

## Optimalizácia režimových parametrov pri rozpojovaní hornín

František Krepelka<sup>1</sup>, Ludmila Tréfová a Milan Labaš

### Optimizing of regime parameters in the rock disintegration

The contribution describes a concept of the evaluation of rock disintegration process using the energetic theory and an optimization of rock disintegration process depending on input parameters, i.e. the thrust force and the torque. The interaction of the tool and the rock causes deformations, mechanical oscillations, etc. The Department of destructional and constructional geotechnics of the Institute of Geotechnics SAS investigates the vibrations from both the quantitative and qualitative point of view. The evaluation of disintegration processes improves the energy distribution and the efficiency of the mechanical rock disintegration. The paper evaluates the initial measurements at the rock disintegration by drilling. The contribution is a form of a profile and joins the optimization of rock disintegration based on input parameters with the optimization of a width of the drilling tool segment. The vibration signal as a carrier of the information on the process enables to improve the optimization with further parameters of rock disintegration, such as the rock type, tool and the tool wear.

**Keywords:** regime parameters, drilling tool, vibrations, signal

### Úvod

Takmer celá výskumná činnosť prof. Ing. Felixu Sekulu, DrSc, člena korešpondenta Ruskej akadémie vied, je spojená s rozpojovaním hornín. Jeho vedecká činnosť začala kandidátskou dizertačnou prácou o energetických meraniach na kyvadlovom dispergátore. Nadväzne na kandidátsku nasledovala doktorská dizertačná práca, v ktorej bola teória rozpojovania hornín popísaná diferenciálnou rovnicou druhého rádu. Témou rozpojovania hornín pokračovali neskôr aj práce jeho doktorandov. Oddelenie rozpojovania hornín pod vedením prof. Sekulu vytvorilo vo výskume rozpojovania hornín kvantitatívne aj kvalitatívne kritériá pre hodnotenie tohto procesu. Teóriu rozpojovania hornín oddelenie tvorilo na základe experimentov, v ktorých boli sledované vzťahy medzi vstupnými a výstupnými veličinami u malopriemerového vrtania a plnopriemerových raziacich strojov.

Ak sa vrátíme do histórie, koncom šesťdesiatych a začiatkom sedemdesiatych rokov minulého storočia, boli známe hypotézy energetických teóriách, ktoré sa začali experimentálne overovať. Jedným z účastníkov experimentálneho overovania bol v tom čase aj Ústav vlastností hornín SAV. Oddelenie rozpojovania hornín v tomto období vykonávalo experimenty na dvoch zariadeniach pre rozpojovanie hornín, a to na kalorimetrickom dispergátore a malopriemerovom vrtacom stande. Na kalorimetrickom dispergátore bola overovaná energetická teória rozpojovania hornín vrtaním a mletím. Na malopriemerovom vrtacom stande boli overované priebehy rýchlosti vrtania, špecifickej práce rozpojovania a podielu týchto výstupných veličín procesu rozpojovania hornín. Obidve experimentálne zariadenia mali tenzometrické snímače na meranie prítlaku a krútiaceho momentu, snímač na meranie otáčok a snímače na meranie rýchlosti vrtania. Uvedené zariadenia predstavovali v rozpojovaní hornín zariadenia, ktoré získavali prostredníctvom analógových signálov merali okamžité hodnoty vstupných a výstupných veličín a v danom čase predstavovali vrchol snímacej techniky.

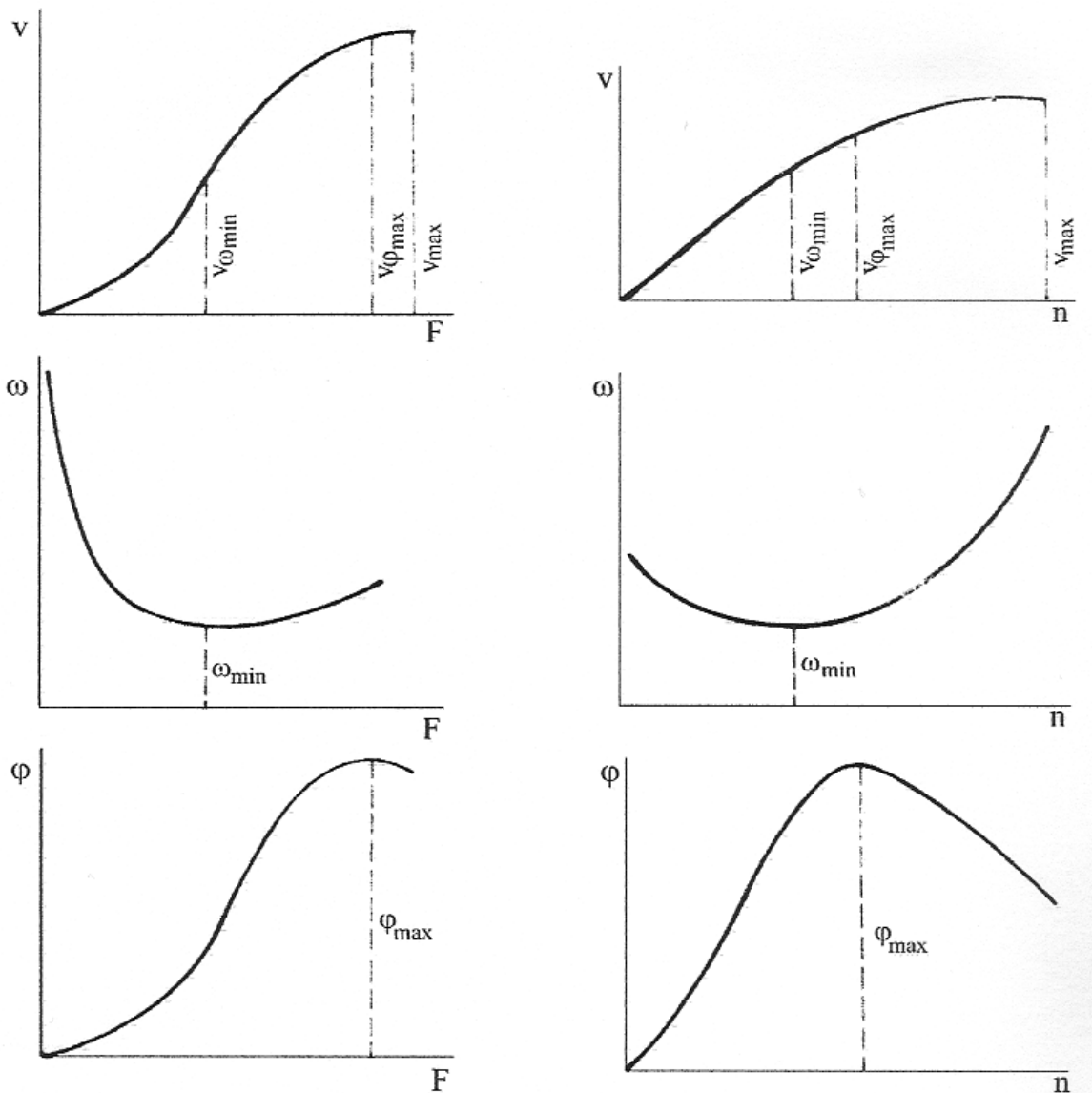
Hodnotenie procesu rozpojovania hornín pomocou energetickej teórie umožňovalo hodnotiť proces rozpojovania z hľadiska:

1. maximálnej rýchlosti vrtania,
2. minimálnej špecifickej práce rozpojovania,
3. maximálnej hodnoty veličiny  $\varphi$ , ktorá je podielom rýchlosti vrtania a špecifickej práce rozpojovania.

Pre rozpojovanie hornín vznikla ucelená teória hodnotenia procesu vrtania hornín rotačným vrtaním. Rýchlosť vrtania bola hodnotená v závislosti od obidvoch vstupných veličín, t.j. prítlaku a otáčok. Meranie špecifickej práce rozpojovania umožnilo hodnotiť energeticko-transformačné javy pri interakcii nástroja a horniny. Rotačným dispergátorom bola zameraná energia, ktorá sa pri interakcii nástroja s horninou menila na teplo. Pri rôznych režimoch merania špecifickej práce rozpojovania v povrchovo-oterovej oblasti, v oblasti objemového vyštepovania a v oblasti sekundárneho rozpojovania bolo možné nepriamo hodnotiť intenzitu opotrebenia nástroja (Bejda a kol., 1982). Závety hodnotenia procesu vrtania hornín pri rotačnom vrtaní možno zhrnúť do závislosti výstupných veličín od prítlaku a otáčok (Krúpa a kol., 1986) (obr. 1).

<sup>1</sup> Ing. František Krepelka, PhD., Ing. Milan Labaš, Ing. Ludmila Tréfová, Ústav Geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53 Košice (Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 17. 3. 2008)

Pomocou obr. 1. sa dá proces rozpojovania hornín hodnotiť kvantitatívnymi a kvalitatívnymi ukazovateľmi výstupných veličín v závislosti od vstupných veličín (Krúpa a kol., 1993).



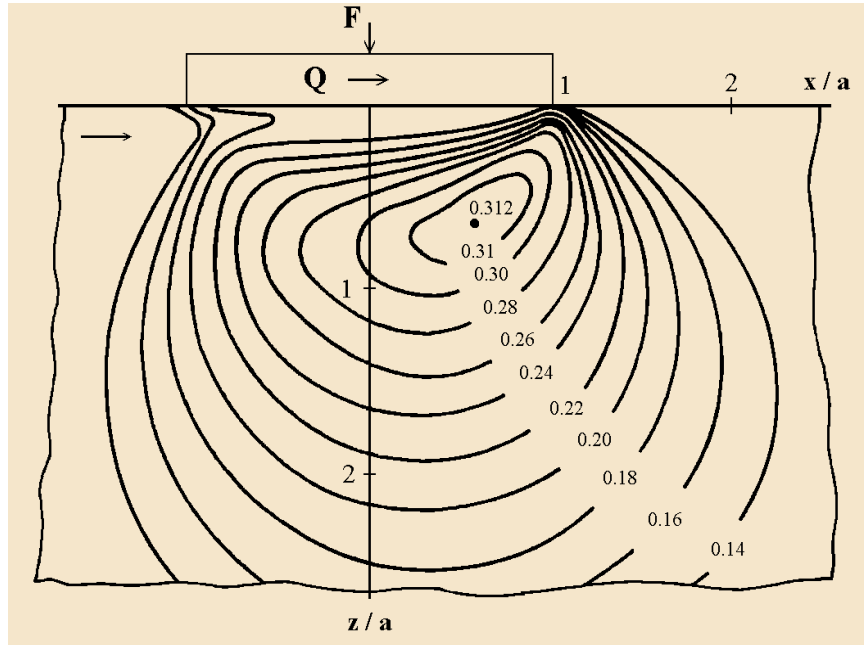
Obr. 1. Závislosť výstupných veličín: rýchlosť vrtania  $v$ , špecifická práca rozpojovania  $w$  a podiel týchto veličín od prítlaku a otáčok.  
Fig. 1. Dependence of the output parameters: the drilling rate, specific disintegration energy, and the ratio of parameters depending on the thrust and the torque.

Špecifická práca rozpojovania  $w$  pri rozpojovaní hornín rotačným vrtaním je súčtom dvoch zložiek, ktoré v závislosti od prítlaku a od otáčok v tvare :

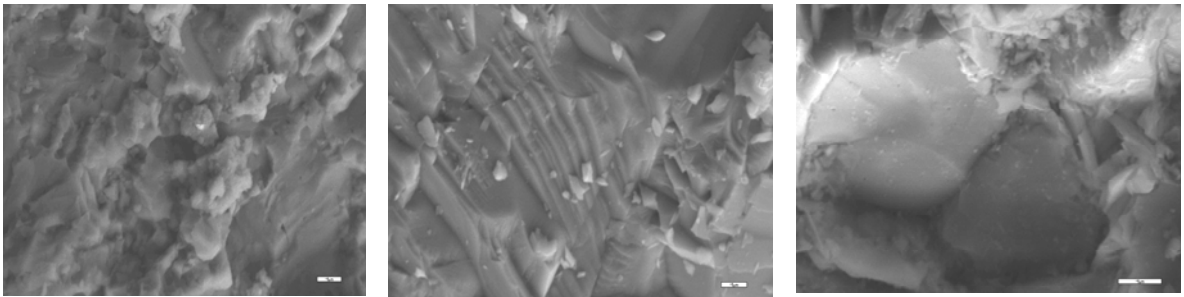
$$w = \frac{F \cdot s}{S_v} + \frac{2\pi n M_k}{S_v} \quad [MJm^{-3}] \quad (1)$$

Prvá zložka predstavuje 1/100 z celkovej špecifickej práce rozpojovania a z toho dôvodu sa pre technické účely zanedbáva. Na rozpojovaní hornín sa teda rozhodujúcou mierou podieľa krútiaci moment. Pri skúmaní rozložení napätia v hornine pôsobením rozpojovacieho nástroja na horninu sa v odbornej literatúre a priori uvažuje len s prítlakom a krútiaci moment sa zanedbáva. V súčasnosti sa oddelenie konštrukčnej a deštrukčnej geotechniky venuje tomuto problému a modeluje rozloženie napätia v hornine metódou konečných prvkov v spolupráci z doc. Ing. Zuzanou Chlebovou, CSc. z Katedry mechatroniky a aplikovanej mechaniky Strojníckej fakulty TU v Košiciach z nameraných hodnôt prítlaku a krútiaceho momentu, ktoré boli získané z meraní v experimentoch pri rozpojovaní hornín na stánde. Cieľom tohto výskumu je prehodnotenie doterajších názorov na mechanizmus rozpojovania hornín pri rotačnom vrtaní. Doterajšie výsledky naznačujú, že k oddeľovaniu častíc horniny pod nástrojom dochádza vplyvom šmykových napätí. Na obr. 2 je zobrazený segment rozpojovacieho nástroja, na ktorý súčasne pôsobí prítlak a krútiaci moment.

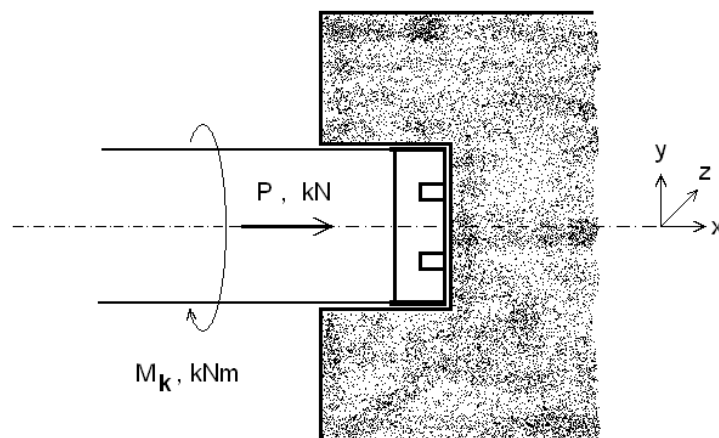
Na nábehovej strane segmentu dochádza ku koncentrácii napätia, ktoré spôsobuje rozpojovanie hornín. Vhodnou kombináciou šírky segmentu a kanálika rozpojovacieho nástroja možno efektívne meniť veľkosť týchto napätí. Pre posúdenie lomovej plochy oddeľovaných častíc od horninového masívu sme skúmali morfológiu lomu pomocou elektrónového mikroskopu. V horninách nedochádza k lomovým plochám, ktoré sú typické pre kovové materiály. Morfológia lomových plôch pri rozpojovaní vápenca, pieskovca a andezitu je zobrazená na obr. 3.



Obr. 2. Rozloženie napätia pod segmentom rozpojovacieho nástroje pri spolupôsobení prítlaku a krútiaceho momentu.  
Fig. 2. Stress distribution under the disintegration tool segment at the cooperation of both thrust and torque.



Obr. 3. Lomové plochy úlomkov vápenca, pieskovca a andezitu po rozpojovaní impregnovaným diamantovým nástrojom.  
Fig. 3. Fracture surfaces of limestone, sandstone and andesite after disintegration by the impregnated diamond tool.



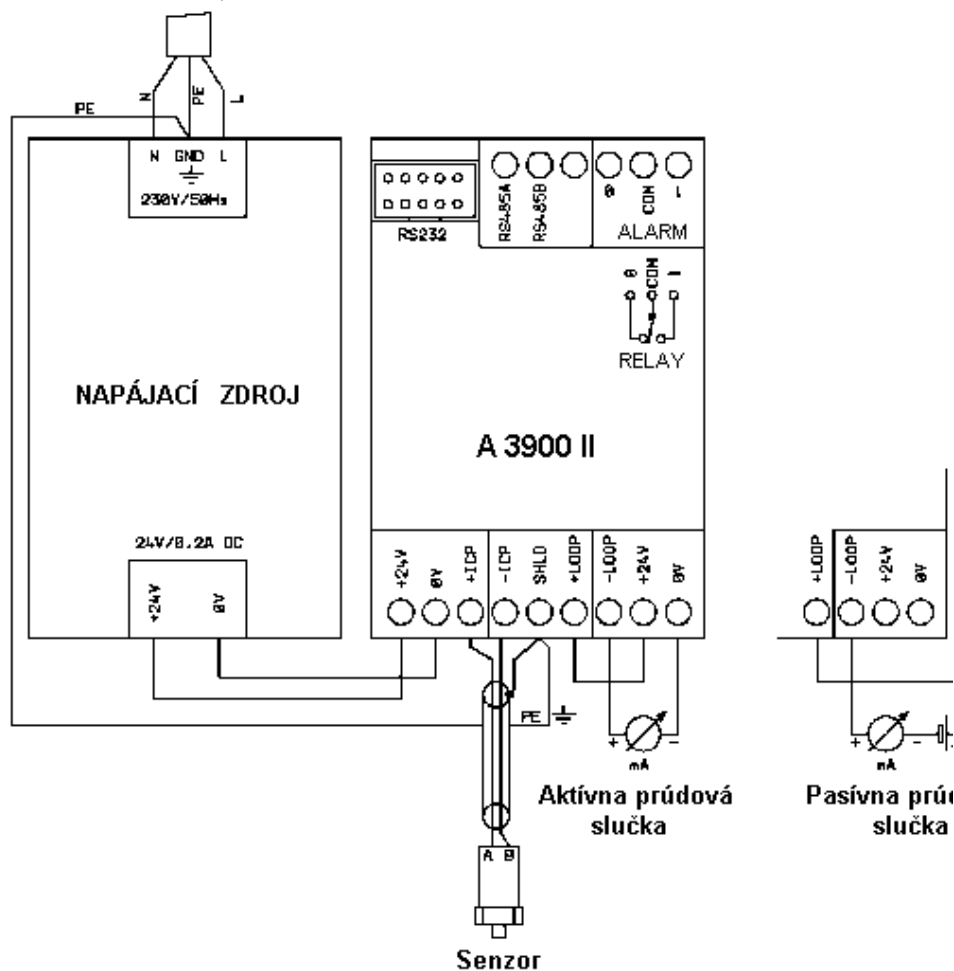
Obr. 4. Interakcia rozpojovacieho nástroja s horninou.  
Fig. 4. Interaction of the disintegration tool and the rock.

Pri interakcii nástroja s horninou, obr. 4, dochádza k vzniku tepla, deformácii nástroja a horniny, tvorbe nových povrchov nástroja a horniny, opotrebovaniu nástroja a „opotrebovaniu horniny“, čo je želaný efekt a hovoríme mu v tomto prípade vŕtanie, a v neposlednom rade dochádza k mechanickému kmitaniu – vibráciám a ich akustickému prejavu – hluku. V prvom období sme sa venovali skúmaniu vzniku nových povrchov a meraniu tepla, neskôr sme skúmali akustické prejavy (Krepelka a kol., 2002) a v poslednom čase sa venujeme meraniu a vyhodnocovaniu vibrácií.

Na základe štúdia akustického signálu sme dospeli k záveru, že akustický signál je nositeľom informácie. V každom akustickom spektre je zakódovaná frekvencia rotácie vretena nástroja. Vo frekvenčnej oblasti sa nachádzajú informácie o vlastnosti rozpojovanej horniny a vlastnostiach rozpojovacieho nástroja (Leššo, 2005). Uvedené skutočnosti je možné študovať v časovej alebo frekvenčnej oblasti spektra (Chlebová a kol., 2005). Vyhodnocovanie akustického signálu je veľmi obtiažne, pretože v priestore merania dochádza k interferencii a odrazom hluku. Samotný akustický signál má veľkú zložku šumu. Z uvedeného dôvodu sme prešli na meranie mechanických kmitov, ktoré sú zdrojom akustického signálu.

### Meranie vibrácií pri vŕtaní

Proces rozpojovania hornín vŕtaním a závislosti vstupných a výstupných veličín procesu rozpojovania hornín sú predmetom štúdia prostredníctvom experimentov vykonávaných na vŕtacom stande. Vŕtací stand na Ústave geotechniky umožňuje štúdium procesu rozpojovania diamantovými impregnovanými a vsadzovanými nástrojmi do priemeru 58 mm. Vŕtací stand pozostáva z ocelevej konštrukcie, hnacieho asynchrónneho elektromotora s výkonom 22 kW, vreteníka s jadrovkou a vŕtacieho nástroja. Vstupné veličiny, t.j. otáčky a prítlak vŕtacieho standu sa dajú plynule regulovať v intervale  $0 - 30 \text{ s}^{-1}$  a  $0 - 20\,000 \text{ N}$ . Mechanické kmity a vibrácie sú snímané piezoelektrickým snímačom zrýchlenia AC102-1A firmy CTC, ktorý sníma vibrácie v rozsahu  $0,5 - 15\,000 \text{ Hz}$ .



Obr. 5. Schéma meracej jednotky A3900, snímača AC 102-1A a prúdová slučka meraného parametra.

Fig. 5. Scheme of the measuring unit A3900, the transducer AC 102-1A and the current loop of the measured parameter.

Rezonančná frekvencia snímača je 23 000 Hz. Citlivosť vibračných snímačov bola kalibrovaná vo firme ADASH, s.r.o. a v smere osi vŕtania je  $98,5 \text{ mV.g}^{-1}$ , v horizontálnej rovine kolmej na smer vŕtania je  $97,6 \text{ mV.g}^{-1}$  a vo vertikálnej rovine kolmej na os vŕtania je  $95,3 \text{ mV.g}^{-1}$ . Vibrácie snímame v troch navzájom kolmých smeroch.

Snímače sú mechanicky uchytené na rám vŕtacieho standu. Zaznamenané signály vibrácií zo snímačov sa ďalej spracúvajú v on – line monitorovacom systéme vibrácií ADASH 3900 II (ďalej A3900 II). Jednotka A3900 II meria vibrácie pomocou snímačov zrýchlenia. Výstupná prúdová slučka A3900 II slúži pre výstup nameranej hodnoty vibrácií. Výstup prúdovej slučky je vo vnútri jednotky galvanicky oddelený od všetkých jej meracích obvodov. Rozsah výstupného prúdu slučky je 4 – 20 mA. Rozsah merania sa dá voliť. Hodnoty namerané medzi minimálnou a maximálnou hodnotou sú lineárne prepočítavané. Schéma zapojenia snímačov s jednotkou A3900 II je na obr. 5.

Jednotka A3900 II je pripojená cez paralelný port k PC, prostredníctvom ktorého sú vibrácie snímané a ukladané pomocou PC karty.

Zariadenie pre meranie vibrácií pozostáva z nasledujúcich segmentov :

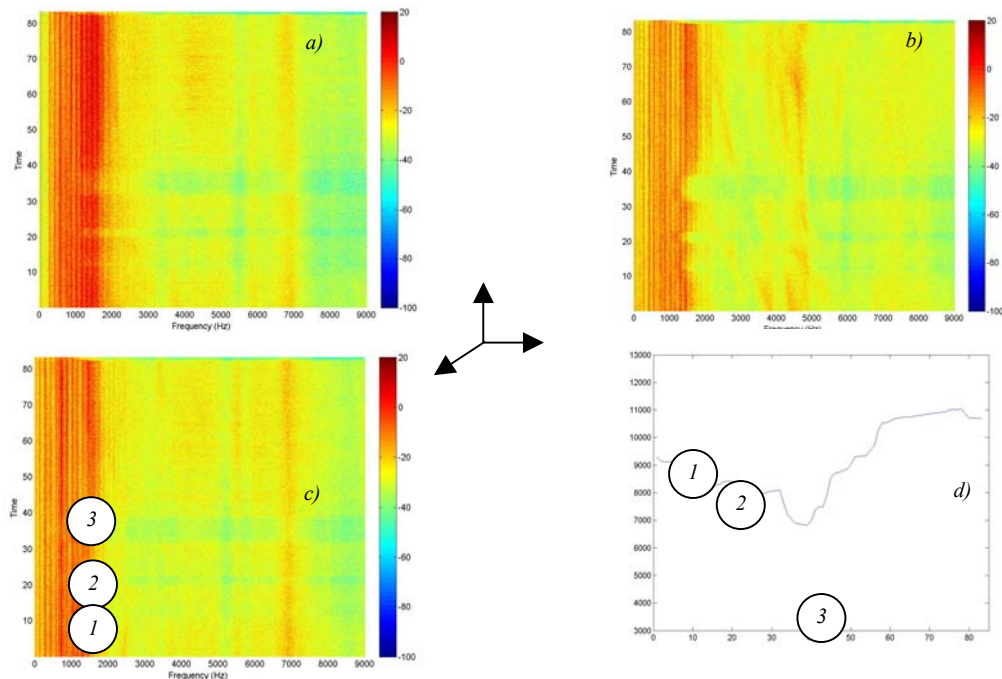
- piezoelektrický snímač zrýchlenia AC102-1A,
- on-line monitorovací systém,
- počítač s PC kartou ,
- počítač s riadiacou doskou DS 1102.

Vibrácie pri vŕtaní boli merané a zaznamenané pri konštantných otáčkach cca  $25 \text{ s}^{-1}$  a pri postupne sa meniacich hodnotách prítlaku 2 500, 7 500, 10 500 a 12 500 N. Pri experimentoch bola používaná 8-kanáliková diamantová impregnovaná korunka s priemerom 46 mm. Náhodné súbory zrýchlenia vynútených vibrácií boli namerané pri vyššie uvedených parametroch pri rozpojovaní andezitu.

### Vyhodnotenie vibračných signálov

Číslkové spracovanie vibračných signálov je realizované v MATLAB, ktorý svojimi toolboxmi (predovšetkým Signal Processing Toolbox) umožňuje komfortné vyhodnocovanie a zobrazovanie signálu v časovej (Krepelka a kol. 2006) aj frekvenčnej oblasti.

Obr. 6 ilustruje spektrogramy vibračného signálu pri vŕtaní andezitu v troch osiach x,y,z a k nim prislúchajúci prítlak. Otáčky boli udržiavané na otáčkovej hladine  $1500 \text{ s}^{-1}$ . Z priebehu spektrier rozvinutých v čase vidíme poklesy energie signálu prejavujúce sa od vysokých frekvencií k nižším. Tieto zmeny spektra sú pozorovateľné vo všetkých troch osiach meraných vibrácií. Najvýraznejší pokles je v čase medzi 30-40 sekundou, čo približne časovo zodpovedá aj najvýraznejšiemu zníženiu prítlaku (obr. 6d).

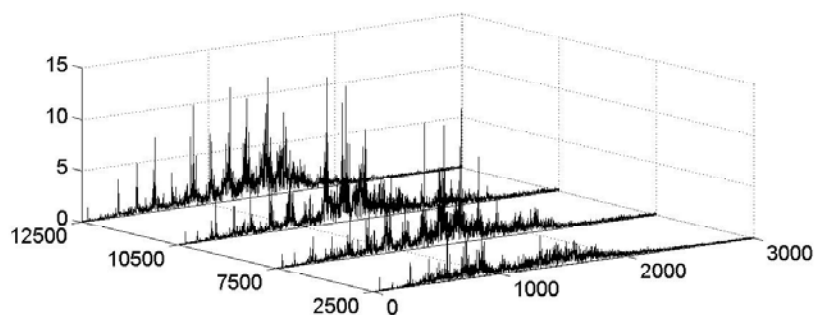


Obr. 6. Spektrogramy vibračného signálu: a) v smere osi x, b) v smere osi y, c) v smere osi z, d) prítlak dosiahnutý pri uvedenom meraní vibrácií.

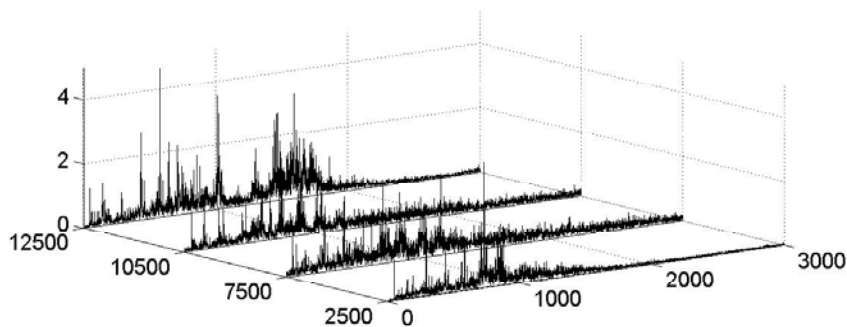
Fig. 6. Spectrograms of the vibration signal a) along the x-axis, b) the y-axis, c) the z-axis course, d) the thrust reached at the given vibration measurement.

Z hľadiska zmien v spektre je zaujímavé spektrum v smere osi y, kde dochádza v pásme 2000-5000 Hz k postupnému preskupeniu dominantných spektrálnych pikov do susedných frekvencií. Tieto zmeny sú rýchle a opakujú sa, preto sú pravdepodobne výsledkom nehomogenity horninového materiálu.

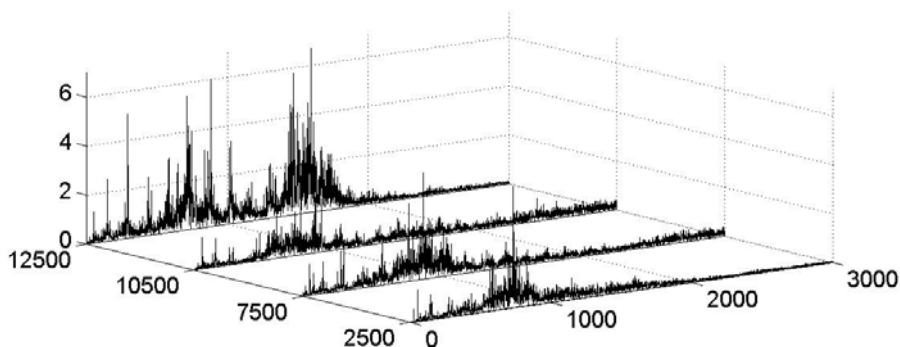
Z priebehov spektrogramov je zrejmé, že najvýraznejšia frekvenčná oblasť je medzi 0 - 3 000 Hz, čo je oblasť nízkych frekvencií. Amplitúdy frekvenčných spektier zobrazených v danom rozsahu, obr. 7a, 7b, 7c, ukazujú, že k najvyššiemu zvýšeniu hodnôt amplitúdy kmitov dochádza v smere osi x. Z hľadiska sledovania spektier v závislosti od zvyšovania hladín prítlaku (2 500, 7 500, 10 500 a 12 500 N - otáčky počas merania ostávali konštantné  $1\,500\text{ s}^{-1}$ ), je zrejмый nárast amplitúd v smere všetkých troch osí. Prehľadnejšie to je viditeľné na obr. 8, kde boli zlúčené signály s uvedenými 4 režimami do jedného a vyhodnotené ako jedno spektrum rozvíjajúce sa v čase. S rastúcim časom rastie aj prítlak. V tomto vyobrazení je zrejмый aj narastanie počtu harmonických frekvencií. Režimy 9 500 N a 12 500 N sa počtom harmonických frekvencií rovnajú, k odlišeniu dochádza vo veľkosti energie signálu na frekvenciách vyšších ako harmonické (ak spočítame plochu zastúpenia vyššími frekvenciami (1 800-9 000 Hz) dostávame pre 9 500 N = 161.23 a pre 12 500 N = 174.37).



a)

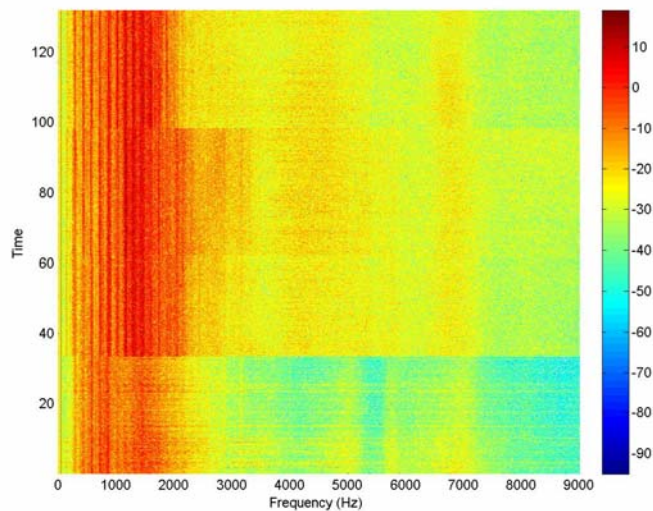


b)



c)

Obr. 7. Spektrálna výkonová hustota a) v smere osi x, b) v smere osi y, c) v smere osi z pre uvedené úrovne prítlaku.  
Fig. 7. Power spectral density along a) the x-axis, b) the y-axis, c) the z-axis for the presented thrust levels.



Obr. 8. Zlúčenie 4 predmetných spektier v smere osi  $x$  pre zachytenie narastania energie na nízkych frekvenciách.  
 Fig. 8. Merging of 4 spectra in the  $x$ -axis for capturing the increase of signal energy at low frequencies.

### Záver

Z výsledkov uvedených experimentov vyplýva, že signál vibrácií, snímaný pri rozpojovaní hornín, je nositeľom informácií o procese. Predbežne sme zistili, že informácie zakódované vo frekvenčných spektrách sú informácie o rozpojovanej hornine (Krepelka a kol., 2004), čo dokumentuje obr. 8, v intervale 0 – 1000 Hz. V intervale 1000 – 2000 Hz sú pravdepodobne informácie o prítlačku, ktoré v ďalšom výskume musíme preveriť a zdokumentovať. Z meraní vibrácií v dvoch alebo jednej osi pozitívne vieme dokumentovať, že vibračný signál je nositeľom informácií o otáčkach rozpojovacieho nástroja (Krepelka a kol., 2004). Výskumy snímania a spracovania signálu pri opracovaní kovov sústružením dávajú informáciu aj o opotrebení nástroja. Cieľený výskum na opotrebovanie sme ešte nerobili, ale chceme zistiť, či aj v signále vibrácií nájdeme interval frekvencií, ktorý bude hodnotiť opotrebovanie rozpojovacieho nástroja. Meranie vibrácií pri rozpojovaní hornín má vysokú mieru informácií o procese, čo je dôležité z hľadiska hodnotenia, optimalizácie a riadenia tohto procesu.

*Je veľmi potešujúce, že začaté dielo prof. Ing. Félixu Sekulu DrSc., je životaschopné aj po niekoľkých desaťročiach.*

*Tento príspevok je venovaný 70. výročiu narodenín prof. Sekulu a vznikol za pomoci grantovej agentúry VEGA 2/6198/26.*

### Literatúra – References

- Bejda, J., Sekula, F., Krúpa, V., Krepelka, F.: Semikvantitatívne ohodnotenie podielu energie transformovanej do indentora. *Banické listy*, 1980, mimoriadne číslo, s. 37-42.
- Chlebová, Z., Gernát, T., Krepelka, F.: Acoustical response of mechanical system by rock drilling and its frequency analysis. In *Proc. 13th Int. scientific conference CO-MAT-TECH 2005, October 2005, Trnava*, pp. 44-49.
- Krepelka, F., Chlebová, Z., Zahradníček, R.: Výstavba letísk - Štúdium mechanizmu rozpojovania pomocou vibračného frekvenčného spektra. *Acta Avionica Roč. VI, č. 10 (2004)*, s. 63-66.
- Krepelka, F., Zahradníček, R., Chlebová, Z., Ivaničová, L., Labaš, M., Miklúšová, V., Ušalová, L.: Meranie a hodnotenie vibračných meraní pri vítaní hornín. *Acta Montanistica Slovaca, Vol. 9, No. 4 (2004)*, p. 367-369.

- Krepelka, F., Labaš, M., Ušalová, Ľ., Futó, J.: Záznam a spracovanie zvukového signálu pri vŕtaní hornín. *Acta Montanistica Slovaca* 2002, roč. 7, s. 12-14.
- Krepelka, F., Labaš, M., Ivaničová L., Miklúšová, V., Tréfová, Ľ., Chlebová, Z.: Štatistické hodnotenie vibrácií pri vŕtaní hornín. *Acta Montanistica Slovaca, Roč. 11 (2006), mimoriadne číslo 2, s. 309-313.*
- Krúpa, V., Krepelka, F., Sekula, F., Krišťáková, Z.: Specific energy as information source about strength properties of rockmass using TBM. *Geotechnical Engineering of Hard Soils, Soft Rocks, eds. A. Anagnostopoulos, F. Schlosser, N. Kalteziotis & R. Frank, A. A. Balkema, Rotterdam, 1993, ISBN 90 5410 344 2, s. 1475–1477.*
- Krúpa, V., Sekula, F., Bejda, J., Krepelka, F.: Stav a perspektívy optimalizácie vŕtania. In: *Zborník konferencie Zámery a výstupy technického rozvoja v rezorte SGÚ, SGÚ Bratislava, 1986, s. 123-129.*
- Leššo, I., Flegner, P.: Riešenie algoritmu frekvenčnej lupy. In: *Mimoriadne vydanie časopisu ATD SR, október 2005, ISBN 80-232-0252-9, EAN 9788023202526.*