

**MRAČNO BODOV AKO ZDROJ DÁT PRE TVORBU DMR**

Peter BOBÁL<sup>1</sup>, Marek FRAŠTIA<sup>2</sup>, Marek IVANÁK<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> YMS, a.s., Hornopotočná 1, 917 01, Trnava, Slovensko  
*peter.bobal@yms.sk; marek.ivanak@yms.sk*

<sup>2</sup> STU v Bratislave, Stavebná fakulta, Radlinského 11, 81368, Bratislava 1, Slovensko  
*marek.frastia@stuba.sk*

**Abstrakt**

Digitálne modely reliéfu (DMR) sú vhodné nielen pre vizualizáciu priebehu reliéfu, ale sú aj podkladom pre množstvo geopriestorových analýz. Ich kvalita je preto jedným z kľúčových faktorov pre dosiahnutie výsledkov analýz na požadovanej úrovni. Pre tvorbu DMR sa v súčasnosti používajú rôzne druhy zdrojových a doplnkových údajov. V posledných rokoch sa však do popredia dostáva tvorba DMR z mračna bodov získaného prostredníctvom leteckého laserového skenovania (LiDAR). Okrem mračna bodov z LiDAR-u je však možné generovať mračno bodov aj z obrazového skenovania povrchu využitím leteckých snímok. Takéto dáta majú však určité obmedzenia, ale aj výhody. Tento príspevok porovnáva možnosti využitia bodových mračen získaných z laserového a obrazového skenovania pre účely tvorby DMR v troch záujmových lokalitách v blízkosti mesta Bytča.

**Abstract**

Digital terrain models are suitable not only for visualization of relief, but also as a data source for many spatial analyses. Their quality is therefore one of the key factors in achieving the required results. Currently, various kinds of data sources are used for DTM creation. In recent years, point cloud derived from airborne laser scanning is often used to generate DTM. In addition to extracting point cloud from LIDAR, it is also possible to generate point cloud from optical scanning of relief using aerial photos. This kind of data has some limitations, but also advantages. This article compares the possibilities of using point cloud data from airborne laser scanning (LIDAR) and from optical scanning for DTM generation in three locations near Bytča city.

**Kľúčové slová:** LIDAR, Letecké laserové skenovanie (LLS), digitálny model terénu, obrazové skenovanie

**Keywords:** LIDAR, Airborne laser scanning, digital terrain model, optical scanning

**1. ÚVOD**

Využitelnosť digitálneho modelu reliéfu ako jednej zo základných geoinformačných technológií je čím ďalej tým rozmanitejšia. DMR je dôležitým podkladom pre rôzne druhy analýz napr. v oblasti hydrológie, poľnohospodárstva, dopravy a podobne. Hlavná požiadavka je pritom kladená na presnosť samotných modelov.

Na Slovensku existuje niekoľko digitálnych modelov reliéfu, ktoré sa líšia svojím rozlíšením a presnosťou. Sú to DMR-1, DMR100-SK, DMR-2, DMR25-SK, DMR 50, DMR-3, ktorý je označený ako digitálny model reliéfu tretej generácie. Bol dokončený v roku 2004 v Topografickom ústave (TOPÚ) v Banskej Bystrici a vytvorený bol vektorizáciou výškopisu, najmä topografických máp v mierke 1:10 000, niektoré malé časti 1:25 000. DMR-3 je rastrový model s rozlíšením 10x10m, 25x25m, 50x50m a 100x100m (Daňová a kol., 2012). Výšková presnosť DMR-3 sa predpokladá na úrovni  $\pm 2,5$  m, avšak z testov presnosti vyplýva, že rozdiely od skutočných hodnôt dosahujú aj 15 m

na výškovo členitých územiach. Posledný aktuálny výškový model na Slovensku je označovaný ako DMR-3.5 a vznikol úpravou DMR-3 z dát zbieraných fotogrametricky pre ZBGIS (Geoportál, 2014).

V súčasnosti dochádza k zdokonaľovaniu technológií slúžiacich pre zber údajov na tvorbu DMR. Do popredia sa dostávajú predovšetkým metódy diaľkového prieskumu zeme (DPZ) umožňujúce získavať informácie o priebehu reliéfu bezkontaktnými metódami. Poskytujú možnosť rýchleho a efektívneho zberu údajov aj z plošne rozľahlejších a menej dostupných oblastí.

Jednou z najprogressívnejších technológií DPZ pre získavanie podkladových informácií pre generovanie DMR je technológia leteckého laserového skenovania. Ide o aktívnu metódu diaľkového prieskumu Zeme, založenú na meraní vzdialenosti medzi skúmaným objektom a samotným skenerom, umiestneným najčastejšie na lietadlách alebo vrtuľníkoch. Výsledkom procesu získavania údajov pomocou LLS je množina presných georeferencovaných bodov, tzv. mračno bodov. Veľkou výhodou tejto technológie je okrem jej vysokej presnosti aj aplikácia v zalesnených oblastiach, kde je vysoká pravdepodobnosť, že určitá časť laserového lúča prenikne aj pod koruny stromov (Vosselman G., Maas H.G. 2010; Bobál, P., Holubec, M., 2013).

Proces spracovania surových dát z lidarů zahrňuje množstvo úkonov ako je vertikálne a horizontálne vyrovnávanie mračna bodov, georeferencovanie, klasifikácia mračna bodov, jeho filtrácia, atď. K tomuto účelu je nutné využiť špecializované softvérové vybavenie. Výsledné mračno bodov je potom možné priamo použiť na tvorbu DMR, poprípade ho doplniť ďalšími doplnkovými údajmi.

Ďalším možným spôsobom generovania mračna bodov povrchu reliéfu je metóda obrazového skenovania. Pre jeho získavanie sa používajú snímky s prekrytom aspoň 60%. V prípade, že objekt resp. terén je snímaný z viacerých rôznych perspektív (SFM – Structure From Motion), je možné tento povrch digitálne rekonštruovať, teda určiť jeho geometriu a polohu v danom súradnicovom systéme. Samotný princíp metódy je teda založený na podobnosti obrazov zachytených z rôznych pozícií. Cieľom je nájsť korešpondujúce body na snímkach, z ktorých je možné určiť vzájomnú orientáciu snímok v celom snímkovom bloku a vypočítať priestorovú polohu bodov vzhľadom na polohu a orientáciu snímok. Následne po tejto orientácii sa generuje samotný povrch tak, že výsledkom je bodové mračno podobne ako pri laserovom skenovaní. Bodové mračno z obrazového skenovania je v podstate totožné s mračnom bodov z lidarů v prípade, že by do úvahy bol vzatý len prvý odraz. Použitím vhodných algoritmov pre filtrovanie je možné z mračna bodov z obrazového skenovania získať body reprezentujúce reliéf (podobne ako pri mračne bodov z lidarů) a využiť ho na generovanie DMR (Fraštia, M., 2012; Nex, F., Rinaldo, F., 2008).

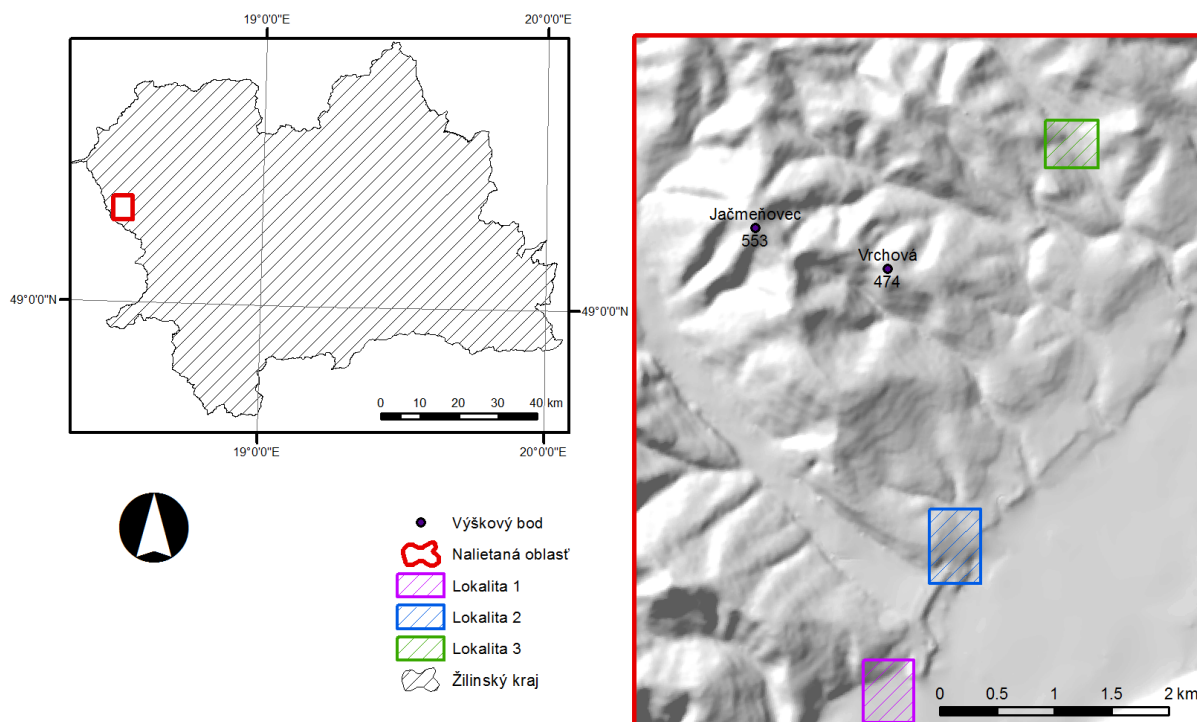
Obrazové skenovanie povrchu je menej nákladný spôsob získavania údajov ako LLS. Vygenerované mračno bodov však neumožňuje na rozdiel od lidarů zachytiť terén nachádzajúci sa pod lesným porastom. Poskytuje však možnosť vizuálnej (obrazovej) interpretácie objektov, ktoré môžu byť pre dáta z LLS problematicky vyhodnotiteľné. Rovnako dovoľuje vytvárať bodové mračná s veľmi vysokou hustotou bodov na m<sup>2</sup>, čo môže napomôcť k lepšej reprezentácii nespojitostí v teréne. Vyššia hustota bodov však nemusí zákonite garantovať vyššiu vertikálnu presnosť výsledného produktu (White, J.C., a kol., 2013).

Cieľom tohto príspevku je posúdenie kvality dnes štandardne dostupných DMR s DMR generovaných pomocou laserového a obrazového skenovania.

## 2. ZÁUJMOVÁ OBLASŤ A VSTUPNÉ DÁTA

Ako záujmová oblasť pre uskutočnenie náletu bola vybraná oblasť nachádzajúca sa západne od okresného mesta Bytča v Žilinskom kraji (Slovenská republika). Jedná sa o pomerne výškovo členité územie v blízkosti letiska Dolný Hričov. Celková rozloha nalietanej oblasti je približne 30 km<sup>2</sup>. Nálet bol uskutočnený v letných mesiacoch 2014 počas jedného dňa.

Z celej nalietanej oblasti boli vybrané 3 menšie lokality, pre overenie možnosti využitia mračna bodov pre tvorbu digitálneho modelu reliéfu (obr. 1). Každá z týchto lokalít bola nalietaná s odlišnou hustotou bodov na m<sup>2</sup> aby bolo možné určiť vplyv tohto faktu na výslednú kvalitu modelu.



Obr. 1. Zaujmová oblasť

### 3. POUŽITÉ TECHNOLOGIE

Pre zber dát bol využitý letecký nosič PA-34 Seneca vybavený systémom pre pokročilé mapovanie koridorov Trimble Harrier 68i (obr. 2). Systém pozostáva z full-waveform laserového skeneru a strednoformátovej digitálnej kamery. Ako nosič bolo použité lietadlo. Systém slúži pre generovanie podrobných lidarových mračien bodov v kombinácii s kvalitnými georeferencovanými ortofotomapami. Základné parametre laserového skeneru zobrazuje tab. 1:

Tab. 1. Základné parametre laserového skeneru

Frekvencia pulzov (PRR)	80 kHz – 400 kHz	Uhlové rozlíšenie	0.001 °
Frekvencia skenovania	10 Hz – 200 Hz	Presnosť vertikálna	< 0.25 m
Zorný uhol	45 ° – 60 °	Presnosť horizontálna	< 0.15 m
Operačná výška	30 – 1600 m AGL		

Ako bolo uvedené vyššie, okrem leteckého laserového skeneru bola na palube lietadla umiestnená aj 60 megapixelová digitálna kamera pre letecké aplikácie Trimble AC P65+. To umožnilo zaznamenať počas jedného náletu nielen laserové údaje, ale aj letecké snímky sledovaného územia. Základné parametre kamery sú uvedené tabuľke 2:

**Tab. 2.** Základné parametre kamery Trimble AC P65+

Rozlíšenie snímača	60 mpx (8924x6732)	Veľkosť pixla (GSD)	od 0.03 m
Farebná hĺbka	16 bitov/kanál	Exp. rýchlosť uzávierky	2.8 s
Veľkosť pixla (snímač)	0,006 mm	Počet kanálov	3 (RGB)

**Obr. 2** Systém Trimble Harrier 68i

## 4. SPRACOVANIE ZÍSKANÝCH ÚDAJOV

### 4.1 Laserové dáta

V rámci prípravnej fázy spracovania údajov bolo realizované vyrovnanie letovej dráhy. K tomuto účelu bola využitá aplikácia PosPac MMS za pomoci údajov z pozemnej referenčnej stanice a údajov zameraných pomocou GNSS a IMU jednotky umiestnených na palube lietadla. Ide o aplikáciu pre priame georeferencovanie kompatibilnú s množstvom leteckých senzorov.

Extrakcia jednotlivých bodov zo surového laserového signálu bola prevedená prostredníctvom aplikácie RiANALYZE. Aplikácia RiANALYZE využíva full-waveform analýzu laserových údajov pre generovanie mračna bodov v súradnicovom systéme skenera. Pomocou metódy gaussovej dekompozície, ktorá je jednou z najčastejšie používaných metód pre analýzu full-waveform dát, boli identifikované jednotlivé odrazy zo surového laserového signálu. Pre každý z bodov aplikácia ukladá okrem súradníc (x,y,z) aj dodatočné informácie k danému bodu ako je napr. časová značka, intenzita odrazu, šírka pulzu, poradie odrazu, a podobne.

K horizontálnemu a vertikálnemu vyrovnaniu mračna bodov bola využitá aplikácia LP Master. Vyrovnanie bolo prevedené v dvoch krokoch. V prvom kroku ide o relatívne vyrovnanie, kde sa vyrovnávajú jednotlivé letové línie/pásky voči sebe. V druhom kroku ide o vyrovnanie voči referenčným údajom tzv. globálne vyrovnanie. Pre horizontálne vyrovnanie boli využité vektorové obrysy budov nachádzajúce sa v sledovanej oblasti. Pre vertikálne vyrovnanie boli využité referenčné body zamerané v teréne. K dispozícii bolo 13 referenčných bodov.

Georeferencované mračno bodov bolo nutné ešte filtrovať a extrahovať z neho body reprezentujúce povrch reliéfu. Tento krok bol vykonaný využitím aplikácie DTM Toolkit. Keďže sledované územie bolo nalietané s rôznou hustotou, výsledné mračno bodov reprezentujúce povrch reliéfu mali nasledovnú hustotu:

**Tab.3** Priemerná hustota mračna bodov na m<sup>2</sup> v jednotlivých lokalitách

<i>Sledované územie</i>	<i>Hustota mračna bodov na m<sup>2</sup></i>
Lokalita 1	22
Lokalita 2	18
Lokalita 3	10

#### 4.2 Letecké snímky

Pre spracovanie leteckých snímok a tvorbu mračna bodov bola použitá aplikácia PhotoScan. Priemerná hodnota veľkosti pixla na teréne (GSD) bola 0,08 m pri letovej výške 650 m nad terénom. Postup prác možno zhrnúť do nasledovných krokov:

- a) Vyhľadanie charakteristických bodov na každej snímke.
- b) Identifikácia identických charakteristických bodov na jednotlivých snímkach.
- c) Blokové vyrovnanie zväzku lúčov (vrátane samokalibrácie kamery, ak je to potrebné).

V tejto fáze sú snímky presne vzájomne zorientované. Poloha a orientácia celého snímkového bloku v systéme WGS84 bez vlícovacích bodov je daná presnosťou georeferencovania snímok pomocou GNSS a inerciálneho meracieho systému (IMS) a dosahuje presnosť od 0,5 m do niekoľko metrov. Už táto presnosť je vyhovujúca pre mnohé aplikácie a je možné pokračovať v ďalšom spracovaní. Pokiaľ však potrebujeme výsledky v národnom alebo lokálnom systéme v presnosti, ktorú obrazové dáta sú schopné poskytnúť, je potrebné na snímkach zamerať vlícovacie body, ktorých súradnice sú v požadovanom konečnom súradnicovom systéme. Celý blok sa potom transformuje do tohto súradnicového systému. Ďalší postup je teda nasledovný:

- d) Meranie vlícovacích bodov na snímkach, prepočet do nového systému.
- e) Generovanie podrobného bodového mračna (vygenerované mračna bodov v záujmovej oblasti s hustotou cca 50 bodov na m<sup>2</sup>).
- f) Tvorba DMR vo forme TIN s požadovaným rozlíšením (max. 1 pixel).
- g) Tvorba ortofotomozaiky s požadovaným rozlíšením (max. 1 pixel).

#### 5. VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV

Výsledné mračna bodov z leteckého laserového skenovania a z leteckých snímok boli využité priamo na generovanie DMR. Pre všetky tri lokality bol vytvorený DMR vo forme nepravidelnej trojuholníkovej siete (TIN – Triangular Irregular Network).

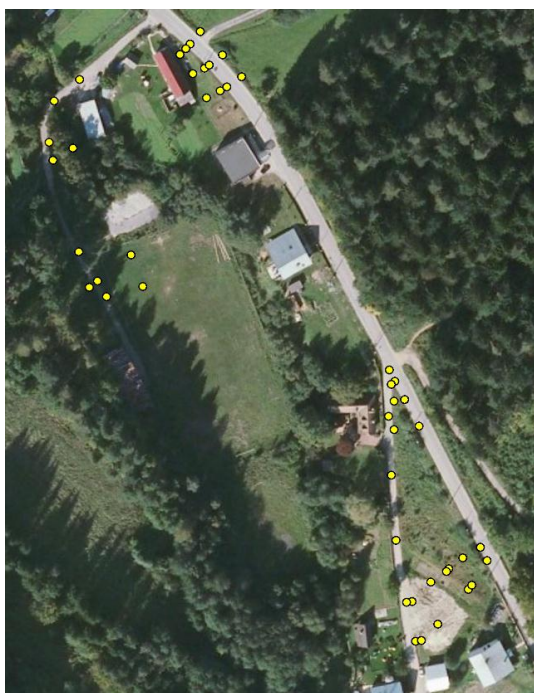
K vyhodnotenie kvality samotného digitálneho modelu reliéfu je možné využiť viacero metód. Často sa kvalita modelu hodnotí len vizuálne bez použitia podporných dát. Vizuálnou kontrolou je možné identifikovať hrubé chyby, ktoré môžu byť následne z modelu odstránené. Avšak takýto spôsob hodnotenia kvality modelu nie je postačujúci a neposkytuje dostatočný obraz o presnosti daného modelu.

Častejšie používaným spôsobom hodnotenia kvality DMR je použitie štatistických ukazovateľov. Najčastejšie používaným ukazovateľom pre vyhodnotenie vertikálnej presnosti modelu je stredná kvadratická chyba RMS (Root Mean Square). Slúži na vyhodnotenie rozdielu medzi hodnotou reprezentovanou prostredníctvom modelu a hodnotou meranou inou technológiou, avšak 5-10 násobne presnejšou. Vhodným ukazovateľom kvality DMR je aj priemerná výšková chyba. Umožňuje odhaliť výskyt systematických chýb modelu (napr. vertikálny posun).

K výpočtu týchto ukazovateľov je nutné využiť kontrolné body zamerané priamo v teréne. Pre tieto účely bolo v záujmovej oblasti vykonané zameranie kontrolných bodov GNSS technológiou v systéme SKPOS (Slovenská Priestorová Observačná Služba). V tejto sieti permanentných staníc je deklarovaná presnosť určenia bodu v reálnom čase v polohe 0,02 m a vo výške 0,05 m. Merania boli uskutočnené tak, aby sa kontrolné body nachádzali na rôznych typoch povrchov ako napr. asfaltové plochy, lúky, polia a podobne a aby boli rovnomerne rozložené v skúmanej oblasti. Merania boli uskutočnené jednak v intravilánoch dotknutých obcí ale aj v extraviláne a v blízkosti vodného toku (v závislosti od dostupnosti danej lokality). V lokalite 1 bolo zameraných 42 kontrolných bodov, v lokalite 2 bolo zameraných 29 kontrolných bodov a v lokalite 3 to bolo 47 kontrolných bodov. Rozloženie kontrolných bodov v území zobrazujú nasledujúce obrázky:



**Obr. 3.** Rozloženie kontrolných bodov v lokalite 1 (vľavo) a v lokalite 2 (vpravo)



**Obr. 4.** Rozloženie kontrolných bodov v lokalite 3

Z vypočítaných hodnôt RMS chyby a priemernej výškovej chyby v jednotlivých lokalitách (viď tabuľka 4 a 5) je možné konštatovať, že DMR z mračna bodov získaného pomocou LLS dosahuje vyšiu výškovú presnosť ako DMR z bodového mračna, ktoré je výstupom obrazového skenovania. Tento jav sa prejavil vo všetkých troch lokalitách. Rozdiely v hustote bodov pri mračne bodov z LLS sa na výslednej presnosti v jednotlivých lokalitách neprejavili. Najnižšia presnosť modelu bola v oboch prípadoch zaznamenaná v lokalite 2. Môže to byť spôsobené tým, že nalietanie bolo realizované počas vegetačného obdobia a väčšina bodov zameraných v tejto lokalite sa nachádza na trávnom povrchu. Aj napriek vyššie zmieneným skutočnostiam vypočítané hodnoty RMS chyby a priemernej výškovej chyby hovoria o veľmi dobrej reprezentácii priebehu reliéfu v sledovanej oblasti.

**Tab. 4.** Vypočítané hodnoty výškovej RMS chyby (m) v sledovaných lokalitách

	<i>Lokalita 1</i>	<i>Lokalita 2</i>	<i>Lokalita 3</i>	<i>Priemer</i>
DMR (LIDAR)	0.11	0.15	0.11	<b>0.12</b>
DMR (obr. skenovanie)	0.22	0.23	0.17	<b>0.20</b>

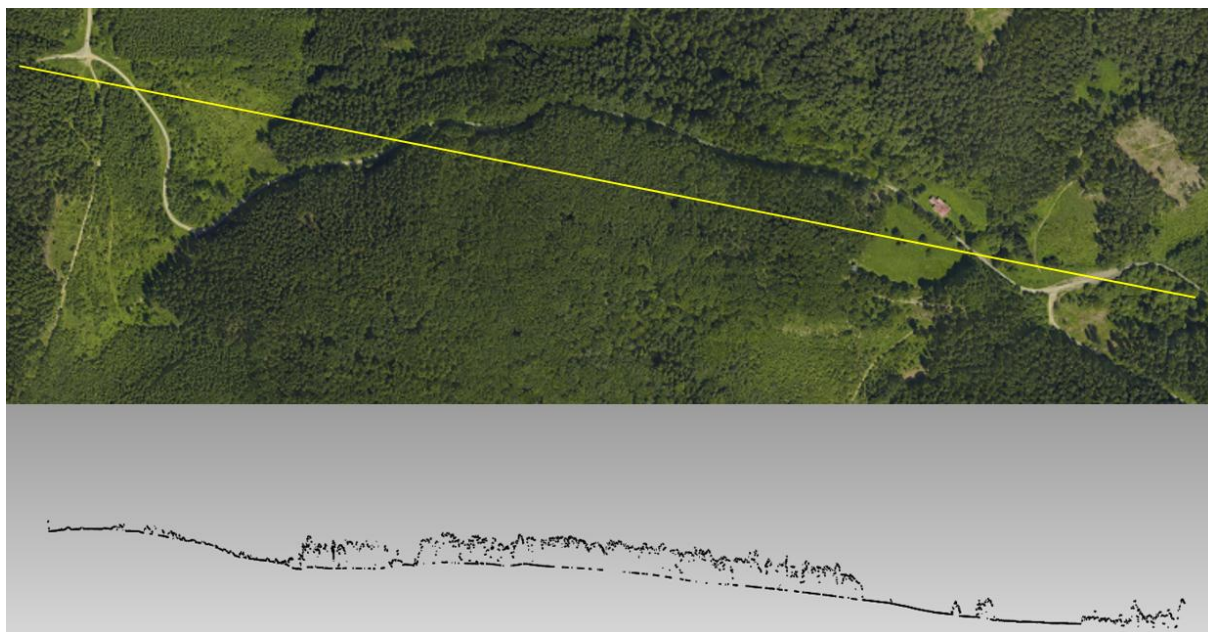
**Tab. 5.** Vypočítané hodnoty priemernej výškovej chyby (m) v sledovaných lokalitách

	<i>Lokalita 1</i>	<i>Lokalita 2</i>	<i>Lokalita 3</i>	<i>Priemer</i>
DMR (LIDAR)	-0.10	-0.11	-0.10	<b>-0.10</b>
DMR (obr. skenovanie)	-0.20	-0.12	-0.15	<b>-0.16</b>

## 6. ZÁVER

Je zrejmé, že údaje z leteckého a obrazového skenovania poskytujú rádovo vyššiu kvalitu čo sa týka výškovej presnosti ako doposiaľ používané národné DMR. Naše testy potvrdili predpokladanú výškovú presnosť oboch technológií na úrovni 0,10 – 0,25 m, čo dáva dobré perspektívy do tvorby vysoko presného digitálneho modelu reliéfu do budúcnosti.

LLS má zásadnú výhodu oproti fotogrametrii v schopnosti detekovať body reliéfu aj v zalesnených oblastiach, dokonca vo vegetačnom období (obr.5). Pritom poskytuje robustnejšie výsledky s menším šumom a menej odľahlými meraniami a javí sa tak, ako technológia o niečo vhodnejšia pre tvorbu výškových modelov ako fotogrametrické metódy. Fotogrametria naopak dokáže generovať hustejšie bodové mračná pri nižších nákladoch a poskytuje vizuálne možnosti identifikácie objektov na snímkach alebo ortofotomozaikách. Preto je optimálnym riešením možnosť súbežného nasadenie oboch technológií pri digitalizácii zemského povrchu.



Obr. 5 Profil cez mračno bodov v zalesnenom území.

## LITERATÚRA

- [1] Bobál, P., Holubec, M. (2013) Basis principles and use of lidar data. Zborník z konferencie INAIR 2013, Bratislava, 7 – 8 Novembra 2013, EDIS, Žilina, pp. 9-12
- [2] Daňová a kol. (2012) Výšková presnosť digitálnych modelov reliéfu horských oblastí. Manažment povodí a povodňových rizík, Časť, 6 – 8 decembra
- [3] Fraštia, M. (2012) Laserové verzus optické skenovanie skalných masívov. Mineralia Slavaca, č. 44, pp. 177-184
- [4] Nex, F., Rinaldo, F. (2008) Multi-image matching: an „Old and New“ Photogrammetric Answer to Lidar Techniques. ISPRS, Beijing, 3 -11 Júla 2008, pp. 621-626
- [5] Geoportál, <http://www.geoportal.sk/sk/udaje/udaje-zbgis/udaje-zbgis/aktualizacia-dmr-3-5.html>, 18.12.2014
- [6] Vosselman G., Maas H.G. (2010) Airborne and terrestrial laser scanning, CRC Press, Dunbeath
- [7] White, J.C., a kol. (2013) The Utility of Image-Based Point Clouds for Forest Inventory: A Comparison with Airborne Laser Scanning. *Forests*, č. 4, pp. 518-536.

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu: „Brokerské centrum leteckej dopravy pre transfer technológií a znalostí do dopravy a dopravnej infraštruktúry ITMS 26220220156.“



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/ Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ