

Využitie terestrického laserového skenovania pri skúmaní štruktúrno-geologických diskontinuit a morfológie jaskýň: príklad jaskyne Dúpnica v Západných Tatrách

Pavel Bella^{1,2}, Juraj Littva^{1,3}, Katarína Pukanská⁴, Juraj Gašinec⁴ & Karol Bartoš⁴

¹ Štátna ochrana prírody SR, Správa slovenských jaskýň, Hodžova 11, 031 01 Liptovský Mikuláš; pavel.bella@ssj.sk

² Katedra geografie, Pedagogická fakulta, Katolícka univerzita v Ružomberku, Hrabovská cesta 1, 034 01 Ružomberok; pavel.bella@ku.sk

³ Katedra geológie a paleontológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Mlynská dolina, Ilkovičova 6, 842 15 Bratislava; littva@gmail.sk

⁴ Ústav geodézie, kartografie a GIS, Fakulta BERG, Technická univerzita v Košiciach, Park Komenského 19, 041 01 Košice; katarina.pukanska@tuke.sk, juraj.gasinec@tuke.sk, karol.bartos@tuke.sk

AGEOS Use of terrestrial laser scanning for the investigation of structural geological discontinuities and morphology of caves: the example of the Dúpnica Cave, Západné Tatry Mts., Slovakia

Abstract: Terrestrial laser scanning was used for a detailed survey and 3D visualization of the Dúpnica Cave. This cave of disputable origin is located at the fault zone among the Západné Tatry Mts., Chočské vrchy Mts. and Liptovská kotlina Basin (the northern part of Slovakia). The cave plan drawn based on a classic surveying is too generalizing. It does not display smaller solutional and breakdown forms, and structural geological discontinuities (located mostly on the high walls and ceiling of main chamber). The origin of primary solutional chamber and adjacent cupola-like cavities and blind chimneys was controlled by steep faults. Later, these solutional forms were remodelled by breakdown processes, mainly along intersecting faults. In the SE part of the cave, well-preserved original solutional morphologies of the lateral passage controlled by the steep ENE–WSW fault are clear indicators of speleogenesis by ascending (probably thermal) waters. The formation of the cave by ascending waters was terminated by the activity of NNE–SSW fault. This suggests that the stress field in the studied area changed during the Quaternary from the N–S oriented extension to the extension generally oriented to the E–W direction.

Key words: structural geology, fault, karst, cave, morphology, hypogene speleogenesis, terrestrial laser scanning, digital 3D model

1. ÚVOD

Mnohé jaskyne majú zložitú morfológiu alebo obsahujú veľké podzemné priestory, ktoré je problematické presne zmerať a zobrazovať. Preto sa v posledných rokoch začali tieto problémy riešiť pomocou moderných geodetických a vizualizačných metód vrátane terestrického laserového skenovania. V speleológii sa doteraz laserové skenovanie využíva pri mapovaní a trojrozmernej vizualizácii jaskynných priestorov (Valentová et al., 2007; Buchroithner & Gaisecker, 2009; Canavese et al., 2009^b, 2011; Roncat et al., 2011; Milius & Petters, 2012; Silvestre et al., 2013 a iní), presnej lokalizácii, inventarizácii a dokumentácii pozoruhodných prírodných javov (Canavese et al., 2009^{a,b}), paleontologických a archeologických nálezísk (González-Aguilera et al., 2009; Chandelier & Roche, 2009; Lerma et al., 2010; Grussenmeyer et al., 2010^{a,b} a iní), ako aj na skúmanie klimatických a glaciologických podmienok v zaľadnených jaskyniach (Berenguer Sempere et al., 2014).

Z trojrozmerných modelov morfológie jaskynných priestorov sa určujú viaceré morfometrické ukazovatele, najmä ich objem, výška a šírka (z profilov v horizontálnej i vertikálnej rovine), či plocha podlahy (Buchroithner & Gaisecker, 2009; McFarlane et al., 2013 a iní). V rámci celkovej morfológie podzemných

priestorov možno pri dostatočnom rozlíšení skúmať aj menšie tvary jaskynného georeliéfu, čo je dôležité z hľadiska rekonštrukcie vývoja jaskýň (Plan et al., 2013).

Na Slovensku sa terestrické laserové skenovanie v speleológii využilo prvýkrát pri tvorbe digitálneho trojrozmerného modelu podzemných priestorov hornej zaľadnenej časti (Malá a Veľká sieň) a topografie podlahových ladových povrchov Dobšinskej ladovej jaskyne (Gašinec et al., 2012^{a,b,c}).

Tento príspevok predkladá výsledky laserového skenovania jaskyne Dúpnica v Západných Tatrách, vykonaného 27. 11. 2013, ktoré sme využili pri jej dopĺňujúcom geologicko-geomorfologickom výskume. Trojrozmerná vizualizácia jaskyne je vhodná na presnejšie zobrazenie zložitej morfológie podzemných priestorov vrátane zlomových plôch a línii. Umožňuje nielen identifikovať zlomy, ale aj odčítať údaje o ich smere, sklone a smere sklonu na ťažko dostupných miestach jaskyne (na vysokých stenách a stropoch). Detailnejšie údaje o štruktúrno-geologických pomeroch a morfológii podzemných priestorov sú dôležité z hľadiska doplnenia a spresnenia doterajších poznatkov o genéze tejto pozoruhodnej jaskyne. Jaskyňa Dúpnica má niektoré morfológické i mineralogické znaky hypogénneho vývoja, čomu zodpovedá aj jej poloha v blízkosti významných zlomov (Bella, 2013).

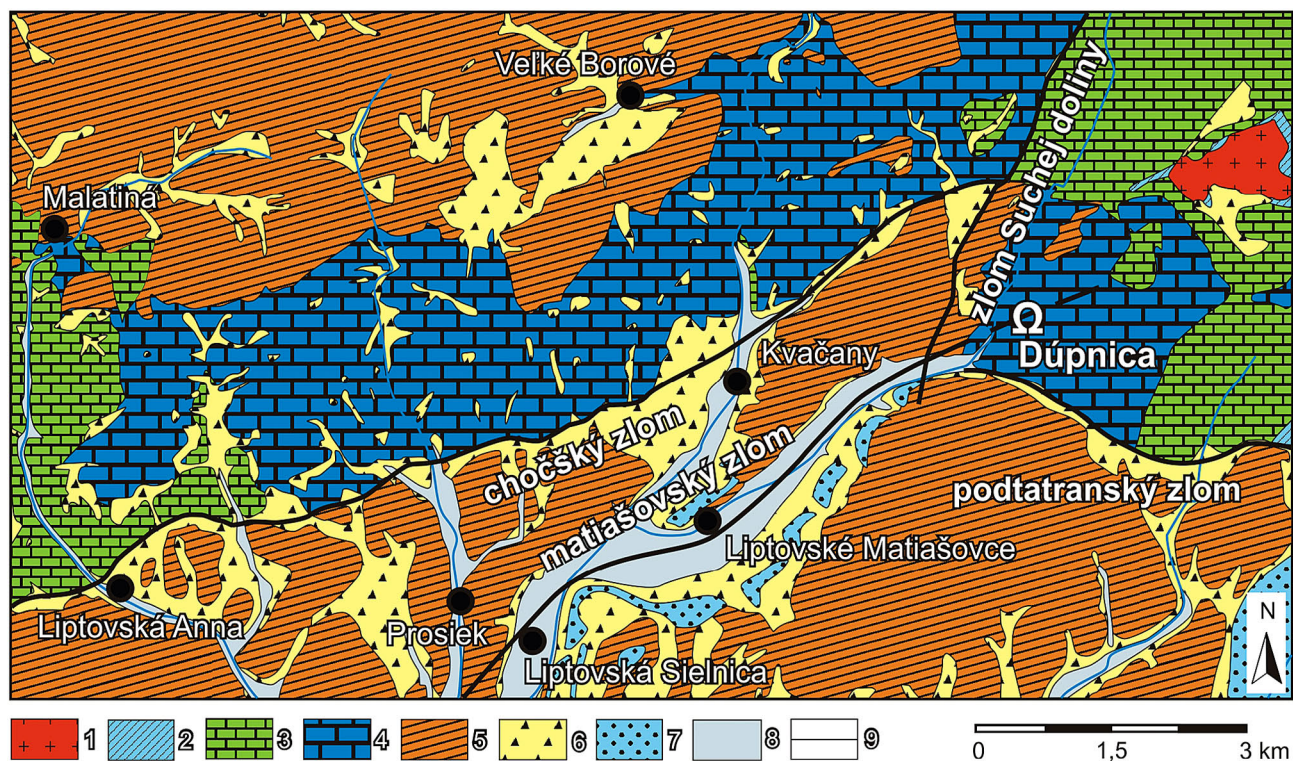
2. JASKYŇA DÚPNICA – POLOHA, GEOLOGICKÉ POMERY, MORFOLÓGIA A PROBLEMATIKA GENÉZY

Jaskyňa sa nachádza na juhozápadnom okraji Západných Tatier, severovýchodne od obce Liptovské Matiašovce (okres Liptovský Mikuláš), na ľavej strane Suchej doliny (dolina Suchého potoka), na protiláhlom svahu od Meštrovej (868 m), v blízkosti rozhrania Západných Tatier s Chočskými vrchmi. Vchod do jaskyne (široký 10 m, vysoký 1,5 m) je v nadmorskej výške 765 m, 73 m nad terajším dnom doliny (Droppa, 1972).

Droppa (1972, 1973) uvádza dĺžku jaskyne Dúpnica 74 m, resp. 65 m. Do jej najnižšej časti, tvorenej úzkymi priestormi (Bludisko), speleológovia prenikli pomedzi veľké skalné bloky, ktoré tvoria podlahu zníženej južnej časti hlavného dómu. Po preskúmaní spodných častí a komínov v severnom okraji dómu dĺžka jaskyne vzrástla na 150 m (Vozárik, 1983).

Západné Tatry sú súčasťou geomorfologického celku Tatry, ktoré predstavujú klenbohrastové jadrové pohorie v rámci vrásovo-kryhovej fatransko-tatranskej morfoštruktúry (Mazúr, 1980; Mazúr et al., 1980). Vyzdvihnuté sú pozdĺž okrajových zlomov, najviac na južnom okraji na rozhraní s Podtatranskou kotlinou (jej západnú časť tvorí Liptovská kotlina).

Jaskyňa Dúpnica je vytvorená v intenzívne tektonicky porušených strednotriasových gutensteinských vápencoch hronika, ktoré sa v širšom okolí jaskyne skláňajú na severovýchod (Nemčok et al., 1994). Keďže geologické pomery v bezprostrednom okolí jaskyne sú výrazne skomplikované vrásovou a zlomovou tektonikou, určenie úložných pomerov gutensteinských vápencov v jaskyni je problematické. V okolí jaskyne je niekoľko významných zlomových rozhraní (Obr. 1). Jaskyňa sa vytvorila v bezprostrednej blízkosti podtatranského zlomu orientovaného generálne zsz.–vjv. až sz.–jv. smerom. V oblasti sa nachádza aj chočský zlom orientovaný generálne vsv.–zjz. smerom. Šikmý vrt CH-1 (lokalizovaný asi 500 m severovýchodne od Kvačian) preukázal poklesový charakter chočského, resp. chočsko-podtatranského zlomu so sklonom 70° na juh (Gross, 1980^a). Geologickú stavbu navyše komplikujú ssv.–jjz. orientované zlomové rozhrania, ktoré presekávajú vyššie uvedené zlomy (Obr. 1). Ssv.–jjz. orientované zlomy ukončujú priebeh podtatranského zlomu a podmieniajú výrazné rozdiely v geologickej stavbe, ako aj v morfológii Západných Tatier a Chočských vrchov (Gross, 1980^{ab}; Dujčík, 1984; Nemčok et al., 1994; Maglay et al., 1999; Hók et al., 2000; Polák et al., 2008). Všetky spomenuté typy zlomov boli zrejme aktívne aj počas kvartéru (Maglay et al., 1999).

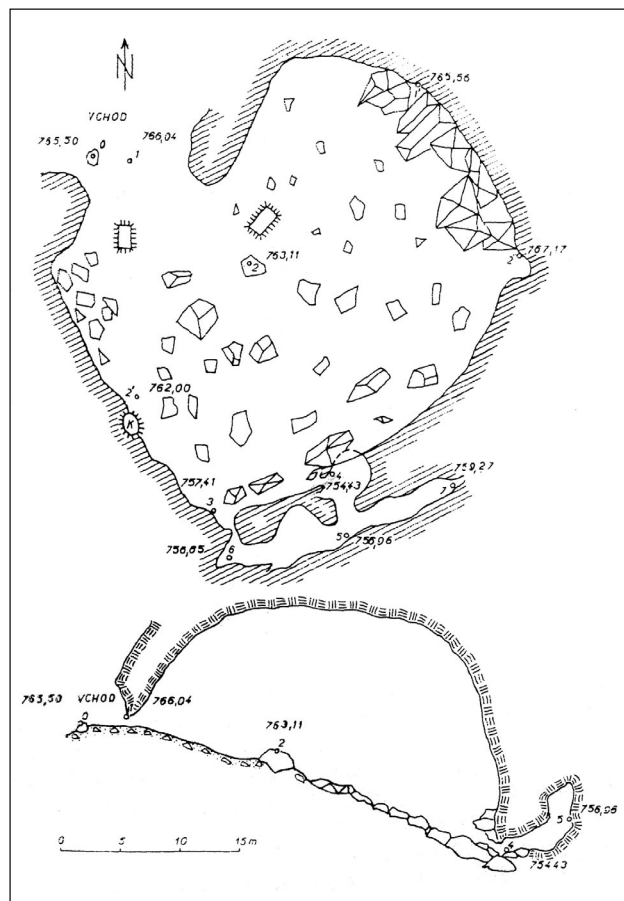


Obr. 1. Geologická mapa okolia jaskyne Dúpnica (vytvorená z Digitálnej geologickej mapy Slovenskej republiky v mierke 1:50 000 – Káčer et al., 2005; spracovanej z podkladov: Filo et al., 2009; Gross et al., 1980a, 1994; Nemčok et al., 1994): 1 – kryštalinikum tatrika; 2 – mezozoický obal tatrika; 3 – fatricum; 4 – hronikum; 5 – sedimenty centrálno-karpatskej paleogénnej panvy; 6 – kvartérne deluviálne sedimenty; 7 – kvartérne sedimenty riečnych terás; 8 – kvartérne sedimenty riečnych nív; 9 – zlomy.

Fig. 1. Geological map of the Dúpnica Cave vicinity (compiled from the Digital Geological Map of the Slovak Republic at a scale of 1:50 000 – Káčer et al., 2005; contained data: Filo et al., 2009; Gross et al., 1980a, 1994; Nemčok et al., 1994): 1 – Taticum crystalline basement; 2 – Mesozoic sedimentary cover of the Taticum; 3 – Fatricum; 4 – Hronicum; 5 – sediments of the Central Carpathian Palaeogene Basin; 6 – Quaternary deluvial sediments; 7 – Quaternary river terrace sediments; 8 – Quaternary flood plain sediments; 9 – faults.

Prevažnú časť jaskyne tvorí priestranný dóm s rozmermi 40 × 35 m a výškou 15 m (Obr. 2). Vchod, ktorým sa vchádza do jaskyne z povrchu, je na severozápadnom okraji dómu. Na juhozápadnom okraji dómu je strmý a pomerne široký oválny komín, vysoký 11 m. Zvyšky komína, resp. kupolovitej vyhlbeniny sú aj na severnom okraji dómu. Na genézu dómu výrazne vplývala tektonika, o čom svedčia početné výskyty krehkých porúch na stenách a strope, ako aj zvyšky tektonicky predisponovaných komínov na jeho okrajoch. Prvotná morfológia dómu je výrazne remodelovaná rútením a mrazovým zvetrávaním. Na podlahe prevládajú zrútené skalné bloky, najmä v jej severovýchodnej časti.

Pôvodnú koróznú morfológiu skalných stien vidieť najmä v bočnej vetve vedúcej z južného okraja dómu, založenej na tektonickej poruche vsv.-zjz. smeru. Túto časť jaskyne tvorí chodba s viacerými stropnými vyhlbeninami, v strednej časti je rozšírená do podoby menšej členitej siene. Miestami sú do skalných stien vyhlbené vertikálne trubicovité kanály (elipsovitých priečných rezov s rozmermi 0,9 × 0,7 m, resp. 0,5 × 0,4 m). Podľa Droppu (1972) oválne skalné tvary v tejto časti jaskyne vznikli riečnou modeláciou (podzemný tok údajne pritekal do jaskyne od vsv., živený prevažne atmosférickými zrážkami). Na základe výškovej polohy a senilného charakteru podzemných priestorov Droppa (1972) predpokladá, že jaskyňa vznikla v staršom pleistocéne.



Obr. 2. Plán jaskyne Dúpnica (zamerali: A. Droppa, A. Chovan a M. Sýkora, 1966).
 Fig. 2. Plan of the Dúpnica Cave (surveyed by A. Droppa, A. Chovan and M. Sýkora, 1966).

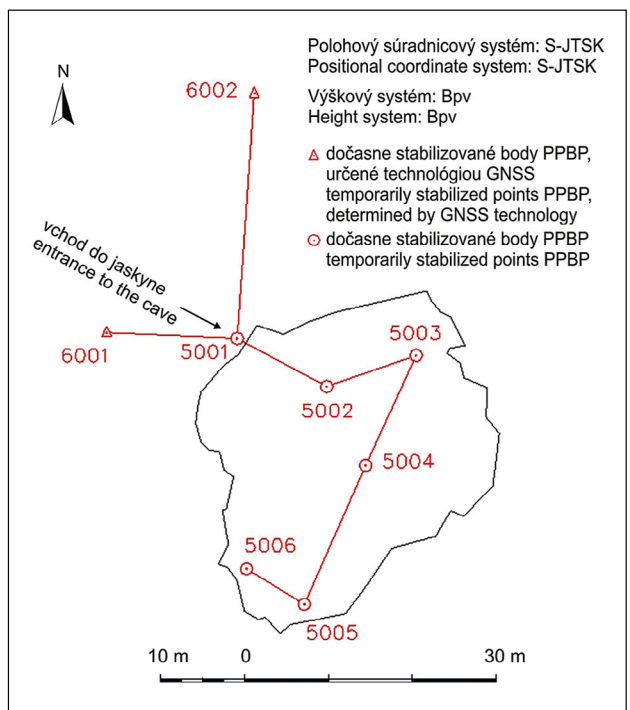
V jej spodnej časti, miestami aj na južnom okraji hlavného dómu (pod komínom) sa na skalných stenách zachovali nevelké, avšak veľmi početné kryštály kalcitu.

Na rozdiel od názoru o riečnom pôvode jaskyne Dúpnica (Droppa, 1972) tektonické pomery okolia, hydrogeologické pomery, morfológia podzemných priestorov (stropné kupoly, vertikálne trubicovité prírodné kanály) i minerálna výplň tvorená najmä kryštálmi kalcitu (jej výskum nie je ukončený) indikujú vytváranie tejto jaskyne vodami hlbkej cirkulácie, ktoré vystupovali pozdĺž zlomových rozhraní (Bella, 2013). V mnohých jaskyniach idiomorfne kryštály kalcitu majú hydrotermálny pôvod (Dublyansky, 1997 a iní).

Trojrozmerný model priestranného dómu a priľahlých častí jaskyne Dúpnica, vytvorený na základe terestrického laserového skenovania, umožňuje presnejšie určiť tektonické diskontinuity vplývajúce na jej vytváranie a detailnejšie posúdiť celkovú morfológiu podzemných priestorov. Výsledky sú dôležité na spresnenie doterajších poznatkov o genéze tejto jaskyne vytvorenej v oblasti rozhrania viacerých zlomov.

3. LASEROVÉ SKENOVANIE, TROJROZMERNÝ MODEL A VIZUALIZÁCIA JASKYNE

Geodetické zameranie jaskyne sme vykonali terestrickým laserovým skenovacím prístrojom Leica ScanStation C10 s polohovým pripojením do štátneho polohového súradnicového systému S-JTSK a výškovým pripojením do Baltského výškového systému po vyrovnaní Bpv pomocou prijímača GNSS Leica GPS



Obr. 3. Prehľad podrobného polohového bodového poľa pred vchodom a v dómovitej časti jaskyne Dúpnica.
 Fig. 3. Overview of the minor geodetic control in front of the entrance and in the chamber part of the Dúpnica Cave.



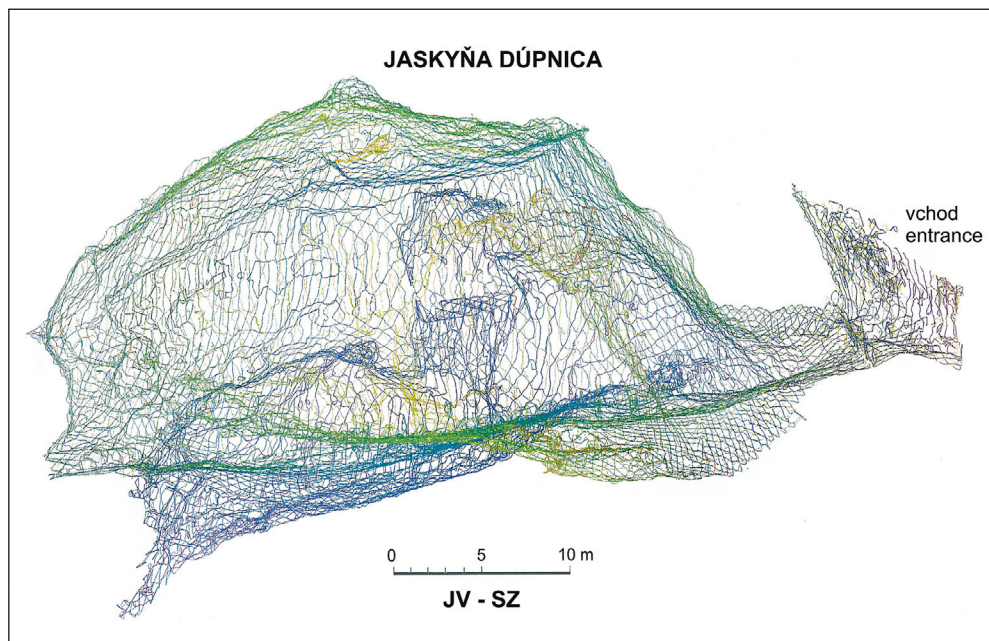
Obr. 4. Laserové skenovanie jaskyne Dúpnica. Foto: P. Bella.

Fig. 4. Laser scanning of the Dúpnica Cave. Photo: P. Bella.

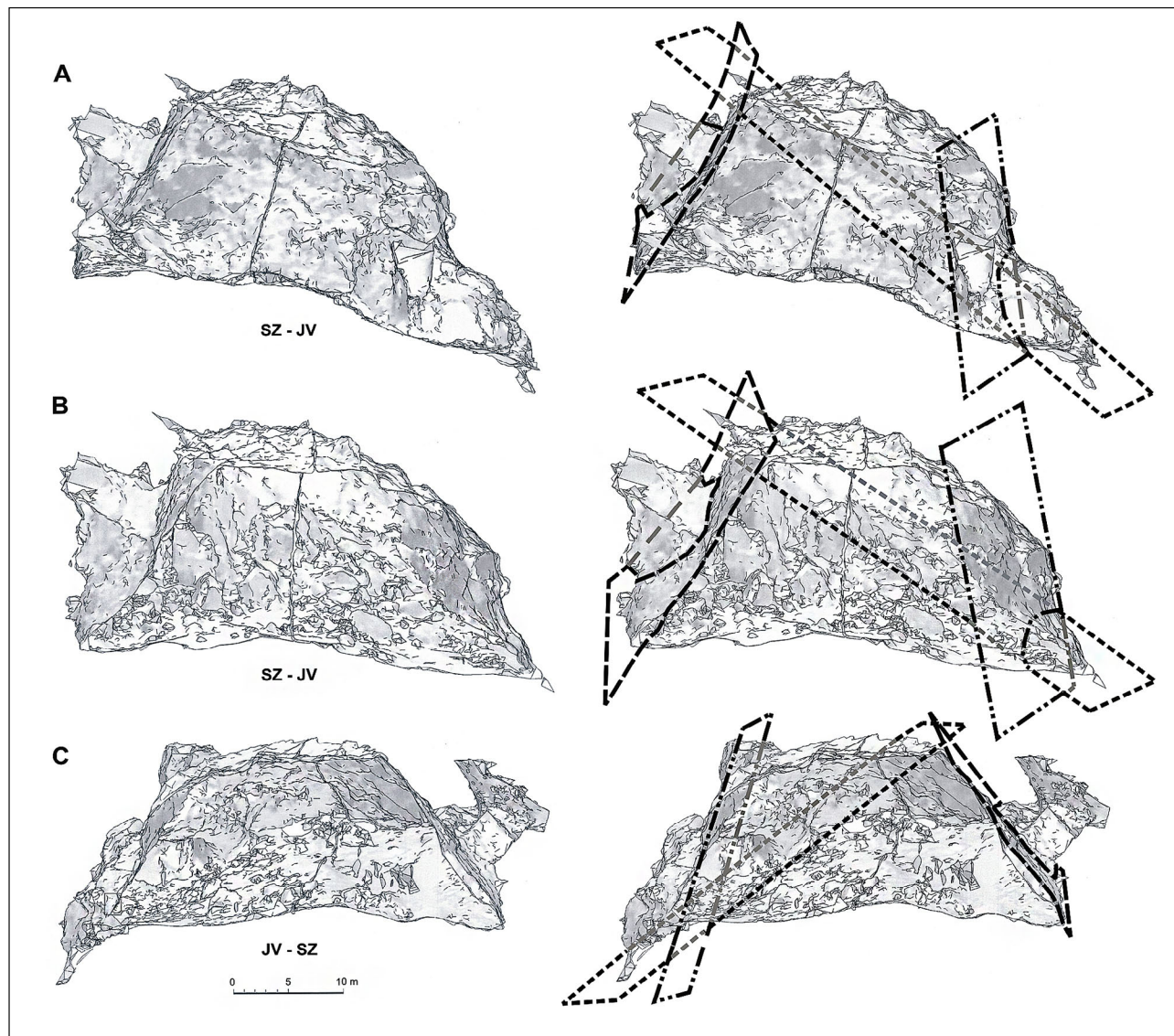


900CS. Objektom merania bol vchod do jaskyne (zameraný z jedného stanoviska) a nasledujúci hlavný dómovitý priestor s príslušným úsekom, ktorý klesá do spodných a bočných častí (zameraný z piatich stanovísk) (Obr. 3). V spodnej časti jaskyne sú úzke a nízke chodby obmedzujúce až zabraňujúce ich

skenovanie uvedeným prístrojom. Prístroj Leica ScanStation C10 je plno panoramatický laserový skener (Obr. 4), umožňujúci zameranie priestorovej polohy s rýchlosťou 50 000 bodov/sek., charakterizovaných apriórnu polohovou chybou 6 mm, s dosahom do 300 m pri 90 % reflektivitve povrchu. Priestory



Obr. 5. Sieťové zobrazenie povrchu jaskyne Dúpnica nástrojmi Trimble Realworks. Fig. 5. Net vertical and horizontal wireframe, 3D model elaborated from the point cloud with Trimble Realworks 3D modelling functionalities.



Obr. 6. Vizualizácia trojrozmerného modelu topografických povrchov jaskyne Dúpnica a najzreteľnejších zlomov (vpravo): A – hlavný dóm; B – severná polovica hlavného dómu (cez vertikálny rez); C – južná polovica hlavného dómu s príslušnou klesajúcou chodbou (cez vertikálny rez).
 Fig. 6. Visualisation of the 3D model of topographic surfaces of the Dúpnica Cave and the most distinct faults (right): A – main chamber; B – northern half of the main chamber (through a vertical section); C – southern half of the main chamber and adjacent descending passage (through a vertical section).

jaskyne boli skenované s rozlíšením 2 cm, čím do spracovania vstúpilo cca 13,3 mil. bodov. Keďže spracovanie objemných údajov bolo graficky náročné, pristúpili sme k redukcii údajov pri rozlíšení 20×20 cm a následne sa vytvoril priestorový model jaskyne reprezentovaný nepravidelnou trojuholníkovou sieťou TIN (Triangulated irregular network) (Obr. 5 a 6A), zobrazený v reze ako dve polovice jaskyne (Obr. 6B a C). Obvod jaskynného priestoru možno graficky zobraziť vertikálnymi rezmi s intervalom 0,5 m v smere osí x a y , čím vznikol priestorový model nepravidelného povrchu s orientovanou štvorcovou sieťou v jeho pôdoryse.

Vzhľadom na skutočnosť, že laserové lúče sú koherentné, v jaskyniach je ťažké až nemožné zachytiť zákrytové časti morfológicky členitých tvarov (napr. nepravidelných komínov, kupol alebo výklenkov). V našom prípade sme nezachytili hornú, zakrivenú časť komína na juhozápadnom okraji dómu.

4. TEKTONICKÁ PREDISPOZÍCIA A MORFO-LÓGIA JASKYNE – POZOROVANIA S VYUŽITÍM VÝSLEDKOV SKENOVANIA

V porovnaní s pôvodným plánom jaskyne Dúpnica z roku 1966 (Obr. 2) trojrozmerný model s vizualizáciou skenovaných častí (Obr. 5 a 6) výrazne sprehľadňuje a spresňuje morfológiu jej podzemných priestorov. Viaceré šikmé a strmé planárne plochy skalných stien poukazujú na priebeh zlomov, ktoré dominantne vplývajú na vznik a vývoj jaskyne. Ich dokumentáciu sme spresnili a doplnili vlastnými meraniami počas dodatočného štruktúrno-geologického výskumu jaskyne v máji 2014.

Nízky a široký vstupný úsek s vchodovým valom je vytvorený v mieste križovania sa viacerých zlomov. Krátky vstupný úsek vedie do priestraného dómu, ktorého skalné steny zo strany Suchej doliny sú predurčené strmými tektonickými poruchami

vsv.–zjz. smeru so sklonom na JJV a ssz.–jjv. smeru so sklonom na ZJZ. Protihlhlá strana dómu je predisponovaná strmou vertikálnou tektonickou poruchou orientovanou na VSV–ZJZ so sklonom na JJV. Prevažne plochý skalný strop dómu, tvorený odlučnými plochami po rútení, je sklonený na juh (Obr. 5 a 6A). Podlaha dómu, zväčša tvorená zrútenými skalnými balvanmi, klesá od severnej steny k južnému okraju. V tomto mieste sa zostupuje do spodnej časti jaskyne, resp. sa prechádza do bočnej chodby paralelnej s juhovýchodnou stenou dómu.

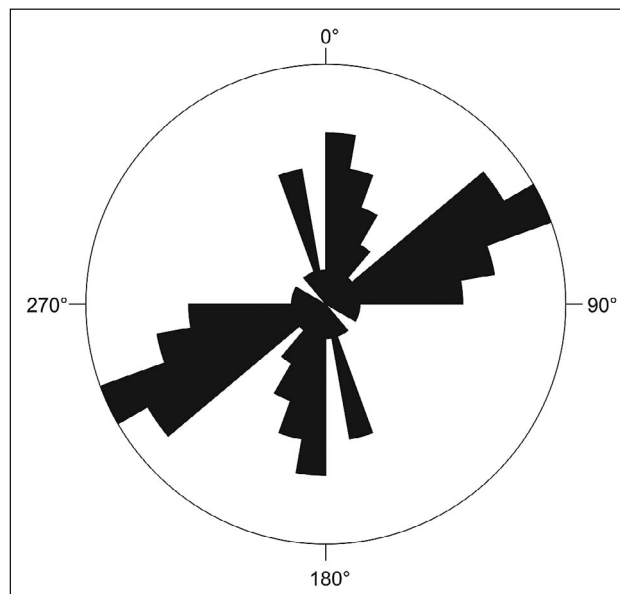
Na skalnej stene severného okraja dómu sú zreteľné dva zlomy sklonené 30° a 65° na JJV, ktoré sa navzájom pretínajú na juhovýchodnom okraji dómu (Obr. 6B). V severnej časti dómu na stene i na stropě ďalej vidieť strmú poruchu vsv.–zjz. smeru so sklonom na SSZ (paralelnú s poruchou na severozápadnom okraji dómu). Na stropě i severnej stene dómu predurčila menšie vyhlbeniny. Na opačnom okraji sa horná porucha so sklonom 35° pretína so strmou poruchou vsv.–zjz. smeru so sklonom na SSZ a tvorí ostré rozhranie stropu a severozápadnej steny dómu. Nižšia porucha so sklonom 20° pretína severozápadnú stenu dómu (predisponovanú poruchou vsv.–zjz. smeru so sklonom na SSZ) asi v polovici výšky medzi podlahou a stropom. Okraj juhozápadnej steny dómu je predisponovaný strmou poruchou sz.–jv. smeru so sklonom na JZ.

V dóme sa nachádzajú dva bočné kupolovité a komínovité výbežky, ktoré sú situované na križovaní zlomov. Jeden z výbežkov je situovaný za okrajom juhozápadnej steny dómu a druhý v najvýchodnejšom cípe dómu. Oba sú predisponované poruchou smeru VSV–ZJZ, pričom prvý z nich vznikol na mieste, kde sa zmenený zlom križuje so strmými ssz.–jjv. zlomami. Pod ním je na podlahe menšia znížena zarútená skalnými blokmi. Vertikálny komín na východnom okraji sieňovitého priestoru sa vytvoril na križovaní zlomu smeru VSV–ZJZ a zlomu SZ–JV smeru so sklonom na SV.

Na južnom okraji dómu sa strop znižuje na 5 až 7 m a zväčšuje sa sklon podlahy smerom k najnižšiemu miestu medzi zrútenými skalnými blokmi, pomedzi ktoré sa zostupuje do najnižšej časti jaskyne (pokles zrútených blokov do nižších dutín; obr. 6C). Za južným okrajom jaskynného dómu sa vytvorila pomerne lineárna chodba orientovaná vsv.–zjz. smerom. Jej pôvodná morfológia nie je zmenená rútením a mrazovým zvetrávaním. Na jej stropě sa nachádzajú kupolovité a komínovité vyhlbeniny, najmä na jej severovýchodnom okraji. Spomenuté vertikálne trubcovité kanály vyhlbené v stenách privádzali počas hypogénneho štádia vývoja jaskyne vodu odspodu nahor (angl. *feeders*; Klimchouk, 2007, 2013).

Okrem veľkorozmerových zlomov pozorovateľných na stenách jaskyne sme počas terénnych prác v jaskyni pozorovali a namerali množstvo mezoskopických porúch. Ich orientáciu vyjadruje ružicový diagram zostrojený v programe Stereo32 (Röller & Trepman, 2003) (Obr. 7). Medzi najdominantnejší typ porúch patria poruchy smeru SSV–JJZ a smeru VSV–ZSZ. V jaskyni sa vyskytovali aj poruchy smeru SZ–JV, avšak oproti vyššie zmieneným zlomom sú výrazne menej početné (preto sa na ružicovom diagrame nezobrazujú).

Na základe laserového skenovania sa objem jaskynného dómu spolu s krátkym vstupným úsekom určil na 8523 m^3 , plocha podlahy v zvislom priemete do roviny na 981 m^2 .



Obr. 7. Ružicový diagram nameraných mezoskopických krehkých štruktúr v jaskyni Dúpnica.

Fig. 7. The rose diagram of measured mesoscopic brittle structures in the Dúpnica Cave.

5. ZÁKLADNÁ INTERPRETÁCIA VÝSLEDKOV A DISKUSIA KU GENÉZE JASKYNE

Na základe terénnych pozorovaní mezoskopických zlomov (s pomocou trojrozmernej vizualizácie rozhraní a planárnych plôch v morfológii podzemných priestorov), ich štruktúrnej analýzy a následného spracovania údajov v programe Stereo32 bolo možné v jaskyni identifikovať dva hlavné smery zlomov – VSV–ZJZ a SSV–JJZ (Obr. 7). Ojedinele sa vyskytujú aj zlomy orientované sz.–jv. smerom. Zlomy lokalizované v jaskyni Dúpnica sú korelovateľné so zlomovými rozhraniami lokalizovanými v okolí jaskyne. Zlomy orientované generálne vsv.–zjz. smerom zodpovedajú chočskému zlomu, zlomy orientované generálne s.–j. smerom sú korelovateľné so zlomami na rozhraní Chočských vrchov a Západných Tatier. Zlomy, ktorých orientáciu možno korelovať s priebehom podtatranského zlomu (SZ–JV až ZSZ–VJV), sa v jaskyni vyskytujú len podružne.

Analýza orientácie jaskynných priestorov nemoifikovaných rúťivými a mrazovými procesmi naznačuje, že genézu jaskyne dominantne predurčili zlomy orientované na VSV–ZJZ. Stropné kupolovité a komínovité vyhlbeniny, ako aj prírodné vertikálne trubice sú situované predovšetkým na takto orientovaných zlomoch. Charakter týchto priestorov napovedá, že vznikli rozpúšťaním vápencov v prvotnej fáze vývoja jaskyne. Predstavujú morfológické indikátory výstupného prúdenia vody pozdĺž zmiených zlomových porúch. Hypogénny pôvod jaskyne morfológicky pripomína aj vyššie situovaný kupolovitý dóm (typológia hypogénnych jaskýň podľa Audru et al., 2009). Slepé komínovité vyhlbeniny na juhozápadnom a severnom okraji dómu takisto vznikli vystupujúcimi prúdmi vody (v súčasnosti sú narušené rútením a mrazovým zvetrávaním ako ostatné časti dómu).

Dôležitejší vplyv na genézu jaskyne Dúpnica mali zlomy ko-relovateľné s chočským zlomom (VSV–ZJZ zlomy), hoci ten je od nej vzdialenejší ako podtatranský zlom. Kotlinovou časťou doliny Suchého potoka pri Liptovských Matiašovciach prebieha zlom (ďalej nazývaný ako matiašovský zlom), rovnobežný s priebehom chočského zlomu (VSV–ZJZ). V geologickej mape (Gross, 1980^b) je priebeh tohto zlomu ukončený na ssv.–jjz. orientovanom zlome Suchej doliny, ktorý by mohol predstavovať podružný segment alebo juhozápadné pokračovanie prosečianskeho zlomu na rozhraní Chočských vrchov a Západných Tatier (Hók et al., 2000; Králiková et al., 2014). Priemet pokračovania zlomovej línie matiašovského zlomu na západné svahy Západných Tatier sa dobre zhoduje s polohou jaskyne Dúpnica (Obr. 1). Na aktivitu tohto zlomu v kvartéri poukazuje asymetria riečnych terás v kotlinovej časti doliny Suchého potoka, ktorou matiašovský zlom prebieha (Obr. 1).

Geologické pomery Chočských vrchov a západných svahov Západných Tatier v oblasti Suchej doliny, ich predurčujú k výraznej hydrogeologickej a hydrotermálnej aktivite (Franko et al., 1975; Franko, 2002). Na sústredovanie a výstup podzemných vôd v predmetnej oblasti vplývajú najmä zlomy, na ktorých sa triasové karbonáty Západných Tatier stýkajú s nepriepustnými paleogénnymi pieskovo-ílovcovými súvrstviami Liptovskej kotliny (Kullman & Zakovič, 1974; Dujčík, 1984). Vrtom BJ-101 v strede výverovej oblasti na Lúčkach bola v hĺbke 77,6–87,0 m zistená krasová dutina, z ktorej do vrtu pritekala termálna voda (asi 100 l.s⁻¹, teplota 32 °C) (Klago et al., 1969; Klago, 1984). Keďže ju vytvorila voda ohriata na menej ako 50 °C, prislúcha nízkoteplotnému hydrotermálnemu krasu (Spötl et al., 2009 a ďalší). Existenciu podobných hydrotermálnych krasových dutín možno predpokladať v priľahlých častiach Liptovskej kotliny (pod paleogénnymi horninami), ako aj v karbonátoch pri zlomových okrajoch okolitých pohorí.

Analogickým prípadom je pravdepodobne aj genéza jaskyne Dúpnica, ktorá predstavuje fragment skrasovatenej výstupnej drenáže podzemných vôd hlbšej cirkulácie súvisiacej s aktivitou matiašovského zlomu. Na základe doterajších poznatkov možno predpokladať tieto základné procesy a fázy jej vývoja:

1. Vytváranie prvotných koróznych priestorov jaskyne vodou vystupujúcou pozdĺž vsv.–zjz. orientovaného matiašovského zlomu (infiltračnou oblasťou boli vyššie položené štruktúry karbonátov v juhozápadnej časti Západných Tatier). Neskôr tvorba minerálnej výplne (kryštálov kalcitu) v podzemných priestoroch vyplnených vodou.

2. Aktivácia mladšieho ssv.–jjz. orientovaného zlomu Suchej doliny, presekávajúceho matiašovský zlom, s relatívnym poklesom bloku západne medzi zlomom Suchej doliny a chočským zlomom (priestor Kvačianskych lúk) a relatívnym výzdvihom bloku východne od zlomu Suchej doliny (okolie jaskyne Dúpnica). Zahĺbením Suchej doliny (pozdĺž rovnomenného zlomu) pod spodné časti jaskyne sa skončila jej korózna freatická, resp. hypogénna modelácia.

3. Remodelácia dómovitej časti jaskyne rútením a mrazovými zvetrávaním, pričom zlomy ako zóny oslabenia usmerňovali a uľahčovali pôsobenie týchto procesov meniacich pôvodné korózne skalné tvary v jaskyni. Miestami tvorba sintrových nátekov účinkom presakujúcich zrážkových vôd.

Na túto sukcesiu aktivity zlomových rozhraní poukazujú tieto skutočnosti:

1. Analýza mezoskopických štruktúr v jaskyni Dúpnica naznačuje, že s.–j. orientované zlomy presekávajú ostatné, pravdepodobne staršie zlomy.

2. Z geologickej mapy vyplýva, že priebeh viacerých zlomov je ukončený priebehom s.–j. orientovaného zlomu Suchej doliny, ktorý by mal byť z tohto dôvodu najmladší (v prospech toho svedčí aj rozloženie kvartérnych sedimentov).

3. Východne od zlomu Suchej doliny sú hypogénne jaskynné priestory vyzdvihnuté vysoko nad úroveň Liptovskej kotliny, avšak západne od tohto zlomu sa hypogénne krasové dutiny nachádzajú pod úrovňou terénu (spomenuté navrátené hydrotermálne dutiny na Lúčkach).

4. Naše výsledky súhlasia s výsledkami Grossa (1980^a), ktorý na základe výskumu zlomov v Liptovskej kotline a jej okolí považuje s.–j. orientované zlomy za mladšie ako v.–z. orientované zlomy.

6. ZÁVER

Na základe trojrozmerného digitálneho modelu povrchu podzemných priestorov jaskyne Dúpnica sme doplnili a spresnili jej morfológickú charakteristiku a určili základné morfometrické ukazovatele. V častiach jaskyne remodelovaných rútením a mrazovým zvetrávaním sa zachovali, resp. možno identifikovať miesta bývalého výstupného prúdenia vody. Kupolovité až komínovité vyhlbeniny na stropoch sú podmienené strmými tektonickými poruchami, predovšetkým poruchami smeru VSV–ZJZ. Podlaha pod týmito stropnými vyhlbeninami je vzhľadom na centrálnu časť jaskynného dómu znížená, pretože skalné bloky zrútené zo stropu sa dostali, resp. poklesli do nižších koróznych dutín. Značný objem hlavného dómu poukazuje na dimenziu pôvodných koróznych podzemných priestorov, ktorých spodné časti sa neskôr zaplnili zrútenými skalnými blokmi. Miesta hlavného výstupu vôd hlbšej cirkulácie sa pravdepodobne nachádzali na južnom a severnom okraji hlavného dómu, v miestach terajších kupolovitých a komínovitých stropných vyhlbenín a znížených častí zarútených podláh. Pôvodné kupolovité tvary a vertikálne trubice (*feeders*) zachované v bočnej vetve na južnom okraji dómu sú postranným vyústením južného výstupného prúdu bývalej drenáže známych častí jaskyne.

Genéza jaskyne je spojená s dvoma výraznými zlomovými rozhraniami: VSV–ZJZ orientovaným zlomom prechádzajúcim kotlinovou časťou doliny Suchého potoka pri Liptovských Matiašovciach (matiašovský zlom), ktorý je paralelný s chočským zlomom a zlomom Suchej doliny ssv.–jjz. smeru. Hlbinné prúdenie vody pozdĺž vsv.–zjz. orientovaného zlomu pravdepodobne podmienilo tvorbu hypogénnej jaskyne. Aktivita zlomu ssv.–jjz. smeru pravdepodobne spôsobila ukončenie freatickej, resp. hypogénnej modelácie jaskyne a jej relatívny výzdvih (priestory jaskyne výškovou polohou zodpovedajú mierne rozčlenenému povrchu kryhy paleogénnych hornín v priestore Kvačianskych lúk, západne od dolnej časti Suchej doliny, ktorú ohraničujú uvedené zlomy).

Takéto zmeny v aktivite dvoch generácií zlomov indikujú, že v kvartéri došlo k zmene napäťového poľa. Keďže vsv.–zjz. orientované zlomy predstavujú staršiu generáciu zlomov, možno konštatovať, že napäťové pole sa zmenilo zo s.–j. orientovanej extenzie na generálne v.–z. orientovanú extenziu. Zlomy orientované na VSV–ZJZ, ako aj na SSV–JJZ následne usmerňovali remodeláciu podzemných priestorov, ako plochy oslabenia uľahčujúce procesy rútenia a mrazového zvetrávania. Jaskyňu Dúpnica možno zaradiť medzi korózne jaskyne Západných Karpát, ktoré vznikli vodami vystupujúcimi pozdĺž zlomov (Bella & Bosák, 2012).

Získané výsledky potvrdzujú, že trojrozmerný model obvodového povrchu podzemných priestorov, spracovaný na základe terestrického laserového skenovania, je dôležitým nástrojom na skúmanie štruktúrno-geologických diskontinuit, celkovej i detailnejšej morfológie jaskýň, vytváranie rezov a odvodzovanie morfometrických ukazovateľov. V prípade jaskyne Dúpnica sa osvedčil najmä pri spresňovaní opisu morfológie priestraného dómu, kvantifikácii morfometrických ukazovateľov a určovaní priestorovej distribúcie zlomov, ktoré usmerňovali speleogenézu. V porovnaní s plánom, spracovaným na základe klasického speleologického zamerania jaskyne, trojrozmerný model podstatne presnejšie zobrazuje zložitú morfológiu podzemných priestorov vrátane zlomových plôch, resp. línií. Umožnil určiť orientáciu zlomov aj na ťažko dostupných miestach vysokých stien a stropov. Tým sa získal názornejší a súbornejší obraz o štruktúrno-geologických pomeroch v tejto pozoruhodnej jaskyni.

Podakovanie: Úloha sa riešila v rámci vedeckého grantového projektu VEGA č. 1/0030/12 „Hypogénne jaskyne na Slovensku: speleogenéza a morfogenetické typy“. Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmlúv č. APVV-0099-11, APVV-0625-11 a APVV-0315-12. Za cenné rady a pripomienky, ktoré prispeli k skvalitneniu tohto príspevku, ďakujeme recenzentom Mgr. Lukášovi Vlčekovi, PhD., a Ing. Jurajovi Papčovi, PhD.

Literatúra

- Audra Ph., Mocochain L., Bigot J.-Y. & Nobécourt J.-C., 2009: Hypogene cave patterns. In: Klimchouk A.B. & Ford D.C. (Eds.): Hypogene Speleogenesis and Karst Hydrogeology of Artesian Basins. Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, Special Paper, 1, Simferopol, 17–22.
- Bella P., 2013: Disolučné kupoly v jaskyniach, ich morfogenetické znaky a typológia – príklady z vybraných jaskýň na Slovensku. *Aragonit*, 18, 1, 30–35.
- Bella P. & Bosák P., 2012: Speleogenesis along deep regional faults by ascending waters: case studies from Slovakia and Czech Republic. *Acta Carsologica*, 41, 2–3, 169–192.
- Berenguer Sempere F., Gómez-Lende M., Serrano E. & de Sanjosé-Blasco J.J., 2014: Orthothermographies and 3D models as potential tools in ice cave studies: the Peña Castil Ice Cave (Picos de Europa, Northern Spain). *International Journal of Speleology*, 43, 1, 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.
- Caneve E.P., Forti P., Naseddu A., Ottelli L. & Tedeschi R., 2011: Laser scanning technology for the hypogean survey: the case of Santa Barbara Karst System (Sardinia, Italy). *Acta Carsologica*, 40, 1, 65–77.
- Canave E.P., Tedeschi R. & Forti P., 2009^a: The caves of Naica – laser scanning in extreme underground environments. *The American Surveyor*, 6, 2, 3–10.
- Caneve E.P., Tedeschi R., Forti P. & Uccelli F., 2009^b: Laser Scanning Use in Cave Contexts: the Cases of Castellana and Santa Barbara (Italy) and Naica (Mexico). In: White W.B. (Ed.): Proceedings of the 15th International Congress of Speleology (July 19–26, 2009, Kerrville, Texas, USA), 3, 2061–2067.
- Droppa A., 1972: Kras skupiny Sivého vrchu v Západných Tatrách. *Československý kras*, 23 (1971), 77–98.
- Droppa A., 1973: Prehľad preskúmaných jaskýň na Slovensku. *Slovenský kras*, 11, 111–157.
- Dublyansky Y.V. 1997: Hydrothermal Cave Minerals. In: Hill C. & Forti P.: Cave Minerals of the World. NSS, Huntsville, Alabama, USA, 252–255.
- Dujčik J., 1984: Výsledky hydrogeologického prieskumu Chočských vrchov. In: Hanzel V. (Ed.): Puklinové a puklinovo-krasové vody a problémy ich ochrany. Zborník referátov z VIII. celoštátnej hydrogeologickej konferencie (Račkova dolina – Západné Tatry, 6. – 8. 6. 1984). GÚDŠ, Bratislava, 53–60.
- Filo I., Buček S. & Siráňová Z., 2009: Litofaciálne členenie borovského súvrstvia podtatranskej skupiny (oravský paleogén) 1:50 000. ŠGÚDŠ, Bratislava.
- Franko O., 2002: Aktuálne názory na hydrogeologickú štruktúru minerálnych vôd v Lúčkach. *Podzemná voda*, 8, 2, 123–132.
- Franko O., Gazda S. & Michalíček M., 1975: Tvorba a klasifikácia minerálnych vôd Západných Karpát. GÚDŠ, Bratislava, 230 p.
- Gašinec J., Bella P., Gašincová S. & Imrezeová A., 2012^a: Digitálny výškový model podlahových ľadových povrchov v Dobšinskej ľadovej jaskyni. *Slovenský kras*, 50, 1, 31–40.
- Gašinec J., Gašincová S., Černota P. & Staňková H., 2012^b: Uses of terrestrial laser scanning in monitoring of ground ice within Dobšinská Ice Cave. *Inžinieria Minerálna*, 13, 2, 31–42.
- Gašinec J., Gašincová S. & Gergelová M., 2012^c: Tvorba priestorového modelu Dobšinskej ľadovej jaskyne a jeho pripojenie na JTSK03. *Geodetický a kartografický obzor*, 58, 9, 218–223.
- González-Aguilera D., Muñoz-Nieto A., Gómez-Lahoz J., Herrero-Pascual J. & Gutierrez-Alonso G., 2009: 3D Digital Surveying and Modelling of Cave Geometry: Application to Paleolithic Rock Art. *Sensors*, 9, 2, 1108–1127.
- Gross P., 1980^a: Tektonika. In: Gross P., Köhler E. (Eds.), Biely A., Franko O., Hanzel V., Hricko J., Kupčo G., Papšová J., Priečhodská Z., Szalaiová V., Snopková P., Stránska M., Vaškovský I. & Zbořil, L.: Geológia Liptovskej kotliny. GÚDŠ, Bratislava, 116–121.
- Gross P., 1980^b: Geologická mapa Liptovskej kotliny 1:50 000. In: Gross P., Köhler E. (Eds.), Biely A., Franko O., Hanzel V., Hricko J., Kupčo G., Papšová J., Priečhodská Z., Szalaiová V., Snopková P., Stránska M., Vaškovský I. & Zbořil, L.: Geológia Liptovskej kotliny. GÚDŠ, Bratislava.
- Grussenmeyer P., Cazalet B., Burens A. & Carozza L., 2010^a: Close range terrestrial laser scanning and photogrammetry for the 3D documentation of the Bronze age cave «les Fraux» in Périgord, France. In: Anreiter P., Goldenberg G., Hanke K., Krause R., Leitner W., Mathis F., Nicolussi K., Oeggl K., Pernicka E., Prast M., Schibler J., Schneider I., Stadler H., Stöllner T., Tomedi G. & Toppe P. (Eds.): Mining in European History. Special Conference of the SFB HiMAT (November 12–15, 2009, Innsbruck, Austria), 411–421.
- Grussenmeyer P., Landes T., Alby E. & Carozza L., 2010^b: High Resolution 3D Recording and Modelling of the Bronze Age Cave “les Fraux” in Périgord (France). *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 5, 262–267.
- Hök J., Bielik M., Kováč P. & Šujan M., 2000: Neotektonický charakter územia Slovenska. *Mineralia Slovaca*, 32, 5, 459–470.
- Chandelier L. & Roche F., 2009: Terrestrial laser scanning for paleontologists: the Tautavel cave. In: Proceedings of the XXII CIPA Symposium “Digital

- Documentation, Interpretation & Presentation of Cultural Heritage" (October 11–15, 2009, Kyoto, Japan), 5 p. [<http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/kyoto/41.pdf>]
- Káčer Š., Antalík M., Lexa J., Zvara I., Fritzman R., Vlachovič J., Bystrická G., Bordianska M., Madarás J., Nagy A., Maglay J., Ivanička J., Gross P., Rakús M., Vozárová A., Buček S., Boorová D., Šimon L., Mello J., Polák M., Bezák V., Hók J., Teťák F., Konečný V., Kučera M., Žec B., Elečko M., Hraško L., Kováčik M. & Pristaš J., 2005: Digitálna geologická mapa Slovenskej republiky M 1:50 000. ŠGÚDŠ, Bratislava. [<http://apl.geology.sk/mapportal/#/aplikacia/1>]
- Klago M., 1969: Lúčky – kúpele – štruktúrny balneologický vrt BJ-101, predbežný HGP. Manuskript. Geologická správa, Geofond, Bratislava, 39 s. (archívne číslo 21075).
- Klago M., 1984: Lúčky – zdroje termominerálnych vôd. In: Dovina V. (Ed.): Po obyčajných a minerálnych podzemných vodách Liptovskej kotliny a prilahlých pohorí. Hydrogeologický sprievodca VIII. celoštátnej hydrogeologickej konferencie (Račkova dolina – Západné Tatry, 6. – 8. 6. 1984). GÚDŠ, Bratislava, 67–70.
- Klimchouk A., 2007: Hypogene Speleogenesis: Hydrological and Morphogenetic Perspective. National Cave and Karst Research Institute, Special Paper, 1, Carlsbad, NM, 106 p.
- Klimčuk A.B., 2013: Gipogennyj speleogenez, ego gidrogeologičeskoe značenie i roľ v evolucii karsta. Ukrainiskij institut speleologii a karstologii, Simferopol', 180 p.
- Králiková S., Vojtko R., Sliva L., Minár J., Fügenschuh B., Kováč M. & Hók J., 2014: Cretaceous – Quaternary tectonic evolution of the Tatra Mts (Western Carpathians): constraints from structural, sedimentary, geomorphological, and fission track data. *Geologica Carpathica*, 65, 4, 307–326.
- Kullman E. & Zakovič M., 1974: Hydrogeológia Chočského pohoria. Západné Karpaty – séria hydrogeológia a inžinierska geológia, 1, GÚDŠ, Bratislava, 65–113.
- Lerma J., Navarro S., Cabrelles M. & Villaverde V., 2010: 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, 3, 499–507.
- Maglay J., Halouzka R., Baňacký V., Pristaš J., Janočko J. & Hók J., 1999: Neotektonická mapa Slovenska 1:500 000. Geologická služba SR, Bratislava.
- Mazúr E., 1980: Typologické členenie reliéfu. In: Mazúr E. (Ed.): Atlas SSR, IV. Povrch, mapa 12 (1:500 000). SAV – SÚGK, Bratislava, 50–51.
- Mazúr E., Činčura J. & Kvitkovič J., 1980: Geomorfológia. In: Mazúr E. (Ed.): Atlas SSR, IV. Povrch, mapa 11 (1:500 000). SAV – SÚGK, Bratislava, 46–47.
- McFarlane D.A., Buchroithner M., Lundberg J., Petters C., Roberts W. & Van Rentergen G., 2013: Integrated three-dimensional laser scanning and autonomous drone surface-photogrammetry at Gomantong Caves, Sabah, Malaysia. In: Filippi M. & Bosák P. (Eds.): Proceedings of the 16th International Congress of Speleology (July 21–28, 2013, Brno, Czech Republic), 2, 317–319.
- Milius J. & Petters C., 2012: Eisriesenwelt – From Laser Scanning to Photo-Realistic 3D Model of the Biggest Ice Cave on Earth. In: Jekel T., Car A. & Strobl J. (Eds.): GI-Forum 2012: Geovisualization, Society and Learning (July 4–6, 2012, Salzburg, Austria), 513–523.
- Nemčok J. (Ed.), Bezák V., Biely A., Gorek A., Gross P., Halouzka R., Janák M., Kahan Š., Kotaňski Z., Lefeld J., Mello J., Reichwalder P., Raczkowski W., Roniewicz P., Ryka W., Wieczorek J. & Zelman J., 1994: Geologická mapa Tatier 1:50 000. GÚDŠ, Bratislava.
- Plan L., Roncat A. & Marx G., 2013: Detailed morphological analysis Palaeotraum gallery using terrestrial laser scanner (Dachstein-Mammuthöhle, Upper Austria) In: Filippi M. & Bosák P. (Eds.): Proceedings of the 16th International Congress of Speleology (July 21–28, 2013, Brno, Czech Republic), 2, 399–401.
- Polák M. (Ed.), Poftaj M., Filo I., Broska I., Kohút M., Mello J., Bezák V., Teťák F., Gross P., Biely A., Rakús Š., Hók J., Vozár J., Nagy A. & Maglay J., 2008: Prehľadná geologická mapa Slovenskej republiky 1:200 000. Mapový list 26 – Žilina. ŠGÚDŠ, Bratislava.
- Roncat A., Dublyansky Y., Spötl C. & Dorninger P., 2011: Full-3D Surveying of Caves: A Case Study of Märchenhöhle (Austria). In: Marschallinger R. & Zobl F. (Eds.): Mathematical Geosciences at the Crossroads of Theory and Practice. Proceedings of the International Association for Mathematical Geosciences (IAMG) conference (September 5–9, 2011, Salzburg, Austria), 1393–1403.
- Röller K. & Trepmann C.A., 2003: Stereo32, software. Ruhr Universität, Bochum, Germany. [<http://www.ruhr-uni-bochum.de/hardrock/downloads.html>]
- Silvestre I., Rodrigues J., Figueiredo M. & Veiga-Pires C., 2013: Cave chamber data modeling and 3D Web visualization. *Information Visualisation*, 4, Proceedings of the 17th International Conference on Information Visualisation (July 16–18, 2013, London, UK), 468–473.
- Spötl C., Dublyansky Y., Meyer M. & Mangini A., 2009: Identifying low-temperature hydrothermal karst and palaeowaters using stable isotopes: a case study from an alpine cave, Entrische Kirche, Austria. *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)*, 98, 3, 665–676.
- Valentová K., Böhmová D. & Borovička V., 2007: Mapování Zbrašovských aragonitových jeskyní s využitím 3D skeneru ILRIS 36D a fotogrammetrického měření. *Acta Montanistica Slovaca*, 12, 3, 581–584.
- Vozárik P., 1983: Kras Sivého vrchu a Babiak. In: Hlaváč J., Hochmuth, Z., Vozárik P. & Valaštiak M. (Eds.): Exkurzný sprievodca krasom Západných Tatier a Chočských vrchov (24. jaskyniarsky týždeň SSS), 7–11. Príloha Spravodaja SSS, 14, 1.

Summary: The 3D digital model of the chamber and side parts of the Dúpnica Cave is a useful visualisation tool for a detailed study of its morphology, structural geological discontinuities, and post-processing of several quantitative morphometric parameters. The cave is formed in Middle Triassic limestone (Hronic Unit). Its origin is associated with two distinct fault zones: ENE-WSW fault leading through the basin part of the Suchý potok Brook valley near Liptovské Matiašovce Village (Matiašovce Fault), which is parallel with the Choč Fault (the fault zone along the SE edge of the Chočské vrchy Mts.), and the Suchá dolina Valley fault of NNE-SSW direction (Fig. 1 and 7). The upper part of the cave consists of a large chamber with vertical blind chimneys and cupola-like cavities (Fig. 2). The morphology of this voluminous underground space was more detailed studied based on a terrestrial laser scanning (Fig. 3–6). The original solutional morphology of the chamber was remodelled by breakdown and frost weathering. Based on vertical floor tubes and wall half-tubes (so-called feeders) in the smaller lateral passage and numerous small calcite crystals, this cave probably originated by corrosion of thermal water ascending along steep faults (hypogene speleogenesis). It was probably formed by waters ascending along ENE-WSW fault. The end of its hypogenic developmental phase and the relative uplift of its underground spaces was most likely induced by the activity of NNE-SSW fault (the height position of the cave corresponds to the surface of uplifted block of Palaeogene rocks at the Kvačianske lúky meadow area, west from the lower part of Suchá dolina Valley). This indicates the change of stress field

from the approximately N-S oriented extension to the extension oriented approximately in the E-W direction. Both faults, as the planes of weakness facilitated processes of breakdown and frost weathering, subsequently controlling the remodelling of underground spaces. The Dúpnica Cave can be included in the group of corrosion caves of the Western Carpathians

Mts. originated by waters ascending along faults (Bella & Bosák, 2012). It represents a drainage outlet fragment of fractured and karstified carbonate aquifer of deeper groundwater circulation related to the Matiašovce Fault activity (with the infiltration area in higher lying structures of carbonates in the southwestern part of the Západné Tatry Mts.).