

KEYNOTE LECTURE No. 4:

PROGNÓZOVÁNÍ VÝKONU STROJŮ TBM PŘI RAŽBÁCH VE SKALNÍCH HORNINÁCH S PÁSMY OSLABENÍ POMOCÍ TBM BEZ ŠTÍTU NEBO TBM S DVOJITÝM ŠTÍTEM

TBM PROGNOSSES FOR HARD ROCK WITH WEAKNESS ZONES, USING OPEN-GRIpper OR DOUBLE-SHIELD SOLUTIONS

NICK BARTON

SHRNUTÍ

Dalekosáhlé posouzení ražby tunelovacími stroji (TBM) s použitím TBM bez štítu v porovnání s TBM s dvojitým štítem, kde je popis horninového prostředí méně přesný, vytváří základnu pro metodu prognózování nazývanou Q_{TBM} . V příspěvku jsou uvedeny některé poznatky z četných posuzovaných případů, následované krátkým úvodem k empirickým metodám založeným na klasifikaci. Údaje o výkonech strojů TBM vycházejí z informací z asi 145 případů, respektive asi 1000 km ražeb, jejichž celkové výkony jsou sloučeny. Od vzniku této metody se datová základna zvětšila tak, aby obsahovala data pro ražbu strojů TBM s dvojitým štítem ve tvrdých vyvřelých horninách a s abrazivitou podobnou té, která je v případě popsaném dále v tomto příspěvku, konkrétně na dvou tunelech ražených v tvrdé hornině s pásmy oslabení, které se mají provádět buď pomocí TBM bez štítu, nebo TBM s dvojitým štítem. Plánované tunely budou tvořit vysokorychlostní norskou trať z města Ski do Oslo. Mají se razit buď pomocí trhacích prací z několika čeleb, nebo pomocí TBM, které mají být použity na tunely délky 7,9 km a 9,6 km. Z důvodu nebezpečí sedání je nutno v různých místech omezit přítoky vody. Data se sbírala většinou pomocí klasifikace podle Q-histogramu více než 300 skalních zářezů, zatímco v případě pásem oslabení se použilo refrakční seismické profilování.

ÚVOD

Ti, kteří znají Q-systém klasifikace horninového masivu, budou znát řadu hodnot Q a přídavná jména „slabý“, „uspokojivý“, „dobrý“ atd., uvedená na obr. 1. Namísto doporučení pro zajištění výrubu se však zde užívá klasifikační diagram, podle kterého se zjišťují obecné trendy

ABSTRACT

A wide-reaching review of TBM tunneling with open-gripper TBM, as opposed to double-shield TBM, where description of ground is less accurate, forms the basis of a prognosis method called Q_{TBM} . Some lessons from the numerous reviewed cases will be given, followed by a brief introduction to the classification-based empirical method. The TBM performance data base numbers some 145 cases or about 1000 km of TBM tunneling, whose overall performance is synthesized. Since the development of this method the data base has been increased to include double-shield TBM driving in hard igneous rock, also of similar abrasiveness to the case to be described in this paper: namely two tunnels in hard rock with weakness zones, to be tackled either by open-gripper or double-shield TBM. The planned tunnels will form a high-speed Norwegian rail link to Oslo from Ski in the south, to be driven either by drill-and-blast from several fronts, or using TBM for 7.9 km and 9.6 km long tunnels. Water ingress must be limited in various localities due to settlement risks. Data collection was mostly by Q-histogram classification of more than 300 rock cuttings, while some drilling and seismic refraction profiling was utilized in the case of weakness zones.

INTRODUCTION

Those familiar with the Q-system of rock mass classification will recognize the progression of Q-values and adjectives “poor”, ‘fair’, ‘good’ etc. given in Figure 1. However, instead of tunnel support recommendations, the classification diagram has been used here to suggest the general trends of penetration rate (PR) and advance rate (AR) with TBM tunneling. Clearly the Q-system parameters RQD, Jn (number of joint sets), Jr (joint roughness), Ja (joint alteration), Jw (joint water inflow) and SRF (stress reduction factor) need additional machine-rock interaction parameters, in order to tackle the much more complex field of TBM tunneling, where PR can vary from extremes of 0.1 m/hr to 10 m hr, and AR can vary from 0.0 m day to 125 m day, or indeed from 0.0 km yr to 16 km yr. This is a demanding field for classification and for understanding the special circumstances of TBM tunneling.

Figure 2 shows the scheme of classification that was developed by trial and error analysis of many of the 145 cases derived from 1000 km of TBM tunneling reviewed by Barton, 2000. Because open-gripper cases formed the great majority, and significant detail had therefore been given of the rock mass conditions and rock properties, this must be considered the basis of the overall trends of deceleration with increased time period, shown in Figure 3. Experience with double-shield TBM has since suggested a possible halving of these gradients.

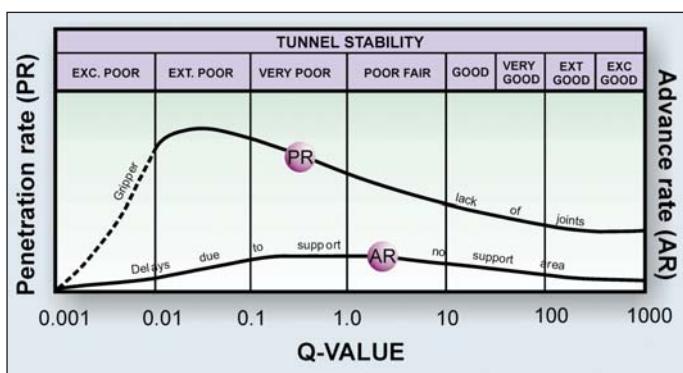
The classic equation used to describe all TBM performance data is following:

$$AR = PR \times U \quad (1)$$

(where U = utilization in a given time period, such as 24 hours, 1 week, or 1 month)

It may be noted in Figure 3 that U has been recast in the form T_m , where T is (total) hours, and $(-)$ m is the negative gradient of deceleration seen in the performance lines in Figure 3. Therefore:

$$AR = PR \times T_m \quad (2)$$



Obr. 1 Metoda Q-systém pro klasifikaci stability výrubu a potřeb jeho výstroje se zde používá k vyjádření relativní obtížnosti ražby tunelu pomocí TBM, s výstupy představy o rychlosti pronikání PR a rychlosti postupu AR

Fig. 1 The Q-system method of classifying tunnel stability and support needs is used here to indicate the relative difficulty of driving tunnels by TBM, with curves to suggest PR (penetration rate) and AR (advance rate)

rychlosti pronikání do horniny (PR) a rychlost postupu (AR) při ražbě tunelovacími stroji TBM. Je jasné, že aby bylo možné pustit se do mnohem složitější oblasti ražby pomocí TBM, kde se rychlosť pronikání PR může pohybovat mezi extrémy 0,1 m/hod až 10 m/hod a rychlosť postupu AR od 0,0 m/den do 125 m/den, nebo třeba i 0,0 m/rok až 16 km/rok, je třeba k parametrům Q-systému, kterými jsou určení kvality horninového masivu RQD, počet systémů diskontinuit Jn, číslo drsnosti puklin Jr, číslo vyjadřující zvětrání puklin Ja, číslo vyjadřující vliv zvodnění po puklinách Jw a Stress reduction factor SRF (redukce podle geostatického napětí), přidat další parametry vzájemného působení mezi horninou a strojem. Jedná se o oblast, která je velmi obtížná pro klasifikaci a pochopení zvláštních podmínek pro ražbu pomocí TBM.

Na obr. 2 je uvedena klasifikace, která byla vyvinuta analýzou pokus–omyl mnoha ze 145 případů získaných z 1000 km ražeb TBM, zkoumaných Bartonem v roce 2000. Jelikož se valnou většinou jednalo o ražby pomocí TBM bez štítu, čímž byl dán důležitý detail podmínek horninového masivu a vlastností horniny, musí se to považovat za základ pro celkové trendy zpomalení se zvětšujícím se časovým obdobím (obr. 3). Dosavadní zkušenosti s TBM s dvojitým štitem ukázaly na možnost snížení těchto gradientů na polovinu.

Klasická rovnice použitá k popsání všech údajů o výkonech TBM je:

$$AR = PR \times U \quad (1)$$

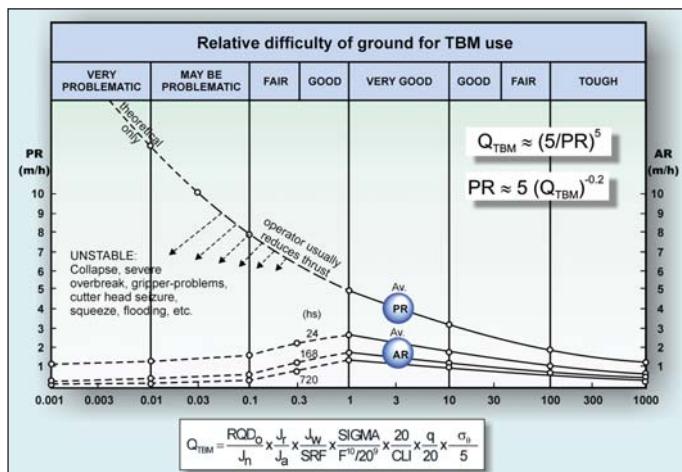
(kde U = využití v daném časovém období, jako je 24 hodin, 1 týden nebo 1 měsíc).

Na obr. 3 je možno poznamenat, že U bylo přetvořeno do formy T^m , kde T je (celkový) počet hodin a $(-m)$ je záporný gradient zpomalení, který je vidět na křivkách výkonu na obr. 3. Tedy:

$$AR = PR \times T^m \quad (2)$$

Ve špatných horninových podmínkách je hodnota $(-m)$ silně spojena se standardní hodnotou Q , která je vyznačena na obr. 4. Ještě před přistoupením k aplikaci Q_{TBM} pro porovnání metod ražeb pomocí TBM (TBM bez štítu nebo s dvojitým štitem a se zařízením pro posunování odtlačováním od ostění při průchodu pásmu oslabení) může být zajímavé porovnat průměrný výkon TBM s výkonom dosahovaným při použití alternativy s použitím trhacích prací.

Toto porovnání je provedeno na obr. 5, kde je při vhodné volbě parametrů „střední hodnoty“ možné vidět $Q \approx Q_{TBM}$. To by nastalo



Obr. 2 Schéma Q_{TBM} pro vystížení důležitých vlastností horninového masivu, parametrů vzájemného působení mezi horninou a strojem a parametrů vzájemného působení mezi horninou a rězným nástrojem. Toto schéma bylo vyvinuto metodou pokus–omyl a, jak si lze všimnout, většina dodatečných parametrů je normalizována podle typických hodnot daného parametru. (viz text s popisy parametrů Q_{TBM})

Fig. 2 The Q_{TBM} scheme for capturing important rock mass properties, rock mass-machine parameters, and rock mass-cutter interaction parameters. This was developed by trial and error, and as may be noted, most of the additional parameters are normalized by typical values of the given parameter. (See text for Q_{TBM} parameter descriptions)

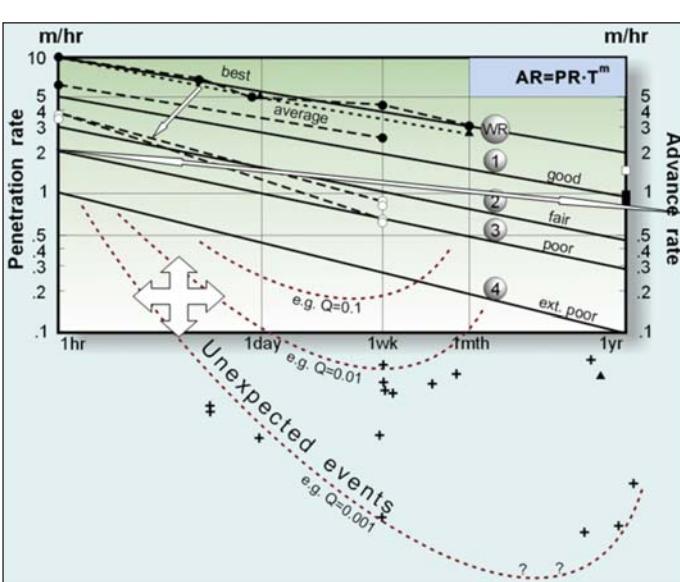
Under poor rock conditions, $(-m)$ is strongly linked to the standard Q -value, as indicated in Figure 4. Before proceeding to the application of Q_{TBM} to compare TBM tunneling methods (open-gripper, or double-shield with push-off-liner capability in weakness zones), it may be of interest to compare a moderate TBM performance to that of the drill-and-blast alternative.

This comparison is made in Figure 5, where by suitable choice of ‘central-value’ parameters one may see $Q \approx Q_{TBM}$. For instance this would occur when cutter force (F) was close to 20 tnf, when rock mass strength (SIGMA) was close to 20 MPa, when cutter-life index (CLI), an NTNU, Trondheim abrasion parameter, was close to 20, when quartz content (q) was close to 20%, and when the approximate biaxial stress (σ_0) at the tunnel was close to 5 MPa, roughly representing 100 m depth with an assumed stress concentration factor of 2 (and rock density averaging 2.5 gm/cc). This last factor captures the greater effort required when stress levels become high in a deep tunnel, prior to the ‘rock burst’ term SRF being activated, and thrust becoming generally reduced for reasons of safety, as bursting is a time-dependent phenomenon.

The drill-and-blast curve in Figure 5, which is assumed to decline only slightly with increased time period, is based on Norwegian contractor figures, where in the case of ‘perfect’ or consistently high- Q conditions, a previous world record of 165 m/week, and a more recent 176 m/week was achieved. Consistent 105 m/week (whole project) results have also been obtained. During a whole project, the distribution of Q -value statistics are of course less than ‘perfect’. However in many projects driven by drill-and-blast, the wider statistical distribution of Q -values may make even 45 m/week a respectable overall result, since various problems in fault zones, resulting in e.g. 10 m/week (or sometimes even less), drag down the average performance.

THE OSLO-SKI TUNNELS

Q -histogram statistics-based rock mass characterization of more than 300 rock cuttings, totalling at least 6 km in length, was used to estimate the likely ranges of rock mass qualities, for the two planned tunnels linking the capital Oslo to the town of Ski, some 20 km to the south. The planned 9.6 km and 7.9 km tunnels may be driven by twin TBM of about 10 m diameter, or by single larger diameter TBM, or by drill-and-blast, with its more immediate water-inflow control using systematic pre-injection. Since the tunnels are mostly in the range 40 to 80 m depth, and the rock cuttings (e.g. for local roads and a motorway) were up to 15 m height, and depth of weathering was mostly limited in the good quality gneisses, it was possible to obtain a valuable source of rock quality data, for subsequent utilization in



Obr. 3 Trendy klesající rychlosťi postupu s rostoucím časem, odvozené z analýzy 145 případů a asi 1000 km ražeb prováděných většinou pomocí TBM bez štítu. Všimněte si, že rovnice pro využití je upravená jako $AR = PR \times T_m$, kde $(-m)$ je záporný gradient zpomalení (tři šipky jsou vysvětleny v textu)

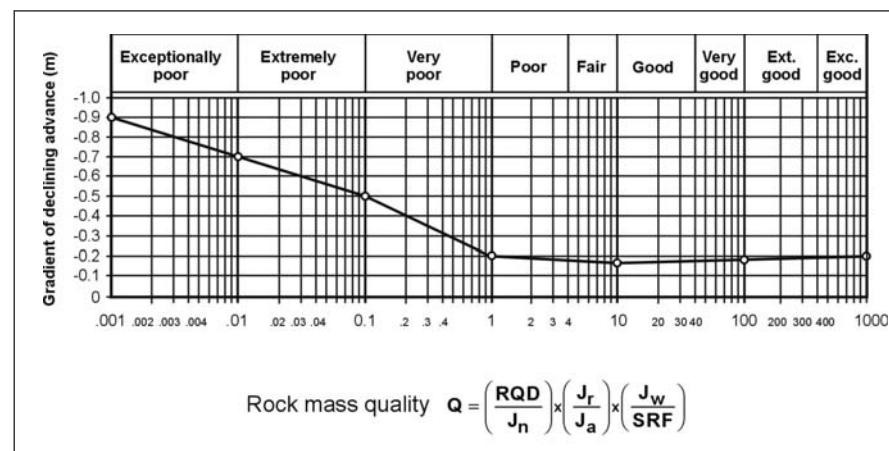
Fig. 3 The trends of declining advance rate with increased time period, derived from an analysis of 145 cases and about 1000 km of mostly open-gripper TBM. Note that the utilization equation has been re-cast as $AR = PR \times T_m$, where $(-m)$ is the negative gradient of deceleration. (The three arrows are explained in the text.)

například, kdyby síla působící na řezný nástroj (F) byla blízko 20 tnf, pevnost horninového masivu (SIGMA) byla kolem 20 MPa, koeficient životnosti řezného nástroje (CLI) (tj. parametr abraze podle norské univerzity NTNU v Trondheimu) byl kolem 20, obsah křemene (q) byl kolem 20 % a kdyby přibližně dvouosé napětí (σ_θ) v tunelu bylo kolem 5 MPa, což by zhruba představovalo hloubku 100 m s uvažovaným faktorem koncentrace napětí rovny 2 (a průměrnou objemovou hmotností 2,5 g/cm³). Tento poslední faktor vystihuje větší úsilí potřebné pro vysokou napjatost v hlubokých tunelech do té doby, než se zaktivuje položka SRF – rock burst (porušení /ukáni horniny díky vysoké napjatososti) a než je snížen osový tlak z důvodů bezpečnosti, jelikož „rock burst“ je časově závislý jev.

Křivka pro případ použití trhacích prací na obr. 5, u které se předpokládá, že bude pouze pomalu klesat s časem, vychází z údajů od norských tunelářů, kde byl v případě podmínek totálně dobrých nebo trvale vysokých hodnot Q dosažen předchozí světový rekord 165 m za týden a poté i 176 m za týden. Dosáhly se i vysoké stálé výkony v průběhu celé stavby – 105 m za měsíc. Během celé stavby je statistické rozdělení hodnot Q samozřejmě horší než „totálně dobré“. U mnoha staveb ražených pomocí trhacích prací však širší statistické rozdělení hodnot Q může udělat z výkonu 45 m za týden úctyhodný celkový výsledek, jelikož průměrný postup je snížován z důvodu různých problémů v poruchových pásmech, vedoucích např. k postupu 10 m za týden (někdy i menšímu).

LYŽAŘSKÉ TUNELY V OSLOU

K odhadování pravděpodobných rozsahů kvality horninového masivu pro dva plánované tunely spojující hlavní město Oslo s městem Ski, nacházejícím se asi 20 km jižně od Osla, se použila charakteristika více než 300 skalních zárezů o celkové délce přinejmenším 6 km, založená na statistickém vyhodnocení Q-histogramu. Plánované tunely s délkou 9,6 km a 7,9 km se mohou razit dvěma stroji TBM o průměru asi 10 m, nebo jedním strojem TBM o větším průměru, nebo pomocí trhacích prací, kde se dají



Obr. 4 Gradient zpomalení (nebo snížení rychlosti postupu) je silně spojen s hodnotami Q v případě špatných horninových poměrů, které jsou vyznačeny šipkou ve formě kříže na obr. 3 (takzvané „nezáčekávané události“). Předstihové vylepšení horniny které je schopné vylepšit efektivní hodnotu Q zlepší i záporný gradient (-m)

Fig. 4 The gradient of deceleration (or declining advance) is strongly linked to the Q-values in the case of poor rock conditions, which are marked by the arrow-in-the-form-of-a-cross seen in Figure 3 (so-called ‘unexpected events’). Pre-treatment, capable of improving the effective Q-value, will also reduce the negative gradient of (-m)

TBM prognoses of the planned tunnels through the better classes of rock mass. In the case of TBM tunnelling the highest quality rock may result in slower progress, and more cutter changes.

In addition to the logging of the numerous surface exposures, drill-core logging performed by the owner Jernbaneverket (JBV) and seismic refraction measurements commissioned by JBV were also utilised. Both the latter were focussed on the reduced rock mass quality experienced when crossing assumed weakness zones and known faults.

The weakness zone velocities appeared to be grouped in three main velocity ranges: 2000-2300m/s (6 cases, mean 18 m wide), 2500-2900m/s (9 cases, mean 18 m wide) and 3200-3500m/s (4 cases, mean 20 m wide), so there was no apparent differentiation concerning width and velocity in general. The three following groups of velocities were therefore simulated in the Q_{TBM} prognosis model as a starting point: 2170, 2730 and 3355 m/s, to approximately represent the above ranges. (A Q_{TBM} input option for shallow tunnels, is to directly apply the P-wave velocity in place of the Q-parameters. Recorded VP velocities are automatically converted to Q-values, using the empirical relations (Barton, 1995):

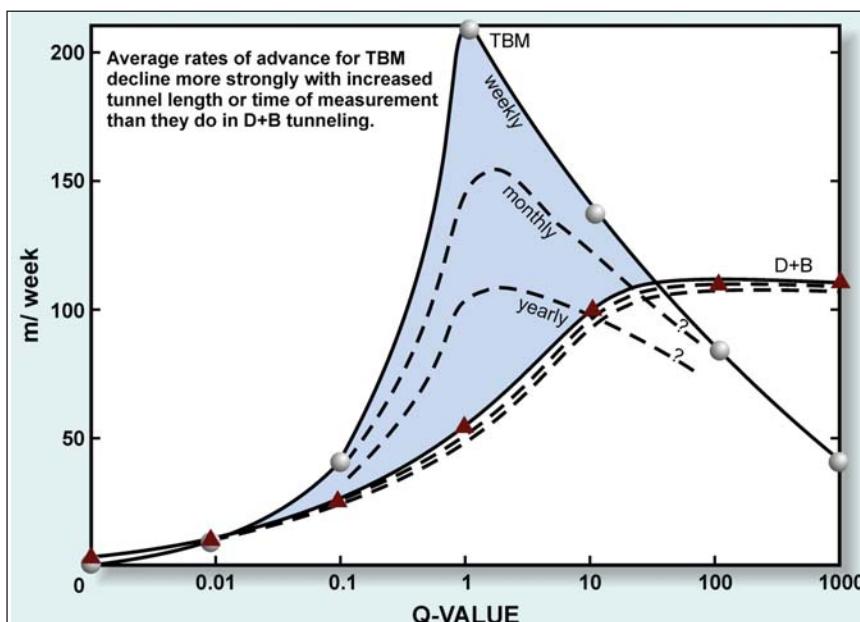
$$VP \approx \log Q_c + 3.5 \text{ (km/s)} \quad (3)$$

(where $Q_c = Q \times UCS/100$ with UCS in units of MPa)

$$Q \approx 100/UCS \times 10^{(VP - 3.5)} \quad (4)$$

(when $VP = 3.5$ km/s, and $UCS \approx 100$ MPa, $Q \approx 1$)

The data collection, principally using the Q-system histogram method, was the first stage of input to the Q_{TBM} prognosis modelling of potential penetration rate PR and actual advance rate AR for the two twin tunnels that may be driven by TBM. Laboratory test data from NTNU/SINTEF of Trondheim, concerning strength and abrasion parameters for the mostly tonalitic and also quartz- and feldspar-rich gneisses, were also combined with the Q-data statistics to give estimates of potential TBM tunnelling speeds. In general UCS values ranged from about 200 to 260 MPa, and CLI was an unfavourable 6 to 10 in general, meaning heavy cutter wear. Quartz contents varied from 25 to 35%, again unfavourable, meaning typically only 3m advance per cutter change, which are of course performed in groups.

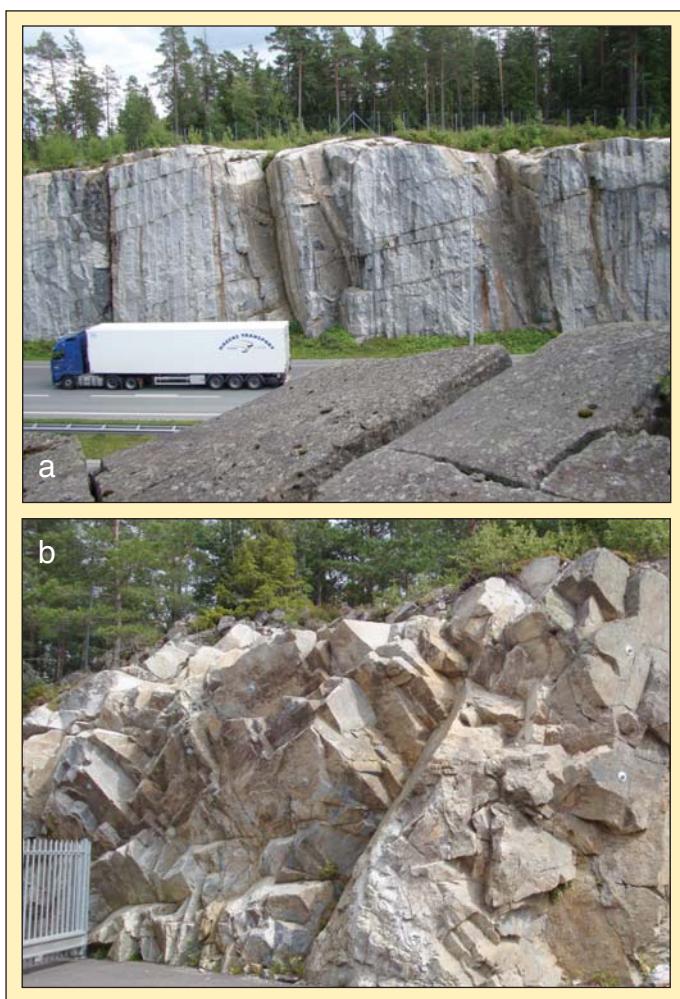


Obr. 5 Porovnání výkonu ražby pomocí trhacích prací a průměrného výkonu TBM pro různá časová období, každého vyjádřeného jako funkce hodnoty Q (nebo hodnoty Q_{TBM}). Jejich velikosti se zde z důvodu uvedených v textu považují za stejné

Fig. 5 A comparison of drill-and-blast tunneling and moderate TBM performance for different time periods, each as a function of Q-value (or Q_{TBM} value), considered here to be of the same magnitude for reasons explained in the text.

ROCK MASS CLASSIFICATION OF ROCK CUTTINGS

Almost 40 areas were selected along the approximate planned line of the two tunnels, where rock exposures, most rock cuttings, were available for classification. In each of these areas, about nine rock



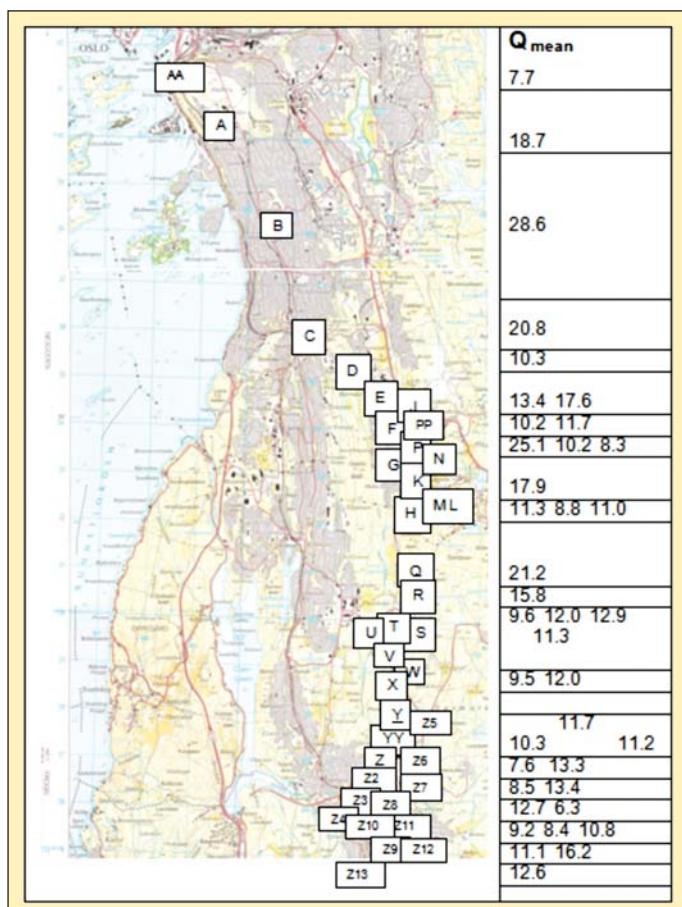
Obr. 6a, 6b Nahoře: Příklad horniny s nejlepší kvalitou na trase dálnice nebo v její blízkosti. Kvůli jejich masivní povaze by byla ražba v nich pomalejší. Hornina je příkladem třídy I horninového masivu. Dole: Příklad více rozpuškaného horninového masivu, ve kterém by se razilo snadněji

Figure 6a and 6b. Top: An example of some of the best quality rock along a nearby motorway. Due to its massive nature this would be slower to bore, and is an example of Class I rock mass. Bottom: An example of some of the more jointed rock that would be easier to bore

bezprostředněji zvládat přítoky vody pomocí systematické předstiové injektáže. Jelikož tunely jsou většinou v hloubce pohybující se od 40 do 80 m a skalní zářezy (např. pro místní silnice a dálnici) byly až 15 m vysoké a hloubka zvětrání byla v kvalitních rulách většinou omezená, bylo možné získat cenné zdroje dat o kvalitě hornin, které se následně použily při prognózování výkonů TBM na plánovaných tunelech, které se měly razit v lepších třídách horninového masivu. V případě ražení pomocí TBM může nejvyšší kvalita horniny vést k pomalejšímu postupu a potřebě výměn řezných nástrojů.

Tab. 1. Přibližné rozdělení tříd horniny v tunelu Sever a tunelu Jih. (Reprezentativní střední hloubky jsou uváděny v závorkách.) Třídy s horší kvalitou horniny Q6, Q7 a Q8 byly posuzovány podle rychlosti V_p z profilů měření seismické refrakce ve známých pásmech oslabení

Table 1. Approximate distribution of rock classes in the North and South tunnels. (Representative mean depths are shown in parentheses). Poorer rock classes Q6, Q7 and Q8 were evaluated by means of V_p from refraction seismic profiles in known weakness zones



Obr. 7 Celkem 38 oblastí, ve kterých se provádělo zaznamenávání do histogramu Q , a to na osmi nebo devíti horninových výchozech v každé oblasti. Celkové střední hodnoty Q jsou uvedeny po lokalitách pokrývajících úsek asi 20 km od severu k jihu. Oslo je těsně nad horním okrajem mapy

Fig. 7 The 38 areas where Q-histogram logging was performed on eight or nine rock exposures per area. Overall mean Q -values are shown by location, covering some 20 km north to south. Oslo is just beyond the top of the map

cuttings were Q-histogram logged. Two examples of the rock are shown in Figure 6a and 6b. The distribution of logging locations and mean Q-values are indicated in Figure 7. An example of the actual distribution of logging locations for the case of the planned 7.9 km long South Tunnel, and more details of the Q-statistics for each area with multiple rock cuttings is shown in Figure 8.

Altogether, five rock mass classes and three weakness zone classes were modelled, the latter based on the core logging data and refraction seismic measurements. Table 1 shows the estimated extent and typical depth of the different rock classes. The large amount of ‘good quality’ rock suggests limited tunnel support needs, but progress by TBM will not be fast, and cutter change will be frequent.

A comparison of the Q-histogram logging of all the exposures used to estimate the rock mass quality for Tunnel North of planned 9.6 km length is shown in Figure 9a, and the result of focused logging of weakness zones sampled in six boreholes is shown in Figure 9b. As mentioned earlier, the results of several kilometers of seismic refraction profiles was the eventual source of Q_{TBM} modeling of three classes of weakness zones, having successively reducing mean velocities. The core logging was a form of ‘quality control’ of the seismic results.

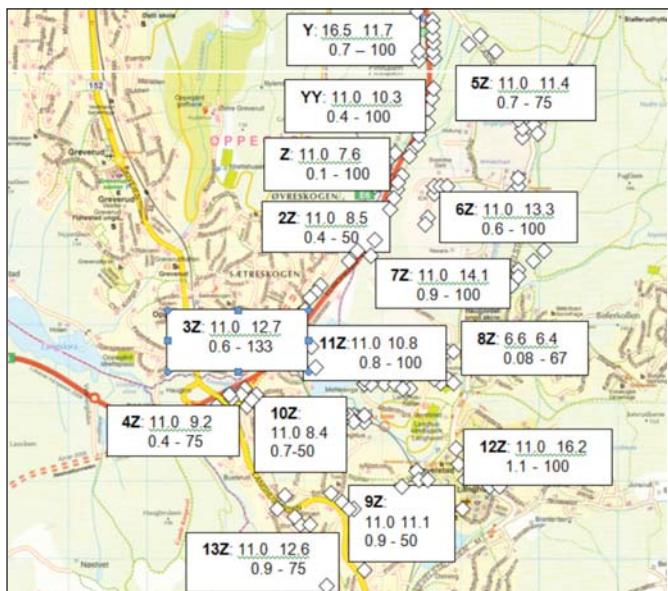
WHY FAULT ZONES MAY DELAY TBM SO MUCH

There are unfortunately very good ‘theo-empirical’ reasons why major fault zones are so difficult for TBM (with or without double-shields). (*Theo-empirical* means that lack of belief will be penalized). We need three basic equations to start with.). From previous discussion:

$$AR = PR \times U, \text{ where } U = T^m$$

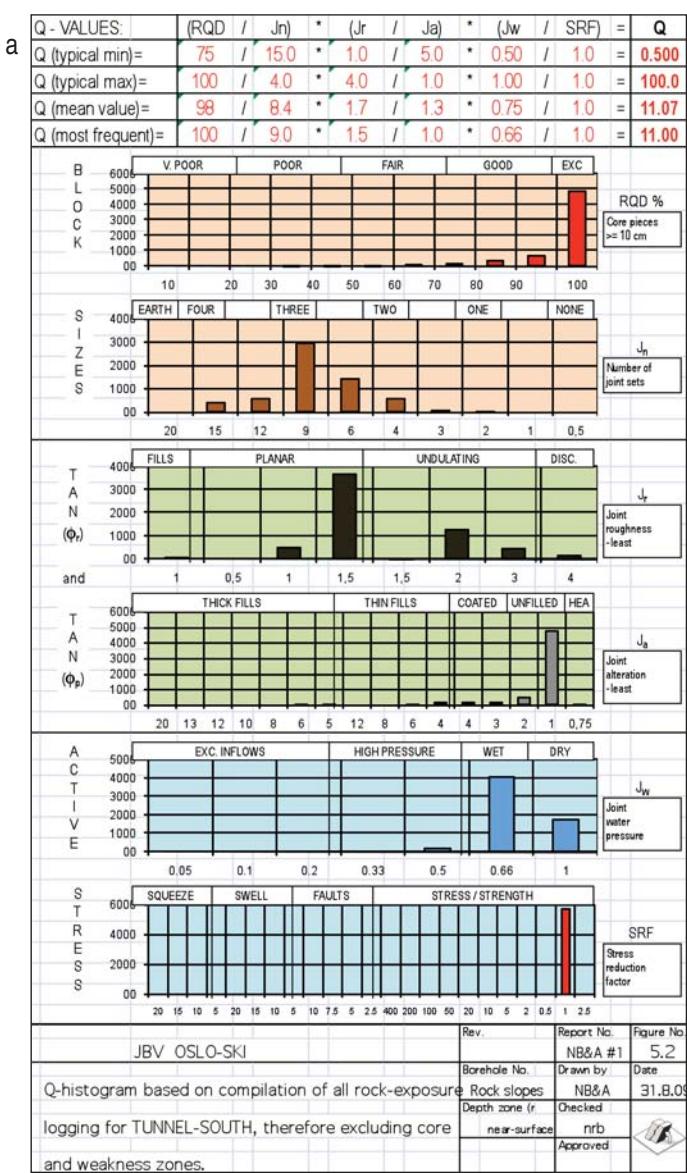
(see Figure 3)

TUNEL / TUNNEL	Q1 Q > 100	Q2 Q 40-100	Q3 Q 10-40	Q4 Q 10-4	Q5 Q 4-1
Sever / North L≈ 9.6km	500 (160)	2000 (120)	5000 (100)	1500 (80)	500 (70)
Jih / South L≈ 7.9 km	200 (130)	1000 (110)	2500 (80)	1750 (60)	500 (30)



Obr. 8 Výběr z lokalit na trase tunelu Jih, ve kterých se prováděly geologické záznamy. V okénkách jsou uvedeny střední hodnoty pro každou z oblastí, ve kterých se prováděly záznamy na několika (8-9) místech. Čísla jsou řazena v pořadí: $Q_{\text{nejčastější}}$, $Q_{\text{střední}}$ a $Q_{\text{typický rozsah}}$

Fig. 8 An extract from the southern tunnel logging locations. Boxes show mean values for each area logged, each in multiple (8 or 9) locations, with numbers listed in the following order: $Q_{\text{most frequent}}$, Q_{mean} , and $Q_{\text{typical range}}$



(Due to the reducing utilization with time increase, advance rate decelerates, but does so to a lesser general extent with push-off liner double-shield TBM, where $-m$ may be nearly halved; see later). Obviously the time T needed to advance length L must be equal to L/AR , for all tunnels and all TBM:

$$T = L / AR \quad (5)$$

Therefore we have the following:

$$T = L / (PR \times T^m) \quad (6)$$

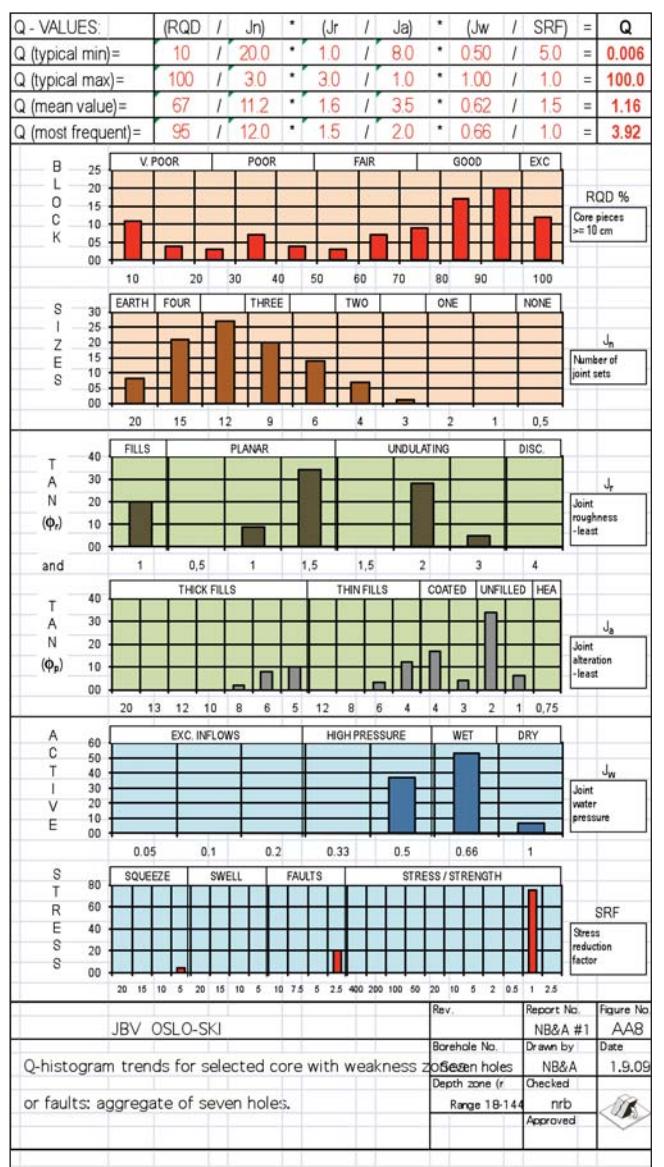
This can be re-arranged as follows:

$$T = (L/PR)^{1/(1+m)} \quad (6)$$

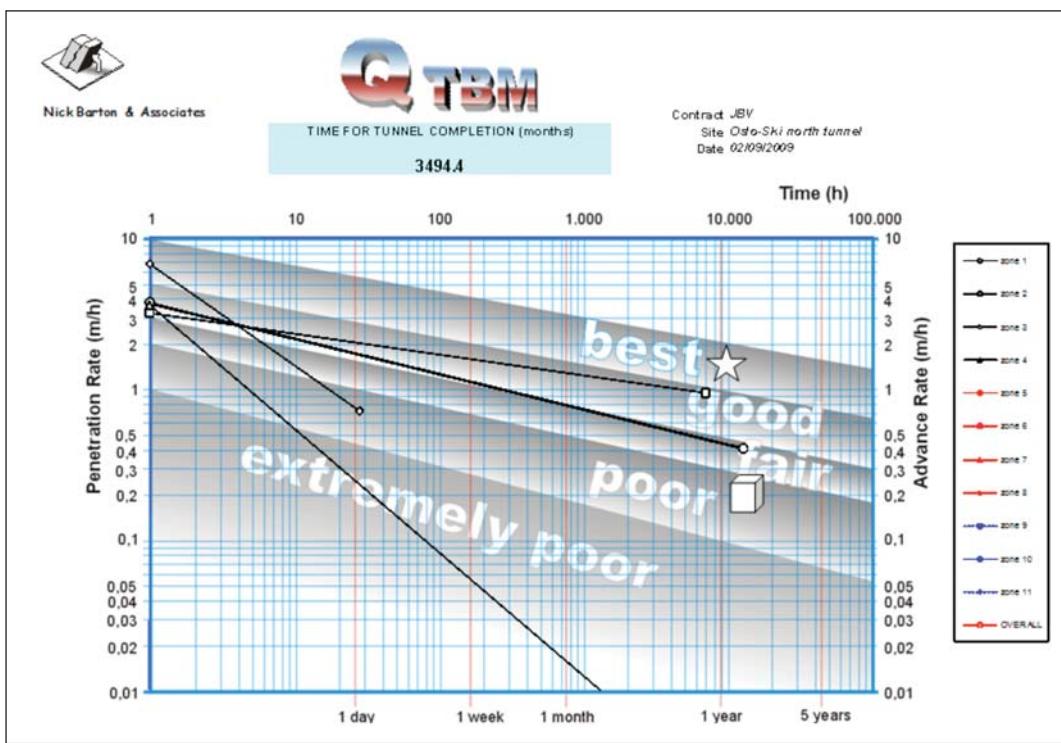
This is a very important equation for TBM, especially if one accepts that the deceleration gradient (-) m is strongly related to low Q-values in fault zones, as shown by the empirical data in Figure 3. Equation 6 is important because negative (-) m values almost reaching (-)1.0, make the component $1/(1+m)$ too large.

If the fault zone is wide (large L) and PR is low (due to gripper problems and collapses etc.) then L/PR gets too big to tolerate a big component $1/(1+m)$ in equation 6. It is easy (in fact all too easy) to calculate an almost 'infinite' time for passing through a fault zone using this 'theo-empirical' equation. This also agrees with reality, in numerous, little-reported cases.

The writer knows of three permanently buried, or fault-destroyed TBM (Pont Ventoux, Dul Hasti, Pinglin). There are many more unreported but privately referred cases, and their causes are probably related in one way or another to the logic behind equation 6. So far



Obr. 9a, 9b Porovnání záznamů histogramu Q pro tunel Sever se záznamy histogramu Q zaměřenými na specifická pásma oslabení odhalená v jádrových vrtech Fig. 9 a and b. A comparison of Q -histogram logging of the Tunnel North with focused Q -histogram logging of specific weakness zones exposed in core



Obr. 10 Předběžný model Q_{TBM} 9 km dlouhého tunelu Sever, kde se pro jednoduchost předpokládala konstantní vstupní data u tonalitické ruly. Modelování TBM bez štítu s průměrným přítlačem na řeznou hlavu 28 tnf (viz „ kostka“) ve srovnání s přitlačem 26 tnf v případě TBM s dvojitým štítem (viz „hvězda“). Pokud není modelováno předstihové vylepšování, strmější přímky představují pásma oslabení se strmějšími gradienty $-m$, řídícími se podle hodnot Q

Fig. 10 A preliminary Q_{TBM} model of the 9 km Northern Tunnel with assumed-for-simplicity constant tonalitic gneiss input data, and modeling of an open-gripper TBM with 28 tnf mean cutter thrust (see ‘cube’), compared to 26 tnf cutter thrust in the case of a double-shield TBM (see ‘star’). The steeper lines represent weakness zones, with steeper Q -controlled $-m$ gradients, unless pre-treatment is modeled

Kromě dokumentování četných povrchových výchozů se použily i záznamy o jádrových vrtech provedených investorem Jerbaneverket (JBV) a výsledky měření refrakční seismiky, objednaných investorem JBV. Ty byly zaměřeny na sníženou kvalitu horninového masivu, která měla být zaznamenána při průchodu očekávanými pásmeny oslabení a známými poruchami.

Zdálo se, že rychlosti v pásmech oslabení byly seskupeny do tří hlavních rozsahů: 2000–2300 m/s (6 případů, v průměru 18 m široká pásmo), 2500–2900 m/s (9 případů, v průměru 18 m široká) a 3200–3500 m/s (4 případy, v průměru 20 m široká), takže obecně neexistovala zjevná diferenciace, co se týká šířky a rychlosti. Tři následující skupiny rychlostí se proto simulovaly v předpovídacím modelu Q_{TBM} jako počáteční body: 2170, 2730 a 3355 m/s, které měly přibližně představovat výše uvedené rozsahy. (Možným vstupem pro Q_{TBM} pro mělce uložené tunely je i přímo použití rychlosti vln P namísto parametrů Q-systému. Zaznamenané rychlosti VP se automaticky převádějí na hodnoty Q pomocí empirických vztahů, Barton, 1995):

$$V_p \approx \log Q_c + 3.5 \text{ (km/s)} \quad (3)$$

(kde $Q_c = Q \times \text{UCS}/100$, s hodnotou pevnosti v prostém tlaku UCS uváděnou v MPa)

$$Q \approx 100/\text{UCS} \times 10^{(\text{VP} - 3.5)} \quad (4)$$

(když $V_p = 3.5 \text{ km/s}$ a $\text{UCS} \approx 100 \text{ MPa}$, $Q \approx 1$)

Sběr dat, zejména pomocí metody Q-systému s použitím histogramu, byl prvním stupněm vstupu do prognózy Q_{TBM} pro modelování možné rychlosti pronikání PR a skutečné rychlosti postupu AR pro výše uvedené dva dvoutrubní tunely, které se mohou razit stroji TBM. Údaje z laboratorních zkoušek provedených univerzitou NTNU/SINTEF v Trondheimu, týkající se parametrů pevnosti a abrazivity většinou tonalitických a také křemitých a živcových rul, se také kombinovaly se statistikou údajů Q, aby se získaly odhadby možných rychlostí rážeb strojů TBM. Obecně se hodnoty pevnosti v prostém tlaku UCS pohybovaly od asi 200 do 260 MPa a koeficient životnosti řezného nástroje CLI byl nepříznivý, pohybující se obecně

this equation seems to be absent from other literature, as the inevitability of deceleration ($-m$) does not seem to have been accepted as a useful method of quantifying reduced utilization with increased time.

TBM must follow a negative m -value, even when breaking world records, like 16 km in one year, or 2.5 km in one month, even 120 m in 24 hours, since even here, PR is sure to be greater than the implied and remarkable mean AR of about 5 m/hr for the record 24 hours period. The uppermost line of world record performances seen in Figure 3 is therefore also showing deceleration, but with a less steep gradient ($-m$).

PROGNOSSES USING Q_{TBM}

For each of the planned Oslo-Ski tunnels, prognoses were compared using hard rock open-gripper TBM and double-shield TBM, where robust PC element liner construction concurrent with thrust from the grippers gives a very fast method of tunnelling. This more expensive method has the possible advantage of converting a possibly ‘poor’ PR (due to rock hardness) into a ‘good’ AR, due to the high utilization, despite frequent cutter changes. With suitable design of gaskets it can also give a watertight and fully supported tunnel (after some initial leakage in the first 10 to 15 m from the face), and has been used with notable success in some other high-speed rail projects through hard rock masses.

A preliminary Q_{TBM} prognosis trial for the 9 km long ‘Tunnel North’ was performed with two assumed long stretches of uniform granitic tonalitic gneiss. This is shown in Figure 10. The simulation with conventional open-gripper TBM and need for subsequent (B + mesh + final Sfr) lining, using conventional deceleration gradient ($-m$), gave the longest line (see cube at 1.5 years: ‘fair’), while the other ‘half’ was modelled with an assumed double-shield TBM, using an appropriately reduced gradient ($-m$), resulting in ‘good’ performance of less than one year (see star).

These differences were obtained despite respective 28 tnf and 26 tnf mean cutter force, giving the deliberate differences seen in PR. Concerning the shortest steeply inclined line, a 20 m wide weakness zone of reduced quality was penetrated with probably too high cutter thrust in ‘one day’, but if supportable in this time, the reduced demand on stand-up time (from last support) is positive. A wider 50 m more serious weakness zone was finally modelled, using no pre-treatment (i.e. the same poor properties as logged in an imaginary cored probe-hole). This untreated weakness zone ‘terminated’ the project (line well below x-axis), because of the ‘theo-empirical’ logic of equation 6, so that the accumulated time-line is not drawn, since of no practical interest.

Figure 11a illustrates the input data screen for the last of five rock mass classes used to define the likely quality ranges of Tunnel North. As may be noted, the first six parameters are the (almost) conventional Q-parameters, but with a specific requirement to consider the RQD in the horizontal (visual scan-line) direction, and preferably also in the planned tunneling direction. Anisotropically distributed RQD logged conventionally in vertical holes therefore represents a potential source of error if used to predict PR.

Figure 11 b illustrates the input data screen for one of nine weakness zones that was modelled

The single-shield push-off-liner option, with its need to build successive rings before resetting grippers, is assumed to have

od 6 do 10, což znamenalo velké opotřebení. Obsah křemene se pohyboval od 25 do 35 %, což bylo také nepříznivé a znamenalo typicky pouze 3 m postupu na výměnu řezného nástroje, která se samozřejmě provádí ve skupinách.

KLASIFIKACE HORNINOVÉHO MASÍVU NA ZÁKLADĚ SKALNÍCH ZÁŘEZŮ

Na předběžně plánované trase uvedených dvou tunelů bylo vybráno téměř 40 oblastí, ve kterých byly pro klasifikaci k dispozici skalní výchozy a většina skalních zářezů. V každé z těchto oblastí bylo zaneseno do Q-histogramu asi devět skalních zářezů. Dva příklady horniny jsou vidět na obr. 6a a 6b. Rozdělení míst odběru vzorků a průměrné hodnoty Q jsou znázorněny na obr. 7. Příklad rozdělení míst odběru vzorků pro plánovaný 7,9 km dlouhý tunel Jih a další detaily ze statistiky Q pro každou oblast s mnoha skalními zářezy jsou znázorněny na obr. 8.

Celkem se modelovalo pět tříd horniny a tři třídy pro pásmá oslabení. Tyto tři třídy vycházely z údajů v záznamech o jádrových vrtech a měření seismické refrakce. Z tabulky 1 je zřejmý odhadovaný rozsah a typická hloubka různých tříd horniny. Velké množství horniny „dobré kvality“ napovídá, že potřeba výstroje výruba bude malá, avšak postup TBM nebudé rychlý a bude častá potřeba výměny řezných nástrojů.

Porovnání záznamů o všech výchozech v Q-histogramu A, použitých k posouzení kvality horninového masívu na tunelu Sever s plánovanou délkou 9,6 km, je uvedeno na obr. 9a, a výsledek měření zaměřených na pásmá oslabení, provedených na vzorcích ze šesti vrtů, je na obr. 9b. Jak bylo uvedeno výše, výsledky několika kilometrů seismických refrakčních profilů byly konečným zdrojem pro modelování Q_{TBM} tří tříd horniny v pásmech oslabení, která následně snížila průměrné rychlosti. Záznamy o jádrových vzorcích byly formou „kontroly kvality“ výsledků refrakční seismiky.

PROČ MOHOU PORUCHOVÁ PÁSMA TAK VÝRAZNĚ ZPOMALOVAT RAŽBU TBM

Bohužel existují velmi dobré teoreticko-empirické důvody, proč jsou velké poruchové zóny tak obtížné pro stroje TBM (s dvojitým štítem nebo bez něj). (Teoreticko-empirický znamená, že nedostatek důvěry bude penalizován.) Pro začátek potřebujeme tři základní rovnice. Z předchozí diskuse vyplývá:

$$AR = PR @ U, \text{ kde } U = T^m \quad (\text{obr. 3})$$

(Z důvodu snižujícího se využití srostoucím časem se rychlosť postupu snižuje, avšak v menším celkovém rozsahu u TBM s dvojitým štítem pohybujícím se odtlačováním od ostění, kde hodnota $-m$ může být téměř poloviční: viz dále.) Evidentně čas T potřebný pro vyražení délky L se musí rovnat L/AR u všech tunelů a všech strojů TBM:

$$T = L / AR \quad (5)$$

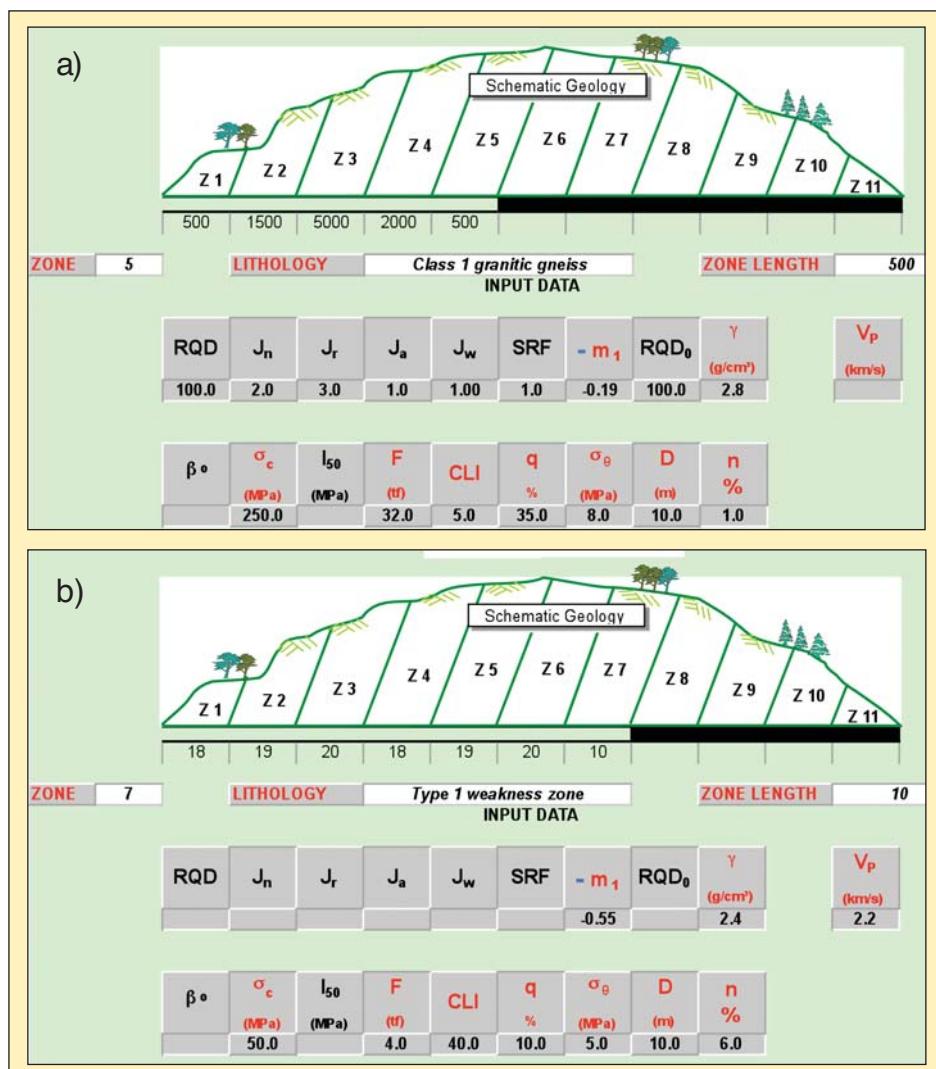
Máme tedy následující vztah:

$$T = L / (PR \times T^m) \quad (6)$$

Ten se dá upravit takto:

$$T = (L/PR)^{1/(1+m)} \quad (6)$$

Tato rovnice je pro stroje TBM velmi důležitá, zvláště pokud se



Obr. IIa, IIb Obrazovka srovnávající vstupní data pro horninový masív nejlepší kvality s daty pro pásmá oslabení. Spodní číslo ukazuje simulaci 500 m dlouhého úseku na tunelu Sever, tvoreného horninovým masivem třídy 1. Následující pásmá (nebo kombinované délky) zařazená do stejných předpokládaných tříd, 5, 4, 3, 2 a 1 (od nejhorší k nejlepší) plus třídy různých pásem oslabení modelovaný tunel postupně doplňují Fig. II a and b. The contrasting input data screens for best quality rock mass and weakness zones. The lower figure shows the simulation of 500 m of Tunnel North, consisting of Class 1 rock mass. Successive zones (or combined lengths) of the same assumed rock classes 5 (poorest), 4, 3, 2 and 1 (best, as in the figure), plus the various weakness zone classes, gradually complete the modeled tunnel

comparably steep ($-m$) deceleration gradients as in the (mostly) open-gripper data base of Barton, 2000, as was synthesised in Figure 3. The gradient of deceleration seen in the input data ($-m = -0.66$) is appropriate to the low velocity of 2.2 km/s, which represents an appropriately low Q-value, as can be seen in Figure 12.

The cumulative time for the nine simulated weakness zones is nearly three months. In these simulations, no pre-treatment has been modelled: neither the delay caused by pre-injection (doubled $-m$, approx: see shortest arrow in Figure 3), nor the faster boring through improved rock on either side of a weakness zone, nor the faster boring through the ‘Q-improved-by-grouting’ weakness zone itself. (For a discussion of the possibility of effectively improving Q-parameters, and therefore the effective Q-value itself, by high pressure particulate pre-grouting, using for instance micro-cements with micro-silica, see Barton, 2004.)

Figure 13 shows examples of the Q_{TBM} simulations for the planned 9.6 km long Tunnel North, showing the contrast of open-gripper and double-shield predicted performance, with nine weakness zones to be added to either solution. The reduced gradients of deceleration ($-m$) seen in the case of the double-shield machine, are based on the back-analysed results of four TBM (two Wirth, and two Herrenknecht machines) which ‘competed’ with each other over a tunneled distance of 14 km each. (Adif, 2005). These four machines eventually formed twin tunnels of 28 km length during about 30 to 33 months of

přijme tvrzení, že existuje silný vztah mezi gradientem zpomalení (-) m a hodnotami Q v poruchových zónách, jak je vidět z empirických dat na obr. 3. Rovnice 6 je důležitá, jelikož záporné hodnoty (-) m téměř dosahující (-)1,0, činí hodnotu složky $1/(1+m)$ příliš velkou.

Je-li poruchová zóna široká (velké L) a rychlosť pronikání PR je malá (z důvodu problémů s uchycovacími rozpěrnými písty, závalů apod.), stává se poměr L/PR příliš velikým na to, aby se v rovnici (6) dala tolerovat velká hodnota složky $1/(1+m)$. Je snadné (vlastně až moc snadné) vypočítat pomocí „teoreticko-empirické“ rovnice téměř neomezený čas pro průchod poruchovou zónou. To také v mnoha, málo oznamovaných, případech odpovídá realitě.

Autor tohoto příspěvku ví o třech natrvalo poříbených TBM nebo TBM zničených poruchami (Pont Ventoux, Dul Hasti, Pinglin). Existuje mnoho neoznámených, avšak v soukromí zmínovaných případů, jejichž příčiny mají nějakým způsobem vztah k logice skryté v rovnici (6). Zdá se, že tato rovnice dosud chybí v ostatní literatuře, jelikož se zdá, že nevyhnutelnost zpomalení dosud nebyla akceptována jako užitečná metoda kvantifikování sníženého využití s rostoucím časem.

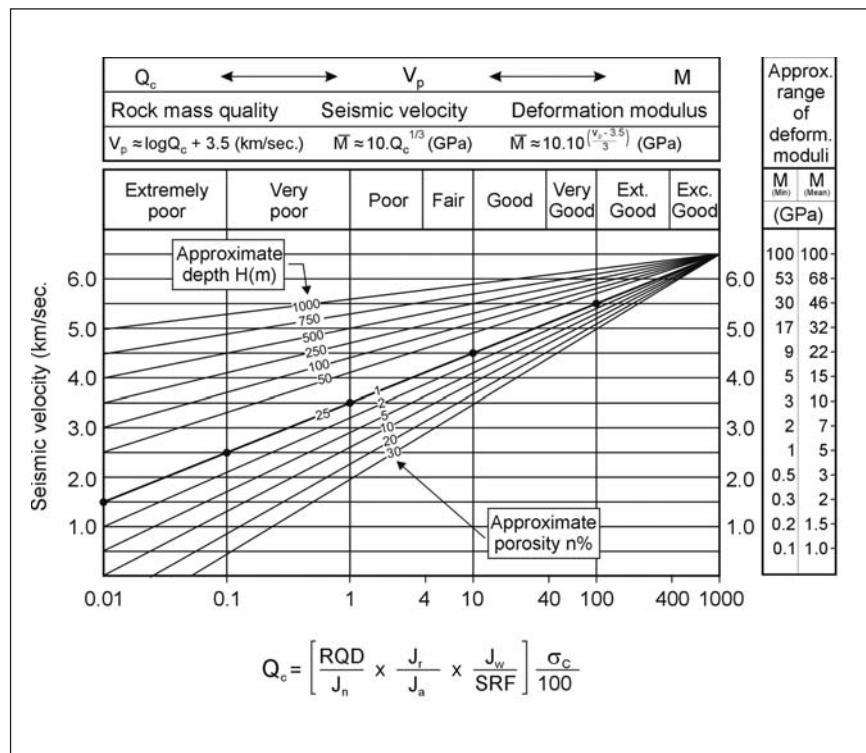
TBM musí sledovat zápornou hodnotu m , i když se překonávají světové rekordy, jako 16 km za jeden rok nebo 2,5 km za jeden měsíc, dokonce i 120 m za 24 hodin, jelikož i zde je rychlosť pronikání PR určitě větší než implikovaná pozoruhodná průměrná rychlosť postupu AR 5 m/hod po rekordní dobu 24 hodin. Nejvyšší čára s výkony světových rekordů na obr. 3 proto také ukazuje zpomalení, avšak s méně strmým gradientem (- m).

PROGNÓZY POMOCÍ Q_{TBM}

U každého z plánovaných tunelů mezi Oslo a Ski se porovnaly prognózy při použití TBM bez štítu a TBM s dvojitým štítem, kde pevná konstrukce prefabrikovaného skládaného ostění spolu s přítlakem umožněným uchycovacími rozpěrnými písty umožňuje použití velmi rychlé metody ražení. Tato nákladnější metoda má možnou výhodu přeměny eventuálně nedostatečné rychlosťi pronikání PR (z důvodu tvrdosti horniny) na dostatečnou rychlosť postupu AR vysokým využitím, bez ohledu na časté výměny řezných nástrojů. Při vhodném řešení těsnících pásků může i zajistit vodo-těsný a plně vystrojený tunel (po několika počátečních průsacích v prvních 10 až 15 metrech od čela výruba). Tato metoda již byla s pozoruhodným úspěchem použita na několika dalších stavbách rychlostních tratí procházejících skalními horninami.

Pokus o předběžnou prognózu Q_{TBM} pro 9 km dlouhý tunel Sever byl proveden s předpokladem existence dvou dlouhých úseků s homogenní granitickou tonalitickou rulou (obr. 10). Simulace s konvenčním TBM bez štítu a potřebou následného ostění (kotvy + síť + definitivní drátkobeton) pomocí konvenčního gradientu zpomalení (- m) vedla ke nejdélší čáre (viz kostka po 1,5 roku: „uspokojivý výkon“, zatímco druhá „polovina“ se modelovala s předpokladem stroje TBM s dvojitým štítem a s použitím přiměřeně zmenšeného gradientu (- m), což vedlo k „dobrému“ výkonu rážby kratší než jeden rok – viz hvězda).

K témtu rozdílu se dospělo navzdory střední řezné síle řezného nástroje 28 tnf, respektive 26 tnf, vedoucí k rozdílu spárovaným v rychlosťi pronikání PR. Co se týká nejkratší, strmě klesající čáry, 20 m širokým pásmem oslabení se sníženou kvalitou se pravděpodobně pronikalo s příliš velkým řezným přítlakem během „jednoho dne“, avšak je-li možné zajistit v této době vystrojení tunelu, je snížený požadavek na „stand-up time“ (dobu, po kterou může výrub zůstat nezajištěný měřenou od posledné instalovaného zajistění), pozitivním. Nakonec se modelovalo širší, 50 m široké významnější pásmo oslabení, bez použití předstihového zlepšování (tj. s použitím stejných spátných vlastností, jaké byly zaznamenány v imaginárním jádrovém vrtu). Toto neošetřené pásmo oslabení „končilo“ projekt (čára hodně dole pod osou x) z důvodu „teore-



Obr. 12 Pomocí tohoto empirického diagramu se mohou rychlosti vln P použít v simulaci pásem oslabení dát do vztahu s hodnotami Q . Kdyby se byly seismické rychlosti měřily ve větší hloubce, vykázaly by vyšší hodnoty, avšak hodnoty Q by se možná nezlepšily. Vyšší byly pouze moduly deformace, Barton, 2002, 2006

Fig. 12. The P-wave velocities used in the simulation of weakness zones can be related to Q -values, using this empirical diagram. If seismic velocities had been measured at greater depth they would have shown higher values, but Q -values might not be improved, just deformation moduli would be higher. Barton, 2002, 2006

tunneling, linking Madrid to Segovia through predominantly gneissic and very abrasive rock masses, also with high cover under the two principal mountain chains.

All four machines were double-shield, giving simultaneous lining and improved efficiency also through wide, but partly pre-treated fault zones. Tough-sounding mean-PR of only about 2 m/hr were nearly converted to ‘good’ final performance, due to these reduced gradients of deceleration, roughly following the trend of the long arrow seen in Figure 3. This was despite cutter change on average each 2.7 to 3.0 m of tunnel advance, and the need for continuous water-cooling of the cutter head.

Figure 14 reproduces the range of input data for the five rock classes used to model Tunnel North, specifically for the double-shield simulation. Note that the assumed initial values of the deceleration gradients (- m) are consistent with approximately half the gradients seen in Figures 3 and 4, due to the greater efficiency achieved in general, with double-shield TBM. The input data is followed by calculation of the various parameters needed to calculate the individual values of Q_{TBM} , which is related to PR and AR as below. The estimate of rock mass compressive strength is (of course) approximate, since no one knows these values, but it is sufficiently of the right magnitude to give a useful comparison with the applied cutter force.

$$\text{PR} = 5 (Q_{\text{TBM}})^{-1/5} \text{ (m/hr)} \quad (7)$$

$$\text{AR} = 5 (Q_{\text{TBM}})^{-1/5} T^{-m} \text{ (m/hr)} \quad (8)$$

$$\text{SIGMA} = 5 \sqrt[3]{Q_{\text{TBM}}} \text{ (MPa)} \quad (9)$$

Modelled rock mass strength (SIGMA) ranged from 19 to 101 MPa in each simulation of the five assumed rock mass classes, due mainly due to large variation in Q -value, and also due to a moderate range of UCS or σ_c values.

“*ticko-empirické*“ logiky rovnice 6, takže čára pro kumulovaný čas není vynesena, protože není prakticky zajímavá.

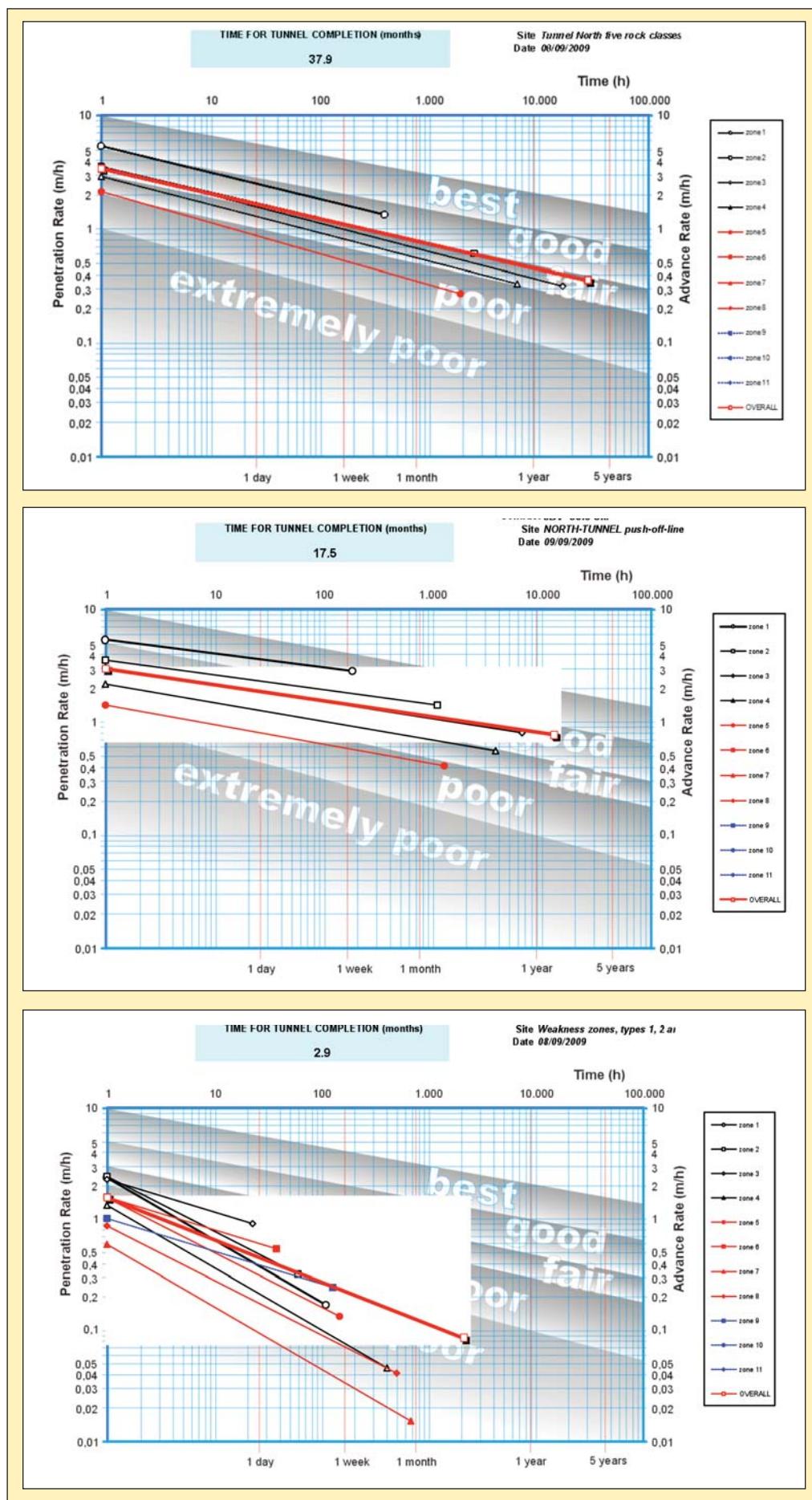
Na obr. 11a je znázorněna obrazovka se vstupními daty pro poslední z pěti tříd horninového masívu, používaných pro definování pravděpodobného rozsahu kvality na tunelu Sever. Jak je možno si všimnout, prvních šest parametrů je (témař) rovno konvenčním parametrem Q, avšak se specifickými požadavky na uvážení tříd RQD ve vodorovném směru (směr pohledu) a nejraději také ve směru plánované ražby. Anisotropní rozdělení tříd RQD zaznamenaných konvenčně ve svíslých vrtech proto představuje potenciální zdroj chyb, je-li používáno pro predikci rychlosti pronikání PR.

Na obr. 11b je znázorněna obrazovka se vstupními daty pro jedno z devíti pásem oslabení, které bylo modelováno.

U varianty s jednodílným štítem opírajícím se o ostění, kde je potřeba stavět následná kola ostění před přestavěním rozpěrných pístů, se předpokládá, že má srovnatelně strmé gradienty zpomalení ($-m$) jako u databáze Bartona, 2000 pro TBM (většinou) bez štítu, jak bylo syntetizováno na obr. 3. Gradient zpomalení uvedený mezi vstupními daty ($-m = -0,66$) je vhodný pro nízkou rychlosť 2,2 km/s, což, jak je vidět na obr. 12, představuje vhodně nízkou hodnotu Q.

Kumulovaný čas pro devět simulovaných pásem oslabení je témař tří měsíce. V těchto simulacích se nemodelovaly žádné předstihové úpravy ani zpozdění kvůli předstihové injektáži (přibližně dvojnásobné $-m$: viz nejkratší modelovaná šipka na obr. 3), ani obtížnější ražba v hornině zlepšené na obou stranách zóny oslabení, ani rychlejší ražba v samotné zóně oslabení s hodnotami Q zlepšenými injektáží. (Diskuse možnosti efektivního zlepšení parametrů Q, a tedy samotné efektivní hodnoty Q, pomocí vysokotlaké předstihové injektáže s použitím drobných částic, například mikrocementu s mikrosilikou - viz Barton, 2004.)

Na obr. 13 jsou příklady simulací Q_{TBM} pro plánovaný 9,6 km dlouhý tunel Sever, ukazující kontrast mezi předpovídánymi výkony TBM bez štítu a TBM s dvojitým štítem (ke každému řešení je nutno přidat devět pásem oslabení). Zmenšené gradienty zpomalení ($-m$), které jsou vidět v případě TBM s dvojitým štítem, jsou založeny na zpětné analýze výsledků čtyř strojů TBM (dva stroje Wirth a dva stroje Herrenknecht), které spolu soutěžily, každý na délce ražby 14 km (Adif, 2005). Tyto čtyři stroje nakonec vytvořily dvoutrubní



Obr. 13a, 13b, 13c Příklady simulací pro plánovaný 9,6 km dlouhý tunel Sever, na kterých je vidět rozdíl mezi předpovídánými výkony TBM bez štítu a TBM s dvojitým štítem (ke každému řešení je nutno přidat devět pásem oslabení)
Fig. 13. a, b and c. Examples of Q_{TBM} simulations for the planned 9.6 km long Tunnel North, showing the contrast of open-gripper and double-shield predicted performance, with nine weakness zones to be added to either solution

tunely o délce 28 km během 30 až 33 měsíců ražení, spojující Madrid se Segovií, procházející převážně rulovými, vysoko abrazivními horninovými masivy včetně vysokého nadloží pod dvěma hlavními horskými pásmi.

Všechny čtyři stroje měly dvojitý štit, který současně produkoval ostění. Účinnost byla zlepšena i při průchodu širokými ale částečně předstihově upravenými poruchovými pásmi. Tvrz znející průměrná rychlosť pronikání PR pouze kolem 2 m/hod byla v důsledku těchto snížených gradientů zpomalení téměř přeměněna na „dobrý“ konečný výkon, sledující zhruba trend *dlouhé šipky* na obr. 3. Bylo tomu tak navzdory výměnám řezných nástrojů v průměru po každých 2,7 až 3 m postupu štítu a potřebě trvalého chlazení řezné hlavy vodou.

Obr. 14 reproducuje rozsah vstupních údajů pro pět tříd horniny, použitých při modelování tunelu Sever, konkrétně pro simulaci TBM s dvojitým štitem. Všimněte si, že předpokládané počáteční hodnoty gradientů zpomalení ($-m$) odpovídají z důvodu obecně dosažené vyšší efektivity u TBM s dvojitým štitem přibližně polovině gradientů na obr. 3 a obr. 4. Vstupní data jsou následována výpočtem různých parametrů potřebných pro výpočet jednotlivých hodnot Q_{TBM} , který se týká rychlosti pronikání PR a rychlosti postupu AR, jak je uvedeno dále. Odhad pevnosti horninového masivu v tlaku je (samozřejmě) přibližný, jelikož tyto hodnoty nikdo nezná, ale jeho velikost je dostatečně správná na to, aby se došlo k použitelnému srovnání s aplikovanou řeznou silou řezného nástroje.

$$PR = 5 (Q_{TBM})^{-1/5} \text{ (m/hod)} \quad (7)$$

$$AR = 5 (Q_{TBM})^{-1/5} T \cdot m \text{ (m/hod)} \quad (8)$$

$$\text{SIGMA} = 5 \gamma Q_c^{1/3} \text{ (MPa)} \quad (9)$$

Modelovaná pevnost horninového masivu (SIGMA) se při každé simulaci pěti předpokládaných tříd horniny pohybovala od 19 do 101 Mpa, hlavně z důvodu velkého kolísání hodnoty Q a také z důvodu nevelkého rozsahu pevnosti v prostém tlaku UCS nebo hodnot σ_c .

ZÁVĚRY

Díky dalekosáhlému zkoumání případů použití strojů TBM a rozsáhlému vývoji (metodou pokus–omyl) metody prognózování nazvané Q_{TBM} (podrobnejí Barton, 2000) je možné vypočítat trendy rychlosti pronikání PR, rychlosti postupu AR a doby ražby T pro ražbu stroji TBM v různých třídách horninového masivu (popsaných pomocí Q) a v různých pásmech oslabení (popsaných pomocí Q nebo V_p). Při výpočtech, prováděných jednoduchým programem se snadným zadáváním vstupních dat grafickými výstupy PR-T-AR pro každou doménu a pro celý simulovaný tunel, se používají různé důležité parametry komplexu stroj–hornina, jako je řezná síla nástrojů, pevnost horninového masivu (vycházející z pevnosti v prostém tlaku UCS a hodnot Q), koeficient životnosti řezného nástroje, obsah křemene a půrovitost horniny.

The screenshot displays four tables from the QTBM software:

- INPUT DATA**: Shows parameters for five rock classes (Class 1 to Class 5) including Lithology, RQD, joint parameters (Jn, Jr, Ja, Jw), SRF, and m1, RQD0, Y.
- BASIC CALCULATION**: Shows calculated values for Stability (Q, Q0), Oriented (Qc), Rock Mass Strength (QT, SIGMAOM, SIGMATM, SIGMA), and SIGMA.
- PERFORMANCE**: Shows overall performance metrics for each rock class, including PR, AR, Time to Advance, and Overall Performance (ΣL, ΣT).
- Contract**: Details the contract site (JBV Oslo-Ski, NORTH-TUNNEL push-off-liner technology, 09-Sep-09).

Below these tables is a table for **GRADIENT** values:

Q	GRADIENT
TBM	m
0.79	-0.12
6.11	-0.13
13.49	-0.15
71.86	-0.17
615.15	-0.17
0.00	0.00
0.00	0.00
0.00	0.00
0.00	0.00
0.00	0.00

Obr. 14a, 14b Tabulkové uspořádání pro čtenáře, kteří mají zájem o zkontrolování předpokladů celého rozsahu vstupních dat pro pět tříd horniny použitých při modelování tunelu Sever, konkrétně pro simulaci TBM s dvojitým štitem. Všimněte si toho, že předpokládané počáteční hodnoty gradientů zpomalení ($-m$) odpovídají přibližně jedné polovině gradientů znázorněných na obr. 3 a 4, a to z toho důvodu, že TBM s dvojitým štitem dosahuje obecně větší účinnost

Fig. 14 a and b. Tabulation for interested readers, who can check the whole range of input data assumptions for the five rock classes used to model Tunnel North, specifically for the double-shield simulation. Note that the assumed initial values of the deceleration gradients ($-m$) are consistent with approximately half the gradients seen in Figures 3 and 4, due to the greater efficiency achieved in general, with double-shield TBM

HLavním zjištěním a kvantifikace plynoucí z analýzy 145 případů, představujících asi 1000 km ražeb většinou strojí TBM bez štítu je zjištění nevyhnutelnosti snížení rychlosti postupu ražby s nářustum časového intervalu, i když zácvik na začátku prací je účinný. Klesající využití U se kvantifikuje jako T^m , s gradientem ($-m$) na počátku daným hodnotou Q tam, kde jsou horninové poměry velmi špatné, avšak většinou v kvalitnějších horninových masivech daným poměry abraze řezných nástrojů.

Na stavbě železničních tunelů mezi městy Oslo a Ski je velké množství obecně relevantních horninových výchozů, které byly detailně zaneseny do Q-histogramu. Záznamy pokrývaly celkem něco kolem 6 až 7 km horninových výchozů, hlavně v silničních zárezech, v celkem 39 oblastech, kdy každá oblast obsahovala 8 až 9 samostatných horninových výchozů. Kromě toho se provedlo selektivní zaznamenání nedávných jádrových vrtů s kontrolou záznamů na místě, v úsecích se špatnou kvalitou, v sedmi různých vrtech provedených tak, aby procházely pásmeny oslabení.

Nejčastějším typem horniny byla podle záznamů granitická tonalitická rula, méně často se vyskytovaly křemité rula a živcová rula, granitická rula a amfibolity s pevností UCS > 300 MPa. Pro modelování prognóz pro stroje TBM se charakteristiky všech těchto horninových typů popsaly pomocí pěti tříd Q (Q1 až Q5), s dalšími třídami pro pásmo oslabení (Typy 1, 2 a 3, nebo nominální Q6, Q7 a Q8). Předpokládané třídy horninového masivu Q1 až Q5, s předpokladem třídy Q1 ve větší hloubce a Q5 v menší hloubce, představovaly rozsahy kvality $Q > 100$, $Q = 100-40$, $Q = 40-10$, $Q = 10-4$ a $Q = 4-1$.

Vstupní data pro modelování reprezentativních pásem oslabení, která měla reprezentovat tyto tři konečné třídy, byla získána ze statistické analýzy měření rychlosti Vp při refrakční seismice. Bylo zjištěno, že střední hodnoty rychlostí pro tři hlavní skupiny pásem oslabení byly 2,2, 2,7 a 3,4 km/sec, s průměrnou šírkou od 18 do 20 m, která se ale na celkem 2,4 km měřících profilů pohybovala od 6 do 40 m. Pro kontrolu hodnot Q a rychlostí vln P byly k dispozici i jádrové vzorky. Tyto jádrové vrtby byly odkloněny tak, aby procházely pásmeny oslabení. Metodou Q_{TBM} se modelovalo devět pásem oslabení, v „generické“ studii, pomocí různých předpokladů pro řeznou sílu F.

Dalšími důležitými vstupními daty pro vytvoření modelů různých tříd horniny pro analýzu Q_{TBM} byly dvě akce univerzity SINTEF v Trondheimu, kdy se prováděly laboratorní zkoušky vlastností neporušené horniny pro společnosti JBV a Multiconsult s použitím jádrových vzorků a ručně odebraných/blokových vzorků. Obzvláště se využily informace o pevnosti UCS, obsahu křemene a koeficientu životnosti řezného nástroje CLI. Koeficient CLI se v modelování prognózy Q_{TBM} používá dvakrát. U pěti „normálních“ tříd horniny Q1 až Q5 se pevnost v tlaku UCS pohybovala od 250 MPa (u Q1) do 150 MPa (u Q5), obsah křemene od 35 (u Q1) do 25 % (u Q5) a CLI od 5 (u Q1) do 15 (u Q5).

Modelování Q_{TBM} se provádělo na 9,5 km horninového masivu pro tunel Sever a 7,7 km horninového masivu pro tunel Jih (včetně odpočtu startovacích komor). Pásma oslabení se v současném modelování modelovala samostatně, jelikož jejich rozsah je v současné době předmětem pokračujících studií. Podle současných předpokladů se pásmá oslabení mohou vyskytovat v délce 100–200 m na každém tunelu, což dává předpokládanou délku 9,6 km a 7,9 km pro pozdější kombinované modelování.

Modelování Q_{TBM} se na každém tunelu provádělo v rozdělení na dvě části: nejprve se předpokládala (nejpomalejší) varianta s TBM bez štítu, kde dochází k časovým ztrátám při provádění nezbytného zajištění výrubu skrz prstový štít TBM nebo za ním a při přestavování rozpěrných pístů na konci každého posunu vpřed, které vedly k zvyšování rychlosti postupu AR. Databáze 145 případů/1000 km od Bartona, 2000 tvořila základ pro modelování zpomalení/využití v závislosti na čase a na kvalitě horniny v této první sadě modelování pro TBM bez štítu.

Ve druhé části se předpokládal stroj TBM s dvojitým štítem s kontinuální montáží ostění z betonových dílců v koncovém štítu, v optimálním provedení s dostatečně masivními prvky pro dodatkové použití technologie pro posunování jednoho štítu odtlačováním od ostění před vstupem do pásem oslabení, při průchodu těmito pásmeny a za nimi. Tato kombinace je předpokladem pro polokontinuální ražení mezi prováděním potřebné

CONCLUSIONS

As a result of a wide-reaching review of TBM case records, and extensive trial and error development of a prognosis method called Q_{TBM} (detailed in Barton, 2000), it is possible to calculate the PR, AR and time-for-tunnelling T trends for TBM tunnelling through different rock mass classes (described by Q) and through different weakness zones (described by Q or VP). Various essential machine-rock parameters such as cutter force, rock mass strength (based on UCS and Q), cutter life index, quartz content, rock porosity, and the estimated biaxial stress concentration at the tunnel face are used in the calculations, which are performed by a simple program, with a user friendly input data keyboard, and graphic PR-T-AR performance for each domain, and for the whole simulated tunnel.

A key finding and quantification from the analysis of 145 cases representing about 1000 km of mostly open-gripper TBM machines, is the inevitable decline in advance rate with time interval, despite learning curve efficiencies at the start. The declining utilization U is quantified as T^m , with the gradient ($-m$) initially given by the Q-value where rock conditions are very poor, but mostly by cutter abrasion terms in the better quality rock masses.

The Oslo-Ski rail-tunnel project has a large number of generally relevant rock exposures, which were Q-histogram logged in detail. A total of between 6 and 7 km of rock exposures, mostly road cuttings, were logged in a total of 39 areas, each area containing some 8 or 9 separate rock exposures. In addition a selective logging of recent borehole core was performed, with ‘spot-check’ logging of poor-quality sections in seven different holes drilled to pass through weakness zones.

The most frequent rock type logged was the granitic tonalitic gneiss, with lesser frequencies of quartz- and feldspar-rich gneiss, granitic gneiss, and amphibolites, with UCS > 300 MPa.. For the TBM prognosis modelling, the characteristics of all these rock types were effectively represented in the chosen five Q-classes (Q1 to Q5), with an additional three weakness-zone classes (Type 1, 2 and 3, or nominal Q6, Q7 and Q8). The assumed Q1 to Q5 rock mass classes, assuming Q1 at greater depth, and Q5 at shallower depth, represented quality ranges of $Q > 100$, $Q = 100-40$, $Q = 40-10$, $Q = 10-4$, and $Q = 4-1$.

The input data for modelling representative weakness zones to represent these final three classes was obtained from ‘statistical’ analysis of the refraction seismic measurements of VP. Velocities of 2,2, 2,7 and 3,4 km/s were found to be the mean values for three major groups of weakness zones, with mean widths typically from 18 to 20 m, but varying from 6 to 40 m in a present total of 2,4 km of profiles. Drill-core was also available for cross-checking Q-values and P-wave velocities. These drill-holes were deviated to cross the weakness zones. Nine weakness zones were modelled with the Q_{TBM} method, in a ‘generic’ type study, using various cutter force F assumptions.

Other essential input data for setting up the models of the various rock classes for Q_{TBM} analysis, were the two SINTEF (Trondheim) campaigns of laboratory testing of intact rock properties for JBV and Multiconsult, using core samples and hand/block samples respectively. Particular use was made of UCS, quartz content, and cutter life index: CLI is used twice in the Q_{TBM} prognosis modelling. In the five ‘normal rock’ classes Q1 to Q5, UCS was varied respectively from 250 MPa down to 150 MPa, quartz content from 35 down to 25%, and CLI from 5 up to 15.

The Q_{TBM} modelling was performed on 9,5 km of rock mass for Tunnel-North, and 7,7 km of rock mass for Tunnel-South (with subtraction of start-chambers included). Weakness zones were modelled separately in the present modelling, as their extent is currently under continued study. An assumed-at-present 100–200 m of weakness zones may occur in each tunnel, giving assumed 9,6 km and 7,9 km lengths for later combined modelling.

The Q_{TBM} modelling was performed in two parts for each tunnel: firstly assuming the (slowest) option of open-gripper TBM, with time lost in necessary support through/behind the finger-shield and when resetting the grippers at the end of each stroke,

údržby a výměny řezných nástrojů, a když se neřeší různé problému v pásmech oslabení (průzkumné vryty před čelbu, předstihová injektáž, další zajišťování výrubu, uvolňování řezné hlavy apod.).

Trendy zpomalení předpokládané v této druhé sadě modelů se touto účinnou technikou, založenou hlavně na záznamech minulých ražeb v období let 2003 – 2005 v rulách a granitech na tunelech Guadarrama ve Španělsku, kde čtyři stroje TBM provedly 56 km ražeb, zmenšily zhruba na polovinu. Celkově tyto tunely procházely ve velké části trasy rulami a trohou granitů, pod vysokým nadložím. Životnost řezných nástrojů byla velmi krátká, v průměru menší než 3 m postupu ražby na výměnu nástroje. Rychlosť pronikání PR byla nejčastěji kolem 2 m/hod.

Nicméně tunely se dokončily asi za 30–33 měsíců, s průměrnou konečnou rychlosťí postupu přibližně 0,55 m/hod. To představuje gradient zpomalení ($-m$) z rychlosťi pronikání PR na rychlosť postupu AR při rostoucím času v průměru -0,12, avšak někdy až -0,09, dokonce i -0,08. Bylo zjištěno, že díky schopnosti polokontinuální ražby, pracuje-li se v uspořádání s dvojitým štítem (65–85 % času), byly tyto hodnoty přibližně poloviční ve srovnání s hodnotami u TBM bez štítu, kde se přítlak získává pouze pomocí rozprávých pístů, kde není žádné zařízení pro posunování odtlačování od ostění při průchodu nekvalitní horninou.

Dále budou uvedeny pouze výsledky modelování tunelu Sever o délce 9,5 km. Tento tunel „prochází“ předpokládanými pěti třídami horniny, v proměnlivé hloubce, nejprve s použitím TBM bez štítu a potom následovala druhá simulace pro TBM s dvojitým štítem respektive s jednoduchým štítem, s možností posunu odtlačování od ostění v nekvalitní hornině. Tyto dvě simulace potřebovaly první 37,9 měsíce a druhá 17,5 měsíce pro průchod všemi z následujících úseků o délkách 500 m, 2000 m, 5000 m, 1500 m a 500 m, řazených do zvolených pěti tříd horniny Q1 až Q5. Rychlosť pronikání PR se pohybovala od 2,1 do 5,3 m/hod, při řezné síle nástrojů pohybující se od 32 tnf u třídy Q1 až do 22 tnf u třídy Q5. V případě modelu TBM s dvojitým štítem, respektive s jednoduchým štítem s možností posunu odtlačování od ostění se rychlosť pronikání PR pohybovala od 1,4 do 5,3 m/hod. Modelovaná pevnost horninového masivu (SIGMA) se v každé simulaci pohybovala od 19 do 101 MPa. Odpovídající hodnoty Q_{TBM} se pohybovaly od 0,8 do 77 u TBM bez štítu a od 0,8 do 615 (velmi tvrdá) při použití TBM s dvojitým štítem respektive s jednoduchým štítem, s možností posunu odtlačování od ostění, byl předpokládaný přítlak v třídách Q1, Q2 a Q3 omezen na 26 tnf na jeden řezný nástroj z důvodu předpokladu, že se použije ostění s „optimalizovanou“ tloušťkou s přihlédnutím k tomu, že horninové masivy převážně s $Q = 10-30$ by ve skutečnosti vyžadovaly pouze minimální vystrojení výrubu.

NICK BARTON, nickrbarton@hotmail.com,
NICK BARTON & ASSOCIATES, Oslo

each increasing AR. A 145 cases/1000 km data base from Barton, 2000 formed the basis for time-and-rock-quality-dependent deceleration/utilization in this first set of open-gripper TBM modelling.

Secondly, double-shield TBM with continuous PC-element liner construction in the tail-shield was assumed, incorporating the optimal design of sufficiently robust elements for the supplementary use of single-shield push-off-liner techniques before, through, and following fault zones. This combination makes for a semi-continuous boring, between maintenance and cutter-change needs, and when not tackling diverse problems in ‘zones’ (probe-drilling, pre-injection, additional support, freeing cutter-head, etc.).

The deceleration trends assumed in this second set of models were roughly halved with this efficient technique, based in particular on a 56 km and four-TBM case record of recent 2003-2005 tunnelling in gneisses and granites at the Guadarrama Tunnels in Spain. In general these tunnels passed through gneisses and some granites, with high cover for a lot of the route. Cutter life was very short, amounting on average to less than 3 m tunnel advance per cutter change. PR was most frequently about 2 m/hr.

Nevertheless the tunnels were completed in about 30-33 months, with an average final AR of about 0.55 m/hr. This represents a deceleration gradient ($-m$) from PR to AR for increasing time periods, that averaged about -0.12, but sometimes was as low as -0.09, even -0.08. These values, because of the ability for ‘semi-continuous’ boring when in double-shield mode (65-85% of the time), were found to be about half those of conventional open-gripper TBM with cyclic thrust only from grippers, since with no push-off-liner facilities for poor ground.

Just the results of modelling Tunnel-North of 9.5 km length will be given here. This ‘passed through’ an assumed five rock classes, at variable depth, firstly with open-gripper TBM, then a second simulation by double-shield/single-shield TBM with the push-off-liner option for bad ground. These two simulations needed respectively 37.9 and 17.5 months for passing through all the following stretches of 500m, 2000m, 5000m, 1500m and 500m of the five chosen rock classes Q1 to Q5. PR varied from 2.1 to 5.3 m/hr, with cutter force F varied respectively from 32 to 22 tnf. In the case of double-shield/single-shield with push-off-liner model, PR varied from 1.4 to 5.3 m hr. Modelled rock mass strength (SIGMA) ranged from 19 to 101 MPa in each simulation. Corresponding Q_{TBM} values varied from 0.8 to 77 with open-gripper TBM, and varied from 0.8 to 615 (very tough) when double-shield/single-shield TBM with push-off-liner thrust limited to 26 tnf. per cutter assumed in Classes Q1, Q2 and Q3, due to the assumption of using an ‘optimised’ liner thickness, bearing in mind that the predominantly $Q = 10-30$ rock masses would actually need minimal support.

NICK BARTON, nickrbarton@hotmail.com,
NICK BARTON & ASSOCIATES, Oslo

LITERATURA / REFERENCES

- ADIF. 2005. *Guadarrama Base Tunnel*. Ministerio de Fomento, Madrid, Španělsko.
- Barton, N. 1995. *The influence of joint properties in modelling jointed rock masses*. Hlavní přednáška, 8. Kongres ISRM, Tokyo, 3: 1023-1032, Balkema , Rotterdam.
- Barton, N. 2000. *TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock*. 173 s. Balkema, Rotterdam.
- Barton, N. 2001. *Are long tunnels faster by TBM?* Proc. Rapid Excavation and Tunnelling Conf. RETC, San Diego, USA. Soc. Min. Eng., 819-828.
- Barton, N. 2002. *Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design*. In J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol. 39/2:185-216.
- Barton, N. and Abrahao, R. 2003. *Employing the QTBM prognosis model*. Tunnels and Tunnelling International, 20-23, prosinec.
- Barton, N. 2004. *The theory behind high pressure grouting*. Tunnels & Tunnelling International, září str. 28-30, říjen str. 33-35.
- Barton, N. 2006. *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*. Taylor & Francis, UK & Netherlands, 729 str.