

Matematická interpretácia výsledkov monitorovania interakcie horninového masívu a raziaceho stroja

Vít'azoslav Krúpa¹ a Edita Lazarová

Mathematical interpretation of monitoring results of the rock mass and TBM interaction

The monitoring of input and output parameters of excavation process using the full-face tunnelling machine provides the determination of properties of excavated rock mass. A mathematical apparatus was designed to solve the task by the description of the interaction between disc cutters and rock mass at the contact surface. The mathematical models were verified by a comparison with the results of the detailed engineering-geological investigation realized in an exploratory gallery of the Branisko highway tunnel in sections excavated by the full-face tunnelling machine Wirth TB-II-330H.

Key words: computer monitoring system, in situ measurement, cutting forces, disc cutter, TBM, rock mass

Úvod

Problematiku strojového razenia začali na Ústave geotechniky SAV intenzívne študovať jeho pracovníci koncom 70-tych rokov minulého storočia, v čase, keď sa Banské stavby, n. p., Prievidza pripravovali na razenie Novej odvodňovacej štólne raziacim strojom Wirth TB-II-330H vo Voznici. Pre tento stroj bola pripravená prvá monitorovacia sústava pre zistenie hodnôt vstupných a výstupných veličín procesu razenia v podmienkach in situ. Z monitorovaných veličín (prítlak F [kN], krútiaci moment M_k [kNm], otáčky raziacej hlavy n [s^{-1}], rýchlosť razenia v [$mm s^{-1}$]) boli vypočítané hodnoty mernej objemovej práce rozpojovania w [$MJ m^{-3}$], ktorou bola hodnotená efektívnosť razenia. Obdobné monitorovacie sústavy boli postupne pripravené pre raziace stroje RS 24-27H, RS 37-40H, Demag TVM 55H a komínovacu súpravu BESPADRILL P-1. Tieto monitorovacie sústavy boli postupne zdokonaľované. Prvýkrát bol použitý PC monitoring pri razení prieskumnej štólne diaľničného tunela Branisko v r. 1997 a druhýkrát pri razení prieskumnej štólne diaľničného tunela Višňové - Dubná skala v rokoch 2001 a 2002. Tieto monitorovacie sústavy boli schopné snímať vstupné a výstupné veličiny procesu razenia v dvojsekundových intervaloch a vypočítavať hodnotu mernej objemovej práce rozpojovania. Prieskumnú štôľnu tunela Branisko razili Banské stavby, a. s., Prievidza plnoprofilovým raziacim strojom Wirth TB-II-330H a prieskumnú štôľnu tunela Višňové - Dubná skala Doprastav, a. s., Bratislava, strojom Voest Alpine ATB 35HA. Tieto dve nasadenia plnoprofilových raziacich strojov na Slovensku umožnili získať rozsiahlu databázu údajov o razení a z nej podrobne študovať interakciu horninového masívu a raziaceho stroja. Verifikácia odvodených matematických modelov tejto interakcie bola uskutočňovaná v súčinnosti s výsledkami podrobného inžiniersko-geologického prieskumu, ktorý realizovali organizácie Ingeo, a. s., Žilina a Geofos, s. r. o., Žilina.

Faktory ovplyvňujúce razenie

Proces strojového razenia ovplyvňuje množstvo faktorov, ktoré je možné z inžinierskeho hľadiska rozdeliť do 6 skupín:

1. vlastnosti rozpojovaného horninového prostredia,
2. konštrukčné a výkonové parametre plnoprofilového raziaceho stroja,
3. geometrické parametre konštrukcie rozpojovacích nástrojov (diskov),
4. zmeny geometrie funkčných (kontaktných) plôch diskov s horninou vplyvom opotrebovania,
5. parametre režimu razenia (F [kN], n [s^{-1}]),
6. organizácia práce.

Prvá skupina faktorov hodnotí horninu a horninový masív. Z hľadiska razenia v podmienkach in situ sú dôležité tieto vlastnosti:

- a) pevnostné charakteristiky horniny (pevnosť v tlaku, šmyku a ťahu),
- b) deformačné charakteristiky horniny (modul pružnosti, modul pretvárnosti, uhol vnútorného trenia),

¹ Ing. Vít'azoslav Krúpa, DrSc., Ing. Edita Lazarová, PhD., Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53 Košice, krupa@saske.sk, lazarova@saske.sk

(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 17. 3. 2008)

- c) tektonicko-štruktúrne prvky (poklesy, prešmyky, mylonitové zóny, tektonické brekcie, vrstevnatosť, bridličnatosť, systémy diskontinuit a ich orientácia k smeru razenia).

Druhá skupina faktorov charakterizuje použitý plnoprofilový raziaci stroj. Dôležité sú tieto parametre:

- priemer raziacej hlavy,
- možnosť regulácie otáčok a ich maximálna hodnota,
- maximálny krútiaci moment,
- maximálny prítlak,
- elektrický príkon.

Tretia skupina faktorov je najdôležitejšia pre matematický popis interakcie raziaceho stroja s horninou, nakoľko disky (rozpojovacie elementy) sú tou časťou plnoprofilového raziaceho stroja, ktorá sa kontaktuje s horninovým masívom vo vybraných bodoch čelby a ktorými raziaci stroj prenáša na horninu energiu rozpojovania. Pre výpočet sú dôležité ich geometrické charakteristiky - priemer disku d [mm], uhol kontaktnej plochy disku α [°], radiálna vzdialenosť medzi koncentrickými dráhami diskov s [mm], ktorá súvisí s počtom diskov na raziacej hlave N [-] a poloha každého disku na hlave raziaceho stroja.

V priebehu rozpojovania sa funkčné plochy diskov opotrebovávajú, čím sa mení kontaktná plocha disku s horninou pri rovnakej hĺbke zatlačenia disku do horniny – štvrtá skupina faktorov.

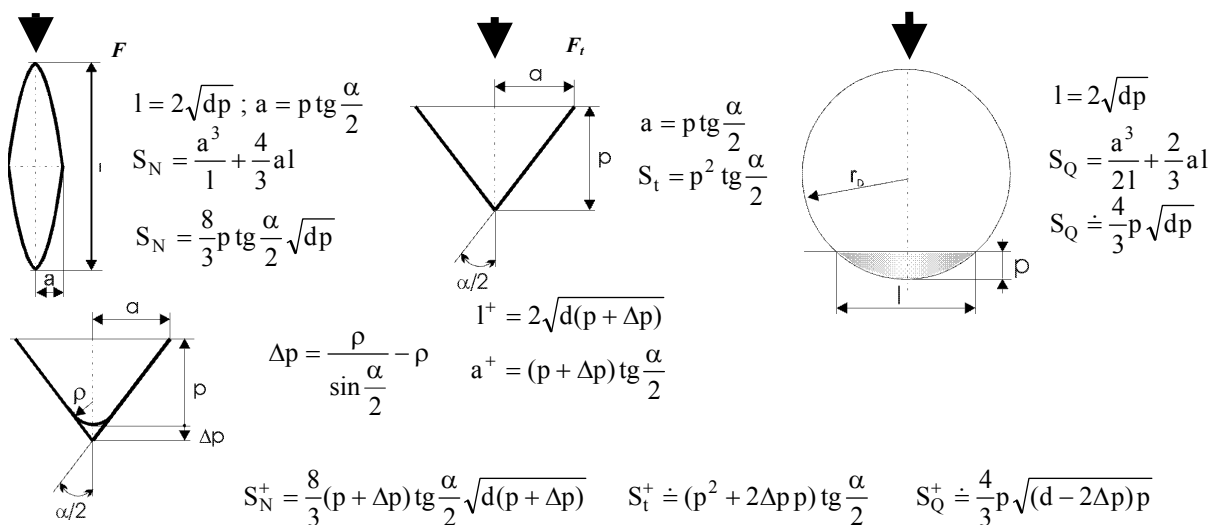
Piatou skupinou faktorov je režim razenia. Horninu je možné rozpojovať s využitím rôznych kombinácií aplikovaných prítlakov a otáčok rozpojovacej hlavy, ale s rôznou efektívnosťou prenosu energie na horninu. Sú to zároveň faktory, ktoré je možné v procese razenia regulovať, s cieľom optimálneho riadenia rozpojovania.

Poslednú, šiestu skupinu faktorov tvorí organizácia práce, ktorá je dôležitá pre celkový efekt razenia (je nutné hlavne zaistiť koordináciu procesu razenia s procesom odťažby, atď.), ale pre matematickú interpretáciu interakcie horninového masívu a raziaceho stroja je nepodstatná.

Odvozenie matematického modelu interakcie

Interakciu horninového masívu a plnoprofilového raziaceho stroja (ich vzájomné silové pôsobenie) v procese rozpojovania horniny sprostredkujú disky osadené na hlave raziaceho stroja. Pri aplikovaní dostatočného prítlaku sú disky zatlačané do horniny. Na každom disku môžeme identifikovať kontaktnú plochu, ktorej tvar je závislý od geometrie funkčnej plochy disku a jej veľkosť ovplyvňuje hĺbka zatlačenia disku do horniny. Hĺbka zatlačenia je funkciou vlastností horniny a veľkosti aplikovaného prítlaku. Na kontakte disku s horninou je možné stanoviť kontaktný tlak, ktorý vyvolá v hornine napätie. Ak dôjde k rozpojeniu horniny, veľkosť týchto napätí je úmerná pevnosti horniny.

Pre plnoprofilový raziaci stroj Wirth TB-II-330H je možné popísať tvar a veľkosť kontaktných plôch disku v troch smeroch (kolmo na čelbu – normálový tlak disku, paralelne s čelbou v smere odvažovania sa disku - tangenciálny tlak disku, v radiálnom smere – bočný tlak disku), ktoré sú na seba kolmé. Na obr. 1 sú znázornené tvary a rovnice určujúce veľkosť kontaktných plôch na disku.



Obr. 1. Tvary kontaktnej plochy disku v 3 smeroch a rovnice pre výpočet ich veľkostí.
Fig. 1. Shapes of the contact area of the disc cutter in 3 directions and equations for their expression.

Popis a komentár k jednotlivým symbolom použitým v obr.1:

V hornom rade sú znázornené tvary kontaktných plôch disku bez opotrebovania, vľavo pre smer normály, uprostred pre tangenciálny a vpravo pre radiálny smer. Vedľa nich sú príslušné matematické popisy. Vplyv opotrebovania modeluje parameter Δp (obrázok v druhom rade), ktorým sú upravené pôvodné rovnice, v ktorých vplyv opotrebovania nie je zahrnutý.

Vysvetlivky:

p – hĺbka zatlačenia disku do horniny určená z monitorovanej rýchlosti razenia, [mm];

d – priemer disku, [mm];

α – uhol funkčnej plochy disku, [°];

S_N – kontaktná plocha disku v smere pôsobenia normálovej sily F_N , [mm²];

S_t – kontaktná plocha disku v smere pôsobenia tangenciálnej sily F_t , [mm²];

S_Q – kontaktná plocha disku v smere pôsobenia radiálnej sily F_Q , [mm²];

F_N – normálová sila stanovená z monitorovaného prítlaku, [kN];

F_t – tangenciálna sila stanovená z monitorovaného krútiaceho momentu M_K , [kN];

F_Q – radiálna sila vypočítaná z rovnice odvodenéj Saniom (Sanio, 1983), [kN];

(⁺) – príslušný symbol pri opotrebovaní, [-].

Kontaktné tlaky a im odpovedajúce napätia v hornine majú matematické vyjadrenie

$$p_N^+ = \frac{F_N}{S_N^+}, \quad p_t^+ = \frac{F_t}{S_t^+}, \quad p_Q^+ = \frac{F_Q}{S_Q^+}.$$

Horeuvedené rovnice modelujú interakciu jedného disku s horninovým masívom. Ideálne pôsobí na jeden disk normálová sila $F_N = F/N$, kde F [kN] je celkový prítlak raziacej hlavy na čelbu a N je počet diskov na hlave. V reálnych podmienkach je táto sila o niečo väčšia, čo ukázali výpočty pri porovnávaní hodnôt síl získaných pri meraní na standoch a v podmienkach in situ. Túto problematiku vyjadrujú rovnice

$$F_R = \sqrt{F_N^2 + F_t^2 + F_Q^2},$$

kde

$$F_t = \frac{4}{5} \sqrt{\frac{p}{d}} F_N \quad \text{a} \quad F_Q = \frac{F_N}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}.$$

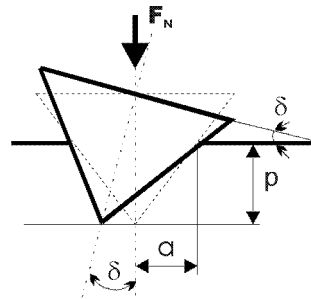
Po dosadení do predchádzajúcej rovnice dostávame pre výpočet rozpojovacej sily tvar

$$F_R = 1,164 F_N \text{ [kN]},$$

z ktorého vyplýva, že v reálnych podmienkach je rozpojovacia sila disku cca o 16 % väčšia ako v ideálnych stanových podmienkach. Pravdepodobnou príčinou je vplyv natočenia niektorých diskov oproti smeru razenia. Táto hypotéza je pre raziaci stroj Wirth TB-II-330H prezentovaná na obr. 2. Odvodené p_{NH} platí pre tieto podmienky: počet diskov $N=31$, $\delta_i=0^\circ$ pre 11 diskov, $\delta_i=9^\circ$ pre 10 diskov, $\delta_i=15^\circ$ pre 3 disky, $\delta_i=21^\circ$ pre 7 diskov. Pri korekcii $\cos \delta=0,9777$ má rovnica tvar

$$p_{NH} = 1,1905 \frac{p_N}{\sqrt{\left(1 + \frac{\Delta p}{p}\right)^3}}$$

$$S_0 = S_N \cos \delta$$



Obr. 2. Natočenie disku vzhľadom na smer razenia.

Fig. 2. Skew of the disc cutter with respect to the tunnelling direction.

Priemerný kontaktný tlak diskovej rozpojovacej hlavy p_{NH} je o cca 19 % vyšší, ako kontaktný tlak jedného disku. Stanovený rozdiel pre Branisko je teda len cca 3 %.

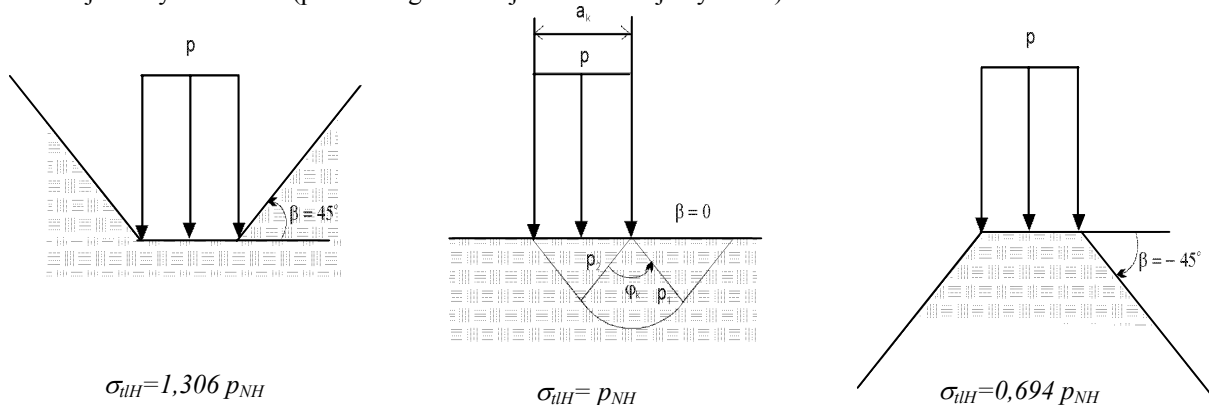
Vplyv horniny na interakciu horninového masívu s rozpojovacou hlavou raziaceho stroja podmieňuje mechanizmus jej rozpojovania, ktorý študoval Kylberg (Kylberg,1991). Jeho výsledky, upravené pre podmienky razenia strojom Wirth TB-II-330H, sú znázornené na obr. 3, z ktorého vyplýva, že pri objemovom rozpojovaní horniny sú priemerné hodnoty rozpojovacích normálových napätí (v konečnom dôsledku pevnosti horninového masívu, pretože tieto napätia vyjadrujú hodnotu v okamžiku porušenia horniny) cca o 3 % väčšie, ako je hodnota priemerného kontaktného tlaku diskovej rozpojovacej hlavy p_{NH} . Tento výsledok dostaneme, ak predpokladáme, že kalibračné disky raziaceho stroja vždy pracujú v záložnej drážke, obrázok vľavo, a polovica ostatných (pilotové a produkčné disky) pôsobí na voľnú plochu, obrázok vpravo. Pre raziaci stroj Wirth TB-II-330H stredné podmienky potom popisuje rovnica

$$\sigma_{tH} = 1,03 p_{NH}$$

Z podrobnej analýzy výsledkov razenia prieskumnej štólne diaľničného tunela Branisko vyplynulo, že mechanizmus rozpojovania horniny je možné zovšeobecniť vzťahom

$$\sigma_{tH} = K_R p_{NH} = \frac{P_{NH}}{10C} \quad [\text{MPa}],$$

kde C je rezný koeficient (pomer tangenciálnej a normálovej sily disku).



Obr. 3. Teoretická analýza zatlačenia disku do horniny.

Fig. 3. Theoretical analysis of cutter penetration into the rock.

Všetky predtým uvádzané veličiny je možné pre daný raziaci stroj v zásade rozdeliť do 2 skupín:

- konštrukčné parametre raziaceho stroja a diskov, ktoré sú pre daný raziaci stroj konštanty a je ich možné v konečnom dôsledku zlúčiť do jednej číselnej hodnoty, charakteristickej pre daný typ stroja,
- veličiny vypočítané z monitorovaných údajov, ktoré interpretujú zmeny kontaktných tlakov (pevností horniny).

Pre raziaci stroj Wirth TB-II-330H je možné stanoviť modelovú pevnosť v tlaku a šmyku, z ktorých sa vypočíta uhol vnútorného trenia horniny. Modelová pevnosť horniny v tlaku pre tento stroj má tvar

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

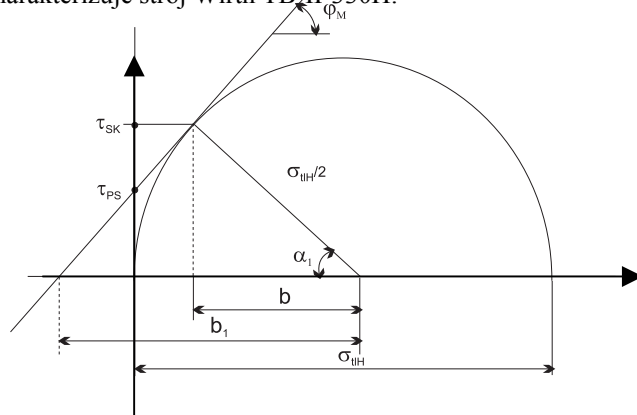
kde číselná hodnota reprezentuje konštrukčné parametre stroja a použitých diskov.

Obdobne v rovnici pre šmykovú pevnosť

$$\tau_{sk} (\text{WIRTH}) = 1,6782 C \sigma_{tH} \quad [\text{MPa}]$$

číselná hodnota charakterizuje práve stroj Wirth TB-II-330H.

Aplikáciou teórie pevnosti podľa Coulomb-Naviera vypočítame ďalej postupom znázorneným na obr. 4 uhol vnútorného trenia horninového masívu φ_M , kde vo výslednom vzťahu číselná hodnota opäť charakterizuje stroj Wirth TB-II-330H.



$$\sigma_r = \frac{\sigma_{tH}}{2} \left(\frac{1}{\sin \varphi_M} - 1 \right) \quad [\text{MPa}]$$

$$\tau_{PS} = \sigma_r \operatorname{tg} \varphi_M \quad [\text{MPa}]$$

$$\varphi_M = 90^\circ - \arcsin \left(\frac{2 \tau_{sk}}{\sigma_{tH}} \right) \frac{360}{2 \pi} \quad [^\circ]$$

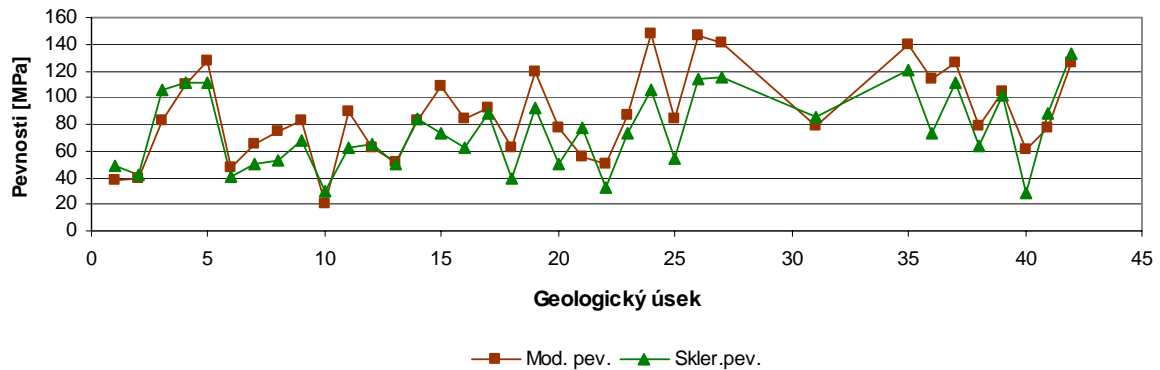
$$\varphi_M = 90^\circ - \arcsin \left(3,3564C \right) \frac{360}{2 \pi} \quad [^\circ]$$

Obr. 4. Aplikácia pevnosti podľa Coulomb-Naviera.

Fig. 4. Application of the strength according to Coulomb-Navier.

Verifikácia matematických vzťahov a vybrané výsledky

Verifikácia matematických vzťahov bola vykonaná porovnaním hodnôt vypočítanej pevnosti s výsledkami pevnosti z podrobného inžiniersko-geologického prieskumu robeného v razenej prieskumnej štôlni tunela Branisko (Bohyník, 1998). Získaný kvázi kontinuálny záznam modelovej pevnosti v tlaku vypočítanej z monitorovaných údajov bol porovnávaný s výsledkami napr. skleroskopickkej pevnosti stanovovanej v 5 až 10 metrových intervaloch na stene prieskumnej štôlni. Skleroskopická pevnosť je odvodená z výsledkov odrazovej skúšky realizovanej Schmidovým kladivkom. Na obrázku 5 sú znázornené priemerné hodnoty skleroskopickkej a modelovej pevnosti pre dané geologické celky. Celý razený úsek v dĺžke približne 2 200 m bol rozdelený do 42 geologických celkov. Z porovnania vidieť jednoznačnú trendovú zhodu.



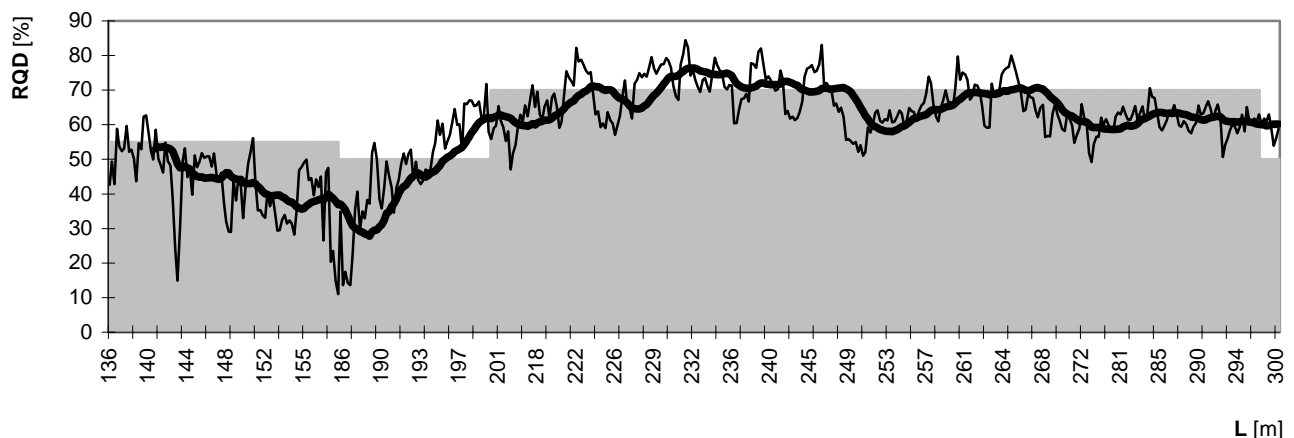
Obr. 5. Porovnanie priemerných hodnôt skleroskopickkej pevnosti a modelovej pevnosti.

Fig. 5. Comparison of the average values of scleroscopic strength and the model strength at a simple pressure.

Na obrázku 6 je porovnanie RQD koeficienta porušenia horninového masívu stanoveného klasickým postupom z odobratých vrtných jadier a RQD_{teor} - teoreticky určeného z výsledkov monitorovania procesu razenia. RQD koeficient získaný geologickým prieskumom je reprezentovaný sivou plochou a RQD_{teor} je vypočítaný z hodnôt monitorovaného uhla vnútorného trenia φ_M , vyjadreného vzťahom

$$\varphi_M = 0,3765 \cdot RQD + 47,499 \quad [^\circ].$$

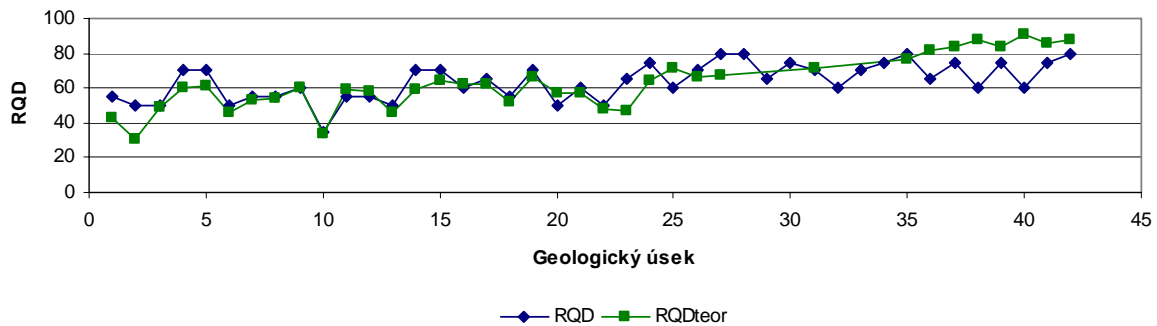
Obr. 6 znázorňuje okamžité hodnoty RQD_{teor} a hrubá čiara predstavuje kĺzavý priemer vypočítaný z okamžitých hodnôt.



Obr. 6. Vypočítané hodnoty koeficienta RQD_{teor} a aktuálna hodnota koeficienta RQD.

Fig. 6. Estimated values of RQD_{teor} coefficient and the actual values of RQD coefficient.

Na obrázku 7 sú znázornené priemerné hodnoty RQD koeficienta získaného inžiniersko-geologickým prieskumom a RQD_{teor} stanoveného výpočtom pre 42 geologických celkov. Taktiež sa tu potvrdila trendová zhoda, podobne ako na obr. 5 pri pevnosti.



Obr. 7. Porovnanie priemerných hodnôt RQD a RQDteor pre geologické celky masívu Branisko.
Fig. 7. Comparison of the average values of RQD and RQDteor for geological sections of the Branisko rock mass.

Záver

Výsledky modelovania matematickej interakcie horninového masívu a raziaceho stroja ukázali, že vytvorený matematický aparát s dostatočnou presnosťou „kopíruje“ výsledky klasických skúšok používaných pri inžiniersko-geologickom prieskume. Na rozdiel od klasických spôsobov má niektoré výhody. Výpočtom z monitorovaných veličín procesu razenia vieme získať kvázi kontinuálny záznam hodnotených vlastností horninového masívu a rozsiahlosť databázy umožňuje vyhodnotiť výsledky aj štatistickými metódami.

Článok vznikol pri riešení projektu
VEGA č. 2/6196/26 s podporou
Vedeckej grantovej agentúry.

Literatúra - References

- Bohyník, a kol.: Podrobný inžinierskogeologický a hydrogeologický prieskum diaľnice D1 Behárovce-Branisko, časť B - tunel Branisko. [Čiastková správa č.6], INGENIO, a.s., Žilina, február 1998.
- Kylberg, G. G.: Relation between the Forces on Gange Cutters and on Face Cutters on Tunnel Boring Machines. *Tunnelling and Mining*, 1991, 13p.
- Sanio, H. P.: Nettovortriebsprognose für Einsätze von Vollschnittmaschinen in anisotropen Gesteinen. 147 s., Bochum, Nov. 1983.