

## HODNOCENÍ METOD INTERPOLACE DAT LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ PRO DETEKCI STROMŮ A MĚŘENÍ JEJICH VÝŠEK

### EVALUATION OF INTERPOLATION METHODS OF AIRBORNE LASER SCANNING DATA FOR DETECTION OF TREES AND THEIR HEIGHTS

TOMÁŠ MIKITA - MARTIN KLIMÁNEK - MILOŠ CIBULKA

*Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Brno*

#### ABSTRACT

This article focuses on the potential of airborne laser scanning data (ALS) in forestry for measuring tree heights and subsequent determination of the total number of individual trees in forest stands. We evaluated different methods of ALS data interpolation acquired with Leica ALS50 -II scanner to a digital surface model (DSM) form. Evaluation was carried out on the basis of the accuracy of elevation models and the determination of total number of trees in forest stands. Results are compared with position and height of the trees acquired by terrain measurement on research plots of 1.25 ha. On these plots the position of all trees and their heights were surveyed using the total station. Firstly, the altitudinal accuracy of ALS for the creation of DSM was evaluated, derived from comparison with terrain measurement. Subsequently, tree tops were detected using hydrological modeling tools in ESRI ArcGIS software and compared with total number of trees on the plots. In accordance with previously published works, our results show that the ALS data interpolations to DSM always underestimate tree heights; when working with DSM of vegetation it is always necessary to use the smoothing filter. When the tree tops and the associated determination of the number of trees are detected in the forest stands it is crucial to choose suitable interpolation and cell size of the resulting grid.

**Klíčová slova:** LIDAR, letecké laserové skenování, výška stromu, digitální model terénu, digitální model povrchu

**Key words:** LIDAR, airborne laser scanning, tree height, digital elevation model, digital surface model

#### 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 současné získávání informací jak o zemském povrchu, tak o objektech, které se na něm a nad ním nacházejí (budovy, vegetace). S rozvojem 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 pro následný výpočet výšky stromů a jejich celkového počtu.

LLS je založeno na principu analýzy svazku laserových paprsků, který je vyslán z nosiče pohybujícího se v určité vzdálenosti od snímaného objektu. U každého laserového paprsku, který je vyslán ze zdroje, je současně zaznamenána jeho aktuální poloha v prostoru pomocí diferenciální GPS a inerciální navigace (IMU). Paprsek dopadne na objekt a odráží se v podobě echa zpět k senzoru, přičemž je změřena vzdálenost, kterou urazil. Paprsek se odráží od každé plošky objektu, čímž se vytváří posloupnost ech od nejvyšších (senzor nejblíže) odrazových ploch po nejnižší, za účelem vytvoření hustého pole zeměpisných souřadnic v místech, kde se laserové pulsy odrazily od povrchu (BALTSVIAS 1999).

Letecké laserové snímače vysílají krátké laserové impulzy (cca 10 ns) o vlnové délce nejčastěji 1040–1060 nm a divergenci paprsku < 1 mrad směrem k zemskému povrchu v rovině kolmé ke směru letu. V závislosti na výšce letu se může přijatelný průměr stop pohybovat v rozmezí od 0,1 m do téměř 4 m. Extrémní zorný úhel napříč letu se podle typu skeneru pohybuje od 45° do 75°. LLS je možné použít jak během dne, tak během noční doby, pod oblačností a při slabé sněhové pokrývce, avšak nelze jej použít za deště nebo sněžení.

Laserové snímání klade vysoké nároky na zpracovatelské možnosti dostupné techniky, neboť pořízených dat je při vysoké podrobnosti snímání značné množství. Získaná data (mračno bodů) se zpravidla zpracovávají dvěma základními metodami: filtrací (má za úkol oddělit body odpovídající požadovanému objektu) a klasifikací (kdy se třídí jednotlivé povrchy). Tyto procesy mohou být automatické nebo poloautomatické, neboť čistě automatizovaná filtrace a klasifikace neposkytuje v mnoha případech optimální výsledky. Využívá se zonálních a globálních filtrů, přičemž největší rozdíly jsou mezi typy krajinného pokryvu, reprezentující intravilán a souvislou vegetaci (JACOBSEN, LOHMANN 2003).

V lesnictví je LLS používán zejména ke třem typům úloh:

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

Využitím technologie LLS mohou být různé lesnické činnosti provedeny rychleji a efektivněji (AKAY et al. 2009; ENSSLE, WEINACKER 2010). 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 odhadnout některé parametry jednotlivých stromů nebo i porostů (HOLOPAINEN, HYYPPÄ 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 ALS), tedy nejen z diskretních odrazů a jejich intenzit (HEINZEL, KOCH 2011). Použitím posledního odrazu může být interpolován digitální model terénu (DMT) velmi vysoké kvality s prostorovým rozlišením 1 m a výškovou přesností 0,1 až 0,2 m (REUTEBUCH et al. 2003). Takovýto DMT může pomoci navrhnout nové terénní klasifikace těžebně-dopravních technologií s ohledem na možnosti harvesterových systémů nebo navrhnout a optimalizovat lesní dopravní síť (AKAY, SESSIONS 2005).

Kvalita a přesnost získaných informací souvisí s postupy zpracování dat laserového skenování. Jde zejména o filtraci a klasifikaci měřených dat a rovněž o varianty prostorové interpolace filtrovaných (a klasifikovaných) dat do podoby digitálních modelů terénu či povrchu (KLIMÁNEK 2006; CIBULKA, MIKITA 2011). Poměr polohové a výškové chyby se obecně pohybuje v rozsahu 2:1 až 5:1. Při sklonu reliéfu do 30° je výšková přesnost vždy vyšší než u digitálních fotogrammetrických metod, ovšem polohová přesnost je vždy výrazně horší než výšková (ŠÍMA 2009).

LLS přináší kvantitativně i kvalitativně nový pohled na data získávaná primárně z prostředí lesních ekosystémů. Je to už zmíněný DMT a DMP a potom zejména dendrometrické stromové nebo porostní charakteristiky (především jde o tloušťku, výšku a objem stromů, zápoj a zakmenění, střední a horní výšku porostu, kruhovou základnu a zásobu porostu).

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, SEITZ 2011; KIRÁLY et al. 2011; LEEUWEN, 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. 2010; HOLOPAINEN 2011). Zásobu porostu lze zjistit s přesností 5 až 35 % (MALTAMO et al. 2009; TONOLLI et al. 2010; VAUHKONEN et al. 2010), přičemž jsou tyto hodnoty závislé na vertikální a horizontální struktuře porostu, sklonu terénu a hustotě mračna bodů LLS. Data LLS se také používají jako podpůrné datové sady při klasifikaci dřevin; vysoké správnosti klasifikace dosahují tato data pouze při dichotomickém rozlišování jehličnatých a listnatých dřevin (LIANG et al. 2007). Při klasifikaci dřevin se tato data chovají jinak pro olistěný a pro neolistěný porost. Vysoké správnosti klasifikace (přes 90 %) je dosahováno při použití obou typů dat; při použití dat mimo vegetační období je přesnost klasifikace vyšší – cca 85 % oproti 75 % ve vegetačním období (SOOYOUNG et al. 2009). Jednoznačným faktem potom je, že v porostech s bohatou strukturou se nepodaří identifikovat všechny jednotlivé stromy, ale jen 35 až 45 % jedinců (KVAK et al. 2007; MONNET et al. 2010). To také dále znamená, že výška kmenů je systematicky podhodnocována, v rozmezí 1 až 5,5 m (KVAK et al. 2007; IOKI et al. 2009; HOLLAU et al. 2011). Pokud jsou navíc takovéto porosty na svazích, tak se zvyšujícím se sklonem vzniká opačný trend vývoje systematické chyby.

Současná aplikace LLS v podmínkách lesních porostů závisí od parametrů snímání (výšky letu a rychlosti letu) a dále od vlastností terénu (LIM et al. 2008). Obvykle se tyto parametry zohledňují tak, aby v „normálních“ podmínkách zalesněných oblastí byla hustota 3–5

bodů na 1 m<sup>2</sup>, přičemž je dosahováno průměrné přesnosti v poloze 0,3 m a ve výšce 0,15 m. Technologie LLS jednoznačně zvyšuje ekonomickou efektivnost získávaných dat, která při celoplošných inventarizačních šetřeních (v rozsahu stovek tisíc hektarů) mohou přinést v optimálních podmínkách úsporu až 40 % prostředků oproti terestrickým metodám.

## MATERIÁL A METODIKA

### Terénní zaměření výzkumných ploch

Hodnocení přesnosti dat LLS proběhlo na několika výzkumných plochách na území Školního lesního podniku Masarykův les Křtiny (ŠLP Křtiny), který má rozlohu přes 10 tis. ha a je organizační součástí Mendelovy univerzity v Brně. Slouží zejména její Lesnické a dřevařské fakultě k zajišťování pedagogických, výzkumných, poloprovozních a ověřovacích úkolů; vedle této hlavní činnosti zajišťuje ŠLP Křtiny i běžnou lesní výrobu.

Pro hodnocení byla použita data LLS od firmy GEODIS Brno z roku 2009. Skenování bylo provedeno ve vegetačním období skenerem s diskretním odrazem Leica ALS50-II z letové výšky 1395 m s průměrnou hustotou 4,3 bodu na m<sup>2</sup>.

Pro porovnání přesnosti leteckého laserového skenování byly zaměřeny celkem 3 výzkumné plochy o celkové rozloze 1,25 ha (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. Druhá skladba na všech plochách byla obdobná s převahou buku (40–50 %) s podílem smrku (10–30 %) a s menším podílem dubu, jehle, modřínu a habru. Střední výška všech zaměřených dřevin byla 27 metrů. 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. Celkem byla zaměřena plocha a nadmořská výška 600 stromů.

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 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. Výsledky měření z totální stanice byly převedeny do podoby bodové shapefile vrstvy s přiřazením atributů měřené výšky u každého ze stromů.

### Zpracování dat LLS

Data LLS byla poskytnuta ve formátu LAS 1.2 a pro využití v GIS dále zpracovávána pomocí dvou rozdílných softwarů. Nejprve v softwaru TerraScan (nastavba Microstation V8i) finské firmy TerraSolid a následně v softwaru LIDAR Analyst (nastavba ESRI ArcGIS) firmy Overwatch Software.

Software LIDAR Analyst umožňuje přímé zpracování surových dat v LAS formátu a jejich interpolaci do podoby rastrových vrstev prvního a posledního odrazu, holého povrchu bez vegetace a dalších objektů, intenzity či vektorových vrstev vegetace, budov a stromů. Oproti

TerraScanu je většina úkonů plně automatizovaných s možností pouze několika modifikací používaných nástrojů. Výhodou je zmíněná okamžitá interpolace, díky níž je výstupem přímo DMT či DMP v rastrové podobě pro další zpracování.

Software TerraScan je primárně určen ke klasifikaci a filtraci bodových mračen z leteckého i pozemního skenování a kromě filtrace prvního a dalších odrazů a detekce bodů terénu umožňuje i detekci nízké, střední a vysoké vegetace, pevných povrchů, budov či elektrického vedení. Výstupem zpracování v softwaru TerraScan byly body klasifikovány do 2 kategorií (první odraz a holý povrch) v LAS formátu, které se následně importovaly do prostředí softwaru ArcGIS. Bylo tak získáno mračno bodů, které se dále interpolovalo do podoby DMP různými interpolačními technikami s různou velikostí buňky rastru (0,5 a 1 metr). Pro interpolaci bodů byly použity interpolační metody Spline, IDW, Natural Neighbour, Krigování a dále nástroj Point Statistics. Výsledky interpolace (kromě Point Statistics) byly vyhlazeny pomocí filtrace nástrojem Focal Statistics s vyhledáváním maximální hodnoty výšky v kruhovém okolí 1 metru od každé buňky rastru (obr. 2).

Výsledné hodnoty interpolovaných DMP byly přiřazeny k bodové vrstvě stromů a byl spočítán rozdíl nadmořských výšek vrcholu stromu, zaměřeného pomocí totální stanice a výškoměru a interpolované hodnoty z dat LLS. Pro rozdíly všech stromů byly spočteny základní statistické charakteristiky – počet případů, minimální a maximální odchylka, systematická chyba, směrodatná odchylka a střední kvadratická chyba (tab. 1).

Poslední metodou hodnocení přesnosti dat LLS bylo přiřazení nejbližšího bodu LLS k vrcholům zaměřených stromů v trojrozměrném prostoru (nástroj Spatial Join – nastavení Intersect 3D) s maximální vzdáleností nejprve do 1, 2 a 3 metrů.

V práci nebyla řešena skutečná výška stromů, která by vznikla odečtením povrchu terénu od povrchu vegetace, neboť pro daný účel by vlivem rozdílných interpolací povrchu mohlo dojít k dalším rozdílům

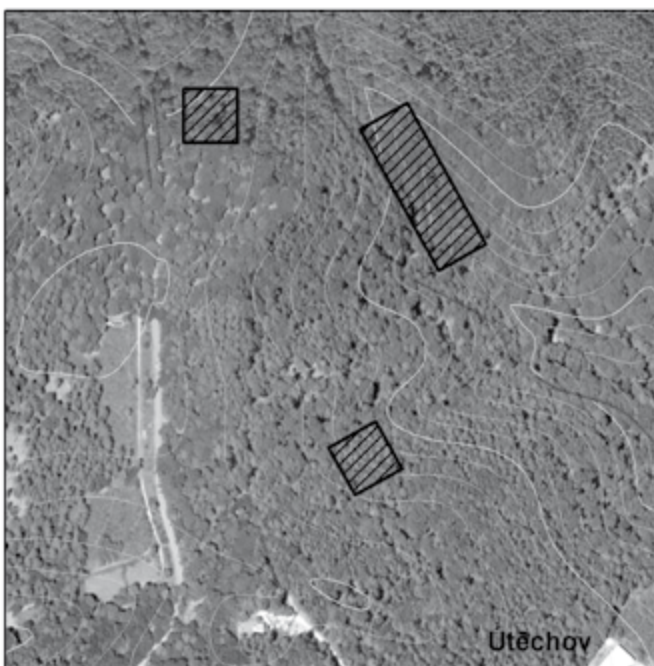
mezi různě interpolovaným povrchem vegetace a povrchem terénu. Přesností interpolace DMT z dat LLS na těchto výzkumných plochách se již dříve zabýval CIBULKA, MIKITA (2011).

### Detekce vrcholů stromů

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), která zabraňují odtoku. Pro výpočet bylo nutné vytvořit převrácený rastr (vynásobením hodnotou -1), 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 DMP do atributové tabulky bodové vrstvy.

## VÝSLEDKY

Výsledky v souladu s literaturou potvrzují podhodnocení výšek u vytvořených digitálních modelů povrchu porostů v rozsahu od 6,8 do 8,1 metrů při zvažování všech stromů v porostu (tab. 1). Tyto hodnoty jsou značně ovlivněny výskytem stromů v podúrovni, kde dochází k enormnímu nárůstu chyby, což dokazují také maximální a minimální odchylky dosahující hodnot až 30 metrů rozdílu (tab. 1). Celkově je možné konstatovat, že kromě zmíněného podhodnocení výšek při modelování povrchu vegetace je střední kvadratická chyba (Root Mean Square Error – RMSE) u všech použitých metod velmi podobná a liší se v řádu desetin až jednotek metrů, pouze použití metody Spline není při hustotě bodů LLS možné; výsledný model nebyl pro nepřesnost použit do srovnání. U všech aplikovaných metod se vždy výrazně



**Obr. 1.**  
Lokalizace výzkumných ploch  
**Fig. 1.**  
Location of research sites



**Obr. 2.**  
Ukázka interpolovaného rastru nástrojem Natural Neighbour dále vyhlazeného nástrojem Focal Statistics  
**Fig. 2.**  
Example of interpolated raster by Natural Neighbour consequently smoothed by Focal Statistics

**Tab. 1.**

Porovnání výšek vrcholů zaměřených stromů a interpolovaných DMP (ps – nástroj Point Statistics; NN – interpolace Natural Neighbour; idw – metoda inverzní vzdálenosti; fr – první odraz LIDAR Analyst; krig – krigování; \*foc – filtrovaný rastr)

Comparison of measured tree top heights and heights generated from interpolated digital surface models (ps – Point Statistic; nn – Natural Neighbour; idw – Inverse distance weighted; fr – first return LIDAR Analyst; krig – kriging; \*foc – filtered raster)

Metoda/Method	Počet stromů/ Number of trees	Min	Max	Syst. chyba/Bias	Směrodatná od- chyška/Standard deviation	RMSE
ps1	600	-30,733	21,231	-2,986	6,875	7,495
ps05	600	-31,833	13,542	-4,062	6,911	8,017
nn05	600	-28,576	31,241	1,479	8,027	8,162
nn05foc	600	-29,430	26,074	-1,413	6,918	7,060
nn1	600	-26,982	29,831	1,148	7,534	7,621
nn1foc	600	-29,667	17,660	-2,056	6,785	7,089
idw05	600	-27,182	34,117	1,528	7,943	8,089
idw05foc	600	-28,599	23,547	-1,013	6,896	6,970
idw1	600	-26,952	30,071	1,097	7,493	7,573
idw1foc	600	-28,920	17,602	-1,661	6,747	6,949
fr1	600	-29,174	27,431	-1,036	7,241	7,315
fr1foc	600	-29,749	14,332	-2,548	6,890	7,346
fr05	600	-29,012	30,175	-0,937	7,512	7,570
fr05foc	600	-29,635	20,027	-2,177	6,944	7,277
krig05	600	-27,362	31,856	1,126	7,200	7,287
krig05foc	600	-27,713	25,807	-0,093	6,963	6,964
krig1	600	-26,719	27,281	1,006	7,071	7,142
krig1foc	600	-28,170	15,079	-0,894	6,802	6,860

**Tab. 3.**

Porovnání výšek vrcholů zaměřených stromů s nejbližšími body LLS ve 3D prostoru – různé okolí

Comparison of measured tree top heights with closest points of airborne laser scanning – different ranges

Metoda/Method	Počet stromů/ Number of trees	Min	Max	Syst. chyba/Bias	Směrodatná od- chyška/Standard deviation	RMSE
3D_1m	200	-0,960	0,953	0,014	0,495	0,495
3D_2m	422	-1,950	1,919	0,170	0,893	0,909
3D_3m	510	-2,770	2,920	0,342	1,271	1,316

**Tab. 2.**

Výsledky porovnání výšek vrcholů zaměřených stromů a interpolovaných DMP – porovnání stromů nad 25 metrů výšky

Comparison of measured tree top heights and heights generated from interpolated digital surface models – trees higher than 25 meters

Metoda/Method	Počet stromů/ Number of trees	Min	Max	Syst. chyba/Bias	Směrodatná od- chyška/Standard deviation	RMSE
ps1	429	-9,180	21,231	0,033	3,837	3,837
ps05	429	-10,535	13,542	-0,918	3,638	3,752
nn05foc	429	-8,736	26,074	1,555	4,273	4,547
nn1	429	-8,401	29,831	4,083	5,391	6,763
nn1foc	429	-9,045	17,660	0,958	3,801	3,920
idw05	429	-8,165	34,117	4,485	6,073	7,550
idw05foc	429	-8,481	23,547	1,911	4,249	4,659
idw1	429	-8,274	30,071	4,092	5,391	6,769
idw1foc	429	-8,808	17,602	1,328	3,837	4,060
fr1	429	-8,058	27,431	1,987	4,837	5,229
fr1foc	429	-8,883	14,332	0,542	3,892	3,929
fr05	429	-8,073	30,175	2,140	5,302	5,717
fr05foc	429	-8,347	20,027	0,861	4,090	4,180
krig05	429	-8,105	31,856	4,014	4,921	6,350
krig05foc	429	-8,299	25,807	2,833	4,443	5,270
krig1	429	-7,804	27,281	3,887	4,788	6,167
krig1foc	429	-8,465	15,079	2,072	3,997	4,502

**Tab. 4.**

Počet detekovaných stromů  
Number of detected trees

Metoda/ Method	Počet detekovaných stromů/ Number of detected trees
ps1	108
ps05	458
nn05foc	630
nn1foc	201
idw05foc	626
idw1foc	198
fr1foc	168
fr05foc	519
krig05foc	471
krig1foc	167

chyba zmenšila při použití fokální filtrace povrchu pomocí maximálního filtru, kdy je kromě vyhlazení povrch také mírně navýšen. Systematická chyba kolísá mezi -4 až +1,5 metry v závislosti na použité metodě, nejčastější je okolo 1 metru. Výsledky hodnocení přesnosti se výrazně zlepšují při výběru stromů v úrovni až nadúrovni (vyšších jak 25 metrů; viz tab. 2), kde je velmi výrazně znát rozdíl povrchů bez filtrace (okolo 4 metrů rozdílu) a s filtrací (okolo 7 metrů). Nejlepších výsledků při hodnocení všech stromů dosáhla metoda krigování při použití buňky o velikosti 1 metru, při hodnocení stromů nad 25 metrů výšky pak nejlepší výsledky vykazuje metoda Point Statistics při rozlišení 0,5 metrů. Kompletní hodnocení střední kvadratické chyby u použitých metod interpolace znázorňuje obr. 3.

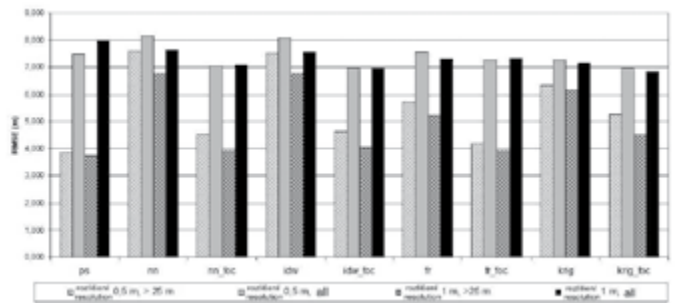
Naprosto nejlepší výsledky vykazuje metoda přiřazení nejbližšího bodu LLS k vrcholu koruny stromu ve 3D prostoru, kde při definovaném okolí 1 metru od vrcholů stromů bylo nalezeno vlivem malé hustoty dat LLS 200 nejbližších bodů s RMSE pod 0,5 metru, při definovaném okolí 2 a 3 metrů se zvýšil počet nalezených vzdálenějších bodů, chyba sice mírně vzrostla, stále však dosahuje pod 1,5 metru (tab. 3).

Dalším z výstupů analýzy dat LLS byly vrcholy stromů identifikovány pomocí hydrologických nástrojů. Hodnoceny již byly pouze rastrové povrchy, které byly vyhlazeny filtrací; nefiltrovaná data není možné pro tento účel použít. Při identifikaci vrcholů stromů hraje mnohem větší roli rozlišení rastru. Při použití rastru s nižším rozlišením byl vždy bez ohledu na použitou metodu detekován pouze malý počet stromů. Nejvíce se celkovému množství zaměřených stromů na plochách blíží metoda interpolace IDW a dále Natural Neighbour, které byly schopné detekovat 626, respektive 630 stromů na ploše (tab. 4). Ostatní metody vykazaly výrazně nižší počty stromů, ve všech případech pak bylo dosaženo lepších výsledků při použití dat s lepším rozlišením (0,5 metru).

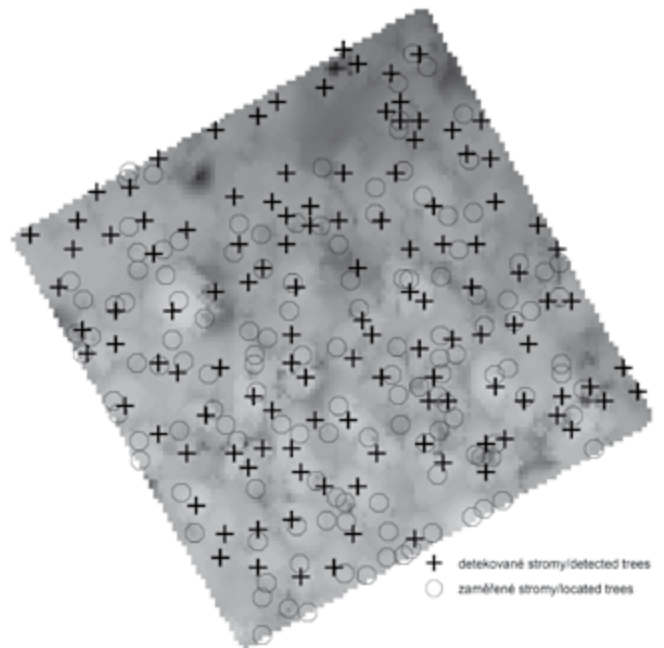
**DISKUSE**

Při hodnocení vertikální přesnosti dat LLS pro tvorbu digitálních modelů povrchu vegetace a odvození výšky dřevin nebylo na první pohled dosaženo příliš kvalitních výsledků, neboť vypočtená střední kvadratická chyba dosahuje průměrně (podle zvolené metody) okolo 7 metrů. Tato nepřesnost je však dána řadou faktorů. Jedním z nich je zmíněný vliv stromů v podúrovni, které buď nebyly zachyceny při skenování vůbec, nebo byly tyto body potlačeny vlivem interpolace či následné filtrace. Jak je viditelné z hodnocení stromů nad 25 metrů výšky, při zvažování pouze úrovnových a nadúrovnových stromů se přesnost zvýší na hodnoty okolo 4 metrů. Samotná přesnost vytvořených modelů je jak z vizuálního hodnocení (obr. 2), tak z porovnání nejbližších bodů (tab. 3) 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. Jedinou přesnou srovnávací metodou by bylo manuální vyhledání totožných stromů a porovnání jejich parametrů, což není u větších statistických souborů (celkem 600 stromů) technicky možné. Vzhledem k celkovému podhodnocení výšek u všech vytvořených DMP by bylo možné také usoudit na jistou chybu v měření s výškoměrem, nicméně z porovnání nejbližších bodů vyplývá, že v nejbližším okolí vrcholů stromů se nachází do vzdálenosti 2 metrů vždy libovolný bod LLS s maximálním výškovým rozdílem do 1 metru. Tento závěr potvrzují také vypočtené systematické chyby, které dosahují minimálních hodnot v řádu desetin metru.

V případě mračen bodů LLS nehraje zvolená metoda interpolace, ani rozlišení rastru zásadní roli, dochází zde pouze k nepatrným odchylkám v celkové přesnosti. Naopak je tomu při detekci jednotlivých stromů, kde jak interpolační metoda, tak výsledné rozlišení mají zcela zásadní význam pro úspěšné zjištění polohy stromů a s tím spojeného určení počtu stromů na ploše. Jak je patrné z obr. 4, poloha detekovaných stromů se oproti zaměřeným stromům liší zmíněným vlivem křivosti kmene. Skupinky stromů mohou být touto metodou sloučeny do jediného stromu, nebo naopak – především u listnatých dřevin s velkou korunou – může být jeden strom nahrazen více detekovanými. Množství chyb na okrajích plochy je dáno opět nesouměrností kmenů a částečně může být zaviněno i chybami v prostorové transformaci měřených dat či dat LLS. Přes uvedené výhrady je možné použít tuto metodu pro další odhad porostních charakteristik, neboť v případě určování počtu stromů na úrovni porostů o výměře několika hektarů jsou tyto chyby zanedbatelné. Z celkového hodnocení



**Obr. 3.** Srovnání RMSE u použitých metod interpolace  
**Fig. 3.** Comparison of RMSE in different interpolation methods



**Obr. 4.** Znázornění detekovaných a zaměřených stromů na podkladu interpolovaného povrchu  
**Fig. 4.** Visualization of detected and measured trees on the background of interpolated surface model

přesnosti i vhodnosti interpolačních metod pro určení počtu stromů a jejich výšek nejlépe vychází v kombinaci obou úkolů metoda IDW s rozlišením 0,5 metru s následným vyhlazením pomocí fokálních filtrů, která při relativně dobré přesnosti digitálního modelu povrchu zaručuje kvalitní detekci stromů. Z dalších metod je možné využít s podobnými výsledky i metodu Natural Neighbour, uspokojivé byly také výsledky metody Point Statistics softwaru ArcGIS a generování povrchu pomocí prvního odrazu v softwaru LIDAR Analyst. Výhodou nástroje Point Statistics je okamžitá interpolace dat včetně vyhlazení, výhodou LIDAR Analyst je přímé zpracování dat v jednom softwaru do finální rastrové podoby.

## ZÁVĚR

Data leteckého laserového skenování jsou kvalitním podkladem pro tvorbu digitálních modelů povrchu za účelem detekce stromů, určení jejich výšky a celkového počtu na ploše. Pro kvalitní DMP je potřeba pracovat s daty s dostatečnou hustotou bodů (minimálně okolo 5 bodů na m<sup>2</sup>). Při interpolaci do podoby DMP vždy dochází k podhodnocení oproti skutečnosti. Optimální metodou interpolace je IDW, která dosahuje relativně dobrých výsledků přesnosti a zároveň nejlepších výsledků pro detekci jednotlivých stromů. Pro dané úkoly je optimální rozlišení DMP 0,5 metru a pro další práci je vždy nutné provést vyhlazení dat pomocí filtrace. Lépe je možné zachytit stromy v úrovni a v nadúrovni, podúrovňové stromy jsou zanedbány vlivem interpolace a filtrace. Z komplexního hodnocení náročnosti výpočtů vychází nejlépe použití aplikací LIDAR Analyst pro ArcGIS, která je schopna souběžně vytvářet rastrové digitální modely terénu i povrchu, dále analyzovatelné v prostředí GIS, oproti zpracování mračna bodů v softwaru TerraScan, kde je nutné provést klasifikaci bodů, jejich filtraci, import do formátů ESRI a následnou interpolaci do rastrové podoby. Nevýhodou LIDAR Analystu je menší možnost kontroly výsledků a také vyšší automatizace celého procesu snižující možnosti modifikací.

### Poděkování:

V textu jsou publikovány výsledky, které vznikly za podpory z výzkumného záměru LDF Mendelovy univerzity v Brně MSM6215648902 „Les a dřevo – podpora funkčně integrovaného lesního hospodářství a využívání dřeva jako obnovitelné suroviny“.

## LITERATURA

- AKAY A.E., SESSIONS J. 2005. Applying the decision support system, TRACER, to forest road design. *Western Journal of Applied Forestry*, 2005, 20 (3): 184–191.
- AKAY A.E., OGUZ H., KARAS I.R., ARUGA K. 2009. Using ALS technology in forestry activities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 151: 117–125.
- BALTSAVIAS E.P. 1999. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54: 164–198.
- 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.
- 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. Proquest, UMI Dissertation Publishing: 277 s.
- ENSSLE F., WEINACKER H. 2010. SilviLaser 2010 – Punktwolken bringen Licht in den Wald. *AFZ Der Wald*, 65 (21): 4–5.
- FRANKEN F. 2005. Neue Techniken in der Walddatenerhebung. [online]. *LÖBF NRW*: 6 p. [cit. 1. srpna 2012]. Dostupné na World Wide Web: [http://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/media/Dokumente/IMPORT/Walddatenerhebung\\_Franken\\_2005.pdf](http://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/media/Dokumente/IMPORT/Walddatenerhebung_Franken_2005.pdf)
- 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.
- HEURICH M., SCHNEIDER T., KENNEL E. 2003. Laser scanning for identification of forest structures in the Bavarian forest national park. In: Hyyppä, J. et al. (eds.): *Proceedings of the ScandLaser scientific workshop on airborne laser scanning of forests*. Umeå, Sweden, Swedish University of Agricultural Sciences: 98–107.
- HOLLAUS M., EYSN L., BAUERHANSL CH., RICCABONA F., MAIER B. 2011. Accuracy assessment of ALS-derived stem volume and biomass maps. In: 1<sup>st</sup> Forestry Workshop. Operational remote sensing in forest management. Prague, 02–03 June, 2011. [Poster presentation]. Dostupné na World Wide Web: <http://pub-geo.tuwien.ac.at/showentry.php?ID=199998&lang=6&nohtml=1> [cit. 01. srpna 2012]
- HOLOPAINEN M., HYYPPÄ J. 2003. Possibilities with laser scanning in practical forestry. In: Hyyppä, J. et al. (eds.): *Proceedings of the ScandLaser scientific workshop on airborne laser scanning of forests*. Umeå, Sweden, Swedish University of Agricultural Sciences: 265–274.
- HOLOPAINEN M. et al. 2010. Effect of tree-level airborne laser scanning measurement accuracy on the timing and expected value of harvest decisions. *European Journal of Forest Research*, 129 (5): 899–907.
- HOLOPAINEN M. 2011. Effect of airborne laser scanning accuracy on forest stock and yield estimates. Helsinki, Aalto University: 86 s. Doctoral Dissertations 6/2011.
- 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): 29–36.
- JACOBSEN K., LOHMANN P. 2003. Segmented filtering of laser scanner DSMS. In: 3-D reconstruction from airborne laser scanner and Invar data. 8–10 Oct, Dresden. [6 s]. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIV, part 3/W13*. Dostupné na World Wide Web: [http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/3-W13/papers/Jacobsen\\_ALSDD2003.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/3-W13/papers/Jacobsen_ALSDD2003.pdf)
- KIRÁLY G., BROLL G., VITÁNYI M. 2011. Comparison and possible use of digital surface models (DSMs) in a multifunctional forest. In: 1<sup>st</sup> Forestry Workshop. Operational remote sensing in forest management. Prague, 02–03 June, 2011. [Abstract] [1 s].
- KLIMÁNEK M. 2006. Optimization of digital terrain model for its application in forestry. *Journal of Forest Science*, 52 (5): 233–241.
- KORPELA I. et al. 2007. Single-tree forest inventory using ALS and aerial images for 3D treetop positioning, species recognition, height and crown width estimation. In: Rönnholm, P. et al. (eds.): *Laser scanning 2007 and Silvilaser 2007*. Espoo, Finland, 12–14 September 2007. Helsinki, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, University of technology: 277–233. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, XXXVI, part 3/W52*.
- 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): 425–434.

- LEEUEWEN M., NIEUWENHUIS M. 2010. Retrieval of forest structural parameters using ALS remote sensing. *European Journal of Forest Research*, 129 (4): 749–770.
- LIANG X., HYYPÄÄ J., MATIKAINEN L. 2007. Deciduous-coniferous tree classification using difference between first and last pulse laser signatures. In: Rönnholm, P. et al. (eds.): *Laser scanning 2007 and Silvilaser 2007*. Espoo, Finland, 12–14 September 2007. Helsinki, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, University of technology: 253–257. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXVI, part 3/W52.
- LIM K., HOPKINSON C., TREITZ P. 2008. Examining the effects of sampling point densities on laser canopy height and density metrics. *Forestry Chronicle*, 84 (6): 876–885.
- MALTAMO M., EERIKAINEN K., PITKANEN J., HYYPPÄ 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.
- MONNET J.-M., MERMIN E., CHANUSSOT J. 2010. Estimation of forestry parameters in mountainous coppice stands using airborne laser scanning. In: 10<sup>th</sup> International conference on LIDAR applications for assessing forest ecosystems, *Silvilaser 2010*. September 14–17, 2010, Freiburg, Germany. [8 s]. Dostupné na World Wide Web: <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/52/32/48/PDF/GR-2010-PUB00029357.pdf>
- 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.
- SOOYOUNG K., MCGAUGHEY R. J., ANDERSEN H.E., SCHREUDER G. 2009. Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 113 (8): 1575–1586.
- 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. In: 1<sup>st</sup> Forestry Workshop. Operational remote sensing in forest management. Prague, 02–03 June, 2011. [Abstract]. [1 s].
- ŠÍMA J. 2009. Abeceda leteckého laserového skenování. *GeoBusiness*, 3: 22–25.
- 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.
- VAUHKONEN J., TOKOLA T., MALTAMO M. 2010. Applied 3D texture features in ALS based forest inventory. *European Journal of Forest Research*, 129 (5): 803–811.

## EVALUATION OF INTERPOLATION METHODS OF AIRBORNE LASER SCANNING DATA FOR DETECTION OF TREES AND THEIR HEIGHTS

### SUMMARY

This article focuses on evaluation of the use of airborne laser scanning (ALS) in forestry for determination of tree heights and the subsequent determination of the total number of individual trees in forest stands.

Different methods of ALS data interpolation acquired by means of Leica ALS50 -II scanner to a digital surface model (DSM) form were tested and evaluated. We used different softwares for data classification and filtration to get a DSM. Firstly, the TerraScan software (Microstation extension) for classification of point clouds was used. Subsequently, the classified point clouds were interpolated to DSM by the following interpolation methods: IDW, Spline, Kriging, and Point Statistics Tool in ArcGIS 10 software. Secondly, the complex application for ALS data processing called LIDAR Analyst (ArcGIS 10 extension) was used. Results of interpolation were compared with position and height of the trees acquired by means of terrain measurement on research plots of 1.25 ha (Fig.1). Consequently, basic statistical characteristics such as maximum, minimum, mean and root mean square error (RMSE) were calculated (Tab. 1 and 2).

Firstly, altitudinal accuracy of ALS for the creation of DSM was evaluated, derived from the comparison with terrain measurement. Subsequently, tree tops were detected using hydrological modeling tools in ESRI ArcGIS software and compared with total number of trees on the plots. The results show that the airborne laser scanning data is a high-quality source for the creation of digital surface models for the detection of trees as well as for determination of tree heights and the total number of individual trees in forests. For DSM quality it is necessary to have data of sufficient point density (at least around 5 points per m<sup>2</sup>). ALS data interpolation to DSM always underestimates heights compared with reality (Tab. 1). Inverse Distance Weighted interpolation (IDW) is an optimal method that achieves rather good accuracy and the best results for individual trees detection. For given tasks the optimal resolution for DMP creation is 0.5 m, and for further work it is always necessary to smooth the data by filtration. ALS data give better results for detection of higher trees; shorter trees are neglected due to interpolation and the error filtration (Tab. 2). The comprehensive evaluation shows that the best performance has extension LIDAR Analyst for ArcGIS, which is simultaneously able to generate rasters of digital terrain and surface models further analyzable in GIS environment. In Terra Scan software it is necessary to classify and filter points, then import into ESRI formats and subsequently interpolate to raster format. The disadvantage of LIDAR Analyst lies in its less flexibility when it comes to reviewing results and errors.

Recenzováno

---

#### ADRESA AUTORŮ/CORRESPONDING AUTHORS:

Ing. Tomáš Mikita, Ph.D., Ing. Martin Klimánek, Ph.D., Ing. Miloš Cibulka, Ph.D.  
Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav geoinformačních technologií  
Zemědělská 3, 613 00 Brno, Česká republika  
tel.: +420 545 134 015; email: tomas.mikita@mendelu.cz, klimanek@mendelu.cz, cibulka@mendelu.cz