

Využitie geodetických metód na modelovanie stien povrchových lomov a skalných útvarov a pri ich štruktúrnej analýze: príklad z kameňolomu Sedlice

LUDOVÍT KOVANIČ¹ a ZOLTÁN NÉMETH²

¹Ústav geodézie, kartografie a GIS, Fakulta BERG, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 040 01 Košice; ludo.kovanic@tuke.sk

²Štátny geologický ústav D. Štúra, regionálne centrum, Jesenského 8, 040 01 Košice; zoltan.nemeth@geology.sk

The application of geodetic methods for modelling the quarry walls and rock outcrops and their use in structural analysis: Case study from the quarry at Sedlice, Slovakia

Article presents modern geodetic methods for collecting spatial data about natural or anthropogenic objects, as well as possible application of these methods in structural geology. The methods were applied on exploitation wall in the dolomite quarry at the village of Sedlice in the Prešov District, Eastern Slovakia. Exploited dolomite with its rheological “hardness” and intensive brittle fracturing represented one of the most demanding lithotypes for testing the methodology of Terrestrial Laser Scanning (TLS), used in our research for indirect collection of structural parameters of investigated planes.

As follows from comparison of further terrestrial methods with the TLS method, they differ mainly by the density of grid points obtained during the same time, which influences the details on the model surface, being composed from obtained data. Therefore the TLS method is the only possible for collecting the spatial data about planes, being usable in structural geology. For comparison there was included also the satellite method GNSS, having the disadvantage of the absence of physically inaccessible places, and lower precision of coordinates of measured points.

The results are presented as differences of surfaces in cross-sections, as well as the differences in volumes determined by the chosen methods in relation to reference surface with the highest number of points.

Key words: terrestrial laser scanning (TLS), GNSS measuring, TIN model, dolomite quarry, Veporicum, Sedlice

Úvod

Článok prezentuje aplikáciu geodetických metód v geologickej a ťažobnej praxi. Pri realizácii banských diel a dobývání úžitkového nerastu povrchovým alebo banským spôsobom je nevyhnutné priestorové zameranie takýchto objektov či určovanie objemov odťažených zásob nerastnej suroviny. V praxi štruktúrnej geológie sa vyskytuje aj problém získavania štruktúrnych dát (napr. smeru sklonu planárnych štruktúr) v prípade plôch na veľkých lomových stenách či v skalných odkryvoch nedostupných priamemu meraniu geologickým kompasom. Metodiku získavania takýchto údajov za pomoci laserového skenovania a matematického odvodenia neznámych štruktúrnych parametrov len na základe niekoľkých „referenčných“ plôch získaných geologickým kompasom sme overili v prípade silne fraktúrovaného dolomitu v kameňolome Sedlice I. v Prešovskom kraji.

Závazne používané súradnicové systémy na území SR v znení vyhlášky Úradu geodézie, kartografie a katastra č. 300/2009, ktorou sa vykonáva zákon Národnej

rady Slovenskej republiky č. 215/1995 Z. z. o geodézii a kartografii a v znení neskorších predpisov, sú:

- *súradnicový systém Jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej (S-JTSK), v súčasnosti používanou národnou realizáciou S-JTSK je JTSK03;*

- *Baltský výškový systém po vyrovnaní (Bpv), v banských prevádzkach je však možné stretnúť sa aj s inými (predtým používanými) systémami, napr. Jadranský výškový systém.*

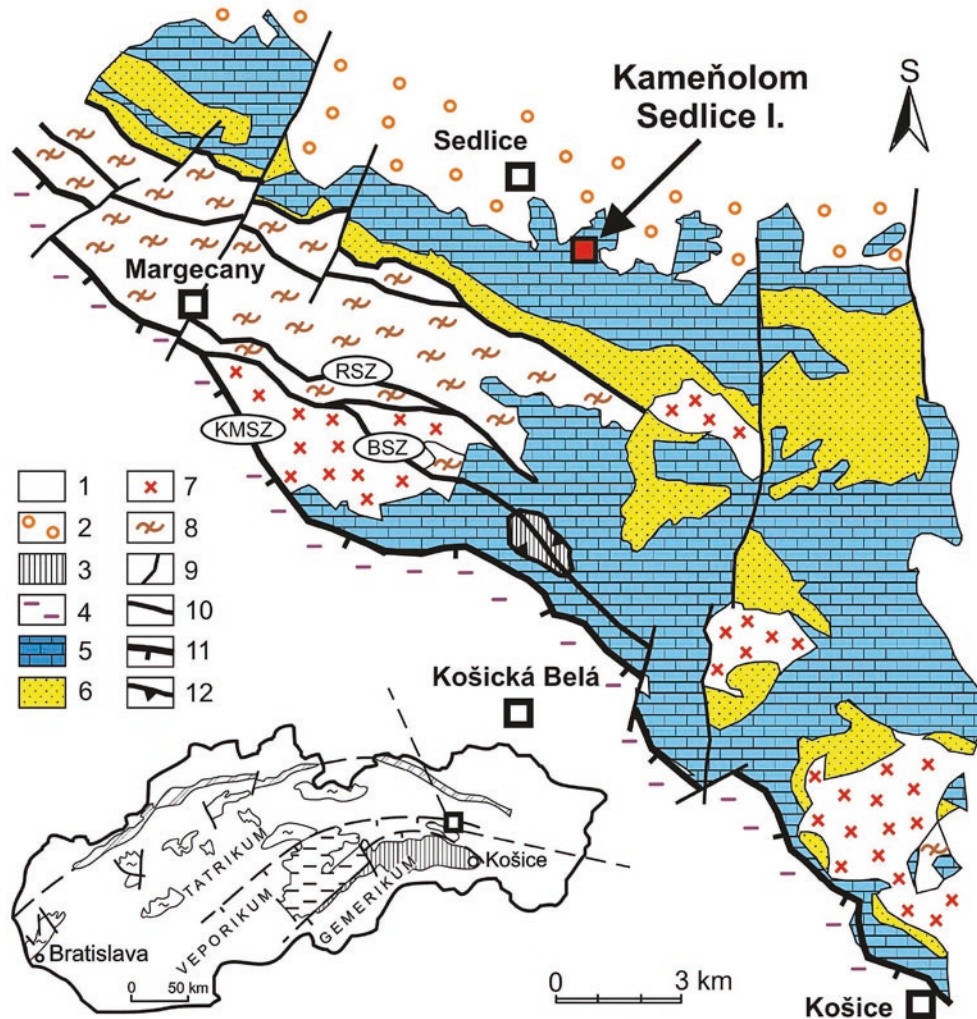
Pri práci s historickými banskými mapami (napr. v Štátnom banskom archíve) sa môžeme stretnúť aj s inými projekčnými systémami, ktoré boli používané na našom území v minulosti (napr. S-42 a i.). Vyznačenie súradnicových systémov na geodetických elaborátoch je nevyhnutné pre správnu nadväznosť najmä etapových geodetických aj geologických prác.

Určenie súradníc a výšok bodov meračskej siete v záväzných geodetických systémoch vykonávame prostredníctvom pasívnych geodetických základov (GZ) najčastejšie klasickým terestrickým meraním univerzálnymi meracími stanicami (UMS), príp. nivelačnými prístrojmi

z geodetických bodov, alebo aktívnych GZ pomocou technológie Globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS) s využitím siete permanentných referenčných staníc Slovenskej priestorovej observačnej služby (SKPOS).

Z celej palety meračských metód sa v súčasnosti pri dokumentácii prírodných skalných útvarov a rovnako aj pri zameraní antropogénnych objektov (napr. lomov, zárezov ciest a pod.) využívajú:

- bezkontaktné technológie na princípe klasického merania polárnou metódou s trigonometrickým určovaním výšok využívajúce UMS s bezhranovým meraním dĺžok, pričom merané body nie je potrebné signalizovať odrazovým systémom,
- metóda terestrického laserového skenovania (TLS),
- kinematická metóda v reálnom čase (RTK) s použitím prístrojov GNSS,
- pozemné a letecké fotogrametrické metódy.



Obr. 1. Pozícia kameňolomu Sedlice I. v generalizovanej tektonickej schéme regiónu veporika v pohorí Čierna hora. Pozícia regionálnych strižných zón je podľa Jacka a Farkašovského (2000; mierne upravené). KMSZ – košicko-margecianska strižná zóna (názov podľa Greculu et al., 1990); BSZ – strižná zóna Bujnínska; RSZ – rolovská strižná zóna. 1 – neogénne molasové sedimenty; 2 – flyšové sekvencie vnútrokarpatského paleogénu; 3 – horniny hronika v chočskom príkrove; 4 – sekvencie črmelskej skupiny; 5 – triasovo-jurské, prevažne karbonatické sekvencie obalu veporika; 6 – permské sedimentárne a vulkanické horniny obalu veporika; 7 – granitoidy bujanovského komplexu; 8 – magmatické a metamorfované horniny kryštalinika veporika – lodinského, miklušovského a bujanovského komplexu, nečlenené (cf. Jacko, 1985; Jacko et al., 1996); 9 – regionálne významné zlomy; 10 – strižné zóny; 11 – tektonická zóna s komplexnou násunovo-poklesovo-strižnou kinematikou (košicko-margecianska strižná zóna, cf. Németh et al., 2012); 12 – tektonizovaná báza chočského príkrova.

Fig. 1. Position of the quarry Sedlice I. in generalized tectonic scheme of the Veporic region in the Čierna hora Mts. Position of regional shear zones is after Jacko and Farkašovský (2000; moderately modified). KMSZ – Košice-Margecany shear zone (designation after Grecula et al., 1990); BSZ – Bujnínska shear zone; RSZ – Rolová shear zone. 1 – Neogene molasse sediments; 2 – flysch sequences of the Intra-Carpathian Paleogene; 3 – rocks of Hronicum in the Choč nappe; 4 – sequences of Črmel Group; 5 – Triassic-Jurassic, prevalingly carbonatic sequences of the Veporic cover; 6 – Permian sedimentary and volcanic rocks of the Veporic cover; 7 – granitoids of the Bujanová Complex; 8 – magmatic and metamorphic rocks of the Veporic crystalline basement – Lodiná, Miklušovce and Bujanová complexes undivided (cf. Jacko, 1985; Jacko et al., 1996); 9 – significant regional faults; 10 – shear zones; 11 – tectonic zone with complex overthrust-unroofing-shear kinematics (Košice-Margecany shear zone, cf. Németh et al., 2012); 12 – tectonized base of the Choč nappe.



Obr. 2. Kameňolom Sedlice I. s vyznačením pozície meranej lomovej steny v severnej časti 2. etáže a základnými alpínskymi regionálnymi štruktúrami násunového deformačného štádia AD₁ a horizontálne posuvného štádia AD₃. Vrstvovitost dolomitov je sklonená na sever pod miernym až stredným uhlom.

Fig. 2. The Sedlice I. quarry with position of measured quarry wall in northern part of 2nd storey and principal Alpine regional structures of the overthrust deformation phase AD₁ and horizontal strike-slip phase AD₃. Bedding of dolomites is dipping to the north under moderate to medium inclination.

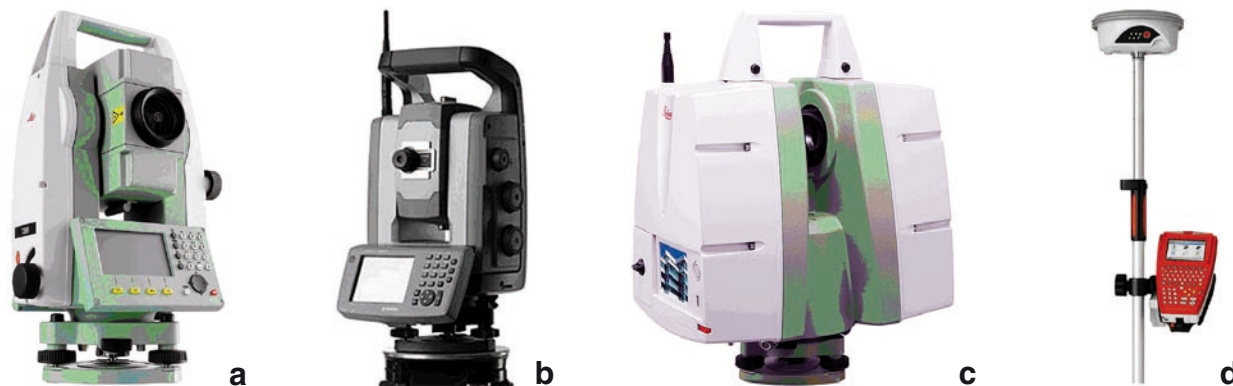
Uvedené metódy sa od seba odlišujú princípom, presnosťou, finančnou náročnosťou na prístrojové a programové vybavenie a tiež rýchlosťou zamerania konkrétneho objektu. Výsledkom procesu terénneho merania a kancelárskeho spracovania nameraných dát je pri všetkých metódach súbor súradníc a výšok bodov potrebný na ďalšie analýzy a hodnotenie dokumentovaného javu alebo objektu (Gašinec et al., 2012a, b).

Kancelárske práce často zahŕňajú aj tvorbu digitálnych 3D modelov TIN (Triangulated Irregular Network), ktoré sú reprezentáciou povrchu skutočného meraného objektu (Blištan, 2005, 2012a). TIN model je podkladom na ďalšie analýzy objektu, napr. určovanie jeho rozmerov, azimutu a sklonu, vytvorenie rezov, výpočet objemov, určenie hodnoty posunov, pretvorenie objektu a pod. (Bajtala et al., 2011; Erdélyi et al., 2012).

Metodika merania

Cieľom nášho výskumu bolo overenie použiteľnosti a porovnanie presnosti niekoľkých geodetických metód pri zameraní steny v povrchovom lome Sedlice I. (obr. 1) na 2. etáži a tiež priradenie štruktúrnych parametrov jednotlivým meraným plochám na tejto lomovej stene na základe 3D modelovania, vychádzajúc zo známych parametrov (smeru sklonu) niekoľkých referenčných plôch, získaných pomocou merania geologickým kompasom. Ťažobná stena mala šírku približne 60 m a výšku 12 m (obr. 2, 4, 12, 13). V lome je dobývaným nerastom strednotriasový dolomit obalu veporika Čiernej hory (cf. Polák a Jacko, eds., 1997).

Zo získaných priestorových údajov o lomovej stene (súradnice X, Y, Z veľkého množstva meraných bodov) sme aplikáciou nižšie charakterizovaných geodetických



Obr. 3. Použité geodetické prístroje. a – UMS Leica TS02 (Web.1); b – Trimble VX Spatial Station (Web.2); c – Leica ScanStation C10 (Web.3); d – Leica GPS900CS (Web.4).

Fig. 3. Applied geodetic devices. a – UMS Leica TS02 (Web.1); b – Trimble VX Spatial Station (Web.2); c – Leica ScanStation C10 (Web.3); d – Leica GPS900CS (Web.4).

Tab. 1
Súbory meraných bodov, počet a priestorová vzdialenosť bodov
Files of measured points, number and spatial distance of points

Metóda merania	Súbor dát	Približný počet bodov	Priestorová vzdialenosť bodov
TLS Leica ScanStation C10		1 200 000	1 [cm]
Trimble VX Spatial Station		7 000	50 [cm]
UMS Leica TS02		200	3 [m]
Leica GPS900CS		150	3 [m]

metód vytvorili a vzájomne porovnali digitálne priestorové TIN modely. Ako referenčný model sme si zvolili model vytvorený z údajov získaných terestrickým laserovým skenerom Leica ScanStation C10.

Porovnávanými metódami merania boli:

1. polárna metóda s trigonometrickým meraním výšok pomocou UMS Leica TS02 (obr. 3a) – meranie bolo vykonané manuálnym cielením na charakteristické body reliéfu objektu, ktoré sa odhadli vizuálne so snahou detailne určiť najmä pätu a hornú hranu steny a tiež jej tvar v približne rovnakých vzájomných vzdialenostiach;

2. polárna metóda s trigonometrickým meraním výšok prístrojom Trimble VX Spatial Station (obr. 3b) v móde automatického skenovania s vopred preddefinovanou vzájomnou vzdialenosťou meraných podrobných bodov v celom rozsahu meraného objektu, bez manuálneho zásahu merača do výberu meraných podrobných bodov;

3. metóda terestrického laserového skenovania prístrojom Leica ScanStation C10 (obr. 3c) podobným spôsobom ako pri prístroji Trimble VX Spatial Station. Výhodou tohto prístroja je vysoká presnosť merania (4 až 6 mm) a rýchlosť merania až do 50 000 bodov za sekundu;

4. metóda RTK s využitím GNSS prístroja Leica GPS900CS (obr. 3d), ktorou boli merané najmä päta a hrana ťažobnej steny, pričom body na reliéfe steny z dôvodu ich neprístupnosti merané neboli.

Počet bodov meraných jednotlivými metódami a ich priemerná vzájomná priestorová vzdialenosť sú uvedené v tab. 1.

Meranie podrobných bodov identickej ťažobnej steny na porovnanie kvality získaných dát a optimálnej využiteľnosti konkrétnych metodík v praxi bolo realizované uvedenými spôsobmi a geodetickými prístrojmi počas jedného dňa tak, aby čas merania bol pri všetkých spôsoboch merania rovnaký. Z tejto podmienky nepriamo vyplýva, že hustota siete meraných bodov v jednotlivých súboroch je rozdielna, a to z dôvodu rozdielnej rýchlosti zberu dát konkrétnou geodetickou metódou a líši sa aj použitým prístrojom.

Horizontálnu presnosť terestrických metód 1 až 3 vyjadrujeme strednou polohovou chybou m_p súradníc meraného bodu podľa vzťahu:

$$m_p^2 = m_{pA}^2 + \sin^2 z \cdot m_s^2 + s^2 \cdot \cos^2 z \cdot \left(\frac{m_z}{\rho}\right)^2 + s^2 \cdot \sin^2 z \cdot \left(\frac{m_\omega}{\rho}\right)^2$$

kde

m_{pA} – stredná polohová chyba stanoviska prístroja,

s – šikmá dĺžka,

z – zenitový uhol,

m_ω – stredná chyba meraného smeru,

m_z – stredná chyba meraného zenitového uhla,

m_s – stredná chyba meranej dĺžky,

ρ – prevodový koeficient.

Vertikálna presnosť je určená strednou chybou odvodenou pre trigonometrické meranie výšok podľa vzťahu:

$$m_h^2 = m_{hA}^2 + \cos^2 z \cdot m_s^2 + s^2 \cdot \sin^2 z \cdot \left(\frac{m_z}{\rho}\right)^2$$

kde

m_{hA} – stredná chyba výšky stanoviska prístroja.

Pomocné meračské body slúžiace ako stanoviská prístrojov a orientácie boli vzhľadom na prevádzku v lome dočasne stabilizované meračským klincom. Súradnice a výšky týchto bodov boli určené metódou RTK s využitím GNSS prístroja Leica GPS900CS s pripojením na sieť referenčných staníc SKPOS s dobou observácie na jednom bode 10 minút. Horizontálna presnosť súradníc takto určených bodov (garantovaná službou SKPOS) je obvykle do ± 20 mm a vertikálna ± 40 mm s ohľadom na podmienky pri meraní.

Terestrické podrobné meranie bodov na povrchu ťažobnej steny bolo vykonané zo vzdialenosti približne 50 m od ťažobnej steny. Vzhľadom na to, že merania boli vykonané postupne pri jednom postavení prístrojov na statíve a zadaní tých istých súradníc, sú hodnoty stredných chýb súradníc podrobných bodov pri uvedených terestrických metódach v závislosti od parametrov prístroja uvádzaných výrobcom približne rovnaké:

$$m_p \approx m_h \approx \pm 3 - 6 \text{ mm.}$$

Na otestovanie aplikovateľnosti geodetických metodík v praxi štruktúrnej geológie sa využila metóda TLS aplikovaním laserového skenera Leica ScanStation C10.

Geologická a tektonická stavba kameňolomu Sedlice a jeho okolia

Kameňolom Sedlice I. (obr. 1 a 2) je situovaný v stredno-triasových ramsauských dolomitoch (ladin) obalu kryštalinika veporika v pohorí Čierna hora cca 2 km na JV od obce Sedlice a 1,2 km na JJZ od obce Suchá Dolina. Teleso ramsauských dolomitov reprezentuje reologický „tvrdý“ horizont situovaný na gutensteinských vápencoch

(anis) a plasticky výrazne deformovaných reologicky „mäkkých“ verfenských ílovitých bridliciach. Nižším horizontom sú kremence a kremenné pieskovce s vložkami bridlíc lúžňanského súvrstvia a permské klastiká, lokálne s vulkanitmi (predajnianske a brusnianske súvrstvie), rovnako ako klastiká vrchného karbónu. Táto sukcesia hornín predstavuje primárny ?gželsko-permsko-mezozoický obal veporického kryštalinika v pohorí Čierna hora. Na dolomity od severu transgresívne nasadá pieskovcovo-zlepencové súvrstvie paleogénneho borovského súvrstvia.

Viacere alpinske deformačné fázy (presuny príkrovov fundamentu a superfiálnych príkrovov, imbrikácia prešmykmi, odstrešovanie, horizontálne strihy, (cf. Jacko et al., 1996; Jacko in Polák, ed., 1997; Gazdačko, 1994; Jacko a Farkašovský, 2000; Farkašovský a Bónová, 2009; Németh et al., 2012) zanechali v jednotlivých horizontoch veporického obalu komplexný štruktúrny inventár, pričom v reologicky „tvrdých“ dolomitoch sa prejavili niekoľkými prešmykovými zónami, často s tektonickým ílom, a dominujúcou krehkou frakturáciou.

V priestore kameňolomu Sedlice I. má teleso dolomitu jednoduchú geologicko-tektonickú stavbu a je tvorené jedným technologickým typom suroviny (Varcholová et al., 1981; Kováč, osob. inf.). Pozícia kameňolomu – značne externe od hlavných regionálnych diskontinuit priebehu SZ – JV (cf. obr. 1) a v litológii pomerne nepriaznivá na zaznamenanie duktilnej deformácie (dolomity obalu veporika) – neumožnila vyjadriť sa komplexnejšie napr. k tektogenéze a kinematike alpínskych strižných zón. Každopádne, získané štruktúrne dáta zaznamenali prejavy tektogenézy štádií AD₁ a AD₃, hoci v prípade štruktúr AD₃ len pri veľmi nízkom deformačnom gradiente. Pri klasifikácii podľa Németha (2005; cf. obr. 3b in Németh et al., 2012), postavenej na regionálnych štruktúrnych zisteniach z gemerika a z východnej stykovej zóny gemerika s veporikom, alpínske deformačné štádium AD₁ reprezentuje severovergentné až SV-vergentné spodnokriedové násuny a štádium AD₃ terciérne až

recentné horizontálne posuny na subvertikálnych strižných zónach SZ – JV a SV až JZ smeru. V prípade východnej stykovej zóny gemerika s veporikom (t. j. v oblasti kontaktu Volovských vrchov a pásma Čiernej hory) bol zistený ako dominujúci SZ – JV smer strižných zón a pravostranné strihy (cf. Grecula et al., 1990; Gazdačko, 1994; Németh, 2005; Németh et al., 2012). Podľa klasifikácie Jacka et al. (1996 a neskoršie práce) zistené štruktúry v kameňolome Sedlice korešpondujú s produktmi deformačných štádií AD₂ a AD₄.

Nami zistená vrstvosť vo vrchných etážach lomu bola sklonená k severu (smer sklonu 342° až 7°), pričom tento sklon bol prevažne stredný až mierny (35° – 44°). K podobnému záveru sa dopracovali ložiskovým prieskumom aj Varcholová et al. (1981) na základe štúdia symetrologických vzťahov puklinových systémov (typu ac, resp. bc), meraných v štôlnach SŠ-1 a SŠ-2 (štôlne mali smer ZSZ – VJV). Autori konštatovali nezretelnú vrstvosť východozápadného smeru s miernymi sklonmi na S aj J. Predpokladali, že plochy vrstvosťosti sú zvrásnené a amplitúda vrás presahuje rozmer ložiska.

Najvýraznejšími diskontinuitami v ložisku sú dve severovergentné násunové plochy regionálneho významu so stredným sklonom na juh, zvýraznené často až niekoľko metrov hrubými polohami tektonického ílu (rekryštalizovaný plastický kalcitický dolomit okrovohnej farby). Severnejšia násunová plocha pretína prvú etáž. Južnejšia násunová plocha, ktorá pretína južnú časť druhej etáže, bola zaregistrovaná a mapovo znázornená už Varcholovou et al. (1981). Tieto násunové plochy spájame s alpínskym deformačným štádiom AD₁, t. j. spodnokriedovou severovergentnou imbrikáciou dolomitového masívu. Spreádzajúce paralelné násunové plochy nižšieho rádu (obr. 4) vykazovali tiež generálne severo-južné striácie s makroskopicky identifikovateľnou násunovou kinematikou. Podľa zistení Varcholovej et al. (1981) na prešmykových plochách V – Z smeru so strmým až miernym sklonom na J dochádza k vyvlečeniu jemnozrnných sericiticko-kremitých



Obr. 4. Sklon 30° – 45° prešmykových plôch deformačného štádia AD₁ generálne k juhu je doložený aj 7 m posunom čela lomovej steny po odstrele medzi dvoma štruktúrnymi meraniami.

Fig. 4. The southern dip (30°–45°) of AD₁ overthrust planes is demonstrated also by 7 m shift of the quarry wall northward after blasting between two structural measurements.

metapsamitov z podložia (seis-kampil) dolomitového telesa a k ich vklínieniu pozdĺž prešmyku do telesa dolomitu.

Štruktúry asociované s pokolíznyim odstrešovaním v štádiu **AD₂** v priestore ložiska neboli zistené. Keďže kinematika odstrešovania, t. j. ponásunových juhovergentných spätných sklzov bola lokalizovaná do sklzových horizontov reologicky „mäkších“ monominerálnych hornín (spodnotriasových kremencov; Németh et al., 2012, obr. 7 ibid.; prípadne ílovitých bridlíc), predpokladáme, že vo vzdialenejšom nadložnom horizonte strednotriasových dolomitov sa extenzia prejavila len vznikom krehkých extenzných fraktúr (puklín) charakteru čistého strihu smeru V – Z so strmým sklonom prevažne na sever, prípadne komplementárnym systémom puklín, kliváže alebo dislokácií smeru S – J, ktoré mali transformný charakter a mohli byť reaktivovanými štruktúrami už zo štádia **AD₁**. Prvý systém na sever sklonených fraktúr sporadicky vykazoval striácie severo-južného smeru s poklesovou kinematikou. Druhý systém S – J smeru (lokálne až SSZ – JJV smeru) zaregistrovali už Varcholová et al. (1981) a interpretovali ako ortogonálne ac-pukliny k vrásovej stavbe pôvodnej vrstvosivosti. S priebehom ac-puklín paralelizovali aj hlavné priečne zlomy v ložisku a v jeho okolí, zvýraznené priebehom dolín: SSZ – JJV až S – J priebehu so sklonom strmo na ZJZ, rozdeľujúce teleso ložiska na dva bloky. Tieto zistenia overil aj náš novší výskum, ale je potrebné konštatovať, že mezoštruktúry takejto orientácie sú menej početné než prevažujúci systém diskontinuit smeru V – Z a stredného sklonu na juh.

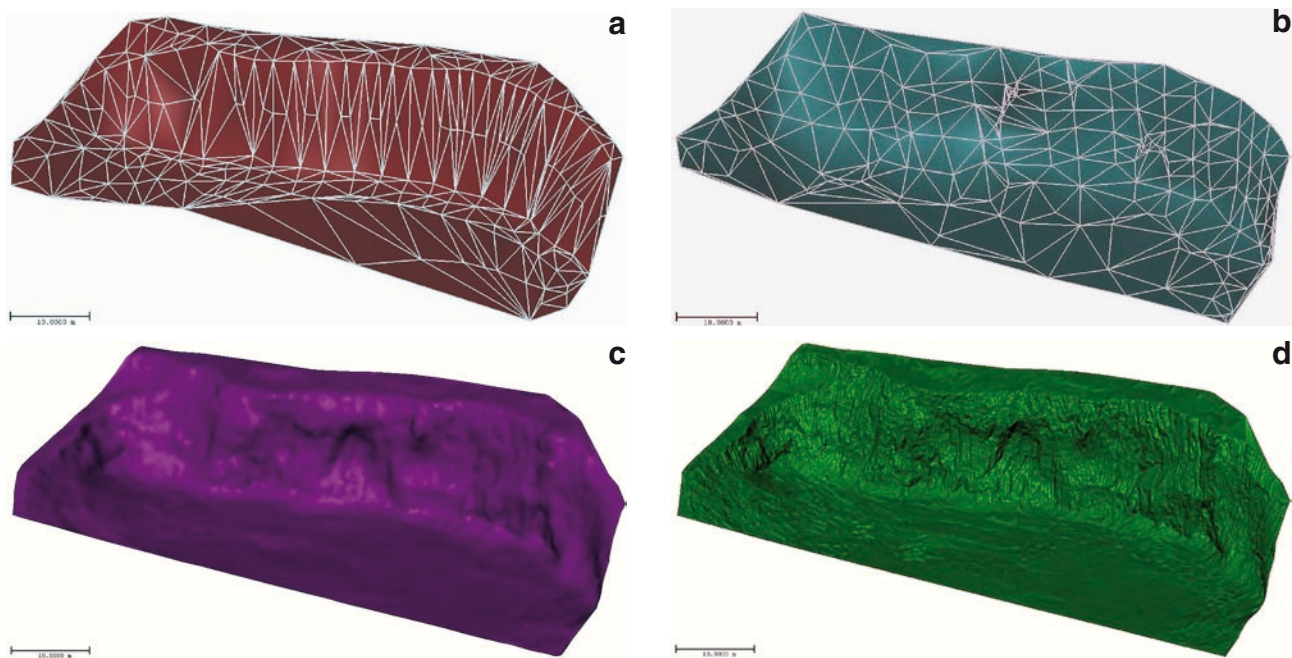
S deformačným štádiom **AD₃** (terciér-recent) asociujeme vertikálnu strižnú zónu priebehu ZSZ – VJV (obr. 2), segmentujúcu ložisko južne od kóty Kuncov vrch

(503,3 m n. m.). Paralelne s ňou sme v mezomeradle zistili ohladené dislokačné plochy (198/60°) so striáciami (120/20°), indikujúcimi nevýrazný pravostranný strih. S aktivitou na strižných zónach smeru ZSZ – VJV až SZ – JV asociujeme tiež puklinový systém na ložisku smeru JZ – SV (sklony 70° – 80° na JV, resp. 65° na SZ), ktoré už Varcholová et al. (1981) interpretovali ako bc-pukliny k systému priečných vrás. Keďže vtedajšie interpretácie generovania vrás (podľa klasickej školy Sandera, 1970) ešte nevychádzali z koncepcie vrás typu „a“ (t. j. os vrásky paralelná s lineáciou vytiahnutia, cf. Ramsay a Huber, 1987), vtedajší názor neprotirečí s našimi poznatkami.

Spracovanie meraných údajov

Na spracovanie údajov nameraných uvedenými geodetickými prístrojmi a metódami bol použitý špecializovaný softvér od spoločnosti Trimble – Trimble RealWorks 6.5, ktorý umožňuje veľmi efektívne spracovať veľké súbory bodov získané laserovým skenovaním, ale rovnako dobre je použiteľný aj pri spracovaní menších dátových súborov, napr. z UMS či GNSS meraní. Z dôvodu dodržania princípu jednotnej metodiky spracovania meraní a jednotného používateľského softvéru bol zvolený na spracovanie všetkých realizovaných geodetických meraní vyššie uvedený softvér.

V prostredí Trimble RealWorks boli zo všetkých dátových súborov meraných bodov využitím Delaunay triangulácie vytvorené 3D TIN modely. Ich detailnosť je závislá od počtu bodov tvoriacich hrany trojuholníkov a zodpovedá parametrom uvedeným v tab. 1. Na obrázku 5 sú zobrazené jednotlivé TIN modely ťažobnej steny.



Obr. 5. TIN model vytvorený z údajov získaných pomocou: a – GNSS Leica GPS900CS; b – UMS Leica TS02; c – Trimble VX Spatial Station a d – Leica ScanStation C10.

Fig. 5. TIN model composed from data obtained by: a – GNSS Leica GPS900CS; b – UMS Leica TS02; c – Trimble VX Spatial Station and d – Leica ScanStation C10.

Porovnaním výsledných TIN modelov môžeme dospieť k nasledujúcim parciálnym záverom:

- z obr. 5a vyplýva absencia meraných bodov na objekte steny lomu, čoho následkom je nedokonalosť modelovaného povrchu a z neho odvodených parametrov, napr. objemu odťažených zásob;
- na obr. 5b je viditeľná relatívne pravidelná trojuholníková sieť tvorená bodmi v celom rozsahu ťažobnej steny, avšak nízky počet meraných bodov má vplyv na detailnosť modelu s podobným následkom;
- použitím metód terestrického laserového skenovania vyznačujúcich sa vysokou hustotou meraných bodov je na obr. 5c a najmä 5d (referenčný model) jednoznačne viditeľná vysoká detailnosť modelovaného povrchu ťažobnej steny.

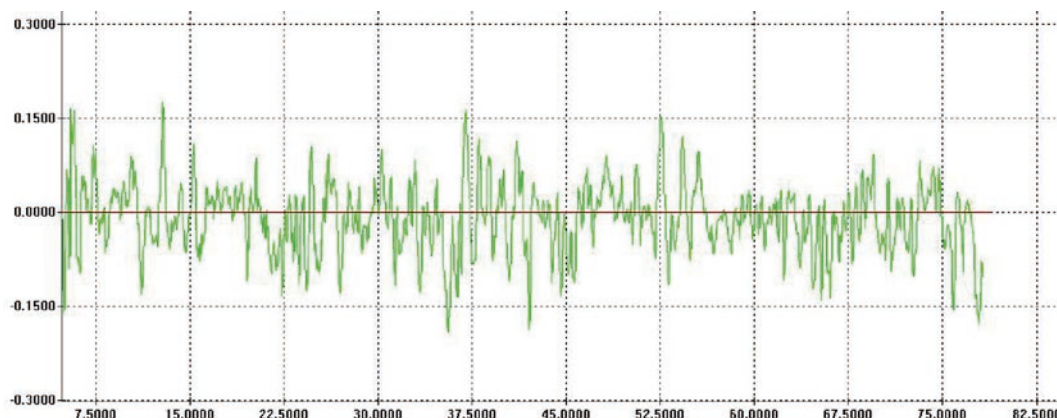
Hodnotenie presnosti metód

Porovnanie modelovaných povrchov s referenčnou plochou a následné hodnotenie použitých geodetických metód zberu priestorových údajov je možné vykonať viacerými spôsobmi. V našom prípade bol ako referenčný model, teda model, ktorý sa svojou presnosťou a detailnosťou najviac blíži reálnemu tvaru dokumentovaného objektu, zvolený TIN model vygenerovaný z dát získaných pomocou TLS Leica ScanStation C10. Hodnotiacimi kritériami na posúdenie presnosti použitých metód boli:

- vzdialenosti modelovaných povrchov od referenčného povrchu v rezech,
- rozdiel objemov „telies“ určených medzi jednotlivými povrchmi a referenčným povrchom – výkop/násyp (cut/fill).

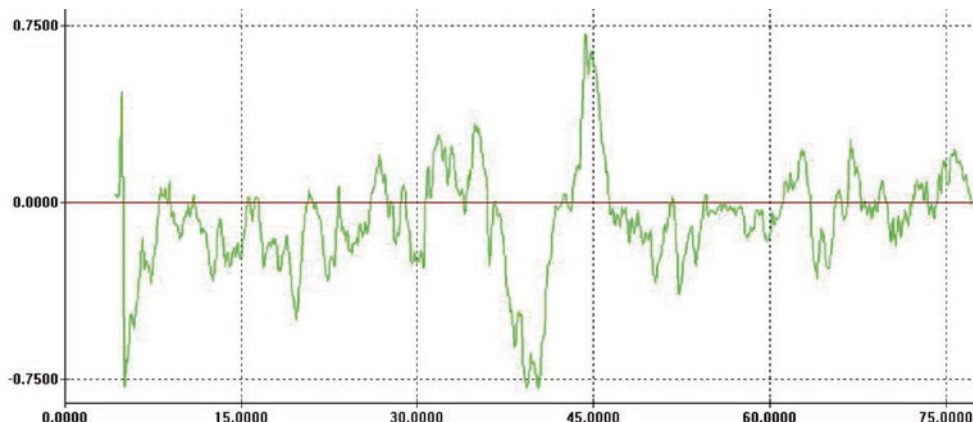
Tab. 2
Kolmá vzdialenosť povrchov od referenčného povrchu v reze
Perpendicular distance of surfaces from the reference surface in the cut

Metóda merania/Súbor dát	Minimálna hodnota odchýlky povrchov [m]	Maximálna hodnota odchýlky povrchov [m]	Empirická stredná chyba modelovaného povrchu [m]
TLS Leica Scanstation C10		referenčný povrch	
Trimble VX Spatialstation	-0,18	+0,17	0,07
UMS Leica TS02	-0,78	+0,70	0,26
Leica GPS 900CS	-1,40	+1,35	0,60



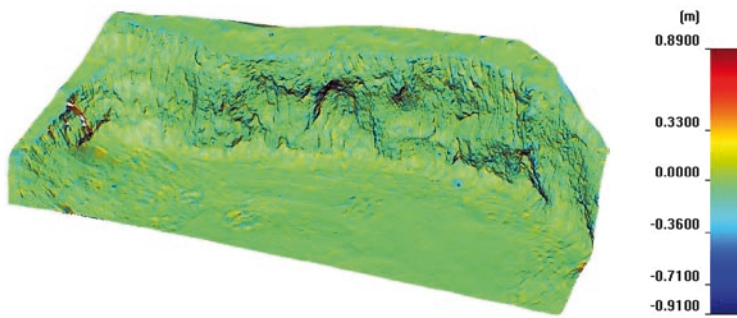
Obr. 6. Vzdialenosť povrchu vytvoreného z dát získaných prístrojom Trimble VX SpatialStation od referenčného povrchu v reze.

Fig. 6. Distance of the surface compiled from data obtained by the Trimble VX SpatialStation facility from the reference surface in the cut.



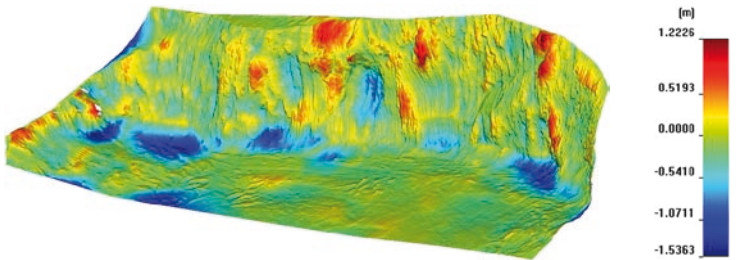
Obr. 8. Vzdialenosť povrchu vytvoreného z dát získaných prístrojom Leica TS02 od referenčného povrchu v reze.

Fig. 8. Distance of the surface compiled from data obtained by the Leica TS02 facility from the reference surface in the cut.



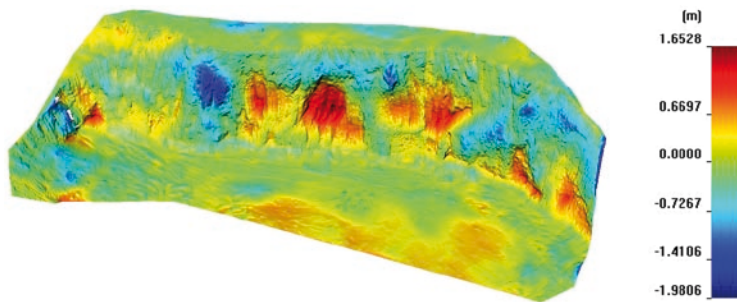
Obr. 7. Hypsometrické vyjadrenie vzdialenosti povrchu vytvoreného z dát získaných prístrojom Trimble VX SpatialStation od referenčného povrchu v reze.

Fig. 7. Hypsometric expression of the surface distance, composed from data obtained by Trimble VX SpatialStation facility from the reference surface in the cut.



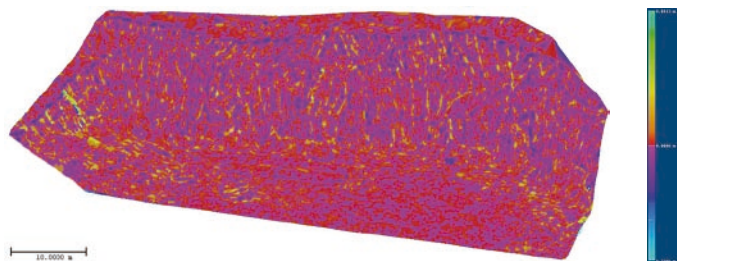
Obr. 9. Hypsometrické vyjadrenie vzdialenosti povrchu vytvoreného z dát získaných prístrojom Leica TS02 od referenčného povrchu v reze.

Fig. 9. Hypsometric expression of the surface distance, composed from data obtained by Leica TS02 facility from the reference surface in the cut.



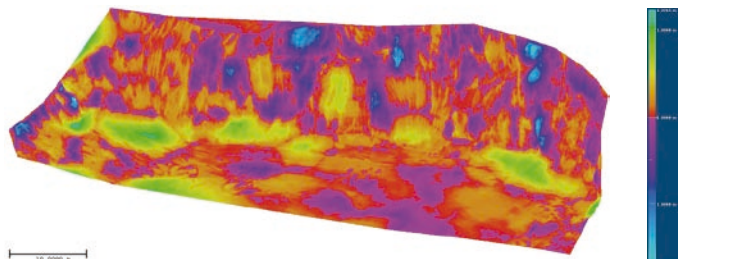
Obr. 11. Hypsometrické vyjadrenie vzdialenosti povrchu vytvoreného z dát získaných prístrojom Leica GPS 900CS od referenčného povrchu v reze.

Fig. 11. Hypsometric expression of the surface distance, composed from data obtained by Leica GPS 900CS facility from the reference surface in the cut.



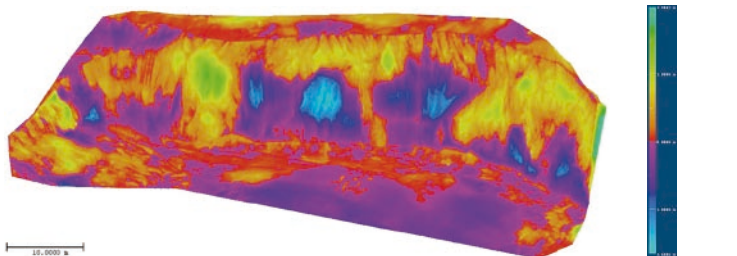
Obr. 13. Hypsometrické vyjadrenie rozdielov objemu povrchu vytvoreného z dát získaných prístrojom Trimble VX Spatial Station od referenčného povrchu.

Fig. 13. Hypsometric expression of the surface volume differences from the reference surface. Composed from data obtained by the Trimble VX Spatial Station facility.



Obr. 14. Hypsometrické vyjadrenie rozdielov objemu povrchu vytvoreného z dát získaných prístrojom UMS Leica TS02 od referenčného povrchu.

Fig. 14. Hypsometric expression of the surface volume differences from the reference surface. Composed from data obtained by the UMS Leica TS02 facility.



Obr. 15. Hypsometrické vyjadrenie rozdielov objemu povrchu vytvoreného z dát získaných prístrojom Leica GPS900CS od referenčného povrchu.

Fig. 15. Hypsometric expression of the surface volume differences from the reference surface. Composed from data obtained by the Leica GPS900CS facility.

Porovnanie na základe vzdialenosti modelovaného povrchu od referenčného povrchu

Vzdialenosti povrchov modelovaných z jednotlivých súborov v rezoch sú vyjadrené číselne v tab. 2, vo forme grafov (obr. 6, 8 a 10) a vizualizované kolorovanými povrchmi s hypsometrickou škálou na obr. 7, 9 a 11. V grafoch je červenou farbou vyjadrený referenčný a zelenou porovnávaný povrch.

Výsledky numerického vyhodnotenia rozdielov TIN modelov oproti referenčnému modelu sú prezentované v tab. 2. Vždy sú uvedené minimálne a maximálne rozdiely dvoch povrchov v metroch a empirické (výberové) stredné chyby. Empirická stredná chyba je mierou koncentrácie chýb okolo strednej nulovej hodnoty. Určená bola podľa vzťahu:

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - x_i)^2}{n-1}}$$

kde

\bar{X} je aritmetický priemer vypočítaných rozdielov (odchýlok) dvoch povrchov oproti sebe v reze,
 x_i – vypočítané rozdiely (odchýlky) dvoch povrchov,
 n je počet hodnôt.

Testovanie opráv odľahlých meraní sa vykonáva

na účel identifikácie hrubých chýb v súbore hodnôt. Hodnota strednej opravy sa vypočíta podľa vzťahu:

$$m_v = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n}}$$

kde

v_i sú rozdiely opráv oproti aritmetickému priemeru, n je počet hodnôt.

Na testovanie sa používa kritérium založené na rozdelení výberovej funkcie

$$W_{(n)} = \frac{\bar{X} - x_{(n)}}{m_v} = \frac{v_{(n)}}{m_v}$$

alebo

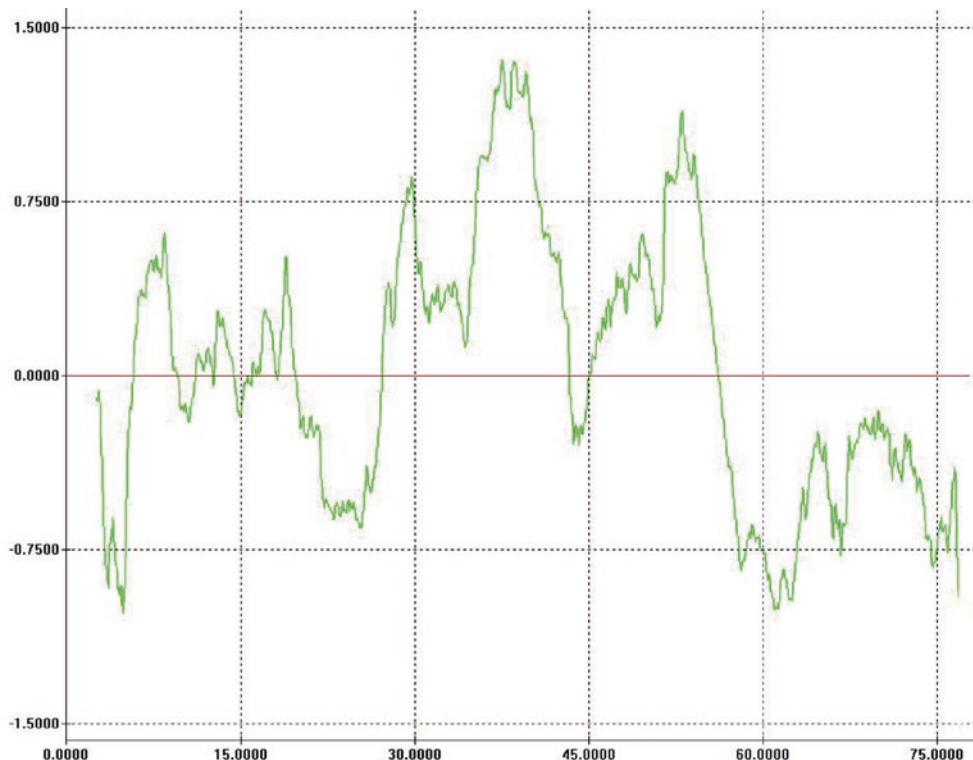
$$W_{(1)} = \frac{\bar{X} - x_{(1)}}{m_v} = \frac{v_{(1)}}{m_v}$$

$$P(|W| > W_\alpha) = \alpha$$

kde

$v_{(n)}$ a $v_{(1)}$ sú krajné opravy,
 m_v je odhad strednej opravy,
 $x_{(n)}$ a $x_{(1)}$ sú najväčšie a najmenšie odmerané hodnoty.

Ak absolútna hodnota krajnej opravy presiahne hodnotu $W_{(\alpha)}$ posudzuje sa to ako pôsobenie hrubej chyby



Obr. 10. Vzdialenosť povrchu vytvoreného z dát získaných prístrojom Leica GPS 900CS od referenčného povrchu v reze.

Fig. 10. Distance of the surface compiled from data obtained by the Leica GPS 900CS facility from the reference surface in the cut.

Tab. 3

Porovnanie rozdielov objemov určených jednotlivými metódami oproti referenčnému povrchu
Comparison of volumes differences determined by individual methods in relation to reference surface

Metóda merania/Súbor dát	Cut [m ³]	Fill [m ³]	Rozdiel určeného objemu [m ³]	Rozdiel určeného objemu [%]
TLS Leica ScanStation C10			referenčný povrch	
Trimble VX Spatial Station	+28	-41	-13	-0,22
UMS Leica TS02	+279	-106	+173	+2,88
Leica GPS900CS	+250	-301	-51	-0,85

a toto meranie sa zo súboru vylúči. Testovanie sa opakuje pre ďalšiu krajinú opravu (Böhm et al., 1990).

Porovnanie na základe rozdielu objemov – výkop/násyp

Ďalším porovnávacím kritériom bol výpočet rozdielu objemov určených medzi povrchmi z jednotlivých súborov dát, kde referenčným povrchom je model získaný pomocou TLS. Objem je vyjadrený hodnotami výkopov a násypov (cut/fill), vzniknutých prekrytím modelovanej plochy referenčným povrchom. Rozdielom týchto hodnôt, ktoré v prípade výkopu majú záporné znamienko a v prípade násypu kladné, získame hodnotu vyjadrujúcu kumulatívny rozdiel oboch objemov v m³. Ak pri porovnaní (analýze) prevažuje výkop nad násypom, bude celkový výsledok záporný a, naopak, ak prevažuje násyp nad výkopom, bude výsledok kladný. V ideálnom prípade by sa výkop mal rovnať násypu a výsledok by sa mal blížiť k nule (Blišťan, 2012b).

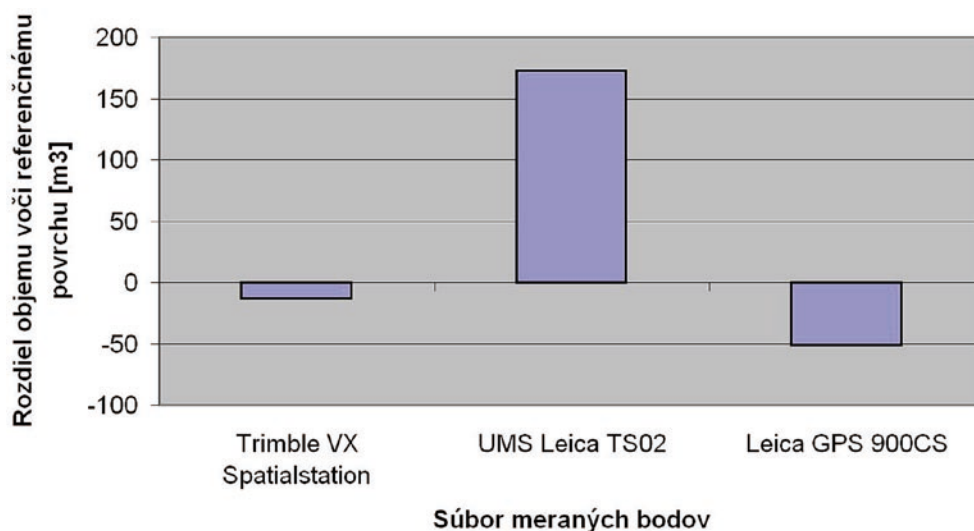
Na relatívne percentuálne vyjadrenie presnosti rozdielov určovania objemov zásob pri ťažbe zvolenými metódami vychádzame z hodnoty zásob odobratých pri jednom odstrele suroviny 6 000 m³. Táto hodnota objemu bola zistená na tej istej ťažobnej stene pri predchádzajúcich meraniach. Výsledky porovnaní sú uvedené v tab. 3 a v grafe na obr. 12.

Hypsometrické zobrazenie rozdielov v určených objemov pre jednotlivé metódy je na obr. 13 až 15. Z identifikácie miest s najväčšou zmenou objemu povrchov oproti referenčnému povrchu vyplýva výrazná zhoda s obr. 7, 9 a 11.

Diskusia k presnosti meračských metód

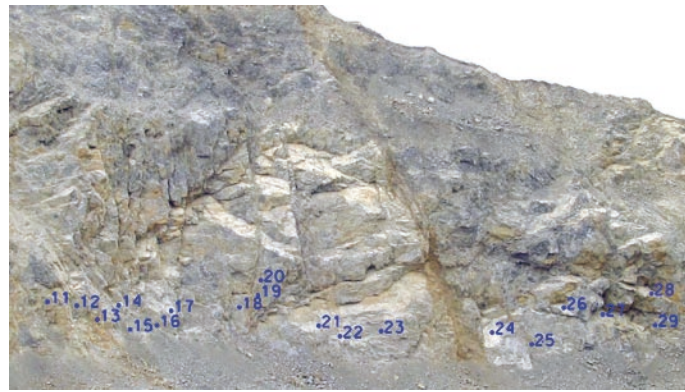
Z apriórneho rozboru presnosti s ohľadom na výrobné parametre prístrojov sú všetky použité meračské metódy svojou presnosťou vzájomne porovnateľné. Odlišujú sa najmä spôsobom a rýchlosťou merania, čo má priamy vplyv na množstvo bodov, ktoré je možné merať na záujmovom objekte za približne rovnakú časovú jednotku. Detailnosť modelovaného povrchu zodpovedá počtu meraných bodov.

Z tohto pohľadu je vzhľadom na dosiahnuté výsledky možné za najvhodnejšie považovať automatické motorizované skenovacie systémy, medzi ktoré okrem terestrických laserových skenerov (napr. Leica ScanStation C10) zaradujeme aj prístroje na báze univerzálnych meracích staníc s možnosťou samočinného skenovania objektov (napr. Trimble VX Spatial Station). Výhodou je okrem rýchlosti merania aj detailnosť a úplnosť modelovaných plôch a tiež podobnosť meračských postupov s klasickými. Problémom sú tu najmä vysoké obstarávacie náklady na hardvér a softvér, preto ich využívanie je skôr zriedkavé.



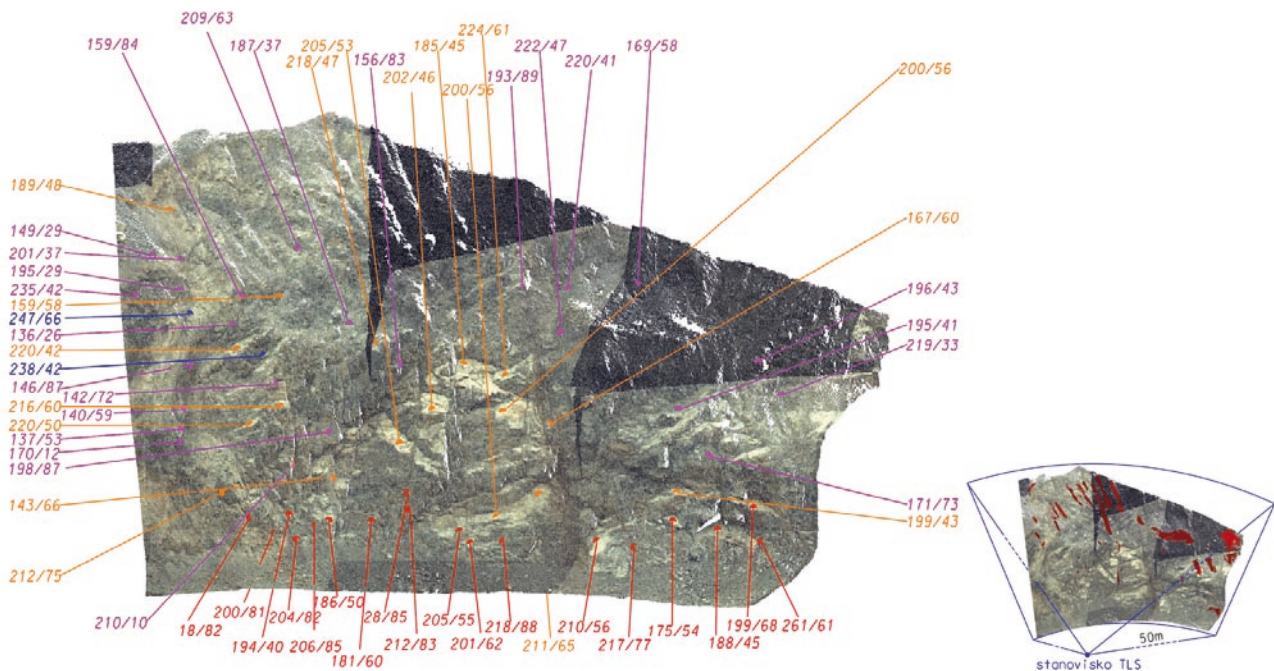
Obr. 12. Porovnanie rozdielov objemov určených jednotlivými metódami oproti referenčnému povrchu.

Fig. 12. Comparison of volumes differences determined by individual methods in relation to reference surface.



Obr. 16. Pozícia referenčných bodov na plochách, ktorých štruktúrne parametre (smer sklonu) boli získané meraním geologickým kompasom a následne aj metodikou TLS. Azimutálne a sklonové hodnoty získané za pomoci obidvoch metodík merania sú porovnávané v tab. 4. Východná strana lomovej steny v severnom ukončení 2. etáže (pozri obr. 2). Nápadné sú na juh sklonené plochy so sivobielym povlakom kalcitického dolomitu, reprezentujúce plochy severovergentnej imbrikácie v deformačnom štádiu AD₁ (merané pred odstrelom 14. 5. 2013; cf. obr. 4). Deformačné štádium AD₃ reprezentujú zlomové a dislokačné plochy priebehu SZ – JV, akými sú celým odkryvom prestupujúce subvertikálne plochy v strede záberu.

Fig. 16. Position of reference point on planes, which structural parameters (trend of dip) were obtained by geological compass, and followingly by TLS methodology. Azimuthal and dip values obtained by both methodologies are compared in Tab. 4. Eastern side of the quarry wall at northern termination of 2nd storey (cf. Fig. 2). Southward dipping planes with grey-white cover of calcitic dolomite are distinct in the photograph. They represent the planes of north-vergent imbrication during the deformation phase AD₁ (measured before blasting 14. 5. 2013; cf. Fig. 4). The subvertical fault and dislocation planes trending NW–SE, produced by the deformation phase AD₃, occur in the middle of the view.



Obr. 17. 3D model lomovej steny zameranej metodikou TLS a matematicky priradené štruktúrne parametre plochám zoskenovaným laserovým skenerom (okrová, fialová a modrá farba). Smer sklonu vyjadrený červenou farbou reprezentuje hodnoty smeru sklonu určené metodikou TLS na referenčných plochách primárne meraných geologickým kompasom. Parametre vyjadrené okrovou farbou dokumentujú prešmykové plochy s povlakom kalcitického dolomitu a lokálne vyvinutými striáciami, ktoré sú produktom imbrikácie dolomitového masívu v deformačnom štádiu AD₁. Fialovou farbou sú vyjadrené štruktúrne parametre ploch v azimutálnom rozsahu 135° – 235° bez známeho pričlenenia k deformačným štádiám. Modrou farbou indikujeme plochy sukcesne asociované so štádiom AD₃. Schéma vpravo dole indikuje pozíciu TLS zariadenia oproti lomovej stene. Červenou farbou na schéme vpravo sú indikované plochy, ktoré neboli zasiahnuté laserovým lúčom.

Fig. 17. 3D model of the quarry wall obtained by the TLS methodology and mathematically assigned structural parameters to planes scanned by laser scanner (ocher, purple and blue colours). Trend of dip expressed by the red colour represents values determined by TLS methodology on reference planes, being for verification also measured by geological compass. Parameters expressed by ochre colour document the overthrust planes with the cover of calcitic dolomite and locally present striations, being an imbrication product of dolomite massif in deformation phase AD₁. Purple colour expresses structural parameters of planes with the azimuth range 135°–235° without known affiliation to deformation phases. Blue colour indicates planes associated with the phase AD₃. Scheme in the right down side indicates a position of TLS device in front of the quarry wall. Red coloured segments on the wall in the scheme were not caught by the laser beam.

Časovo aj technicky náročnejšie je najmä spracovanie meraných údajov.

Použitím univerzálnych meracích staníc (napr. Leica TS02) je možné podobne ako pri TLS bez potreby použitia odrazového hranola merať objekt v celom rozsahu, vrátane pre figuranta neprístupných miest. Potrebné je však manuálne cielenie pomocou ďalekohľadu, alebo vo vhodných svetelných podmienkach pomocou laserového lúča. Táto skutočnosť výrazne predlžuje čas merania. Najväčšou nevýhodou je ale subjektívna klasifikácia reliéfu meraného objektu a výber meraných bodov, čo má výrazný vplyv (často negatívny) na výsledný modelovaný povrch a veličiny z neho odvodené (obr. 5b, obr. 9).

Pri meraní pomocou GNSS (napr. Leica GPS900CS) metódou RTK z dôvodu neprístupnosti meraných bodov

najmä na zvislých stenách lomu získavame značne skreslený a neúplný model skutočného objektu bez zachytenia potrebných zmien jeho tvaru (obr. 5a, obr. 11).

Aplikácia metodiky TLS pri štruktúrnej analýze a diskusia získaných výsledkov

Testovanie geodetickej metodiky terestrického laserového skenovania (TLS) pre potreby štruktúrnej geológie sme uskutočnili na lomovej stene ukončujúcej od severu 2. etáž v kameňolome Sedlice I. Matematicky určené hodnoty smeru sklonu naskenovaných plôch boli porovnávané s hodnotami získanými geologickým kompasom (obr. 16 a 17). Tab. 4 dokladá malé rozdiely azimutov a sklonov v prípade porovnávaných plôch.

Tab. 4
Porovnanie štruktúrnych parametrov plôch (smer sklonu) meraných geologickým kompasom a tých istých parametrov získaných metódou terestrického laserového skenovania (TLS)
Comparison of structural parameters of planes (trend of dip) measured by geological compass and parameters obtained by terrestrial laser scanning (TLS)

Por. číslo plochy	Rozmery plochy [cm]	Údaje merané geologickým kompasom		Údaje určené z modelu získaného pomocou TLS		Rozdiely		Rozdiely v percentách	
		Smer (trend) [°]	Sklon (dip) [°]	Smer (trend) [°]	Sklon (dip) [°]	Smer (trend) [°]	Sklon (dip) [°]	[%]	[%]
1	10 x 10	150	40	158	47	-8	-7	-2,2	-1,9
2	8 x 8	162	60	175	64	-13	-4	-3,6	-1,1
3	20 x 20	137	70	146	70	-9	0	-2,5	0,0
4	30 x 30	176	68	200	66	-24	2	-6,7	0,6
5	10 x 10	182	63	196	60	-14	3	-3,9	0,8
6	5 x 5	118	84	117	77	1	7	0,3	1,9
7	5 x 5	140	73	145	67	-5	6	-1,4	1,7
8	5 x 5	172	56	177	56	-5	0	-1,4	0,0
9	5 x 5	192	58	196	77	-4	-19	-1,1	-5,3
10	10 x 10	202	46	215	49	-13	-3	-3,6	-0,8
11	15 x 15	28	75	32	103	-4	-28	-1,1	-7,8
12	10 x 10	18	82	30	97	-12	-15	-3,3	-4,2
13	5 x 5	200	81	210	82	-10	-1	-2,8	-0,3
14	7 x 7	194	40	211	37	-17	3	-4,7	0,8
15	5 x 5	204	82	227	75	-23	7	-6,4	1,9
16	10 x 10	206	85	223	77	-17	8	-4,7	2,2
17	15 x 15	186	50	183	48	3	2	0,8	0,6
18	5 x 5	181	60	192	58	-11	2	-3,1	0,6
19	10 x 10	212	83	222	79	-10	4	-2,8	1,1
20	10 x 10	28	85	51	87	-23	-2	-6,4	-0,6
21	15 x 15	205	55	210	53	-5	2	-1,4	0,6
22	10 x 10	201	62	206	60	-5	2	-1,4	0,6
23	10 x 10	218	88	220	85	-2	3	-0,6	0,8
24	15 x 15	210	56	219	56	-9	0	-2,5	0,0
25	10 x 10	217	77	223	81	-6	-4	-1,7	-1,1
26	15 x 15	175	54	189	56	-14	-2	-3,9	-0,6
27	20 x 20	188	45	196	48	-8	-3	-2,2	-0,8
28	20 x 20	199	68	191	54	8	14	2,2	3,9
29	20 x 20	261	61	262	64	-1	-3	-0,3	-0,8

Poznámka. Hodnoty azimutu a sklonu plôch z meraní získaných metódou TLS boli určené v grafickom prostredí softvéru Trimble RealWorks 6.5 preložením plôch bodmi zodpovedajúcimi ich obrysom, pričom boli opravené o hodnotu meridiánovej konvergencie – uhla, ktorý zvierá rovnobežka s osou +X Křovákova zobrazenia so smerom geografického poludníka v mieste merania (Buchar, 1981) a o hodnotu magnetickej deklinácie – uhol medzi smerom magnetického a geografického poludníka v mieste merania (Web. 5). Takto upravené výsledky sú vzájomne kompatibilné a porovnateľné s hodnotami získanými geologickým kompasom.

Note. Azimuth and dip of planes obtained by TLS method were determined applying graphic environment Trimble RealWorks 6.5 by positioning points on planes, corresponding with their contour. They were corrected by a value of meridian convergence – an angle between the parallel line with +X axis of the Křovák projection to direction of the geographic meridian (Buchar, 1981), as well as by the value of magnetic declination – angle between the direction of magnetic and geographic meridians in the measuring site (Web. 5). Such modified results are mutually compatible and comparable with values obtained by geological compass.

Porovnanie výsledkov metodiky TLS aplikáciou štandardných tektonogramov využívaných v štruktúrnej geológii, ktoré zobrazuje obr. 18, vychádza tiež v prospech zavedenia metodiky TLS do štruktúrnej praxe.

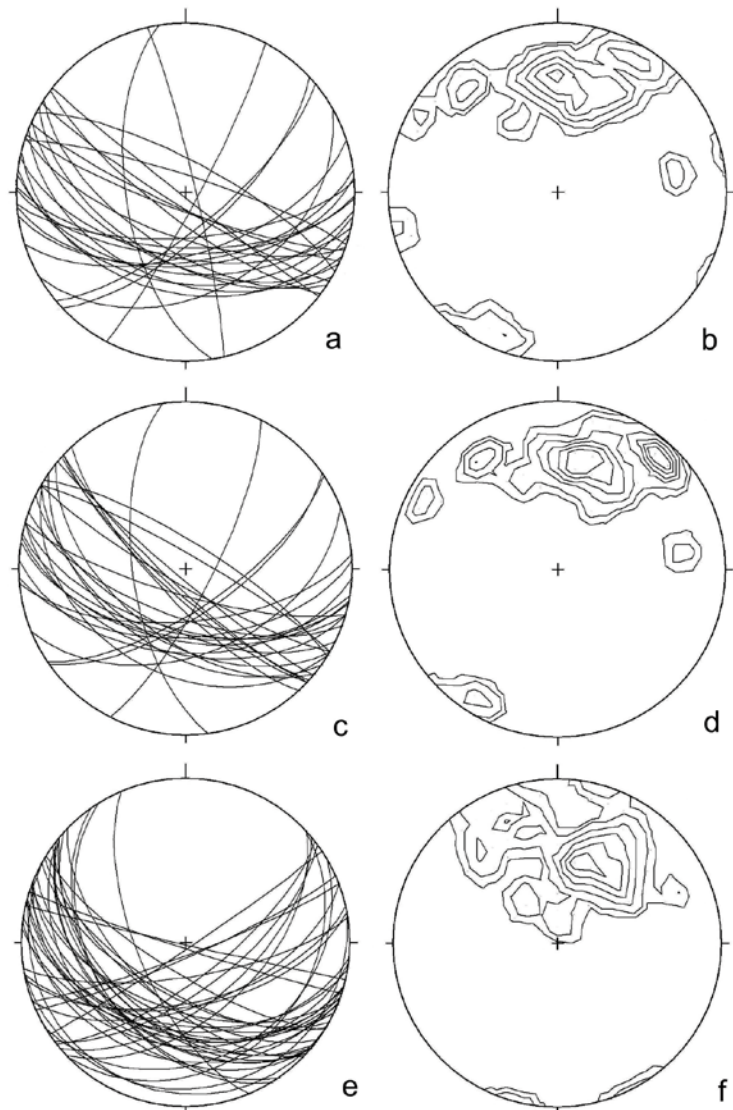
Výhodou metodiky TLS – aplikáciou laserového skenera s priestorovou vzdialenosťou skenovaných bodov 1 cm (tab. 1) – pri štruktúrnom výskume je teda možnosť získania komplexných priestorových charakteristík (uhla sklonu) planárnych štruktúr (vrstovitosti, zlomových, klivážových a dislokačných plôch, prípadne aj puklín malých rozmerov, rádovo už od 5 x 5 cm). V prípade veľkých stien v kameňolomoch, prípadne prirodzených odkryvov, ťažko dostupných priamemu zberu štruktúrnych dát geologickým kompasom, považujeme metodiku TLS za hodnotný a kvalitný komplementárny nástroj štruktúrneho geológa.

Keďže aplikácia metodiky TLS na využitie v štruktúrnej geológii bola testovaná na Slovensku prvý raz, meranie sa uskutočnilo len z jedného stanovišťa situovaného

v kolmej pozícii cca 50 m od skenovanej plochy (steny kameňolomu). Toto umožnilo zoskenovať len plochy bezprostredne zasiahnuteľné laserovým lúčom, t. j. zhruba s azimutom $90^\circ - 270^\circ$ pri orientácii lomovej steny na juh (azimutálny rozsah 180°). Preto aj diagramy na obr. 18 (c – f) zobrazujú len plochy s takýmto azimutom. Aplikácia metodiky TLS v štruktúrnej geológii pri našich ďalších výskumoch bude využívať laserové skenovanie planárnych objektov z dvoch vzájomne vzdialených stanovišť, čo po vhodnom matematickom spracovaní umožní ešte dokonalejšie 3D zobrazovanie objektov a prisudzovanie štruktúrnych parametrov v predpokladanom azimutálnom rozsahu až do 300° .

Záver

Terestrické metódy merania a dokumentovania skalných útvarov a objektov v povrchových lomoch sú



Obr. 18. Porovnanie štruktúrnych parametrov plôch na východnej strane lomovej steny v severnom ukončení 2. etáže, meraných geologickým kompasom (a, b) a laserovým skenerom Leica ScanStation C10 (TLS; c – d) dňa 14. 5. 2013. Ľavé tektonogramy vyjadrujú veľké oblúky meraných plôch (priesečníky so spodnou pologulou). Pravé kontúrové tektonogramy vyjadrujú pozíciu pólů týchto plôch s maximami 11,3 % na $180/59^\circ$ (b), 13,4 % na $220/79^\circ$ (d) a 11,8 % na $192/41^\circ$ (f). Izolinie sú v prípadoch b, d, f rovnaké: 1,0; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0 a 10,0. a – b – plochy merané kompasom; c – d – parametre tých istých plôch ako a – b, získané po zameraní laserovým skenerom a počítačovým spracovaním pomocou softvéru Trimble RealWorks 6.5; e – f – ukážka časti z obrovského množstva štruktúrnych dát získaných laserovým skenovaním bez potreby ich fyzického merania geologickým kompasom.

Fig. 18. Comparison of structural parameters of planes in the eastern side of the quarry wall in northern termination of 2nd storey, measured by geological compass (a, b) and laser scanner Leica ScanStation C10 (TLS; c–d) on 14. 5. 2013. Left stereograms express great circles of measured planes (intersections with the lower hemisphere). Right contour stereograms express position of poles of these plains with maximas 11.3 % on $180/59^\circ$ (b), 13.4 % on $220/79^\circ$ (d) and 11.8 % on $192/41^\circ$ (f). Isolines in cases b, d, f were the same: 1.0; 2.0; 4.0; 6.0; 8.0 and 10.0. a–b – planes measured by compass; c–d – parameters of the same planes as a–b, obtained by laser scanning and computer processing by means of the software Trimble RealWorks 6.5; e–f – manifestation of a part of immense number of structural data obtained by laser scanning without a need of measuring by geological compass.

stále najviac používanými metódami predovšetkým pre ich dostupnosť. Cieľom tejto práce bolo kvantifikovať možnosti terestrických geodetických metód merania prirodzených a umelých skalných útvarov s ohľadom na ich praktické využitie najmä pri ich modelovaní, pri určovaní ich posunov a pretvorení, ako aj pri určovaní objemov odťažených zásob. Ako preukázal náš výskum, úplne novou oblasťou využitia metodiky terestriálneho laserového skenovania (TLS) je oblasť štruktúrnej geológie, a to prisudzovanie štruktúrnych parametrov plochám nedostupným priamemu meraniu geologickým kompasom. Na tieto účely bude metodika ďalším výskumom ešte vylepšená o terestrické laserové skenovanie z dvoch vzdialených stanovišť, čo umožní zobrazenie plôch vo väčšom azimutálnom intervale (300° miesto 180° pri skenovaní z jedného stanovišta).

Na základe výsledkov analýzy spracovaných priestorových údajov a modelov ťažobnej steny meranej vybranými terestrickými geodetickými metódami je možné vyvodiť závery o významnosti rozdielov modelovaných povrchov oproti referenčnému povrchu.

Výsledky porovnania hodnôt rozdielu modelovaných povrchov v rezoch (tab. 2) oproti referenčnému povrchu potvrdzujú predpoklad, že hustota meraných bodov a detailnosť vymodelovaného povrchu priamo ovplyvnia kvalitu výsledku. Metódami terestrického laserového skenovania sme schopní získať súbory s vysokou plošnou hustotou meraných bodov a bez zásahu merača tak získame priestorové údaje aj na kritických (nepriístupných) miestach objektu – konvexné a konkávne tvary. Pri meraní pomocou UMS s manuálnym cielením je výber meraných bodov závislý od odhadu a skúsenosti merača, čo môže mať nepriaznivý vplyv na výsledný tvar modelovanej plochy. Meraním pomocou GNSS nie je možné merať body na zvislej stene objektu, tie sú fyzicky neprístupné. Táto skutočnosť je najväčším nedostatkom metódy a má výrazne – negatívny vplyv na výsledný model povrchu.

Napriek výrazným rozdielom povrchov v rezoch, ako aj pri hodnotení rozdielov objemov je pri všetkých porovnávaných metódach celková chyba modelovaného objemu telesa do troch percent (tab. 3). Táto hodnota je bankskými prevádzkami všeobecne akceptovaná, preto možno všetky použité metódy merania označiť ako vhodné na určovanie objemov odťažených zásob nerastných surovín.

PodĎakovanie. Tento príspevok vznikol s finančnou podporou grantovej agentúry VEGA v rámci riešenia grantovej úlohy č. 1/0887/11. Autori súčasne ďakujú Ing. Petrovi Kováčovi za podnetné diskusie k ložiskovému pomerom v lokalite a tiež spoločnosti VSK MINERAL, s. r. o., za umožnenie geodetických a štruktúrno-geologických prác v lome.

References

BAJTALA, M., BRUNČÁK, P., KUBINEC, J., LIPTÁK, M. & SOKOL, Š., 2011: The problem of determining the volumes using modern surveying techniques. *J. Interdisciplinary Research*, 1, 2.

- BÖHM, J., RADOUCH, V. & HAMPACHER, M., 1990: Teorie chyb a vyrovnávací počet. Geodetický a kartografický podnik, Praha.
- BLIŠŤAN, P., 2005: Priestorové modelovanie geologických objektov a javov v prostredí GIS. *Acta Montan. Slov.*, 10, 3, 296 – 299.
- BLIŠŤAN, P., 2012a: Interpolačné metódy pre modelovanie a vizualizáciu priestorových javov v prostredí GIS. In: *Fyzikálne faktory prostredia (mimoriadne číslo)*, 2, 99 – 105.
- BLIŠŤAN, P., 2012b: Modelovanie a výpočet objemu nepravidelných telies – princípy. *Egrse*, 19, 2, 13 – 25.
- BUCHAR, P., 1981: Přibližný výpočet meridiánové konvergence v Křovákove zobrazení. *Geodetický a kartografický obzor*, 27/69, 2, 37 – 38.
- ERDÉLYI, J., LIPTÁK, I., KYRINOVÍČ, P. & KOPÁČIK, A., 2012: Určovanie posunov a pretvorení železobetónových konštrukcií pomocou TLS. In: *Geodézia, kartografia a geografické informačné systémy 2012: VII. vedecko-odborná medzinárodná konferencia, Tatranská Lomnica, SR, 24. – 25. 10. 2012. Košice, Technická univerzita v Košiciach*.
- FARKAŠOVSKÝ, J. & BÓNOVÁ, K., 2009: Štruktúrny profil tektonitmi rolvskej strižnej zóny (veporikum Čiernej hory). In: *Šimon, L. & Kohút, M. (eds.): Zbor. abstraktov zo Spoločného kongresu Slovenskej a Českej geologickej spoločnosti. Konf., Symp., Sem., Vyd. D. Štúra, Bratislava, 59 – 60*.
- GAŠINEC, J., GAŠINCOVÁ, S., ČERNOTA, P. & STAŇKOVÁ, H., 2012: Zastosowanie naziemnego skaningu laserowego do monitorowania logu gruntowego w Dobszyńskiej Jaskini Lodowej. *Inżynieria Mineralna*, 13, 2, 30, 31 – 42.
- GAŠINEC, J., GAŠINCOVÁ, S. & GERGELOVÁ, M., 2012: Tvorba priestorového modelu Dobšinskej ľadovej jaskyne a jeho pripojenie na JTSK03. In: *Geodetický a kartografický obzor*, 58, 9, 21 – 223.
- GAZDAČKO, L., 1994: Polyfázový deformačný vývoj východnej časti stykovej zóny gemerika a veporika. *Miner. Slov.*, 26, 387 – 398.
- GRECULA, P., NÁVESNÁK, D., BARTALSKÝ, B., GAZDAČKO, L., NÉMETH, Z., IŠTVÁN, J. & VRBATOVÍČ, P., 1990: Shear zones and arc structure of Gemericum, the Western Carpathians. *Miner. Slov.*, 22, 2, 97 – 110.
- JACKO, S., 1985: Litostratigrafické jednotky kryštalinika Čiernej hory. *Geol. Práce, Spr.*, 82, 127 – 133.
- JACKO, S., SASVÁRI, T., ZACHAROV, M., SCHMIDT, R. & VOZÁR, J., 1996: Contrasting styles of Alpine deformations at the eastern part of the Veporicum and Gemericum units, Western Carpathians. *Slovak Geol. Mag.*, 2, 151 – 164.
- JACKO, S. & FARKAŠOVSKÝ, R., 2000: Tertiary semi-ductile shear event within Margecany and related shear zones. *Miner. Slov.*, 32, 175 – 178.
- NÉMETH, Z., 2005: Paleopiezometry: Tool for determination of differential stresses for principal ductile shear zones of Gemericum, Western Carpathians. *Slovak Geol. Mag.*, 11, 2 – 3, 185 – 193.
- NÉMETH, Z., RADVANEC, M., GAZDAČKO, L. & KOBULSKÝ, J., 2012: Variscan tectonic setting vs. Alpine overprint in Gemericum (Inner Western Carpathians): Their role in recent distribution of tectonic units in the eastern part of the territory as expressed in significant localities. *Miner. Slov.*, 44, 1, *Geovest.*, 8 – 15.
- POLÁK, M. (ed.), JACKO, S., VOZÁROVÁ, A., VOZÁR, J., GROSS, P., HARČÁR, J., ZACHAROV, M., BALÁŽ, B., LIŠČÁK, P., MALÍK, P., ZAKOVIČ, M., KAROLI, S. & KALIČIAK, M., 1997: Vysvetlivky ku geologickej mape Braniska a Čiernej hory 1 : 50 000. *Vyd. D. Štúra, ŠGÚDŠ, Bratislava*, 201 s.
- RAMSAY, J. G. & HUBER, M. I., 1987: The techniques of modern structural geology, volume 2: Folds and fractures. *Academic Press, New York*, 1 – 700.
- SANDER, B., 1970: An introduction to the study of fabrics of geological bodies (Phillips, F. C. & Windsor, G., trans.). Pergamon Press, London, 1 – 641. (Original publication 1930).
- VARCHOLOVÁ, J., MIHALIČ, A., URBAN, V., VONDRÁČEK, L. & VALKO, P., 1981: Sedlice II. Záverečná správa a výpočet zásob. *Archív. ŠGÚDŠ, Bratislava*, 114 s.
- Web.1: Leica FlexLine TS 02. http://www.geotech.sk/downloads/Totalne-stanice/FlexLine_TS02_Datasheet_en.pdf. [Cit. 27. 03. 2013].

Web.2: Trimble VX SpatialStation. <http://www.trimble.com/3D-laser-scanning/vx.aspx?dtlID=overview&>. [Cit. 27. 03. 2013].
Web.3: Leica ScanStation C 10. http://www.geotech.sk/downloads/Laserove-skeneryHDS/Leica_ScanStation_C10_Brochure_en.pdf. [Cit. 27. 03. 2013].
Web.4: Leica GPS 900CS. <http://www.geotech.sk/Produkty/GPS-GNSS/GPS-900CS.html>. [Cit. 27. 03. 2013].

Web.5: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#declination>. [Cit. 18. 06. 2013].

Rukopis doručený 19. 6. 2013
Revidovaná verzia doručená 25. 6. 2013
Rukopis akceptovaný red. radou 27. 6. 2013

The application of geodetic methods for modelling the quarry walls and rock outcrops and their use in structural analysis: Case study from the quarry at Sedlice, Slovakia

Article presents modern geodetic methods for collecting spatial data about natural or anthropogenic objects, as well as possible application of these methods in structural geology. These methods were tested and applied on exploitation wall terminating 2nd storey in the dolomite quarry at the village of Sedlice in the Prešov District, Eastern Slovakia (Figs. 1 and 2). The quarry Sedlice I is located ca 2 km to SE of the Sedlice village and 1.2 km to SSW of the Suchá Dolina village.

At the beginning of article, following geodetic methods were tested and mutually compared:

1. Polar method with trigonometric measurement of heights with the total station Leica TS02 (Fig. 3a) – measuring was done manually with targeting on characteristic points of the quarry wall relief.

2. Polar method with trigonometric measurement of heights with Trimble VX Spatial Station (Fig. 3b) in the automatic scanning mode with predefined mutual distance of measured points without manual selection of points.

3. Terrestrial laser scanning by the Leica ScanStation C10 device (Fig. 3c) similarly like at Trimble VX Spatial Station device. A great advantage of the laser scanning consists of a very high preciseness of measurement (4–6 mm) and speed of measurement up to 50 000 points per second.

4. Applying RTK method by GNSS facility Leica GPS900CS (Fig. 3d) we measured mainly the heel and edge of the quarry wall. The points on the wall relief were not measured due to their inaccessibility.

The number of measured points and spatial distance of points in each used method are presented in Tab. 1. The horizontal preciseness of terrestrial methods 1–3 was expressed by the mean positional error m_p of coordinates of measured point. Similarly there was expressed the mean error for trigonometric measurement of heights m_h . The detail terrestrial measuring of points was done at a distance app. 50 m from exploitation wall. Because the measurements were done successively by positioning of facilities on the same stand – at the same positioning coordinates, both errors are similar:

$$m_p \approx m_h \approx \pm 3 - 6 \text{ mm.}$$

Applying above listed methods, we compared digital spatial TIN models, being compiled from obtained spatial data (coordinates X, Y, Z from a great number of points). As a reference model there was chosen that one, consisting

from the data obtained by terrestrial laser scanner Leica ScanStation C10

As follows from comparison of further terrestrial methods with the TLS method, they differ mainly by the density of grid points obtained during the same time, which influences the details on the model surface, being composed from obtained data. Therefore the TLS method is the only possible one for collecting the spatial data about planes used in structural geology. For comparison there was included also the satellite method GNSS, having the disadvantage of the absence of physically inaccessible places, and lower precision of coordinates of measured points.

The results of comparison are presented as differences of surfaces in cross-sections, as well as the differences in volumes determined by the chosen methods in relation to reference surface with the highest number of points (Figs. 5–15, Tabs. 2 and 3).

At testing the application of geodetic methods in structural geology we applied the terrestrial laser scanning (TLS) by the Leica ScanStation C10 device. The article briefly characterizes the geological and tectonic setting of the quarry at Sedlice and its surrounding (Figs. 1 and 2). The Sedlice I quarry is located in the Middle Triassic (Ladinian) Ramsau Dolomites, representing rheologically “hard” horizon situated on Gutenstein Limestones (Anisian) and plastically deformed rheologically “soft” Werfen clayey shales. Beneath, the Lower Triassic quartzites and quartzite sandstones with shale interbeds of the Lúžna Fms. are present, as well as Permian clastics, locally with volcanites (Predajná and Brusno Fms.), and Upper Carboniferous clastics. This rock sequence represents a primary ?Gzhelian-Permian-Mesozoic cover of the Veporic crystalline basement of the Čierna hora Mts. From the north, the dolomites are progressively covered by the Paleogene sandstones and conglomerates of the Borové Fms.

Several Alpine deformation phases (displacements of the basement and superficial nappes, imbrication by overthrusts, unroofing, strike-slips; cf. Jacko et al., 1996; Jacko in Polák, ed., 1997; Gazdačko, 1994; Jacko and Farkašovský, 2000; Farkašovský and Bónová, 2009; Németh et al., 2012) left a complete structural inventory in these cover sequences. Despite, in rheologically “hard” dolomites there remained only several overthrust zones, usually infilled with tectonic calcite-dolomite clay, and dominating brittle fracturing.

In the area of the quarry Sedlice I the dolomite body has simple geological-tectonic structure and represents one technological type of raw material (Varcholová et al., 1981; Kováč, personal inf.). Position of the quarry externally of the main regional discontinuities of the NW–SE trend (cf. Fig. 1) and lithology (the dolomites of Veporic cover) relatively unfavourable for ductile deformation, did not allow to contribute more significantly with our research – e.g. to tectogenesis and kinematics of the Alpine shear zones. Nevertheless, obtained structural data have registered demonstrations of the phases AD₁ and AD₃, though in the case of AD₃ phase, studied structures manifested very low deformation gradient. *In this classification by Németh (2005; cf. Fig. 3b in Németh et al., 2012), based on regional structural findings from Gemericum and eastern contact zone of Gemericum with Veporicum, Alpine deformation phase AD₁ represents the N-vergent to NE-vergent Lower Cretaceous overthrusts and the phase AD₃ represents Tertiary to Recent strike-slips along subvertical shear zones trending NW–SE and NE–SW. In the case of whole eastern contact zone of Gemericum with Veporicum (i.e. along the contact of the Volovské vrchy Mts. with Čierna hora Mts.), the NW–SE trending dextral AD₃ shear zones were found as dominating (cf. Grecula et al., 1990; Gazdačko, 1994; Németh, 2005; Németh et al., 2012). According to classification by Jacko et al. (1996 and following works) found structures in the Sedlice I quarry correspond with products of deformation phases AD₂ and AD₄.*

The bedding found by our research in upper storeys of the quarry was dipping to the north (trend of dip 342° to 7°), with prevalingly medium to moderate dip (35–44°). The same information obtained Varcholová et al. (1981) by deposit exploration, based on the study of symmetrologic relations of joint systems (ac, resp. bc types of joints), measured in adits SŠ-1 and SŠ-2 (adits had trend WNW–ESE). They stated indistinct bedding of east-west trend and moderate dips to N and S. Authors (l.c.) supposed that the bedding planes are folded, but the fold amplitude exceeds the deposit size.

The most distinct discontinuities in the deposit are represented by two north-vergent overthrust planes of regional significance with moderate dip to south, highlighted with several decimetres to metres thick infill by tectonic clay (recrystallized plastic calcitic dolomite of ochre-brown colour).

North overthrust plane cut 1st storey. Further south located overthrust plane, which penetrates southern part of the 2nd storey, was registered and visualized in maps already by Varcholová et al. (1981). Regarding our classification, we affiliate these overthrust planes with the Alpine deformation phase AD₁, i.e. the Lower Cretaceous north-vergent imbrication of the dolomite massif. Accompanying parallel overthrust planes of the lower order (Fig. 4) have demonstrated generally north-south trending striae and macroscopically identifiable overthrust kinematics. Varcholová et al. (1981) found that the overthrust planes of E–W trend and steep to moderate dip to S contain also dragged out Lower Triassic fine-grained sericite-quartz metapsammities from the footwall of the dolomite body.

Structures associated with the post-collision unroofing in the phase AD₂ in the area of deposit were not found. Since the kinematics of unroofing, i.e. the post-collision south-vergent normal faults, was localized to slip horizons of rheologically “softer” monomineral rocks (Lower Triassic quartzites; Németh et al., 2012, Fig. 7 *ibid.*; eventually clayey shales), we suppose that in more distant overlying horizon of the Middle Triassic dolomites the extension has applied only by the origin of brittle extensional fractures (joints) of pure shear character, trending E–W and steeply dipping prevalingly to north, eventually with complementary system of joints, cleavage or dislocation trending N–S, having the transform character, with possibility to represent reactivated structures already from the phase AD₁. First system of fractures, dipping to north sporadically demonstrates striae of N–S trend with dip-slip kinematics. Second system of discontinuities of N–S trend (locally even NNW–SSE trend) was registered already by Varcholová et al. (1981) and interpreted as orthogonal ac-joints related to folded bedding. With the course of ac-joints they parallelized also the main transversal faults in the deposit and its surrounding, being highlighted by the course of valleys: NNW–SSE to N–S trend with steep dip to WSW, dividing the deposit body to two blocks. These findings were verified also by our newer investigation, but we must emphasize that mesostructures of this orientation are less numerous than prevailing system of discontinuities of the trend E–W and medium dip to south.

With deformation phase AD₃ (Tertiary-Recent) we associate the vertical shear zone of the course WNW–ESE (Fig. 2), segmenting the deposit south of the altitude point Kuncov vrch (503.3 m a.s.l.). Parallel with this fault we found in mesoscale the dislocation planes (198/60°) with slickenside lineations (120/20°), indicating indistinct dextral shear. With the activity on shear zones trending WNW–ESE, to NW–SE, we associate also the joint system trending SW–NE (dip 70–80° to SE, resp. 65° to NW), being interpreted by Varcholová et al. (1981) as bc-joints related to the system of transversal folds. Since that time interpretation of the fold origin (according to classical school by Sander, 1970) did not apply the concept of a-type folds (i.e. the fold axis parallel with stretching lineation, cf. Ramsay and Huber, 1987), that time opinion does not contradicts to our knowledge.

The exploited dolomite with its rheological “hardness” and intensive brittle fracturing represented one of the most demanding lithotypes for testing the TLS methodology, used in our research for indirect collection of structural parameters of investigated planes. As demonstrated in comparison of structural data obtained by geological compass, as well as indirect TLS method (Figs. 16–18, Tab. 4), the application of TLS method is meaningful especially for collecting structural data from large objects (quarry walls, large outcrops) not accessible for direct measuring. Because the TLS method was applied from one site app. 50 m distinct from the wall, only planes caught by the laser beam could be visualized (azimuth range close to 180°). Therefore our further research will be focussed on scanning investigated objects from two sites in appropriate mutual distance, allowing the obtain azimuth and dip parameters of planes in a wider azimuth range (up to 300°).