

Michal GALLAY, Chris LLOYD, Jennifer MCKINLEY, Lorraine BARRY

## POROVNANIE VERTIKÁLNEJ PRESNOSTI DIGITÁLNYCH MODELOV GEORELIÉFU Z ÚDAJOV ZÍSKANÝCH MODERNÝM POZEMNÝM MERANÍM A LETECKÝM LASEROVÝM SKENOVANÍM

Gallay, M., Lloyd, C., McKinley, J., Barry, L.: Comparing the vertical accuracy of digital elevation models derived using modern ground survey and airborne laser scanning. Kartografické listy 2011, 19, 4 figs., 2 tabs., 21 refs.

**Abstract:** The paper presents a comparison of digital elevation models of georelief (terrain) (DEMs) of a high spatial resolution based on summary statistics of elevation residuals. The DEMs were generated from elevation points measured using three state-of-the-art ground surveying technologies and airborne laser scanning (ALS), also known as LiDAR. The data acquired represent two sections of the earth surface in a mountainous area of the Great Langdale Valley, Lake District, England. Four DEMs were derived from the four datasets which were mutually subtracted and statistics were computed from the residuals for each site. The applicability of the ground surveying methods is also discussed. Based on practical experience, it was concluded that surveying with total station using automatic target recognition and also differential GPS provided the most precise model of the terrain surface. High definition terrestrial laser scanning (HDS LS) provided the most detailed sample of the landscape canopy surface. However, the method seems less effective, compared with the two previously mentioned methods, if terrain modelling is the objective of a survey. The use of HDS LS is restricted to sites with an easy access and it is more sensitive to weather conditions. The data acquired by ALS modelled the terrain more realistically than HDS LS data. Accuracy of the ALS sample with respect to the total station data was acceptable judging by the RMSE specified by the data provider. Thus, one can recommend using such data as a reference sample in the assessment of different DTMs of similar spatial resolution and level of detail providing that the objects restricting laser light to reach the ground surface are masked out.

**Keywords:** automatic target recognition, differential GPS, laser scanning, accuracy, DEM

### Úvod

Digitálne modely zemského povrchu dnes nachádzajú široké uplatnenie tak vo vede ako aj v inžinierskej praxi. Rozlíšiť však možno niekoľko úrovní zemského povrchu. V zmysle Krcha (1990) je z mnohých hľadísk najdôležitejším rozhraním v krajine georeliéf, resp. terén a pre praktické úlohy taktiež povrch krajiny pokrývky. Rozlišujeme tak digitálne modely georeliéfu (DMR), resp. terénu (angl. digital terrain models – DTM) a digitálne modely povrchu krajiny pokrývky (angl. digital surface models – DSM). Zdrojovými údajmi pre ich tvorbu sú najčastejšie hodnoty nadmorských výšok v bodoch. V súčasnosti existuje široká paleta technológií používaných pre pozemný zber alebo merania prostredníctvom diaľkového prieskumu Zeme (DPZ). V prípade rastrového DMR je úroveň detailnosti povrchu DMR (rozlíšenie DMR) dané presnosťou

Mgr. Michal GALLAY, PhD., Univerzita Pavla Jozefa Šafárika, Prírodovedecká fakulta, Ústav geografie, Jesenná 5, 040 01 Košice, e-mail: michal.gallay@upjs.sk,

Dr. Christopher D. LLOYD, Dr. Jennifer MCKINLEY, MSc. Lorraine BARRY, Queen's University Belfast, School of Geography, Archaeology and Palaeoecology, BT7 1NN Belfast, UK, e-mail: c.lloyd@qub.ac.uk, j.mckinley@qub.ac.uk, l.barry@qub.ac.uk

a hustotou zberu zdrojových údajov a veľkosťou bunky rastra. Kľúčovým krokom v procese tvorby DMR je práve voľba metódy zberu údajov o povrchu, pretože uvedené faktory určujú kvalitu výsledného modelu. Jej hodnotenie je predmetom početných vedeckých prác u nás aj v zahraničí. Identifikovať možno príspevky navzájom porovnávajúce: DMR vytvorené z rôznych zdrojových údajov (metódy zberu) (Kraus, 1997, Baltsavias, 1999, Mercer, 2001, Gallay, 2008); vplyv inter-polačných metód použitých pri tvorbe DMR z rovnakých zdrojových údajov (Desmet, 1997, Lloyd a Atkinson, 2006, Wise 2007); rôzne reprezentácie DMR ako napr. rastrové modely a modely trojuholníkových sietí (Carrara et al., 1997).

Prezentovaný príspevok patrí do prvého okruhu a prínosný je tým, že podáva hodnotenie štyroch moderných metód mapovania georeliéfu. Aplikovaná bola elektronická tachymetria s automatickým rozlišovaním cieľa (angl. automatic target recognition – TPS ATR), diferenciálne meranie s GPS (angl. Global Positioning System), pozemné laserové skenovanie vo vysokom rozlíšení (angl. high definition survey terrestrial laser scanning – HDS LS) a letecké laserové skenovanie (LLS) známe ako LiDAR (angl. light detection and ranging). Prvé tri reprezentujú metódy pozemného zberu a štvrtá letecký diaľkový prieskum. Uvedené technológie v poslednom desaťročí prenikajú aj do slovenskej akademickej sféry, avšak najmä v geografickej obci nie sú bežne používané. Dôvodom je najmä cena prístrojov, resp. náklady súvisiace so zberom. Priaznivejšia situácia je v susednej Českej republike, kde sú údaje z LLS dostupné pre rozsiahlejšie oblasti ako v SR a sú využívané aj v geomorfologickom výskume (Kolečka a Tejkal, 2010). V súčasnosti sa začínajú objavovať hodnotenia presnosti údajov LLS pre Českú republiku (Šíma, 2011). Existujú tiež práce osobitne hodnotiace presnosť merania totálnou stanicou (Skořepa, 2009), resp. DGPS (Hricko, 2003, Bureš, 2009) alebo možnosti pozemného laser skeningu pre modelovanie zemského povrchu (Pukanská, et al., 2008). Cieľom bolo uvedené štyri metódy na jednom mieste stručne predstaviť a:

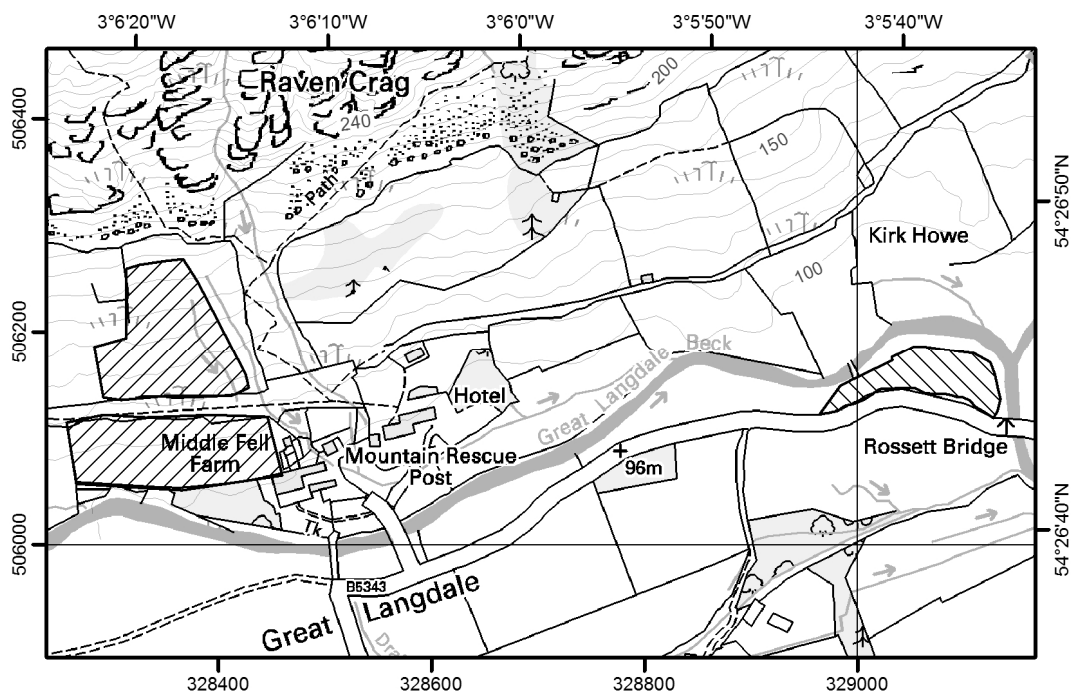
- porovnať presnosť merania pomocou pozemného laserového skenovania, automatizovaného zberu totálnou stanicou a diferenciálnym GPS a zároveň zhodnotiť výhody a nevýhody jednotlivých technológií najmä pre účely modelovania plochy terénu,
- porovnať presnosť DMR vytvoreného z údajov posledného odrazu lúča LLS vzhľadom na údaje z pozemného merania, ako je uvedené v predošlom bode,
- zhodnotiť vhodnosť DMR z LLS údajov posledného odrazu ako etalónu pre hodnotenie kvality iných DMR podobného rozlíšenia (fotogrametria, interferometrický SAR).

## 1. Vymedzenie územia

Údaje spracované v príspevku a z nich vytvorené DMR predstavujú výrez terénnej plochy horského prostredia na dvoch lokalitách v údolí Great Langdale v anglickom Lake District (obr. 1). Jednou z lokalít bol nízko spásaný pasienok pri Middle Fell Farm na svahu so sklonom  $8^\circ - 45^\circ$  porastený trávami a papraďou dorastajúcou do výšky 1 až 1,5 metra. Vo vyššie položených častiach svahu bol skalnatý povrch bez vegetácie. Druhá lokalita predstavovala plochú rovinu riečnej nivy so sklonom menej ako  $1^\circ$  na ľavom brehu riečky Great Langdale pri moste Rosset Bridge, ktorú v čase merania pokrýval čerstvo nízko pokosený trávnatý porast.

## 2. Údaje a metodika

Použité údaje pochádzajú z terénneho mapovania vykonaného Michalom Gallayom a Lorraine Barry v júni 2007 v údolí Great Langdale, ako je uvedené v kap. 1. Ďalej sme pracovali s údajmi leteckého laserového skenovania, ktoré nad údolím uskutočnila britská agentúra Environment Agency (kap. 2.4) v decembri 2000 s hustotou približne 2 metre. Výškové bodové pole bolo získavané tromi modernými metódami pozemného zberu tak, aby existovalo referenčné meranie pre väčšinu bodov z leteckého laserového skenovania. Za predpokladu, že má byť hustota meraní okolo 2 metre, je efektívnosť takejto úlohy pre rozsiahlejšie oblasti ako niekoľko hektárov nízka. Preto boli vybrané dve menšie lokality ako typy terénu na svahu (2,5 ha) a rovine (1 ha). V rámci nich boli tri typy etalónu vzájomne porovnané, a tiež porovnané vzhľadom na DMR z údajov LLS. Cieľom teda nebolo klasické hodnotenie výškovej presnosti DMR platné pre rozsiahlu oblasť, ako napr. stanovenie strednej chyby (RMSE) na základe náhodne rozptýlených presnejších pozemných meraní. Sústredili sme sa na porovnanie výšok podobnej hustoty zberu, ktoré však boli merané pomocou odlišných metód zberu. Terénne merania boli získané vo WGS 84 a transformované do Britskej národnej siete (angl. British National Grid) OSGB36, výškový systém Newlyn (kap 2.5).



Obr. 1 Poloha meračských lokalít v údolí Great Langdale, Lake District, Anglicko. Súradnice OSGB36 a WGS 84, vrstevnicový interval 10 m. Mapový podklad Ordnance Survey (c) Crown Copyright

## 2.1 Elektronická tachymetria s automatickým rozlišovaním cieľa

Pozemné meranie totálnou stanicou bolo vykonané s využitím automatizovaného zberu v móde ATR (angl. automatic target recognition). Ide o metódu automatického rozpoznávania meračského hranola CCD kamerou totálnej stanice, ktorú merač diaľkovo ovláda. To umožňuje rýchle a presné meranie jednou osobou, ktorá sa s hranolom premiestňuje na merané body. Použili sme stanicu Leica TPS 1200, ktorej vnútorná presnosť merania módom ATR je podľa Leica Geosystems (2005) 0,1 mm a stredná celková chyba je stanovená na 2 mm + 1 ppm pre hranol 360°, ktorým sa meralo. Efektívna vzdialenosť použitia ATR je 100 – 150 m od prístroja s maximom 600 m pri ideálnom počasí. Uvedená metóda bolo použitá pre zber bodov na terénnej ploche s rozstupom 2 – 7 metrov v lokálnom súradnicovom systéme rešpektujúc dôležité rozhrania terénu. Details možno nájsť v tab. 1. Poloha totálnej stanice bola zameraná pomocou DGPS v statickom režime, čo umožnilo prevod ATR meraní z WGS84 do OSGB36 (kap. 2.5).

## 2.2 Diferenciálny globálny polohový systém

Zber bodov pomocou globálneho satelitného navigačného systému GPS bol uskutočnený pomocou diferenciálneho určovania polohy (DGPS) použitím dvoch GPS súprav Leica GPS 1200. Jedna z nich slúžila ako referenčná stanica, druhou sme merali polohu bodov na terénnej ploche odčítajúc 4 – 5 meraní na jednom bode. Určovanie polohy využívalo meranie fázy nosnej vlny signálov L1 a L2 v statickom režime so štandardnou anténou. Podľa Leica Geosystems (2008) je celková vnútorná presnosť merania pri takomto spôsobe určovania polohy 0,2 mm. Pre určovanie polohy je stredná horizontálna chyba 5 mm + 0,5 ppm a stredná vertikálna chyba 10 mm + 0,5 ppm. Merania boli korigované v reálnom čase (RT Static) vzhľadom na referenčnú stanicu a post-processingom vzhľadom na stanicu RINEX v Ambleside vzdialenú 15 km východne. Bodové pole bolo získané v súradnicovom systéme WGS84 a po zbere transformované do systému OSGB 36.

**Tab. 1 Špecifikácie zberu údajov pomocou elektronickej tachymetrie v režime ATR (TPS ATR), DGPS, pozemným laserovým skenovaním (HDS LS) a leteckým laserovým skenovaním (LLS).**

Metóda zberu	Lokalita	Počet staničení	Plocha zberu	Počet meracích bodov	Priemerný rozstup bodov	Trvanie zberu	Spracovanie údajov po zbere	Priem. čas zberu na jeden bod
		početnosť	hektáre	početnosť	metre	hodiny	hodiny	sekundy
DGPS	MFF	1	2,49	788	4,7	8,5	4	39
	RB	1	0,95	826	3,4	5,5	4	24
TPS ATR	MFF	3	2,77	1 117	4,9	13	4	42
	RB	1	0,95	528	4,2	6	4	41
HDS LS	MFF	7(15 terčov)	5,41	9 384 864	0,08	29,5	8	0,011
	RB	1(4 terče)	0,95	1 044 623	0,10	2	8	0,007
LLS	MFF	-	2,49	6619	2,0	-	-	-
	RB	-	0,95	1635	2,4	-	-	-

Metóda zberu	Lokalita	SDM total	SDM XY	SDM Z	SDM XYZ	SDM RINEX	SDM TPS	SDM DGPS	SDM RT DGPS
		milimetre							
DGPS	MFF	6,5	3,0	5,2	6,1	0,4	NA	NA	49,8
	RB	6,5	3,3	5,0	6,1	0,4	NA	NA	43,9
TPS ATR	MFF	4,7	2,8	1,9	3,4	0,4	0,9	NA	NA
	RB	4,9	3,1	2,2	3,9	0,4	0,6	NA	NA
HDS LS	MFF	9,2	-	-	4,0	0,4	0,9	3,9	NA
	RB	10,0	-	-	6,0	0,4	0,6	3,0	NA
LLS	MFF	250,0*	-	-	-	-	-	-	-
	RB	250,0*	-	-	-	-	-	-	-

Vysvetlivky: SDM total – celková štandardná odchýlka merania nadmorskej výšky po post-processingu a transformácii bodového poľa do WGS 84, SDM XY – štandardná odchýlka merania v horizontálnom smere pred post-processingom, SDM Z – celková štandardná odchýlka merania vo vertikálnom smere pred post-processingom, SDM XYZ – celková štandardná odchýlka merania (v horizontálnom aj vertikálnom smere) pred post-processingom, SDM RINEX – celková štandardná odchýlka merania referenčnej stanice vzhľadom na stanicu RINEX v Ambleside, SDM TPS – štandardná odchýlka merania totálnou stanicou, SDM DGPS – celková štandardná odchýlka pri určení polohy totálnej stanice prostredníctvom DGPS, SDM RT – celková štandardná odchýlka merania pri zbere bodov pomocou DGPS v reálnom čase v statickom móde (bez korekcií z ref. stanice), NA – meranie sa na danú metódu nevzťahuje (angl. not applicable), \* špecifikované podľa Environment Agency UK ako RMSE pre rovinné plochy s voľným obzorom.

### 2.3 Pozemné laserové skenovanie

Pozemné laserové skenovanie je najmodernejšou metódou pozemného zberu schopnou v priebehu niekoľkých sekúnd získať množstvo bodov z povrchu scény obklopujúcej skener. V podstate ide o ekvivalent leteckého laserového skenovania na zemi, kde hlavným princípom je stanovenie času, ktorý uplynie medzi vyslaním a prijatím laserového pulzu. Zaznamenávaný je jediný (zväčša prvý) odraz od objektov navôkol. Milimetrová presnosť merania, rýchlosť a hustota vykonaných meraní je hlavnou prednosťou tejto technológie. Vysoká hustota bodov (rádovo milióny) spôsobuje prebytok údajov, ak je hlavným účelom skenovania modelovanie zemského povrchu, kde to môže predstavovať skôr nevýhodu v spracovaní a použití dát. Úlohou bolo overiť vhodnosť pozemného laserového skenovania pre digitálne modelovanie terénu v geomorfologickom výskume.

V našom prípade sme pozemné laserové skenovanie (HDS LS) na lokalitách v údolí Great Langdale realizovali so systémom Leica HDS 3000. Podľa Leica Geosystems (2006) prístroj dokáže zaznamenať merania s minimálnym rozstupom 1,2 mm. Pri vzdialenosti do 50 metrov od prístroja je priemer laserovej stopy 4 – 6 mm a stredná celková chyba merania 6 mm. Hustota meraných bodov klesá so vzrastajúcou vzdialenosťou od prístroja, pričom použité bolo nastavenie 150 mm pri vzdialenosti 50 metrov. Efektívny dosah skenovania je okolo 100 metrov. Na lokalite Rossett Bridge bolo vykonané jedno skenovanie. Na lokalite Middle Fell Farm bolo spolu vykonaných 7 skenov, ktoré boli spojené do jedného mračna používajúc terčiky (targets) rozmiestnené v skeno-

vanej oblasti tak, aby boli zachytené minimálne v dvoch skenoch. Poloha terčov bola zameraná elektornickou tachymetriou v lokálnom súradnicovom systéme totálnej stanice. Jej poloha v systéme WGS84 bola určená pomocou DGPS v statickom režime. Uplatnené boli korekcie britskej národnej siete pozemných referenčných staníc RINEX. Takýmto spôsobom bolo bodové pole súradnicovo priradené do WGS84 a následne transformované do britského systému OSGB36, výškový systém Newlyn (kap. 2.5). Podrobnosti skenovania sú uvedené v tab. 1. Hustota bodov sa pohybovala medzi 0,5 – 50 cm, avšak práca v štandardnom GIS vyžadovala redukciu tak, že vzdialenosť medzi bodmi bola minimálne 20 cm.

#### 2.4 Letecké laserové skenovanie

Táto technológia je tiež známa ako letecká laserová altimetria alebo slangovo pod skratkou LiDAR (angl. light detection and ranging), ktorá je v anglofónnej literatúre udomácnená. Zber bodového poľa nadmorskej výšky využíva meranie vzdialenosti medzi zdrojom laserového žiarenia a povrchom, od ktorého sa laserový lúč odrazí. Princípom je stanovenie času medzi vyslaním a prijatím lúča a energie prijatého lúča. Totiž laserový lúč môže dopadnúť na niekoľko úrovní, a tak zachytiť viacero povrchov v rámci stopy. Predmetom záujmu je najmä prvý a posledný odraz, pričom sa predpokladá, že korešponduje s meraním výšky povrchu krajiny pokrývky (stromy, budovy, elektrické vedenia) a povrchom terénu (georeliéfu). V príspevku sme hodnotili vertikálnu presnosť DMR odvodeného z bodov meraní posledného odrazu LLS, ktoré považujeme za vzorku terénnej plochy. Bodové pole bolo dodané v súradnicovom systéme OSGB36 britskou národnou inštitúciou Environment Agency (<http://www.environment-agency.gov.uk>), ktorá ich zozbierala v decembri 2000. Agentúra okrem iných činností zodpovedá za manažment povodňovej ochrany v Británii, vizualizáciu povodňového rizika a predpoveď povodní (<http://maps.environment-agency.gov.uk/wiyby/wiybyController>). Z toho dôvodu zvolili LLS ako vhodnú metódu pre mapovanie rizikových oblastí. Meračské misie sa lietadlom nalietavali od roku 1998 a v súčasnosti výškové bodové pole s priemernou hustotou 2 m pokrýva takmer 50 % plochy Anglicka a Walesu. Agentúra deklaruje priemernú celkovú chybu merania okolo 25 cm na rovinnom povrchu bez vegetácie. Viaceré oblasti boli skenované opakovane s vyššou presnosťou. Na základe osobnej komunikácie s Environment Agency možno povedať, že špecifikácie meračských misií sa líšia vzhľadom na čas a pokrok technológie. Vo všeobecnosti sa letová výška pohybovala medzi 600 až 800 metrov nad zemou a zorný uhol skenovania bol cca 20°. Pre údaje zozbierané od septembra 2004 agentúra garantuje strednú štvorcovú celkovú chybu 15 cm (RMSE), pre staršie dáta 25 cm. Presnosť merania klesá s narastajúcim sklonom povrchu, nakoľko rastie efekt výškového rozdielu povrchu v rámci laserovej stopy. Predpokladaný priemer laserovej stopy možno podľa Baltsaviasa (1999) určiť na 20 cm pre letovú výšku 800 m a uhlový rozptyl lúča 0,25 mrad. Údaje boli dodané ako body posledného odrazu.

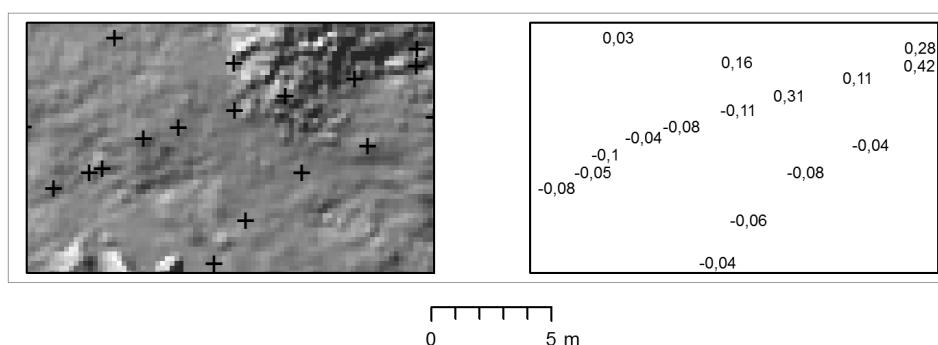
#### 2.5 Súradnicové transformácie a porovnanie meraní

Pre porovnanie údajov bolo potrebné zabezpečiť prevod všetkých údajov do jednotného súradnicového systému, ktorým bola Britská národná sieť OSGB36 s realizáciou OSTN02. Terénne merania aj LLS merania, vykonané Environment Agency, boli pôvodne získané vo WGS84. Pre transformáciu pozemných meraní z WGS84 do OSGB36 bol použitý program GridInQuest vyvinutý britským kartografickým úradom Ordnance Survey Great Britain. Podľa OSGB (2011) softvér používa pre prevody z WGS84 ako jeho realizáciu pre Britské ostrovy systém ETRS89. Výšky sa vzťahujú k elipsoidu GRS 1980. Transformácia do OSGB36 využíva transformáciu OSTN02, ktorej výškový referenčný systém je definovaný modelom kvázigeoidu OSGM02. Ako uvádza Šíma (2011), je dôležité poznať model kvázigeoidu použitý pre transformácie súradníc z WGS84 do národných systémov. Presnosť použitého kvázigeoidu môže pre malé územia vniest chyby systematického charakteru. Metadáta o údajoch LLS od Environment Agency neobsahovali informácie o transformácii medzi WGS84 a OSGB36. Keďže LLS sa uskutočnilo koncom roku 2000, pre prevod meraní z WGS84 bola, namiesto ešte neexistujúcej OSTN02, pravdepodobne použitá transformácia OSTN97. Stredná štvorcová celková chyba transformácie OSTN97 je okolo 20 cm, zatiaľ čo pre OSTN02 iba 10 cm (OSGB 2011).

Predstavenými štyrmi metódami boli získané štyri výškové bodové polia s rôznou priestorovou distribúciou a hustotou, ako aj presnosťou merania. Bežne používaný spôsob porovnávania dvoch povrchov je založený na vzájomnom odčítaní povrchov pomocou mapovej algebry. Ideálne ko-

rektné porovnávanie presnosti merania nadmorskej výšky by vyžadovalo zber na identických bodoch všetkými štyrmi metódami, aby odčítavané hodnoty odpovedali tomu istému miestu na povrchu. Z praktického hľadiska je to však ťažko uskutočniteľné. Opodstatnenosť takejto snahy súvisí s úrovňou detailu povrchu (mierky), pre ktorý sa analýza vzťahuje. V snahe eliminovať vplyvy zberu na rôznych bodoch a s rôznou hustotou bol zvolený nasledovný postup. Zo štyroch typov bodového poľa nadmorských výšok boli vytvorené DMR vo forme nepravidelnej trojuholníkovej siete (TIN). Modely TIN boli následne konvertované do rastrových DMR s veľkosťou bunky 20 cm, čo zodpovedá minimálnej vzdialenosti bodov poľa HDS meraní, a tiež veľkosti laserovej stopy LLS. Napokon boli od každého DMR odčítané hodnoty výšky v bodoch referenčného merania. Napr. od DMR z HDS LS meraní boli odčítané hodnoty TPS meraní v bodoch, v ktorých sa TPS meranie uskutočnilo (obr. 2). Tak sa získali odchýlky DMR od referenčných bodov, ktoré boli štatisticky vyhodnotené pre každú kombináciu metód. V podstate išlo o odhad hodnôt nadmorskej výšky získanej jednou metódou v bodoch totožných s referenčnými bodmi pomocou bilineárnej interpolácie z nepravidelného vstupného bodového poľa do pravidelného poľa.

Pre realistickejšiu interpoláciu by mohla byť použitá aj metóda váženou inverznou vzdialenosťou (IDW) alebo nejaký typ splajnov, avšak požiadavka nastavenie parametrov pri týchto metódach zvyšuje množstvo premenných, a tak vnáša viac neurčitosti maskujúc zdroje chýb. Lineárna interpolácia bola uprednostnená pre jej jednoduchosť, rýchlosť výpočtu bez potreby rozhodovať o nastavení parametrov interpolácie.



Obr. 2 Spôsob výpočtu výškových rezidiu medzi hodnoteným DMR a referenčnými bodmi. Vľavo referenčné TPS ATR body zobrazené krížikom na povrchu DMR z HDS LS meraní (bunka rastra 0,2 m). Vpravo výškové rezidiu (odchýlky) na týchto bodoch.

#### 4. Výsledky a diskusia

Výsledky štatistického vyhodnotenia rozdielov medzi meraniami pomocou HDS LS, TPS, DGPS a LLS sú uvedené v tab. 1 a 2. Tab. 1 poukazuje na vnútornú presnosť merania jednotlivými metódami a efektívnosť zberu. Tab. 2 predstavuje charakteristiku vzájomných vertikálnych odchýlok bodových poľí, pričom odchýlky pre dvojznačnosť nazývame výškové rezidiu. Výsledky diskutujeme so zreteľom na mapovanie a modelovanie terénu. Pravdaže iné aplikácie, ako napr. v kriminalistike, či v stavebníctve môžu mať na otázku efektivity alebo použiteľnosti metód pre zber údajov iný uhol pohľadu.

Celkovú presnosť merania treba hodnotiť komplexne vzhľadom na príspevky chýb merania metódami, ktorými boli jednotlivé bodové polia získané a transformované do systému WGS84, a potom do OSGB36 (pozri kap. 2). Vzhľadom na celkovú štandardnú odchýlku merania v tab. 1, označenej ako SDM total, možno diferenciálne GPS a elektronickú tachymetriu v režime ATR považovať za najpresnejší zber. Pokým DGPS meranie v RTK režime je o čosi rýchlejšie (priemerný čas 39 a 24 s), celková presnosť merania je nižšia (50 mm) ako pri meraní totálnou stanicou v ATR režime (ca 5 mm). Pokiaľ je možnosť prepojiť polygónový ťah priamo na národnú sieť geodetických bodov, zber môže byť ešte rýchlejší, bez potreby použiť GPS aparatúru. Pozemné laserové skenovanie vzbudzuje dojem veľmi efektívnej meračskej metódy. Treba si však uvedomiť, že celkový čas merania závisí od plochy územia, a teda počtu skenov pre jeho pokrytie.

**Tab. 2 Štatistické vyhodnotenie vzájomných výškových reziduí medzi hodnotami na bodoch a DMR vytvorenými z údajov získaných elektronickou tachymetriou (TPS ATR), DGPS, pozemným laserovým skenovaním (HDS LS) a leteckým laserovým skenovaním (LLS) na lokalite Middle Fell Farm.**

**Štatistické vyhodnotenie výškových reziduí vzhľadom na 1117 bodov z TPS ATR**

Metóda zberu	5 PERC	MEDIAN	95 PERC	MEAN	SD	MAE	RMSE	RMSE_90
LLS	-0,15	0,10	0,40	0,11	0,22	0,17	0,25	0,16
HDS LS	-0,19	0,04	1,24	0,36	0,71	0,45	0,80	0,54
RTK DGPS	-0,23	-0,01	0,20	-0,01	0,16	0,10	0,16	0,10

**Štatistické vyhodnotenie výškových reziduí vzhľadom na 788 bodov z DGPS**

Metóda zberu	5 PERC	MEDIAN	95 PERC	MEAN	SD	MAE	RMSE	RMSE_90
LLS	-0,16	0,07	0,38	0,09	0,18	0,14	0,20	0,14
HDS LS	-0,21	0,00	1,15	0,24	0,55	0,35	0,60	0,44
TPS ATR	-0,23	-0,01	0,20	-0,01	0,16	0,10	0,16	0,08

**Štatistické vyhodnotenie výškových reziduí vzhľadom na 2 231 917 bodov z HDS LS**

Metóda zberu	5 PERC	MEDIAN	95 PERC	MEAN	SD	MAE	RMSE	RMSE_90
LLS	-1,12	0,05	0,34	-0,22	0,76	0,42	0,79	0,44
RTK DGPS	-1,15	0,00	0,21	-0,24	0,55	0,35	0,60	0,44
TPS ATR	-1,19	-0,01	0,20	-0,29	0,70	0,39	0,76	0,47

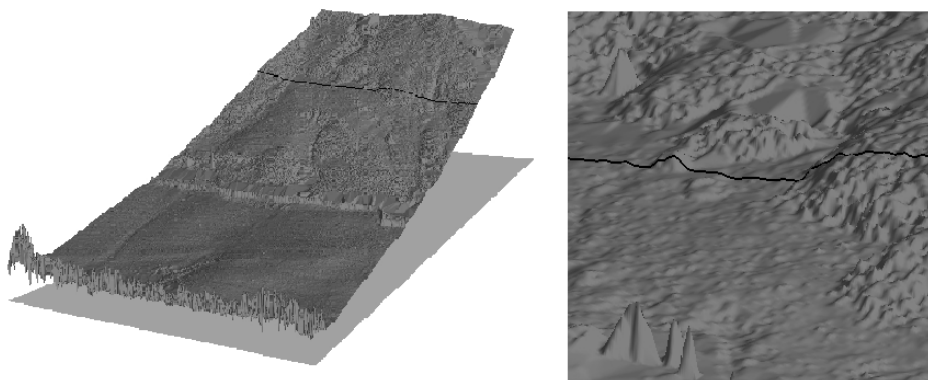
Vysvetlivky: 5 PERC – 5. percentil, 95 PERC – 95. percentil, MEAN – priemerná odchýlka výškových reziduí, SD – štandardná odchýlka výškových reziduí, MAE – priemerná absolútna odchýlka výškových reziduí, RMSE – štvorcová odchýlka výškových reziduí, RMSE\_90 – štvorcová odchýlka výškových reziduí počítaná z 90 % najfrekvencovanejších hodnôt výškových reziduí.

Prvotný prieskum pre umiestnenie terčov a premiestňovanie prístroja výrazne predĺžili celkový čas mapovania, hoci priemerný čas na jeden bod je veľmi krátky (cca 0,01 s), čo však nezahŕňa čas spracovania po zbere. Celková presnosť merania je najnižšia spomedzi pozemných metód, avšak z viacerých aspektov úplne akceptovateľná. Mračno bodov je potrebné transformovať prostredníctvom meraní terčov totálnou stanicou a DGPS. Registrácia terčov medzi dvomi skenmi tiež zvyšuje potenciálnu chybu. Pokiaľ možno scénu zachytiť iba jedným skenom (lokalita Rossett Bridge), efektívnosť skenovania sa výrazne zvyšuje, hoci celková štandardná odchýlka sa mierne zvýšila. Štatistické ukazovatele rozdielov výškového bodového poľa získaného leteckým laserovým skenovaním vzhľadom na TPS a DGPS údaje poukazujú na vernejšiu reprezentáciu terénu v porovnaní s údajmi pozemného laserového skenovania (tab. 2). Príčinou je práve zachytenie rozdielnych úrovní zemského povrchu (obr. 3 a 4), čo naznačuje posun štatistického rozdelenia odchýlok k pozitívnym hodnotám vychádzajúc z 5. a 95. percentilu. Indikuje to, že nadmorské výšky HDS údajov sú zväčša vyššie ako bodové pole TPS ATR.

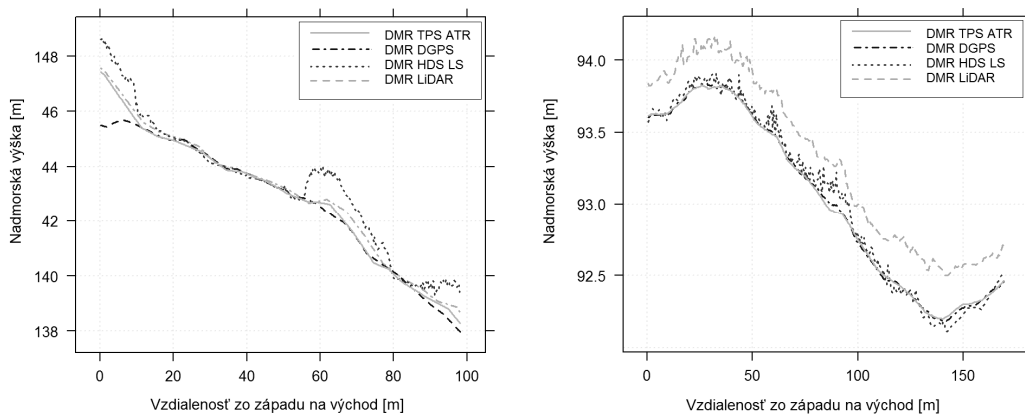
Obr. 4 vykresľuje priečne rezy digitálnymi povrchmi odvodenými z výškových bodových poľí zo štyroch meračských metód. Predovšetkým na prierezoch je vidieť lokálne rozdiely medzi jednotlivými DMR. Povrch DMR z bodového poľa, získaného elektronickou tachymetriou ATR, považujeme za model terénu najbližší skutočnému povrchu terénu. DMR z DGPS meraní reprezentuje terén podobne. Priečny rez v západo-východnom smere v strednej časti svahu na lokalite Middle Fell Farm odhaľuje, že v úseku s hustým papraďovým porastom LLS DMR sleduje povrch skutočného terénu, ktorý najlepšie reprezentuje DMR z TPS ATR meraní. Laserový lúč prenikol porastom paprade ako aj trávy, nakoľko stopa je dostatočne široká, aby prenikla medzerami medzi listami paprade alebo tráv a osvietila terén pod ňou. Naproti tomu stopa laserového lúča pozemného skenera má oveľa menší priemer, a preto sa úplne odráža od povrchu vegetácie.

Teda pri HDS LS zbere je treba rátať s tým, že získané bodové pole reprezentuje hlavne povrch krajinej pokrývky a modelovanie terénu vyžaduje filtrovanie bodov. Dokazuje to, že použité údaje LLS tak poskytujú vernú reprezentáciu povrchu terénu, ktorá je porovnateľná s meraniami DGPS a TPS. To podporuje aj nižšia priemerná a štvorcová odchýlka LLS DMR v porovnaní s HDS DMR vzhľadom na referenčný TPS DMR. Z obr. 4 je však zreteľné systematické nadhodnotenie výšok terénu v údajoch LLS oproti pozemným meraniam na lokalite Rossett Bridge, čo sa neobjavuje na lokalite na svahu. Veľmi pravdepodobne ide o chybu v GPS registrácii susediacich

skenov medzi týmito lokalitami. Štatistické ukazovatele odchýlok oproti TPS ATR meraniam indikovali systematickú chybu v rozsahu okolo +20 cm, čo sa dá odhadnúť aj z priečného rezu. Táto chyba je však v intervale uvedenom poskytovateľom údajov. Rozdielnosť použitých transformačných kľúčov pre LLS merania a pozemné merania môže, ale aj nemusí vysvetľovať systematické nadhodnotenie meraní na Rossett Bridge (pozri kap. 2.5). Dôvodom pochybností je najmä blízkosť lokality ku Middle Fell Farm (500 m) a neprítomnosť systematickej chyby pre merania na svahu. Merania, aj následné spracovanie, boli totiž vykonané rovnakým postupom s rozdielom dvoch dní. Taktiež nie je známe, či údaje LLS boli medzi vyhotovením agentúrou a dodaním autorom (cca 5 rokov) korigované vzhľadom na OSTN02. Niva pri Rossett Bridge je zachytená v rámci iného skenového pásu ako svah pri Middle Fell Farm, čo predstavuje jediný autorom známy rozdiel v meraniach. Pravdaže, chyby mohli vniesť aj ďalšie faktory, ako spomína Šíma (2011).



Obr. 3 Priestorové zobrazenie digitálneho modelu povrchu odvodeného z pozemného laserového HDS skenovania na svahu pri lokalite Middle Fell Farm v rozlíšení 20 cm. Územie zobrazené vľavo má skutočne rozmery 100 x 150 metrov a vyznačená je na ňom línia priečného rezu zobrazenom na obr. 4. Detail vpravo znázorňuje strednú časť profilu v dĺžke asi 40 metrov, kde je evidentný rozdiel medzi nízkym porastom trávy vľavo a vysokým porastom paprade vpravo, ktorým laserové lúče pozemného skenera neprenikli.



Obr. 4 Priečne rezy digitálnymi výškovými modelmi na lokalitách Middle Fell Farm (vľavo) a Rossett Bridge (vpravo). Líniu rezu na svahu pri Middle Fell Farm vidieť na obr. 3, počiatkový bod:  $x=328300$ ,  $y=506202$ , koncový bod:  $x=328400$ ,  $y=506202$ . Priečný rez strednou časťou riečnej nivy pri Rossett Bridge, počiatkový bod:  $x=328971$ ,  $y=506125$ , stredný bod:  $x=329050$ ,  $y=506164$ , koncový bod:  $x=329127$ ,  $y=506140$ .



## 5. Záver

Cieľom príspevku bolo navzájom porovnať presnosť a použiteľnosť merania jednotlivými metódami a overiť, či údaje získané leteckým laserovým skenovaním (LLS) sú vhodné ako etalón digitálneho modelu terénnej plochy pre hodnotenie presnosti výšok iných DMR v porovnateľnom rozlíšení, avšak odvodených z údajov, ktoré boli získané inými metódami DPZ. Jednotlivé metódy pozemného, ale aj mapovania georeliéfu pomocou DPZ majú svoje obmedzenia. Praktická skúsenosť s tromi pozemnými metódami dovoľuje ich vzájomné porovnanie, a tiež porovnanie vzhľadom na LLS ako metódu zberu.

Meranie totálnou stanicou v režime automatického rozpoznávania cieľa (ATR) je najpresnejšou metódou mapovania terénu spomedzi použitých metód. Možno ho tiež považovať za najefektívnejšie pokiaľ je k dispozícii geodetický bod národnej siete, prostredníctvom ktorého možno získané bodové pole transformovať do národného súradnicového systému. V našom prípade však bolo potrebné pre tento účel zamerať polohu totálnej stanice pomocou statického diferenciálneho GPS. DGPS v reálnom čase ponúka rýchlejšiu možnosť zberu bodového poľa, ale na úkor presnosti, ktorá sa pohybuje rádovo v centimetroch. Výhodou sú však okamžité a relatívne presné dáta v geografickom súradnicovom systéme. Pre meranie s milimetrovou presnosťou je potrebné využiť statický DGPS režim a vlastniť dve GPS súpravy, čo zvyšuje náklady.

Oproti uvedeným dvom metódam pozemné laserové skenovanie umožňuje najdetailnejšie mapovanie povrchu. Získané husté bodové pole, obsahujúce milióny bodov, však reprezentuje povrch krajiny obálky. Modelovanie terénu vyžaduje filtrovanie mračna bodov, čo zvyšuje časovú náročnosť a výsledná vzorka bodov na teréne môže byť veľmi malá. Správna vzájomná registrácia skenov v geografickom súradnicovom systéme vyžadovala použitie DGPS a elektronickej tachymetrie, čo zvyšuje čas a celkové náklady mapovania. Presnosť merania bola okolo 10 mm. Hlavnou nevýhodou je prebytok údajov, obzvlášť v prípade, ak je cieľom modelovať povrch terénu. Pozemné laserové skenovanie pre modelovanie georeliéfu je bezkonkurenčne použiteľné najmä pre mapovanie strmých nezarastených svahov, skalných previsov, či jaskýň, ako to predstavujú napr. Buckley et al. (2008). Treba však spomenúť aj citlivosť prístroja na vlhkosť, otrasy a ťažkosť s manipuláciou v horskom teréne. Z toho dôvodu možno HDS laserové skenovanie odporučiť pre ľahko dostupné lokality, a treba zväžiť aj ich rozlohu.

Pokiaľ ide o údaje z leteckého laserového skenovania, na základe porovnaní sa ukázalo, že majú potenciál slúžiť ako husté referenčné bodové pole pre porovnanie s inými DMR podobnej, alebo či nižšej úrovne detailu v miestach, kde je terén obnažený alebo porastených trávami či papradami. Akceptujúc chybu merania stanovenú dodávateľom LLS dát, husté bodové pole poskytuje referenčné hodnoty výšok pre každý pixel hodnotených DMR produktov, a nie len pre náhodnú vzorku niekoľkých presných bodov v hodnotenom výreze reliéfu. Tento predpoklad sme prijali v práci Gallay (2010).

*Príspevok vznikol s podporou British Society for Geomorphology ako súčasť doktorandského projektu "Assessing alternative methods of acquiring and processing digital elevation data" financovaného ESF na Queen's University Belfast v Spojenom kráľovstve.*

## Literatúra

- BALTSAVIAS, E. P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54, s. 83-94.
- BUCKLEY, S. J., HOWELL, J. A., ENGE, H. D., KURZ, T. H. (2008). Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. *Journal of the Geological Society*, 165, 3, s. 625-638.
- BUREŠ, J. (2009). Analýza experimentálních měření GPS – RTK. *Geodetický a kartografický obzor*, 55/97, 4, s. 75-87.
- CARRARA, A., BITELLI, G., CARLA, R. (1997). Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. *International Journal of Geographical Information Science*, 11, 5, s. 451-473.
- DESMET, P. J. J. (1997). Effects of Interpolation Errors on the Analysis of DEMs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 6, s. 563-580.
- GALLAY, M. (2008). Assessment of DTM quality: A case study using fine spatial resolution data from alter-

- native sources. In *Proceedings from GIS Research UK 2008 16th Annual Conference*. Manchester (Metropolitan University), s. 156-162.
- GALLAY, M. (2010). *Assessing alternative methods of acquiring and processing digital elevation data*. Belfast (Queen's University Belfast, School of Geography, Archaeology and Palaeoecology).
- HRICKO, B. (2003). Využitie GPS pri mapovaní v zalesnených územiach. *Kartografické listy*, 11, s. 16-23.
- KOLEJKA, J., TEJKAL, M. (2010). Laserscan terrain models and their application potential. In *Digital Terrain Models in Cartography*. Wrocław (Uniwersytet Wrocławski, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Zakład Kartografii), s. 17-18.
- KRAUS, K. (1997). Restitution of airborne laser scanner data in wooded areas. *Advances in Remote Sensing. Yearbook 1997*, 5, s. 120-127.
- KRCHO, J. (1990). *Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu*. Bratislava (Veda).
- LEICA GEOSYSTEMS (2005). *Leica TPS1200 Series Technical Data*. Leica Geosystems. (Leica Geosystems).
- LEICA GEOSYSTEMS (2006). *Leica HDS3000 Versatile, high-accuracy 3D laser scanner*. (Leica Geosystems).
- LEICA GEOSYSTEMS (2008). *Leica GPS1200+ Series Technical data*. (Leica Geosystems).
- LLOYD, C. D., ATKINSON, P. M. (2006). Deriving ground surface digital elevation models from LiDAR data with geostatistics. *International Journal of Geographical Information Science*, 20, 5, s. 535-563.
- MERCER, B. (2001). Combining LIDAR and IfSAR: What can you expect? In Fritsch, D., Spiller R. (eds.) *Photogrammetric Week 2001*. Heidelberg (Wichmann Verlag), s. 227-237. Dostupné na: <<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo01/Mercer.pdf>>
- OSGB (2011). *Surveying with the free OS Net services*. Dostupné na: <[http://www.ordnancesurvey.co.uk/oswebsite/gps/osnetfreeservices/about/surveying\\_osnet.html](http://www.ordnancesurvey.co.uk/oswebsite/gps/osnetfreeservices/about/surveying_osnet.html)>
- PUKANSKÁ, K., FRAŠTIA, M., SABOVÁ, J. (2008). Observation of morphological terrain changes with using terrestrial laser skener and digital photogrammetry. *Metallurgija*, 47, 3, s. 275-284.
- SKOŘEPA, Z. (2009). Přesnost souřadnic z totálních stanic. *Geodetický a kartografický obzor*, 55/97, 1, s. 6-11.
- ŠÍMA, J. (2011). Příspěvek k rozboru přesnosti digitálních modelů reliéfu odvozených z dat leteckého laserového skenování celého území ČR. *Geodetický a kartografický obzor*, 57/99, 5, s. 101-106.
- WISE, S. M. (2007). Effect of differing DEM creation methods on the results from a hydrological model. *Computers & Geosciences*, 33, 10, s. 1351-1365.

## S u m m a r y

### Comparing the vertical accuracy of digital elevation models derived using modern ground survey and airborne laser scanning

The paper focuses on comparison of the vertical accuracy and applicability of three modern ground survey acquisition methods and airborne laser scanning data with regard to terrain modelling. Two areas (ca. 2,5 ha and 1 ha) in the Great Langdale Valley were surveyed with a total station using automatic target recognition, differential GPS and terrestrial laser scanner. Airborne laser scanning (ALS) data were supplied by the Environment Agency which acquired in December 2000. It was tested whether the ALS data are suitable as a reference data set of terrain surface for evaluation of the vertical accuracy of other DEM derived from data acquired with other methods such as interferometric SAR, photogrammetry and map digitizing. However, such comparison is not in the scope of the paper.

The results show that electronic tachymetry with a total station using ATR is the most precise method of mapping the terrain. It can be also considered as the most effective technique in case a benchmark is available to link the survey with the national coordinate system. In our case DGPS was used to position the total station within the WGS 84 and then transform the points into OSGB36, Ordnance Datum Newlyn. This approach is faster although more costly as GPS and TPS kits are required and the accuracy is still below a centimetre. In conclusion, DGPS and TPS methods are effective in sampling and modelling terrain despite HDS LS provides massive point cloud of point measurements very quickly. However, these represent the canopy surface as the narrow laser beam did not penetrate the tall vegetation to the ground. Especially, the cover of tall fern masks the ground surface and even filtering in those areas is not helpful. Thus, HDS LS data are not suitable for terrain modelling in areas such as were surveyed. The terrain surface should be clear or covered with low grass. HDS LS can be recommended for surveying sites which are accessible as the kit is heavy and also sensitive to weather conditions. Duration of the scanning increases with the number of scan required to cover the area. HDS LS is a highly competitive surveying method for mapping steep uncovered slopes, caves or overhangs as, for example, Buckley et al. (2008) present. Airborne laser scanning data appeared to be a more real-

istic representation of terrain based on the results. The data can be used as a reference data for assessing digital terrain models in areas where with exposed ground or covered with grass and fern. The features impermeable for the laser beam should be masked (e.g. dense tree cover, buildings, stone walls). Accepting the data accuracy specified by the provider of the ALS data (25 cm of RMSE), the dense point cloud of ALS data provides a reference for every cell as opposed to few randomly spread precise ground measurements which is often the case of assessing DEM accuracy. This assumption was accepted in Gallay (2010).

Fig. 1 Location of the ground survey sites within the Great Langdale Valley, Lake District, England. Coordinates OSGB36 and WGS 84, contour interval 10 m. Topographic background Ordnance Survey (c) Crown Copyright

Fig. 2 Calculation of elevation residuals between assessed DEM and reference points. Reference TPS ATR points overlaid as crosshairs over the DEM surface from HDS LS survey (cell size 0,2 m) on the left. Corresponding elevation residuals on the TPS LS points (right)

Fig. 3 Spatial visualisation (2,5D) of a DEM surface derived from data acquired with terrestrial laser scanning of the slope near the Middle Fell Farm (cell size 0,2 m). The real size of the rectangular section displayed on the left is 100 x 150 metres. The line of the cross-sectional profile (Fig. 3) is highlighted. The detail on the right depicts middle part of the profile (ca. 40 meters) where the difference between grass cover and fern cover is apparent. Laser beam did not penetrate through the fern cover

Fig. 4 Cross-sectional profiles of DEMs for the Middle Fell Farm (left) and the Rossett Bridge (right). The line of the profile at the Middle Fell Farm can be seen in Fig. 2, start:  $x=328300$ ,  $y=506202$ , end:  $x=328400$ ,  $y=506202$ . The cross-section of a fluvial plain at the Rossett Bridge, start:  $x=328971$ ,  $y=506125$ , middle:  $x=329050$ ,  $y=506164$ , end:  $x=329127$ ,  $y=506140$

Tab. 1 Specifications of data acquisition with electronic tachymetry using ATR (TPS ATR), differential GPS, terrestrial laser scanning (HDS LS), and airborne laser scanning (ALS)

Tab. 2 Summary statistics of elevation residuals between point data and DEMs derived from data acquired with electronic tachymetry using ATR (TPS ATR), differential GPS, terrestrial laser scanning (HDS LS), and airborne laser scanning (ALS) at the Middle Fell Farm

**Recenzoval:**

**Doc. Ing. Jiří ŠÍMA, CSc.,**

**Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd,  
Plzeň, Česká republika**