

Stanovenie koeficienta drsnosti puklín (JRC) metódou blízkej digitálnej fotogrametrie

Vladimír Greif & Tomáš Drotár

Katedra inžinierskej geológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Mlynská dolina G, 842 15 Bratislava; greif@fns.uniba.sk, tomas.drotar@gmail.com

AGEOS Estimation of joint roughness coefficient (JRC) by close-range digital photogrammetry

Abstract: This work deals with the evaluation of joint roughness coefficient (JRC) in the rock mass based on the digital photogrammetry and its comparison with traditional method of JRC estimation using linear profiling. The JRC value is used for the estimation of shear strength of discontinuities in rock mass. First method used for JRC determination was the method using comb profilometer used to create roughness profiles by tracing the cross-sections to the paper and digitizing them. The second method made use of principles of digital photogrammetry, where digital images were used for the creation of 3D model of joint surface, from which roughness profiles were extracted. Both methods were used at the Devínska cesta road cut in Bratislava. The profiles obtained by two methods were compared visually with the standard profiles. Based on this comparison each profile was given a JRC value which is necessary input for the estimation of joint shear strength. The value of JRC obtained by both methods was in range 14–16 corresponding to the standard profile no. 8. Further, both methods, contact and non-contact, were compared by subtracting both curves and statistically analyzing the difference in more than 1500 sampling points. The results showed that the standard deviation in the case of profile 16–17 was 0.422 mm, which represents 4.4 % of the roughness amplitude, while for the profile 22–23 the standard deviation was 0.35 mm, representing 3.5 % of the roughness amplitude. Both standard deviations were under the 5 % margin, which gives good indication of the acceptability of photogrammetric method of JRC determination.

Key words: digital photogrammetry, joint roughness coefficient, comb profilometer, Bratislava-Devínska cesta road cut

1. ÚVOD

V podmienkach malých normálových napätí je správanie horninových masívov kontrolované najmä prítomnosťou diskontinuit, po ktorých nastáva ušmyknutie ľahšie ako cez intaktný horninový materiál (Hoek, 2007). Dlhodobo známy fakt, že drsnosť puklín má veľký vplyv na pevnosť, tuhosť a priepustnosť horninových masívov vyvolal snahy o vytvorenie kritérií na stanovenie šmykovej pevnosti diskontinuit s ohľadom na vplyv drsnosti puklín. Známe sú hlavne práce Pattona (1966), Ladanyiho & Archambaulta (1970), Jaegera (1971), Bartona (1973), Bartona & Choubeyho (1977) a Bartona & Bandisa (1990). S vývojom šmykových kritérií zahŕňajúcich drsnosť puklín vzišla potreba merania povrchov diskontinuit. Od počiatku 70-tych rokov až do dnešných dní bolo veľa prác orientovaných práve týmto smerom. Viacero metód merania drsnosti puklín možno v zásade rozdeliť do dvoch skupín. Prvú tvoria kontaktné metódy, pri ktorých dochádza k priamemu dotyku meracieho zariadenia a povrchu diskontinuity. Sem patria lineárne profilometrovanie zahŕňajúce rotačný a hrotový profilometer (Weissbach, 1978); hrebeňový profilometer (Barton & Choubey, 1977, Stimpson, 1982); rôzne pravítka a meracie hrany (Piteau, 1970, Milne et al., 1992) a tieňová profilometria (Maerz et al., 1990).

Druhou skupinou sú bezkontaktné metódy merania drsnosti puklín, umožňujúce meranie aj neprístupných a nebezpečných miest v skalných odkryvoch. K týmto metódam patria (Poropat, 2006):

- ▶ pasívna alebo aktívna triangulácia (napr.: blízka digitálna terestriálna fotogrametria);
- ▶ priame alebo nepriame meranie vzdialenosti (napr.: laserové skenovanie);
- ▶ moiré techniky.

Táto práca sa venuje porovnaniu najstaršej, ale zároveň najpoužívanejšej metódy merania drsnosti puklín, ktorou je použitie hrebeňového profilometra s bezkontaktnou metódou blízkej digitálnej terestriálnej fotogrametrie a zhodnoteniu aplikovateľnosti tejto metódy v praxi na príklade skalného odkryvu v odreze Devínskej cesty v Bratislave.

2. DRSNOSŤ PUKLÍN A SPÔSOBY JEJ ZISŤOVANIA

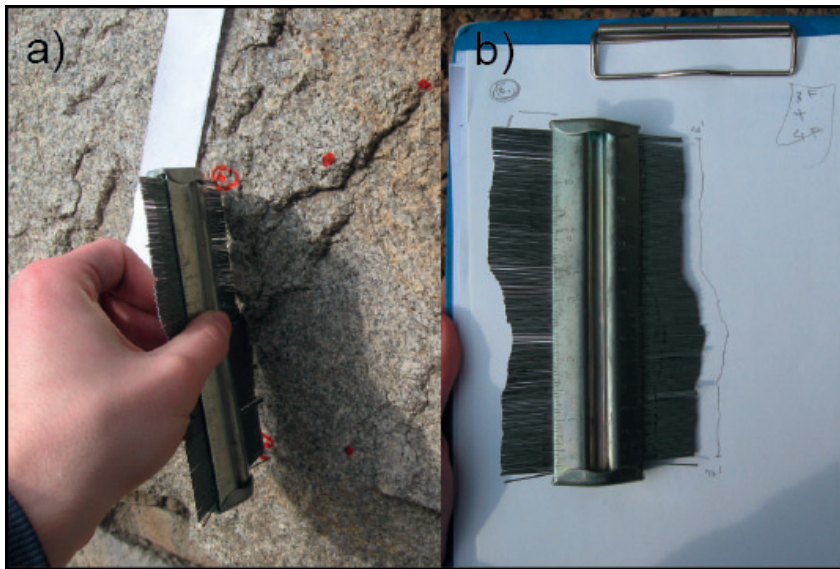
2.1. Lineárne profilometrovanie

Lineárne profilometrovanie je proces merania kolmých vzdialeností medzi priamou referenčnou líniou a povrchom diskontinuity v pravidelných intervaloch. Výsledné súradnice $[x, y]$ pospájané do krivky sa nazývajú 2D profily drsnosti. Pre charakterizáciu drsnosti pukliny musí byť viacero takýchto profilov odčítaných v rôznych smeroch. Aj keď v laboratórnych podmienkach sú na vytvorenie profilov drsnosti najpoužívanejšie hrotové alebo rotačné profilometre, ich použitie v teréne je nepraktické a časovo veľmi náročné. Pre tento účel sa v teréne najviac osvedčili hrebeňové profilometre (Obr. 1), ktoré sú oveľa

praktickejšie, aj keď pracujú s menším rozlíšením a presnosťou. Takýto typ profilometra obsahuje zvyčajne 100–150 kovových posuvných ihlíc, ktoré pri dotyku s povrchom diskontinuity kopírujú jej tvar a prekreslením vzniknutého tvaru ceruzkou na papier dostaneme výsledný profil drsnosti. Táto jednoduchá metóda sa úspešne používa už vyše 30 rokov a z profilov drsnosti boli stanovené empirické vzťahy na výpočet šmykovej pevnosti puklín v skalnom masíve.

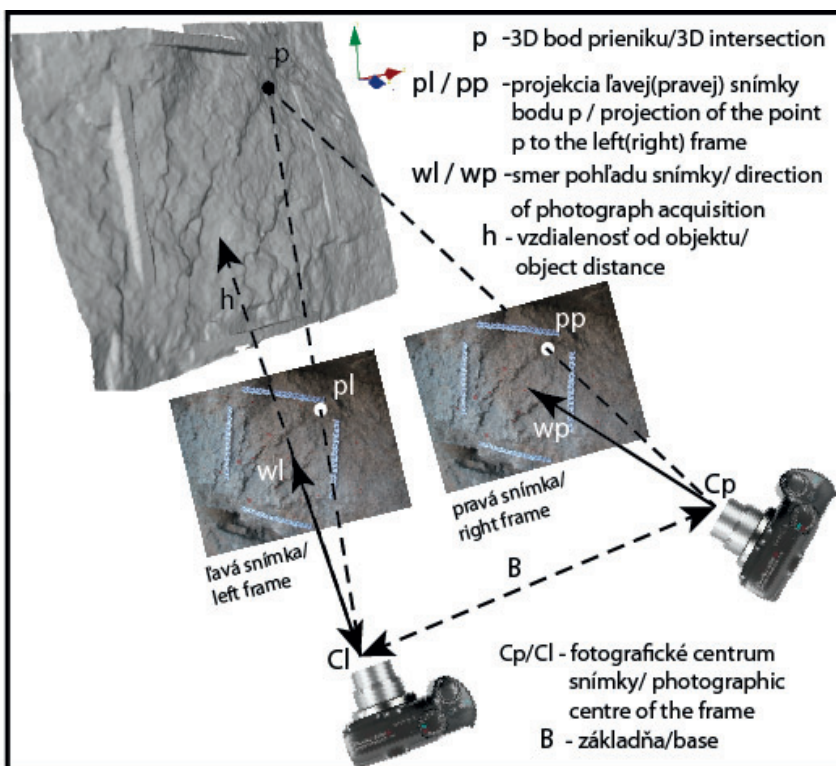
2.2 Metóda blízkej digitálnej terestriálnej fotogrametrie

Táto metóda patrí medzi metódy pasívnej triangulácie, teda medzi bezkontaktné metódy zisťovania drsnosti puklín. Blízka digitálna terestriálna fotogrametria (ďalej fotogrametria) je proces merania 3D informácie z dvoch alebo viacerých 2D snímok rovnakej scény, zosnímaných z rôznych pozícií (Birch, 2006; Gaich et al., 2006). Tento proces zahŕňa identifikáciu spoločných bodov na každej snímke, ich projekciu do priestoru a zis-



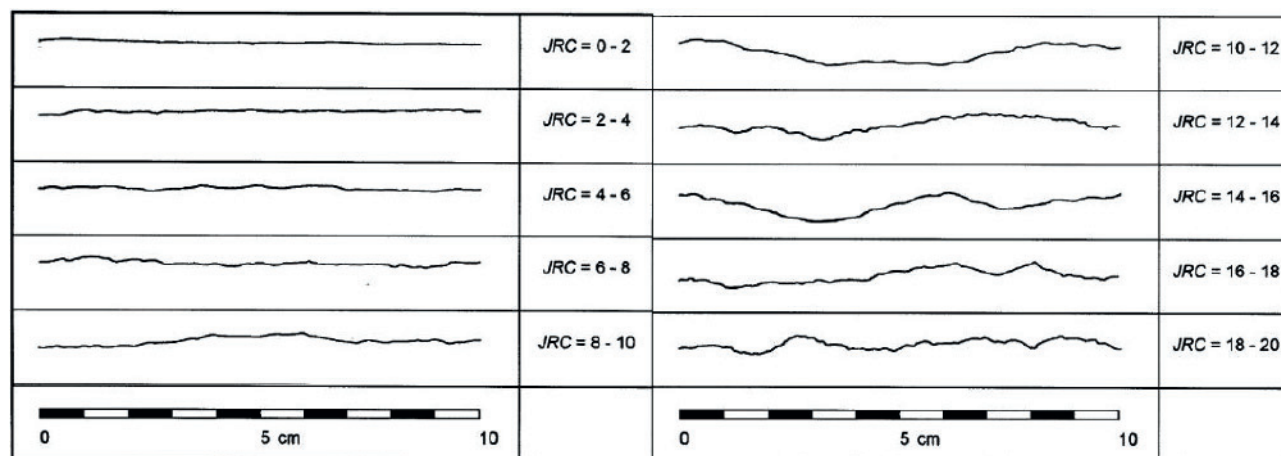
Obr. 1. a – hrebeňový profilometer; b – pre-kreslenie profilu drsnosti na papier.

Fig. 1. a – Comb profilometer; b – tracing of the roughness profile to paper.



Obr. 2. Vytvorenie stereoskopického obrazu priesekovou fotogrametriou.

Fig. 2. Stereoscopic image creation by intersection photogrammetry.



Obr. 3. Štandardné profily drsnosti povrchu diskontinuity (podľa Barton & Choubey, 1977).

Fig. 3. Standard discontinuity roughness profiles (after Barton & Choubey, 1977).

tenie pozície takto určeného bodu ako priesečníka uvedených projekcií (Obr. 2). Pre dvojicu snímok je vzdialenosť medzi stanoviskami označovaná ako základňa (baseline, B). Spravidla je táto vzdialenosť rovná $1/5$ až $1/10$ vzdialenosti od objektu (h). Voľba vhodnej základne (B) je kompromisom, pretože väčšia základňa sice zvyšuje presnosť, ale zároveň spôsobuje väčšiu zmenu perspektívy medzi snímkami, takže identifikácia spoločných bodov na dvojici snímkov sa stáva náročnejšou.

Použitie fotogrametrie pre potreby charakterizácie skalných masívov zahŕňajúce aj meranie drsnosti puklín bolo prvýkrát navrhnuté začiatkom 70-tych rokov (Wickens & Barton, 1971; Ross-Brown et al., 1973). Toto viedlo aj k začleneniu fotogrametrie medzi navrhované metódy merania topografie diskontinuit Medzinárodnou spoločnosťou pre mechaniku skalných hornín. Napriek tomu, ťažkosti spojené s automatizáciou výpočtu 3D bodov, potrebný výpočtový čas a problémy spojené s filmovými fotoaparátmi spôsobili, že využitie fotogrametrie na tieto účely stagnovalo (Poropat, 2006). S príchodom lacných digitálnych fotoaparátov a nárastom výpočtovej kapacity počítačov v poslednej dobe sa fotogrametria stala dostupnejšou pre väčšiu skupinu aplikácií. Od počiatku 90-tych rokov bolo publikovaných viacero prác s témami zameranými na využitie fotogrametrie pri hodnotení drsnosti puklín v laboratórnych podmienkach (Jessell et al., 1995; Lee & Ahn, 2004), ako aj in situ (Haneberg, 2007; Baker et al., 2008; Poropat, 2008).

2.3. Stanovenie JRC

Najpoužívanejšou metódou určenia šmykovej pevnosti nevyplnených a nezvetraných diskontinuit v skalných masívoch je empirická metóda Barton-Bandis (Barton, 1973, Barton & Choubey, 1977; Barton & Bandis, 1990). Výsledný vzorec pre určenie šmykovej pevnosti diskontinuity (τ) pri danom normálovom napätí (σ_n) má tvar:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan [\varphi_b + JRC \cdot \log_{10}(JCS / \sigma_n)] \quad (1)$$

Vzorec sa skladá z troch indexových parametrov JRC – koeficient drsnosti puklín (Joint Roughness Coefficient), JCS – pevnosť povrchu pukliny v tlaku (Joint Wall Compressive Strength) a Φ_b – základný uhol vnútorného trenia (basic friction angle). Všetky parametre je možné merať ako v laboratóriu, tak aj v teréne.

Koeficient drsnosti puklín JRC je v podstate parameter zhodnosti krivky profilu drsnosti s referenčnými krivkami podľa Barton & Choubey (1977), ktorý nadobúda hodnoty od 0 pre veľmi hladké povrchy až po 20 pre drsné povrchy. Táto hodnota môže byť spätne vypočítaná z výsledkov skúšok sklonomerom na vzorkách skalných hornín. Avšak tento spôsob určenia JRC znehodnocuje prediktívnu funkciu Barton-Bandisovej rovnice pre šmykovú pevnosť na pukline. Preto Barton & Choubey (1977) vypracovali sériu štandardných profilov umožňujúcich odvodenie parametra JRC na základe vizuálneho porovnania nameraných hodnôt s referenčnými profilmi (Obr. 3). Avšak táto jednoduchá metóda umožňuje subjektívne vyhodnotenie profilov, čo má za následok značné odchýlky v odhadoch JRC (Beer et al., 2002). V prípade laboratórnych vzoriek malých rozmerov bude drsnosť povrchu približne rovnaká ako v štandardných profiloch, avšak je potrebné uvažovať s faktom, že v teréne môže byť dĺžka povrchu diskontinuity až niekoľko metrov a hodnota JRC musí byť určená pre jej celú dĺžku. Okrem stanovenia šmykovej pevnosti puklín je charakteristika drsnosti puklín dôležitá aj pri klasifikačných systémoch skalných masívov ako sú RMR (Bieniawski, 1989), Q-system (Grimstad & Barton, 1993), RMI (Palmström, 2000) alebo SSCP (Hack et al., 2003). V týchto klasifikačných systémoch vystupuje drsnosť v rámci rôznych parametrov, teda už nie ako JRC. Koeficient JRC je do veľkej miery subjektívnym parametrom, závisiacim od porovnania profilu drsnosti s referenčnými profilmi podľa Barton & Choubeyho (1977). Tento problém sa snažilo vyriešiť viacero autorov korelovaním štandardných JRC hodnôt s inými, objektívnejšími spôsobmi hodnotenia drsnosti povrchu pukliny. V priebehu rokov to boli empirické vzťahy využívajúce štatistické parametre opisu drsnosti ako napríklad Z_2 (kvadratický priemer prvej derivácie profilu drsnosti) (Tse & Cruden, 1979; Yu & Vayssade, 1991; Yang et al., 2001; Kim & Lee, 2009) alebo

koeficient drsnosti R_p (Maerz et al., 1990; Yu & Vayssade, 1991; Kim & Lee, 2009); veľkosť fraktálu D (Turk et al., 1987; Carr & Warriner, 1989; Lee et al., 1990; Wakabayashi & Fukushige, 1992; Xie & Pariseau, 1992; Jang et al., 2006; Kim & Lee 2009) a iné s cieľom zobjektívizovať kvantifikáciu JRC.

3. METODICKÝ POSTUP

Za účelom porovnania dvoch metód stanovenia drsnosti povrchu diskontinuit bol ako modelová lokalita vybraný odrez Devínskej cesty v Bratislave, ktorý je lokalizovaný v juhozápadnej časti mestskej časti Bratislava IV Karlova Ves v tesnej blízkosti pozemnej komunikácie smerujúcej do Devína na súradniciach $48^{\circ}8'51.59''N$ zemepisnej šírky a $17^{\circ}2'49.84''E$ zemepisnej dĺžky v nadmorskej výške 150 m n. m. (Obr. 4).

Odkryv horninového masívu na lokalite sa nachádza v hercýnskych granitoch. Dvojsludové granity obsahujú zonálne plagioklasy s albitovými lemmami, ktoré často uzavierajú oválne kremeň a biotit. Makroskopicky sú to strednozrnné až hrubozrnné horniny, ktorých farba závisí od pomeru slúd a rôzneho zastúpenia živcov, pričom sa pohybuje od svetlých odtieňov až po sivozelenkavé. Masív má doskovitú blokovitú, s hrúbkou jednotlivých lavíc od 0,5 m do 1 m, sklonených smerom na juhozápad (Bezák et al., 2009).

3.1 Lineárne profilometrovanie

Na skalnej stene bolo vyznačené pracovné pole v rozsahu asi 100×100 cm, v ktorom boli hrebeňovým profilometrom s dĺžkou 15 cm zmerané 4 profily drsnosti v smere predpokladaného ušmyknutia. Počiatkové a koncové body všetkých profilov drsnosti boli označené červenou farbou priamo na povrchu pukliny. Každý profil bol prekreslený na papier a jednotlivé profily zaznamenané na papieri boli zoskenované skenerom Lexmark X2620, čím sa vytvoril digitálny obraz vo formáte [*.jpeg]. Papierový záznam bol zdigitalizovaný v programe Un-Scan-It pomocou automatického algoritmu sledovania čiary na základe jej farby a šírky. Z toho dôvodu bolo potrebné zdefinovať farbu čiary, mierky osí x , y a vyznačiť rovnú časť profilu pre automatické stanovenie hrúbky čiary. Digitalizáciou boli vytvorené $[x, y]$ súradnice profilov vo formáte [*.txt] s krokom približne 0,1 mm. Zo súradníc jednotlivých profilov boli vykreslené grafy, ktoré sa použili na následné stanovenie JRC a porovnanie výsledkov z profilometra a digitálneho 3D modelu.

3.2 Kalibrácia digitálneho fotoaparátu a vytvorenie digitálnych snímok

Na účely vyhotovenia snímok potrebných na vytvorenie 3D modelu povrchu diskontinuity bol použitý digitálnym fotoa-



Obr. 4. Lokalizácia odrezu granitového masívu Devínskej cesty.

Fig. 4. Localization of the Devínska cesta road cut.

parát Canon PowerShot A590 IS, ktorý bol predtým kalibrovaný vo fotogrametrickom programe PhotoModeler Scanner, v ktorom boli neskôr spracovávané digitálne snímky. Zámerne bol použitý fotoaparát nižšej triedy, ktorý je bežne dostupný a používaný pri dokumentácii skalných odkryvov s rozlíšením 8 megapixelov.

Kalibrácia pozostávala zo zosnímania série snímok kalibračnej mriežky, ktorá obsahuje 100 bodov zoradených v radoch po desať (10 x 10). Mriežka bola snímaná z každej strany (t.j. 4x) v troch orientáciách fotoaparátu (4 strany x 3 orientácie fotoaparátu = 12 snímok) a to:

- ▶ s vodorovnou orientáciou fotoaparátu;
- ▶ s fotoaparátom otočeným o 90° v smere hodinových ručičiek od bodu 1;
- ▶ s fotoaparátom otočeným o 90° proti smeru hodinových ručičiek od bodu 1,

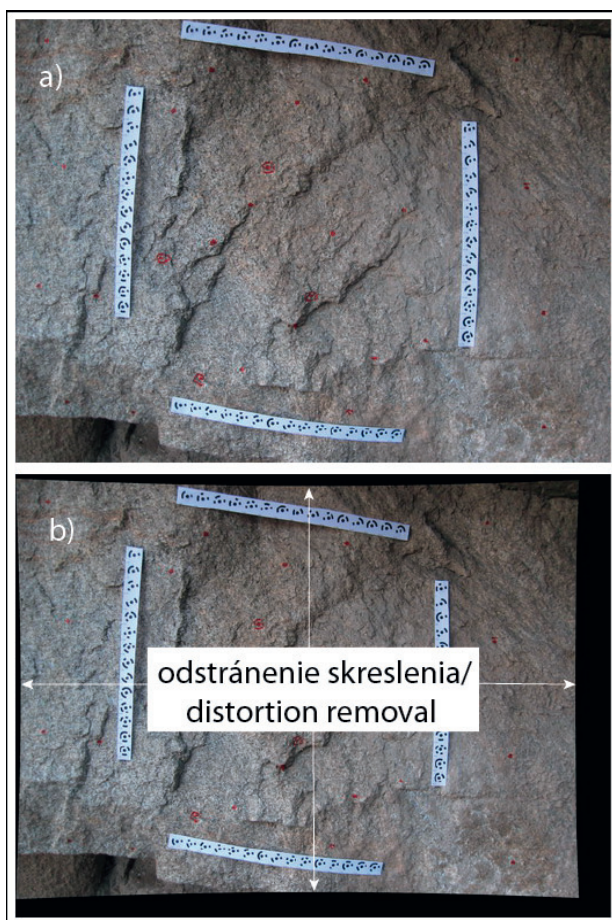
pričom podstatné bolo pokrytie čo možno najväčšej plochy senzora fotoaparátu bodmi kalibračnej mriežky. Počas kalibrácie v programe PhotoModeler Scanner dochádza k výpočtu jednotlivých koeficientov potrebných na elimináciu súdkovitého a radiálneho skreslenia spôsobeného šošovkou objektívu. Toto skreslenie je z digitálnej snímky odstránené v procese tzv. idealizácie snímky, kedy sú jednotlivé body digitálnej snímky posunuté v závislosti od vzdialenosti od centra snímky smerom k okraju (Obr. 5). Tento proces umožňuje vytvorenie snímky, v ktorej sú zachované rovnaké vzdialenosti medzi obrazovými bodmi, bez ohľadu na ich pozíciu. Toto bolo v minulosti dosahované špeciálnymi fotogrametrickými aparátmi s extrémne nákladnou optikou. V súčasnosti sa dajú porovnateľné snímky vytvoriť s použitím bežných, nízko nákladových fotoaparátov za predpokladu ich spojenia s fotogrametrickým softvérom po ich úspešnej kalibrácii. Tu sa prejavila hlavná výhoda digitálnej fotogrametrie oproti klasickej, používajúcej záznam na film.

Pred vyhotovením snímok bolo na stenu pripevnených 15 fotogrametrických terčikov (coded targets) zoradených v 4 pásoch, ktoré boli vytvorené v programe PhotoModeler Scanner. Ide o unikátne kódové terče okrúhloho tvaru, ktoré sú automaticky rozoznávané programom PhotoModeler Scanner a zrýchľujú a skvalitňujú proces identifikácie totožných bodov na fotografických snímkach pri tvorbe mračna bodov. Po úspešnej kalibrácii fotoaparátu boli vyhotovené digitálne snímky cieľovej časti steny horninového masívu, ktorá už obsahovala zaznačené začiatky a konce profilov z predchádzajúceho merania profilometrom.

Orientácia snímok bola v súlade s princípmi stereofotogrametrie, teda bol vyhotovený jeden pár snímok z ľavej strany približne v uhle 45° od pomyselného stredu zaznačenej časti steny, pričom fotoaparát bol pravou a ľavou snímkou posunutý len o niekoľko centimetrov, aby bol docielený stereoskopický pohľad. Druhý pár snímok (teda snímka 3 a snímka 4) bol vyhotovený z pravej strany časti steny taktiež približne v uhle 45° od pomyselného stredu (Obr. 2). Takto zrealizované snímky mali vysoký predpoklad na kvalitný výstup v programe PhotoModeler Scanner.

3.3 Vytvorenie 3D modelu povrchu v programoch PhotoModeler Scanner a VRMesh

Ďalším krokom po zosnímaní steny masívu bolo vytvorenie interaktívneho 3D modelu povrchu pukliny zo štyroch digitálnych snímok v špeciálnom fotogrametrickom programe PhotoModeler Scanner. Tento proces pozostával, ako už bolo spomenuté vyššie, z idealizácie jednotlivých digitálnych fotografií – teda odstránenia skreslenia vplyvom tvaru šošovky objektívu. Treba podotknúť, že v prípade objektívov s variabilnou ohniskovou vzdialenosťou (tzv. ZOOM) je potrebné zabezpečiť, aby snímkovanie prebehlo na rovnakých ohniskových vzdialenostiach, pri akých bol objektív kalibrovaný, pretože s meniacou sa ohniskovou vzdialenosťou sa mení aj skreslenie objektívu. Preto bola kalibrácia aj snímkovanie robené na krajných hodnotách ohniskovej vzdialenosti fotoaparátu. Ďalším krokom tvorby 3D modelu povrchu diskontinuity bola identifikácia totožných (vlicovacích) bodov v pravej a ľavej snímke, ktorá bola zabezpečená automatickým rozoznaním kódových terčikov a ich vzájomným zreferencovaním. Toto umožnilo značné zrýchlenia spracovania snímok. V ďalšom kroku program automaticky identifikuje totožné body v ľavej a pravej snímke

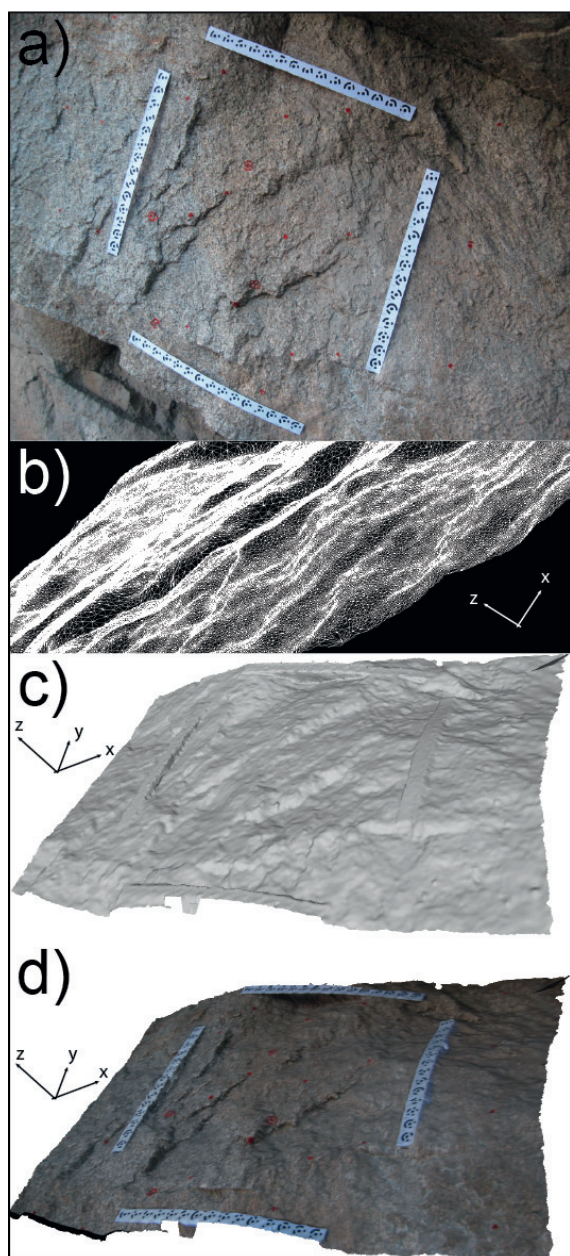


Obr. 5. Odstránenie skreslenia v dôsledku tvaru šošovky objektívu v procese idealizácie snímky.

Fig. 5. Removal of lens distortion caused by the shape of the lens in the process of image idealization.

Tab. 1. Štatistické parametre rozdielov medzi krivkami vzniknutými kontaktnou a bezkontaktnou metódou získania profilov drsnosti diskontinuity.
 Tab. 1. Statistical parameters of differences between curves obtained by contact and non-contact methods of roughness profiles determination.

Profil Profile	N	Priemer Average	Štandard. odchýlka Standard deviation	Medián Mean	Minimum	Maximum
16-17	1686	0,045	0,422	0,080	-1,585	1,003
22-23	1711	0,060	0,350	0,036	-0,657	0,992



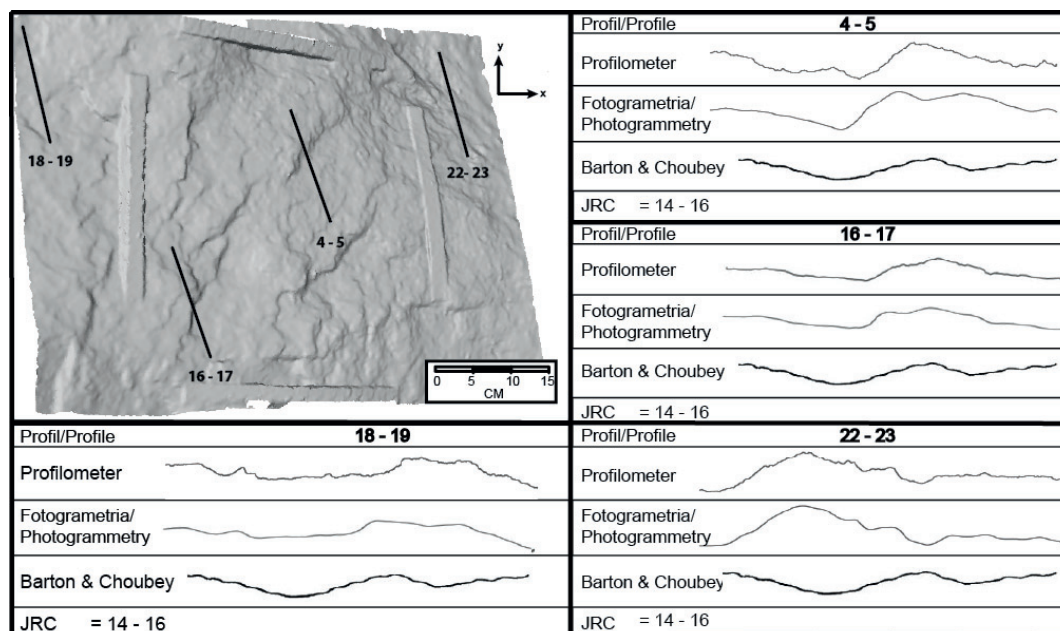
Obr. 6. Originálna digitálna snímka povrchu diskontinuity: a – s prilepenými kódovými terčikmi; b – 3D model povrchu v mriežkovom zobrazení; c – tieňovaný povrch; d – povrch potiahnutý textúrou.

Fig. 6. Original digital image of the discontinuity surface: a – with attached coded targets; b – 3D surface model in mesh; c – shaded relief; d – textured surface view.

a priesekovou metódou vypočíta polohu bodu v 3D priestore. Týmto spôsobom sa vytvorila bodová sieťka (PointMesh) pozostávajúca z 361 513 bodov a 721 061 trojuholníkov, teda výsledný 3D model povrchu diskontinuity. Povrch bolo možné skontrolovať a vykresliť v štyroch zobrazeniach ako tieňovaný povrch (Obr. 6c), mriežka (zobrazujúci hrany trojuholníkov, ktoré vznikli vzájomným pospájaním bodov (Obr. 6b), ďalej ako jednotlivé body, alebo ako textúrou potiahnutý povrch s farbami prenesenými z jednej z pôvodných snímok (Obr. 6d). Ako už bolo spomenuté, program PhotoModeler Scanner nedokáže vytvoriť profil (rez) povrchu, a preto bolo potrebné použiť program na vytvorenie profilov povrchu v digitálnej forme na stanovenie a porovnanie JRC s profilmi, vyhotovenými profilometrom. Mračno bodov so súradnicami $[x, y, z]$ bolo exportované do textového súboru aj s informáciami o farbách jednotlivých bodov v RGB formáte, takže výsledný súbor mal tvar $[x, y, z, R, G, B]$. Na vytvorenie rezov bol použitý program VRMesh, v ktorom bol z importovaného mračna bodov vytvorený 3D model povrchu a v miestach označených červenou farbou (označujúcou miesta, z ktorých boli hrebeňovým profilometrom vynesené profily drsnosti) boli vynesené rezy touto plochou. Tieto rezy, predstavujúce jednotlivé profily, po konverzii z formátu *.dxf do textového súboru v tvare $[x, y, z]$ boli podobné, ako v prípade lineárneho profilometrovania, vynesené do grafov za účelom vizuálneho porovnania. Popri vizuálnom porovnaní profilov drsnosti, vzniknutých dvoma rôznymi metódami, boli stanovené hodnoty JRC na základe porovnania nameraných profilov s referenčnými profilmi Bartona a Choubyho. Profily drsnosti vzniknuté lineárnym profilometrom a fotogrametrickou metódou boli porovnané aj štatistickou analýzou vypočítaním rozdielov medzi dvoma krivkami a stanovením základných štatistických parametrov (priemerná hodnota rozdielu, štandardná odchýlka rozdielu, minimum a maximum rozdielu a medián rozdielu) pre tento rozdiel vo viac ako 1500 bodoch kriviek. Cez obidve krivky boli preložené lineárne regresné priamky. Vzhľadom na fakt, že mali nenulový sklon, boli matematicky zarotované tak, aby nimi preložené regresné priamky boli horizontálne a dali sa vypočítať rozdiely medzi profilmi drsnosti.

4. ANALÝZA VÝSLEDKOV

Po spracovaní oboch metód a vykreslení jednotlivých kriviek rezov bol stanovený koeficient drsnosti puklín (JRC) pre metódu profilometrovania a pre metódu digitálnej fotogrametrie vizuálnym porovnaním s referenčnými profilmi drsnosti.



Obr. 7. Porovnanie profilov drsnosti vytvorených lineárnym profilmetrom a digitálnou fotogrametriou so stanovením výsledného JRC.

Fig. 7. Comparison of roughness profiles from linear profiling and digital photogrammetry with estimated JRC.

Hodnota JRC bola stanovená porovnaním kriviek drsnosti povrchu štyroch rezov (rezy 4-5, 16-17, 18-19, 22-23) so štandardnými rezi uverejnenými Bartonom & Choubey (1977) (Obr. 3). Výsledky sú znázornené na obr. 7. Pri porovnaní treba brať do úvahy, že dĺžka rezov nie je totožná, pretože štandardné rezy majú dĺžku 10 cm a výsledné rezy majú dĺžku 15 cm. Avšak, na zmenu hodnôt takýto rozdiel nemá vplyv a vizuálne porovnanie je dostačujúce, preto výsledný koeficient drsnosti puklín $JRC = 14-16$. Z porovnania kriviek vyhotovených metódou lineárnej profilometrie a metódou digitálnej fotogrametrie (Obr. 8, 9) vyplýva, že jednotlivé krivky sú si do veľkej miery podobné, s rovnakými maximami a minimami. Treba podotknúť, že napriek starostlivému označeniu začiatkov a koncov profilov v teréne, nebolo celkom možné s milimetrovou presnosťou umiestniť rezy 3D modelu povrchu diskontinuity do rovnakých miest a to aj z dôvodu deformácie textúry snímky pri naložení na 3D model. Táto skutočnosť vyplýva z profilov 4-5 a 18-19. Napriek tomu možno konštatovať, že metóda digitálnej fotogrametrie vizuálne poskytuje dostatočne presné profily drsnosti puklín aj s fotoaparátom nižšej triedy a pre účely stanovenia koeficienta drsnosti puklín (JRC) plne postačuje.

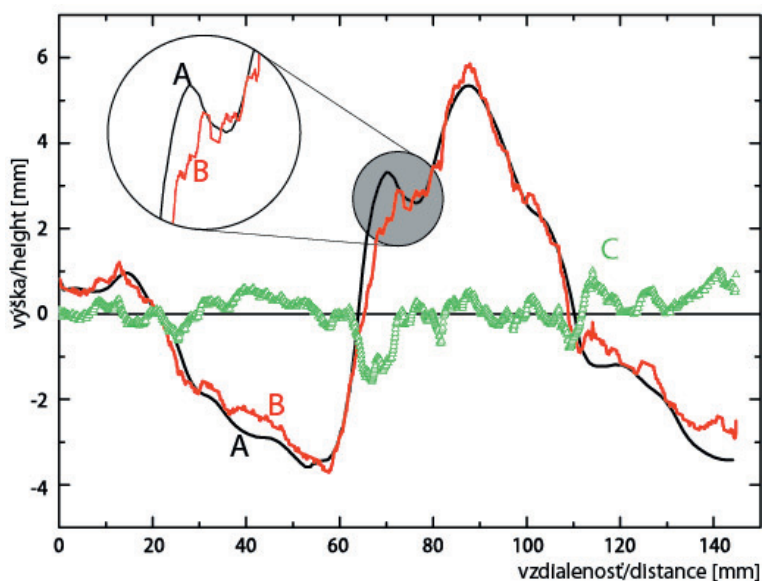
Pre potreby štatistickej analýzy výsledkov obidvoch metód boli krivkami drsnosti preložené regresné priamky a krivky boli rotované tak, aby mali horizontálny priebeh. Vzájomným odčítaním kriviek bola dosiahnutá rozdielová krivka C (Obr. 8, 9). Zo získaných rozdielov boli stanovené základné štatistické parametre pre profily 16-17 a 22-23 so štatistickým súborom viac ako 1500 hodnôt rozdielov. Ako vyplýva z tab. 1, štandardná odchýlka bola 0,422 mm pre profil 16-17 pri amplitúde drsnosti povrchu 9,5 mm, čo predstavuje 4,4 %-tný podiel. Pre profil 22-23 bola štandardná odchýlka 0,35 mm pri amplitúde drsnosti povrchu 10,1 mm, čo predstavuje 3,5 %-tný podiel. Zvyšné dva

profily drsnosti nebolo možné z vyššie uvedených dôvodov vzájomne štatisticky porovnať. Napriek tomu možno konštatovať, že v obidvoch prípadoch boli odchýlky menšie ako 5 % z celkovej amplitúdy drsnosti povrchu pukliny, čo je plne postačujúce vzhľadom na i tak subjektívny charakter určovania JRC (Beer et al., 2002)

5. ZÁVER A DISKUSIA

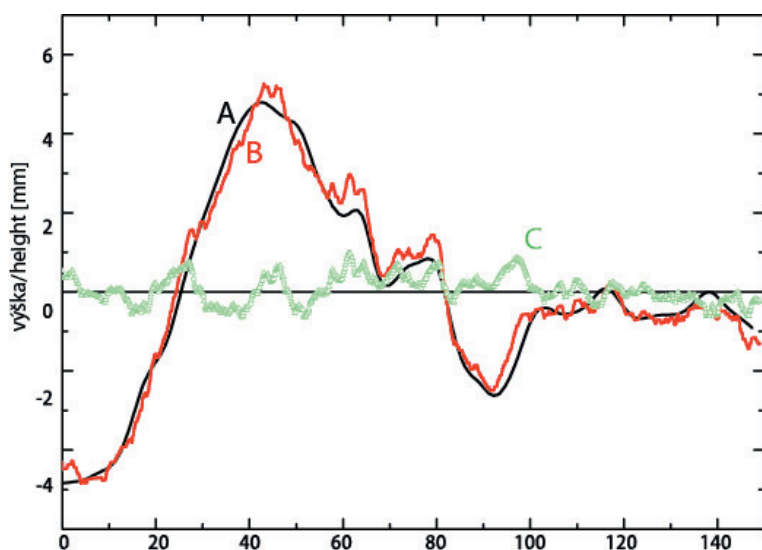
Stanovenie koeficienta drsnosti puklín (JRC) je najviac používanou metódou získania informácií o nerovnosti povrchu diskontinuit, ktoré vstupujú do výpočtu šmykovej pevnosti puklín. Šmyková pevnosť na pukline je rozhodujúcim parametrom pri výpočte stability prirodzených alebo umelých svahov skalných masívov, vstupuje ako kľúčový parameter pri modelovaní a rôznych výpočtoch v mechanike skalných hornín, a taktiež pri klasifikačnom hodnotení horninových masívov pre realizáciu podzemných diel.

Cieľom realizovanej práce bolo overiť možnosť stanovenia koeficienta drsnosti puklín JRC na základe spracovania digitálnych stereosnímkov zhotovených digitálnym fotoaparátom nižšej triedy a zároveň porovnať výsledky s klasickou metódou určovania pomocou lineárneho profilometrovania. Ako typová lokalita bola vybraná lokalita Devínska cesta, presnejšie v záreze cesty v horninovom skalnom masíve pozostávajúcom z granitu až granodioritu kryštalinika Malých Karpát. Na vybranej diskontinuite boli vyznačené miesta vzorkovacích profilov a lineárnym profilmetrom boli zostrojené krivky drsnosti na štyroch miestach v rámci pracovného priestoru s plochou 1 m^2 . Tieto boli po zdigitalizovaní vynesené do grafov na porovnanie. Zo štyroch digitálnych snímkov bol zhotovený 3D model povr-



Obr. 8. Krivky drsnosti povrchu diskontinuity získané fotogrametrickou metódou (A) a metódou lineárneho profilometrovania (B), s krivkou vzájomných rozdielov (C) pre profil 16-17.

Fig. 8. Roughness profiles obtained by photogrammetric method (A) and method of linear profiling (B) with their differences (C) for profile 16-17.



Obr. 9. Krivky drsnosti povrchu získané fotogrametrickou metódou (A) a metódou lineárneho profilometrovania (B), s krivkou vzájomných rozdielov (C) pre profil 22-23.

Fig. 9. Roughness profiles obtained by photogrammetric method (A) and method of linear profiling (B) with their differences (C) for profile 22-23.

chu diskontinuity a v označených miestach, totožných s miestami vzorkovania lineárnym profilometrováním boli vytvorené rezy. Tieto boli navzájom porovnané vizuálne a pri profiloch 16-17 a 22-23 aj štatisticky.

Hodnota koeficienta drsnosti puklín JRC pri vizuálnom porovnaní so štandardnými rezmi bola stanovená na 14-16. Z výsledkov možno konštatovať, že vzhľadom na fakt, že štandardná odchýlka rozdielov medzi profilmi drsnosti zhotovenými profilometrováním a fotogrametricky tvorila menej ako 5 % z celkovej amplitúdy drsnosti, je fotogrametricky zhotovený profil drsnosti plne akceptovateľný ako dostatočne dôveryhodný spôsob stanovenia koeficienta drsnosti pukliny (JRC). Pri podrobnejšom pohľade na krivku získanú lineárnym profilometrováním v detaile obr. 9 – krivka B, sú zrejme nerovnosti spôsobené krokom vzorkovania povrchu pri použití hrebeňového profilometra, ktorého ihlice majú šírku 0,5 mm, takže po prekreslení na papier vzniká typické “zúbkovanie” profilu. Z toho vyplýva aj fakt, že pri digitalizácii nemá zmešovanie

kroku vzorkovania pod hodnotu 0,5 mm zmysel. K rovnakému záveru prišli aj Tatone & Grasseli (2010). Opísaná skutočnosť je jednou z nevýhod použitia hrebeňového profilometra. Na druhej strane, pri tvorbe 3D povrchu diskontinuity z mračna bodov získaných digitálnou fotogrametriou dochádza k interpolácii medzi bodmi pri ich spájaní do mriežky, čo má za následok prílišné vyhladenie krivky (Obr. 8 – krivka A).

Ako už bolo spomenuté vyššie, koeficient JRC je do veľkej miery subjektívnym parametrom, závisiacim od porovnania profilu drsnosti s referenčnými profilmi podľa Barton & Choubeyho (1977). K najznámejším pokusom o objektivizáciu tohto parametra patria Tse & Cruden, (1979) a Maerz et al. (1990), ktoré uvažujú so vzťahmi medzi Z_2 alebo R_p a JRC, nasledovne:

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log(Z_2) \quad (2)$$

$$JRC = c(R_p - 1), \text{ kde } c = 400 \text{ až } 411 \quad (3)$$

kde Z_2 je kvadratický priemer prvej derivácie profilu drsnosti a R_p koeficient drsnosti.

Ďalším problémom spojeným s drsnosťou puklín je mierkový efekt. Vzhľadom na fakt, že jeho štúdium nebolo predmetom tejto práce, možno o uvedenej problematike nájsť viac informácií v prácach Swana & Zongqi (1985); Gianiho et al. (1992), Henchera et al. (1993) alebo Cravera et al. (2001).

Hlavná výhoda metódy digitálnej fotogrametrie je v skrátenej dobe potrebného na zber údajov, ktorý predstavuje len dobu potrebnú na realizáciu fotografických snímok spoločne s možnosťou vytvorenia 3D modelu povrchu diskontinuity na väčších plochách a aj vo fyzicky nedostupných miestach.

Podakovanie: Táto práca bola realizovaná vďaka spolufinancovaniu grantu Ministerstva školstva VEGA 1/0331/09, projektu EU FP7 „SAFER“ č. 218802 a s príspevom grantov Agentúry pre podporu výskumu a vývoja SR: DO7RP-0012-09, APVV-0330-10 a APVV-0641-10.

Literatúra

- Baker B.R., Gessner K., Holden E.-J. & Squelch A.P., 2008: Automatic detection of anisotropic features on rock surfaces. *Geosphere*, 4, 2, 418-428.
- Barton N.R., 1973: Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*, 7, 4, 287-332.
- Barton N.R. & Choubey V., 1977: The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10, 1-2, 1-55.
- Barton N.R. & Bandis S.C., 1990: Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In: Barton N.R. & Stephansson O. (Eds.): Rock Joints. Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen, Norway, 603-610.
- Beer A.J., Stead D. & Coggan J.S., 2002: Estimation of the joint roughness coefficient (JRC) by visual comparison. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 35, 1, 65-74.
- Bezák V., Biely A., Broska I., Bóna J., Buček S., Elečko M., Filo I., Fordinál K., Gazdačko L., Grecula P., Hraško L., Ivanička J., Jacko st. S., Jacko ml. S., Janočko J., Kaličiak M., Kobulský J., Kohút M., Konečný V., Kováčik M. (Bratislava), Kováčik M. (Košice), Lexa J., Madarás J., Maglay J., Mello J., Nagy A., Németh Z., Olšovský M., Plašienka D., Polák M., Potfaj M., Pristaš J., Šiman P., Šimon L., Teťák F., Vozárová, A., Vozár J. & Žec B., 2009: Vysvetlivky k prehľadnej geologickej mape Slovenskej republiky M 1:200 000. Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, 534 p.
- Bieniawski Z.T., 1989: Engineering rock mass classifications. John Wiley & Sons, New York, 251 p.
- Birch J.S., 2006: Using 3DM Analyst Mine Mapping Suite for rock face characterization. Laser and photogrammetric methods for rock face characterization. Report on a workshop held June 17-18, 2006 in conjunction with GoldenRocks 2006: The 41st U.S. Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, Alexandria, 13-32.
- Carr J.R. & Warriner J.B., 1989: Relationship between the fractal dimension and joint roughness coefficient. *Association of Engineering Geologists – Bulletin*, 26, 2, 253-264.
- Cravera M., Iabichino G. & Ferrero A.M., 2001: Evaluation of joint roughness and dilatancy of schistosity joints. In: Särkkä P. & Eloranta P. (Eds.): Rock mechanics - a challenge for society; proceedings of Eurock 2001, Espoo, Finland, 4-7 June 2001, 217-222.
- Gaich A., Potsch M., & Schubert W., 2006: Basics and application of 3D imaging systems with conventional and high-resolution cameras. Laser and photogrammetric methods for rock face characterization. Report on a workshop held June 17-18, 2006 in conjunction with GoldenRocks 2006: The 41st U.S. Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, Alexandria, 33-48.
- Giani G.P., Ferrero A.M., Passarello G. & Reinaudo L., 1992: Scale effect evaluation on natural discontinuity shear strength. In: Myer L.R. (Ed.): Proceedings of the conference on fractured and jointed rock masses, Lake Tahoe, California, 3-5 June 1992, 447-452.
- Grimstad E. & Barton N., 1993: Updating of the Q-System for NMT. In: Kompen R., Opsahl O. & Berg K. (Eds.): Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support. Norwegian Concrete Association, Oslo, 20 p.
- Hack R., Price D. & Rengers N., 2003: A new approach to rock slope stability – a probability classification (SSPC). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62, 2, 167-184.
- Haneberg W., 2007: Directional roughness profiles from three-dimensional photogrammetric or laser scanner point clouds. In: Eberhardt E., Stead D. & Morrison T., (Eds.): Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands; proceedings of the 1st Canada-US rock mechanics symposium,, 27-31 May 2007, Vancouver, Canada, 101-106.
- Hencher S.R., Toy J.P. & Lumsden A.C., 1993: Scale-Dependent Shear-Strength of Rock Joints. In: Pinto da Cunha A. (Ed.): Scale Effects in Rock Masses 93; Proceedings of the 2nd international workshop on scale effects in rock masses, Lisbon, Portugal, 25 June 1993, 233-240.
- Hoek E., 2007: Shear strength of discontinuities (Chapter 4). *Practical Rock Engineering*. 14 p. (http://www.rocsience.com/hoek/pdf/4_Shear_strength_of_discontinuities.pdf).
- Jaeger J.C. 1971: Friction of rocks and stability of rock slopes. *Geotechnique*, 21, 2, 97-134.
- Jang B.-A., Jang H.-S. & Park H.-J., 2006: A new method for determination of joint roughness coefficient. In: Culshaw M., Reeves H., Spink T. & Jefferson I. (Eds): Proceedings of IAEG2006: Engineering Geology for Tomorrow's Cities, Nottingham, UK, 6-10 September 2006, Paper 95, p. 9.
- Jessell M.W., Cox S.J.D., Schwarze P. & Power W.L., 1995: The anisotropy of surface roughness measured using a digital photogrammetric technique. *Geological Society, London, Special Publications*, 92, 1, 27-37.
- Kim D.-Y. & Lee H.-S., 2009: Quantification of rock joint roughness and development of analyzing system. In: Kulatilake P.H.S.W. (Ed): Proceedings of the International Conference on Rock Joints and Jointed Rock Masses Tucson, Arizona, 7-8 January 2009: Paper 1019, p. 8.
- Ladanyi B. & Archambault G., 1970: Simulation of the shear behaviour of a jointed rock mass. In: Somerton W.H. (Ed.): Proceedings of the 11th Symposium on Rock Mechanics: Theory and Practice, Berkeley, California, 105-125.
- Lee H.-S. & Ahn K.-W., 2004: A prototype of digital photogrammetric algorithm for estimating roughness of rock surface. *Geosciences Journal*, 8, 3, 333-341.
- Lee Y.H., Carr J.R., Barr D.J. & Haas C.J., 1990: The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 27, 6, 453-464.
- Maerz N.H., Franklin J.A. & Bennett C.P., 1990: Joint roughness measurement using shadow profilometry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 27, 5, 329-343.
- Milne D., Germain P. & Potvin Y., 1992: Measurement of rock mass properties for mine design. In: Hudson J.A. (Ed.): Proceedings of the ISRM symposium on Rock Characterization: Eurock '92, Chester, England, 245-250.

- Palmström A., 2000: Recent developments in rock support estimates by the RMI. *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*, 6, 1, 1-19.
- Patton F.D., 1966: Multiple modes of shear failure in rock. In: ISRM (Ed.): *Proceeding of the 1st Congress of International Society of Rock Mechanics*, Lisbon, Portugal, 509-513.
- Piteau D.R., 1970: Geological factors significant to the stability of slopes cut in rock. In: Van Rensburg P.W.J. (Ed.): *Proceedings of the Symposium on Planning Open Pit Mines*, Johannesburg, South Africa, 33-53.
- Poropat G.V., 2006: Remote 3D mapping of rock mass structure. Laser and photogrammetric methods for rock face characterization. Report on a workshop held June 17-18, 2006 in conjunction with GoldenRocks 2006: The 41st U.S. Rock Mechanics Symposium, American Rock Mechanics Association, Alexandria, 63-75.
- Poropat G.V., 2008: Remote characterization of surface roughness of rock discontinuities. In: Potvin Y. (Ed.): *Proceedings 1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium*, Perth, Australia, 16-19 September 2008, 447-458.
- Ross-Brown D.M., Wickens E.H. & Markland J.T., 1973: Terrestrial photogrammetry in open pits: 2 - an aid to geological mapping. *Transactions Institution of Mining and Metallurgy, Section A*, 82, 115-130.
- Stimpson B., 1982: A rapid field method for recording joint roughness profiles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 19, 6, 345-346.
- Swan G. & Zongqi S., 1985: Prediction of shear behaviour of joints using profiles. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 18, 3, 183-212.
- Tatone B.S.A & Grasselli G., 2010: A new 2D discontinuity roughness parameter and its correlation with JRC. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, doi:10.1016/j.ijrmms.2010.06.006.
- Tse R. & Cruden D.M., 1979: Estimating joint roughness coefficients. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 16, 5, 303-307.
- Turk N., Grieg M.J., Dearman W.R. & Amin F.F., 1987: Characterization of rock joint surfaces by fractal dimension. In: Farmer I.W., Daemen J.J.K., Desai C.S., Glass C.E. & Neuman S.P. (Eds.): *Proceedings of 28th U.S. Rock Mechanics Symposium*, Tuscon, AZ, 29 June -1 July 1987, 1223-1236.
- Wakabayashi N. & Fukushige I., 1992: Experimental study on the relation between fractal dimension and shear strength. In: Myer L.R. (Ed.): *Proceedings of the conference on fractured and jointed rock masses*, Lake Tahoe, California, 3-5 June 1992, 119-124.
- Weissbach G., 1978: A new method for the determination of the roughness of rock joints in the laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15, 3, 131-133.
- Wickens E.H. & Barton N.R., 1971: The application of photogrammetry to the stability of excavated rock slopes. *The Photogrammetric Record*, 7, 37, 46-54.
- Xie H., & Pariseau W.G., 1992: Fractal estimation of joint roughness coefficients. In: Myer L.R. (Ed.): *Proceedings of the conference on fractured and jointed rock masses*, Lake Tahoe, California, 3-5 June 1992, 125-131.
- Yang Z.Y., Lo S.C. & Di C.C., 2001: Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using Z2. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 34, 3, 243-251.
- Yu X.B. & Vayssade B., 1991: Joint profiles and their roughness parameters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 28, 4, 333-336.
- continuities, while the actual mobility of the sliding mass is controlled by the shear strength of the joint representing the sliding surface.
- The most widely used method of estimating the shear strength of unaltered joints without filling is the method of Barton and Bandis empirical shear criterion (Barton, 1973; Barton & Choubey, 1977; Barton & Bandis, 1990). The formula for the calculation is:
- $$\tau = \sigma_n \cdot \tan [\varphi_b + JRC \cdot \log_{10}(JCS / \sigma_n)] \quad (1)$$
- where σ_n is the applied normal stress; φ_b is the basic friction angle, JRC is the Joint Roughness Coefficient, which describes the roughness of the discontinuity surface and JCS is the Joint wall Compressive Strength, which describes the intact strength of the asperities. The research was focused on two methods used for the determination of the joint surface roughness coefficient from roughness profiles. The first method was the traditional linear profiling method using comb profilometer (Fig. 1a), which was used as the reference. The second evaluated method was application of close-range terrestrial digital photogrammetry and subsequent generation of 3D model of joint surface. By cutting this model in the exact places of linear profiling a roughness profiles were obtained, which could be compared with the profiles obtained by the traditional method (Fig. 7). This approach was applied for the JRC determination at the Devínska cesta road cut site. The 3D joint surface model was obtained by photographing the rock outcrop using customer grade digital camera Canon PowerShot A590 IS with resolution 8 MPixel, the camera was before calibrated using Photomodeler Scanner photogrammetric software in order to reduce the lens distortion. The same software was used for the calculation of 3D points with subsequent mesh generation and 3D model creation. After the creation of cross-sections the JRC was determined by the comparison of the joint roughness profiles with the standard profiles of Barton & Choubey (1977). The results for both methods used was the same JRC = 14–16. Further, both methods, contact and non-contact, were compared by subtracting both curves and statistically analysing the difference in more than 1500 sampling points. The results showed that the standard deviation in the case of profile 16-17 was 0.422 mm, which represents 4.4 % of the roughness amplitude, while for the profile 22-23 the standard deviation was 0.35 mm, representing 3.5 % of the roughness amplitude (Tab. 1). Both standard deviations were under the 5 % margin, which gives good indication of the acceptability of the roughness profiles obtained by digital photogrammetry using customer grade digital camera. By visually comparing the created roughness profiles it is obvious that the traditional method using the comb profilometer has its resolution limit around 0.5–1.0 mm, where the traced pins of the profilometer are clearly visible (Fig. 8). The profiles created by photogrammetry on the other hand are suffering reduced resolution due to the interpolation of triangle vertices during the mesh creation. Nevertheless, the digital photogrammetry has several advantages. First is the reduction of the time spent by the linear profiling to photographing 3 or 4 snapshots necessary for the software to create the 3D model of the surface. The second advantage is the ability to generate roughness profiles and thus estimate the JRC in larger areas and not accessible places of the rock slope.

Summary: The stability of natural rock slope is due to the low normal stress conditions governed by the existence of discontinuities. The mechanism of the failure mostly depends on the orientation of the dis-