

# HODNOTENIE SPOL' AHLIVOSTI DISKOVÝCH VALIVÝCH DLÁT PLNOPROFILOVÝCH RAZIACICH STROJOV PRI RAZENÍ PRIESKUMNÝCH ŠTÔLNÍ PRE TUNELOVÉ RÚRY

Vít' azoslav Krúpa<sup>1</sup> a Edita Lazarová<sup>2</sup>

**Key words:** computer monitoring system, TBM, full profile tunnelling, rock mass properties

## Úvod

Prieskumná štôlna tunela Branisko bola z východnej strany razená plnoprofilovým raziacim strojom Wirth TB-II-330H/M. Z hľadiska použitej techniky je to ekonomicky náročná stavba, a preto je potrebné zabezpečiť plynulý a rýchly priebeh postupu prác s maximálnym využitím výkonnosti mechanizmov a efektívnym využitím pracovného času. Počas razenia raziaci stroj prechádzal rôznymi geologickými útvarmi, pričom boli sledované výmeny diskových valivých dlát na hlave raziaceho stroja a zároveň boli zaznamenávané monitorované veličiny aplikovaného režimu razenia: prítlak, otáčky, krútiaci moment raziacej hlavy, príkon a odvrt. Príspevok hodnotí možnosť využitia ukazovateľov spola hlivosti pri postupnom opotrebovaní raziacich dlát ako aj vplyv dynamických vlastností sústavy indentor-hornina pri prechode jednotlivými geologickými úsekmi na ich degradáciu.

## Aplikovaná metodika pri výstavbe prieskumných štôlní

Nasadenie PPRS pri razení tunelov má v porovnaní s klasickými spôsobmi razenia tieto výhody:

vyššia bezpečnosť prác; odpadá práca s trhavinami; horninové prostredie sa v blízkosti výrubu narušuje minimálne, čo v porovnaní s trhavinovým razením zlepšuje stabilitu výrubu; vytváraný výrub má presný obrys, vzniká minimum nadvýlomov; plne mechanizovaný pracovný postup umožňuje v priaznivých geologických podmienkach dosiahnuť vysoké postupové rýchlosti; vytvárajú sa približne rovnaké veľkosti rúbaniny, s čím súvisí bezproblémová kontinuálna doprava pásovými dopravníkmi; mechanické razenie umožňuje kontinuálny priebeh prác, ktoré je možné diaľkovo ovládať, monitorovať, optimalizovať a automatizovať [1].

Na základe monitorovaných veličín je možné vypočítať okamžitú rýchlosť razenia  $v$  ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ), mernú objemovú prácu rozpojovania  $w$  ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a doporučený prítlak  $F_{dop}$  (kN). Monitorované údaje boli spracovávané viacstupňovo. V prvej fáze bola prevedená aktívna filtrácia vstupných údajov pri chode rozpojovacej hlavy naprázdno, pri dorovnávaní smerovosti, alebo pri cúvaní raziaceho stroja. V druhej fáze boli vypočítavané priemerné hodnoty všetkých veličín pre stanovený úsek razenia a pre každú veličinu bola vypočítaná stredná hodnota pre úsek v dĺžke cca 25 cm razeného úseku. V tretej fáze boli vypočítané charakteristiky, používané pre vyhodnotenie procesu razenia.

Z výsledkov, ktoré boli získané z monitorovania procesu strojného razenia môžeme konštatovať, že monitoring zabezpečuje v porovnaní s klasickými metódami inžinierskogeologického prieskumu väčší objem informácií, umožňuje podrobne mapovať zmeny vlastností hornín na postupujúcej čelbe a zabezpečuje údaje využiteľné pre:

1. podrobné štúdium procesu razenia,
2. identifikovanie vplyvov zmien stavu diskov na rozpojovacej hlave,

<sup>1</sup> host' Prof. Ing. Vít' azoslav Krúpa, DrSc., Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53 Košice, e-mail: [krupa@saske.sk](mailto:krupa@saske.sk)

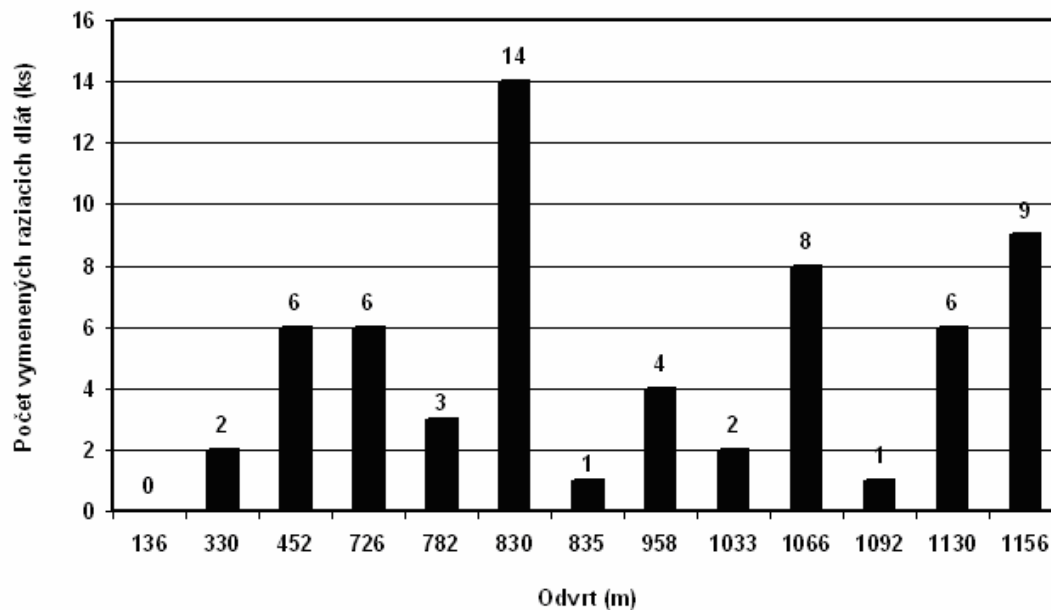
<sup>2</sup> Ing. Edita Lazarová, PhD., Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53 Košice, e-mail: [lazarova@saske.sk](mailto:lazarova@saske.sk)

3. zisťovanie optimálnych režimov razenia z hľadiska nákladovosti razenia,
4. predikciu zmien vlastností hornín na postupujúcej čelbe.

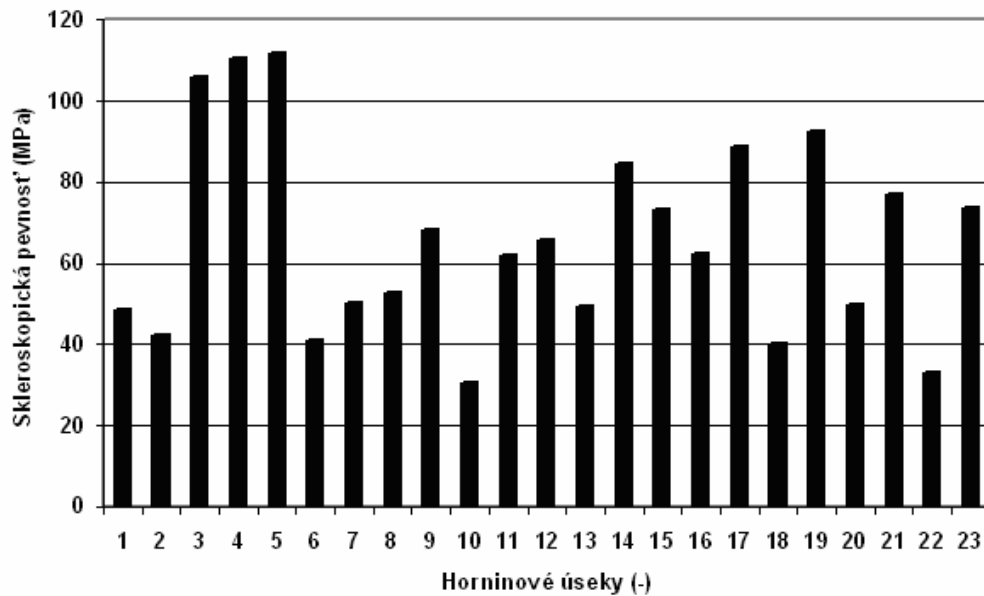
Vlastnosti horniny a horninového masívu sa stanovovali klasickými metódami inžiniersko-geologického prieskumu. Určovala sa bodová pevnosť horniny -  $\sigma_{CI}$  point load testom a skleroskopická pevnosť -  $\sigma_C$ , z odrazových skúšok Schmidovým kladivkom.

Geomechanickým monitoringom a použitím metódy IKONA – (Inverzná kontinuálna metóda stanovenia vlastností horninového masívu), ktorá je podrobne rozpracovaná v práci [7], sa matematickými postupmi z monitorovaných hodnôt určila modelová pevnosť horniny v tlaku  $\sigma_{iIH}$ . Touto metódou sme získali 5041 hodnôt priemernej modelovej pevnosti hornín pre úseky o dĺžke 25 cm [8].

Pre identifikovanie vplyvov zmien stavu diskov na rozpojovacej hlave v kontexte s vlastnosťami rozpojovaného horninového masívu sme použili údaje o výmenách diskov a údaje o hodnotách skleroskopickej pevnosti v jednotlivých horninových úsekoch. Sú znázornené na obr. 1 a obr. 2. Výmeny diskov pri 330 m z obr. 1, prislúchajú šiestemu horninovému úseku z obr. 2, výmeny pri 452 m začiatku ôsmeho horninového úseku, výmeny pri 726 m úseku z pätnásteho horninového úseku, výmeny pri 782 m, 830 m, 835 m, 958 m devätnástemu horninovému úseku, výmeny pri 1033 m dvadsiatemu horninovému úseku, výmeny pri 1066 m dvadsiatemu prvému úseku, výmeny pri 1092 m úseku dvadsiatemu druhému, výmeny pri 1130 m a 1156 m dvadsiatemu tretiemu úseku a výmeny.

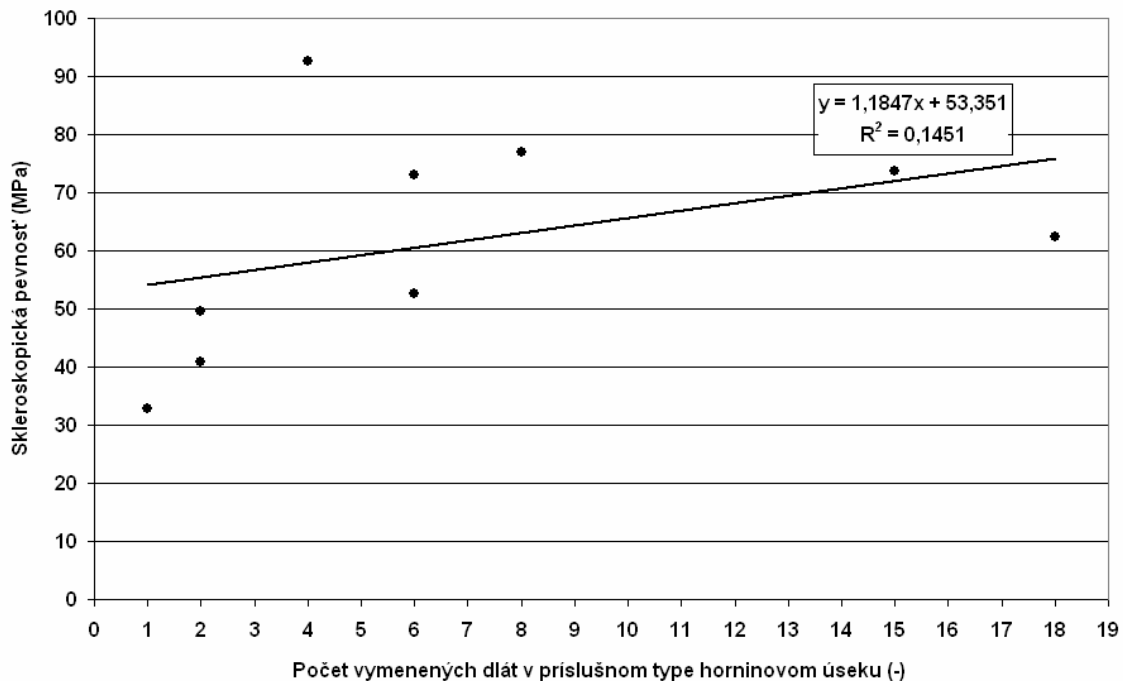


Obr.1 Počet vymenených diskov na jednotlivých staničeniach pri razení tunela Branisko



Obr.2 Závislosť skleroskopických pevností jednotlivých geologických celkov

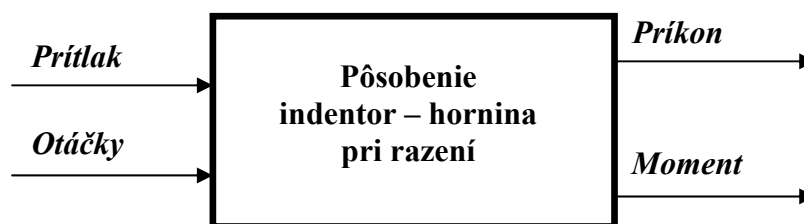
Na základe zaznamenaných výmien dlát v jednotlivých staničeniach a experimentálne nameraných hodnôt skleroskopickej pevnosti sme zostrojili regresný model vzájomného vzťahu medzi počtom vymenených dlát a skleroskopickou pevnosťou, obr. 3.



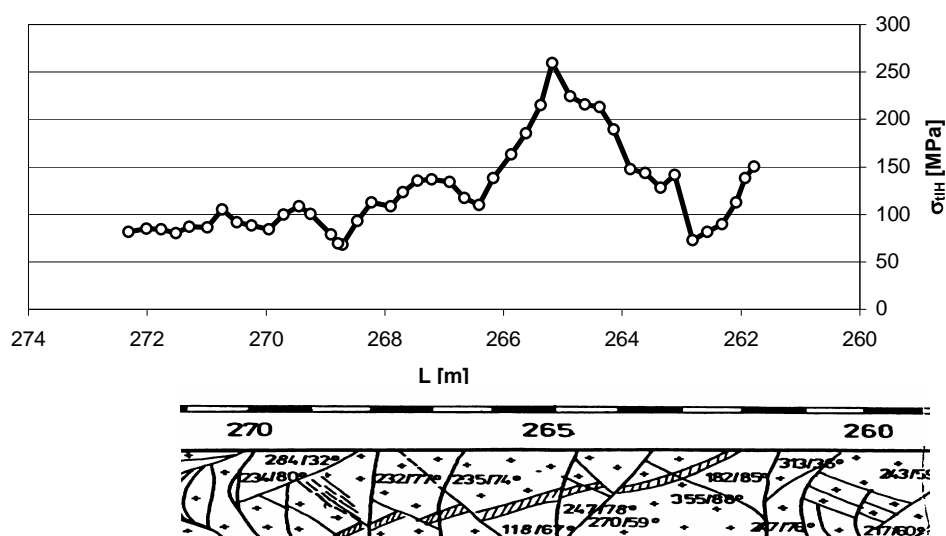
Obr. 3 Regresný model medzi počtom vymenených dlát a skleroskopickou pevnosťou

Z grafu vyplýva, že sledovaný vzájomný vzťah, resp. stupeň regresie je malý. Príčinou tohto nesúladu medzi sledovanými veličinami je pravdepodobne postupná degradácia diskového dláta prechodom cez horninový masív s rôznymi vlastnosťami a jeho výmena je výsledkom čiastkových predchádzajúcich poškodení. Okamžik výmeny teda priamo nesúvisí s okamžitou nameranou hodnotou pevnosti. Je ale zrejmé, že pevnosť vplyva na opotrebovanie diskov, čo môžeme komentovať použitím obr. 2, keď k prvej výmene disku došlo po prekonaní relatívne dlhého úseku s vysokou hodnotou pevnosti, horninové úseky 3 až 5. Skalárny náhľad na túto problematiku pravdepodobne nie je dostatočný a je nutné skúmať tento proces v dynamickom režime. Jedným z riešení je sledovať prechodové charakteristiky sústavy indentor – hornina t. j. odozvu systému na známy vstupný signál v našom prípade zmenu prítlaku (v podobe jednotkového skoku) na vstupe sústavy. Tieto „jednotkové skoky“ sme schopní sledovať u plnoprofilového razenia v intervaloch približne 1 meter a súvisia s technológiou. Uvedená problematika bola popísaná v práci [2], kde rozdiely medzi prechodovkami pri nových a procesom razenia poškodených, t. j. čiastočne degradovaných diskoch sú výrazne rozdielne. Na základe modelu uvedeného v tejto práci je zostrojený model a prechodovky z úseku s dominantnou kremennou žilou, obr. 4, 5 a 6.

Obr. 4 znázorňuje použitý model. Ako vstupné veličiny uvažujeme prítlak a otáčky, ktoré sú v požadovanom úseku stabilizované, a výstupnými veličinami sú krútiaci moment raziacej hlavy a príkon. Obr. 5 popisuje vlastnosti skúmaného úseku razenia s dominantnou žilou kremeňa.



Obr. 4 Schéma procesu rozpojovania vstup/výstup



Obr.5 Schéma horninového masívu pri prechode raziaceho stroja kremennou žilou v prieskumnej štólňi Branisko

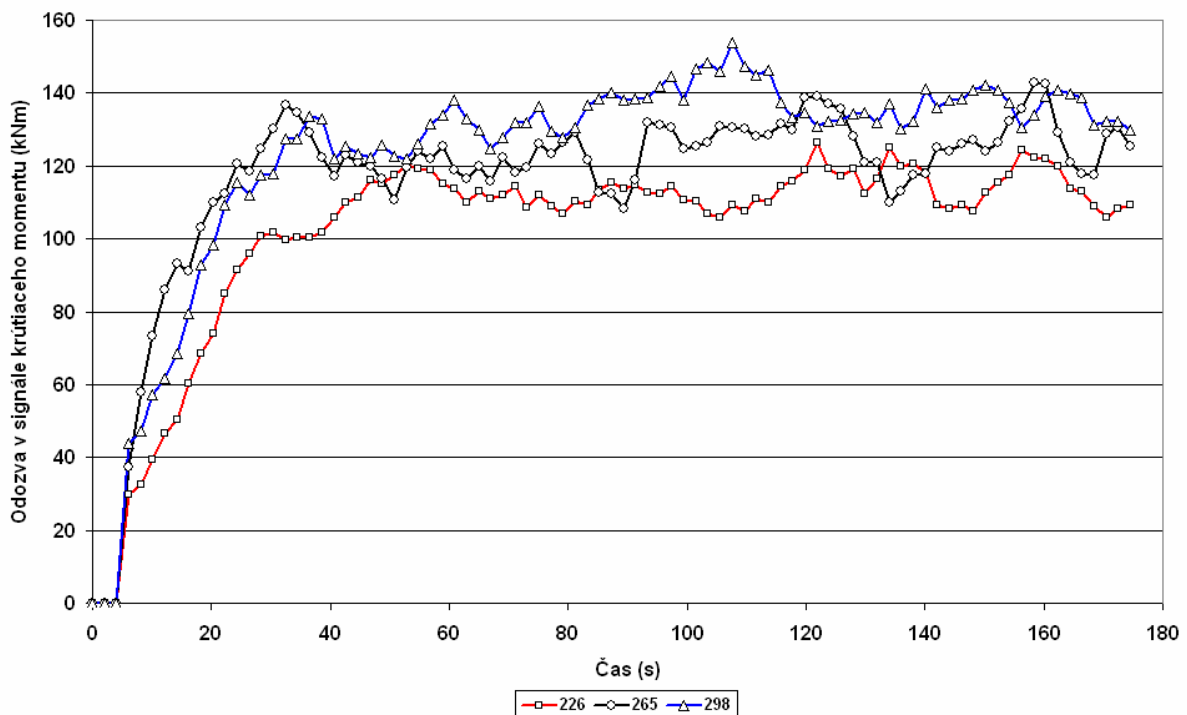
Ako výsledok takejto odozvy našej sústavy na “jednotkový skok” získaného zo signálu prítlaku sú prechodovky, ktoré sú obsiahnuté v signále krútiaceho momentu na obr. 6. Priebehy prechodových charakteristík pred dominantnou žilou (staničenie 226 m), počas prechodu stroja cez kremennú žilu (staničenie 265 m) a po jej prerazení (staničenie 298 m) sú dostatočným príkladom rozdielneho správania sa raziacej hlavy pri rozpojovaní horniny. Líšia sa zosilnením, časovou konštantou ako aj zastúpením kmitavej zložky v signále [3], [5].

Na určenie priebehu výsledných prechodových charakteristík (stredný pravdepodobnostný priebeh) bol použitý vzťah:

$$f_i = \frac{\sum_{k=1}^N \text{sign}(\Delta u_k) y_{ik}}{\sum_{k=1}^N |\Delta u_k|}, \quad (1)$$

kde  $f_i$  je výsledný priebeh prechodovej charakteristiky a  $\Delta u_k$ ,  $y_{ik}$  predstavujú vstupné, resp. výstupné realizácie [2], [3].

Na základe takto získaných prechodových charakteristík je možné predpokladať, že na opotrebovanie a poškodenie bude mať vo veľkej miere vplyv dynamické namáhanie raziacej hlavy, ktoré sa prejaví na počte vymenených diskov. Po prechode kremennej žily sa viditeľne zvýšilo dynamické namáhanie rozpojovacej hlavy a pri odvрте 330 m museli byť vymenené poškodené (úplne degradované) disky.



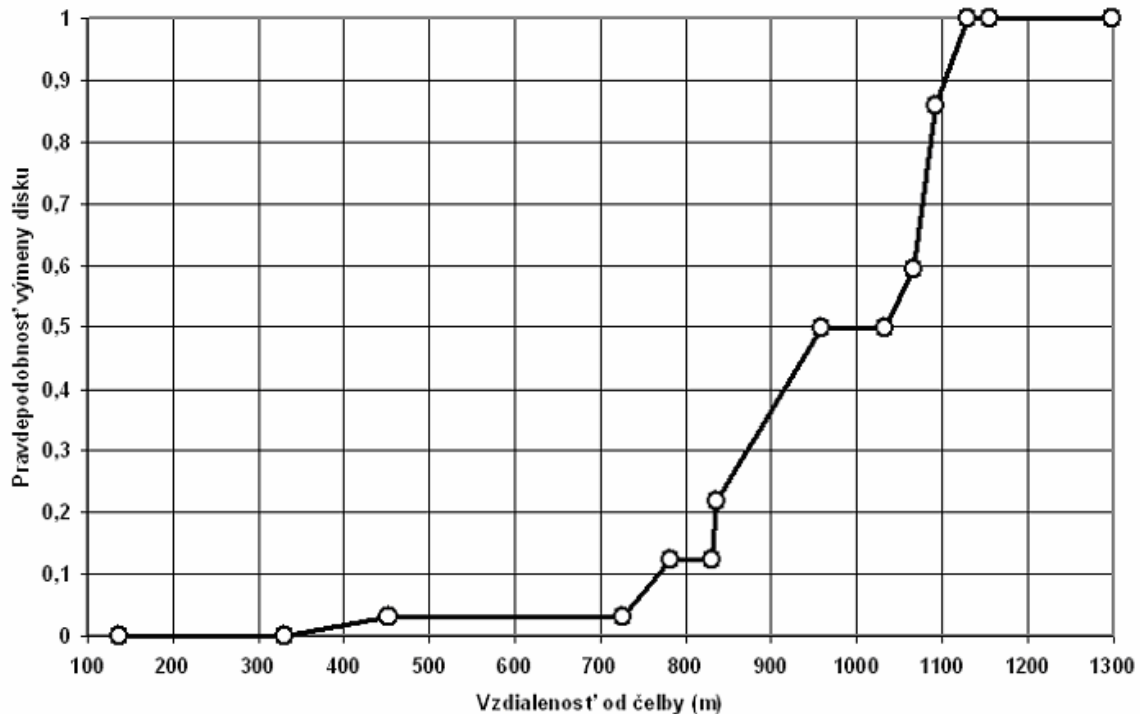
Obr. 6 Odozva sústavy hornina-indentor v signále krútiaceho momentu raziacej hlavy

### Kvantitatívne hodnotenie spoľahlivosti diskov na raziacej hlave

Jednotiacim hľadiskom všetkých prístupov ku kvantitatívnemu hodnoteniu spoľahlivosti je jeho pravdepodobnostný charakter a tá skutočnosťou, že vlastnosti určujúce spoľahlivosť objektov sú určované alebo ovplyvňované náhodnými javmi a činiteľmi,

v našom prípade predovšetkým vlastnosťami horniny. Preto ukazovatele spoľahlivosti ako kvantitatívna miera týchto vlastností majú náhodný charakter. Tieto skutočnosti podmieňujú použitie vhodného matematického aparátu na báze teórie pravdepodobnosti a štatistiky.

Jedným z celého radu možných ukazovateľov je distribučná funkcia pravdepodobnosti výmeny disku na raziacej hlave.



Obr. 7 Priebeh empirickej distribučnej funkcie vzniku poruchy na raziacom stroji

Ako z priebehu funkcie na obr. 7 vyplýva, prudký nárast pravdepodobnosti výmeny disku nastáva za hranicou 700m, ktorý pretrváva ďalších 400m až do vzdialenosti približne 1100m a mení sa na istotu.

Pre štatistické odhady ukazovateľov bezporuchovej činnosti  $f(t)$  a  $\lambda(t)$  je potrebné zaznamenávať ešte počet diskov  $\Delta B_i(\Delta T)$ , ktoré sa poškodili v krátkom čase  $\Delta T$  po dobe  $t$ .

$$\Delta B_i(\Delta T) = B(t + \Delta T) - B(t). \quad (2)$$

Pretože približne platí

$$\Delta B_i(\Delta T) \cong N f_E(t) \Delta T, \quad (3)$$

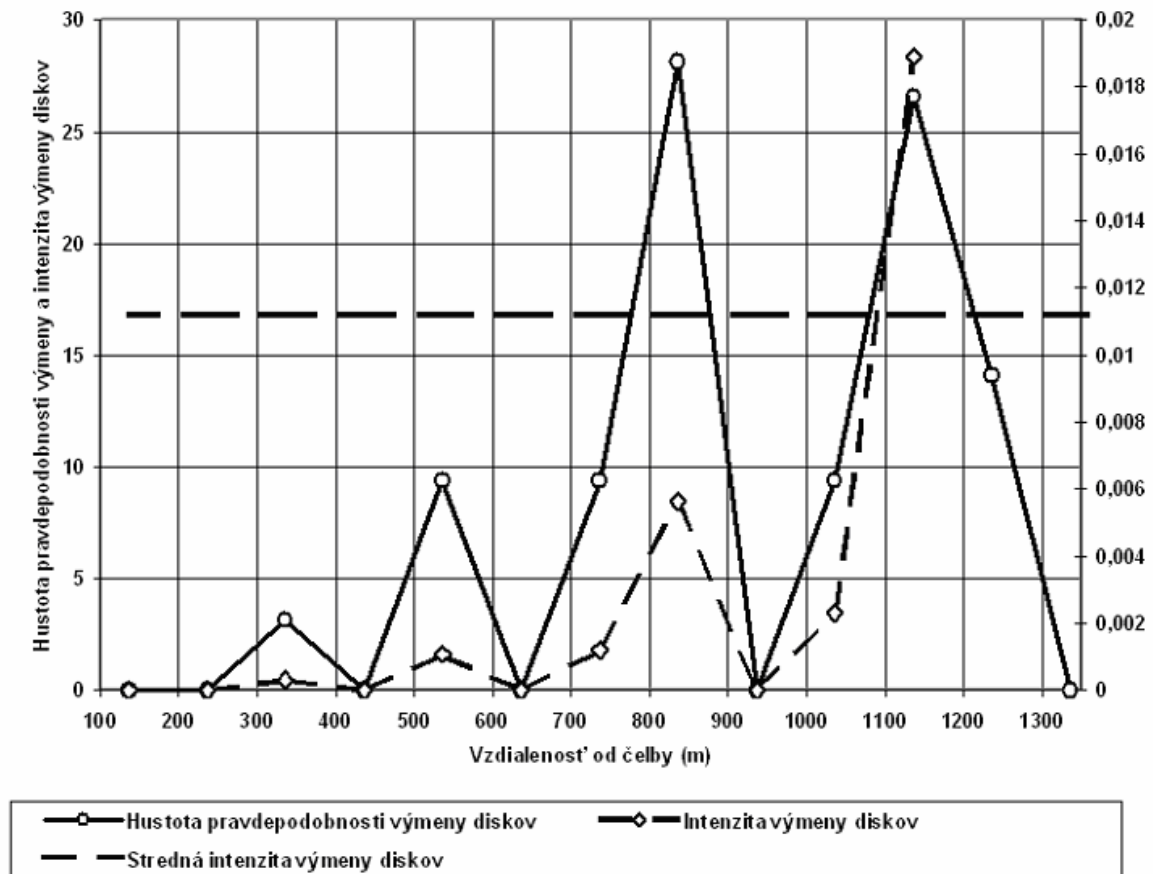
je bodový odhad  $f_E(t)$  hustoty pravdepodobnosti porúch v intervale  $\langle 0, t \rangle$  daný vzťahom

$$f_E(t) = \frac{\Delta B_i(\Delta T)}{N \Delta T}. \quad (4)$$

Z priebehov hustoty pravdepodobnosti výmeny a intenzity výmeny diskov na obr. 11 môžeme sledovať opäť vo vzdialenosti 700m od čelby prudký nárast pravdepodobnosti aj intenzity výmeny diskov nad úroveň priemernej výmeny diskov [2], [4].

Následne intenzitu výmien vypočítame podľa vzťahu:

$$\lambda_E(t) = \frac{\Delta B_i(\Delta T)}{N(t) \Delta T} \quad (5)$$



Obr. 8 Priebehy hustoty pravdepodobnosti, intenzity a strednej intenzity výmeny diskov

### Záver

Rozpojovanie hornín plnoprofilovými raziacimi strojmi ako už bolo spomenuté je veľmi zložitý proces a o cene bežného metra takéhoto banského diela rozhoduje celý rad faktorov. Sú to konštrukčné a prevádzkové parametre stroja, konštrukcia diskových dlát, ich rozmiestnenie na hlave, rozostup dlát, ich tvar a materiálové zloženie a v neposlednom rade aplikovaný režim razenia [7]. Teda z hľadiska celkovej ceny diela má vplyv na proces rozpojovania hlavne jeho optimálny režim v celom razenom úseku ako aj konštrukcia rozpojovacieho zariadenia. Preto je snahou získať čo najväčší počet informácií o prebiehajúcom procese, jeho režime a okamžitom stave zariadenia. Dôležitú úlohu má pri tomto spôsobe monitorovania aj prenos získaných dát a následne možnosti vyhodnotenia a ich využitie pri riadení tohoto náročného procesu v reálnom čase [6], [9], [10].

V súčasnosti neexistujú priame metódy hodnotenia stavu horninového masívu na čelbe. Možnosti riešenia spočívajú v podrobnom geologickom prieskume, v aplikovaní nepriamych metód hodnotenia stavu horninového masívu na čelbe (IKONA), skúmaním dynamických vlastností sústavy hornina-indentor a následné zavádzanie metód umelej inteligencie do riešenia tejto problematiky, ktorá úzko súvisí s opotrebovaním dlát na raziacej hlave.

Článok je členený do troch hlavných častí, v ktorých je v krátkosti popísaná história a technické parametre tunela Branisko, parametre raziaceho stroja, monitorované veličiny, možnosti výpočtu a aplikácie dynamických vlastností sústavy a určenie niektorých ukazovateľov spoľahlivosti v závislosti na dĺžke odvrtu. Je dôležité spomenúť, že aj napriek relatívne veľkému priestoru poskytnutému na publikovanie nie je možné uviesť všetky

možnosti, ktoré poskytujú ako namerané dáta, tak aj štatistické možnosti ich vyhodnotenia. Uvedené výpočty napríklad vôbec nezohľadňujú rozloženie výmien na jednotlivých pozíciách raziacej hlavy, čo v rámci procesu zohráva tiež mimoriadne dôležitú úlohu.

V rámci ďalšieho výskumu je potrebné venovať pozornosť predovšetkým sledovaniu dynamických vlastností sústavy indentor-hornina, napr. konštrukciou vhodného laboratórneho standu na modelovanie týchto dynamických dejov s prihliadnutím hlavne na opotrebovanie alebo poškodenie diskov na raziacej hlave. Následné popísanie experimentálnych dejov pomocou vhodného matematického modelu a vyriešenie rýchleho prenosu dát [6], [9], [10] môže byť v budúcnosti vhodným prostriedkom pre riadenie tohoto zložitého procesu na základe dát, ktoré sú získavané v reálnom čase s možnosťou predikcie vzniku nebezpečných prevádzkových stavov.

## Literatúra

- [1] BOGDANOVSKÁ, G.: Štandardy pre BOZP. 1. vyd. Košice : TU, FBERG, 2008. 85 s. ISBN 978-80-8073-907-2.
- [2] FUTÓ, J., IVANIČOVÁ, L., KREPELKA, F.: Statistical evaluation of reliability of disc roller bits on tunnel boring machines, In: XXXIV Seminar ASR 2009, Ostrava, VŠB, 2009, s. 61-69. Dostupné z: <<http://www.fs.vsb.cz/akce/2009/asr2009/proceedings/061.pdf>>. ISBN 978-80-248-1953-2.
- [3] FUTÓ, J.: Identifikácia, Košice, TU Košice, F BERG, 2006, Dostupné z: <<http://ccdec.tuke.sk/~bogdanov/Identifikacia/>>. ISBN 80-8073-703-7.
- [4] FUTÓ, J., BOGDANOVSKÁ, G.: Spôľahlivosť technických systémov, Košice, TU F BERG, 2005, <<http://ccdec.tuke.sk/~bogdanov/Spo%beahlivos%9d/>>. ISBN 80-8073-357-0.
- [5] FUTÓ, J. - IVANIČOVÁ, L. - KREPELKA, F.: Use of acoustic signal in evaluation of characteristic parameters in rock disintegration. In: 10 th International Carpathian Control Conference : ICC 2009.
- [6] HOROVČÁK, P., TERPÁK, J.: Web services in comparison with other technologies ICC 2004: proceedings of international Carpathian control conference, Zakopane, Poland, May 25-28, 2004, Krakow, ISBN 83-89772-00-0.
- [7] KRÚPA, V.: Hypotézy, modely, teórie a ich verifikácie pri plnoprofilovom razení. [Doktorská dizertačná práca], Košice *ÚGt SAV*, 1998, 251 s.
- [8] LAZAROVÁ, E., KRÚPA, V. Skúsenosti z plnoprofilového razenia prieskumných štôlní pre tunelové rúry. . In: *Acta Montanistica Slovaca*, roč.11 (2006), mimoriadne číslo 2, ISSN 1335-1788, s.330-334
- [9] PAVLAS, R. Projektování systémů. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007, 1. vydání. 226 s. ISBN 978-80-248-1517-6
- [10] URÍČEK, J., POPPEOVÁ, V., ĎURICA, J., BULEJ, V., GALBAVÝ, T., REJDA, R.: The Development of TriVariant Simulation Software. In: IWKM 2008. 19th International Scientific Conference Mittweida, Scientific Reports Nr. 6, Journal of the University of Applied Sciences Mittweida, Industrielle, Steuerungen/Robotik, Mittweida, November 05-06, 2008, str. 61-64. ISSN 1437-7624

*Príspevok vznikol pomocou grantovej úlohy č.2/0086/09.*

**Lektoroval:**

Doc. Ing. Jiří David, PhD.