

LIDAROVÉ DÁTA PRI VÝSKUME ZÁVRTOV NA PLOŠINÁCH KUCHYNSKO-OREŠANSKÉHO KRASU

Laura Dušeková*, Alexander Lačný**, Michal Veselský***,
Juraj Papčo****, Michal Šujan*****

* Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky, Správa Národného parku Malá Fatra,
Hrnčiarska 197, 013 03 Varín, Slovensko, laura.dusekova@sopsr.sk

** Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky, Správa Chránenej krajinej oblasti Malé Karpaty,
Štúrova 115, 900 01 Modra, Slovensko, alexander.lacny@sopsr.sk

*** ArcGEO Information Systems, Kutuzovova 13, 831 01 Bratislava, Slovensko, veselsky@arcgeo.sk

**** STU v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra geodetických základov,
Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovensko, juraj.papco@stuba.sk

***** Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, Katedra geológie a paleontológie,
Ilkovičova 6, 84215 Bratislava, Slovensko, miso@equis.sk

LiDAR data in the research of dolines on the plateaus of the Kuchyňa-Orešany Karst

The paper presents the usage of LiDAR data as a basemap for spatial analyses in geographical informational systems (GIS) to identify count, depth and perimeter of dolines in the karst area in the Little Carpathian Mountains (Malé Karpaty in Slovak). Specifically, three karst plateaus were subjects of the study: Biela skala, Dlhý vrch and Komberek. The aim of the paper is to provide a GIS comparison of the location and dimensions of dolines identified using LiDAR data and data obtained from fieldwork. Application of the Fill function in ArcMap 10.1 allowed the identification 91% of dolines originally recognized by the field research. However, comparison between depths and perimeters of identified depressions with those in-situ measured, has not provided such a satisfying result, but it gets better by excluding outliers from analysis. The paper should point out possible differences in the results of GIS analysis compared to in-situ measurements and draw attention especially to those who do not have an opportunity to compare the LiDAR-based results with field observations.

Key words: LiDAR, GIS, dolines, Kuchyňa-Orešany Karst, the Little Carpathian Mountains, Western Slovakia

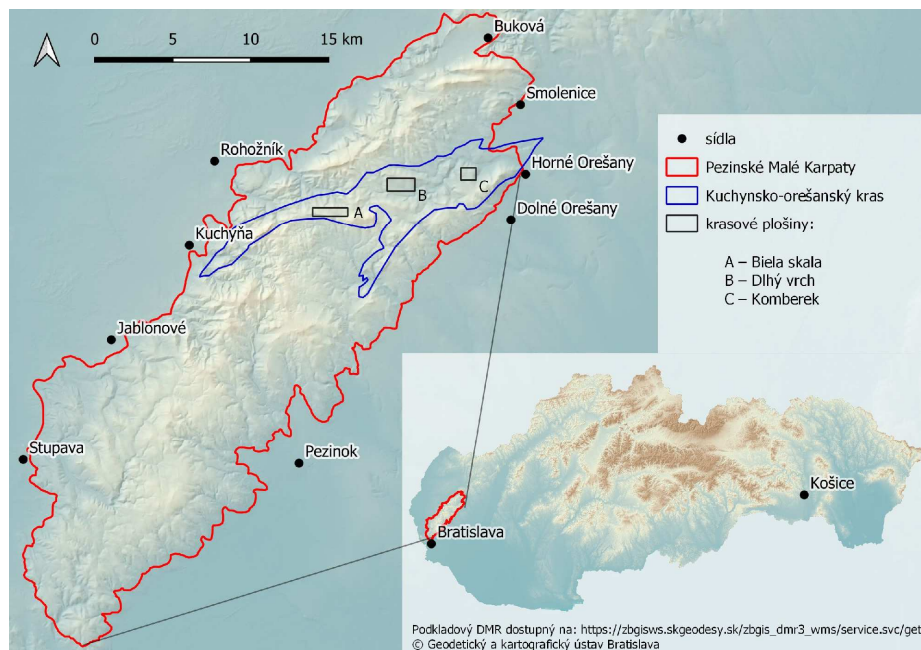
ÚVOD

Závrtý ako najšpecifickejšie povrchové formy krasového reliéfu predstavujú uzavreté depresie variabilných rozmerov s mierne naklonenými až takmer vertikálnymi bočnými stenami (Cvijic 1893, Sweeting 1972, Ford a Williams 1989, Williams 2004, Sauro 2012, Kranjc 2013 a ďalší). Výskum závrty v rámci krasových plošín patrí k aktuálnym témam slovenskej geomorfológie a geológie, najmä, ak v súčasnosti môžeme disponovať pomerne presnými digitálnymi modelmi reliéfu. Zdrojom týchto modelov sú často údaje získané pozemným alebo leteckým laserovým skenovaním, tzv. lidarom (z anglického Light Detection and Ranging), ktoré využívajú pulzný laserový lúč na meranie vzdialenosti medzi objektom, resp. povrchom a vysielačom – laserovým skenerom. Aplikácia týchto dát na rozsiahlejšie krasové územia môže identifikovať povrchové krasové formy na miestach, ktoré sú ťažko dostupné, prípadne pre rozsiahlosť územia nebolo možné fyzicky formy lokalizovať. Najlepším spôsobom, ako lidarové dáta otestovať, je porovnať ich s údajmi získanými pozemnými meraniami – v našom prípade získanými pomocou GPS prístroja a meracieho pásma. Väčšina autorov tohto článku sa v minulosti ve-

novala výskumom krasových plošín Kuchynsko-orešanského krasu v Malých Karpatoch (Lačný 2011, Veselský et al. 2014a a 2014b, Putiška et al. 2014 a Lačný et al. 2018). Počas týchto výskumov bolo geodeticky zameraných až 143 depresíí, z ktorých väčšinu tvoria závrty. Tento súbor dát považujeme za dostatočný vo vzťahu k cieľu tohto príspevku, ktorým je porovnanie in-situ zameraných parametrov závrto s lidarovými dátami a poukázanie na možné odchýlky pri testovaní spoľahlivosti zvolených metodických postupov.

IDENTIFIKÁCIA ÚZEMIA

Malé Karpaty sa nachádzajú v západnej časti Slovenskej republiky. Tvorené sú geomorfologickými podcelkami Devínske a Pezinské Karpaty, ktoré patria k Fatransko-tatranskej oblasti (Mazúr a Lukniš 1978). Kuchynsko-orešanský kras sa nachádza v severnej časti Pezinských Karpát medzi obcami Kuchyňa a Horné Orešany (obr. 1). Je vytvorený v mezozoických komplexoch fatrika a tatrika (Polák et al. 2012). Má značne pruhovitú stavbu, pričom sa striedajú karbonátové a nekarbonátové súvrstvia, čo limituje vývoj a rozsah krasu. V minulosti sa Kuchynsko-orešanský kras opisoval v rámci Smolenického krasu (Droppa 1952), od roku 1974 je považovaný za samostatnú regionálnu jednotku krasu Malých Karpát (Stankovičský 1974). Vnútorne sa člení na južnú časť, kde je viazaný na karbonáty tatrika, a severnú časť vytvorenú v karbonátoch fatrika. Povrchový kras je zastúpený najmä závrtní, ponormi, vyvieracškami a miestami sa vyskytujúcimi škrapami. Podzemný kras je charakteristický jaskyňami a priepasťami (Lačný 2012).



Obr. 1. Vymedzenie skúmaného územia Kuchynsko-orešanského krasu na základe mapy krasových území v zmysle Mittera (1983)

Upravené podľa podkladového DMR, dostupného na: https://zbgisws.skgeodesy.sk/zbgis_dmr3_wms/service.svc/get

V rámci geomorfologického vymedzenia Kuchynsko-orešanského krasu evidujeme tri významné krasové plošiny: Biela skala (561 m n. m.), Dlhý vrch (481 m n. m.) a Kombok (409 m n. m.). Krasové závrty na všetkých plošinách vykazujú znaky lineárneho usporiadania. Z geologického hľadiska sú podloží závrto horiny vysokých vápencov a dolomitov na kontakte s karpatským keuprom geologickej jednotky fatrika, tzv. vysokého príkrovu (Polák et al. 2011). Plošiny sú často prekryté kvartérnym deluviálnym pokryvom, čo niekedy znemožňuje detailné geologické mapovanie.

PREHLAD VÝSKUMOV PLOŠÍN V KUCHYNSKO-OREŠANSKOM KRASE

Krasová plošina na Dlhom vrchu

Oblasť kót Dlhý vrch (481 m n. m. a 474 m n. m.) je situovaná na severnom okraji rovnomennej krasovej plošiny s rozlohou 0,29 km². Geologické podložie je tvorené vysokým súvrstvom príkrovovej jednotky fatrika (Polák et al. 2011). Od roku 2011 intenzívne prebiehal výskum krasových javov tejto plošiny (Lačný 2011). Najzásadnejší výskum však priniesla práca Veselský et al. (2014a), kde bolo evidovaných 26 závrto. Výskum preukázal tektonickú predispozíciu na hlavnej závrtovej línii (18 závrto). Závrty sa vyskytujú aj na litologickom rozhraní sedimentov karpatského keupru a podložných dolomitov. Nachádzajú sa severozápadne od závrtovej línii. Vznik závrto Orešanská sonda (obr. 2A) súvisí s tektonickou poruchou SZ–JV smeru, na ktorej sú situované Orešanská vyvieracia, Orešanská sonda a skupinka dvoch plytkých závrto nachádzajúcich sa 300 m na SZ od Orešanskej sondy (Potočný et al. 2016).

Krasová plošina na Bielej skale

V blízkosti Bielej skaly nachádzajúcej sa severozápadne od obce Píla, bolo lokalizovaných 41 závrto (obr. 10) – Veselský et al. (2014b). Tie sa nachádzajú v plytkej úvaline 350 m severne od kóty Biela skala (561,3 m n. m.). Závrty sú situované v línii smerujúcej na SZ v dĺžke 1,45 km, miestami bezprostredne vedľa seba. Najväčší z nich dosahuje dĺžku 8 metrov a hĺbku 4 metre. Závrty tu dosahujú priemer 3 – 6 metrov, ich priemerná hĺbka je 0,3 – 4 m. Do štyroch závrto ústi ronová ryha (stružka) – ide o aktívne ponorové závrty. Podložie tvoria vápence vysokého súvrstvia. V minulosti tieto závrty opísali vo svojich prácach Novodomec (1967), Stankoviansky (1970 a 1974), Šmída (2008), a najnovšie Veselský et al. (2014b). Autori poslednej štúdie predpokladajú, že hlavná závrtová línii vznikla na zlomovej poruche SZ–JV orientácie.

Krasová plošina na Komboku

Vrch Kombok (Křč) (408,6 m. n. m), je lokalizovaný pri obci Horné Orešany – časť Majdanske. Je charakteristický strmými svahmi zo severu, východu a západu. Okolie vrcholu tvorí krasová plošina, na ktorej sa nachádza niekoľko desiatok krasových závrto, bahnovísk a vápenných jám. Tie boli zamerané v rokoch 2012 až 2014 (Lačný 2012 a Putiška et al. 2014). S cieľom ďalšieho výskumu genézy závrto bolo zameraných 76 depresií, ktorých časť okrem závrto tvoria aj tzv. vápenné jamy, ktoré môžu byť problémom pri identifikácii závrto. Niektorí ich môžu považovať dokonca za závrty. Nie je vylúčené, že niektoré závrty ako priro-

dzené depresie boli v minulosti využívané ako vápenné jamy. To potvrdil aj geofyzikálny výskum – magnetometria realizovaná na niekoľkých závrtoch v blízkosti závrtovej línie (Putiška et al. 2014). Závrty tu dosahujú priemer 4 – 11 m a hĺbku 0,5 – 3 m. Nájdu sa však aj väčšie závrty s priemerom 26 m a hĺbkou 10 m (obr. 2, časť B). Z pohľadu genézy ide zväčša o korozívne závrty, kde prebiehalo postupné rozpúšťanie karbonátu na litologických a tektonických rozhraniach. K poznaniu podložia závrtoch prispel aj geofyzikálny výskum, ktorý verifikuje pôvodné interpretácie o vzniku závrtoch (Putiška et al. 2014 a Lačný et al. 2018). Hlavná závrtovej línia vznikla na výraznej zlomovej poruche SZ-JV smeru. Taktiež tu možno nájsť niekoľko závrtoch, ktoré vznikali na litologických rozhraniach medzi strednotriasovými karbonátmi a karpatským keuprom (ZKO55 – obr. 4).



Obr. 2. časť A – Korozívny závrť Orešanská sonda, časť B – Najväčší závrť krasovej plošiny Komberek (ZKO28)

METODIKA

S cieľom skúmania závrtoch vzniklo viacero metodických postupov venujúcich sa nielen snahe charakterizovať ideálne parametre pre geometrický tvar, ale aj snahe charakterizovať závrty ako súčasť komplexného geosystému vo vzťahu ku geologickým, geomorfologickým, hydrologickým, klimatickým, pedologickým a biogeografickým vlastnostiam krajiny (Williams 1972, Castiglioni 1991, Bondesan et al. 1992 a ďalší). So zdokonaľovaním metód diaľkového prieskumu Zeme pribúdajú aj metódy využívajúce takto získané údaje, v našom prípade lidarové dáta, na identifikáciu geomorfologických foriem. Presnosť týchto dát pri identifikácii morfometrických parametrov závrtoch je možné overiť komparáciou s údajmi získanými pozemnými meraniami.

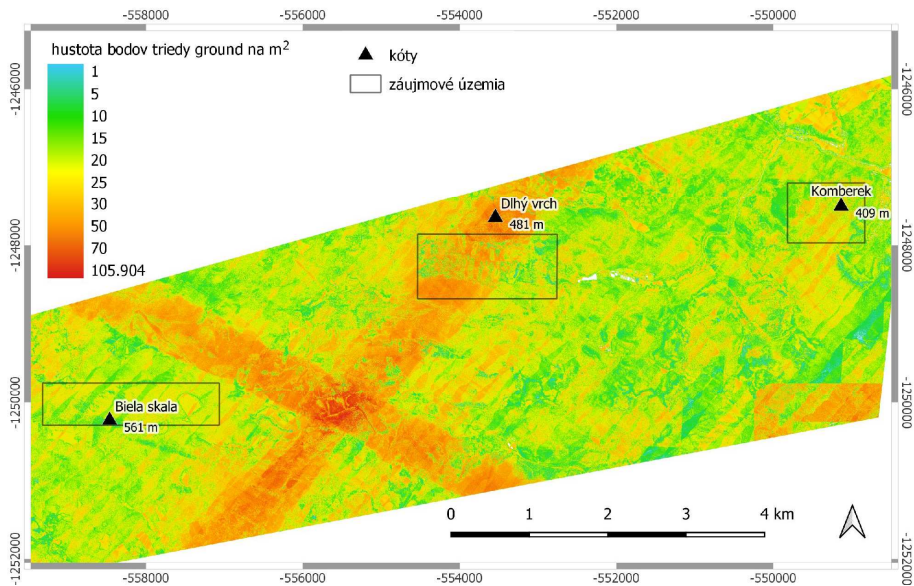
Porovnanie už známych a in-situ zameraných depresii na záujmových krasových plošinách s depresiami zistenými analýzou DTM (Digital Terrain Model, resp. digitálny model terénu – DMT) vytvoreného z lidarových dát bolo vykonané pomocou geografických informačných systémov (ďalej GIS), konkrétne v prostredí ArcMap 10.1. Už pri transformácii DTM na tieňovaný reliéf (*hillshade*) s parametrami azimut = 315, sklon = 45°, resp. pri vyextrahovaní vrstevníc, bola väčšina zameraných závrtoch dobre viditeľná. Vzhľadom na množstvo závrtoch sme pre urýchlenie procesu využili nástroje hydrologického modelovania, konkrétne Fill. Tento nástroj predstavuje jednoduchý postup pre identifikáciu terénnych depresii a je často využívaný pri hľadaní nových závrtoch automatizovanými a poloautomati-

zovanými procesmi (Miao et al. 2013, Kobal et al. 2015, Svoboda 2016 a Hofierka et al. 2018). Tento postup bol aplikovaný analogicky k prácam autorov Veselský et al. (2014a a 2014b), z ktorých sme čerpali údaje o závrtoch na plošine Biela Skala a Dlhý vrch. Pre čo najadekvátnejšie porovnanie a interpretáciu výsledkov z lidarových dát je dôležité zachovať rovnaký postup. Nástroj Fill vyplní depresie v DTM (Argis help 2020) pre potreby vytvorenia korektného hydrologického modelovania, čím vzniká DTM zbavený bezodtokových depresii (ďalej uvádzané FILL DTM). Použitím nástroja Raster Calculator – odčítaním FILL DTM od pôvodného DTM sme dostali raster znázorňujúci hĺbku identifikovaných depresii. Tieto boli po reklasifikácii rastra vektorizované bez zjednodušovania polygónov. Vzhľadom na to, že cieľom je porovnanie už zameraných závrtoch so známymi charakteristikami s charakteristikami depresii identifikovaných v GIS na podklade lidarových dát, z identifikovaných depresii sme vyseletovali tie, ktoré sa polohovo prekrývali s bodovou vrstvou závrtoch zameraných pozemnými meraniami. Niektoré identifikované depresie, predstavovali dva alebo aj viacero in-situ zameraných závrtoch zlúčených do jedného polygónu. Uvedený výsledok vznikol z dôvodu, že tieto závrty sa nachádzali blízko seba a boli oddelené len nevýraznou eleváciou pod úroveň terénu, z ktorej ešte prebieha odtok ďalej do krajiny a nezhrmažďuje sa. Takto zlúčené depresie boli dodatočne rozdelené na základe vizuálnej interpretácie DTM z lidarových dát a fyzicky zameraných závrtoch. Na výsledné polygóny znázorňujúce identifikované depresie sme využili nástroj Zonal statistics as a table, ktorý identifikovaným depresiam (polygónom) priradil maximálne hodnoty rastra hĺbok pre každý polygón. Taktiež sme identifikovaným depresiam pridali ďalší atribút – vypočítaný obvod. Tieto údaje boli spojené na základe priestorovej lokálizácie s najbližším pozemne zameraným závrtoch. V prípadoch, kde existovali polohové odchýlky vzniknuté nepresnosťami pri meraní GPS v teréne, boli tieto závrty manuálne na základe vizuálnej interpretácie v GIS posunuté. Údaje boli následne exportované do programu Excel, kde prebiehali ďalšie analýzy (korelačná a regresná) a porovnania s už známymi charakteristikami závrtoch.

POUŽITÉ PODKLADY

Údaje leteckého laserového skenovania z predmetného územia boli vytvorené v rámci Projektu leteckého laserového skenovania Slovenskej republiky realizovaného pod záštitou Úradu geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky (Leitmannová a Kalivoda 2018) v jarnom období roku 2018. Poskytnuté údaje boli vo forme neklasifikovaných mračien bodov s vertikálnou presnosťou 15 cm a horizontálnou 30 cm (vo formáte LAS v.1.4) v polohovom súradnicovom systéme TM-34 a elipsoidických výškach vzhľadom ku elipsoidu GRS-80 (Leitmannová a Kalivoda 2018). Priemerná hustota skenovania bola 100 bodov/m². Aby sme mohli vytvoriť DTM, boli tieto údaje spracované nasledovným postupom. V prvom kroku boli zo všetkých naskenovaných mračien bodov pomocou softvérového balíka LAStools v.190604 (<http://lastools.org/>) a jeho nástroja lasclip vyselektované príslušné mračná bodov pre našu záujmovú lokalitu. V ďalšom kroku bola realizovaná klasifikácia údajov primárne do tried „never classified“, „unclassified“ a „ground“ v zmysle štandardu Americkej spoločnosti pre fotogrametriu a diaľkový prieskum Zeme (ASPRS 2013). Tento proces bol iteratívne vykonávaný v softvérovom balíku Trimble INPHO Scop++ v.5.6. Priemerná hustota bodov v triede „ground“ bola po klasifikácii približne 30 bodov na m². Body triedy „ground“ boli následne transformované do polohového súradnicového systému S-JTSK (realizácia JTSK03)

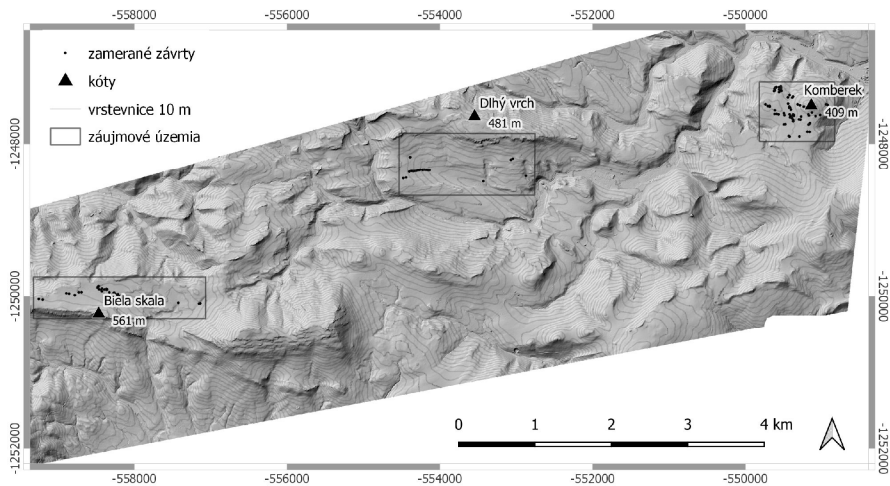
a výškového systému Bpv. Na záver bol z takto spracovaných údajov následne v softvérovom prostredí Surfer v.13 pomocou interpolačnej funkcie Kriging so základnými nastaveniami vytvorený digitálny model terénu s veľkosťou pixla 1 m, na ktorom sa vykonávali ďalšie analýzy. Napriek celkovej vysokej hustote skenovania, resp. bodov klasifikovaných do triedy „ground“ (obr. 3) vykazuje výsledný model v niektorých hlavne husto zarastených oblastiach vyššiu mieru šumu, ktorá sa prejavuje zvýšenou mierou výskytu umelých artefaktov vo forme tzv. „bull eyes“. Artefakty však nevznikli v dôsledku nekvalitnej interpolácie alebo nedostatku dát, ale v dôsledku nedostatočného, neúplného odstránenia vegetácie, resp. nedokonalého odstránenia klamlivých bodov (šumu), ktoré sa nachádzali v blízkosti skutočného terénu (nad alebo pod skutočným terénom).



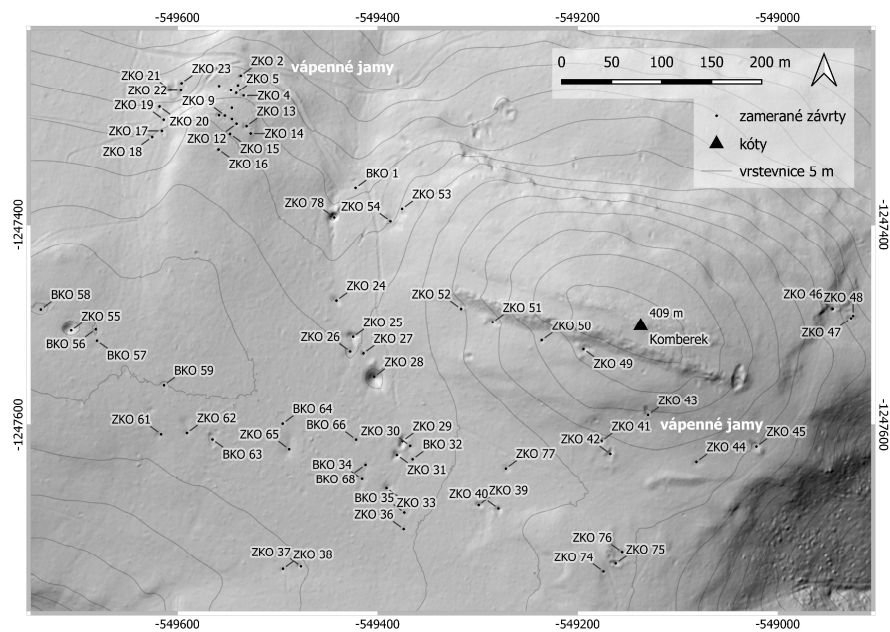
Obr. 3. Hustota bodov triedy „ground“ s vyznačením záujmových území

Celková plocha DTM riešeného územia spracovaného z lidarových dát dosahuje cca 45,871 km², podrobnejšie sme sa však venovali najmä krasovým plošinám – Biela skala, Dlhý vrch a Komberek (obr. 4). Priemerná hustota bodov triedy „ground“ na m² na lokalite Biela skala bol 20,2, na lokalite Dlhý vrch 28,8 a na lokalite Komberek 21,4.

Zber dát pozemnými meraniami prebiehal od roku 2012 do roku 2019. Pri terénnom výskume bolo použitých viacero pomôcok: GPS zariadenie, laserový diaľkomer, meracie pásmo a fotoaparát. Ako podklady o závrtoch (ich polohe, hĺbke a obvode) pre prácu v GIS z lokality Komberek boli zozbierané údaje o 76 depresióch (Lačný et al. 2018) – obr. 5. Z uvedených depresí však niektoré nepredstavujú závrty, ale ide aj o vápenné jamy a tzv. „bahnoviská“ – tieto označujeme písmenom B (napr. BKO3). Keďže bahnoviská sú plytké depresie a nemajú v teréne výrazné geomorfologické hranice, informácie o ich hĺbke a obvode z tohto dôvodu absentujú. Hĺbka absentuje aj pri ZKO 46, kde sa nachádza jaskyňa Závrtovej priepasť, preto nebolo možné zmerať hĺbku pôvodného závrta.

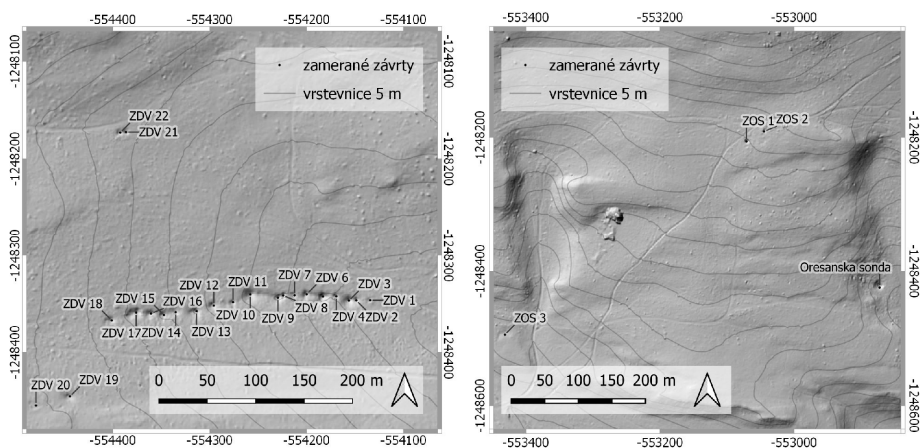


Obr. 4. Tieňovaný DTM s vyznačením záujmových území v súradnicovom systéme S-JTSK



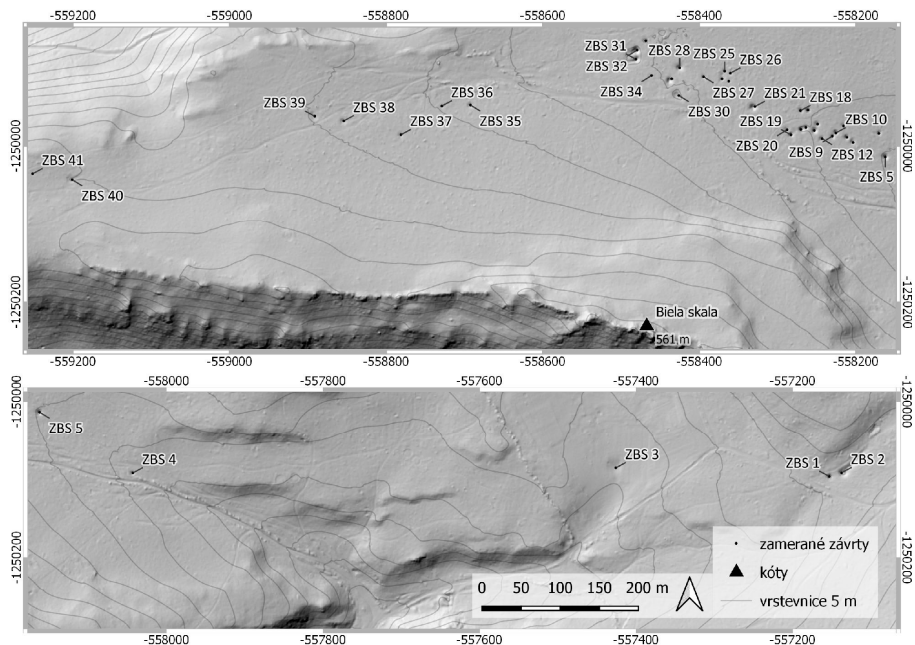
Obr. 5. Terestricky zamerané závrtý a antropogénne depresie na lokalite Kamberek na podklade *hillshaded* DTM v S-JTSK (spracované podľa Lačný et al. 2018)

Na lokalite Dlhý vrch boli využité charakteristiky 26 závrtov (obr. 6) získané z analýz vykonaných v GIS (Veselský et al. 2014a). Tieto závrtý autori polohovo zamerali zariadením GPS TRIMBLE PATHFINDER PRO-XRS (využívajúci DGPS signál) a na základe výškového bodového poľa zozbieraného pomocou univerzálnej meracej stanice Topcon GTS-105N vytvorili DTM s priestorovým rozlíšením $0,5 \times 0,5$ m, ktorý predstavoval vstupné údaje pre analýzy v GIS.



Obr. 6. Terestricky zamerané závrtv na lokalite Dlhý vrch na podklade *hillshaded* DTM v S-JTSK (spracované podľa Veselský et al. 2014a)

Z krasovej plošiny Biela skala je známych 41 závrtov (Veselský et al. 2014b) – obr. 7, ktoré boli polohovo zamerané pomocou GPS Archer Field PC. Pre lokalitu závrtov bol taktiež vytvorený DTM, avšak v rozlíšení 0,1 m na pixel na základe bodového poľa zozbieraného pomocou univerzálnej meracej stanice Topcon GTS105N.



Obr. 7. Terestricky zamerané závrtv na lokalite Biela skala na podklade *hillshaded* DTM v S-JTSK (spracované podľa Veselský et al. 2014b)

Parametre závrto (hlbka a obvod) na lokalite Komberek boli získané priamymi meraniami, čím by sa dala predpokladať najväčšia dôveryhodnosť dát. Pri meraniach priamo v teréne je však predpoklad vysokej miery subjektivity mapovateľa pri určovaní „hranice“ závrto, čomu sa pri analýzach v prostredí GIS dá vyhnúť. Parametre z lokalít Biela skala a Dlhý vrch považujeme, aj keď boli získané nepriamo, za porovnateľnejšie s našimi výsledkami, keďže pre ich odvodenie bola využitá rovnaká metóda ako v našej štúdii. Rozdielny bol len spôsob získania bodového poľa, z ktorého bol vytváraný DTM.

VÝSLEDKY

Výsledné hĺbky a obvody depresii identifikovaných v GIS na podklade DTM z lidarových dát môžeme vidieť v tabuľkách 1 – 4. Z plošiny Biela skala a Dlhý vrch sú výsledky lepšie interpretovateľné, keďže bola použitá rovnaká metóda pre identifikáciu závrto ako u autorov, ktorí sa týmto plošinám už v GIS venovali na podklade DTM zostrojeného z terestrických meraní (Veselský et al. 2014a a 2014b). Na lokalite Dlhý vrch bolo z celkového počtu zameraných závrto identifikovaných z DTM všetkých 26 – teda úspešnosť pri ich identifikácii na tejto lokalite predstavuje 100 %. Na lokalite Biela skala bola pri identifikácii závrto úspešnosť tiež stopercentná (identifikovaných 40/40 zameraných závrto a takisto aj pri bahniškách na lokalite Komberek (14/14 bahnišk). Na plošine Komberek však bolo identifikovaných 50 z 62 závrto (resp. vápenných jám), čo znižuje úspešnosť pri lokalizácii depresii na tejto lokalite na 81 %. Identifikované neboli závrty s označením ZKO-38, ZKO-47, ZKO-48, ZKO-50, ZKO-53, ZKO-54, ZKO-61 a vápenné jamy ZKO-6, ZKO-8, TKO-15, ZKO-18 a ZKO-19 (obr. 5). Priemerná úspešnosť pri lokalizácii závrto pomocou nástroja Fill tak celkovo na všetkých troch plošinách dosahuje 91 % (126/138 závrto). Pri pohľade na rozdiely medzi nameranými hĺbkami závrto, resp. ich obvodmi, už úspešnosť nie je taká vysoká. Absolútne hodnoty rozdielov identifikovaných depresii predstavujú v niektorých prípadoch aj viac ako 100 % hodnôt fyzicky zameraných závrto. Na lokalite Komberek (tab. 1) bola priemerná absolútna hodnota rozdielu hĺbok medzi zameranými závrmi a identifikovanými depresiami 0,61 m, čo je v priemere 63 % rozdiel v porovnaní s nameranými hodnotami (obr. 8). Priemer absolútnej hodnoty rozdielu obvodov (obr. 9) dosahoval takmer 13 m, čo je približne 81 % v porovnaní so zameranými údajmi. V niektorých ojedinelých prípadoch bola hĺbka identifikovaných depresii väčšia ako hĺbka už zameraných závrto, v prevažnej väčšine to však bolo naopak. Vypočítaný obvod pri identifikovaných depresiiach bol naopak vo väčšine prípadov väčší ako reálne zameraný. Po vynechaní depresii, pri ktorých rozdiely dosiahli viac ako 100 % hodnoty parametrov závrto sa výsledné hodnoty rozdielov podstatne znížili. Bez týchto „outliers“ priemerné hodnoty rozdielov na lokalite Komberek dosahujú cca 64 % pri obvodoch a 60 % pri hĺbkach.

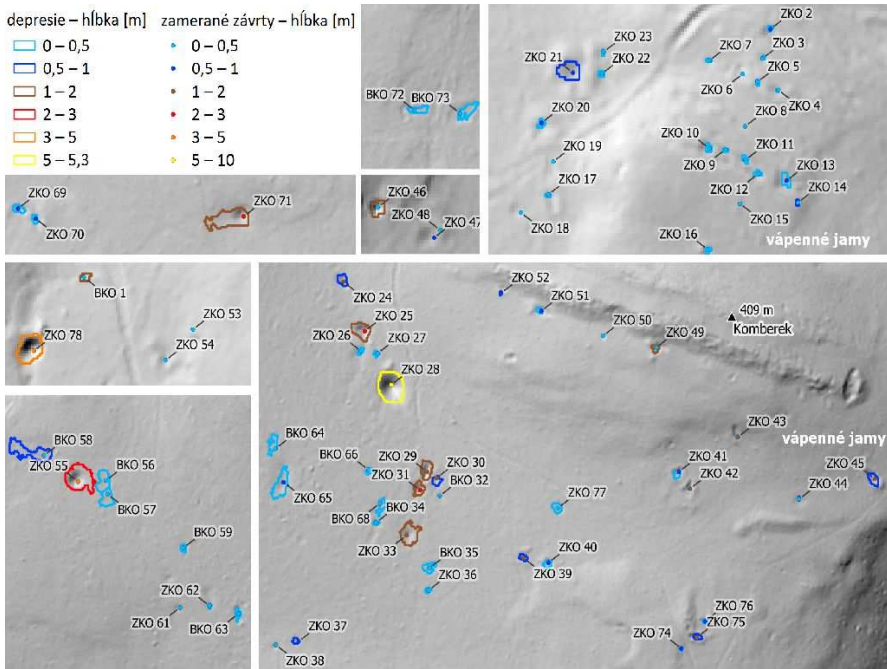
Korelačný koeficient medzi obvodmi získanými pozemným a distančným meraním dosiahol na tejto lokalite hodnotu 0,80 – teda ide o pomerne silnú lineárnu závislosť. Vzťah medzi obvodom získaným pozemným meraním (x) a dištančným meraním (y) možno vyjadriť vo forme $y = 1,3847x$, pričom vysvetľuje približne 63 % variability premenných so štandardnou odchýlkou 22,98 m. Úrovňová konštanta bola štatisticky nevýznamná. Pri hĺbkach korelačný koeficient dosiahol hodnotu 0,95, čo predstavuje veľmi tesnú lineárnu závislosť. Keďže aj v tomto prípade bola úrovňová konštanta štatisticky nevýznamná, vzťah je vyjadrený funkciou $y =$

$0,5741x$ (x = pozemné merania, y = dištančné merania), pričom vysvetľuje približne 90 % variability premenných so štandardnou odchýlkou 0,36 m.

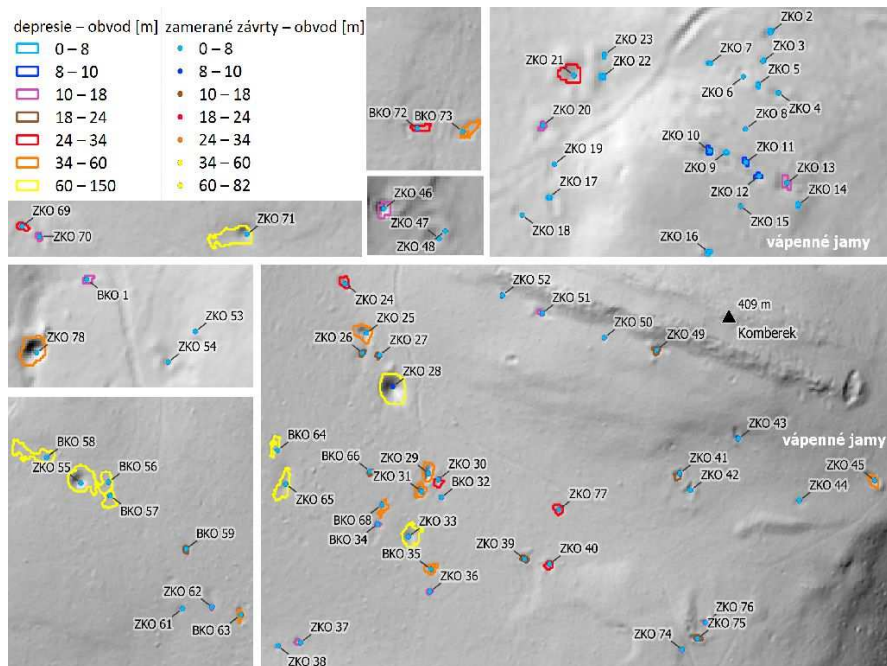
Prínosom na tejto lokalite je zistenie parametrov pri bahnskách (tab. 2), keďže ich zameranie v teréne je vzhľadom na ich nevýrazné hranice veľmi náročné a zatiaľ bola priamymi meraniami zaznamenaná iba ich poloha.

Tab. 1. Porovnanie identifikovaných depresí s fyzicky zameranými závrtni na lokalite Komberek (v m)

Označenie	Obvod závrty	Obvod depr.	Rozdiel abs.	Rozdiel %	Hĺbka závrty	Hĺbka depr.	Rozdiel abs.	Rozdiel %
ZKO 2	18,85	8,00	10,85	57,56	0,80	0,06	0,74	92,26
ZKO 3	6,28	4,00	2,28	36,31	0,30	0,07	0,23	78,07
ZKO 4	9,42	4,00	5,42	57,54	0,40	0,02	0,38	93,96
ZKO 5	6,28	6,00	0,28	4,46	0,40	0,05	0,35	88,21
ZKO 7	4,71	6,00	1,29	27,39	0,50	0,07	0,43	86,69
ZKO 9	4,71	6,00	1,29	27,39	0,30	0,02	0,28	92,60
ZKO 10	12,57	10,00	2,57	20,45	0,50	0,07	0,43	85,48
ZKO 11	3,14	10,00	6,86	218,47	0,30	0,10	0,20	67,78
ZKO 12	6,28	10,00	3,72	59,24	0,40	0,05	0,35	88,56
ZKO 13	12,57	16,00	3,43	27,29	1,00	0,10	0,90	90,45
ZKO 14	4,71	6,00	1,29	27,39	0,30	0,64	0,34	112,28
ZKO 16	3,14	8,00	4,86	154,78	0,20	0,04	0,16	81,38
ZKO 17	4,71	6,00	1,29	27,39	0,40	0,04	0,36	90,39
ZKO 20	12,57	12,00	0,57	4,53	0,80	0,09	0,71	88,86
ZKO 21	25,13	28,00	2,87	11,42	1,00	0,55	0,45	44,64
ZKO 22	6,28	8,00	1,72	27,39	0,40	0,07	0,33	81,85
ZKO 23	6,28	6,00	0,28	4,46	0,50	0,01	0,49	98,02
ZKO 24	12,57	34,00	21,43	170,49	1,50	0,70	0,80	53,12
ZKO 25	15,71	60,00	44,29	281,92	2,50	1,72	0,78	31,03
ZKO 26	12,57	20,00	7,43	59,11	0,50	0,14	0,36	72,65
ZKO 27	9,42	20,00	10,58	112,31	0,30	0,15	0,15	48,61
ZKO 28	81,68	84,00	2,32	2,84	10,00	5,32	4,68	46,85
ZKO 29	37,70	48,00	10,30	27,32	2,00	1,46	0,54	26,83
ZKO 30	15,71	30,00	14,29	90,96	1,50	0,51	0,99	65,81
ZKO 31	25,13	46,00	20,87	83,05	2,20	1,43	0,77	34,95
ZKO 33	31,42	82,00	50,58	160,98	1,50	1,73	0,23	15,31
ZKO 36	6,28	18,00	11,72	186,62	0,30	0,11	0,19	62,33
ZKO 37	12,57	18,00	5,43	43,20	1,00	0,52	0,48	48,23
ZKO 39	23,56	24,00	0,44	1,87	1,20	0,53	0,67	55,54
ZKO 40	18,85	26,00	7,15	37,93	0,80	0,39	0,41	51,43
ZKO 41	18,85	24,00	5,15	27,32	1,00	0,43	0,57	57,11
ZKO 42	21,99	8,00	13,99	63,62	1,50	0,14	1,36	90,51
ZKO 43	25,13	10,00	15,13	60,21	1,70	0,14	1,56	91,92
ZKO 44	21,99	8,00	13,99	63,62	0,50	0,60	0,10	20,42
ZKO 45	31,42	36,00	4,58	14,58	1,20	0,86	0,34	28,17
ZKO 46	21,99	18,00	3,99	18,14	-	1,12	1,12	-
ZKO 49	21,99	24,00	2,01	9,14	0,50	1,05	0,55	110,32
ZKO 51	31,42	18,00	13,42	42,71	1,00	0,31	0,69	69,49
ZKO 52	18,85	10,00	8,85	46,95	0,80	0,85	0,05	6,25
ZKO 55	15,71	131,39	115,68	736,32	3,50	2,70	0,80	22,81
ZKO 62	12,57	14,00	1,43	11,38	0,50	0,10	0,40	79,39
ZKO 65	15,71	84,00	68,29	434,69	0,60	0,48	0,12	19,32
ZKO 69	25,13	26,00	0,87	3,46	0,60	0,39	0,21	34,47
ZKO 70	12,57	18,00	5,43	43,20	0,80	0,23	0,57	71,59
ZKO 71	37,70	96,00	58,30	154,64	2,50	1,52	0,98	39,03
ZKO 74	9,42	12,00	2,58	27,39	0,60	0,10	0,50	83,30
ZKO 75	15,71	22,00	6,29	40,04	1,20	0,57	0,63	52,78
ZKO 76	9,42	16,00	6,58	69,85	1,00	0,29	0,71	71,50
ZKO 77	18,85	32,00	13,15	69,76	0,50	0,29	0,21	42,18
ZKO 78	31,42	48,00	16,58	52,77	4,50	3,51	0,99	22,03



Obr. 8. Porovnanie hĺbok identifikovaných depresií a zameraných závrťov na lokalite Kamberek

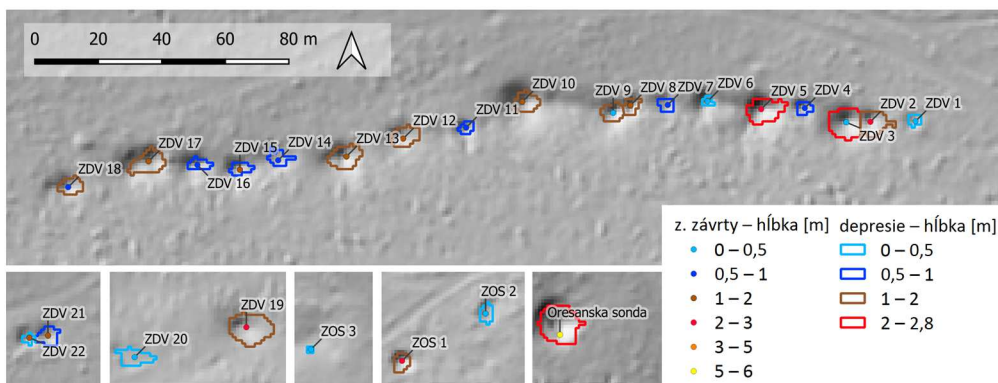


Obr. 9. Porovnanie obvodov identifikovaných depresií a zameraných závrťov na lokalite Kamberek

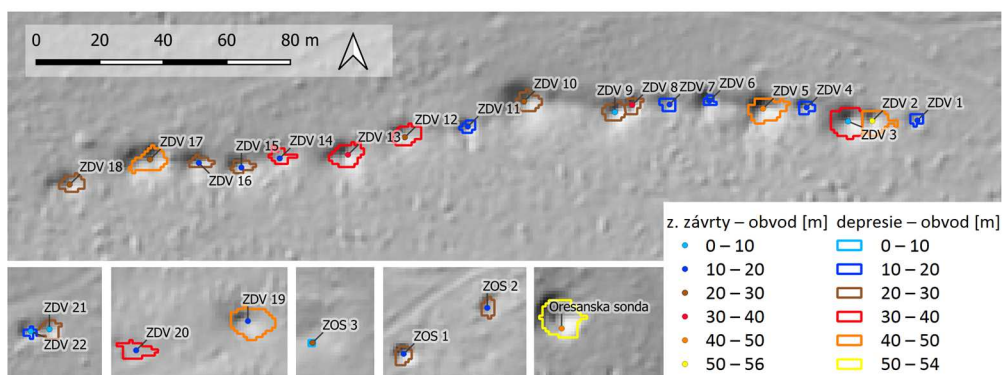
Tab. 2. Zistené parametre bahnovísk na lokalite Komberek (v m)

Označenie	Obvod	Hĺbka	Označenie	Obvod	Hĺbka
BKO 1	16	1,38	BKO 59	22	0,09
BKO 32	4	0,001	BKO 63	38	0,05
BKO 34	16	0,04	BKO 64	66	0,10
BKO 35	48	0,09	BKO 66	22	0,06
BKO 56	64,02	0,31	BKO 68	46	0,12
BKO 57	62,09	0,23	BKO 72	34	0,07
BKO 58	150	0,93	BKO 73	58	0,10

Na plošine Dlhý vrch, boli výsledné rozdiely hĺbok (obr. 10) a obvodov (obr. 11) o niečo menšie (tab. 3). Priemer absolútnej hodnoty rozdielu hĺbok závrto a identifikovaných depresii je 0,58 m, čo predstavuje približne 71 % hodnoty in-situ zameraných hĺbok. Túto percentuálnu hodnotu priemeru rozdielu však podstatne zvyšuje ZDV 9, pri ktorom bola zameraná hĺbka podľa kolektívu Veselský et. al. (2014a) 0,11 m, no hĺbka nami identifikovanej depresie až 1,33 m. Rozdiel medzi nimi tak predstavuje viac ako 10-násobok zameranej hodnoty, čo značne zvyšuje udávanú priemernú hodnotu. Pri vynechaní tohto údaju by priemerná hodnota rozdielu dosahovala necelých 28 %, čo je podstatne lepší výsledok v prospech lidarových dát. Podobné odchýlky, ktoré zvyšujú priemernú hodnotu rozdielov pozorujeme aj pri obvodoch. Pri závrtoch ZDV 3, ZDV 9, ZDV 19-22 predstavujú rozdiely viac ako 100 % pôvodnej hodnoty, pri závrte ZDV 9 je to dokonca viac ako štvornásobok obvodu udávaného autormi Veselský et. al. (2014a). Vzhľadom na to, priemer hodnoty absolútneho rozdielu obvodu na tejto lokalite dosahuje 11,33 m a približne 148 %. Vylúčením „outliers“ na lokalite Dlhý vrch by rozdiely vzhľadom na zamerané hodnoty predstavovali približne 30 % pri obvodoch a 28 % pri hĺbkach.



Obr. 10. Porovnanie hĺbok identifikovaných depresii a zameraných závrto na lokalite Dlhý vrch



Obr. 11. Porovnanie obvodov identifikovaných depresií a zameraných závrťov na lokalite Dlhý vrch

Tab. 3. Porovnanie identifikovaných depresií s fyzicky zameranými závrťmi na lokalite Dlhý vrch (v m)

Označenie	Obvod závrťu	Obvod depr.	Rozdiel abs.	Rozdiel %	Hĺbka závrťu	Hĺbka depr.	Rozdiel abs.	Rozdiel %
Oreš. sonda	47,12	54,00	6,88	14,60	6,00	2,74	3,26	54,32
ZOS 1	18,85	22,00	3,15	16,71	3,00	1,23	1,77	58,89
ZOS 2	12,57	22,00	9,43	75,02	0,50	0,39	0,11	21,58
ZOS 3	28,27	8,00	20,27	71,70	0,50	0,09	0,41	81,88
ZDV 1	12,25	16,00	3,75	30,61	0,38	0,45	0,07	17,20
ZDV 2	55,97	42,26	13,71	24,49	2,43	1,45	0,98	40,28
ZDV 3	1,89	39,74	37,85	2 002,51	0,00	2,42	2,42	0,00
ZDV 4	14,47	18,00	3,53	24,40	0,76	0,71	0,05	5,98
ZDV 5	40,89	44,00	3,11	7,61	2,39	2,14	0,25	10,32
ZDV 6	15,81	14,00	1,81	11,45	0,39	0,47	0,08	21,25
ZDV 7	16,38	18,00	1,62	9,89	0,53	0,56	0,03	5,23
ZDV 8	38,79	21,65	17,14	44,19	1,39	1,19	0,20	14,68
ZDV 9	4,59	26,46	21,87	476,53	0,11	1,33	1,22	1 106,55
ZDV 10	26,16	30,00	3,84	14,68	1,30	1,20	0,10	7,99
ZDV 11	16,91	18,00	1,09	6,45	0,81	0,66	0,15	18,14
ZDV 12	26,52	32,00	5,48	20,66	1,20	1,27	0,07	5,65
ZDV 13	32,28	40,00	7,72	23,92	1,68	1,61	0,07	4,08
ZDV 14	19,17	32,00	12,83	66,93	0,59	0,61	0,02	3,30
ZDV 15	18,28	24,00	5,72	31,29	1,01	0,68	0,33	32,75
ZDV 16	19,06	24,00	4,94	25,92	0,64	0,66	0,02	2,92
ZDV 17	27,37	42,00	14,63	53,45	1,13	1,18	0,05	4,28
ZDV 18	20,65	28,00	7,35	35,59	0,90	1,04	0,14	16,02
ZDV 19	15,71	50,00	34,29	218,27	3,00	1,37	1,63	54,28
ZDV 20	15,71	38,00	22,29	141,88	0,50	0,12	0,38	75,90
ZDV 21	7,85	27,78	19,93	253,90	1,20	0,79	0,41	34,02
ZDV 22	7,85	18,23	10,38	132,27	1,20	0,25	0,95	79,51

Existenciu závislosti medzi obvodmi získanými pozemným meraním a dištančným meraním potvrdzuje korelačný koeficient s hodnotou 0,43. Vzťah medzi týmito premennými možno vyjadriť funkciou $y = 0,39x + 20,365$ (x = pozemné merania, y = dištančné merania), ktorá však vysvetľuje len necelých 19 % variability premenných so štandardnou odchýlkou 10,89 m. Pri analýze hĺbok bola závislosť o niečo silnejšia, korelačný koeficient dosahuje hodnotu 0,62. Funkcia $y = 0,33x + 0,59$ (x = pozemné merania, y = dištančné merania) vysvetľuje 39 % prípadov so štandardnou chybou 0,54 m. Po vylúčení ZDV 3 a ZDV 9 (pri ktorých rozdiely

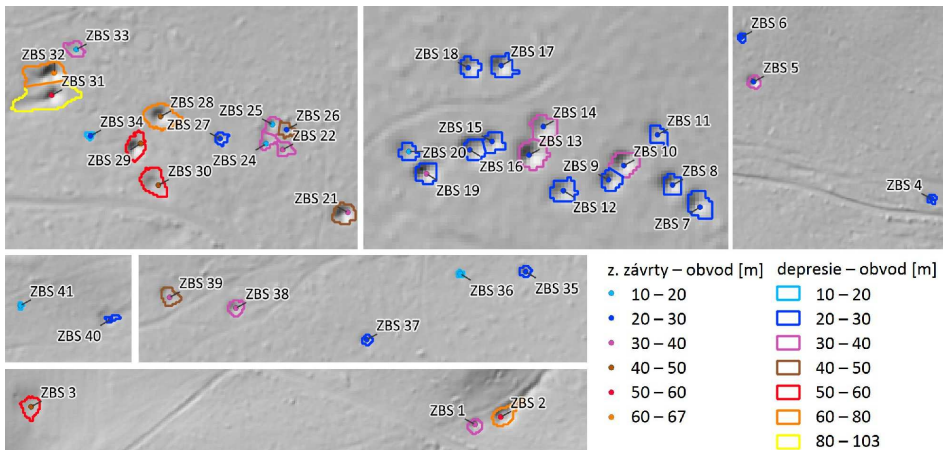
predstavovali extrémne hodnoty) z analýzy hĺbok, koeficient korelácie dosiahol hodnotu 0,85 a vzťah $y = 0,43x + 0,36$ vysvetľuje 72 % variability premenných so štandardnou odchýlkou 0,34 m. Vynechaním „outliers“ (ZDV 3, ZDV 9, ZDV 19-22) aj pri analýze obvodov dosiahol koeficient korelácie hodnotu 0,71, pričom vzťah $0,70x + 9,77$ vysvetľuje 50 % prípadov so štandardnou odchýlkou 8,6 m.

Na lokalite Biela skala (tab. 4) absolútne hodnoty rozdielu obvodov (obr. 12) dosiahli priemer 8,27 m a približne 31 %. Priemer absolútnej hodnoty rozdielov hĺbok (obr. 13) tu dosahuje 0,45 m, čo však predstavuje rozdiel priemerne až 262 %. Priemer by sa pohyboval okolo 23 %, no 10 závrto (ZBS 21-30 a ZBS 33) ho podstatnou mierou zvyšuje, keďže rozdiely predstavujú v niektorých prípadoch až viac ako 20-násobok hodnoty podľa Veselský et al. (2014b). Po vylúčení „outliers“ by rozdiely obvodov predstavovali približne 14 % a rozdiely hĺbok približne 22 % in-situ zameraných hodnôt.

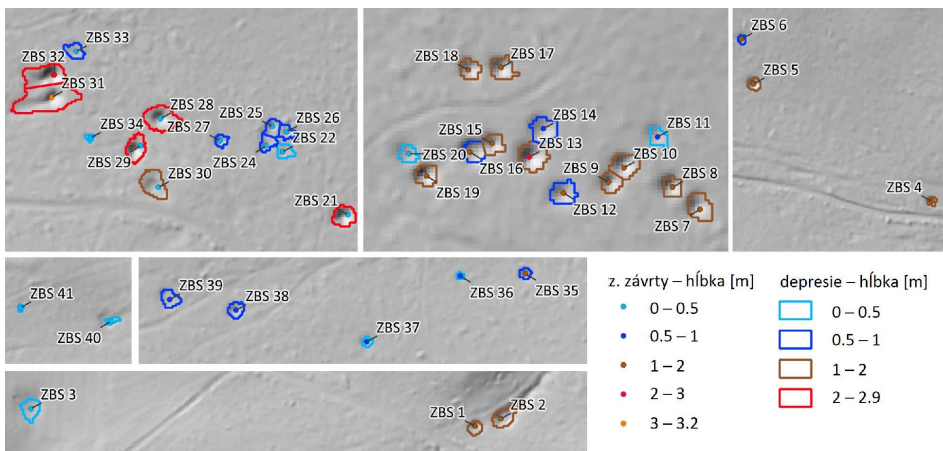
Tab. 4. Porovnanie identifikovaných depresí s reálne zameranými závrtnami na lokalite Biela skala

Označenie	Obvod závrtnu	Obvod depr.	Rozdiel bs.	Rozdiel %	Hĺbka závrtnu	Hĺbka depr.	Rozdiel abs.	Rozdiel %
ZBS 1	31,68	36,00	4,32	13,64	1,32	1,16	0,16	11,86
ZBS 2	57,96	74,00	16,04	27,67	1,69	1,36	0,33	19,49
ZBS 3	41,84	56,00	14,16	33,84	0,49	0,50	0,01	1,84
ZBS 4	20,56	24,00	3,44	16,73	1,03	1,19	0,16	15,73
ZBS 5	24,63	36,00	11,37	46,16	1,60	1,70	0,10	6,07
ZBS 6	20,13	22,00	1,87	9,29	1,15	0,91	0,24	20,87
ZBS 7	28,67	30,00	1,33	4,64	1,98	1,40	0,58	29,47
ZBS 8	21,01	22,00	0,99	4,71	1,53	1,12	0,41	26,69
ZBS 9	22,25	24,28	2,03	9,11	1,42	1,03	0,39	27,13
ZBS 10	27,53	30,04	2,51	9,11	1,67	1,39	0,28	17,02
ZBS 11	20,57	22,00	1,43	6,95	0,56	0,44	0,12	21,24
ZBS 12	26,83	30,00	3,17	11,82	1,11	0,92	0,19	17,33
ZBS 13	28,57	35,49	6,92	24,22	2,15	1,88	0,27	12,33
ZBS 14	25,37	30,80	5,43	21,42	0,93	0,89	0,04	3,94
ZBS 15	21,75	24,58	2,83	13,00	1,46	1,09	0,37	25,38
ZBS 16	23,16	23,70	0,54	2,32	1,19	0,94	0,25	20,63
ZBS 17	27,04	30,00	2,96	10,95	1,44	1,32	0,12	8,42
ZBS 18	20,80	24,00	3,20	15,38	1,29	1,01	0,28	21,80
ZBS 19	31,39	24,00	7,39	23,54	1,81	1,48	0,33	18,31
ZBS 20	19,45	22,00	2,55	13,11	0,48	0,42	0,06	12,43
ZBS 21	38,20	46,00	7,80	20,42	0,10	2,25	2,15	2 153,54
ZBS 22	35,85	35,00	0,85	2,38	0,11	0,35	0,24	215,16
ZBS 24	12,98	36,74	23,76	183,01	0,10	0,54	0,44	444,07
ZBS 25	15,30	35,21	19,91	130,10	0,10	0,90	0,80	804,60
ZBS 26	27,65	42,42	14,77	53,43	0,10	0,52	0,42	415,32
ZBS 27	22,98	28,00	5,02	21,85	0,13	0,93	0,80	613,50
ZBS 28	47,54	74,00	26,46	55,66	0,13	2,33	2,20	1693,03
ZBS 29	44,20	56,00	11,80	26,70	0,10	2,25	2,15	2 150,18
ZBS 30	45,27	60,00	14,73	32,54	0,10	1,21	1,11	1 105,87
ZBS 31	57,10	102,62	45,52	79,72	3,16	2,45	0,71	22,34
ZBS 32	66,21	73,87	7,66	11,56	2,50	2,89	0,39	15,48
ZBS 33	15,08	40,00	24,92	165,25	0,19	0,61	0,42	221,53
ZBS 34	26,86	18,00	8,86	32,99	0,43	0,18	0,25	58,99
ZBS 35	21,81	26,00	4,19	19,21	1,07	0,85	0,22	20,23
ZBS 36	13,96	16,00	2,04	14,61	0,67	0,40	0,27	39,59
ZBS 37	22,23	24,00	1,77	7,96	0,54	0,41	0,13	24,00
ZBS 38	35,88	38,00	2,12	5,91	0,95	0,81	0,14	14,88
ZBS 39	34,73	42,00	7,27	20,93	0,65	0,50	0,15	23,04
ZBS 40	28,68	26,00	2,68	9,34	0,28	0,07	0,21	73,78
ZBS 41	18,37	14,00	4,37	23,79	0,28	0,12	0,16	57,28

Korelačný koeficient pri obvodoch dosiahol hodnotu až 0,97 čo predstavuje veľmi tesnú závislosť. Keďže úrovňová konštanta bola štatisticky nevýznamná, vzťah medzi obvodymi získanými pozemnými (x) a dištančnými meraniami (y) možno vyjadriť funkciou $y = 1,25x$, ktorá vysvetľuje až 95 % prípadov so štandardnou odchýlkou 9,5 m. Korelačný koeficient hĺbok mal hodnotu o niečo nižšiu, 0,53. Vzťah medzi hĺbkami možno vyjadriť vo forme $y = 0,47x + 0,62$, pričom vyjadruje len 28 % variability premenných so štandardnou odchýlkou 0,58 m. Ak sme však vylúčili závrty ZBS 21-30, ktorých hĺbka bola zo súboru dát najnižšia (0,10 až 0,13 m) a rozdiely predstavovali naopak najvyššie percentuálne hodnoty, dosiahol koeficient korelácie hĺbok hodnotu 0,98, pričom vzťah $y = 0,85x$ vysvetľuje až 97 % prípadov so štandardnou chybou 0,22 m.



Obr. 12. Porovnanie obvodov identifikovaných depresii a zameraných závrto v na lokalite Biela skala



Obr. 13. Porovnanie hĺbok identifikovaných depresii a zameraných závrto v na lokalite Biela skala

DISKUSIA

Úspešnosť identifikácie závrtovej z lidarových dát – 91 % je porovnateľná s výsledkami identifikácie závrtovej v severovýchodnej Brazílii (De Carvalho et al. 2014), kde bolo rovnakou metódou, avšak s nastavením prahovej hodnoty hĺbky 1 m, zistených 231/249 závrtovej (cca 92 %) pri použití SRTM-DEM (priestorové rozlíšenie 90 m a výšková presnosť 5 m) a 226/249 (cca 90 %) závrtovej pri použití ALOS/PRISM-DEM (priestorové rozlíšenie 5 m, výšková presnosť uvádzaná okolo 1 – 6 m). Výsledky GIS analýz autori porovnávali so závrtovej z referenčnej mapy zostavenej z 249 závrtovej identifikovaných z ALOS/PRISM-DEM (priestorové rozlíšenie 2,5 m) a Google Earth snímok vizuálnou interpretáciou. Presnosť lidarových dát, ktoré sme využili pre tvorbu DTM, je na úrovni pre mračno 15 cm vo vertikálnom smere a 30 cm v horizontálnom smere (Leitmanová a Kalivoda 2018), preto by sa v našej štúdiu dalo očakávať aj vyššie percento identifikovaných závrtovej. Analýzou kvality interpolácie sme zistili, že väčšina rozdielov DTM v porovnaní s bodmi triedy „ground“ (10 000 náhodných bodov nezahrnutých do interpolácie) sa pohybuje medzi +/- 10 cm so strednou chybou 3,7 cm. Taktiež sme overili presnosť DTM meraniami v teréne pomocou GNSS Trimble R12 na 29 lokalitách (v blízkosti analyzovaných lokalít, závrtovej), ktoré poukázali na strednú chybu 6,3 cm a najviac odchýlok v rozmedzí 0 až 5 cm v porovnaní s lidarovým DTM. Aj keď realizované analýzy preukázali, že presnosť meraní a interpolácie je pri zisťovaní parametrov najmä plytkých závrtovej v GIS kľúčová, v našej štúdiu nie je predpoklad vplyvu nepresnosti DTM a chýb interpolácie na vznik extrémnych hodnôt rozdielov oproti terestrickým meraniam, vzhľadom na výsledky uvedených meraní v teréne aj na priemernú hustotu bodov triedy „ground“ na riešených lokalitách. Limitujúcim faktorom však môže byť v našom prípade rozdielna veľkosť buniek DTM na lokalitách Biela skala (0,1 m) a Dlhý vrch (0,5 m) oproti DTM z lidarových dát (1 m). Na lokalite Komberek boli údaje o závrtovej získané priamo. Terénnu hranu posudzoval mapovateľ na základe subjektívneho uváženia, preto analýza prezentuje aj obraz, do akej miery sa môžu líšiť dáta získané rôznym spôsobom. Subjektivita môže byť dôvodom rozdielov obvodov na tejto lokalite, keďže GIS v rámci hydrologických analýz považujú za hranicu závrtovej už prvú bunku rastra, z ktorej je odtok situovaný do bezodtokovej depresie. Chybovosť môže byť pri aktívnych závrtovej spôsobená aj ich dynamikou, avšak vzhľadom na relatívne krátky časový horizont a v niektorých prípadoch extrémne rozdiely považujeme za pravdepodobnejšiu možnosť, že diferencie hĺbok sú dôsledkom porovnania DTM s rôznymi veľkosťami bunky a tiež vertikálnou presnosťou lidararu. Po vylúčení „outliers“ mal najvyššiu hodnotu korelačného koeficientu súbor dát z plošiny Biela skala, kde boli parametre závrtovej odvodené z DTM s veľkosťou bunky 0,1 m. Dôvodom chybovosti môže byť tiež akumulovaný biologický materiál v depresiách alebo nedokonalé odstránenie klamlivých bodov pri tvorbe DTM v dôsledku nedostatočného, neúplného odstránenia vegetácie v husto zarastených oblastiach.

Prínosom aplikácie lidarových dát je poznanie možnosti vzniku odchýlok identifikovaných parametrov závrtovej v GIS, najmä pri výskumoch bez možnosti porovnania s fyzicky zistenými údajmi. Prínosná je aj identifikácia hĺbky a obvodu bahnovísk na lokalite Komberek, ktoré doposiaľ zamerané neboli. Za praktické využitie výsledného DTM modelu z lidarových dát pri výskume krasových javov možno považovať možnosť identifikácie nových závrtovej vyskytujúcich sa osamotene, či

na často neprístupných miestach (napr. v mladine), kde je lokalizácia in-situ často-krát veľmi komplikovaná. Prakticky využiteľná je aj identifikácia tvarov závrvtov a ich vzťahov zo širšieho geomorfologického a geologického kontextu.

ZÁVER

Využitie lidarových dát ako podkladu pre identifikáciu závrvtov pomocou funkcie Fill môžeme hodnotiť pozitívne a 91-percentnú úspešnosť za dostatočnú a využiteľnú aj pri ďalších výskumoch. Závrty, ktoré boli terestricky zamerané predstavovali však len malé percento funkciu Fill získaných depresí, ktoré vo väčšine prípadov predstavovali nepresnosti DTM. Tie sa však dajú vylúčiť a „pravé“ závrty vyčleniť zapracovaním viacerých prahových hodnôt (Chen et al. 2018). Pri parametroch ako hĺbka a obvody v niektorých prípadoch dosahovali rozdiely v porovnaní s in-situ zameranými závrvtmi aj 20-násobok pôvodnej hodnoty, čo určite nepovažujeme za postačujúcu hodnotu z hľadiska ďalšieho výskumu alebo využitia. Absolútna hodnota rozdielu hĺbok bola v priemere 0,54 m, čo ale predstavuje až 132 % priemernej hodnoty zameraných závrvtov. Rozdiely medzi obvody dosahovali v priemere 10,86 m, čo je približne 86 % priemernej hodnoty pozemne zameraných závrvtov. K prijateľnejším číslam vo výpočtoch rozdielov sme dospeli po vylúčení tzv. „outliers“ (depresie s rozdielmi predstavujúcimi viac ako 100 % hodnoty in-situ zameraných závrvtov). Bez týchto depresí by priemerné hodnoty rozdielu hĺbok predstavovali približne 37 % hodnoty terestricky zameraných závrvtov a priemerné hodnoty rozdielu obvodov cca 36 % in-situ zameraných závrvtov. Tieto hodnoty považujeme, aj vzhľadom na relatívne malé rozmery závrvtov a odchýlku merania lidar, ktorá štandardne nepresahuje niekoľko decimetrov (Hofierka et al. 2017), za uspokojivé.

Aj napriek väčším percentuálnym hodnotám rozdielov v niektorých prípadoch, regresná a korelačná analýza poukázala na lokalite Komberek na vysokú mieru korelácie aj pri obvodoch (0,80) aj hĺbkach (0,95). Na lokalite Biela skala korelačný koeficient obvodov dosiahol hodnotu 0,97, pri hĺbkach 0,53 (po vylúčení „outliers“ 0,98). Na plošine Dlhý vrch bola korelácia potvrdená tiež – pri hĺbkach mal hodnotu 0,62, no pri obvodoch poukázal koeficient 0,43 na menej tesnú závislosť. Po vylúčení „outliers“ má však koeficient hodnotu 0,85 pri hĺbkach a 0,71 pri obvodoch. Väčšina „outliers“ vznikala pri závrvtoch s nízkymi hodnotami hĺbok a obvodov, nie je to však pravidlom, keďže v ojedinelých prípadoch sa podarilo lidar zachytiť aj parametre závrvtov podobných rozmerov s pomerne nízkymi hodnotami rozdielov. Podstata vzniku týchto extrémnych hodnôt bude riešená v ďalšom výskume, v ktorom bude snaha o minimalizáciu faktorov limitujúcich porovnanie (rôzne veľkosti buniek DTM).

Autori ďakujú ÚGKK SR za poskytnutie údajov leteckého laserového skenovania. Príspevok bol vypracovaný s podporou projektu APVV-16-0146 a VEGA 2/0100/20.

LITERATÚRA

- ARGIS HELP (2020). *Fill*, [Online]. Dostupné na: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/fill.htm> [cit: 27-2-2020].
- ASPRS (2013). *Las specification version 1.4 – R13 15 July 2013*, [Online]. Dostupné na: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/LAS_1_4_r13.pdf [cit: 15-3-2020].

- BONDESAN, A., MENEGHEL, M., SAURO, U. (1992). Morphometric analysis of dolines. *International Journal of Speleology*, 21(1-4), 1-55. DOI: <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.21.1.1>.
- CASTIGLIONI, B. (1991). Some morphometric and environmental aspects of dolines in Berici Hills (Vincenza, Italy). Proceeding of the International conference on environmental changes in karst areas – I.G.U.-U.I.S., 15-27 Sept. 1991. *Quaderni del Dipartimento di Geografia*, 13, 143-156.
- CVIJIC, J. (1893). Der Karstphänomen. *Geographische Abhandlungen*, 5, 219-329.
- De CARVALHO, O. A., JÚNIOR, GUIMARÃES, R. F., MONTGOMERY, D. R., GILLESPIE, A. R., TRANCOSO GOMES, R. A., De SOUZA MARTINS, É., SILVA, N. C. (2014). Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil. *Remote Sensing*, 6(1), 330-351. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs6010330>.
- DROPPA, A. (1952). Kras na juhovýchodnej strane Malých Karpát. *Spríevodca Slovakotouru*. Bratislava (Tatran), pp. 63-138.
- FORD, D., WILLIAMS, P. (1989). *Karst hydrogeology and geomorphology*. London (Chapman and Hall).
- HOFIERKA, J., ŠAŠAK, J., ŠUPINSKÝ, J., GALLAY, M., KAŇUK, J., SEDLÁK, V. (2017). 3D mapovanie krajiny pomocou pozemného a leteckého laserového skenovania. *Životné prostredie*, 51, 21-27.
- HOFIERKA, J., GALLAY, M. A., BANDURA, P., ŠAŠAK, J. (2018). Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis. *Geomorphology*, 308, 265-277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.004>.
- CHEN, H., OGUCHI, T., WU, P. (2018). Morphometric analysis of sinkholes using a semi-automatic approach in Zhijin County, China. *Arabian Journal of Geosciences*, [Online]. Dostupné na: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3764-3> [cit: 27-2-2020].
- KOBAL, M., BERTONCELJ, I., PIROTTI, F., DAKSKOBLER, I., KUTNAR, L., QUATTROCHI, D. A. (2015). *Using LiDAR data to analyse sinkhole characteristics relevant for understory vegetation under forest cover – Case study of a high karst area in the Dinaric Mountains*, [Online]. Dostupné na: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122070> [cit: 27-2-2020].
- KRANJC, A. (2013). Classification of closed depressions in carbonate karst. *Treatise on geomorphology*, 6, 104-111.
- LAČNÝ, A. (2011). Príspevok ku genéze krasu a jaskýň v Dlhom vrchu (Kuchynsko-orešanský kras, Malé Karpaty). *Slovenský kras*, 49(1), 57-76.
- LAČNÝ, A. (2012). *Kuchynsko-orešanský kras (geológia, tektonika, hydrogeológia)*. Diplomová práca, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského v Bratislave, Bratislava.
- LAČNÝ, A., ŠUJAN, M., HÓK, J., CSIBRII, T., PUTIŠKA, R., DOSTÁL, I., MOJZEŠ, A. (2018). The Komberek karst area - An example of the basement rock influence on the morphology of karst sinkholes (Malé Karpaty Mts., Slovakia). *Acta Geologica Slovaca*, 10(1), 151-164.
- LEITMANNOVÁ, K., KALIVODA, M. (2018). Projekt leteckého laserového skenovania Slovenskej republiky, *Geodetický a kartografický obzor 64 (106)*, 5, 101-104.
- MAZÚR, E., LUKNIŠ, M. (1978). Regionálne geomorfologické členenie SSR. *Geografický časopis*, 30, 101-125.
- MIAO, X., QLU, X., WU, S.-S., LUO, J., GOUZLE, D. R., XLE, H. (2013). Developing efficient procedures for automated sinkhole extraction from LiDAR DEMs. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 79, 545-554. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.79.6.545>.
- MITTER, P. (1983). Geomorfologická rajonizácia krasu Malých Karpát. *Slovenský kras*, 21, 3-34.
- NOVODOMEČ, R. (1967). Geomorfologické pomery povodia Parnej v Malých Karpatoch. *Geografický časopis*, 19, 212-223.

- POLÁK, M., PLAŠIENKA, D., KOHÚT, M., PUTIŠ, M., BEZÁK, V., FILO, I., OLŠAVSKÝ, M., HAVRILA, M., BUČEK, S., MAGLAY, J., ELEČKO, M., FORDINÁL, K., NAGY, A., HRAŠKO, E., NÉMETH, Z., IVANIČKA, J., BROSKA, I. (2011). *Geologická mapa regiónu Malých Karpát v M = 1: 50 000*. Bratislava (MŽP SR, Štátny geologický ústav).
- POLÁK, M., PLAŠIENKA, D., KOHÚT, M., PUTIŠ, M., BEZÁK, V., MAGLAY, J., OLŠAVSKÝ, M., HAVRILA, M., BUČEK, S., ELEČKO, M., FORDINÁL, K., NAGY, A., HRAŠKO, E., NÉMETH, Z., MALÍK, P., LIŠČAK, P., MADARAS, J., SLAVKAY, M., KUBEŠ, P., KUCHARIČ, E., BOOROVÁ, D., ZLÍNSKA, A., SÍRÁNOVÁ, Z., ŽECOVÁ, K. (2012). *Vysvetlivky ku geologickej mape regiónu Malé Karpaty v mierke 1:50 000*. Bratislava (MŽP SR, Štátny geologický ústav).
- POTOČNÝ, T., CSIBRI, T., LAČNÝ, A. (2016). Genéza závrtovej tektoniky – oblasť Dlhého vrchu, Kuchynsko-orešanský kras, Malé Karpaty. *Slovenský kras*, 54, 109-118.
- PUTIŠKA, R., KUŠNIRÁK, D., DOSTÁL, I., LAČNÝ, A., MOJZEŠ, A., HÓK, J., PAŠTEKA, R., KRAJNÁK, M., BOŠANSKÝ, M. (2014). Integrated geophysical and geological investigations of karst structures in Komberek, Slovakia. *Journal of Cave and Karst Studies*, 76, 155-163. DOI: <https://doi.org/10.4311/2013es0112>.
- SAURO, U. (2012). Closed depressions in karst area. In White, W. B., Culver, D. C., eds. *Encyclopedia of Caves, 2nd edn*. Waltham (Elsevier), pp. 140-155. DOI: 10.1016/B978-0-12-383832-2.00133-X.
- STANKOVIANSKY, M. (1970). *Geomorfologické pomery strednej časti Malých Karpát v oblasti Vápená – Vysoká*. Diplomová práca, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského, Bratislava.
- STANKOVIANSKY, M. (1974). Príspevok k poznaniu krasu Bielych hôr v Malých Karpatoch. *Geografický časopis*, 26, 241-257.
- SVOBODA, L. (2016). *Identifikace krasových tvarů z digitálních modelů reliéfu*. Bakalářská práce, Přírodovědecká Fakulta, Masarykova Univerzita, Geografický Ústav, Brno.
- SWEETING, M. M. (1972). *Karst landforms*. London (McMillan Press).
- ŠMÍDA, B. (2008). *Krasové jamy (závrty) Západných Karpát: štúdium ich morfológie a genézy*. Písomná práca k dizertačnej skúške, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského v Bratislave, Bratislava.
- VESELSKY, M., LAČNÝ, A., HÓK, J. (2014a). Závrty na Dlhom vrchu: modelová štúdia ich vzniku na lineárnych diskontinuitách (Malé Karpaty). *Acta Geologica Slovaca*, 6, 159-168.
- VESELSKY, M., ÁGH, L., LAČNÝ, A., STANKOVIANSKY, M. (2014b). Závrty na krasovej plošine Biela skala a ich morfometrická analýza, Kuchynsko-orešanský kras, Malé Karpaty. *Slovenský kras*, 52, 127-139.
- WILLIAMS, P. W. (1972). Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. *Geological Society of America Bulletin*, 83, 761-796. DOI: [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1972\)83\[761:MAOPKI\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83[761:MAOPKI]2.0.CO;2).
- WILLIAMS, P. (2004). Dolines. In Gunn J., ed. *Encyclopedia of caves and karst science*. London (Taylor and Francis Group), pp. 304-310.

Laura Dušeková, Alexander Lačný, Michal Veselský,
Juraj Papčo, Michal Šujan

LIDAR DATA IN THE RESEARCH OF DOLINES ON THE PLATEAUS OF THE KUCHYŇA-OREŠANY KARST

Nowadays, modern methods in geomorphology and geology are very effective having digital terrain models based on precise remote sensing data, in this case obtained from airborne laser scanning, also known as LiDAR (Light Detection and Ranging). The aim of the

paper is to investigate the relevancy and precision of the LiDAR data in comparison with the information about dolines obtained from fieldwork. The study area is located in Western Slovakia in the Little Carpathian Mountains (Malé Karpaty in Slovak), specifically in the Kuchyňa–Orešany karst area. Research is focused on the karst plateaus Biela skala (561 m a.s.l.), Dlhý vrch (481 m a.s.l.) and Komberek (409 m a.s.l.).

Identification of dolines and their morphometric characteristics in the Malé Karpaty Mts. was the subject of study of Lačný (2011), Veselský (2014a and 2014b), Putiška et al. (2014) and Lačný et al. (2018). One hundred and forty-three depressions were geodetically measured within these studies which we consider as a relevant amount of data for examination of the correlation with LiDAR data and for testing the reliability of methodology we chose. The digital terrain model (DTM) based on the LiDAR data was created using the Kriging function for interpolation in Surfer v.13 (Golden Software) with the size of pixel 1 m. Comparison between in-situ measured characteristics of dolines with those obtained from LiDAR data was made in geographical informational systems (GIS), particularly Arcmap 10.1 using a tool for hydrological modelling – Fill, which fills the depressions including dolines in DTM. Subtracting filled DTM from original DTM we obtained the layer of terrain depression. The layer was vectorised without simplifying polygons. The selection of polygons which intersect with in-situ measured dolines was followed by the addition of two more attributes – perimeter and maximal depth, using Zonal statistics as a table tool. Data was exported to Microsoft Excel where a comparison and final analyses (regression and correlation) were made.

All the dolines were identified using the Fill function in the study area Biela skala (40/40) and Dlhý vrch (26/26), so the effectivity rate in these locations is 100%. There weren't identified 12/66 depressions in the locality near the top of Komberek hill, so the total rate of effectivity reached 91% – which is still a very satisfactory number. However, comparison between depths and perimeters of identified depressions with those in-situ measured, has not provided such a satisfying result. Absolute values of difference between depths attain a 0.54 m in average, what represents 132% of the average value of in-situ measured depths, while the difference between field- and LiDAR-based perimeters reaches 10.86 m, which equates to 86% of the average in-situ measured values. High percentage values are caused by several cases, in which the differences in depth or perimeter are more than 2 – 4 times bigger (in one case even 20 – times bigger) than values obtained from in-situ measurement. Ignoring these outliers – depressions in which case values of difference were more than 100% of in-situ measured values, we have got more satisfactory results: the average value of difference in depths was 37% and in perimeters 36%. Data from the Biela skala plateau, which were derived from 0.1 m DTM, provide the highest values of a correlation coefficient with data obtained from LiDAR: 0.97 comparing the perimeters of dolines and 0.98 comparing depths (excluding outliers).

Possible reasons for high values of difference could have been the different size of pixels in DTMs, biological materials accumulated in depressions while airborne laser scanning, or the imperfect filtering of “ground” points due to dense vegetation while creating the DTM or character and process of the Fill function. The essence of the outliers will be the subject of the next study in which limiting factors will be minimized.



Article first received: April 2020

Article accepted: October 2020