

# TECHNICKÉ MOŽNOSTI ZAJIŠTĚNÍ PŘEDPOLÍ RAŽBY VE ZHORŠENÝCH GEOLOGICKÝCH A GEOTECHNICKÝCH PODMÍNKÁCH

## TECHNICAL POSSIBILITIES FOR SECURING TUNNEL PREFACE AREA IN WORSENED GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL CONDITIONS

PETR KUČERA

### ABSTRAKT

*Stávající technologie při ražbách tunelů Novou rakouskou tunelovací metodou (NRTM) umožňují použití řady technických opatření vedoucích ke zvýšení bezpečnosti samotné ražby, ale také životnosti tunelu při jeho provozování. Nejedná se přitom pouze o bezpečnost ražby, ale také o další vlivy vzhledem např. k povrchové zástavbě nebo nákladům na provozování tunelu. Tunel je projektován s životností 100 let a v praxi je jeho časové využití reálně vyšší. Komplexní přístup ke všem těmto aspektům je úkolem projektové přípravy a samotného projektu, který se ovšem neobejde bez vstupních informací a relevantních podkladů, včetně znalostí technických možností a vhodnosti jednotlivých řešení ve vztahu ke geologickým a geotechnickým podmínkám při ražbě tunelů. V článku je na dvou konkrétních příkladech staveb realizace těchto opatření představena.*

### ABSTRACT

*Existing technologies applied during tunnelling operations respecting New Austrian Tunnelling Method (NATM) allow the use of a number of technical measures leading to an increase in the safety of the tunnelling itself, but also in the lifetime of the tunnel during its operation. This is not about the safety of the tunnelling itself, but also about other influences in relation to e.g. surface construction or the cost of operating the tunnel. The tunnel is designed with a lifetime of 100 years and in practice its time use is realistically higher. A comprehensive approach to all these aspects is the task of the project preparation and of the design itself, which however cannot be done without input information and relevant background, including knowledge of technical possibilities and suitability of individual solutions in relation to geological and geotechnical conditions in tunnelling. In the article, the implementation of these measures is presented on two concrete examples of constructions.*

### ÚVOD

Zadavatelé výstavby určitého tunelu obvykle charakterizují základní parametry, které má výsledné dílo splňovat s ohledem na respektování evropských a národních zákonů, směrnic, předpisů a norem. Pokud je zadavatel tunelové stavby osvěceny, nechá vypracovat řadu podkladů tak, aby projekční tým měl tyto komplexní informace k dispozici, a tedy měl i možnost zpracovat zodpovědně vlastní projekt. V ideálním výsledku bude projekt respektovat všechna potenciální rizika podzemní činnosti dotčená nebo s touto činností přímo související.

### BEZPEČNOST RAŽBY TUNELU

Samozřejmě množství vlivů na bezpečnost ražby tunelu a přijatá bezpečnostní opatření při ní samotné jsou v základních parametrech přímo úměrná inženýrskogeologickým a hydrogeologickým podmínkám, povrchovým poměrům na území ovlivněném trasou tunelu, výšce nadloží, kvalitě nadložních vrstev, včetně samotné technologie ražby (obr. 1).

Velmi účinným souborem prvků zajištění bezpečné ražby, který je také s výhodou kombinovaně využíván, je vyztužování nadloží a předpolí raženého tunelu (pre-reinforcement), včetně stabilizujících, těsnících a zpevňujících injektáže (pre-grouting) [2]. Cílem těchto opatření je eliminovat nepříznivé inženýrskogeologické a hydrogeologické poměry, které mají vliv na vznik nadměrných deformací horninového prostředí v předpolí raženého tunelu. Tyto technologie se obvykle kombinují spolu s dalšími opatřeními při vlastní ražbě tunelu jako např. členěním výrubu, zkrácením záběru v kombinaci se zmenšením vzdálenosti prvků vyztuže.

### INTRODUCTION

Investors for the construction of given tunnel typically characterize the basic parameters that the resulting work has to meet with the requirements of respecting European and national laws, directives, regulations and standards. If the investor for the tunnel construction is enlightened, it will have a number of documents drawn up so that the design team has access to this comprehensive information and thus has the opportunity to process the design itself responsibly. Ideally, the design will respect all potential risks of underground activity affected or directly related to this activity.

### SAFETY OF TUNNELLING WORKS

The obvious number of influences on the safety of tunnelling and the safety measures taken in the tunnelling itself are in basic parameters directly proportional to the geological and hydrogeological conditions, surface conditions in the area affected by the tunnel route, the height of the overburden, the quality of the overburden layers, including the tunnelling technology itself (Fig. 1).

In the complex point of view a very effective set of elements to ensure safe excavation, which is also used with advantage, is the reinforcement of the overburden and preface of the tunnel, including stabilising, sealing and pre-grouting [2]. The aim of these measures is to eliminate unfavourable geological and hydrogeological conditions that influence the occurrence of excessive deformation of the rock environment in the preface of the tunnel. These technologies are usually combined with other measures in the actual excavation of the tunnel, such as face sequencing, shortening of the round in combination with a reduction of the distance of the reinforcement elements.

## ZAJIŠTĚNÍ NADLOŽÍ A PŘEDPOLÍ JEHLOVÁNÍM NEBO OCHRANNÝMI DEŠTNÍKY

Pro zajištění nadloží tunelu je možno využít trubkový mikropilotový deštník se systémem zatahovaných pažnic nebo zavrtávaný deštník injekčních tyčí systému SDA (IBO), popř. kombinace obou systémů. Volba typu nebo průměru prvků vždy vychází z aktuálních geotechnických podmínek a stabilitních výpočtů.

K dispozici jsou různá provedení a průměry od obou typů „ocelových“ zajištění od Ø 32 mm do Ø 154 mm. Pokud jsou pro následnou injektáž těchto prvků použity cementové materiály, je vhodné použít aktivované směsi s důrazem na rychlý náběh pevnosti a minimální smrštitelnost, včetně přídržnosti k hornině.

K vyztužování předpolí čelby lze s výhodou použít zavrtávaných nebo vkládaných sklolaminátových prvků. Použití sklolaminátu má oproti ocelovým prvkům výhodu v jejich následné snadnější odstranitelnosti při ražbě. Při použití samozávrtných sklolaminátů (např. typu R32 SPINMAX) je další výhodou rychlost instalace a flexibilita použití, včetně kompatibilitnosti závitů s ocelovými prvky (např. SDA R 32).

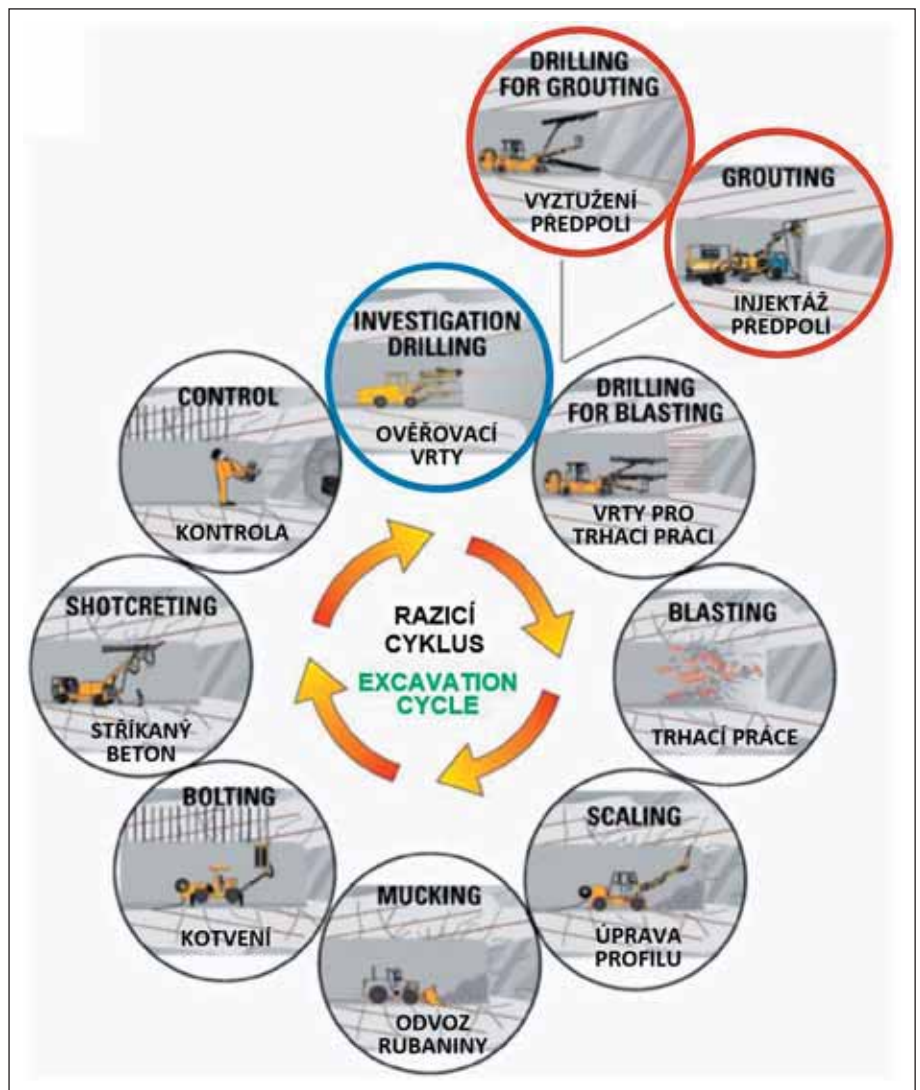
Důležitým faktorem může být při instalaci výše popsaných prvků v určitých geologických podmínkách volba výplachu, kdy standardně používaný vodní výplach musí být nahrazen výplachem např. pěnovým. Při použití pěnového výplachu nedochází k možnému zhoršení smykových parametrů určitých typů hornin v předpolí raženého díla, tak jako u výplachu vodního. V kombinaci zavrtávaných prvků s výplachem do určitého horninového prostředí je rovněž klíčovým parametrem volba typu zavrtávací korunky. Správný typ korunky je podmínkou efektivní instalace všech výše popsaných prvků.

### STABILIZUJÍCÍ, TĚSNICÍ A ZPEVŇUJÍCÍ INJEKTÁŽE CHEMICKÝMI MATERIÁLY

K použití chemických materiálů pro provádění injektáží se přistupuje tehdy, kdy podmínky pro ražbu jsou komplikované různými negativními faktory a technologie konvenčních minerálních (cementových) směsí nedává jistotu nebo technickou možnost jejich použití.

Mezi nejvýznamnější negativní faktory se řadí nepříznivé uložení geologických vrstev, zvodnění okolních hornin s výskytem tlakové podzemní vody, lokální tektonika, tektonicky porušené či zvětralé horniny a nestabilní vrstvy zemin nad obrysem raženého díla. Častá je i kombinace těchto negativních faktorů a použití vhodného typu a technologie chemické injektáže se tak stává nutností.

V rámci ražby tunelů jsou v praxi nejvíce využívány polyuretanové pryskyřice a organicko-minerální hmoty, kde pro rozhodnutí o jejich použití je vhodné provést injekční zkoušku v daných podmínkách s vyhodnocením dosažených výsledků.



Obr. 1 Schéma razicího cyklu (červeně označena možná doplňující technická opatření, modře začátek cyklu)

Fig. 1 Excavation cycle scheme (red marked possible additional technical measures, blue marked start of the cycle)

### SECURING OVERBURDEN AND PREFACE BY FOREPOLING OR CANOPY TUBES

A canopy tube systems with retracted casings or a bored SDA (IBO) injection bar forepoles or a combination of both systems can be used to secure the overburden of the tunnel. The choice of the type or diameter of the elements is always based on the current geotechnical conditions and stability calculations.

Various designs and diameters are available from both types of “steel” securing from Ø 32mm to Ø 154mm. If cement materials are used for subsequent grouting of these elements, it is advisable to use activated mixtures with an emphasis on rapid build-up of strength and minimum shrinkability including adherence to the rock.

It is possible to use bored or inserted glass-fiberglass elements for the reinforcement of the preface. The use of fiberglass has an advantage over steel elements in their subsequent easier removability during the excavation itself. When using self-drilling fiberglass bolts (e.g. type R32 SPINMAX) another advantage is the speed of installation and flexibility of application, including the compatibility of the thread with steel elements (e.g. SDA R 32).

An important factor can be the choice of flushing medium when installing the elements described above in certain geological conditions, when the water flushing normally used has to be replaced

Mezi důležité fyzikálně-mechanické vlastnosti samotných materiálů a chemickou injektáží vzniklých geokompozitů patří pevnost v tlaku, pevnost v tahu, pevnost v tlaku za ohybu, přídržnost k hornině, smyková pevnost, sřihová pevnost a odvozená veličina hodnota přetvárné práce. Všeobecným benefitem chemických směsí je pak rychlá aktivace (reakční časy v řádu minut max. desítek minut), stabilita směsi a nerozplavitelnost vodou, včetně konečné pevnosti a přídržnosti k hornině.

Pro samotnou aplikaci vstupují do výsledku injektáže další in-situ parametry jako např. teplota prostředí, teplota okolních hornin, teplota podzemní vody.

Tyto vnější podmínky následně ovlivňují u chemických materiálů reakční časy, viskozitu směsi a dostupnost injektáže v horninovém prostředí. Tyto, pro provádění chemických injektáží nepříznivé vlivy, lze samozřejmě do určité míry kompenzovat. Např. nízká teplota podzemní vody je kompenzována zvýšením teploty injektovaných hmot. Vysoký tlak podzemní vody lze kompenzovat použitím kapacitnějšího čerpadla, přípravou definované směsi „na míru“ ve výrobním závodě a tak podobně.

### PŘÍKLADY POUŽITÍ TĚSNICÍCH A ZPEVŇUJÍCÍCH INJEKTÁŽÍ

Dva příklady použití rozdílných chemických injektáží na významných a již dokončených českých tunelových stavbách dokumentují nutný, ale zcela rozdílný přístup v aplikovaném pracovním postupu a volbě chemického injektčního materiálu než bylo obvyklé. Tyto přístupy byly koncipovány tak, aby při potřebné podrobné znalosti injektovaného prostředí splnily stanovené cíle injektáže, tedy zpevnění a utěsnění horninového masivu. Oba případy poji skutečnost, že šlo o zdolávání velmi nepříznivých geologických a technických podmínek.

V prvním případě se jednalo o klasickou zpevňující injektáž horninového prostředí v předpolí raženého tunelu. Její provedení bylo zaměřeno na oblast přímého nadloží tunelu jako součást přijatých sanačních opatření po dvou mimořádných událostech – kolapsech raženého tunelu.

Ve druhém případě se jednalo o zajištění úvodní části ražby tunelu v městské zástavbě s velmi nízkým nadložím, kdy se v části raženého profilu nacházela nepříznivá geologická situace – zvodnělá šterkopísková vrstva. Zhotovitel tunelu musel reagovat na závazný příkaz státní báňské správy k zajištění bezpečnosti práce a provozu přijetím dodatečných technických opatření, které spočívaly ve zpevňujících a těsnicích injektážích problematického prostředí.

#### 1. Tunel Blanka – doplňující sanační opatření v ražené části tunelu č. 0079 Špejchar – Pelc-Tyrolka v úseku Královská obora

Tunelový komplex Blanka (TKB) je součástí pražského městského okruhu v délce přes 5,5 km. Ražené tunelové trouby, včetně provozních, mají délku více než 6,0 km. První úsek ražených tunelů byl realizován z portálu Troja k portálu Letná v délce 2231 a 2224 metrů a vžil se pro něj pracovní název „Špelc“.

Jeho součástí je úsek tunelu Královská obora, který se v prostoru Stromovka nachází ve velmi obtížných geotechnických podmínkách. Z výsledků geotechnického průzkumu a na základě informací o technickém řešení ražených tunelů byly patrné tyto skutečnosti:

- budou zastiženy velmi komplikované a proměnlivé geotechnické podmínky;
- bude podcházen vodní tok s nebezpečím průtrže zvodnělých materiálů a průvalu vody;

by e.g. flushing with foam. When using foam flushing, there is no possible deterioration of the shear parameters of certain types of rocks in the preface as in the case of water flushing. In combination of bored elements with flushing to a certain rock environment, the choice of the type of drill bit is also a key parameter. The correct type of drill bit is a must for effective installation of all the elements described above.

### STABILIZING, SEALING AND STRENGTHENING GROUTING USING CHEMICAL MATERIALS

The use of chemical materials for grouting is approached when the conditions for excavation are complicated by various negative factors and the technology of conventional mineral (cement) mixtures does not provide certainty or technical possibility of their use.

The most significant negative factors include the unfavourable deposit of geological layers, aquiferment of surrounding rocks with occurrence of pressurized groundwater, local tectonics, broken or weathered rocks and unstable soil layers above the contour of the excavated work. A combination of these negative factors is frequent, and the use of the appropriate type and technology of chemical grouting becomes necessary.

In practice, polyurethane resins and organic-mineral materials are most used in tunnelling, where it is advisable to carry out an grouting test in given conditions with evaluation of achieved results for the decision on their use.

Important mechanical-physical properties of the materials themselves and resulting geocomposites from the chemical grouting include pressure strength, tensile strength, bending pressure strength, adhesion strength, shear strength, shear strength and derived quantity value of transformation work. The general benefit of chemical mixtures is rapid activation (reaction times in range of minutes max. tens of minutes), stability of the mixture and being non-soluble by water, including final strength and adhesion to the rock.

For the application itself, other in-situ parameters such as ambient temperature, ambient rock temperature, groundwater temperature enter the result of the grouting.

These external conditions in turn influence reaction times, viscosity of the mixture and availability of grouting in the rock environment for chemical materials. These, which are unfavourable for the performance of chemical grouting, can of course be compensated to a certain extent. For example, low groundwater temperature is compensated by an increase in injection mass temperature. High groundwater pressure can be compensated by using a more capacitive pump, preparation of a defined “tailor-made” mixture in the production plant and so on.

### EXAMPLES OF USING SEALING AND STRENGTHENING GROUTING

Two examples of the use of different chemical grouting on important and already completed Czech tunnel constructions document the necessary but completely different approach in the applied working procedure and the choice of chemical injection material than was usual. These approaches were designed so that, with the necessary detailed knowledge of the grouted environment, they fulfilled the stated objectives of the grouting, i.e. the reinforcement and sealing of the rock massif. Both cases are connected by the fact that it was about overcoming very unfavourable geological and technical conditions.

In the first case, it was a classic strengthening grouting of the rock environment in the preface of the tunnel. Its implementation

- ražba v některých úsecích bude probíhat s minimálním skalním nadložím;
- bude podcházeno ze společenského hlediska velmi cenné prostředí.

### 1.1 Geologické a hydrogeologické poměry

Pokryvné útvary v zájmovém území jsou převážně tvořeny fluvialními sedimenty terasy Vltavy. Výsledkem erozivní činnosti řeky je hluboké koryto, tvořící tzv. přehloubenou brázdou v parku Stromovka před Šlechtovou restaurací. Následující sedimentací bylo celé údolí vyplněno písčitymi štěrky. Erozní báze je značně proměnlivá, mocnost se pohybuje v rozmezí 2,0–5,0 m.

Hydrogeologicky lze zvodně podzemní vody v zájmovém území řadit ke dvěma typům:

- podzemní voda v prostředí s průlinovou propustností v pokryvných sedimentech;
- podzemní voda v prostředí s puklinovou propustností v horninách ordovického skalního podkladu.

### 1.2 Zkušební injektáž

V roce 2008 došlo v průběhu ražeb, prováděných podle zásad NRTM, v prostoru Královské obory ke dvěma mimořádným událostem, které potvrdily velmi komplikované a proměnlivé geotechnické podmínky ražby. Vzhledem k tomu, že ražby obou tunelových trub se na jaře roku 2009 přiblížily k úsekům, ve kterých je výška horninového nadloží tunelu nad kalotou minimální, a to v rozsahu 1,0 až 4,0 metry, bylo nutno předstihově provedená, a i následně prováděná sanační opatření před ražbou a v rámci ražby tunelu doplnit tak, aby byla zajištěna bezpečnost práce a provozu a minimalizován možný vznik další mimořádné události.

Dle dohody se zhotovitelem a ve spolupráci s projektantem byly v květnu 2009 provedeny zkoušky stabilizujících chemických injektáží podle předloženého technického návrhu a technologického postupu. Cílem zkoušek bylo:

- ověřit polohy nepevných hornin/zemin v nadloží, zjištěné v rámci prováděných bezjádrových předvrtů a průzkumných vrtů, vrtaných z průzkumné štoly;
- odzkoušet navrhovanou technologii stabilizujících injektáží pomocí dvousložkových polyuretanových pryskyřic CarboPur (2C PUR) přes dlouhé injekční vrty;
- odzkoušet efektivitu chemických injektáží v daném geologickém prostředí dotčeném předešlými pracemi (injektáž z povrchu, injektáž z průzkumné štoly);
- demonstrovat pracnost a časovou náročnost provedení injekčních prací.

### 1.3 Vyhodnocení zkoušek

Po vyhodnocení injekčních zkoušek bylo možno konstatovat:

- Podle dosažených spotřeb, maximálních injekčních tlaků a samotného průběhu injektáže bylo potvrzeno, že i po v předstihu provedených sanačních pracích se v bezprostředním okolí výrubu nacházejí diskontinuity, které nejsou vyplněny injekční směsí, a které při nevhodné kombinaci jejich křížení mohou přivádět do nevytuzeného výrubu podzemní vodu a způsobovat tak snížení parametrů smykové pevnosti podél jednotlivých ploch těchto nespojitostí.
- Průběh a výsledek zkoušky potvrdily, že navržená technologie a typ injekční hmoty jsou v daném prostředí vhodné a umožňují tlakovou injektáž hornin s předpokládaným dosahem a vymezením (pomocí obturátorů).
- Průběh, výsledek a vyhodnocení zkoušky potvrdily, že navržená technologie a typ injekční hmoty vede v daném prostředí k požadovanému efektu – tj. dotěsnění a zpevnění horninového

was focused on the area of the direct overburden of the tunnel as part of the adopted remediation measures after two extraordinary events – collapses of the tunnel.

In the second case it was about securing the initial part of the tunnelling in the urban development area with very low overburden, where the part of the tunnelling profile contained an unfavourable geological situation – an aquiferred gravel layer. The tunnel contractor had to react to a binding order of the state mining administration to ensure safety of work and operation by adopting additional technical measures, which consisted in strengthening and sealing grouting of the problematic environment.

### 1. Tunnel Blanka – additional stabilization measures in excavated part of tunnel No. 0079 Špejchar – Pelc – Tyrolka in section Královská obora

Tunnel complex Blanka (TCB) is part of Prague's inner ring with overall length of 5.5km. Excavated tunnel tubes including service tunnels have length of more than 6km. First part of mined tunnels is realized from portal part Troja in direction Letná with length 2231 and 2224m and is named Špelc.

Its part is section called Královská Obora which goes through very difficult geotechnical conditions in location of Stromovka. Based on results from geotechnical monitoring and based on information regarding technical solution for mined tunnels following facts were obvious:

- very difficult and variable geotechnical conditions will be encountered;
- water course will be crossed with danger of intruding water and aquiferous material;
- excavation will take place in areas with minimum rock overburden;
- very valuable location from the social point of view will be under passed.

#### 1.1 Geological and hydrogeological situation

Super incumbent formations in area of interest are mainly formed by fluvial sediments of Vltava terrace. Result of Vltava river erosion activities is deep riverbed which created so called over dredged trench in Stromovka in front of Šlechta's restaurant. During following massive sedimentation of sandy gravels the valley was completely filled. Its erosion base is very variable. Thickness varies from 2 to 5 meters.

Underground waters in area of interest can be classified from hydro geological point of view as follows:

- underground water in environment with intrinsic permeability in covering sediments;
- underground water in environment with fissure permeability in rock of Ordovician rock in the bedrock.

#### 1.2 Testing grouting

In 2008, during excavation works according to NATM two exceptional events occurred in area of Královská obora which proofed very difficult and variable geotechnical conditions for excavation. Due to the fact that excavation of both tubes approached in spring of 2009 to areas with minimum overburden height of 1 to 4m above calotte it was necessary to supplement already executed and carried improvement measures to secure safety works and operations and to minimize possible development of exceptional event.

Based on agreement with contractor and together with designer tests of stabilization chemical grouting based on presented



Obr. 2 Celkový pohled na kalotu čelby po odtěžení horniny (lokality Královská obora, TKB)

Fig. 2 Overall view of top heading following mucking (locality Královská obora, TCB)

prostředí v cílové oblasti, a je tedy možné v předmětném úseku s touto technologií uvažovat jako s vhodným technickým opatřením, které povede ke zvýšení bezpečnosti při ražení díla.

- Z pořízené fotodokumentace bylo patrné, že pryskyřice vyplňuje plochy nespojitosti mezi vrstvami horniny a navzájem je spojuje ve výsledný kompaktní celek. To se potvrdilo i při následné ražbě kaloty tunelu (obr. 2, 3).

#### 1.4 Aplikace technologie při ražbách

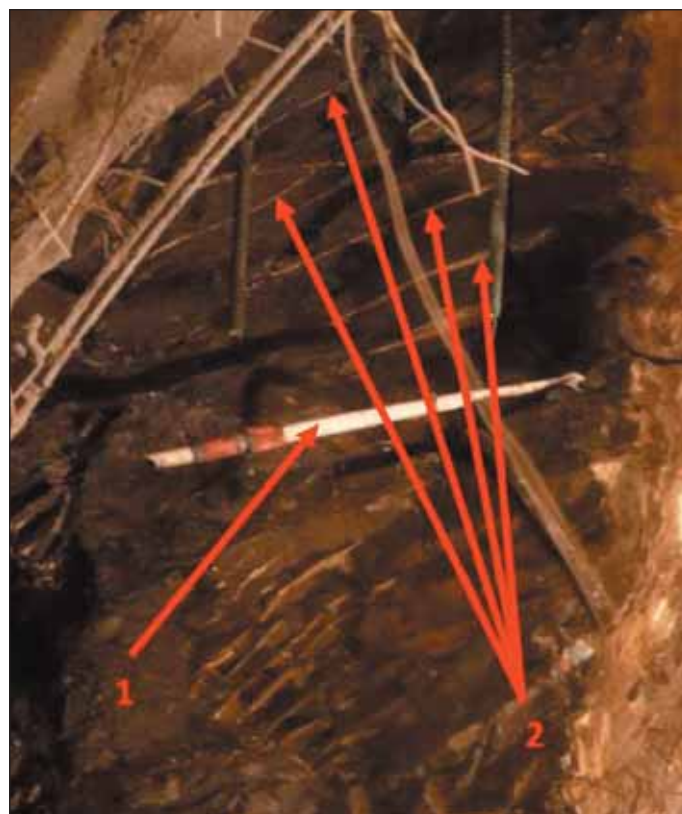
Na základě jednoznačně pozitivního hodnocení průběhu a výsledků provedené zkušební injektáže polyuretanovými pryskyřicemi bylo rozhodnuto o dalším využití této technologie při ražbách v úsecích s minimálním horninovým nadložím tunelu. Stávající sanační opatření byla tedy v těchto vytipovaných úsecích a staničeních doplněna o chemickou injektáž polyuretanovými pryskyřicemi.

Bylo nutné doložit, že navržené materiály disponují schválením pro styk s pitnou vodou a nemají negativní vliv na životní prostředí. Vzhledem k tomu, že již v předchozím období byly tyto materiály úspěšně použity, například při řešení následků mimořádných událostí v Královské oboře v roce 2008, byly materiály pro injektáž zástupci objednatele schváleny a injektáže mohly být zahájeny (obr. 4, 5).

Do obvodu dělené kaloty tunelu bylo vrtáno 9–11 ks předvrtů v délkách 6,0–8,0 m. Vrtné schéma, injekční postupy a parametry vlastní injektáže bylo nutné vždy přizpůsobovat podle aktuálního stavu geologického prostředí v jednotlivých staničeních a technických podmínkách pro provádění chemických injektáží. Celkem bylo provedeno cca 25 ks injekčních deštníků v časovém období od června do září 2009. Při provádění vlastních chemických injektáží byla použita pístová injekční čerpadla GX 45, pneumatické obturátory BVS 40 a dvousložková polyuretanová pryskyřice CarboPur WF (2C PUR).

recommendations and technological procedures were executed. Aim of these tests were:

- to verify locations of unconsolidated rocks/soils in the overburden which were encountered during exploratory drillings;
- to test proposed technology of stabilization grouting using two component polyurethane resins CarboPur (2C PUR) through long grouting holes;
- to test effectiveness of chemical grouting in given geological conditions influenced by previous works (grouting from surface, grouting from exploratory gallery);
- demonstrate laboriousness and time demandingness of executing grouting works.



Obr. 3 Detail pryskyřice CarboPur WF vyplňující plochy odlučnosti vrstev horniny (1 – injektážní trubka, 2 – injektáží zpevněné plochy odlučnosti)

Fig. 3 Detailed view of CarboPur WF resin filling discontinuity planes (1 – injection lance, 2 – discontinuity planes strengthened by resin grouting)

#### 1.3 Test evaluation

Based on executed testing grouting following could be stated:

- Based on recorded consumptions, maximum pressures and grouting itself was confirmed that also after already in advance executed improvement works discontinuities occur in immediate surrounding of stope. These discontinuities are not filled with injection material and in case of unfavourable



Obr. 4 Vrtací práce pro realizaci zpevňujících injektáží na členěné kalotě raženého tunelu (lokality Královská obora, TKB)

Fig. 4 Drilling works for execution of strengthening grouting at divided top heading of excavated tunnel (locality Královská obora, TCB)

Spotřeby injekčních hmot byly závislé na zastížených geologických podmínkách a odpovídaly spotřebám, které byly zaznamenány při realizaci injekčních zkoušek. Problémy při provádění injektáží byly zaznamenány v křemencových polohách, kdy docházelo k zavalování vrtů již v průběhu vrtání. Z tohoto důvodu byly s úspěchem v několika případech využity injekční zavrtávané svorníky.

### 1.5 Výsledek chemických injektáží

Velmi komplikované a proměnlivé geotechnické podmínky pro ražbu tunelů, včetně nízkého horninového nadloží v prostoru Královské obory, předurčovaly nutnost přijmout účinná sanační opatření.

Zároveň bylo nutno minimalizovat riziko vzniku dalších mimořádných událostí a zajistit bezpečnost práce a provozu v obou tunelových troubach na úsecích dlouhých cca 80 metrů. S ohledem na výsledky, které byly dosaženy, lze konstatovat, že chemická injektáž polyuretanovými pryskyřicemi výrazně přispěla ke splnění stanoveného cíle [3].

## 2. KRÁLOVOPOLSKÝ TUNEL – ZPEVNĚNÍ A UTĚŠŇOVÁNÍ NESOUDRŽNÝCH ZEMIN V NADLOŽÍ ŠTOL IIA A IIB

Výstavba Královopolského tunelu se potýkala s náročnými podmínkami, jež řadí toto dílo mezi ojedinělé stavby. Problémy způsobovaly zejména hustá povrchová zástavba, související inženýrské sítě a dopravní komunikace na povrchu – to vše v geologických podmínkách představovaných převážně brněnskými neogenními jíly, tzv. tégly.

Krátce po zahájení ražeb průzkumných štol vznikly problémy u budov nad trasou tunelu II, kdy naměřené hodnoty poklesů a deformací překračovaly stanovené hodnoty varovných stavů. Nejzávažnější problémy se týkaly příportálové oblasti štol IIA a IIB, jež podcházely zástavbu až třípodlažních obytných budov. Naopak

intersecting of those could bring underground water to unsecured slope and cause lowering of shear strength along single discontinuity planes.

- Course and results of the test proved that pro-posed technology and type of injection material is in given environment suitable and allows high pressure grouting of rocks with expected range and limitations (through packer).
- Course, results and evaluation of the test proved that proposed technology and type of injection material leads in given environment to requested effect – final sealing and strengthening of rock massif in area of interest and thus allows considering this technology as



Obr. 5 Provádění injektážních prací pryskyřicí CarboPur WF v kalotě raženého tunelu (lokality Královská obora, TKB)

Fig. 5 Execution of grouting works with CarboPur WF resin in top heading of excavated tunnel (locality Královská obora, TCB)

appropriate technical measure during excavation works leading to increased safety.

- It is apparent from pictures that resins fills discontinuity planes between rock layers and joints it in resulting compact complex which was proofed during following excavation of the tunnel top heading (Fig 2, 3).

u štolý Ib, vedené v ose ulice, deformace původní předpoklady nepřekročily.

Příčiny vzniklé situace u štol IIa a IIb byly podle autora následující:

- velmi nízké nadloží štol v příportáli (mocnost pouze 5,0–8,0 m v délce ražby cca 50,0–80,0 m);
- zastižení deprese v horizontu neogenních jíílů, vyplněné vodonosnými vrstvami šterkopísků;
- neočekávané a trvalé výrazné přítoky podzemní vody do štolý IIa;
- provedení dvou pater nástavby na původně jednopodlažní domy přímo nad tunelem II, a to krátce před zahájením ražeb.

### 2.1 Geologické a hydrogeologické poměry

Z provedených průzkumů a měření byly odvozeny čtyři základní geotechnické typy:

- antropogenní sedimenty (navážky);
- spraše a sprašové hlíny;
- kvartérní fluvialní hlíny;
- hlinité šterky a písky – problematické nepravidelné polohy zahliněných nesoudržných zemin, vysoké propustnosti (při zvodnění způsobující značné přítoky vody) a s malou soudržností (možný vznik nadvylomů, případě i komínů);
- neogenní jííl (charakteru většinou kompaktní zeminy až polo-skalní horniny s velmi vysokou plasticitou).

Z hlediska zpracování projektové dokumentace byly důležité vrstvy zahliněných zvodnělých šterkopísků a písků uzavřené mezi vrstvami neogenních jíílů a spraší, které mají relativně nízkou pórovitost a jsou obecně obtížně injektovatelné.

### 2.2 Zkušební injektáž nesoudržné šterkopískové vrstvy

Vzhledem k uvedeným skutečnostem bylo pro ověření účinnosti injekčních hmot v daném prostředí projektantem vyžádáno provedení pokusné injektáže. V otevřené stavební jámě v Brně Králově Poli proto proběhla zkušební injektáž odkryté vrstvy zvodnělých šterků a šterkopísků. Bylo zde navrženo 7 ks zkušebních vrtů délky 3,0 m, u kterých byla realizována injektáž třemi typy nízkoviskózních polyuretanových pryskyřic. Při zkušební injektáži bylo sledováno zejména injektované množství pryskyřic, injekční tlaky, teplota injektovaného prostředí a teplota injekčních hmot. Po provedení zkoušky byla vrstva nesoudržných zemin v místě zkoušky odkopána a byly získány tyto poznatky:

- nejlepšího výsledku proinjektování zemin bylo dosaženo za použití jednosložkové polyuretanové pryskyřice typu Carbo-Stop 41 (1C PUR) se separátním katalyzátorem CarboStop 41 ACC;
- zjištěný dosah injektáže činil až 0,8 m, tzn., že pro zajištění dostatečného proinjektování zeminy bude potřeba instalovat injekční trubky s roztečí cca 0,6 m, s uspořádáním injekčních vrtů do rovnoramenných trojúhelníků o délce strany právě 0,6 m;
- spotřeba injekční směsi činila cca 50,0–55,0 l/m<sup>3</sup> zpevněné zeminy;
- průměrná pevnost vzniklého geokompozitu byla 1,8 MPa, průměrná pórovitost 12,5 %, stupeň napětí injekční směsi 2;
- vzniklý geokompozit byl z hlediska pevnostních i přetvárných vlastností hodnocen jako vhodný pro zajištění stropu i boků výlomu tunelu metodou injektovaného vyztuženého deštníku (obr. 6, 7).

### 1.4 Application during excavation

Based on very positive appraisal of course and results of testing grouting with polyurethane resins decision was taken to use this technology for further excavation works in areas with minimum overburden height. Present improvement measures were in predetermined sections and stationing supplemented with chemical grouting using polyurethane resins.

It was necessary to proof that proposed materials have approvals for contact with potable water and do not present environmental issues. Due to the fact that these materials were already successfully used in the past for example during works after exceptional events in Královská Obora in 2008 materials were approved by representatives of contractor and works could began (Fig. 4, 5).

From 9–11 boreholes with length of 6–8 meters were executed in the circumference of divided top heading. Drilling patterns and grouting procedures were necessary to adopt according to local geological conditions in each stationing and according to technical conditions for chemical grouting. In total 25 injection umbrellas were executed in period from June to September 2009. Piston injection pumps GX-45, packers BVS-40 and polyurethane resin CarboPur WF were used for execution of grouting works.

Consumption of injection material depended on given geological conditions and corresponded to consumption recorded during testing grouting. Problems during grouting works were recorded in case of reaching quartzite formations when boreholes were collapsing already during drilling. Due to this fact successful use of self-drilling bolts was recorded several times.

### 1.5 Conclusions from chemical grouting

Very complicated and variable geotechnical conditions for excavation of tunnel tubes including very low overburden in location Královská obora predetermined usage of effective improvement measures.

It was simultaneously necessary to minimize risks of further exceptional events and securing work and operation safety in both tunnel tubes in approx. 80m long sections. With respect to achieved results it is possible to state that chemical grouting with polyurethane resins contributed to achieve given objective [3].

## 2. TUNNEL KRÁLOVOPOLSKÝ – STRENGTHENING AND SEALING OF NON-COHESIVE SOILS IN OVERBURDEN OF GALLERIES IIA AND IIB

Construction of the Královopolský tunnel complex faced challenging conditions that make this work among unique construction. Problems were caused mainly by dense surface residential construction, related engineering networks and surface transport communications – all in the conditions of Brno's neogenic clays, so-called "tegl".

Shortly after the start of excavation of exploratory tunnels, problems arose in the buildings above the tunnel II route, when the measured values of declines and deformations exceeded the set critical limits. The most serious problems related to the portal area of the IIa and IIb galleries, which underwent the construction of up to three-storey residential buildings. On the other hand, for the IIb tunnel, which runs in the street axis, deformations did not exceed the original assumptions.

The causes of the situation for IIa and IIb galleries were:

- very low overburden of the galleries in the portal area (thickness only 5–8m in the length of the excavation about 50–80m);
- existence of a depression in the horizon of neogenic clays, filled with aquifer layers of gravel sand;
- unexpected and persistent significant groundwater infiltrations into the excavation of the gallery IIa;



Obr. 6 Zkušební pole s injekčními vrti č. 1–7 ve vrstvě zvodněných štěrkopísků (lokality Brno, Královopolský tunel)  
Fig. 6 Test field with boreholes No. 1–7 in aquiferred gravel sands (locality Brno, Královopolský tunnel)

### 2.3 Projekt chemických injektáží ve štolách IIa a IIb

Na základě informací z geologického průzkumu, zkušeností z rážeb průzkumných štol a výsledků ověřovacích injekčních zkoušek byl vypracován projekt zpevňujících injektáží.

Projekt počítal se systémem radiálních injekčních vrtů, uspořádaných do vějířů kolmých na podélnou osu tunelu. Směrování a četnost vrtů a vzdálenost mezi vějíři musely zajistit řádné proinjektování zastižených poloh písčitého štěrku v nadloží štol. S ohledem na průběh báze nesoudržných zemin a omezený prostor štol byla vypracována tři vrtná/injekční schémata s délkou injekčních vrtů v rozsahu 0,8–4,8 m a vzájemnou roztečí mezi vějíři 0,6 m (obr. 8). Provedení chemických injektáží bylo navrženo v obou průzkumných štolách do vzdálenosti 42,6 m od provizorních portálů



Obr. 7 Odtěžené těleso proinjektované zeminy – tzv. geokompozit (lokality Brno, Královopolský tunel)  
Fig. 7 Extracted body of grouted soil – so called geocomposite (locality Brno, Královopolský tunnel)

- carrying out the superstructure of single-storey houses on a three-storey directly above tunnel II shortly before the excavations began.

### 2.1 Geological nad hydrogeological conditions

The following four geotechnical types were ascertained from the surveys and measurements taken:

- anthropogeneous deposit (mainly landfills)
- dry moulds and dry mould clays
- quaternary fluvial clays
- clay gravels and sands – problematic irregular positions of grouting uncompacted soil, coal, aquiferred below the level of underground water, layers are not continuous, the thickness has changed from a few decimetres up to several meters, the presence of these will make the tunnelling of tunnel tubes more difficult due to the permeability (causing a large inflow of water) and

low consolidation (possible origination of over-breaks or chimneys)

- neogene clays (mostly compacted soil with very high plasticity)

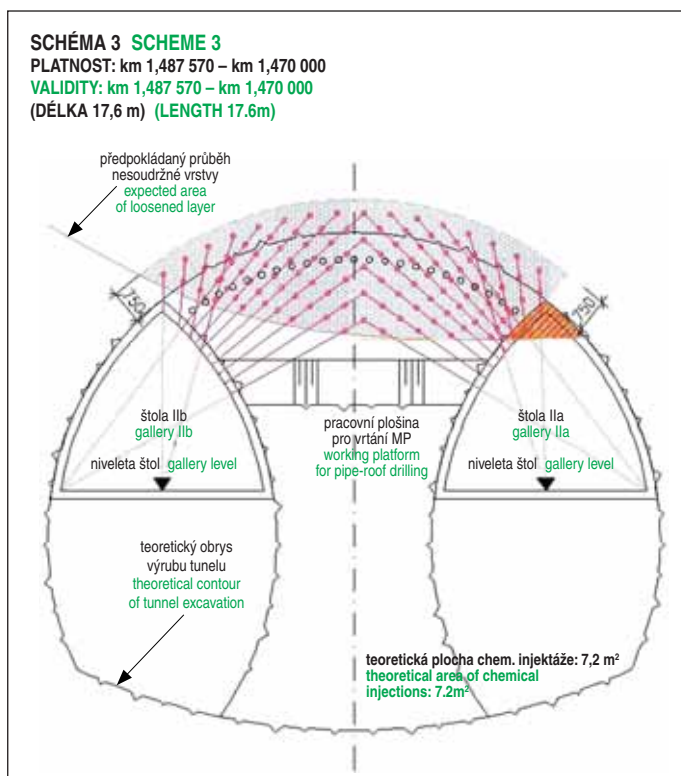
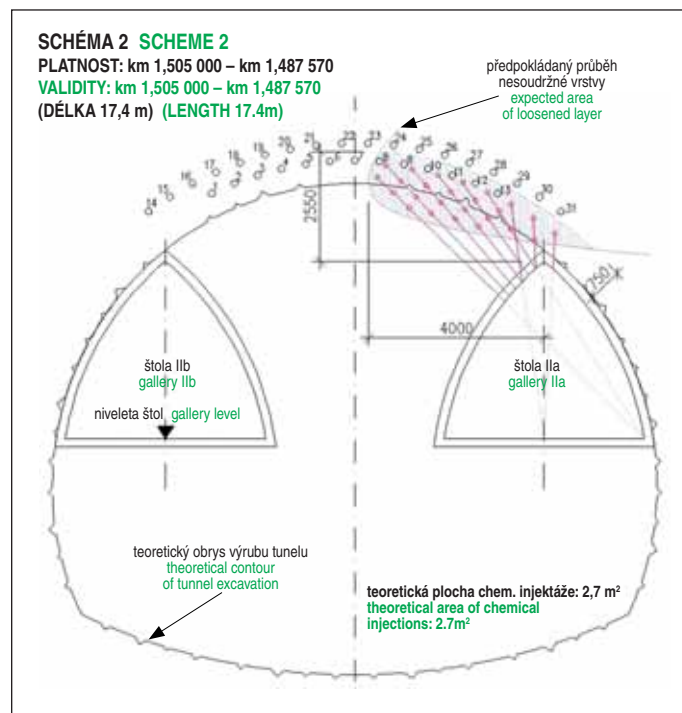
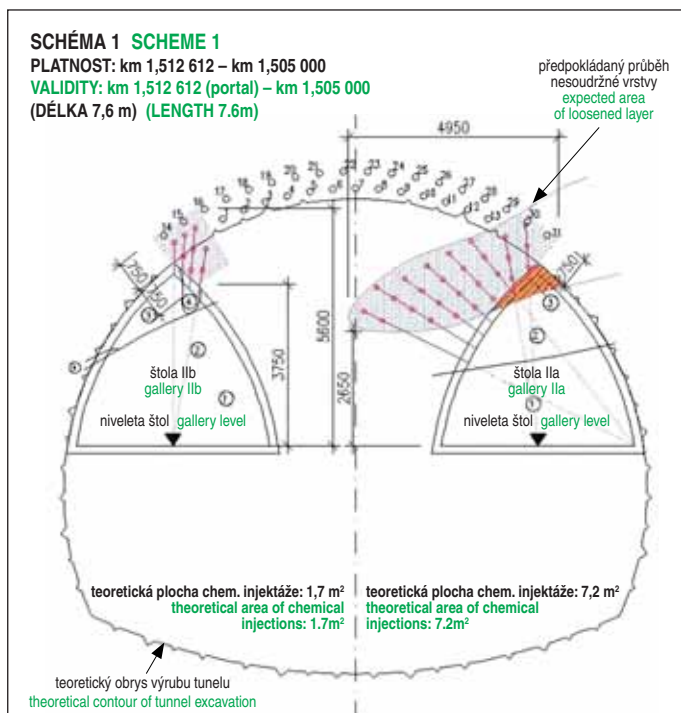
In terms of preparation of the project documentation, the layers of clayed aquiferred gravels and sands which are closed between layers of neogene clays and dry moulds are important. This soil has relatively low porosity and is difficult to inject

### 2.2 Test grouting of the non-cohesive gravel sand layer

With respect to stated facts designer requested to execute trials in order to confirm effectiveness of injection materials in given environment. Test grouting was done in the Královo Pole construction ditch into an open layer of aquiferred gravels and gravel sands. Seven testing boreholes with a length of 3m were made for which the grouting was done using three types of low-viscosity polyurethane resin. The injected volume of resin, injection pressures, temperature of injected environment and the temperature of injection substances were monitored during the test grouting. After the test, the layer of non-cohesive soil in the place of the test was removed resulting in the following information:

- the best result was achieved by using a single-component resin CarboStop 41 (1C PUR) with separate catalyst Carbostop 41 ACC;
- the scope of the grouting was up to 0.8m; to achieve a reliable grouting, it is necessary to install injection lances with a span of 0.6m and to arrange the grouting boreholes into isosceles triangles with side lengths of 0.6m;
- consumption of injection mixture is 50–55L/m<sup>3</sup> of the compacted soil;
- the average strength of the originated geocomposite is 1.8MPa, the average porosity is 12.5%, foaming of the injection substance is double;
- the originated geocomposite is suitable in terms of strength and deformation properties for securing the ceiling and sides





Obr. 8 Navržená schémata chemických injektáží pro jednotlivé dílčí výrubu (lokality Brno, Královopolský tunel)

Fig. 8 Proposed schemes for chemical grouting for individual cuts (locality Brno, Královopolský tunnel)

tunelu. Celková délka injekčních vrtů činila 4 260 m a celková kubatura proinjektované zeminy byla 688 m<sup>3</sup>.

Pro zpevňující injektáž byla použita jednosložková polyuretanová pryskyřice CarboStop 41 (1C PUR), která při ověřovacích zkouškách prokázala nejvyšší účinnost. Pro vystrojení vrtů byly použity injekční manžetové trubky.

#### 2.4 Výsledek chemických injektáží

Chemickou injektáží se v první řadě podařilo zpevnit polohy zvodněných nesoudržných zemín v oblasti kaloty, což znamenalo

of the tunnel breaks by the method of injecting a reinforced umbrella (Fig. 6, 7).

#### 2.3 Design of chemical grouting in galleries Ia and Ib

Based on information from geological survey, experience from excavation of exploration galleries and results of verification grouting trials design for strengthening grouting works was prepared.

Design incorporated system of radial grouting boreholes forming fans perpendicular to longitudinal axis of the tunnel. Directions, number of boreholes and distances between fans had to ensure proper grouting of encountered sandy gravels in the galleries overburden. With respect to orientation of non-cohesive soil basis and limited space in galleries three drilling patterns were designed with borehole lengths of 0.8–4.8m and distance between fans 0,6m (Fig. 8). Execution of grouting works was designed in both galleries up to distance of 42.6m from portals, stationing km 1,512 612 to km 1,470 000. Bill of quantities stated total length of grouting boreholes as 4 260.3m and total volume of injected soil 688m<sup>3</sup>.

Single component polyurethane resin CarboStop 41 (1C PUR) was used for strengthening grouting which exhibited during verification trials the best efficiency. Sleeved pipes (tube-a-manschette pipes) were used for instrumentation of boreholes.

#### 2.4 Results of chemical grouting

In the first place, chemical grouting succeeded in strengthening the positions of the aqueous non-cohesive soils in the top heading area, which meant achieving stability of the upper part of the excavation. This ensured not only the safety of the tunnel excavation works but also managed to seal significant groundwater infiltrations into the galleries. This stopped the degradation of the lining which locally reached a near-emergency state.

The effectiveness of the proposed solution of strengthening grouting with sealing effect was demonstrated during subsequent excavations, which took place without any problems [3] (Fig. 9, 10).

#### CONCLUSION

The described technologies and their various combinations have been successfully used in tunnel constructions not only in



Obr. 9 Proinjektované zvodnělé nesoudržné zeminy v kalotě (lokality Brno, Královopolský tunel)

Fig. 9 Grouted aquiferred loose soils in tunnel top heading (locality Brno, Královopolský tunnel)

dosažení stability horní části výrubu. Tím byla zajištěna nejen bezpečnost při ražbě tunelu, ale zároveň se podařilo utěsnit výrazné výrony podzemní vody do štol. Zastavila se tak degradace ostění průzkumných štol, která lokálně dosahovala téměř havarijního stavu.

Účinnost navrženého řešení zpevňujících injektáží s těsnícím účinkem byla prokázána při následných ražbách, které proběhly bez jakýchkoliv problémů [3] (obr. 9, 10).

## ZÁVĚR

Popisované technologie a jejich různá kombinace se již řadu let úspěšně využívají na tunelových stavbách nejen v České republice. Je jen otázkou zejména zodpovědného přístupu všech zainteresovaných stran a subjektů, při výskytu očekávaných či neočekávaných zhoršených geotechnických podmínek ražby tunelu a profesní připravenosti, vhodně tyto situace řešit a vyřešit pro zajištění maximální bezpečnosti a prevence vzniku mimořádných událostí. Autor článku nabízí zkušenosti týmu Minova Bohemia i výše zmiňované materiály a výrobky skupiny Minova při hledání vhodných technických řešení při realizaci tunelových staveb.

Ing. PETR KUČERA,  
petr.kucera@minovaglobal.com, Minova Bohemia s.r.o.

Recenzoval Reviewed: Ing. Tomáš Ebermann, Ph.D.

the Czech Republic for many years. It is only a question of responsible approach of all interested parties and entities, in case of occurrence of expected or unexpected worsened geotechnical conditions of tunnelling and professional readiness, to appropriately address and resolve these situations in order to ensure maximum safety and prevent occurrence of emergencies. The author of the article offers the experience of the Minova Bohemia team as well as the above mentioned materials and products of the Minova Group in search of suitable technical solutions in the implementation of tunnel constructions.

Ing. PETR KUČERA,  
petr.kucera@minovaglobal.com,  
Minova Bohemia s.r.o.



Obr. 10 Radiální injekční vrty vystrojené injekčními trubkami (lokality Brno, Královopolský tunel)

Fig. 10 Radial grouting boreholes equipped with injection lances (locality Brno, Královopolský tunnel)

## LITERATURA / REFERENCES

- [1] Interní materiály společnosti Minova [Internal materials Minova](#)
- [2] KUČERA, P. a kol. Technologie stabilizující nadloží a předpolí použité při výstavbě tunelového komplexu Blanka. *Tunel*, 2014, roč. 23, č. 1, s. 4–8.
- [3] KUČERA, P. a kol. Technologie chemických injektáží a jejich přínos na tunelových stavbách v ČR. In: *Podzemní stavby Praha 2023*. Praha: Česká tunelářská asociace ITA-AITES z.s., 2023.