

VYUŽITÍ PLOŠNÉHO PŘÍSTUPU KE ZPRACOVÁNÍ DAT LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ V INVENTARIZACI LESA

USE OF AREA-BASED APPROACH TO PROCESS THE AIRBORNE LASER SCANNING DATA IN FOREST INVENTORY

ZDENĚK PATOČKA ✉ - TOMÁŠ MIKITA

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

✉ e-mail: xpatock2@mendelu.cz

ABSTRACT

Area-based approach of forest inventory is the statistical method, where the features and predictors are assessed from the laser derived surface models and point clouds, which are directly used for forest parameters estimation, typically using linear regression or k-nearest neighbor imputation method. Collecting of field data for the creation of model for forest stand volume estimation was carried out at the Training Forest Enterprise, Křtiny (Czech Republic). In total, 43 plots with a radius of 12.62 m were selected, and diameters at breast-height and heights of all trees were measured on each of them. Selected LiDAR metrics calculated in FUSION software were used as independent variables for the creation of linear regression equations. Multivariate linear regression models were created using the software QC Expert for all forest variables. Models for volume and basal area estimation explained 82% or 72% of all cases. Regression triplet was tested for the final regression models. Comparison with the Forest Management Plan was made using zonal statistics applied to maps of mensurational variables. Deviation depended on the complexity of a particular forest stand structure.

Klíčová slova: LiDAR, letecké laserové skenování, plošný přístup, zásoba porostu, výčetní kruhová základna, lineární regresní modely

Key words: LiDAR, airborne laser scanning, area-based approach, forest stand volume, basal area, linear regression models

ÚVOD

Systém leteckého laserového skenování (LLS) nebo obecně LiDAR (Light Detection and Ranging) je moderní progresivní metodou dálkového průzkumu Země. Tato metoda umožňuje hromadný sběr velmi přesných výškopisných a polohopisných dat jak o zemském povrchu, tak o objektech, jež se na něm nacházejí (vegetace, budovy) (MIKITA et al. 2013a). Laserový paprsek dopadá na objekt a odráží se od každé jeho plošky, čímž se vytváří série odrazů paprsku od nejbližších až po nejvzdálenější. Při skenování lesních porostů se paprsek může chovat různě. Odrazí se buď celý zpět od horní vrstvy porostu, nebo se odrazí jen jeho část, přičemž neodražená část pak může pokračovat do nižších vrstev. Při odrazu paprsku od horní vrstvy, od špiček a povrchu korun stromů, se jedná o tzv. první odraz (first return), avšak mezerami v zápoji propadá laserový paprsek postupně až k zemskému povrchu a vznikají tak další odrazy. Posledním odrazem (last return) pak rozumíme odraz od samotného zemského povrchu, kdy můžeme získat představu o zemském povrchu pod zapojeným porostem a také o nižších etážích porostu. Vzniká tak charakteristický shluk naměřených bodů (mračno bodů), který vstupuje do dalších analýz (obr. 1) (ACKERMANN 1999).

LLS našlo již uplatnění v nejrůznějších aplikacích, jako jsou 3D modely měst a budov, znázorňování nadzemních silových vedení a nadzemních částí produktovodů, zjišťování stavebních a terénních letových překážek, vyhledávání rozsáhlých archeologických objektů, analýzy vegetačního pokryvu, mapování vodních ploch aj. (JEDLIČKA 2009). S rozvojem technologie našel tento způsob sběru dat své místo i v lesnictví. Na základě multiplikace odrazů při průletu paprsku lesním ekosystémem je možné odhadnout některé parametry lesních porostů či jednotlivých stromů, např. objem korun jednotlivých stromů, počet stromů v porostu, šířku koruny a její nasazení, velikost zápoje, odhady objemu dřevní hmoty a biomasy či dokonce dřevinnou skladbu (NÆSSET 2004; HYYPPÄ et al. 2008; KORPELA et al. 2009).

Ve světě existují dva základní přístupy ke zpracování dat LLS pro účely inventarizace lesa, a to (1) individuální detekce jednotlivých stromů (individual tree detection – ITD) (HYYPPÄ, INKINEN 1999) a (2) plošný přístup (area-based approach – ABA) (NÆSSET 2002). Při detekci jednotlivých stromů v případě první metody se pracuje s mračnem bodů LLS s vyšší hustotou (4–12 bodů na m²) a využívají se různé metody identifikace lokálního maxima, např. technika segmentace inverzního povodí (VINCENT, SOILLE 1991; MIKITA et al. 2013b), která

je založena na nástrojích hydrologického modelování, dále pak metoda minimové sítě (GOUGEON 1995) či metoda růstového algoritmu – Seed Region Growing (NOVOTNÝ 2014) a řada dalších. Nejjednodušeji implementovaná do prostředí GIS je metoda segmentace inverzních povodí, kdy je na základě rozdílu digitálního modelu povrchu (DMP) a digitálního modelu terénu (DMT) vytvářen tzv. digitální model korun (Canopy Height Model – CHM). Vynásobením CHM hodnotou -1 vznikne převrácený model, kde každá bezodtoká deprese reprezentuje korunu stromu. Bezodtoká deprese je zároveň lokálním povodím. Poté se výpočtem směru a délky odtoku detekují lokální minima, která reprezentují jednotlivé vrcholky stromů. Výška každého stromu se získá extrakcí z výškového modelu korun. Výčetní tloušťka se pak vypočítá na základě regresního vztahu ve výškových funkcích, např. Michajlova výšková funkce (MICHAILOFF 1943), Nāslundova výšková funkce (NĀSLUND 1947), dle Halaje (HALAJ 1959) a Šmelka (ŠMELKO et al. 1987). Objem jednotlivých stromů se následně vypočítá podle objemových rovnic, viz např. práce PETRÁŠ, PAJTÍK (1991). Metoda ITD se používá v případě vysoké hustoty bodů LLS (HYYPÄ, INKINEN 1999) a byla široce studována; stále však přetrvává mnoho problémů, které souvisí zejména s detekcí stromů (KAARTINEN, HYYPÄ 2008).

Metoda ABA, určená pro nízkou hustotu bodů LLS (přibližně 1–2 body/m²) se ve Skandinávii užívá již od roku 2002 pro inventarizaci lesů. V této metodě se jako nezávislých proměnných využívá prvků odvozených z povrchových modelů a z mračen bodů leteckého laserového skenování, které jsou dále přímo použity pro odhad taxačních veličin, většinou formou parametrické regrese nebo metodou nejblížešších sousedů (k-nearest neighbor – kNN) (NĀSSET 2002). Tato metoda patří mezi neparametrické a využívá klasifikaci do shluků, kdy do daného shluku přiřadíme hodnotu, která je mu nejpodobnější, a to na základě vzdálenosti v Euklidovské metrice. Predikcí neznámé hodnoty pak je průměr hodnot naměřených na nejblížešších *k*-trénovacích případech (POŠÍK 2008). Ve Finsku se touto metodou zabýval SUVANTO et al. (2005). MALTAMO et al. (2006) k této metodě přidal prvky odvozené z leteckých snímků a využil metodu *k*-nejvíce podobných sousedů (k-Most Similar Neighbor – k-MSN). V některých případech může metodu *k*-MSN překonat moderní data-miningová

technika Random Forests (RF) (HUDAK et al. 2008). Další možností je použití Bayesovské statistiky (JUNTTILA et al. 2008). Obě metody lze samozřejmě kombinovat. Tímto se zabývali např. BREIDENBACH et al. (2010) nebo VASTARANTA et al. (2012).

Cílem této práce je ověření využitelnosti metody plošného přístupu ke zpracování dat LLS pro účely zjišťování dvou významných taxačních veličin (zásoba a výčetní kruhová základna) v lesních porostech na území České republiky, dále pak vyvinutí lokálně specifických regresních modelů a jejich aplikace na širší území.

MATERIÁL A METODIKA

Data LLS použitá v této práci byla naskenována ve dnech 17. 9. a 18. 9. 2014 v souřadnicovém systému ETRS-89 UTM 33N a v elipsoidických výškách GRS-80.

Parametry leteckého laserového skenování:

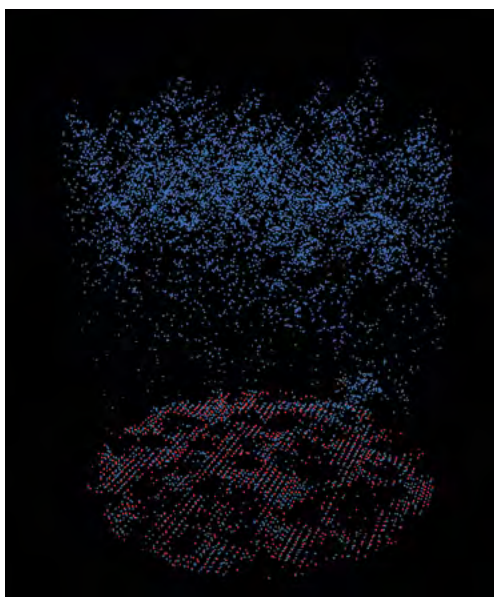
- použitý skener: Leica ALS70-CM (SN7209)
- použitý letoun: Cessna 206 Turbo stationair OK-EKT
- skenovací úhel: 24°
- skenovací mechanismus: oscilující zrcátko
- PRF (Pulse Repetition Frequency): 301,8 kHz
- průměrná hustota bodů: 7,8 bodů/m²

Sběr terénních dat pro tvorbu modelu k výpočtu taxačních charakteristik probíhal během roku 2015 na Školním lesním podniku Masarykův les Křtiny, na polesí Habrůvka. Výběr ploch se uskutečnil na základě stratifikace podle dat lesní hospodářské knihy. Bylo vytyčeno 43 zkusných ploch o poloměru 12,62 m a jejich střed byl zaměřen přesnou GNSS aparaturou Topcon Hiper Pro s aplikovanými RTK korekcemi ze sítě CZEPOS. GNSS měření bylo prováděno v pětisekundových intervalech po dobu dvaceti minut. Na každé ploše byly měřeny výčetní tloušťky a výšky všech stromů. Objemy jednotlivých stromů byly spočítány pomocí objemových rovnic (PETRÁŠ, PAJTÍK 1991). Věk měřených porostů se pohyboval mezi 60 a 130 lety, s výraznou převahou porostů starších 100 let. Průměrné zastoupení dřevin na všech zkusných plochách je v tab. 1.

Tab. 1

Zastoupení dřevin na zkusných plochách
Tree species composition in sample plots

Zastoupení/Composition (%)	
Smrk/Spruce	90
Modřín/Larch	6
Borovice/Pine	2
Buk/Beech	1
Ostatní/Other	1

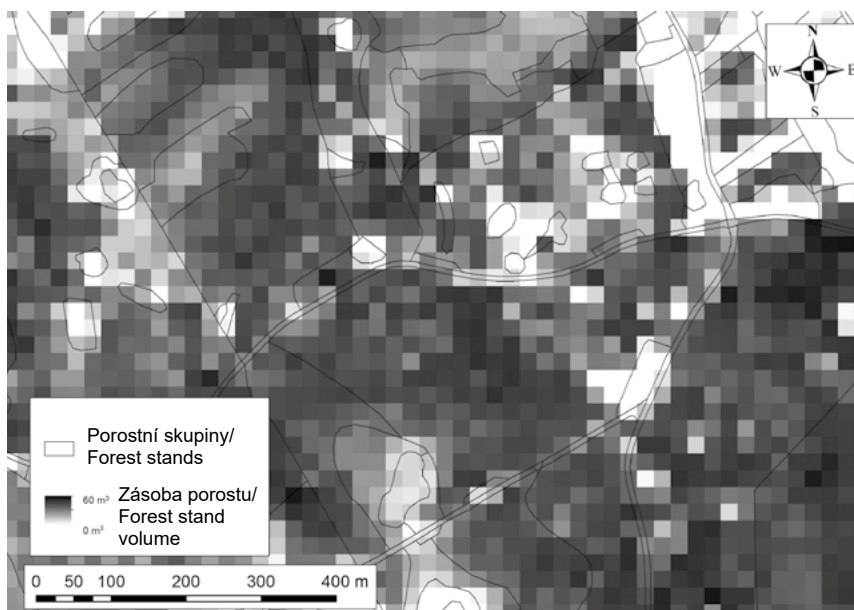


Obr. 1.
Mračno bodů leteckého laserového skenování
Fig. 1.
Point cloud of airborne laser scanning

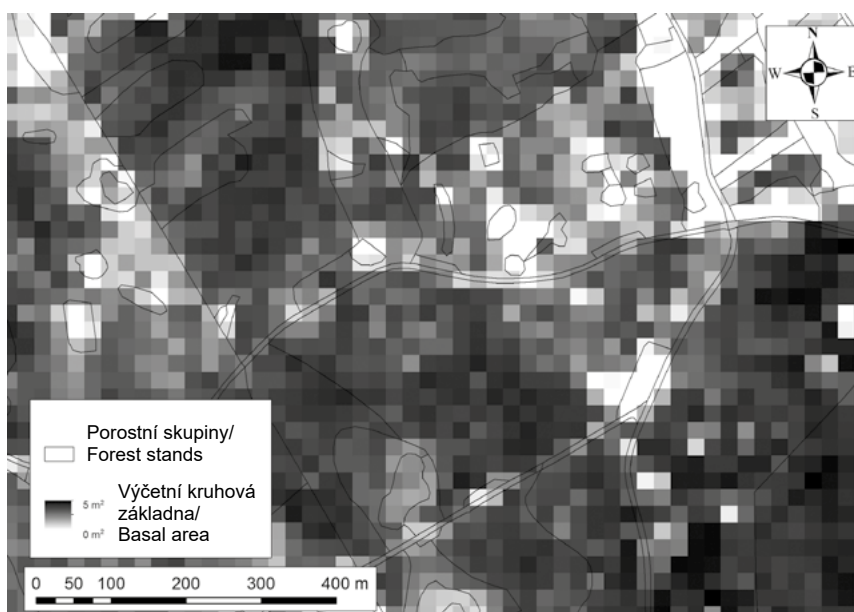
Klasifikace dat probíhala v nadstavbě TerraSolid Terrascan softwaru Bentley Microstation. Pomocí automatického skriptu byl také odstraněn překryt bodů mezi jednotlivými letovými pásy. Zpracování klasifikovaného mračna bodů bylo provedeno v softwaru FUSION, vyvinutém v U. S. Department of Agriculture, Forest Service, University of Washington (McGAUGHEY 2014). Nejprve byly příkazem clipdata vyříznuty zkusné plochy z mračna bodů a následně se vypočítaly pomocí příkazu cloudmetrics charakteristiky mračen bodů na jednotlivých zkusných plochách. Příkaz cloudmetrics poskytuje 87 charakteristik bodového mračna, založených na attributech výška bodu a intenzita odrazu. Pomocí korelačních matic se hledaly nejvyšší závislosti mezi

danou taxační veličinou (zásoba, výčetní kruhová základna) a jednotlivými charakteristikami mračna bodů. V softwaru QC Expert byly vytvořeny vícerozměrné lineární regresní modely pro každou taxační veličinu tak, že do modelu vstupovala jako nezávislá proměnná vždy ta charakteristika bodového mračna, která vykazovala nejvyšší korelaci s danou taxační veličinou. Do tohoto regresního modelu se vložila další charakteristika, která nejvíce korelovala s jeho rezidui. Takto se postupovalo, dokud se u modelů nepřestaly zvyšovat koeficienty determinace a zároveň všechny nezávislé proměnné byly významné. U finálních modelů byl otestován regresní triplet.

Pro odhad zásob v jednotlivých porostech je třeba vypočítat charakteristiky v celém bodovém mračnu. K tomu se využívá příkazu *gridmetrics*, který vytvoří rastr, kde v každém pixelu je informace o velikosti hodnoty dané charakteristiky mračna bodů. Plocha pixelu by měla být vždy blízká velikosti zkušné plochy. V této studii byl použit rastr s prostorovým rozlišením 22,36 m. Podobně je tomu tak i ve světě, např.: Finsko – poloměr zkušné plochy 9 m, pixel – 16 m, Ontario – poloměr zkušné plochy 11,28 m, pixel 20 m, Britská Kolumbie – poloměr zkušné plochy 11,28 m, pixel 20 m (WHITE et al. 2013). Zadáním regresních modelů a vstupních rastrů charakteristik bodového mračna do Raster Calculatoru vznikly mapy taxačních veličin (viz obr. 2 a 3).



Obr. 2.
Mapa zásoby lesních porostů
Fig. 2.
Map of forest stand volume



Obr. 3.
Mapa výčetní kruhové základny
Fig. 3.
Map of basal area

VÝSLEDKY

Na základě regresní analýzy v softwaru QC Expert byly vybrány nejvhodnější modely pro výpočet zásob a kruhové výčetní základny.

Výsledný regresní model pro výpočet zásoby porostu lze popsat rovnicí:

$$\text{Zásoba} = -45,13317342 + 1,841567494x + 0,419936447y,$$

kde x představuje charakteristiku Elev P30 a y charakteristiku (All returns above mean/Total first returns) $\times 100$.

Charakteristika (All returns above mean/Total first returns) $\times 100$ se vypočítá jako stonásobek podílu všech odrazů nad průměrnou výškou všech bodů nad terénem k celkovému počtu všech prvních odrazů, charakteristika Elev P30 určuje průměrnou výšku bodů v třicátém percentilu. Percentilem se v tomto smyslu myslí relativní umístění bodů vzhledem k ostatním bodům ve vertikálním profilu bodového mračna konkrétní zkušné plochy. Například stý percentil by byl roven nejvyššímu bodu v mračnu.

Kvalitu regresního modelu popisuje tab. 2. Koeficient determinace R^2 o hodnotě 0,824165 znamená, že výsledný model vysvětluje 82,42 % všech změřených případů.

Důležitou součástí regresní analýzy je studium regresního tripletu, tedy hodnocení kvality dat, kvality modelu a kvality metody odhadu (metoda nejmenších čtverců). V rámci testování regresního tripletu byly provedeny tyto testy: Fisher-Snedecorův test významnosti modelu, Scottovo kritérium multikolinearity, Cook-Weisbergův test heteroskedasticity, Jarque-Berrův test normality, Waldův test autokorelace, Durbin-Watsonův test autokorelace a Znaménkový test reziduí. Na základě těchto testů nebyly vyvozeny žádné negativní závěry, jež by ovlivnily věrohodnost regresních modelů.

Regresní model pro výpočet výčetní kruhové základny je vyjádřen touto rovnicí:

$$\text{Výčetní kruhová základna} = -1,60071 + 0,036195x + 0,067997y,$$

kde x představuje charakteristiku Percentage first returns above mean a y charakteristiku Elev P20.

Charakteristika Percentage first returns above mean se vypočítá jako procentuální podíl prvních odrazů nad průměrnou výškou všech bodů nad terénem, charakteristika Elev P20 určuje průměrnou výšku bodů v dvacátém percentilu.

Kvalitu regresního modelu popisuje tab. 3. Koeficient determinace R^2 o hodnotě 0,71754 znamená, že výsledný model vysvětluje 71,75 % všech změřených případů.

Tab. 2.

Statistické charakteristiky regresního modelu pro výpočet zásob porostů

Statistical parameters of regression model for forest stand volumes estimation

Vícenásobný korelační koeficient R/ Multiple correlation coefficient R	0,907835
Koeficient determinace R^2 / Coefficient of determination R^2	0,824165
Predikovaný korelační koeficient R_p / Predictive correlation coefficient R_p	0,640529
Střední kvadratická chyba predikce MEP/ Mean quadratic error of prediction MEP	15,968
Akaikeho informační kritérium/ Akaike information criterion	119,6692

Na základě provedených testů v rámci studia regresního tripletu (viz výše) je možné výsledný regresní model považovat za korektní.

Pro účely validace výsledků bylo provedeno porovnání s lesní hospodářskou knihou zpracovanou v rámci lesního hospodářského plánu pro ŠLP Masarykův les Křtiny (platnost: 1. 1. 2013 – 31. 12. 2022) pomocí zonální statistiky, která počítala hodnoty pixelů v každém polygonu porostu. V tab. 4 a 5 jsou uvedeny plochy porostů rozdělené na základě velikosti odchylky zásoby a výčetní kruhové základny zjištěné pomocí leteckého laserového skenování od zásoby a výčetní kruhové základny uvedené v lesní hospodářské knize. Na obr. 4 a 5 jsou odchylky modelu od LHP znázorněny graficky formou map. V tab. 6 a 7 (respektive na obr. 6 a 7) je uvedeno totéž, avšak pouze pro porosty se zastoupením smrku větším než 50 %.

DISKUSE

Výsledky plošné aplikace vytvořených regresních modelů ukazují na různou kvalitu odhadu taxačních veličin v závislosti na celé řadě faktorů. Velice dobrých výsledků bylo dosaženo v případě výpočtu zásoby. Zásoba necelé třetiny plochy všech porostů byla vypočítána s odchylkou do deseti procent od dat v lesní hospodářské knize, což je možné považovat i za obecnou přesnost lesních hospodářských plánů. Vzhledem k tomu, že kvalita lesních hospodářských plánů může být sporná (SIMON et al. 2013), teoreticky můžeme považovat za správnou i odchylku do 15 % od knihy. Potom by plochy se správně vypočítanou zásobou představovaly 47 % ze všech porostů, ve kterých byl proveden výpočet.

Méně přesných výsledků bylo dosaženo v případě zjišťování hodnoty výčetní kruhové základny, kdy bylo maximálně desetiprocentní odchylky dosaženo u šestnácti procent plochy porostů, maximálně patnáctiprocentní odchylky pak u 28 % plochy porostů. Chyby mohou být způsobeny nižším koeficientem determinace (0,72) než v případě modelu pro výpočet zásoby (0,82). Je možné, že i relativně malé snížení koeficientu determinace povede k významně horším výsledkům. Obecně koeficient determinace 0,72 postačuje k vytvoření modelu, ale je poměrně nízký pro účely inventarizace lesa na základě zpracování lidarových dat plošným přístupem. Například MEANS et al. (1999) dosáhl při výpočtu regresních modelů pro odhad výšky stromů, výčetní kruhové základny a objemu nadzemní biomasy v douglaskových porostech koeficientů determinace 0,95, 0,96 a 0,96. HOLLAUS (2006) dosáhl při zjišťování objemu kmene koeficientu determinace 0,87. NÆSSET (2002) vytvořil regresní modely pro horní výšku porostu, počet stromů a výčetní kruhovou základnu s koeficienty determinace mezi 0,5 až 0,93.

Tab. 3.

Statistické charakteristiky regresního modelu pro výpočet výčetní kruhové základny

Statistical parameters of regression model for basal area estimation

Vícenásobný korelační koeficient R/ Multiple correlation coefficient R	0,84707
Koeficient determinace R^2 / Coefficient of determination R^2	0,71754
Predikovaný korelační koeficient R_p / Predictive correlation coefficient R_p	0,45043
Střední kvadratická chyba predikce MEP/ Mean quadratic error of prediction MEP	0,09279
Akaikeho informační kritérium/ Akaike information criterion	-102,77

Tab. 4.

Plochy porostů rozdělené podle velikosti odchylky zásoby zjištěné pomocí leteckého laserového skenování od zásoby uvedené v lesní hospodářské knize

Forest stands areas sorted by variance height of volume estimated using airborne laser scanning and volume found in the Forest Management Plan

	Plocha porostů/ Forest stand area	Procentuální podíl/ Percentage
Celkem/In total	549,83	100,00
Odchylka do 3 %/ Variance up to 3%	59,13	10,75
Odchylka do 5 %/ Variance up to 5%	95,78	17,42
Odchylka do 10 %/ Variance up to 10%	177,85	32,35
Odchylka do 15 %/ Variance up to 15%	256,24	46,60
Odchylka do 20 %/ Variance up to 20%	292,43	53,19
Odchylka do 25 %/ Variance up to 25%	333,42	60,64
Odchylka do 30 %/ Variance up to 30%	400,16	72,78

Tab. 6.

Plochy porostů se zastoupením smrku větším než 50%, rozdělené podle velikosti odchylky zásoby zjištěné pomocí leteckého laserového skenování od zásoby uvedené v lesní hospodářské knize

Forest stands areas with more than 50% proportion of spruce sorted by variance height of volume estimated using airborne laser scanning and volume found in the Forest Management Plan

	Plocha porostů/ Forest stand area	Procentuální podíl/ Percentage
Celkem/In total	210,44	100,00
Odchylka do 3 %/ Variance up to 3%	47,11	22,39
Odchylka do 5 %/ Variance up to 5%	58,14	27,63
Odchylka do 10 %/ Variance up to 10%	110,80	52,65
Odchylka do 15 %/ Variance up to 15%	133,81	63,59
Odchylka do 20 %/ Variance up to 20%	154,32	73,33
Odchylka do 25 %/ Variance up to 25%	183,37	87,14
Odchylka do 30 %/ Variance up to 30%	191,32	90,92

Tab. 5.

Plochy porostů rozdělené podle velikosti odchylky výčetní kruhové základny zjištěné pomocí leteckého laserového skenování od výčetní kruhové základny uvedené v lesní hospodářské knize

Forest stands areas sorted by variance height of basal area estimated using airborne laser scanning and basal area found in the Forest Management Plan

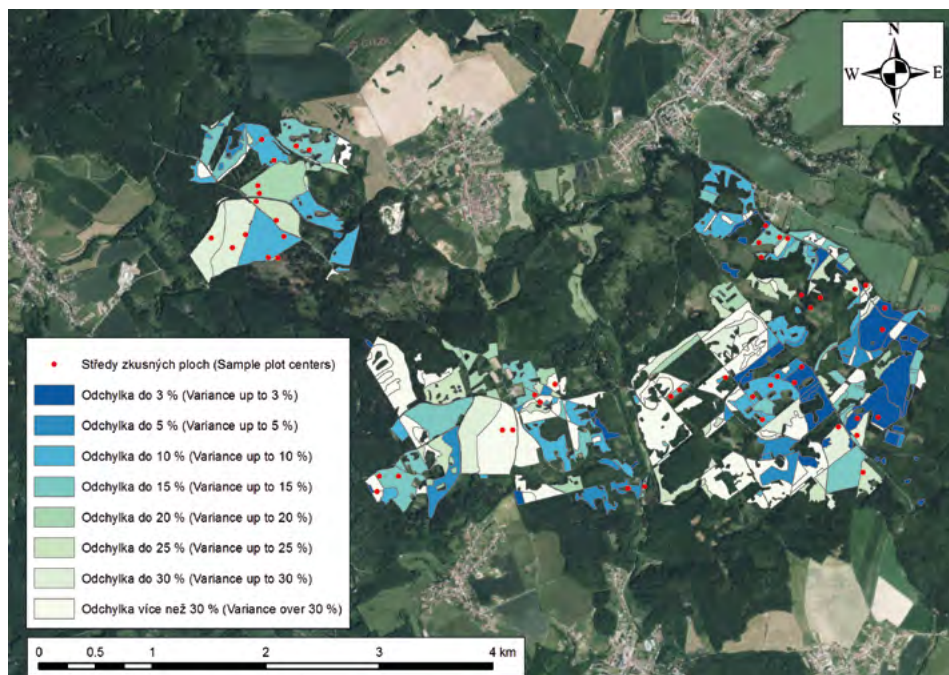
	Plocha porostů/ Forest stand area	Procentuální podíl/ Percentage
Celkem/In total	549,83	100,00
Odchylka do 3 %/ Variance up to 3%	27,19	4,95
Odchylka do 5 %/ Variance up to 5%	44,80	8,15
Odchylka do 10 %/ Variance up to 10%	88,78	16,15
Odchylka do 15 %/ Variance up to 15%	156,00	28,37
Odchylka do 20 %/ Variance up to 20%	204,32	37,16
Odchylka do 25 %/ Variance up to 25%	239,76	43,61
Odchylka do 30 %/ Variance up to 30%	275,33	50,08

Tab. 7.

Plochy porostů se zastoupením smrku větším než 50%, rozdělené podle velikosti odchylky výčetní kruhové základny zjištěné pomocí leteckého laserového skenování od výčetní kruhové základny uvedené v lesní hospodářské knize

Forest stands areas sorted with more than 50% proportion of spruce by variance height of basal area estimated using airborne laser scanning and basal area found in the Forest Management Plan

	Plocha porostů/ Forest stand area	Procentuální podíl/ Percentage
Celkem/In total	210,44	100,00
Odchylka do 3 %/ Variance up to 3%	19,72	9,37
Odchylka do 5 %/ Variance up to 5%	30,70	14,59
Odchylka do 10 %/ Variance up to 10%	50,97	24,22
Odchylka do 15 %/ Variance up to 15%	95,87	45,56
Odchylka do 20 %/ Variance up to 20%	119,01	56,55
Odchylka do 25 %/ Variance up to 25%	136,70	64,96
Odchylka do 30 %/ Variance up to 30%	141,26	67,13

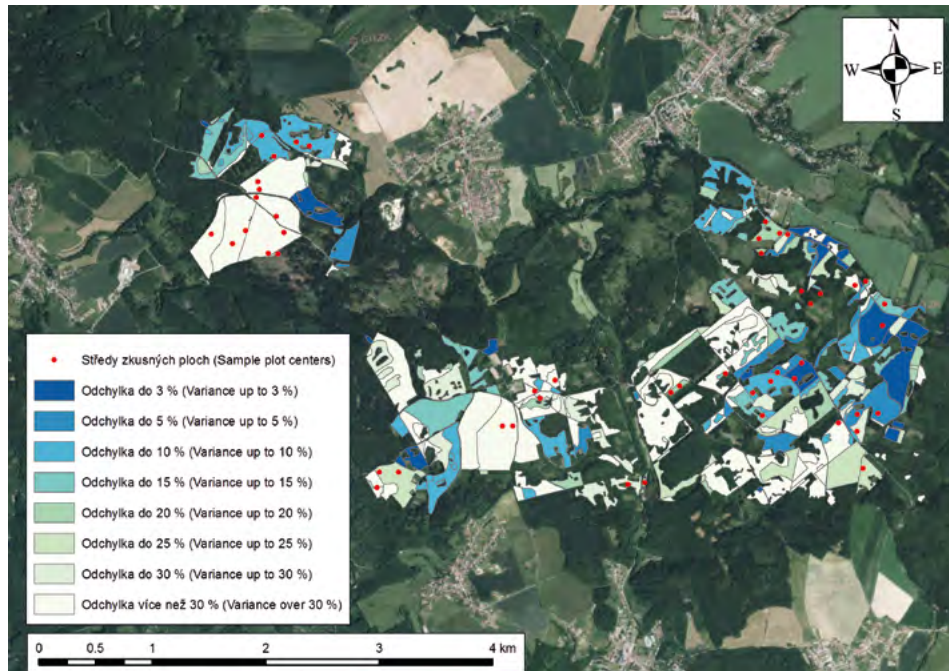


Obr. 4.

Plochy porostů rozdělené podle velikosti odchyliky zásoby zjištěné pomocí leteckého laserového skenování od zásoby uvedené v lesní hospodářské knize

Fig. 4.

Forest stands areas sorted by variance height of volume estimated using airborne laser scanning and volume found in the Forest Management Plan

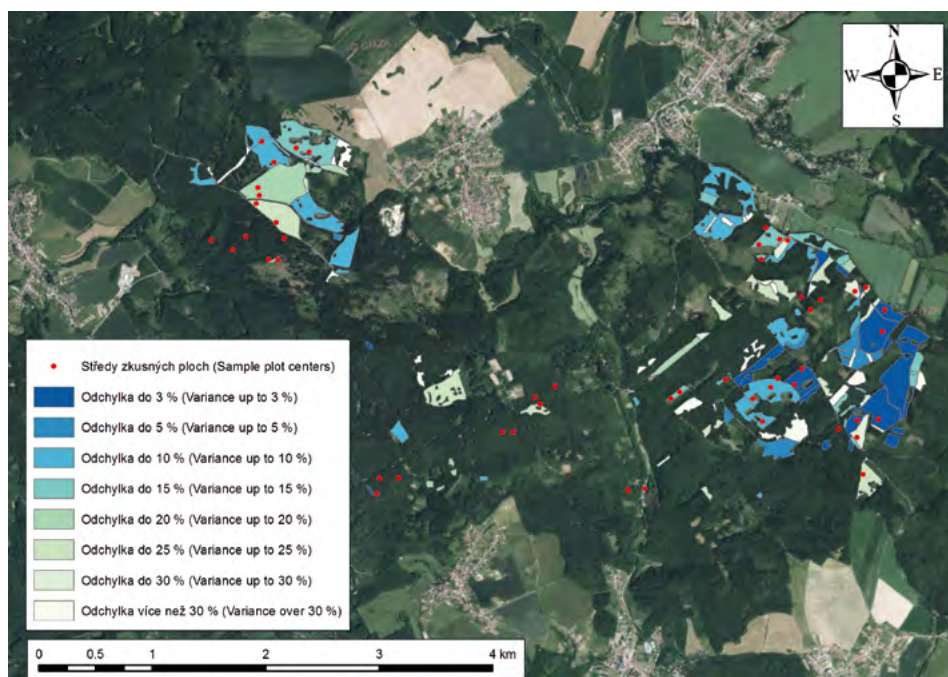


Obr. 5.

Plochy porostů rozdělené podle velikosti odchyliky výčetní kruhové základny zjištěné pomocí leteckého laserového skenování od výčetní kruhové základny uvedené v lesní hospodářské knize

Fig. 5.

Forest stands areas sorted by variance height of basal area estimated using airborne laser scanning and basal area found in the Forest Management Plan

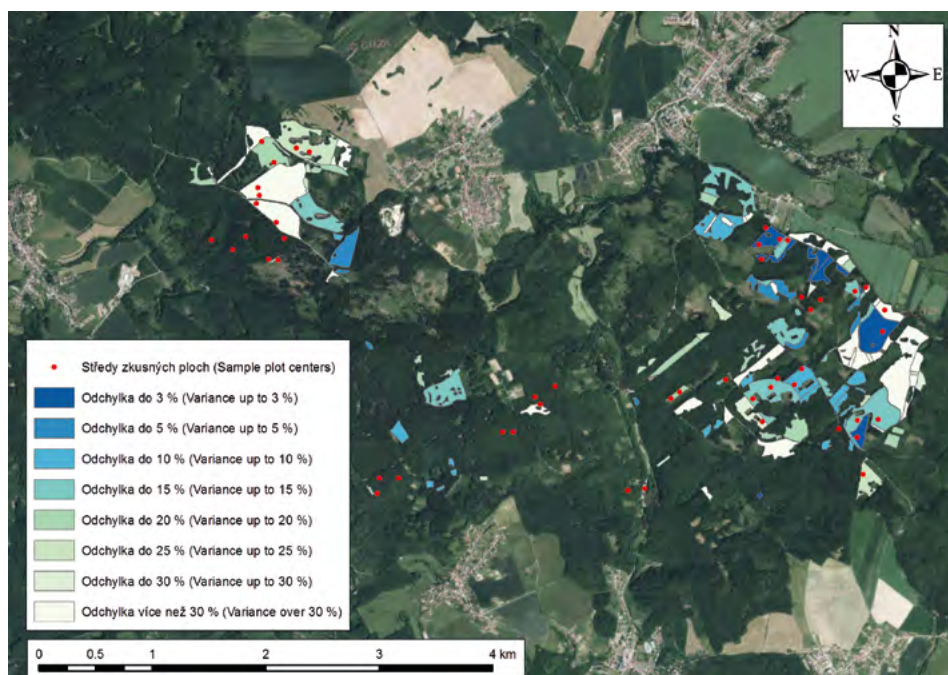


Obr. 6.

Plochy porostů se zastoupením smrku větším než 50 % rozdělené podle velikosti odchylny zásoby zjištěné pomocí leteckého laserového skenování od zásoby uvedené v lesní hospodářské knize

Fig. 6.

Forest stands areas with more than 50% proportion of spruce sorted by variance height of volume estimated using airborne laser scanning and volume found in the Forest Management Plan



Obr. 7.

Plochy porostů se zastoupením smrku větším než 50 % rozdělené podle velikosti odchylny výčetní kruhové základny zjištěné pomocí leteckého laserového skenování od výčetní kruhové základny uvedené v lesní hospodářské knize

Fig. 7.

Forest stands areas with more than 50% proportion of spruce sorted by variance height of basal area estimated using airborne laser scanning and basal area found in the Forest Management Plan

Koeficient determinace pro model sloužící k výpočtu zásoby se pohyboval mezi 0,80 až 0,93. Nejhorší koeficient determinace (0,39 až 0,78) byl dosažen pro regresní rovnici pro výpočet výčetní tloušťky. BOUVIER et al. (2015) vytvořil regresní model pro odhad zásoby s koeficientem determinace 0,95 a regresní model pro odhad výčetní kruhové základny s koeficientem determinace 0,84. Všechny tyto modely byly vyvinuty pro jehličnaté porosty a do regresní analýzy vstupovalo 39 zkusných ploch. PATOČKA et al. (2015) použil deset zkusných ploch ze stejného souboru zkusných ploch jako v této práci a vytvořil tři regresní modely s koeficienty determinace 0,8 až 0,96. Při využití všech zkusných ploch pak koeficienty determinace klesly a zároveň byly použity jiné charakteristiky mračna bodů. Yu et al. (2010) porovnával plošný přístup s individuální detekcí stromů a jeho regresní modely dosahovaly koeficientů determinace 0,84 pro výčetní tloušťku středního kmene a 0,79 pro objem středního kmene. K vytvoření modelu však použil data-miningovou techniku Random Forest.

Výčetní kruhová základna je závislá pouze na výčetní tloušťce stromů a jak je obecně známo, leteckým laserovým skenováním je obtížné zachytit průběh kmene. Zásoba porostu se přitom dá přibližně odvodit i na základě výšky porostu a objemu koruny, kde je distribuce bodů leteckého laserového skenování ještě poměrně dobrá.

Dalším zdrojem chyb je skutečnost, že na zkusných plochách zcela dominovaly jehličnaté dřeviny, přičemž mezi porostními skupinami pro porovnání s LHP byly i porosty listnaté a dokonce porosty s bohatou strukturou. V těchto porostech jsou ale body leteckého laserového skenování zcela odlišně distribuovány a bylo by nutné provést měření také u listnáčů a vytvořit pro ně vlastní regresní model. V porostech se zastoupením smrku větším než 50 % byly zjištěny odchylky od LHP významně nižší (tab. 6, obr. 6). V případě odhadu zásoby bylo dosaženo maximálně desetiprocentní odchylky od LHP u 53 % porostů s převahou smrku, respektive u 64 % porostů při maximální odchylce 15 %. V případě odhadu výčetní kruhové základny byla přesnost opět analogicky nižší (tab. 7, obr. 7). Ve smíšených porostech by bylo proto vhodné provést klasifikaci jednotlivých stromů z multispektrálních nebo ještě lépe hyperspektrálních snímků, tyto stromy sdružit do clusterů a každému clusteru pak přiřadit specifický regresní model.

Vztah mezi taxačními veličinami změřenými konvenčními metodami a charakteristikami mračna bodů nemusí být vždy lineární, proto se často využívají neparametrické metody, jako jsou k-Nearest Neighbor a k-Most Similar Neighbor. Zároveň použitím pouze dvou proměnných z celkových 87 dojde k určité ztrátě informace. Redukování dimenze dat je však nezbytné, protože u korektního lineárního regresního modelu se nesmí vyskytovat multikolinearita, což se právě při použití více než dvou proměnných vždy stalo. Zachování kompletních informací o mračnu bodů je možné využitím dataminingových technik a neuronových sítí při vytváření regresních modelů.

Vzhledem ke kolísající přesnosti dat LHP je možné namítnout, že porovnání výsledků s lesní hospodářskou knihou není zcela vhodné. Správná validace by spočívala ve zpětném porovnání s dalšími zkusnými plochami, které se neúčastnily tvorby regresních modelů a jsou tedy na těchto modelech nezávislé. Porovnání s LHP bylo zvoleno pro demonstrování možnosti navázání metody plošného přístupu na konvenční metody inventarizace lesa, což jako velkou výhodu popisuje také SHAN, TOTH (2009). Zároveň bylo cílem práce provést výpočet pro celé porostní skupiny, jelikož je v zájmu lesnické praxe znát zásobu celých porostních skupin, nikoliv pouze zkusných ploch. Provádět zpětnou validaci modelů v celých porostních skupinách průměrným naplněním by pak bylo příliš časově náročné.

Jak bylo zmíněno v metodice, pro porovnání s LHP byla použita zónální statistika, která pracuje na principu tzv. pravidla absence a výskytu. Jestliže nějaký pixel zasahuje do polygonu porostu, je započítána celá jeho hodnota, nikoliv jen jeho poměrná část. Tato vlastnost může představovat zdroj drobných nepřesností.

ZÁVĚR

Tato studie ukázala, že je možné aplikovat plošný přístup zpracování dat leteckého laserového skenování nejenom v boreálních lesích, kde se používá v praxi již více než deset let, ale i v lesích na území České republiky. Toto téma je aktuální zejména z toho důvodu, že se v současné době dokončuje digitální model povrchu 1. generace, který není sice zcela vhodný pro aplikaci v inventarizaci lesa, ale i přesto je možné jej částečně využít na území celé republiky.

Výhoda plošného přístupu ke zpracování dat leteckého laserového skenování spočívá zejména v možnosti navázání na konvenční způsoby inventarizace lesa, dále umožňuje snížit potřebný počet zkusných ploch a zároveň eliminovat chybu způsobenou výběrem nereprezentativních ploch.

Mezi nejdůležitější taxační veličiny patří zejména výška stromů, výčetní kruhová základna a zásoba dřevní hmoty. To, že je možné pomocí leteckého laserového skenování určit poměrně přesně výšku stromů, bylo již v minulosti prokázáno (např. MIKITA et al. 2013b). Tato práce byla proto zaměřena na zjišťování zásoby a výčetní kruhové základny. Nejprve bylo nutné sesbírat referenční data ze zkusných ploch a poté pro klasifikovaná data leteckého laserového skenování provést výpočty charakteristik distribuce bodů a intenzity odrazu v lesních porostech. Vybrané charakteristiky pak vstupovaly jako nezávislé proměnné do tvorby lineárních regresních rovnic. Pro výpočet zásoby a výčetní kruhové základny byly vytvořeny modely, které vysvětlovaly 82 %, respektive 72% všech případů. Tyto regresní modely byly poté aplikovány k plošnému odhadu těchto taxačních veličin na širším území. Na závěr bylo provedeno porovnání s daty lesního hospodářského plánu. Odchylka od něj byla různá, v závislosti na struktuře a dřevinné skladbě konkrétního porostu.

K aplikaci do lesnické praxe v ČR ještě chybí několik kroků. Zejména bude potřebné data leteckého laserového skenování zkombinovat s hyperspektrálními snímky tak, aby bylo možné zjišťovat i dřevinnou skladbu porostů. Výzkum bude zaměřen i na vyvinutí dalších technik tvorby regresních modelů, jelikož klasická lineární regrese neposkytuje nejpřesnější výsledky. Půjde zejména o neparametrické techniky jako metoda k-nebližších sousedů, data-miningové techniky, např. Random Forest, nebo vícevrstvé perceptronové neuronové sítě. Určitého zpřesnění výsledků může být také dosaženo kombinací s metodou individuální detekce stromů.

Poděkování:

V textu jsou publikovány výsledky, které vznikly za podpory z projektu Lesnické a dřevařské fakulty Mendelovy univerzity v Brně – IGA 13/2015 „Využití dat leteckého laserového skenování zpracovaných metodou plošného přístupu pro zjišťování taxačních charakteristik“.

LITERATURA

- ACKERMANN F. 1999. Airborne laser scanning present status and future expectations. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54 (2/3): 64–67. DOI: 10.1016/S0924-2716(99)00009-X
- BOUVIER M., DURRIEU S., FOURNIER R.A., RENAUD J.-P. 2015. Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. Remote Sensing of Environment, 156: 322–334. DOI: 10.1016/j.rse.2014.10.004
- BREIDENBACH J., NÆSSET E., LIEN V., GOBAKKEN T., SOLBERG S. 2010. Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on

- fused airborne laser scanning and multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 114 (4), 911–924. DOI: 10.1016/j.rse.2009.12.004
- GOUGEON F.A. 1995. A crown following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution digital images. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 21: 274–284.
- HALAJ J. 1959. Prieskum výškovej vzrastavosti drevín na Slovensku a návrh stupnic výškových bonít. *Lesnícky časopis*, 3–4: 173–204.
- HOLLAUS M. 2006. Large scale applications of airborne laser scanning for a complex mountainous environment. Ph.D. thesis. Vienna, University of Technology: 127 s.
- HUDAK A.T., CROOKSTON N.L., EVANS J.S., HALL D.E., FALKOWSKI M.J. 2008. Nearest neighbor imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 112 (5): 2232–2245. DOI: 10.1016/j.rse.2007.10.009
- HYYPÄ J., INKINEN M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 16 (2): 27–42.
- HYYPÄ J., HYYPÄ H., LECKEE D., GOUGEON F., YU X., MALTAMO M. 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 1339–1366. DOI: 10.1080/01431160701736489
- JEDLIČKA K. 2009. Accuracy of surface models acquired from different sources – important information for geomorphological research. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 9 (1): 17–28.
- JUNTILA V., MALTAMO M., KAURANNE T. 2008. Sparse Bayesian estimation of forest stand characteristics from airborne laser scanning. *Forest Science*, 54: 543–552.
- KAARTINEN H., HYYPÄ J. 2008. EuroSDR/ISPRS Project, Commission II "Tree Extraction", Final Report. Frankfurt am Main, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie: 56 s. EuroSDR, European Spatial Data Research, No 53.
- KORPELA I., KOSKINEN M., VASANDER H., HOLOPAINEN M., MINKKINEN K. 2009. Airborne small-footprint discrete-return LiDAR data in the assessment of boreal mire surface patterns, vegetation, and habitats. *Forest Ecology and Management*, 258: 1549–1566. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.07.007
- MALTAMO M., MALINEN J., PACKALÉN P., SUVANTO A., KANGAS J. 2006. Nonparametric estimation of stem volume using airborne laser scanning, aerial photography and stand-register data. *Canadian Journal of Forest Research*, 36 (2): 426–436. DOI: 10.1139/x05-246.
- MCGAUGHEY R.J. 2014. FUSION/LDV: Software for lidar data analysis and visualization. Version 3.41 [online]. Seattle, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. [cit. 2014-11-10]. Dostupné na/Available on: <http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.htm>
- MEANS J.E., ACKER S.A., HARDING D.J., BLAIR J.B., LEFSKY M.A., COHEN W.B., HARMON M.E., MCKEE W.A. 1999. Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the western Cascades of Oregon. *Remote Sensing of Environment*, 67 (3): 298–308. DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00091-1
- MICHAILOFF I. 1943. Zahlenmäßiges Verfahren für die Ausführung der Bestandeshöhenkurven. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Heft 6: 273–279.
- MIKITA T., KLIMÁNEK M., CIBULKA M. 2013a. Hodnocení metod interpolace dat leteckého laserového skenování pro detekci stromů a měření jejich výšek. *Zprávy lesnického výzkumu*, 58 (2): 99–106.
- MIKITA T., KLIMÁNEK M., CIBULKA M. 2013b. Evaluation of airborne laser scanning data for tree parameters and terrain modelling in forest environment. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 61 (5): 1339–1347.
- NÄSLUND 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. Stockholm, National Forest Research Institute: 81 s.
- NÆSSET E. 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*, 80 (1): 88–99. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00290-5
- NÆSSET E. 2004. Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19: 164–179. DOI: 10.1080/02827580310019257
- NOVOTNÝ J. 2014. Tree crown delineation using growing and active contour: Approach introduction. In: Mendel 2014. 20th International Conference on Soft Computing. Brno University of Technology: 213–216.
- PATOČKA Z., SABOL J., MIKITA T., CARBOL S. 2015. Využití plošného přístupu ke zpracování dat leteckého laserového skenování v inventarizaci lesa. In: *Praktické využití GIS v lesnictví a zemědělství 2015*. Brno, Mendelova univerzita v Brně: 1–6.
- PETRÁŠ R., PAJTIK J. 1991. Sústava česko-slovenských objemových tabuliek drevín. *Lesnícky časopis*, 37 (1): 49–56.
- POŠÍK P. 2008. Jak na data mining v programu STATISTICA Data Miner. Praha, StatSoft: 78 s.
- SHAN J., TOTH C.K. (eds.) 2009. Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. Boca Raton, CRC Press: 590 s.
- SIMON J., PODLENA R., KADLEC J. 2013. Lesní hospodářské plány: Změny postavení a aktivit zařízení LHP v posledních desetiletích. *Lesnická práce*, 92 (1): 34–35.
- SUVANTO A., MALTAMO M., PACKALÉN P., KANGAS J. 2005. Kuviokohtaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksella. *Metsätieteen aikakauskirja*, 2005 (4): 413–428.
- ŠMELKO Š., PÁNEK F., ZANVIT B. 1987. Matematická formulácia systému jednotných výškových kriviek rovnovekých porastov SSR. *Acta Facultatis Forestalis Zvolen*, XXIV: 151–173.
- VASTARANTA M., KANKARE V., HOLOPAINEN M., YU X., HYYPÄ J., HYYPÄ H. 2012. Combination of individual tree detection and area-based approach in imputation of forest variables using airborne laser data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67: 73–79. DOI:10.1016/j.isprsjrs.2011.10.006
- VINCENT L., SOILLE P. 1991. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE PAMI*, 13 (6): 583–598.
- WHITE J.C., WULDER M.A., VARHOLA A., VASTARANTA M., COOPS N.C., COOK B.D., PITT D., WOODS M. 2013. A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using the area-based approach (Version 2.0). Information Report FI-X-010. Victoria, BC, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service: 50 s. Dostupné na/Available on: <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/34887.pdf>
- YU X., HYYPÄ J., HOLOPAINEN M., VASTARANTA M. 2010. Comparison of area-based and individual tree-based methods for predicting plot-level forest attributes. *Remote Sensing*, 2: 1481–1495. DOI: 10.3390/rs2061481

USE OF AREA-BASED APPROACH TO PROCESS THE AIRBORNE LASER SCANNING DATA IN FOREST INVENTORY

SUMMARY

This study demonstrates application possibilities of the area-based approach to process airborne laser scanning data in the forests of the Czech Republic, not only in the boreal forests where it has been used in practical forestry for more than ten years. This topic has received much attention lately, because the 1st generation digital surface model is currently finalizing. This model is not entirely suitable for application in forest inventory, however it is possible to use it throughout the Czech Republic.

Advantage of area-based approach for data processing of ALS is mainly in the possibility of follow-up to the conventional methods of forest inventory. This approach enables to reduce the required number of sample plots and eliminates error caused by selecting unrepresentative plots. Tree height, basal area and stem volume belong to the most important variables. Exact determination of the tree height using airborne laser scanning had been previously demonstrated (e.g. MIKITA et al. 2013b). Presented work is therefore focused on stem volume and basal area estimation. First, it was necessary to collect the reference data of the plots, and then LiDAR metrics, based on point distribution in forest stands, and return intensity were calculated. Selected LiDAR metrics were used as independent variables for the creation of linear regression equations. Models for volume and basal area estimation were created and explained 82% (Tab. 2) or 72% of all cases (Tab. 3). Then, these regression models were applied to the area-wide estimation of these mensurational variables (Fig. 2 and 3). At the end, a comparison was made with Forest Management Plan data. Deviation from it depends on the structure and tree species composition of a particular forest stand. Very good results were achieved in the case of volume estimation. (Tab. 4, Fig. 4). Less accurate results were achieved in the case of basal area estimation (Tab. 5, Fig. 5). It has been achieved significantly higher accuracy in the forest stands with more than 50% proportion of spruce (Tab. 6 and 7; Fig. 6 and 7).

As for the application to practical forestry in the Czech Republic, there are still some steps to do. In particular, it will be necessary to combine ALS with hyperspectral images in order to make the detection of tree species composition possible. Further research will be focused on development of other techniques for regression models creation, because linear regression does not provide any absolutely accurate results. Above all, nonparametric techniques will be developed, such as k-nearest neighbor imputation method, data-mining techniques, e.g. Random Forest, or multilayer perceptron neural network. Certain accuracy improvement can be also achieved through combination of these techniques with individual tree detection method.

Zasláno/Received: 16. 12. 2015

Přijato do tisku/Accepted: 19. 02. 2016