

# APLIKAČNÝ POTENCIÁL KOMBINÁCIE LETECKÉHO A POZEMNÉHO MOBILNÉHO LASEROVÉHO SKENOVANIA V TAXÁCII LESA

Ivan Sačkov

**Sáčkov, I.: An application potential of combined use of airborne and mobile laser scanning within the forest management inventory.** APOL, 2021, vol. 2, no. 1, p. 165–170.

**Abstract:** Forest management inventory (FMI) based on combination of data from airborne laser scanning (ALS), aerial imaging and mobile laser scanning (MLS) provides the opportunity for partial or complete replacement of an extensive forest mensuration, which is physically, economically and time-consuming. This paper presents base information on (1) the importance of FMI for sustainable management of natural resources, (2) the technical principles and alternatives of ALS and MLS technology, including a general overview of their application potential within the FMI, (3) the first evaluation of application potential of combination of ALS and MLS data within the FMI in Slovakia, including a description of related phases, methodology and outputs dissemination.

**Key words:** remote sensing; LiDAR; point cloud; forest mensuration; forest mapping; dendrometric characteristics

## Úvod

**Taxácia lesa** poskytuje relevantné informácie o stave a vývoji lesných ekosystémov a je preto pre zabezpečenie trvalo udržateľného manažmentu a ochrany prírodného bohatstva veľmi dôležitá. V tejto súvislosti je národnými autoritami všeobecne podporovaná až legislatívne vyžadovaná (Szarka & Bavlšík 2018).

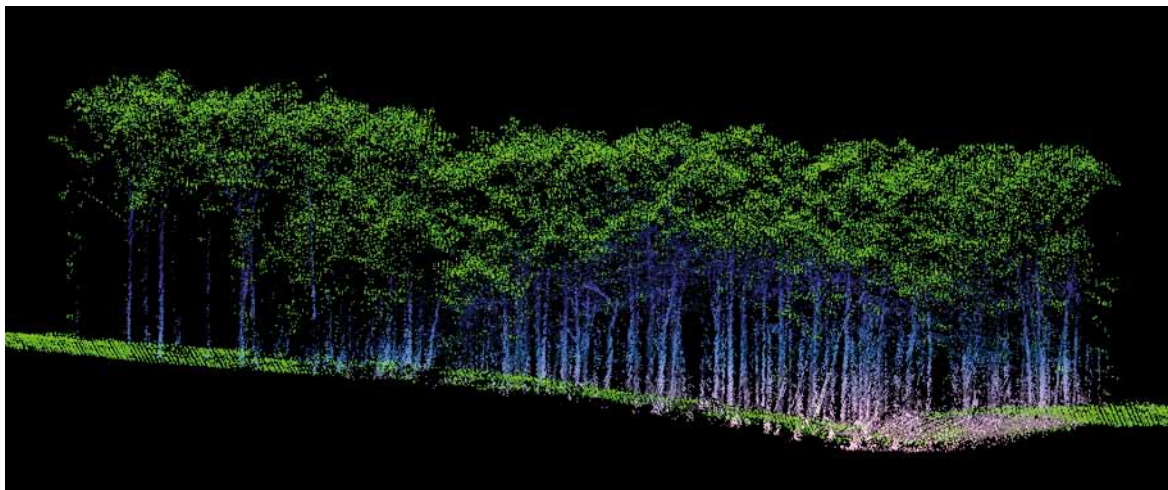
Geopriestorové technológie a techniky založené na kombinácii dát rôznych platforiem **dialkoveho prieskumu Zeme (RS)** z anglického názvu Remote Sensing) ako aj využití progresívnych nástrojov **geoinformatiky (GIS)** z anglického názvu Geographic Information System) poskytujú mimoriadne efektívne aplikačné možnosti v taxácii lesa. Požadované informácie sú totiž získavané, spracovávané a analyzované z väčšej miery automatizovane, so známou mierou presnosti, na voliteľnej plošnej úrovni a zároveň sú tieto informácie priestorovo a časovo lokalizované. Predovšetkým kombinácia technológie **leteckého laserového skenovania (ALS)** z anglického názvu Airborne Laser Scanning) a **leteckého snímkovania (DAP)** z anglického názvu Digital Aerial Photography) predstavuje inovatívny prístup, ktorý má potenciál na čiastočné či úplne nahradenie extenzívnej pozemnej taxácie lesa, ktorá je fyzicky, ekonomicky a časovo značne náročná. ALS totiž ako jediná technológia leteckej platformy RS umožňuje získavať geodáta so submetrovou presnosťou aj pod korunovým krytom stromov, pričom tieto dáta umožňujú samostatne alebo v kombinácii s dátami DAP priame zistenie alebo odvodenie rôznych dendrometrických charakteristík (Maltamo et al. 2014). Na druhej strane, tento prístup vždy vyžaduje aj reprezentatívne množstvo dát z terénneho merania na kalibračné ako aj validačné účely a na stromovej úrovni sú výstupy väčšinou systematicky podhodnotené, pričom priamo je možné zistiť len pozíciu a výšku identifikovaných stromov. Efektívne riešenie týchto obmedzení poskytuje technológia **pozemného laserového skenovania (TLS)** z anglického názvu Terrestrial Laser Scanning), ktorá predovšetkým vo forme **pozemného mobilného laserového skenovania (MLS)** z anglického názvu Mobile Laser Scanning) umožňuje relatívne rýchlo a presne získavať geodáta využiteľné na zistenie väčšiny stromových charakteristík (Hyypä et al. 2020). Obmedzením tohto prístupu je ale nutnosť pozemnej aplikácie, lokálna úroveň zisťovania a pomerne vysoká obstarávacía cena technického vybavenia.

Tento príspevok poskytuje základné informácie o (1) význame taxácie lesa v trvalo udržateľnom manažmente prírodných zdrojov, (2) technických princípoch a konštrukčných alternatívach technológie ALS a MLS vrátane všeobecného prehľadu ich aplikačného potenciálu v rámci taxácie lesa, (3) pilotnom zhodnotení aplikačného potenciálu kombinácie ALS a MLS dát za účelom taxácie lesa na Slovensku vrátane popisu fáz tohto vyhodnocovania, použitej metodiky a formy diseminácie získaných výstupov.

## Laserové skenovanie

**Laserové skenovanie (LiDAR** z anglického názvu Light Detection And Ranging) vo všeobecnosti slúži k detekcii objektov a meraniu vzdialeností. Založené je na meraní uplynutého času medzi vyslaním pulzu a prijatím jeho odrazu, pričom sa tento čas následne prepočítava na vzdialenosť. Jednotlivé pulzy sú pritom vysielané v rôznom uhle pri vysokej frekvencii a s ohľadom na ich priemer je možné prijať aj viac odrazov z jedného pulzu. Zároveň sa v priebehu skenovania zaznamenávajú aj lokálna alebo globálna poloha laserového skenera, ktorý je umiestnený na pozemnej, leteckej alebo satelitnej platforme.

**LiDAR dáta** s ohľadom na technologický princíp skenovania predstavujú súbor prijatých pulzov, ktoré vo forme 3D súradníc vytvárajú tzv. mračno bodov (obr. 1). Každý bod pritom okrem zaznamenatej polohy (x, y, z) obsahuje aj spektrum iných kvantitatívnych ako aj kvalitatívnych informácií (napr. intenzita). Spracovanie LiDAR dát a generovanie ich derivátov je vykonávané z väčšej časti automatizovaným spôsobom a zamerané je predovšetkým na kontrolu kvality, klasifikáciu, mozaikovanie a tvorbu digitálnych výškových modelov. Spracované LiDAR dáta alebo ich deriváty je následne možné využívať na špecifické účely v rôznych oblastiach, vrátane lesného hospodárstva.



**Obrázok 1.** LiDAR dáta z leteckého (zelená farba) a pozemného mobilného (modrá farba) laserového skenovania  
*Figure 1.* LiDAR data from airborne (green color) and mobile (blue color) laser scanning.

## Letecké laserové skenovanie v taxácii lesa

Skenovanie technológiou ALS prebieha zo vzduchu pričom laserový skener je umiestnený na lietajúcom nosnom zariadení. Súčasná technická riešenia pritom umožňujú skener umiestniť do konvenčných lietadiel ako aj do lietajúcich zariadení pilotovaných na diaľku vrátane zariadení schopných lietať pod korunami stromov.

Výhodou technológie ALS je možnosť vykonávať skenovanie na lokálnej až regionálnej úrovni pri stabilnom prijímaní signálu z GNSS družíc, čo významne zvyšuje ekonomickú efektívnosť záznamu. Za krátky čas je tak možné z pomerne veľkého územia získať a následne automatizovane spracovať veľké množstvo trojrozmerných dát so submetrovou presnosťou. Získané LiDAR dáta pritom posky-

tujú široké možnosti produkcie ich derivátov dosahujúcich geodetickú presnosť a zároveň umožňujú aplikovať stromové ako aj plošné prístupy ALS-založenej taxácie lesa. Na druhej strane, skenovanie nie je možné vykonávať bez dôkladnej prípravy a administrácie, záznam LiDAR dát pod korunami stromov je limitovaný a cena skenovacieho zariadenia je relatívne vysoká.

S ohľadom na výhody a nevýhody technológie ALS sa aplikácie v taxácii lesa zameriavajú predovšetkým na tri oblasti: (1) Mapovanie lesnej cestnej siete; (2) Mapovanie lesa s/bez zohľadnenia kritérií definujúcich les (napr. minimálna výmera, šírka, výška, korunový zápoj); (3) Inventarizácia lesa prostredníctvom stromového ako aj plošného prístupu vrátane detekcie jednotlivých stromov a zisťovania alebo odvodzovania relevantných stromových a porastových charakteristík.

Z dostupných informácií vyplýva, že v taxačnej praxi sa technológia ALS využíva v širšom spektre jej potenciálu predovšetkým v škandinávskych krajinách, kde predmetné výskumné aktivity prebiehajú kontinuálne už od deväťdesiatych rokov dvadsiateho storočia a kde vláda priamo podporuje vlastníkov lesa, ktorí výsledky výskumu aplikujú (Maltamo et al. 2014). Na Slovensku sa technológia ALS v kombinácii s DAP v súvislosti s taxáciou lesa využíva od roku 2014, a to predovšetkým v rámci aktivít Národného lesníckeho centra vo Zvolene (NLC). Dáta získané z 1/10 územia ročne sa prakticky zatiaľ ale využívajú len za účelom mapovania lesov. Paralelné snímkovanie a skenovanie vlastnou infraštruktúrou NLC (obr. 2a) pritom predstavuje slubný potenciál na variabilnejšie využitie získaných dát nielen na záznam priestorových informácií pre mapovanie polohopisu prípadne výškopisu, ale aj na zabezpečenie rôznych kvantitatívnych ako aj kvalitatívnych informácií využiteľných v trvalo udržateľnom manažmente lesov. Dostupné štúdie zo sveta ako aj zo Slovenska to jasne potvrdzujú. Vyplýva z nich, že v závislosti od zvoleného plánu skenovania je týmto spôsobom možné zabezpečiť za jednu hodinu dáta z plochy až niekoľko sto kilometrov štvorcových. Podiel správne identifikovaných stromov na základe týchto dát môže následne dosiahnuť až  $60 \pm 20\%$  (Sačkov et al. 2017a, 2019a). Celková chyba (RMSE%) zistenia strednej výšky, strednej hrúbky a zásoby pritom s pravdepodobnosťou 68 % v určitých prípadoch dosahuje hodnotu  $12 \pm 7\%$ ,  $16 \pm 10\%$  a  $21 \pm 8\%$  (Sačkov et al. 2017b, 2019b).



**Obrázok 2.** Technológia leteckého snímkovania a laserového skenovania: a) Leica ALS70-CM and Leica RCD30; b) Cessna 206 OK-EKT (Miková et al. 2020)

**Figure 2.** Technology of airborne imaging and laser scanning: a) Leica ALS70-CM and Leica RCD30; b) Cessna 206 OK-EKT (Miková et al. 2020).

### Pozemné laserové skenovanie v taxácii lesa

Skenovanie technológiou TLS sa vykonáva zo zeme pričom laserový skener je umiestnený na nepohybujúcom sa nosnom zariadení (napr. statív). LiDAR dáta sú tak v tomto prípade väčšinou zabezpečované spájaním záznamov z rôznych pozícií skenera, na ktoré ho je nutné vždy individuálne stabilizovať. Rôzne pozície skenera tak umožňujú zaznamenať objekty z rôznych strán, ale ich počet jednoznačne ovplyvňuje čas a energiu potrebnú na realizáciu skenovania. Z prevádzkového hľadiska je preto efektívnejšou alternatívou technológia MLS, ktorá umožňuje zo zeme zaznamenať objekty z rôznych

strán prostredníctvom jedného kontinuálneho záznamu. Laserový skener je v tomto prípade umiestnený na pohybujúcom sa nosnom zariadení (napr. vozidlo, obr. 3a) alebo je nesený človekom (napr. batoh, obr. 3b).

Z uvedených dôvodov má v rámci taxácie lesa vyšší aplikačný potenciál technológia MLS. Jej výhodou je možnosť vykonávať skenovanie individuálne, operatívne a teda aj opakovane, pričom za relatívne krátky čas je možné bezkontaktné získať a následne automatizovane spracovať veľké množstvo trojrozmerných dát až s milimetrovú presnosťou. Na druhej strane, jej aplikačné možnosti dosahujú len lokálnu úroveň, podrobne sa zaznamenávajú väčšinou len objekty pod korunami stromov, ekonomická efektívnosť skenovania je nižšia ako v prípade ALS, cena skenovacieho zariadenia je relatívne vysoká a obmedzením býva aj nestabilný príjem GNSS signálu počas kontinuálneho záznamu. MLS-založená taxácia lesa je navyše obmedzená len na stromový prístup.

S ohľadom na výhody a nevýhody technológie MLS sa aplikácie v taxácii lesa zameriavajú predovšetkým na dve oblasti: (1) Mapovanie lesnej cestnej siete vrátane zhodnotenia jej technického stavu; (2) Inventarizácia lesa vrátane detekcie jednotlivých stromov a zisťovania alebo odvodzovania ich výšky, hrúbky ako aj objemu, pričom sa špeciálne analyzovali aj možnosti tvorby kmeňových profilov a originálnych alometrických modelov.

Z dostupných informácií vyplýva, že v taxačnej praxi sa technológia MLS zatiaľ nevyužíva. Jej aplikačný potenciál v Európe ale podrobnejšie analyzuje skupina niekoľkých finských vedeckých a akademických inštitúcií spolupracujúcich v rámci „Centre of Excellence in Laser Scanning Research“ (<https://laserscanning.fi>). V tejto spolupráci bol skonštruovaný vlastný skenovací systém „ROAMER“, ktorý z väčšej časti pozostáva z unifikovaných zariadení tretích strán (Kukko et al. 2012). Z týchto dôvodov ani výskum zameraný na využitie technológie MLS v taxácii lesa nie je rozsiahly. Dostupné štúdie založené na dátach zo skenera, ktorý je nesený človekom ale preukazujú jasný aplikačný potenciál v tejto oblasti. Vyplýva z nich, že v závislosti od zvoleného plánu skenovania je týmto spôsobom možné zabezpečiť za jednu hodinu dáta z plochy až niekoľko sto metrov štvorcových. Podiel správne identifikovaných stromov na základe týchto dát môže následne dosiahnuť až  $80 \pm 20\%$ . Celková chyba (RMSE%) zistenia výšky, hrúbky a objemu týchto stromov pritom s pravdepodobnosťou 68 % v určitých prípadoch dosahuje hodnotu  $10 \pm 4\%$ ,  $9 \pm 4\%$  a  $12 \pm 2\%$  (Hyypä et al. 2020).



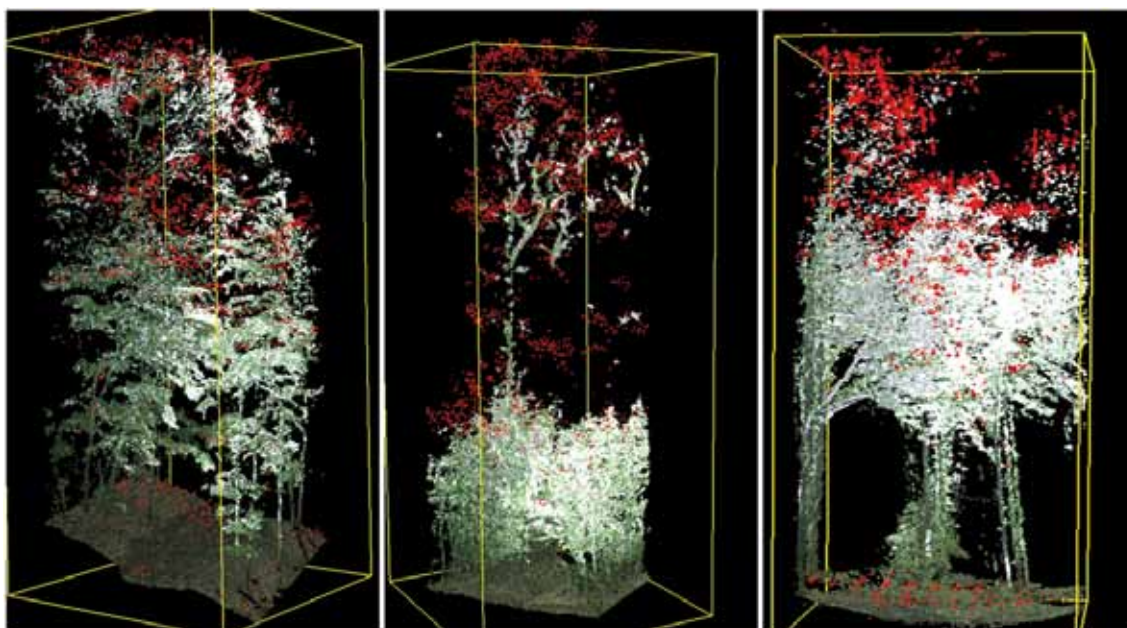
**Obrázok 3.** Technológia pozemného mobilného laserového skenovania: a) Leica Pegasus: Two; b) Leica Pegasus: Backpack  
*Figure 3.* Technology of mobile laser scanning: a) Leica Pegasus: Two; b) Leica Pegasus: Backpack.

## Pilotné zhodnotenie aplikačného potenciálu kombinácie leteckého a pozemného mobilného laserového skenovania na Slovensku

V slovenských podmienkach sa celkovo prvé zhodnotenie aplikačného potenciálu kombinácie ALS a MLS dát za účelom taxácie lesa vykonalo v rámci riešenia projektu „Výskum a vývoj na podporu konkurencieschopnosti slovenského lesníctva (SLOVLES)“.

Riešenie prebiehalo v troch fázach. Prvá fáza sa vykonávala v roku 2019 a zameriavala sa na všeobecné zhodnotenie aplikačného potenciálu ALS a MLS v rámci taxácie lesa, ktoré bolo založené na rešerši poznatkov z oblasti súvisiaceho výskumu ako aj praxe. Druhá fáza sa vykonávala v roku 2020 a zameriavala sa na špecifické zhodnotenie aplikačného potenciálu ALS a MLS v rámci taxácie lesa, ktoré bolo založené na vlastných dátach zo záujmového územia LC Víglaš (obr. 4). Tretia fáza sa vykonávala v roku 2021 a zameriavala sa na vyhodnotenie výsledkov riešenia predošlých fáz a ich syntézu do realizačného výstupu projektu.

Realizačný výstup projektu vo forme štúdie bude k dispozícii koncom roka 2021. V prvej kapitole štúdia poskytne prehľad všeobecných informácií o rôznych aplikáciách ALS a MLS dát v rámci taxácie lesa vo svete a na Slovensku. V druhej kapitole štúdia poskytne špecifické informácie o aplikácii ALS a MLS dát v rámci taxácie lesa, ktoré vyplývajú z vykonanej prípadovej štúdie v záujmovom území LC Víglaš. V tretej kapitole štúdia zosumarizuje uvedené všeobecné ako aj špecifické informácie a poskytne tak ucelený prehľad možností a obmedzení aplikácie ALS a MLS dát v rámci taxácie lesa vrátane odporúčaní pre efektívny transfer tejto technológie do hospodárskej praxe manažmentu lesa.



**Obrázok 4.** Zhodnotenie aplikačného potenciálu kombinácie leteckého (červená farba) a pozemného mobilného (RGB farba) laserového skenovania v taxácii lesa bolo vykonané na troch referenčných plochách lokalizovaných na území LC Víglaš

*Figure 4.* An application potential of combined use of airborne (red color) and mobile (RGB color) laser scanning within the forest management inventory was evaluated on three reference plots located in the territory of the forest management unit Víglaš.

## Záver

Zisťovanie stavu v vývoja lesa na základe kombinácie dát technológií ALS, DAP a MLS poskytuje príležitosť na čiastočné či úplne nahradenie extenzívnej pozemnej taxácie lesa, ktorá je fyzicky, ekonomicky a časovo značne náročná. V slovenských podmienkach sa celkovo prvé zhodnotenie aplikačného potenciálu kombinácie dát týchto technológií za účelom taxácie lesa vykonalo v rámci riešenia projektu „SLOVLES“. Realizačný výstup projektu vo forme štúdie bude k dispozícii koncom roka 2021, pričom na základe rešerše predmetnej oblasti a prípadovej štúdie vykonanej na území v LC Víglaš poskytne ucelený prehľad možností a obmedzení aplikácie ALS a MLS dát v rámci taxácie lesa zohľadňujúc relevantné technické, ekonomické a legislatívne súvislosti.

## Podakovanie

*Tento príspevok bol podporený projektom „Výskum a vývoj na podporu konkurencieschopnosti slovenského lesníctva – SLOVLES“, financovaným z rozpočtovej kapitoly MPRV SR v rámci prvku 08V0301 a projektom „Rozvoj pokrokových geopriestorových technológií pre viacúrovňový monitoring lesných ekosystémov – GeoMon“, financovaným prostredníctvom verejnej výzvy APVV v rámci zmluvy č. APVV-19-0257.*

## Literatúra

- Hyypä, E., Kukko, A., Kaijaluoto, R., White, J.C., Wulder, M.A., Pyörälä, J., Liang, X., Yu, X., Wang, Y., Kaartinen, H., Virtanen, J. P., Hyypä, J., 2020: Accurate derivation of stem curve and volume using backpack mobile laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, (161):246–262.
- Kukko, A., Kaartinen, H., Hyypä, J., Chen, Y., 2012: Multiplatform Mobile Laser Scanning: Usability and Performance. *Sensors*, (12):11712–11733.
- Maltamo, M., Naesset, E., Vauhkonen, J., 2014: *Forestry Application of Airborne Laser Scanning: Concept and Case Studies*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 460 s.
- Miková, A., Halvoň, L., Gábor, M., 2020: Čo všetko dokáže laser – zbraň alebo zdroj údajov. Výstupy NLC pre lesnícku prax II. Zvolen, NLC, s. 12–22.
- Sačkov, I., Hlásny, T., Bucha, T., Juriš, M., 2017a: Integration of tree allometry rules to treetops detection and tree crowns delineation using airborne lidar data. *iForest*, (10): 459–467.
- Sačkov, I., Sedliak, M., Kulla, L., Bucha, T., 2017b: Inventory of Close-to-Nature Forests Based on the Combination of Airborne LiDAR Data and Aerial Multispectral Images Using a Single-Tree Approach. *Forests*, (8):467.
- Sačkov, I., Kulla, L., Bucha, T., 2019a: A Comparison of Two Tree Detection Methods for Estimation of Forest Stand and Ecological Variables from Airborne LiDAR Data in Central European Forests. *Remote Sensing*, (11):1431.
- Sačkov I., Scheer L., Bucha T., 2019b: Predicting forest stand variables from airborne LiDAR data using a tree detection method in Central European forests. *Central European Forestry Journal*, (65):191–197.
- Szarka, P., Bavlšík, J., 2018: 250-ročná tradícia vypracovania lesných hospodárskych plánov na Slovensku. *Les&Letokruhy*, 7:4–6.

---

### Adresa:

Ing. Ivan Sačkov, PhD.

Národné lesnícke centrum - Lesnícky výskumný ústav Zvolen, T. G. Masaryka 2175/22, SK – 960 01 Zvolen

e-mail: ivan.sackov@nlcsk.org