

# Vlastnosti hornín stanovené kontinuálně z procesu strojného razenia

Vítězoslav Krúpa a Edita Lazarová<sup>1</sup>

## Rock Properties Determined Continuously from TBM Excavation Process

The computer monitoring system used at excavation of exploratory galleries of motorway tunnels Branisko and Višňové-Dubná skala (excavated by Wirth TB-II-330H/M and Voest Alpine ATB 35H, respectively) brought an ample study material. Several characteristics of rock environment in the line of exploratory galleries were determined using developed mathematical models. The verification of the models was carried out based on the comparison of results of mathematical models with results of common procedures of detailed engineering-geological investigation. The description of the continuous method and the results of comparisons are subject of this paper.

**Key words:** monitoring, rock properties, TBM

## Úvod

Základný výskum mechanizmu rozpojovania hornín diskovými valivými dlátami (diskami) má na Ústave geotechniky SAV v Košiciach 25-ročnú tradíciu. Laboratórny standový výskum bol v prvej etape orientovaný na pochopenie vplyvu rôznych faktorov na proces rozpojovania horniny, s cieľom optimalizovať tento proces. Štúdium bolo orientované na poznanie vplyvov režimových parametrov rozpojovania, energeticou bilanciou rozpojovania, vplyvy zmien geometrie kontaktných plôch diskov s horninou na výsledný efekt rozpojovania, vplyv spolupôsobenia diskov na rozpojovacej hlave a vplyv vlastností hornín na interakciu diskov s horninou. Prvé overenie teoretických poznatkov v praxi bolo realizované začiatkom 80-tych rokov minulého storočia pri razení Novej odvodňovacej štôlne (Voznica) plnoprofilovým raziacim strojom WIRTH TB-II-330H, v spolupráci s Banskými stavbami, n.p., Prievidza. Výsledkom niekoľkoročného snaženia bolo vytvorenie optimalizačného systému WORS (w-optimalizátor raziaceho stroja), ktorý umožňuje sledovaním režimových parametrov minimalizovať spotrebu diskov pri razení, a tým podstatne znížiť náklady na razenie. Systém WORS bol v zdokonalenej verzii použitý pri razení prieskumnej štôlne diaľničného tunela Branisko, razeného plnoprofilovým raziacim strojom WIRTH TB-II-330H/M (Lazarová a kol., 1999). Razenie realizovali Banské stavby, a. s., Prievidza. Sekundárnym výsledkom celoročného monitorovania parametrov režimu razenia v r. 1997 bol rozsiahly súbor získaných údajov (cca 1GB), ktorý sa stal základom vývoja metódy IKONA (inverzná kontinuálna metóda stanovenia vlastností horninového masívu z monitorovaných údajov procesu razenia). Metóda IKONA de facto umožňuje využiť prepojenie inžiniersko-geologických a geotechnických informácií pri strojnom razení (Krúpa a kol., 2000, 2001).

## Princíp metódy IKONA

Proces plnoprofilového razenia v podmienkach in situ ovplyvňuje veľké množstvo faktorov, ktoré rozhodujú o efektívnosti rozpojovania horninového masívu. Je ich možné v zásade rozdeliť do 5 skupín:

1. vlastnosti horninového prostredia,
2. konštrukčné parametre raziaceho stroja a diskov,
3. aplikované parametre režimu razenia,
4. vplyv opotrebovania diskov na hlave raziaceho stroja,
5. prevádzkové podmienky stroja ovplyvňované organizáciou práce.

Všetky tieto faktory ovplyvňujú vstupné a výstupné veličiny procesu razenia a určujú ich vzájomné väzby. Počas razenia systém WORS monitoruje v 2-sekundových intervaloch:

- prítlak rozpojovacej hlavy na čelbu  $F$  [kN],
- otáčky rozpojovacej hlavy  $n$  [ $s^{-1}$ ],
- krútiaci moment rozpojovacej hlavy  $M_k$  [kN.m],
- hĺbku zatlačenia diskov do horniny penetrácia –  $p$  [mm].

<sup>1</sup> host Prof. Ing. Vítězoslav Krúpa, DrSc., Ing. Edita Lazarová, PhD., Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53 Košice, [krupa@saske.sk](mailto:krupa@saske.sk), [lazarova@saske.sk](mailto:lazarova@saske.sk)  
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 8.12.2004)

Z týchto veličín je možné v reálnom čase stanovovať ďalšie veličiny, napr. mernú objemovú prácu rozpojovania  $w$  [ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ], rozpojovací výkon  $Q$  [ $\text{m}^3\cdot\text{hod}^{-1}$ ] a pod. Každú okamžitú zmenu ľubovoľného faktora je možné na priebehoch sledovaných veličín počas monitorovania identifikovať. Problémom však je rozlíšiť vplyvy jednotlivých faktorov. Metóda IKONA je vytvorená na princípe identifikácie dominantných vplyvov rozpojovaného horninového prostredia tak, aby marginálne vplyvy ostatných faktorov neuvažovalo. Dôraz bol kladený na určenie pevnosti a porušenia horninového prostredia. Odvodený matematický model pevnosti horninového prostredia v tlaku pre raziaci stroj Wirth TB-II-330H/M má formálne tvar

$$\sigma_{\text{III}}(\text{WIRTH}) = \frac{F}{10,899 \cdot C \cdot \sqrt{(p + \Delta p)^3}}, \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

a vyjadruje kontaktné napätie pod diskom v okamžiku porušenia horniny. Vo vzťahu (1) explicitne vystupuje prítlak rozpojovacej hlavy  $F$  [kN], rozpojovací koeficient  $C$  [-], penetrácia disku  $p$  [mm] a  $\Delta p$  [mm] modelujúce vplyv opotrebovania kontaktnej plochy. Všetky ostatné konštrukčné parametre raziaceho stroja a diskov sú po matematických úpravách zahrnuté do konštanty 10,899.

Teoretický výpočet porušenia horninového prostredia sa realizuje štatisticko-analytickou rovnicou

$$RQD_t = \frac{\varphi_M - 47,499}{0,3765}, \quad [\%] \quad (2)$$

v ktorej okrem štatistických konštánt vystupuje veličina  $\varphi_M$  – monitorovaný uhol vnútorného trenia horniny [ $^\circ$ ]. Rovnica (2) je platná len pre podmienky horninového prostredia prieskumnej štôlne Branisko a pre raziaci stroj WIRTH TB-II-330H/M. Uhol  $\varphi_M$  je vypočítaný z monitorovaných údajov procesu razenia teoreticky odvodeným vzťahom

$$\varphi_M = 90^\circ - \arcsin(3,3564 \cdot C) \frac{360}{2\pi}, \quad [^\circ] \quad (3)$$

Podrobnosti o odvodení matematických modelov metódy IKONA poskytuje práca (Krúpa, 1998).

### Verifikácia metódy IKONA

Výsledky podrobného inžiniersko-geologického a hydrogeologického prieskumu masívu Branisko spracovalo IN GEO, a. s., Žilina v práci (Bohyník a kol., 1997).

Pevnostné charakteristiky hornín a horninového masívu v tlaku reprezentovala pevnosť v prostom tlaku stanovená z indexu bodovej pevnosti  $I_{S(50)}$  (Point load test) vzťahom  $\sigma_{\text{Cl}} = 24 \cdot I_{S(50)}$  (ISRM, 1985) a skleroskopická pevnosť  $\sigma_{\text{C}}$  stanovená Schmidových kladivkom NR-10 s registračným zariadením podľa ON 441118 z hodnôt odrazovej pevnosti pri odrazových skúškach. Skleroskopická pevnosť  $\sigma_{\text{C}}$  bola určovaná s intervalom 5 a 10 m na bočných stenách prieskumnej štôlne, priemerná bodová pevnosť  $\sigma_{\text{Cl}}$  bola vypočítaná z 2 až 3 meraní na odobratých vrtných jadrách pre každý geologický celok. Východná časť prieskumnej štôlne, ktorúrazil plnoprofilový raziaci stroj, bola rozdelená do 42-och geologických celkov. Celkovo bolo v úseku razenom raziacim strojom vyhodnotených 85 hodnôt pevnosti  $\sigma_{\text{Cl}}$  a 693 hodnôt pevnosti  $\sigma_{\text{C}}$ . Porušenosť horninového masívu v každom geologickom celku charakterizoval RQD koeficient.

- Geologické celky (GC1 až GC42) reprezentovali:
- GC1 – paleogénne pieskovce,
- GC2 – kontakt paleogén-kryštalínium,
- GC3-GC4 + GC6-GC9 – biotitické až biotiticko-amfibolické ruly,
- GC5 – muskoviticko-biotitický granitoid,
- GC10 – výrazne mylonitizované bioticko-amfibolické ruly,
- GC11-GC12 – biotiticko-amfibolické pararuly,
- GC13-GC42 – amfibolity a amfibolické ruly.

Z monitorovaných údajov procesu razenia sa vzťahmi (1) a (2) stanovila tretia pevnostná charakteristika  $\sigma_{\text{III}}$  (modelová pevnosť v tlaku) a  $RQD_t$  (teoretický koeficient porušenia RQD). Priemerné hodnoty modelovej pevnosti  $\sigma_{\text{III}}$  a  $RQD_t$  pre jednotlivé geologické celky boli určené z 5037 priemerných hodnôt pre 0,25 m úseky prieskumnej štôlne. Pritom počet okamžitých hodnôt  $\sigma_{\text{III}}$  a  $RQD_t$  pre úsek 0,25 m kolíše v rozmedzí 100 až 500 hodnôt v závislosti od rýchlosti razenia.

Podrobná analýza získaných výsledkov metódou IKONA ukázala, že hodnoty modelovej pevnosti  $\sigma_{\text{III}}$  v okolí prevedenia odrazových skúšok sú porovnateľné s hodnotami skleroskopickej pevnosti  $\sigma_{\text{C}}$  a sú zachované

trendy rastu a poklesu hodnôt obidvoch pevnostných charakteristík. Vyhodnotené intervaly spoľahlivosti troch rôznych pevnostných charakteristík pri 95% pravdepodobnosti hodnôt pre jednotlivé geologické celky znázorňuje obr. 1. Pre každý geologický celok sú vynesené z prava do ľava hodnoty:  $\sigma_{CI}$ ,  $\sigma_C$ ,  $\sigma_{IH}$ .

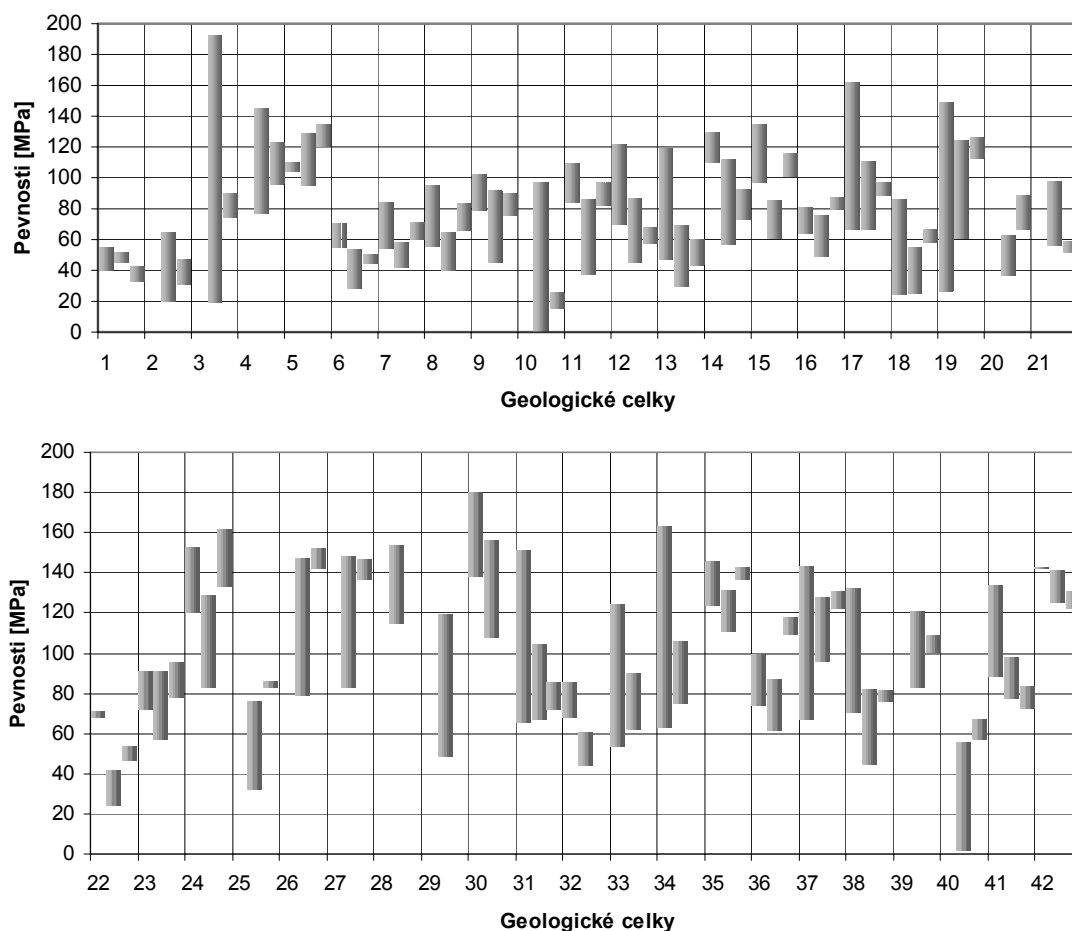
Interval spoľahlivosti určuje vzťah, (Reisenauer, 1965)

$$IS = \bar{x} \pm 1,96 \cdot \frac{\xi}{\sqrt{n}}, \quad (4)$$

kde  $\bar{x}$  vyjadruje priemernú hodnotu veličín  $\sigma_{CI}$ ,  $\sigma_C$ ,  $\sigma_{IH}$ ,  $\xi$  štandardnú smerodajnú odchýlku  $\sigma_{CI}$ ,  $\sigma_C$ ,  $\sigma_{IH}$  a  $n$  je počet meraní. Porovnanie hodnôt RQD a RQD<sub>t</sub> znázorňuje obr. 2. Obr. 3 poskytuje informácie o lineárnych regresných závislostiach troch nezávislých pevnostných charakteristík  $\sigma_{CI}$ ,  $\sigma_C$ ,  $\sigma_{IH}$ . Súčasťou obrázku sú tiež rovnice regresíí a koeficient determinácie  $R^2$ . Kritické hodnoty koeficienta korelácie  $r = \sqrt{R^2}$  pre 42 priemerných hodnôt sú pri 99,5 % pravdepodobnosti  $r_p=0,3932$ . Na základe zistených hodnôt  $r$  je teda možné prijať hypotézu, že vypočítané regresné modely vhodne vyjadrujú posudzované vzťahy medzi charakteristikami.

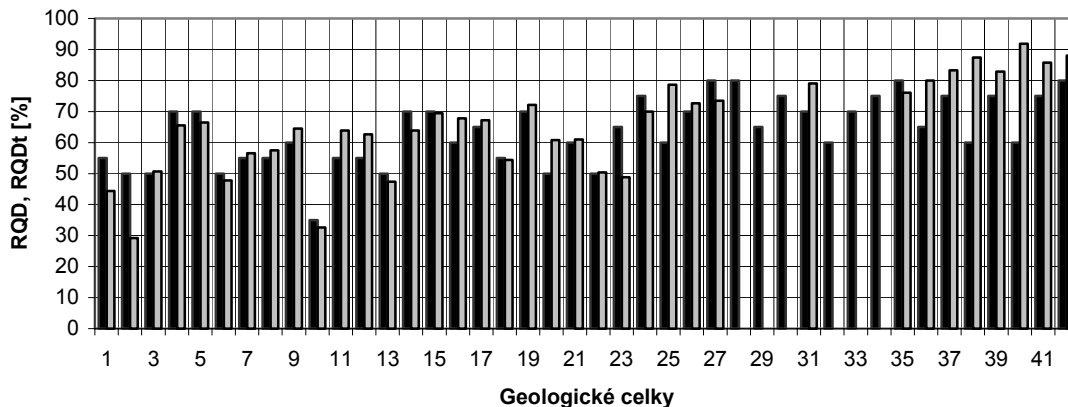
### Diskusia

Na obr.1 v niektorých geologických celkoch chýbajú hodnoty niektorých pevnostných charakteristík reprezentovaných ich intervalom spoľahlivosti, vzťah (4). V týchto prípadoch neexistuje dostatočný počet meraní bodovej pevnosti  $\sigma_{CI}$ , resp. nepracoval monitorovací počítačový systém a hodnoty  $\sigma_{IH}$  nebolo možné vyhodnotiť. Trendy zmien vykazovaných pevností sú zhodné. Z obr. 3 je zrejmé, že tesnejšia korelácia je medzi hodnotami skleroskopickéj a modelovej pevnosti (priemerné hodnoty týchto veličín boli získané z väčšieho súboru dát), ale hodnotami je modelová pevnosť  $\sigma_{IH}$  takmer zhodná s bodovou pevnosťou  $\sigma_{CI}$ . Najväčšia variabilita



Obr. 1. Pevnosti  $\sigma_{CI}$ ,  $\sigma_C$  a  $\sigma_{IH}$  pre geologické celky GC1 – GC42

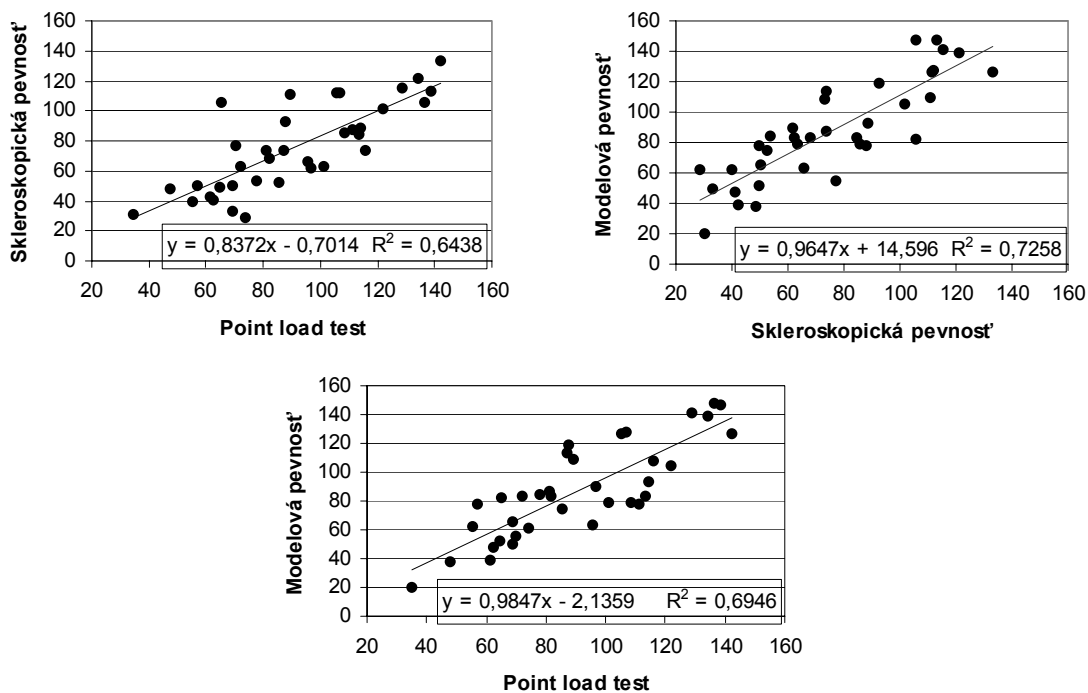
Fig. 1. Rock strength  $\sigma_{CI}$ ,  $\sigma_C$  and  $\sigma_{IH}$  in geological sections GC1 – GC42



Obr. 2. Koeficienty porušnosti RQD a RQDt, pre geologické celky GC1 – GC42  
 Fig. 2. RQD and RQDt, in geological sections GC1 – GC42

nameraných hodnôt bol zaznamenaný pri skleroskopickej pevnosti  $\sigma_C$  v GC3, ktorý mal dĺžku len 9 m a predstavoval začiatok kryštalinika.

Medzi hodnotami koeficienta RQD a jeho teoretickým ekvivalentom RQDt neboli zaznamenané výrazné rozdiely až po geologický celok GC36. Od tohto úseku boli hodnoty RQDt stále vyššie ako RQD. Je to spôsobené pravdepodobne zmenou rozpojovacích podmienok, ktoré model nedostatočne popísal.



Obr. 3. Lineárne regresie pevností  $\sigma_{Cb}$ ,  $\sigma_C$  a  $\sigma_{iIH}$   
 Fig. 3. Linear regressions of strength  $\sigma_{Cb}$ ,  $\sigma_C$  and  $\sigma_{iIH}$

### Záver

Verifikácia matematických modelov získaných parametrov inverznej kontinuálnej metódy IKONA potvrdzuje, že vypracovaný nový spôsob získavania inžiniersko-geologických informácií z geotechnických informácií charakterizujúcich proces rozpojovania horninového masívu plnoprofilovým raziacim strojom, je správny. Monitorovaním procesu plnoprofilového razenia je možné získať pri podrobnom prieskume ďalšie relevantné dáta, využiteľné pre účely projektovania tunelových stavieb.

Poznámka: Príspevok vznikol pri riešení grantovej úlohy č.2/3209/23.

### Literatúra - References

- Lazarová, E., Krúpa, V., Filová, M.: Razenie prieskumnej štólne diaľničného tunela Branisko raziacim strojom. In: *11<sup>th</sup> International Scientific Conference on the occasion of the 100<sup>th</sup> anniversary of establishing the Czech Technical College in Brno and initiating education in the Civil Engineering branch of study, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, říjen 1999, ISBN 80-214-1435-9, s. 187-190*
- Krúpa, V., Lazarová, E.: Možnosti spresnenia výsledkov inžinierskogeologického prieskumu monitorovaním procesu razenia. - *Acta Montanistica Slovaca, roč.5 (2000), č.3, ISSN 1335-1788, F BERG TU Košice, s.228-232*
- Krúpa, V.; Lazarová,E.; Ivaničová,L.: Využitie počítačovej diagnostiky pri plnoprofilovom razení.. *Geotechnika, 4, 2001, č.2, ISSN 1211-913X, s.7-11*
- Krúpa, V.: Hypotézy, modely, teórie a ich verifikácie pri plnoprofilovom razení. [*Doktorská dizertačná práca*]. *ÚGt SAV Košice, 1998*
- Bohyník, J., Záthurecký, A., Molčan, T., Lenártová, J., Šimek, M., Lenková, M., Frličková, M.: Podrobný inžinierskogeologický a hydrogeologický prieskum diaľnice D1 Behárovce - Branisko, časť B - tunel Branisko. (*Čiastkové správy č.4, č.5*), *INGEO a.s. Žilina, 1997*
- ISRM: Point load test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 1985, 22, č.2, p. 51-60
- Reisenauer, R.: Metody matematické statistiky a jejich aplikace, *SNTL, Praha, 1965*.