eap.1460
- DIACI, J., 2006. NATURE-BASED FORESTRY IN CENTRAL EUROPE.
- FABRIKA, M., 2005. Simulátor biodynamiky lesa SIBYLA, koncepcia, konštrukcia a programové riešenie. Technická univerzita vo Zvolene.

- FABRIKA, M., ĎURSÝ, J., 2005. Stromové rastové simulátory. EFRA – Vedecká agentúra pre ekológiu a lesníctvo, Zvolen.
- FABRIKA, M., PRETZSCH, H., 2011. Analýza a modelovanie lesných ekosystémov. Technická univerzita vo Zvolene.
- GADOW, K., KURTILA, M., LESKINEN, P., LESKINEN, L., NUUTINEN, T., PUKKALA, T., 2007. Designing forested landscapes to provide multiple services. *CAB Rev. Agric. Vet. Sci. Nutr. Nat. Resour.* 2007, 1–15. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- GARCIA-GONZALO, J., BUSHENKOV, V., MCDILL, M.E., 2015. A Decision Support System for Assessing Trade-Offs between Ecosystem Management Goals: An Application in Portugal 65–87. doi:10.3390/f6010065
- GARCIA-GONZALO, J., BUSHENKOV, V., MCDILL, M.E., BORGES, J.G., 2015. A decision support system for assessing trade-offs between ecosystem management goals: An application in portugal. *Forests* 6, 65–87. doi:10.3390/f6010065
- GRILLI, G., JONKISZ, J., CIOLLI, M., LESINSKI, J., 2016. Mixed forests and ecosystem services: Investigating stakeholders' perceptions in a case study in the Polish Carpathians. *For. Policy Econ.* 66, 11–17. doi:10.1016/j.forpol.2016.02.003
- GRITTEN, D., MOLA-YUDEGO, B., DELGADO-MATAS, C., KORTELAINE, J., 2013. A quantitative review of the representation of forest conflicts across the world: Resource periphery and emerging patterns. *For. Policy Econ.* 33, 11–20. doi:10.1016/j.forpol.2012.06.008
- HAHN, W.A., HÄRTL, F., IRLAND, L.C., KOHLER, C., MOSHAMMER, R., KNOKE, T., 2014. Financially optimized management planning under risk aversion results in even-flow sustained timber yield. *For. Policy Econ.* 42, 30–41. doi:10.1016/j.forpol.2014.02.002
- HALAJ, J., 1987. Rastové tabuľky hlavných drevín CSSR. *Príroda*.
- HOREMANS, J.A., BOSELA, M., DOBOR, L., BARNA, M., BAHYL, J., DECKMYN, G., FABRIKA, M., SEDMAK, R., CEULEMANS, R., 2016. Variance decomposition of predictions of stem biomass increment for European beech: Contribution of selected sources of uncertainty. *For. Ecol. Manage.* 361, 46–55. doi:10.1016/j.foreco.2015.10.048
- JAEHNE, S., DOHRENBUSCH, A., 1997. A method to evaluate forest stand diversity. *Forstwiss. Cent.* 333–345.
- LÄHDE, E., LAIHO, O., LIN, C.J., 2010. Silvicultural alternatives in an uneven-sized forest dominated by *Picea abies*. *J. For. Res.* 15, 14–20. doi:10.1007/s10310-009-0154-4
- LEECH, J., 2014. Rotation length and discount rates. *Aust. For.* 77, 114–122. doi:10.1080/00049158.2014.945110
- LEXERØD, N., GOBAKKEN, T., 2008. Economic efficiency of selective cutting under different timber price scenarios. In *Planning, management and economy of selective cutting in Norway*, ed. N. Lexerød (PhD thesis). As: Norwegian University of life sciences.
- LOTOV, A., BUSHENKOV, V., KAMENEV, G., 2004. Interactive decision maps: Approximation and visualization of Pareto frontier. Kluwer Academic Publishers.
- MATTHEW, J.D., 1989. *Silvicultural systems*, Reprinted. ed. Oxford University Press, New York.
- MIINA, J., HOTANEN, J.P., SALO, K., 2009. Modelling the abundance and temporal variation in the production of bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) in Finnish mineral soil forests. *Silva Fenn.* 43, 577–593. doi:10.14214/sf.181
- NOTARO, S., PALETTO, A., 2011. Links between mountain communities and environmental services in the Italian Alps. *Sociol. Rural* 51, 137–157.
- NYLAND, R.D., 2002. *Silviculture*, second ed. ed. Waveland Press Inc., Long Grove, Illinois.
- PALMER, S., 1994. Von der Auslesedurchforstung zur Zieldurchmesser-Ernte bei Buche, AFZ. *Allgemeine Forst Zeitschrift*.
- PAN, Y., BIRDSEY, R.A., FANG, J., HOUGHTON, R., KAUPPI, P.E., KURZ, W.A., PHILLIPS, O.L., SHVIDENKO, A., LEWIS, S.L., CANADELL, J.G., CIAIS, P., JACKSON, R.B., PACALA, S.W., MCGUIRE, A.D., PIAO, S., RAUTAINEN, A., SITCH, S., HAYES, D., 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333, 988–93. doi:10.1126/science.1201609
- PETRÁŠ, R., NOCIAR, V., 1991. Nové sortimentačné tabuľky hlavných ihličnatých drevín. *Lesn. časopis* 37, 377–392.
- PETRÁŠ, R., NOCIAR, V., 1990. Nové sortimentačné tabuľky hlavných listnatých drevín. *Lesn. časopis* 36, 535–552.
- PORTER, M.L., LABISKY, R.L., 1986. Home range and foraging habitat of red-cockaded woodpeckers in northern Florida. *J. Wildl. Manag.* 50, 239–247.

- PRETZSCH, H., 2009. Forest dynamics, growth, and yield, in: Forest Dynamics, Growth and Yield. Springer, pp. 1–39.
- PSL, 2013. Program starostlivosti o les.
- PUETMANN, K.J., COATES, K.D., MESSIER, C., 2009. A critique of silviculture. Managing for complexity. Island Press.
- PUKKALA, T., 2016. Which type of forest management provides most ecosystem services? For. Ecosyst. 3, 9. doi:10.1186/s40663-016-0068-5
- PUKKALA, T., LÄHDE, E., LAIHO, O., SALO, K., HOTANEN, J.-P., 2011. A multifunctional comparison of even-aged and uneven-aged forest management in a boreal region. Can. J. For. Res. 41, 851–862. doi:10.1139/x11-009
- REINEKE, L.H., 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests.
- REININGER, H., 1989. Zielstärken-Nutzung oder die Plenterung des Altersklassenwaldes. Wien : Österreichischer Agrarverlag.
- ROSSER, J.B., 2013. Special problems of forests as ecologic-economic systems. For. Policy Econ. 35, 31–38. doi:10.1016/j.forpol.2013.06.005
- SAARIKOSKI, H., TIKKANEN, J., LESKINEN, L.A., 2010. Public participation in practice - Assessing public participation in the preparation of regional forest programs in Northern Finland. For. Policy Econ. 12, 349–356. doi:10.1016/j.forpol.2010.02.006
- SCHÜTZ, J.P., 2001. Der Plenterwald und weitere Formen strukturierter und gemischter Wälder. Parey, Berlin, Germany.
- Slovakia, S.F. of, 2016. State Forests of Slovakia [WWW Document].
- SMITH, D.M., LARSON, B.C., KELTY, M.J., ASHTON, P.M.S., 1997. The Practice of Silviculture: Applied Forest Ecology. JohnWiley and Sons: New York, NY, USA.
- SMITH, H.C., DEBALD, P.S., 1978. Economics of even-aged and uneven-aged silviculture and management in eastern hardwoods., in: Uneven-Aged Silviculture and Management in the United States. pp. 125–141.
- TAHVONEN, O., 2009. Optimal choice between even- and uneven-aged forestry. Nat. Resour. Model. 22, 289–321. doi:10.1111/j.1939-7445.2008.00037.x

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-15-0714, APVV 15-0265, APVV 0069-12.

Adresa autorov:

Ing. Jozef Výboštok
 Ing. Ján Bahýľ, PhD.
 doc. Ing. Ján Merganič, PhD.
 Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie
 Lesnícka fakulta
 Technická univerzita vo Zvolene
 T. G. Masaryka 24
 960 53 Zvolen
 Slovenská republika
 email: jozef.vybostok@tuzvo.sk
 email: jan.bahyl@tuzvo.sk
 email: merganic@tuzvo.sk

Discount rate as a factor influencing fulfilment of forest functions

SUMMARY

Nowadays, the preference of non-production functions of forest ecosystems is the global trend in forest management. Multifunction forest management presents the problem of consensus between all participated parties (e.g. forest owners, forest managers, forest protectors, political parties or state).

The determinant factor influencing forest functions is the harvest-regeneration methods of forest management. Several studies demonstrate a significant impact of the discount rate on the selection of appropriate regeneration method. The aim of presented article is to assess the impact of the discount rate on the fulfilment of various production and non-production functions. The study area is a representative of non-native mixed forest stand in Slovakia and Central Europe. The specific forms and variants of harvest-regeneration methods considering in this study are shown in tab. 1. Growth and development of studied forest stand was simulated in growth simulator Sibyla. Based on the literature research, the four indicators were chosen for the multi-criteria optimisation of forest regeneration method. Selected indicators describe the production and non-production function of forest, these are following: diversity, stability, stand density and cumulative net present value of forest stand.

The most important factor affecting the fulfilment of non-production functions was the length of rotation and regeneration period, whereas the value of discount rate did not influence significantly the fulfilment of these functions. On the other hand, the most important factor influencing fulfilment of production function is the value of discount rate, but rotation and regeneration period also significantly affect the fulfilment of the production function. The maximisation of non-production indicators confirmed as more appropriate harvest-regeneration methods based on individual cutting. The production of forest expressed by revenues from cutting is influenced by a discount rate as follows: with increasing value of discount rate, the length of rotation period decreases, and there is a preference of clear cutting harvest-regeneration method. The differences between optimal harvest-regeneration methods in multicriteria optimisation were smaller comparing with maximisation of one objective represented by selected indicator.