

## ODVOZOVÁNÍ LESNICKÝCH POROSTNÍCH CHARAKTERISTIK NA ZÁKLADĚ DAT LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ

Tomáš MIKITA, Martin KLIMÁNEK

Ústav geoinformačních technologií, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně,  
Zemědělská 3, 613 00 Brno, Česká republika  
*tomas.mikita@mendelu.cz*

### Abstrakt

Příspěvek se zabývá zpracováním dat leteckého laserového skenování (LLS) z lesních porostů za účelem výpočtu základních taxačních stromových a porostních charakteristik. Mezi testované parametry patří výška, výčetní tloušťka a objem hroubí jak jednotlivých stromů, tak celých lesních porostů. Výška stromů je zjišťována na základě zpracování dat LLS, kdy jsou nejprve detekovány jednotlivé vrcholy stromů a poté na základě rozdílu digitálního modelu povrchu a terénu je určena jejich výška. Výčetní tloušťka a objem stromů je odhadován podle vypočtených statistických závislostí. Přesnost výpočtu parametrů je porovnávána s údaji zjištěnými terénním měřením na experimentálních plochách s různou druhovou a prostorovou skladbou lesa. Kromě těchto parametrů se práce také zabývá ověřením obecných pravidel pro tvorbu digitálních modelů povrchů z dat LLS v podmínkách lesních porostů, a to v závislosti na hustotě bodů a požadovaném rozlišení rastrové reprezentace.

### Abstract

The paper is focused on analyses of Airborne Laser Scanning (ALS) data in conditions of forest stands with objective to derive basic forest mensurational tree and stand characteristics. There are tree and stand height, diameter and growing stock volume (timber to the top of 7 cm) in the tested parameters. Heights of the trees are computed by differentiation between digital terrain model and digital surface model for their detected tops of crowns. Diameter and stock volume of the trees are derived by modeling for their statistical dependencies. Precision of derivations is tested by comparison with terrestrial field data measured by geodetic methods on several experimental plots with different spatial and tree species arrangement. There is also testing of methods of ALS data spatial interpolation for digital elevation modeling in conditions of forest stands, compared to densities of point clouds and resolution of rasters, as subsidiary objective in this paper.

**Klíčová slova:** letecké laserové skenování; LIDAR; digitální model terénu; digitální model povrchu; prostorová interpolace; stromové taxační veličiny

**Keywords:** airborne laser scanning; LIDAR; digital elevation model; digital surface model; spatial interpolation; forest mensurational data

### 1. ÚVOD

Systém leteckého laserového skenování (LLS) nebo obecně LIDAR (Light Detection and Ranging) je moderní metodou hromadného sběru polohopisných i výškopisných dat o vysoké hustotě bodů umožňující současně získávání informací jak o zemském povrchu, tak o objektech, které se na něm a nad ním nacházejí (např. budovy, vegetace). S rozvojem této technologie dochází také k jejímu postupnému využívání v lesnictví, kde tato data mohou být velmi přesným zdrojem informací pro určení některých porostních charakteristik, především údajů o výšce a počtu stromů v porostech. Cílem této práce je proto popsat a zhodnotit různé metody interpolace dat LLS za účelem tvorby digitálního modelu povrchu (DMP) pro následný výpočet výšky stromů a určení jejich počtu.

V lesnictví je LLS používán zejména ke třem typům úloh:

- identifikace stromů,
- měření parametrů stromů,
- tvorba digitálního modelu povrchu korun stromů.

LLS přináší kvantitativně i kvalitativně nový pohled na data získávaná primárně z prostředí lesních ekosystémů. Díky LLS je tak možné získat detailní informaci jak o terénu, tak o objektech, které se na něm a nad ním nacházejí; je to už zmíněný DMP, případně digitální model terénu (DMT) a potom zejména dendrometrické stromové nebo porostní charakteristiky (zejména jde o tloušťku, výšku a objem stromů, zápoj a zakmenění, střední a horní výšku porostu, kruhovou základnu a zásobu porostu).

Při vytváření datových souborů v zalesněných územích se mohou laserové pulsy odrážet od různých vrstev vegetačního krytu, zahrnujícího nejvyšší hladinu vegetace (první odraz), střední hladiny (druhý a následující odrazy) a zemský povrch (poslední odraz). Na základě prvního a následujících odrazů je možné zpracovat digitální model povrchu korun a z něj (případně také přímo z mračna bodů) potom odhadnout některé parametry jednotlivých stromů nebo i porostů (Holopainen and Hyypä 2003), jako jsou například plocha koruny, výška stromu nebo zakmenění (Heurich et al. 2003; Maltamo et al. 2004). Novějším přístupem při zkoumání stromových a porostních charakteristik je využití informace z odrazů celého průběhu vlny (tzv. full-waveform), tedy nejen z diskrétních odrazů a jejich intenzit (Heinzel and Koch 2011). Použitím posledního odrazu může být interpolován DMT velmi vysoké kvality s prostorovým rozlišením 1 m a výškovou přesností 0,1 až 0,2 m (Reutebuch et al. 2003).

Výpočet porostních charakteristik je vždy vázán na základní parametry zjistitelné z dat LLS jako jsou výška porostu či jednotlivých stromů a dále případně šířka koruny a její tvar, neboť i při velmi vysoké hustotě bodů LLS není možné přímo identifikovat průměr kmene. Výpočet porostních charakteristik je proto převážně založen na regresních modelech výškových či objemových křivek pro jednotlivé dřeviny s různým počtem proměnných a koeficientů (dle výškové křivky např. Halaj 1959; Michailoff 1943; Näslund 1947; Šmelko 1987; dle objemové křivky např. Halaj 1955; Näslund 1947, Petráš a Pajtík 1991).

Současné výsledky aplikovaného výzkumu ukazují na značnou variabilitu zkoumaných parametrů. Například nejčastěji hodnocený parametr, výška stromů, se pohybuje v přesnosti od  $\pm 0,2$  do  $\pm 1,5$  m (Straub and Seitz 2011; Király et al. 2011; Leeuwen and Nieuwenhuis 2010; Franken 2005). Při zjišťování tloušťky se dosahované přesnosti pohybovaly v intervalu 2,5 až 6,5 cm (Korpela et al. 2007, Holopainen et al. 2009, Holopainen 2011). Zásobu porostu lze zjistit s přesností cca 5 až 35 % (Maltamo et al. 2009; Tonolli et al. 2010; Vaukhonen et al. 2009), přičemž jsou tyto hodnoty závislé na vertikální a horizontální struktuře porostu, sklonu terénu a hustotě mračna bodů LLS.

## 2. MATERIÁL A METODIKA

Testování dat LLS proběhlo na několika výzkumných plochách na území Školního lesního podniku Masarykův les Křtiny (ŠLP Křtiny). Pro hodnocení byla použita data LLS od firmy GEODIS Brno z roku 2009. Skenování bylo provedeno ve vegetačním období skenerem Leica ALS50-II z letové výšky 1395 m s průměrnou hustotou 4,3 bodu na  $m^2$ .

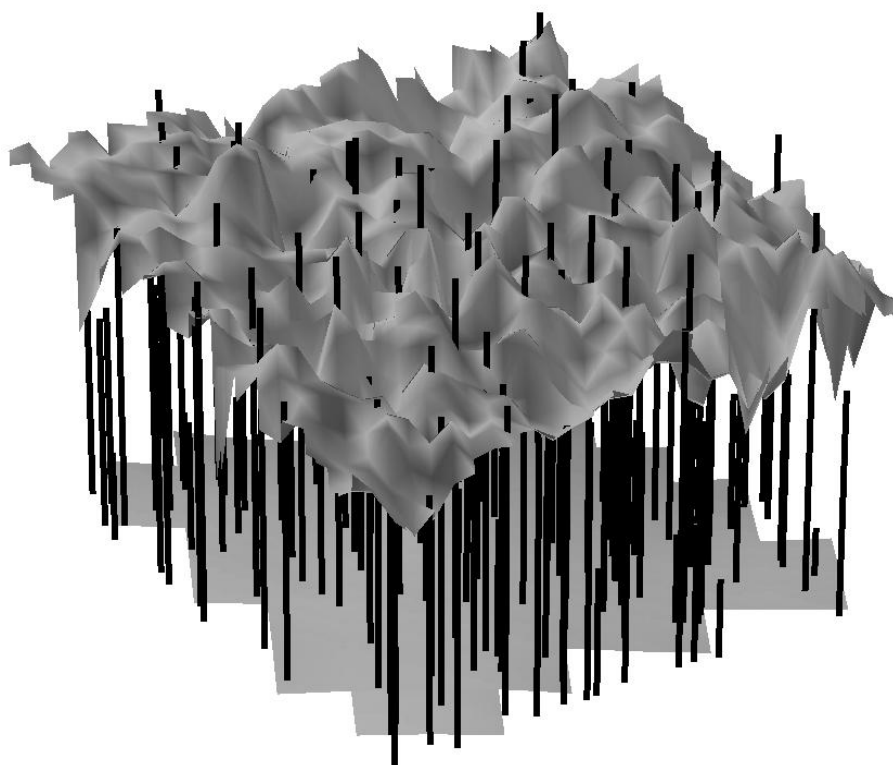
Pro účely hodnocení byly zaměřeny celkem 3 výzkumné plochy o celkové rozloze 1,25 ha (viz Obr. 1). Plochy se nacházejí 10 km severně od města Brna a leží v nadmořské výšce 470 - 520 m n. m. Při výběru výzkumných ploch byl kladen důraz na druhovou i prostorovou variabilitu lesních porostů a zároveň i na členitost reliéfu. Byly tak vybrány 2 čtvercové plochy s rovinným či mírně skloněným reliéfem a jedna obdélníková plocha probíhající hlubokou strží. Lesní porosty na čtvercových plochách mají věk 81 let, v případě obdélníkové plochy šlo o porosty mladší, ve věku 69 let. Druhová skladba na všech plochách byla obdobná s převahou buku s menším podílem smrku a ostatních dřevin. Celkem bylo zaměřeno 600 stromů se střední výškou 27 metrů a střední tloušťkou 29 cm. Geodetické zaměření plochy bylo provedeno pomocí totální stanice Topcon GPT – 9003M s připojením na geodetickou síť zaměřenou GNSS přístrojem Topcon Hiper Pro v souřadnicovém systému S-JTSK. Pro zpřesnění výsledků GNSS měření byly použity RTK korekce ze sítě pozemních stanic CZEPOS.

Zaměření výšek těchto stromů bylo provedeno elektronickými výškoměry TruPulse 360B firmy Laser Technology, Inc. a Vertex VL-402 Laser firmy Haglöf Sweden AB. Výšky stromů se měřily z vhodného místa v porostu tak, aby z tohoto místa bylo dobře vidět na vrcholek stromu a na jeho patu. Minimální odstupová vzdálenost od stromu se rovnala odhadnuté výšce stromu. Z důvodu zajištění větší přesnosti byla výška

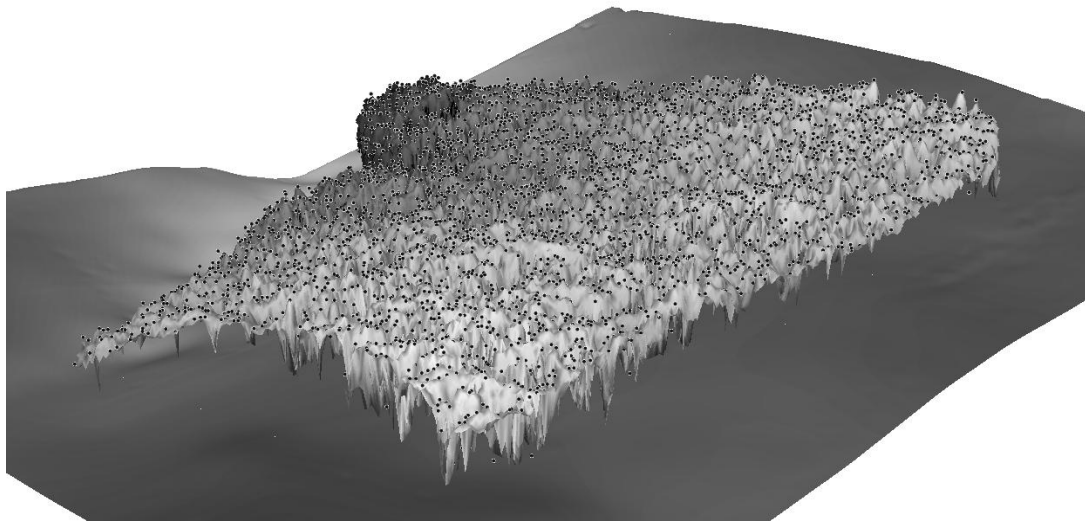
každého stromu měřena třikrát, pokaždé z jiného směru a výsledná výška vznikla jakožto aritmetický průměr všech tří hodnot. Kromě výšky byla měřena rovněž výčetní tloušťka ve výšce 1,3 metrů nad zemí. Výsledky měření z totální stanice byly převedeny do podoby bodové shapefile vrstvy s přiřazením atributů měřené výšky u každého ze stromů.

Data LLS byla poskytnuta ve formátu LAS 1.2 a pro další zpracování byla nejprve klasifikována v softwaru Terra Scan do vrstev holého terénu a vrstvy prvního odrazu představujícího povrch korun. Klasifikovaná mračna bodů byla následně interpolována v softwaru ArcGIS do podoby rastrových digitálních modelů terénu (DMT) a povrchu korun (DMP). Pro interpolaci DMT byla použit nástroj Natural neighbor, pro interpolaci DMP pak nástroj IDW. DMP byl následně vyhlazen pomocí filtrace (viz Obr. 1). Konkrétní volba těchto interpolací a filtrace dat vychází z dříve publikovaných prací (Cibulka et Mikita 2010; Mikita et al. 2013).

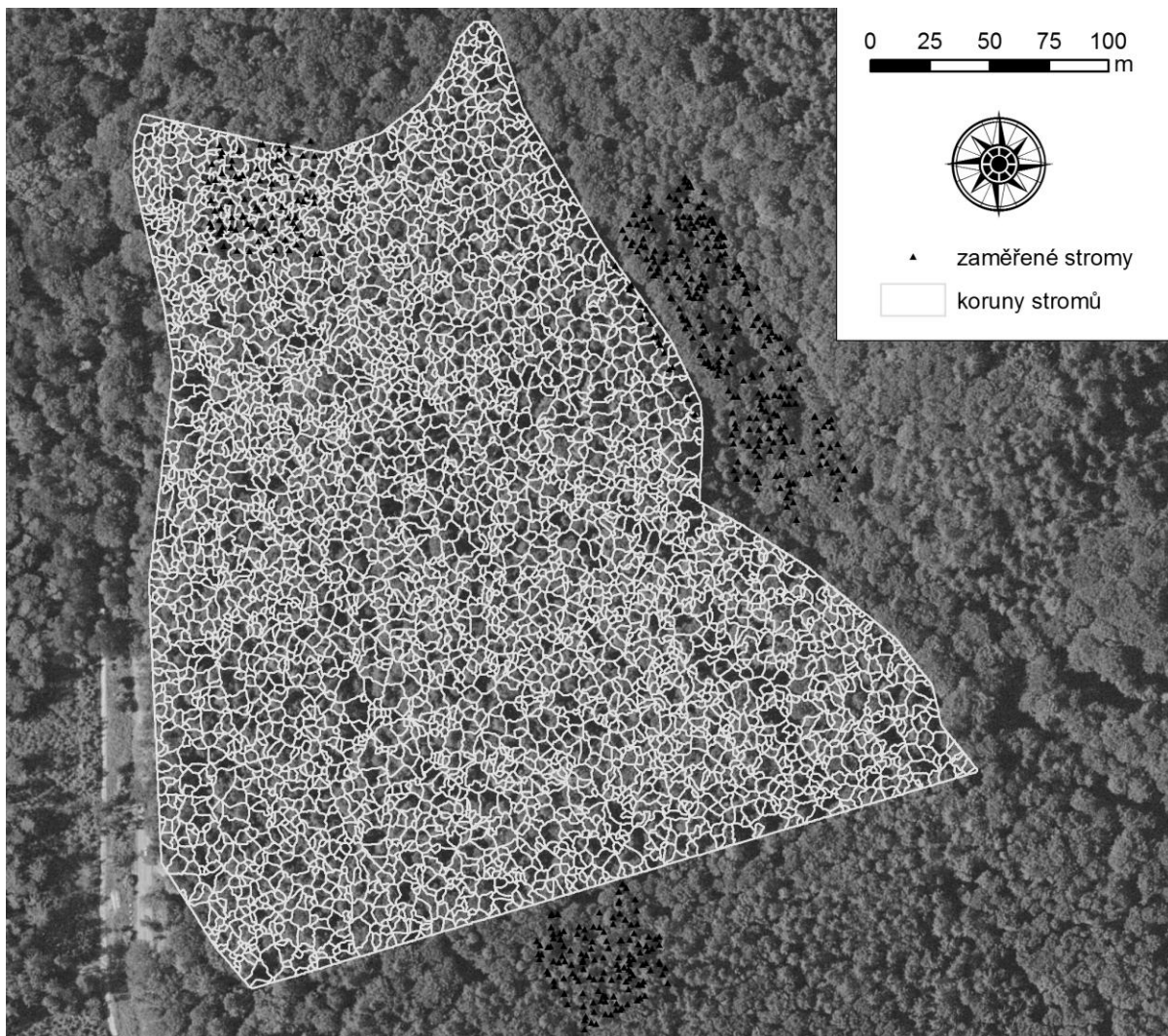
Pro určení vrcholů stromů byla použita zjednodušená metoda tzv. segmentace inverzního povodí – Inversed Watershed Segmentation (Edson 2011). Metoda je založena na nástrojích hydrologického modelování a vyhledává lokální minima (deprese), které zabraňují odtoku. Pro výpočet bylo nutné vytvořit nejprve výškový model korun porostu odečtením DMP a DMT a následně vynásobit hodnotou -1. Vznikl tak převrácený rastr, kde každá koruna stromu představuje bezodtokou propadlinu, jež zároveň vytváří lokální povodí. Výpočtem směru a následně délky odtoku (Flow Direction a Flow Length) byla detekována lokální minima, která představují zmíněné vrcholky stromů. Počet stromů byl pro každou použitou metodu zjištěn na základě vytvořeného množství bodových prvků. Výšku jednotlivých stromů je možné získat jednoduchou extrakcí hodnot výšky z výškového modelu korun do atributové tabulky bodové vrstvy. Aplikací nástroje na výpočet povodí byly následně přibližně identifikovány i koruny stromů (viz Obr. 2 a Obr. 3). V atributové tabulce výsledné bodové vrstvy stromů byly vypočteny porostní charakteristiky výčetní tloušťky a objemu kmene a poté porovnány s měřenými údaji vzájemným spojením bodových souborů měřených a identifikovaných stromů. Propojení atributů proběhlo na základě nejbližší vzdálenosti bodů.



**Obr. 1** Ukázka interpolovaného povrchu korun a zaměřených stromů



Obr. 2 Ukázka DMP a identifikovaných vrcholů korun



Obr. 3 Zaměřené stromy na zkušních plochách a identifikované koruny porostu

Pro výpočet výčetní tloušťky ( $d$ ) byla použita upravená Michajlovova funkce vypočtená na základě regresní analýzy měřených dat výšek ( $h$ ) pro všechny stromy na plochách (1).

$$d = 12,2901 / [3,777 - \ln(h - 1,3)] \quad (1)$$

Objem ( $V$ ) jednotlivých stromů byl počítán podle slovenského modelu objemových rovnic (Petráš et Pajčík 1991). Vzhledem k druhové převaze buku na plochách byla použita rovnice a koeficienty pro buk (2).

$$V = (0,542013 - 0,31183/h + 44,3274/h^2 - 235,97/d - 0,00107117 * h/d - 0,0000186004 * h^2/d - 0,0000008806277 * h * d^2 - 0,0000000599567 * h * d^3) * (\pi * d^2 / 40000) * h \quad (2)$$

Pro praktické využití při určování výšek, výčetních tloušťek a s tím spojeného objemu dříví v porostech byl vytvořen model v softwaru ESRI ArcGIS, který na základě dat DMP a DMT automaticky identifikuje jednotlivé stromy, do atributové tabulky dopočítá výčetní tloušťky a objemy stromů a na zadané ploše spočítá celkový objem dřevní hmoty. Tento model byl dále testován na opět převážně bukovém porostu o rozloze 8,31 ha (střední tloušťka 30 cm, střední výška 27 m) a výsledný kalkulovaný objem dříví byl porovnán s daty lesního hospodářského plánu.

### 3. VÝSLEDKY A DISKUSE

Při lesnickém využití dat LLS pro výše zmíněné účely hraje velmi velkou roli rozlišení rastru DMP, neboť se zvyšující se velikostí pixelu klesá celkový počet identifikovaných stromů. Optimální rozlišení při použití dat LLS s hustotou okolo 4 bodů na  $m^2$  se tak jeví rozlišení okolo 0,5 metru (Mikita et al. 2013).

Výsledky porovnání výšek stromů s přímo měřenými hodnotami v souladu s literaturou potvrzují podhodnocení výšek u rozsahu RMSE od 6,8 do 8,1 metrů při zvažování všech stromů v porostu. Tyto hodnoty jsou značně ovlivněny výskytem stromů v podúrovni, kde dochází k enormnímu nárůstu chyby vlivem filtrace na základě maximálních hodnot v okolí. Při zvažování pouze vyšších stromů v úrovni a nadúrovni (nad 25 m) RMSE klesá na cca 4 metry (Mikita et al., 2013). Samotná přesnost vytvořených modelů korun je mnohonásobně vyšší a vypočtené chyby jsou ovlivněny zvoleným postupem hodnocení. Při terénním zaměřování byla měřena vždy pata kmene a výška vrcholu stromu vznikla přičtením výšky stromu k nadmořské výšce tohoto bodu; tzn. vždy jako svislá průsečnice s patou kmene. Vzhledem ke značné výšce stromů (střední výška 27 metrů, maximum 37 metrů) i nepatrný náklon kmene měl za následek rozdílnou polohu vrcholu oproti svislici. Vrcholy stromů zaměřené pomocí výškoměru proto nemohou vždy polohově odpovídat nejvyššímu místu interpolovaného povrchu a vznikají tak chyby až v řádu desítek metrů.

Stanovení výčetní tloušťky na základě regresní analýzy vychází pouze z jediného parametru – výšky stromu. Veškeré nepřesnosti ve výšce stromu proto následně přecházejí při výpočtu i na tuto veličinu. Výsledky porovnání proto také nedosahují příliš kvalitních výsledků s RMSE 8 cm, v případě stromů nad 25 metrů výšky pak okolo 6 cm.

Pro výpočet přesných objemů stromů by bylo nutné změřit více veličin. Objem byl proto statisticky náhodně porovnán pouze na základě tabulek pro výpočet objemu kulatiny s tím, že vypočtené hodnoty odpovídají skutečně zaměřeným stromům.

Při analýze dat pro celý porost o rozloze 8,31 ha bylo identifikováno celkem 4128 stromů o celkové zásobě  $4365 m^3$ , což odpovídá hustotě 496 stromů na hektar a hektarové zásobě  $525 m^3$ . Tyto hodnoty jsou opět v souladu s taxačním tabulkami ÚHÚL i daty lesního hospodářského plánu a chyba určení těchto parametrů nepřekračuje 10 %.

Provedená analýza dat pouze nastiňuje možnosti využití dat LLS. Pro detailní mapování bude dále nutné kombinovat různé datové zdroje za účelem určení druhové skladby porostů na úrovni jednotlivých stromů (např. pomocí metod DPZ), upřesnit a modifikovat modely výškových a objemových křivek pro jednotlivé dřeviny a případně zahrnout více zjistitelných proměnných do těchto modelů (např. šířka koruny).

Přestože při detailním porovnání jednotlivých stromů se může jevit tato metoda určení porostních charakteristik jako nepřesná, při stanovení zásob celých porostů, kde nehrají malé odchylky významnou roli,

však může dosahovat objektivních výsledků, které dokonce mohou být přesnější než data udávaná v rámci LHP a efektivně (opakovatelně) mapovatelná z dat LLS. Praktické uplatnění se nabízí při plánování nejen při tvorbě lesních hospodářských plánů, kde by metoda mohla částečně nahradit, případně zpřesnit taxaci porostů, ale i při plánování obnovy lesa a předběžný výpočet těžené hmoty. Pro vlastníka by takový nástroj umožnil přesnější evidenci dříví, monitoring přírůstu za uplynulé období a detailnější informaci o množství hmoty při obnovních těžbách.

## LITERATURA

- Cibulka, M., Mikita, T. (2011) Přesnost digitálního modelu reliéfu vytvořeného z dat leteckého laserového skenování v lesních porostech. *Geodetický a kartografický obzor*, 57(11): 265-269. ISSN 0016-7096.
- Edson, C. B. (2011) *Light Detection and Ranging (LiDAR): What We Can and Cannot See in the Forest for the Trees*. Dissertation. Oregon State University. 277p.
- Franken, F. (2005) *Neue Techniken in der Walddatenerhebung*. LÖBF NRW, 6 p.
- Halaj, J. (1955) Tabuľky jednotných hmotových kriviek pre určovanie hmoty porastov. *SVPL Bratislava*, 220 s.
- Halaj, J. (1959) Prieskum výškovej vzrastavosti drevín na Slovensku a návrh stupnic výškových bonít. *Lesnický časopis*. 3–4, s. 173–204.
- Heurich, M., Schneider, T., Kennel, E. (2003) Laser scanning for identification of forest structures in the Bavarian forest national park. In: Hyypä, J., Naesset, 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, 98–107. ISSN 1401-1204.
- Heinzel, J., Koch, B. (2011) Exploring full-waveform ALS parameters for tree species classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1): 152-160. ISSN 0303-2434.
- Holopainen, M. (2011) *Effect of airborne laser scanning accuracy on forest stock and yield estimates [doctoral dissertation]*. Helsinki: Department of Surveying, Aalto University, 160 p.
- Holopainen, M., Hyypä, J. (2003) Possibilities with laser scanning in practical forestry. In: Hyypä, J., Naesset, 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, 265–274. ISSN 1401-1204.
- Holopainen, M., Mäkinen, A., Rasinmäki, J. (2009) Effect of tree-level airborne laserscanning measurement accuracy on the timing and expected value of harvest decisions. *European Journal of Forest Research*, 2009, 129(5): 899–907. ISSN 1612-4677.
- 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*.
- Klimánek, M. (2006) Optimization of digital terrain model for its application in forestry. *Journal of Forest Science*, 52(5): 233–241. ISSN 1212-4834.
- 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, p. 227-233, ISSN 1682-1777.
- Leeuwen, M., Nieuwenhuis, M. (2010) Retrieval of forest structural parameters using ALS remote sensing. *European Journal of Forest Research*, 129(4): 749–770. ISSN 1612-4677.
- Maltamo, M., Eerikainen, K., Pitkanen, J., Hyypä, J., Vehmas, M. (2004) Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. *Remote Sensing of Environment*, 90: 319–330.

Maltamo, M., Packalén, P., Suvanto, A. (2009) Combining ALS and NFI training data for forest management planning: a case study in Kuortane, Western Finland. *European Journal of Forest Research*, 128(3): 305–317. ISSN 1612-4677.

Michailoff, I. (1943) Zahlenmäßiges Verfahren für die Ausführung der Bestandeshöhenkurven. *Forstw. Cbl.*, H. 6, s. 273 - 279.

Mikita, T., Klimánek, M., Cibulka, M. (2013) Hodnocení metod interpolace dat leteckého laserového skenování pro detekci stromů a měření jejich výšek, *Zprávy lesnického výzkumu*, ISSN 0322-9688 [v tisku].

Naslund, M. (1947) Functions and Tables for Computing the Cubic Volume of Standing Trees: Pine, Spruce and Birch in Southern Sweden and in the Whole of Sweden, Report 36, National Forest Research Institute, Stockholm, Sweden, 81 p.

Petráš, R., Pajtík, J. (1991) Sústava česko-slovenských objemových tabuliek drevín. *Lesnícky časopis*, 37, (1), s. 49-56.

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): 527–535.

Straub, Ch., 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*.

Šmelko, Š., Pánek, F., Zanvit, B. (1987) Matematická formulácia systému jednotných výškových kriviek rovnovekých porastov SSR. *Acta Facultatis Forestalis Zvolen*, XXIV, s. 151-173.

Tonolli, S., Dalponte, M., Vescovo, L. (2010) Mapping and modeling forest tree volume using forest inventory and airborne laser scanning. *European Journal of Forest Research*, 130(4): 569–577. ISSN 1612-4677.

Vauhkonen, J., Tokola, T., Maltamo, M. (2009) Applied 3D texture features in ALS based forest inventory. *European Journal of Forest Research*, 129(5): 803–811. ISSN 1612-4677.