

## Monitorovanie rozpojovania pri plnoprofilovom razení líniových podzemných diel

Felix Sekula<sup>1</sup> a Slávka Grexová<sup>1</sup>

### Monitorierung der Zerkleinerung des Gesteinsmassivs beim mechanisierten Treiben mit Vollschnittmaschinen

Zusammenfassung: Monitorierung der Zerkleinerung im Prozess des mechanisierten Treibens der Gesteine wurde ermöglicht, die Festigkeit Charakteristiken der Gesteinsmassivs zu identifizieren. Es wurde die Abhängigkeit zwischen der spezifischen Energie und der Spannung, die unter einzelnen Diskusen der Treibenmaschine hervorrufen war, bestimmt.

In der vorliegende Arbeit dokumentieren wir Messergebnisse des Desintegrierungsprozesses beim Treiben einer Grubenstrecke mit einer Durchmesser von 3 m mit einer Vollschnittmaschine tschechoslowakischer Produktion mit der Typenbezeichnung RS 24-27h und mit einer Bohrmaschine Bspadrill P1. Die verfolgten Größen wurden mit einer Datendichte von 150 Informationen pro Meter für drei verfolgte Parameter ermittelt: Vorschubkraft der Vortriebmaschinen – F, kN; momentane Vortriebgeschwindigkeit der Maschine – v, mm.s<sup>-1</sup>; reine desintegrierungsleistung P, kW. Die Umdrehungszahl des Maschinenkopfes war konstant mit n=0,167 s<sup>-1</sup>.

Aus den genannten Werten wurden für jeden gemessenen Augenblick weitere Größen abgeleitet, welche ermöglichen den Desintegrierungsprozess in Bezug auf die Festigkeitscharakteristik des Gesteins massivs zu diagnostizieren. Die pro Volumeneinheit des desintegrierten Gesteins verbrauchte spezifische Energie – w, MJ.m<sup>-3</sup> wurde aus den Messergebnissen nach der folgenden Beziehung zur Desintegrierungsleistung, momentane Vortriebgeschwindigkeit der Maschine und zur Stirnfläche des vorgetriebenen Grubenbaus in m<sup>2</sup> bedeutet. Die mittlere Eindringungstiefe der Bohrmeissel – h, [mm]/ definiert momentane Vortriebsgeschwindigkeit der Maschine und die Umdrehungszahl des Maschinenkopfes.

Abschliessend können wir zusammenfassen, dass sich bei Veränderungen der Festigkeit und der spezifischen Energie bei einem Gesteinstyp infolge von Störungen auch der Young'sche Elastizitätsmodul ändern muss. Wir dokumentieren die ursprüngliche gemessene Abhängigkeit des berechneten Mittelwerts der Spannung unter der Schrämscheibe von der spezifischen Energie bei einem quasi konstanten Vorschubkraft F=2200 kN und gleichzeitig eine weiter ermittelte Abhängigkeit in der selben Gesteinsformation bei eine quasi konstanten Vorschubkraft F=1000 kN. Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Art der Beanspruchung auch das Verhältnis der berechneten Spannung und des Young'schen Elastizitätsmoduls bzw. den Richtungskoeffizienten ändert. Abschliessend ist festzustellen, dass die spezifische Energie genügend Informationen für die Erfassung der Festigkeit eines Gesteinsmassivs liefert

**Key words:** monitoring, fullface driving process, disintegration power, rotation speed, specific energy consumption, course of driving.

### Úvod

Riadenie razenia plnoprofilovými strojmi kladie vysoké nároky na poznanie zákonitostí procesu rozpojovania pod valivými elementami vrtacej hlavy, ktoré vychádzajú z predchádzajúcich poznatkov z oblasti rozpojovania hornín rotačným vrtaním (Sekula a kol., 1991). Ide najmä o poznanie funkčných vzťahov medzi vstupmi a výstupmi procesu, t.j. funkčné vzťahy okamžitej rýchlosti postupu razenia v, mernej energie rozpojovania w, podielu týchto veličín φ a prítlaku F (obr.1).

### Optimalizácia procesu rozpojovania hornín pri plnoprofilovom razení

Merná objemová práca rozpojovania na základe monitorovaných údajov na tunelovacom stroji je daná vzťahom:

$$w = \frac{N}{S \cdot v}, \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1)$$

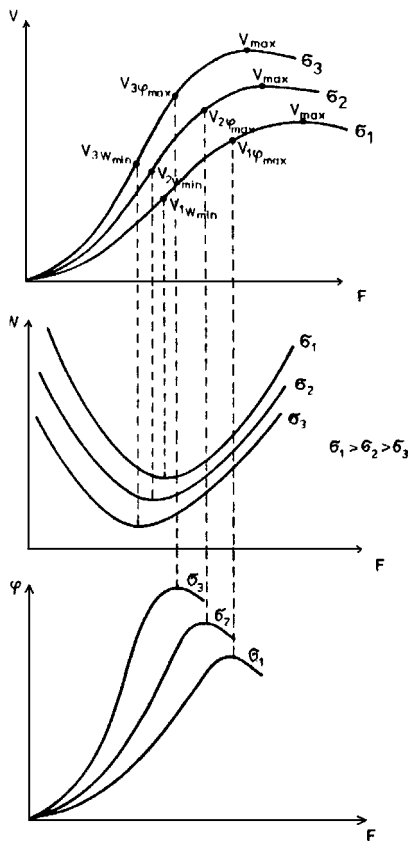
kde: N – je rozpojovací výkon [W],  
S – rozpojovaná plocha [m<sup>2</sup>],  
v – okamžitá rýchlosť vrtania [m.s<sup>-1</sup>],  
k – energetický koeficient abrazivity [-].

Na tejto veličine je lineárne závislá intenzita opotrebovania nástroja, ktorá je vyjadrená vzťahom:

$$I_0 = k \cdot w = \frac{\Delta G}{w \cdot L} \cdot w, \quad [\text{g} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (2)$$

kde: ΔG - je hmotnostný úbytok pracovných elementov nástroja [g],  
L - je dĺžka odvrtu [m].

<sup>1</sup> Prof. Felix Sekula, CSc., Ing. Slávka Grexová, Katedra dobývania ložísk a geotechniky F BERG Technickej univerzity v Košiciach, 042 00 Košice, Park Komenského 19 (Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 20.6.2001)



Pri dlhodobom stendovom výskume rotačného vŕtania hornín boli určené závislosti medzi vstupnými a výstupnými veličinami vŕtania. Za výstupné veličiny považujeme okamžitú rýchlosť postupu razenia  $v$ , mernú energiu rozpojovania  $w$  a podiel týchto dvoch veličín  $\varphi$  a krútiaci moment. Za vstupné veličiny považujeme prítlak  $F$  a otáčky  $n$ . Výstupné veličiny  $v$  v závislosti na prítlaku sú schematicky znázornené na obr. 1.

Podiel okamžitej rýchlosti postupu razenia  $v$  a mernej objemovej práce rozpojovania vyjadruje okamžitú rýchlosť vŕtania, ktorá pripadá na jednotku mernej objemovej práce rozpojovania, ktorú označujeme symbolom  $\varphi$ . Táto veličina je priamo úmerná mernej rýchlosti vŕtania. Merná rýchlosť vŕtania vyjadruje okamžitú rýchlosť vŕtania pripadajúcu na jednotku intenzity opotrebovania nástroja.

$$\varphi = \frac{v}{w}, \quad \left[ \frac{m \cdot s^{-1}}{J \cdot m^{-3}} \right] \quad (3)$$

$$w_{mer} = \frac{v}{I_0} = \frac{v}{k \cdot w}, \quad \left[ \frac{m \cdot s^{-1}}{g \cdot m^{-1}} \right] \quad (4)$$

Obr.1. Funkcia okamžitej rýchlosti postupu razenia  $v$ , mernej energie rozpojovania  $w$  a podielu týchto veličín  $\varphi$  na prítlaku pri rôznych napätových stavoch  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  a  $\sigma_3$ .

Abb.1. Die Funktion der momentane Vortriebgeschwindigkeit -  $v$ , spezifische Energie -  $w$  und der Anteil der Größen -  $\varphi$  auf dem Vorschubkraft beim  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  a  $\sigma_3$ .

### Optimalizácia procesu rozpojovania

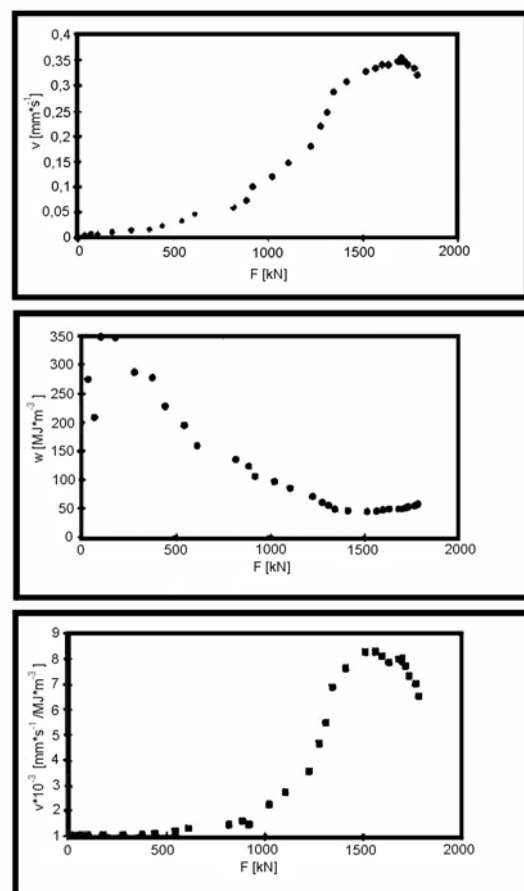
Na základe uvedeného možno proces rozpojovania pri vŕtaní riadiť z hľadiska optimalizácie procesu rozpojovania podľa nižšie uvedených kritérií:

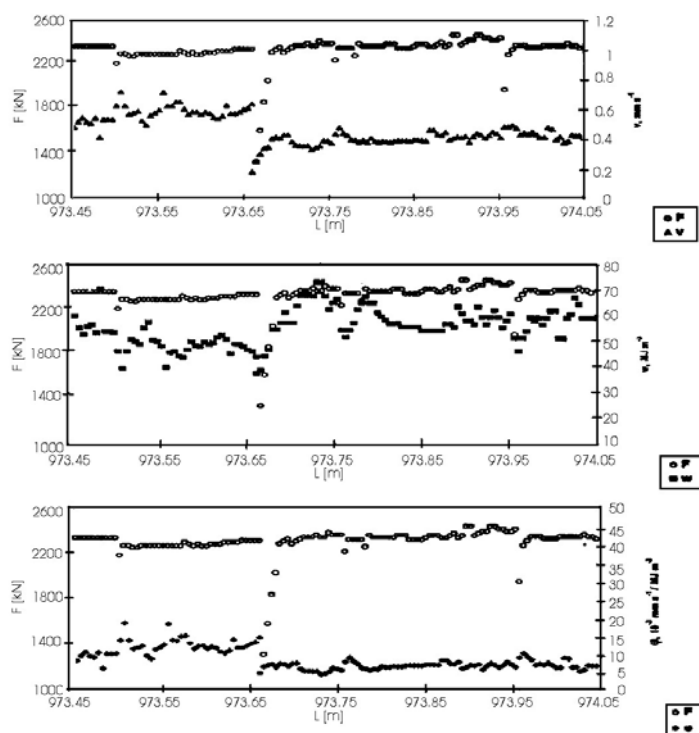
1. Pre málo pevné a málo abrazívne horniny maximálna okamžitá rýchlosť postupu razenia  $v_{max}$ .
2. Pre vysoko pevné, silne abrazívne horniny minimálna hodnota mernej energie rozpojovania  $w_{min}$ , ako kritérium minimálnej intenzity opotrebovania nástroja.
3. Pre stredne pevné a stredne abrazívne horniny maximálna hodnota podielu týchto veličín  $\varphi_{max}$ .

Pri monitorovaní uvedených veličín pri plnoprofilovom razení boli získané izomorfné priebehy okamžitej rýchlosti razenia  $v$ , mernej energie vŕtania  $w$  a podielu týchto dvoch veličín  $\varphi$  (obr.2).

Obr.2. Priebehy okamžitej rýchlosti vŕtania, mernej energie rozpojovania  $w$ , podielu týchto veličín  $\varphi$  získané na plnoprofilovom raziacom stroji RS 24 - 27 H, staničenie: 889,41 m, hornina: rulovo - amfibolitový komplex.

Abb.2. Die Verläufe der momentane Vortriebgeschwindigkeit -  $v$ , spezifische Energie der Zerstörung -  $w$  und der Anteil der Größen -  $\varphi$  auf der Vollschnittmaschine RS 24-27 H gewonnen, Stationieren 889,41 m, Gneis-Hornblendesgesteinkomplex.





Obr.3. Priebiehy vstupných a výstupných veličín  $F$ ,  $v$ ,  $w$  a  $\phi$  v závislosti od dĺžky razenia získané pri monitorovaní na plnoprofilovom raziacom stroji RS 24 – 27 H, hornina: pieskovec, siderit

Abb.3. Die Verläufe der Ein- und Ausganggröße  $F$ ,  $v$ ,  $w$  und  $\phi$  in Abhängigkeit von der Länge des Vortriebs beim Monitorierung der Vollschnittmaschine RS 24-27 H gewonnen, Sandstein, Spateisenstein.

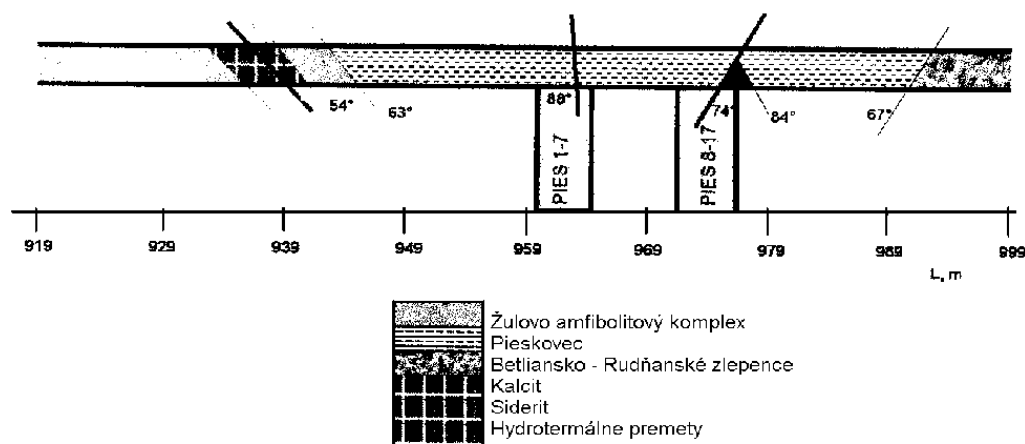
Pretože prítlak výrazne ovplyvňuje výstupné veličiny, bolo potrebné zistiť, ako sa menia výstupné veličiny pri konštantnom prítlaku v závislosti na meniacich sa vlastnostiach horninového masívu. Preto sme na základe z veľkého množstva monitorovaných údajov, kde riadič stroja sám volil prítlak na hlavu raziaceho stroja, vybrali taký úsek, kde bola hodnota prítlaku kvázi konštantná. Uvedené výstupné veličiny v závislosti od staničenia sú znázornené na obr.3.

Na obrázku 4 sú znázornené geologické pasporty razného diela. Pri staničení 973,65 došlo k výraznému zníženiu okamžitej rýchlosti postupu razenia, k zvýšeniu mernej energie a k zníženiu podielu týchto dvoch veličín. Stroj prechádzal z menej pevnej do pevnejšej horniny. Z pasportu uvedeného na obrázku možno konštatovať, že to bol prechod zo žulovo-amfibolitového komplexu do sideritovej výplne.

Pri monitorovaní výstupných veličín komínovacou súpravou Besspadrill sa na rozdiel od plnoprofilového raziaceho stroja RS 24 - 27 tieto veličiny výrazne menili napriek tomu, že obsluha stroja prítlak neustále znižovala (obr. 6). Teda neustálym znižovaním prítlaku dochádzalo k zvyšovaniu okamžitej rýchlosti postupu razenia  $v$ , k znižovaniu mernej

energie  $w$  a následne k zvyšovaniu podielu mernej rýchlosti postupu razenia.

Ako vyplýva z priebehov veličín uvedených na obr. 1, k takýmto javom nemohlo dochádzať vplyvom znižovania prítlaku  $F$ . Museli sa tu výrazne prejavovať vlastnosti horninového masívu.

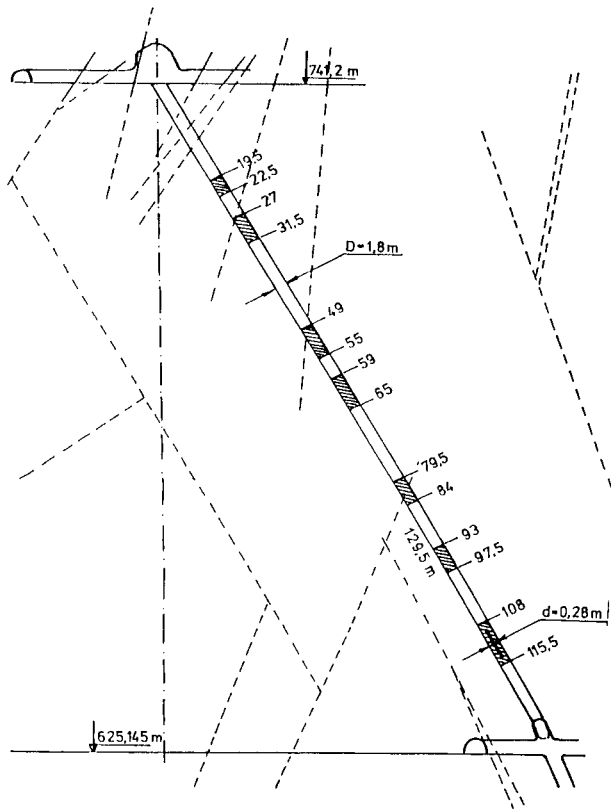


Obr.4. Obzor v Rudňanoch razný plnoprofilovým raziacim strojom RS 24 – 27 H.

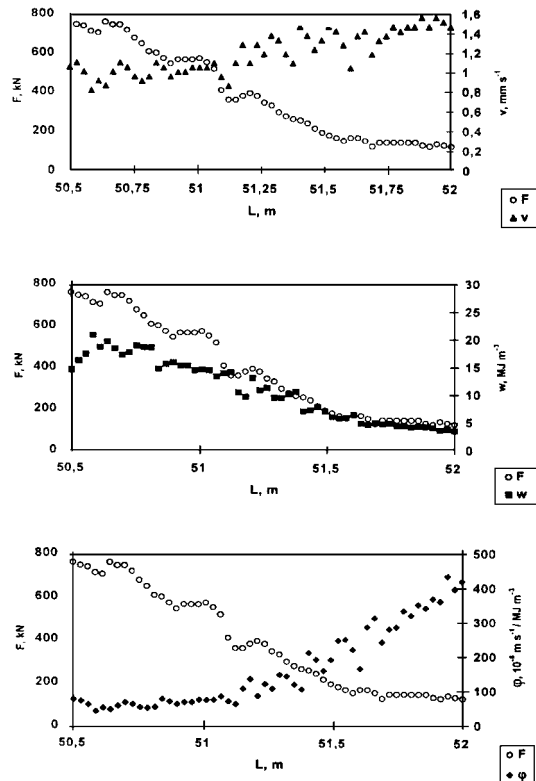
Abb.4. Der Horizont in Rudňany mit der Vollschnittmaschine RS 24-27 H vortriebende.

### Pevnostná charakteristika masívu

Pre určenie pevnostných charakteristík masívu nestačí iba podmienka konštantného prítlaku, pretože tangenciálne sily, ktorými pôsobí disk na horninu, sú závislé na fyzikálno – mechanických vlastnostiach masívu, ktoré sa menia vo veľmi krátkych úsekoch razenia.



Obr.5. Komin vyrazený kominovacou súpravou Bespadrill P1.  
Abb.5. Das Rolloch vortreibene mit Anlage Bespadrill P1.



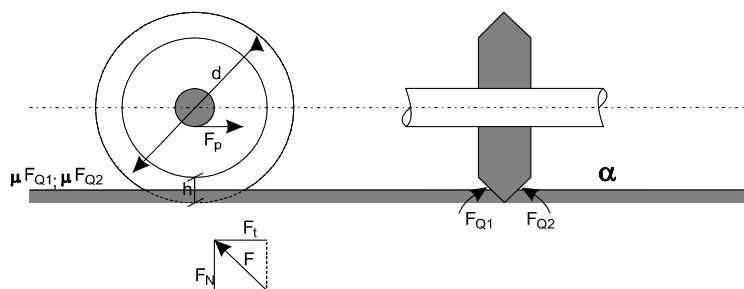
Obr.6. Priebehy vstupných a výstupných veličín okamžitej rýchlosti vŕtania v, mernej energie rozpojovania w a podielu týchto veličín  $\varphi$  v závislosti od dĺžky razenia.  
Abb.6. Die Verläufe der Ein- und Ausganggröße F, v, w und  $\varphi$  in Abhängigkeit von der Länge.

Aby sme mohli monitorované údaje použiť v budúcnosti na určenie pevnostnej charakteristiky masívu, je potrebné definovať spôsob namáhania horniny valivými dlátami a toto namáhanie brať ako konvenčný, dohovorový spôsob namáhania, tak ako je to u iných konvenčných druhov pevnosti (ako napr. pevnosť v jednoosom tlaku, v ťahu, v šmyku, vlačná pevnosť a pod.).

Na valivý disk (obr. 7) pôsobia pri zanedbaní valovej trecej sily dláta, trenie v ložiskách disku, bočné sily  $F_{Q1}$ ,  $F_{Q2}$ , normálová a tangenciálna sila (Krúpa, 1998). Tangenciálna sila pri kvázi homogénnej hornine na čelbe vrtu je rovnaká pre každý disk a dá sa určiť z momentovej rovnice:

$$F_t r_1 + F_t r_2 + \dots + F_t r_i - M_k = 0, [N \cdot m] \quad (5)$$

- $F_n$  – normálová sila [N]
- $F_t$  – tangenciálna sila [N]
- $F_{Q1}$ ,  $F_{Q2}$  – bočné sily [N]

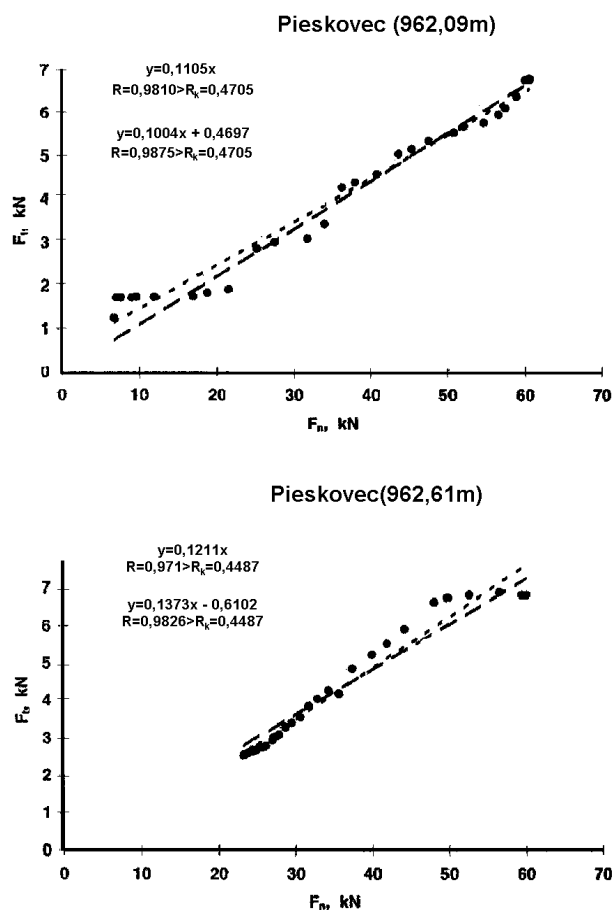


Obr.7. Rozloženie síl na valivom disku.  
Abb.7. Kraft – und Raumverhältnisse unter der Schrämscheibe.

$$\text{resp. } F_t \sum_{i=1}^n r_i - M_k = 0, \quad (6)$$

$$\text{takže } F_t = \frac{M_k}{\sum_{i=1}^n r_i}, \quad [\text{N}] \quad (7)$$

kde:  $F_t$  [N] - tangenciálna sila,  
 $M_k$  [N. m] - krútiaci moment,  
 $r_i$  [m] sú polomery dráh jednotlivých diskov,  $n$  = počet diskov.



Obr.8. Lineárny priebeh monitorovaných údajov v pieskovci.  
 Abb.8. Der lineare Verlauf der gemessene Angaben im Sandstein.

nych úsekoch rôznych lineárnych závislostí, získaných v rôznorodých horninách, môžeme dosiahnuť taký stav, že bude platiť:

$$\frac{dF_t}{dF_n} = K \quad (11)$$

K - konštanta.

Tento predpoklad musí platiť, ak budeme uvažovať všeobecne lineárne závislosti, posunuté od počiatku súradnicovej osi.

Krútiaci moment sa dá vypočítať z monitorovaného činného výkonu

$$M_k = \frac{N}{2\pi s}, \quad [\text{N. m}] \quad (8)$$

s sú otáčky hlavy raziaceho stroja.

Normálová sila je daná podielom osového prtlaku na hlavu raziaceho stroja a počtu diskov:

$$F_n = \frac{F}{n}, \quad [\text{N}] \quad (9)$$

Vektorový súčet normálovej a tangenciálnej sily vyjadríme vzťahom:

$$\vec{F}_t + \vec{F}_n = \vec{F}_r, \quad (10)$$

ktorý predstavuje výslednú rozpojovaciu silu, pôsobiacu na disku, pri zanedbaní bočných síl, kde  $N$  [MJ] je činný odoberaný výkon.

Definujeme, že dohovorený konvenčný spôsob namáhania horniny valivým diskom vzniká pri konštantnom uhle  $\alpha$ . Pri kvázi konštantnej hornine je tangenciálna sila lineárne úmerná normálovej sile.

Tento predpoklad je možné dokumentovať z monitorovaných údajov uvedených, na obr. 8. Táto závislosť je však len pri kvázi konštantných vlastnostiach horninového masívu. Uvedený lineárny priebeh sme získali na relatívne veľmi krátkom úseku razeneho diela približne 0,01 m. To znamená, že pri meniacich sa vlastnostiach horninového masívu smernica tejto závislosti sa bude tiež meniť.

Môžeme to dokumentovať ďalšou lineárnou závislosťou, získanou z monitorovaných údajov v tej istej hornine (pieskovec) na 0,01 m dlhom úseku razenia, vzdialenú od prechádzajúceho monitorovaného úseku o 0,0052 m.

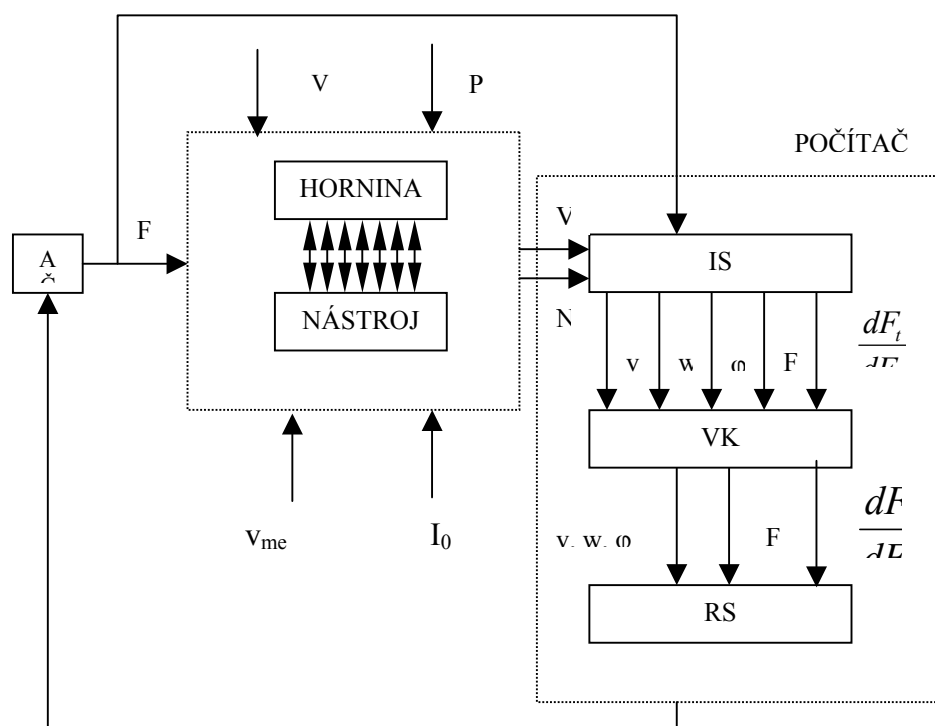
Možno však predpokladať, že na diferenciál-

## Záver

Pri optimalizácii procesu rozpojovania je proces riadený pomocou prítlaku pri troch možných zvolených extrémnych hodnotách výstupných veličín, t.j. buď pri maximálnej okamžitej rýchlosti postupu razenia  $v$ , alebo minimálnej hodnote mernej objemovej energie rozpojovania  $w$ , resp. pri maximálnej hodnote podielu týchto veličín  $v/w = \varphi$ .

V zmysle Gilbertových definícií okamžitú rýchlosť postupu razenia možno pozorovať aj riadiť, intenzitu opotrebovania nástroja možno riadiť a nemožno pozorovať, mernú rýchlosť vrtania možno tiež riadiť a nemožno pozorovať (Mikloš a Hutla, 1986). Vyplýva to z rovníc (2), (3) a (4).

Základná bloková schéma pre takéto spôsoby riadenia a pozorovania je znázornená na obr. 9.



Obr.9. Základná bloková schéma pre riadenie a pozorovanie.  
Abb.9. Vortriebsprozessgrößen.

Vysvetlivky k obrázku: IS – informačná sústava,  
VK – výber kritérií,  
RS – riadiaca sústava,  
AČ – akčný člen.

Schéma na obrázku 9 neuvažuje s premenlivým vstupom otáčok.

V prípade monitorovania pevnosti horninového masívu je riadený prítlak z hľadiska splnenia podmienky  $dF_t / dF_n = K$  a je pozorovaná a registrovaná veličina  $w$ , ktorá fyzikálne najhodnovernejšie charakterizuje pevnosť masívu.

Zlúčenie týchto dvoch riadiacich prístupov, teda optimalizácia procesu rozpojovania a monitorovanie pevnosti masívu je jednou z dôležitých úloh vedeckého výskumu v danej oblasti v budúcnosti.

## Literatúra

- SEKULA, F., KRÚPA, V., BEJDA, J., KREPELKA, F.: Einige charakteristiken des Gesteinmassivs, die beim mechanisierten Treiben mit Vollschnittmaschinen gewonnen wurden. 7 Internationaler Kongress über Felsmechanik, Aachen, Deutschland, 1991, p. 1015 - 1018.  
KRÚPA, V.: Určovanie vlastností hornín z výsledkov monitorovania razenia, Spravodaj 4-5, 1998, s. 258- 261.  
MIKLOŠ, J., HUTLA, V.: Teória automatického riadenia, 1986.