

# RAŽBY V PORUCHOVÝCH ZÓNÁCH – PROBLÉMY A JEJICH ŘEŠENÍ

## TUNNELLING IN FAULT ZONES – PROBLEMS AND SOLUTIONS

WULF SCHUBERT

### ABSTRAKT

Při ražbách tunelů v poruchových zónách s velkou výškou nadloží jsou často pozorovány velké deformace. To, zda způsobují problémy, velmi záleží na použitém přístupu. Problémy spočívají v předpovídání očekávaných deformací před zahájením ražby, tak aby se nenarušil průjezdný profil, a ve volbě charakteristik výztuže odpovídajících přetvořením. Ostění ze stříkaného betonu může bez porušení udržet přetvoření přibližně 0,5 % až 1 %. Přetvoření přesahující tuto hodnotu vede k porušení ostění a ztrátě odolnosti, která způsobuje další přetvoření. Bylo vytvořeno kritérium pro kritickou výšku nadloží u uzavřených ostění. Jako vylepšení otevřených trhlin byly vyvinuty poddajné prvky umožňující velká přetvoření a řízený vývoj odolnosti výztuže. Musí se brát v úvahu vývoj posunutí i reologické chování výztuže výrubu. Při použití standardních injektovaných svorníků existuje možnost, že se „čerstvá“ injektážní hmota usmykne v důsledku velkých počátečních rychlostí přetvoření. Vyšší tolerance k přetvoření je umožňována speciálně navrženými svorníky. Důležitý je monitoring kvality a hodnocení aktuálních dat umožňující předvídání změn horninových poměrů před čelem výrubu. Vývoj deformací pro různé rychlosti postupu a různé druhy výstroje se dá předpovídat pomocí empirických vztahů.

### ABSTRACT

When tunnelling through fault zones with large overburden depth, large displacements are frequently observed. Whether this causes problems very much depends on the approach used. Challenges are the prediction of the expected displacements prior to excavation in order not to violate the clearance profile, as well as choosing support characteristics compatible with the strains. Shotcrete linings can sustain a strain of approximately 0.5% to 1% without failure. Strain above this value inevitably leads to failure of the lining and a loss of resistance, causing additional displacements. A criterion for a critical overburden depth for closed linings has been developed. As an improvement to open slots, yielding elements have been developed, allowing large strains and controlled development of support resistance. The development of the displacements, as well as the rheological behaviour of the supports must be considered. Using standard grouted bolts, a potential that the “fresh” grout is sheared due to the initially large strain rates exists. Special bolt designs allow for a higher strain tolerance. Quality monitoring and up-to-date data evaluation is of crucial importance, allowing the prediction of changes in the ground conditions ahead of the face. With the help of empirical relations, the development of the displacements for different advance rates and supports can be predicted.

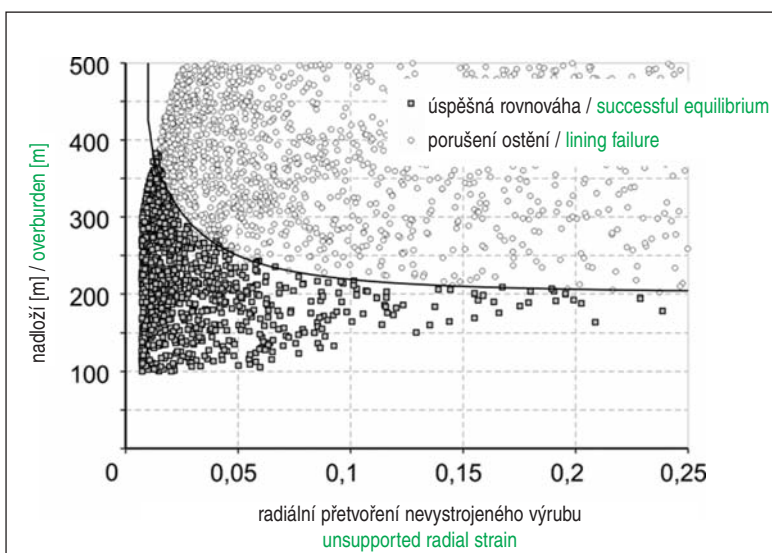
### 1. CO JE TLAČIVOST?

„Tlačivost horniny (squeezing)“ je široce používaný pojem. Problém je, že neexistuje žádná uspokojivá definice tlačivosti. Někdo tvrdí, že tlačivost se objeví, když je hornina nadměrně namáhána (Jethwa et al., 1984), nebo když se překročí „kritické přetvoření“ u nezajištěných tunelů (Aydan et al., 1993; Hoek, 2001). Toto nemůže být pravdivé tvrzení, jelikož hornina je často nadměrně namáhána i u mělkých tunelů v zemině, ale v takových případech o tlačivosti hovo-

### 1. WHAT IS SQUEEZING?

The term “squeezing” is widely used. The problem is that there is no satisfying definition of squeezing. Some claim that squeezing occurs when the ground is overstressed (Jethwa et al., 1984) or when a “critical strain” for unsupported tunnels is exceeded (Aydan et al., 1993; Hoek, 2001). This cannot hold true, as also for shallow tunnels in soil, the ground frequently is overstressed, but nobody would talk about squeezing in such cases. The same problem arises, when so-called classification systems are used to identify squeezing (Goel et al., 1995; Sing et al., 1997). Others think, squeezing is characterized by long lasting and large displacements, but do not provide any threshold values for the magnitude of displacements or the duration of displacements (Barla, 2001). The latter publication at least mentions that the installed support plays a major role. All those approaches do not address the real problem, namely that conventional linings cannot sustain large strains, and as a consequence, linings fail.

A criterion for squeezing cannot be reasonably established solely on ground conditions, since there is always interaction between the deforming ground and the installed support. Depending on the support characteristics, problems with the lining will develop or not. In order to address this issue, a novel approach has been taken: the maximum capacity of a continuous shotcrete lining has been determined by accounting for its rheological behaviour, and put in relation



Obr. 1 Stanovení kritického nadloží metodou vzorkování Monte Carlo  
Fig. 1 Determination of critical overburden by Monte Carlo sampling

Tab. 1 Parametry definující kritické nadloží

|                          | $X [-]$ | $\varepsilon_0 [-]$ | $H_0$ | $H^*$ |
|--------------------------|---------|---------------------|-------|-------|
| plnoprofilová ražba      | 0,062   | 0,035               | 100   | 680   |
| přístropí                | 0,062   | 0,045               | 100   | 680   |
| přístropí s protiklenbou | 0,030   | 0,030               | 75    | 375   |

řit nelze. Stejný problém nastává, když se tak zvané klasifikační systémy používají pro identifikaci tlačivosti (Goel et al., 1995; Sing et al., 1997). Lze se domnívat, že tlačivost je charakterizována dlouhotrvajícími a velkými deformacemi, ale nikde nejsou uvedeny žádné prahové hodnoty pro velikost anebo trvání deformace (Barla, 2001). Poslední zmíněná publikace alespoň uvádí, že velkou roli hraje použitá výztuž. Všechny tyto přístupy neřeší skutečný problém, jmenovitě to, že uzavřená (konvenční) ostění nemohou snést velká přetvoření a v jejich důsledku selhávají.

Kritérium pro tlačivost se nedá vytvořit pouze podle horninových poměrů, jelikož vzájemné působení mezi deformující se horninou a použitým vyztužením výrubu existuje vždy. Problémy s ostěním se buď vytvoří, nebo nevytvoří, podle charakteristik výztuže. Aby se dal tento problém řešit, byl použit nový přístup: maximální únosnost uzavřeného ostění ze stříkaného betonu je stanovována s přihlédnutím k jeho reologickému chování a je dáována do souvislosti s různými (rozumnými) horninovými poměry (Radoncic, 2011). K zjištění, zda je možná rovnováha mezi horninovým masivem a výztuží výrubu, lze použít maximální únosnost obálky ze stříkaného betonu, čímž se obejde problém přesné rovnováhy. Tímto způsobem je možné stanovit kritické nadloží pro takové typy vystrojení výrubu. Na obr. 1 je výsledek počítán s užitím metody Monte Carlo. Odvozenou funkcí ukazuje rovnice 1. Parametry této funkce byly vyhodnocovány pro ražbu na celý profil, ražbu přístropí a přístropí s dočasnou protiklenbou ze stříkaného betonu (tab. 1).

$$H_{crit} = (H_0 + H^* \tan \phi) - 75 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{X}{X + \varepsilon - \varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

kde je

$H_{crit}$  výška nadloží, do kterého je možné použít uzavřená ostění;

$\varepsilon$  přetvoření nevystrojeného výrubu;

$\varepsilon_0, X, H^*, H_0$  parametry vhodné pro oblouk.

Tabulka 1 ukazuje, že vztah funguje dobře pro třecí úhly horniny do 30°. Při vyšší hodnotě se výsledky stávají nepřesnými v důsledku předpokladů přijatých s ohledem na deformovatelnost horniny. I když tento přístup není perfektní, řeší problém uzavřených ostění s omezenou schopností snášet přetvoření.

## 2. STRATEGIE RAŽBY A VYSTROJENÍ VÝRUBU

Již desítky let je známo, že zesilování ostění je účinné pouze do určité míry. Rabcewicz (1944) uvádí: „... i pro primární ostění je to marný pokus vyrovnat se s velkým horninovým tlakem použitím tuhých a těžkých systémů vystrojení, protože ty by byly nevyhnutelně zničeny.“ Ve své knize Rabcewicz také doporučuje několik strategií pro ražbu a vystrojení výrubu, mimo jiné instalaci poddajné výztuže, jak to bylo úspěšně používáno při práci v dolech. Rabcewicz

Table 1 Parameters defining the critical overburden

|                         | $X [-]$ | $\varepsilon_0 [-]$ | $H_0$ | $H^*$ |
|-------------------------|---------|---------------------|-------|-------|
| full face excavation    | 0.062   | 0.035               | 100   | 680   |
| top heading             | 0.062   | 0.045               | 100   | 680   |
| top heading with invert | 0.030   | 0.030               | 75    | 375   |

to various (reasonable) ground conditions (Radoncic, 2011). The maximum work capacity envelope of shotcrete can be used to determine whether equilibrium between the rock mass and support is possible, while circumventing the issue of exact equilibrium. In this way, a critical overburden for such support types can be determined. Figure 1 shows the result of the Monte Carlo sampling. Equation 1 shows the derived function. The function parameters have been evaluated for full face, top heading, and top heading excavation with temporary shotcrete invert (Table 1).

$$H_{crit} = (H_0 + H^* \tan \phi) - 75 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{X}{X + \varepsilon - \varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

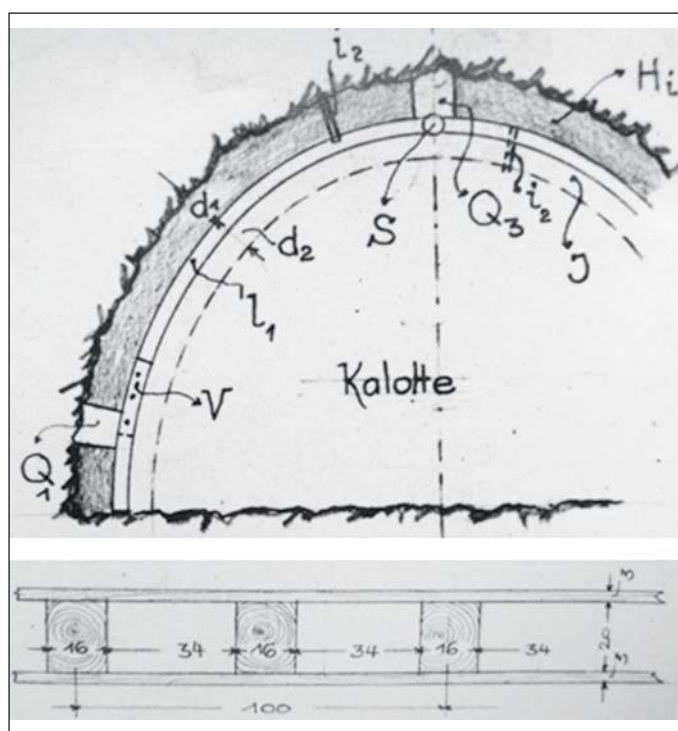
where

$H_{crit}$  overburden depth, up to which closed linings can be used;

$\varepsilon$  strain of unsupported tunnel;

$\varepsilon_0, X, H^*, H_0$  curve fitting parameters.

It has shown that the relation works well for friction angles of the rock mass up to 30°. Beyond that, the results become fuzzy, caused by assumptions made with respect to the deformability of the ground. Although this approach is not perfect, it addresses the problem of closed linings having a limited strain tolerance. For shotcrete the critical strain is somewhere in the range of 0.5% to 1.0%.



Obr. 2 Poddajné ostění z betonu s poddajnými dřevěnými prvky Q (Rabcewicz, 1950)

Fig. 2 Ductile lining with concrete support and timber yielding elements Q (Rabcewicz, 1950)





Obr. 3 Otevřené mezery v ostění ze stříkaného betonu na tunelu Inntal v Rakousku

Fig. 3 Open gaps in shotcrete lining at the Inntaltunnel, Austria

(1950) navrhl kombinaci betonového ostění a poddajných dřevěných prvků (obr. 2).

Jakmile je dosažena kritická deformace uzavřeného ostění, je nutné použít jiné strategie ražby a vyztužování. Otázky, které se mají řešit, jsou zajištění dostatečné výztuže bránící rozpadu horniny, zajištění celistvosti výztuže i v případě velkých přetvoření a zajištění dostatečné tolerance pro deformaci, aby nedocházelo k narušení průřezného profilu. Požadovaná celistvost prvků výztuže během deformace se netýká pouze běžně užívaného stříkaného betonu, ale i ocelových oblouků a horninových svorníků.

Pro několik alpských tunelů byl zvolen pragmatický přístup – pouze vynechání otevřených štěrbin v ostění ze stříkaného betonu, tedy umožnění sledování deformace masivu ostěním bez jeho poškození (Pöchhacker, 1974; Rabcewicz, 1975; Schubert, 1993; Schubert, 1996). Na obr. 3 je vidět použití takových otevřených štěrbin v ostění ze stříkaného betonu na tunelu Inntal v Rakousku. Na tomto tunelu došlo k radiální deformaci až do 100 cm v poruchové zóně křížící tunel na délce téměř 2000 m. Vyztužení bylo tvořeno 20–25 cm silným ostěním ze stříkaného betonu, ocelovými oblouky z U-profilů s poddajnými spojkami, hustě instalovanými injektovanými svorníky o délce 6 až 8 metrů a svařovanými sítěmi.

I když se tato metoda ukázala jako úspěšná, má několik nedostatků. Jednou z nevýhod je to, že z důvodu štěrbin ostění nevyvine velký odpor, tedy ve skutečnosti nesníží deformace. S relativně velkými radiálními deformacemi je spojené výrazné smykové posunutí mezi ostěním a horninou, obzvláště v blízkosti otevřených štěrbin, což vyvolává velká stříhová zatížení horninových svorníků, které občas selžou, což je nebezpečné pro personál a stroje.

Při vyšetřování havárie na tunelu Galgenberg (Schubert & Riedmüller, 1995) došlo k zajímavému zjištění, které se týkalo funkce injektovaných svorníků vystavených velkým deformacím horniny. Největší míry deformace se vyskytují v blízkosti čela výrubu, kde jsou instalovány horninové svorníky. Velké smykové přetvoření může vést ke smykovému porušení ještě čerstvé injekční směsi. Vyšetřování provedené v Institutu pro mechaniku hornin a tunelování Technické univerzity Graz

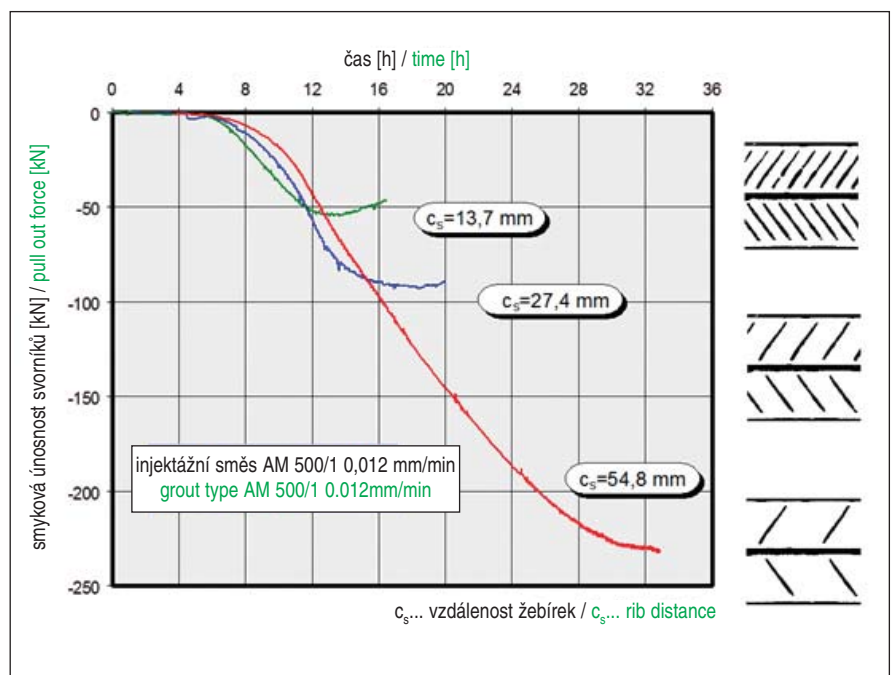
## 2. EXCAVATION AND SUPPORT STRATEGIES

It is well known since decades that strengthening of supports is only effective up to a certain limit. Rabcewicz (1944) states: "... also for primary supports it is a futile attempt to cope with high ground pressure by adopting stiff and heavy supports, as those would be inevitably destroyed." In his book, Rabcewicz also recommends several strategies for excavation and support, amongst others the installation of a ductile support, as had been successfully applied in mining operations. Rabcewicz (1950) proposed a combination of a concrete lining and yielding timber elements (Figure 2).

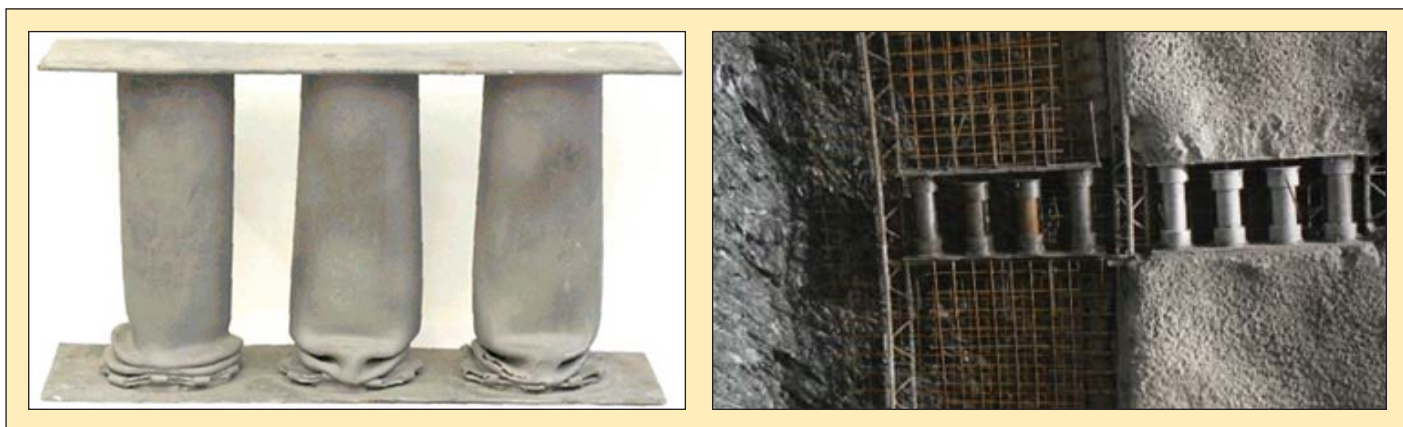
Once conventional linings reach the critical strain, different excavation and support strategies have to be applied. Issues to be addressed are providing enough support to prevent disintegration of the rock mass, maintain support integrity also in case of large strains, and provide enough deformation tolerance to ensure not violating the clearance profile. The required integrity of the support elements during the deformation process not only applies to the commonly used shotcrete, but also to steel arches and bolts.

A pragmatic approach was chosen for several Alpine tunnels by just leaving open gaps in the shotcrete lining, thus enabling the lining to follow the deformation without being damaged (Pöchhacker, 1974; Rabcewicz, 1975; Schubert, 1993; Schubert, 1996). Figure 3 shows the application of such open slots in the shotcrete lining at the Inntaltunnel, Austria. At this tunnel radial displacements up to 100cm occurred in a fault zone, which the tunnel crossed on a length of nearly 2,000m. Support consisted of a shotcrete lining with a thickness from 20 to 25cm, dense bolting with grouted bolts in a length of 6 to 8m, U-shaped steel arches with sliding couplings, and wire mesh.

Although this method proved to be successful, it has several drawbacks. One of the disadvantages is that the lining, due to the open slots does not develop much resistance, thus not really reducing displacements. Associated with the relatively large radial displacements is a pronounced shear displacement between lining and rock mass, in particular close to



Obr. 4 Vliv vzdálenosti žebírek na odpor injektovaných svorníků proti vytažení (Blümel, 1996)  
Fig. 4 Influence of rib distance on the pull out force of grouted bolts (Blümel, 1996)



Obr. 5 Skupina poddajných prvků, nalevo první generace instalovaná v poruchové zóně na tunelu Galgenberg v Rakousku; napravo zlepšený systém použitý například na Tauerském tunelu

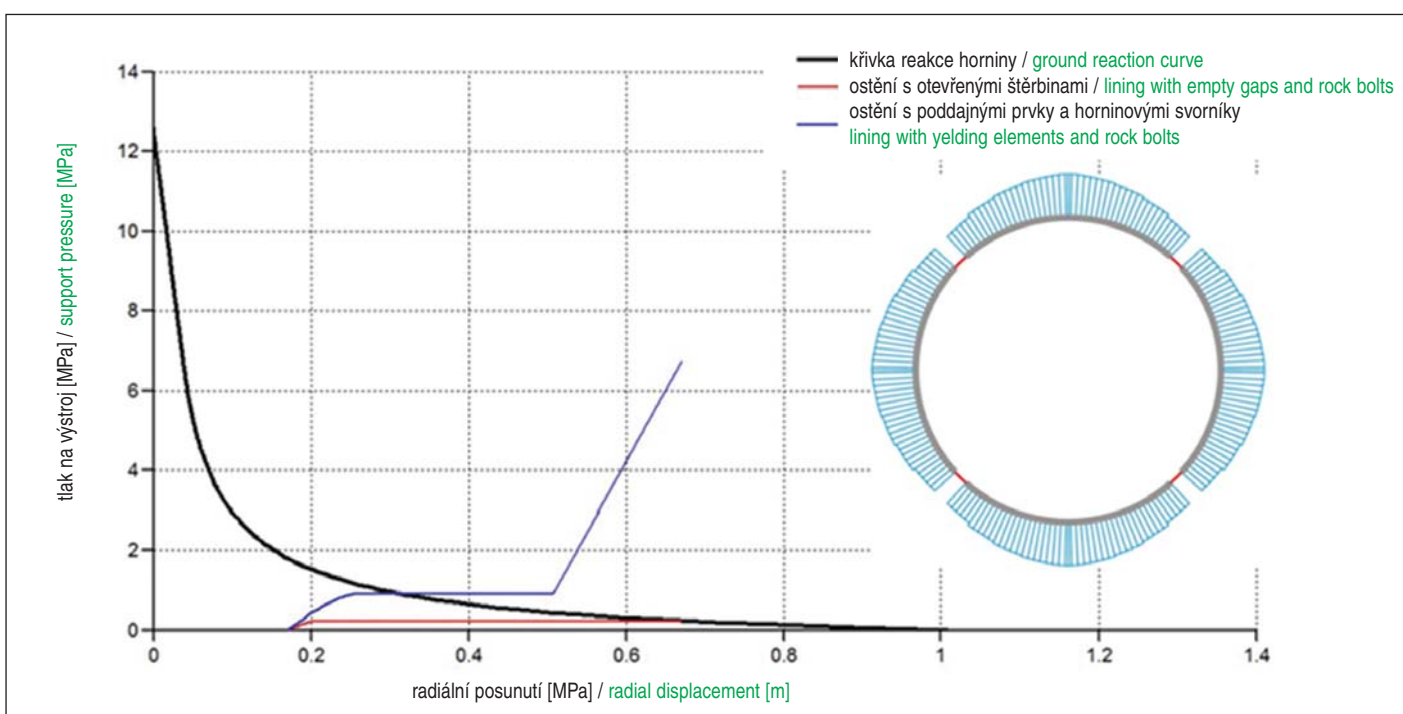
Fig. 5 Group of ductile elements, left first generation as installed in a fault zoen at the Galgenbergtunnel, Austria; right improved system, as used for example at the Tauertunnel

zjistilo, že vzdálenost mezi žebírky na povrchu svorníků má vliv na velikost smykové únosnosti na jejich plášti (Blümel, 1996). Na obr. 4 jsou výsledky laboratorních zkoušek únosnosti svorníků při různé vzdálenosti žebříků. Je vidět, že čím větší je vzdálenost žebříků, tím větší je smyková únosnost na plášti svorníku. To ukazuje význam sledování toho, aby byly všechny komponenty kompatibilní s velkými přetvořeními.

Běžně se v tlačivých horninách používají ocelové rámy. Ty musí být všechny navrhovány tak, aby se hodily pro velké deformace. V minulosti se dávala přednost U-profilům, které umožňovaly prokluzování spojek, pokud nebyly příliš utažené. Nevýhodou tohoto prvku je, že přilnavost stříkaného betonu je špatná, což často vede k oddělení ocelových rámu od ostění. Poddajné styky se mohou dosáhnout i u I-profilů pomocí speciálních kluzných spojek. V Rakousku byla myšlenka kluzných spojek opuštěna a již několik let se používají nepřerušované příhradové rámy, které se deformují ve šterbinách.

the open slots, causing strong shear loads in the bolts, which occasionally fail, being a hazard for the crew and equipment.

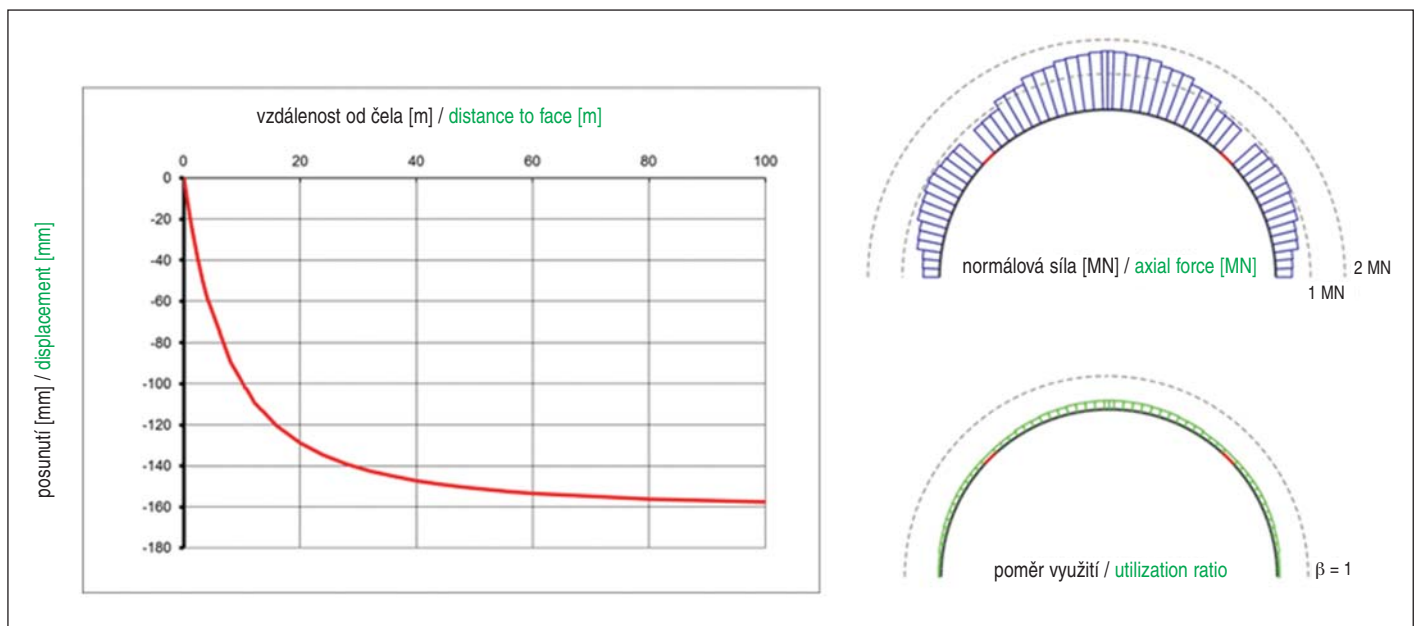
An interesting finding concerning the performance of grouted bolts exposed to large ground displacements was made, when investigating a collapse at the Galgenbergtunnel (Schubert & Riedmüller, 1995). The highest displacement rates occur close to the face, where the bolts are installed. The large shear strain can lead to shear failure of the still fresh grout. An investigation conducted at the Institute for Rock Mechanics and Tunnelling at the Graz University of Technology revealed that the bolts rib distance and geometry control whether the grout is sheared off (Blümel, 1996). Figure 4 shows results of laboratory pull out tests with bolts with different rib distance. It can be seen that the larger the rib distance, the larger is the resistance of the bolt. This highlights the importance to take care that all components are compatible with the large strains.



Obr. 6 Srovnání deformací vypočtených pro výztuž s otevřenými šterbinami a výztuž s poddajnými prvky; je zřetelné zvýšení odporu výztuže a jeho významného účinku na deformaci v případě užití poddajných prvků; napravo normálová síla v ostění (Radončić, 2011)

Fig. 6 Comparison of calculated displacements for support with open slots, and support with yielding elements; note the increase in support resistance and its significant effect on the displacements, when using ductile elements; right: developed thrust in the lining (Radončić, 2011)





Obr. 7 Hodnocení normálové síly v ostění a stupeň využití postupu ražby kaloty  
 Fig. 7 Evaluation of thrust in the lining and utilization ratio of a top heading advance

Pro ostění s otevřenými štěrbinami byly vyvinuty poddajné prvky. Jsou nedílnou součástí ostění a umožňují vývoj normálových sil v ostění, čímž zajišťují odpor proti deformacím horniny. Charakteristiky poddajných prvků byly zvoleny tak, aby se přihlíželo k očekávanému vývoji deformací a k časově závislým vlastnostem stříkaného betonu. Jelikož vývoj deformací silně závisí na rychlosti ražby, měl by se brát v úvahu i tento parametr. První poddajné prvky byly v Rakousku instalovány v poruchové zóně tunelu Galgenberg (obr. 5 nalevo). Byly to skupiny ocelových trubek instalovaných s osami ve směru obvodu (Schubert, 1996). Ukázalo to, že deformace se mohou významně snížit díky aktivaci odporu výztuže. I když se tento systém ukázal jako účinný, jeho slabou stránkou byl silně kolísající odpor v důsledku boulení trubek (Moritz, 1999).

Zlepšený systém těchto prvků (obr. 5 napravo) se používá na mnoha stavbách po celém světě. Přírůstky ve srovnání s původním systémem spočívají ve zvýšené absorpci energie, což vede k vyšší účinnosti. Praktické zkušenosti ukazují na snížení deformací nejméně o 50 % ve srovnání se systémem s otevřenými štěrbinami. Tím se nejenom zvyšuje bezpečnost, ale zmenšuje se i požadavek na rozšíření profilu výrubu a zmenšují se negativní vedlejší účinky, jako je přestřihávání svorníků. V současné době se vyvíjí další generace poddajných prvků s vyšší účinností, snadnějším přizpůsobením podmínkám stavby a nižšími výrobními náklady.

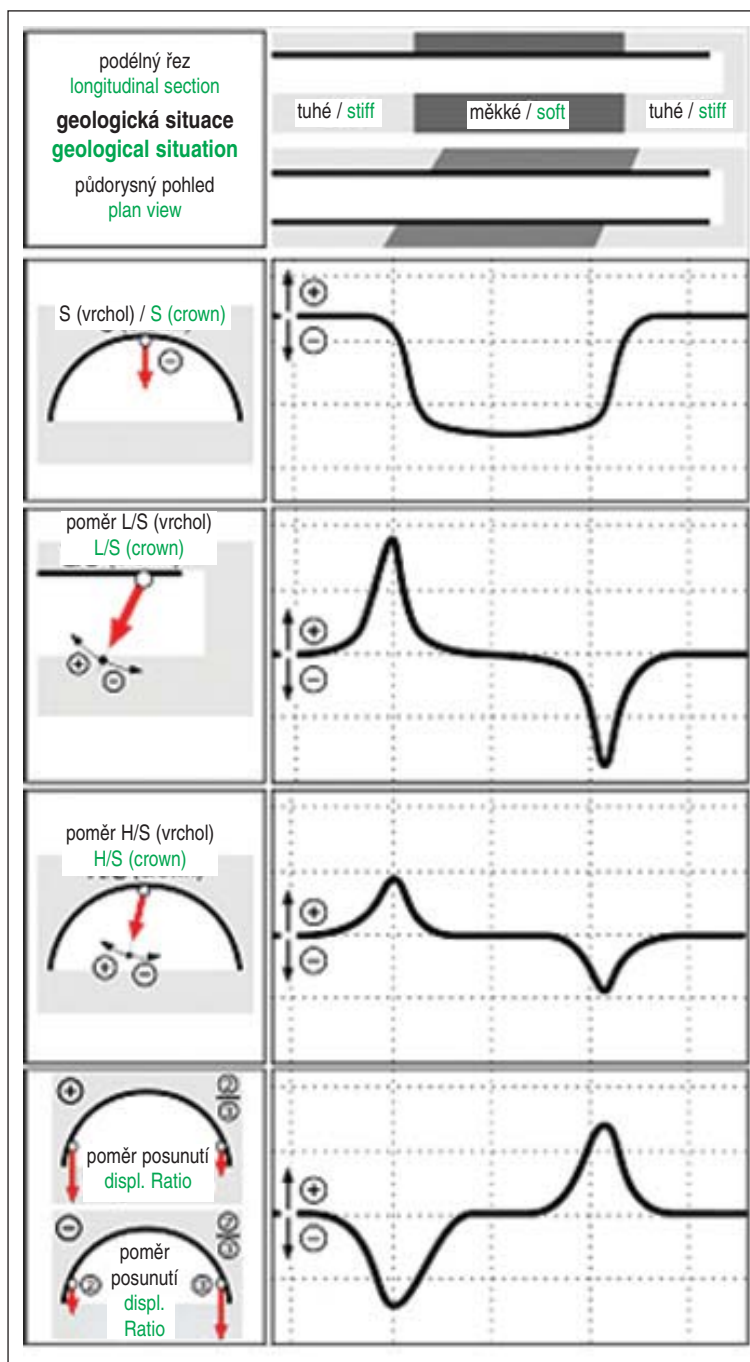
Výzkumníci v Institutu mechaniky hornin a tunelování vyvinuli metodiku přihlížející k časově závislým vlastnostem stříkaného betonu, vývoji deformací i k účinku svorníků (Radoncic, 2011). Na obr. 6 je srovnání očekávaných deformací u ostění s otevřenými deformačními štěrbinami a ostění s integrovanými poddajnými prvky a s přihlédnutím k účinku horninových svorníků. Použitím poddajných prvků lze dosáhnout značného zmenšení deformací (přibližně deformace 12 cm při poddajných prvcích ve srovnání s přibližně 40 cm při otevřených štěrbinách po instalaci výstroje).

Program umožňuje hodnocení osových sil a využití ostění v kterémkoliv okamžiku. Je užitečný hlavně v etapě projektování, ale dá se použít i při odhadování úrovně zatížení v ostění během stavby se vstupem v podobě naměřených deformací. Na obr. 7 je osová síla a stupeň využití pro postup ražby

Commonly in poor ground, steel sets are used. Also those have to be designed to be compatible with the large strains. In the past, U-shaped profiles have been preferred, allowing sliding at the couplings, if they are not connected too tight. The disadvantage of this element is that the bond to the shotcrete is poor, frequently leading to disengagement of the steel sets from the lining. Deformable joints can be achieved also with I-shaped profiles, using special sliding couplings. In Austria, the idea of sliding couplings has been abandoned, and since several years simply continuous lattice girders are installed, which deform in the slots.

Realizing the limited capacity of linings with open gaps, ductile elements have been developed. They are integral part of the lining, and shall allow development of axial forces in the lining with displacement, thus providing resistance against ground displacement. The characteristics of the yielding elements have to be chosen in a way to consider the expected displacement development, as well as time dependent shotcrete properties. Because displacement development strongly depends on the excavation rate, also this parameter should be taken into account. First yielding elements in Austria have been installed in a fault zone of the Galgenbergtunnel (Figure 5 left). Those were groups of steel tubes, installed with the axis in circumferential direction (Schubert, 1996). It showed that displacements could be significantly reduced due to the activated support resistance. Although the system showed to be effective, improvements to the elements (Figure 5 right) practically eliminated the strongly oscillating resistance due to buckling of the tubes (Moritz, 1999).

The improved system has been used on many sites around the world. The benefits, compared to the original system are increased energy absorption, leading to more efficiency. Practical experience shows a reduction of at least 50% of the displacements compared to a system with open slots. This not only increases safety, but also reduces the required widening of the excavation profile, and reduces negative side effects, like shearing of bolts. Currently the next generation of ductile elements is under development, featuring higher efficiency, easier adjustment to site-specific conditions and lower production costs.



Obr. 8 Typické změny v trendech a velikostech deformací, když ražba kříží poruchovou zónu

Fig. 8 Typical changes in trends of displacements and displacement ratios when the excavation crosses a weak zone

přístropí s ostěním tvořeným stříkaným betonem, poddajnými prvky a horninovými svorníky 10 dnů po instalaci výztuže.

### 3. MONITORING

Z důvodu nejistot vlastních horninovým modelům je potřebné pečlivé sledování chování systému, aby bylo možné podle něj přizpůsobovat ražbu a výztuž. Zavedení monitoringu absolutních deformací umožnilo mnohem lépe porozumět mechanickým procesům, ke kterým dochází v okolí tunelu během výstavby. Pokročilé metody interpretace dat umožňují zjišťování změn v horninových podmínkách před čelem výrubu a vně viditelné oblasti a předpovídání chování systému na základě několika počátečních měření.

Včasné varování usnadňuje včasné přizpůsobení ražby a výztužení očekávaným podmínkám, jako je zvětšení výrubu v důsled-

Researches at the Institute for Rock Mechanics and Tunnelling developed a methodology, considering transient properties of the shotcrete, displacement development, as well as the contribution of rock bolts (Radoncic, 2011). Figure 6 shows a comparison of the expected displacements for a lining with open deformation slots and a lining with integrated yielding elements, considering also the contribution of the rock bolts. Note the achievable considerable saving in displacements, when using ductile elements (approximately 12cm of displacement with ductile elements against approximately 40cm with open slots after installation of support).

The program allows an assessment of axial force and utilization of the lining at any given time. This is useful primarily during the design stage, but can be used also for estimating the level of loading in a lining during construction with the measured displacements as input. Figure 7 shows axial force and utilization ratio for a top heading advance with a shotcrete-ductile element-rock bolt support 10 days after installation of the support.

### 3. MONITORING

Due to the inherent uncertainties in the ground model, careful observation of the system behaviour is required to be able to adjust excavation and support to the requirements. With the implementation of absolute displacement monitoring techniques, it became possible to obtain much better insight into the mechanical processes occurring around a tunnel during its construction. Advanced techniques of data interpretation allow detecting changes in the ground conditions ahead of the face and outside the visible area, and prediction of the system behaviour based on few initial measurements.

The early warning facilitates a timely adjustment of excavation and support to the expected conditions, like increase of the excavation size to account for expected displacements, changes in the support quality and quantity, etc. After the initial measurements are available and a reliable prediction of the system behaviour is possible, final “fine tuning” of the support and excavation concept is performed (Radoncic, 2011; Sellner, 2000; Schubert & Moritz, 2014). Assessing the trend of the displacement vector orientation is particularly helpful for predicting ground conditions ahead of the face or outside the visible area. Deviations from a normal range always indicate a change in the ground conditions (Schubert & Budil, 1995; Schubert & Steindorfer, 1996; OeGG, 2014).

Figure 8 shows typical changes in displacement trends and trends of displacement ratios for an excavation crossing a fault zone in an oblique angle. The trend of the vertical displacements of the crown (S) shows a significant increase only after the face entered the fault zone, while the trends of the displacement vector orientation (L/S – ratio between longitudinal and vertical displacement and H/S – ratio between horizontal and vertical displacement) already deviate from the normal range some distance ahead of the transition in the ground. Trends of ratios of the vertical displacements of left and right sidewall can be used to identify features, like faults or slickensides close to the tunnel sidewalls, well before they are visible at the face. When combining several trends, also

ku očekávaného zvětšení deformace, změny v kvalitě a množství výztuže apod. Když jsou k dispozici počáteční měření a je možné spolehlivě předpovídat chování systému, provede se „jemné doladění“ koncepce vyztužení a ražby (Radonic, 2011; Sellner, 2000; Schubert & Moritz, 2014). Obzvláště užitečné pro předvídaní horninových poměrů před čelem výrubu a vně viditelné oblasti je hodnocení trendu orientace vektoru deformací. Odchytky od normálního stavu vždy ukazují na změnu horninových poměrů (Schubert & Budil, 1995; Schubert & Steindorfer, 1996; OeGG, 2014).

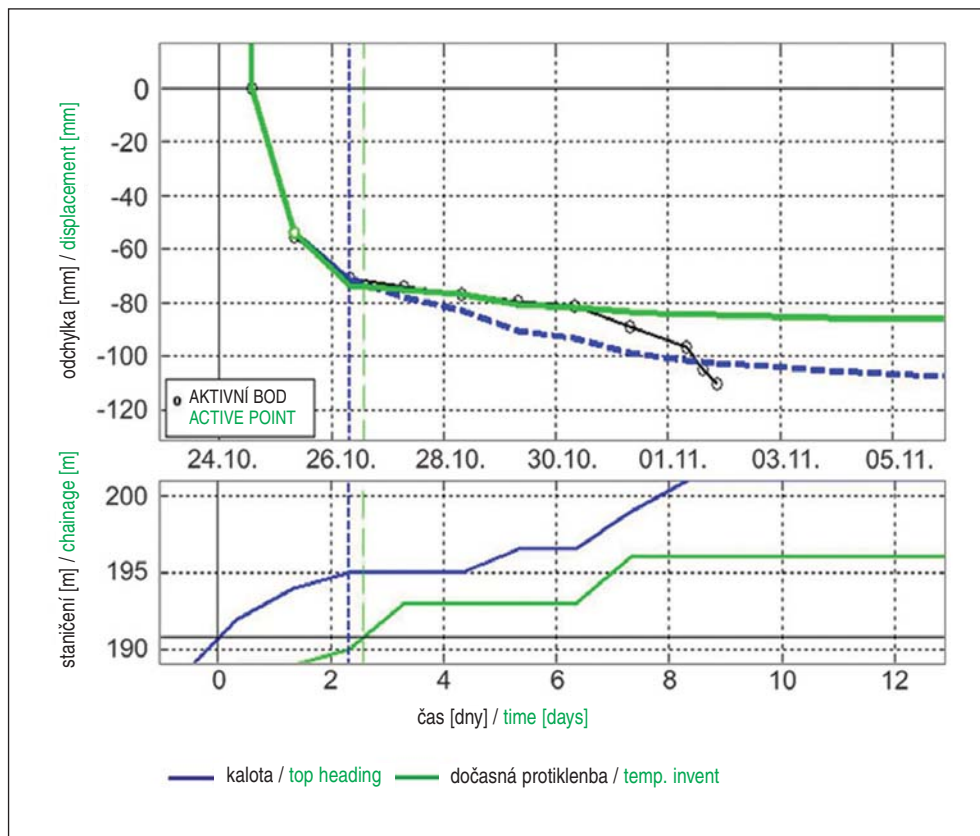
Na obr. 8 jsou typické změny v trendech poměrných deformací pro ražbu procházející poruchovou zónou pod šikmým úhlem. Trend svislých deformací stropu (S) ukazuje na značný nárůst pouze po vstupu čela výrubu do poruchové zóny, zatímco trendy orientace vektoru deformací (poměr L/S mezi podélnou a svislou deformací a poměr H/S mezi horizontální a svislou deformací) se již odchylojí od normálního rozsahu v nějaké vzdálenosti před změnou vlastností horniny. Trendy poměrů mezi svislými deformacemi na levé a pravé stěně výrubu se dají použít pro identifikaci takových znaků, jako jsou zlomy nebo ohlasy v blízkosti boků výrubu, o dost dříve než jsou viditelné na čele výrubu. Když se kombinuje několik trendů, dá se relativně spolehlivě předvídat i prostorová orientace geologického rysu, jako je poruchová zóna. Když se používá systematicky, může předstihové hodnocení údajů monitoringu deformací pomoci v připravenosti na změny horninových podmínek a vyhnout se tak opožděné reakci, nákladným opravám a nehodám.

Předpovídání chování systému na základě hodnocení dat deformací a správnosti empirických funkcí vývoje deformací bylo dále vyvíjeno Sellnerem (2000). Umožňuje velmi spolehlivou krátkodobou analýzu deformací, beroucí v úvahu takové vlivy, jako je tuhost výstroje, různé stavební fáze, jim příslušné pozice čela výrubu a čas. Proto se konečné deformace a možnost narušení průjezdného profilu a nebezpečí porušení ostění ze stříkaného betonu dají zjistit včas a dají se provést protiopatření, jsou-li zapotřebí.

Po předpovědi posunutí ve vztahu k členění výrubu, délce záběru, času a vystrojení se naměřená data importují a chování systému se srovnává s předpovídaným „normálním chováním“. To umožňuje snadné posuzování, zda se systém chová tak, jak by měl. V případě odchýlení od normálu je možná včasná reakce, takže se sníží pravděpodobnost nehod a nákladných oprav. Na obr. 9 je situace, kde se pozorované chování odchyloje od předpovídaného z důvodu poruchy v protiklenbě kaloty.

#### 4. ZÁVĚR

Úspěšná ražba tunelů v poruchových zónách vyžaduje použití speciálních metod. Zesilování výztuže je účinné pouze tehdy,



Obr. 9 Odchylka naměřených deformací (plná čára s kroužky) od deformací předpovídaných pro kalotu s dočasnou protiklenbou

Fig. 9 Deviation of the measured displacements (solid line with circles) from the predicted for a top heading with temporary invert

the spatial orientation of a geological feature, like a fault zone, can be predicted relatively reliably. Systematically applied, an advanced evaluation of displacement monitoring data can assist in being prepared for changes in the ground conditions, and thus help avoiding late reaction, costly repairs and accidents.

The prediction of the system behaviour based on displacement data evaluation and fitting of empirical displacement development functions has been further developed by Sellner (2000). It enables very reliable short-term analysis of the displacements, taking influences such as support stiffness, various construction phases and their respective face positions and time into account. Hence, the final displacements and the potential for a clearance violation and the hazard of overstressing the shotcrete support can be detected on time and countermeasures implemented if required.

After predicting the displacements in relation to construction sequence, advance, time, and support, measured data are imported and the performance of the system compared to the predicted „normal behaviour“. This allows an easy assessment whether the system is behaving as it should. In case of deviation from the normal, a timely reaction is possible, thus reducing the probability of accidents and costly repairs. Figure 9 shows a situation, where the observed behaviour deviated from the predicted due to failure of the top heading invert.

#### 4. CONCLUSION

Successful tunnelling through fault zones requires the application of special methods. Strengthening of supports is only effective if the primary stress is rather low. In all other



když je primární napjatost spíše nízká. Ve všech ostatních případech se doporučuje použití poddajné výztuže. V uplynulých dvou desetiletích bylo vyvinuto značné úsilí zlepšit systémy vyztužování výrubu tak, aby odpovídaly zadaným požadavkům. Doporučuje se vyhybat se neurčitému pojmu „tlačivost“ a raději zaujímat inženýrský přístup, včetně pečlivého popisu hornin, hodnocení chování hornin a ochotně přijímat nekonvenční strategie vyztužování výrubu. Ukazuje se, že techniky pro úspěšné řešení velkých deformací, které jsou spojeny s ražbou tunelů v poruchových zónách, existují a jsou trvale zlepšovány s růstem zkušeností s hlubokými tunely. Z důvodu nejistot při matematickém modelování se za nejučinnější způsob pro úspěšnou ražbu tunelů v nepříznivých podmínkách považuje observační přístup s pečlivým a cíleným monitoringem chování systému a s bezprostředním vyhodnocováním monitoringu.

*Prof. WULF SCHUBERT, schubert@tugraz.at,  
Graz University of Technology*

*Recenzovali / Reviewed: Ing. Václav Veselý,  
Ing. Aristotelis Caravanas*

cases, the application of ductile supports is advisable. Over the past two decades considerable effort has been made to improve support systems to meet the requirements. It is recommended to avoid the fuzzy term of “squeezing”, but rather follow an engineering approach, including a careful rock mass characterization, evaluation of the ground behaviour, and an open mind for unconventional support strategies. It has been shown that techniques for successful dealing with large displacements, as they are associated with tunnelling in fault zones, are available, and are constantly improved, as experience with deep tunnels increases. Due to the inherent uncertainties in the ground model, an observational approach with careful and targeted monitoring of the system behaviour and up to date evaluation of the monitoring is considered the most effective way for successful tunnelling under adverse conditions.

*Prof. WULF SCHUBERT, schubert@tugraz.at,  
Graz University of Technology*

## LITERATURA / REFERENCES

- [1] AYDAN, Ö., AKAGI, T., KAWAMOTO, T. (1993) The squeezing potential of rock around tunnels: theory and prediction. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2. 137-163
- [2] BARLA, G. (2001) Tunnelling under squeezing rock conditions, Eurosummer-School in Tunnel Mechanics Innsbruck, Politecnico di Torino, Torino
- [3] BLÜMEL, M. (1996) Performance of grouted bolts in squeezing rock. In: Barla, G. (ed.), Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering; Proc. EUROCK '96, Vol. 2, Turin, Italien, 2-5 September 1996, pp. 885-891. A.A. Balkema: Rotterdam
- [4] GOEL, R. K., JETHWA, J. L., PAITHAKAN, A. G. (1995) Tunnelling through the young Himalayas – a case history of the Maneri – Uttarkashi power tunnel. *Engineering Geology* 39. 31-44
- [5] HOEK, E. (2001) Big tunnels in bad rock. 36<sup>th</sup> Karl Terzaghi Lecture, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. Seattle
- [6] JETHWA, J. L., SINGH, B., SINGH, B. (1984) Estimation of ultimate rock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions – a new approach. Proc. Design and Performance of Underground Excavations, ISRM Symposium, Cambridge. E.T. Brown and J.A. Hudson (eds.) 231-238
- [7] MORITZ, A. B. (1999) Ductile Support System for Tunnels in Squeezing Rock. In: Riedmüller, Schubert & Semprich (eds.) Publication series Geotechnical Group Graz, Vol. 5
- [8] OeGG, (2014) Geotechnical Monitoring in Conventional Tunnelling, Handbook. OeGG, Salzburg
- [9] PÖCHHACKER, H. (1974) Moderner Tunnelvortrieb in sehr stark druckhaftem Gebirge. *Porr Nachrichten* 57/58
- [10] RABCEWICZ, L. v. (1944) Gebirgsdruck und Tunnelbau. Springer, Vienna
- [11] RABCEWICZ, L. v. (1950) Die Hilfgewölbebauweise. Doctoral thesis, TH – Graz, Austria
- [12] RADONCIC, N. (2011) Tunnel design and prediction of system behaviour in weak ground. In: Dietzel, Kieffer, Schubert, Schweiger & Semprich (eds). Publication series Geotechnical Group Graz, Vol. 43
- [13] SCHUBERT, W. (1993) Erfahrungen bei der Durchörterung einer Großstörung im Inntaltunnel. *Felsbau* 11 (6), pp. 287-290, Essen: Verlag Glückauf
- [14] SCHUBERT, W., RIEDMÜLLER, G. (1995) Geotechnische Nachlese eines Verbruches - Erkenntnisse und Impulse. In: Semprich, S. (ed.), Innovationen in der Geotechnik; Proc. 10. Christian-Veder-Kolloquium, Graz, 20-21 April 1995, pp. 59-68. Institut fuer Bodenmechanik und Grundbau, TU-Graz: Graz
- [15] SCHUBERT, W., BUDIL, A. (1995) The importance of longitudinal deformation in tunneling. In: Fuji (ed) Proceedings of the 8th International Congress on Rock Mechanics (ISRM), Vol. 3, Balkema, Rotterdam
- [16] SCHUBERT, W. (1996) Dealing with squeezing conditions in alpine tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 29 (3), pp. 145-153, Springer: Wien
- [17] SCHUBERT, W., STEINDORFER, A. (1996) Advanced Monitoring Data Evaluation for Tunnels in Poor Rock. In: Barla (ed) Prediction and Performance in Rock Mechanics and Rock Engineering; Proc. EUROCK '96, Vol. 2
- [18] SELLNER, P. (2000) Prediction of Displacements in Tunnelling. In: Riedmüller, Schubert & Semprich (eds.) Publication series Geotechnical Group Graz, Vol. 9
- [19] SINGH, B., GOEL, R. K., JETHWA, J. L., DUBE, A. K. (1997) Support pressure assessment in arched underground openings through poor rock masses. *Engineering Geology* 48, 59-81