

MAPOVANIE JASKYNE DOMICA POMOCOU TERESTRICKÉHO LASEROVÉHO SKENOVANIA

Jaroslav Hofierka, Zdenko Hochmuth, Ján Kaňuk, Michal Gallay, Alena Gessert*

* Univerzita Pavla Jozefa Šafárika, Prírodovedecká fakulta, Ústav geografie, Jesenná 5, 040 01 Košice, jaroslav.hofierka@upjs.sk, zdenko.hochmuth@upjs.sk, jan.kanuk@upjs.sk, michal.gallay@upjs.sk, alena.gessert@upjs.sk

Mapping the Domica Cave using terrestrial laser scanning

Caves are specific underground forms that result from complex processes. The majority of the caves in the Western Carpathians developed in limestone karst regions. There are various methods for cave mapping mostly including traditional geodetic measurement. However, these methods are unable to capture important details of the cave interiors, such as stalagmites or smaller geomorphic forms. Recent developments in laser scanning technology provide new methods and tools for high-accuracy mapping of caves. This paper presents a methodology for the use of terrestrial laser scanning technology for cave mapping and evaluates its applicability to cave morphology analysis at various levels of detail. This paper demonstrates that the acquired point cloud can be visualized and used for an interactive analysis of cave morphology. Moreover, it can be further processed to a 3D cave model that helps to identify specific geomorphological forms. The georeferenced point cloud can also be integrated into a GIS database to explore complex spatial interactions between landscape components and the cave system.

Key words: caves, terrestrial laser scanning, LiDAR, Domica cave

ÚVOD

Jaskyne ako špecifické podzemné formy krasového georeliéfu sú dlhodobo predmetom záujmu nielen speleológov a karsológov, ale aj geografie a ďalších vied skúmajúcich krajinu a jej zložky z rôznych aspektov. Vznik jaskyne je výsledkom zložitých procesov. Rozhodujúcu úlohu má horninové podložie a klimatické podmienky. Zvyčajne na tektonickom základe dochádza k modelovaniu vnútorných priestorov fluvialnymi, gravitačnými, ale aj geochemickými a biogénnymi procesmi. Výsledkom týchto procesov je morfológicky značne členitá dutina, pri fluvio-krase prevažne lineárneho charakteru (chodba). Významnou okolnosťou je, že jaskyne predstavujú aj svojrázne drenážne cesty krasových masívov, ktoré môžu byť aktívne, ale aj neaktívne.

Prevažne lineárny charakter a rádovo menšie rozmery jaskyne v porovnaní s inými javmi v krajine môžu viesť k domnienke, že ide o málo významné javy, ktoré sú na okraji záujmu. Ich komplexnejší výskum však dokazuje, že sú cenným zdrojom informácií o procesoch v minulosti (Droppa 1963). Sú v nich ukryté sedimenty, ale aj geomorfologické formy, ktoré vznikli za iných reliéfových okolností. Takto napríklad jaskynné úrovne v dolinách riek hovoria viac o vývoji georeliéfu počas oscilácií klímy v kvartéri ako riečne terasy, ktoré sa často z dôvodov denudácie práve v tomto georeliéfe nezachovali. Na základe alochtónnych kremičitých štrkov zacementovaných na stenách chodieb najvyššej vývojovej úrovne Domice datovali Bella et al. (2014) vek uloženia týchto sedimentov na $3,47 \pm 0,78$

miliónov rokov. Vtedy sa formovali základné črty súčasnej hydrologickej siete v danom regióne a jaskynná chodba musela už vtedy existovať (stredný pliocén). Tiež samotná morfológia priestorov napovedá veľa o procesoch, o ktorých by sme sa inak ani nemohli dozvedieť (Gallay et al. 2016). Ide napríklad o striedanie akumulačných a erózych fáz, vodnatosti toku vytvárajúceho jaskynné chodby a tiež rekonštrukciu znosovej oblasti povodia (petrografické analýzy). Z tohto hľadiska predstavujú jaskyne veľmi významný krajinný prvok, ktorého poznanie umožňuje efektívnejší manažment krasovej krajiny, ktorá na Slovensku zaberá asi 30 % z celkovej rozlohy.

Terénny výskum jaskýň je veľmi náročný. Vyplýva najmä z komplikovaných priestorových podmienok, chýbajúceho svetla, vysokej vlhkosti, častého výskytu tečúcej vody a blata. Napriek tomu je potrebné jaskyne skúmať a mapovať ich morfológiu. Podrobné poznatky o morfológii a morfometrii jaskýň nám umožňujú skúmať a poznávať nielen vývoj ich samotných, ale aj celého krasového územia.

Možnosti mapovania jaskyne a aj následného kartografického vyjadrenia má svoje špecifiká. Jaskynné teleso je priestorové a extrémne nepravidelné. Hlavný problém predstavuje skutočnosť, že prakticky nikdy nie je možné zachytiť celú jaskyňu jedným pohľadom, ako je to napríklad pri povrchových tvaroch, preto je potrebné jaskyňu mapovať „po častiach“ a napokon tieto pri záverečnom spracovaní „poskladať“. Taktó vzniká mapa jaskyne, podobne ako pri mapovaní baní, avšak tam sa prevažne stretávame s relatívne pravidelnými útvarmi (štôlne a šachty).

Mapovanie jaskýň sa iba málo podobá mapovaniu povrchu, kde prevažuje horizontálna zložka a iba zriedka sa stretávame so zvislými či previsnutými časťami. Teda zobrazenie jaskyne má bližšie k metodikám známym z technických vied – strojárstva, stavbárstva či banského meračstva, a preto sa klasické metódy zobrazenia najčastejšie pokúšajú priblížiť skutočný tvar jaskyne vyjadrením pomocou rezov – pôdorysu, bokorysu, priečnymi rezmí či priemetmi.

Tradične sú tvary ich priestorov mapované na princípe magnetického polygónneho ťahu, realizovaného pomocou banských meračských súprav, prípadne iných zariadení na princípe magnetického kompasu (Hochmuth 1995). Dlhý polygónový ťah pomocou tohto prístroja má značné riziká z hľadiska presnosti, avšak spresnenie mapovania pomocou teodolitu by bolo také časovo náročné, že v súčasnosti prevažujú magnetické prístroje, aj keď sa postupom času stále viac využívajú i modernejšie technológie založené na automatickom digitálnom zázname (laserový diaľkomer, digitálny sklonomer a kompas). Tieto klasické meračské metódy kladú na mapujúci tím jaskyniarov vysoké nároky (čas, fyzická pripravenosť, zručnosť práce s meračmi zariadeniami v limitujúcich priestoroch a pod.), avšak na druhej strane sa týmto spôsobom dajú zmapovať aj ťažšie dostupné úseky chodieb. Výsledkom uvedených klasických meračských metód je mapa jaskyne, ktorá však stále môže obsahovať značné nepresnosti vzhľadom na limitované možnosti zachytenia detailov a subjektívny odhad pri tvorbe náčrtov. Tieto mapy nezachytávajú detailnú vnútornú morfológiu jaskyne, ale len jej základné tvary. Formou kartografických značiek je znázornený výskyt špecifických jaskynných foriem či tvarov.

Vyššiu presnosť a detailnosť mapovania jaskýň prináša využitie metód pozemného diaľkového prieskumu, ako je fotogrametria (Belzner 1959 a Llanos Viña a García-Lázaro 1983) a laserové skenovanie (Buchroithner a Gaisecker 2009 a Canavese et al. 2009). V prípade fotogrametrie je limitujúcim faktorom najmä zabezpečenie dostatočného a rovnomerného osvetlenia jaskynných priestorov. Naproti

tomu dnešný rozvoj technológií na báze laserového skenovania umožňuje rýchle a presné mapovanie jaskýň s vysokou mierou presnosti a priestorovej detailnosti. Terestrické laserové skenery (TLS) zachytávajú milióny bodov v trojdimenzionálnom priestore v priebehu niekoľkých minút. Toto mračno bodov reprezentuje trojrozmernú (3D) geometriu povrchu, od ktorého sa laserový lúč odrazil. Bezkontaktným spôsobom tak možno mapovať aj vzdialené povrchy, ktoré nie sú človeku fyzicky dostupné (napr. strop jaskyne a úzke pukliny).

Základné spracovanie dát získaných pomocou TLS v podobe vizualizácie mračna bodov nekladie vysoké nároky na znalosti technológie, keďže laserové skenery sú dodávané spravidla aj so špecializovaným softvérom, ktorý je dostatočne intuitívny pre bežného užívateľa. Existujú aj voľne šíriteľné programy, z ktorých možno spomenúť napríklad LAStools, Lidarview, Meshlab a Cloud Compare. Všetky tieto programy umožňujú na jednej strane efektívnu vizualizáciu (sú schopné efektívne zobrazovať veľké dátové súbory) a na druhej strane umožňujú základné merania jaskynnej 3D geometrie – interaktívne určenie dĺžky, šírky a výšky chodby, relatívneho prevýšenia chodieb, tvorbu profilov a povrchov, výpočet objemov a export do iných dátových formátov. Laserové skenovanie pri mapovaní jaskýň má však aj svoje obmedzenia a nemožno ním úplne nahradiť tradičné metódy mapovania vychádzajúce z banskej geodézie a jaskyniarstva.

V predkladanom príspevku predstavíme terestrické laserové skenovanie ako novú metódu mapovania jaskýň, pričom sa zameriame na možnosti 3D vizualizácie a analýzy získaného mračna bodov pri geomorfologickom mapovaní jaskýň s cieľom lepšie identifikovať špecifické geomorfologické formy v jaskyni a pochopiť ich genézu.

LASEROVÉ SKENOVANIE JASKÝŇ NA SLOVENSKU A VO SVETE

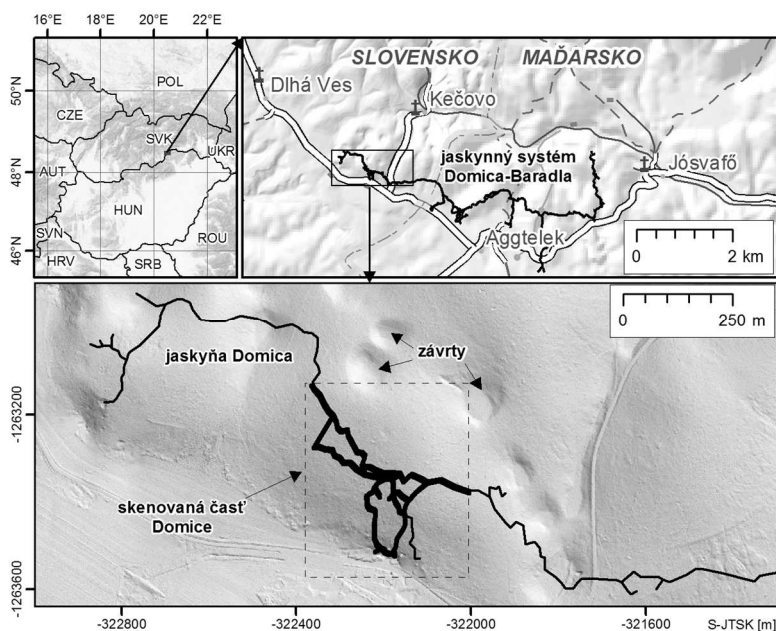
Mapovanie jaskýň pomocou pozemného laserového skenovania nadobúda čoraz väčší význam. Prehľad teoretických princípov a aplikácií laserového skenovania podrobne uvádzajú napr. Mallet a Bretar (2009), Höfle a Rutzinger (2011) a Gallay (2013). Pozemné laserové skenovanie jaskynných priestorov sa stáva čoraz dostupnejším. Vo všeobecnosti je možné konštatovať, že jeho hlavným cieľom je získanie veľmi detailnej 3D reprezentácie jaskyne. Cieľom skenovania jaskyne môže byť kartografická vizualizácia a geomorfologický výskum (Roncat et al. 2011 a Buchroithner et al. 2011), archeologický výskum (Gonzalez-Aguilera et al. 2009), zoologický výskum (Azmy et al. 2012) či mapovanie pre účely virtualizácie prírodného dedičstva (Rüther et al. 2009) alebo ako pomôcka pre rozvoj cestovného ruchu (Buchroithner a Gaisecker 2009). Pokrokom je kombinácia dát získaných laserovým skenovaním s inými metódami, ako napríklad fotografiou (Lerma et al. 2009), termálnym snímaním (Berenguer-Sempere et al. 2014) alebo s dátami o povrchu nad jaskyňou (Hoffmeister et al. 2014).

V oblasti Karpát bolo pozemným laserovým skenovaním realizovaných málo projektov, ktoré boli aj publikované. Na Slovensku prvé aplikácie tejto metódy v jaskyni prinášajú príspevky Gašinc a et al. (2012a, 2012b), opisujúce postup a výsledky skenovania v Dobšinskej ľadovej jaskyni. Využitie terestrického skenovania pre výskum štruktúrno-geologických podmienok jaskyne Dúpnica prezentuje Bella et al. (2015). Prvotné výsledky v súvislosti so skenovaním jaskyne Domica prezentovali Gallay et al. (2015b). Z blízkeho okolia Karpát možno spomenúť skenovanie chodieb Amatérskej jaskyne a Koněpruských jaskýň (Kuda et al. 2014), či

Zbrašovských aragonitových jaskýň (Valentová 2008). Viaceré z týchto pokusov sa sústreďujú najmä na jednoduchšie jaskynné priestory, zvyčajne okrúhle priestory s minimálnym množstvom stanovišť. Raritné je skenovanie dlhých a členitých jaskynných priestorov vyžadujúcich veľký počet skenov komplexnejšie mapujúcich morfológiu jaskyne. Práve príkladom skenovania jaskyne vo veľkom priestorovom rozsahu a vysokom rozlíšení je v tomto príspevku prezentované skenovanie Domice.

ZÁUJMOVÉ ÚZEMIE

Jaskyňa Domica sa nachádza na južnom Slovensku v oblasti Slovenského krasu. Ide o najväčšie krasové územie v oblasti Západných Karpát. Jaskyňa Domica je súčasťou jedného z najrozsiahlejších jaskynných systémov v Slovenskom krase, ktorý je známy ako Domica – Baradla (pomenovaný podľa jaskýň) a má cezhraničný a medzinárodný význam (obr. 1). V zozname najdlhších jaskýň sveta je systém Domica – Baradla s dĺžkou 26 065 m zaradený na 173. miesto (Gulden 2015). Jaskynná sústava Domica sa nachádza na okraji krasového územia, na hranici s nekrasovým georeliéfom. Práve územie s nekrasovým georeliéfom patrí do povodia veľkej časti vodných tokov, ktoré privádzajú vodu do jaskyne.



Obr. 1. Poloha záujmového územia jaskyne Domica

Jaskyňa Domica bola objavená až v roku 1926 a hneď bola aj zákonom chránená. Za relatívne krátky čas od jej objavenia boli niektoré jej časti postupne sprístupnené. Prvá časť jaskyne bola sprístupnená v roku 1932 a mala dĺžku cca 930 m. Proces budovania chodníkov a súvisiacej infraštruktúry potrebnej na jej sprístupnenie bol realizovaný pomerne citlivo, preto je v nej menej devastáčnych zásahov v porovnaní s inými sprístupnenými jaskyňami na Slovensku.

Mapovanie jaskyne Domica a tvorba jej mapy prebiehali hneď po jej objavení, čo bolo podmienené aj iniciatívou súvisiacou s jej sprístupnením. Otázka presnosti merania a akceptácie hodnovernosti zachytenia pôdorysu jaskyne sa však dlhodobo vyvíjala. Prvé meračské práce sa uskutočnili v rokoch 1930, 1931 a 1933 pod vedením E. Paloncyho, banského merača z Ostravy (Paloncy 1932 a 1933). Zamerané body boli stabilizované a stále možno časť týchto bodov v jaskyni identifikovať (Hochmuth 2014a, 2014b).

Na mapovanie E. Paloncyho nadväzuje pozoruhodné kartografické, ba až umelecké dielo Z. Rotha, „demonštrátora“ zamestnaného na Geologickom ústave Univerzity Karlovy v Prahe u známeho geológa prof. R. Kettnera, ktorý vyhotovil na základe podrobného merania v spolupráci s ním mapy v mierke 1:100 (Roth 1937).

O 30 rokov neskôr (1964) bola jaskyňa zameraná pracovníkmi Geografického ústavu SAV A. Droppom a A. Chovanom. Išlo o doposiaľ najkomplexnejšiu mapu jaskyne Domica, mala totiž aj pozdĺžne rezy a výškopis (Droppa 1972). V roku 1975 bol prevádzkový okruh jaskyne zmapovaný banskými meračmi n. p. Geologický prieskum v Spišskej Novej Vsi (geologická oblasť Rožňava) s cieľom vyhovieť bansko-bezpečnostnému predpisu pre sprístupnenie jaskyne (Novoveský 1975). Toto meranie sme prostredníctvom identifikácie jeho stabilizovaných bodov použili aj na vyhodnotenie chyby nášho merania. Pretože jaskynným systémom Domica – Baradla prechádza štátna hranica, v roku 1949 bolo realizované aj veľmi presné meranie dvoma nezávislými meračskými skupinami s cieľom vytýčiť priebeh slovensko-maďarskej hranice a umiestniť hraničný kameň. K novším čiastočným mapovaniam Domice patrí mapovanie Meandrovej chodby (Bella a Holúbek 2001) či zameranie časti Čertovej diery pod vedením Z. Hochmutha (Hochmuth 2014a).

METODIKA A POSTUP SKENOVANIA JASKYNE

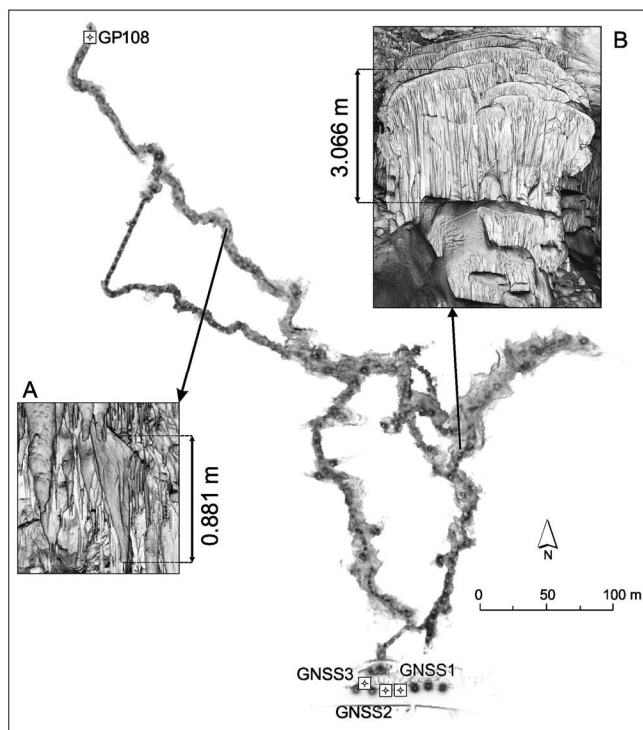
Pozemné laserové skenovanie jaskyne Domica bolo realizované v marci 2014. Detaily technického postupu a porovnanie s obdobným mapovaním jaskýň v zahraničí je uvedené v práci (Gallay et al. 2015b). Pre potreby tejto štúdie v stručnosti uvedme, že na skenovanie bol zvolený prevádzkový okruh jaskyne s niektorými nesprístupnenými časťami. Väčšina chodieb je relatívne priestranná so stropom vysoko nad dnom jaskyne, ktoré je zväčša bez blata alebo vody. Výzdoba jaskyne je bohatá, s čím sa bolo potrebné metodicky vysporiadať pre vznikajúce zákryty (tíne) počas skenovania. Najextrémnejšie miesta, kde bolo skenovanie realizované, bola úzka Posvätná chodba a bočné chodby ústiace do Dómu netopierov, ktoré sú tvorené priestormi s výškou stropu do 1 m. V Panenskej chodbe bol pre skenovanie rizikový výskyt nánosov bahna a tečúci vodný tok. Najväčšie priestory sa nachádzajú v Majkovom dome, kde rozmery vnútorných priestorov (šírka a výška) dosahujú viac ako 30 m.

Pozemné laserové skenovanie jaskyne Domica bolo realizované tak, aby 3D mračno bodov umožňovalo identifikáciu rôznych makro-, mezo- aj mikromorfologických štruktúr vrátane špecifických geomorfologických a sintrových foriem, ako sú napríklad stropné korytá, jaskynné štíty či bočné ryhy na stenách reprezentujúce výšku tečúcej vody. Pre naplnenie nášho cieľa sme zvolili skener FARO Focus 3D S120 na polykarbonátovom statíve GITZO. Táto zostava vážila spolu 5 kg a bola aj vďaka relatívne malým rozmerom ľahko prenosná. Technické parametre skenera umožňujú dosah od 0,6 – 130 m s odchýlkou merania vzdialenosti ± 2 mm. Vďaka

uvedeným parametrom skenera a príslušenstva bolo možné dosiahnuť vysokú rýchlosť zberu dát a aj vysokú dostupnosť v limitovaných priestoroch.

Skenovanie sa realizovalo na základe individuálnych skenov okolia skenera, pričom dôležitý bol správny výber pozícií skenera tak, aby skeny obsahovali čo najmenej zákrytov a zohľadnila sa nasledujúca pozícia skenera. Celková dĺžka skenovaných chodieb dosahuje cca 1 600 m a skenovanie bolo vykonané z 327 pozícií skenera vrátane vstupného areálu (obr. 2). Jednotlivé skeny sa následne spájali do výsledného mračna bodov. Registrácia jednotlivých pozícií a tvorba výsledného mračna bodov bola vykonaná pomocou plastových geometricky presných gúľ s priemerom 145 mm, ktoré sú dodávané ku skeneru jeho výrobcom. Tieto gule boli počas skenovania systematicky prekladané, pričom z dôvodu ich presnej identifikácie pri registrácii jednotlivých stanovíšť nesmeli byť vzdialené od skenera viac ako 10 metrov a zároveň sa pri každom nasledujúcom skene nezmenila pozícia minimálne troch z nich. Výhodou gúľ ako vĺčovacích bodov je, že z akéhokoľvek uhla skenovania sa ich geometrický stred javí s vysokou presnosťou na rovnakom mieste, čo zjednodušuje proces vzájomnej registrácie skenov. Vzájomná vzdialenosť skenovaných bodov podmieňujúca mieru detailnosti výsledného mračna bodov bola nastavená na 7 mm pri vzdialenosti 10 metrov od skenera. Skenovanie z jedného stanovíšťa pre takúto detailnosť trvalo približne 5 minút. V prípade jaskynných priestorov, kde dochádzalo k vetveniu chodieb, boli do skenovaného poľa doplnené plastové fotogrametrické terčíky. V týchto prípadoch bolo skenovanie nastavené na rozlíšenie 3 mm pri vzdialenosti 10 metrov od skenera, aby bola zabezpečená vyššia detailnosť. V tomto prípade zber bodov trval 15 minút a na registráciu sa použili body reprezentujúce stredy terčikov. Skenovanie trvalo 45 hodín čistého pracovného času. Vnútorňa presnosť vzájomnej registrácie jednotlivých mračien bodov (skenov) dosiahla strednú štvorcovú chybu 2,24 mm, čo je porovnateľné s klasickými časovo náročnejšími tachymetrickými metódami, s ktorými však nie je prakticky možné dosiahnuť porovnateľnú úroveň priestorového detailu ako pri laserovom skenovaní.

Celkový proces poloautomatickej registrácie jednotlivých skenovacích pozícií v prostredí softvéru FARO Scene trval približne 70 hodín čistého pracovného času. Spracovanie pozostávalo z manuálnej registrácie po sebe nasledujúcich skenov (nakladanie na gule) a v niektorých prípadoch boli použité aj dva identické skeny (registrácia typu cloud-to-cloud), resp. podľa identických bodov. Aj keď softvér umožňuje automatickú registráciu, manuálny proces zvyšuje presnosť operácie. Po vzájomnej registrácii skenov vzniklo finálne mračno bodov, ktoré ako dátový súbor obsahuje viac ako 11,9 miliárd bodov reprezentovaných súradnicami x , y , z a intenzitou odrazeného laserového žiarenia, čo predstavuje 33 GB dát vo FLS formáte (pôvodný formát vyvinutý pre zariadenia FARO). Posledná fáza pozostávala z polohového priradenia výsledného mračna bodov v národnom súradnicovom systéme S-JTSK (S-JTSK, EPSG code 5514) a výškovom systéme Balt po vyrovnaní (B.p.v). Na registráciu bodov boli použité tri referenčné body merané pomocou RTK-GNSS zostavy HIPER II od firmy TOPCON s použitím diferenciálneho merania polohy vzhľadom na sieť SKPOŠ, ktoré sa nachádzajú pred vstupnou budovou do jaskyne (GNSS1, GNSS2 a GNSS3). Jeden bod (GP108), ktorý sa nachádza na konci Panenskej chodby (obr. 2), bol použitý z merania realizovaného v roku 1975 (Novoveský 1975).



Obr. 2. Vizualizácia mračna bodov z laserového skenovania (pohľad zhora)

Značky s krížikmi označujú referenčné body, na základe ktorých bolo celé mračno bodov polohovo umiestnené do národného súradnicového systému S-JTSK. Detailný výsek A – jaskynný štít, detailný výsek B – Samsonove stĺpy.

Priemerná chyba určenia troch bodov pomocou GNSS dosiahla 10 mm. Stredná chyba merania Geologickým prieskumom, n. p., v roku 1975 (Novoveský 1975) bola pri uzavretých a obojstranne pripojených tachymetrických a nivelačných polygónových ťahoch 16 – 130 mm v rovine a 2 – 180 mm vo výške.

Geodetická transformácia finálneho mračna bodov do kartografického súradnicového systému S-JTSK na základe štyroch bodov bola vykonaná v prostredí softvéru FARO SCENE a stredná štvorcová chyba polohového priradenia dosiahla 21 mm. Pre nezávislé určenie celkovej presnosti skenovania sme porovnali 3D súradnice 18 bodov z mapovania z roku 1975 (Novoveský 1975) so súradnicami odčítanými z polohovo priradeného finálneho mračna bodov získaného laserovým skenovaním. Použili sme body, ktoré bolo možné jednoznačne identifikovať geodetickými značkami a kľincami v stenách a strope jaskyne a boli jasne identifikovateľné aj v mračne bodov z laserového skenovania. Stredná štvorcová odchýlka na týchto bodoch vo všetkých troch osiach x , y , z dosiahla 175 mm. Ak zohľadníme udávané polohové a výškové chyby polygónových ťahov v roku 1975 a taktiež schopnosť presného určenia bodu v mračne bodov zo skenovania, môžeme konštatovať, že ide o odchýlku rádovo v niekoľkých milimetroch. V dôsledku kombinácie všetkých zdrojov chýb a ich šírenia preto konštatujeme, že výsledná presnosť polohového

priradenia do súradnicového systému S-JTSK je vzhľadom na ďalšie aplikácie prijateľná. Finálne mračno bodov získané skenovaním je teda vnútorne veľmi presné (stredná štvorcová chyba RMSE je len 2,24 mm), avšak jeho celkové napojenie na národný súradnicový systém je možné ešte spresniť doplnkovým tachymetrickým a nivelačným meraním. Na niekoľkých stabilizovaných bodoch mapovania realizovaným Novoveským (1975) vo vstupnej chodbe smerom k Samsonovým stĺpom sme overovali výškovú presnosť niveláciou, pričom absolútna odchýlka sa pohybovala v intervale 0 – 7 mm.

Vnútorňa presnosť skenov vo výslednom mračne bodov a aj jeho priradenie do súradnicového systému S-JTSK umožňuje aj v budúcnosti nadviazať na toto meranie. Na tento účel sa dajú využiť stabilizované body zo starších meraní, ktoré sú identifikovateľné aj na našich skenoch. V prípade laserového skenovania je tiež možné použiť najmodernejšie postupy spájania skenov pomocou poloautomatickej registrácie identických plôch, ktoré sú pri skenovaní dobre identifikovateľné (Lichti a Skaloud 2009).

VIZUALIZÁCIA A MOŽNOSTI ANALÝZY MORFOLÓGIE JASKYNE

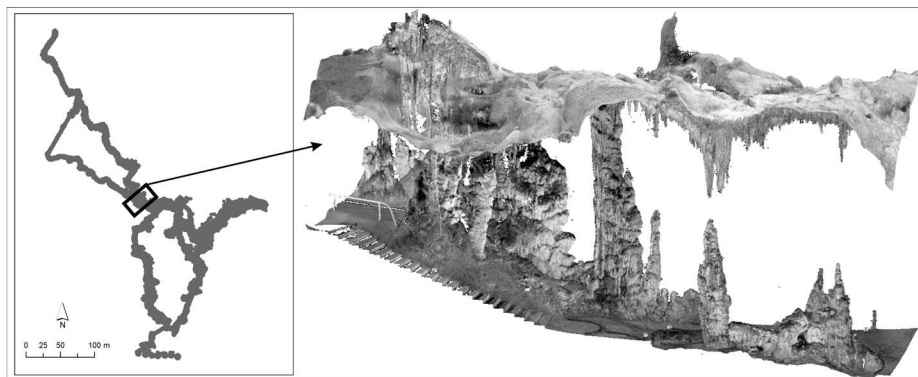
Výsledkom laserového skenovania sú miliardy 3D bodov reprezentujúcich vnútorný povrch jaskyne. Získané mračno bodov nám umožňuje nielen vytvoriť celkovú vizualizáciu tvaru jaskyne, ale pomocou tohto veľmi hustého bodového poľa aj identifikovať špecifické formy jaskynnej výzdoby a merať vzdialenosti či rozmery objektov (obr. 2). Miera detailnosti mračna bodov sa približuje fotografii, avšak v tomto prípade môžeme analyzovať nielen rozmery, ale aj mikroštruktúru povrchu stien.

Mračno bodov je možné spracovať aj do podoby spojitého 3D vektorového modelu povrchu jaskyne, ktorý už nemá obmedzenie prílišného objemu dát. Môžeme tiež vytvoriť tradičnú speleologickú mapu manuálnou alebo automatickou interpretáciou, či už samotného mračna bodov alebo 3D modelu, podobne, ako vzniká topografická mapa interpretáciou leteckých alebo satelitných snímok. Získaný dátový súbor však ponúka oveľa viac ako len tvorbu pôdorysov či bokorysov jaskyne. Podstatnou výhodou je presná geometrická reprezentácia veľkej časti jaskynného povrchu, a to aj takých úsekov, ktoré sú veľmi ťažko priamo dostupné (napr. strop).

Práca s mračnom bodov vyžaduje špecializovaný softvér a kladie vysoké nároky na výkon počítača. Bežným riešením je preto redukcia počtu bodov tak, aby bola možná interaktívna práca s mračnom bodov a bola zachovaná požadovaná miera priestorového detailu. Výrobcovia skenerov poskytujú základný softvér, ktorý umožňuje prácu s dátovým súborom, jeho vizualizáciu, redukciu počtu bodov či export do iných dátových formátov. Existujú aj špecializované softvéry, ktoré sa zameriavajú nielen na vizualizáciu a základné spracovanie, ale aj na ďalšie analýzy (napr. LAStools, Cloud Compare, Cyclone, či Bentley Pointools). V tejto štúdii bol na prácu s mračnom bodov použitý softvér Bentley Pointools. S redukovaným počtom bodov (cca len 0,03 % pôvodného súboru) bolo možné pracovať aj v softvéri ArcGIS od spoločnosti ESRI.

Vizualizácia výsledného mračna bodov nám v týchto softvéroch umožňuje vykonávať interaktívnym spôsobom základné analýzy, ako sú merania dĺžky, šírky a výšky jaskynného priestoru, jeho častí či špecifických javov (obr. 2), relatívnej

výšky chodieb a takisto tvorbu profilov (rezov; obr. 3). Pomocou hypsometrického zafarbenia mračna bodov je možné vizuálne analyzovať výšku jednotlivých foriem na oboch stranách chodby a tak analyzovať ich symetriu. Taktiež je možné identifikovať špecifickú jaskynnú výzdobu typickú pre jaskyňu Domica – jaskynný štít, ktorý visí zo stropu. Vysoká detailnosť skenovania umožňuje aj identifikovať a analyzovať formy, ktoré sú výsledkom zásahu človeka, napr. chodník, zábradlie, alebo sledovať súčasné koryto vodného toku Styx.



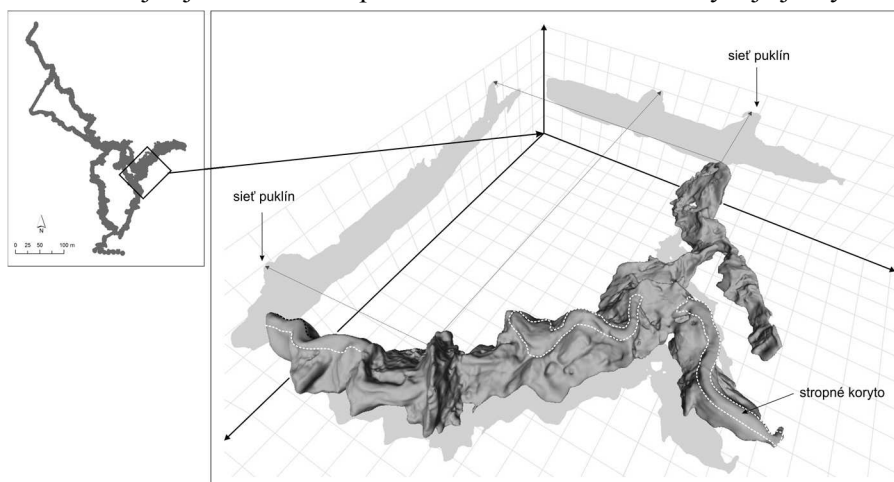
Obr. 3. Profil jaskyňou v časti Dóm indických pagod (vľavo pozícia profilu v jaskyni)

Aj keď je vizualizácia a interaktívna analýza povrchu jaskyne možná aj so samotným mračnom bodov (obr. 2 a 3), pre niektoré typy analýz je vhodnejší hladký 3D model povrchu. Pomocou softvéru Meshlab sme vytvorili 3D model jaskyne, prostredníctvom ktorého je možné realizovať volumetrické alebo morfometrické analýzy jaskyne (Gallay et al. 2015a). Podľa miery detailnosti vytvoreného 3D modelu je možné analyzovať geomorfologické formy v rôznej rozlišovacej úrovni či miere detailu. Na obr. 4 je znázornená časť jaskyne v oblasti Majkovho dómu obsahujúca aj tzv. stropné korytá, ktoré svedčia o fluviálnych procesoch a vývoji jaskyne. Stropné korytá sú pozostatkom meandrujúceho vodného toku zarezaného do horniny. Tieto stropné korytá je dosť zložitá presne mapovať iným spôsobom, pretože sú vysoko v stropnej časti chodby. Na tejto ukážke môžeme tiež identifikovať aj prejavy tektoniky na rozšírenej sieti puklín. Takéto, relatívne hustejšie siete puklín uľahčujú presakovanie vody z povrchu a urýchľujú rozpúšťanie vápenca pozdĺž puklín. V dôsledku intenzívnejšieho narúšania horniny dochádza v nich ku kolapsom jaskynného stropu a vzniku vysokých dómov.

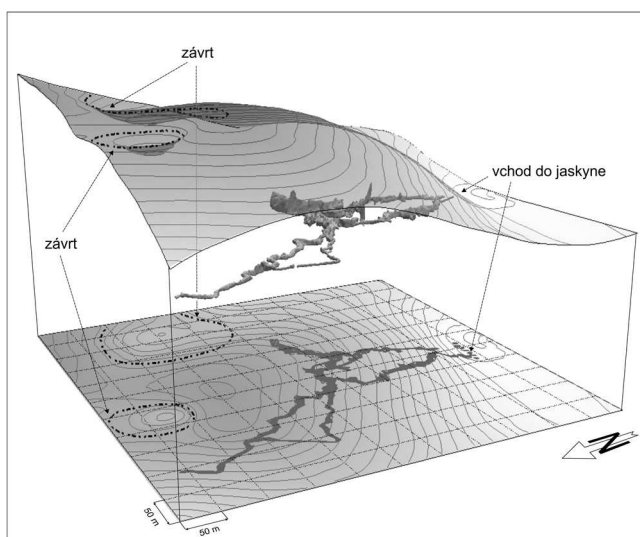
Gallay et al. (2015a) prezentovali aj možnosti sofistikovaných 3D morfometrických analýz na báze viacmierkovej analýzy strednej krivosti Poissonovho povrchu 3D modelu jaskyne. Na základe vizualizácie mračna bodov, jeho 3D modelu a morfometrických analýz je teda možné identifikovať a skúmať geomorfologické tvary, ktoré formovali procesy v rôznych etapách vývoja jaskyne.

Umiestnenie mračna bodov a 3D modelu jaskyne do súradnicového systému S-JSTK bolo základným predpokladom pre integráciu dát do geografického informačného systému (GIS). Integrácia 3D dát z laserového skenovania do databázy GIS-u umožňuje skúmať širšie súvislosti vzniku a fungovania jaskynného systému. Napríklad pomocou 3D pohľadu na mračno bodov reprezentujúcich jaskyňu a po-

vrch predstavujúci georeliéf je možné skúmať možné cesty vody prenikajúcej do podlažia a formujúcej jaskyňu. Na obr. 5 je znázornená jaskyňa a tiež georeliéf vrátane závrto, ktoré by mohli byť jedným z koncentrovaných zdrojov vody prenikajúcej do jaskyne. Podobne je pomocou GIS-u možné skúmať aj ďalšie zložky krajiny, ktoré ovplyvňujú vývoj jaskynného systému. Sofistikovanejšie využitie GIS-u umožňuje aj modelovanie procesov či tvorbu modelov vývoja jaskyne.



Obr. 4. 3D model jaskyne odvodený z mračna bodov znázorňuje oblasť Majkovho dómu. Veľkosť jedného štvorca siete je 2 m. Znáznomené sú aj bokorys a pôdorys jaskyne. Vo vrchnej časti modelu je viditeľné a prerušovanou čiarou označené stropné koryto a šípkou bokorys siete puklín.



Obr. 5. Zobrazenie mračna bodov reprezentujúceho jaskyňu Domica s digitálnym modelom reliéfu (obrázok demonštruje 3D pohľad a 2D pohľad)

ZÁVER

Laserové skenovanie patrí medzi nové, progresívne metódy mapovania, ktoré poskytujú vysokú presnosť mapovania a úroveň priestorového detailu. V kombinácii s bežne využívanými GNSS a optickými geodetickými metódami predstavuje veľmi presný nástroj na detailné mapovanie morfológie vybraných prvkov krajiny a prejavov prebiehajúcich procesov. V tomto príspevku sme demonštrovali použiteľnosť technológie pri mapovaní jaskyne a načrtli sme potenciál veľmi presného mapovania pri výskume morfológie jaskyne a jej genetických procesov.

Nepopierateľnou výhodou skenovania je vysoká presnosť mapovania a získané veľké detaily povrchu jaskyne. Miera presnosti a detailu závisí najmä od výberu skenovacích pozícií a vzdialenosti medzi nimi. Výsledné mračno bodov vytvára verný obraz jaskyne, s ktorým sa dá v prostredí špecializovaných softvérov ďalej pracovať. Významnou pomôckou pri geomorfologickej analýze dát je interaktívne meranie rozmerov útvarov, vzdialeností medzi povrchmi, možnosť realizovať morfometrické analýzy povrchov či prepojenie s inými priestorovými dátami v prostredí GIS-u. Skenovanie terestrickým laserovým skenerom jednoznačne skracuje čas a aj fyzickú náročnosť mapovania.

Za nevýhodu možno považovať rozmery a citlivosť prístroja, čo neumožňuje skenovanie nízkych alebo veľmi úzkych priestorov, nevhodné sú aj úseky s hlbšou stojacou vodou alebo značne zablatené, ktoré by mohli poškodiť citlivý prístroj. S podobným obmedzením sa však stretávame aj pri klasických tachymetrických meraniach. Skener použitý v tomto príspevku umožňuje skenovať chodby široké približne jeden meter, avšak v súčasnosti už existujú menšie prístroje, s ktorými je možné podrobne mapovať aj speleologicky náročnejšie časti jaskyne, ako sú plazivky a závaly (Zlot a Bosse 2014), alebo dokonca priestory pod vodou (Schiller a Pfeiler 2014). Pre komplexné mapovanie je dôležitý výber skenovacích pozícií, aby sa v maximálnej miere eliminovali zákryty, najmä pri členitej výzdobe jaskyne. V tom prípade je nutné skenovať daný priestor z viacerých pozícií, čo mapovanie predlžuje. Keďže vlicovacie body jednotlivých skenov nie sú stabilizované, nie je možné sa k nim dodatočne vrátiť a opätovne ich použiť. Preto je príprava postupu skenovania veľmi dôležitá.

Tento príspevok vznikol za podpory projektov APVV-0176-12 a VEGA 1/0474/16.

LITERATÚRA

- AZMY, S. N., SAH, S. A. M., SHAFIE, N. J., ARIFFIN, A., MAJID, Z., ISMAIL, M. N. A., SHAMSIR, M. S. (2012). Counting in the dark: non-intrusive laser scanning for population counting and identifying roosting bats. *Scientific Reports*, 2, 524.
- BELLA, P., HOLUBEK, P. (2001). Meandrová chodba v jaskyni Domica. *Aragonit*, 5, 3-6.
- BELLA, P., BRAUCHER, R., HOLEC, J., VESELSKÝ, M. (2014). Datovanie pochovania kremitého štrku na vrchnej vývojovej úrovni jaskyne Domica pomocou kozmogénnych nuklidov. *Slovenský kras*, 52, 15-24.
- BELLA, P., LITTTVA, J., PUKANSKÁ, K., GAŠINEC, J., BARTOŠ, K. (2015). Využitie terestrického laserového skenovania pri skúmaní štruktúrno-geologických diskontinuit a morfológie jaskýň: príklad jaskyne Dúpnica v Západných Tatrách. *Acta Geologica Slovaca*, 7, 93-102.
- BELZNER, H. (1959). Photogrammetrische Aufnahme der Höhlendecke in Altamira (Spanien). *Bildmessung und Luftbildwesen*, 59(3), 97-103.

- BERENGUER-SEMPERE, F., GÓMEZ-LENDE, M., SERANNO, E., DE SANJOSÉ-BLASCO, J. J. (2014). Orthothermographies and 3D modeling as potential tools in ice caves studies: the Peña Castil Ice Cave (Picos de Europa, Northern Spain). *International Journal of Speleology*, 43, 35-43.
- 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, [Online]. Dostupné na: <http://dx.doi.org/10.1127/1432-8364/2009/0025> [cit: 24-02-2016].
- BUCHROITHNER, M. F., MILIUS, J., PETERS, C. (2011). *3D surveying and visualization of the biggest ice cave on Earth*. In Ruas, A., ed. *Proceedings of 25th International Cartographic Conference, 3-8 July 2011, Paris*. Paris (French Committee of Cartography), p. 6.
- CANAVESE, E. P., TEDESCHI, R., FORTI, P. (2009). The caves of Naica – laser scanning in extreme underground environments. *The American Surveyor*, 6(2), 3-10.
- DROPPA, A. (1963). Paralelizácia riečnych terás a horizontálnych jaskýň. *Geologické práce*, 64, 93-96.
- DROPPA, A. (1972). Príspevok k vývoju jaskyne Domica. *Československý kras*, 22, 65-72.
- GALLAY, M. (2013). Direct acquisition of data: airborne laser scanning. 2.1.4 Airborne LiDAR. In Clark, L. E., Nield, Y., eds. *Geomorphological techniques* (Online Edition). London (British Society for Geomorphology), [Online]. Dostupné na: http://www.geomorphology.org.uk/onsite_publications [cit: 28-01-2016].
- GALLAY, M., KAŇUK, J., HOFIERKA, J., HOCHMUTH, Z., MENEELY, J. (2015a). Mapping and geomorphometric analysis of 3-D cave surfaces: a case study of the Domica Cave, Slovakia. In Jasiewicz, J., Zwoliński, Z., Mitasova, H., Hengl, T., eds. *Geomorphometry for Geosciences*. Poznań (Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Adam Mickiewicz University in Poznań – Institute of Geocology and Geoinformation), pp. 69-73.
- GALLAY, M., KAŇUK, J., HOCHMUTH, Z., MENEELY, J., HOFIERKA, J., SEDLÁK, V. (2015b). 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, 277-291.
- GALLAY, M., HOCHMUTH, Z., KAŇUK, J., HOFIERKA, J. (2016). Geomorphometric analysis of cave ceiling channels mapped with 3D terrestrial laser scanning. *Hydrology and Earth System Sciences*, (v tlači).
- GAŠINEC, J., BELLA, P., GAŠINCOVÁ, S., IMRECZEOVÁ, A. (2012a). Digitálny výškový model podlahových ľadových povrchov v Dobšinskej ľadovej jaskyni. *Slovenský kras*, 50, 31-40.
- GAŠINEC, J., GAŠINCOVÁ, S., ČERNOTA, P., STAŇKOVÁ, H. (2012b). Uses of terrestrial laser scanning in monitoring of Ground Ice within Dobšinská Ice Cave. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 30(2), 31-42.
- GONZALEZ-AGUILERA, D., MUÑOZ, A. L., LAHOZ, J. G., HERRERO, J. S., CORCHON, M. S., GARCIA, E. (2009). Recording and modeling paleolithic caves through laser scanning. In *Proceedings of International Conference on Advanced Geographic Information Systems & Web Services, Cancun, February 1-7*, pp. 19-26.
- GULDEN, B. (2015). *World's longest caves*, [Online]. Dostupné na: <http://www.caverbob.com/wlong.htm> [cit.:24-02-2015].
- 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 Annals of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5, 173-179.
- HOCHMUTH, Z. (1995). *Mapovanie jaskýň*. Liptovský Mikuláš (Slovenská speleologická spoločnosť).

- HOCHMUTH, Z. (2014a). Mapovanie prepojenia Čertovej diery a Domice. *Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti*, 45(3), 18-23.
- HOCHMUTH, Z. (2014b). História mapovania a vytvorenie spojitého meračského ťahu ako podkladu pre reambulovanie mapy Domice. *Slovenský kras*, 52, 173-190.
- HÖFLE, B., RUTZINGER, M. (2011). Topographic airborne LiDAR in geomorphology: a technological perspective. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 55(2), 1-29.
- KUDA, F., KAJZAR, V., DIVÍŠEK, J., KÜKUTSCH, R. (2014). *Aplikace pozemního laserového skenování v geovědních disciplínách*. Praha (Ústav geoniky Akademie věd České republiky, v.v.i.).
- LERMA, J. L., NAVARRO, S., CABRELLES, M., VILLAVERDE, V. (2009). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37, 499-507.
- LICHTI, D., SKALoud, J. (2009). Registration and calibration. In Vosselman, G., Maas, H.-G., eds. *Airborne and terrestrial laser scanning*. Dunbeath (Whittles Publishing), pp. 83-129.
- LLANOS VIÑA, A., GARCÍA-LÁZARO, F. J. (1983). Photogrammetric surveying of the cave pictographs of Altamira. *Jenaer Rundschau*, 4, 193-197 a 206.
- MALLET, C., BRETAR, F. (2009). Full-wave form topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 1-16.
- NOVOVESKÝ (1975). *Technická správa, Domica 111-I-13*. Geologický prieskum, n. p., Geologická služba podniku, geologická oblasť Rožňava. Liptovský Mikuláš (Slovenské múzeum ochrany prírody a jaskyniarstva).
- PALONCY, E. (1932). Jak sme měřili v Domici. *Krásy Slovenska*, 11(2-3), 48-53.
- PALONCY, E. (1933). Měření jeskyně Domice. *Krásy Slovenska*, 12(2-3), 65-68.
- RONCAT, A., DUBLYANSKÝ, Y., SPOTL, C., DORNINGER, P. (2011). Full-3D surveying of caves: a case study of Märchenhöhle (Austria). In *Proceedings of the International Association for Mathematical Geosciences, September 5-9, Salzburg*. Salzburg (University of Salzburg), pp. 1-11.
- ROTH, Z. (1937). *Vývoj jeskyně Domice*. Bratislava (Učená spoločnosť Šafaříkova).
- RÜTHER, H., CHAZAN, M., SCHROEDER, R., NEESER, R., HELD, C., WALKER, S. J., MATMON, A., KOLSKA HORWITZ, L. (2009). Laser scanning for conservation and research of African cultural heritage sites: the case study of Wonderwerk Cave, South Africa. *Journal of Archaeological Science*, 36, 1847-1856.
- SCHILLER, A., PFEILER, S. (2014). A laser technique for capturing cross sections in dry and underwater caves. In Andreo, B., Carrasco, F., Durán, J. J., Jiménez, P., LaMoreaux, J., eds. *Hydrogeological and environmental investigations in karst systems*. Heidelberg (Springer), pp. 551-558.
- VALENTOVA, K. (2008). Aplikace digitálních technologií ve Zbrašovských aragonitových jeskyních. *Speleofórum*, 27, 148-150.
- ZLOT, R., BOSSE, M. (2014). Three-dimensional mobile mapping of caves. *Journal of Cave and Karst Studies*, 76, 191-206.

*Jaroslav Hofierka, Zdenko Hochmuth, Ján Kaňuk,
Michal Gallay, Alena Gessert*

MAPPING THE DOMICA CAVE USING TERRESTRIAL LASER SCANNING

Caves are specific underground forms that result from various and usually complex processes. The rock substratum and climatic conditions play a key role in the process of forming the cave. Typically, the formation of a cave is induced along a tectonic predisposition which is further enlarged by fluvial, gravitational, geochemical, or biogenic processes. In

the West Carpathians, the majority of the caves evolved in limestone rocks. There are various methods for cave mapping such as traditional geodetic measurements using theodolites, mining suspension compasses with clinometer or total stations. However, these methods are unable to capture important details of the cave interiors, such as stalagmites or smaller geomorphic forms. Recent developments in laser scanning technology provide new methods and tools for high-accuracy mapping of caves. A growing number of terrestrial laser scanning applications are used in the mapping of caves. The theoretical background of this technology can be found in Mallet and Bretar (2009), Höfle and Rutzinger (2011), or Galloway (2013).

This paper presents the methodology for the use of terrestrial laser scanning technology for cave mapping and evaluates its applicability to cave morphology analysis at various levels of detail. The methodology is applied to the Domica cave, Slovakia. The Domica cave is a part of the Domica-Baradla system which is a listed UNESCO World Heritage site within the Caves of Aggtelek and the Slovak Karst caves. The cave is protected by national legislation and NATURA 2000 norms. In a 5 day mission we scanned 1.5 km of the corridors that present mainly accessible parts of the cave but we also tested the accuracy in small narrow parts that are not accessible to the public. Using the scanner Faro Focus 3D Scanner we scanned this length from 327 positions with the internal accuracy of point cloud registration of 2.24 mm RMSE (root mean square error) within 40 hours in total. The scanning point density was set at 20 millimetres at 10-metre distance. The final point cloud contained 11.9 billion of points. The geodetic transformation of the final point cloud to the S-JTSK coordinate system using 4 reference points was done in the FARO SCENE software and the RMSE of this transformation was 21 mm.

The resulting point cloud makes it possible to create 3D cave models and various visualisations. These can be used for basic spatial analysis, interactive measurements and identification of specific cave forms. The georeferenced point cloud also enables the integration of 3-D laser scanning data into a GIS database and explores spatial relations and interactions between the landscape components and cave systems. For example, possible ways for infiltrating precipitation water flow into the cave system from surface karst forms such as sinkholes can be explored. Fig. 5 shows the cave along with georelief represented by a digital elevation model that includes two sinkholes that could be a source of the water flowing into the cave. Similarly, we can explore other landscape components that affect the development of the cave system using GIS.