

Problémy interpretácie monitorovaných veličín vo vrtnej praxi

Ján Bejda¹ a Viera Miklúšová²

Interpretation problems of using monitored quantities in a drilling practise

One part of the paper points the ambiguity of the relation between the strength of the disintegrated rock and the actual penetration rate of drilling. For the overcoming this ambiguity, the rock is sorted into clusters according to the prevailing mechanism of its disintegration at drilling by model tools. In paper the generalized algorithm of costs optimization function of drilling in rockmass is also defined.

Key words: costs of drilling, minimal costs per meter, monitoring of drilling, penetration rate, specific energy.

Úvod

Výsledky monitoringu pri vrtaní tak malopriemerovom, ako i pri vrtaní na veľký profil, sú využiteľné nielen pre potreby geomechanickej karotáže, ale aj pre optimálne riadenie vrtných prác (Kostúr, 1997; Leššo et al., 1997). Geomechanický monitoring sa celkom úspešne využíva pre stanovenie litologického členenia, vymedzovanie kvázi homogénnych blokov, identifikáciu sústavy tektonických porúch. V oblasti optimalizácie vrtania zber a spracovanie dát pomocou počítačovej techniky a moderných softwarových prostriedkov umožňuje využívať optimalizačné kritériá pre riadenie procesu vrtania v systéme on-line. V prácach (Bejda et al., 1996; Sekula et al., 1992) sme poukázali

na niektoré problémy pri tvorbe softwarových prostriedkov, umožňujúcich rýchlu interpretáciu výsledkov monitoringu. Prekonanie týchto problémov by umožnilo významne skvalitniť databázu výsledkov, získaných pri zbere dát a rozšíriť použiteľnosť týchto metód pri riešení rôznych úloh tak z oblasti geomechaniky, ako aj riadenia procesu vrtných prác.

Geomechanický monitoring

Využitie výsledkov monitoringu pri vrtaní je najproblematickejšie pri ich aplikácii pre charakterizovanie geotechnických vlastností horninového prostredia

V práci (Bejda et al., 1996) sme zaviedli pojmy, ako sú redukovaná okamžitá rýchlosť vrtania a redukovaná špecifická energia rozpojovania. Tieto pojmy používame pre označenie veličín, očistených od vplyvu zmeny vrtacej schopnosti nástroja v dôsledku jeho opotrebovania a od vplyvu zmien parametrov vrtania, t.j. hlavne osového prítlaku F , otáčok nástroja n a kvality a množstva výplachovej kvapaliny Q . Táto nezávislosť sa u súčasne používaných monitorovacích sústav zaisťuje hlavne softwarovými prostriedkami.

V práci (Bejda et al., 1996) sme tiež analyzovali vzťahy medzi redukovanou špecifickou energiou rozpojovania a pevnostnými charakteristikami hornín. Ukázalo sa, že redukovaná špecifická energia ešte v súčasnosti neumožňuje priamo definovať veličinu, totožnú s nejakou pevnostnou charakteristikou prevrtávanej horniny, umožňuje však spresniť polohu rôzneho druhu nespojitostí masívu, vymedziť litologické celky, prípadne kvázi homogénne bloky, ktoré sa spravidla jeden od druhého odlišujú rôznymi hladinami redukovanej špecifickej energie rozpojovania.

Veľmi citlivo reaguje veličina špecifickej energie rozpojovania na priemer rozpojovacej hlavy pri vrtaní a razení. V tabuľke 1 sú uvedené nami zistené údaje tak v laboratórnych podmienkach, ako aj in situ (Miklúšová, 1989) pri štúdiu rozpojovania hornín.

¹ RNDr. Ján Bejda, CSc., Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53 Košice. Tel.: 095/6320582, Fax: 095/6323402

² Mgr. Viera Miklúšová, CSc., Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53 Košice. Tel.: 095/6320582, Fax: 095/6323402.

E-mail: miklusv@linux1.saske.sk

(Recenzovali: Doc.Ing. Karol Kostúr a Ing. Vítazoslav Krúpa, CSc. Revidovaná verzia doručená 22.10.1997)

Tab.1. Hodnoty špecifickej energie rozpojovania pre rôzne priemery rozpojovacej hlavy.

priemer rozpojovacej hlavy, [m]	0,046	0,05 - 0,08	0,28	2,7	3,3	5,5
špecifická energia rozpojovania, [MJm ⁻³]	200 - 10 000	100 - 1000	50 - 300	20 - 300	10 - 200	5 - 30

Predpokladáme, že výsledky uvedené v tabuľke 1 sú v súlade s tzv. rozmerovým efektom horninového masívu (Miklušová, 1989). Hodnota vŕtačnej pevnosti meraná na tej istej hornine s narastajúcou plochou zatláčaného indentora klesá. Najvyššie hodnoty vŕtačnej pevnosti sú namerané s mikrotvrdomerom a najnižšie pri skúške podľa Barona, kde plocha zatláčaného indentora je 10mm². Predpokladáme, že aj s veľkosťou rozpojovacieho nástroja odpor voči rozpojovaniu klesá tak, ako

u vŕtačných skúšok, a preto aj hodnoty špecifickej energie rozpojovania s narastaním priemeru rozpojovacieho nástroja klesajú.

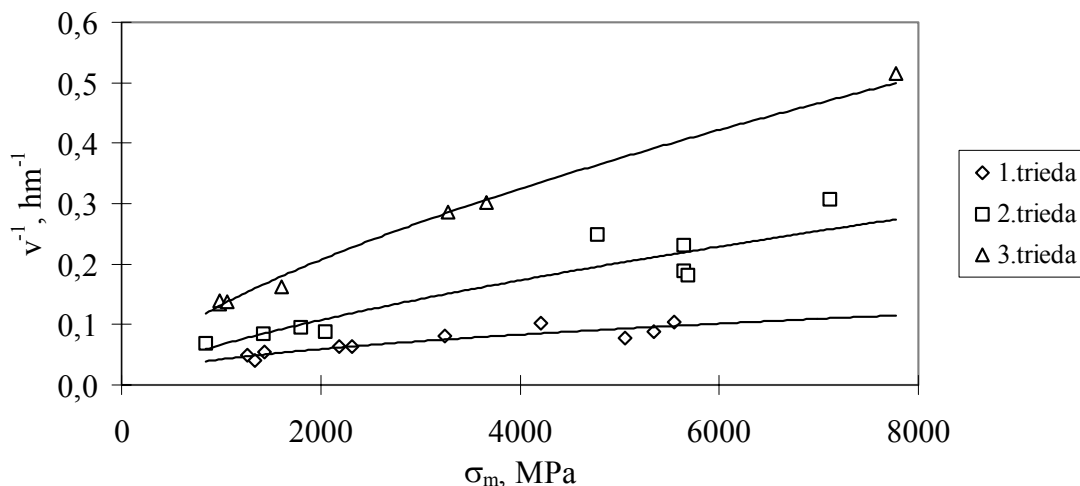
Vo vzťahu špecifickej energie rozpojovania a pevnostnej charakteristiky horniny sme zámerne bližšie nešpecifikovali pevnosť, t.j. nevychádzali sme z konkrétnej metodiky, použitej pri skúmaní tejto pevnosti.

Pri analýze veličiny redukovanej okamžitej rýchlosti vŕtania v sme sa orientovali na veličinu redukovanej vŕtačnej pevnosti σ_m , získanej pomocou štandardizovanej metódy, používanej v geologicko-prieskumnej praxi. V práci (Bejda et al., 1996) sme uviedli výsledky, ktoré sme získali pri laboratórnom standovom výskume s impregnovanými korunkami priemeru 46mm. Výsledky meraní sme spracovali pomocou vzťahu

$$v_i = A_i \sigma_m^{\alpha_i} \quad (1)$$

kde v_i - okamžitá rýchlosť vŕtania, m.h⁻¹
 A_i, α_i - koeficienty korelácie, $i = 1, 2, 3$
 σ_m - vŕtačná pevnosť, MPa.

Na obrázku 1 sú znázornené vypočítané závislosti prevrátenej hodnoty okamžitej rýchlosti vŕtania v^{-1} od vŕtačnej pevnosti σ_m a tiež experimentálne údaje.



Obr.1. Závislosť prevrátenej hodnoty okamžitej rýchlosti vŕtania od vŕtačnej pevnosti pri vŕtaní s impregnovanými nástrojmi. 1.trieda - pieskovec - Řeka, pieskovec - Čergov, pieskovec - Boskovická Bříza, andezit - Ruskov, kremeňce - Řevnice u Prahy. 2.trieda - bridlice svetlé - Zlaté Hory, bridlice tmavé - Zlaté Hory, muskovitický kvarcít rohovcovitý - Kozlín, žulový porfýr - Cínovec, porfýrit - Lítolhavy. 3.trieda - diabáz - Hnilec, migmatit - Jesenie, olivínické gabro - Staré Ransko, keratofýr - Horní Benešov.

V tabuľke 2 sú uvedené hodnoty konštánt korelačných závislostí podľa vzťahu (1) pre experimentálne výsledky, uvedené na obrázku 1.

Tab.2. Hodnoty konštánt korelačných závislostí.

trieda, $i = 1, 2, 3$	α_i	A_i	r_i
1	- 0,7	3 438,37	0,87

2	- 0,7	1 861,39	0,95
3	- 0,7	956,53	0,99

Ako vidieť z obrázku 1 a z výsledkov uvedených v tabuľke 2, postupom, pri ktorom sme použili metodiku tzv. zhlukovej analýzy, sa nám pri vzťahu veličiny prevrátenej hodnoty okamžitej rýchlosti vrtania v^{-1} podarilo získať veľmi tesnú koreláciu s veličinami vŕtačnej pevnosti, získanými pri meraniach na odobratých jadrách prevrtávaných hornín pri standovom experimente.

Optimalizácia vrtných prác

Zaoberajme sa optimalizáciou vrtania z hľadiska nákladov na bežný meter vrtu. Waller a Rowsell (Waller et al., 1994) sformulovali účelovú funkciu pre optimalizáciu nákladov v tvare

$$C = \frac{B + R T_m H}{L_i} + \frac{R}{P} \quad (2)$$

kde

C - náklady na bežný meter vrtu, USD.m⁻¹,

B - doplnujúce náklady na vrtanie, USD,

R - priame vrtné náklady prepočítané na jednotku času, USD.h⁻¹,

T_m - časové straty prepočítané na jednotku dĺžky, h.m⁻¹,

H - v prípade hĺbkového vrtania hĺbka, v ktorej sa realizuje proces, m,

L_i - priebežne odvrátná hĺbka alebo dĺžka s novonasadeným nástrojom až do jeho opotrebenia, m,

P - rýchlosť samotného čistého vrtania, m.h⁻¹.

Ďalej navrhli pre výpočet L_i vzťah

$$L_i = \frac{k}{w} \quad (3)$$

kde

k - konštanta

w - intenzita opotrebovania nástroja, mm.m⁻¹.

Obdobné vzťahy ako vzťah (2) pre optimalizáciu nákladov používali aj iní autori (Sitnikov, 1992; Wijk, 1991).

V práci (Bejda et al., 1993) sme konštanty L_i a k nahradili inými veličinami, u ktorých uvažujeme, že sa v procese vrtania môžu meniť.

Nech $L = L(t)$, t.j. skutočne odvrátná dĺžka s novým nástrojom za čas t . To znamená, že $L \in (0, L_i)$. Na základe toho možno upraviť aj vzťah (3) na tvar

$$L(t) = \frac{k(F, n, Q, \sigma)}{w(F, n, Q, \sigma)} \quad (4)$$

kde

F - osový prítlak na nástroj, N,

n - otáčky nástroja, s⁻¹,

Q - množstvo výplachovej kvapaliny, m³.h⁻¹,

σ - vŕtačací odpor horniny, MPa.

Pripúšťame, že veličinu L môžu ovplyvňovať aj iné parametre, nehovoriac o tom, že i veličiny F , n , Q a σ sa v podstate v závislosti od času môžu meniť. Uvažuje sa tiež s možnosťou, že aj veličina vo vzťahu (4) sa môže meniť, stáva sa teda premennou.

Aby sme zjednodušili problém, uvažujeme, že budeme analyzovať iba taký proces vrtania, v ktorom sú parametre F , n , Q blízke k optimálnym parametrom F_{opt} , n_{opt} , Q_{opt} . V práci (Bejda et al., 1993) sme ukázali, že v takomto prípade je možné intenzitu opotrebovania nástroja vyjadriť pomocou vzťahu

$$w(F_{opt}, n_{opt}, Q_{opt}, \sigma) = k_A A(\sigma) E(F_{opt}, n_{opt}, Q_{opt}, \sigma) \quad (5)$$

kde

k_A - konštanta,

$A(\sigma)$ - abrazivita horniny, mm.m⁻¹,

E - špecifická energia rozpojovania, J.m⁻³.

Vo vzťahu (2) i veličina P prejde určitou zmenou

$$(6) \quad P = P(F_{opt}, n_{opt}, Q_{opt}, \sigma) .$$

Teraz sa novo definované veličiny E aj P pri optimálnych parametroch vŕtania môžu meniť iba pri zmene vŕtacej schopnosti nástroja v dôsledku jeho opotrebovania alebo pri zmene vŕtacieho odporu horniny σ .

Vzťah (5) napíšme v zjednodušenom tvare

$$w = k_A A E . \quad (7)$$

Veličina $k(F_{opt}, n_{opt}, Q_{opt}, \sigma)$ zo vzťahu (4) pri optimálnych parametroch vŕtania sa môže meniť iba pri zmene vrtného odporu horniny.

Rozoberme prípad, keď sa vŕtanie realizuje navyše v hornine s nemeniacim sa vrtným odporom a parametre vŕtania sú i naďalej optimálne. V tomto prípade na základe vzťahov (4) a (7) je možné nákladovú rovnicu (2) prepísať na tvar

$$C = \frac{B + R T_m H}{\frac{k}{k_A A E}} + \frac{R}{P} . \quad (8)$$

Po úprave dostaneme výraz

$$C = \frac{U P + \frac{R}{E}}{\frac{P}{E}} , \quad (9)$$

kde

$$U = \frac{(B + R T_m H) A k_A}{k} . \quad (10)$$

Vo vzťahu (9) v menovateli vystupuje podiel funkcie okamžitej rýchlosti vŕtania a špecifickej energie rozpojovania. Potom podľa uvedeného vzťahu, ak zaistíme takú reguláciu vŕtania, aby sa uvedený podiel zvyšoval, pravdepodobne bude dochádzať k znižovaniu nákladov na vŕtanie.

Z hľadiska riadenia vŕtania je to veľmi závažný poznatok, avšak ako ukážeme ďalej, maximalizácia veličiny P/E je iba nutnou, ale nie postačujúcou podmienkou na tvorbu algoritmov optimálneho riadenia procesu z hľadiska minimalizácie nákladov na vŕtanie.

V skutočnosti vo vzťahu (9) pri nami diskutovaných podmienkach pri vŕtaní rastie nielen menovateľ, ale aj čitateľ. Je potrebné zodpovedať otázku, čo rastie rýchlejšie, čitateľ alebo menovateľ.

Poukážeme na jednu z možností, ako riešiť túto neurčitosť.

Pre výpočet okamžitej rýchlosti vŕtania P so zohľadnením opotrebovania nástroja v závislosti od odvrtnutia L a vplyvu tohoto javu na veličinu okamžitej rýchlosti vŕtania použijeme vzťah

$$P(L) = P_0 e^{k_E E(L) L} , \quad (11)$$

kde

k_E - konštanta

P_0 - počiatočná rýchlosť vŕtania s neopotrebovaným nástrojom, $m \cdot h^{-1}$.

Na základe vzťahu (8) a (11) a pri zohľadnení označenia (10) je možné vzťah (2) prepísať na tvar

$$C = \frac{U k}{L A k_A} + \frac{R}{P_0 e^{k_E E(L) L}} . \quad (12)$$

Ako vidíme, vo vzťahu (11) nevystupuje čas a všetky premenné veličiny sú iba funkciami L . Veličina U závislá od L vystupuje iba s presnosťou na zmenu T_m . Napr. pri hĺbkovom vŕtaní a pri razení v priebehu odvrtnutia s jedným nástrojom ju považujeme za konštantnú. Veličiny k_A a A závisia od abrazivity a vŕtateľnosti hornín. V tomto štádiu považujeme i tieto veličiny za konštantné.

Na základe toho upravme vzťah (11) na tvar

$$P = P_0 [F(L), n(L), Q(L)] e^{k_E E(L) L} . \quad (13)$$

Na začiatku rozoberme prípad, keď sú parametre riadenia procesu, t.j. F , n a Q , konštantné. Úpravou funkcie C na tvar (12) sme sa vyhli ťažkostiam, ktoré sú spojené s hľadaním extrému funkcie pomocou operátorov

$$\frac{\partial C}{\partial F} = 0 \quad \text{a} \quad \frac{\partial C}{\partial n} = 0, \quad (14)$$

ktoré používali napr. Wijk (1991) a Sitnikov (1992).

Náš prístup k riešeniu problému umožnil využiť ďaleko efektívnejšie optimalizačné kritérium

$$\frac{dC}{dL} = 0, \quad (15)$$

ktoré znamenalo kvalitatívny krok v hľadaní algoritmov pre on-line systém riadenia procesu z hľadiska nákladov.

Po aplikácii kritéria (15) na vzťah (12) dostaneme výraz

$$-\frac{U k}{L_{opt}^2 A k_A} - \frac{R k_E \left[L \frac{dE(L)}{dL} + E(L) \right]}{P_0 e^{k_E E(L) L}} = 0, \quad (16)$$

kde

L_{opt} - odvrt, pri ktorom sa dosiahnu minimálne náklady pri zvolenom režime vŕtania.

Nech výraz v zátvorke v čitateli druhého činiteľa výrazu (16) spĺňa podmienku

$$L \frac{dE}{dL} + E = k_L E, \quad (17)$$

kde

k_L - konštanta.

Toto je diferenciálna rovnica prvého rádu, ktorá sa dá riešiť separáciou premenných, teda úpravou

$$\frac{dE}{E} = (k_L - 1) \frac{dL}{L}.$$

(18)

Po vyriešení rovnice a po úprave výsledku dostaneme výraz

$$E(L) = k_I L^{k_L - 1}, \quad (19)$$

kde

k_I - konštanta.

Úpravou rovnice (16) pomocou diferenciálnej rovnice (17) sme definovali podmienku, pri ktorej vo vzťahu (9) rastie menovateľ rýchlejšie ako čitateľ. Vychádzajúc zo vzťahu (19) platí, že buď sa špecifická energia s odvrtom nemení, t.j. $k_L = 1$, prípadne rovnomerne monotónne stúpa (pri $k_L > 1$) alebo monotónne klesá (pri $k_L < 1$). Pri aplikácii rovnice (17) na rovnicu (16) možno po prevedení druhej derivácie dokázať, že ide skutočne o odvrt pri minimálnych nákladoch. Po úprave získame vzťah

$$L_{opt}^2 = -\frac{U k}{R A k_A k_E k_L} \frac{P}{E}. \quad (20)$$

To znamená, že pomocou vzťahu (20) je možné vypočítať optimálny odvrt pri tom režime vŕtania F a n , pri ktorom sme analyzovali proces. Ak porovnáme výrazy (9) a (20) zistíme, že sme sa zbavili neurčitosti. Pri uvažovaných obmedzujúcich podmienkach vŕtania vzťah (20) umožní experimentálne zistiť maximálny odvrt s nasadeným nástrojom tak, že stačí meniť režim vŕtania, teda veličiny (F , n , Q) až dovtedy, kým sa nedosiahne maximum funkcie

$$\frac{P(F, n)}{E(F, n)} = \left(\frac{P}{E} \right)_{max-1} \quad (21)$$

Jednou z obmedzujúcich podmienok pri odvodení vzťahu (8) bolo, že sa pri vŕtaní nemení hornina v tom zmysle, že tak jej vŕtateľnosť ako aj abrazivita zostávajú konštantné.

Uvažujme so spojitou zmenou buď vŕtateľnosti alebo abrazivity. Toto vyvolá zrejme potrebu variovať parametre vŕtania a snažiť sa dosiahnuť stav $(P/E)_{max-2}$. Ešte výraznejšie môžu ovplyvniť

systém výpočtu $(P/E)_{max}$ skokové zmeny v hornine. V tomto prípade je potrebné použiť niektorý z klasických systémov optimalizácie, čo môže podstatne zasiahnuť do riadenia, napr. i včítane potreby výmeny nástroja.

Vo vzťahu (8) uvažujeme s veličinou T_m ako konštantou. Na príklade vŕtania na naftu ukážeme, ako v rovnici (16) možno zohľadniť i zmenu tejto veličiny.

Definujme zmenu veličiny T_m s odvrtnom L pre vŕtanie na naftu v tvare

$$T_m = \frac{1}{H_0} \left(\frac{H_0}{P_z} + \frac{H_0 + L}{P_v} \right) \quad , \quad (22)$$

kde

P_z - rýchlosť zapúšťania náradia, $m \cdot h^{-1}$,
 P_v - rýchlosť vyťahovania náradia, $m \cdot h^{-1}$.

Po dosadení výrazu (22) do rovnice (2) obdržíme vzťah

$$C = \frac{B}{L} + \frac{RH_0}{L} \left(\frac{1}{P_z} + \frac{1}{P_v} \right) + \frac{R}{P_v} + \frac{R}{P} \quad . \quad (23)$$

Uvažujeme s premennými veličinami $E(L)$ a $P(L)$, pričom parametre vŕtania a vŕtateľnosť horniny sú konštantné. Za veličinu P vo vzťahu (23) dosadíme výraz (11) a po aplikácii operátora (15) na rovnicu (23) dostaneme výraz

$$\left[B + RH_0 \left(\frac{1}{P_z} + \frac{1}{P_v} \right) \right] \frac{1}{L^2} + \frac{R k_E \left(\frac{dE}{dL} L + E \right)}{P_0 e^{k_E E L}} = 0 \quad . \quad (24)$$

Požadujeme splnenie podmienky (17), na základe čoho možno potom výraz (24) upraviť na tvar

$$L_{opt} = \left[\frac{B + RH_0 \left(\frac{1}{P_z} + \frac{1}{P_v} \right)}{R k_E k_L} \frac{P}{E} \right]^{1/2} \quad . \quad (25)$$

Záver

V našej práci sme sformulovali návod, ako sa vyhnúť nejednoznačnosti vzťahu medzi monitorovanými veličinami pri vŕtaní a pevnostnými charakteristikami hornín.

Navrhli sme algoritmus optimalizácie riadenia procesu vŕtania, vychádzajúci z požiadavky minimalizácie nákladov na bežný meter vrtu. Tento algoritmus nenahradí plne známe klasické metódy riadenia, ale na jeho základe je možné vybudovať doplnujúci riadiaci systém, ktorý umožní inovovať riadenie niektorých technológií vŕtania.

Literatúra

- Bejda, J., Krúpa, V. & Sekula, F.: Algorithm of control of disintegration of rocks at drilling from the point of view of costs per meter at bored hole. In: *Geomechanics 93, Balkema, Rotterdam, 1993, pp.407.*
- Bejda, J. & Miklúšová, V.: Klasifikácia hornín podľa ich redukovanej rozpojiteľnosti. *Uhlí, rudy, geologický průzkum, ročník 3, č.1, 1996, s.19-23.*
- Kostúr, K.: Expertný systém pre technológiu rotačného vŕtania. In: *Knižná publikácia z 9. medzinárodnej banickej konferencie „Riadenie procesov získavania a spracovania surovín“, Štroffek, Košice, 1997, s.73.*
- Leššo, J., Baluch, D., Horovčák, P., Futó, J. & Budiš, J.: Monitorovací systém vŕtacej súpravy pre účely riadenia. In: *Knižná publikácia z 9. medzinárodnej banickej konferencie „Riadenie procesov získavania a spracovania surovín“, Štroffek, Košice, 1997, s.91.*
- Miklúšová, V.: Energeticko-transformačné aspekty rozpojovacieho procesu hornín pri rotačnom vŕtaní. *KDP, Ústav geotechniky SAV, Košice, 1989, s.118.*

- Sekula, F., Krúpa, V., Krepelka, F., Bejda, J. & Koči, M.: Monitoring of the rock strength characteristics in the course of fullface driving process. *In: Proceedings of the international conference „Geomechanics 91“, Balkema, Rotterdam, 1992, pp.299.*
- Sitnikov, N.B.: Vlijanije ograničenij na effektivnost' processa burenija glubokich skvažin. *Gornyj žurnal IVUZ, 7-1992, s. 52-56.*
- Waller, M.D. & Rowsell, P.J.: Intelligent drilling control. *In: Trans. Inst. Min. Metall. (Sect. A: Min. industry), Vol.103, January-April 1994, pp. A47-A51.*
- Wijk, G.: Rotary drilling prediction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, Vol.28, January 1991, pp.35.*