SLOVENSKÝ KRAS ACTA CARSOLOGICA SLOVACA	57/2	165 – 176	LIPTOVSKÝ MIKULÁŠ 2019

SPRACOVANIE A ZDIEĽANIE DÁT Z POZEMNÉHO LASEROVÉHO SKENOVANIA KOMPLEXNÉHO JASKYNNÉHO SYSTÉMU NA PRÍKLADE JASKYNE DOMICA

JOZEF ŠUPINSKÝ – ZDENKO HOCHMUTH – JÁN KAŇUK – VLADIMÍR SEDLÁK – JÁN ŠAŠAK

Ústav geografie, Prírodovedecká fakulta, Univerzity P. J. Šafárika v Košiciach, 041 00 Košice; jozef.supinsky@upjs.sk; zdenko.hochmuth@upjs.sk; jan.kanuk@upjs.sk; vladimir.sedlak@upjs.sk; jan.sasak@upjs.sk

J. Šupinský, Z. Hochmuth, J. Kaňuk, V. Sedlák, J. Šašak: Processing and sharing of terrestrial laser scanning data of complex cave system on example of the Domica Cave

Abstract: Terrestrial Laser Scanning (TLS) cave mapping is well developed and has been used for many caves. Most of the work in which TLS is used for mapping is dedicated only to large domes, or to easily accessible cave corridors. Until now, there have been no published papers that have been subjected to TLS mapping for difficult to access cave sections. On the example of mapping over 1000 positions using the TLS method, we point out the possibility of using this method under any conditions, while maintaining a high positioning accuracy and density of the recorded point cloud representing the cave. In addition to the hard-to-reach parts of the cave, sharing and visualizing such large data is a problem, which requires increased demands on the hardware performance of used computer and user knowledge of using specialized software. For this reason, a number of point cloud indexing tools are being developed. These tools drawing only a small portion of the data where is the user targeted and thus being able to use weaker devices without the need to install additional software. An example of such a tool is the Potree visualization tool developed at TU Vienna implemented in the LAStools software package. The big advantage of sharing results is the possibility of free access to data and their download for everyone. In this paper, we focus on the issue of data collection, processing and sharing in cave mapping using TLS, which builds on previous experiences of members of the author's team in the field of research and mapping of caves.

Key words: Domica – Čertova diera Cave system, Slovak Karst, point cloud, terrestrial laser scanning (TLS), data sharing, data visualization

ÚVOD

Jaskyne sú jednou z posledných oblastí na Zemi, ktorých mapovanie a poznanie má značné limity najmä z dôvodu obmedzeného prístupu. Pri ich skúmaní je často problematické, dokonca až nemožné, použitie konvenčných mapovacích metód. Využívané mapovanie pomocou magnetického polygónového ťahu vytvára iba schematický a málo presný pohľad na jaskyňu. Aj keď existuje široká škála metód pre mapovanie jaskýň (Hochmuth, 1995) od tachymetrie, U-GPS (Wenger, 2004), pozemnej fotogrametrie (Triantafyllou et al., 2019), sonaru (Stipanov et al., 2008), či využitia aktívnej (Chamberlain et al., 2000) alebo pasívnej tomografie (Barnaföldi et al., 2012) môžeme konštatovať, že klasické banské

meračské metódy nie je v súčasnosti možné úplne nahradiť novými prístupmi, ktoré však môžu byť v určitých častiach jaskyne použité ako doplnková forma mapovania. Preto je stále potrebné zaznamenávať polygónový ťah jaskyne. Je však možné realizovať ho s použitím pozemného laserového skenovania (PLS). Princíp PLS (Vosselman a Maas, 2010) spočíva v opakovanom meraní vzdialenosti vzhľadom k povrchu, na ktorý je emitovaný laserový lúč. Pri laserovom skenovaní sa rozlišuje statické pozemné laserové skenovanie z jedného stanovišťa, letecké laserové skenovanie (LLS) a mobilné laserové skenovanie (môže byť využitý pozemný aj letecký skener), kedy v reálnom čase dochádza k pohybu a zaznamenávaniu trajektórie mapovania vzhľadom ku ktorej sú vynášané zaznamenané body. Využitie PLS sa ukazuje presnejším ako využitie mobilného (Zlot et al., 2014), či dokonca mobilného UAV laserového prístupu (Kaul et al., 2015). Mobilné metódy sú závislé od schopnosti zaznamenať trajektóriu letu, kedy je potrebné určiť polohu zariadenia v čase emitácie pulzu pomocou inerciálnej meracej jednotky (IMU), ktorej schopnosť záznamu v čase je menej presná, než je frekvencia emitácie laserového lúča. Tieto nedostatky je následne nutné vyrovnávať a jedným z riešení je simultánna lokalizácia a mapovanie (SLAM). Podľa Bao et al. (2019) až po zakomponovaní atómových hodín do tohto druhu zariadení sa zbavíme limitácie spôsobenej nedostatočnou časomierou, čím sa zdokonalí lokalizácia polohy merania v priestore a samotná poloha bodov. PLS je preto metóda často používaná aj pre prieskum a 3D rekonštrukciu komplexných povrchov ako jaskynné chodby a dómy (Buchroithner a Gaisecker, 2009), ako aj pre rôzne geologické (Hoffmeister et al., 2014), geomorfologické (Fabri et al., 2017), glaciologické (Gašinec et al., 2012; Kamintzis et al., 2017) aplikácie v jaskyniach, pričom výsledok je získaný vo vysokom priestorovom rozlíšení a za relatívne krátky čas (Mohammed Oludare a Pradhan, 2016). Aj PLS však so sebou nesie dávku neurčitosti vo forme kumulácie systematickej chyby merania. Tá môže na neuzavretých meračských ťahoch dosahovať vysoké odchýlky, kedy je nutné vzhľadom k voľnosti translácie a rotácie pozícií dbať na precíznosť spracovania získaných dát z terénu.

Naším cieľom bolo detailné mapovanie rozsiahleho jaskynného systému Čertova diera – Domica metódou PLS za účelom dokumentácie systému a výskumu hydrologických fenoménov prostredníctvom komplexných 3D modelov jaksyne. Pri mapovaní sme sa preto sústredili na zaznamenanie priebehu vodných tokov v jaskynnom systéme pre vytvorenie spojitého mračna obsahujúceho vybudované hydrologické profily. Okrem tohto sa snažíme o inovatívny prístup s využitím 3D vizualizačného nástroja Potree (Schuetz, 2016) pre zdieľanie nami zaznamenaných dát, kedy sa nám podarilo kombináciou leteckých a pozemných lidarových dát spracovať interaktívny webový portál jaskyne Domica a okolia. V jaskyni Domica sme pokračovali v meračských prácach s rozsiahlym využitím PLS v nesprístupnených častiach jaskyne, ktoré neboli mapované v roku 2014 (Gallay et al., 2015) a v roku 2017 (Šupinský et al., 2018). Zamerali sme sa na prekonanie ťažkých úsekov s čo najvyššou presnosťou zberu dát, pričom sme riešili najmä problémy s registráciou dát zo skenovania vzhľadom k nie vždy priechodným častiam jaskyne (občasné sifóny, nízka miera prekrytu dát) a integráciu s nehomogénnym lidarovým datasetom, ktorá bola problematickejšia, ako sme na začiatku prác predpokladali. Okrem nami získaných dát z PLS sme do výsledného webového portálu zakomponovali aj letecké lidarové dáta, ktoré nám pomáhajú podať informáciu o priestorovom vzťahu podzemia s povrchom. V predkladanom príspevku sa komplexne venujeme celému procesu od zberu a spracovania, až po vytvorenie portálu jaskyne, kedy sa nám podarilo zachytiť hlavnú hydrologickú sieť podzemných vodných tokov jaskynného systému Čertova diera – Domica.

OBJEKT VÝSKUMU

Výskumné územie predstavuje lokalita jaskyne Domica, ktorá je pre potreby nášho výskumu zaujímavá z viacerých dôvodov. Jaskyňa je špecifická jarnými povodňami vo veľkých priestoroch Majkovho dómu, kde je možné sledovať správanie sa vodného toku a zmenu jeho prirodzeného koryta. Tento výskum je podporený systematickým sledovaním pomocou monitorovacej siete zloženej z meracích zariadení meteorologických staníc (WH 1080 a 1090) a hydrologických profilov s tlakovými sondami MARS (Hochmuth a Gessert, 2016). Pre relevantnú interpretáciu výsledkov je nevyhnutné vychádzať z podrobného komplexného modelu jaskyne, nakoľko klasická speleologická mapa je pre tieto účely nepostačujúca. Priebežné výsledky mapovania pomocou PLS, týkajúce sa najmä sprístupnenej časti jaskyne Domica, boli publikované v prácach Gallay et al. (2015) a Hofierka et al. (2016). Súčasťou mapovania v roku 2014 bolo aj LLS južnej časti Silickej planiny, ktoré podáva informáciu o formách georeliéfu a ďalších objektoch na povrchu nad jaskyňou (Hofierka et al., 2017). Na mapovanie v jaskyni sme nadviazali v rokoch 2017 a 2018, kedy bola metódou PLS zaznamenaná morfológia jaskynného systému od Čertovej diery po maďarskú hranicu.

Jaskyňa Domica je súčasťou geomorfologického celku Slovenský kras, ktorý je typický svojím planinovým charakterom s množstvom krasových foriem. Cezhraničný jaskynný systém Domica-Baradla s dĺžkou 26 065 m je hranicou rozdelený na Slovenskú Domicu s dĺžkou 6603 m (Spravodaj SSS 1/2017) a maďarskú Baradlu. Jaskyňa bola zostupom zo Starej Domice v roku 1926 objavená Jánom Majkom (Droppa, 1961), ktorému sa ju podarilo v roku 1929 spojiť s Čertovou dieru. Po Skalistom potoku ide o druhú najdlhšiu známu jaskyňu v Slovenskom krase. Jaskyňa je spolu s ďalšími jaskyňami Aggtelektského a Slovenského krasu od 2. 2. 2001 v zozname svetového dedičstva UNESCO. Podrobná charakteristika jaskynného systému Domica-Baradla je publikovaná v práci Gaál a Gruber (2014). Jaskyňa bola od objavenia mnohokrát premapovaná, pričom prvé mapovanie prebiehalo v roku 1932 pod vedením Paloncyho (Paloncy, 1932). Postupne sa s využitím rôznych techník mapovania vystriedalo viacero meračov, ktorí sa prevažne zamerali na sprístupnené časti jaskyne, najmenej problematické pre mapovanie (Roth, 1937; Novoveský, 1975). Najkomplexnejšiu mapu jaskyne vyhotovil Droppa a Chovan (Dropa, 1972) a dnes prebieha pod vedením Hochmutha, ktorý vyhotovil spojitý meračský ťah priestorov a postupne dochádza ku premapovávaniu všetkých častí jaskyne (Hochmuth, 2014).

Jaskyňa Domica a jej okolie je taktiež predmetom viacerých hydrologických štúdií (Klaučo et al., 1999; Peško, 2003; Haviarová et al., 2010), ktoré realizovali najmä pracovníci Správy slovenských jaskýň (SSJ). Na základe uvedených prác môžeme konštatovať, že jaskynný systém je občasne dopĺňaný vodami z povrchového vodného toku Domický potok a v období intenzívnych zrážok a topenia snehu voda infiltruje cez ponory a v podzemí vytvára občasný tok Styx, do ktorého sa vlieva Domický potok. Aj napriek rozsiahlym poznatkom o režime vodných tokov z ich predchádzajúceho dlhodobého monitoringu a prijatým ochranným opatreniam dochádza v Domici k hydrologickým situáciám, ktoré nie sú dostatočne vysvetlené.

ZBER A SPRACOVANIE DÁT

Pri nami vykonanom mapovaní v rokoch 2017 (Šupinský et al., 2018) a 2018 sme pracovali so skenerom RIEGL VZ-1000, ktorý vysiela blízke infračervené vlnenie (1550 nm) s vysokou polohovou presnosťou meraných bodov (± 3 mm) a maximálnym

dosahom skenovania až 1400 m (Riegl, 2015). Vzhľadom k nižšej polohovej presnosti bodov v blízkosti skenera, ktorá súvisí s meraním času pri pulznom type skenera, sú objekty bližšie ako 1,5 m automaticky odstránené z bodového poľa scén. Rozmery skeneru sú 0,3 m × 0,2 m × 0,2 m a s batériami váži približne 10 kg, pričom technické riešenie zariadenia s umiestňovaním fotoaparátu na skener obmedzuje skenovanie v zenitovom smere na 100°, čo je nutné eliminovať väčším množstvom skenovacích pozícií, resp. vertikálnym skenovaním. Keďže ide o zariadenie navrhnuté predovšetkým pre využitie pri povrchovej banskej činnosti, skenery od výrobcu Riegl sú robustnejšie a odolnejšie aj voči zvýšenej prašnosti. Po skenovaní v Čertovej diere sme pri nabíjaní batérií pravidelne zo zariadenia vysypávali jemný vápencový prášok, ktorý sa dostal v podobe aerosólov do nechránených chladiacich častí zariadenia.

Zber dát bol zameraný na čo najlepšie zaznamenanie jaskynných chodieb s ohľadom na presnosť registrácie dát a množstvo pozícií. Vynechaním terčov sme sa snažili ušetriť čas strávený mapovaním, pričom ich rozmiestnenie by bolo problematické najmä v Čertovej diere a Panenskej chodbe. Pri mapovaní sme okrem statívu použili aj doplnkové pomôcky ku meracej technike, ako napr. platformu pre skenovanie v miestach s elastickým podkladom (obr. 1A), dosku so skrutkou pre skenovanie v úzkych priestoroch, zmenšený statív, podložku pre mapovanie úzkych priestorov aj s výskytom vody (obr. 1B) a podložku na vertikálne skenovanie v prípade úzkych komínov. Všetky tieto nevyhnutné meračské pomôcky vyhotovil Hochmuth na mieru pre daný typ skenera. Plavby v Domici boli skenované počas najnižšieho vodného stavu, kde bolo potrebné použiť spomínanú platofmu pre skenovanie na nestabilnom bahennom podklade.

Po prekonaní druhej plavby sme niekoľko pozícií skenovania vyniesli na povrch cez druhý východ, kde prebehlo meranie registračných bodov, ktoré slúžili pre umiestnenie výsledného mračna bodov do súradnicového systému S-JTSK a Bpv. Meranie registračných bodov bolo realizované pomocou metódy GNSS prístrojom „TOPCON HiPER II“, s referenčným pripojením na observačnú službu SKPOS. Meranie bodov sa vykonalo v trvaní 15 sekúnd metódou RTK s využitím váženého priemerovania. Súradnice bodov v súradnicovom systéme S-JTSK03 a výškovom systéme Bpv boli vypočítané pomocou softvérov TopconLink a TopconTools fy. Topcon. Následne boli transformované do súradnicového systému S-JTSK pomocou rezortnej transformačnej služby.

Ďalej sme postupovali k maďarskej hranici, pričom problematické úseky boli hlavne v oblasti Kaskádovej siene s nutnosťou zamerania komínu a v závere pri prechode hraničnej mreže. V roku 2018 sme sa sústredili najmä na mapovanie v Čertovej diere, ktorú sme pripojili k predchádzajúcemu mapovaniu cez Rúru, pričom najužšie miesto v lokalite Majkova prepojka bolo len o pár centimetrov väčšie, ako sú rozmery zariadenia. V závere, pri nízkom vodnom stave, sme zaznamenali chýbajúcu časť od Panenskej chodby po ústie toku Styx v Majkovom dóme a Štôlňu Domického potoka. V rokoch 2017 a 2018 sme v Domici a Čertovej diere skenerom RIEGL zaznamenali 712 pozícií, čo po napojení na predchádzajúce mapovanie spolu tvorí databázu z 1039 skenovacích pozícií (tabuľka 1).

V prvej fáze šlo o náročný pohyb v blate druhej plavby s množstvom lokálnych depresií naplnených vodou. Za hrádzou druhej plavby bol pohodlný vzpriamený pohyb až po maďarskú hranicu, kde sme používali len statív s pomôckou pre umiestnenie skenera v blate (obr. 1A). Vynesenie mapovania na povrch cez druhý východ v závrte a spojenie povrchovým ťahom s Čertovou dierou bolo nutné pre uzavretie meračských ťahov. V Čertovej diere bol najnáročnejší transport skenera, na ktorý sme používali špeciálne puzdro, aby nedošlo k poškodeniu zariadenia. Na mapovanie zúžených priestorov s väč-

Obr. 1. Príklady pomôcok použitých pri mapovaní v náročných podmienkach: platforma pre pohyb v zamokrených úsekoch (A) a podložka pre mapovanie v zúžených podmienkach bez statívu (B)
Fig. 1. Examples of instruments used for mapping in difficult conditions: platform for movement in wet sections (A) and mapping pad for use in restricted conditions, without a tripod (B)

ším množstvom zákrytov, kde by bolo vhodnejšie použiť menšie skenovacie zariadenie, sme používali dosku so skrutkou a v lepších častiach zmenšený statív. Po zostúpení k riečisku toku Styx sme sa sústredili na zameranie všetkých hydrologických profilov a spojenie od Čertovej diery ku jaskyni Domica. Tu sme používali „stolček“ (obr. 1B), aby nedošlo k prípadnému namočeniu skenera do vody. Dobrá chodba a Blúdivá sieň nie sú dostatočne spojené z dôvodu celoročného výskytu vody. Sifón za umelým spojením Suchej a Panenskej chodby v Domici bol doplnený pri poslednom mapovaní. Práve vďaka mapovaniu bol identifikovaný pred Zrúteným dómom komín, ktorý sa nevyskytuje na žiadnej mape, pričom dosahuje výšku až 25 m. Mapovanie trvalo spolu 21 dní, pričom v odľahlých a vertikálne členitých priestoroch bol najnáročnejší transport materiálu na miesto skenovania. Celkovo trvalo skenovanie približne 100 h (cca 10 min na pozíciu). Priemerná dĺžka skenovania v rámci jednej pozície bola 80 s, pri vertikálnom a horizontálnom zázname bodov každých 0,06° a v závislosti od veľkosti priestorov bolo zaznamenaných približne 9 miliónov bodov na pozíciu. V tejto súvislosti je potrebné upozorniť aj na objem spracovaných dát, ktorý nebol triviálny. Ako uvádza Hofierka et al. (2017), objem dát rastie priamo úmerne s množstvom skenovacích pozícií, preto je nutné zvoliť postačujúcu mieru detailu, ako aj vhodnú metódu filtrovania dát.

Registračný proces prebiehal od vnútornej a vonkajšej registrácie, cez filtrovanie a export dát. Po načítaní jednotlivých scén do registračného projektu boli odstránené body, ktoré sú z hľadiska vnútornej registrácie problematické. Ide najmä o body, ktoré sú označované ako šum, ktorý vzniká pri dopade laserového lúča na vodu, ktorá zrkadlí, prípadne pri falošných odrazoch v miestach, kde stopa laserového lúča dopadne na rozhranie objektov. Odstránením šumu dokážeme znížiť výslednú chybu registrácie pri použití automatického cloud-to-cloud prístupu, kde sú vzájomne porovnávané mračná bodov alebo ich deriváty. Tento šum možno odstrániť ručne vyhľadávaním falošných odrazov (Gómez-Lende a Sánchez-Fernández, 2018) alebo sa dá pristúpiť k automatickému filtrovaniu dát, ktoré však často nemusí fungovať správne. Vnútornú registráciu vzájomných pozícií je možné vykonať manuálne vyhľadávaním registračných objektov, pričom ide o podobný postup ako pri georeferencovaní rastrového objektu v GIS prostredí, kedy vyhľadávame aspoň 4 totožné páry. Po manuálnej registrácii dát sa zvyčajne používa automatické vyrovnanie

Tabuľka 1. Zoznam mapovaní v jaskyni Čertova diera – Domica
Table 1. List of surveys in the Čertova diera – Domica Cave

Dátum	Lokalita	Čas [h]	Podmienky	Pozície	Skener
3. 3. 2014	Domica – vchod – Dóm indických pagod	8	Chodník	98	FARO
4. 3. 2014	Domica – Dóm Indických pagod – vchod	8	Chodník	50	FARO
5. 3. 2014	Domica – Panenská a Suchá chodba	8	Chodník	99	FARO
6. 3. 2014	Domica – domerávka Panenskej chodby + Majkov dóm + domerávka od Samsonových stĺpov k Posvätnej chodbe	8	Suché časti	80	FARO
1. 12. 2017	Domica – Prvá plavba a začiatok druhej plavby	4	Blato	37	RIEGL
13. 12. 2017	Domica – dokončenie druhej plavby	4	Blato	32	RIEGL
20. 12. 2017	Domica – Druhá plavba – Kaskádová sieň + zameranie II. východu	4	Suché časti	61	RIEGL
29. 12. 2017	Domica – dokončenie po maďarskú hranicu	4	Suché časti	59	RIEGL
18. 1. 2018	Domica – Klenotnica + zameranie východu k I. plavbe	4	Suché časti	43	RIEGL
4. 2. 2018	Čertova diera – vchod až rebrík za Predným dómom	4	Úzke priestory	33	RIEGL
18. 2. 2018	Čertova diera – Majkov dóm	4	Úzke priestory	25	RIEGL
25. 2. 2018	Čertova diera – plazivky po Zrútený dóm	4	Úzke priestory	37	RIEGL
2. 3. 2018	Čertova diera – k Dómu českých colníkov	4	Blato	43	RIEGL
3. 4. 2018	Povrch – II. východ po Líščiu dieru	4	Povrch	56	RIEGL
7. 4. 2018	Povrch – Líščia diera – Čertova diera	4	Povrch	18	RIEGL
27. 4. 2018	Čertova diera – Bočný dóm	4	Úzke priestory	13	RIEGL
21. 8. 2018	Domica – od Rúry k Majkovmu prekopu	4	Úzke priestory	51	RIEGL
23. 8. 2018	Čertova diera – Majkov prekop k Dómu českých colníkov + Nebezpečný dóm	4	Blato	46	RIEGL
16. 11. 2018	Čertova diera – Vysoký dóm	4	Úzke priestory	37	RIEGL
20. 11. 2018	Čertova diera – Dobrá chodba + Blúdivá sieň	4	Blato + Voda	36	RIEGL
23. 11. 2018	Domica – tok Styxu od Panenskej chodby po Majkov dóm a Domický potok k štôlni	4	Blato + Voda	85	RIEGL
Spolu 21 dní		100		1039	

na základe rôznych prístupov, kedy sú použité buď celé mračná bodov, čo je výpočtovo náročný proces, alebo sa odvodzujú jednoduchšie zriedené vzorky, kde je porovnávaný pôdorys, orientácia normálových vektorov, či iné prístupy, ako napríklad porovnávanie ostrých prechodov na hranách objektov. Týmto krokom zabezpečíme vzájomné vyrovnanie pozícií až po uzavretie meračského ťahu, čím zlepšíme polohovú presnosť dát. Následne je v prípade nutnosti možné transformovať dáta z tohto lokálneho projektového súradnicového systému do „globálneho" súradnicového systému v procese vonkajšej registrácie, ktorá je v prípade použitia registračných bodov („tie points") podobná procesu manuálnej vnútornej registrácie skenovacích pozícií (Riegl, 2015).

Skenovacie pozície boli spracované v softvéri RiSCAN PRO, pričom nepoužiteľná bola len jedna pozícia v oblasti Kaňonu pri maďarskej hranici, kedy pravdepodobne došlo vplyvom plastického piesčitého podložia k poklesu skenera počas skenovania z dôvodu, že sme nepoužili platformu pre skenovanie v zamokrených úsekoch. Vnútorná registrácia dát prebiehala najprv manuálne vyhľadávaním 4 identických bodov na susedných pozíciách a v druhom kroku prebehla registrácia cez MSA (Multi Station Adjustment) metódou robust fitting (Ullrich et al., 2003), kde bola potrebná tvorba polydát cez nástroj „plane patch filter". Odvodené polydáta reprezentujú bodové pole centroidov plôšok vyhľadávaných na základe stanovených kritérií. Použitie metódy robust fitting (metóda priameho naloženia – MPN) je vhodnejšie než použitie metódy least square fitting (metóda najmenších štvorcov – LSF), pretože dokáže lepšie reagovať aj na extrémne hodnoty tzv. „outliers", ktoré pri použití LSF spôsobujú problém pri registrácii dát, kedy dochádza ku vyššej chybe vnútornej registrácie. Následne prebehlo automatické vyhľadávanie identických normálových vektorov z odvodených dát v polomere 0,25 m a sklonom v rozsahu 5°, čím sme získali väčšie množstvo registračných bodov, než prípadným použitím registračných terčov a zabezpečili tak spresnenie manuálnej registrácie skenovacích pozícií. Pri manuálnej registrácii sa smerodajná odchýlka pohybovala v priemere od 15 až do 8 mm a po následnom použití MSA s MPN bola výsledná smerodajná odchýlka vnútornej registrácie vzájomných pozícií **3 mm**.

Pôvodne integrácia dát z oboch skenovaní prebehla v prostredí RiSCAN PRO pomocou celého mračna bodov z predchádzajúceho mapovania skenerom FARO ako ďalšej skenovacej pozície, kedy sme sa snažili o registrovanie dát k nášmu mapovaniu (Šupinský et al., 2018), no práca s celým bodovým poľom bola náročná vzhľadom na objem dát, rozdielnu hustotu bodových polí a odvodených dát pre registráciu ako aj vplyvom rozdielov z dôvodu rekonštrukcie chodníkov a zábradlí, kde miestami pribudla 5 cm vrstva nového povrchu. Z dôvodu nedostatočného množstva dát došlo k premapovaniu priestorov z Majkovho dómu po východ z jaskyne, čím sme zabezpečili väčší prekryt dát v S – J smere. Zistili sme však, že aj pri takejto registrácii vznikli chyby spojené s odlišným typom predchádzajúcej registrácie a nevyrovnania Gotického dómu pri mapovaní v roku 2014, ktorý bol napojený manuálne na základe 4 bodov, čo spôsobilo hrubú chybu registrácie dát a problémy pri uzavretí meračského ťahu. Nakoniec sme tento problém vyriešili importovaním všetkých pozícií z roku 2014 do projektu v programe RiSCAN PRO a preregistrovaním cez MSA pomocou MPN ako u zvyšku dát, čím sme zabezpečili korektnú integráciu s pôvodnými dátami.

Po integrácii dát sme pristúpili k vyrovnaniu šiestich uzavretých meračských ťahov (obr. 2). Statickou ostala len prvá pozícia nášho skenovania a k nej boli postupne vyrovnané po úsekoch všetky scény. K rozdeleniu po úsekoch sme museli pristúpiť z dôvodu vysokej výpočtovej náročnosti vyrovnávacieho výpočtu, ktorý trval pri najdlhšom štvrtom úseku

Obr. 2. Lokalizácia skenovacích pozícií
Fig. 2. Location of the scanning positions

od Rúry v Panenskej chodbe po vstupný areál jaskyne Domica so 400 pozíciami 5 dní. Pri uzavretí meračských ťahov dochádzalo k vyrovnaniu nakumulovanej systematickej chybe merania, ktorá napríklad pri 150 pozíciách bola 15 cm a vyrovnala sa medzi pozície zvýšením chyby o 1 mm na pozíciu, takže výsledná štandardná odchýlka registrácie dát je na úrovni **4 mm**. V úseku od konca druhej plavby po maďarskú hranicu nedošlo k uzatvoreniu meračského ťahu, čo mohlo vniesť nepresnosti vplyvom kumulovania systematickej chyby na neuzavretom meračskom ťahu. Polohová chyba v týchto častiach, vzhľadom k počtu pozícií na neuzavretom meračskom ťahu, dosiahla hodnotu až 20 cm. V tak extrémnych jaskynných podmienkach tiež nebolo možné zaistiť, aby na nasledujúcich pozíciách boli vždy zachytené registračné objekty v rovnakej kvalite záznamu k prináležiacim scénam pre ideálnu registráciu, preto je použitie MSA bez registračných objektov najlepším riešením.

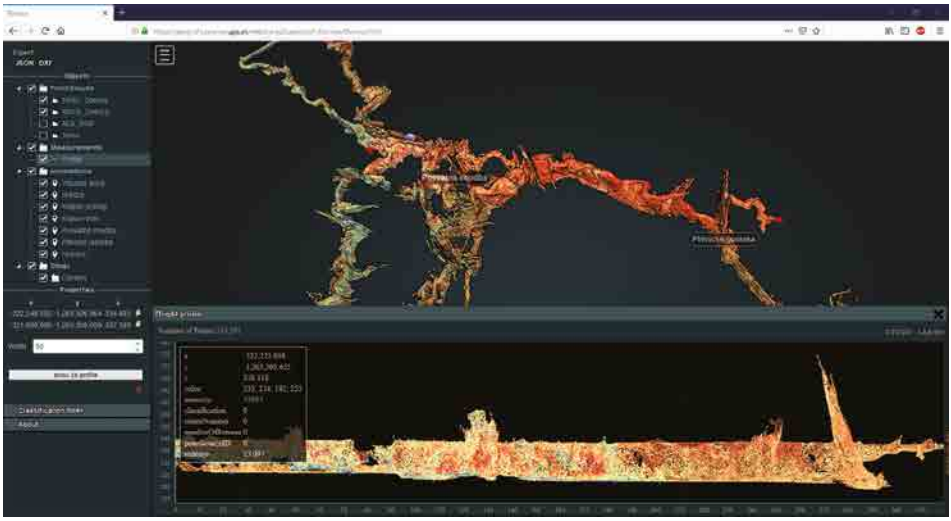
Po umiestnení vnútorne registrovaných dát do S-JTSK a Bpv bolo zistené, že dátam smerom na sever rastie nadmerne výšková súradnica, preto sme sa rozhodli vyhľadať v mračne okrem už skôr použitých colníckych bodov aj body z mapovania geologického prieskumu (Novovseký, 1975) realizovaných v S-JTSK. Celkovo bolo v spracovanom mračne bodov identifikovaných 56 pôvodných meračských bodov. Pre vonkajšiu registráciu sme použili podmienku aspoň 8 referenčných bodov a dosiahnutie chyby menšej ako 5 cm. Získali sme tak 102 kombinácií, no len jedna registračná matica mala v kontrolných bodoch správne určené súradnice a výsledná chyba registrácie do S-JTSK a Bpv je **16,6 mm**. Na sledovanom hraničnom medzníku sa napríklad nadmorská výška menila od 312 do 324 metrov nad morom, pričom vždy bola chyba vonkajšej registrácie pod 5 cm. Kombináciou geodetických bodov a GNSS merania sa nepodarilo zaistiť chybu pod 5 cm, čo poukazuje na riziko použitia vlastných GNSS meraní pre registráciu do globálneho resp. národného súradnicového systému (Riegl, 2015). Registrované dáta boli z programu RiSCAN PRO exportované po pozíciách, pričom sa rozlišovali dáta z rozdielnych zariadení, ktoré tak v portáli vystupujú ako samostatné mračná bodov.

Dáta z leteckého skenovania boli umiestnené do národného súradnicového systému S-JTSK čo umožnilo integráciu dát z leteckého a pozemného mapovania. Dáta z leteckého laserového skenovania boli zafarbené na základe ortofotosnímok z dôvodu lepšej orientácie vo vytvorenom mapovom portáli. Z bodov klasifikovaných ako terén bol tiež odvodený

model terénu formou lineárnej interpolácie, z ktorého boli extrahované 4 body na 1 m^2, aby sme pre vytvorenú webovú vizualizáciu získali hustejšie bodové pole pôsobiace spojitým dojmom. Všetky pripravené dáta z pozemného a leteckého laserového skenovania sme pomocou nástroja laspublish (Isenburg, 2018) spracovali do formy webového portálu, kde sme pridali niekoľko významných bodov, ktoré umožnia užívateľovi rýchlu navigáciu vo vytvorenom mračne bodov.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Výsledkom postupu uvedeného v metodickej časti predkladaného článku bolo mračno bodov reprezentujúce jaskynný systém Čertova diera – Domica s priľahlými povrchovými časťami, umiestnené v národnom súradnicovom systéme S-JTSK a Bpv. Celkovo sme zmapovali približne 5 km chodieb pri variáciách rôznorodého povrchu od chodníkov, cez kamenný podklad, blato, piesok a prekonali zaplavené plochy. V záverečnej fáze spracovania dát sme pracovali s 1039 pozíciami, čo v plnom rozlíšení zodpovedalo vyše 20 miliardám bodov. Z dát boli odfiltrované body reprezentujúce šum. Dáta boli priestorovo zriedené na 1 cm, pričom po filtrácii bolo potrebné pracovať s približne dvoma miliardami bodov. Pri mapovaní sme sa stretli aj s javom, kedy v prípade sintra pokrytého jemným vodným filmom dochádzalo vo výnimočných prípadoch k zrkadleniu objektov. Pri východe z jaskyne v zimnom období zas došlo k vstupu studeného vzduchu, čo sa vo vytvorenom mračne bodov znázornilo na podlahe a strope ako šum. Z tohto dôvodu odporúčame vstupy do jaskýň skenovať v stabilných teplotných podmienkach, kedy dochádza k najslabšiemu pohybu vzduchových hmôt. Z dôvodu zachovania iných dát s nízkou odrazivosťou boli manuálne odstránené odrazy od vodnej hladiny a nežiaduce objekty ako osoby a meračská technika. Konečným produktom mapovania je portál spájajúci mračno bodov povrchu a jaskyne dostupný pre širokú verejnosť prostredníctvom webovej platformy (Portál). Práca s bodovým poľom je vizuálne efektívnejšia a autentickejšia ako práca s 3D modelom. Trojrozmerná vizualizácia jaskyne slúži najmä pre lepšiu predstavivosť distribúcie častí jaskyne vzhľadom na povrch. Takýto interaktívny webový portál ponúka širokú škálu možností zobrazovania a zdieľania dát. Vytvorený portál umožňuje vytvoriť výškový profil, ktorým je možné pripraviť rozvinutý rez vybranými priestormi doplnený napríklad o povrch. Tieto dáta si vie užívateľ stiahnuť a ďalej s nimi pracovať v špecializovaných softvéroch. Vytvorený portál (obr. 3) nie je mapou jaskyne, ale poskytuje všetky potrebné informácie o lokalizácii objektov v priestore, pričom je ochránený o neurčitosť vnesenú modelovaním, či skreslením mapy. Vytvorený webový portál nekladie na užívateľa špeciálne nároky, postačuje štandardná výbava počítača s internetovým pripojením a internetovým prehliadačom. Problémy s vykresľovaním mračna bodov môže byť spôsobené napríklad slabým internetovým pripojením, prípadne spomalenie vykresľovania je spôsobené nižšou kapacitou pamäte RAM. Odporúčame tiež použiť webový prehliadač Mozzila Firefox, ktorý pri testovaní portálu vykazoval najlepšie výsledky vykresľovania dát. Optimalizáciu vykresľovania je možné regulovať množstvom vykresľovaných bodov a množstvom zapnutých údajových vrstiev. Keďže v jaskyni neboli zabezpečené stabilné svetelné podmienky, pri mapovaní pomocou pozemného laserového skenera sme nefotili okolitú scénu. Z tohto dôvodu nie je možné vykresliť mračno bodov v pravých farbách. Na druhej strane vytvorený portál umožňuje vyfarbiť bodové polia cez rôzne iné parametre, ako napríklad intenzita odrazu, vyrovnaná intenzita, nadmorská výška. Užívateľ si tu môže všimnúť rôzne vlastnosti materiálov, kedy sa nám ukážu dáta s vyšším množstvom náteku a mokré oblasti s nízkou hodnotou



Obr. 3. Ukážka webového portálu s výškovým profilom časti priestorov doplnenými o gradient intenzity odrazu
Fig. 3. Preview of a web portal with a height profile of a part of cave spaces, supplemented by a gradient of reflection intensity

intenzity (modrá) a naopak suché a vysoko reflexné oblasti ako zábradlia a masívy s vysokou hodnotou intenzity (červená).

ZÁVER

Dokončením mapovacích prác v jaskyni sme získali ucelený priestorový obraz o systéme Čertova diera – Domica vo vysokom priestorovom rozlíšení. V článku prezentujeme postup mapovacích prác pomocou metódy pozemného laserového skenovania, ako aj metódy spracovania dát. Výsledkom je databáza, v ktorej sú umiestnené výsledky mapovania v podobe mračna bodov od roku 2014 do roku 2018. Následne bola vytvorená webová aplikácia, kde môžu uživatelia prezerať priebeh jaskynného systému, vykonávať meranie a exportovať dáta pre potreby ďalšieho spracovania.

Spôsob spracovania dát umožňuje, aby sa v budúcnosti k prezentovanému mapovaniu bolo možné kedykoľvek napojiť a pokračovať ďalšími prepojkami a nezmapovanými úsekmi, pričom samotnú jaskyňu nezaťažujeme ďalšou stabilizáciou a signalizáciou meračských bodov. Takéto mapovanie vizualizované pomocou webového prehliadača nám slúži ako platforma aj pre zdieľanie výsledkov výskumu. Najjednoduchšie využite prezentovaného webového portálu vidíme pri virtuálnej prehliadke sprístupnených a nesprístupnených priestorov, čo môže slúžiť ku propagácii prírodného dedičstva.

Poďakovanie. Príspevok vznikol aj vďaka členom jaskyniarskej skupiny Speleo UPJŠ J. Kovalíkovi, N. Lackovi a J. Miklošovi, ktorí sa zúčastnili na mapovaní. Tento príspevok vznikol v rámci riešenia projektov VEGA 1/0963/17: Dynamika krajiny vo vysokom rozlíšení, APVV-15-0054: Fyzikálne založená segmentácia georeliéfu a jej geovedné aplikácie. Webový portál je dostupný na adrese: https://geografia.science.upjs.sk/webshared/Laspublish/Domica/Domica.html

LITERATÚRA

Bao, H., Cooper, A., Rowley, M., Di Lauro, L., Gongora, T. S. J., Chu, T. S., Little, E., B., Oppo, G., L., Morandotti, R., Moss, J. D., Wetzel, B., Peccianti, M. & Pasquazi, A. 2019. Laser cavity--soliton microcombs. Nature Photonics, 13, 6, 384–389.

Barnaföldi, G. G., Hamar, G., Melegh, H. G., Oláh, L., Surányi, G. & Varga, D. 2012. Portable cosmic muon telescope for environmental applications. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 689, 60–69.

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, 4, 329–339.

Chamberlain, A. T., Sellers, W., Proctor, C. & Coard, R. 2000. Cave detection in limestone using ground penetrating radar. Journal of Archaeological Science, 27, 10, 957–964.

Droppa, A. 1961. Domica – Baradla, jaskyne predhistorického človeka. Šport, Bratislava, 1–151.

Droppa, A. 1972. Príspevok k vývoju jaskyne Domica. Československý kras, 22, 65–72.

Fabri, S., Sauro, F., Santagata, T., Rossi, G. & De Waele, J. 2017. High-resolution 3-D mapping using terrestrial laser scanning as a tool for geomorphological and speleogenetical studies in caves: An example from the Lessini mountains (North Italy). Geomorphology, 280, 16–29.

Gaál, Ľ. & Gruber, P. 2014. Jaskynný systém Domica-Baradla. Jaskyňa, ktorá nás spája. Aggteleki Nemzeti park, Aggtelek, 512 s.

Gallay, M., Kaňuk, J., Hochmuth, Z., Meneely, J., Hofierka, J. & Sedlák, V. 2015. Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave, Slovakia. International Journal of Speleology, 44, 3, 277–291.

Gallay, M., Hochmuth, Z., Kaňuk, J. & Hofierka, J. 2016. Geomorpho-metric analysis of cave ceiling channels mapped with 3-D terrestrial laser scanning. Hydrology and Earth System Sciences, 20, 5, 1827.

Gašinec, J., Gašincová, S., Čermota, P. & Staňková, H. 2012. Uses of Terrestrial Laser Sanning in Monitoring of Ground Ice within Dobšinská Ice Cave. Journal of the Polish Mineral Engineering Society, 30, 2, 31–42.

Gómez-Lende, M. & Sánchez-Fernández, M. 2018. Cryomorphological Topographies in the Study of Ice Caves. Geosciences, 8, 8, 274.

Haviarová, D., Fľaková, R., Seman, M. & Ženišková, Z. 2010. Formovanie chemického zloženia vôd v jaskyni Domica. Podzemná voda, 13, 2, 153–161.

Hoffmeister, D., Zellmann, S., Kindermann, K., Pastoors, A., Lang, U., Bubenzer, O., Weniger, G. C. & Bareth, G. 2014. Geoarchaeological site documentation and analysis of 3D data derived by terrestrial laser scanning, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., II-5, 173–179.

Hofierka, J., Hochmuth, Z., Kaňuk, J., Gallay, M. & Gessert, A. 2016. Mapovanie jaskyne Domica pomocou terestrického laserového skenovania. Geografický časopis, 68, 1, 3–24.

Hofierka, J., Gallay, M., Kaňuk, J. & Šašak, J. 2017. Modelling Karst Landscape with Massive Airborne and Terrestrial Laser Scanning Data. In Ivan, I., Singleton, A., Horák, J., Inspektor, T. (Eds.): The Rise of Big Spatial Data, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Springer International Publishing, 1–14.

Hochmuth, Z. 1995. Mapovanie jaskýň. Slovenská speleologická spoločnosť, Liptovský Mikuláš.

Hochmuth, Z. 2014. História mapovania a vytvorenie spojitého meračského ťahu ako podkladu pre reambulovanie mapy Domice. Slovenský kras, 52, 2, 173–190.

Hochmuth, Z. & Gessert, A. 2016. Povodne v Domici a hydraulický pulz. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti, 47, 3, 30–33.

Isenburg, M., 2018. LAStools – efficient LiDAR processing software (version 180812, licensed). http://rapidlasso.com/LAStools

Kamintzis, J., Jones, P. P. J., Irvine-Fynn, T., Holt, O., Bunting, P., Jennings, S., Porter, P. R. & Hubbard, B. 2017. Assessing the applicability of terrestrial laser scanning for mapping englacial conduits. Journal of Glaciology, 64, 243, 37–48.

Kaul, L., Zlot, R. & Bosse, M. 2015. Continuous-Time Three-Dimensional Mapping for Micro Aerial Vehicles with a Passively Actuated Rotating Laser Scanner. J. Field Robotics, 33, 103–132.
Klaučo, S., Filová, J. & Peško, M. 1999. Hydrologický monitoring v jaskyni Domica v rokoch 1997 – 1998. Aragonit, 4, 11–14.
Mohammed Oludare, I. & Pradhan, B. 2016. A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: A review of sensors, method and application development. International Journal of Speleology, 45, 1, 8.
Novoveský, A. 1975. Technická správa, Domica 111-I-13. Geologický prieskum, n. p., Geologická služba podniku, geologická oblasť Rožňava. Slovenské múzeum ochrany prírody a jaskyniarstva.
Paloncy, E. 1932. Jak sme měřili v Domici. Krásy Slovenska, 11, 48–53.
Peško, M. 2003. Výsledky hydrologického monitoringu jaskyne Domica v rokoch 1999 – 2001. Aragonit, 8, 15–17.
Riegl Laser Measurement Systems GmbH, Austria (2015). 3D Terrestrial laser scanner Riegl VZ-400 / Riegl VZ-1000 / Riegl VZ-2000 General Description and Data Interfaces.
Roth, Z. 1937. Vývoj jeskyně Domice. Bratislava, 11, 129–163.
Schuetz, M. 2016. Potree: Rendering Large Point Clouds in Web Browsers. Diploma thesis, Vienna University of Technology, 92.
Stipanov, M., Bakarić, V. & Eškinja, Z. 2008. ROV use for cave mapping and modeling. IFAC Proceedings Volumes, 41, 1, 208–211.
Šupinský, J., Hochmuth, Z. & Kaňuk, J. 2018. Integrácia dát z pozemného laserového skenovania pri mapovaní jaskýň. In Inspektor, T., Horák, J. & Růžička J. (Eds.): GIS Ostrava 2018 GIS pro podporu bezpečnosti a krizového řízení, 10.
Triantafyllou, A., Watlet, A., Le Mouėlic, S., Camelbeeck, T., Civet, F., Kaufmann, O., Quinif, Y. & Vandycke, S. 2019. 3-D digital outcrop model for analysis of brittle deformation and lithological mapping (Lorette cave, Belgium). Journal of Structural Geology, 120, 55–66.
Ullrrich, A., Schwarz, R. & Kager, H. 2003. Using hybrid multi-station adjustment for an integrated camera laser-scanner system, Optical 3-D Measurement Techniques IV, Volume I, 298–305.
Vosselman, G. & Maas, H. G. 2010. Airborne and terrestrial laser scanning. CRC.
Wenger, R. 2004. La balise de positionnement U-GPS (Underground-GPS). ISSKA Rapport Annuel (Swiss Institute for Speleology and Karst Studies, La Chaux-de-Fonds), 13–14.
Zlot, R. & Bosse, M. 2014. Three-dimensional mobile mapping of caves. Journal of Cave and Karst Studies, 76, 3, 191–206.