

INTEGRÁCIA DÁT Z POZEMNÉHO LASEROVÉHO SKENOVANIA PRI MAPOVANÍ JASKÝŇJozef ŠUPINSKÝ¹, Zdenko HOCHMUTH¹, Ján KAŇUK¹¹ Ústav geografie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach,

Jesenná 5, 040 01, Košice, Slovenská republika

*jozef.supinsky@upjs.sk, zdenko.hochmuth@upjs.sk, jan.kanuk@upjs.sk***Abstrakt**

Pozemné laserové skenovanie (TLS) ako nástroj pre získanie informácie o trojrozmernej geometrii objektov vo vysokom priestorovom rozlíšení je metóda využívaná čoraz častejšie aj v speleológii. Väčšina prác venujúcich sa TLS mapovaniu jaskýň je orientovaná na mapovanie špecifických mikroforiem a vybraných objektov v malom rozsahu, pretože skenovanie veľkých jaskynných systémov pomocou TLS je spojené s celým radom problémov. V porovnaní s TLS mapovaním na povrchu narážame na väčšie limity pri zbere a spracovaní takýchto dát ako: vytváranie množstva zákrytov zložitou morfológiou a výzdobou jaskyne, plasticita podložia v prípade výskytu blata, veľkosť chodieb a kumulovanie chyby registrácie pri dlhých systémoch s jedným vchodom. Náš príspevok sa venuje integrácii dvoch datasetov z dvoch rôznych meraní, pri ktorých boli použité dva rôzne typy pozemných laserových skenerov. Prvé merania boli realizované v jaskyni Domica v roku 2014, kde sa využíval pozemný laserový skener FARO Focus 3D. V prvej fáze bolo zameraných približne 1500 m chodieb. Na toto skenovanie nadväzovali ďalšie merania realizované v roku 2017 pozemným laserovým skenerom Riegl VZ-1000. Rozdiely medzi meraniami boli aj v podklade. Pri prvej fáze to bol prevažne pevný kamenný, resp. betónový podklad (sprístupnená časť jaskyne), v druhej etape bolo podkladom najmä zvodnený hlinitý sediment (blato) alebo tečúca, resp. stojatá voda. Cieľom mapovania bolo v oboch prípadoch tvorba komplexného modelu jaskyne pre hydrologické a morfo-genetické analýzy. Po integrácii dát je potrebné pracovať s viac ako 500 skenovacími pozíciami, ktoré zachytávajú sprístupnené časti jaskyne a hlavnú chodbu Styxu vedúcu až k podzemnej hranici s Maďarskom. Takéto množstvo dát je z hľadiska geoinformatiky veľmi zaujímavé, pretože pri spracovaní a tvorbe modelov jaskyne bolo potrebné riešiť viacero výziev, napr. integráciu dát, problémy súvisiace s registráciou do S-JTSK na základe viacerých metód, tvorbu modelov a spracovania 3D modelu jaskyne pre hydrologické modelovania.

Abstract

Terrestrial laser scanning (TLS) as a tool for obtaining three-dimensional geometry information of objects in high spatial resolution is a method more often used in speleology. Most work of TLS caves mapping is focused on mapping specific micro-forms and selected objects in small extent, since scanning large cave systems using TLS is associated with a number of problems. Compared with TLS mapping on the surface, we encounter larger limits in collecting and processing such data as creating more shadows due to complex morphology and cave decorations, plasticity subsoil in case of mud, corridor size and registration coarse error accumulation in long single-entry systems. Our contribution concerns the integration of two datasets from two different measurements using two different types of terrestrial laser scanners. The first measurements were made in Domica cave in 2014, where was used terrestrial laser scanner FARO Focus 3D. In the first phase, were measured approximately 1500 m of corridors. This was followed by further measurements made in 2017 by terrestrial laser scanner Riegl VZ-1000. The differences between the measurements were also in the surface composition. In the first phase it was predominantly solid stone, respectively concrete substrate (accessible part of the cave) and in the second phase it was mainly mud or running water. The mapping objective was in both cases the creation of a complex cave model for hydrological and morphogenetic analyzes. After data integration, it is necessary to work with more than 500 scanning positions that capture the accessible parts of the cave and the main corridor of the Styx leading to the underground border with Hungary. Such a lot of data is very interesting from a geoinformatic view, because there were several clues to be solved in the process of cave modeling as data integration, problems with S-JTSK registration, modeling and processing of cave 3D model for hydrological modeling.

Klíčová slova: jaskyňa speleológia LiDAR TLS MSA**Keywords: cave speleology LiDAR TLS MSA**

1. ÚVOD

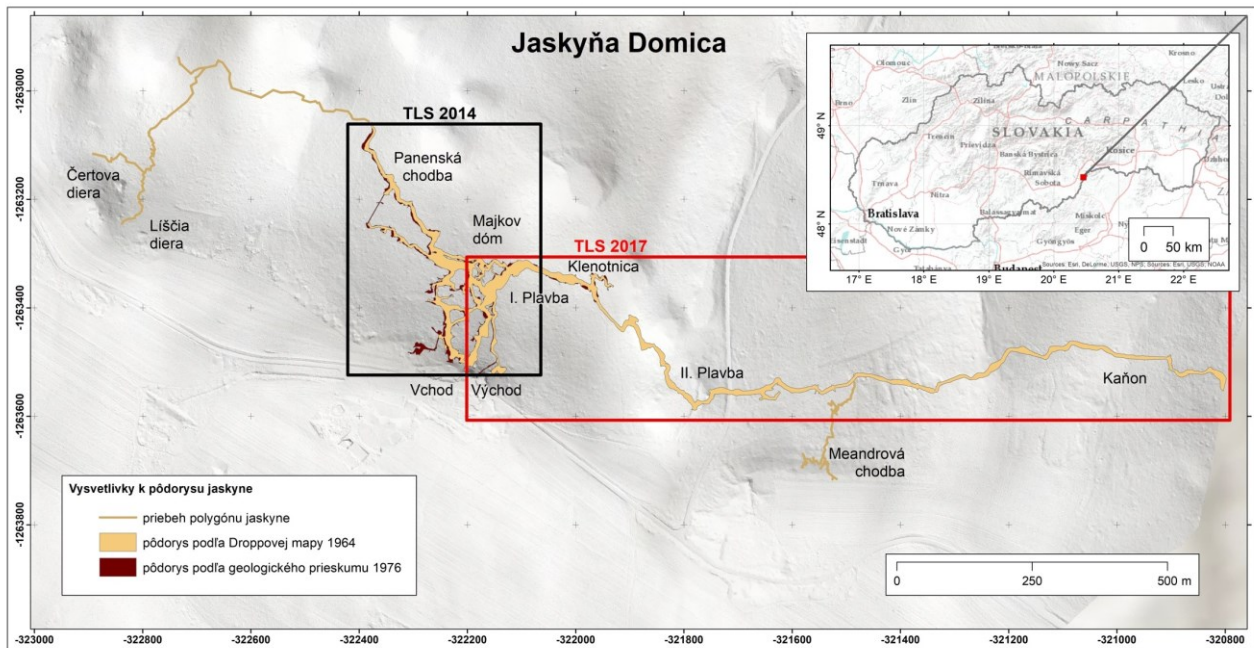
V jaskyni Domica sme vykonávali meračské práce, s rozsiahlym využitím pozemného laserového skenovania odľahlejších častí jaskyne, ktoré neboli zmapované pri predchádzajúcich prácach v roku 2014 (Gallay et al. 2015). Naším cieľom bolo zachytiť čo najpresnejšiu geometriu jaskynných priestorov pre ďalšie hydrologické, klimatické a morfológické analýzy. Ohľad sme brali na prekonanie ťažkých úsekov s čo najmenším počtom skenovacích pozícií, pričom sme riešili problémy s integráciou nehomogénnych lidarových datasetov, ako aj problémy s napojením dát do národného geodetického systému S-JTSK.

Hlavným motívom pre použitie tejto metódy je získanie interaktívneho vysoko presného obrazu o zložitej morfológii, ktorú bolo predtým náročné zachytiť klasickými meračskými metódami (Hochmuth 1995). Klasické metódy sa zameriavajú najmä na vyhotovenie pôdorysov, bokorysov a vybraných profilov jaskynnými priestormi. Len málo klasických prác sa z dôvodu zdĺhavého zberu dát venuje axonometrickému zobrazeniu jaskyne pomocou vertikálnych a horizontálnych vrstevníc, ktoré podáva najkomplexnejší pohľad na jaskynné priestory a dalo by sa považovať za predchodcu dnešných lidarových vizualizácií jaskýň (Bosák 1977, Hochmuth 1997). Paleta uplatnenia zaznamenaných lidarových dát z jaskýň (Gallay et al. 2015, Idres a Pradhan 2016) je rôznorodá od vedeckého využitia v geológii (Hoffmeister et al. 2014), geomorfológii (Fabri et al. 2017), glaciológii (Gašinec et al. 2012, Kamintzis et al. 2017), archeológii (Gonzales et al. 2009), zoológii (Azmy et al. 2012) až po vizualizácie zamerané na zvýšenie povedomia a návštevnosti jaskyne (Buchroithner et al. 2011, Buchroithner et al. 2012). Vďaka viacerým spomínaným prácam, no najmä tým v extrémnych podmienkach (Buchroithner a Gaisecker 2009) a s príchodom mobilného prístupu (Bosse et al. 2012, Zlot a Bosse 2014, Kaul et al. 2015) sa ukazuje, že TLS je dnes s ohľadom na presnosť a rýchlosť zberu dát najlepšou metódou pre mapovanie jaskýň.

Od prvého použitia TLS v jaskynných priestoroch (Teichmann 1999) ubehla dlhá doba a preto je premapovanie jaskýň touto metódou niekedy spojené s obmenou zariadení, ku ktorej došlo z rôznych dôvodov. Po mapovaní a vnútornej registrácii dát je potom potrebná integrácia dát so staršími mapovaniami, ktoré sú nehomogénne (rozdielna vlnová dĺžka zberu dát, hustota, presnosť, formát, a i.). Okrem rozdielnosti dát prichádza do pozornosti aj objem dát, ktorý pri dlhých systémoch neúnosne rastie a preto je nutné zvoliť postačujúcu mieru detailu ako aj vhodnú metódu filtrovania šumu (Hofierka et al. 2017). Jednotlivé spoločnosti majú svoju špecifickú filozofiu pre zber a spracovanie dát a zväčša pracujú v interných formátoch, preto prvotné spracovanie surových dát prebieha v softvéri navrhnutom pre použitý skener. Spracovanie dát je možné aj v OS softvéroch (Cosso et al. 2014), ktoré ponúkajú podobné nástroje, avšak ich spoľahlivosť a miera presnosti sú pri registrácii dát nižšie ako v softvéroch od výrobcov skenerov, preto v nich prebieha zväčša len následný postprocessing vo forme modelovaní a analýz.

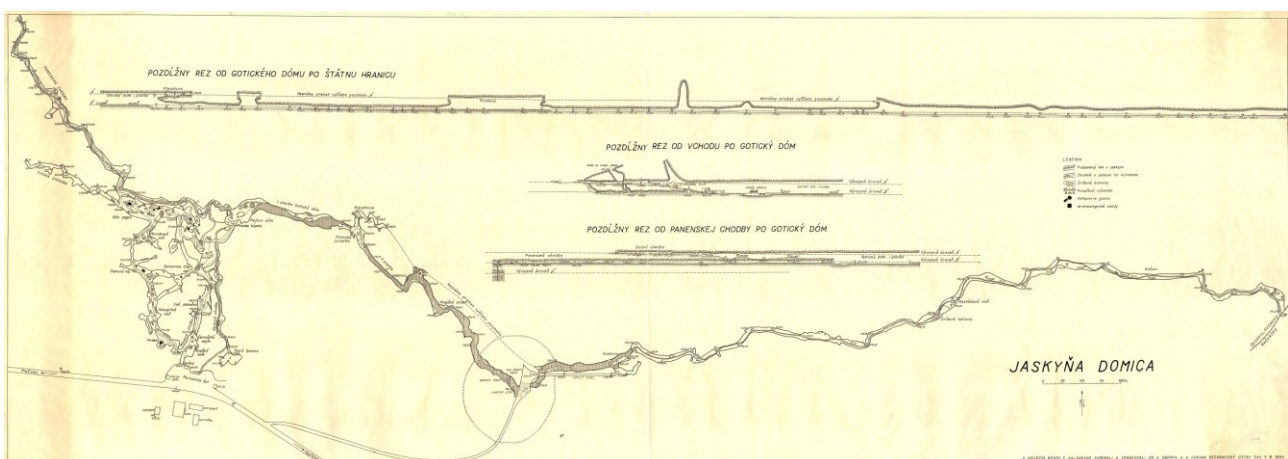
2. ZÁUJMOVÉ ÚZEMIE

Jaskyňa Domica (Obr.1) sa nachádza v katastri obce Kečovo v blízkosti hranice s Maďarskou republikou. Podzemné priestory jaskynného systému sú hranicou rozdelené na slovenskú časť Domica a maďarskú Baradlu. Domica bola objavená v roku 1926 J. Majkom prechodom zo Starej Domice, pričom spojenie s Čertovou dierou dosiahol v roku 1929 (Droppa 1961). Celková dĺžka systému Domica-Baradla je podľa caverbob.com 26 065 m, pričom Slovenská časť systému dosahuje dĺžku 6 603 m (Spravodaj SSS 1/2017). Ide o 2. najdlhšiu jaskyňu v Slovenskom krase s výnimočnou sintrovou výzdobou špecifickou najmä kaskádovými jazierkami, cibulkovými stalaktitmi, sintrovými bubnami, štípmi a stegamitmi. Systém je unikátny aj svojou faunou a flórou, pričom je zapísaný v zoznamoch svetového dedičstva UNESCO a Ramsarských lokalít. Podrobne sa celému jaskynnému systému venuje práca Jaskynný systém Domica-Baradla. Jaskyňa, ktorá nás spája (Gaál a Gruber 2014).



Obr. 1: Zobrazenie jaskyne na tieňovanom reliéfe z ALS s vymedzením skenovaných oblastí metódou TLS.

Jaskyňa bola z dôvodu viacerých zásahov viacnásobne premapovaná a každá z prác má svoje špecifikum. Prvé komplexné mapovanie jaskyne po jej objavení prebiehalo pod vedením Ostravského merača E. Paloncyho (1932). Najdetailnejšiu mapu vybraných častí jaskyne v mierke 1:100 vyhotovil pri svojej činnosti geológ Z. Roth (1937). Na tieto práce nadväzuje povojnové colnícke mapovanie z roku 1949 vyhotovené z dôvodu vytýčenia hranice s Maďarskou republikou podzemnými priestormi, z ktorého sa zachovala jedna z najlepších stabilizácií a signalizácií, avšak z tejto práce nebola vyhotovená žiadna mapa. Asi najhodnotnejšia je mapa vytvorená Droppom a Chovanom z roku 1964 (Obr.2), ktorá dopĺňa pôdorys jaskyne o bokorys priestorov a značenie vývojových úrovní jaskyne (Droppa 1972). Ďalšie mapovanie, ktoré realizovali banskí merači z Rožňavy bolo nutné vykonať kvôli prerazeniu umelého tunelu zo Suchej do Panenskej chodby v sprístupnených častiach jaskyne (Novoveský 1975). V poslednom období prebehlo premapovanie jaskyne s využitím časti známych bodov z predchádzajúcich mapovaní pod vedením Z. Hochmutha, ktorý vyhotovil spojitý meračský ťah celých jaskynných priestorov (Hochmuth 2014).



Obr. 2: Mapa jaskyne Domica vyhotovená klasickou metódou (Droppa 1972).

Význam nášho mapovania je dôležitý pre detailné pochopenie hydrologickej charakteristiky systému, pretože výstupom doktorandskej práce má byť v budúcnosti systematické modelovanie vodných tokov v jaskyni. Predchádzajúce mapovanie metódou TLS bolo ukončené v smere na Čertovu Dieru pri bývalej hrádzi Styxu a smerom k Maďarsku končilo mapovanie na začiatku I. plavby. Jaskyňou pretekajú dva podzemné toky. Domický potok sa do jaskyne dostáva dnes už neprirodzene cez štôľňu, ktorá ústi v objavnej chodbe pod

Starou Domicou a neskôr sa vlieva do Styxu v priestoroch Majkovho Dómu. Styx, ktorý je hlavným vodným tokom v jaskyni sa dostáva do jaskyne cez Hlavný ponor pod Čertovou dierou a ďalej priberá prítoky z ponoru pod Líščou dierou, ponorov v Hančinej od Nebezpečného dómu a ďalších menších stružiek až po Majkov dóm, kde sa doň vlieva Domický potok. Ďalší významnejší prítok Styxu je až za druhou plavbou v ústí Meandrovej chodby, kde priberá vody z Demikovho ponoru. Počas terénnych prác sme sa teda sústredili najmä na zmapovanie I. a II. plavby za Majkovým dómom, Klenotnice, II. východu a zvyšku hlavnej chodby Styxu smerujúcej k hranici s Maďarskom. Práce na oboch plavbách boli z časti závislé aj od množstva vody v systéme, pretože pri vysokom stave a naplnení plavieb by bolo skenovanie nerealizovateľné. Jaskyňu postihlo v minulosti viacero záplav, ktoré mali niekedy aj fatálne následky na infraštruktúru a výzdobu jaskyne, pričom v Majkovom dóme pri sútoku Styxu a Domického potoka dochádza skoro každoročne k povodniam, spôsobeným buď dlhotrvajúcou zrážkovou činnosťou, alebo masívnym topením snehu.

3. ZBER A SPRACOVANIE DÁT

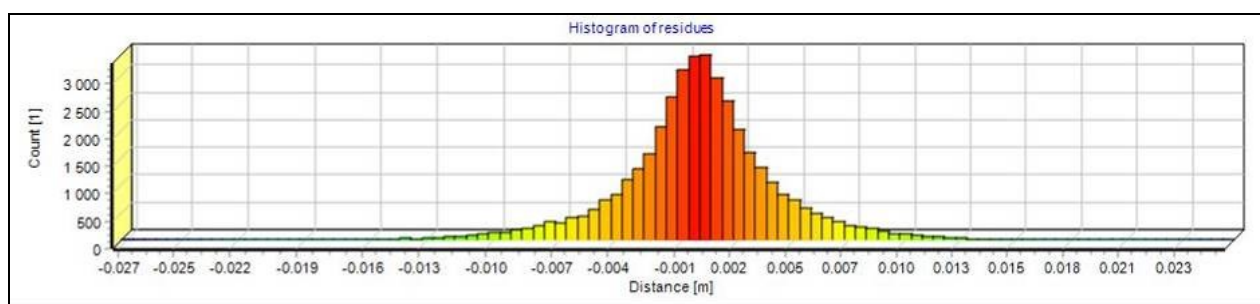
Pri mapovaní sme pracovali so skenerom RIEGL VZ-1000, ktorý je navrhnutý primárne pre exteriérové použitie, avšak jeho vlastnosti ho nelimitujú ani na mapovanie v jaskynných priestoroch. Ide o full waveform (pracuje s viacerými odrazmi laserového lúču) pulzný skener vysielajúci blízke infračervené vlnenie (1 550 nm), ktorý sa vyznačuje vysokou presnosťou zberu dát ± 3 mm s maximálnym dosahom skenovania až 1 400 m. Výrobca uvádza minimálnu vzdialenosť skenera od skenovaného objektu vo vzdialenosti 1,5 m, čo bolo vo väčšine prípadov zaistené, a preto bližšie objekty neboli zaznamenané v bodovom poli. Skener má trochu väčšie rozmery 0,3 m x 0,2 m x 0,2 m a s batériami váži približne 10 kg. Najväčšou nevýhodou skenera je obmedzenie skenovania v zenitovom smere na 100° , čím nedokážeme zachytiť časť dna a stropu v blízkosti skeneru a tak vzniká slepé miesto v dátach ktoré je nutné eliminovať častejším staničením. V extrémnych prípadoch úzkych komínov sme preto zariadenie vertikálne otočili a skenovali len oblasť stropu.

Zber dát prebiehal v niekoľkých etapách, pričom sme si stanovili za cieľ nepoužívať žiadne prídavné zariadenia, ktoré by vytvárali nadbytočné tienenie (fotogrametrické terče, registračné objekty) a predlžovali prácu v teréne. Najprv bolo nutné prekonať úseky oboch plavieb, ktoré mali v dobe skenovania nízky vodný stav. Aj napriek prázdny plavbám vznikala problém s elasticitou podlažia, kde hrozil pohyb zariadenia počas skenovania, čomu sa nám podarilo vyhnúť vďaka platforme (Obr.3), ktorú sme v prípade potreby v polozaplavených úsekoch využívali aj ako plavák pre transport skenera na stavíe bez nutnosti vypínania a demontáže zariadenia. Po prekonaní druhej plavby sme skenovanie vyniesli na povrch cez druhý východ, kde prebehlo GNSS meranie. V ďalších etapách sme postupovali až k maďarskej hranici, pričom problematické úseky boli hlavne v oblasti Kaskádovej siene a v závere pri prechode "hraničnej" mreže.



Obr. 3. Príklady mapovania v náročných podmienkach nestabilného povrchu v suchých úsekoch a v zaliatých lokálnych depresiách s použitím trojuholníkovej platformy pre zvýšenie stability zariadenia.

Zaznamenali sme celkovo 232 pozícií, s priemernou dĺžkou skenovania pozície 80 s, vertikálnym a horizontálnym záznamom bodov každých $0,06^\circ$ a v závislosti od veľkosti priestorov bolo zaznamenaných približne 9 miliónov bodov na pozíciu. Jednotlivé pozície sme spracovali v softvéri RiSCAN PRO, pričom nepoužiteľná bola len jedna, u ktorej pravdepodobne došlo vplyvom plastického piesčitého podlažia k poklesu skeneru počas skenovania (nepoužili sme platformu). Problém sme si všimli až počas registrácie dát, kedy sa ukázalo, že minimálne poklesnutie resp. posunutie na plastickom podlaží v priebehu merania skenera zvýšilo chybu registrácie z niekoľkých milimetrov na centimetrovú úroveň a nebolo možné akékoľvek registrovanie pozície, pretože bola značne zdeformovaná. Samotná vnútorná registrácia dát prebiehala najprv manuálne vyhľadávaním 4 identických bodov na susedných pozíciách a v druhom kroku prebehla registrácia cez MSA (Multi Station Adjustment), kde bola potrebná tvorba polydát cez plane patch filter, ktoré reprezentujú bodové pole centroidov plôšok vyhľadávaných na základe stanovených kritérií. Následne prebehlo automatické párovanie identických polydát na prekrývajúcich sa pozíciách v stanovenom polomere, čím sme získali väčšie množstvo registračných bodov a zabezpečili tak spresnenie manuálnej registrácie skenovacích pozícií (Ullrich et al. 2003). Pri manuálnej registrácii sa smerodajná odchýlka pohybovala na úrovni 15 až 8 mm a po následnom použití MSA bola výsledná smerodajná odchýlka vnútornej registrácie dát 3,6 mm (Obr.4).



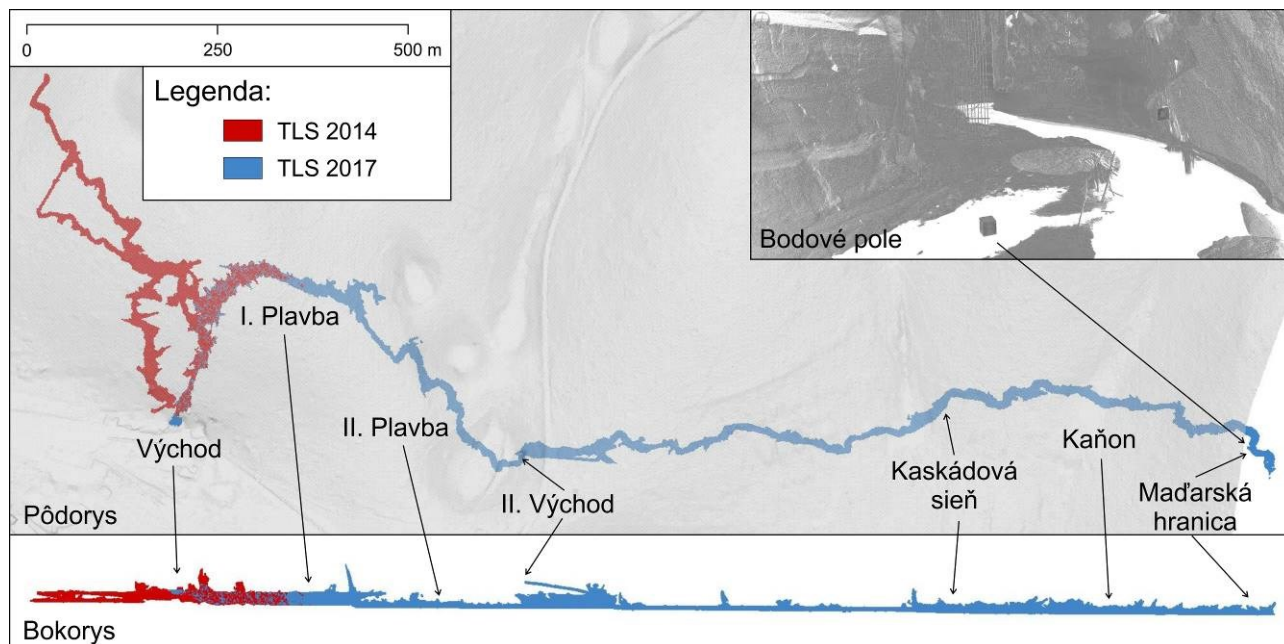
Obr. 4: Histogram rozloženia chyby pri vnútornej registrácii dát.

Predchádzajúce skenovanie z roku 2014 prebiehalo v spolupráci s J. Meenelym z Queen's University of Belfast, ktorý pracoval so zariadením FARO Focus 3D S 120. Spolu so statívom zostava vážila 5 kg a bola aj vďaka relatívne malým rozmerom ľahko prenosná. Technické parametre skenera umožňovali dosah od 0,6 – 130 m s odchýlkou merania vzdialenosti ± 2 mm (Hofierka et al. 2016). Autori zaznamenali 327 skenovacích pozícií, pričom mapovanie bolo zamerané na sprístupnené časti jaskyne v nenáročných podmienkach betónových chodníkov a len v niekoľkých prípadoch prepojení bolo nutné zísť na iný povrch.

Integrácia dát z oboch skenovaní prebehla v prostredí RiSCAN PRO, kde bolo importované celé mračno bodov z predchádzajúceho mapovania ako samostatná pozícia. Pri exporte dát z pôvodného projektu bola z dôvodu vysokej hustoty zberu dát a častého staničenia pri predchádzajúcom mapovaní zvolená filtrácia identických bodov do 1 mm, čím sme znížili počet bodov zo skoro 12 na 2,5 miliardy. Najprv sme sa snažili o registrovanie dát na naše mapovanie, no práca s celým bodovým poľom bola náročnejšia aj v dôsledku rekonštrukcie chodníkov a zábradlí, kde miestami pribudla aj 5 cm vrstva nového betónu, čím sa rapídne znížil počet dát pre registráciu a výsledná chyba registrácie sa pohybovala až na úrovni 6 cm, čo bolo pre nás nepostačujúce. Rozhodli sme sa preto pre dodatočné premapovanie priestorov z Majkovho domu po východ z jaskyne, čím sme zabezpečili väčší prekryt dát v S-J smere. Následne prebehol dvojkrokový proces registrácie, kedy sme najprv pomocou manuálnej registrácie pripojili predchádzajúce mapovanie, ktoré sme v procese automatickej registrácie zafixovali ako statické a cez MSA pripojili naše pozície, pričom výsledná smerodajná odchýlka je na úrovni 4 mm.

Registrácia spracovaných dát do systému S-JTSK vzhľadom na začnú dĺžku nevyrovnaného úseku a iné faktory súvisiace s nezvyklým prostredím (vlhkosť, výskyt aerosólu) bola taktiež problematická, preto sme použili viacero postupov. Najprv sme sa pokúsili použiť len dáta z merania pomocou GNSS systému Topcon Hiper II v oblasti prvého a druhého východu s presnosťou merania v danej oblasti ± 2 cm. Chyba vonkajšej registrácie sa pohybovala na úrovni 24 cm, čo vytváralo pochybnosti o presnosti vnútornej registrácie dát. Overiť presnosť mapovania sme sa rozhodli na základe vyhľadávania bodov zo staršieho mapovania, kedy sme identifikovali body colníckeho mapovania, ktoré zachytilo jaskyňu až po Maďarskú hranicu. Z tohto

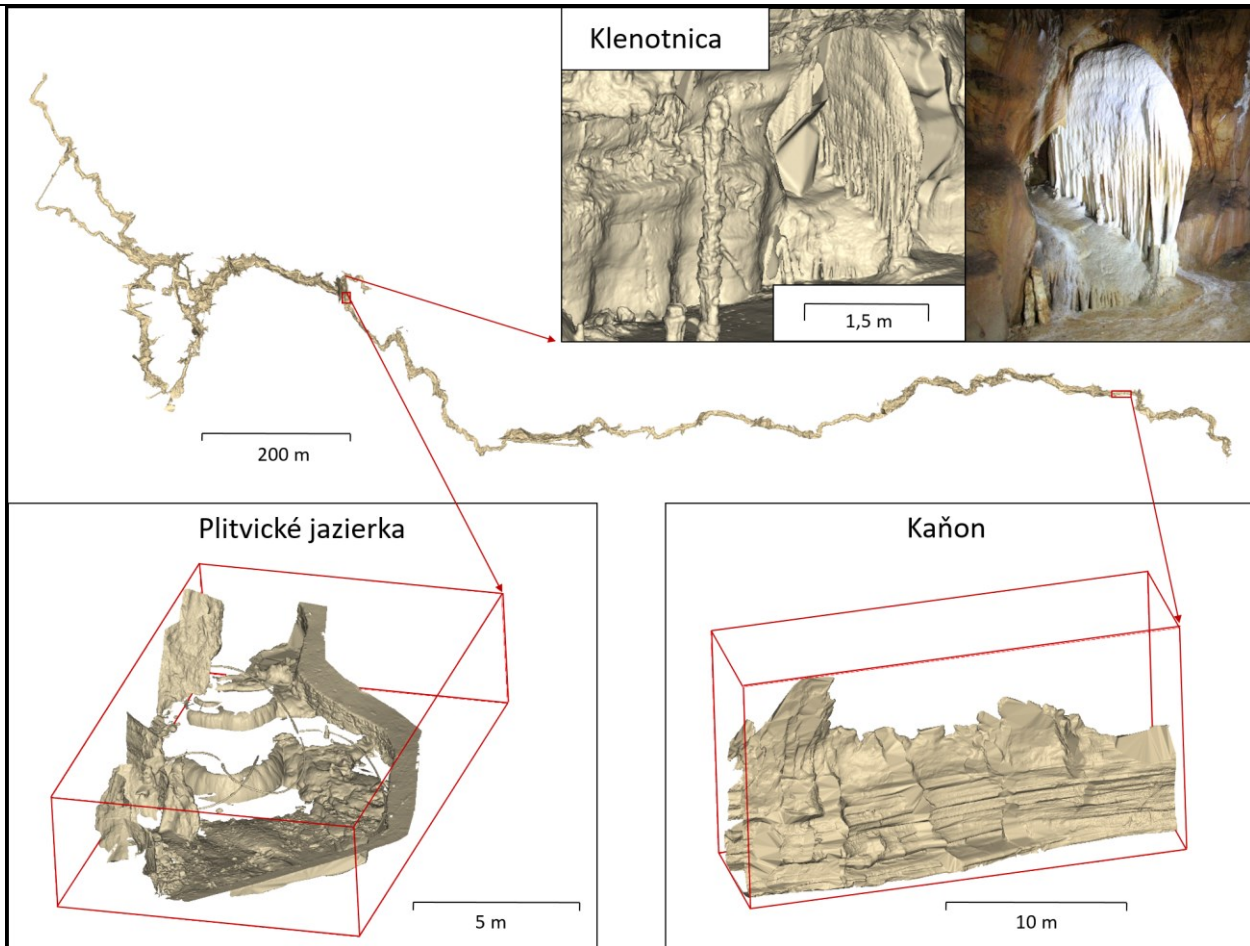
overenia sa ukázalo, že časti jaskyne mapované v roku 2014 sú posunuté smerom na SZ a aj tento fakt bol dôvodom na spomínané doplnkové mapovanie. Na základe tohto mapovania a spresnením vnútornej registrácie klesla chyba vonkajšej registrácie na výsledných 8 cm. Z bokorysu (Obr.5) skenovaného územia si môžeme všimnúť pridanú hodnotu skenovania v porovnaní s Dropovou mapou, na ktorej chýbajú niektoré komíny a strop po Maďarsko sa javí ako zarovnaný, pričom v našich dátach sú zachytené viaceré komíny a poruchy. Druhý prístup k registrácii do S-JTSK bol založený na overení presnosti predchádzajúcej registrácie bez využitia GNSS merania len pomocou naloženia TLS dát na ALS dáta cez MSA, kedy sme dosiahli podobnú chybu registrácie na úrovni 8,5 cm. Je však nutné poznamenať, že výsledná odchýlka je vypočítaná len z 232 polydát, pričom maximálna chyba bola na úrovni ± 21 cm.



Obr. 5: Bodové pole integrovaných dát z TLS a ALS (hillshade) na základe GNSS merania s detailom na TLS dáta v priestoroch hranice.

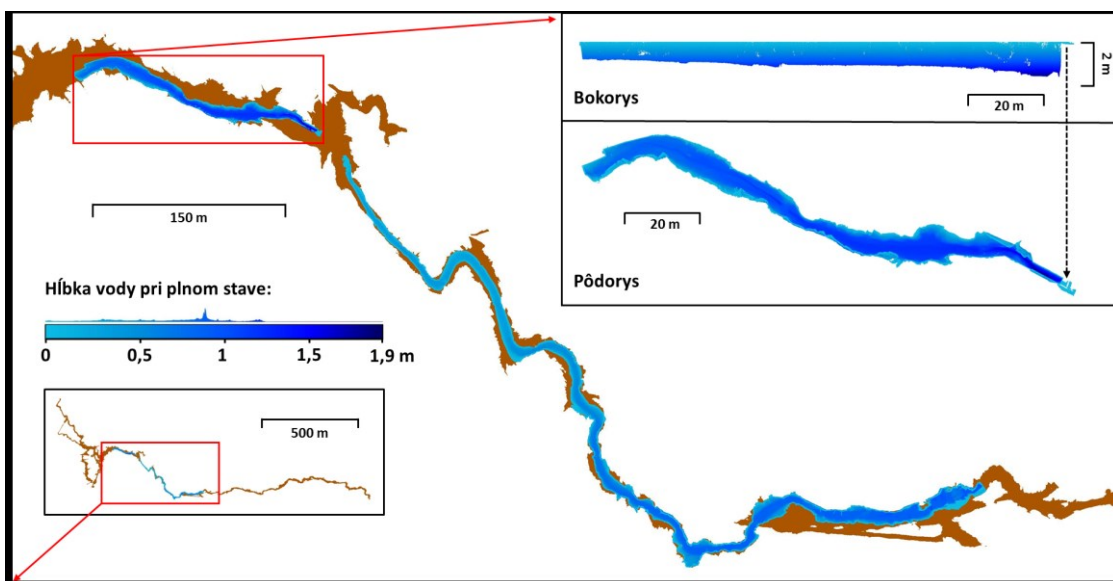
4. VÝSLEDKY

Naše snaženie v jaskyni vyústilo do úspešnej integrácie dát z dvoch rôznych TLS mapovaní s napojením do systému S-JTSK. Celkovo sme zmapovali približne 2 km chodieb pri variáciách rôznorodého povrchu od chodníkov cez kamenný podklad, blato, piesok a zaplavené plochy. V záverečnej fáze spracovania dát sme pracovali s 559 pozíciami, čo v plnom rozlíšení zodpovedalo vyše 4,5 miliardy bodov (4 614 824 007 z toho Riegl 2 132 957 333). Po filtrovaní dát na 1 cm úroveň sme pracovali s miliardou bodov (z toho Riegl skoro 700 mil.). Pre odvodenie celého modelu jaskyne sme použili dáta filtrované až na 10 cm úroveň pozostávajúce z 42 mil. bodov (z toho Riegl skoro 32 mil.). Samozrejme bola potrebná dodatočná filtrácia týchto dát, pretože v oblastiach s výskytom vodnej plochy dochádzalo k zrkadleniu objektov viditeľných na hladine, po východe z jaskyne k zachyteniu nadbytočného množstva bodov na povrchu a vegetácii a nadmernému výskytu identických bodov. Model jaskyne (Obr.6) spracovaný formou 3D triangulácie (Edelsbrunner et al. 1998) obsahuje niekoľko chýbajúcich častí, ktoré sú spojené s oblasťami vyšších vývojových úrovní, kde sme nevykonali skenovanie, čím sme stratili dáta potrebné pre vytvorenie modelu týchto priestorov, pričom výsledný model sa skladá z 13,5 milióna polygónov. Pre potreby našich budúcich hydrologických modelovaní prietoku Styxu však nie sú tieto priestory dôležité. Nemusí nás mrziť ani fakt, že v niektorých úsekoch sa nachádzala voda, pretože stav Styxu v období skenovania môžeme považovať za minimálny.



Obr. 6: Model jaskyne zo zriedeného bodového poľa na 10 cm a detailné modely vybraných lokalít z dát zriedených na 1 cm.

Body odvodené z 3D modelu (z dôvodu vyplnenia chýbajúcich dát v oblastiach s vodou) sme použili pre aproximáciu objemu prvej a druhej plavby (Obr.7). Prvá plavba dosahuje pri plnom vodnom stave po výšku chodníka objem 640 m³ s maximálnou hĺbkou 1,9 m a je nutné poznamenať, že v období záplav je vodný stav ešte vyšší. Druhá plavba je síce dlhšia, ale vyznačuje sa užšími priestormi, pričom jej objem vzhľadom na úroveň chodníka v prístavisku je 790 m³ a maximálna hĺbka 2,45 m. V dobe mapovania bola hladina vody pri stavidle na úrovni 1,2 m a výškový rozdiel medzi úrovňou hladiny a úrovňou chodníka je teda 1,25 m.



Obr. 7: Bodové pole odvodené z modelu jaskyne použité pre výpočet objemov plavieb.

Výhodou triangulácie je, že v zaplavených úsekoch nedochádzalo k umelému prehlbovaniu plavieb interpoláciou k predpokladanému dnu na základe normál, ale k vymodelovaniu hladiny spojením posledných bodov na oboch stranách "jazera", takže objem bol v prípade zaznamenaných vodných plôch počítaný od ich hladiny. V prvej plavbe sa nenachádzali žiadne vodné plochy, ktoré by ovplyvnili výpočet objemu. Druhá plavba bola mapovaná v dvoch etapách, pričom sme najmä v jej závere zaznamenali viacero vodných plôch, ktoré znemožnili exaktné modelovanie dna. Vypočítaný objem sa teda dá považovať za množstvo vody potrebné k maximálnemu naplneniu plavieb vzhľadom k minimálnemu vodnému stavu v jaskyni.

5. ZÁVER

Minuloročnými aktivitami sa nám podarilo dosiahnuť v podzemí štátnu hranicu s Maďarskom a tým dokončiť východnú vetvu jaskynného systému. Taktiež sa nám podarilo integrovať nami získané dáta s predošlým skenovaním, kedy sme zaznamenali viaceré problémy spojené s takýmto integrovaním starších mapovaní. Z našich zistení vyplýva, že pre dosiahnutie čo najlepšej registrácie je nutné realizovať oveľa väčší prekryt mapovaných oblastí, ako sme predpokladali. Použitie registračných objektov pri mapovaní je v konečnom dôsledku zbytočné, pretože predlžuje mapovanie a pri nesprávnom rozložení objektov v priestore vznikajú zákryty, ako aj možná vyššia chyba pri manuálnej registrácii dát pomocou malého množstva registračných bodov. Pre zvýšenie presnosti registrácie plánujeme po skončení zimného obdobia uzavrieť meračský ťah jaskyne po povrchu od hlavného vchodu po II. východ v závrte. V úseku od konca II. plavby po maďarskú hranicu však neprichádza uzatvorenie meračského ťahu do úvahy a uvedomujeme si možné nepresnosti spojené s kumulovaním chyby registrácie na neuzavretom lineárnom ťahu. V ďalšom období plánujeme domapovať aj chýbajúce prepojenia, úsek jaskynného systému po Čertovu dieru, ako aj pre nás dôležitý úsek štôlne Domického potoka. Po dokončení mapovaní tak získame ucelený priestorový model systému Domica-Čertova diera, ktorý ponúkne okrem dát pre splnenie našich primárnych cieľov aj ďalšie možnosti využitia najmä pre geologické a morfo-genetické analýzy. Po dokončení skenovania jaskyne bude nutné exaktné domodelovanie objektov priepustov a hrádzí v jaskynnom systéme, ktoré sa ukazujú ako kľúčové pri probléme s každoročnými záplavami. Zaujímavé by bolo aj vypustenie vodných plôch v oboch plavbách ich sprietočnením a opakované skenovanie, čím by sme exaktne zistili presný objem plavieb a množstvo vody, ktorá sa v systéme drží aj v dlhých suchých obdobiach. Na záver prebehne séria simulácií, ktoré odhalia kritické miesta v systéme, pričom sa budeme snažiť vyhotoviť návrh úpravy priestorov, tak aby sme týmto záplavám v budúcnosti mohli predchádzať s ohľadom na minimálny zásah do ekosystému jaskyne.

POĎAKOVANIE

Príspevok vznikol aj vďaka členom jaskyniarskej skupiny Speleo UPJŠ J. Kovalíkovi a N. Lackovi, ktorí sa zúčastnili na mapovaní. Tento príspevok vznikol v rámci riešenia projektov VEGA 1/0963/17: Dynamika krajiny vo vysokom rozlíšení a APVV-15-0054: Fyzikálne založená segmentácia georeliéfu a jej geovedné aplikácie.

LITERATÚRA

- AZMY, S. N., SAH, S. A., SHAFIE, N. J., ARIFFIN, A., MAJID, Z., ISMAIL, N. A., SHAMSIR, S. (2012). Counting in the dark: Non-intrusive laser scanning for population counting and identifying roosting bats. *Scientific Reports* 2: 524.
- BOSÁK, P. (1977). Aplikace prostorového zobrazení jeskyní metodou vertikálních vrstevnic. *Československý kras*, 29, 122-124.
- BOSSE, M., ZLOT, R., FLICK, P. (2012). Zebedee: Design of a spring-mounted 3D range sensor with application to mobile mapping. *IEEE Transactions on Robotics*, 28 (5): 1104-1119
- 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.

- BUCHROITHNER, M. F., MILIUS, J., PETTERS, C. (2011). 3D Surveying and visualisation of the biggest ice Cave on Earth. Proceedings 25th International Cartographic Conference, Paris, France, 3-8 July, CD-ROM: 6 p.
- BUCHROITHNER, M. F., PETTERS, C., PRADHAN, B. (2012). Three-dimensional visualisation of the worldclass-prehistoric site of the Niah Great Cave, Borneo, Malaysia. Conference Handout. Interdisciplinary Conference on Digital Cultural Heritage, July 2-4, Horst Kremers (Ed.), Saint-Dié-des-Vosges, France: 2 p. Ed. German Cartographic Society.
- COSSO, T., FERRANDO, I., ORLANDO, A. (2014). Surveying And Mapping A Cave Using 3d Laser Scanner The Open Challenge With Free And Open Source Software. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5, 181-186.
- DROPPA, A. (1961). Domica – Baradla, jaskyne predhistorického človeka. Šport, Bratislava, p. 1–151.
- DROPPA, A. (1972). Príspevok k vývoju jaskyne Domica. Československý kras, 22, pp. 65–72.
- EDELSBRUNNER, H., FACELLO, A.M., FU, P., QIAN, J., NEKHAYEV, V.D. (1998). Wrapping 3D Scanning Data. Proc. SPIE 3313, Three-Dimensional Image Capture and Applications, 148 - 158.
- FABBRI, 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, L., GRUBER, P. (2014). Jaskynný systém Domica-Baradla. Jaskyňa, ktorá nás spája. Aggteleki Nemzeti park, Aggtelek, p. 512.
- 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.
- GAŠINEC, J., GAŠINCOVÁ, S., ČERNOTA, P., STAŇKOVÁ, H. (2012). 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., MUOZ, 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. pp. 19-26.
- 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. (1997). Príspevok k problematike genézy jaskynných úrovní v Liskovskej jaskyni. Slovenský kras, 35, 89-96.
- HOCHMUTH, Z. (2014). História mapovania a vytvorenie spojitého meračského ťahu ako podkladu pre reambulovanie mapy Domice. Slovenský kras: Acta Carsologica Slovaca 52, 2, 173-190.

- IDREES, M., O., 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: 71-88.
- 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*. 1-12.
- KAUL, L., ZLOT, R. AND 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.
- 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, Zvolen, pp. 48–53.
- ROTH, Z. (1937). Vývoj jeskyně Domice. *Bratislava*, 11, pp. 129–163.
- TEICHMANN, D. (1999). Großmaßstäbige 3D-Modellierung und animierte kartographische Visualisierung der Dachstein-Südwandhöhle, Stiermark(Österreich). Diploma Thesis, Institute for Cartography, TU Dresden.
- ULLRICH, 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.
- ZLOT, R., BOSSE, M. (2014). Three-dimensional mobile mapping of caves. *Journal of Cave and Karst Studies*, 76 (3): 191-206.