

## VYUŽITÍ DAT LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ PRO ZJIŠŤOVÁNÍ ZÁKLADNÍCH TAXAČNÍCH PARAMETRŮ LESNÍCH POROSTŮ

Stanislav CARBOL<sup>1</sup>, Martin KLIMÁNEK<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Ústav hospodářské úpravy lesa a aplikované geoinformatiky, Lesnická a Dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 3, 613 00 Brno, Česká Republika

*xcarbol@node.mendelu.cz; martin.klimanek@mendelu.cz*

### Abstrakt

Práce se zabývá zpracováním a využitím dat leteckého laserového skenování (LLS) pořízených mimo vegetační sezónu. Hlavním cílem práce bylo zjišťování průměru a mediánu výšek jak pro všechny stromy v porostu, tak i pouze pro stromy nacházející se v hlavní stromové úrovni. Vedlejšími cílem bylo odvozování výčetních tloušťek na základě zjištěných výšek, a také určení počtu stromů v porostech pomocí detekce korun a vrcholů. Pro účely výpočtů byl v prostředí programu ArcGIS 10.2 vytvořen modifikovaný výpočetní model zčásti využívající principů metody „segmentace inverzních povodí“, pracující s digitálními modely terénu (DMT) a povrchu (DMP). Klasifikace dat prvního a posledního odrazu laserového pulsu byla získána v programu Microstation s nadstavbou TerraScan. Pro další použití byla tato data následně převedena do podoby tzv. multipontů. Přesné ověření zjištěných výsledků bylo provedeno prostřednictvím 11 geodeticky zaměřených kruhových ploch, na kterých bylo provedeno detailní změření parametrů všech stromů. Výsledné výšky (průměr a medián) získané modelem za užití celkem 8 variant jeho nastavení, byly porovnávány pomocí regresní analýzy se všemi údaji zjištěnými na zkusných plochách. Bylo tak zjišťováno, které nastavení modelu nejvíce koreluje s hodnotami jednotlivých typů zjištěných výšek, ale i výčetních tloušťek. Obdobným způsobem bylo porovnáno množství detekovaných korun a vrcholů s počtem změřených stromů na plochách. Tento postup byl proveden jak pro skupinu všech zkusných porostů zároveň, tak pro skupinu 7 listnatých a 4 jehličnatých porostů. Při použití získaných optimálních regresních vztahů bylo dosaženo velmi dobrých výsledků s průměrnou chybou střední hodnoty do 5% především pro odvozování výšek horní úrovně porostů, 4-12% pro odvozování průměrných výšek na základě výšek všech jedinců v porostu, a 4-20% pro odvozování výčetních tloušťek.

### Abstract

The work deals with the processing and use of data from an airborne laser scanning (ALS) taken out of the growing season. The main objective of this work was to estimate mean and median heights for all the trees in the stand, and also only for the trees located in the main canopy level. The secondary objectives were to derive breast-height diameters based on identified heights, and also determine the number of trees in stands by detecting their tops and crowns. For the purposes of the calculations a modified computational model was created in ArcGIS 10.2 software, partly using the principles of the method "segmentation of inverse basins", working with digital terrain models (DTM) and digital surface models (DSM). Classification of the first and last laser pulse returns was obtained in Microstation software with using Terrascan extension. For subsequent utilization, this data was converted into so-called multipoints. Accurate verification of the obtained results was carried out through 11 geodetically oriented circular surfaces, where detailed measurement of all parameters of all the trees was carried out. The final heights (mean and median), derived by using the model with a total of 8 variants of its settings, were compared with the data found on the circular plots using regression analysis. After that was investigated which settings of the model is the most correlating with the values of each type of detected heights, but also with breast-height diameters. In a similar manner were compared numbers of detected crowns and tops with a number of trees measured on plots. This procedure was performed for the group of all researched plots and also for a group of 7 deciduous and 4 coniferous forest plots. When using the obtained optimal regression relationships, very good results with a standard error of the mean value up to 5% especially for deriving heights at upper stands level, 4-12% for deriving the

average heights based on the heights of all individuals in the stand, and 4-20% for deriving breast-height diameters were achieved.

**Klíčová slova:** taxace; výška lesních porostů; výčetní tloušťka; detekce vrcholů; vylišení korun; letecké laserové skenování; LIDAR; digitální model terénu; digitální model povrchu; multipointy; lesní hospodářské plánování

**Keywords:** forest inventory; forest heights; diameters at breast-height; tree tops detection; crowns detection; airborne laser scanning; LIDAR; digital terrain model; digital surface model; multipoints; forest management planning

## 1. ÚVOD

Letecké laserové skenování, které je jednou z variant využití technologie LiDAR, je považováno za moderní metodu hromadného sběru dat – polohopisných a výškopisných, které díky povaze technologie a vysoké hustotě bodů umožňují např. získávání informací o terénu (na rozdíl od fotogrammetrie i v lesních porostech), tak i o objektech které se na něm nacházejí (např. vegetace, stavby). Jednou z nejdůležitějších aplikací LLS je tvorba digitálních modelů terénu (DMT) a digitálních modelů povrchu (DMP). LLS také přineslo nový pohled na data získávaná z prostředí lesních porostů, resp. ekosystémů. Interakce laserových pulsů a lesního porostu je charakterizována odrazem od zápoje porostu (první odraz), průchodností skrz tento zápoj (druhý a následující odrazy) až po dosažení terénu (poslední odraz).

Data transformovaná do podoby DMT a DMP mohou být v lesnictví využita pro tvorbu takzvaných CHM (Canopy Height Models), což jsou digitální modely reprezentující výšky např. na úrovni vylišitelných porostních skupin. Zjednodušeně řečeno je CHM v podstatě získáván jako rozdíl výšek mezi prvním odrazem laserového pulsu a výškou digitálního modelu terénu. Většina autorů uvádí podhodnocení výšek porostů získaných z dat LLS o 0,2 – 5m (Næsset a Økland, 2002; Coops *et al* 2007; Heurich 2008). V jednotlivých porostech mohou být tímto způsobem získány údaje především o jejich výšce. Data o vyšší hustotě bodů (cca již od 3-4 bodů na m<sup>2</sup>) dovolují detekci a modelování jednotlivých stromů (např. Solberg, Næsset, Bollandsas 2006; Heurich a Weinacker, 2004). Modelování jednotlivých stromů na základě primárního vytvoření CHM provedli (Pitkänen, Maltamo, Hyyppä, Yu 2004). Pro toto modelování bylo použito i kombinace dat LLS s multispektrálními daty (Watt *et al.* 2004; Mei a Durrieu, 2004). Byly již také vytvořeny a testovány polo-automatické (např. Breidenbach *et al.*, 2010) a automatické přístupy (Heurich 2008) v rozpoznávání a měření jednotlivých stromů.

Získané parametry a informace z dat LLS lze dále užít pro zjišťování výčetních tlouštěk stromů (přesnost 2 - 8 cm) a k výpočtům objemu hroubí (přesnost 5-40%) (Hollaus *et al.* 2012; Salas *et al.*, 2010), a současně ke klasifikaci dřevin (Yao, Krzystek, Heurich 2012). Pro zjištění parametrů tlouštěk a objemu bylo taktéž využito kombinaci s multispektrálními snímky (Tonolli *et al.* 2010; Shataee, Weinaker, Babanejad 2011) nebo infračervenými digitálními snímky (Persson, Holmgren, Söderman, Olsson, 2004). Všechny informace získané a odvozené z dat LLS byly již použity pro komplexní inventarizaci lesa (Wack *et al.* 2003; Holmgren a Jonsson 2004; Yu *et al.* 2006; Andersen a Breidenbach 2007; Korpela *et al.* 2007), včetně zjišťování i odhadu množství celkové biomasy porostu (Gobbakken *et al.* 2012; Straub, Koch 2011; Zhao, Popescu, Nelson 2008).

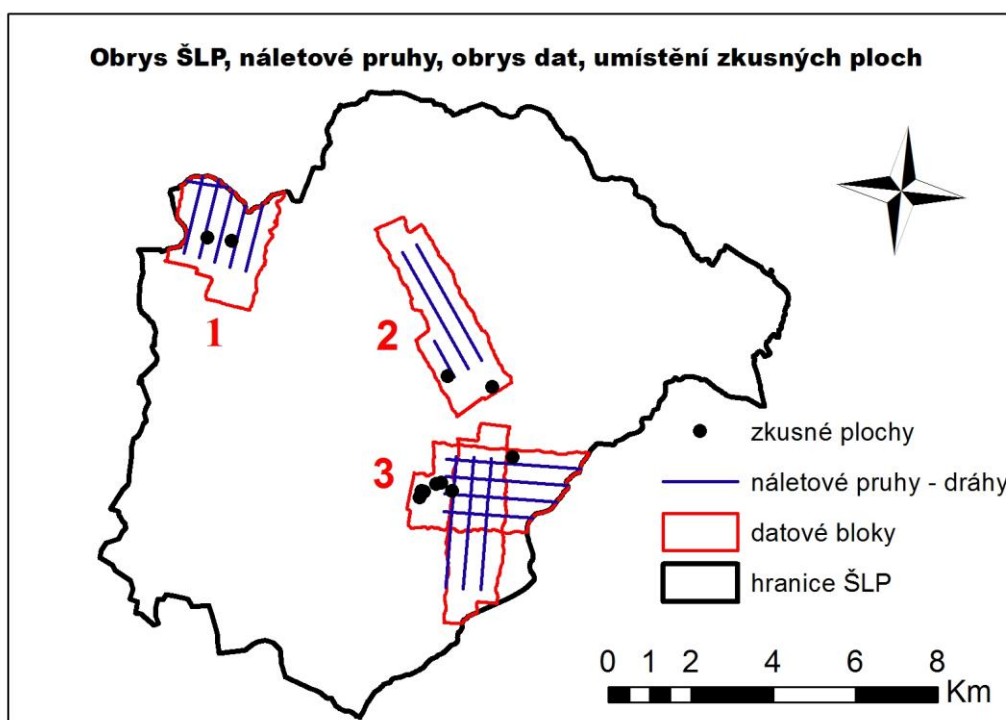
Ačkoliv byly inventarizační šetření pomocí LLS provedeny ve Finsku již v roce 1999, přesto je v lesnictví (a především na území střední Evropy) tato technologie považována stále za novou a perspektivní pro získávání taxačních dat. V některých případech může podpořit nebo zcela nahradit konvenční metody a techniky získávání dat. Díky 3D povaze dat má LLS mnohem větší potenciál než snímky získané leteckým snímkováním nebo družicí (Maas 2010). Nejnovějším přístupem při zkoumání stromových a porostních charakteristik je využití informace z odrazů celého průběhu vlny (tzv. full-waveform), tedy nejen z diskretních odrazů a jejich intenzity (Heinzel a Koch, 2011). Tento přístup nabízí možnost digitalizace průběhu celé křivky odrazu, která vytváří profil intenzity celého odraženého - navraceného pulsu. V lesnických aplikacích tyto křivky poskytují informaci o 3D struktuře zápoje. Jelikož data z celého průběhu vlny nejsou ještě běžně dostupná, bylo cílem práce vytvořit a zkalibrovat novou kombinaci a modifikaci již známých metod CHM

pracujících na základě principů tvorby DMT a DMP, a zhodnotit přesnost výpočtů výšek a počtu jedinců (a následně odvodit výčetní tloušťky) na ploše, na základě porovnání s LHP a především s daty terénního měření. Hlavním cílem bylo dosáhnout optimálních regresních vztahů funkčních pro zpětný výpočet výšek a následně výčetních tloušťek celých porostních skupin v podmínkách území Školního lesního podniku Masarykova lesa Křtiny Mendelovy univerzity v Brně (dále jen „ŠLP“). Účelem navržené metody nebylo zjištění co nejpřesnějšího počtu korun a vrcholů, ale především zjištění nastavení, ve kterém bude dosaženo nejtěsnějšího vztahu zjištěných výšek a výčetních tloušťek, nehledě na počet výsledných detekovaných stromů. Nicméně výsledky detekce byly taktéž zaznamenávány a porovnávány s počtem stromů v LHP a dle terénního měření.

## 2. MATERIÁL A METODIKA

### 2.1. Dostupná data LLS a jejich zpracování

Pro účely práce byla získána data LLS pořízená 6.3. – 18.4.2013 laserem RIEGL Q680i z letové výšky 700 m při rychlosti 100 km/h, s průměrnou hustotou 4,14 bodu / m<sup>2</sup>, při šířce záběru 50° a s frekvencí opakování pulsu 250 kHz. Neoklasifikovaná data ve formátu „.las“ byla dodána v podobě náletových pruhů o celkové velikosti dat 87,8 GB. Délka náletů je proměnlivá mezi 1,5 - 4 km, šířka je 700 - 900 m dle terénních podmínek. Jedná se o data původně určená k jiným než lesnickým účelům (hledání zaniklých stezek a cest), pořízená roztroušeně v územích mezi Brnem a Mohelnicí na Moravě. V době přípravy této studie se jednalo o nejaktuálnější dosažitelná data použitelná na území ŠLP Křtiny. Z celkového počtu 100 náletových pruhů se 14 pruhů plně nebo částečně nachází na území ŠLP. Pět svojí celou rozlohou a dalších devět pruhů zasahuje do území 50 - 70% své rozlohy. Zmíněných 14 náletových pruhů lze v rámci ŠLP rozdělit do tří celistvých datových bloků. Průměrná vzdálenost bodů v bodovém mračku před klasifikací je 0,293 - 0,347 m. Celková rozloha dat využitelných na území ŠLP je 2140,7 ha.



**Obr. 1.** Hranice datových bloků, dráhy náletových pruhů a umístění zkusných ploch v rámci ŠLP (zdroj: práce autorů)

Příprava dat spočívala především v klasifikaci prvního a posledního odrazu laserového pulsu dle echa (odezvy). Pro tyto účely byl použit software Microstation V8i firmy TerraSolid s nadstavbou „TerraScan“. Pomocí nástroje „MacroModel“ umožňujícího stanovit automatizovaný postup byla postupně stanovena následující procedura klasifikace tzv. surových dat v tomto pořadí: rozdělení dat do přednastavených tříd, odstranění „air“, „isolated“ a „low“ points, klasifikace posledních odrazů pomocí „ground“ a klasifikace pomocí

volby „any first“. Pomocí nástrojů (např. „create LAS dataset“) dostupných v ArcGIS 10.2. bylo ověřeno, že jsou data klasifikována korektně a jednotlivé klasifikace dat náletových pruhů lze propojit do homogenních celků bez vzniku švů mezi daty náletových pruhů. Po kontrole správnosti spojení byla data převedena nástrojem „LAS to multipoint“ do tří bloků (viz. Obr. 1.), vždy zvlášť pro data posledních odrazů, i pro data prvních odrazů. Rozestup bodů byl zvolen 0,5 m s ohledem na průměrný rozestup bodů po klasifikaci terénu a povrchu. Kontrolu dat lze provést opět převedením do rastrového formátu dat pomocí některé z interpolačních technik, např. Inverse Distance Weighting (IDW).

## 2.2. Příprava dat z LHP a terénního měření

K získání „referenčních“ dat o lesních porostech bylo nutné nalézt lokality, které poskytují požadovanou heterogenitu parametrů porostů v rámci ŠLP. Bylo založeno celkem 11 kruhových zkusných ploch proměnlivého průměru v 9 porostech na 4 lokalitách vzdálených od sebe cca 2 – 8 km. Plochy 1-6 (3. blok) severně od obce Kanice, plocha 7 (3. blok) západně od obce Březina, plocha 8 a 11 (2. blok) u obce Babice nad Svitavou, plochy 9 a 10 (1. blok) severně od obce Vranov. Minimální rozloha kruhové zkusné plochy pro analýzu všech stromových jedinců byla stanovena na 1000 m<sup>2</sup> s poloměrem  $r = 17,84$  m, přičemž se tato plocha zvětšovala o 100 m<sup>2</sup> dle potřeby tak, aby bylo vždy nalezeno minimálně 60 jedinců s výčetní tloušťkou větší než 7 cm. Podmínkou bylo, aby krajní stromy zasahovaly do poloměru plochy alespoň svým vnitřním okrajem. Následně byly plochy pro potřeby výpočtu v modelu rozšířeny o buffer 1 m, tak aby do zkoumané plochy zasahovaly kmeny v celé výčetní tloušťce. Převažujícími listnatými dřevinami v hlavní stromové úrovni na zkusných plochách jsou dub zimní (*Quercus petraea*), buk lesní (*Fagus sylvatica*), habr obecný (*Carpinus betulus*) a vzácněji se vyskytující javor mléč (*Acer platanoides*) a lípa malolistá (*Tilia cordata*) jako nejčastější podrostní dřeviny. Z jehličnanů se nejčastěji vyskytuje modřín opadavý (*Larix decidua*) v nadúrovni, borovice lesní (*Pinus sylvestris*) a smrk ztepilý (*Picea abies*) v hlavní úrovni.

Tab. 1. Základní údaje porostů, ve kterých jsou situovány výzkumné plochy

Pořadí výzkumu/ IDTOPOL dle LHP	Oddělení	Díllec	Porost/skupina	Výměra porostu (ha)	Datový blok (viz. kap. 2.1)	Číslo zkusné plochy	výměra kruhových zkusných ploch	věková třída porostu LHP	zakmenění LHP	smíšení (listnaté / jehličnaté) %
1. / 15021	334	D	a/6	7,79	3.	1 ; 2	á 1000 m <sup>2</sup>	7	0,9	90 / 10
2. / 14893	334	F	a/10	6,09	3.	3 ; 4	á 1300 m <sup>2</sup>	11	0,9	78 / 22
3. / 14741	335	B	a/7	4,56	3.	5	1100 m <sup>2</sup>	7	0,9	63 / 37
4. / 13797	336	B	a/8	1,67	3.	6	1000 m <sup>2</sup>	8	1	23 / 77
5. / 14930	340	A	a/10a	6,49	3.	7	3300 m <sup>2</sup>	10	0,8	92 / 8
6. / 15147	313	C	a/9	12,02	2.	8	1400 m <sup>2</sup>	10	0,7	47 / 53
7. / 14736	9	A	a/9	4,66	1.	9	1500 m <sup>2</sup>	10	1	70 / 30
8. / 12935	3	B	a/5	1,04	1.	10	1000 m <sup>2</sup>	5	0,9	6 / 94
9. / 14780	310	B	a / 13	4,98	2.	11	2000 m <sup>2</sup>	13	0,8	97 / 3

V porostech určených k založení zkusných ploch byla dotazována data LHP – vážený průměr výšek a výčetních tloušťek na základě průměrných hodnot a zastoupení každé dřeviny, a také hektarové počty jednotlivých dřevin. Na kruhových zkusných plochách byly zjištěny a analyzovány průměry a mediány výšek a výčetních tloušťek pro všechny stromy v porostu, ale také pouze pro stromy nacházející se svojí výškou v horní úrovni porostu. Jako horní úroveň porostu byly stanoveny všechny stromy s výškou vyšší než hodnota mediánu výšek všech stromů na ploše. U porostů s významným podílem podrostních dřevin tak došlo k jednoznačnému rozlišení hlavní stromové úrovně a podúrovně. Pro kruhové zkusné plochy byly vytvořeny vektorové shapefile s dodržением přesného poloměru rozšířeného o buffer = 1 m. V tabulce

(viz. níže) je uvedena ukázka zpracování výšek a výčetních tloušťek, se kterými byly porovnávány výsledky získané výpočetním modelem.

**Tab. 2.** Ukázka (část) zpracování přehledu výšek a výčetních tloušťek (DBH) porostů na kruhových zkušných plochách, hodnoty LHP pro celý porost v němž je plocha umístěna

č. zkusné plochy / (počet jedinců na ploše) / Listn. (L); Jehl. (J)	LHP	výšky (výčetní tloušťky) - terénní měření na kruhových plochách			
	vážený průměr výšek (v. tloušťek) dřevin dle LHP (m; cm)	průměrná výška (v. tloušťka) všech stromů (m; cm)	průměrná výška (v. tloušťka) stromů horní úrovně (m; cm)	medián výšek (v. tloušťek) všech stromů (m; cm)	medián výšek (v. tloušťek) stromů horní úrovně (m; cm)
1 / (92) / L	21 ; 26,33	16,99 ; 19,9	20,8 ; 25,8	18 ; 20	21 ; 26
6 / (79) / J	25,4 ; 31,27	24,32 ; 26,3	29,69 ; 33,2	25,5 ; 24	30 ; 33,5

### 2.3. Model pro výpočet výšek porostů a individuální detekci korun a vrcholů

Pro tvorbu modelu pomocí nástroje „Model Builder“ v prostředí ArcMap 10.2 bylo využito základních principů platných pro tzv. segmentaci metodou inverzního povodí (Edson 2011). Model lze nazvat polo-automatickým z důvodu nutných dodatečných činností před spuštěním modelu a také z důvodu následné nutnosti manuální extrakce údajů z atributových tabulek. Tyto detekce jsou založeny na filtraci na lokální maxima a dále na užití nástrojů hydrologického modelování. Model sestává ze 14 rozdílných nástrojů, před jeho samotným použitím bylo nutné použít další 2 nástroje. Vstupními daty modelu jsou klasifikovaná data prvních a posledních odrazů převedená do podoby „multipointů“. Dále jsou vstupními daty polygonové (kruhové) shapefile tachymetricky zaměřených zkušných ploch rozšířených o 1 m buffer. K tvorbě rastrů DMT a DMP s rozlišením 0,5 m je použita interpolační metoda IDW.

Model je navíc doplněn o „nízkofrekvenční“ filtraci před samotným filtrováním nástrojem „Focal Statistics“. V rámci nastavení modelu byl zkoumán vliv počtu sousedů při filtraci (1,2,3,4) a typ statistické extrakce dat (mean a maximum). Dalším, empiricky zjištěným specifikem modelu je, že po zjištění potenciálních poloh vrcholů stromů je hodnota výšek „pod těmito body“ extrahována z prvotního rastru získaného odečtením DMP a DMT nástrojem „minus“. Ukázka zpracování výšek vypočítaných modelem je uvedena v tabulce 3 níže:

**Tab. 3.** Ukázka (část) zpracování přehledu průměrných výšek (m); mediánů výšek (m) zjištěných pomocí výpočetního modelu na zkušných plochách – všechny testované varianty nastavení („nnc“= number of neighborhood cells)

varianta nastavení filtrace	„nnc 1“	„nnc 2“	„nnc 3“	„nnc 4“	„nnc 1“	„nnc 2“	„nnc 3“	„nnc 4“
	„mean“	„mean“	„mean“	„mean“	„max“	„max“	„max“	„max“
plocha								
1	19,551; 19,984	19,427; 19,953	18,767; 19,530	18,373; 19,417	19,851; 20,090	19,972; 20,413	19,997; 20,649	19,740; 20,661
6	26,971; 27,144	27,215; 27,390	26,580; 26,909	26,405; 27,038	27,554; 27,840	27,781; 28,037	28,132; 28,580	28,107; 29,018

### 3. VÝSLEDKY

Po zpracování všech měření a výsledků bylo provedeno základní porovnání modelem zjištěných výšek (průměrů a mediánů) a všech 5 typů výšek vylišených na plochách. Ve srovnání s váženými průměry výšek dle LHP se odchylky modelového měření pohybovaly v rozmezí -14,65% až +17,07% při použití průměrné hodnoty. Nejlepším nastavením bylo „nnc = 4“; „maximum“. Při porovnání s průměry a mediány výšek zjištěných ze všech stromů na každé ploše se odchylky modelového měření pohybovaly od -6,42% do +24,33%, resp. od -8,14% do +24,78% při použití hodnot mediánu a při nastavení „nnc = 1“; „mean“. Při porovnání hodnot s průměry a mediány pro horní úroveň porostů se odchylky modelového měření pohybovaly od -7,92% do +3,15%, resp. od -7,98% do +2,37% při použití hodnot mediánu a při nastavení „nnc = 4“; „maximum“.

Následně byla pomocí regresní analýzy zjišťována míra korelace mezi výškami (průměr a medián) vypočtenými podle 8 typů nastavení a všemi variantami výšek a výčetních tloušťek zjištěných na zkušných plochách. Cílem bylo získat optimální nastavení modelu z hlediska měření rozdílných typů výšek a výčetních tloušťek jak pro všechny měřené porosty najednou, tak i při jejich rozdělení na listnaté a jehličnaté. Bylo zjištěno, že se míra závislosti mezi modelovými a v terénu změřenými hodnotami liší pro jednotlivá nastavení a jednotlivé vylišené typy výšek v řádech jednotek procent ( $\pm 4\%$ ), což při zpětném zjišťování výšek pomocí zjištěných regresních závislostí znamená rozdíly maximálně v řádu desítek cm. Při odvozování výčetních tloušťek jsou to rozdíly v řádech mm až jednotek cm.

Nejlepších výsledků napříč všemi zkoumanými porosty bylo dosaženo při určování průměru a mediánu výšek stromů v horní úrovni porostů. Při porovnání „terénních“ hodnot s mediánem získaným z výsledných modelových dat bylo dosaženo závislosti 97%. Pro zpětný výpočet průměrů a mediánů výšek horní úrovně porostů bylo dosaženo na základě zjištěných regresních vztahů průměrné chyby střední hodnoty 4,06% (1,05 m), resp. 3,98% (1,03 m) s rozpětím hodnot 3,00 – 5,05%, resp. 2,94 – 4,90% pro všech 11 ploch. Pro tyto výsledky byla použita filtrace „nnc = 4“; „maximum“.

O něco horších výsledků bylo dosaženo pro určování průměru a mediánu výšek všech stromů na plochách. Zde bylo dosaženo závislosti 87% pro modelovaný průměr a 90% pro modelovaný medián, při průměrné chybě střední hodnoty 9,58% (2,09 m), resp. 8,96% (2,03 m), s rozpětím hodnot 6,78 – 12,35%, resp. 6,35 – 11,95% pro jednotlivé porosty. Pro získání těchto optimálních hodnot bylo použito nastavení filtrace z opačné strany spektra použitých nastavení: „nnc = 1“; „mean“.

Při rozdělení na 7 listnatých a 4 jehličnaté porosty bylo dosaženo nepatrně lepších výsledků, které však byly získány pomocí rozdílných typů nastavení pro každý typ porostu. V případě porostů s převahou listnatých dřevin byla při určování mediánu výšek horní úrovně za použití modelového mediánu zjištěna závislost dat 98% s průměrnou chybou střední hodnoty 3,03% (0,74 m) při rozpětí 2,18 - 3,54% a 4,18% (1,03 m) při rozpětí 3,00 – 4,93% za použití modelového průměru, a to při použití filtrace „nnc = 2“; „mean“. Pro zjišťování výšek všech stromů v porostu bylo dosaženo závislosti dat 94% a hodnoty chyby střední hodnoty 8,08% (1,66 m) při rozpětí 5,38 – 9,80% pro průměr, resp. 8,47% (1,78 m) při rozpětí 5,59 - 10,52% pro medián výšek ve stejném nastavení jako pro horní úroveň listnatých porostů.

U jehličnatých porostů bylo dosaženo nejvyšší závislosti dat 98% a průměrné chyby střední hodnoty 3,93% při rozpětí 3,20 – 5,32% pro určování průměrné výšky horní úrovně porostů, resp. 4,52% při rozpětí 3,69 – 6,16% pro určování mediánu výšek horní úrovně porostů. Při určování průměru a mediánů výšek všech stromů v porostu bylo dosaženo průměrné chyby střední hodnoty 7,30% (1,8 m) při rozpětí 6,27 – 9,24% za užití modelového průměru a 6,60% (1,71 m) při rozpětí 5,37 – 8,59% za užití modelového mediánu. U jehličnatých porostů bylo pro získání nejlepších výsledků použito nastavení „nnc = 3“; „maximum“ pro horní výšky a „nnc = 4“; „maximum“ pro průměr a medián výšek všech stromů na ploše.

Při porovnávání závislosti modelových výšek s váženými průměry výšek dle LHP bylo dosaženo závislosti 79% s průměrnou chybou střední hodnoty 8,26% (2,02 m) při zahrnutí všech porostů, 73% s průměrnou chybou střední hodnoty 10,36 (2,49 m) u listnatých porostů, a překvapivě 98% s průměrnou chybou střední hodnoty 2,87% (0,72 m) u jehličnatých porostů. Vše s variantou filtrace „nnc = 4“; extrakce dat „maximum“.

Pro odvozování výčetních tloušťek bylo pro všechny porosty, ale zároveň i pro samostatnou skupinu listnatých porostů, dosaženo nejlepších výsledků s použitím průměrných výšek získaných při filtraci „nnc = 4“; „maximum“. Odhad výčetních tloušťek stromů v horní úrovni znamenal závislost dat 87% pro lineární a až 90% pro mocninnou závislost s průměrnou chybou střední hodnoty 10% (3,2 - 3,4 cm), odhad tloušťek všech stromů v porostu pak znamenal mocninnou závislost 75 - 81%, lineární 74 - 77% s průměrnou chybou střední hodnoty 16 - 20% (4,1 cm při srovnání s průměrem a 4,9 cm při srovnání s mediánem výčetních tloušťek). Pro jehličnaté porosty bylo dosaženo chyb střední hodnoty pouze 3,77 - 8,35% (1,2 - 2,8 cm) pro horní úroveň, a 9,22 - 16,68% (2,5 - 4,6 cm) pro všechny stromy v porostu, při úrovni filtrace „nnc = 3“; „mean“. Při použití mocninné závislosti bylo vždy dosaženo lepších výsledků závislosti dat, neboť při zpomalení výškového přírůstu lze předpokládat konstantní přírůst tloušťkový. V porovnání s daty LHP bylo v případě výčetních tloušťek dosaženo závislosti dat pouze 48 - 52%, avšak při zachování významné statistické závislosti dat.

Dále bylo porovnáváno množství detekovaných korun a vrcholů podle jednotlivých nastavení, jak s celkovým počtem stromových jedinců na plochách, tak i s počtem jedinců vylišených dle výšek v horní úrovni. Zde byly rozdíly mezi korelačními koeficienty již velmi významné. Při porovnávání detekovaných korun a vrcholů s celkovým počtem stromů na každé ploše bylo dosaženo pro jednotlivá nastavení rozsahu korelace 15 - 34% pro koruny, resp. 13 - 26% pro vrcholy. Při porovnávání získaných výsledků pouze s jedinci v horní úrovni bylo dosaženo rozsahu korelace 18 - 40% pro koruny a 17 - 29% pro vrcholy. V porostech s převahou listnatých dřevin bylo dosaženo lepších výsledků především v porovnání s počtem jedinců v horní úrovni - korelace 53 - 55 % při filtraci „nnc = 1“; „mean“ nebo „maximum“. V jehličnatých porostech byly zjištěny velmi zásadní rozdíly rozmezí korelace 1 - 84% pro detekci dle rozlišných nastavení pro variantu srovnání celkového počtu jedinců a detekovaných korun. Při srovnání počtu jedinců horní úrovně a detekovaných korun však bylo dosaženo maximální závislosti dat „pouze“ 63%.

V tabulkách níže jsou ukázky zpracování přehledu nejlepších výsledků dle koeficientu determinace a nastavení při kterém bylo tohoto výsledku dosaženo. Výsledky detekce korun a vrcholů podle všech použitých nastavení jsou vyjádřeny prostřednictvím procentického množství detekovaných stromů ve srovnání s reálně na ploše se nacházejícími stromy a jejich ukázka je uvedena samostatně v tabulce 6. Údaje získané výpočtem jsou porovnány jak s celkovým počtem stromů na ploše, tak s počtem stromů vylišených v horní úrovni. Z výsledků detekce bylo zjištěno, že nelze stanovit jedno či dvě nastavení optimálně funkční pro všechny porosty. Polohová přesnost detekce vrcholů a tvar korun neodpovídá realitě, a proto jsou tyto výsledky vhodné spíše jen k množstevnímu porovnání se zjištěnými „referenčními“ počty stromů na plochách. Při znalosti počtu stromů na plochách však lze stanovit vhodné nastavení pro konkrétní porosty.

**Tab. 4.** Přehled výsledků odvozování výšek s optimálními variantami nastavení modelu – všechny zkoumané plochy

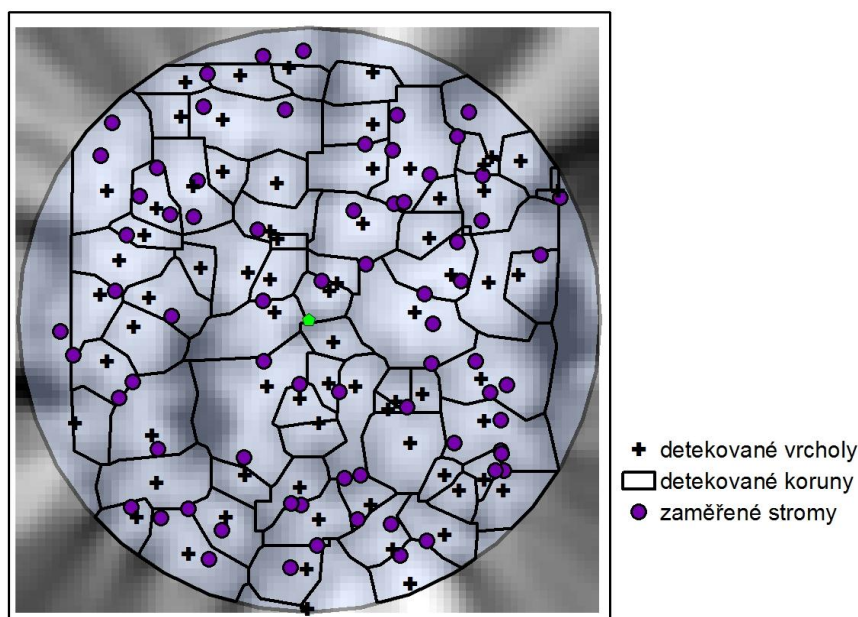
zjišťovaná hodnota - „y“=	vážený průměr výšek dle LHP (m)	průměrná výška všech stromů (m)	průměrná výška stromů horní úrovně (m)	medián výšek všech stromů (m)	medián výšek stromů horní úrovně (m)
R (koeficient determinace)	0,79	0,87	0,97	0,90	0,97
nastavení nástroje „Focal Statistics“	4 „nnc“ maximum	1 „nnc“ mean	4 „nnc“ maximum	1 „nnc“ mean	4 „nnc“ maximum
typ vypočítaných hodnot výšek - model = („x“)	průměr	medián	medián	medián	medián
průměrná chyba střední hodnoty (m)	2,02	2,09	1,05	2,03	1,03
průměrná odchylka střední hodnoty v %	8,26	9,58	4,06	8,96	3,98
rozpětí odchylek jednotlivých (11) porostů v %	6,34 – 10,26	6,78 – 12,35	3,00 – 5,05	6,35 – 11,95	2,94 – 4,90
významnost závislosti dat	0,00023148	$2,75 \cdot 10^{-5}$	$3,89 \cdot 10^{-8}$	$8,84 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$
regresní rovnice pro lineární závislost	$y = 0,6469x + 8,574$	$y = 1,0139x - 1,8758$	$y = 1,0173x + 0,2814$	$y = 1,1299x - 3,7759$	$y = 1,0077x + 0,518$

**Tab. 5.** Přehled výsledků odvozování výčetních tlouštěk s optimálními variantami nastavení modelu – všechny zkoumané plochy

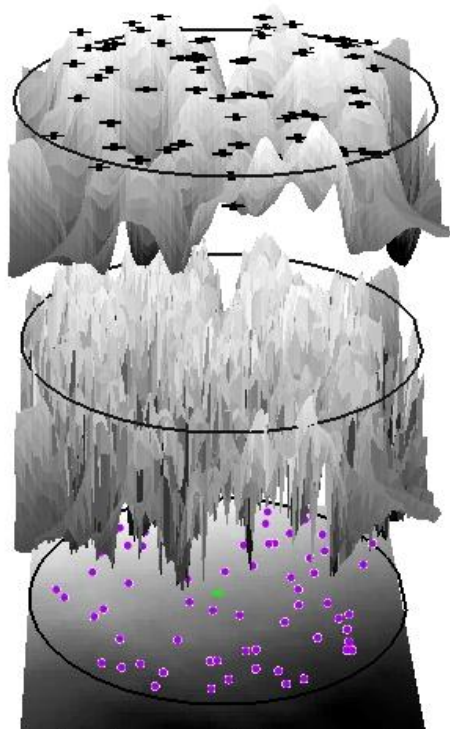
zjišťovaná hodnota - „y“=	vážený průměr DBH dle LHP (m)	průměrná DBH všech stromů (m)	průměrná DBH stromů horní úrovně (m)	medián DBH všech stromů (m)	medián DBH stromů horní úrovně (m)
R (koeficient determinace) mocninný / lineární	0,61 / 0,53	0,81 / 0,77	0,88 / 0,84	0,75 / 0,74	0,90 / 0,87
nastavení nástroje „Focal Statistics“	4 „nnc“ maximum	4 „nnc“ maximum	4 „nnc“ maximum	4 „nnc“ maximum	4 „nnc“ maximum
typ vypočítaných hodnot výšek - model = („x“)	průměr	průměr	průměr	průměr	průměr
průměrná chyba střední hodnoty (cm)	4,8	4,1	3,4	4,9	3,2
průměrná odchylka střední hodnoty v %	16,23	16,11	10,78	20,30	10,13
rozpětí odchylek jednotlivých (11) porostů v %	11,15 – 23,39	9,82 – 22,69	7,10 – 14,81	11,62 – 31,87	7,00 – 14,33
významnost závislosti dat	0,011761	0,000386	$5,64 \cdot 10^{-5}$	0,000719	$3,16 \cdot 10^{-5}$
regresní rovnice pro mocninnou závislost	$y = 2,9399x^{0,7352}$	$y = 0,6428x^{1,155}$	$y = 1,2582x^{1,0134}$	$y = 0,417x^{1,2801}$	$y = 1,1187x^{1,0426}$
regresní rovnice pro lineární závislost	$y = 0,8508x + 10,125$	$y = 1,222x - 3,7604$	$y = 1,3273x - 0,2122$	$y = 1,348x - 7,4572$	$y = 1,3107x - 0,5502$

**Tab. 6.** Ukázka: Úspěšnost detekce korun a vrcholů podle jednotlivých nastavení pro plochy 5 a 6

nastavení „Focal Statistics“	plocha 5 (celk. 72; 38 v h.ú.)						plocha 6 (celk. 79; 40 v h.ú.)					
	detekce počet :		vs. celý por. %		vs. horní úr. %		detekce počet :		vs. celý por. %		vs. horní úr. %	
	kor.	vr.	kor.	vr.	kor.	vr.	kor.	vr.	kor.	vr.	kor.	vr.
FS1_mean	73	71	101,39	98,61	192,11	186,84	51	49	64,56	62,03	127,50	122,50
FS3_mean	28	27	38,89	37,50	73,68	71,05	29	28	36,71	35,44	72,50	70,00
FS2_mean	59	54	81,94	75,00	155,26	142,11	41	38	51,90	48,10	102,50	95,00
FS4_mean	29	24	40,28	33,33	76,32	63,16	28	21	35,44	26,58	70,00	52,50
FS1_max	60	60	83,33	83,33	157,89	157,89	42	42	53,16	53,16	105,00	105,00
FS3_max	18	18	25,00	25,00	47,37	47,37	16	16	20,25	20,25	40,00	40,00
FS2_max	26	26	36,11	36,11	68,42	68,42	28	28	35,44	35,44	70,00	70,00
FS4_max	12	12	16,67	16,67	31,58	31,58	10	10	12,66	12,66	25,00	25,00

**Obr. 2.** Ukázka „detekce“ korun a vrcholů stromů na ploše č. 5 – 101% korun, 99% vrcholů v porovnání s počtem zaměřených stromů. Nastavení nástroje Focal Statistics: „1 nnc“; „mean“





**Obr. 3.** Grafická ukázka dat použitých k výpočtům na ploše č. 5 - dole DMT s polohami zaměřených kmenů, uprostřed DMP, nahoře výsledný CHM (model výšek porostů) vč. detekce vrcholů

#### 4. ZÁVĚR

Cílem práce bylo využít alternativní data LLS, která byla původně určena k jiným než lesnickým účelům, ověřit možnosti jejich zpracování k získávání výšek a odvozování výčetních tloušťek na úrovni vylišených porostních skupin, a pokud možno ověřit také pomocí zvolené metody možnosti detekce korun či vrcholů pro zjištění počtu stromů v porostu. Tato data se od dat standardně používaných pro odvozování porostních parametrů odlišují především dobou pořízení mimo vegetační období a mimořádně velkým úhlem záběru skeneru 50°. Tato práce nastiňuje možnosti provozního uplatnění LLS v lesnické praxi pro komplexní podmínky v ČR, při současném ověření a vylepšení již všeobecně známých metod. Zároveň dokazuje, že při použití kvalitních nástrojů pro klasifikaci dat LLS lze dosáhnout přesvědčivých výsledků především při měření výšek na úrovni vylišených zkušných ploch, a to i při použití dat ne zcela vhodných k těmto účelům. Komerční nástroje však nemusí být vždy všem dostupné, a proto bude do budoucna účelné zabývat se možností využití volně dostupných klasifikačních nástrojů, např. některé nástroje „LAS tools“ nebo software „Fusion“. Během zpracování nebyl zkoumán vliv rozdílných interpolačních technik, neboť jejich vliv na výsledné výšky celých porostů je podle různých autorů zanedbatelný.

Navzdory poměrně velké variabilitě napříč porosty na kruhových zkušných plochách bylo dosaženo přesvědčivých výsledků pro měření průměrů a mediánů výšek stromů vylišených v hlavní stromové úrovni. Menší, avšak stále velmi těsné závislosti mezi měřenými výškami bylo dosaženo pro měření průměrů a mediánů výšek všech stromů v porostu. Dosažené výsledky měření výšek jsou nyní v souladu s výsledky uváděnými jinými autory, tzn. že výšku zápoje – hlavní stromové úrovně lze zjistit s přesností do 5%, celých porostů včetně podrostu pak do cca 10-15%. Přesnost odvozování výčetních tloušťek od 5 do 20% silně závisí na skladbě porostů na zkušných plochách a odvozené vztahy jsou aplikovatelné více-méně pouze lokálně.

Co se týče detekce korun a vrcholů, tak zde metoda primárně určená k tomuto využití příliš nefunguje, resp. by bylo nutné vytvořit rozsáhlou databázi porostů, a na základě jejich shodnosti ve větším počtu (věku, skladby, míry zastoupení podrostu, zakmenění, doby náletu dat atd.) pro ně najít vhodná nastavení.

Například v mladších či jehličnatých porostech nebylo nutné uplatňovat filtraci více sousedy, zatímco ve starších a listnatých porostech bylo nutné uplatnit filtraci větším „oknem“. Každý porost se však choval jako „svébytný“, a proto bylo nejlepších výsledků pro každý z nich dosaženo vždy při jiném nastavení filtrace. Naopak pro zpětné zjišťování výšek vztažených na celý porost lze model využít prakticky v jakémkoliv nastavení filtrace s velmi podobnými výsledky. Při měření výšek tedy spíše více závisí na metodách klasifikace dat. Zajímavostí je, že nejlepších výsledků co se týče korelace výškových dat pro celé porosty je dosaženo nejčastěji až při malém počtu modelem detekovaných stromů, např. při 15 ze 60, zpravidla při využití počtu 3 nebo 4 sousedů a statistického typu extrakce dat „maximum“.

Metodu bude nadále vhodné validovat na dalších, náhodně vybraných plochách, a za stávajícího, již pevně daného postupu využít i jiná data LLS ze stejného území. Celý proces zjišťování výšek je nyní velmi časově náročný, neboť je nutné pro každý porost ručně měnit vstupní data a nastavení modelu a zároveň také manuálně provádět veškerá statistická šetření. Další automatizace procesu je tedy pro jeho budoucí využití ve větší míře nezbytná.

## LITERATURA

Breidenbach, J., Næsset, E., Lien, V., Gobakken, T., Solberg, S. (2010) Prediction of species specific forest inventory attributes using nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 114, s. 911-924.

Cibulka, M., Mikita, T. (2011) Přesnost digitálního modelu reliéfu vytvořeného z dat leteckého laserového skenování v lesních porostech. *Geodetický a kartografický obzor*, 57(11): s. 265-269. ISSN 0016-7096.

Coops, N.C., Hilker, T., Wulder, M.A., St-onge, B., Newham, G., Siggins, A., Trofymow, J.A. (2007) Estimating canopy structure of Douglas-fir forest stands from discrete-return LiDAR. *Trees* 21, s. 295-310.

Dolanský, T. (2004) Lidary a letecké laserové skenování, Ústí nad Labem, Acta Universitatis Purkynianae 99, 100 s., ISBN 80-7044-575-0

Edson, C.B. (2011) Light detection and ranging (LiDAR): What we can and cannot see in the forest for the trees. Dizertační práce. Oregon State University. Proquest, UMI Dissertation Publishing, 277 s.

Gobakken, T. a kol. (2012) Estimation biomass in Hedmark Country, Norway using national forest inventory field plots and airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 123, s. 443-456.

Heinzel, J., Koch, B. (2011) Exploring full-waveform ALS parameters for tree species classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1): s. 152-160. ISSN 0303-2434.

Heurich, M., Weinacker, H. (2004) Automated tree detection and measurement in temperate forests of central Europe using laserscanning data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (Part 8/W2), s. 198-203.

Heurich, M. (2008) Automatic recognition and measurement of single trees based on data from airborne laser scanning over the richly structured natural forest of the Bavarian Forest National Park. *Forest Ecology and Management* 255, s. 2416-2433.

Hollaus, M., Mücke, W., Eysn, L. (2012) Forest structure and stem volume assessment based on airborne laser scanning. *Ambiência Guarapuava (PR) v.8 Ed. Especial*, ISSN 1808 – 0251, s. 471-482

Holmgren, J., Jonsson, T., (2004) Large scale airborne laser-scanning of forest resources in Sweden. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(Part 8/W2), s. 157-160.

Holopainen, M., Hyypä, J. (2003) Possibilities with laser scanning in practical forestry. In: Hyypä, J., Næsset, E., Olsson, H., Pahlén, T. G., Reese, H. (Eds.) Proceedings of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests. Swedish University of Agricultural Sciences in Umea, Sweden, s. 265–274. ISSN 1401-1204.

Hyypä, J., Hyypä, H., Litkey, P., Yu, X., Haggrén, H., Rönholm, P., Pyysalo, U., Pitkänen, J., Maltamo, M. (2004) Algorithms and methods of airborne laser-scanning for forest measurements. International Archives of Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences, 36 (Part 8/W2), s. 82-89

Ioki, K., Imanshi, J., Sasaki, T. (2009) Estimating stand volume in broad-leaved forest using discrete-return ALS: plot-based approach. Landscape and Ecological Engineering, 6(1): s. 29–36. ISSN 1860-1888.

Király, G., Brolly, G., Vitányi, M. (2011) Comparison and Possible use of Digital Surface Models (DSMs) in a Multifunctional Forest. Proceedings of the EARSeL SIG Forestry workshop.

Korpela, I. a kol. (2007) Single-tree forest inventory using ALS and aerial images for 3D treetop positioning, species recognition, height and crown width estimation. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXVI, part 3/W52, s. 227-233, ISSN 1682-1777.

Kvak, D. A., Lee, W. K., Lee, J. H. (2007) Detection individual trees and estimation of tree height using ALS data. Journal of Forest Research, 12(6): s. 425–434. ISSN 1610-7403.

Lim, K., Hopkinson, C., Treitz, P. (2008) Examining the effects of sampling point densities on laser canopy height and density metrics. Forestry Chronicle 2008, 84(6): s. 876-885. ISSN 0015-7546.

Maas, H.G. (2010) Forestry Applications, 6th chapter in Airborne and Terrestrial Laser Scanning, Whittles Publishing, Dunbeath Scotland, ISBN 978-1904445-87-6, s. 213-229.

Maltamo, M., Packalén, a kol. (2007) Experiences and possibilities of ALS based forest inventory in Finland. International Articles of Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences, 36, (Part 3/W52), s. 207-279.

Mei, CH., Durrieu, S. (2004) Tree crown delineation from digital elevation models and high resolution imagery. International Archives of Photogrammetry, Remote sensing and Spatial Information Sciences, 36 (Part 8/W2), s. 218-223.

Mikita, T., Klimánek, M., (2013) Odvozování lesnických porostních charakteristik na základě dat leteckého laserového skenování In: GIS Ostrava 2013, Sborník referátů.

Monnet, J.-M., Mermin, E., Chanussot, J. (2010) Estimation of forestry parameters in mountainous coppice stands using airborne laser scanning. Proceedings of the 10th International Conference SilviLaser 2010.

Næsset, E. (2008) Effects of different sensors, flying altitudes, and pulse repetition frequencies on forest canopy metrics and biophysical stand properties derived from small-footprint airborne laser data. Remote sensing of Environment 113, s. 148-159.

Næsset, E., Økland, T. (2002) Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. Remote sensing of Environment 79, s. 105-115.

Persson, Å, Holmgren, J., Söderman, U. (2002) Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68(9), s. 925-932.

Persson, Å, Holmgren, J., Söderman, U., Olsson, H. (2004) Tree species classification of individual trees in Sweden by combining high resolution laser data with high resolution near-infrared digital images. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 36 (Part8/W2), s.204-207.

Pitkänen, J., Maltamo, M., Hyypä, J., Yu, X. (2004) Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model. . International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(Part 8/W2), s. 187-191.

Reutebuch, S. E., McGaughey, R. J., Andersen, H. E., Carson, W. W. (2003) Accuracy of a high-resolution ALS terrain model under a conifer forest canopy. Canadian Journal of Remote Sensing, 29(5): s. 527–535.

Salas, CH., Ene, L., Gregoire, T.G., Næsset, E., Gobakken, T. (2010) Modelling tree diameter from airborne laser scanning derived variables: A comparison of spatial statistical models. Remote Sensing of Environment 114, s. 1277-1285.

Shataee, S., Weinaker, H., Babanejad, M. (2011) Plot-level Volume Estimation Using Airborne Laser Scanner and TM Data Comparison of Boosting and Random Forest Tree Regression Algorithms. Procedia Environmental Science 7, s. 68-73.

Smreček, R. (2012) Určenie výšky porastu pomocou leteckého laserového skenovania. In: GIS Ostrava 2012 – Současné výzvy geoinformatiky, Sborník referátů.

Solberg, S., Næsset, E., Bollandsas, O.M. (2006) Single Tree Segmentation Using Airborne Laser Scanner Data in a Structurally Heterogenous Spruce Forest. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 72, No. 12, s. 1369-1378.

Straub, CH. a Koch, B. (2011) Enhancement of bioenergy estimations within forests using airborne laser scanning and multispectral line scanner data. Biomass and bioenergy 35, s. 3561-3574.

Straub, CH. a Seitz, R. (2011) A comparison of digital photogrammetry and airborne laser scanning for the derivation of digital surface models in different forest types and terrain situations. Proceedings of the EARSeL SIG Forestry workshop.

Tonolli, S. a kol. (2011): Fusion of airborne LIDAR and satellite multispectral data for the estimation of timber volume in the Souther Alps. Remote Sensing of Environment 115, s. 2486-2498.

Watt, P.J. a kol. (2004) Predicting forest height from IKONOS, LANDSAT and LiDAR IMAGERY. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(Part 8/W2), s. 228-231.

Yao, W., Krzystek, P., Heurich, M. (2012) Tree species classification and estimation of stem volume and DBH based on single tree extraction by exploiting airborne full-waveform LiDAR data. Remote Sensing of Environment, s. 368-380.

Yu, X. a kol. (2006) Change detection techniques for canopy height growth measurements using airborne laser scanner data. Photogrammetric engineering and remote sensing 72(12), od s. 1339

Zaremba, M. B., Gougeon, F. (2007) A. Fusion of high-resolution satellite and lidar data for individual tree recognition. Proceeding of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, art. no. 4054805, s. 1112-1115. ISBN 978-1-424-40038-6.

Zhao, K., Popescu, S., Nelson, R. (2009) Lidar remote sensing of forest biomass: A scale-invariant estimation approach using airborne lasers. Remote Sensing of Environment 113, s. 182-196.

## PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek prezentuje výsledky výzkumu, který byl podpořen Interní grantovou agenturou LDF MENDELU jako projekt č. 46 / 2013.