

VYUŽITÍ LASEROVÝCH MODELŮ TERÉNU V GEOMORFOLOGICKÉM VÝZKUMU

JAROMÍR KOLEJKA*, MILOŠ TEJKAL**

Jaromír Kolečka, Miloš Tejkal: Application of laser scanner terrain models in geomorphological research. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 11, 2011, 1, 10 figs., 1 tab., 16 refs.

A high quality DTM can be provided by the laser scanning (LIDAR – Light Detection and Ranging). Main principles both the ground and airborne laser scanning of terrain are presented and discussed in the paper. While the ground application is useful for scanning relatively small terrain objects and earth constructions (especially for those with steep walls), the airborne laser scanning is efficiently applicable for large areas. The airborne laser scanning seems to be very useful for the construction of DTMs in densely built up areas, forested landscapes, terraced slopes, areas with dynamic terrain processes or flooded areas. The process of point cloud processing is depicted and the derivation both of the digital surface model (DSM) and digital terrain model described. The results of these processes are demonstrated on the example of the Svitava River valley (15 km to the north from the City of Brno, Czech Republic). The improved quality of a laser scanner DTM is visible in comparing with a classical DTM of the same area derived from a contour lines map. The DTM and the digital landscape cross section, both constructed using laser scanner data serve various land form studies. Possible efficient geomorphological applications of the detailed laser scanner DTM are listed by the end of the paper. The written text is accompanied with figures explaining principles of this technology and examples of 2D and 3D terrain model from the study territory.

Key words: ground and airborne laser scanning, DTM, land form research application

ÚVOD

Jedním z trendů současné geomorfologie je upřesňování podkladů o reliéfu studovaného území za účelem získání kvalitnějších podkladů umožňujících lepší a spolehlivější výklad geneze a stavu tvarů terénu. Pokud se geomorfologický výzkum opírá o analýzy digitálního modelu reliéfu, právě zde se naráží na problém diskutované jednak topografické přesnosti modelu a jednak jeho geomorfologické věrohodnosti. Vzhledem k tomu, že většina digitálních modelů reliéfu (dále DMR) se opírá o podklady vrstevnicových sítí topografických map, případně o data letecké fotogrammetrie, pochybnosti o správnosti modelů se většinou týkají těch území, kde je terén překrytý vzrostlou vegetací, zastavěn, upraven lidskými aktivitami (zemědělskými, těžbou surovin, výstavbou zemních těles všeho druhu a pod.), případně kde jsou reliéfotvorné pochody akcelerovány jak lidskou činností, tak mimořádnými přírodními událostmi (eroze, sesouvání, zanášení nádrží a údolí, subsidence, hlubinné ploužení, rozsedání svahů a pod.). V takových územích je skutečně obtížné dokonale přesně zaměřit povrch klasickými metodami a získat tak dostatečně

přesné podklady nejen pro možné modelování reliéfu, ale i pro pochopení a výklad současného stavu. Za těchto okolností je zapotřebí se poohlédnout po dokonalejších technologiích zaměřování terénu, a to takových, které budou poskytovat data:

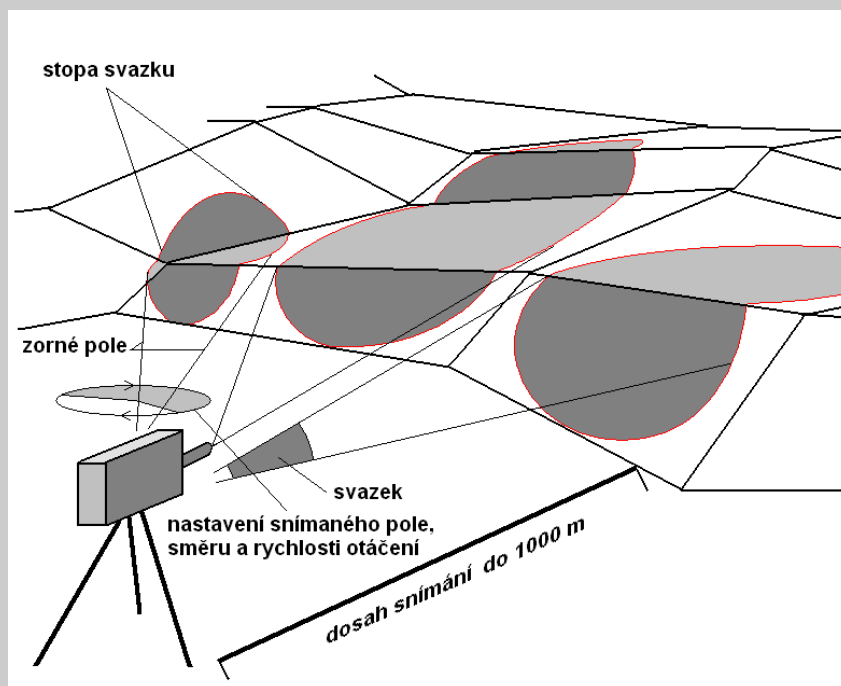
- 1 – polohově přesnější v 3D prostoru, než je tomu u dat současných,
- 2 – pokrývající dostatečně velké území nezbytné pro srovnávací účely potřebné pro vymezení zájmových tvarů reliéfu,
- 3 – v reálném čase, tedy v takovém časovém období, které uspokojí tématického zpracovatele dat a postihne v elementární požadované míře rovněž dynamické jevy v reliéfu.

Pokud z nově a efektivně sesbíraných dat bude vznikat DMR, což je zcela běžné u digitálně pořizovaných dat, veškeré další pracovní postupy se budou opírat o jeho analýzu. Lze předpokládat, že čím přesnější bude použitý DMR, tím kvalitnější bude výsledek zpracování. Snaha zdokonalit digitální modely reliéfu vede v podstatě dvěma směry:

1. budování kvalitnějších DMT nad disponibilními daty některou z řady dostupných metod

* Ústav geoniky AV ČR, Pobočka Brno, Drobného 28, 602 00 Brno, Česká republika,
e-mail: kolejka@geonika.cz

** GEODIS BRNO, spol. s r.o., Lazaretní 11a, 615 00 Brno, Česká republika,
e-mail: milos.tejkal@geodis.cz



Obr. 1 Pozemní laserové skenování povrchu ze zařízení umístěného na stojanu

(jednak spoléháním na podrobnější topografické, geodetické a fotogrammetrické údaje, jednak zdokonalováním modelačních technik – algoritmů tvorby modelů),

2. získáváním kvalitnějších originálních dat (zvyšování kvality dat znamená jednak zajištění vyšší pokryvnosti povrchu zaměřenými body, jednak zvýšení polohové přesnosti zaměřených bodů).

Zejména druhému bodu vyhovuje tvorba digitálního modelu terénu cestou laserového skenování zemského povrchu (KOLEJKA a TEJKAL 2002).

ZÁKLADY LASEROVÉHO MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI

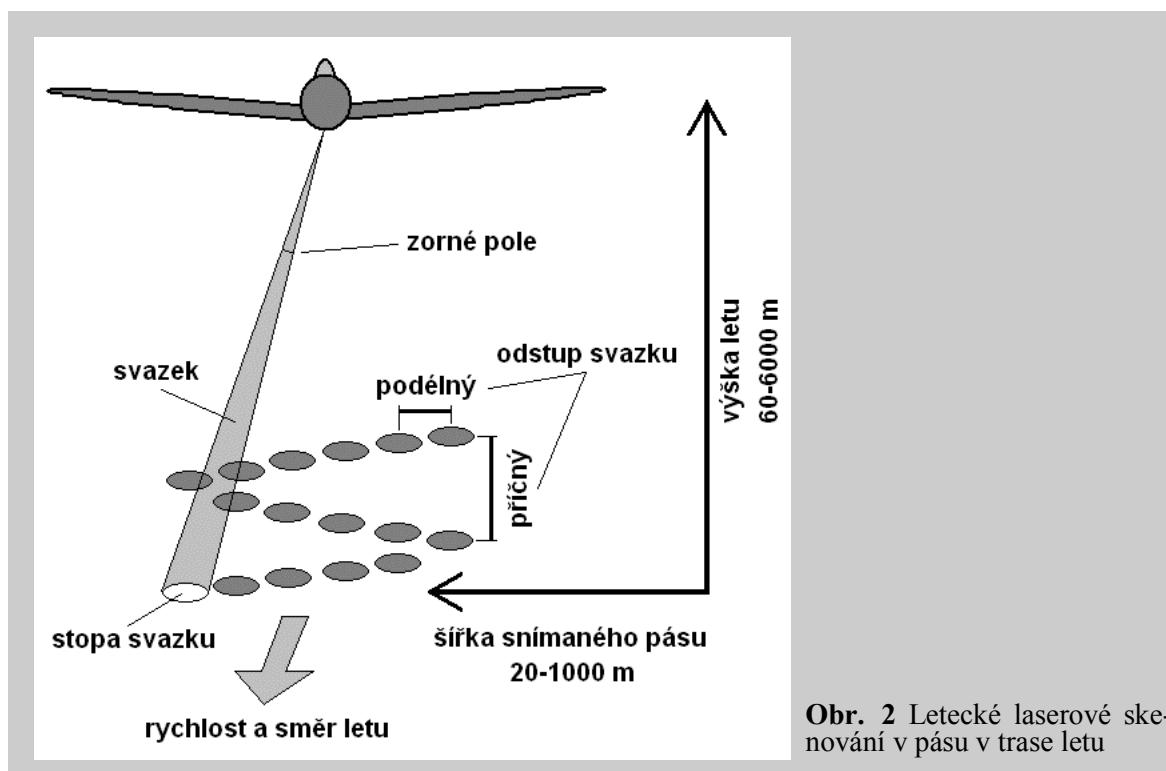
Elektronické měření vzdáleností, jež je technologickým principem laserového skenování, spočívá v měření času, který uplyne po jeho emitování vysílačem, odrazem od objektu a koncové překážky až k návratu zpět k přijímači, jenž je umístěn v místě emitování původního pulzu. Měří se tedy čas, který paprsek potřebuje k projití dvojnásobku příslušné vzdálenosti objektu od zdroje záření. Vysílač v okamžiku vyslání pulzu odstartuje měřič času. Pulz se odrazí od objektu a pak dopadne na čidlo přijímače, čímž zastaví měřič času. Paprsek se pohybuje rychlostí $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro tak vysokou rychlost musí být měření času velmi přesné, aby vzdálenost k objektu byla přesně vy-

počtena. Vedle toho elektronického měření existuje ještě možnost měření vzdálenosti fázovým délkoměrem postaveným na registraci fázového rozdílu mezi vysílaným a odraženým zářením. Další, neboli frekvenční dálkoměr spočívá ve využití principu skládání časově posunutých frekvenčně modulovaných vln.

Dalším technologickým úkolem je tzv. rozmitání emitovaného paprsku, tj. jeho zmnožení do podoby kužele emitovaného záření neboli svazku, který je schopen s jistou hustotou bodů pokrýt dopadovou plochu – neboli vytvořit stopu svazku. Vnitřní úhel tohoto kužele dává tzv. úhel výhledu čidla neboli úhel zorného pole (FOV – field of view). K dispozici je několik způsobů, jak rozmitání paprsku realizovat (např. rotujícím zrcadlem, hranolem, rotací zdroje, či statickým optickým elementem). Po odrazu od objektu je registrován čas návratu každého paprsku v daném emitovaném svazku.

Vlastní přepočítání registrovaných odrazů laserového skenování se děje polární metodou. Metoda výpočtu vychází ze znalosti polohy zdroje, resp. rozmitacího zrcadla nebo hranolu, úhlů šíření jednotlivých paprsků, času návratu, z čehož jsou vypočteny 3D souřadnice bodů odrazu paprsku (KAŠPAR et al. 2003). Produktem měření je mračno bodů opatřených 3D souřadnicemi. Teprve zpracováním registrovaného mračna bodů lze získat představu o objektech, od kterých se paprsek odrazil.

Laserové skenovací zařízení mohou být umístěna jak na statických stojanech (**obr. 1**),



Obr. 2 Letecké laserové skenování v pásu v trase letu

tak na mobilních nosičích (automobilech, letadlech a vrtulnících). Zatímco u statických skenovacích systémů je poměrně snadné zjišťovat 3D polohu zařízení, mobilní zařízení (**obr. 2**) se neobejdou bez dalších návazných polohovacích systémů (GPS) a inerciální navigace (INS). Zejména zpracování dat leteckých laserových skenerů je pohybem nosiče značně komplikováno, což se může odrazit v přesnosti interpretace a 3D polohování mračen nasnímaných bodů.

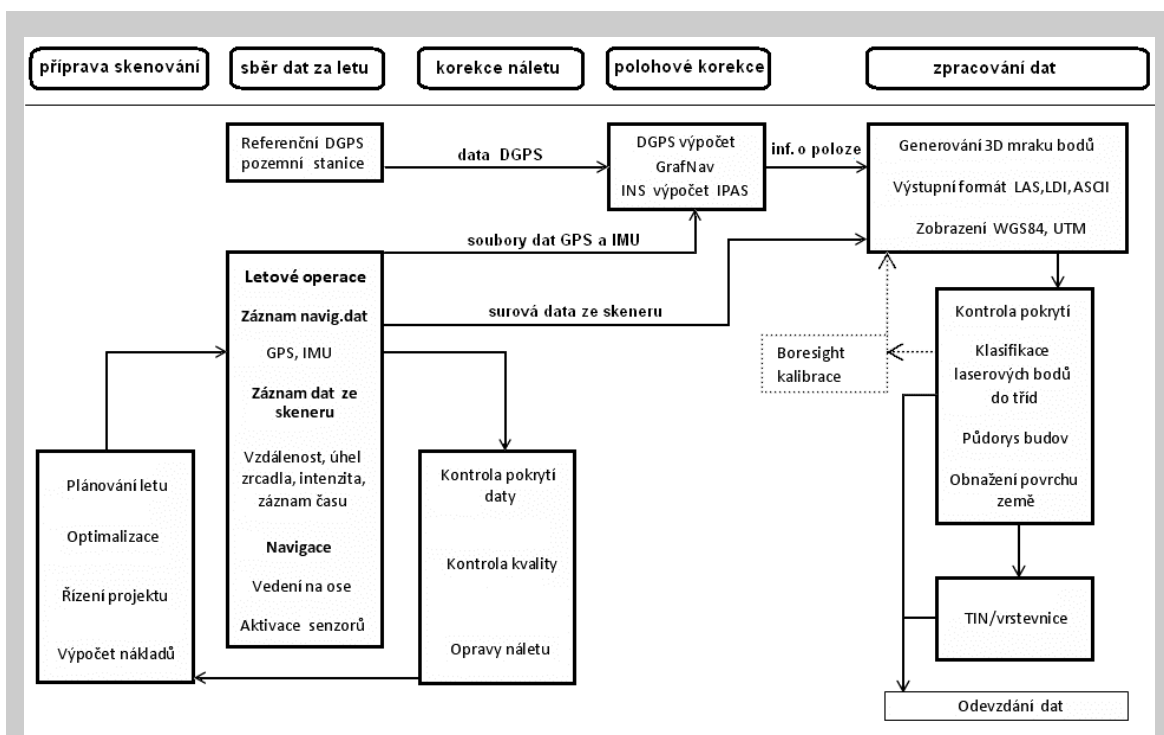
Letecké laserové snímače fungují do značné míry podobně jako optické skenery. Zařízení vysílá svazek paprsků, které v řadě více méně napříč pohybu nosiče dopadají na povrch. Krajní body řady definují zorný (vyzařovací) úhel zařízení (může být 10° až 75°). Po jejich dosažení je snímán další řádek, tentokrát v opačném směru. Každý jednotlivý paprsek má svůj vlastní obrazový úhel, čili vytváří pohledový kužel s vrcholem v čidle a podstavou – „stopou“ na snímaném objektu. Tato stopa je tím větší, čím je čidlo vzdálenější od objektu.

Je zřejmé, že od jisté vzdálenosti čidla od objektu se mohou tyto stopy překrývat, obzvláště je-li nastavení obrazového úhlu pevné. Výška letu je tedy důležitou stránkou celého procesu pořizování dat. V závislosti na ní se přijatelná velikost průměrů stop může pohybovat v rozmezí od 10 cm do téměř 4 m, čemuž musí odpovídat analogický či mírně větší odstup os paprsků při dopadu na zemi. Například při výšce letu 1000 m je laserem registrován pás na povrchu o šířce cca 200 m s pěti stopa-

mi na 1 m^2 . Při letové výšce cca 400 m se hustota záznamů stopami zvyšuje na 25 na 1 m^2 . V zásadě platí, že čím větší frekvenci impulsů laser vysílá, tím přesnější informaci pořizuje, neboť je získáváno více údajů na jednotku plochy. Třeba z větších výšek je vhodnější nízkofrekvenční snímání kolem 5 kHz s adekvátně nižší hustotou záznamů povrchu. Kombinováním výšky letu, obrazového úhlu a frekvence laserových impulsů lze nastavit optimální snímací podmínky podle účelu práce. Analýzou zaznamenaného vráceného paprsku je pak vyhodnocován vlastní objekt a vzdálenost čidla od něj. Je-li laserové snímání doprovázeno sběrem také optických dat ve viditelném, případně dalších pásmech, výsledný efekt je mimořádný. Na trhu je v současnosti nabízena řada zařízení, která splňují rozmanité požadavky plánovaného účelu nasazení (KAŠPAR et al. 2003, TEJKAL 2008 a NAVRÁTIL 2009).

INTERPRETACE MRAČEN BODŮ

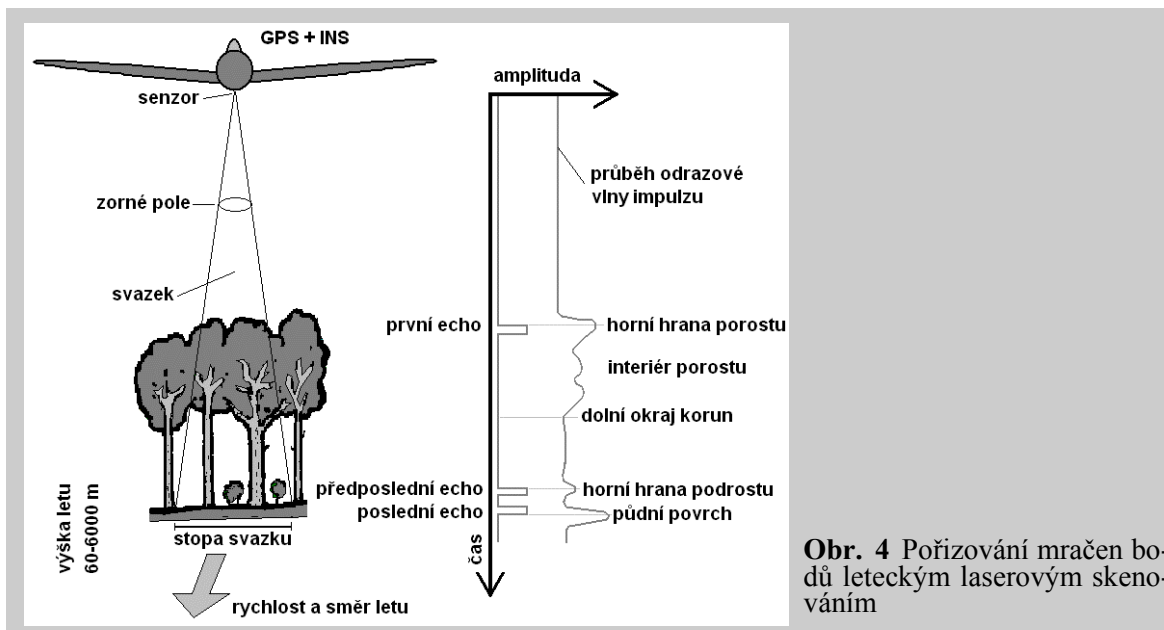
Proces pořízení digitálního modelu reliéfu zahrnuje mnoho dílčích procedur, které pojednávají jednotlivé stránky jeho konstrukce, a to od vlastní přípravy letu (jde-li o letecké skenování) přes sběr a zpracování dat do podoby finálního výstupu požadovaného zákazníkem (**obr. 3**). Z hlediska finálního produktu je klíčovou záležitostí interpretace mračen bodů do podoby digitálního modelu povrchu (DMP) a vlastního digitálního modelu reliéfu (DMR). Zatímco digitální model povrchu (digital surfa-



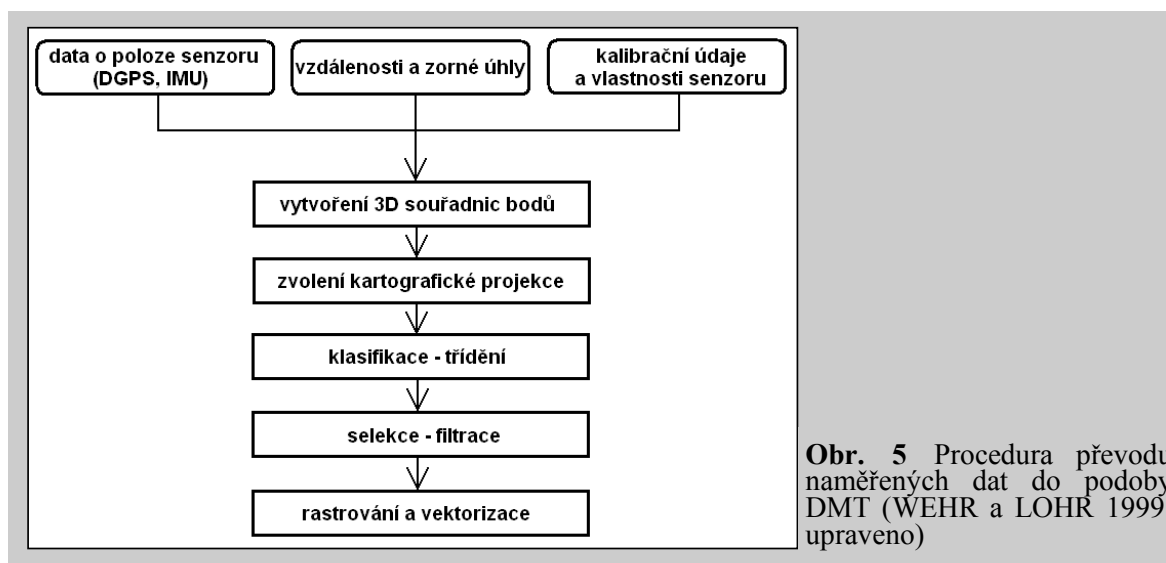
Obr. 3 Přehled dílčích aktivit procesu pořizování digitálního modelu terénu leteckým laserovým skenováním

ce model – DSM) představuje plochu popsanou prvními odrazy laserových pulzů (případně jedinými odrazy, nenastalo-li vícenásobné odrážení), digitální model reliéfu (digital terrain model - DTM) reprezentuje plochu popsanou posledními odrazy (nebo jedinými odrazy, kde nedošlo k vícenásobným odrazům) a plochami vzniklým „odříznutím“ nadzemních objektů (přírodních – zpravidla vegetace v několika jejich patrech podle okolností a antropogenních – staveb).

Laserovým snímáním je získáno mračno bodů, které reprezentují místa odrazu laserového pulzu ze svazku paprsků. Principiálně jsou si pozemní (ground nebo terrestrial laser scanning – TLS) a letecké laserové skenování (aerial laser scanning – ALS) podobné. Přijímačem jsou registrovány časy, za které jsou vykonány dráhy pulzu od zdroje k objektu a po odrazu od něj zpět k přijímači. Některé objekty na zemském povrchem jsou pro laserové pulzy „polopropustné“ (např. vegetace). Paprsky



Obr. 4 Pořizování mračen bodů leteckým laserovým skenováním



Obr. 5 Procedura převodu naměřených dat do podoby DMT (WEHR a LOHR 1999, upraveno)

ve svazku daném příslušným zorným polem tak mohou vytvářet mračna bodů, kde budou jak body kteréhokoliv odrazu (echa) počínaje horním okrajem objektu (první echa), odrazy od reflexe schopných částí uvnitř objektu až po odrazy od pevného (zpravidla) zemského povrchu (poslední echa) (**obr. 4**).

Poté, co do stanovení 3D polohy bodů v mračnách jsou zakomponovány úpravy s ohledem polohu senzoru a výkyvy letadla (ve třech osách – registrované pomocí inerciálního navigačního systému – INS) zpracované připojeným zařízením IMU (inertial measurement unit), každý z registrovaných bodů získává souřadnice v 3D prostoru. Vzhledem k tomu, že kvalita záznamu (hustota pokrytí plochy bodu) klesá se vzdáleností od objektu (podle typu zařízení např. z letové hladiny 6000 m činí pokryvnost body 1 bod/m², při letu např. v 60 m to činí cca 250 bodů/m²), nutno větší území snímat v překrývajících se pásích z optimální výšky letu. Navíc při vhodně zvolené výšce letu dochází také ke vzájemnému překryvu stop svazků laserových paprsků. Slícování bodů a nasnímaných pásů v zónách překryvu je standardním krokem předzpracování dat. Velikost vzniklých mračen dosahuje několika MB, až několika desítek MB. Celkový objem dat může činit až několik TB, což vyžaduje kapacitní počítačové zázemí. Postup vlastního zpracování naměřených dat (**obr. 5**) se člení do posloupnosti etap (WEHR a LOHR 1999).

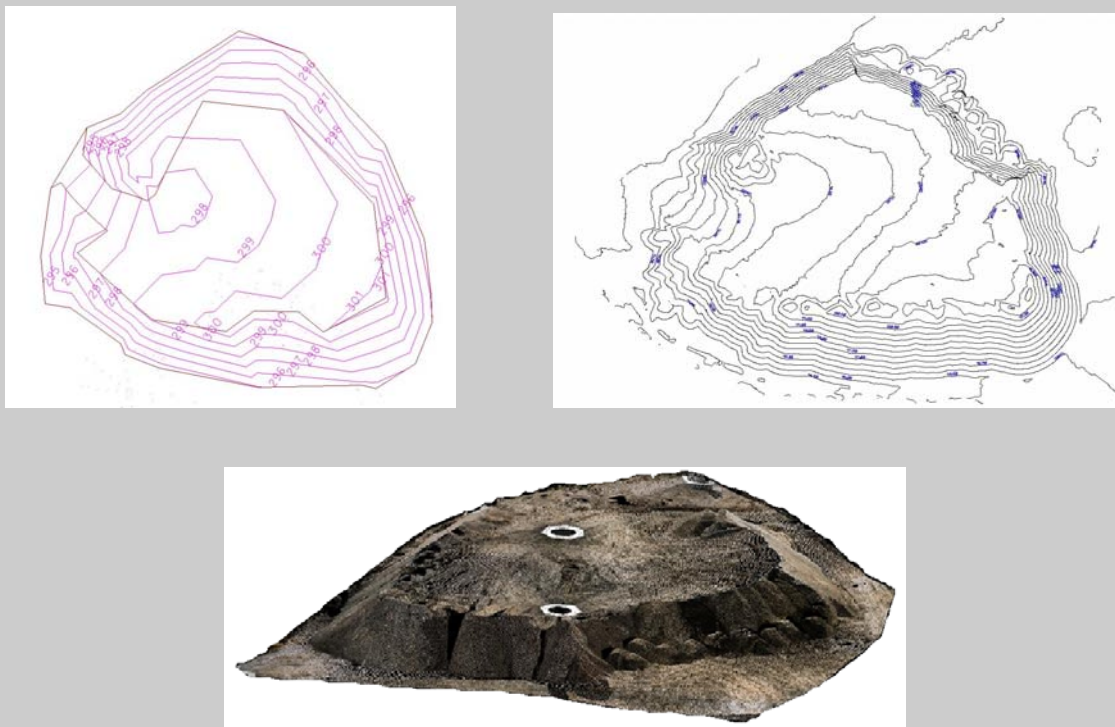
Slícování se opírá o spolehlivě polohově registrované body a dále o analogické body obou lícovaných souborů (mračen porovnávaných svazků až po mračna dokumentující nasnímané pásy). Moduly pro vyhodnocení laserových záznamů jsou k dispozici jak samostatně, tak v balících SW GIS či SW pro architektu. Tímto způsobem se vytváří předběžná představa o tvaru nasnímaných objektů či konfigu-

raci terénu zájmového území. Vlastní interpretace pak spočívá nejprve ve vzájemném odlišení jednotlivých výškových hladin registrovaných bodů v mračnách, pak jde o určení jejich kvalitativního významu (jaký objekt popisují).

POZEMNÍ LASEROVÉ SKENOVÁNÍ A JEHO VYUŽITÍ

Pozemní snímání je vhodné pro zaměřování menších objektů a ploch, kde je kladen důraz na vysokou přesnost záznamů (chyby v řádu několika mm) a výsledných modelů. Může jít jak o pořizování statických modelů stavebních objektů (zejména takových, kde je postrádána architektonická dokumentace, tedy u starých objektů), či dynamických modelů moderních objektů (dokumentování jejich pohybů při různých situacích – např. mostů při různých zátěžích vozidly, přehradních hrází, střech pod sněhem, zatížení elektrického vedení námrazou apod.). Podobně lze dokumentovat sestavením statických modelů rozmanitá území před a po realizaci rozmanitých zásahů (inundační prostory nádrží, povrchové těžební lokality, nestabilní svahy), pro potřeby krizového řízení (objekty, dostupnost, průchodnost, překážky a pod.). Vhodné je rovněž nasazení pro dokumentaci obtížně dostupných tvarů reliéfu, např. skalních stěn (stěny karů v Tatrách dokumentovala pozemním laserovým skenerem N. KOLECKA (2010)). Dynamické modely území umožňují podchytit probíhající procesy opakovaním záznamů, ať již jde o sesuvná území v blízkosti obcí, komunikací nebo citlivých objektů (TEJKAL a TRUTNOVSKÝ 2003).

Praktické využití nachází pozemní laserové skenování také při dokumentaci drobných tvarů reliéfu, zejména při zjišťování jejich kubatur (HOTAR et al. 2005), případně jejich dynami-



Obr. 6 Olbramovice – digitální model terénu skládky stavebního materiálu (srovnání podrobnosti dat získaných geodetickým měřením – vlevo a laserovým skenováním – vpravo s prezentací ve výsledném modelu – dole)

ky či detailního postavení vůči okolí (ŠTĚPANČÍKOVÁ et al. 2010), podobně je tomu při určování objemu zářezů a násypů komunikačních staveb, revitalizaci těžebních prostorů, skládek odpadu (**obr. 6**). Jinou efektivní aplikací pozemního laserového skenování je měření a modelování interiérů, např. jeskyní, důlních děl, tunelů a pod. (BUCHROITHNER a GAISECKER 2009).

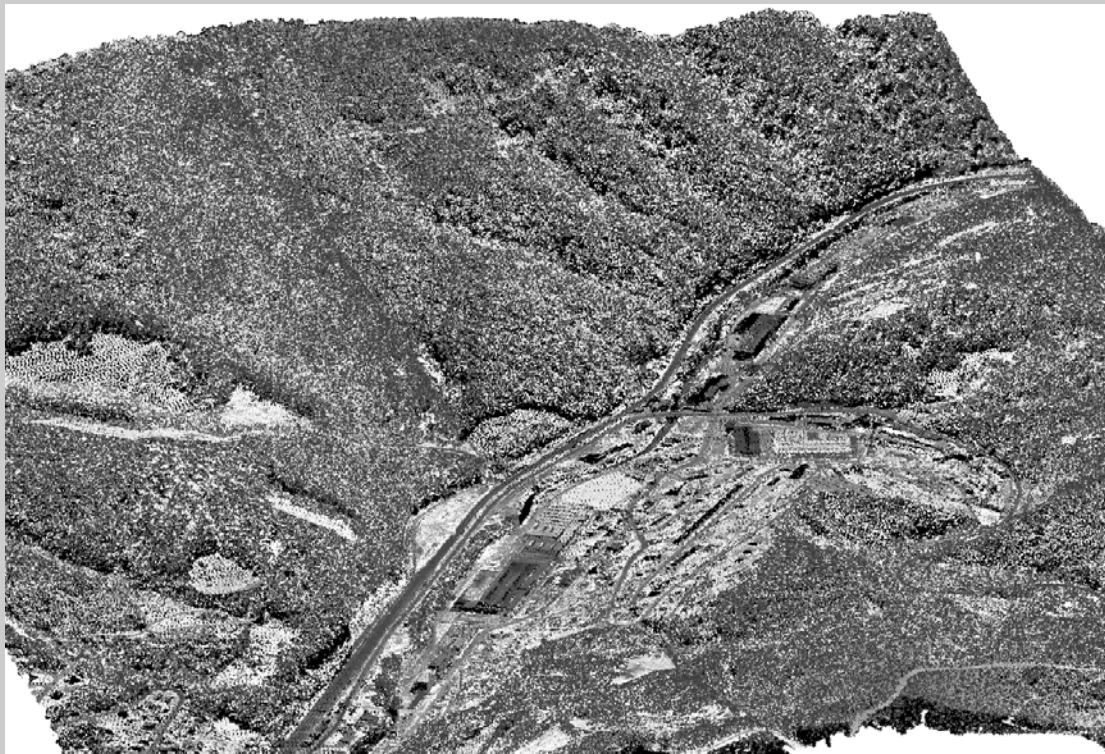
LETECKÉ LASEROVÉ SKENOVÁNÍ A JEHO VYUŽITÍ

Laserové snímání z leteckých nosičů je schopno kvalitně pokrýt rozsáhlejší území, přičemž míru přesnosti je vhodné podle požadavku kvality kombinovat s předpokládanými náklady. Další výhodou je odstranění problému vhodného a bezpečného umístění laseru v terénu v případě pozemního snímání.

Surový záznam laserem pořízených dat ve vizualizované podobě podle prvních ech poskytuje představu o zájmovém území a objektech v něm s vysokou pestrostí a přesností (**obr. 7**).

Možnosti praktického uplatnění takto pořízených 3D modelů jsou velmi široké. Laserové snímání se jeví jako nejvhodnější zdroj dat o povrchu a terénu v územích hustě pokrytých nadzemními objekty, ať již přirozenými, např.

lesem (KRAUS a PFEIFER 1998), anebo umělými, třeba v prostoru městské zástavby. Zároveň pod lesem lze touto cestou pořídit podstatně kvalitnější digitální model terénu než klasickým pozemním mapováním (takto zjištěn detailní průběh morén posledního zalednění v polských Krkonoších – Andrzej Traczyk, ústní sdělení 2010), u zastavěných ploch takto odpadá komplikované měření výškových kót na objektech nutných k namodelování jejich tvarů a velikostí (MARTINEZ de AGUIRRE a MALPICA 2010). Navíc vhodnou technologií lze tyto objekty od terénu „odříznout“ a tak získat „čistý“ DMR. Výsledek lze užít pro četné výzkumné a praktické aplikace. Za zvláštní pozornost stojí právě využití laserem pořízených 3D modelů území pro řešení havarijních situací spojených s pádem lavin, sesuvů, zřícených přírodních i umělých objektů, neboť porovnáním pohavarijního povrchu s původním lze vytipovat místa nejvhodnějšího zásahu. Jinou aplikací může být dokumentace nepřístupného území zastíněného hustou oblačností, mlhou či kouřem. Nedávné povodně v roce 2010 i v tomto směru představují neblahou inspiraci, neboť pořízení laserového DMR ohroženého území umožní lépe odhadnout dosah záplavy nebo sesouvání, přesně vytipovat ohrožené objekty a území a jistým způsobem předvídat i velikost škod vztaženou k jednotlivým variantám záchranných opatření, v optimálním



Obr. 7 Vizualizovaný laserový záznam údolí Svitavy na území města Adamova 15 km severně od Brna

případě opakovaným skenováním lze podchytit i dynamiku jevu. Detailní dokumentace drobných tvarů reliéfu a i nepatrných výškových rozdílů získaných leteckým laserovým snímaním umožnila identifikaci urbánní konfigurace zaniklé středověké obce v italském kraji Basilicata (LA-SAPONARA et al. 2010). Chronologickou řadu podrobných digitálních modelů terénu pořízených leteckým laserovým skenem lze výhodně využít k postihu dynamiky horských ledovců a tak je přesněji odlišit od jejich okolí, obzvláště je-li jejich povrch při okraji překryt sutí, jak to doložili ABERMANN et al. (2010) svým výzkumem v rakouských Ötztálských a Stubaiských Alpách.

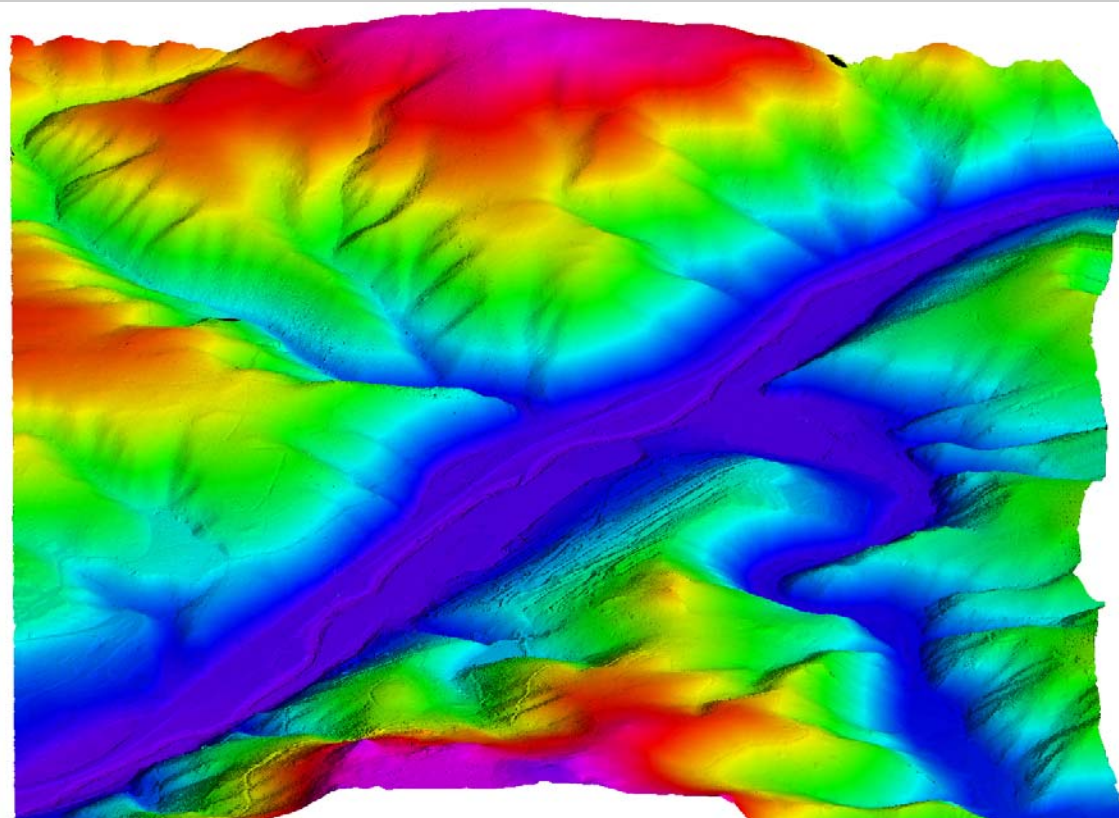
V rámci prvního kroku vlastního tématického vyhodnocení dat (tedy zjištění objektů na zemském povrchu a odečtení reliéfu) probíhá klasifikace bodů mračen. Body jsou rozděleny zpravidla na ty, které označují první a poslední echa, a na zbylé body, jejichž definitivní interpretace zůstává do jisté míry nespolehlivá.

Vizualizací interpretovaného laserového záznamu je tak možné získat vcelku detailní pohled na zájmové území v podobě DMP. Výškové rozdíly mezi registrovanými objekty podávají jen částečnou informaci o podstatě objektů. Takto upravený záznam nemůže tedy vyčerpávajícím způsobem reflektovat rozmanitě povrchy krajiny a nahrazovat mapu využití ploch.

Vlastní digitální model reliéfu dále vzniká vizualizací prvních ech (jsou-li v daném místě jediná) a posledních ech (v místech s vícenásobným odrazem). Filtrací může být povrch terénu shlazen, míra shlazení je úměrná počtu opakovaných filtrací (oknem $n \times n$ pixelů). Optimální míru shlazení nastavuje podle svých zkušeností a charakteru území operátor zařízení (zpracovatel dat). Výsledný digitální model terénu pořízený laserovým skenováním (**obr. 8**) však vykazuje oproti modelům vytvořeným z digitalizovaných vrstev či dat pozemní či letecké fotogrammetrie nesrovnatelně vyšší přesnost a podrobnost. Ta obzvláště vyniká v územích pokrytých stromovou vegetací (většinou ukrývající poměrně členitý mikroreliéf).

Detailní podchycení drobných tvarů reliéfu obzvláště vyniká při porovnání s DMR získaným odvozením z vrstevnic. Tradiční model na bázi vrstevnic představuje opakovaně generalizovaný obraz reliéfu původně generovaný z diskrétní sítě měrných bodů pozemního nebo leteckého snímání. Převedením do rastrové podoby je ztracena další informace, byť pro mnohé účely je i takový model zcela dostačující (**obr. 9**). Podrobný digitální model terénu, stejně jako model povrchu získaný laserovým skenováním nabízí širší spektrum uplatnění než modely pořízené některou z tradičních cest.

Laserové snímání poskytuje jinak obtížně získatelná podrobná obrysová data o:



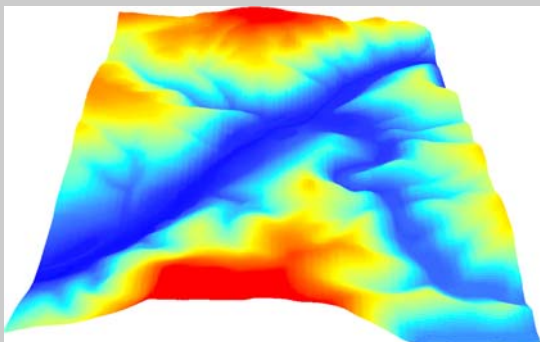
Obr. 8 Digitální model reliéfu pro údolí Svitavy u Adamova. Laserové snímání umožňuje kvalitní podchycení přirozených (drobné skalky, zářezy toků) i umělých terénních detailů (zářezy lesních cest) jak v lesem pokrytých údolích, tak mezi antropogenními objekty (urbánní terasy, komunikační násypy a zářezy, upravené koryto řeky Svitavy)

1. přírodních objektech nad zemským povrchem,
2. přírodních a umělých objektech pod zemským povrchem,
3. antropogenních objektech nad „přírodním“ terénem, vlastním terénu (reliéfu) území po „odříznutí“ umělých nadzemních objektů všeho druhu.

Z geomorfologického hlediska jsou nadzemní přírodní objekty reprezentovány rozmanitými skalními útvary (v podmínkách ČR: to-

ry, viklany, suky, skalní mísy, skalní stěny, písčivcová skalní města a pod.). Vedle studia vlastního tvaru, a to do extrémních detailů s možností opakování měření pro postižení dynamiky, je možné kvalifikovaně odhadovat kubaturu útvarů a dílčích výstupků nebo vhloubenin na nich (tafoni, voštiny, včetně jejich dynamiky).

Podzemní přírodní objekty jsou nejčastěji reprezentovány krasovými a pseudokrasovými útvary, jež je možné touto technologií dokona-



Obr. 9 Digitální model terénu údolí Svitavy v okolí Adamova (vlevo) pokrytý aktuálním ortofotem pro srovnání s charakterem modelu pořízeným laserovým skenováním na **obr. 8**

| Statické parametry terénu - využití | Dynamické parametry terénu - využití |
|---|---|
| Skalní útvary – dokumentace a výpočet objemu | Skalní útvary – pohyb s rizikem říčení |
| Sesuvy – dokumentace a objem sesouvané zeminy | Sesuvy – rychlost pohybu, zapojování objemů do pohybu |
| Bezodtoké pánve – dokumentace a objem pro akumulaci vody | Poddolované plochy – vývoj kubatur povrchu poklesových území |
| Údolí – dokumentace a objem pro stanovené objemu nádrže | Údolí – vývoj kubatury zástavby jakožto překážky povodňového průtoku |
| Mikrorelief lesa – dokumentace a retenční schopnost povrchu | Mikrorelief lesa – vedení lesních komunikací |
| Mikrorelief polomů – dokumentace a výpočet objemu uvolněné zeminy a objemu vodní retence ve vývratech | Mikrorelief polomů – dokumentace vývoje svahových procesů, hydrologické modelování |
| Přírodní tvary reliéfu pod porosty – dokumentace vývoje území | Přírodní tvary reliéfu pod porosty – chování exponovaných tvarů vůči turistické návštěvnosti |
| Antropogenní tvary reliéfu – dokumentace míry přeměnění původního reliéfu člověkem | Antropogenní tvary reliéfu – stabilita zemních těles komunikací aj. objektů |
| Podzemní reliéf přírodních útvarů krasu a pseudokrasu – dokumentace pozemním skenováním ke stanovení tvaru, objemu pro vědecké i praktické účely | Podzemní reliéf přírodních útvarů krasu a pseudokrasu po dramatických událostech (záplavy, říčení, sesuvy apod.) – dokumentace pozemním skenováním pro vědecké a praktické účely |
| Důlní díla, sklepení a jiné podzemní prostory (podzemní továrny, sklady, úkryty a pod.) – dokumentace pozemním skenováním pro inventarizaci a další výpočty | Důlní díla, sklepení a jiné podzemní prostory (podzemní továrny, sklady, úkryty a pod.) po dramatických událostech (záplavy, říčení, sesuvy a pod.) – dokumentace pozemním skenováním pro inventarizaci a další výpočty |

Tab. 1 Přehled možných aplikací digitálního modelu terénu z laserového skenování

le dokumentovat s možným vyústěním i do přehodnocení dosavadních názorů na jejich genezi a stav. Podobně je tomu i u důlních děl.

Nadzemní antropogenní objekty představují z geomorfologického hlediska jak rozmanité stavební konstrukce, tak zemní tělesa. Hlavním potenciální uživatelem je tedy oblast architektury (exteriéru i interiéru), stavebnictví (pozemního, dopravního a pod.), avšak také těžby a přemísťování surovin/zemin (montánní, komunikační, industriální, urbánní aj. antropogenní tvary reliéfu). Související aplikací je pak dokumentace terénu v zastavěných územích (DOLANSKÝ 2003, MARTINEŽ de AGUIRRE a MALPICA 2010). Vedle rozmanitých deskriptivních úkolů (dokumentace staveb, zemních objektů, stavu a vývoje povrchových i podzemních důlních děl) jsou poskytována data pro navazující úkoly, např. výpočty kubatur objektů (vnitřních a vnějších, konstrukcí i zemních staveb), geologických zásob, kapacit vodních nádrží a pod.

V ČR prozatím omezené využití pozemního a leteckého laserového skenování pro přírodovědecký aplikovaný výzkum (KOLEJKA 2003) naráží zejména na cenovou hladinu pořizování a zpracování laserových dat. Zatímco snímací technologie se stávají cenově dostupné, zpracovatelské technologie jsou stále ve stádiu vývoje a zdokonalování, což vede ke zdražování procedur vyhodnocení záznamů.

Přesto digitální modely reliéfu získané laserovým skenováním nemají v přesnosti a spolehlivosti alternativu (ani sebedokonalejší algoritmy úprav DMR nedosáhnou přesnosti laserových modelů) a jsou výhledově dobře využitelné v řadě oblastí výzkumu s nemalým dopadem na praxi (**tab. 1**).

Dokumentace reliéfu pořízená laserovým skenováním ať již v podobě DMR, z něj odvozených map nebo krajinných, resp. terénních profilů (**obr. 10**) se však může stát významným impulzem k řadě studií základního nebo aplikovaného výzkumu, kde spolehlivost výstupů doposud narážela na nedostatky standardních digitálních modelů reliéfu.

ZÁVĚR

Digitální modely terénu pořízené pozemním nebo leteckým laserovým skenováním se vyznačují řadou předností, ale i nevýhod (DOLANSKÝ 2003). Mezi základní klady patří:

- prakticky nezávislost snímání na počasí,
- možnost provádění snímání za nízké nebo nulové viditelnosti, tedy i v noci,
- nejsou potřebné lícovací body,
- vysoká pokrývnost území souřadnicemi popsanými body (závisí na vzdálenosti senzoru od objektu) a s tím související vysoká přesnost modelů,



Obr. 10 Interpretované mračno bodů v podobě krajinného profilu (vlevo) a z něj vektorizací odvozený terénní profil s vyznačenými umělými objekty nad povrchem (vpravo). Za pozornost stojí dobře dokumentovaný mikoreliéf pod stromovými porosty (zčásti pravděpodobně zarostlé agrární terasy)

- možnost práce v interiéru (objektu, porostu, podzemního útvaru),
- úspora času díky rychlému nasnímání objektů, resp. území.

Použitelnost prozatím snižují některé nedostatky:

- potřeba znalosti klíčových ploch pro lokalizaci,
- potřeba znalosti klíčových objektů pro slícování mračen bodů a nasnímaných pásů,
- doplňková vizuální obrazová data pro podporu interpretace,
- vysoce výkonné (a zpravidla) nákladné zpracovatelské zařízení,
- časová náročnost zpracování nasnímaných dat (mračen bodů),
- specifické programové vybavení s potřebnou kontinuální upgradou vzhledem k neustálému pokroku ve vývoji.

Technologický pokrok a rozšiřující se produkce potřebného HW a SW však vede k rozmanitosti nabídky na trhu. Rostoucí konkurence a příliv nových technologií a zkušeností vede k příznivému cenovému vývoji pro potenciální uživatele produktů laserového skenování. Vysoká užitná hodnota těchto produktů však naznačuje, že tvorba laserových digitálních modelů terénu v brzké době nahradí většinu klasických DMR, ale také přinese nové výzvy k jejich neustálému zdokonalování. V některých vyspělých zemích již probíhá sestavování pokryvných laserových DMT pro celé státní území (Michal Gallay – ústní sdělení 2010). Z hlediska geomorfologického výzkumu bude tento vývoj patrně zpočátku znamenat koncentraci zejména na menší území a detailní dokumentaci. Pozornost se pravděpodobně soustředí na atraktivní povrchové a podzemní tvary, případně na dynamické objekty přijatelných rozměrů (sesuvy, skalní řícení, svahové deformace, sedimentační areály a pod.).

Uvedený moderní geografický výzkum krajiny podporuje výzkumný projekt MSM00-21622418 „Dynamická geovizualizace v krizovém managementu“ v gesci Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR a výzkumný

projekt „Osud české postindustriální krajiny“ číslo IAA 300860903 financovaný Grantovou agenturou Akademie věd České republiky. V těchto projektech jsou vyvíjeny nástroje a postupy, které slouží optimálnímu rozhodování v případě ohrožujících jevů, přípravě dokumentace a plánování budoucnosti krajiny pomocí soudobých nástrojů geoinformatiky.

LITERATURA

ABERMANN, J., FISCHER, A., LAMBRECHT, A., GEIST, T. (2010). On the potential of very high-resolution repeat DEMs in glacial and periglacial environments. *The Cryosphere*, 4, 1, 53 – 65.

BUCHROITHNER, M. F., GAISECKER, T. (2009). Terrestrial Laser Scanning for the Visualization of a Complex Dome in an Extreme Alpine Cave System. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, 4/2009, 329 – 339.

DOLANSKÝ, T. (2003). Zpracování dat laserového skenování v AutoCADu. *Ročenka Geo-Info 2003*, Praha, Computer Press, Praha, 67 – 69.

HOTAŘ, Z., JANKŮ, M., KOLEJKA, J. (2005). Využití moderních laserových skenerů při určování kubatur prostorových těles. *Minerální suroviny/Surowce mineralne*, 15, 3, 32 – 35.

KAŠPAR, M., POSPÍŠIL, J., ŠTRONER, M., KŘEMEN, T., A TEJKAL, M. (2003). *Laserové skenovací systémy ve stavebnictví*. Vega s. r.o., Hradec Králové, 111 s.

KOLECKA, N. (2010). Wykorzystanie skaningu laserowego do modelowania powierzchni 3D - zastosowania w badaniach środowiska geograficznego. In Zyszkowska, W., Spalleks, W., eds. *XIX Szkoła Kartograficzna. Główne problemy współczesnej kartografii 2010: Numeryczne modele terenu w kartografii*. Uniwersytet Wrocławski, Instytut Geo-

grafii i Rozwoju Regionalnego, Zakład Kartografii Wrocław, 122 – 131.

KOLEJKA, J. (2003). Laserové snímání krajiny jako zdroj přesných třírozměrných vstupních dat do GIS. *Geografie – Sborník České geografické společnosti*, 108, 1, 92 – 93.

KOLEJKA, J., TEJKAL, M. (2002). Nejrychlejší pohled na svět: Přesný 3D model povrchu z laserového snímání. *Geodis News*, 1, 9 – 11.

KRAUS, K., PFEIFER, N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53, 4, 193 – 203.

LASAPONARA, R., COLUZZI, R., GIZZI, F. T., MASINI, N. (2010). On the LiDAR contribution for the archaeological and geomorphological study of a deserted medieval village in Southern Italy. *Journal of Geophysics and Engineering*, 7, 2, 155 – 163.

MARTINEZ de AGUIRRE, A., MALPICA, J. A. (2010). Morphological filter for removing nonground measurements from LIDAR data. In Hrubá, L., Podhoranyi, M., Kapias, A., eds. *Proceedings - Symposium GIS Ostrava 2010. GIS meets Remote Sensing and Photogramme-*

try towards Digital World (Ostrava, Česká republika, 24 – 27 January 2010). VSB - Technical University of Ostrava. <http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2010/sbornik/indexe.htm> Online [May 20th 2011].

NAVRÁTIL, P. (2009). GEODIS has a new serial scanner. *Geodis News*, 8, s. 5.

ŠTĚPANČÍKOVÁ, P., MASANA, E., ROCKWELL, T. (2010). Applications of airborne and ground LiDAR in active fault studies: an example from the Elsinore fault in the Coyote Mts. Imperial Valley (California). In Křížek, M., Nyplová, P., Vočadlova, K., Borská, J., eds. *Geomorfologický sborník 9 (Stav geomorfologických výzkumů v roce 2010 Branná, Česká republika, 11 – 13 May 2010)*. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Praha, s. 63.

TEJKAL, M. (2008). Laser scanning – news, new scanner. *Geodis News*, 7, 32 – 33.

TEJKAL, M., TRUTNOVSKÝ, K. (2003). Využití pozemního laserového zobrazovacího skeneru. *Geodis News*, 2, 16 – 17.

WEHR, A., LOHR, U. (1999). Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, 2 – 3, 68 – 82.