

# TUNEL

č. 4  
2012

ČASOPIS ČESKÉ TUNELÁŘSKÉ ASOCIACE A SLOVENSKEJ TUNELÁRSKEJ ASOCIÁCIE ITA-AITES  
MAGAZINE OF THE CZECH TUNNELLING ASSOCIATION AND SLOVAK TUNNELLING ASSOCIATION ITA-AITES





## Vážení čtenáři časopisu TUNEL,

dostalo se mi cti a možnosti se s vámi, váženými konzumenty obsahů stránek našeho časopisu, podělit o názory a pocity, které jsou spojeny právě s tímto naším předvánočním číslem nebo chcete-li příběhem. Mohlo by se zdát, že dnešní pohnutá, až turbulentně nestabilní doba nemůže v našich myslích generovat příliš velká očekávání bohatých vánočních svátků, které musí být u pravověrných tunelářů představovány právě dárky v podobě dalších nově zahajovaných podzemních staveb. Ale přesto je zde namísto jisté míry optimismu, kterou v našem stylizovaném vánočním příběhu „*O tom jak ke stavbě nového podzemního díla český a slovenský tunelář přišel*“ mohou symbolizovat právě společnosti ARCADIS GEOTECHNIKA, a. s., a ELTODO EG, a. s., kterým je toto číslo věnováno.

Symboliku a spojitost hledejme ve společné funkci a formulaci úvodu a závěru každého literárního díla stejně jako v našem případě v zahájení a dokončení každého podzemního díla.

ARCADIS GEOTECHNIKA, a. s., je geotechnická a konzultační společnost s dlouholetou tradicí a z principu svých činností stojí mimo jiné na začátku každého podzemního projektu, kterému do jeho vínku může zadávací formulací své úvodní statě dát potenciál k úspěšné realizaci.

Vlastní a dnes již samozřejmá střední realizační stat' není předmětem našeho vánočního příběhu, a proto rovnou můžeme přistoupit k jeho závěru.

ELTODO EG, a. s., je společností vyznačující se komplexností technologických dodávek spojených zejména s bezpečností a provozem podzemních děl, a tím dávající předpoklad, že náš vánoční dárek prezentovaný naším příběhem bude úspěšně dokončený a uživatelsky bezpečně provozovaný.

Proto si přejme, aby takových vánočních příběhů, resp. dárků, bylo pro naši tunelářskou komunitu pod stromečkem nachystáno pro příští rok co nejvíce, i když víme, že záznaky se často nedějí ani o Vánocích, takže šťastné a veselé.

**ING. BORIS ŠEBESTA**  
člen redakční rady

## Dear readers of TUNEL journal,

It is my honour that I have been allowed to share my opinions and feelings regarding this pre-Christmas issue, or if you wish a story, with you, esteemed consumers of the content of our journal pages. It could seem that the present stirring and turbulently unstable time cannot generate in our minds too high expectations of rich Christmas holidays, which must be represented in the minds of orthodox tunnellers by presents in the form of newly commenced underground construction projects. However, a certain level of optimism is in order. In our styled Christmas story, or a fairy tale, about *how a Czech tunneller and a Slovak tunneller came by a new underground construction contract*, this optimism can be symbolised by ARCADIS GEOTECHNIKA, a. s. and ELTODO EG, a. s., which are the companies this issue is dedicated to.

Let us seek the symbolism and relationship in the common function and formulation of the introduction and conclusion of each literary work, which is identical with the commencement and completion of each underground working dealt with in our case.

ARCADIS GEOTECHNIKA, a. s. is a geotechnical and consultancy company with a long-standing tradition. It follows from the principle of its activities that, among others, it is present at the beginning of each underground construction project where it can endow it with a potential for successful realisation by its initial geological report and geotechnical interpretation.

The middle construction realisation part itself, which is today already common, is not the subject of our Christmas story, therefore we can proceed to its conclusion.

ELTODO EG, a. s., is a company distinguishing itself by the complexness of equipment supplies associated, first of all, with the safety and operation of underground workings, giving the assumption that our Christmas present in the form of our story will be successfully completed and operated in a way friendly to the users.

For that reason our wish is that there are as many as possible similar Christmas stories or presents prepared under the Christmas tree for our tunnelling community, even though we know that miracles are infrequent even during the Christmas time. Anyway, we wish you Merry Christmas.

**ING. BORIS ŠEBESTA**  
Member of the Editorial Board







## VÁŽENÍ ČTENÁŘI,

je pro mne a pro celou naši společnost ARCADIS Geotechnika, a. s., počtou, stručně vám v tomto čísle časopisu Tunel představit naše aktuální aktivity a záměry v oboru podzemního stavitelství.

Konstantou naší podnikatelské strategie je trvalá orientace na komplexní inženýrskou a konzultační činnost v oboru geotechniky pro podzemní stavitelství a rozhodnutí provádět ji pro naše klienty na nejvyšší možné dosažitelné úrovni.

Naše služby, jak známo, zahrnují takřka úplné spektrum geotechnických specializací. Od geotechnických průzkumů pro tunely a podzemní stavby, přes konzultační činnost při jejich projektové přípravě včetně analýzy geotechnických rizik. V průběhu výstavby realizujeme geotechnický dozor a geotechnický monitoring, včetně řízení geotechnických rizik, zaměřený na optimalizaci mezi náklady stavby, na plnění technicko-kvalitativních požadavků projektu a bezpečnost při jejím provádění.

Zkušenosti a znalosti v oboru podzemního stavitelství, které máme, jsou založeny na mnoho desítek let trvajícím působení na nejvýznamnějších podzemních stavbách již od vzniku ČSR. V posledních letech se naši tuneloví specialisté uplatňují i v zahraničí. Jen v tomto roce působili v Číně, Chile, Srbsku, Slovensku a ve Francii.

Zázemí pro práci specialistů na podzemních stavbách tvoří v naší firmě laboratoř mechaniky hornin a zemin, středisko matematického modelování geotechnických problémů, pracoviště terénních zkoušek a pracoviště inženýrské geodézie, vybavené nejmodernější optickou technikou, a skupina geotechnických specialistů systematicky pracujících na výzkumu a technickém rozvoji.

Trvalou součástí rozvoje firmy je aplikovaný výzkum. V současném období řeší specialisté ARCADIS Geotechnika, a. s., řadu výzkumných úkolů a rozvojových projektů orientovaných přímo nebo nepřímo na problematiku podzemního stavitelství. V návaznosti na ně byly do praxe zaváděny například moderní metody geotechnického monitoringu.

K významným počínům našich specialistů v oblasti tunelového stavitelství patří například vypracování „*TP 76-C Geotechnický průzkum pro tunely pozemních komunikací*“ a „*TP 237 Geotechnický monitoring pro tunely pozemních komunikací*“.

Je jen přirozené, že naše společnost ARCADIS Geotechnika, a. s., také podporuje aktivity naší národní skupiny CzTA. Je například zlatým sponzorem konference Podzemní stavby 2013. Naši specialisté se podílejí na činnosti redakční rady časopisu Tunel, aktivně se účastní tunelářských odpolední, atp.

Jsem přesvědčen, že i v budoucnu budeme pevnou součástí naší „tunelářské komunity“ a budeme se podle našich možností podílet na rozvoji českého podzemního stavitelství.

Přeji všem čtenářům časopisu Tunel a členům CzTA mnoho úspěchů v podnikatelské činnosti i v osobním životě.

## DEAR READERS,

it is an honour for me and for our ARCADIS Geotechnika a. s. as a whole to be allowed to introduce our current activities and plans in the area of underground construction to you in this TUNEL journal issue.

The strategy of permanent orientation to comprehensive engineering and consultancy activities in the area of geotechnics for the underground engineering industry and the determination to perform them for our clients at the highest achievable level is a constant feature of our business strategy.

Our services, as generally known, comprise nearly the complete spectrum of geotechnical specialisations, ranging from geotechnical investigations for tunnels and underground structures through consultancy during the design stage, including analyses of geotechnical risks. During the course of construction, we carry out geotechnical supervision and geotechnical monitoring, including the management of geotechnical risks focused on the optimisation of the relations of construction costs, meeting technical and qualitative requirements of the design, and safety during the works.

Our experience and know-how in the sphere of underground construction is based on activities in most important underground construction projects, lasting already from the origination of the Czechoslovak Republic. In recent years our tunnelling specialists have asserted themselves even abroad. Only this year, they worked in China, Chile, Serbia, Slovakia and France.

The hinterland for the work of our specialists on construction sites is provided in our company by a rock and soil mechanics laboratory, a centre for mathematical modelling of geotechnical problems, a field testing workplace, an engineering land survey workplace equipped with state-of-the-art optical technologies, and a group of geotechnical specialists systematically working on research and technical development.

Applied research is a permanent part of the company development. At present, ARCADIS Geotechnika a. s. specialists are solving several research problems and development projects oriented directly or indirectly towards underground construction. As a follow-up to them, for example, modern geotechnical monitoring methods were put into practice.

Among important deeds of our specialists in the field of tunnel construction engineering there are, for instance, the elaboration of technical specifications „*TS 76-CK Geotechnical Investigation for Road Tunnels*“ and „*TS 237 Geotechnical Monitoring for Road Tunnels*“.

Naturally, our company, Arcadis Geotechnika, also supports the activities of our national ITA-AITES CzTA. It is, for example, a golden sponsor of the Underground Construction 2013 Conference. Our specialists participate in the activities of the Editorial Board of TUNEL journal, actively participate in the Tunnel Afternoon meetings etc.

I am convinced that we will be a firm member of our “tunnel building community” even in the future and will participate in developing the Czech underground construction industry wherever we can.

I wish all readers of TUNEL journal and the ITA-AITES CzTA members lots of success in their entrepreneurial activities and their private lives.

**ING. VÁCLAV HOŘEJŠÍ, MBA**

*ředitel a předseda představenstva společnosti ARCADIS Geotechnika, a. s.  
CEO and Chairman of the Board of Directors of ARCADIS Geotechnika, a. s.*



## VÁŽENÍ ČTENÁŘI ČASOPISU TUNEL

Společnost ELTODO, která v září letošního roku oslavila 21 let své existence, je od svého založení úzce svázána s vývojem nových perspektivních systémů pro řízení technologického a dopravního vybavení v silničních tunelech. Současně jsme v letošním roce oslavili patnáctileté výročí otevření Strahovského automobilového tunelu, kde byla technika vyvinutá ELTODO nasazena poprvé. Stojí za to připomenout, že systémy ELTODO založené na řídicím systému Kerberus jsou v současné době instalovány ve 26 tunelech v České republice, na Slovensku a v Turecku.

Současná tíživá ekonomická situace v naší zemi s sebou kromě mnohých rizik spojených s nedostatkem zakázek přináší rovněž nebezpečí odlivu zkušených odborníků z oblasti tunelových technologií do jiných sektorů ekonomiky, popřípadě do zahraničí. Společnost ELTODO se snažila vždy po celou dobu své existence přinést svým zaměstnancům práci na zajímavých projektech, které zajišťovaly stabilitu profesního týmu. Abychom v tomto byli schopni pokračovat i do budoucna, snažíme se dlouhodobě orientovat na nové perspektivní technologie. Tyto technologie se vyznačují důrazem na zlevnění a zefektivnění technologických dodávek v oblasti tunelových a dálničních staveb. Články publikované v tomto čísle časopisu Tunel jsou těmto novým trendům věnovány.

Technologické dodávky v oblasti tunelových staveb byly vždy společností ELTODO vnímány jako komplexní služby, které společnost zajišťuje od zpracování projektové dokumentace, přes zajištění montáží, dodávku softwaru, oživení, uvedení do provozu, provádění zkušebního provozu, až po následné zajišťování údržby dodaného zařízení. Nejdůležitější etapou komplexní dodávky technologického vybavení každé tunelové stavby z hlediska investičních a provozních nákladů je optimální návrh jejího technologického vybavení. Na striktním dodržování standardů založené projektování se zdá v současné době částečně překonané, protože rigidní sledování požadavků norem a technických podmínek vede mnohdy ke zbytečnému prodražování staveb. ELTODO se podílí na vědeckých a výzkumných projektech SAFETUN, OPTUN a ZET, které se zabývají problematikou optimalizace návrhu a stanovení optimální míry rizika s cílem zefektivnit a zlevnit technologické vybavení tunelů. Významným počinem v této oblasti, který ELTODO uvedlo v život, je systém evidence mimořádných událostí v tunelech AZMUT, provozovaný pracovníky společnosti v datovém prostředí Národního dopravního informačního centra v Ostravě.

Významným prvkem bezpečnostního vybavení každého tunelu je řídicí systém technologie a dopravy. V jednom z článků je rozebrána problematika řídicího systému komplexu tunelů Blanka. Tato stavba svojí velikostí a charakterem představuje opravdovou výzvu pro projektanty a programátory řídicího systému. Kromě vlastního rozsahu řízené stavby je nutné řešit řadu problémů spojených s integrací tunelového komplexu do řízení dopravy ve městě a rovněž je třeba se vypořádat s mimořádně složitým systémem vzduchotechniky. Důležitou součástí návrhu takto složitého systému je rovněž kvalitní softwarový projekt, na jehož přípravě se pracovníci ELTODO rovněž podílejí.

Další článek je věnován procesu vyhodnocování zkušebního provozu tunelových a dálničních staveb na silničním okruhu kolem Prahy, kterého se pracovníci ELTODO aktivně účastní. Pro účely vyhodnocování takovýchto staveb vyvinulo ELTODO speciální software, který je na této stavbě využíván. Zkušenosti s novou metodikou vyhodnocování mohou být úspěšně využity i na jiných stavbách.

**ING. JIŘÍ ŘEHÁK**

*výrobně-technický ředitel a člen představenstva ELTODO EG, a. s.*

*Chief Technical and Operating Officer and Member of the Board of Directors of ELTODO EG, a. s.*

## DEAR READERS OF TUNEL JOURNAL!

ELTODO company, which celebrated 21 years of its existence in September this year, has been associated since its foundation with the development of new emerging systems for the management of technical and traffic-related equipment in road tunnels. At the same time, we have celebrated the 15th anniversary of the opening of Strahov tunnel to traffic. It was the first tunnel where equipment developed by ELTODO was installed. It should be noted that ELTODO systems based on the Kerberus management system are currently installed in 26 tunnels in the Czech Republic, Slovakia and even in Turkey.

Among numerous other risks associated with the lack of orders, the current distressing economic situation in the Czech Republic brings the risk from "brain-drain" in the area of tunnel technologies to other sectors of economy or abroad. ELTODO, has always during its existence made efforts to provide its employees with work on interesting projects, ensuring the stability of the professional team. We endeavour to focus our objectives on new emerging technologies so as to be able to continue even in the future. These technologies distinguish themselves by the stress put on reducing prices of technological supplies in the area of tunnel and motorway structures and increasing their effectiveness. Papers published in the TUNEL journal issue are dedicated to these new trends.

Supplying technological systems for tunnel structures has always been considered by ELTODO to be comprehensive services, which are provided by the company from the creation of design documents, through securing the installations, supplying the software, activating, bringing into operation, commissioning up to subsequent maintaining of the equipment supplied by the company. The most important stage of the comprehensive supply of a technological equipment system for each tunnel construction project in terms of investment costs and operating costs is the creation of an optimum design for the tunnel equipment. Designing based on strict adhering to standards seems today to be partly outdated because the rigid observation of requirements of standards and technical specifications often leads to unnecessary increased costs of projects. ELTODO participates in the scientific and research projects SAFETUN, OPTUN and ZET, dealing with the problems of the optimisation of designs and determination of the optimum risk level with the aim of increasing the effectiveness and reducing the cost of tunnel equipment. Among important initiatives implemented in this area by ELTODO is the AZMUT system of the registration of extraordinary events in tunnels, which is operated by the company's personnel in the data environment of the National Traffic Information Centre, Ostrava.

A significant element of the safety equipment of each tunnel is the equipment and traffic management system. The issue of the management system for the Blanka complex of tunnels is analysed in one of the papers. Owing to its magnitude and character, this project has been a real challenge for designers and programmers of the management system. In addition to the scope of the structure to be managed, it is necessary to solve many problems associated with the integration of the complex of tunnels into the traffic management system in the whole city and, in addition, it is necessary to cope with the extremely complicated system of ventilation. Even the good-quality software design, the preparation of which also proceeds with ELTODO personnel participating, is an important component of the design for such the complicated system.

Another paper is dedicated to the process of assessing the trial operation of tunnel and motorway structures on the Prague City Ring Road. ELTODO employees actively participate in this process. ELTODO a. s. developed special software to be used for the assessing of such structures. It has been applied to this construction. Experience with the new assessment methodology can be successfully used even by other projects.

# MODERNÍ MONITOROVACÍ METODY PRO RAŽBU TUNELŮ V MĚSTSKÉ ZÁSTAVBĚ

## MODERN MONITORING METHODS FOR TUNNELLING IN URBAN DEVELOPMENT

ONDŘEJ HORT, TOMÁŠ EBERMANN, ALEXANDR ROZSYPAL, MAREK ZÁLESKÝ, JAKUB BOHÁTKA

### ÚVOD

Používání a rozvoj monitorovacích metod pro řešení rozličných geotechnických problémů má ve společnosti ARCADIS Geotechnika, a. s. (dříve Stavební geologie-Geotechnika, a. s., dále jen společnost Arcadis) velmi dlouhou tradici. Její počátky se pojí s výstavbou sypaných i gravitačních přehrad během poválečné industrializace ČSR v padesátých a šedesátých letech. V dalším období, v sedmdesátých letech, byla pozornost přeměřována na zakládání náročných a na nerovnoměrná sedání citlivých objektů. Tyto práce vyústily ve zpracování známé, až donedávna široce používané, normy ČSN 73 1001 (1988) „Základová půda pod plošnými základy“.

V osmdesátých letech minulého století nastala éra vývoje monitorovacích metod pro řešení stability vysokých svahů vyvolaná rozvojem povrchové těžby uhlí.

Je proto jen přirozené, že s rozvojem dopravní infrastruktury, zejména tunelového stavitelství v posledních letech, se společnost Arcadis zařadila mezi společnosti, které počaly udávat tón v rozvoji monitorovacích metod i pro podzemní stavitelství.

Moderní monitorovací metody na stavby městských tunelů v ČR se začaly zavádět v první polovině 90. let minulého století. Platí to o měření v podzemí (konvergenční měření ostění tunelových výrubů, měření napětí tlakovými poduškami) i o měření na povrchu (průběhy poklesových kotelin, různé typy měření deformací na objektech nadzemní zástavby).

Byla to společnost Arcadis, kdo přišel s konceptem, že monitoring není jen měření (výběr měřidel, jejich instalace, sběr dat a jejich zpracování), ale že jeho nedílnou součástí je i rozhodovací proces vycházející z principů observační metody, jehož cílem je nepřetržitě optimalizování postupu výstavby a projektu. Zavedení praxe Rady monitoringu (RAMO) na tunelových stavbách, kde se za účasti všech kompetentních účastníků výstavby výsledky měření projednávají a přijímají i příslušná rozhodnutí, je důsledkem tohoto přístupu.

Při existenci obrovského množství prakticky každý den vznikajících dat z řady různých typů měření a nepřetržitého rychlého postupu výstavby bylo nezbytné jejich operativní zpracování a okamžitý transport výsledků zpracování ke všem účastníkům výstavby. Společnost Arcadis proto jako první v České republice spustila původní webovou aplikaci pro prezentaci a správu výsledků monitoringu – systém BARAB®.

Společnost Arcadis se profilovala nejen jako dodavatel měření, ale jako komplexní geotechnický konzultant, schopný měření provést i vyhodnotit a formulovat doporučení pro další postup výstavby.

Relativně významný příspěvek pro rozvoj monitorovacích metod mohla společnost poskytovat i díky řadě výzkumných projektů zaměřených na rozvoj monitorovacích metod. Jsou to projekty financované zpravidla MPO ČR, Grantovou agenturou ČR nebo Technologickou agenturou ČR. Společnost Arcadis v nich vystupuje buď jako nositel celého projektu, nebo jako spoluřešitel určité jeho části.

V neposlední řadě je společnost Arcadis autorem řady normativních předpisů, např. technických podmínek Ministerstva dopravy ČR č. 237 „Monitoring tunelů na dopravních komunikacích“ a TP 76-C „Geotechnický průzkum pro tunely pozemních komunikací“

### INTRODUCTION

Using and developing monitoring methods for the solution to various geotechnical problems has a very long tradition in ARCADIS Geotechnika a. s. (formerly Stavební geologie - Geotechnika, a. s.). Its beginning is associated with the development of earthfill dams and gravity dams during the post-war industrialisation of the Czechoslovak Republic in the 1950s and 1960s. During the subsequent period, in the 1970s, the attention was redirected to the foundation of complicated structures sensitive to uneven settlement. These operations led to the developing of the well known standard ČSN 73 1001 (1988) 'Foundation ground under spread foundations'.

The era of the development of monitoring methods for solving the stability of high slopes, which was brought by the development of opencast coal mining, came in the 1980s.

It is therefore only natural that, with the development of transportation infrastructure, ARCADIS Geotechnika a. s. ranked among the companies which set the tone for the development of monitoring methods even for underground construction engineering.

The introducing of modern monitoring methods for construction projects for urban tunnels in the Czech Republic started in the first half of the 1990s. This applies both to underground measurements (convergence measurements of tunnel linings, measurements of stresses induced by pressure pads) and to measurements carried out at the surface level (the development of settlement troughs, various types of measuring deformations on surface buildings and structures).

It was ARCADIS Geotechnika a. s. who came up with the concept that monitoring is not only the process of measuring (selection of measuring gauges, their installation, data collection and processing), but that its inseparable part is also the decision-making process based on principles of the observational method, the aim of which is also continuous optimising of the excavation procedure and the design. The introduction of the praxis of the Monitoring Board (MB) on tunnelling construction sites, where the results of measurements are discussed and respective decisions are made with the participation of all competent parties to the project, is a result of this approach.

With respect to the existence of the immense volume of practically every day originating data from a range of various measurement types and to the uninterrupted quick advancing of the construction, it was necessary to secure the operative processing of the data and immediate transfer of the processing results to all parties to the project. ARCADIS Geotechnika a. s. therefore, as the first company in the Czech Republic, put into operation an original web application for the presentation and administration of monitoring results, the system BARAB®.

ARCADIS Geotechnika a. s. created its distinctive image not only as a provider of measurements, but also as a complex geotechnical consultant capable of both conducting and assessing the measurements as well as formulating recommendations for subsequent construction advance.

The company was able to offer a relatively significant contribution to the development of monitoring methods even thanks to a number of research projects focused on the development of monitoring methods. These projects are usually financed by the



a ve Slovenské republice vypracovala do Technicko-kvalitativních podmínek Slovenskej správy ciest časť 28 „*Geotechnický monitoring pre tunely a prieskumné štólne*“.

V předloženém textu dále autoři stručně popisují jak vývoj monitorovacích metod, tak i aplikaci jejich výstupů při řešení geotechnických problémů souvisejících s výstavbou městských tunelových staveb v ČR a některé při tom získané zkušenosti.

## SHRNUTÍ VÝVOJE MONITORINGU NA MĚSTSKÝCH TUNELECH V ČR

Geotechnický monitoring na městských tunelech se vyvíjel spolu s rozvojem výstavby městských podzemních staveb.

První vlašťovkou byl monitoring na pokusném výrubu na trase metra I.C v Praze v prostoru Fügnerova náměstí (1968, důlní výztuž). U městských silničních tunelů byl poprvé geotechnický monitoring prováděn při ražbě Strahovského automobilového tunelu (80. až 90. léta, modifikovaná jádrová metoda).

Rozsáhlejší a především komplexní využití geotechnického monitoringu v ČR je však vázáno právě na moderní tunelovací metody (dominující NRTM, zatím soliterně využitou metodu obvodového vrubu a nejnověji i mechanizované strojní ražby). Průkopníky moderních metod ražby v ČR byly tunely Hřebeč, Pisárecký a trasa IV.B metra v Praze. Ty však byly v prvních deseti letech po změně společenských poměrů v roce 1989 prakticky jedinými započatými a dokončenými dopravními tunely v ČR.

Výstavbu více než dvaceti dopravních tunelů po roce 1999 odstartovala Mrázovka (1999–2004), Vepřek (2000–2004), trasa metra IV.C1 (2000–2004) a Březno (2000–2007). Z celého tohoto období však lze k ryze městským řadit jen tunely pražských staveb Mrázovka, metro IV.C1 a IV.C2 (2004–2008), tunelový komplex Blanka (2007–2014), metro V.A (2010–2014) a z Brna tunel Královopolský (2008–2012).

Nejen metoda ražby, ale také společenské a ekonomické změny na konci 80. let napomohly k důslednější aplikaci geotechnického monitoringu. Časté negativní ovlivnění soukromých majetků rychle přestalo být snadno zdůvodnitelné pouze „společenským zájmem“. Riziko spojené s dopady stavby na majetek a zájmy třetích osob ať už fyzických, nebo právnických se stalo jedním z nových řídicích prvků výstavby tunelů ve městech. Touto změnou náhledu se stalo jedním z hlavních cílů monitoringu při výstavbě městských tunelů prokazování skutečného vlivu výstavby na okolí.

Již od tunelu Mrázovka je samozřejmostí podrobná pasportizace objektů nadzemní zástavby před zahájením stavby a následný průběžný monitoring zaměřený na deformační a seizmické ovlivnění budov. Závěrečná repasportizace potom sumarizuje změny, které vznikly v průběhu ražeb, a společně s vyhodnocením monitoringu dává odpověď na otázku, které poruchy mohly souviset s výstavbou a které jsou dány přirozenou degradací/chováním budovy. Jak pasportizace, tak repasportizace by měla být v optimálním případě zpracována formou znaleckého posudku pro případ soudních sporů o náhradu škod s majiteli. Vhodné je i uzavření smlouvy s majiteli o strpění činností souvisejících se zajištěním objektů, s jejich monitoringem a především o opravě nebo náhradě škod vzniklých v souvislosti se stavbou. Tyto typy smluv byly uzavírány např. na tunelech Mrázovka a Královopolském.

Metody geotechnického monitoringu byly na prvních městských tunelech v ČR po roce 1989 využity prakticky ve stejné škále, přesnosti a kvalitě měření, jako jsou používány v současnosti. Přesto se objevilo několik zcela nových způsobů geotechnického sledování. Hlavní změna za posledních patnáct let ale nastala především ve způsobu přenosu dat, jejich prezentaci a postupné automatizaci některých metod monitoringu.

## ROZVOJ AUTOMATIZACE MĚŘENÍ A POKROK V PŘENÁŠENÍ DAT

Už od projektů prvních městských tunelů byl některými firmami zaváděn automatizovaný monitoring. Jednalo se ale vždy

Ministry of Industry and Trade of the CR, the Grant Agency of the CR or the Technology Agency of the Czech Republic. ARCADIS Geotechnika a. s. acts in these projects either as the holder of the entire project or a co-solver of a particular part of the project.

At last but not least, ARCADIS Geotechnika a. s. is the author of a range of normative regulations, e.g. technical specifications of the Ministry of Transport of the CR No. 237 on ‘*Monitoring of road tunnels*’ and TP 76-C specifications on ‘*Geotechnical research for road tunnels*’. In the Slovak Republic, the company carried out the section 28 of ‘*Geotechnical monitoring for roads and exploratory galleries*’.

In the text submitted to publishing, the authors further briefly describe both the development of monitoring methods and the application of their outputs to solving geotechnical problems associated with the development of urban tunnelling structures in the CR, and some experience gained during this process.

## SUMMARY OF DEVELOPMENT OF MONITORING OF URBAN TUNNELS IN THE CR

Geotechnical monitoring in urban tunnels developed along with the development of the construction of urban underground structures.

The first swallow was the monitoring on the trial excavation on the Line I.C of Prague metro, in the area of Fügnerovo Square (1968, colliery arches). At urban road tunnels, the first application of geotechnical monitoring took place during the course of the excavation of the Strahov automobile tunnel (the 1980s through 1990s, the modified side-drift method).

The more extensive utilisation of geotechnical monitoring in the Czech Republic is associated with modern tunnelling methods (the dominating NATM, the until now solitarily used mechanical pre-cutting method and the newest full-face mechanical driving). Pioneers of modern tunnelling methods in the CR were the Hřebeč tunnel, the Pisárky tunnel and the Line IV.B of Prague metro. However, during the initial 10 years after the change in social conditions, these tunnels were practically the only transport tunnels commenced and completed in the CR.

The development of over twenty transport tunnels after 1999 was commenced by the Mrázovka tunnel (1999-2004), the Vepřek tunnel (2000-2004), the metro Line IV.C1 (2000-2004) and the Březno tunnel (2000-2007). However, from this period, in its entirety, it is possible to number among genuinely urban structures only the following tunnels in Prague: the Mrázovka tunnel, metro Lines IV.C1 and IV.C2 (2004-2008), the Blanka complex of tunnels (2007-2014), metro Line V.A (2010-2014), and the Královo Pole tunnel in Brno (2008-2012).

Not only the tunnelling method but also social and economic changes at the end of the 1980s contributed to the more consistent application of geotechnical monitoring. Frequent negative influencing of private properties quickly ceased to be easy to justify by ‘social interest’. The risk associated with the effects of construction on properties and interests of third parties, no matter whether physical or juristic persons, has become one of the new controlling elements for the construction of tunnels in cities. After this change in opinions, one of the main objectives of monitoring during the construction of urban tunnels became the proving of actual influence of the development on the surroundings.

Detailed condition surveys of buildings before the commencement of the works and subsequent continual monitoring focused on deformational and seismic influencing of the buildings have become a commonplace since the Mrázovka tunnel construction. In the end, the final condition survey summarises the changes which originated during the underground excavation and, together with the assessment of the monitoring, gives an answer to the question which defects could be associated with the construction and which defects result from the natural deterioration/behaviour of the building. In an optimum case, both the condition survey and the final condition survey should be carried out in the form of an expert opinion in case of a legal dispute with property owners over compensation of damages. It is even recommendable to conclude a contract with the owners about the toleration to

spíše o aplikaci jedné metodiky, nebo pouze několika vybraných snímačů. Například na tunelu Mrázovka bylo poprvé využito automatických deformetrů. Záznamy z deformetrů byly kabely přenášeny do ústředny umístěné v budově a odtud přenášeny bezdrátově do kanceláře monitoringu k vyhodnocení a přes mobilní telefony přímo odpovědným pracovníkům investora, dodavatele stavby a projektanta.

Využití automatických totálních stanic pro sled deformací objektů zahájily společnosti Zakládání staveb, a. s., a ANGERMEIER Engineers, spol. s r. o. První aplikací byl sled deformací bytových domů v ulici Ostrovského na stavbě tunelu Mrázovka v souvislosti s prováděním kompenzačních injektáží. Stejně společnosti použily síť devíti automatizovaných totálních stanic také jako doprovodného měření kompenzačních injektáží na Královopolském tunelu v Brně. Primární využití dat sloužilo pro potřeby zhotovitele kompenzačních injektáží. Přenosem dat do databázového systému BARAB<sup>®</sup> bylo zajištěno i využití měření pro účely geotechnického monitoringu.

Společnost Arcadis poprvé úspěšně použila automatizované totální stanice na tunelu Blanka pro sled deformací bytových domů na Letné (tzv. budovy Molochoy). Systém využíval přenos dat přímo do databázového systému monitoringu BARAB<sup>®</sup>.

Za zmínku v této souvislosti stojí, ač není městským tunelem, železniční tunel Jablunkov, kde společnost Arcadis poprvé instalovala automatickou totální stanici s kontinuálním sběrem dat o deformaci tunelového ostění přímo v tunelu. Jednalo se o měření deformací ostění v provozovaném železničním tunelu, který byl v zóně ovlivněné ražbou tunelu velkého výrubního profilu v jeho sousedství. Měření mělo garantovat bezpečnost provozu exponované dopravní cesty.

Na novějších projektech je v hydrogeologických vrtech již standardně využíván kontinuální záznam hladiny podzemní vody, který může být doplněn i o dálkový přenos dat.

Podstatný vývoj od tunelu Mrázovka zaznamenal způsob zpracování a přenosu dat od zhotovitele monitoringu k uživateli (zpočátku elektronický přenos dat narážel na technické limity poskytovatelů připojení k internetu v České republice). Na tunelu Mrázovka bylo ještě plně využito modelu rozesílání výsledků měření na e-mailu ať už přímo, nebo prostřednictvím programu ArtecView. Zmíněný program umožňoval jak zpracování, tak vizualizaci zaslanych dat z konvergenčních měření u koncového

activities associated with the stabilisation of buildings, monitoring over them and, first of all, repairs or compensations for the damages which originated in the context of the construction activities. These types of contracts were concluded, for example, for the Mrázovka and Královo Pole tunnels. Geotechnical monitoring methods were applied to the initial urban tunnels in the CR after 1989 in the range, accuracy and measurement quality identical with those which are used today. Although, several absolutely new methods of geotechnical observation have emerged. The main change for previous fifteen years took place, first of all, in the data processing technique, its presentation and gradual automation of some monitoring methods.

## DEVELOPMENT OF MEASURING AUTOMATION AND PROGRESS IN DATA TRANSMISSION

Automated monitoring has been implemented by some firms already since the first urban tunnelling projects. However, these were always rather the cases of the application of single methodology or only several selected transducers. For example, the Mrázovka tunnel was the first case of the application of automatic deformeters. Records were transferred from the deformeters by cables to a switching centre installed in the building and from this place they were wireless transmitted to the monitoring office to be assessed and, via mobile phones, were transferred directly to responsible employees of the client, contractor and designer.

The use of automatic total stations for the observation of deformations of structures was started by Zakládání staveb a. s. and ANGERMEIER Engineers spol. s r. o. The first case of the application was the observation of deformations of blocks of flats in Ostrovského Street for the Mrázovka tunnel construction, in the context of the compensation grouting activities. The same companies used a network of nine automated total stations as an accompanying measurement system on the Královo Pole tunnel in Brno. The primary use of the data was for the needs of the contractor for compensation grouting. The use of the measurements for the purposes of geotechnical monitoring was secured through the transfer of data to the BARAB<sup>®</sup> data base system.

ARCADIS Geotechnika a. s. for the first time successfully used automated total stations for the first time on the Blanka tunnel for the observation of blocks of flats in Letná (the so-called Molochoy buildings). The system used the transmission of data directly to the database of the BARAB<sup>®</sup> monitoring system.

Despite the fact that the Jablunkov railway tunnel is not an urban tunnel, it is worth mentioning. ARCADIS Geotechnika a. s. for the first time installed an automated total station with continuous collection of data on deformations of the tunnel lining directly inside the tunnel. It was a case of measuring deformations of the lining inside an operating railway tunnel, which was located in a zone affected by the excavation of a large tunnel profile in its neighbourhood. The measurement was intended to guarantee the safety of operation on an busy transport route.

Continuous recording of water table level, to which long-distance transfer of data can be added, has



Obr. 1 Příklad výstupu z programu ArtecView (ARCADIS Geotechnika, a. s.)

Fig. 1 An example of an output from ArtecView program (ARCADIS Geotechnika, a. s.)



uživatele. Rozesílání dat e-maily však byla pouze provizorní cesta publikace výsledků.

Již na tunelech budovaných v období od roku 2000 uvedla společnost Arcadis na trh původní webový prohlížeč výsledků geodetických měření BARAB®. Systém od počátku využíval relativně jednoduššího zpracování geodetických dat a publikace měřených hodnot, ale již bez nutnosti využívání emailu, nebo instalace zvláštního softwaru. Jedinou podmínkou bylo internetové připojení a verifikace přístupových práv k projektu.

Prakticky od počátku byly v aplikaci BARAB® publikovány geologické dokumentace čeleb. Brzy byla doplněna i možnost ukládání dalších statických dokumentů umožňující prezentaci prakticky jakéhokoli typu měření. Statické dokumenty jsou však časově náročnější na zpracování a neumožňují jakékoli další efektivní vyhodnocení dat. Vyjma inklinometrů a tzv. 3D měření deformací ve vrtech se počínaje projektem metro V.A publikují veškeré měřitelné metodiky monitoringu pomocí číselného vstupu do databáze. Statickými dokumenty tak dnes zůstávají kromě výše zmíněných pouze protokoly o stavu stavebních objektů a dokumentace čeleb. Podstatnou změnou pro uživatele je variabilita grafického výstupu a možnost stažení jakýkoli dat v tabulární formě prostřednictvím souborů formátu csv.

Systém od samotného počátku umožňoval zobrazení projektů a měřených míst ve webovém GIS prohlížeči. Později bylo umožněno i oboustranné připojení s aplikací BARAB® přes konkrétní měřicí místo.

## ZAVÁDĚNÍ NOVÝCH METOD GEOTECHNICKÉHO MONITORINGU

K inovativním metodám monitoringu, které na stavbách prvních tunelů nebyly využity, patří např. 3D měření deformací po výšce sledovaného vrtu tzv. 3D inklinometry. Tato měření kombinují funkci extenzometrů a inklinometrů. Obdoba inklinometrických pažnic s vodícími drážkami pro posuvný náklonoměr je zpravidla v metrových vzdálenostech doplněna flexibilními spoji s měřicími značkami, mezi kterými je proměřována jejich aktuální vzájemná vzdálenost. Výhodou metodiky je výstup obdobný výsledkům měření na inklinometru, který je doplněný o průběh svislých deformací po výšce vrtu. Přínosem je i vyhodnocení svislých deformací prakticky spojitě po výšce vrtu a ne jen v diskrétních bodech, jako je tomu u klasických extenzometrů. Nevýhodou je kromě vyšších nákladů na instalaci a měření také praktická nemožnost automatizace měření.

Dalším doplněním standardního portfolia monitoringu při ražbě městských tunelů bylo využití automatických stanic pro sledování případných úniků plynu ve vybraných objektech nad Královopolským tunelem. K využití tohoto měření bylo přistoupeno s ohledem na očekávaná relativně vysoká deformační ovlivnění vybraných objektů, a tedy i vyšší riziko poškození rozvodů plynu v oblasti prostupů přípojek plynu do objektu. Většina přípojek sice byla kvůli ražbě upravena na přípojky flexibilní, ale k prostupu plynu do objektu nemusí dojít pouze kvůli poruše na vlastní přípojce, ale také např. pronikáním plynu v propustnějším prostředí zpětných zásypů venkovních rozvodů. Automatické stanice se snímači koncentrace plynu rozesílaly při překročení limitní hranice varovné signály formou SMS skrze bránu GSM zhotoviteli monitoringu i zástupci stavby. V případě varovného signálu následovala kontrola ručním detektorem plynu a případná další opatření.

## SPECIÁLNÍ METODY GEOTECHNICKÉHO MONITORINGU NA STAVBĚ METRA V.A

Díky využití moderních mechanizovaných zeminových štítů je výstavba metra V.A v prostředí ČR průlomovým projektem. To se projevilo i na řadě inovací z pohledu monitoringu, které nebyly z důvodu absence zkušeností se strojní ražbou a poznatků o stavu ražbou podcházených budov součástí původní dokumentace pro výběr zhotovitele monitoringu. Snad nebude předčasným konstatováním, že i díky operativním, často i podstatným úpravám

already been used as a standard on newer projects in hydrological boreholes.

Substantial development was registered on the Mrázovka tunnel in the system of processing and transmission of data from the contractor for monitoring to the user (in the beginning the electronic transmission encountered technical limits set by of the internet service providers in the Czech Republic). A model of distribution of measurement results through e-mails, either directly or through the ArtecView program, was still fully used on the Mrázovka tunnel. The above-mentioned program allowed both the processing of data obtained from convergence measurements and its visualisation at the end user's place. The distribution of data using e-mails was only a temporary way of the publication of results.

It was as early as on tunnels built during the period starting in 2000 that ARCADIS Geotechnika a. s. marketed the original BARAB® Web browser displaying results of survey measurements. In the beginning the system used relatively simpler processing of survey data and publication of measured values, but no more with the necessity for using e-mails or installing special software. The only condition was the Internet connection and verification of access rights to the project.

Geological documents on tunnel headings were published in the BARAB® application virtually from the beginning. The application was soon complemented by the addition of the possibility of storing other static documents, owing to which the presentation of virtually any type of measurement was possible. However, static documents are more demanding in terms of processing time and do not make any subsequent effective processing of data. Starting by the Metro V.A project, all measurable methodologies of monitoring, with the exception of inclinometers and 3D borehole measurements of deformations, are published by means of a numeric entry into the database. Apart from the above-mentioned documents, only protocols on the condition of building structures and documents on tunnelling headings remain to be static documents. The variability of the graphical output and possibility of downloading any data in a tabular form through CSV format files is a significant change for users.

The system allowed imaging of designs and measured locations in the GIS-Browser. The double-sided connection with the BARAB® application through a concrete measurement location was made possible later.

## IMPLEMENTATION OF NEW METHODS OF GEOTECHNICAL MONITORING

Among the innovative monitoring methods which were not applied on the construction sites of first tunnels there are, for example, 3D borehole measurements of deformations along the depth of the borehole being observed, the so-called 3D inclinometers. These measurements combine the function of extensometers and inclinometers. An analogy of inclinometer casing pipes with guiding grooves for the sliding inclinometer is complemented with flexible joints with measurement marks installed usually at one metre intervals; the current distance between them is continuously measured. The advantage of this methodology is the output similar to results of inclinometer measurement, which is complemented by the values of vertical deformations along the borehole depth. Another contribution is the information on vertical deformations provided virtually continually along the borehole depth, not only in discrete points as it is with classical extensometers. A disadvantage is that, apart from higher installation and measurement costs, the automation of measuring is practically impossible.

Another complementation of the standard portfolio of monitoring during the course of the excavation of urban tunnels was the application of automatic stations for the observation of contingent escape of gases in selected buildings above the Královo Pole tunnel. The decision to use this type of measurement was made with respect to the anticipated relatively high deformational influencing of selected buildings, thus also a higher risk of damage to gas distribution pipelines in the area of entries of gas services to the



monitoringu probíhají vlastní ražby úspěšně a v podstatě v mantinelech původního harmonogramu. Geotechnický monitoring na stavbě metra V.A provádí společnost Arcadis, která je vedoucím sdružení, jehož druhým členem je firma Inset, s. r. o.

Složitým úkolem bylo vyřešení monitoringu bytového komplexu „Hvězda“ na Petřínách a pěti čtrnáctipatrových panelových domů na sídlišti Červený Vrch. Obě tyto oblasti byly přímo podcházeny ražbami obou tunelovacích strojů a měly svá stavební specifika.

Rozsáhlý bytový komplex „Hvězda“ pochází z 90. let a jak se ukázalo, kvalita stavby je poplatná tomuto překotnému období. Prakticky ihned po dokončení komplexu se začaly projevovat problémy se statikou objektu. Hlavními problémy monolitického železobetonového skeletu, zjištěnými při pasportizaci objektu, bylo založení na patkách bez zohlednění velice proměnlivých geologických poměrů v úrovni základové spáry a také neprůběžné dilatační spáry. Tyto konkrétní problémy byly zjištěny při pasportizaci komplexu před jeho ovlivněním vlastními ražbami.

Po odmítnutí stavebně-technického průzkumu objektu vlastníky nemovitosti bylo rozhodnuto o instalaci rozsáhlého systému monitoringu v suterénních garážích objektu, jehož cílem bylo případný vznik nepříjemného deformačního chování objektů včas signalizovat. S ohledem na stav objektu i rychlost postupu strojní ražby byla smysluplná jediná varianta automatizovaného monitoringu, umožňující reagovat na případný nepříznivý vývoj v průběhu ražeb včas. Na nosné sloupce a stěny v suterénu byla nainstalována plně automatizovaná síť totálních stanic a měřících terčů (tři totální stanice a desítky odrazných hranolů).

Na vybrané trhlíny bylo osazeno 15 automatických deformetrů a na nosné zdi 15 automatických náklonoměrů. V obou případech bylo využito dálkového přenosu dat a automatické publikace výsledků měření v databázovém systému BARAB®. Automatickým monitoringem, který byl v provozu v řádu měsíců, a to i v období mimo ražby pod objektem, bylo prokázáno, že deformační ovlivnění objektu teplotními změnami je stejné, ne-li větší než ovlivnění objektu vlastní ražbou. Vysoká teplotní citlivost budov se projevovala i při extrémních klimatických výkyvech jak v zimě, tak v létě, kdy zástupci vlastníků upozorňovali na nové poruchy, které však prokazatelně stavbou způsobeny nebyly.

Podobně jako na komplexu „Hvězda“ byl koncipován i monitoring panelových domů na sídlišti Červený Vrch. Pět



Obr. 2 Stanoviště totální stanice v podzemních garážích komplexu „Hvězda“ (foto sdružení Arcadis – Inset)

Fig. 2 Total station set up in the underground garages of the Hvězda housing estate (Arcadis – Inset consortium)

buildings. It is true that the majority of gas services were modified to flexible tubes, but gas does not have to penetrate a building due to a defect on the service itself. It also may penetrate through a more permeable environment formed by backfills of external pipelines. When the limit was exceeded, the automatic stations with gas concentration sensors distributed warning signals in the form of SMS sent through a GSM gateway to the contractor for monitoring and a representative of the contractor. In the case of receiving a warning signal, inspection followed using a hand-held gas detector and contingent additional measures followed.

### SPECIAL GEOTECHNICAL MONITORING METHODS FOR METRO V.A CONSTRUCTION

Owing to the use of modern mechanised Earth Pressure Balance Shields, the construction of the metro line V.A is a breakthrough project in the environment of the Czech Republic. It manifested itself even on numerous innovations in the field of monitoring, which were not parts of original documents for monitoring services because of the absence of experience in full-face mechanical excavation and knowledge about the condition of the buildings being passed under by the excavation. Hopefully, the statement will not be premature that the tunnelling operations are proceeding successfully and, in substance, are being maintained within the boundaries of the original schedule owing to operative and often substantial modifications proposed by monitoring services. Geotechnical monitoring for the Metro V.A construction are provided by ARCADIS Geotechnika a. s., which is the leader of the consortium the second member of which is Inset s. r. o.

There was a difficult task for the monitoring to solve the monitoring of the Hvězda housing estate in Petřiny and five fourteen-storey panel buildings located in the residential area of Červený Vrch. The two areas were directly passed under by the excavation using both full-face tunnelling machines and had their own civil engineering specifics.

The extensive housing estate of Hvězda originated in the 1980s and, as it has turned out, the construction quality is indebted to this feverish period. It was virtually immediately after the completion of the complex that problems with the structural condition of the building started to emerge. The foundation on footings without allowing for very variable geological conditions at the foundation base level and non-continuous expansion joints were the main problems of the cast-in-place reinforced concrete frame, which were revealed during the building condition survey. These specific problems were identified during the condition survey before the effects of tunnelling operations started to take place.

After the owners of the property refused the structural condition survey, the decision was made that an extensive system of monitoring be installed in basement garages in the building the aim of which was to signal in time contingent origination of unacceptable deformational behaviour of the building. With respect to the building condition and the advance rate of the mechanical tunnelling, the only reasonable variant was automated monitoring, making a response to contingent unfavourable development during the course of the underground excavation possible in time. A fully automated network of total stations and survey targets (3 total stations and tens of retro-reflective prisms) were installed on structural columns and walls in the basement.

The total of 15 automatic deformeters and 15 automatic tiltmeters were installed on selected cracks and structural walls, respectively. Long distance data transmission and automatic publication of measurement results in the BARAB® database system was used in both cases. Owing to the automatic monitoring, which was in operation for a period in the order of months, even when no excavation was carried out under the building, it was proved that the deformational influencing of the building by temperature changes was identical, if not greater than the influencing of the building by tunnelling operations themselves. The high sensitivity of buildings to temperatures manifested itself even during extreme climatic fluctuations both in winter and in summer, where representatives of owners gave notices of new

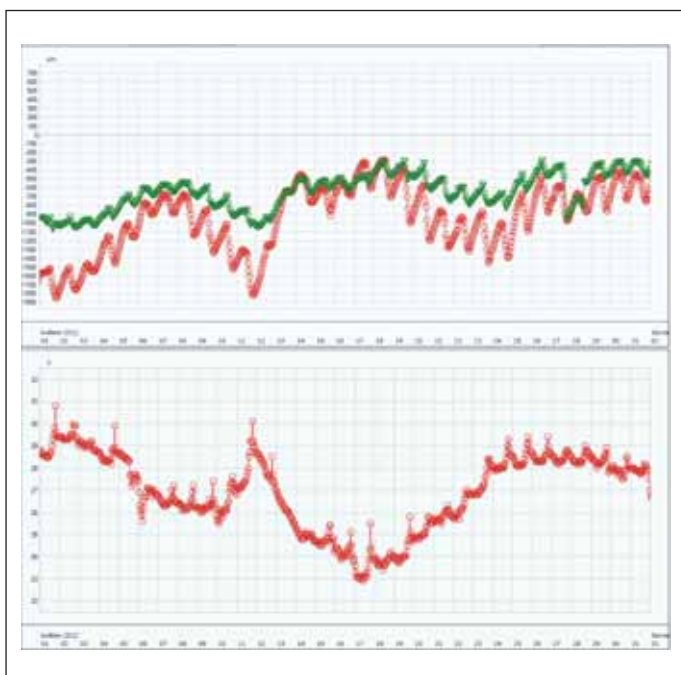
čtrnáctipodlažních panelových domů tvoří dvojice budov založených ve dvou výškových úrovních. Monitoring byl v tomto případě opět plně automatizovaný s využitím deformetrů (28 ks) a náklonměřů (31 ks) rozmístěných po celé výšce objektů. Dvojice totálních stanic umístěných na okolních budovách naproti jižní i severní fasádě sledovala na každém z domů čtveřici odrazných hranolů. Obdobně jako v případě monitoringu komplexu „Hvězda“ bylo prokázáno, že deformační ovlivnění objektu teplotními změnami je větší než ovlivnění objektu vlastní ražbou. Vysoká teplotní citlivost budov se projevovala zejména na dilatačních sparách, jak dokumentuje následující obrázek 3.

Další významnou metodikou z projektu metro V.A, která je u nás novinkou, je využití obráceného extenzometru pro měření extruze čelby při ražbě VZT tunelu pod ulicí Evropská v prostředí kvartérních sedimentů pod hladinou podzemní vody. Extenzometry byly osazovány do subhorizontálních vrtů vedených souběžně s osou tunelu přibližně ve středu kaloty. Hlava extenzometrů byla uložena u paty vrtu a s postupující těžbou se postupně odtěžovaly jednotlivé kotvy extenzometru. Stále však bylo možné odečítat data o změně vzdálenosti jednotlivých kotev vůči hlavě extenzometru. Měřeními byla dobře prokázána dostatečná stabilita čelby a její deformace. Hodnoty extruze nepřesáhly 20 mm. Extruze se projevovala až několik málo metrů před čelbou.

Měření extruze čelby je u nás dosud zanedbávanou metodou, přestože omezením extruze, např. kotvením čelby, lze dosáhnout významného zmenšení deformací.

Ojedinelá byla rovněž instrumentace kanalizační stoky vedené těsně nad tímtéž VZT tunelem. V případě havárie zděného páteřního kanalizačního řadu hrozila nejen propagace deformací na ulici Evropskou, ale také značná degradace horninového masivu v okolí stoky, která by mohla ohrozit i bezpečnost ražeb vlastního tunelu. Proto byly do stoky instalovány tři konvergenční profily tvořené dvojicemi automatizovaných tyčových konvergo-metrů (jeden vodorovný a jeden svislý). Systém byl doplněn i o kamerový systém s osvětlením, takže byly k dispozici nepřetržitě informace o stavu stoky bez nutnosti vstupu do stoky (fyzicky obtížně řešitelné, protože kanalizační vstupy jsou ve vozovce).

Tyto metodiky monitoringu se osvědčily především při provádění předstihového zajištění z tryskové injektáže nad budoucí klenbou tunelu, která jen těsně podcházela dno stoky. Při zjištění



Obr. 3 Změny šířky dilatační spáry ve dvou rovinách v mikrometrech a změny denních teplot (sdružení Arcadis – Inset)

Fig. 3 Changes in the width of an expansion joint in two planes in micrometers and changes in temperatures during day (Arcadis – Inset consortium)

defects, which were demonstrably not caused by the works.

The monitoring of panel buildings in the Červený Vrch housing estate was drafted similarly to the monitoring in the Hvězda complex. Five fourteen-storey panel buildings form pairs of buildings founded at two depth levels. In this case, monitoring was again fully automated using deformeters (28 pieces) and tiltmeters (31 pieces) distributed throughout the height of the buildings. The pair of total stations installed on neighbouring buildings across both the southern and northern façades observed groups of retro-reflective prisms installed on each of the buildings. Similarly to the case of the monitoring of the Hvězda housing estate, it was proved that the deformational influencing of the building by temperature changes was greater than the influencing of the building by the tunnelling itself. The high sensitivity to temperature changes manifested itself first of all on expansion joints, as documented by the following Figure 3.

Another important methodology implemented on the Metro V.A project, which is a novelty in the Czech Republic, is the use of a reverse-head extensometer for the measurement of the extrusion of the excavation face during the excavation of the ventilation tunnel under Evropská Street, in the environment formed by Quaternary sediments below water table. The extensometers were installed in sub-horizontal boreholes running in parallel with the tunnel centre line, approximately at the centre of the top heading. The heads of extensometers were installed at the ends of boreholes and individual extensometer anchors were step-by-step cut away during the advancing excavation. Although, it was still possible to read data on the changes in the distances of individual anchors from the extensometer heads. Sufficiently stable excavation face and its deformations were well proved by the measurements. The extrusion values did not exceed 20 mm. The extrusion started to manifest itself only several few metres ahead of the face.

Measuring of excavation face extrusion is a method which has been neglected in the Czech Republic till now, despite the fact that it has been proved that it is possible to achieve significant diminishing of deformations by restricting the extrusion, e.g. by face anchoring.

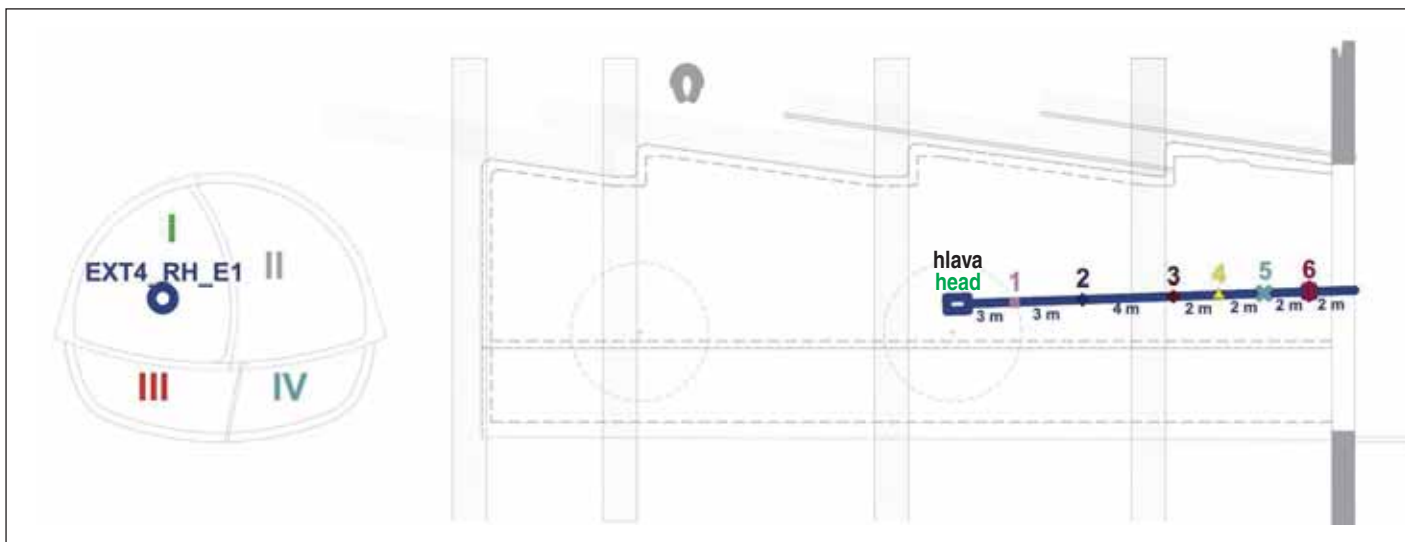
The instrumentation of the sewer running just above the above-mentioned ventilation tunnel was also unique. Not only the propagation of deformations to Evropská Street but also significant deterioration of the rock mass in the sewer vicinity, which could even jeopardise the safety of the tunnel itself, threatened in the case of a collapse of the main masonry sewer. This was the reason why 3 convergence profiles consisting of pairs of automated rod-type convergence meters (one of them vertical and the other horizontal) were installed inside the sewer. The system was even complemented by the addition of a camera system with lighting; uninterrupted information on the sewer condition was therefore available without necessity for entering the sewer (which task is physically difficult to solve because of the fact that entrances are in the roadway).

These monitoring methodologies acquitted themselves well first of all during the execution of jet grouting pre-support above the future tunnel vault, which passed just below the sewer bottom. When a change in the deformation of the sewerage tunnel lining (the closing of the egg-shaped structure) was identified or when intrusion of grouting mix into the tunnel was captured by the cameras, the grouting procedure was modified or the progress was suspended.

A number of measures, including complements and amendments to the monitoring system, were implemented after the emergency which took place in Evropská Street on 8th July 2012, which was connected with the generally poor condition of the road subgrade. One of the main changes was motivated by the need for identifying movements of the subgrade under consolidated road layers and tram tracks in time. Classical measurements of subsidence carried out on levelling pins installed on the surface of the rigid roadway creating 'bridges' over the settling soft subgrade would not have allowed it.

With this aim, the shallow extensometer principle was for the first time applied to the monitoring of urban tunnels. Groups of



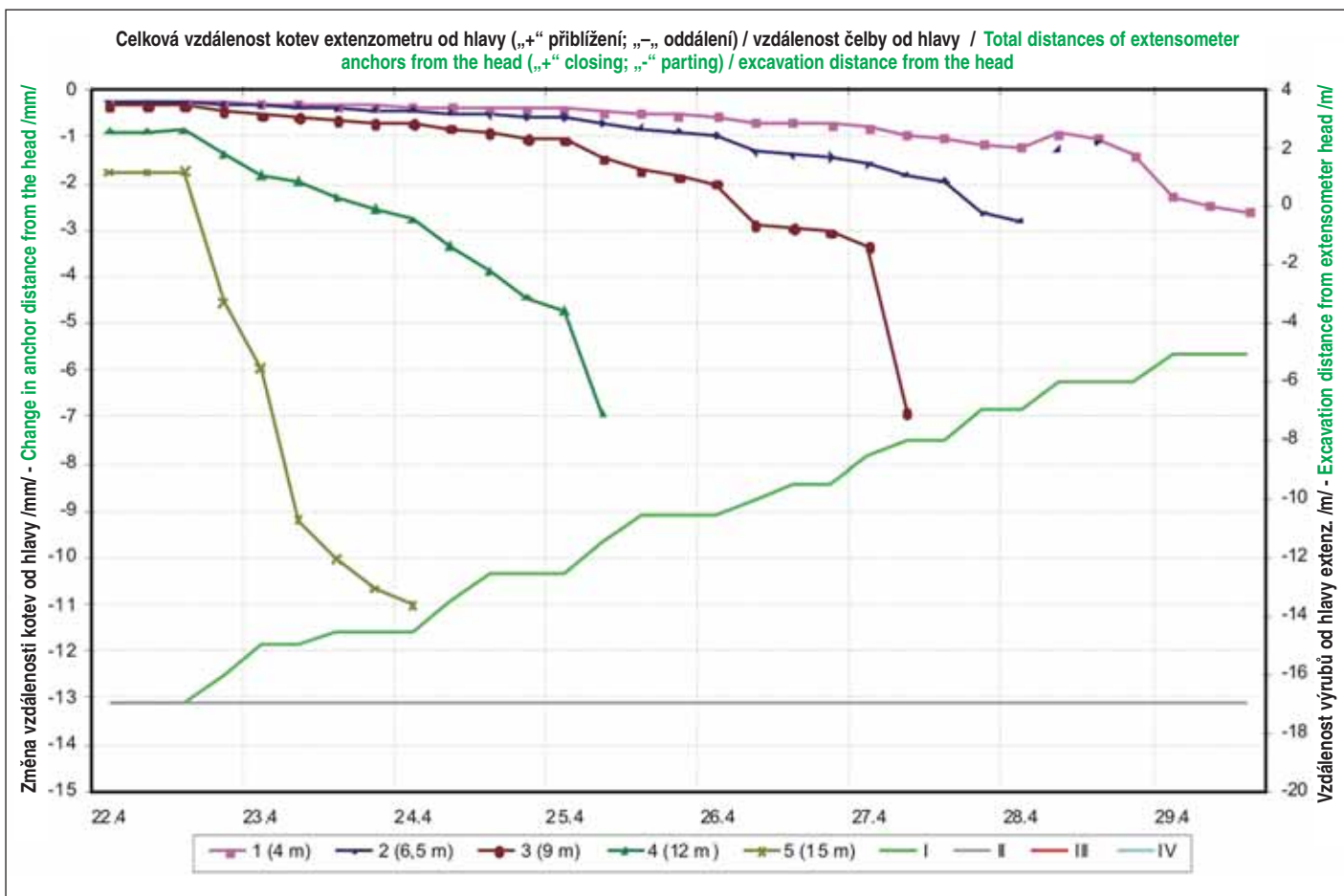


Obr. 4 Schéma čelbového extenzometru č. 2 (sdružení Arcadis – Inset)  
 Fig. 4 A chart of the front-face extensometer No. 2 (Arcadis – Inset consortium)

změny deformace ostění štoly (sevření vejčitého tvaru), nebo při zachycení průniků injektážní směsi do štoly kamerami byl postup injektáže upraven/pozastaven.

Po mimořádné události na ulici Evropská ze dne 8. 7. 2012, která souvisela s celkovým špatným stavem podloží komunikace, byla přijata řada opatření včetně doplnění a úprav monitoringu. Jedna z hlavních změn byla motivována potřebou zjistit včas pohyb podloží zpevněných vrstev komunikace a tramvajové trati. Klasické měření poklesů na nivelačních hřebech osazených na povrch tuhé komunikace vytvářející „mosty“ nad sedajícím měkkým podložím by to neumožnilo.

four levelling points fixed at a depth under stabilised road layers were step-by-step installed in transverse profiles, throughout the length of the route driven under Evropská Street by shields. The fixation of these points was carried out in a way securing the embedding of the levelling mark under the rigid roadway structure as a matter of principle as deep as the level of unconsolidated layers in the roadway or tram track subgrade. Contingent cases of settlement of the deep marks were transferred to the road surface by a rod protected by a special casing pipe and a head, where it was surveyed using standard surveying methods. The experience gained till now shows that the initial response to the



Obr. 5 Příklad výsledků čelbového extenzometru č. 2 (sdružení Arcadis – Inset)  
 Fig. 5 An example of results of the front-face extensometer No. 2 (Arcadis – Inset consortium)



Obr. 6 Automatický monitoring deformací stoky (foto sdružení Arcadis – Inset)

Fig. 6 Automatic monitoring of the sewer deformations (Photo courtesy of the Arcadis – Inset consortium)

Pro tento cíl bylo při monitoringu městských tunelů poprvé využito principu mělkého extenzometru. Po celé trase ražby štítů pod ulicí Evropská byly postupně instalovány čtveřice hloubkově stabilizovaných bodů v příčných profilech. Hloubková stabilizace bodů byla provedena tak, aby nivelační značky byly vetknuty pod tuhou vozovku zásadně až do nezpevněných vrstev v podloží vozovky, resp. tramvajové trati. Případná sedání hloubkových značek byla tyčí, pod ochranou speciální pažnice a zhlaví, přenášena na povrch vozovky a tam standardními geodetickými metodami měřena. Dosavadní zkušenosti ukazují, že první reakce na ražbu je na těchto bodech patrná v předstihu před klasickými nivelačními body osazenými

excavation is noticeable on these points in advance of the classical levelling points embedded directly in the roadway structure. Nevertheless, the total values of the deformation measured by both ways (deep-stabilisation points and points fixed directly to the roadway) become equal during several few days. The advance can be seen in the picture 7 – in the order of 1 to 2 days, i.e. about 15 – 30 metres. The advance of such the information is very important for timely proposal and implementation of contingent measures.

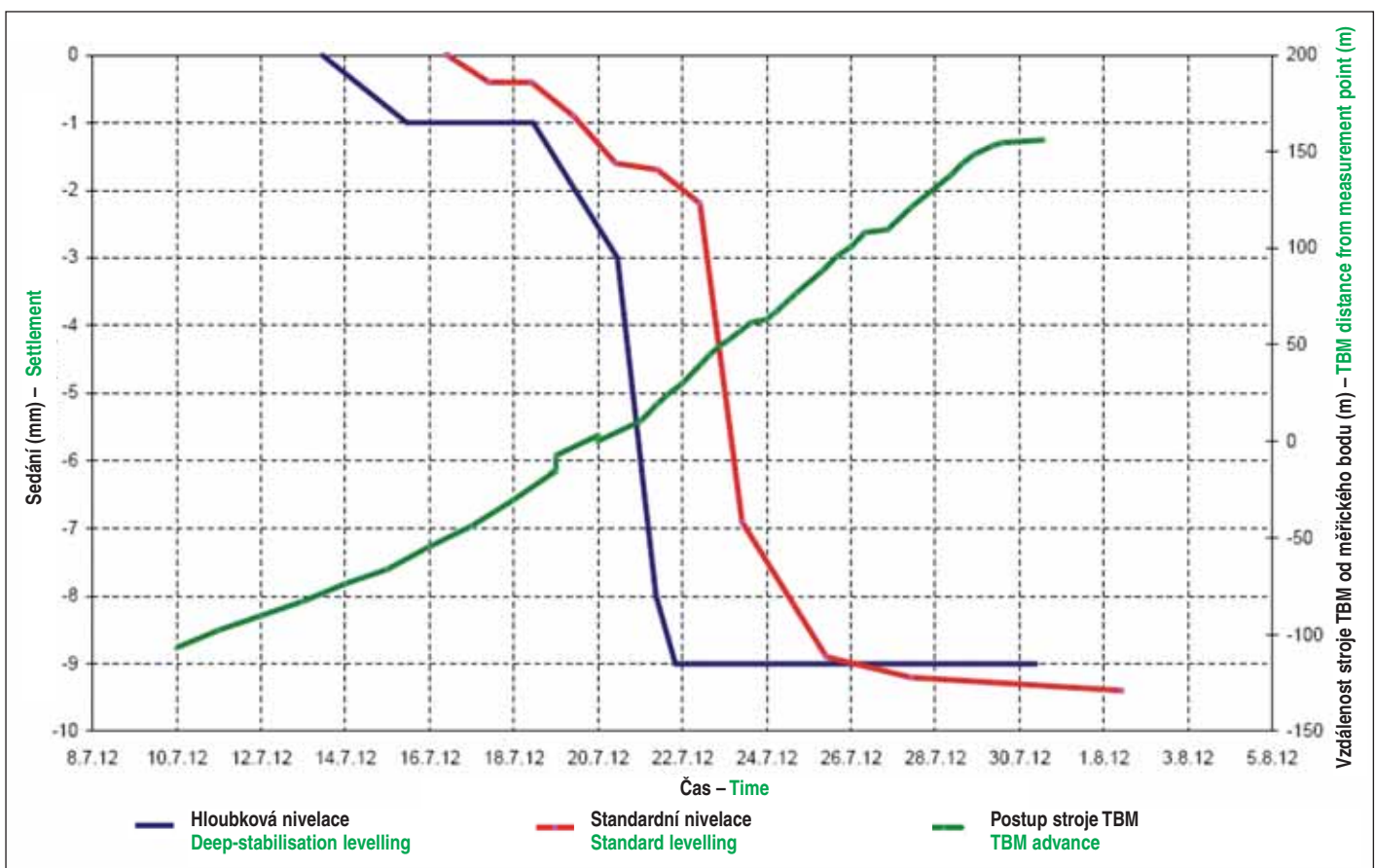
The above-mentioned applications of the new special monitoring methods to the Metro V.A project were realised by an ARCADIS - INSET consortium.

## RESEARCH PROJECTS FOCUSED ON THE DEVELOPMENT OF MONITORING

Applied research is permanently in the centre of attention and forms one of fundamental pillars of the long-term strategy of ARCADIS Geotechnika a. s. The following projects belonged among the most important tasks in the field of underground construction engineering:

*The Grant Agency of the CR project No. 103/09/2016 „Building structures affected by underground activities – prediction of the development of stress, strain and failure” (2009 – 2011)*

ARCADIS Geotechnika a. s. was the project co-resolver. The main resolver was the Professional Association for Science, Research and Consultancy of CSSI. The grant project subject was the elaboration of a theory and methodologies for the prediction of the development of strain field with time, relative to changes in the stress field around the excavation and the tunnel excavation face in various types of ground environment and the elaboration of the methodology of the processing of measurement data. Among other issues, the project was engaged in theoretical assumptions for the implementation of the engineering risk analysis with the perspective of its use in engineering related risk



Obr. 7 Srovnání pozorovaných deformací na klasickém nivelačním bodě a na hloubkově stabilizovaném nivelačním bodě (sdružení Arcadis – Inset)

Fig. 7 Comparison of deformations observed on a classical levelling point and a deep-fixed levelling point (Arcadis – Inset consortium)



přímo do konstrukce vozovky. Celková hodnota deformace se však v řádu prvních dnů u obou typů měření (hloubkové značky a body fixované přímo do vozovky) srovnává. Předstih je vidět na obr. 7 – řádově 1 až 2 dny, tj. cca 15–30 m. Předstih takových informací je velmi významný pro včasný návrh a provedení případných opatření.

Výše uvedené aplikace nových speciálních metod monitoringu na projektu metra V.A byly realizovány sdružením Arcadis–Inset.

## VÝZKUMNÉ PROJEKTY ZAMĚŘENÉ NA ROZVOJ MONITORINGU

Aplikovaný výzkum je trvale v centru pozornosti a tvoří jeden ze základních pilířů dlouhodobé strategie společnosti Arcadis. V oblasti podzemního stavitelství a monitoringu patřily mezi nejvýznamnější úkoly následující projekty:

*Projekt Grantové agentury ČR 103/09/2016 „Stavební konstrukce ovlivněné podzemní činností – predikce vývoje namáhání, přetvoření a porušení“ (2009–2011)*

Společnost Arcadis byla spoluřešitelem projektu. Hlavním řešitelem byla Odborná společnost pro vědu, výzkum a poradenství ČSSI. Předmětem grantového projektu bylo vypracování teorie a metodik pro predikci vývoje pole přetvoření v závislosti na změnách pole napětí okolo výrubu a čelby tunelu se zohledněním času v různých typech horninového prostředí a zdokonalení metodiky zpracování výsledků měření. Projekt se kromě jiného zabýval teoretickými předpoklady pro zavádění analýzy inženýrských rizik s perspektivou jejího uplatnění při řízení inženýrských rizik během výstavby inženýrských staveb.

Výstupy řešení projektu vytvořily předpoklady pro nové postupy vypracovávání efektivních metod vedoucích k zajištění spolehlivosti predikce skutečného působení stavebních konstrukcí ovlivněných podzemní činností. Dvěma konkrétními výstupy z řešení projektu jsou technické podmínky Ministerstva dopravy ČR č. 237 „Monitoring tunelů na dopravních komunikacích“ a ve Slovenské republice Technicko-kvalitatívne podmienky Slovenskej správy ciest časť 28 „Geotechnický monitoring pre tunely a prieskumné štôlne“ rovněž zpracované týmem specialistů společnosti Arcadis.

*Projekt ČBÚ č. 61 – 08 „Monitoring podzemních objektů v etapě užívání“ (2008–2010)*

Tento projekt byl řešen společně s firmami Energie–stavební a báňská, a. s., a Metroprojekt Praha, a. s. Poskytl podklady pro obnovu a doplnění předpisové základny monitoringu podzemních objektů v etapě provozu. Nositelem úkolu byla společnost Energie–stavební a báňská, a. s.

Společnost Arcadis se ve svých pracích zaměřila na vypracování zásad trvalého monitorování nosné konstrukce podzemní stavby v návaznosti na monitoring v průběhu výstavby tak, aby nemohlo dojít k haváriím s velkými materiálními škodami nebo snížení funkčnosti podzemního díla.

*Projekt ČBÚ – č. 3805 „Vedení podzemních děl v souvislé městské zástavbě“ (2005–2007)*

Nositelem tohoto úkolu byla společnost Arcadis spolu s Energií–stavební a báňskou, a. s. Předmětem řešení společnosti Arcadis bylo především vypracování metod komplexního monitoringu v oblastech výstavby dopravních tunelů ve městech. Monitoring byl zaměřen i na sledování a kontrolu deformačního procesu objektů nadzemní zástavby ovlivňovaných ražbou tunelů.

Součástí výstupů byl mimo jiné i návrh paragrafovaného znění novely vyhlášky ČBÚ č. 55/1996 Sb. (k inovaci vyhlášky pak došlo po diskusi širšího okruhu odborníků CzTA a do vyhlášky byla zapracována klauzule o nezbytnosti geotechnického monitoringu).

*Projekt VaV MPO ČR – č. FT-TA5/128 „Komplexní řešení stabilizace zemního, resp. horninového prostředí pro výstavbu podzemních objektů“ (2008–2010)*

Předmětem tohoto výzkumného projektu byl vývoj nových progresivních technologií stabilizace horninového prostředí, zlepšování fyzikálně-mechanických vlastností hornin a vývoj typových postupů pro stabilizaci horninového prostředí podle hlavních typů horninového prostředí.

management during the development of civil engineering projects.

The outputs of the solution to the project formed assumptions for new procedures for elaborating effective methods leading to securing of the reliability of the prediction of actual response of building structures affected by underground construction activities. There are two concrete outputs from the project solution, namely the Technical Specification of the Ministry of Transport of the CR No. 237 on the “Monitoring of road tunnels” and, in the Slovak Republic, the Technical Specifications of the Slovak road administration part 28 on “Geotechnical monitoring for road tunnels and exploratory galleries”, which were also elaborated by Arcadis.

*The project of the Czech Mining Authority No. 61–08 on the „Monitoring of underground structures at the stage of operation“ (2008–2010)*

This project was solved jointly with Energie - stavební a báňská a. s. and METROPROJEKT Praha a. s. It provided grounds for renewing and complementing the regulatory base for the monitoring of underground structures at the stage of operation. The project holder was Energie - stavební a báňská a. s.

In its papers, ARCADIS Geotechnika a. s. focused itself on the elaboration of rules for continuous monitoring of a load-bearing part of an underground structure in the context of the monitoring during the course of construction, intended to prevent collapses causing serious material damages or reducing the underground working functionality.

*The project of the Czech Mining Authority No. 3805 on „Carrying out underground workings in continuous urban development“ (2005–2007)*

The holder of this project was ARCADIS Geotechnika a. s. jointly with Energie - stavební a báňská a. s. The subject of the solution carried out by Arcadis was, first of all, the elaboration of methods for comprehensive monitoring in urban areas where transport areas are to be constructed. The monitoring was even focused on the observation and checking of the process of deformation of surface buildings affected by tunnelling operations.

Part of the outputs was, among other things, even a draft of the articulated text of the amendment to the Decree No. 55/1996 of the Czech Mining Authority (the decree was later amended after a discussion among a wider circle of experts of the CzTA; a clause about the indispensability of monitoring was incorporated into the Decree).

*The project of the Department of Research and Development of the Ministry of Industry and Trade of the CR No. FT-TA5/128 „The comprehensive solution to the stabilisation of ground environment for the development of underground structures“ (2008–2010)*

The subject of this research project was the development of new progressive technologies for the stabilisation of rock environment, improvement of physical-mechanical properties of ground and the development of types of procedures for the stabilisation of ground environment according to main ground environment types.

*The project of the Ministry of Industry and Trade of the CR No. FR-TI3/609 „The research into and development of the detection and checking observation of critical locations of geotechnical structures, first of all for the underground engineering industry, mining industry and other civil engineering construction“ (2011–2013)*

The main resolver is ARCADIS Geotechnika a. s., the co-resolvers are the Faculty of Civil Engineering of the Czech Technical University in Prague and SAFIBRA, s. r. o. As an example of the previous procedure of the work we can present the trial installation of optical cables on the primary lining in a tunnel for a dead-end-tail track at the Metro V.A construction. The objective of this project was to verify the procedure proposed for the installation of optical cables in praxis, with the construction works running, and detect deformations of the primary lining induced by tunnelling shields passing in close proximity. The measurements are conducted using the BOTDA (Brillouin Optical Time Domain

*Projekt MPO ČR FR-TI3/609 „Výzkum a vývoj detekce a kontrolního sledování kritických míst geotechnických konstrukcí zejména podzemního stavitelství, báňského průmyslu i ostatních inženýrských staveb“ (2011–2013)*

Hlavním řešitelem je společnost Arcadis, spoluřešiteli jsou Stavební fakulta ČVUT v Praze a Safibra, s. r. o. Jako příklad z dosavadního postupu prací uvádíme zkušební instalaci optických kabelů na primární ostění obrátového tunelu na stavbě metro V.A. Cílem bylo ověřit navržený postup osazení optických kabelů v praxi za provozu stavby a detekovat deformace primárního ostění vyvolaných razicími štíty, které procházely v těsné blízkosti. Měření jsou prováděna metodou BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis). Tento projekt je realizován za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu.

## NĚKTERÉ POZNATKY ZÍSKANÉ PŘI MONITORINGU VÝSTAVBY MĚSTSKÝCH TUNELŮ

Standardní proces vyhodnocení výsledků monitoringu by měl zahrnovat několik kroků. Poněkud odlišné je přitom hodnocení monitoringu s automatickým odečtem měřených dat a monitoringu s manuálním odečtem dat.

V první řadě by měly být veškeré výsledky hodnoceny z hlediska relevantnosti extrémů (anomálií) ve změřených hodnotách. Ojedinelé extrémy nebo anomálie lze po podrobnějším prozkoumání většinou přisoudit poškození měřicího místa, nestandardnímu ovlivněním technologií ražby nebo např. špatnou stabilizací měřického bodu. Pro posouzení těchto nahodilých vlivů je výhodnější provádět kontrolní ruční odečty měření, u kterých je měřičem automaticky prováděna i kontrola měřicího místa i širšího stavebního okolí.

Po odfiltrování výše zmíněných extrémů by se na výsledky mělo pohlížet z hlediska možného ovlivnění parazitními jevy (např. klimatické vlivy, nahodilá zatížení atd.). V případě jasně známých závislostí na parazitním jevu je možné výsledky o tato zkeslení opravit. Další vyhodnocení výsledků je už komplexní pohled na zjištěná data, při kterém je ještě někdy možné odhalit i chybu měření nebo chybu při zpracování dat. Spíše už se však jedná o analýzu změřených dat především v kontextu aktuálních postupů prací na stavbě, výsledků souvisejících měření, geologické skladby i dalších okrajových podmínek. Na změřená data se musí nahlížet s citem pro základní zákony statiky, fyziky a geologie/geotechniky.

Pokud se však nenalezne příčina anomálních jevů, je nutno hledat jejich fyzikální vysvětlení a posoudit platnost přijatých hypotéz a předpokladů o chování pozorovaných konstrukcí.

Základní pravidlo je hodnocení trendů v chování sledovaných systémů. Trendy jsou vždy důležitější než absolutní hodnoty. Díky prakticky libovolné četnosti měření je hodnocení trendů u automatického monitoringu velmi usnadněno. Tato výhoda je umocněna, pokud existuje dostatečně dlouhé časové období provádění měření již před ovlivněním stavebními pracemi. V takovém případě lze výsledky očistit o řadu parazitních jevů, které jinak výsledky měření mohou značně zkeslit. Asi nejpodstatnějším parazitním vlivem je ovlivnění teplotní. Nejedná se pouze o zkeslení výsledků aktuální atmosférickou teplotou, ale také o vlivy od oslunění měřených konstrukcí a o dlouhodobější trendy prohřívání nebo prochladnutí konstrukcí v průběhu ročních období. Příkladem parazitního vlivu změny teploty na změny šířky dilatační spáry je uveden výše na obrázku 3.

Dalším přirozeným vlivem jsou změny úrovně hladiny podzemní vody.

Při dlouhodobějším kontinuálním sledování lze ale filtrovat i vlivy pravidelně se opakujících významnějších nahodilých změn/pohybů. Typickým příkladem mohou být např. deformace parkovacího domu v důsledku jeho proměnlivé obsazenosti.

Přesnost některých měření zkeslují i další parazitní jevy, jejichž eliminace je již podstatně náročnější. Například u použití totálních stanic pro automatická sledování polohových změn se v exteriéru nepříznivě projevuje vliv refrakce laserového paprsku

(Analysis) method. This project is being implemented with a financial support from the means of the national budget through the Ministry of Industry and Trade.

## SOME PIECES OF KNOWLEDGE OBTAINED DURING THE MONITORING OF URBAN TUNNELS

The standard process of assessing monitoring results should comprise several steps. The assessment of monitoring with automatic readout of measured data and monitoring with manual data readout are slightly different.

First of all, all results should be assessed from the aspect of the relevancy of extremes (anomalies) in the measured values. Isolated extremes or anomalies can be after examination mostly assigned to a damage caused to the measurement point, non-standard impact of the tunnelling technology or, for example, wrong stabilisation of the measuring point. To be able to assess these random effects it is more advantageous to carry out manual reading of measurements, where the person carrying out measurements also automatically performs checking of the measurement point and wider construction surroundings.

After filtering out the above-mentioned extremes, the results should be viewed from the point of view of the possible impact of parasitic phenomena (e.g. climatic effects, random loads etc.). If clearly known dependence on the parasitic phenomenon is the case, it is possible to rectify the results by allowing for these distortions. The subsequent assessment of results is already a comprehensive view of the ascertained data, where it is still sometimes possible even to detect a measurement error or an error in the processing of data. However, it is rather a case of the analysis of measured data, first of all in the context of current work procedures on site, results of related measurements, geological structure and other boundary conditions. The measured data must be viewed with feeling for basic laws of static, physics and geology/geotechnics.

Anyway, if the cause of the anomalous phenomena is not found, it is necessary to seek a physical explanation for them and assess the validity of adopted hypotheses and assumptions regarding the structures being observed.

The basic rule is the assessment of trends in the behaviour of monitored systems. Trends are always more important than absolute values. Owing to the arbitrary frequency of measurements, the assessment of trends in automatic monitoring is made much easier. This advantage is enhanced if a sufficiently long period of the execution of measurements exists before the effects of construction work start to act. In such a case it is possible to refine the results by removing many parasitic phenomena, which otherwise can significantly distort measurement results. Probably the most significant parasitic phenomenon is the affection by temperature. It is not only the case of skewing the results, but also effects of the sun exposure of the structures being measured and longer-term trends in heating up or cooling down of structures during the course of the seasons of the year. An example of the parasitic impact of temperature changes on the width of an expansion joint is presented above in Figure 3.

Another natural effect lies in changes in the water table level.

However, at longer-term continual observation it is possible to filter out even the effects of regularly repeating more significant random changes/movements. Deformations of the car parking building induced by the variable occupancy can be used as a typical example.

The accuracy of some measurements is even skewed by other parasitic phenomena, the elimination of which is already significantly more complicated. For example, in the case of the application of total stations to the automatic observation of position changes in the exterior, the refraction of laser beam at the interface between air layers with different temperatures has an adverse influence. The influence of wind gusts may also be problematic when measurement stations or points are installed on less tough and high buildings. Another example is the monitoring of basement garages of the Hvězda housing estate (see above), where an also interesting parasitic influence of temperature was



na rozhraní různě teplých vrstev vzduchu. A problematický může být i vliv poryvů větru při umístění měřicích stanic nebo bodů na relativně méně tuhých a vysokých budovách. Dalším příkladem je monitoring suterénních garáží obytného komplexu „Hvězda“ (viz výše), kde byl pozorován rovněž zajímavý parazitní vliv teploty – ačkoli se jednalo o měření v interiéru, stávalo se, že docházelo k refrakci laserového paprsku dálkoměru při záměrech těsně nad kapotami zaparkovaných vozidel s ještě teplým motorem.

## ZÁVĚR – POUČENÍ PRO PŘÍŠTÍ PROJEKTY

Uplatnění monitorovacích metod u nás, ve srovnání se zahraničím, má nepochybně vysokou úroveň. Do běžné praxe jsou zavedeny všechny potřebné metody s odpovídající spolehlivostí. Výjimkou dosud bylo měření extruze čelby. S pomocí monitoringu se již i u nás běžně řídí geotechnická rizika během ražeb. Větší rezervy jsou ale ještě v optimalizaci nákladů při výstavbě v situacích, kdy výsledky měření prokazují zanedbatelná rizika s možností přijmout opatření vedoucí k úsporám.

Budoucnost monitoringu bezpochyby patří automatizaci některých metod monitoringu s kontinuálním sběrem a dálkovým přenosem dat. Ne všechny metody lze ale automatizovat a ne pro všechny úlohy se hodí kontinuální sběr dat. Například konvergenční měření v tunelu optickými stanicemi lze automatizovat jen částečně (z jednoho stanoviště totální stanice) a kontinuální sběr dat v tomto případě ani nemá smysl.

Automatizaci vybraných metod monitoringu a dálkovým přenosem všech změřených dat ke geotechnikovi a dalším účastníkům výstavby se zkrátí prodleva mezi provedením měření a jeho interpretací. To umožní skutečně operativní řízení ražeb na základě výsledků monitoringu. Vzhledem k rozvoji rychlých strojních ražeb i v podmínkách České republiky ani jiná cesta není možná.

Na druhou stranu je třeba si uvědomit, že monitoring není všelék. Monitoring sleduje projevy interakce horninového prostředí a stavební činnosti. Některé jeho projevy však zaznamenávat nemůže nebo by to nebylo ekonomické. Pokud je příčinou nepříjemného chování sledovaného systému fenomén, který není předmětem měření a sledování, tak ani přijatelné výsledky měření ostatních parametrů nejsou zárukou bezpečné ražby.

**ING. ONDŘEJ HORT, hort@arcadisgt.cz,**  
**ING. TOMÁŠ EBERMANN, ebermann@arcadisgt.cz,**  
**DOC. ING. ALEXANDR ROZSYPAL, CSc.,**  
 rozsypal@arcadisgt.cz,  
**ING. MAREK ZÁLESKÝ, Ph.D., zalesky@arcadisgt.cz,**  
**JAKUB BOHÁTKA, bohatka@arcadigt.cz,**  
**ARCADIS Geotechnika, a. s.**

Recenzoval: doc. Ing. Vladislav Horák, CSc.

observed – even though the measurements were conducted in the interior, distance meter laser beam refraction was from time to time encountered in the cases of sight lines running just above hoods of parking vehicles with engines still hot.

## CONCLUSION – LESSONS FOR FUTURE PROJECTS

The level of the monitoring methods which have been applied in the Czech Republic is undoubtedly high in comparison with foreign countries. All required methods guaranteeing relevant reliability have been introduced in common praxis. Measuring of the excavation face extrusion has so far been an exception. Monitoring has already become a common tool for the management of geotechnical risk during the course of tunnelling operations. More significant reserves still exist in the optimisation of costs during construction in situations where measurement results demonstrate negligible risks with the possibility of implementing measures leading to savings.

The future of monitoring indisputably belongs to the automation of some monitoring methods with continuous collection and long-distance transmission of data. On the other hand, not all methods can be automated and the continuous data collection is not suitable for all tasks. For example, convergence measurements inside a tunnel using optical stations (from one total station set up) can be automated only partially and continuous data collection has no sense in this case.

Owing to the automation of selected monitoring methods and long-distance transmission of all measured data to the geotechnician and all other parties to the construction, the lag between the measurement execution and its interpretation is shortened. It will make the real operative management of tunnelling operations based on monitoring results possible. With respect to the development of high advance rate mechanical tunnelling even in the conditions of the Czech Republic, no other way is certainly possible.

On the other hand, it is necessary to realise that monitoring is not a panacea. Monitoring observes manifestations of the interaction between ground environment and construction activities. Although, it cannot register all of the interaction manifestations or it would be uneconomic. If a phenomenon which is not the subject of measurements and observation is the cause of the unacceptable behaviour of the system being observed, even the acceptable results of measurements of the other parameters are not a guarantee of safe tunnelling.

**ING. ONDŘEJ HORT, hort@arcadisgt.cz,**  
**ING. TOMÁŠ EBERMANN, ebermann@arcadisgt.cz,**  
**DOC. ING. ALEXANDR ROZSYPAL, CSc.,**  
 rozsypal@arcadisgt.cz,  
**ING. MAREK ZÁLESKÝ, Ph.D., zalesky@arcadisgt.cz,**  
**JAKUB BOHÁTKA, bohatka@arcadigt.cz,**  
**ARCADIS Geotechnika, a. s.**

## LITERATURA / REFERENCES

- Bohátka, J., Ebermann, T., Hort, O. *Prague Metro Line A Extension – New Geotechnical Challenge In Historic City*. Sborník konference WTC 2011 ITA-AITES. Helsinky.
- Ebermann, T., Hort, O., Tlamsa, J., Záleský, M. *Geotechnical Risks Mastery – Prague Metro Line A Extension*. Sborník konference WTC 2012 ITA-AITES. 2012. Bangkok.
- Ebermann, T. Disertační práce: *Tunelování v měkkých horninách*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2012. 137 s.
- RozsyPAL, A. *Varietní metody hodnocení konvergenčních měření ostění při ražbě tunelu*. Polní geotechnické metody Ústí n. L. 2010.
- RozsyPAL, A. *Kontrolní sledování a rizika v geotechnice*. Vydavatelství Jaga Group v. o. s. 2001. Bratislava.
- RozsyPAL, A., Veselý, V., Ebermann, T. Geotechnický monitoring tunelů pozemních komunikací. *Technické podmínky Ministerstva dopravy ČR*. 2011. Č. 237. Praha.
- RozsyPAL, A., Veselý, V., Ebermann, T., Badíková, N. Geotechnický monitoring pre tunely a prieskumné štôlny. *Technicko-kvalitatívne podmienky SSC – časť 28*. Ministerstvo dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja SR. 2010. Bratislava.
- Veselý, V. Disertační práce: *Konfrontace modelu v geotechnice*. Vysoké učení technické v Brně. Brno. 2006. 115 s.
- Záleský, M. Disertační práce: *Dilatometrická měření pro stanovení přetvárných vlastností horninového masivu*. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Praha. 2010. 309 s.

# INŽENÝRSKOGEOLOGICKÁ A GEOTECHNICKÁ PROBLEMATIKA VÝSTAVBY NOVÉ TRASY METRA V.A V PRAZE

## ENGINEERING GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL PROBLEMS OF THE NEW METRO LINE V.A CONSTRUCTION IN PRAGUE

JIŘÍ TLAMSA, TOMÁŠ EBERMANN, JAKUB BOHÁTKA, LUCIE BOHÁTKOVÁ, JIŘÍ ROUT

### ÚVOD

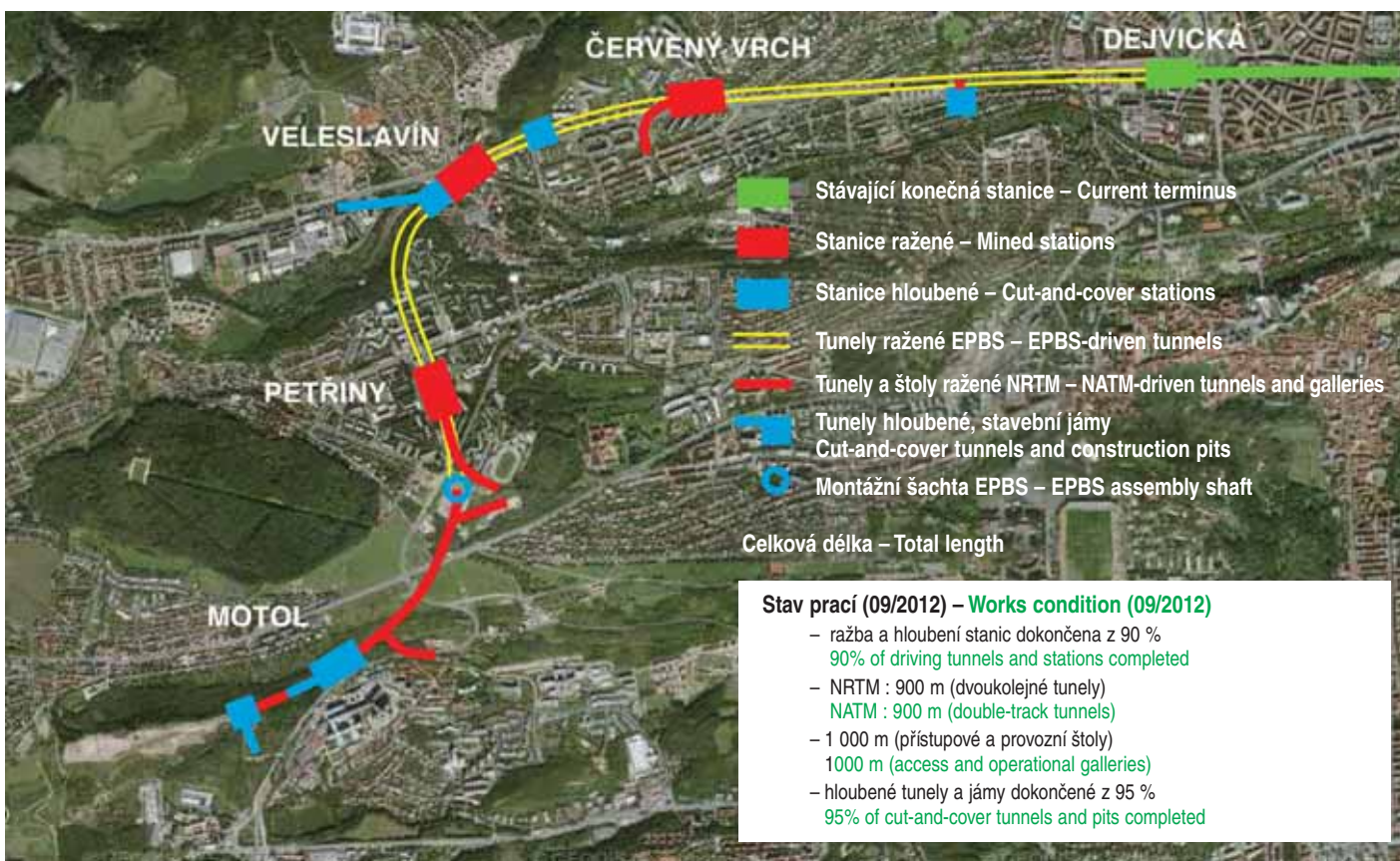
Prodloužení trasy metra V.A v Praze vede geologicky velmi složitým územím, které je v mnoha ohledech specifické a vymyká se geologickým podmínkám tak, jak je známe z vnitřní Prahy. Kromě toho se ražba poprvé v ČR provádí technologií plnoprofilových razičích štítů s podporou čelby (dále jen EPB). Obě tyto skutečnosti, spolu s neúplnými znalostmi geologického prostředí v době přípravy stavby, jsou příčinou řady nestandardních geotechnických problémů, s kterými se musí stavba vypořádávat. Autoři se věnují především inženýrsko-geologické problematice, která s řešením těchto problémů souvisí.

Nová trasa metra s celkovou délkou cca 6,2 km se nachází v západní části města a vede od stávající konečné stanice Dejvická po největší pražskou nemocnici Motol. Její součástí jsou 4 nové stanice – 3 stanice ražené pomocí Nové rakouské tunelovací metody (dále jen NRTM) (Červený Vrch/Bořislavka, Veveřslavín a Petřiny) a jedna stanice hloubená (Motol). Hlavním specifickým z pohledu projektového řešení a technologie výstavby je zejména skutečnost, že převážnou část trasy (zhruba 4,8 km) tvoří jednokolejné traťové tunely realizované pomocí dvou razičích štítů EPB o průměru 6 m. Na území ČR jde o vůbec první využití této technologie ražeb. Pouze v okolí stanice Motol

### INTRODUCTION

The fifth extension of the Prague Metro Line A (Line V.A) runs across a geologically very complicated area, which is in many respects specific and goes beyond the scope of geological conditions as we know them from inner Prague. In addition, it is for the first time that the excavation is carried out using earth pressure balance shields (EPB). The two facts, together with the incomplete knowledge of the geological environment during the construction planning stage, are the cause of a range of non-standard geotechnical problems, which the project management must often cope with. The authors devote themselves first of all to engineering geological problems, which are connected with these problems.

The new metro line with the total length of 6.2 km is located in the western sector of the city, running from the existing terminus, Dejvická station, up to Motol Hospital, which is the currently largest hospital in Prague. The line extension contains 4 new stations – 3 of them mined (Červený Vrch / Bořislavka, Veveřslavín and Petřiny stations) using the New Austrian Tunneling Method (the NATM) and one cut-and-cover station (Motol station). The main specific feature from the design solution and tunnelling technique point of view is first of all the



Obr. 1 Přehledná situace trasy metra V.A v Praze  
Fig. 1 General map of the Metro V.A Line in Prague



je nová trasa metra tvořena dvoukolejnými traťovými tunely raženými metodou NRTM (z části rovněž hloubené). Téměř celá trasa metra V.A se nachází v hustě zastavěné oblasti města s mnoha budovami, frekventovanými komunikacemi, podzemními inženýrskými sítěmi nebo železniční a tramvajovou tratí. Stavební práce ve formě prvních ražeb přístupových štol a hloubení stavebních jam byly započaté v květnu 2010. Zahájení provozu metra je na této nové trase plánováno na konec roku 2014. Přehledná situace trasy s označením hlavních stavebních objektů je uvedena na obr. 1.

V průběhu dosavadní výstavby se vyskytla řada geotechnických problémů a mimořádných situací. Na takovéto neočekávané problémy bylo vždy nutné adekvátně a operativně reagovat ať už formou realizace doplňkového inženýrskogeologického průzkumu pro ověření nebo upřesnění geotechnických podmínek výstavby, adaptací projektového řešení či technologie výstavby nově zjištěným podmínkám, nebo modifikací metod a rozsahu geotechnického monitoringu. Hned v úvodu je třeba říci, že díky operativní spolupráci všech účastníků výstavby se řešení takovýchto problémů daří většinou včas.

Společnost ARCADIS Geotechnika, a. s., se jako u téměř všech v minulosti realizovaných rozsáhlých tunelových staveb na území Prahy na řešení těchto problémů významně podílí. Od prvních přípravných prací ve formě archivních rešerší a jednotlivých etap geologických průzkumných prací po současné aktivity v průběhu výstavby v podobě komplexního geotechnického monitoringu a konzultační činnosti v oblasti geotechniky, hydrogeologie, povrchového a podzemního stavitelství.

## GEOLOGICKÉ PRŮZKUMNÉ PRÁCE PŘED ZAHÁJENÍM VÝSTAVBY

Počáteční znalosti o geologickém prostředí v době zahájení přípravných prací na projektu byly velmi omezené, protože rozsah geotechnického průzkumu byl, jako ostatně velmi často v jiných případech, jeho zadáním omezen. Nicméně postupně s rozvojem přípravy stavby a v době jejího zahájení a průběhu byla provedena řada významných doplňkových průzkumů, které tento nedostatek alespoň částečně vykompenzovaly.

V úplném počátku přípravných prací se společnost ARCADIS Geotechnika, a. s., podílela na sběru a vyhodnocení dostupných archivních údajů pro možnost předběžného zhodnocení podmínek výstavby a sestavení prvotního projektového řešení nové trasy metra. V dalším období v letech 2007–2008 byla předmětem její činnosti nejprve spolupráce na geofyzikálním měření při provádění průzkumu pro dokumentaci pro územní rozhodnutí (DUR) a posléze provedení a vyhodnocení průzkumných prací zahrnující již komplexní spektrum metod v podobě geologického mapování, realizace inženýrskogeologických vrtů, laboratorních a polních zkoušek, geofyzikálního měření apod. pro vypracování dokumentace pro stavební povolení (DSP) a výběr zhotovitele stavby (DVZ).

Po provedení první etapy průzkumných prací byly geotechnické podmínky výstavby v převážné části trasy hodnoceny jako velmi složité a místy pro dané projektové řešení jako značně nepříznivé. Závěry průzkumných prací ukázaly, že převážná část projektované trasy metra V.A se nachází v horninovém prostředí s velmi pestrá a komplikovanou strukturně-geologickou stavbou. Jednotlivé projektované stanice a traťové tunely se nacházejí v proměnlivém prostředí paleozoických sedimentárních a vulkanických hornin pražské pánve (jílovité břidlice, prachovce, křemence, tufy, diabasy), sedimentárních hornin křídových plošin (pískovce, prachovce, jílovce) a místy také kvartérních sedimentů (sprašové hlíny, svahoviny, terasové štěrky). V zájmovém území bylo rovněž identifikováno několik významných tektonických zón a také oblastí četných fosilních svahových pohybů při okrajích křídových plošin.

fact that the major part of the route (about 4.8 km) is formed by single-track running tunnels driven by two 6 m-diameter EPB shields. It is the case of the first application of this tunnelling technique in Prague. The new line is formed by double-track running tunnels driven using the NATM (also with a cut-and-cover part) only in the vicinity of Motol station. Nearly the entire metro V.A route is located in a densely developed area of the city, containing many buildings, busy roads, underground engineering networks or a railway and tram tracks. The construction operations in the form of initial driving of access tunnels and excavation of construction trenches commenced in May 2010. The opening of the metro operation on this line is planned for the end of 2014. A synoptic layout of the route with the main structures marked in it is presented in Fig. 1.

A number of geotechnical problems and extraordinary situations have been encountered during the course of the construction till now. It was always necessary to adequately and operatively, either by executing a supplementary geological survey with the aim of verifying or specifying geological conditions for the construction, adapting the design solution or the construction technology to the newly determined conditions or by modifying the methods and scope of the geotechnical monitoring. It is necessary just in the beginning to say that, owing to the operative collaboration of all parties to the construction, such problems have been mostly successfully solved in time.

ARCADIS Geotechnika a. s. significantly participates in solving these problems, similarly to nearly all extensive tunnelling construction projects completed in Prague in the past. Their participation comprises initial planning work in the form of archive information retrieval and individual stages of geological investigation operations, up to the current activities during the course of the construction in the form of comprehensive geotechnical monitoring and consultancy in the field of geotechnics, hydrogeology, at-grade structures and underground structures.

## GEOLOGICAL EXPLORATORY WORK BEFORE THE CONSTRUCTION COMMENCEMENT

The initial knowledge of the geological environment at the moment of starting the work on the project was very limited because the scope of geotechnical investigation was restricted by the contract, similarly to many other cases. Nevertheless, numerous important supplementary investigations were carried out gradually, with the development of the construction preparation and at the beginning of the construction works, which partially compensated for this drawback.

In the very beginning of the preparation work, ARCADIS Geotechnika a. s. participated in collecting and assessing archive data available, which was carried out to make a preliminary assessment of the construction conditions and compilation of an initial design solution for the new metro line possible. During the following period, in 2007 – 2008, the subject of its activities first of all comprised the initial collaboration on geophysical measurements during the investigation required for the issuance of the zoning and planning permission and, later, the execution and assessment of survey work covering the already complex spectre of methods in the form of geological mapping, carrying out engineering geological boreholes, laboratory tests and field tests, geophysical measurements etc., required for the elaboration of the final design and procurement documents for the construction works.

After the completion of the initial stage of the investigation, geotechnical conditions for the construction were assessed as very complicated for the major part of the alignment, locally significantly unfavourable for the particular design solution. The conclusions of the investigation showed that the major part of the Metro V.A alignment being designed is located in

## GEOLOGICKÉ PRŮZKUMNÉ PRÁCE PO ZAHÁJENÍ VÝSTAVBY – DOPLŇKOVÉ PRŮZKUMY

I přes malý rozsah průzkumných prací provedených v letech 2007–2008 (pouze 21 průzkumných vrtů na cca 6,2 km trasy – rozsah prací zde byl pevně stanoven objednatelům) a místy značně nepříznivé geotechnické podmínky, na což bylo v závěrech průzkumu pro DSP z roku 2008 upozorňováno, bylo při nedostatečných znalostech o horninovém prostředí postupně zahajováno zpracovávání dokumentace pro provedení stavby (DPS) a na některých úsecích trasy metra i samotná výstavba. Po započítání prvních prací v podobě ražeb přístupových štol a hloubení stavebních jam či šachet se však na mnoha místech trasy brzo ve větší či menší míře postupně ukázalo, že znalost geologické stavby hostitelského prostředí opravdu není dostatečně podrobná. Prvotní předpoklady geotechnických podmínek, místy založených pouze na údajích z geologických map bez přímého ověření průzkumnými vrtými, se od těch skutečných poměrně často výrazně odlišovaly.

V průběhu let 2010 až 2012, tedy po zahájení prvních razících a výkopových prací, byla proto pro doplnění informací o geotechnických podmínkách výstavby v rámci celé trasy metra V.A postupně provedena řada doplňkových inženýrsko-geologických a geofyzikálních průzkumů. Tyto doplňkové průzkumné práce, které prováděla společnost ARCADIS Geotechnika, a. s., byly realizované převážně v prostoru projektovaných stanic metra, hloubeného dvoukolejného tunelu za stanicí Motol a problematického úseku ražby EPB mezi stanicí Červený Vrch a Dejvická. V rámci těchto doplňkových průzkumných prací bylo k polovině roku 2012 provedeno celkem 55 průzkumných vrtů, což zhruba odpovídá i původně doporučenému počtu doplňkových vrtů ze závěrů inženýrsko-geologického průzkumu pro DSP z roku 2008. Kromě průzkumných vrtů prováděných z povrchu bylo vzhledem k místy velmi nepříznivým geotechnickým podmínkám a komplikované strukturně-geologické stavbě území nutné v několika případech rovněž realizovat průzkumné vrtky z podzemí. Takoveto vrtné práce pro upřesnění nebo ověření podmínek ražby byly realizované při ražbách stanic Veleslavín a Červený Vrch (obr. 2) a také v prostoru vzduchotechnické štoly v blízkosti stanice Motol, kde byla ražbou neočekávaně zastížena stará štola s dřevěnou výztuží (více viz níže).

Nedostatečná prozkoumanost území ve fázi přípravy projektu stavby v kombinaci se složitou strukturně-geologickou stavbou



Obr. 2 Realizace doplňkových průzkumných vrtů a presiometrického měření ve stanici Červený Vrch pro potřeby upřesnění strukturně-geologické stavby a geotechnických parametrů horninového masivu (foto D. Moravanský)

Fig. 2 Realisation of supplementary survey boreholes and pressuremeter measurements at Červený Vrch station, required for the specification of structural-geological composition of the ground mass (Photo courtesy of D. Moravanský)

ground environment with very variable and complicated structural-geological composition. Individual stations and running tunnels being designed are located in the variable environment of Palaeozoic sedimentary and volcanic ground of the Prague Basin (clayey shales, siltstone, quartzites, tuffs, diabases), sedimentary rocks of the Cretaceous plateaus (sandstone, siltstone, claystone) and locally also Quaternary sediments (secondary loess, colluvial deposits, terrace gravels). Even several significant fault zones and areas with the occurrence of numerous fossil slope mass movements at the edges of the Cretaceous plateaus were identified in the area of operations.

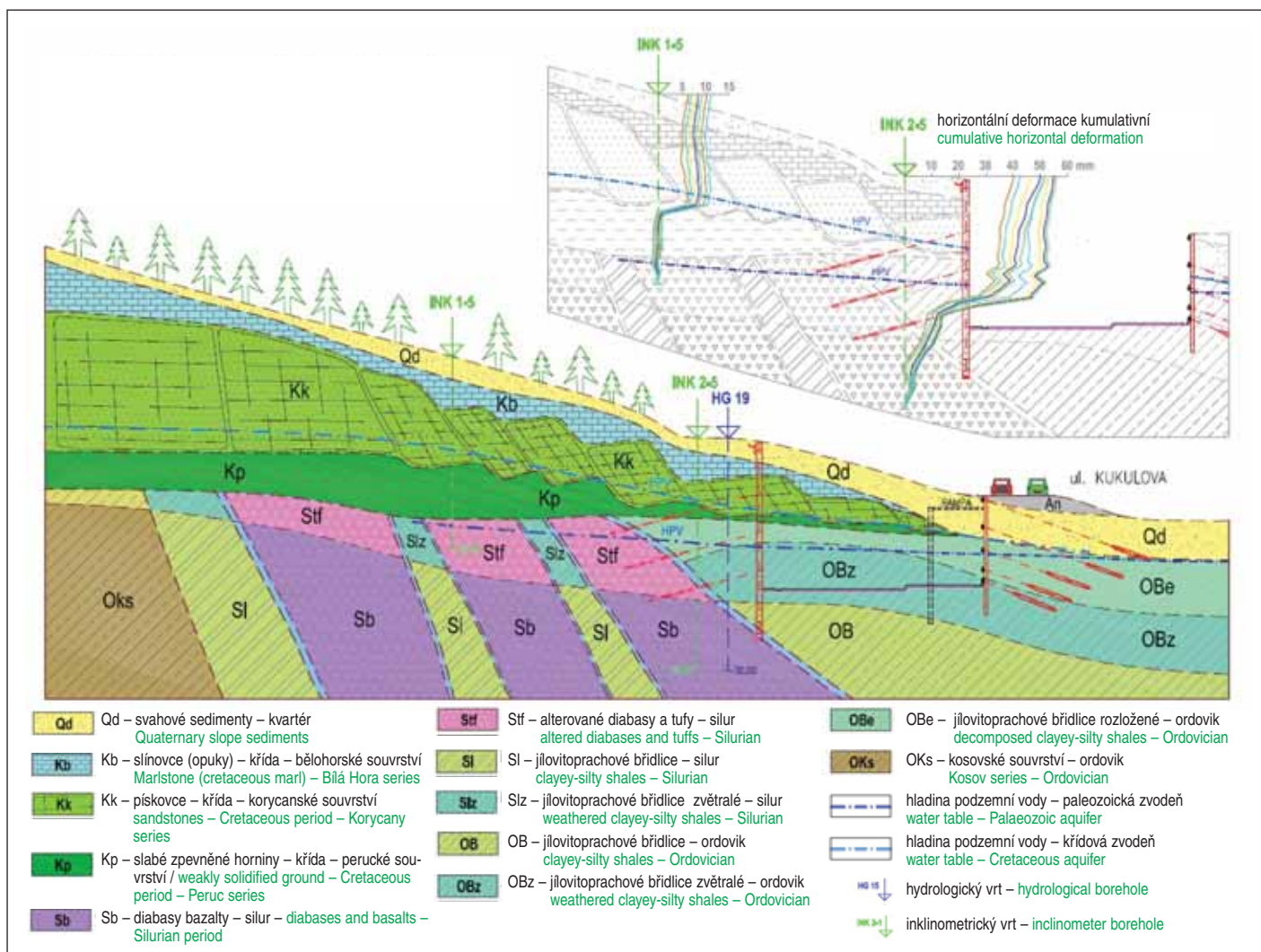
## GEOLOGICAL SURVEYS AFTER THE CONSTRUCTION COMMENCEMENT – SUPPLEMENTARY SURVEYS

Even despite the small extent of survey operations carried out in 2007 – 2008 (only 21 exploratory boreholes along the about 6.2 km long alignment – this scope was prescribed by the client) and the locally significantly unfavourable geotechnical conditions, which fact was notified of in the conclusions of the survey for the final design from 2008, the work on the detailed design gradually commenced despite the inadequate knowledge of the ground environment, even the construction work started in some sections of the metro route. Although, it soon gradually turned out in larger or smaller extent in many locations of the route, after the commencement of initial work operations, having the form of driving assess tunnels and excavating construction trenches or shafts, that the knowledge of the geological structure of the host environment is really not sufficiently detailed. The initial assumptions about the geological conditions, which were locally based only on data from geological maps, without direct verification by means of exploratory boreholes, relatively frequently significantly differed from reality.

For that reason a number of supplementary engineering geological and geophysical surveys were step-by-step conducted during the 2010 – 2012 period, after the commencement of initial tunnelling and excavation operations, with the aim of complementing information about geotechnical conditions for the construction within the framework of the entire metro V.A line. These supplementary surveys were carried out by ARCADIS Geotechnika a. s., mostly in the area of the designed metro stations, the cut-and-cover double-track tunnel beyond Motol station and a problematic section of the EPB tunnelling between Červený Vrch and Dejvická stations. The total of 55 exploratory boreholes were carried out within the framework of these supplementary surveys until the end of the half of 2012, which number roughly corresponds to the originally recommended number of supplementary boreholes based on the conclusions of the engineering geological survey for the final design from 2008. Apart from the exploratory boreholes carried out from the surface, it was in several cases necessary with respect to the locally very unfavourable geotechnical conditions and the complicated geological structure of the area to carry out the drilling from the underground. Such drilling operations for the specification or verification of tunnelling conditions were realised during the excavation of Veleslavín and Červený Vrch stations (see Fig. 2) and also in the area of a ventilation tunnel in the vicinity of Motol station, where the excavation unexpectedly encountered an abandoned gallery with timber support (for more information see the text below).

The insufficient scope of surveys carried out in the construction design preparation phase in combination with the complex structural-geological composition led, in some cases, to encountering diametrically different geotechnical conditions just before the commencement or during the course of excavation and tunnelling operations. It in many cases fundamentally affected the construction procedures. Sometimes it was even





Obr. 3 Příčný geologický řez v prostoru stavební jámy stanice Motol v území postiženého fosilními blokovými pohyby křídových pískovců; na obrázku je dobře patrná spojitost geologické stavby a reakce horninového masivu na postupné odtěžování stavební jámy (zprac. J. Tlamsa)

Fig. 3 Geological cross-section in the area of construction pit for Motol station, the area affected by fossil block movements of Cretaceous sandstone. The relationship between the geological structure and the ground mass response to the gradual excavation down to the construction pit bottom is well visible in the picture (prepared by J. Tlamsa)

vedla v některých případech k zastížení diametrálně odlišných geotechnických podmínek těsně před zahájením nebo v průběhu výkopových a razicích prací. To mělo v mnoha případech zásadní dopad do postupu výstavby. Někdy bylo dokonce potřeba přistoupit k jinému projektovému řešení a technologii (záměna raženého tunelu za hloubený, použití skalní frézy místo drapáku, změna členění výrubů a postupu ražby, náročnější zajištění výrubu, náročná stavební opatření pro zajištění okolních objektů, úprava rozsahu a metodiky monitoringu apod.).

Význam průzkumných prací adekvátního rozsahu a kvality se téměř ve všech případech dobře prokázal po dokončení jednotlivých stavebních objektů, kdy se doplňkovými průzkumy očekávané geologické podmínky vždy v přijatelných mezích shodovaly s realitou. Problematika přípravy a realizace výstavby vlivem změn podmínek pak názorně ukázala, že provedení průzkumných prací podle všeobecně známých a platných zásad je v případě takovéto rozsáhlé stavby zcela nezbytné.

### GEOTECHNICKÝ MONITORING VÝSTAVBY

Vedle doplňkových průzkumných prací je hlavní náplní prací společnosti ARCADIS Geotechnika, a. s., v rámci výstavby nové trasy metra V.A provádění komplexního geotechnického a hydrogeologického monitoringu. Geotechnický monitoring je prováděn ve sdružení s firmou INSET, s. r. o., kdy vedoucím členem sdružení je společnost Arcadis.

Cílem geotechnického monitoringu je sledování vlivu povrchové a podzemní výstavby na přetváření horninového masivu

necessary to proceed to another design solution and technology (replacing mining with cut-and-cover procedure, the use of a roadheader instead of a clamshell excavator, changing the excavation sequence and the tunnelling procedure, more demanding excavation support, demanding construction measures for stabilising buildings in the neighbourhood, modifying the scope and methodology of monitoring etc.).

The importance of adequate scope and quality surveys was nearly in all cases well proved after the completion of individual structures, where the geological conditions anticipated by the supplementary surveys were always within acceptable limits identical with reality. The problems of the preparation and realisation of the construction caused by changes in the conditions clearly demonstrated that in the cases of such an extensive construction project the execution of surveys according to well known and valid principles is absolutely indispensable.

### GEOTECHNICAL MONITORING OF THE CONSTRUCTION PROCESS

Apart from supplementary exploration, the main component of the ARCADIS Geotechnika a. s. work within the framework of the construction of the new metro Line V.A is the execution of comprehensive geotechnical and hydrogeological monitoring. The geotechnical monitoring is carried out by a consortium where ARCADIS Geotechnika a.s. is the leader and the other member is INSET s. r. o.

(sledování odezvy horninového masivu na ražbu a hloubení pomocí inklinometrického a extenzometrického měření ve vrtech, konvergenční měření výrubů, sledování sedání povrchu apod.) a změny v režimu proudění podzemní vody (kontinuální měření úrovní hladiny podzemní vody, sledování vydatností pramenů, poklesy vody ve studních, změny chemismu apod.). Dalším úkolem monitoringu je sledování chování nových stavebních konstrukcí (ostění tunelů, stěny stavebních jam, výztužné prvky atd.) a jejich interakce s horninovým prostředím ovlivněným stavebními pracemi. V neposlední řadě se sleduje reakce stávajících nadzemních konstrukcí na ražby (náklony a porušení budov, deformace komunikací a kolejí, poruchy kanalizačních sítí atd.).

Spektrum použitých monitorovacích metod a přístrojové techniky odpovídá charakteru a náročnosti jednotlivých stavebních objektů a geotechnickým podmínkám. Předmětem činnosti geotechnického monitoringu je tak kupříkladu komplexní sledování rozsáhlých stavebních jam v městském intravilánu (např. jáma hloubené části stanice Veleslavín) nebo ve výrazně nepříznivých geotechnických podmínkách (např. jáma stanice Motol – obr. 3), dále pak rozsáhlých ražených stanic v podmínkách silně porušeného horninového masivu (např. stanice Červený Vrch – obr. 7) a velmi nízkého nadloží (např. stanice Veleslavín) nebo ražba jednokolejných traťových tunelů pomocí nové technologie EPB v extrémně nepříznivých podmínkách kvartérních sedimentů (úsek Červený Vrch – Dejvická).

## INŽENÝRSKOGEOLOGICKÁ DOKUMENTACE VÝSTAVBY

Nedílnou součástí geotechnického monitoringu je inženýrskogeologická dokumentace horninového prostředí. Hlavním úkolem inženýrskogeologické dokumentace je pak posuzování shody či míry odlišnosti skutečně zastižených geotechnických podmínek výstavby vůči předpokladu realizačního projektu.

Geotechnická a inženýrskogeologická dokumentace se provádí podle TP 237 „*Geotechnický monitoring tunelů pozemních komunikací*“, ve kterých je metodika provádění těchto prací podrobně definována v návaznosti na geotechnický monitoring a zařídování do technologických tříd výrubu. TP 237 vstoupily v platnost v červenci roku 2011 a byly vypracovány pod vedením kolektivu specialistů společnosti Arcadis.

V případě ražeb pomocí NRTM se na základě zhodnocení inženýrskogeologické dokumentace a posouzení případných odlišností mezi předpoklady a zastiženou skutečností přizpůsobuje technologie ražby (tj. technologické třídy NRTM) v podobě členění výrubu, délky záběrů, tloušťce primárního ostění, počtu



Obr. 4 Inženýrskogeologická dokumentace postupného odtěžování hlouběného tunelu pro obrátové koleje při stanici Motol v prostředí tektonicky porušeného horninového masivu a fosilních svahových pohybů (foto J. Tlamsa)

Fig. 4 Geological documentation of the gradual excavation for the cut-and-cover tunnel for the turn-back track tunnel at Motol station, in the environment formed by faulted ground mass and fossil slope mass movements (Photo courtesy of J. Tlamsa)

The objective of the geotechnical monitoring is to observe the impact of at-grade and underground construction on deformations of ground mass (the observation of the response of ground mass to underground excavation and digging by means of inclinometer and extensometer measurements in boreholes, convergence measurements of excavated openings, observation of the settlement of the surface etc.) and the changes in the groundwater flow regime (continual measurement of water table level, observation of the yield of springs, dropping of water in wells, changes in the water chemistry etc.). Another monitoring task is the observation of the behaviour of new structures (tunnel linings, walls of construction pits, reinforcing elements etc.) and their interaction with the ground environment affected by construction processes. At last but not least, it follows responses of existing surface structures to underground excavation (tilting of buildings and their deterioration, deformations of roads and rail tracks, defects of sewerage networks etc.).

The spectrum of the monitoring methods and instrumentation used corresponds to the character and demands of individual structures and geotechnical conditions. The subject-matter of the activities of geotechnical monitoring is, for example, comprehensive observation of large construction pits in urban areas (e.g. the construction trench for the cut-and-cover section of Veleslavín station) or in markedly unfavourable geotechnical conditions (e.g. the construction pit for Motol station – see Fig. 3), as well as the observation of extensive mined stations in the conditions formed by heavily disturbed ground mass (e.g. Červený Vrch station – see Fig. 7) and very thin overburden (e.g. Veleslavín station) or the driving of single-track running tunnels by means of the new technology using EPB shields in extremely unfavourable conditions of the Quaternary sediments (the section between Červený Vrch and Dejvická stations).

## GEOLOGICAL DOCUMENTATION OF THE CONSTRUCTION WORKS

Geological documentation of the ground environment is an inseparable part of geotechnical monitoring. The main task of the geological documentation is to assess the conformance or degree of deviation of actually encountered geotechnical conditions if compared with assumptions of the detailed design.

Geotechnical and geological documentation are elaborated according to the technical specifications TP 237 on ‘Geotechnical monitoring or road tunnels’, where the methodology of the execution of these works defined in detail in relation to geotechnical monitoring and categorisation into excavation support classes. The TP 237, which were carried out under the leadership of a team of ARCADIS Geotechnika a.s. specialists, came in effect in July 2011.

In the case of the NATM, the excavation procedure (i.e. the excavation support classes) in the form of the excavation sequence, excavation round length, thickness of the primary lining, number of supporting elements etc., is modified on the basis of the assessment of geological documentation and the assessment of contingent differences between assumptions and the reality encountered. The conditions encountered form the factor crucial for the selection of suitable excavation procedure (in the form of various degrees of the face support in the extraction chamber provided by the muck itself or by compressed air – see Fig. 4) even in the case of the EPBM tunnelling. The documentation of actually encountered engineering geological and geotechnical conditions is, apart from other purposes, indispensable for the correct assessment and interpretation of results of all measurements conducted within the framework of the geotechnical monitoring.

As opposed to other underground construction projects in the Czech Republic, there is a specific activity carried out during the course of the geological documentation for the





Obr. 5 Odběr vzorků horniny z prostoru těžní komory EPB S-609 (Tonda) pro stanovení fyzikálně-mechanických parametrů včetně abrazivnosti podle CAI (foto J. Rout)

Fig. 5 Taking samples of ground from the EPB S-609 (Tonda) extraction chamber for the purpose of determining physical-mechanical parameters, including abrasivity according to CAI (Photo courtesy of J. Rout)

výztužných prvků apod. Rovněž v případě ražeb pomocí EPB jsou zastižené podmínky rozhodné pro zvolení optimální technologie ražby v podobě různého stupně podpory čelby v těžní komoře (samotnou rubaninou nebo pomocí přetlaku vzduchu). Obdobně u hloubení stavebních jam jsou zastižené geotechnické podmínky rozhodné pro posouzení dostatečného dimenzování výztužných prvků a celkového zajištění (obr. 4). Dokumentace skutečně zastižených inženýrskogeologických a hydrogeologických podmínek je mimo jiné také nezbytná pro správné vyhodnocení a interpretaci výsledků všech měření prováděných v rámci geotechnického monitoringu.

Mezi specifika činnosti inženýrskogeologické dokumentace při výstavbě metra V.A je oproti jiným podzemním stavbám na území ČR sledování geotechnických podmínek ražby pomocí štítů EPB, které jsou v podmínkách naší republiky použity vůbec poprvé. V případě této technologie ražby, kdy je přímá dokumentace horninového prostředí značně omezena (při ideálních podmínkách přístup na čelbu zpravidla jen 1–2 za týden, tj. při maximální rychlosti postupu stroje po cca 100–200 m, přes odtěžovací otvory v hlavě EPB je viditelná jen cca 1/4 plochy čelby), se vedle standardní dokumentace čela výrubu z prostoru těžní komory posouzení geotechnických podmínek ražby opírá výhradně o inženýrskogeologickou dokumentaci vyvážené rubaniny. Specifickou činností prováděnou pracovníky společnosti Arcadis při hodnocení podmínek ražby pomocí EPB jsou také odběry vzorků z čela výrubu (obr. 5) pro posuzování fyzikálně-mechanických vlastností zastižených hornin (vedle standardních údajů např. abrazivnost dle CAI).

Kromě ověřování předpokládaných geologických podmínek ražeb je úkolem inženýrskogeologické dokumentace i provádění prognóz vývoje podmínek pro další úseky. Tato činnost je důležitá zejména v případě prostředí s nízkým stupněm prozkoumanosti nebo velmi složitých strukturně-geologických podmínek, kde je i při realizaci velkého počtu průzkumných sond obtížné přesně určit stavbu horninového masivu. V případě zastižení neočekávaných podmínek ražby nebo hloubení jsou pak poznatky z pečlivé inženýrskogeologické dokumentace neocenitelným zdrojem informací sloužícím jako jakýsi další stupeň průzkumných prací, na jejichž základě lze detailněji zhodnotit nejen další úseky ražby, ale také geotechnické podmínky okolních stavebních objektů.

Z těchto důvodů také většina přístupových štol, šachet nebo menších ražených objektů velmi dobře posloužila jako podzemní průzkumná díla (například přístupová štola a strojovna vzduchotechniky Markéta při stanici Petřiny, přístupová štola František

metro V.A construction, namely the observation of geotechnical conditions of the tunnelling using EPB shields. This technique is used in the conditions of the Czech Republic for the first time. In the case of this particular tunnelling technique, where the direct documentation of ground environment is significantly limited (at ideal conditions the access to the excavation face is possible only 1–2 times per week, i.e. at the maximum EPB machine advance rate it means an inspection conducted approximately every 100–200 m; it is carried out through cutterhead openings providing the visibility of about 1/4 of the excavation face) the assessment of the excavation geotechnical conditions is, in addition to the standard documentation of the excavation face, solely based on the geological documentation of the muck transported to the surface. A specific activity carried out by employees of ARCADIS Geotechnika a. s. when assessing the EPB tunnelling conditions is also collecting samples from the excavation face (see Fig. 5) for the assessment of physical-mechanical properties of the rock encountered (for instance, in addition to standard data, the abrasivity according to CAI).

Apart from the verification of anticipated tunnelling geological conditions, the task of geological documentation is to provide prognoses of the development of the conditions even for subsequent sections. This activity is important first of all in the case of the environment with the low degree of knowledge provided by surveys or very complicated structural and geological conditions, where it is difficult to exactly determine the structure of rock mass despite the big number of completed exploratory probes. In the case of encountering unexpected conditions for tunnelling or excavation from the surface, the pieces of knowledge gained from thoroughly carried out geological documentation are an invaluable source of information, serving as a sort of another degree of survey, on the basis of which it is possible to objectively assess not only the section which will follow, but also geotechnical conditions of neighbouring building structures.



Obr. 6 Tektonicky nasunutá hornina kosovského souvrství (šedé jílovité břidlice a křemence – levá část čelby) a siluru (černé jílovitoprachovité břidlice) v prostředí ordovických břidlic bohdaleckého souvrství (šedé jílovité břidlice – pravá část čelby); důkladná dokumentace tektonické stavby umožnila prognózu podmínek ražby přilehlé štoly VZT (foto D. Schaffner)

Fig. 6 Tectonic overthrust formed by the Kosov strata (grey clayey shales and quartzites – the left-hand side of the face) and the Silurian (black clayey-silty shales) in the environment formed by the Ordovician shales of the Bohdalec strata (grey clayey shales – the right-hand part of the face). The thorough documentation of the tectonic structure made the prognosis for the excavation of the adjacent ventilation tunnel possible (Photo courtesy of D. Schaffner)

při stanici Červený Vrch nebo ražená přeložka kanalizace při stanici Veleslavín). Obdobně byly mnohokrát využity i poznatky z dokumentace stavebních jam (např. poznatky z hloubení stanice Motol pro úvodní úsek dvoukolejného traťového úseku v prostředí sesuvného území). Typickým příkladem využití dokumentace ražeb pro okolní objekty je situace vzduchotechnické štoly v Motole, jejíž geotechnické podmínky ražby byly kromě doplňkového vrtného a geofyzikálního průzkumu zhodnoceny z velké části právě na základě zjištěných strukturně-geologických podmínek v přilehlém dvoukolejném traťovém tunelu (obr. 6).

### INŽENÝRSKOGEOLOGICKÁ A GEOTECHNICKÁ PROBLEMATIKA VÝSTAVBY

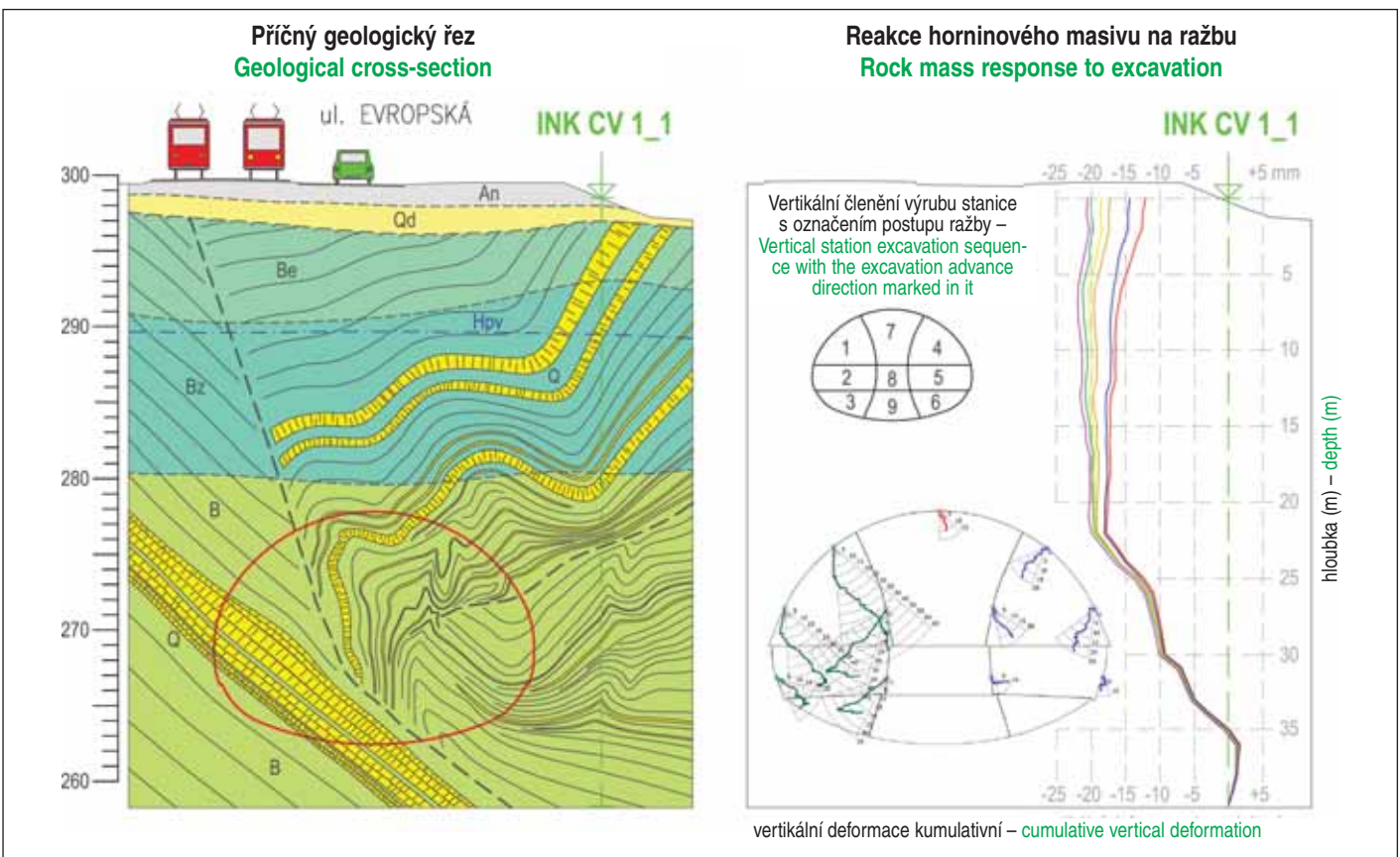
Podobně jako u jiných rozsáhlých staveb ve složitých geotechnických podmínkách a městském intravilánu se rovněž v případě nové trasy metra V.A vyskytla řada neočekávaných geotechnických problémů. Hlavní příčinou vzniku takovýchto problémů při ražbách štól, tunelů a stanic nebo hloubení stavebních jam bylo zastížení odlišných geotechnických podmínek, než předpokládal realizační projekt. Tyto odlišnosti byly způsobené jednak nedostatečným prozkoumáním horninového prostředí s velkou variabilitou ve fázi přípravy stavby, případně nedostatečným respektováním závěrů a doporučení provedených průzkumů (takto vzniklým problémům se tedy dalo do značné části předejít). Krajním případem pak byly příčiny v podobě neočekávaného zastížení podzemních prostor.

V případě ražeb pomocí NRTM neočekávané a výrazně nepříznivé geotechnické podmínky často snížily stabilitu čela a boků výrubu, způsobily výrazné deformace horninového masivu a primárního ostění (konvergence, sedání povrchu), místy se

For the above reason, the majority of access tunnels, shafts or smaller mined structures very well served as underground exploratory workings (for example the Markéta access tunnel and ventilation plant cavern at Petřiny station, the assess tunnel František at Červený Vrch station or the mined diversion adit for a sewer near Veleslavín station). Pieces of knowledge gained from the documentation of construction pits (e.g. the use of pieces of knowledge from the excavation of Motol station pit for the initial section of the double-track running tunnel in a land sliding area environment). A typical example of the use of the documentation of underground excavation for adjacent structures is the situation of the ventilation drift in Motol, the geotechnical tunnelling conditions of which were assessed not only on the basis of a supplementary borehole and geophysical survey, but also largely just on the basis of the structural geological conditions determined on the adjacent double-track running tunnel (see Fig. 6).

### ENGINEERING GEOLOGICAL AND GEOTECHNICAL PROBLEMS OF THE PROJECT

Similarly to other extensive construction projects implemented in complicated geotechnical conditions and urban areas, numerous unexpected geotechnical problems were encountered also in the case of the new metro Line V.A. The main cause of the origination of such problems during the excavation of adits, tunnels and stations or excavation of construction pits was the encountering of geotechnical conditions different from those anticipated by the detailed design. These differences were caused both by the insufficient exploration of the highly variable ground environment during the project



Obr. 7 Příčný geologický profil stanic Červený Vrch v prostředí silně porušeného horninového masivu (Q – křemence, B – navětralé břidlice, Bz – zvětralé břidlice, Be – rozložené břidlice, Qd – deluviální sedimenty, An – navážky); vpravo znázorněna reakce masivu na postupnou ražbu ve formě výsledků konvergenčního a inklinometrického měření (zprac. J. Tlamsa)

Fig. 7 Geological cross-section through Červený Vrch station running through an environment formed by heavily disturbed ground mass (Q – quartzites, B – slightly weathered shales, Bz – weathered shales, Be – decomposed shales, Qd – deluvial sediments, An – made ground). The ground mass response to the progressing excavation is shown on the right side in the form of results of convergence and inclinometer measurements (prepared by J. Tlamsa)



projevily vznikem geologicky podmíněných nadvýlomů variabilního rozsahu (od málo významných nadvýlomů v řádu prvních m<sup>3</sup> po významné nadvýlomy až závaly v řádu několika desítek m<sup>3</sup>) nebo neočekávaně silnými přítoky podzemní vody apod. Takovéto problémy si podle charakteru a závažnosti zpravidla vyžádaly dodatečná opatření v podobě úpravy projektu technologie ražeb (vyprojektování náročnějších technologických tříd, v některých případech pak i změnu trasy a nivelety podzemního díla), přizpůsobení geotechnického monitoringu (větší četnost měření, případně aplikace speciálních monitorovacích metod), provedení doplňkových průzkumů pro ověření dalších podmínek ražby nebo zjištění rozsahu vzniklých kaveren v okolí výrubů.

V případě hloubených stavebních jam se neočekávaně horší geotechnické podmínky projevily zpravidla v podobě náročnější realizace jámy z hlediska obtížnější těžitelnosti zastížených hornin, překvapivých přítoků podzemní vody nebo nežádoucími deformacemi stěn jam či okolního horninového prostředí. I v případě stavebních jam změny geotechnických podmínek zpravidla vedly k nutné úpravě projektu zajištění jámy, technologie její realizace nebo rozsáhlejšího monitoringu horninového masivu, nových a stávajících stavebních konstrukcí.

Příkladem zastížení odlišných geotechnických podmínek při ražbách, které se daly předvídat, je stanice Červený Vrch. Zde nebylo respektováno doporučení provést před zahájením výstavby doplňkové průzkumné vrty v prostoru stanice (v rámci průzkumných prací před zahájením výstavby byl ve stanici proveden jen jeden bezjádrový vrt nedostatečné hloubky). Toto pak vyústilo v situaci, kdy se v krátké době před plánovaným zahájením ražeb stanice (při ražbě přístupové štoly) zjistily zcela odlišné geotechnické podmínky výstavby (namísto očekávaných masivních křemenců se v prostoru stanice vyskytují polohy silně tektonicky porušených břidlic – obr. 7) znamenající nutnou změnu projektu.

Jiným příkladem neočekávaných geotechnických podmínek při hloubení a zajištění stavebních jam, které by bývalo bylo možné včas zjistit, je stanice Motol. Zde rovněž nebylo respektováno doporučení provést doplňkové průzkumné vrty přímo v prostoru projektovaných stavebních objektů (v rámci průzkumných prací před zahájením výstavby byly provedeny pouze dva vrty, a to pouze při jednom okraji jámy). V protilehlé části stavební jámy se při provádění inklinometrických vrtů pro geotechnický monitoring krátce před výstavbou zjistily masivní velmi pevné vulkanické horniny a v prostoru ve svahu nad jámou byly identifikované rozsáhlé fosilními sesuvy rozvlečené bloky



Obr. 8 Zával při ražbě vzduchotechnické štoly v Motole při zastížení štoly z období druhé světové války; při pravém okraji snímku je v rubanině a čelbě patrná dřevěná výztuž (foto J. Tlamsa)

Fig. 8 The collapse during the excavation of the ventilation tunnel in Motol when a tunnel from World War 2 was encountered. Timbering is visible in the muck and at the face at the right-hand edge of the picture (Photo courtesy of J. Tlamsa)

planning stage and by insufficient respect paid to conclusions and recommendations following from the completed surveys (it was to a large extent possible to prevent the problems which originated in this way). The causes in the form of the unexpected encountering of underground spaces were an extreme case.

As far as the NATM excavation is concerned, unexpected and significantly unfavourable geotechnical conditions frequently reduced the stability of the excavation face and side walls, caused serious deformations of the ground mass and primary lining (convergences, terrain surface settlement), locally manifested themselves by the origination of geologically conditioned overbreaks with variable extent (ranging from lithe significant overbreaks in the order of first m<sup>3</sup> up to serious collapses in the order of several tens of m<sup>3</sup>) or by unexpectedly strong inflows of groundwater etc. Such problems, depending on their character and gravity, required additional measures in the form of a change in the design for the tunnelling technology (designing more demanding excavation support classes, in some cases even changes in horizontal and vertical alignment of the underground working), modification of the geotechnical monitoring (larger frequency of measurements or even the application of special monitoring methods), the execution of supplementary surveys for the verification of conditions for subsequent tunnelling or determination of the extent of caverns developing around the excavated openings.

As far as the open excavation pits are concerned, unexpectedly worse conditions manifested themselves usually in the form of more complicated excavation in terms of more difficult excavation classes of the ground encountered, surprising groundwater inflows or undesirable deformations of excavation walls or the surrounding ground environment. Changes in geotechnical conditions usually led to changes in the excavation support design, excavation procedure or to more extensive monitoring of the rock mass and new or existing building structures.

Červený Vrch station is an example of different geotechnical conditions encountered during the underground excavation, which could be anticipated. In this case, the recommendation to carry out supplementary exploratory boreholes in the area of the station prior to the commencement of construction (only one full-hole borehole with an insufficient depth was carried out for the station within the framework of the survey before the construction started) was not heeded. As a result, completely different geotechnical conditions for the construction (heavily faulted shales instead of expected massive quartzites – see Fig. 7) were identified shortly before the commencement of the station excavation operations (during the driving of an access tunnel) in the station area. They meant the necessity for modifying the design.

Another example of unexpected geotechnical conditions encountered during the work on the excavation and support of construction pits is Motol station. Nor in this case the recommendation to carry out supplementary exploratory boreholes directly in the area of the structures being designed was heeded (only 2 boreholes were drilled within the framework of the surveys prior to the commencement of the construction operations, moreover only at one edge of the construction pit). Massive, very hard volcanic rock was found shortly before the construction works commencement in the opposite part of the construction pit during the execution of inclinometer boreholes for geotechnical monitoring and extensive blocks of cretaceous sandstone spread by fossil landslides, representing significant risk of the loss of stability of the slope above the pit were identified in the slope above the pit (see Fig. 3). This situation led to a necessary change in the technique of the

křídových pískovců představujících značné riziko ztráty stability svahu nad jámou (obr. 3). To vedlo k nutné změně technologie hloubení podzemní stěny pro zajištění jámy, masivnějšímu zajištění celé jámy a rozšíření jejího monitoringu.

Příkladem neočekávaných geotechnických podmínek při ražbách, kterým se naopak dalo jen obtížně předejít, je dvoukolejný tunel z Motola do Petřín a přilehlá vzduchotechnická štola. Na tomto místě byly při ražbách zastíženy geologické anomálie v podobě tektonických poruchových pásem a poloh hornin nepříznivých geotechnických vlastností, které vedly ke vzniku významných nadvýmů. V případě vzduchotechnické štoly byla ražba navíc zkomplikována současným zastížením starého podzemního díla v podobě štol plánovaného stanoviště ambulance a první pomoci při Pomocné nemocnici v Motole z konce roku 1944 (obr. 8).

Pro stanici Červený Vrch bylo proto operativně provedeno několik inženýrskogeologických doplňkových průzkumů (realizovaných z povrchu i v podzemí – obr. 2). Ty umožnily dodatečně podrobněji popsat strukturně-geologickou stavbu horninového masivu a jednotlivým horninovým typům přiřadit reprezentativní geotechnické parametry umožňující adekvátní úpravu projektu ražeb a zajištění stanice i okolních stavebních objektů. V případě zajištění stavební jámy ve stanici Motol bylo ověření skutečných geotechnických podmínek provedeno doplňkovými průzkumnými vrty, pomocí dokumentace samotného hloubení jámy a vrtů pro potřeby geotechnického monitoringu. Ten byl pro účely dostatečného sledování reakce horninového masivu a režimu proudění podzemní vody na stavební zásah společně se sledováním stavebních konstrukcí svým rozsahem a metodikou připůsoben výrazněji nepříznivějším podmínkám výstavby.

Při ražbě dvoukolejného tratového tunelu při stanici Motol byly zjištěny údaje o charakteru a průběhu tektonických poruch úspěšně využity pro predikci dalších podmínek ražby v prostoru přilehlé vzduchotechnické štoly. V případě vzduchotechnické štoly byl po neočekávaném zastížení podzemních prostor a souvisejícího vzniku významného nadvýmolu realizován povrchový a podzemní vrtný a geofyzikální průzkum pro ověření rozsahu podzemních prostor, rozsahu vzniklé kaverny v okolí štoly a upřesnění strukturně-geologické stavby horninového masivu v dalším úseku ražeb.

## BUDOUCNOST – CO NÁS NA NOVÉ TRASE METRA V.A JEŠTĚ ČEKÁ

V současné době (konec září 2012) je převážná část ražeb a hloubení stavebních jam již dokončena. V dalším období zbývá dokončit zejména ražbu stanice Veleslavin (střední dílčí výrub a únikový objekt) a jednokolejné tratové tunely mezi stanicí Červený Vrch a Dejvická včetně tunelových propojek. I v případě těchto zbylých ražeb bude nutné věnovat velkou pozornost predikovaným geotechnickým rizikům.

U stanice Veleslavin spočívá potenciální problém zejména v ražbě v horninovém prostředí s nepříznivými geotechnickými parametry a s velmi nízkým nadložím tvořeným výhradně kvartétními zeminami a navážkou v prostoru ulice Evropská. Díky prognóze podmínek ražby z inženýrskogeologické dokumentace ražeb obou bočních výrubů i okolních objektů (úniková štola a ražené přeložky kanalizací) a průzkumných sond by však mělo být riziko vzniku nepřijatelné či nevládnutelné reakce horninového masivu na ražbu přijatelné.

U ražeb jednokolejných tratových tunelů pomocí EPB je nebezpečí stabilitních problémů a nepřijatelných deformací horninového masivu spojeno s možným výskytem jeho oslabení v důsledku případných poruch souběžné kanalizace. Toto nebezpečí by však mělo být minimalizováno právě díky probíhajícímu doplňujícímu geofyzikálnímu a vrtnému průzkumu v celé délce ulice Evropská (obr. 9). Kromě toho se provádí rozsáhlá sanace podloží tohoto úseku, především pak v místech průzkumnými pracemi zjištěných anomálií indikujících horší geotechnické podmínky.

excavation for a diaphragm wall supporting the pit, more massive system of support of the whole pit and extension of the scope of its monitoring.

An example of unexpected geotechnical conditions encountered during tunnelling operations, which were, on the contrary, hard to prevent, is the double-track running tunnel from Motol to Petřín and the adjacent ventilation tunnel. In this location, the tunnelling work encountered geological anomalies in the form of fault zones and layers of rocks with unfavourable geotechnical properties, which led to the origination of significant overbreaks. The underground excavation of the ventilation tunnel was in addition complicated by the encountering of an abandoned mine working in the form of tunnels for a planned ambulance and first aid station of the Subsidiary Motol Hospital from the end of 1944 (see Fig. 8).

This was the reason why several supplementary engineering geological surveys were operatively carried out for Červený Vrch station (both from the surface and from the underground – see Fig. 2). Owing to them it was subsequently possible to describe the structural-geological composition of the ground mass and assign more representative geotechnical parameters to individual ground types in a more detailed way, allowing an adequate modification of the design for tunnelling and stabilisation of the station surroundings and building structures in the vicinity. In the case of the Motol station construction pit support, the verification of actual geotechnical conditions was carried out by means of supplementary surveys, the documentation of the pit excavation itself and boreholes drilled for the needs of geotechnical monitoring. The scope and methodology of the monitoring, together with the observation of building structures, was adapted for the purposes of the sufficient observation of the ground mass response and the groundwater flow regime to the construction intervention to the conditions significantly more unfavourable for the construction.

The information gained on the character and paths of faults was successfully used during the excavation of the double-track running tunnel adjacent to Motol station for the prediction of conditions for subsequent excavation in the area of the adjacent ventilation tunnel. In the case of the ventilation tunnel, a drilling and geophysical survey was carried out from the surface and from the underground after the unexpected encountering of underground spaces and the origination of a significant collapse associated with it, with the aim of verifying the extent of the underground spaces, the extent of the cavern which originated in the tunnel neighbourhood and the specification of the structural-geological composition of rock mass in the subsequent tunnelling section.

## THE FUTURE – WHAT STILL AWAITS US ON THE NEW METRO LINE V.A

Currently (the end of September 2012) the greater part of tunnelling work and excavation of construction pits is finished. In the subsequent period of time it is necessary to complete first of all the underground excavation of Veleslavin station (the central drift and the escape structure) and the single-track running tunnels between Červený Vrch and Dejvická stations, including ventilation tunnels. Significant attention will have to be paid to the predicted geotechnical risk even in the case of these remaining tunnelling operations.

Regarding Veleslavin station, a potential problem lies first of all in the passage of the excavation through a ground environment with unfavourable geotechnical parameters, under very shallow overburden solely consisting of the Quaternary soils and man-made ground in the area of Evropská Street. However, owing to the prognosis of the conditions for tunnelling derived from the engineering geological documentation





**Obr. 9** Realizace průzkumného vrtu pro ověření geotechnických podmínek ražby a sanace podloží vozovky a tramvajové trati v prostoru ulice Evropská nad jednokolejnými tratovými tunely raženými pomocí EPB (foto J. Tlamsa)  
**Fig. 9** Realisation of an exploratory borehole for the verification of geotechnical conditions for the underground excavation and stabilisation of the road and tram track subgrade in the area of Evropská Street, above the EPB-driven single-track running tunnels (Photo courtesy of J. Tlamsa)

Důsledný a komplexní geotechnický monitoring horninového prostředí a stavebních konstrukcí zůstane podmínkou úspěšné ražby tunelů metra až do jejich dokončení.

## ZÁVĚR

V průběhu přípravy a samotné výstavby nové trasy metra V.A v Praze se vyskytla řada geotechnických problémů různého charakteru, významu a příčin. Z pohledu inženýrské geologie se zejména názorně ukázalo, jak podcenění potřeby realizace rozsahem dostatečného a kvalitního průzkumu v případě takto náročné stavby ve složitých podmínkách může vést ke vzniku významných stabilitních problémů při ražbách, nutnosti změn projektového řešení a technologie výstavby podzemních i povrchových objektů nebo aplikaci rozsáhlejšího monitoringu horninového masivu a stavebních konstrukcí.

Na druhou stranu je možné konstatovat, že se díky účinné a profesionální spolupráci všech účastníků výstavby dařilo počáteční deficit v poznání geologického prostředí stavby při průběžné realizaci doplňkových průzkumů včas snižovat na přijatelnou míru a všechny problémy poměrně úspěšně vyřešit bez vzniku vážnějších mimořádných událostí. Výše uvedená problematika je také dobrým příkladem pro možnost se z takovýchto chyb poučit a v případě dalších obdobných staveb zajistit jejich bezproblémovou přípravu a realizaci bez zbytečného časového prodlení a navýšení finančních nákladů.

**MGR. JIŘÍ TLAMSA**, [tlamsa@arcadisgt.cz](mailto:tlamsa@arcadisgt.cz),  
**ING. TOMÁŠ EBERMANN**, [ebermann@arcadisgt.cz](mailto:ebermann@arcadisgt.cz),  
**JAKUB BOHÁTKA**, [bohotka@arcadisgt.cz](mailto:bohotka@arcadisgt.cz),  
**MGR. LUCIE BOHÁTKOVÁ**, [bohatkova@arcadisgt.cz](mailto:bohatkova@arcadisgt.cz),  
**MGR. JIŘÍ ROUT**, [rout@arcadisgt.cz](mailto:rout@arcadisgt.cz),  
**ARCADIS Geotechnika, a. s.**

Recenzoval: prof. Ing. Jiří Barták, DrSc.

of the excavation of both side-wall drifts and of documentation of the adjacent structures (an escape gallery and mined sewer diversions), as well as exploratory boreholes, the risk of the origination of a non-permissible or uncontrollable response of the rock mass to the underground excavation should be acceptable.

In the case of the EPB excavation of single-track running tunnels, the danger of stability problems and unacceptable deformations of rock mass is associated with the possible occurrence of its weakening caused by contingent defects of parallel sewerage. However, this danger should be minimised owing to the supplementary geophysical and drilling survey, which is currently in progress throughout the length of Evropská Street (see Fig. 9). In addition, extensive rehabilitation of the subbase in this section is being carried out, first of all in locations of anomalies detected by the survey, indicating worse geological conditions.

Consistent and comprehensive geotechnical monitoring of ground environment and building structures will remain to be a condition for successful driving of metro tunnels until their completion.

## CONCLUSION

Many geotechnical problems of various character, significance and causes were encountered during the course of the planning stage and the construction itself of the new metro line V.A in Prague. From the engineering geology point of view, it was first of all shown how the underestimation of the need for the execution of adequate and good-quality survey in the case of such demanding construction in complicated conditions may lead to the origination of significant stability problems during underground excavation, the necessity for changing the design solution and the technology of the construction of both underground and surface structures or the application of more extensive monitoring of ground mass and building structures.

On the other hand, it is possible to state that, owing to effective and professional collaboration between all parties to the construction, the initial deficit in the knowledge of the geological environment of the construction in time gradually reduced to an acceptable level (thanks to the step-by-step carried out supplementary surveys) and solve all problems relatively successfully, without the origination of more serious emergencies. The problems described above are even good examples for the possibility of learning lessons of such mistakes and, in the case of other similar construction projects, securing trouble-free planning and implementation of the projects without unnecessary delay and increasing of financial expenses.

**MGR. JIŘÍ TLAMSA**, [tlamsa@arcadisgt.cz](mailto:tlamsa@arcadisgt.cz),  
**ING. TOMÁŠ EBERMANN**, [ebermann@arcadisgt.cz](mailto:ebermann@arcadisgt.cz),  
**JAKUB BOHÁTKA**, [bohotka@arcadisgt.cz](mailto:bohotka@arcadisgt.cz),  
**MGR. LUCIE BOHÁTKOVÁ**, [bohatkova@arcadisgt.cz](mailto:bohatkova@arcadisgt.cz),  
**MGR. JIŘÍ ROUT**, [rout@arcadisgt.cz](mailto:rout@arcadisgt.cz),  
**ARCADIS Geotechnika, a. s.**

## LITERATURA / REFERENCES

- BOHÁTKOVÁ, L. Závěrečná zpráva geotechnického průzkumu pro stavbu „Prodloužení trasy A metra v Praze ze stanice Dejvická“ mezi stanicemi Dejvická a Motol – DSP. Stavební geologie-Geotechnika. Praha, 10/2008  
 BOHÁTKOVÁ, L., TLAMSA, J. Očekávané a skutečné geologické podmínky při výstavbě metra V.A v Praze a jejich vliv na projekt a realizaci stavby. *Geotechnika*, 2012, 1–2, s. 43–52  
 BOHÁTKA, J., EBERMANN, T., HORT, O., LIŠKA, S. Metro V.A v Praze, stanice Motol a Červený Vrch – geotechnická překvapení v srdci Barrandienu. In *Sborník konference Zakládání staveb 2011*. Brno 2011  
 Výsledky geotechnického monitoringu výstavby metra V.A, sdružení Arcadis – Inset, 2010–2012

# VÝZKUM VLASTNOSTÍ HORNINOVÉHO MASIVU PRO NÁVRH A REALIZACI PODZEMNÍCH ÚLOŽIŠŤ

## RESEARCH INTO ROCK MASS PROPERTIES FOR DESIGNING AND CONSTRUCTING UNDERGROUND REPOSITORIES

JIŘÍ ZÁRUBA, KAREL SOSNA, JAN NAJSER

### ABSTRAKT

V posledních letech věnuje Ministerstvo průmyslu a obchodu velkou pozornost přípravě budoucích úložišť produktů energetické činnosti ve velkých hloubkách horninového masivu. Na území České republiky se jako optimální geologické prostředí pro hlubinná úložiště jeví granitoidní horniny. V současnosti provozovaný kavernový zásobník plynu na Příbrami, který je pro budoucí stavby tohoto typu modelem, je v granitech stejně jako navrhované hlubinné úložiště vyhořelého paliva.

V uplynulých letech byla v rámci již ukončeného výzkumného úkolu pracovníky ARCADIS Geotechnika, a. s., velmi podrobně studována problematika puklinové propustnosti granitů. V současné době probíhá projekt zaměřený na migrační vlastnosti horninové matrice (makroskopicky neporušeného horninového prostředí) granitoidních hornin. Řešení obou zmínovaných projektů zahrnovalo rozsáhlé série laboratorních i terénních zkoušek na řadě lokalit, během nichž došlo k vyvinutí unikátních metod pro výzkum propustnosti v prostředí s extrémně nízkou hydraulickou vodivostí. Podstatnou součástí prací bylo rozsáhlé matematické modelování zaměřené jak na predikci, tak následné ověření změřených dat.

Jedním z výsledků výzkumných prací je i metoda zkoušení puklinové propustnosti, která je předmětem uděleného patentu. V současné době probíhá řízení k udělení patentu provádění vodních tlakových zkoušek v horninách s velmi malou propustností.

### ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Proudění podzemní vody a transport kontaminantů podzemní vodou v prostředí krystalinických horninových formací se svým charakterem výrazně odlišují od procesů, které probíhají v prostorech sedimentárních pánví. Horninové prostředí hydrogeologických masivů se z hlediska proudění a transportu projevuje jako silně heterogenní a anizotropní. Dominantní vliv na proudění a transport v tomto prostředí má puklinová síť, její charakter a hustota. Samotná horninová matrice se na proudění vody z kvantitativního hlediska podílí neporovnatelně menší mírou. Puklinové kolektory hydrogeologických masivů byly v minulosti opomíjeny vzhledem k limitované možnosti dlouhodobého a intenzivního vodohospodářského využití.

V posledních desetiletích se problematika puklinových kolektorů dostává do popředí společenského i vědeckého zájmu. Generálně nízká propustnost hornin masivů a jejich vysoká pevnost jsou ideálními vlastnostmi pro budování podzemních zásobníků plynu nebo úložišť odpadů včetně vysoce aktivního vyhořelého jaderného paliva. Hlavním požadavkem na funkčnost hlubinného úložiště radioaktivních odpadů je bezpečné a dlouhodobé (řádově desítky až stovky tisíc let) oddělení uložených nebezpečných látek od životního prostředí, resp. potravního řetězce. K tomu musí sloužit kromě primární fixace radionuklidů v uloženém kontejneru také geologické prostředí a inženýrské bariéry. Za inženýrské bariéry jsou považovány těsnící materiály vyplňující manipulační a technologické prostory podzemního úložiště i puklinový systém geologické struktury. Hydrogeologický masiv, představovaný starými, tektonicky stabilními, krystalinickými horninovými celky, splňuje velmi dobře nároky na bezpečnost takových úložišť. Obzvláště v případě, pokud jsou úložné prostory dobře zatěsněny

### ABSTRACT

In the recent years the Ministry of Industry and Trade has dedicated considerable attention to the preparation of future repositories for products of power generation activities, to be developed at great depth of rock mass. An optimum geological environment for deep repositories in the Czech Republic appears to exist in granitoid rocks. The currently operating underground gas storage cavern near Příbram, which is a model for the future project of this type, is in a granitic environment, identically with the design draft for the deep repository for spent nuclear fuel.

Problems of fissure permeability of granites were studied in a detailed way by employees of ARCADIS Geotechnika a. s. during recent years, within the framework of an already finished research project. At present, a project focused on migration properties of rock matrix of granitoid rocks (for a macroscopically undisturbed rock environment) is underway. The solution to both above-mentioned projects comprised extensive series of laboratory tests and field tests on many localities, during which unique methods for the research into permeability in an extremely low hydraulic conductivity environment were developed. Substantial part of the works was formed by extensive mathematical modelling focused on both the prediction and subsequent verification of measured data.

One of the results of the research activities is the method for the testing of fissure permeability, which is the subject of a patent which was obtained. At the moment proceedings for obtaining a patent for the execution of pressure tests in a very low permeability rock environment are underway.

### INTRODUCTION INTO PROBLEMS

The character of the process of groundwater flow and transport of contaminants by ground water within an environment formed by crystalline rock formations significantly differ from the character of processes running in the areas of sedimentary basins. In terms of groundwater flow, the rock environment of hydrogeological massifs manifests itself as strongly heterogeneous and anisotropic. The dominating influence on the flow and transport within this environment is provided by the fissure network, its character and density. The contribution of the rock matrix itself to the water flow is quantitatively smaller. Fissure aquifers in hydrogeological massifs were neglected in the past because of the limited possibility for long-term and intensive use for water management purposes.

During the course of the past decades, the issue of fissure aquifers has come to the front of social and scientific interest. The generally low permeability of rocks forming the massifs and their high strength are ideal properties for developing underground gas storage facilities or for disposal of soil, including repositories for spent nuclear fuel. The main requirement for the functionality of a deep repository for spent nuclear fuel is the safe and long-term (in the order of tens- to hundreds of thousands of years) separation of the deposited dangerous substances from the living environment, or from the food chain. This requirement must be fulfilled, apart from the primary fixing of radionuclides in a storage container (a cask), also by the geological environment and engineering barriers. Sealing materials filling the handling and technological spaces of an underground repository and the fissure system of the geological



a situovány do dostatečných hloubek pod povrchem. Významným limitujícím faktorem v tomto směru je tektonické porušení horniny a podzemní voda, představující hlavní rizikový faktor pro realizaci úložišť jako prakticky jediné dynamické médium celého prostředí. Problematika propustnosti horninové matrice nabývá na významu v souvislosti s funkčností inženýrského díla v řádu stovek tisíc let.

## PŘEHLED VÝZKUMNÝCH AKTIVIT

Vývoj metodik a postupů hydrogeologického výzkumu puklinového prostředí pevných hornin s velmi nízkou propustností dosáhl v posledních 20–30 letech značného rozsahu v souvislosti s vyhledáváním vhodných lokalit pro hlubinné úložiště radioaktivního odpadu. V důsledku odlišných geologických podmínek v různých zemích není možné výsledky získané v rámci národních výzkumných programů aplikovat obecně. Metody hydrogeologického výzkumu jsou proto vyvíjeny a aplikovány vždy v závislosti na konkrétních geologických poměrech, vrtné technologii, průměru výzkumných vrtů, používaném technickém vybavení a softwarových nástrojích pro vyhodnocení. Ze států, kde je této problematice věnována velká pozornost, můžeme uvést například Švédsko (<http://www.skb.se>), Finsko (<http://www.posiva.fi>), Francii (<http://www.andra.fr>), Švýcarsko (<http://www.nagra.ch>), Španělsko (<http://www.enresa.es>), Kanadu (<http://www.nwmo.ca>), a Velkou Británii (<http://www.nirex.co.uk>). V České republice se touto problematikou zabývá Správa úložišť radioaktivního odpadu <http://www.surao.cz>.

## VÝZKUM MIGRAČNÍCH VLASTNOSTÍ PUKLINOVÉHO PROSTŘEDÍ GRANITOVÝCH HORNIN

Výzkumný úkol „*Metody a nástroje hodnocení vlivu inženýrských bariér na vzdálené interakce v prostředí hlubinného úložiště*“ byl zaměřen na testování prostředků a nástrojů pro analýzu hydrogeologických vlastností puklinového prostředí v granitoidních horninách. Zaměření úkolu bylo koncipováno tak, aby byl navržen, otestován a popsán metodický postup hydrogeologického průzkumu a matematického modelování tohoto prostředí, který by mohl být prakticky použit pro úlohy konkrétně zaměřené na aplikace inženýrských bariér do puklinového prostředí.

Výzkumný úkol byl realizován v letech 2004 až 2009. Podílely se na něm celkem čtyři organizace. Pracovníci ISATech, s. r. o., ARCADIS Geotechnika, a. s., a GIÚ AV ČR, v. v. i., zajišťovali laboratorní a terénní, hydrogeologický a geomechanický výzkum, pracovníci PROGEO, s. r. o., prováděli matematické modelové simulace. Práce byly v průběhu řešení úkolu rozděleny do tří hlavních etap. V první etapě byla provedena rešerše a výběr vhodných modelovacích programů, v druhé etapě byly realizovány laboratorní hydraulické a transportní testy a jejich matematické modelové simulace a ve třetí etapě byly provedeny terénní hydraulické a transportní testy, jejich matematické modelové simulace a finální modelová predikce transportu stopovače.

Během úvodní etapy projektu bylo velmi důležité zhodnotit požadavky, které budou kladeny při zpracování úkolu na modelová řešení. Ze zaměření úkolu vyplynul požadavek na konceptuální přístup matematického modelování. Bylo nezbytné zvolit program nebo kombinaci více programů, které umožňují diskrétní popis prostředí puklin s maximálním zohledněním přírodní heterogeneity a anizotropie prostředí. Dalším požadavkem, který významně zúžil výběr vhodné aplikace, byla volba programů, jejichž funkčnost a použitelnost byla dostatečně ověřena na mezinárodních projektech souvisejících s ukládáním v prostředí krystalinických hornin. Po zvážení všech dalších požadavků na programy vyplývajících z harmonogramu prací úkolu byla pro modelování zvolena dvojice programů NAPSAC a FEFLOW.

V průběhu druhé etapy byly v laboratoři testovány tři typy granitových vzorků. Jako první byla zkoušena tělesa typu válec. Tělesa byla 150 a 200 mm vysoká. Průměr těles činil 83, 105 a 137 mm. Testovány byly vzorky bez viditelného tektonického porušení a vzorky tektonicky porušené, a to buď s vyhojenou, nebo otevřenou puklinou. Dále byla testována dvě tělesa typu

structure are considered as the engineering barriers. A hydrogeological massif represented by old, tectonically stable crystalline rock formations very well meets requirements for the safety of such storage facilities and repositories. It is so especially in the case of very well sealed disposal spaces, which are located at sufficient depths under ground surface. A limiting factor significant from this viewpoint is tectonic disturbance of rock and groundwater, which represents the main risk factor for the implementation of repositories as virtually the only dynamic medium existing in the entire environment. The importance of the issue of rock matrix permeability grows in the context of the functionality of an engineering project the duration of which is in the order of hundreds of thousands of years.

## OVERVIEW OF RESEARCH ACTIVITIES

During the course of the previous 20 – 30 years, the development of methodologies and procedures for hydrogeological research into the fissure environment of hard rocks with very low permeability has reached significant extent in the context of the search for locations suitable for repositories for radioactive waste. The results obtained within the framework of national research programs cannot be applied generally with respect to varying geological conditions in various countries. Hydrogeological research methods are therefore developed and applied always in the dependence on particular geological conditions, the drilling technology, the diameter of research boreholes, the technical equipment and software tools used for the assessment. Of the states where these problems are dedicated great attention, we can mention, for example, Sweden (<http://www.skb.se>), Finland (<http://www.posiva.fi>), France (<http://www.andra.fr>), Switzerland (<http://www.nagra.ch>), Spain (<http://www.enresa.es>), Canada (<http://www.nwmo.ca>) and Great Britain (<http://www.nirex.co.uk>). In the Czech Republic, these problems are dealt with by the Radioactive Waste Repository Authority <http://www.surao.cz>.

## RESEARCH INTO MIGRATION PROPERTIES OF FISSURE ENVIRONMENT FORMED BY GRANITOID ROCKS

The research project on “*Methods and tools for assessing the influence of engineering barriers on remote interactions within a deep repository environment*” was focused on the testing of the means and tools for analysing hydrogeological properties of a fissure environment formed by granitoid rocks. The concept of the project focus was determined with the aim of guaranteeing that the methodological procedure for the hydrogeological survey and the mathematical modelling of this environment were proposed, tested and described which could be capable of practical using for tasks concretely focused on the applications of engineering barriers into a fissure environment.

The research project was realised during 2004 – 2009. The total of four organisations participated in it. Employees of ISATech, s. r. o., ARCADIS Geotechnika a. s. and Institute of Geology of the Academy of Sciences of the CR provided hydrogeological and geomechanical research, whilst employees of PROGEO, s. r. o. conducted mathematical model simulations. The operations were divided during the course of solving the tasks into three main stages. During the first stage, suitable modelling programs were searched for and selected; during the second stage, laboratory hydraulic and transport tests and their mathematical model simulations were carried out and, during the third stage, field hydraulic and transport tests, their mathematical model simulations and the final model prediction of the transport of the tracer were conducted.

During the initial project stage it was very important to assess the requirements which would be posed during the work on the task for model solutions. A requirement ensued from the task focus on a conceptual approach of the mathematical modelling. It was necessary to select a program of a combination of more programs which make the discrete description of the environment of fissures with the maximum consideration of natural heterogeneity and anisotropy of the environment possible. Another requirement, which significantly reduced the choice of suitable applications,

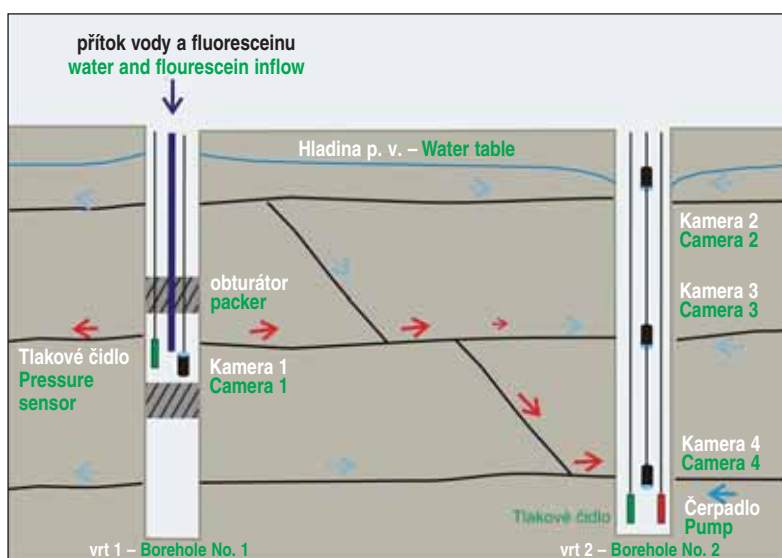
hřeben s uměle vytvořenou puklinou. Jednalo se vždy o dvojici granitových kvádrů o rozměrech 800x600x300 mm do sebe vzájemně sesazených. Jako poslední byla testována tělesa typu blok s přirozenými puklinami. Tělesa měla tvar krychle, resp. osmistěnu o hraně podstavy 600, resp. 250 mm. Základem první fáze laboratorních testů byly hydrodynamické a migrační testy společně s měřením fyzikálních vlastností, zejména pórovitosti (otevřené i celkové), objemové hmotnosti, rychlosti ultrazvukových vln s frekvencí 1 MHz, dále pak celkový charakter testované discontinuity (geometrie a rozevření). Hydrodynamické testy byly prováděny na všech třech typech laboratorních těles. Testy probíhaly za podmínek ustáleného proudění při konstantním hydraulickém gradientu v nasyceném prostředí. Každý vzorek byl testován minimálně pro tři rozdílné hydraulické gradienty. Výstupem byly objemové průtoky vzorkem a koeficienty hydraulické vodivosti. Migrační testy probíhaly na hřebenech a blocích, rovněž při podmínkách ustáleného proudění. Jako konzervativní stopovací látka byl zvolen roztok chloridu sodného a Na-fluoresceinu. Detekce stopovací látky probíhala měřením elektrické konduktivity, resp. intenzity záření stopovače v modrém světle pomocí kamer. Kamery byly vybaveny dvěma optickými filtry a zdroji světla umožňující detekci stopovače v reálném čase. Při použití oranžového světla a filtru bylo možno pozorovat jednotlivé objekty před kamerou. Při použití modrého světla definované vlnové délky 490 nm a oranžového filtru bylo možno kamerou sledovat pouze fluorescenci roztoku Na-fluoresceinu. Černobílý televizní signál z kamery byl veden do televizní karty nainstalované v PC, která sekvence snímků ukládala. Výstupem byly průnikové křivky zaznamenávající průchod stopovače. V druhé fázi byly vybrány inženýrské bariéry vhodné k injektáži puklin, založené na bázi bentonitu a cementového pojiva. U vybraných materiálů byla určena receptura míchání a přípravy vzorků a byla odlita zkušební laboratorní tělesa. Při přípravě vzorků byly stanoveny základní parametry injekčních směsí, mezi něž náleží viskozita, dekantace a objemová hmotnost. Zkušební laboratorní tělesa byla podrobena testům určujícím jejich pevnost v prostém tlaku a koeficient hydraulické vodivosti. Ve třetí fázi byla tělesa typu hřeben a blok parciálně injektována vybranou inženýrskou bariérou a hydrodynamické a migrační testy se zopakovaly. Testy probíhaly jako v první fázi za podmínek ustáleného proudění při konstantním hydraulickém gradientu v nasyceném prostředí. Konzervativní stopovací látkou byly opět roztoky chloridu sodného a fluoresceinu. Výstupem byly objemové průtoky vzorky, koeficienty hydraulické vodivosti inženýrské bariéry a průnikové křivky zaznamenávající průchod stopovače. Na analogických simulacích byly otestovány schopnosti programů NAPSAC a FEFLOW, byla vypracována metodika simulace pro měřítko laboratorních vzorků, otestovány způsoby možného koncepčního přístupu, alternativního zadávání vstupních parametrů a kalibrace modelů. Vzhledem k faktu, že modelování v konkrétním prostředí puklinových diskretních sítí není běžná hydrogeologická úloha, byla laboratorní část projektu z hlediska modelování velmi důležitá pro získání zkušeností a přípravu na modelové práce v prostředí terénní lokality.

V rámci třetí etapy byl jako testovací polygon vybrán granitový kamenolom v katastru obce Panské Dubenky, který měl jednoduchý puklinový systém, jehož znalost byla nezbytná k jednoznačné interpretaci všech terénních měření a experimentů. Pro objasnění přírodních poměrů lokality byl proveden geologický, geofyzikální a geochemický průzkum. Pomocí závěrů z geologické stavby okolí a geofyzikálního průzkumu bylo vytypováno nejvhodnější místo pro umístění výzkumného polygonu o rozměrech 14x12 m se čtrnácti monitorovacími vrti, které byly hluboké 2,90 až 8,55 m. V průběhu řešení projektu byly provedeny čerpací zkoušky, jejichž cílem bylo poskytnutí informací o okrajových podmínkách polygonu pro matematické modelování. V rámci terénních prací byly provedeny cross-hole testy (C-H testy, obr. 1) prováděné na dvojicích vrtů. Tyto testy sloužily jednak ke kalibraci parametrů středního rozevření puklin puklinové sítě v matematickém modelu, dále k stanovení možnosti predikce matematického modelování a také posouzení vlivu inženýrských bariér na změnu hydrodynamických

was the selection of programs the functionality and usability of which had been sufficiently verified on international projects related to the disposal in an environment formed by crystalline rocks. After weighing up all other requirements for programs ensuing from the task works schedule, a couple of programs NAPSAC and FEFLOW was chosen for the modelling purposes.

During the course of the second stage, three types of granite samples were laboratory tested. Cylinder-type specimens were tested first. The specimens were 150 mm and 200 mm high, respectively. Their diameters were 83 mm, 105 mm and 137 mm. Both specimens without visible tectonic disturbance and tectonically disturbed specimens either with a healed or open fissure were subjected to testing. Further on, 2 comb-type specimens with an artificially carried out fissure were tested. Each of them consisted of a pair of granite blocks with the dimensions of 800x600x300 mm assembled one into the other. The last testing covered the block-type specimens with natural fissures. The specimens had the shape of a cube or an octahedron with the edge of the base of 600 and 250 mm, respectively. The first stage of laboratory tests was based on hydrodynamic and migration tests together with measurements of physical properties, first of all porosity (both open and total), volume weight, velocity of ultrasonic waves with the frequency of 1 MHz, and the general character (geometry and aperture) of the discontinuity subjected to testing. The hydrodynamic tests were conducted on all of the three types of laboratory specimens. The tests proceeded in the steady flow conditions at a constant hydraulic gradient in a saturated environment. Each specimen was tested at least for three different hydraulic gradients. The output comprised the volume flow rate and coefficients of hydraulic conductivity. The migration tests were carried out on the combs and blocks, also in the steady flow conditions. Sodium chloride and Na-fluorescein solutions were selected as the preserving tracer. The tracer detection was carried out by means of measurements of electric conductivity, or intensity of the tracer radiation in blue light by cameras. The cameras were equipped with two optical filters and sources of light allowing the detection of the tracer in real time. When orange light and the filter were used, it was possible to observe individual objects in front of a camera. When blue light with the defined length of wave of 490 nm and the orange filter were used, the camera was only able to observe the fluorescence of the Na-fluorescein solution. The black-and-white television signal from the camera was transferred to a television card installed in the PC, which downloaded the picture sequences. The output consisted of intersection curves recording the passage of the tracer were. During the second stage, the engineering barriers suitable for injecting bentonite-based grout with a cement binder into fissures were selected. The formula for mixing and the process of the preparation of specimens were determined for the selected materials and laboratory test specimens were cast. Basic parameters of grouting mixtures, with viscosity, decantation and volume weight among them, were determined during the preparation of the specimens. The laboratory test specimens were subjected to tests determining their unconfined compressive strength and the coefficient of hydraulic conductivity. In the third phase, the comb-type and block-type specimens were partially grouted with the selected engineering barrier and the hydrodynamic and migration tests were repeated. The tests were conducted in the same way as those in the first phase, i.e. in the steady flow conditions at a constant hydraulic gradient in a saturated environment. Sodium chloride and fluorescein solutions were again used as the preserving tracer. The output consisted of the volume flow rate of the specimens, coefficients of hydraulic conductivity of the engineering barrier and intersection curves recording the passage of the tracer. The abilities of the NAPSAC and FEFLOW programs were tested on analogical simulations, the methodology for the simulation for the laboratory specimens scale methodology was elaborated on their basis and the ways of possible conceptual approach, the alternative specifying of input parameters and the calibration of models were tested. With respect to the fact that modelling in a particular environment formed by discrete





Obr. 1 Schéma uspořádání cross-hole testů (C-H testy)  
Fig. 1 Cross-hole tests (C-H tests) arrangement chart

a migračních parametrů puklinového prostředí. C-H testy byly provedeny při umělém hydraulickém gradientu. Oběh podzemní vody byl částečně uzavřený. Testovaná puklina byla v injekčním vrtu izolována obturátorem. Na jednotlivé pukliny byly v čerpaném vrtu umístěny detekční kamery. Při testech byly měřeny hodnoty průtoku systémem, hladiny podzemní vody v testovaných vrtech (ve vymezeném úseku vtláčecího vrtu a v celém úseku vrtu čerpacího) a lokalizace a čas přítoku stopovače (Na-fluoresceinu) do čerpacího vrtu. Výsledků C-H testů ukazují, že jednotlivé vrty jsou nejčastěji propojeny subhorizontálními puklinami, které s mírným sklonem zapadají směrem od lomové stěny. Jejich rozvětvení je cca 0,8 mm. Toto zjištění velmi dobře koresponduje s výsledky strukturně-geologického měření puklin v zájmovém polygonu a také s údaji orientačních směrů a sklonů získaných při prohlídce vrtů pomocí kamer. Vertikální pukliny mají většinou funkci těsnící, jejich rozvětvení je cca 0,3 mm. Výsledky terénního výzkumu hodnotil např. Sosna (2009).

Matematický model sloužil v této etapě především jako nástroj ke stanovení geometrických, hydraulických a transportních parametrů nepřístupných přímému měření a jako nástroj pro predikci výsledků projektovaných testů. Doplnění dat nepřístupných přímému měření bylo realizováno pomocí kalibrace inverzní modelové úlohy. Jedním z nejvýznamnějších takto stanovených parametrů byla hodnota středního hydraulického rozvětvení puklin (transmisivita puklin). Modelové simulace predikující účinnost inženýrských bariér v puklinovém horninovém prostředí testovací lokality byly provedeny v závěrečné fázi řešení projektu. Srovnání výsledků těchto simulací s referenčními měřeními poskytlo informace o míře možnosti predikce proudění a transportu pomocí matematického modelu v diskretní puklinové síti (obr. 2), do které byla aplikována inženýrská bariéra. Matematické simulace popsal např. Polák (2009).

## VÝZKUM MIGRAČNÍCH VLASTNOSTÍ HORNINOVÉ MATRICE GRANITOVÝCH HORNIN

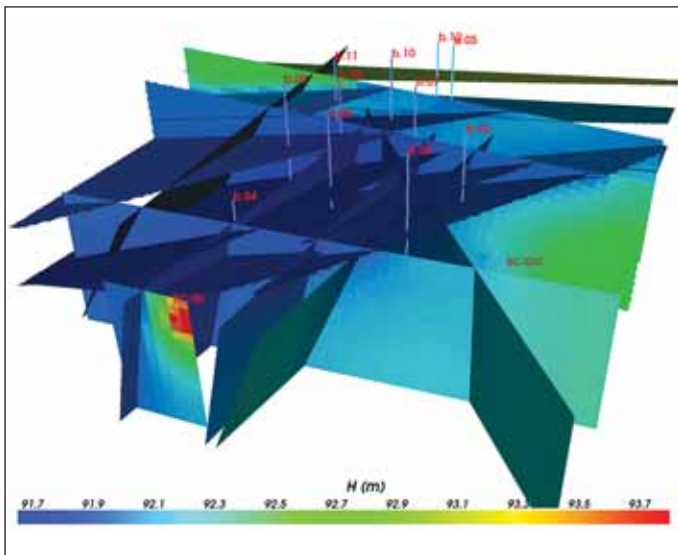
Projekt „Výzkum vlivu mezizrně propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání do geologických formací a vývoj metodiky a měřicí aparatury“ (2009–2013) je zaměřen na problematiku propustných zón ve zdánlivě kompaktní nerozpukané hmotě žulových hornin. Řešení výzkumného úkolu se orientuje na problematiku migrace látek (potencionálně kontaminantů) systémem mikrotrhlin v čerstvé a alterované žule v laboratorních podmínkách a *in situ* na testovací lokalitě. Cílem celého výzkumného projektu je odpovědět na otázku, zdali je mezizrně propustnost (pracovní název charakterizující propustnost horninové matrice) typickou vlastností granitových hornin, nebo je podmíněna

fissure networks is no common hydrogeological problem, the part of the project carried out in laboratory conditions is very important from the aspect of modelling for gathering experience and the preparation for model operations in the terrain locality environment.

The granite quarry in the cadastral district of the village of Panské Dubenky was selected as a testing polygon within the framework of the third stage. This quarry had a simple fissure system, the knowledge of which was indispensable for the unambiguous interpretation of all field measurements and experiments. A geological, geophysical and geochemical survey was carried out with the aim of making the natural conditions of the locality clear. The most suitable location for establishing the survey polygon with the dimensions of 14x12 m with fourteen monitoring boreholes 2.90 to 8.55 m deep was identified by means of the conclusions made on the basis of the geological structure of the surrounding area and the geophysical investigation. Pumping tests were conducted during the course of the process of solving the design with the objective to provide information on boundary conditions of the polygon for mathematical modelling.

Cross-hole tests (C-H tests, see Fig. 1) on the pairs of boreholes were carried out within the framework of the field work operations. These tests served both to the calibration of parameters of the moderately wide discontinuities in the fissure network in the mathematical model, to the determination of the possibility for the prediction of mathematical modelling and for the assessment of the influence of engineering barriers on changes in the hydrodynamic and migration parameters of the rock environment. The C-H tests were conducted at an artificial hydraulic gradient. The groundwater circulation system was partially closed. The tested fissure in the borehole being pumped out was isolated by a packer. Detection cameras were installed on individual fissures in a borehole being subjected to pumping. The values of the rate of the flow through the system, water table levels in the tested boreholes (along a specified section of the injection borehole and throughout the depth of the abstraction borehole) and the time at which the tracer (Na-fluorescein) was located and at which it approached the extraction borehole were measured during the course of the tests. The C-H tests results show that individual boreholes are most frequently interconnected by sub-horizontal discontinuities, which dip at a moderate gradient out of the quarry face. Their aperture is about 0.8 mm. This finding very well corresponds to the results of structural-geological measurements of discontinuities inside the polygon of operations and also to the data on the fissure trends and dips obtained during the camera inspection of the boreholes. The majority of vertical discontinuities have the sealing function; their aperture is about 0.3 mm. The results of the field survey were assessed, for example, by Sosna (2009).

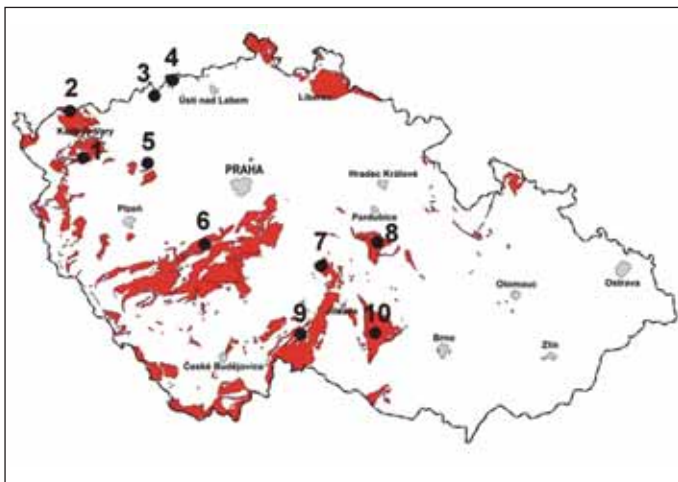
The mathematical model was used at this stage first of all as a tool for determining geometrical, hydraulic and transport-related parameters which were inaccessible for direct measurements and as a tool for the prediction of results of the tests being designed. Data inaccessible for direct measuring was supplemented by means of the calibration of an inverse model problem. One of the most important parameters determined in this way was the value of the medium hydraulic aperture of discontinuities (transmissivity of discontinuities). Model simulations predicting the effectiveness of engineering barriers within a fissured rock environment of the testing locality were carried out during the final stage of solving the design. The comparison of the results of these simulations with reference measurements provided information about the rate of the possibility for flow and transport prediction to be carried out by means of a mathematical model in a discrete fissure network (see Fig. 2) with an engineering barrier applied into it. The mathematical simulations were described, for example, by Polák (2009).



Obr. 2 Model puklinového prostředí Panské Dubenky  
Fig. 2 Model of Panské Dubenky fissure environment

geochemickými či hydrogeochemickými procesy, případně geotechnickými či fyzikálními změnami v závislosti na čase. Dále výzkum otevírá otázku způsobu vyhodnocování přítomnosti mezizrnné propustnosti geologickoprůzkumnými metodami za použití matematického modelování verifikovanými a validovanými softwary.

Na řešení projektu se podílí celkem šest organizací. Pracovníci ARCADIS Geotechnika, a. s., České geologické služby, ISATech, s. r. o., Ústavu jaderného výzkumu Řež, a. s., a Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR, v. v. i., realizují laboratorní a terénní, hydrogeologický a geomechanický výzkum. Pracovníci PROGEO, s. r. o., provádějí matematické modelové simulace. Laboratorní výzkum je soustředěn na studium vrtných jader do hloubky zhruba 100 m z osmi archivních vrtů a jedenácti nových vrtů, realizovaných v místech vrtů archivních. Jedním z cílů laboratorního výzkumu je porovnání mechanicko-fyzikálních vlastností archivních a nových vrtů a studium potenciální degradace archivních vrtů uložených desítky let ve skladech. Vrtvy byly vybrány tak, aby zahrnuly většinu významných granitových masivů v České republice. Vrtvy jsou situovány v Melechovském masivu, v Centrálním moldanubickém a Třebíčském plutonu v kraji Vysočina, v Cínoveckém a Čistěcko-jesenickém masivu a pni Lesná v Ústeckém kraji,



Obr. 3 Lokalizace studovaných hornin v rámci České republiky (granitoidní horniny jsou vyznačeny červeně) 1 – Krásno, 2 – Potůčky-Podlesí, 3 – Lesná, 4 – Cínovec, 5 – Tis u Blatna, 6 – Příbram, 7 – Melechovský masiv, 8 – Ctětín, 9 – Panské Dubenky, 10 – Pozdátky

Fig. 3 Locations of rocks being studied within the framework of the Czech Republic (granitoid rocks are marked in red): 1 – Krásno, 2 – Potůčky-Podlesí, 3 – Lesná, 4 – Cínovec, 5 – Tis u Blatna, 6 – Příbram, 7 – Melechovský masiv, 8 – Ctětín, 9 – Panské Dubenky, 10 – Pozdátky

## RESEARCH INTO MIGRATION PROPERTIES OF ROCK MATRIX OF GRANITIC ROCKS

The project on “The research into the influence of intergrain permeability of granites on the safety of deep deposition into geological formations and the development of the methodology and the measuring apparatus” (2009 – 2013) is focused on the issue of permeable zones within a seemingly compact non-fissured mass of granitic rocks. The solution to this research project is oriented towards the problems of the migration of substances (potential contaminants) and the system of microfissures in fresh and altered granite in laboratory conditions and *in situ*, in the testing locality. The objective of the entire research project is to answer the question whether the intergrain permeability (a working name characterising the permeability of rock matrix) is a typical property of granitic rocks or it is conditioned by geochemical or hydrogeochemical processes or geotechnical or physical changes taking place with time. In addition, the research opens the question of the process of assessing the presence of intergrain permeability by geological-survey methods using mathematical modelling by means of verified and validated software tools.

The total of six organisations have participated in the solution to the project. Employees of ARCADIS Geotechnika a.s., Czech Geological Survey, ISATech, s.r.o., the Nuclear Research Institute Řež Ltd. and the Institute of the Rock Structure and Mechanics of the Academy of Sciences of the Czech Republic, v. v. i. carry out laboratory and field research and hydrogeological and geomechanical research. Employees of PROGEO, s. r. o. carry out mathematical model simulations. The laboratory research is focused on the study into borehole cores down to the depth of about 100 m obtained from eight archive boreholes and eleven new boreholes, which were carried out in the locations of the archive boreholes. One of the laboratory research objectives is to compare cores from the archive boreholes and new boreholes and to study potential deterioration of cores from the archive boreholes which have been deposited in stores for tens of years. The boreholes were selected in a way guaranteeing that the majority of significant granitic massifs in the Czech Republic were embraced. The boreholes are located in the Melechov massif, in the Central Moldanubic and Třebíč pluton in the Region of Vysočina, in the Cínovec and Čistá-Jesenice massif and the Lesná body in the Region of Ústí nad Labem, in the Blatná massif and Krudum massif in the Region of Karlovy Vary, in the Central Bohemian pluton in the Central Bohemian Region and in the Železná Hory pluton in the Region of Pardubice.

Compact specimens of the rock matrix are subjected to a wide range of laboratory tests, which are focused on the determination of their main mechanical-physical parameters. The open porosity of laboratory samples is determined using the triple-weighing method, which determines the porosity value from the difference between the weight of a saturated specimen and a dried specimen. The distribution of sizes of pores in the rock mass is studied by means of mercury porosimetry. This method is based on the phenomenon of mercury capillary depression, where mercury penetrates into pores through the action of pressure.

The interconnection of pores and their shapes are studied in a UV optical microscope on fluorescent resin saturated specimens and in a scanning electron microscope with the detection of secondary and recoiled electrons on polished specimens. The structure of microfissures is statically analysed using software tools; it serves as input information for numerical modelling (see Fig. 4).

Mineral composition and petrographical description of rocks are determined by means of a silicate analysis and by studying slices in an optical microscope. The advection flow of water is studied by measuring the hydraulic conductivity of specimens and by dye-tracing tests. Hydraulic conductivity is determined in pressure triaxial cells (see Fig. 5). The tests are run at a constant hydraulic gradient on pressure controllers acting on the bottom and upper base of a water-saturated specimen. The pressure acting on both bases is chosen in a way guaranteeing that the average effective stress in



v Blatenském masivu a masivu Krudum v Karlovarském kraji, v Středočeském plutonu v Středočeském kraji a v Železnohorském plutonu v Pardubickém kraji.

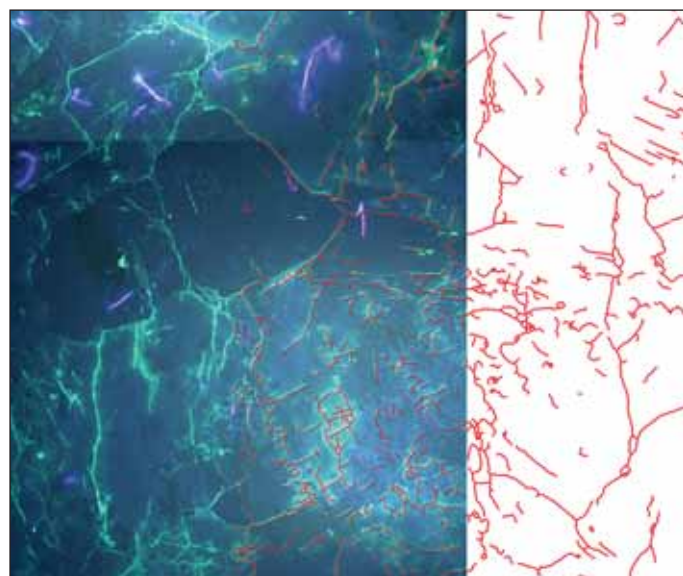
Kompaktní vzorky horninové matrice jsou v laboratoři podrobeny široké škále testů, které se soustřeďují na určení jejich hlavních mechanicko-fyzikálních parametrů. Otevřená pórovitost laboratorních vzorků je stanovena pomocí metody trojího vážení, která určuje hodnotu pórovitosti z rozdílu hmotnosti vodou nasyceného a vysušeného vzorku. Distribuce velikosti pórů v hornině je studována pomocí rtuťové porozimetrie. Tato metoda je založena na jevu kapilární deprese rtuti, kdy rtuť vniká do pórů působením tlaku.

Propojení a tvar pórů se studuje na výbrusech sycených fluorescenční pryskyřicí v optickém mikroskopu s UV světlem a na leštěných nábrusech pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu s detektorem sekundárních a zpětně odražených elektronů. Struktura mikrotrhlin se statisticky analyzuje za pomoci softwarových nástrojů a slouží jako vstupní informace pro numerické modelování (obr. 4).

Minerální složení a petrologický popis hornin jsou stanoveny pomocí silikátové analýzy a studiím výbrusů v optickém mikroskopu. Advektivní proudění vody je studováno měřením hydraulické vodivosti vzorků a pomocí stopovacích zkoušek s barvivou. Hydraulická vodivost je určována v tlakových komorách (obr. 5). Testy probíhají při konstantním hydraulickém gradientu vyvozeném rozdílem tlaků na tlakových kontrolerech působících na dolní a horní podstavě vodou nasyceného vzorku. Tlak na obou podstavách je zvolen tak, aby průměrné efektivní napětí ve vzorku odpovídalo napětí *in situ* v místě odběru vzorku.

Výstupem stopovacích zkoušek jsou průnikové křivky prostupu stopovače horninovými vzorky. Výzkum migrace stopovacích látek, kde je hlavním transportním mechanismem difúze látek ve směru klesajícího koncentračního spádu, je studován pomocí průnikových difúzních a elektromigračních experimentů, které určují hodnoty efektivního difúzního koeficientu a formačního faktoru. Horninový vzorek je během těchto experimentů umístěn mezi dvě nádrže. První nádrž obsahuje roztok se zájmovým prvkem o definované koncentraci, zatímco ve druhé je koncentrace prvku nulová. Zájmový prvek difunduje horninovým vzorkem a dochází k nárůstu koncentrace ve výstupním roztoku. Analýzu migračních parametrů horninové matrice zkoumaných hornin provedli např. Havlová et al. (2012) nebo Najser et al. (2011).

Petrofyzikální měření anizotropie magnetické susceptibilitě odráží velmi citlivě litologii granitů z hlediska jejich magmatického vývoje a ukazuje na přednostní orientaci paramagnetických horninotvorných minerálů, jako jsou slídy a amfiboly. Usměrnění slíd detekované pomocí anizotropie magnetické susceptibilitě odpovídá nejpočetnějšímu výskytu bazálních rovin biotitových zrn a tím nepřímo indikuje směr mikrotrhlin v těchto minerálech. Další



Obr. 4 Ukázka softwarové digitalizace puklin  
Fig. 4 Example of the software digitisation of fissures

the specimen corresponds to the stress *in situ*, in the sampling location.

The output of the tracing tests is in the form of intersection curves for the tracer passage through rock specimens. The research into the migration of tracer substances, where the main transport mechanism is the diffusion of the substances in the direction of the dropping concentration gradient, is studied by means of intersection diffusion and electromigration experiments determining the values of the effective diffusion coefficient and formation factor. During these experiments, the rock specimen is placed between two tanks. The first tank contains a solution with the interest element with the defined concentration, while the concentration of this element in the other tank is zero. The interest element diffuses through the rock specimen and its concentration in the output solution grows. The analysis of the migration parameters of the rock matrix of the rocks being examined was carried out, for example, by Havlová et al. (2012) or Najser et al. (2011).

Petrophysical measurements of the anisotropy of magnetic susceptibility very sensitively reflect the lithology of granites in terms of their magmatic development and point at the preferential orientation of paramagnetic rock-forming minerals, such as mica and amphiboles. The aligning of mica detected by means of the anisotropy of magnetic susceptibility corresponds to the most frequent occurrence of basal planes of biotite grains, thus indirectly indicating the direction of microfissures in these minerals. Another petrophysical method allowing the determination of the anisotropy of pore space is measuring of electric resistivity. The lowest resistivity is displayed by the rocks in directions parallel with the bedding or foliation, whilst the lowest is in the direction perpendicular to these planes.

Mechanical properties of the granites being studied are tested by means of tests, which determine their unconfined compressive strength, tensile splitting strength, modulus of elasticity and compressive modulus of deformation and Poisson's ratio. Another method showing the mechanical-physical condition of rock is the velocity of P- and S-waves propagation. The anisotropy of the speed of P-wave propagation, identically with the anisotropy of magnetic susceptibility and electric resistivity, indicates the preferential orientation of minerals and the micro-fissure network. The relative correlation between results of individual tests was described, for example, by Nováková (2011) and Sosna (2011).

The field research is first of all focused on the verification of the fissure environment, mechanical-physical properties of rock matrix and hydrogeological conditions in eleven localities of operations. The field research was conducted in three phases. The borehole survey was carried out in the first phase. Its results were



Obr. 5 Tlakové komory pro měření hydraulické vodivosti horninových vzorků  
Fig. 5 Pressure triaxials cells for measuring hydraulic conductivity of rock specimens

petrofyzikální metodou, která umožňuje stanovit anizotropii pórového prostoru, je měření elektrické rezistivity. Nejnižší rezistivitu vykazují horniny ve směrech paralelních s vrstevnatostmi či foliací, nejvyšší ve směru kolmém k těmto rovinám.

Mechanické vlastnosti studovaných granitů se testují pomocí zkoušek, které určují jejich pevnost v prostém tlaku a příčném tahu, modul pružnosti a přetvárnosti v tlaku a Poissonovo číslo. Další metodou, která vypovídá o mechanicko-fyzikálním stavu horniny, je rychlost šíření P a S-vln. Anizotropie rychlosti šíření P-vln, stejně jako anizotropie magnetické susceptibilitě a elektrické rezistivity, indikuje přednostní orientaci minerálů a sítě mikrotrhlin. Vzájemnou korelaci výsledků jednotlivých zkoušek popsali např. Nováková (2011) a Sosna (2011).

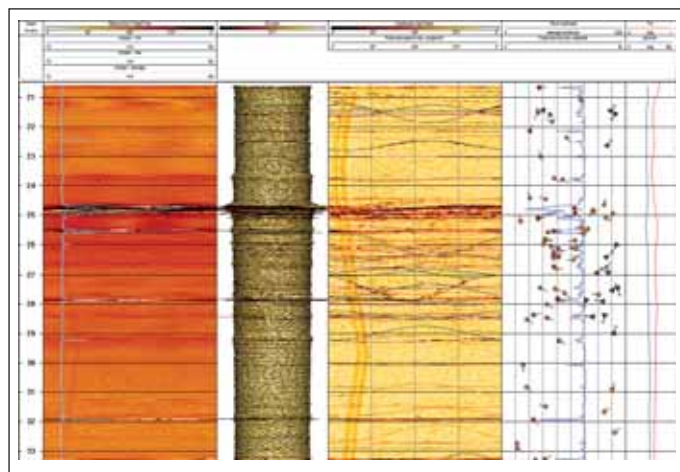
Terénní výzkum je zaměřen na ověření puklinového prostředí, mechanicko-fyzikální vlastnosti horninové matrice a hydrogeologické poměry jedenácti zájmových lokalit. Terénní průzkum probíhal ve třech fázích. V první fázi byla provedena karotážní měření. Jejich výsledky byly použity při druhé fázi, kdy byly realizovány hydrodynamické testy. Ve třetí fázi byly pomocí uniaxiálního lisu Goodman Jack zjištěny přetvárné parametry hornin.

Pomocí karotáže byly určeny fyzikální vlastnosti horniny a vody ve vrtech, průběh tektoniky a stupeň porušení hornin, hydrodynamické a geomechanické parametry. Gama karotáž měřila sumární přirozenou radioaktivitu hornin, která je úměrná zastoupení radioaktivních prvků; v běžných horninách především draslíku  $K^{40}$ . Ten je v granitech obsažen v draselných živcích a ve slídách. Neutron-neutron karotáž měřila tok zpomalených sekundárních tepelných neutronů. Ten ukazuje na obsah vodíku, který v horninách přímo souvisí s obsahem vody v pórech a v puklinách a s obsahem jílovitých minerálů. Gama-gama karotáž stanovila objemovou hmotnost horniny. Elektrokarotáž měřila zdánlivý měrný elektrický odpor. Elektrokarotáž byla spolu s gama karotáží, neutron karotáží, akustickou karotáží a gama-gama karotáží základní metodou pro stanovení stupně alterace a tektonického porušení hornin. Termometrie, která spojitě měřila teplotu vody, detekovala vertikální proudění vody ve vrtu. Místa přítoků, pohyb vody a vydatnost proudění byly určeny podle anomálií na resistivimetrových křivkách a ze skutečných časů měření. Pomocí akustické vrtní televize (obr. 6), která měřila odraz rotujícího akustického signálu a jeho amplitudu, bylo interpretováno prostorové zobrazení puklin protínajících vrt, úklon a směr úklonu puklin, rozlišení otevřených a uzavřených puklin.

Akustická karotáž s registrací úplného vlnového obrazu umožnila vyhodnocení rychlostí podélných a příčných vln a výpočet dalších geomechanických parametrů hornin, jako jsou Poissonovo číslo, modul pružnosti ve smyku a v tlaku.

Základem hydrogeologického výzkumu ve vrtech jsou vodní tlakové zkoušky, které jsou realizovány etážově, na úsecích vrtů izolovaných pomocí dvojice obturátorů. Při etážové vodní tlakové zkoušce je do odděleného úseku vrtu vtlačována voda při konstantním zkušebním tlaku. Tlak je měřen tlakovým snímačem na ústí vrtu. Současně je kontinuálně měřena spotřeba vtlačené vody a výška hladiny vody ve vrtu nad testovanou etáží. Vodní tlakové zkoušky jsou aplikovány v jedноступňové podobě s konstantním vstupním tlakem. Ke sledování reakcí na hydrodynamické zkoušky v okolí testovaného vrtu se používá multipakový systém. Ze záznamu reakcí na vodní tlakovou zkoušku v sousedních vrtech je možné zjistit hloubku významných komunikujících puklin a míru propojení puklinových systémů na lokalitě. Dále se provádějí čerpací a stoupací zkoušky v celém vrtném stvolu a odebírá se směsný vzorek podzemní vody, jejíž chemismus je následně analyzován. Výsledky vodních tlakových zkoušek hodnotí Rukavičková (2011).

Modul pružnosti a přetvárnosti se zjišťují pomocí uniaxiálního lisu Goodman Jack. Zařízení se skládá z hydraulického válcového lisu průměru 76 mm s dvěma zabudovanými snímači posunu LVDT a hydraulického čerpadla. Zkoušky se provádějí s dvěma zatěžovacími cykly do 20 MPa a 40 MPa.



Obr. 6 Záznam z akustické kamery ve vrtu

Fig. 6 Record from an acoustic camera in a borehole

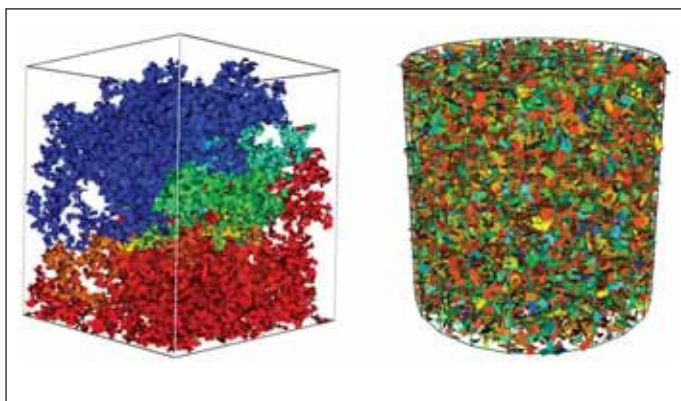
used during the second phase, where hydrodynamic tests were realised. In the third phase, deformational parameters of rocks were determined using a Goodman Jack uniaxial press.

The borehole logging was used for the determination of physical properties of rock and water in boreholes, the course of tectonics and the degree of rock disturbance, hydrodynamic and geomechanical parameters. Gamma ray logging measured the summary natural radioactivity of rocks, which is in proportion to the representation of radioactive elements, in common rocks first of all calcium  $K^{40}$ . It is contained in granites in potassium feldspar and micas. Neutron-neutron logging measured the flow of moderated secondary thermal neutrons. This flow indicates the content of hydrogen, which is directly connected with the content of water in pores and fissures and with the content of clayey materials in rocks. The gamma-gamma ray logging determined the volume weight of the rock. Electrical logging measured apparent electrical resistivity. The electrical logging together with gamma logging, neutron logging, acoustic logging and gamma-gamma logging was the basic method for the determination of the degree of alteration and tectonic disturbance of rocks. Thermometry, which continually measured water temperature, detected the vertical flow of water in a borehole. The inflow locations, water movement and water flow yield were determined according to anomalies in resistivimetric curves and on the basis of actual measurement times. Acoustic borehole televiewer (see Fig. 6), measuring the refraction of an acoustic signal and its amplitude, was used for the interpretation of spatial images of discontinuities cutting through the borehole, the dip and trend of discontinuities, and for the recognition of open fissures and closed fissures.

The acoustic logging, registering the complete wave image, made the assessment of the velocity of longitudinal and transverse waves and the calculation of other geomechanical parameters of rocks, such as Poisson's ratio, modulus of elasticity in shear and compression, possible.

Borehole hydraulic tests are the basis of hydrogeological research. They are carried out stage by stage, in borehole sections isolated by a couple of packers. During the staged hydraulic test, water is injected into the separated borehole section under a constant test pressure. The pressure is measured by a pressure transducer installed at the borehole mouth. At the same time, the consumption of injected water and the water table in the borehole above the tested stage are continually measured. The hydraulic tests are applied in a single-stage form, with a constant input pressure. A multi-packer system is used for the observation of responses to hydrodynamic tests in the surroundings of the borehole being tested. It is possible to identify the depth of significant communicating fissures and the degree of the interconnection between fissure systems in the locality from the record of responses to hydraulic tests in neighbouring boreholes. In addition, pumping and recovery tests throughout the well bore depth are conducted and a composite sample of groundwater is obtained. Its chemistry





Obr. 7 Matematický model horninové matrice  
Fig. 7 Mathematical model of a rock matrix

Matematické modelování je zaměřeno na analýzu výsledků získaných při laboratorních a terénních testech. Zaměření výzkumného úkolu na mikroměřítko prostředí granitových hornin klade specifické nároky na aplikaci obvyklých postupů matematického modelování proudění a transportu. Validované programy pro modelování v oblasti hydrogeologie (MODFLOW, FEFLOW, NAPSAC) jsou primárně navrženy a téměř výhradně používány pro makroměřítko odpovídající velikosti základního elementárního objemu v řádu jednotek až desítek metrů. Přechod do úloh s diskretizací v řádu jednotek milimetrů a menší je experimentální záležitostí. Použití standardních modelových nástrojů pro simulace úloh proudění a transportu v mikroměřítko vyžaduje rozsáhlé testování možných postupů a provedení citlivostních analýz na různé modelové parametry. Pro geometrický model horninové matrice jsou zvoleny konceptuální přístupy, které pomocí diskretních puklin simulují jednotlivé mikrotrhliny (obr. 7). Vstupními daty modelových simulací jsou informace o velikosti, rozvětvení a množství mikrotrhlin a údaje o konfiguraci testu (okrajové a počáteční podmínky, velikost vzorku). K ověření modelových výstupů proudění a transportu jsou použity měřené hodnoty pórovitosti, hydraulické vodivosti a difuzního koeficientu. Matematické modelování podrobně popisuje např. Gvoždík (2010).

## PŘÍNOSY PROJEKTŮ A UPLATNĚNÍ JEJICH VÝSLEDKŮ

V průběhu řešení úkolu „*Metody a nástroje hodnocení vlivu inženýrských bariér na vzdálené interakce v prostředí hlubinného úložiště*“ se prokázalo, že matematický model je velmi účinný nástroj při hydrogeologickém hodnocení vlastností horninového prostředí, které představuje tzv. oblast vzdálených interakcí při hlubinném ukládání, a to i v případě velmi heterogenního a anizotropního prostředí. Kvalita geometrického modelu a kvalita kalibrace hydrogeologického a transportního modelu je vždy závislá na množství a kvalitě vstupních a kalibračních dat. V prostředí puklinových kolektorů krystalinického masivu je získání dostatečného množství informací pro sestavení věrohodného modelu velmi nesnadným úkolem náročným na množství vrtných prací, provedených zkoušek a měření a v neposlední řadě také na časový horizont řešení a na finanční prostředky. Využití postupů a výsledků modelových prací provedených během řešení úkolu umožní lépe předvídat a eliminovat mnohé problémy a využít nástroje matematického hydrogeologického modelování v této oblasti efektivněji.

K prohlídce vrtů a následným stopovacím zkouškám zjišťujícím proudění podzemní vody mezi vrty byly v rámci řešení úkolu použity speciální televizní kamery. Jejich hlavní výhodou spočívala v možnosti jejich přesného umístění na studovanou strukturu, okamžitého zjištění času příchodu stopovací látky a kontinuálního záznamu dat. Princip měření pomocí takové kamery je předmětem patentu podaného na základě výsledků prezentovaného výzkumu.

Při řešení projektu zabývajících se hydraulickými vlastnostmi horninové matrice patřila mezi největší výzvy adaptace stávajících metod měření hydraulické vodivosti na horniny s extrémně nízkou

is subsequently analysed. Results of the hydraulic tests are assessed by Rukavičková (2011).

The modules of elasticity and deformation are determined by means of a Goodman Jack uniaxial press. The facility consists of a hydraulic cylinder press 76 mm in diameter, with two built-in LVDT movement transducers and a hydraulic pump. The tests are conducted with two loading cycles up to 20 MPa and 40 MPa.

Mathematical modelling is focused on analysing results gained by laboratory and field testing. The focusing of the research project on the micro-scale of the granitic rocks environment imposes requirements for the application of usual procedures for mathematical modelling of flow and transport. Validated programs for modelling in the area of hydrogeology (MODFLOW, FEFLOW, NAPSAC) are primarily designed and nearly solely used for a macro-scale corresponding to the volume size of the basic elementary volume in the order of up to tens of metres. The transition to problems involving the discretisation in the order of several millimetres and smaller is a matter of experiments. The application of standard modelling tools for the simulations of problems of flow and transport on a micro-scale requires extensive testing of possible procedures and the execution of sensitivity analyses for various model parameters. Conceptual approaches have been chosen for the geometrical model of a rock matrix simulating individual micro-fissures by means of discrete fissures (see Fig. 7). The input data for the model simulations provide information on the size, aperture and quantity of micro-fissures and data on the test configuration (boundary and initial conditions, the specimen size). Measured values of porosity, hydraulic conductivity and diffusion coefficient are used for the verification of the model procedures for flow and transport. The mathematical modelling is described in detail, for example, by Gvoždík (2010).

## BENEFITS BROUGHT BY THE PROJECTS AND THE APPLICATION OF THEIR RESULTS

It was proved during the course of the process of solving the project “*Methods and tools for assessing the influence of engineering barriers on remote interactions within a deep repository environment*” that a mathematical model is a very effective tool in hydrogeological assessing of rock environment properties, which represents the so-called area of remote interactions existing during the deep deposition. It is so even in the case of highly heterogeneous and anisotropic rock environment. The quality of the geometrical model and quality of the calibration of the hydrogeological and transport models always depends on the amount and quality of input and calibration data. The gaining of volume of information sufficient for the creation of a credible model for an environment formed by fissure aquifers in a crystalline massif is a very difficult problem, which is demanding in terms of the amount of drilling work, tests and measurements to be conducted, and at last but not least, the time horizon for the solution and financial means. The application of the procedures and results of the model works carried out during the process of solving the project will make it possible to better predict and eliminate many problems and use tools for mathematical hydrogeological modelling in this area more effectively.

Special television cameras were used within the framework of the project solution for the inspection of boreholes and subsequent tracing tests determining the flow of groundwater between boreholes. The main advantage of the cameras was that it was possible to position them accurately on the structure being studied, immediately to identify the time of the arrival of the tracer and to obtain a continual record of the data. The principle of the measurement by means of such the camera is the subject of a patent applied for on the basis of the results of the presented research.

One of the greatest challenges encountered during the process of solving the problem dealing with hydraulic properties of rock matrix was the adaptation of existing methods for measuring hydraulic conductivity to the rocks with extremely low permeability. The measurement of hydraulic conductivity even in the order of  $10^{-14}$  m.s<sup>-1</sup> was successfully verified within the framework of laboratory tests,

propustností. V rámci laboratorních testů bylo při testech v tlakových komorách úspěšně ověřeno měření hydraulické vodivosti i v řádu  $10^{-14}$  m.s<sup>-1</sup>. Taková přesnost se ukázala jako dostatečná pro naprostou většinu testovaných vzorků (koeficient hydraulické vodivosti byl úspěšně stanoven u 163 ze 166 vzorků). Při terénním měření hydraulické vodivosti horninové matrice musel být způsob detekce průtoků oproti standardním vodním tlakovým zkouškám opět modifikován. Nově vyvinuté metody, které jsou výsledkem provedených výzkumných prací, umožnily snížit spodní limit detekce průtoků z cca 1 ml.min<sup>-1</sup> u běžných zkoušek až o 4 řády. Vyvinutá terénní aparatura pro měření extrémně nízkých hydraulických vodivostí je předmětem žádosti o patent.

Základním předpokladem pro terénní měření bylo přesné vytyčení makroskopicky neporušených úseků ve vrtech. V tomto směru se prokázal mimořádný přínos moderních karotážních metod, které umožňují s vysokou rozlišovací schopností detekovat veškeré nehomogenity ve stěně studovaného vrtu. S pomocí záznamu z akustické karotáže a metodik zpracované v rámci řešení úkolu mohla být také dodatečně zorientována vrtná jádra příslušných vrtů, čímž byla umožněna prostorová interpretace výsledků laboratorních zkoušek a petrofyzikálních analýz vrtného jádra.

Výsledky výzkumů prováděných v rámci úkolů Ministerstva průmyslu a obchodu prokázaly, že uvnitř každé horninové matrice granitoidních hornin existuje spojitá síť mikrotrhlin. V případě neexistence či zatěsnění makroskopických puklin v okolí podzemního úložiště se tato síť stává hlavní migrační cestou pro potenciální šíření kontaminantů. Prezentovaný výzkum výrazně přispívá ke zmapování mikrotrhlinové sítě a popisu jejích migračních charakteristik. Jedná se o velmi významný fenomén, který při plánování podzemního úložiště zejména vzhledem k extrémně dlouhé době jeho funkčnosti nelze opominout. Velmi nízké propustnosti, které lze při řešení obvyklých geotechnických úloh zanedbat, se totiž stávají při době proudění ve stovkách tisíc let velmi významnými.

#### Poděkování:

*Tento příspěvek byl realizován za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci projektů registrovaných pod čísly 1H-PK/31 a FR-T11/367.*

**ING. JIŘÍ ZÁRUBA, MBA, [zaruba@arcadisgt.cz](mailto:zaruba@arcadisgt.cz),  
RNDr. KAREL SOSNA, Ph.D., [sosna@arcadisgt.cz](mailto:sosna@arcadisgt.cz),  
RNDr. JAN NAJSER, Ph.D., [najser@arcadisgt.cz](mailto:najser@arcadisgt.cz),  
ARCADIS Geotechnika, a. s.**

*Recenzoval: doc. Ing. Richard Šňupárek, CSce.*

during tests conducted in pressure chambers. Such the accuracy turned out to be sufficient for absolute majority of tested specimens (the hydraulic conductivity coefficient was successfully determined for 163 of 166 specimens). The standard hydraulic test had to be again modified for the method for detecting the flow rates during the field measurements of hydraulic conductivity of rock matrix. The newly developed methods which are the result of the completed research work made the reducing of the lower limit for the flow detection from about 1ml.min<sup>-1</sup> applicable for common tests by up to 4 orders of magnitude possible. The field apparatus for measuring low hydraulic conductivities is the subject of a patent application.

The basic requirement for field measurements was the precise determination of locations of macroscopically undisturbed sections in boreholes. In this regard, an extraordinary contribution of modern borehole logging methods allowing the detection of all inhomogeneities in a borehole wall being studied with high definition capability was proved. It was also possible owing to the record from the acoustic logging and the methodology developed within the framework of the work on the project to sufficiently orient the cores from respective borehole, thus to allow the spatial interpretation of the results of laboratory tests and petrophysical analyses of the borehole cores.

The results of research operations carried out within the framework of projects prepared by the Ministry of Industry and Trade proved that a continuous network of micro-fissures exists inside any rock matrix formed by granitoid rocks. In the case of non-existence of macroscopic fissures in the underground disposal site surroundings or if these fissures are sealed, this network becomes the main migration route for potential spreading of contaminants. The presented research significantly contributes to the mapping of the micro-fissure network and the description of its migration characteristics. It is a very important phenomenon, which cannot be neglected in the process of planning of underground disposal sites, first of all with respect to the extremely long time of its functioning. The reason is that very low permeability values, which can be neglected when common geotechnical problems are being solved, become very significant taking into consideration the duration of the water flow continuing for hundreds of thousands years.

#### Acknowledgements:

*This paper was carried out with the financial support from the means of the state budget by way of the Ministry of Industry and Trade within the framework of projects registered under numbers 1H-PK/31 and FR-T11/367.*

**ING. JIŘÍ ZÁRUBA, MBA, [zaruba@arcadisgt.cz](mailto:zaruba@arcadisgt.cz),  
RNDr. KAREL SOSNA, Ph.D., [sosna@arcadisgt.cz](mailto:sosna@arcadisgt.cz),  
RNDr. JAN NAJSER, Ph.D., [najser@arcadisgt.cz](mailto:najser@arcadisgt.cz),  
ARCADIS Geotechnika, a. s.**

#### LITERATURA / REFERENCES

- Gvoždík, L., Polák, M., Záruba, J., Vaněček, M. (2010) Modeling and Analysis of Granite Matrix Pore Structure and Hydraulic Characteristics in 2D and 3D Networks. AGU Fall Meeting, San Francisco.
- Havlová, V., Večerník, P., Najser, J., Sosna, K., Breiter, K. (2012) Radionuclide diffusion into undisturbed and altered crystalline rocks. *Mineralogical Magazine* – v tisku
- Najser, J., Sosna, K., Nováková, L., Brož, M., Kasíková, J., Michálková, J., Novák, P., Vaněček, M., Záruba, J. (2011) The relationship between matrix hydraulic conductivity and P-wave and S-wave ultrasound velocities in granites, *Proc. GEOPROC 2011*, Perth, Australia.
- Nováková, L., Sosna, K., Brož, M., Najser, J., Novák, P. (2011) Geomechanical parameters of the podlesí granites and its relationship to seismic velocities. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. Vol. 8, No. 3 (163), 353–369.
- Polák, M., Gvoždík, L., Sosna, K., Vaněček, M. (2009) Modelování hydrodynamických zkoušek v puklinovém prostředí, 10. Československý mezinárodní hydrogeologický kongres, Ostrava, s. 143–146, ISBN 978-80-248-2026-2.
- Rukavičková, L., Najser, J., Holeček, J. (2011) Srovnání hydraulické vodivosti rozpukaných hornin a horninové matrice v granitech Českého masivu, Zprávy o geologických výzkumech v roce 2010, ČGS, Praha, 242–245.
- Sosna, K., Brož, M., Vaněček, M., Polák, M. (2009) Exploration of a Granite Rock Using a TV Camera, *Acta Geodyn. Geomater.*, Vol. 6, No. 4 (156), 453-463, ISSN 1214-9705.
- Sosna, K. (2011) Laboratory determination of the mechanical properties of granite rocks. 21st European Young Geotechnical Engineers Conference, Rotterdam, The Netherlands.



# VYBAVENÍ SILNIČNÍCH TUNELŮ A PŘIMĚŘENÁ BEZPEČNOST PROVOZU

## ROAD TUNNEL EQUIPMENT AND ADEQUATE OPERATIONAL SAFETY

PAVEL PŘIBYL

### ÚVOD

Tento příspěvek pojednává o problematice „optimálního“ vybavení tunelů zařízením a technologickými systémy z hlediska poskytování přiměřené bezpečnosti pro jeho uživatele, v tomto případě osádkám projíždějících vozidel. Vždy existuje jisté morální dilema projektantů, a zodpovědných osob obecně, mezi vybavením tunelu a úrovní bezpečnosti, kterou poskytuje tunel. Nikdy není možné vybavit tunel tak, aby byl absolutně bezpečný. Na druhé straně, každé další zařízení či systém, které nejsou nutné pro zachování přiměřené bezpečnosti, s sebou přinášejí vyšší investiční náklady a často vysoké a dosud příslušně nedoceňované provozní náklady.

Vzhledem k tomu, že se pojem „přiměřená bezpečnost“ špatně definuje, dochází u nás často k tomu, že se tunely vybavují striktně podle norem a někdy se i něco „pro jistotu“ přidá navíc. Tento, ryze formalistický, přístup může vést k tomu, že se tunel prodraží. Diskuse, jak optimálně vybavit tunel technologiemi, patrně nikdy neskončí, ale v rámci pracovních diskusí ve výboru C3.3 „Road Tunnel Operation“ Mezinárodní silniční asociace přibývají názory, že je nutné, při hledání kompromisu ve vybavení tunelů, využívat nejenom rigidně normy. Článek v krátkosti seznamuje s tímto novým přístupem kombinujícím normy a matematické metody pro odhadování rizik.

Ministerstvo dopravy věnovalo značnou pozornost výzkumu technologického a bezpečnostního vybavení tunelů pozemních komunikací v projektech OPTUN a SAFETUN. Ve druhé části článku je představen softwarový produkt, který byl vyvinut v rámci tohoto výzkumu, umožňující centrálně zaznamenávat a statisticky vyhodnocovat mimořádné události ve všech našich tunelech.

### VYSVĚTLENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ

*Nebezpečím* jsou míněny okolnosti, které mohou způsobit jevy s možnými nežádoucími účinky, ale které lze jen obtížně uspokojivým a přesným způsobem definovat. Většina definic považuje za nebezpečí situaci nebo stav systému, ve kterém existuje určitá předvídatelná možnost nezamýšleného poškození osob nebo fyzických prvků v systému. Z hlediska analýzy rizik však tyto okolnosti nemusí nezbytně nastat.

Pojem *riziko* potom používáme na kvalitativní a/nebo kvantitativní ohodnocení nebezpečí. Je to tedy očekávaný rozsah následků nepříznivých jevů pro osoby, či to jsou ekonomické ztráty nebo ztráty z poškození životního prostředí. *Přijatelné riziko* je stupeň rizika, které ještě není jednotlivcem nebo společností vnímáno jako vážné, ale které může být považováno za referenční bod v kritériu rizik. Obecně se ví, že vnímání rizik společností ovlivňují kulturní, společenská, psychologická, ekonomická a další hlediska. Málokdo se pozastaví nad tím, že za týden zahyne na našich silnicích v průměru osmnáct lidí. Oproti tomu smrt tří lidí v tunelu je široce diskutována médii. *Tolerovatelné riziko* je stupeň rizika, který jsou jednotlivcem nebo společností ochotni podstoupit k zajištění jistých výhod za předpokladu, že riziko bude odpovídajícím způsobem řízeno. Platí, že tolerovatelné riziko nemusí být zanedbatelné, musí však být pod stálou kontrolou. V souvislosti s tunely se mluví spíše o *přijatelném* než *tolerovatelném* riziku.

### INTRODUCTION

This paper deals with the problems of “optimum” equipment of tunnels with facilities and technological systems in from the aspect of providing adequate safety for their users, i.e. in this case, passengers of vehicles passing through them. There is always a certain moral dilemma for designers and responsible persons in general between the tunnel equipment and the level of safety provided by the tunnel. It is never possible to equip a tunnel in a way guaranteeing absolute safety. On the other hand, any additional facility or system which is not necessary for maintaining adequate safety brings with it higher investment costs and frequently high and till now underestimated operational expenses.

With respect to the fact that the term ‘adequate safety’ is difficult to define, it happens relatively frequently in the conditions of the Czech Republic that tunnels are equipped strictly in compliance with standards and, sometimes something more is even added ‘to be on the safe side’. This approach, which is purely formalistic, can lead to inadequately increased cost of the tunnel. Discussions on how the optimum tunnel equipment is to be designed will probably never end. Nevertheless, the number of opinions grows within the framework of working discussions in the C3.3 committee of the International Road Association on ‘Road Tunnel Operation’ that it is not necessary to use only standards in a rigid way when seeking compromising requirements for the equipment of tunnels. The paper briefly informs about this new approach, combining standards and mathematical methods for the identification of risks.

The Ministry of Transport paid significant attention to the research into the technological and safety equipment of road tunnels in the OPTUN and SAFETUN projects. The second part of the paper introduces a software product which was developed within the framework of this research, making central recording and statistical assessing of extraordinary events in all our tunnels possible.

### EXPLANATION OF BASIC TERMS

*Hazard* is for the circumstances which may cause phenomena with possible undesired effects, but which are difficult to define in a satisfactory and precise manner. The majority of definitions consider a hazard to be a situation or state of a system in which a certain predictable possibility of unintentional damage to persons or physical elements in the system exists. From the risk analysis point of view, these circumstances do not have to necessarily take place.

The term of *risk* is used in our terminology for qualitative and/or quantitative assessing of a hazard. It is therefore the anticipated extent of consequences of adverse phenomena for persons or economic losses or losses resulting from environmental damages. *Acceptable risk* is for the potential for risk which is not considered by an individual person or the society to be serious, but which can be considered to be a reference point within the risk criterion. It is generally known that the perception of risks by the society is affected by cultural, societal, psychological, economic and other viewpoints. Hardly anybody is taken aback by the fact that eighteen people perish on our roads in average per week. In contrast, the death of three people in a tunnel is widely discussed by media. *Tolerable risk* is for the degree of risk which an individual or the society is willing to run to secure certain advantages under the assumption that the risk will be managed in an adequate way. It applies that a tolerable risk does not have to be negligible, but it has to be under permanent control. The term *acceptable* is used rather than the tolerable risk in the context of tunnels.

Samotné riziko bývá v odborné a vědecké literatuře neformálně vyjadřováno mnohými způsoby, nejčastěji však jako:

- pravděpodobnost nežádoucí události;
- důsledek nežádoucí události;
- očekávaná hodnota následků, jako násobek pravděpodobnosti nežádoucí události a jejího důsledku.

První dvě definice jsou většinou považovány za neúplné, neboť vyzdvihují pouze jediný aspekt rizika (v prvním případě pravděpodobnost výskytu nežádoucí události, ve druhém případě její důsledek), což vede k nepřesnému posouzení těch událostí, které jsou málo pravděpodobné, avšak mají katastrofické důsledky, a naopak. Velmi málo pravděpodobný požár s mnoha oběťmi bude pro většinu lidí více rizikový než četnější malé dopravní nehody nemající důsledky na zdraví a životy.

Velmi často jsou špatně pojmenována zařízení a subsystémy, které ovlivňují bezpečnost. Uvažuje se jen několik technologických celků, jako například elektropožární signalizace či kamerový dohled, které jsou takto zatříděny i v normách. Stále je nutné mít na zřeteli, že do hodnocení bezpečnosti je nutné nejenom zahrnout technologické subsystémy tunelu, ale i celý *bezpečnostní management*, vč. dispečerů a složek integrovaného záchranného systému, sociální subsystém, životní prostředí a další entity, které mohou mít vliv na bezpečnost. Tunel musí být z hlediska bezpečnosti zkoumán jako holistický systém.

V České republice se již od 90. let minulého století považuje tunel za *dopravně-telematický systém* (Příbyl, 1998), charakterizovaný tím, že jsou různá zařízení tvořící jednotlivé funkční celky integrována do jednoho celku s jednotným přístupem. Integrovaný přístup také znamená, že veškeré vstupní a výstupní proměnné jsou k dispozici řídicímu systému v libovolném čase a libovolném místě systému. V dalším textu je tedy technologickým vybavením tunelu míněno vše, co může v jednotlivých situacích ovlivnit míru bezpečnosti. Nejedná se tedy jen o bezpečnostní systém vyjmenovaný v TP98 „*Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací*“. Jen takovýto přístup umožní zkoumat bezpečnost z holistického přístupu.

## PREKRIPTIVNÍ PŘÍSTUP K VYBAVOVÁNÍ TUNELŮ TECHNOLOGIÍ

Bezpečnostní návrh je zatím u nás, stejně jako v řadě jiných zemí, postaven hlavně na standardech. Tyto dokumenty jsou vyvíjeny po desítky let a jsou založeny na každodenních zkušenostech včetně zkušeností při řešení mimořádných událostí. Navíc jsou tyto standardy kontinuálně harmonizovány s dokumenty jiných zemí. V praxi to znamená, že návrhář systému striktně dodržuje to, co mu říká norma ČSN 73 7507 „*Projektování tunelů na pozemních komunikacích*“ a řada dalších technických podmínek a dokumentů.

Takovýto preskriptivní přístup má svá omezení pro jistou kategorii nebezpečí (Kohl, 2009). Platí totiž, že i pokud tunel splňuje dokonce všechny požadavky předpisů, je zde jisté zbytkové riziko, které nemůže být nikdy specificky adresovatelné. Dále také platí, že v řadě předem specifikovaných případů je aktuální situace odlišná od předpokladů, které měli tvůrci předpisů na mysli, a potom následky nehody závisejí i na vhodné reakci lidí (dispečerů, záchranný systém) a také na interakci lidí a technických systémů. Znamená to, že i při důsledném použití standardů existuje vždy nějaké zbytkové riziko, které dokonce ani není, při tomto přístupu, pojmenováno.

Dalším a málo diskutovaným nebezpečím tohoto přístupu je, že se navrhovatel systému jistí a raději zařízení předimenzuje, což zvyšuje cenu tunelu. Příkladem se v naší republice najde několik. Typickou ukázkou je přístup k návrhu a provedení únikových chodeb v tunelu Libouchec na dálnici D8. V dokumentaci pro stavební povolení a v dokumentaci pro zadání stavby byla navržena úniková chodba mezi oběma tunelovými troubami o rozměrech 3x3 m zhruba v polovině tunelu, přičemž i v nejneprůzračnějším případě byla úniková cesta dlouhá 270 metrů.

In technical and scientific literature, the risk itself is usually expressed informally by many ways, most frequently as follows:

- probability of the undesired event;
- consequence of the undesired event;
- anticipated value of consequences, as a multiple of probability and the consequence.

The first two definitions are mostly considered as incomplete because of the fact that they accentuate only one aspect of risk (in the first case the probability of the occurrence of the undesired event, while the event consequence is accentuated in the second case), which leads to inaccurate assessment of the events which are little probable but have catastrophic consequences, and vice versa. For the majority of people, a very little probable fire with many victims will be more risky than more frequent small traffic accidents having no consequences as far as health and lives are concerned.

The facilities and sub-systems influencing the safety are frequently incorrectly named. Only several equipment complexes are taken into account, for example the fire alarm and detection system or camera surveillance system, which are categorised in this way even in standards. It is still necessary to keep in mind the fact that the assessment of safety has to contain not only tunnel equipment sub-systems but also the entire *safety management system* including operators and components of the integrated rescue system, the social sub-system, environment and other entities, which may influence the safety. In terms of safety, a tunnel has to be examined as a holistic system.

In the Czech Republic, a tunnel has been considered to be a *traffic-telematic system* since the 1990s (Příbyl, 1998), which is characterised by the integration of various facilities forming individual functional complexes into a single complex with a unified approach. In addition, the integrated approach means that all input and output variables are at disposal of the system manager at any arbitrary time and any arbitrary place of the system. The meaning of the tunnel technological equipment in the further text is everything that can influence the degree of safety in individual situations. It is therefore not a mere case of the safety system defined in the TP98 specifications on ‘*Road Tunnel Equipment*’. This is the only approach which will make the examination of safety on the holistic basis possible.

## PRESCRIPTIVE APPROACH TO EQUIPPING TUNNELS WITH TECHNOLOGIES

A safety design in the Czech Republic has been, similarly to other countries, based first of all on standards. These documents have been developed for tens of years and are based on everyday experience including experience in dealing with emergencies. In addition, these standards have been continually harmonised with documents issued by other countries. In practice this means that the system designer strictly adheres to the requirements of the ČSN 73 7507 standard on ‘*Design of Road Tunnels*’ and many other technical conditions and documents.

Such a prescriptive approach has its own limitations for a certain category of hazards (Kohl, 2009). The reason is the fact that it applies that certain residual risk which can never be specifically addressable exists even if the tunnel meets all requirements of regulations. It further applies that in many pre-specified cases the current situation differs from the assumptions which the authors of regulations kept in mind. Accident consequences then depend even on the proper reaction of people (operators, the rescue system) and also on the interaction of people and technical systems. This means that some residual risk, which is not even named at this approach, exists always, even when standards are consistently applied.

Another and little discussed danger of this approach is the fact that the system designers protect themselves and prefer overdimensioning of the facility, which increases the tunnel cost. There are several examples available in the Czech Republic. A typical illustration is the approach to the design and execution of escape galleries in the Libouchec tunnel on the D8 motorway. An escape gallery with the dimensions of 3x3 m was proposed in the final design and the tender design, to be driven between the two tunnel tubes roughly in the middle of the tunnel. In this case, the escape route was 270 m long even in the most unfavourable case.

The building permit issued by the Road Department of the Ministry of Transport in Clause 29.1 reduces the escape route length to 170 m



Vydané stavební povolení Ministerstvem dopravy odborem pozemních komunikací v článku 29.1 zkracuje délku únikové cesty na cca 170 m vybudováním dvou propojek. Zdůvodnění uvádí, že pro nejsložitější variantu požáru je délka úniku 270 m, což přesahuje „povolenou“ vzdálenost v normě, která je 250 m.

Na žádost zástupců supervizního sdružení byl zpracován znalecký posudek, který měl shrnout požadavky vyplývající ze zahraničních standardů, zvláště pak Direktivy Evropského parlamentu a Rady 54/2004/ES z dubna roku 2004, a provést výpočet evakuačních dob. V posudku je analýzou sedmi předpisů ukázáno, že většina vyspělých tunelových zemí požaduje zachovat vzdálenost únikových východů 300 m. Evropská direktiva se smiřuje dokonce s 500 metry. Pro špičkové hodiny provozu 12 500 vozidel za den v predikci pro rok 2010 a 14% podíl nákladních vozidel byly pro tunel Libouchec mikro-simulačními modely simulovány různé dopravní situace po vzniku nehody. Doba úniku, pro požár přímo u únikového východu, byla vypočítána na 300 s. Doba úniku se prodloužila o 20 s oproti normě (250 m), pokud by byla trasa úniku delší o 20 m!!! Přesto bylo nakonec konstatováno, že by tunel nevyhovoval normě a byly vybudovány dvě propojky po 170 m s navýšenou cenou odhadem o 7 až 10 mil. Kč.

### KVALITATIVNÍ METODY PRO HODNOCENÍ RIZIK

Kvalitní návrh bezpečného tunelového systému s přiměřenou mírou rizik by se měl odehrávat ve dvou fázích. V první fázi se systém navrhuje podle předpisů, které se netýkají jenom technologického vybavení (ČSN 73 7507, TP98), ale i organizace činností a práce s dispečery (TP154, 2004). Po tomto návrhu, který by měl být i široce diskutován odborníky, by měly následovat metody, které kvalitativně ohodnotí rizika a případně najdou slabá místa v projektu.

Velmi efektivní metodou, a relativně snadno realizovatelnou, která hodnotí riziko na relativní stupnici, představuje SAFMEA, jejíž principy jsou popsány (Tichý, 2006). Postup analýzy rizik SAFMEA je založený na expertním posuzování a následném statistickém vyhodnocení. Metoda tedy nevyžaduje statistická data, ale zato tým odborníků. Celý proces řídí rizikový analytik, který je znalý problematiky rizikového inženýrství a měl by mít i schopnost práce s kolektivem expertů. Proces hodnocení je založen na následujících krocích:

- Identifikace možných nebezpečí (poruch/událostí): rizikových faktorů;
- Identifikace a ocenění možných následků rizikových faktorů;
- Kvalifikace a reprezentace rizik na ordinální stupnici hodnot.

Vypovídací schopnost analýzy roste s počtem expertů, a proto by jejich počet neměl být nižší než pět. Protože se metoda osvědčila pro hodnocení rizik v tunelech (Krajčír, 2008) nebo dokonce pro hodnocení staveb (Bína, 2008), byla zpracována jako doporučení i v nových technických podmínkách TP229 „Bezpečnost v tunelech pozemních komunikací“ (Příbyl, 2010). SAFMEA je poměrně nenáročnou a přesto efektivní komplementární metodou k preskriptivnímu přístupu.

### Pravděpodobnostní a deterministické metody

Metody, které nám přímo určí míru rizika ve formě numerické hodnoty, udávající počet poškozených osob, ekonomické ztráty apod. pro různé situace, jsou obecně vzato neobjektivnější, neboť jsou poměrně dobře kontrolovatelné. V zásadě je dělíme na metody pracující se statistikami, jejichž výsledkem je pravděpodobnost rizika (počtu usmrcených osob,...) a na metody využívající hlavně dopravní a fyzikální modely a determinující pro danou událost číselné výsledky např. v počtu usmrcených osob.

Klíčovým faktorem moderního hodnocení rizika je uvědomění si, že nežádoucí události nevznikají samy od sebe, ale začínají (často nepatrným) narušením normálního stavu, které se může rozvinout několika směry v závislosti od reakce na nehodu. Uvedená koncepce je známá jako motýlový model (*bow tie model*) a je znázorněna na obr. 1, kde je v horní polovině uveden princip pravděpodobnostní metody a v dolní polovině princip deterministické metody, která se v praxi nazývá metoda analýzy scénářů.

by carrying out two cross passages. The substantiation states that the length of 270 m which is required according to the proposal in the case of the most complicated variant of fire exceeds the distance of 250 m 'permitted' by the standard.

An expert opinion was formed by request of representatives of the supervising association. Its task was to summarise requirements following from foreign standards, first of all the Directive of the European Parliament and of the Council No. 54/2004/ES from April 2004, and to carry out the calculation of evacuation times. It is shown in the assessment through an analysis of seven regulations that the majority of developed tunnelling countries require the spacing between escape exits of 300 m to be maintained; the European directive reconciles itself even to 500 metres. Various traffic situations after the origination of an accident were simulated by micro-simulation models for the Libouchec tunnel, for peak traffic hours of a day of 12,500 vehicles in the prediction for 2010 and the percentage of lorries of 14%. The escape time in the case of a fire directly at the escape exit was calculated to 300 s. The escape time would be increased by 20 s compared with the standard (250 m), if the escape route was longer by 20 m!!! Despite this fact it was eventually stated that the tunnel did not satisfy the standard and two cross passages were driven at the spacing of 170 m; the construction cost was increased approximately by CZK 7 to 10 million.

### QUALITATIVE METHODS FOR ASSESSING RISKS

A good quality design for a safe tunnel system with a reasonable level of risks should be carried out in two phases. In the first phase, the system is designed in compliance with regulations, which apply not only to tunnel equipment (ČSN 73 7507, TP98) but also to the organisation of activities and work with operators (TP154, 2004). When this phase is finished, it should be widely discussed with experts and then methods should follow, qualitatively assessing risks and possibly finding weak points in the design.

A very effective method, which is relatively easy to implement, which assesses the risk on a relative scale, is represented by the SAFMEA, the principles of which have been described (Tichý, 2006). The SAFMEA risk analysis procedure is based on expert assessing and subsequent statistical evaluation. The method therefore requires a team of experts instead of statistical data. The whole process is controlled by a risk analyst who is acquainted with risk engineering issues and should be also capable of working with a collective of experts. The assessment process is based on the following steps:

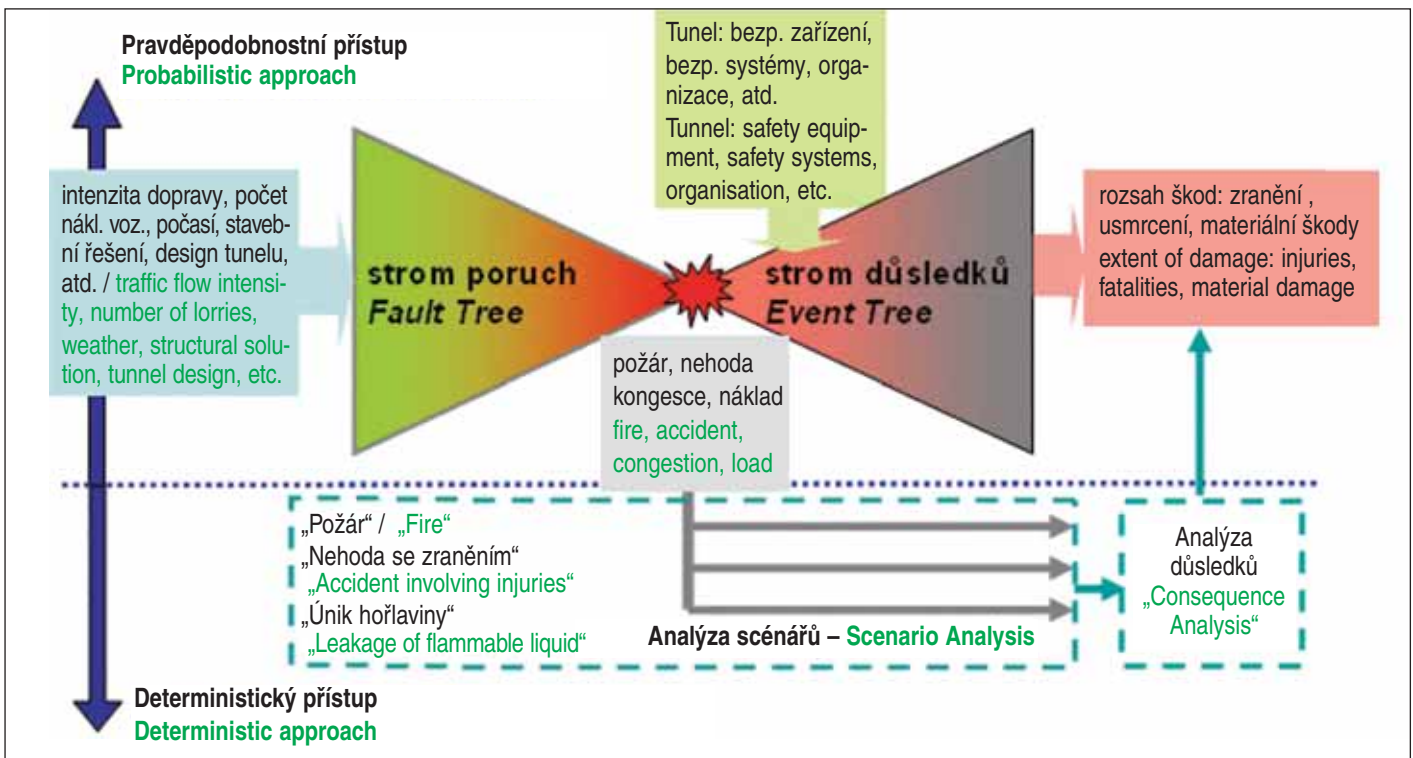
- Identification of potential hazards (defects/events): identification of risk factors;
- Identification and estimation of consequences of risk factors;
- Qualification and representation of risks on an ordinal scale of values.

The informative ability of the analysis grows with the growing number of experts. Their number therefore should not be lower than five. Because the method acquitted itself for assessing risks in tunnels (Krajčír, 2008) or even for assessing structures (Bína, 2008), it was incorporated as a recommendation even into the new technical specifications TP229 on 'Safety in road tunnels' (Příbyl, 2010). The SAFMEA is a relatively unexacting but still effective method complementary to the prescriptive approach.

### Probabilistic and deterministic methods

The methods which directly inform us about the level of risk in the form of a numerical value stating the number of injured persons, economic loss etc. for various situations are generally the most objective because they are relatively easy to check. We basically divide them into methods working with statistics, the result of which is the probability of risk (the number of fatalities, ...) and methods preferably using traffic and physical models and determining numerical results for a particular event, e.g. the number of fatalities.

The key factor of the modern risk assessment is the realisation of the fact that undesired events originate of their own accord and that they start by the violation (often insignificant) of the normal state, which may develop in several directions, depending on the response to the accident. This conception, which is known as the Bow Tie Model, is demonstrated in Fig. 1, where the principle of the probabilistic method is presented in the bottom peneplane, whilst the principle of the deterministic method, which is in practise named the Scenario Analysis, is shown in the upper peneplane.



Obr. 1 Motýlkový model  
Fig. 1 Bow Tie Model

Levá strana pravděpodobnostního schématu řeší vznik dopravní události typu požár, nehoda, tvorba kongescí nebo ztráta nákladu. Vznik, resp. odhad pravděpodobnosti či četnosti této události, se obvykle řeší stromem poruchových stavů, do něhož vstupuje řada parametrů: intenzita dopravy, skladba vozového parku, stavební řešení tunelu a jeho barevný návrh, počasí apod. Tato část, hledající četnosti vzniku různých událostí při různých okrajových podmínkách, se nazývá FTA (Fault Tree Analysis). Pravé křídlo motýlkového modelu potom udává následky iniciační události (ETA Event Tree Analysis), a to v závislosti na dalších faktorech, které povětšinou souvisejí s vybavením tunelu. V úvahu je brána kvalita samo-evakuace, schopnost rychle identifikovat událost, účinnost ventilace atd. Výsledkem je četnost scénáře pro danou konfiguraci okrajových podmínek. Vlastní následky události, jejichž výstupem je počet raněných či usmrcených osob, se stanovují různými odhady spočívajícími převážně na expozici osob či skupiny osob jedovatými zplodinami kouře, při té dané události.

Metoda je věrohodná pouze v případě, že vychází z reprezentativních souborů reálných statistických hodnot. Například je nutné mít k dispozici statistiku vzniku požárů ve špičkových hodinách dopravy, statistiku selhání, či špatné funkčnosti ventilace v případě vzniku požáru a desítky dalších statisticky významných kombinací. Rakouská směrnice pro výpočet rizik pravděpodobnostní metodou (TuRisMo, 2006) vychází ze statistiky 447 nehod, při kterých se zranili lidé za roky 1992 až 2003. Základní statistické hodnoty pro Německo byly získány rozбором 979 nehod v 80 tunelech v Německu.

V rámci projektu SAFETUN (2007–2009) byly detailně analyzovány výstupy záznamů mimořádných událostí a byla provedena komparativní analýza s Rakouskem a Německem (Štefaňák, 2010). Výsledky za roky 2010 a 2011 jsou uvedeny v dalším textu.

#### Dílčí závěr k pravděpodobnostním metodám:

Metody lze efektivně a spolehlivě využít pro odhadování pravděpodobnosti následků, pokud je dostatečný počet hodnot pro statistiku a navíc jsou přesně zaznamenány okrajové podmínky. To v našich podmínkách do roku 2009 nebylo. Vzhledem k charakteru našich řidičů, jejich způsobu jízdy a celkově jiným

The left-hand side of the probabilistic chart solves the origination of a traffic event of fire, accident, development of congestion or loss of load types. The origination or estimation of probability or frequency of the event are usually solved using a fault tree, which is entered by many parameters: traffic flow intensity, composition of the vehicle fleet, structural design of the tunnel and colour scheme in it, weather etc. This part, seeking frequencies of the origination of various events under various boundary conditions, is called the FTA (Fault Tree Analysis). The right-hand wing of the Bow Tie Model indicates consequences of the initiating event (the ETA - Event Tree Analysis), depending on other factors mostly associated with the tunnel equipment. The considerations involve the quality of self-evacuation, the ability to quickly identify an event, the efficiency of ventilation etc. The result is the frequency of the scenario for the particular configuration of boundary conditions. The event consequences themselves, the output of which is the number of injuries or fatalities, are determined by various estimations based mostly on the exposition of persons or a group of persons to poisonous smoke emissions during the particular event.

The method is credible only in the case that it is based on representative sets of real statistical values. For example, it is necessary to have at disposal the statistics of the origination of fires during peak traffic hours, statistics of failures or poor functioning of ventilation in the case of the origination of a fire and tens of other statistically significant combinations. The Austrian directive on the calculation of risks using a probabilistic method (TuRisMo, 2006) is based on the statistics of 447 accidents during which people were injured in the 1992 – 2003 period. Basic statistical values for Germany were obtained by an analysis of 979 accidents in 80 tunnels in Germany.

Outputs of records of extraordinary events were analysed in detail within the framework of the SAFETUN project (2007–2009) and a comparative analysis with Austria and Germany was carried out (Štefaňák, 2010). The results for 2010 and 2011 are presented in the text below.

#### Partial conclusion regarding probabilistic methods:

The methods can be effectively and reliably used for assessing the probability of consequences if a number of values sufficient for statistics is available and, in addition, the boundary conditions are accurately recorded. This was not the case of the conditions in the Czech Republic before 2009. With respect to the character of our drivers, their driving manners and, in general, other conditions, it is very



podmínkám je velmi problematické používat statistické hodnoty, které poskytuje metoda TuRisMo. Tu lze ale použít metodicky, jak je i naznačeno v TP229.

Obecně platí, že tento typ analýz je obvykle zpracován nejvíce v detailu, a proto vyžaduje i nejvíce času, je relativně drahý. Hlavně musí být k dispozici i dostatek vstupních informací, což v případě statistik nehod a požárů pro různé druhy tunelů u nás zatím zcela neplatí.

Na zasedání PIARC v říjnu 2005 v Dubrovniku francouzská delegace informovala o kvantitativní analýze prováděné systematicky pro řadu tunelů ve Francii s tím, že pro krátké tunely je tato analýza neefektivní, a tudíž i drahá.

Úvahy spojené s přípravou této metody v rámci projektu SAFETUN vedly k tomu, že je nutné zavést celonárodní databázový systém pro záznam a zpracování mimořádných událostí, který by propojoval všechny tunely, kde působí dispečeri. Internetově orientovaný programový nástroj AZMUT je popsán dále.

### Metoda deterministická

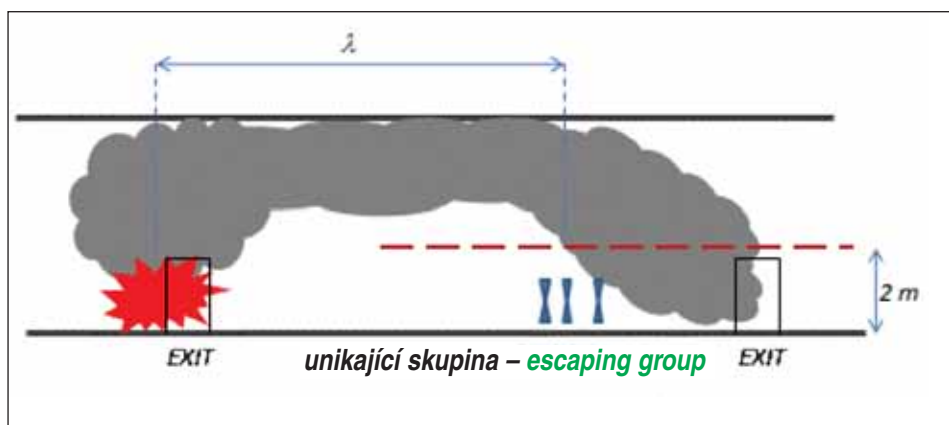
Základní princip, ze kterého vychází analýza scénářů, je popsán v obr. 2. V tomto případě se jedná o deterministické stanovení počtů ohrožených či zachráněných osob na základě detailní analýzy postupu události. Model pro analýzu scénářů (dále SA) je vždy aplikován na konkrétní tunel s konkrétními subsystemy a zařízeními. Vychází se ze stavu, kdy vznikne nebezpečná situace, v obrázku je to požár. Velikost požáru, jeho vývoj a způsob šíření kouře je popisován detailními fyzikálními modely. Oproti tomu dopravní mikro-simulační modely umí nakonfigurovat pozice vozidel po nehodě na základě reálných dat z provozu.

Zásadním problémem při zjišťování počtu a rozsahu zranění či dokonce usmrcení osob je odhad toho, jak budou lidé reagovat na krizovou situaci, což je obecně velmi těžké a neexistuje zde obecná odpověď. Jak lidé reagují, je ovlivněno vnějšími podmínkami a jejich individuální psychikou. Na druhé straně se využívají všeobecně platné evakuační modely počítající dobu dosažení únikových východů. Model evakuace má tři komponenty:

- Dobu zjištění události;
- Dobu reakce;
- Dobu pro únik.

Výsledný stav, určující k jakým ztrátám potenciálně dojde, je dobře patrný z obr. 2. Stratifikovaný kouř po jisté době klesá do prostoru únikových dveří (EXIT) a v obrázku naznačená skupinka unikajících osob by již neměla šanci na záchranu. Schéma je značně zjednodušené, ale vystihuje princip metody SA.

Podrobnější popis metody a návod k její aplikaci lze najít v literatuře (Příbyl, 2008). Z hlediska efektivity záchrany osob platí zásadně princip samo-evakuace, nebo se také mluví o prvních osmi minutách, které rozhodují o lidských osudech. A právě o prvních minutách rozhodují převážně postižení účastníci sami.



Obr. 2 Základní princip metody analýzy scénářů

Fig. 2 Basic principle of the Scenario Analysis Method

problematic to use the statistical values which are provided by the TuRisMo method. Although, it can be used methodologically, as it is also outlined in the TP229 specifications.

It applies in general that this type of analyses is usually carried out in most detail and for that reason requires most time, therefore is relatively expensive. Above all it is necessary to have sufficient amount of input information available, which does not fully apply today in our country in the case of statistics of accidents and fires for various types of tunnels.

It was at the PIARC meeting in Dubrovnik in October 2005 that the French delegation informed about a quantitative analysis carried out systematically for a number of tunnels in France, concluding that this analysis was ineffective and thus also expensive.

Considerations associated with the preparation of this method within the framework of the SAFETUN project led to the conclusion that it was necessary to establish a nation-wide database system for recording and processing of extraordinary events, which would link all tunnels controlled by operators. The Internet-oriented programming tool is described below.

### The deterministic method

The basic principle which the Scenario Analysis proceeds from is described in Fig. 2. In this particular case it is the deterministic determination of the number of endangered or rescued persons on the basis of a detailed analysis of the course of events. The model designed for the Scenario Analysis (hereinafter referred to as the SA) is always applied to a concrete tunnel with concrete sub-systems and facilities. It starts from the state during which the dangerous situation originates; it is a fire in the picture. The magnitude of the fire, its development and manner of smoke propagation are described by means of detailed physical models. In contrast, traffic micro-simulation models are capable of configuring positions of vehicles after an accident on the basis of real data from the operation.

The principal problem solved when the number and extent of injuries or even fatalities is being determined is the guessing at the response of people to the emergency situation, which is generally very difficult and no general answer exists in this case. The way people respond is affected by external conditions and their individual psyche. On the other hand, generally applicable evacuation models calculating the time required for reaching escape exits are used. The evacuation model has the following three components:

- Event detection time;
- Event response time;
- Escape time.

The resultant state determining the losses which will potentially take place is well visible in Fig. 2. Stratified smoke starts to sink to the space of escape doors (EXIT) after a certain time and the group of escaping persons would no more have a chance for rescue. The chart is significantly simplified, but it catches the SA method principle.

A more detailed description of the method and instructions for its application can be found in literature (Příbyl, 2008). As far as the effectiveness of the rescue of people is concerned, it applies that self-evacuation is the fundamental principle (the initial eight minutes are also

referred to as the minutes deciding about destinies of people. And it is just the initial minutes that the affected participants decide about mostly by themselves. It is necessary for increasing the chance of the rescue of persons to cut all three times in the evacuation model and even use the appropriate tunnel equipment for this purpose.

**Event detection time and Response time:** The event detection time can be characterised as the time during which an individual realises that something specific happened. Of course, this time is associated with the character of the event. People who are confronted with smoke or flames realise this situation nearly immediately. It applies that the more serious visual consequences of the event the shorter detection time. It is possible to distinguish two

Pro větší šanci na záchranu osob je nutné zkracovat všechny tři časy v evakuačním modelu a využívat k tomu i vhodnou technologii vybavení tunelu.

**Doba zjištění události a doba reakce:** Doba *zjištění události* lze charakterizovat jako čas, kdy si jedinec uvědomí, že se něco konkrétního stalo. Tento čas samozřejmě souvisí s charakterem události. Lidé, kteří jsou konfrontováni s kouřem nebo plameny, si tuto situaci uvědomí téměř okamžitě. Platí zde, že čím jsou větší vizuální následky události, tím je doba zjištění menší. Lze rozlišit dvě kategorie uvědomění si události – část lidí je v kontaktu s místem události a ti reagují díky fyzikálnímu charakteru události (kouř, plameny) velmi rychle. Další část lidí může být informována pouze nepřímo, například informačním systémem nebo prchajícími lidmi.

*Doba reakce* je čas, který se počítá od doby zjištění události do doby začátku evakuace. Znamená to, že si je jedinec vědom události a hledá vhodné řešení. Obvykle následuje chování ostatních lidí, kteří se rozhodují rychleji. Přestože je tato doba také silně individuální, jsou zde jisté faktory, které ji ovlivňují. Jedná se o chování jedinců v okolí, prostředí v tunelu, viditelnost únikových východů apod. Všechny tyto faktory ovlivní čas, který je potřebný pro rozhodnutí, jakou evakuační cestu zvolit.

Z hlediska instalovaných technologií v tunelech je mezi schopností ovlivnit oba časy jistý rozdíl. Identifikovat událost typu zastavení či nehodu vozidla nebo i vznik požáru umí řada zařízení a systémů, které jsou do tunelu instalovány standardně – videodetekce, senzory požáru, senzory kouře apod. Nehodu lze identifikovat videodetekcí téměř okamžitě, u požáru závisí, jak je charakterizován. Někdy hned roste tepelný výkon, jindy je na počátku více kouře. Přesto je rychlost identifikace požáru postačující, a bývá okolo 60 s.

Podstatně horší je, jak okamžitě a účinně informovat účastníky události o nutnosti neprodleně opustit vozidlo a rychle dosáhnout únikových východů. Naše předpisy zatím počítají s možností dispečera vstoupit do rozhlasového vysílání, což funguje, pokud má dotyčný naladěnu odpovídající stanici. Další možností je pak již jen evakuační rozhlas, který u nás tvoří tlakové reproduktory umístované v pravidelných vzdálenostech v tunelu. Tento systém, v kombinaci s dokonale odrazivým prostředím v tunelu, činí hlasová hlášení málo srozumitelnými, a to hlavně kvůli mnohonásobným ozvěnám. Někteří dodavatelé se pyšní CD kvalitou, což je u evakuačního rozhlasu spíše na škodu. Navíc se neměří, a není to ani předepsáno v normách, kvalita přenášené informace vyjádřená logatomovou či větnou srozumitelností. Neobjektivněji míru srozumitelnosti vyjadřuje index STI (Speech Transmission Index). Zjednodušené přístrojové měření měří koeficient STIPA (Speech Transmission Index for Public Address Systems), který také přímo vyjadřuje míru srozumitelnosti. Požadavky na úpravu norem pro tunely z hlediska měření srozumitelnosti byly specifikovány v rámci projektu ZET (ZET, 2011) a bude snaha je zapracovat v dalším kole úprav našich standardů.

V tunelu se doba reakce na nebezpečí může podstatně vylepšit, pokud je tunel vybaven informačními tabulemi či světelnými značkami. V současné době se doporučuje umísťovat zařízení pro provozní informace po 500 metrech, což by odpovídalo koloně cca 50 vozidel, při 10 % nákladních vozidel mezi těmito tabulemi. Takovéto rozestupy jsou evidentně velké a je nutné řešit možnosti rychlého informování uživatelů i v nové revizi technických předpisů.

#### **Dílčí závěr k deterministickému hodnocení rizik:**

1. Hodnocení cestou analýzy scénářů lze reprezentativně použít pro hodnocení následků události. K dispozici jsou příslušné mikro-simulační nástroje pro věrné modelování dopravních situací. K dispozici jsou i velmi dobré fyzikální modely pro modelování požáru včetně šíření kouře. Pro pohyb osob při evakuaci je vhodné použít také simulační modely pracující s psychomotorikou osob.

categories of realising an event – a proportion of people are in contact with the event location and these people respond very quickly owing to the physical character of the event (smoke, flames). The other proportion of people can be informed only indirectly, for example by an information system or by fleeing people.

*Response time* is the time which is counted from the event detection time to the beginning of evacuation. It means that an individual is aware of the event and seeks proper solution. He or she usually follows the behaviour of other people who make decisions quicker. Despite the fact that this time is also strongly individual, there are certain factors which affect it, such as the behaviour of individuals in the surroundings, the environment inside the tunnel, the visibility of exits etc. All these factors influence the time which is necessary for making the decision about the evacuation route to be chosen.

From the aspect of the equipment installed in tunnels, there is a certain difference between the ability to influence the two times. There are many facilities and systems installed in the tunnel as a standard (video-based detection, fire detection sensors, smoke detection sensors etc.), which are capable of identifying events of the types of vehicle stopping or vehicle accident or the origination of a fire. An accident can be identified by the video-based detection system nearly immediately, whilst the identification of a fire depends on the way in which the fire is characterised. Sometime the fire capacity immediately grows; another time there is more smoke in the beginning. Despite this fact the speed of the fire identification is sufficient, taking usually about 60 seconds.

A significantly worse problem is how to immediately and effectively inform participants of the event about the necessity of immediate evacuating the vehicle and quick reaching escape exits. Our current regulations count on the possibility for the operator to enter the broadcasting, which system works only if the particular driver has the relevant station tuned in. The only other option is the evacuation broadcasting system, which is formed in our conditions by pressure loudspeakers installed at regular intervals inside the tunnel. This system, in combination with the perfectly reflective environment inside the tunnel, makes audio announcements little intelligible, first of all because of multiple echoes. Some suppliers pride themselves of CD-quality level, which is a property rather detrimental in the case of evacuation broadcasting. Moreover, the quality of the information being transmitted is not measured by means of logatome tests or sentence intelligibility tests. The most objective intelligibility ratio is expressed by the Speech Transmission Index (STI). A simplified instrumental measurement system measures the Speech Transmission Index for Public Address Systems (STIPA), which also directly expresses the intelligibility level. Requirements for the modification of standards for tunnels in terms of intelligibility measurements were specified within the framework of the ZET project (ZET, 2011) and efforts will be made to incorporate them into the next round of modifications of our standards.

In a tunnel, the time of response to a danger can be significantly improved if the tunnel is equipped with message signs or luminous traffic signs. It is currently recommended that operational information facilities should be installed every 500 m, which distance would correspond to a column of about 50 vehicles between the facilities, containing 10 per cent of lorries. Such the intervals are evidently large and it is necessary to solve possibilities for quick informing of users even in the new review of technical regulations.

#### **Partial conclusion on the deterministic risk assessment:**

1. The assessment by means of the Scenario Analysis can be representatively used for the assessment of event consequences. Relevant micro-simulation tools for faithful modelling of traffic situations are available. Very good physical models for modelling a fire including the propagation of smoke are also available. The use of simulation models working with the psychomotorics of people is advisable for the analysis of the movement of persons during evacuation.

2. Scenarios are selected on the basis of multiple criteria, preferably by a group of experts. The most important criterion is the ability of the scenario to test the system boundaries because the main objective of the analysis is to determine whether the system safety level is sufficient. However, no regulation defining the scenario which should be applied exists. The scenario selection is in a significant extent subjective and it is therefore impossible to assess the tunnel safety level only



2. Scénáře jsou vybírány na základě vícero kritérií, přednostně skupinou expertů. Nejdůležitějším kritériem je schopnost scénáře otestovat hranice systému, protože hlavním cílem analýzy je zjistit, zda je úroveň bezpečnosti systému dostatečná. Neexistuje však žádný předpis definující, jaký scénář by se měl použít. Výběr scénáře je do značné míry subjektivní a hodnotit úroveň bezpečnosti tunelu pouze na základě jediného scénáře není možné. Doporučené množství vybraných scénářů je 5 až 10.

3. Do evakuačního modelu je nutné zavést časovou dynamiku hodnotící kvalitu a rychlost technologických subsystémů pro identifikaci události a subsystémů pro informování účastníků události. Tento požadavek je nový a není zatím v žádné dostupné literatuře diskutován.

## POŽADAVKY NA ZÁZNAM UDÁLOSTÍ

Sběr, zpracování a vyhodnocení vzniku, příčin a následků mimořádných událostí je základem pro jakoukoli analýzu rizik, a proto je nutné mu věnovat mimořádnou pozornost. Kromě toho je tento požadavek dán Směrnicí 2004/54/EC Evropského parlamentu a Rady o požadavcích na minimální bezpečnostní vybavení tunelů na trans-evropské silniční síti schválené ke dni 29. 4. 2004 a také NV 264/2009 Sb., kde je v příl. 2 uveden vzor zprávy o mimořádných událostech. Sběr a vyhodnocení dopravních dat a mimořádných událostí vyplývá také z kap. 6 technických podmínek TP 154 „Provoz, správa a údržba tunelů pozemních komunikací“ odsouhlasených Ministerstvem dopravy a Ministerstvem vnitra a vydaných v roce 2009. Původní záznamy do papírových pracovních deníků na dispečincích byly v prosinci 2004 nahrazeny deníky elektronickými pro záznam mimořádných událostí pro tunely v Praze a následně i pro tunely v Brně. Pro výslednou statistickou analýzu však bylo potřeba tato data přenést z jednotlivých dispečinků na místo vyhodnocení pomocí přenosných datových médií např. CD-ROM. Současně řešení využívající možnosti internetu a propojující všechny naše tunely s obsluhou je popsáno v následující kapitole.

## TECHNICKÉ A ORGANIZAČNÍ ŘEŠENÍ

V rámci projektu SAFETUN řešeného společností Eltodo EG byl v lednu 2009 uveden do ostrého provozu programový balík AZMUT (Automatizované Zpracování Mimořádných Událostí v silničních Tunelech). Aplikace spočívá v elektronickém dotazníku, který je umístěn na každém obsluhovaném dispečerském pracovišti tunelů s odděleným počítačem s úplným přístupem do veřejné internetové sítě. Řešení spočívalo v instalaci softwarové aplikace na jednotlivých dispečerských pracovištích (dispečink Brno, Jihlava, Ostrava, Praha, Řehlovice). Dispečink tunelu Valčík je obsluhován pouze policií ČR a zpočátku se organizačně nepodařilo zajistit i sběr dat z tohoto tunelu. Od roku 2010 jsou již všechny dispečinky internetově propojeny na Národní dopravně informační centrum (NDIC) v Ostravě.

Aplikace AZMUT slouží k záznamu a uchování údajů o mimořádných událostech a také provádí předzpracování informací o mimořádných událostech sloužících pro správce tunelu. Údaje o mimořádných událostech se zapisují do databáze lokální sítě na dispečinku pomocí www formulářů. Principiální schéma celého fungujícího systému je v následujícím obr. 3.

Správu databáze obstarává systém řízení báze dat, který je v rámci univerzálnosti použití navržen pomocí databázového serveru MS SQL. Samotná databáze mimořádných událostí je umístěna na společném úložišti pro všechny sledované tunely. Webový server, na kterém je umístěna aplikace, je navržen jako součást vnitřní sítě organizace, která celý systém spravuje. Uchování dat zapsaných v databázi Ztráta dat je řešena pravidelným automatickým zálohováním na oddělený diskový prostor na NDIC.

Organizačně systém pracuje tak, že každý dispečer je povinen se po převzetí směny přihlásit do systému a registrovat se na elektronickém formuláři. Povinností dispečera je po vyřešení mimořádné situace pečlivě vyplnit dotazník, případně napsat své názory a návrhy na zlepšení. Způsob vyplňování dotazníku se

on the basis of a single scenario. The recommended number of selected scenarios is 5 to 10.

3. It is necessary to introduce time dynamics assessing the quality and speed of equipment sub-systems into the evacuation model for the purpose of identifying events and subsystems for informing participants in an event. This requirement is new and till now has not been discussed in any literature available.

## REQUIREMENTS FOR EVENT RECORDS

The collection, processing and assessment of the origination, causes and consequences of extraordinary events are the basis for any risk analysis and it is therefore necessary to pay extraordinary attention to them. In addition, this requirement is stipulated by the Directive of the European parliament and of the Council No. 2004/54/EC on minimum safety requirements for tunnels in the Trans – European road network, which was approved on 29th April 2004, and also the government decree No. 264/2009 Coll., where a standard report format for reporting extraordinary events is presented in Annex 2. The collection and assessment of traffic data and extraordinary events also follows from section 6 of the technical specifications TP 154 ‘Operation, administration and maintenance of road tunnels’ approved by the Ministry of Transport and the Ministry of the Interior and published in 2009. Original records in paper work diaries maintained in management centres were replaced in December 2004 by electronic diaries for recording of extraordinary events for tunnels in Prague and subsequently even for tunnels in Brno. But it was necessary for the final statistical analysis to transfer the data from individual management centres to the assessment centre by means of portable data media, e.g. CD-ROMs. The current solution using possibilities offered by Internet and interconnecting all our tunnels managed by operators is described in the section below.

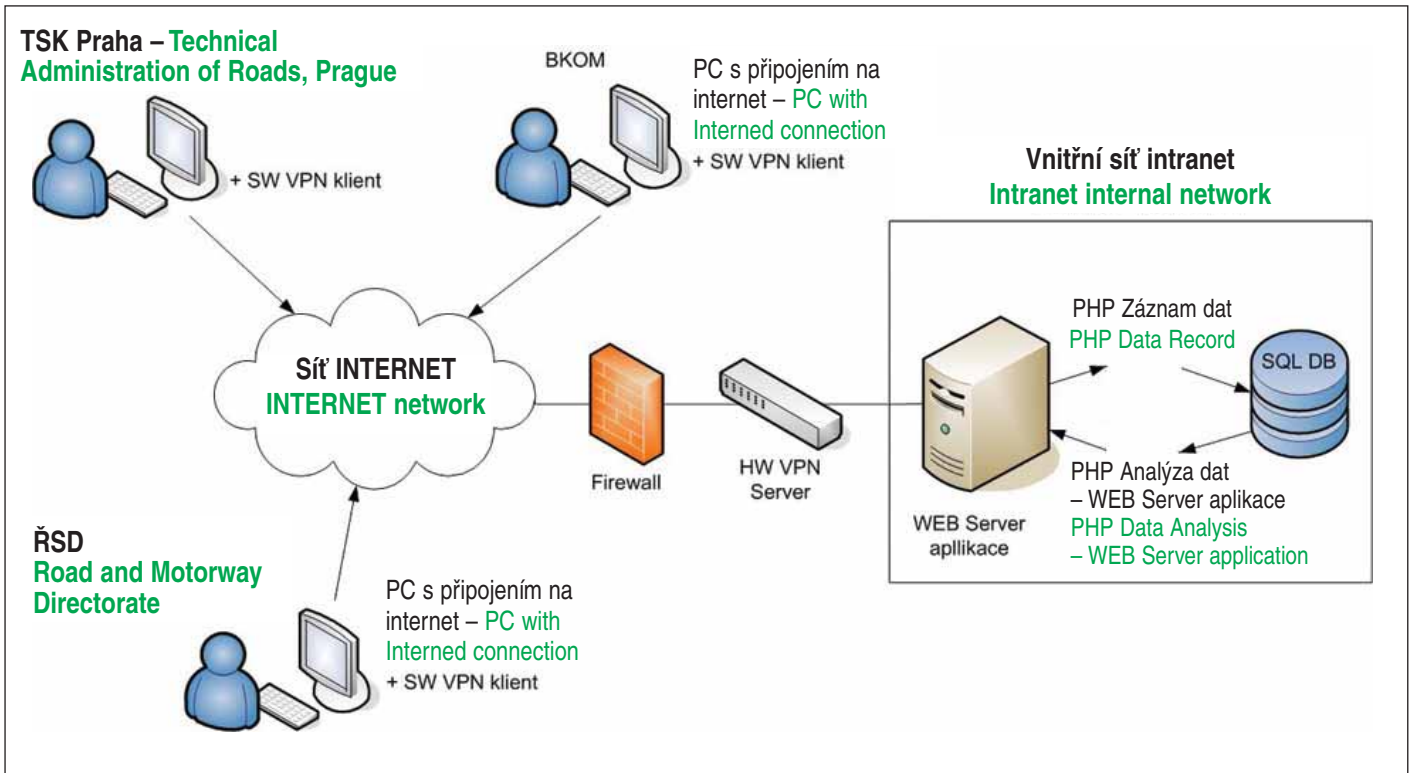
## TECHNICAL AND ORGANISATIONAL SOLUTION

The AZMUT programme package (for automated processing of extraordinary events in road tunnels) was brought into hot service in January 2009 within the framework of the SAFETUN project being solved by Eltodo EG a. s. The application lies in an electronic questionnaire, which is placed at each serviced tunnel management centre equipped with a separate computer with full access to the public Internet network. The solution lied in the installation of the software application at individual management centres (management centres in Brno, Jihlava, Ostrava, Prague and Řehlovice). The Valčík tunnel management centre is serviced only by the Police of the CR and in the beginning the organisational attempts to secure the collection of data even from this tunnel failed. All management centres have been connected on Internet to the National traffic information centre (the NTIC) in Ostrava since 2010.

The AZMUT application is used for recording and maintaining data on extraordinary events. In addition, it carries out pre-processing of information about extraordinary events for the tunnel administrator. Data on extraordinary events is recorded in the local network database in the management centres using www forms. The principal chart of the entire functioning system is presented in the picture below.

The database administration is provided by the database management system, which was designed within the framework of the universality of the application by means of the MS SQL database server. The database of extraordinary events itself is located in the data storage facility for all the tunnels being observed. The web server on which the application is located is designed as a part of the internal network of the organisation which administers the entire system. The holding of the data stored in the Data Loss Database is solved by regular automatic data backup in a separate disk space on the NTIC.

In terms of the organisation, the system works in a way where each operator is obligated to log in the system after taking the shift over and registering himself or herself in the electronic form. Operator's duty is to thoroughly fill the questionnaire after sorting out the extraordinary situation, possibly even to write their own opinions and proposals for improvement. The method of filling the questionnaire is a subject of training sessions for operators. The regular registration of events is the responsibility of the tunnel administrator. Reports on extraordinary events are submitted through the road administration office to the

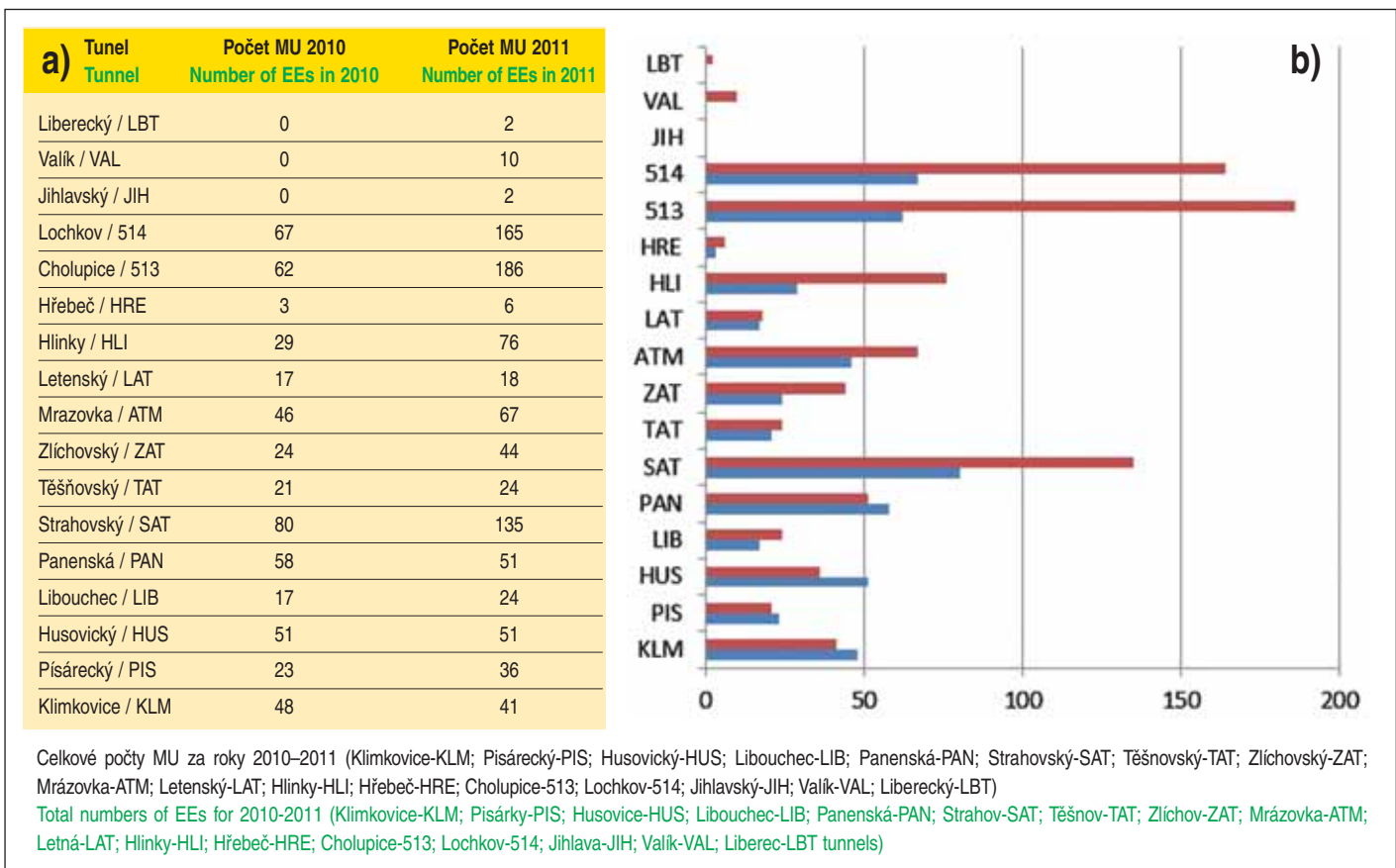


Obr. 3 Princip datového přenosu aplikace AZMUT

Fig. 3 Principle of the AZMUT application data transfer

trénuje v rámci školení dispečerů. Za pravidelné registrování událostí zodpovídá správce tunelu. Cestou silničního správního úřadu jsou zprávy o MU předávány na Ministerstvo dopravy nebo na jím pověřený subjekt, který zpracovává sumární přehled za Českou republiku. Pověřená osoba se účastní plánování, provádění

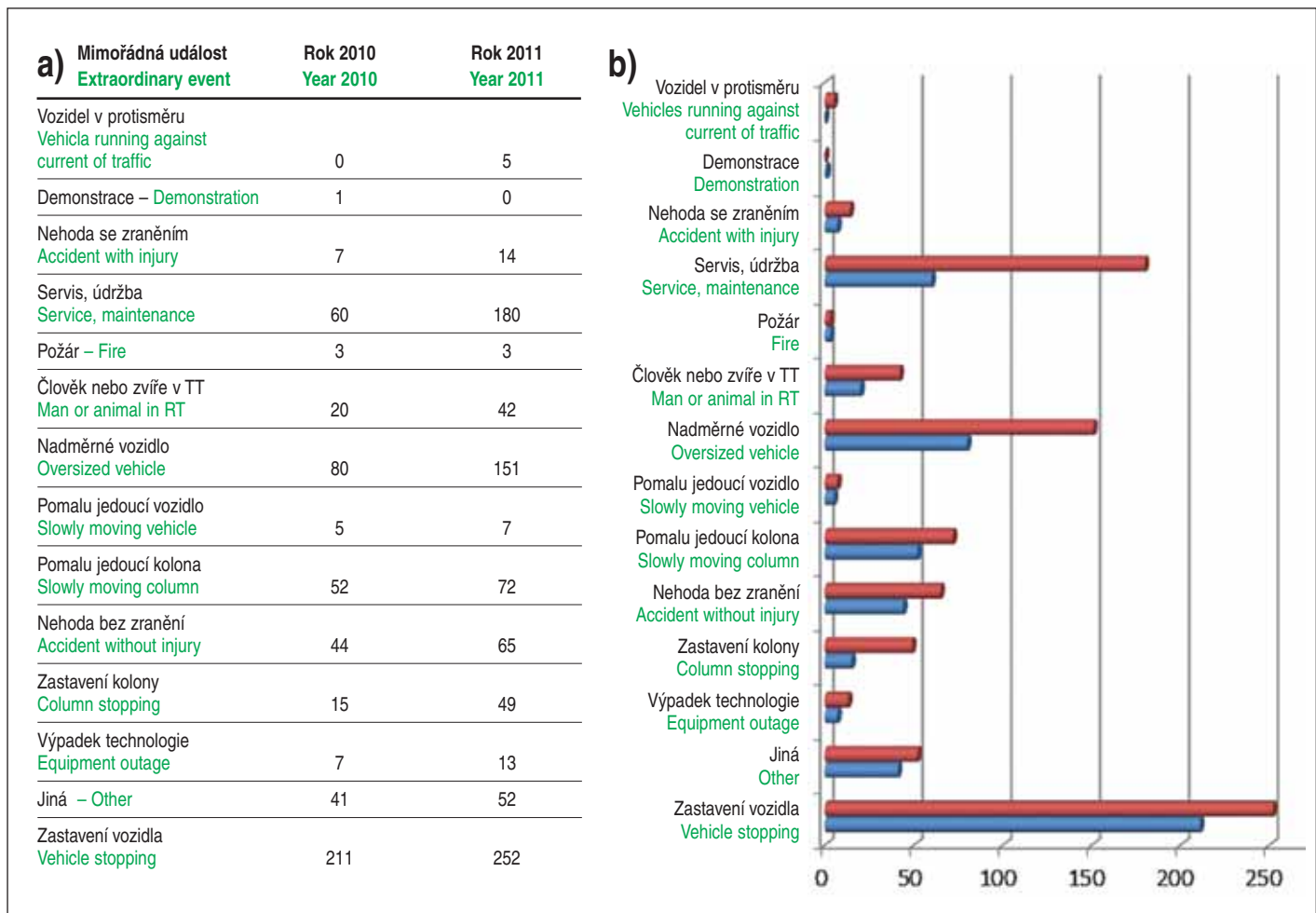
Ministry of Transport or to a subject authorised by the ministry, which compiles a summary for the Czech Republic. The authorised person participates in the planning, execution and assessing of each activities in the cases of extraordinary events and further takes part in the assessment of each extraordinary event.



Obr. 4 a) Přehled MU, b) Graf přehledu MU

Fig. 4 a) EEs summary, b) EEs summary graph





Obr. 5 Počty MU podle kategorií a) Tabulka kategorií MU, b) Graf kategorií MU  
Fig. 5 Numbers of EEs according to categories a) Table of EEs categories, b) EEs categories graph

a vyhodnocování činností v případě mimořádných událostí a dále se účastní hodnocení každé mimořádné události.

Jako příklad výstupu absolutních hodnot četností mimořádných událostí lze uvést údaje za roky 2010 a 2011 zpracované společností Eltodo EG. Tabulka a graf (obr. 4) znázorňuje celkový počet mimořádných událostí (MU). Nejvíce MU je ve Strahovském tunelu, ale v roce 2010 se zhruba po třech měsících provozu dostávají na podobná čísla tunely 513 a 514 na silničním okruhu. V roce 2011 tunely Cholutice a Lochkov již toto pořadí vedou. Specifický charakter těchto MU je vysvětlen dále. Podstatnější nárůst MU v roce 2011 lze zaznamenat v tunelu Zlíchov (+83 %), Mrázovka (+46 %) a Hlinky (+192 %).

Stejně jako v údajích o typech MU, které uvádí PIARC, se nejvíce projevuje zastavení vozidla v tunelu (obr. 5), což je ale událost s velkým krizovým potenciálem. Na rozdíl od PIARC, kde se tvrdí, že v dálničních tunelech zastavují vozidla poměrně méně, to u nás zcela neplatí.

Ukazuje se, že v tunelech pražského okruhu je, na rozdíl od ostatních tunelových staveb, největším původcem vzniku MU vjezd nadměrného vozidla. Je to dáno maximální průjezdnou výškou 4,5 m, která je v porovnání s ostatními tunely relativně nižší, a dále velmi přesným detekčním zařízením, které zachycovalo například i vlající plachtu. V roce 2011 probíhalo zkoumání důvodů častých přerušení provozu z důvodu detekce nadměrného vozidla ověřováním spolehlivosti systému. Došlo k předsunutí čidel ve směru na Plzeň (před tunelem Cholutice). Dále došlo k přidání třetího detektoru do výšky 4 m ke stávajícím detektorům a ke změně detekčního algoritmu. Předpokládá se, že počet takto vzniklých MU bude klesat i s rostoucím podvědomím řidičů o nutnosti dodržování výšky vozidla.

Velmi nebezpečnou MU je jízda v protisměru, která byla v roce 2011 zaznamenána v tunelu Hlinky, Husovickém

As an example of the output of absolute values of extraordinary events frequencies it is possible to present the data for 2010 and 2011 processed by Eltodo EG a. s. The table and graph (see Fig. 4) depict the total number of extraordinary events (EEs). Most EEs happened in the Strahov tunnel, but in 2010, roughly after three months in operation, similar figures are reached in the tunnels of construction lots 513 and 514 of the Prague City Ring Road. In 2011 the Cholutice and Lochkov tunnels already lead this tier. The specific character of these EEs is explained below. A more significant increase in the number of EEs in 2011 can be registered in the Zlíchov tunnel (+83 %), the Mrázovka tunnel (+46 %) and the Hlinky tunnel (+192 %).

Identically with the data on EE types presented by the PIARC, vehicle stopping in a tunnel, which is an event with a big critical potential, is the most apparent. In contrast with the PIARC, where they state that vehicles stop in motorway tunnels relatively less, this situation does not fully apply to the Czech Republic.

It has turned out that the greatest initiator of EEs in tunnels on the Prague City Ring Road is, in contrast with other tunnel structures, the entry of an oversized vehicle. It is the result of the maximum height clearance of 4.5 m, which is relatively lower in comparison with other tunnels, and of the relatively very accurate detection facility, which captured, for example, even a flying tarpaulin. In 2010, the reasons of frequent traffic interruptions due to the detection of an oversized vehicle was examined through verifying the system reliability. The sensors were moved forward in the direction of Plzeň (in front of the Cholutice tunnel). In addition, the third detector was added to the existing detectors to the level of 4.0 m and the detection algorithm was changed. It is assumed that the number of EEs originating for this reason will drop, even with the growing awareness of drivers of the necessity to meet the vehicle height.

A very dangerous extraordinary event is driving against the current of traffic, which was registered in 2011 in the Hlinky, Husovice and Strahov tunnels. A relatively frequent event is that people or animals

a Strahovském tunelu. Poměrně často se v tunelech pohybují lidé či zvířata. Oběma kategoriím těchto událostí se dá zabránit, či se dají významně omezit pomocí technických prostředků.

## ZÁVĚR

V posledních letech se v pravidelných cyklech diskutuje cena vybavení tunelů technologiemi. V článku je ukázáno, že u nás dosud aplikovaný přístup spočívající ve striktním dodržování toho, co je předepsáno standardy, je z hlediska moderního pojetí analýzy rizik již překonáno. Na příkladu je ukázáno, že to může vést i ke zbytečnému navyšování ceny vybavení tunelu. Vhodné je kombinovat tento preskriptivní přístup s některou z metod analýzy rizik.

Vzhledem k tomu, že statistiky událostí v naší republice mají trochu jiný charakter než v sousedních zemích a navíc dosud není dostatek statistických dat, doporučuje autor využívat spíše deterministickou než pravděpodobnostní metodu. I deterministická metoda reprezentovaná analýzou scénářů může být zatížena subjektivním přístupem, a proto je nutné využívat vysoce erudovaných analytiků a výsledky hodnotit i skupinou expertů.

V článku je upozorněno na nutnost zaměřit se na tunelové informační systémy, které umožní zrychlit proces evakuace. Doba evakuace významně ovlivňuje počet zachráněných osob. Zatímco pro identifikaci požáru je zpravidla instalováno několik subsystémů, informování účastníků o krizové události se realizuje nepříliš kvalitním evakuačním rozhlasem. Hodnocení kvality informování všeobecně přijímaným indexem srozumitelnosti bude nutné zpracovat do nové verze technických podmínek TP98.

V rámci projektů vědy a výzkumu OPTUN a SAFETUN byl vyvinut a celostátně implementován internetový systém pro záznam a vyhodnocení mimořádných událostí v tunelech na území České republiky. Výše popsaný systém AZMUT má zásadní přínos pro budoucí kalibraci pravděpodobnostních metod vyžadujících relevantní statistické hodnoty. Zároveň má zásadní význam v tom, že ukazuje správci tunelu, v čem je jeho tunel horší než jiné tunely, a označuje i přímo problém jako třeba jízdu v protisměru, která se vyskytuje jen u určitých tunelů. Bližšímu rozboru mimořádných událostí v našich tunelech bude věnován specifický článek v časopisu Tunel.

**PROF. ING. PAVEL PŘIBYL, CSc., [pribylp@eltodo.cz](mailto:pribylp@eltodo.cz),  
Fakulta dopravní ČVUT – Ústav dopravních systémů,  
ELTODO EG – Společná laboratoř tunelových systémů**

*Recenzoval: prof. Ing. Juraj Spalek, Ph.D.*

move inside a tunnel. Both categories of these events can be prevented or it is possible to significantly restrict them by means of technical means.

## CONCLUSION

In recent years the cost of tunnel equipment has been discussed in regular cycles. It is shown in this paper that the approach which has been applied in the Czech Republic till now, which is based on strict adhering to requirements of standards, has already been overcome from the point of view of the modern concept of the Risk Analysis. It is shown on an example that it can even lead to unnecessary increasing of the tunnel equipment cost. It is recommendable to combine this prescriptive approach with some of the Risk Analysis methods.

With respect to the fact that the character of statistics of events in the Czech Republic is slightly different than that in neighbouring countries and, in addition, the amount of statistical data is not sufficient yet, the author recommends that the deterministic method should be used rather than the probabilistic method. Even the deterministic method which is represented by the Scenario Analysis may be affected by a subjective approach. It is therefore necessary to employ highly erudite analysts and assess the results even by a team of experts.

In the paper, attention is drawn to the necessity to focus on tunnel information systems, which will make the acceleration of the evacuation process possible. The evacuation time significantly influences the number of rescued persons. Whilst several fire identification sub-systems are usually installed in a tunnel, information about a critical situation is passed through a not too good quality evacuation broadcasting system. The assessment of the information system quality by means of the generally accepted intelligibility index will have to be incorporated into the new version of the TP98 technical specifications.

The Internet-based system for recording and assessing of extraordinary events in tunnels in the Czech Republic was developed and nationwide implemented within the framework of the OPTUN and SAFETUN science and development projects. The AZMUT system described above has a fundamental contribution for future calibration of probabilistic methods requiring relevant statistical values. At the same time it has a fundamental importance in its ability to show the tunnel administrator aspects in which its tunnel is worse than other tunnels and even directly defines the problem, for example driving against the current of traffic, which occurs only in the case of certain tunnels. A specific paper in TUNEL journal will be dedicated to a closer analysis of extraordinary events in our tunnels.

**PROF. ING. PAVEL PŘIBYL, CSc., [pribylp@eltodo.cz](mailto:pribylp@eltodo.cz),  
Fakulta dopravní ČVUT – Ústav dopravních systémů,  
ELTODO EG – Společná laboratoř tunelových systémů**

## LITERATURA / REFERENCES

- PŘIBYL, P. *Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací*, Technické podmínky TP98, MDS-OPK, Praha, 1998, 70 s.
- KOHL, B. *Assessing and Improving Safety of Existing Tunnels*. PP prezentace, WG2 Road Tunnel safety, 2009
- PŘIBYL, P. *Tunel Libouchec – posouzení únikových východů*. FD ČVUT, Praha, srpen 2004, 19 s.
- TP154 *Provoz, správa a údržba tunelů pozemních komunikací*, technické podmínky, MDS, Praha, 2004, 124 s., ISBN 80-238-8361-5
- TICHÝ, M. *Ovládání rizika*. Praha: C.H. Beck, 2006, ISBN 80-7179-415-5
- KRAJČÍR, D. *Tramvajový tunel – posouzení rizik*. Eltodo EG, posudek pro BKOM, září 2008, 63 s.
- BÍNA, L. *Posouzení variant železničního spojení Praha – letiště Ruzyň – Kladno*. 3. ročník mezinárodní konference EMTECH 2008, 13. 5. 2008, ČVUT v Praze
- PŘIBYL, P. *Bezpečnost v tunelech pozemních komunikací*. TP226, MD-OSI, Eltodo EG, Praha, 2010, s. 87. ISBN 978-80-254-7953-7
- TuRisMo. *Austrian Tunnel Risk Analysis*. RVS09.03.11, FSV, Vídeň, 2006
- ZULAU, Ch. at al. *Evaluation of the safety of road tunnels. Final Report*, November, 2007, pp. 55
- ŠTEFANAČEK, J. *Komparativní analýza určování vzniku početnosti nehod*. Eltodo EG, Žilinská univerzita, Výzkumná zpráva, leden 2010
- PŘIBYL, P., JANOTA, A., SPALEK, J. *Analýza a řízení rizik v dopravě – Tunely na pozemních komunikacích a železnici*. Praha: BEN, 2008, 527 s. ISBN 978-80-7300-214-5, s. 527
- ZET *Výzkum evakuačních možností tunelu*. VZ 333, EEG, Praha, 2011, Projekt TA01030020, 29 s.



# VYHODNOCENÍ TELEMATICKÝCH SYSTÉMŮ

## ASSESSMENT OF TELEMATIC SYSTEMS

DUŠAN KRAJČÍR, MARTIN KŇÁKAL

### VYHODNOCENÍ ZKUŠEBNÍHO PROVOZU SILNIČNÍHO OKRUHU KOLEM PRAHY

Silniční okruh kolem Prahy (obr. 1) byl uveden do provozu dne 20. 9. 2010 v režimu zkušebního provozu. Během režimu zkušebního provozu je mimo jiné potřeba vyhodnotit data získaná během tohoto období. Skupina ELTODO pro objednatele RSD ČR zajišťuje zpracování technologických, dopravních a dalších dat z telematických systémů získaných během zkušebního provozu. Vyhodnocení těchto dat je jednou z náležitostí nutných pro ukončení zkušebního provozu a plynulého přejití na normální provoz této unikátní stavby.

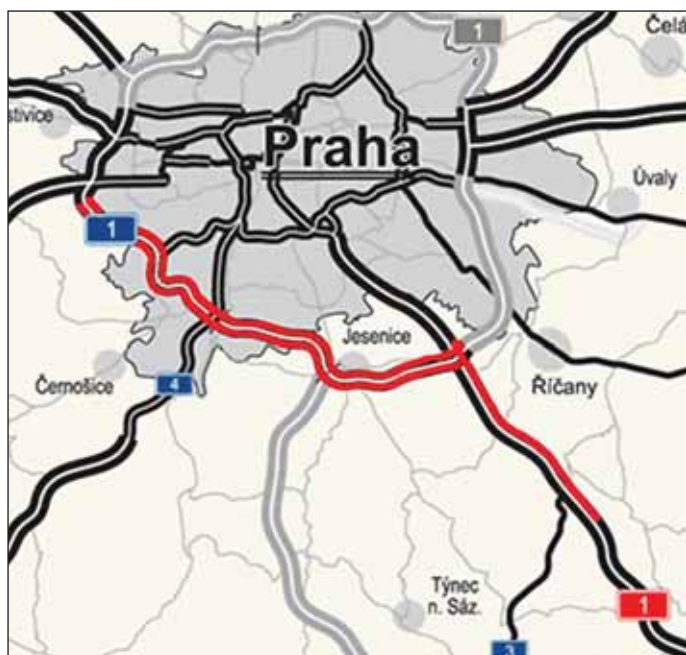
V rámci přípravy podkladů pro vyhodnocení společnost Eltodo využívá obecných zkušeností s telematickými systémy a zejména skutečnosti, že byla hlavním dodavatelem telematických zařízení a systémů instalovaných na silničním okruhu kolem Prahy.

V rámci tohoto vyhodnocení byla zpracována data za rok 2011 a za prvních 7 měsíců roku 2012. Konec roku 2010 byl z vyhodnocení logovaných dat vypuštěn vzhledem k postupnému zprovoznování všech funkcionalit systému (od září 2010). Pasporty OD (operátorů dopravy) a hlášenky DT (dispečerů technologie) jsou zpracovány za celé období zkušebního provozu.

### VYHODNOCENÍ ZKUŠEBNÍHO PROVOZU TELEMATICKÝCH SYSTÉMŮ NA VOLNÉ TRASE

V rámci zpracování podkladu pro vyhodnocení telematických systémů a zařízení na volné komunikaci SOKP byla analyzována veškerá sbíraná a dostupná data. Na základě této analýzy byla data roztržena na data podstatná k vyhodnocení a data bez větší důležitosti pro vyhodnocení zkušebního provozu. Mezi data vybraná pro hodnocení patří:

- Technologická data telematických zařízení na volné trase SOKP
- Dopravní data
- Záznamy činnosti operátorů dopravy



Obr. 1 Schéma silničního okruhu kolem Prahy  
Fig. 1 Prague City Ring Road alignment

### ASSESSMENT OF THE TRIAL OPERATION OF THE PRAGUE CITY RING ROAD

The Prague City Ring Road (outer ring) (see Fig. 1) was inaugurated on 20th September 2010 in the trial operation regime. During the trial operation regime it is necessary, among other tasks, to assess the data obtained during this period. ELTODO Group provides the processing of technological, traffic-related and other data from telematic systems, which was gathered during the trial operation. The assessment of the data is one of the conditions which are requisite for the termination of the trial operation and fluent transition to the normal operation of this unique project.

ELTODO uses general experience with telematic systems in the framework of the preparation of source documents for the assessment, first of all the fact that it was the main contractor for telematic facilities and systems installed on the Prague City Ring Road (PCRR).

The data for 2012 and initial 7 months of 2012 was processed within the framework of this assessment. The end of 2010 was left out of the assessment of the logged data taking into consideration the gradual putting of all functionalities of the system into service (from September 2010). Although, passports of traffic operators (TO) and reports of technology controllers (TC) have been processed for the entire trial operation period.

### ASSESSMENT OF THE TRIAL OPERATION OF TELEMATIC SYSTEMS ON OPEN SURFACE ALIGNMENT

All data being collected which was available was processed within the framework of the assessment of telematic systems and facilities on the open surface alignment of the PCRR was analysed. The data was categorised on the basis of this analysis to data substantial for the assessment and data without greater importance for the assessment of the trial operation. The following types of data belong among the data selected for the assessment:

- Technological data of telematic facilities on the open surface alignment of the PCRR
- Traffic data
- Records of the activities of traffic operators

The data on modifications of the system, completed analyses and verifications of the functionality of the system and its components and passports of events recorded by traffic operators was defined for the above groups (types) as substantial source documents.

Processing procedures were defined for the individual groups of data and source documents, which will make the simple orientation and assessment of the data and source documents possible. Requirements for the outputs were defined and these outputs were prepared, namely:

1. The function of telematic facilities
2. Technological data
3. Traffic data
4. Operational safety
5. OD passports
6. TC records
7. Project modifications

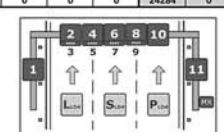
Simplifying summaries making easy orientation in historic data possible were carried out within the framework of the assessment of the Function of telematic facilities (see Fig. 2).

In these summaries there are records of the number of errors of each facility categorised according to individual LTC (Linear Traffic Control) cross-sections on the PCRR. Individual facilities, numbers of defects reported by them and the total time of the duration of these

D1 Km 18,110 vlevo		Leden		Únor		Březen		Duben		Květen		Červen		Červenec		Srpen		Září		Říjen		Listopad		Prosinec		Rok 2012			
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
PDZ	D01-D-B20axx00181	14984	0:00:08	3436	4	4	7	5	5	2	1:08:43	1:08:43	16:56:16														18443	76:23:29	
	D01-D-KZ1xxx00181	7		1	4	4	7	5	5	2	4:30:33	1:08:42	16:56:16														31	76:23:27	
	D01-D-E5xxx00181	31:50:15	0:00:08	1	4	4	15	30	35	44	4:46:36	1:19:26	17:16:59														136	77:12:39	
	D01-D-KZ2xxx60181	7		1	4	4	7	5	5	2	4:30:34	1:08:43	16:56:16														31	76:26:36	
	D01-D-E3aE4x60181	31:50:15	0:00:08	1	4	4	20:00:58	4:30:34	1:08:43	16:56:16																		37	76:23:55
	D01-D-KZ5xxx60181	7		1	4	4	7	5	5	2	4:30:33	1:08:42	16:56:16														32	76:23:46	
	D01-D-E5xxx60181	31:50:15	0:00:08	1	4	4	2:00:01	4:30:34	1:08:42	16:56:16																		50	76:26:39
	D01-D-KZ2xxx40181	7		1	4	4	7	5	5	2	4:30:37	1:10:48	16:57:09															31	76:24:43
	D01-D-E3aE4x40181	31:50:15	0:00:08	2	4	4	19:59:05	4:30:34	1:08:43	16:56:16																		99	76:46:35
	D01-D-B2658c40181	7		0:00:12	1	4	4	19:57:50	4:39:35	1:12:57	17:06:04																	31	76:23:26
	D01-D-B20axx20181	31:50:15	0:00:08	1	4	4	1:59:42	4:30:33	1:08:42	16:56:16																			5334
LD4	D01-S-LD00181																												
	D01-S-LD60181																												
	D01-S-LD40181																												
MX	X MX20181	7		2	2	6	6	6	3	3																		29	57:47:17
		31:50:15	0:00:08	0:02:00	19:48:12	4:30:39	0:01:15	1:34:48																					
Celkový počet chyb za období:		15061	0	6610	0	2191	0	95	0	120	0	113	0	94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24284	0

Chyba A – Error A      chyba komunikace se zařízením – error in communication with a facility  
 výpadek komunikace – communication outage

Chyba B – Error B      neplnění povelu – failure to keep order  
 podpětí napájecího zdroje – nebezpečí výpadku – under-voltage of the power-supply unit

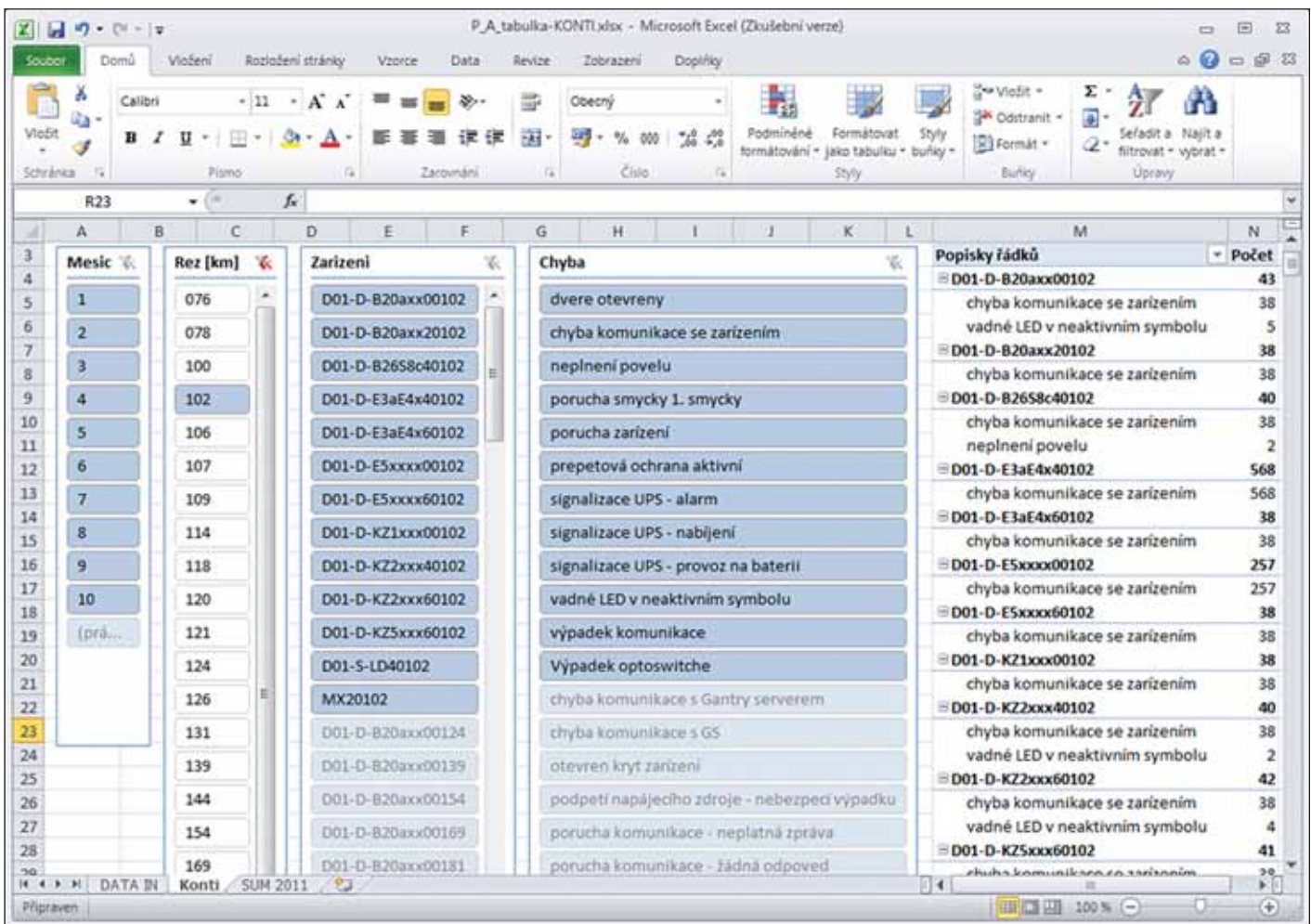


Obr. 2 Tabulky vyhodnocení činnosti telematických zařízení  
 Fig. 2 Tables with the assessment of the function of telematic facilities

K těmto skupinám automaticky sbíraných dat byly definovány jako podstatné podklady o úpravách systému, provedených analýzách a ověřeních funkčnosti systému a jeho součástí, pasporty údajů zapsané operátory dopravy.

Pro jednotlivé skupiny dat a podkladů byly definovány způsoby zpracování, které poskytnou jednoduchou možnost orientace

states are assessed on the monthly basis. Columns A contain errors in communication with the facility and communication outages; columns B contain failures to obey commands and under-voltage of the power-supply unit. Individual facilities are identified by unique codes according to the PPK – ZAR, the Requirements for the system of marking of operational units and electric facilities on motorways, roads with limited access, in tunnels and other structures under the administration of the Road and Motorway Directorate of the CR.



Mesíc	Rez [km]	Zarizení	Chyba	Popisky řádků	Počet
1	076	D01-D-B20axx00102	dvere otevreny	D01-D-B20axx00102	43
2	078	D01-D-B20axx20102	chyba komunikace se zarizenim	chyba komunikace se zarizenim	38
3	100	D01-D-B2658c40102	neplneni povelu	D01-D-B20axx20102	38
4	102	D01-D-E3aE4x40102	porucha smycky 1. smycky	chyba komunikace se zarizenim	38
5	106	D01-D-E3aE4x60102	porucha zarizeni	D01-D-B2658c40102	40
6	107	D01-D-E5xxx00102	prepetova ochrana aktivni	chyba komunikace se zarizenim	38
7	109	D01-D-E5xxx60102	signalizace UPS - alarm	neplneni povelu	2
8	114	D01-D-KZ1xxx00102	signalizace UPS - nabijeni	D01-D-E3aE4x60102	568
9	118	D01-D-KZ2xxx40102	signalizace UPS - provoz na baterii	chyba komunikace se zarizenim	38
10	120	D01-D-KZ2xxx60102	vadné LED v neaktivním symbolu	D01-D-E5xxx00102	257
	121	D01-D-KZ5xxx60102	výpadek komunikace	chyba komunikace se zarizenim	38
	124	D01-S-LD40102	Výpadek optoswitche	D01-D-KZ1xxx00102	38
	126	MX20102	chyba komunikace s Gantry serverem	chyba komunikace se zarizenim	38
	131	D01-D-B20axx00124	chyba komunikace s GS	D01-D-KZ2xxx40102	40
	139	D01-D-B20axx00139	otevren kryt zarizeni	chyba komunikace se zarizenim	38
	144	D01-D-B20axx00154	podpeti napajeciho zdroje - nebezpeci vypadku	vadné LED v neaktivním symbolu	2
	154	D01-D-B20axx00169	porucha komunikace - neplatná zpráva	D01-D-KZ2xxx60102	42
	169	D01-D-B20axx00181	porucha komunikace - žádná odpověď	chyba komunikace se zarizenim	38
				vadné LED v neaktivním symbolu	4
				D01-D-KZ5xxx60102	41

Obr. 3 Kontingenční tabulka zpracovaná nad technologickými daty jednotlivých zařízení  
 Fig. 3 Contingency table compiled from technological data of individual facilities



a zhodnocení daných dat a podkladů. Byly definovány požadavky na výstupy a tyto výstupy zpracovány. Jedná se o:

1. Činnost telematických zařízení
2. Technologická data
3. Dopravní data
4. Bezpečnost provozu
5. Pasporty OD
6. Hlášenky DT
7. Úpravy projektu

V rámci vyhodnocení činnosti telematických zařízení byly zpracovány zjednodušující přehledy, které umožňují snadnou orientaci v historických datech (obr. 2).

V těchto přehledech je zaznamenán počet chyb každého zařízení podle jednotlivých řezů LRD na SOKP. Po měsících jsou vyhodnoceny jednotlivá zařízení, počet jimi hlášených poruch a celkový čas trvání těchto stavů. Sloupce A zahrnují chyby komunikace se zařízeními a výpadky komunikace, sloupce B neplnění povelu a podpětí napájecího zdroje. Jednotlivá zařízení jsou identifikována unikátními kódy podle PPK – ZAR, požadavků na systém značení provozních celků a elektrických zařízení na dálnicích, rychlostních silnicích, tunelech a jiných objektech ve správě ŘSD ČR. Pod těmito unikátními kódy jsou zařízení tříděna v systému a pro zachování jednoduché orientace veškerá vyhodnocení s těmito kódy pracují. Kódy přesně specifikují lokaci zařízení, jeho typ i umístění v rámci portálu, ale pro přehlednost je ještě ke každé tabulce doplněn schematický náhled na daný řez (na obrázku 2 vpravo dole).

Dále byla obecně vyhodnocována veškerá sbíraná technologická data. Tato data jsou zpracovávána pomocí kontingenčních tabulek v SW MS Excel. Uživatel má možnost několika jednoduchými kroky najít libovolné konkrétní zařízení a z celého objemu dat získat informace systému o provozu právě tohoto zařízení. Příklad takovéto kontingenční tabulky je uveden na obr. 3.

V těchto kontingenčních tabulkách jsou také uvedeny všechny záznamy v přesné podobě bez jakéhokoli zjednodušení v rámci agregace nebo přehlednosti, takže uživatel má přesný náhled na

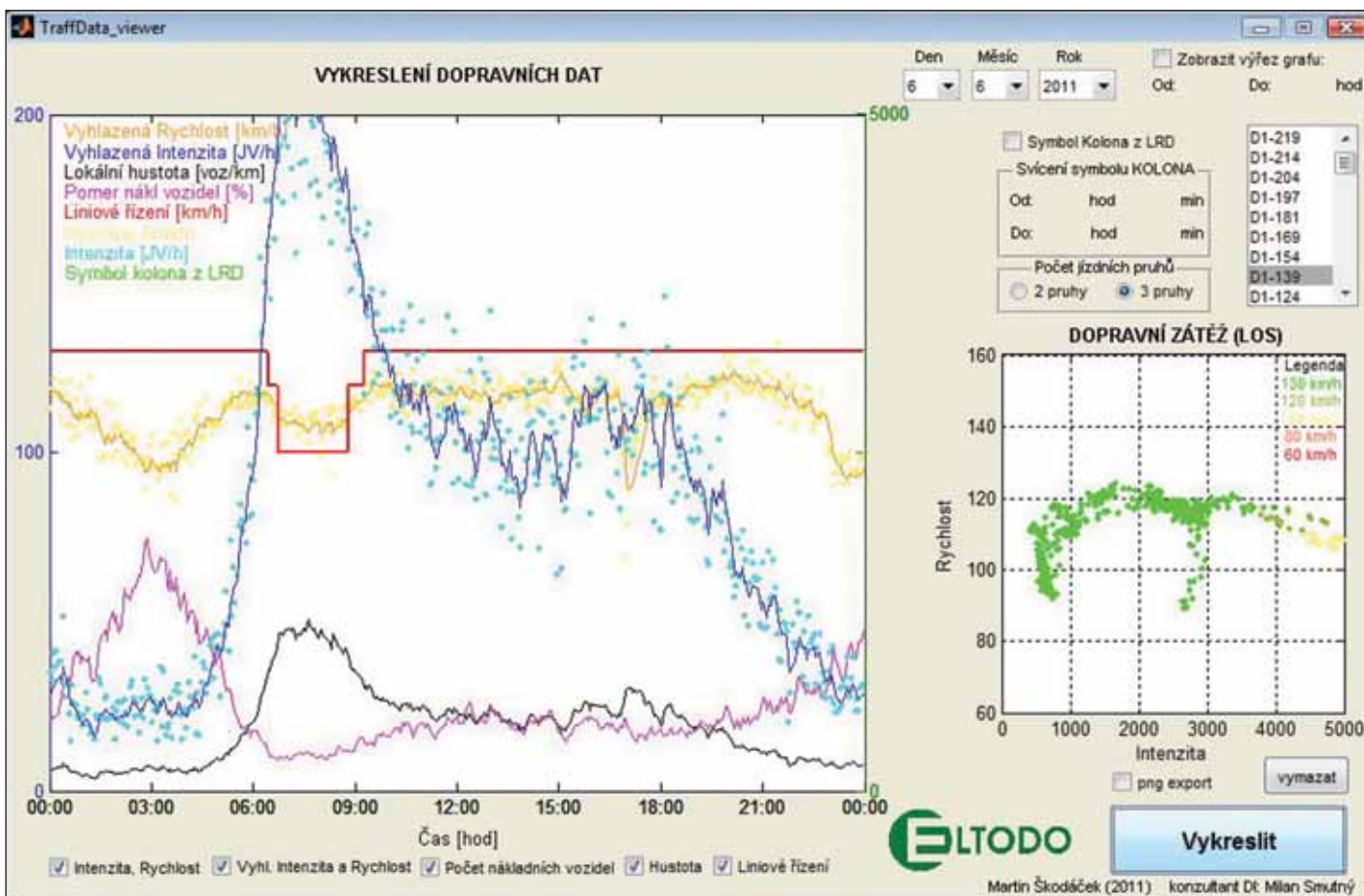
Under these unique codes, the facilities are categorised within the system and all assessments work with these codes so that simple orientation is maintained. The codes accurately specify the location of the facility, its type and position within the framework of the portal, but for the purpose of lucidity, a schematic preview of the particular cross-section is added to each table (at the bottom right of the picture 2).

In addition, all collected technological data was being generally assessed. This data is processed by means of contingency tables in the SW MS Excel. It is possible for the user to find by several simple steps an arbitrary concrete facility and obtain system information from the entire volume of data on the operation just of the particular facility. An example of such a contingency table is presented in Fig. 3.

These contingency tables even contain all records in exact forms, without and simplification within the framework of aggregation or lucidity, therefore the user has an exact view of the technological data available down to the level of the logging of individual states available, for example defective LEDs in the non-active symbol of the VTS (Variable Traffic Sign).

Traffic data from the open surface alignment was processed in the next part. Traffic data was collected from all detection cross-sections of the Linear Traffic Control system and was processed using the Matlab SW tool. A unique browser was developed using this tool, which depicts particular selected days for selected categories of data on the basis of well-founded traffic data. It is therefore possible to search out any arbitrary day of the trial operation and depict the traffic data of this day (see Fig. 4).

The traffic data browser does not extract data only from the database of detectors, but also from the Linear Traffic Control (LTC) system. For that reason it is capable of depicting the response of the LTC system to a particular situation in the traffic data (speed limit reduction depicted by a red curve). Apart from this browser, general summaries for typical daily, weekly and yearly variations of traffic on the open surface alignment of the PCRR were prepared. An example of the graphic depiction of a daily variation for a common working day is described in Fig. 5.



Obr. 4 Náhled okna DATAviewer

Fig. 4 Preview of the DATA viewer window

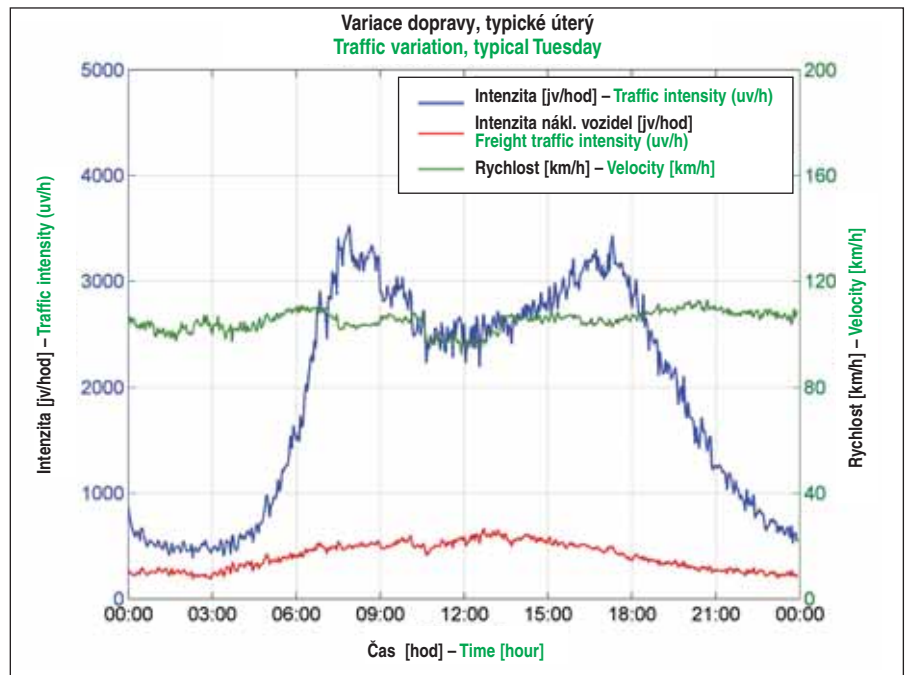
technologická data do úrovně logování jednotlivých stavů, například vadných LED v neaktivním symbolu PDZ.

V další části byla zpracována dopravní data z volné trasy. Byla posbírána dopravní data ze všech detekčních řezů systému liniového řízení dopravy a zpracována pomocí SW nástroje Matlab. Na tomto nástroji byl vytvořen unikátní prohlížeč, který z podložených dopravních dat vykresluje jednotlivé zvolené dny pro vybrané kategorie dat. Je tedy možno dohledat libovolný den zkušebního provozu a zobrazit dopravní data tohoto dne (obr. 4).

Prohlížeč dopravních dat nevytahuje data jenom z databáze detektorů, ale také ze systému liniového řízení dopravy. Proto dokáže do dopravních dat vykreslit reakci systému LŘD na příslušnou situaci (omezení povolené rychlosti zobrazené červenou křivkou). Kromě tohoto prohlížeče byly připraveny obecné přehledy pro typické denní, týdenní a roční variace dopravy na volné trase SOKP. Příklad grafického zobrazení denní variace pro běžný pracovní den je popsán na obr. 5.

V dalších podstatných podkladech pro ukončení zkušebního provozu jsou zařazeny veškeré analýzy a studie prováděné nad systémem od jeho uvedení do provozu. Jedná se například o analýzu funkce automatické detekce kolon, analýzu funkčnosti harmonizace provozu, prostorového i časového vyhlazování posloupnosti dopravního značení a další studie a testy, jejichž cílem bylo mapovat a prokázat funkčnost telematického systému na SOKP jako celku.

K rozšíření náhledu na průběh zkušebního provozu ve velké míře přispívá také zpracování statistik ohledně pasportů zapsaných operátory dopravy a statistik hlášenek zapsaných dispečery technologie. Veškeré záznamy byly rozříděny podle obsahu do několika

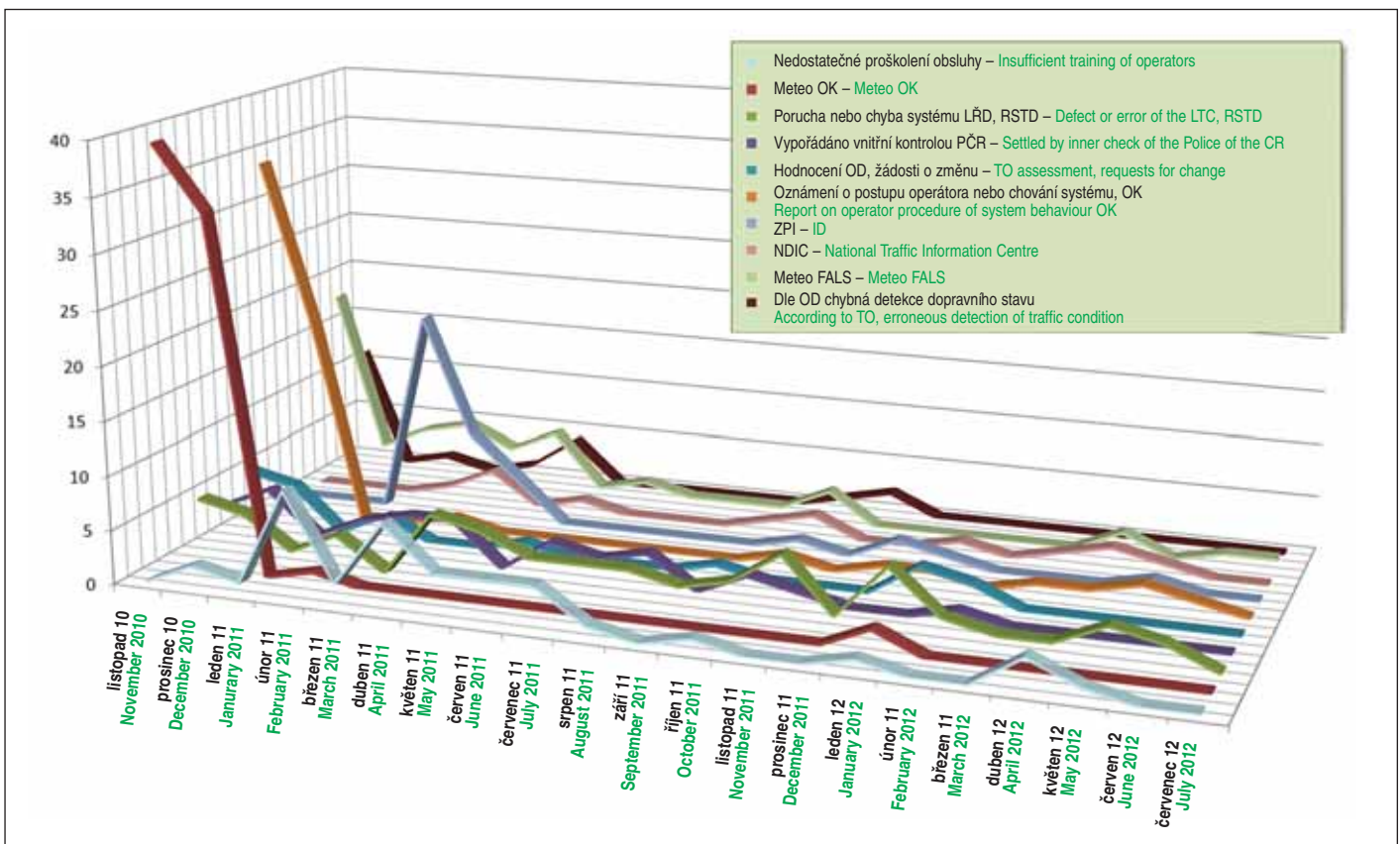


Obr. 5 Typická úterní variace dopravy na SOKP km 18,2 vpravo

Fig. 5 Typical Tuesday's variation of traffic on the PCRR at chainage km 18.2, on the right-hand side

Other source documents substantial for the termination of the trial operation comprise all analyses and studies conducted on the system from its bringing into service. Among them there are, for example, an analysis of the function of automatic detection of queues, an analysis of the functionality of traffic harmonisation, spatial and time-related smoothing of the sequence of traffic signs and other studies and tests the objective of which was to map the telematic system on the PCRR and prove its functionality as a whole.

The elaboration of statistics regarding passports recorded by traffic



Obr. 6 Graf kategorizovaných pasportů zapsaných operátory dopravy  
Fig. 6 Graph of categorised passports recorded by traffic operators





Obr. 7 Technologické vybavení tunelu  
Fig. 7 Tunnel equipment

kategorií a byly vytvořeny přehledné grafy vyjadřující počty záznamů v kategoriích v čase (obr. 6).

Na grafu je snadno pozorovatelný vývoj počtu pasportů, kdy na začátku zkušebního provozu měli OD zapisovat veškeré události (i pozitivní), například správnou detekci meteosituace. Jsou ale také viditelné klesající tendence počtu pasportů odkazujících na nedostatky systému. Přehledový graf na obrázku byl dále členěn pro jednotlivé kategorie, například pro kategorii ZPI byl vytvořen samostatný graf založený na pozitivních, negativních a informativních pasportech, atd.

V neposlední řadě byla do podkladů vyhodnocení zkušebního provozu pro telematická zařízení na volné komunikaci zařazena pasportizace změn a úprav systému provedených během zkušebního provozu jako například parametrické úpravy hranic harmonizace nebo změna reakce dopravního značení na detekované stavy.

## VYHODNOCENÍ ZP TELEMATICKÝCH SYSTÉMŮ V TUNELECH

V rámci vyhodnocení zkušebního provozu telematických zařízení v tunelových stavbách bylo postupováno analogicky jako na otevřené komunikaci. Byla vyhodnocena činnost telematických zařízení a byla vyhodnocena technologická data. Rozdíly byly v tom, že v rámci vyhodnocení činnosti telematických zařízení a zpracování technologických dat v tunelových stavbách byla do tohoto zpracování zahrnuta nejen data PDZ či jiných telematických zařízení, ale i z dalších zařízení jako například akomodačního a průjezdového osvětlení nebo vzduchotechniky (obr. 7).

V rámci vyhodnocování záznamů obsluhy byly vyhodnocovány pouze hlášenky dispečerů technologie (pasporty operátorů dopravy jsou ve vazbě na systém LŘD).

## ZÁVĚR

Na základě zpracovaných podkladů a shrnutí bude v rámci ŘSD vypracována zpráva hodnotící zkušební provoz telematických zařízení SOKP. Zpracované podklady vykazují známky odladění systému od uvedení do provozu k 7. měsíci roku 2012. Jak z pohledu systému liniového řízení dopravy, jehož pilotní aplikace v podmínkách ČR vyžadovala parametrické nastavení na lokální specifické podmínky, tak i z pohledu telematických zařízení a vnitřních procesů systému, které byly odladěny k finální funkčnosti v normálním provozu.

ING. DUŠAN KRAJČÍR, DiS., krajcird@eltodo.cz,  
ING. MARTIN KŇÁKAL, knakalm@eltodo.cz,  
ELTODO EG, a. s.

Recenzoval: Ing. Petr Bednář

operators and statistics of reports recorded by technology controllers also greatly contributes to the insight into the course of the trial operation. All records were divided according to their content into several categories and lucid graphs expressing the numbers of records in the categories changing with time (see Fig. 6).

It is easy to follow the development of the number of passports, where in the beginning traffic operators were required to record all events (even the positive ones), for example the correct detection of meteorological situation. Although, a decreasing tendency of the number of passports referring to drawbacks of the system is also noticeable. The communication graph in the picture was further articulated for individual categories, for example a separate graph based on positive, negative and informative passports was created for traffic advisory information (TAI) category, etc.

At last but not least, the passportisation of changes and system modifications carried out during the trial operation, such as for example parametric changes in the harmonisation limits or a change in the response of traffic signs to the detected states, were incorporated among the documents of the assessment of the trial operation for telematic facilities on an open surface alignment.

## ASSESSMENT OF THE TRIAL OPERATION OF TELEMATIC SYSTEMS INSIDE TUNNELS

The procedure used for the assessment of the trial operation of telematic facilities inside tunnel structures was analogical to the procedure for open surface roads. The work of telematic facilities was assessed and telematic data was assessed. Differences lied in the fact that not only the data on VTS or other telematic facilities were incorporated into this processing within the framework of the work of telematic facilities and processing of technological data inside tunnels, but also data from other facilities, such as, for example, the accommodation lighting, interior lighting or ventilation (see Fig. 7).

Only the reports of technology controllers were assessed within the framework of the assessing of records carried out by service personnel (passports carried out by traffic operators are related to the LTC system).

## CONCLUSION

A report assessing the trial operation of telematic facilities on the PCRR will be compiled within the framework of the Road and Motorway Directorate of the CR on the basis of the prepared source documents and summaries. The prepared source documents exhibit signs of the system debugging since the system putting into service in July 2012, both in terms of the linear traffic control, the pilot application of which in the conditions of the CR required parametric setting to specific local conditions, and in terms of telematic facilities and internal processes of the system, which were debugged for final functionality during normal operation.

ING. DUŠAN KRAJČÍR, DiS., krajcird@eltodo.cz,  
ING. MARTIN KŇÁKAL, knakalm@eltodo.cz,  
ELTODO EG, a. s.

## LITERATURA / REFERENCES

- Příbyl, P., Krajčír, D., Příkryl, J. *Metodika zvýšení propustnosti dálnic*. ELTODO EG, a. s., 2011, 38 s.  
Příbyl, P., Smutný, M., Krajčír, D. *Výzkumná zpráva projektu SATEL č. 2A-ITPI/023*. ELTODO EG, a. s., 2011, 89 s.  
Příbyl, P., Krajčír, D., Kňákal, M. *Metodický pokyn Liniové řízení dopravy a identifikace excesů*. ELTODO EG, a. s., 2010, 94 s.

# ŘÍDICÍ SYSTÉM TUNELU BLANKA A PROJEKT DOPRAVNÍHO ZNAČENÍ

## BLANKA TUNNEL MANAGEMENT SYSTEM AND DESIGN FOR TRAFFIC SIGNS

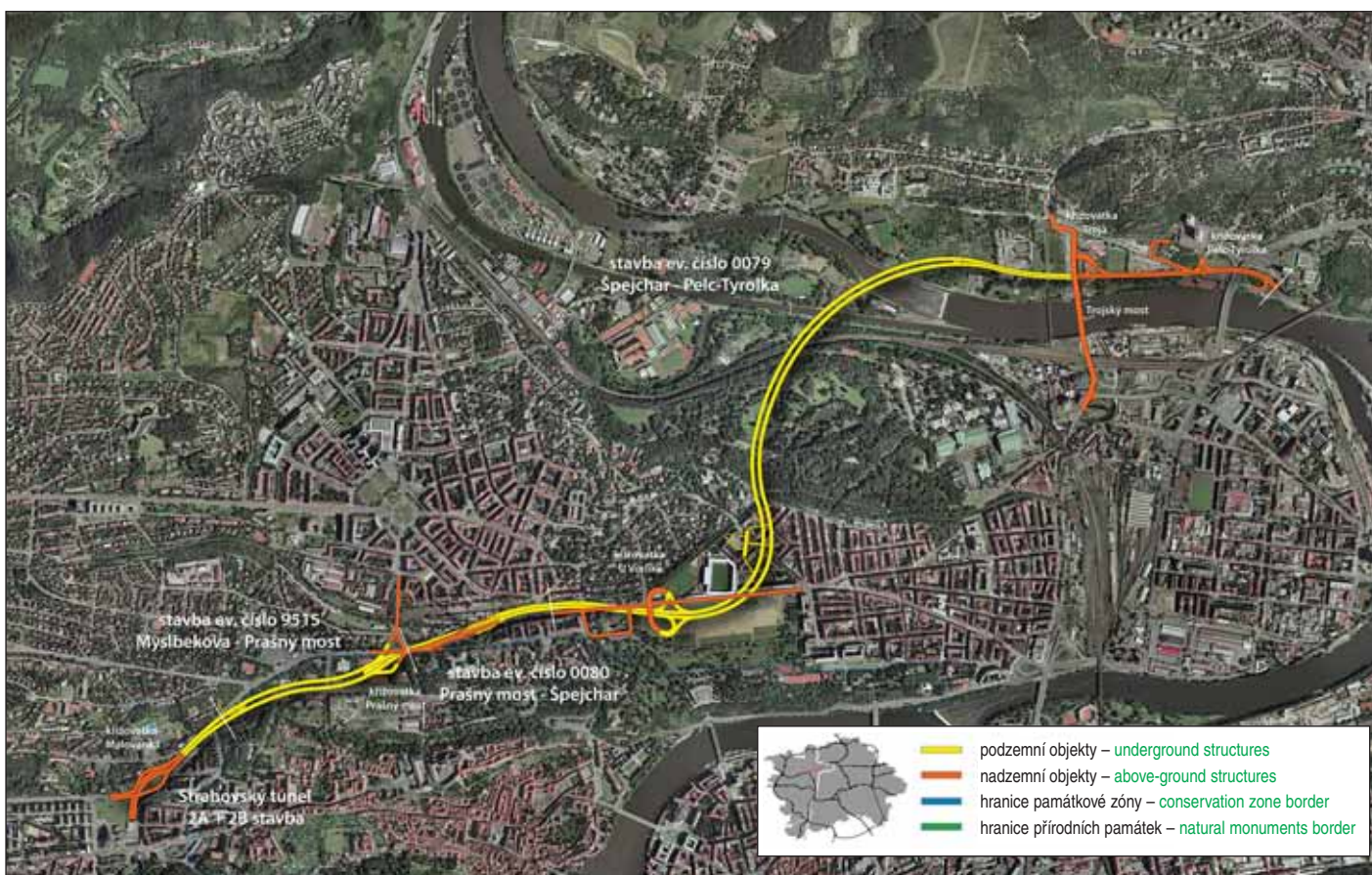
MARTIN KŇÁKAL, DUŠAN KRAJČÍR, JIŘÍ ŠTEFAN

Mezi aktuálně nejnámější silniční tunelové stavby patří tunelový komplex Blanka realizovaný v rámci severozápadní části pražského vnitřního okruhu (obr. 1). Tato tunelová stavba obsahuje velké množství technologie – osvětlení, rozsáhlou vzduchotechniku, systémy řízení dopravy, kamerový dohled s detekcí nestandardních situací, systémy radiového spojení i SOS skříně pro pomoc řidičům při nepředvídaných událostech. Koordinaci všech systémů na této rozsáhlé stavbě zajišťuje řídicí systém. Generálním projektantem tunelu Blanka je společnost SATRA, spol. s r. o., projektantem i zhotovitelem řídicího systému je skupina ELTODO.

Z výše uvedeného vyplývá, že pod zemí je, kromě železa a betonu, ukryto i značné množství technického vybavení. Pravidelně se objevují názory, že by se tato oblast dala realizovat jednodušeji a s menšími náklady. Ale průjezd tunelem už ve své podstatě znamená pro řidiče větší ohrožení než cesta po otevřené komunikaci. Možnost úniku osob v tunelu je při mimořádné situaci značně ztížena proti možnostem na volné komunikaci. V případě požáru je zvýšené ohrožení sálavým teplem či jedovatými zplodinami hoření, přičemž přístup složek integrovaného záchranného systému na místo zásahu je složitější než na volné komunikaci.

The Blanka complex of tunnels, which is being developed within the framework of the north-western section of the City Circle Road (inner circle) in Prague (see Fig. 1) belongs among currently the best known road tunnel construction projects. This tunnel structure contains lots of equipment – lighting, extensive ventilation, traffic management systems, camera surveillance with the detection of non-standard situations, wireless communication systems and SOS boxes helping drivers during unexpected events. The coordination of all systems on this extensive construction project is provided by the management system. The general designer for the Blanka tunnel is SATRA, spol. s r. o., the designer and contractor for the management system is ELTODO Group.

It follows from the text above that under the ground surface, there is even a significant amount of equipment apart from steel and concrete. Opinions regularly appear that this area could be realised in a simpler way, with lower costs. But the passage through the tunnel itself in its substance means more serious threatening of the driver than driving along an open surface road. The possibility for people to escape from the tunnel is made significantly more difficult during an extraordinary event compared with the possibilities on an open surface road. In the



Obr. 1 Schéma tunelového komplexu Blanka (zdroj: [www.tunelblanka.cz](http://www.tunelblanka.cz))

Fig. 1 Layout of the Blanka complex of tunnels (source: [www.tunelblanka.cz](http://www.tunelblanka.cz))



Je přinejmenším morální povinností toho, kdo stanovuje pravidla provozu, aby zajistil uživatelům komunikace v těchto problematických úsecích srovnatelnou úroveň bezpečnosti jako na volné komunikaci, nebo se k této úrovni alespoň blížil.

Proměnné dopravní značení umožní maximální kapacitní využití komunikace a při mimořádném stavu bude účastníky provozu včas varovat. V případě požáru systém požárního větrání odvede kouř ztěžující orientaci i s jedovatými zplodinami mimo stavbu, tak aby umožnil bezpečnou evakuaci osob. Uvedené předpokládá, že všechny technické systémy stavby, koordinované pomocí řídicího systému, budou pracovat způsobem, že v souhrnu přispějí k plynulému průjezdu vozidel, včasným vyhodnocením dat předejdou vzniku řady mimořádných událostí a pokud tyto události přece jen vzniknou, tak jejich následky budou značně mírnější.

Řídicí systém tunelové stavby je projekčně i realizačně zajišťován skupinou ELTODO. Rozsahu stavby odpovídá i složitost řídicího systému. Databáze fyzických vstupů do systému má přes 24 000 položek, fyzických výstupů je přes 13 000. Pro srovnání, zatím nejsložitější do provozu uváděný tunel Mrázovka (ATM) obsahuje okolo 8000 binárních vstupů. Dále se oproti předchozím tunelovým stavbám značně zvýšil počet zařízení, která si vyměňují informace po sběrnících vyšší úrovně (sériových komunikacích). Pro správu takto rozsáhlé databáze je použita vlastní aplikace skupiny ELTODO, realizovaná na databázovém systému Microsoft Access a obsahující řadu mechanismů pro automatizovanou kontrolu vkládaných údajů.

## ARCHITEKTURA SYSTÉMU

Řídicí systém je pro zachování potřebné bezpečnosti a odolnosti proti poruchám navržen jako plně redundantní na všech úrovních. Veškeré hardwarové součásti řídicího systému i jejich propojení jsou zdvojeny. Na úrovni programovatelných automatů PLC je systém navržen na platformě SIMATIC S7-400 firmy SIEMENS s využitím průmyslové sběrnice PROFIBUS DP na optické a metalické fyzické vrstvě. Na vizualizační úrovni je systém navržen na platformě PROFICY CIMPLICITY firmy GE FANUC určené pro operační systémy Microsoft Windows. Jako archivační systém je použit MICROSOFT SQL SERVER. Systém je dále doplněn redundantními servery pro řízení provozního větrání, videodohledu a informačního systému ZPI. Jako převodníky průmyslových sběrnic jsou použity moduly ANYBUS Communicator firmy HMS. Systém je doplněn průmyslovými PC s aplikačním softwarem určeným pro komunikaci se systémy třetích stran připojených po sběrnících vyšší úrovně (sériové linky, Ethernet, průmyslové sběrnice).

## SYSTÉM ŘÍZENÍ

Tunelový komplex Blanka nestojí samostatně na tzv. zelené louce, ale bezprostředně navazuje na linii tunelových staveb Zlíčovská radiála (ZLRA), automobilový tunel Mrázovka (ATM) a Strahovský automobilový tunel (SAT). Proto v řízení provozu této tunelové stavby musí být zohledňován provoz i v sousedních lokalitách, zrovna tak jako provoz na výjezdech z tunelového komplexu a jejich nejbližším okolí.

Převážná část algoritmů řízení, zejména bezpečnostní funkce, je kvůli nutnosti vyhodnocovat výše zmíněnou sumu informací v reálném čase naprogramována v algoritmech řídicího systému. Vyhodnocování stavu

case of a fire, there is increased threatening by radiant heat or poisonous combustion products there, whilst the access of components of the integrated rescue system to the intervention spot is more complicated than the access on a free surface road.

It is at least the moral obligation of the person determining operational rules to ensure a level of safety for users of the road in these problematic sections which is comparable with the level existing on an open surface road or at least approximates this level.

Variable traffic signs will make the maximum capacity use of a road possible and will warn participants of traffic in time in the case of an extraordinary event. In the case of a fire, the fire ventilation system will evacuate smoke making orientation more difficult and poisonous combustion products outside the structure so that safe evacuation of people is possible. The above-mentioned information assumes that all technical systems of the structure, which are coordinated by the management system, will work in such the way that they will contribute as the whole to the fluent passage of vehicles and, through timely assessment of data, will prevent the origination of many extraordinary events and, if these events after all develop, their consequences will be significantly more moderate.

The management system for a tunnel structure is secured in terms of the design and installation by ELTODO Group. The complexity of the management system corresponds to the scope of the project. The database of physical inputs into the system contains over 24,000 items, whilst the number of physical outputs exceeds 13,000. For the purpose of comparison, the till now most complicated tunnel opened to traffic, the Mrázovka automobile tunnel, contains approximately 8,000 binary inputs. In addition, the number of facilities exchanging information through higher-level buses (serial communications) significantly increased in comparison with previous tunnel structures. Such the extensive database is managed using ELTODO Group's own application, which is realised on the Microsoft Access database system and contains numerous mechanisms for automatic checking of the data being inserted.

## ARCHITECTURE OF SYSTEMS

The management system is designed for maintaining the necessary safety and resistance against failures as a system fully redundant at all levels. All hardware components of the management system and their connections are doubled. At the level of programmable logic control (PLC) automates the system is designed on the SIMATIC S7-400 platform developed by SIEMENS, using the PROFIBUS DP industrial bus on an optical and metallic physical layer. At the visualisation level, the system is designed on the PROFICY CIMPLICITY platform developed by GE FANUC, which is designed for Microsoft Windows operating systems. MICROSOFT SQL SERVER is used as the archival system. The system is further supplemented by redundant servers for the control of the operating ventilation, camera surveillance and the information display ID. ANYBUS Communicator modules of HMS company are used as converters of industrial buses. The system is supplemented by industrial PCs with application software designed for communication with third party systems connected through higher level buses (serial lines, Ethernet, industrial buses).

## MANAGEMENT SYSTEM

The Blanka complex of tunnels does not stand independently, on a green field; it directly links the line of tunnel structures formed by tunnels on the Zlíčov Radial Road and the Mrázovka and Strahov automobile tunnels. For that reason it is necessary for the traffic management system to allow for the traffic in neighbouring locations, as well as the traffic at exits from the complex of tunnels and their closest surroundings.



Obr. 2 Vizualizace tunelové trouby s dopravním značením (zdroj: [www.tunelblanka.cz](http://www.tunelblanka.cz))

Fig. 2 Visualisation of a tunnel tube with traffic signs (source: [www.tunelblanka.cz](http://www.tunelblanka.cz))

dopravy v tunelových stavbách však musí počítat s tak velkou množinou událostí, že ne všechny jejich varianty lze zpracovat v uložených algoritmech. Proto stále nezastupitelným druhem řízení provozu v tunelových stavbách je dispečerské řízení, spojující sofistikované zpracování přicházejících dat se zkušenostmi dispečerů. V případě tunelového komplexu Blanka je současně projektována dostavba víceúčelového Multifunkčního operačního centra (MOS), kde se bude nacházet i dispečerské centrum řízení tunelových staveb.

### TECHNIKA POUŽITÁ PRO ŘÍZENÍ

Na horní úrovni, tj. vizualizačním znázornění stavů dopravy a technologie, je použita standardní PC platforma s využitím operačních systémů Microsoft Windows v serverovém a desktopovém provedení. Jako vizualizační software je použit systém PROFICY SIMPLICITY firmy GE FANUC v konfiguraci klient – server s redundancí na úrovni SCADA a databázového serveru. V aplikační úrovni je použit, podobně jako ve všech tunelových stavbách v Praze, vlastní produkt skupiny ELTODO systém Kerberus. Dále jsou zde samostatné servery pro řízení provozního větrání a pro zpracování informací od videodohledu a systému ZPI. Jsou rovněž v redundantním provedení, a to i s potřebným aplikačním softwarem. Moderní použitá součástková základna umožní, při zachování pravidel pravidelné údržby, používat tento řídicí systém po dobu navrhovanou v ČSN 73 7507 kapitola 5, tj. více než 15 let.

### SW PROJEKT DOPRAVNÍHO ZNAČENÍ

Pravidla pro umístování proměnného dopravního značení v tunelových stavbách, způsob jeho ovládání a algoritmy

The majority of management algorithms, first of all the safety function, are programmed in the management system algorithms because of the necessity of assessing the above-mentioned sum of information in real time. However, the process of assessing the state of traffic in tunnels has to be prepared for such a large set of events that not all of their variants can be processed in the stored algorithms. For that reason management by operators joining sophisticated processing of incoming data with the experience of operators is still a non-substitutable method of managing traffic in tunnels. In the case of the Blanka complex of tunnels an expansion of the multi-purpose Multifunctional Operation Centre which will even house the operator management centre for tunnel structures.

### TECHNIQUE APPLIED TO MANAGEMENT

A standard PC platform using Microsoft Windows operating systems configured for a server and desktop is used at the top level, i.e. the visualisation depiction of traffic and equipment states. PROFICY SIMPLICITY of GE FANUC PLC in configuration client – a server with redundancy at the level of SCADA and a database server – is used as the visualisation server. ELTODO own product, the Kerberus system, is used at the application level, similarly to all tunnel structures in Prague. In addition, independent servers are used for the operating control of ventilation and for processing of information from the camera surveillance system and the information display system. They are also in the redundant form, even with the required application software. The state-of-the-art component base which is used will, under the condition of adhering to rules of regular maintenance, allow this system to be used for the time proposed in ČSN 73 7507, section 5, i.e. for over 15 years.

### SW DESIGN FOR TRAFFIC SIGNS

Rules for positioning of variable traffic signs in tunnel structures, the method of controlling them and management algorithms interlocked with the state of other systems, form a specific area of management, which, in contrast with management systems, has no direct equivalent in industrial systems.

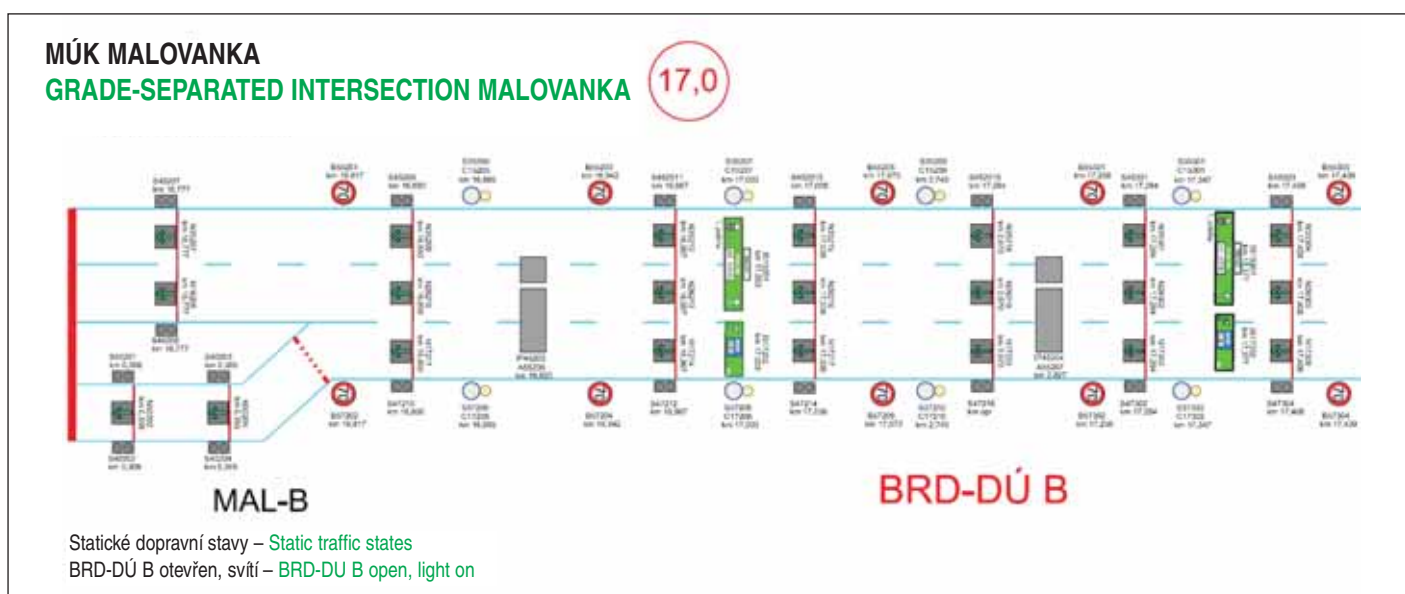
The SW design for traffic signs comprises the defining of all particulars required for the operation of traffic signs within the framework of the complex in terms of the management system. It is not only the defining of the conditions of individual traffic signs and facilities (the number of which in the tunnel amounts to about 800) for the group of tunnel traffic states, but also creating a source document for SW programmers from the aspect of transition sequences between individual static states. Dynamic states of the tunnel, which are formed by combinations of static states of the tunnel in a time sequence, are directly tied to the transition sequences. These states and their rules are subsequently implemented to the management system, the user interface of which is formed in compliance with the already



Obr. 3 Vizualizace tunelové trouby s výjezdovou rampou a tunelovou propojkou (zdroj: [www.tunelblanka.cz](http://www.tunelblanka.cz))

Fig. 3 Visualisation of a tunnel tube with an exit ramp and a cross passage between tunnel tubes (source: [www.tunelblanka.cz](http://www.tunelblanka.cz))





Obr. 4 Blokové schéma dopravního značení pro dopravní stav s normálním provozem  
 Fig. 4 Block diagram of traffic signs for the traffic state with normal traffic

řízení provázané na stav dalších systémů tvoří specifickou oblast řízení, která, na rozdíl od řídicích systémů, nemá přímý ekvivalent v průmyslových systémech. SW projekt dopravního značení zahrnuje definování veškerých náležitostí pro provoz dopravního značení v rámci komplexu z pohledu řídicího systému. Jedná se nejen o definování stavů jednotlivých dopravních značek a zařízení (kterých je v tunelovém komplexu cca 800) pro skupinu dopravních stavů tunelu, ale také o vytvoření podkladu pro programátory SW z pohledu přechodových sekvencí jednotlivých statických stavů. Na přechodové sekvence přímo navazují dynamické stavy tunelu, které jsou tvořeny kombinacemi statických stavů tunelu v časové posloupnosti. Následně jsou tyto stavy a jejich pravidla implementovány do řídicího systému, jehož uživatelské rozhraní je vytvářeno v souladu s již provozovanými řídicími systémy pražských tunelů. To je z logického důvodu zachování stejných principů řízení tak, aby operátoři dopravy a dispečerů technologie nemuseli pracovat s rozdílnými systémy.

Celý tunelový komplex Blanka je v současném pojetí dělen do čtyř staveb a pro dva řídicí systémy. Terminologicky je označen jako tři tunely s vlastním názvem – Brusnický tunel, Dejvický tunel a Bubenečský tunel. Z pohledu terminologie je možné, že se názvy ještě budou měnit a pro realizaci dokumentace není pojmenování finální.

Pro samotné přiřazení aktuálního zobrazení na jednotlivé PDZ musely být nejdříve definovány statické stavy, pro které bude dopravní značení řešeno a přednastaveno. Tyto stavy byly definovány v rámci kooperace s ostatními zhotoviteli stavby a SW projektu dopravního značení. Pro definování statických stavů byl tunelový komplex rozdělen na samostatné dopravní úseky, které jsou rozděleny podle mimoúrovňových křižovatek. Jsou definovány tak, aby v případě zavření celého dopravního úseku vozidla mohla právě před tímto úsekem opustit tunel výjezdovou rampou (obr. 3).

Pro definované jednotlivé úseky byly navrženy statické dopravní stavy (obr. 4). To znamená například stav levý jízdní pruh uzavřen, snížení rychlosti v celé délce atd. K definovaným statickým stavům byly doplněny dynamické stavy – stavy určené pouze vzorovým výkresem a definováním podmínek, za kterých mohou nastat. Takovým

operating management systems for Prague tunnels. This means, for a logical reason, that identical principles of management are maintained so that traffic operators and equipment controllers do not have to work with different systems.

In the current conception, the entire Blanka complex of tunnels is divided into four structures for two management systems. In terms of terminology, it is marked as three tunnels entitled the Brusnice tunnel, the Dejvice tunnel and the Bubeneč tunnel. It is possible in terms of terminology that the names be still changed and that the names are not final for the execution of design documents.

It was necessary for the assigning of the current imaging system to individual variable traffic signs first of all to define the static states for which the traffic signs will be solved and pre-set. These states were defined within the framework of cooperation with other contractors for the structures and the SW design for traffic signs. The complex of tunnels was divided for the purpose of defining the static states into independent traffic sections, which are divided according to grade-separated intersections. They are defined with the intention to make it possible for vehicles to vacate the tunnel via an exit ramp in the case of the closure of the entire traffic section (see Fig. 3).

Static traffic states were proposed for the defined individual sections (see Fig. 4). It means, for example, a state where the left-hand traffic lane is closed, the speed limit throughout the lane length is reduced etc. The defined static states were supplemented by adding dynamic states to them – i.e. states determined only by a standard drawing and defining of conditions under which they can take place. An example of such the state is a floating traffic closure, which does not close the traffic lane throughout its length, but only several transverse profiles before the restriction location. Beyond this location the traffic along the lane is again permitted. The time sequence of the imaging of road signals is also considered to be a dynamic state, namely at a combination with more static states.

The 'tunnel closed' static state can be used as a demonstration example. At this state, the entrances and exits are closed and all transverse profiles with traffic signs and traffic lights activate the signal S1 a, i.e. the red light signal 'Stop'. Red crosses are activated on the lane-use signals (signal S8a – lane closed to all vehicles). This is how the 'tunnel closed' state looks in its final shape, but its activation can consist of several partial steps. At a common closure, the signal 'lane closed to all vehicles' is not switched on at all transverse profiles at the same time; it is activated gradually, from the tunnel entrance ahead down the tunnel



Obr. 5 Vizualizace MÚK Špejchar (zdroj: [www.tunelblanka.cz](http://www.tunelblanka.cz))  
Fig. 5 Visualisation of Špejchar grade-separated intersection (source: [www.tunelblanka.cz](http://www.tunelblanka.cz))

stavem je například plovoucí uzávěra, která neuzavírá jízdní pruh v celé délce, ale pouze několik řezů před místem omezení. Za ním je jízda v pruhu opět povolena. Za dynamický stav je také považována časová posloupnost zobrazení dopravního značení, zejména při kombinaci více statických stavů.

Ukázkovým příkladem může být statický stav tunel uzavřen. Při tomto stavu jsou uzavřeny vjezdy, výjezdy a všechny řezy s dopravním značením a světelně signalizačním zařízením aktivují signál S1a – signál s červeným světlem „Stůj“. Na pruhové signalizaci nad jízdními pruhy jsou aktivovány červené křížky (signál S8a – zakázaný vjezd vozidel do jízdního pruhu). Takto stav tunel uzavřen vypadá v konečné podobě, jeho aktivace ale může být složena z dílčích kroků. Při běžném uzavření není zákaz jízdy rozsvícen na všech řezech najednou, ale aktivuje se postupně od vjezdu do tunelu ve směru jízdy tak, aby žádné vozidlo nemohlo být dopravním značením „chyceno“ v tunelu. To ale neplatí v případě mimořádných událostí, kdy je naopak zapotřebí celý dopravní proud před místem mimořádné události bezodkladně zastavit. Vozidlům za událostí ale musí být umožněno z tunelu bezpečně vyjet, takže uzavření proběhne v úseku před událostí najednou, a za ní postupně. Finální statický stav je vždy stejný – pouze jeden, ale dynamických stavů, které mu předcházejí, je velmi mnoho.

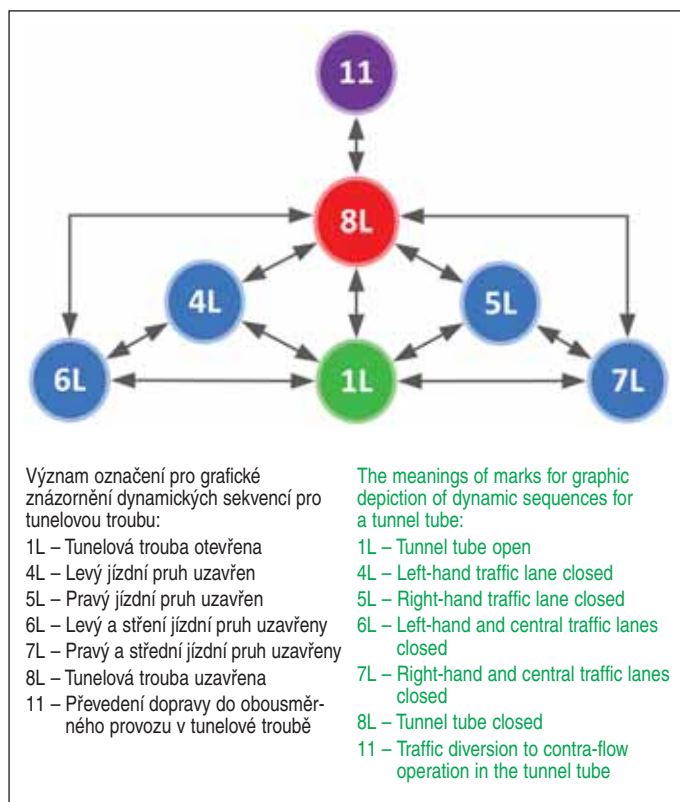
K definovaným stavům v tunelu jsou navázány stavy dopravního značení na povrchu (vjezdové rampy a přílehlé křižovatky) obr. 5.

Po definování statických stavů a dynamických stavů je třeba vytvořit dynamické sekvence – pravidla pro možné přechody mezi jednotlivými statickými stavy s možnou kombinací na dynamické stavy. V současné době jsou práce na SW projektu právě v této fázi – jsou definovány statické a dynamické stavy a probíhají práce na dynamických sekvencích (obr. 6).

Uvedení celého komplexu do provozu je plánováno k termínu duben 2014. Do té doby je v rámci tvorby řídicího systému tunelového komplexu Blanka potřeba udělat mnoho práce, ale SW projekt dopravního značení, na jehož základě bude řídicí systém značky využívat a ovládat, je na dobré cestě ke splnění termínu realizace.

ING. MARTIN KŇÁKAL, [knakalm@eltodo.cz](mailto:knakalm@eltodo.cz),  
ING. DUŠAN KRAJČÍR, DiS., [krajcird@eltodo.cz](mailto:krajcird@eltodo.cz),  
ING. JIŘÍ ŠTEFAN, [stefanj@eltodo.cz](mailto:stefanj@eltodo.cz),  
ELTODO EG, a. s.

Recenzoval: Ing. Petr Bednář



Obr. 6 Příklad grafického znázornění dynamických sekvencí – povolených přechodů mezi statickými stavy

Fig. 6 An example of graphic depiction of dynamic sequences – permitted transitions between static states

in the direction of travel so that no vehicle can be ‘entrapped’ by the signals inside the tunnel. However, this rule does not apply to emergency cases, when, on the contrary, it is necessary to immediately stop the entire traffic stream before the emergency location. But the vehicles found behind the emergency location must be allowed to safely leave the tunnel. For that reason the closure event will happen at one stroke in the section before the emergency location and step-by-step behind it. The final static state is always identical, only one, but there are many preceding dynamic states.

The states of traffic signs on the surface (entry ramps and adjacent intersections) are tied to the defined states inside the tunnel (see Fig. 5).

After defining the static states and dynamic states, it is necessary to develop dynamic sequences, i.e. rules for possible transitions between individual static states with a possible combination with dynamic states. The work on the SW design is currently at this stage, i.e. the definition of static and dynamic states has been completed and the work on dynamic sequences is underway (see Fig. 6).

Bringing the entire complex into service is planned for April 2014. Till that time it is necessary to carry out lots of work within the framework of the development of the management system for the Blanka complex of tunnels. Anyway, the SW design for traffic signs on the basis of which the management system will use and control the signs is on good way to meeting the deadline for the system implementation.

ING. MARTIN KŇÁKAL, [knakalm@eltodo.cz](mailto:knakalm@eltodo.cz),  
ING. DUŠAN KRAJČÍR, DiS., [krajcird@eltodo.cz](mailto:krajcird@eltodo.cz),  
ING. JIŘÍ ŠTEFAN, [stefanj@eltodo.cz](mailto:stefanj@eltodo.cz),  
ELTODO EG, a. s.



# EXPERIMENTÁLNÍ ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY DRÁTKOBETONOVÝCH A ŽELEZOBETONOVÝCH PREFABRIKOVANÝCH SEGMENTŮ PRO OSTĚNÍ TUNELŮ

## EXPERIMENTAL LOADING TESTS OF STEEL FIBRE REINFORCED AND TRADITIONALLY REINFORCED PRE-CAST CONCRETE SEGMENTS FOR TUNNEL LININGS

MATOUŠ HILAR, PETR VÍTEK

### 1 ÚVOD

Pro mechanizovanou ražbu pomocí plnoprofilových tunelovacích štítů (technologie TBM) je zpravidla aplikováno segmentové tunelové ostění z prefabrikovaného železobetonu. V současné době jsou v praxi stále častěji využívány segmenty z prefabrikovaného drátkobetonu bez tradiční prutové výztuže (Hilar, Beňo, 2012). V České republice nyní probíhá výzkum zaměřený na problematiku drátkobetonových segmentů, aby danou technologii bylo možné využít i na českých tunelech. V úvodních fázích výzkumu byla vyrobena a odzkoušena řada vzorků pro porovnání a výběr vhodného složení drátkobetonové směsi (Vodička a kol., 2012). Byl porovnáván vliv různého dávkování drátku i různých typů drátků na výsledné chování drátkobetonu. Vlastnosti vzorků byly laboratorně zkoušeny a vyhodnoceny (pevnost v prostém tlaku zkoušená na krychlích, ohybová pevnost zkoušená na trámčích). Některé parametry drátkobetonu byly zpětně odvozovány pomocí pokročilého numerického modelování metodou konečných prvků v programu ATENA (Sajdllová, Pukl, 2011). V Kloknerově ústavu ČVUT v Praze byly zkoušeny železobetonové a drátkobetonové segmenty (Vokáč, Bouška, 2011). Výsledky provedených zkoušek jsou prezentovány v následujícím článku.

### 2 TYPY ZKOUŠEK

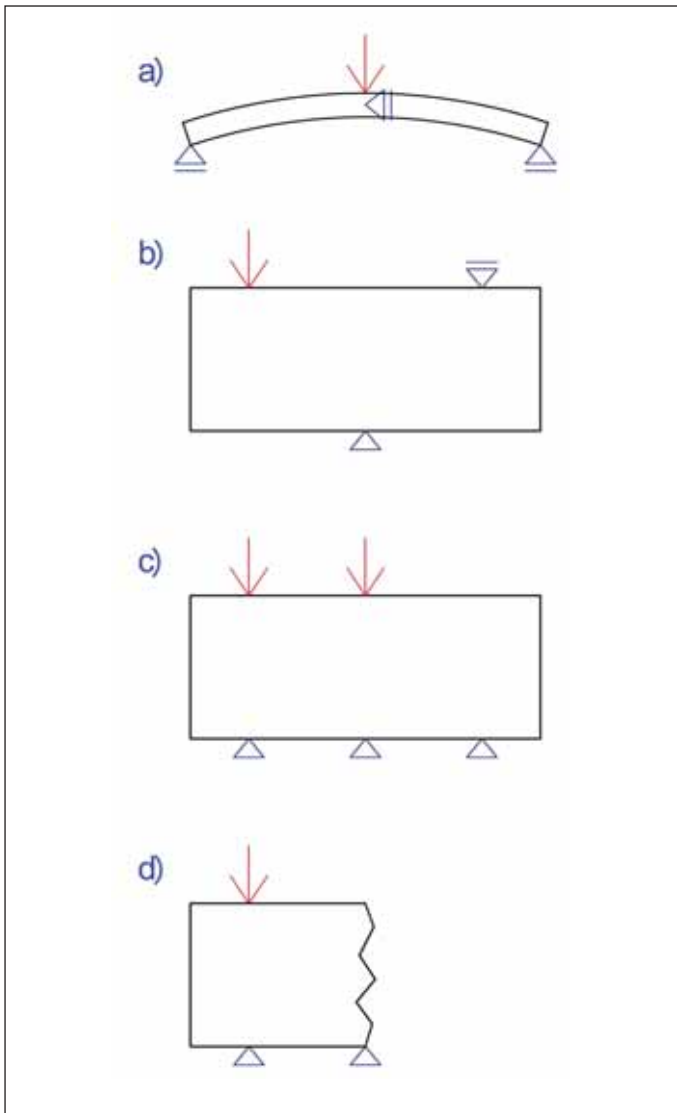
Kromě testování malých vzorků zejména trámčů, jejichž testování se běžně realizuje již řadu let, byl nyní uskutečněn komplexní soubor testů na reálných prvcích skutečné velikosti. Přestože jsou segmenty tunelového ostění vystaveny účinkům řady zatěžovacích stavů (např. manipulace, skladování, doprava, instalace, definitivní zatížení, atd.), jsou v praxi zaváděna opatření, aby rozhodující pro dimenzování prefabrikátů byly jen některé z nich. Zásadním návrhovým zatížením je přirozeně zatížení horninovým masivem. Vzhledem k vodonepropustnosti segmentového ostění může hrát významnou roli také hydrostatický tlak, zejména pokud je hladina podzemní vody nad úrovní tunelu. Uvedená zatížení působí po celou dobu životnosti konstrukce. Dalším významným zatěžovacím faktorem je přítlak tunelovacího štítu, který je zatlačován do horninového masivu pomocí hydraulických lisů zapřených o smontované prstence ostění. Jedná se sice o dočasný stavební stav a krátkodobé zatížení, které by z hlediska co nejušpornějšího návrhu nemělo být podstatné. Avšak s ohledem na mnohdy předpokládané vysoké hodnoty přítlačné síly stroje (závisejí na predikovaných geotechnických vlastnostech horninového masivu) hraje daný zatěžovací stav často rozhodující roli při návrhu segmentů. I vzhledem k tomuto faktu

### 1 INTRODUCTION

Segmental tunnel lining is usually applied to mechanised tunnelling using full-face tunnelling shields (the TBM technology). Pre-cast steel fibre reinforced segments are currently used in praxis, containing no traditional rod reinforcement (Hilar, Beňo, 2012). In the Czech Republic, there is a research underway focused on problems of steel fibre reinforced segments so that this technology can be applied even to Czech tunnels. A variety of samples were produced and tested in the initial phases of the research, serving for the comparison and selection of suitable composition of steel fibre reinforced concrete mixture (Vodička et al., 2012). The influence of different dosing of steel fibres on the resultant behaviour of steel fibre reinforced concrete was subjected to comparison. The properties of steel fibres were laboratory tested and assessed (unconfined compressive strength tested on cubes, flexural strength tested on beams). Some parameters of steel fibre reinforced concrete were derived backward by means of advanced numerical modelling using the Finite Element Method in the ANTENA simulator (Sajdllová, Pukl, 2011). Traditionally reinforced concrete segments and SFRC segments were tested by the Klokner's Institute of the Czech Technical University in Prague (Vokáč, Bouška, 2011). The results of the completed tests are presented in the paper below.

### 2 TYPES OF TESTS

Apart from the testing of small samples, first of all beams, the testing of which has been commonly conducted for a number of years, a comprehensive set of tests on real elements with real sizes was carried out at present. Although segments of tunnel linings are exposed to effects of a range of loading cases (e.g. handling, storing, transport, installation, final loading), measures are being introduced in praxis designed to make only some of them deciding for the dimensioning of the pre-cast elements. Naturally, the load induced by rock mass is the principal design load. With respect to the waterproofing capacity of a segmental lining, even the hydrostatic pressure can play important role, first of all when the water table is above the tunnel level. The above-mentioned loading cases are in action throughout the design life of the structure. Another significant loading factor is the thrust of a tunnelling shield, which is pressed into rock mass by means of hydraulic rams pushing against assembled lining rings. It is true that this is a temporary construction condition and short-term loading, which should not be significant as far as the as economic as possible design is concerned.



Obr. 1 Prováděné zkoušky – a) ohyb segmentu kolmo na rovinu segmentu, b) ohyb segmentu v rovině segmentu, c) prostý tlak na segment dvěma břemeny, d) prostý tlak jedním břemenem na zbytky segmentů

Fig. 1 Conducted tests – a) segment bending perpendicularly to the segment plane, b) segment bending in the segment plane, c) unilateral pressure on the segment induced by two loads, d) unilateral pressure induced by a single load acting on remains of segments

je třeba posuzovat technologii TBM jako celek, potřebná vyšší únosnost ostění je kompenzována řadou výhod.

Pro simulaci rozhodujících návrhových stavů byly navrženy tři typy zkoušek (obr. 1):

#### A) Simulace zatížení horninovým masivem:

Segment je zatěžován ohybem, a to v rovině kolmé na plochu segmentu. Segment se ukládá ve tvaru klenby (obrácené "U") na posuvné podpory a zatěžuje se ve vrcholu klenby přímkovým zatížením. Posuvné podpory znamenají namáhání prostým ohybem bez vlivu normálové síly (obr. 1a). Ačkoli ve skutečnosti jsou tunelová ostění namáhána normálovou silou, pro účel zkoušení byl zvolen staticky jednodušší model, aby výsledky byly snáze interpretovatelné a poskytly vhodnější podklady pro numerickou analýzu. Kombinaci s normálovým zatížením ostění lze následně relativně snadno modelovat v numerickém výpočtu.

#### B) Simulace zatížení axiálními lisami štítu – ideální stav:

Jak již bylo zmíněno, zatížení lisami štítu zajišťujícími potřebný přítlak stroje na čelbě je pro návrh segmentů jeden z rozhodujících zatěžovacích stavů. Je zapotřebí mít jasnou

However, with respect to the anticipated high values of the thrust force of the machine (depending on the predicted geotechnical properties of rock mass), the particular loading case often plays the deciding role in designing segments. It is also with respect to this fact that the full-face TBM technology must be assessed as a whole; the required higher loading capacity is compensated for by numerous advantages.

The following three types of tests were proposed for the simulation of deciding design conditions (see Fig. 1):

#### A) Simulation of the rock mass induced loading:

A segment is loaded by bending in a plane perpendicular to the segment surface. The segment is placed in the position of a vault (inverted 'U') on movable supports; a linear load acts on the top of the vault. The movable supports mean that only a pure bending load acts, without the influence of a normal force (see Fig. 1a). Despite the fact that tunnel linings are in reality loaded by normal forces, a statically simpler model was chosen for the purpose of the testing, so that the results were easier to interpret and provided more suitable grounds for a numerical analysis. A combination containing the normal loading acting on the lining can be subsequently relatively easily modelled in a numerical calculation.

#### B) Simulation of loading induced by axial rams on the shield – an ideal condition:

As mentioned above, the loading induced by rams on the shield providing the required thrust of the machine against the excavation face is one of the loading cases deciding for the segment design. It is necessary to have clear information about the load under which cracks start to develop and the moment at which they start to propagate throughout the lining thickness. Despite the fact that the loading capacity of a segment can be sufficient, a crack running throughout the segment thickness means that the lining is permeable for water, which naturally is unacceptable. The test is arranged in a way where the segment is loaded by a pressure inside the central plane. With respect to the capability of the loading equipment (maximum force of 10 MN – 1000 t), the test was composed in two variants, namely with the loading by a single load (see Fig. 1b) with the possibility of reaching the total load-bearing capacity of the element, and the loading by two loads (see Fig. 1c) without the possibility of reaching the loading capacity of the element.

#### C) Simulation of loading induced by axial rams on the shield – non-uniform bearing of the segment:

Segments in lining rings are bonded in a way similar to brickwork. This system brings many advantages, including the increase in the rigidity of the lining. When the loading by the tunnelling shield is being applied, the loading force is transmitted to two segments of the previous ring. If the state occurs where the segmental lining is not assembled geometrically accurately, the segment being loaded by rams is supported non-uniformly. In the case being assessed, one segment is exposed to loading in 3 points (the simulation of 3 rams) and is placed on 3 supports. With respect to the fact that a statically indeterminate structure is in substance in question, the element is loaded by bending when a support drops. The test is adjusted to this fact. The segment is fixed on two supports and the side support is omitted; it is loaded by a single load acting in the central plane in the end point of application (see Fig. 1d). The element is therefore loaded as a high cantilever.



informaci o tom, při jakém zatížení vznikají trhliny a kdy se propagují na plnou tloušťku ostění. Přestože segment může být dostatečně únosný, trhlinka procházející celou tloušťkou segmentu znamená vodopropustnost ostění, což přirozeně není přijatelné. Zkouška je uspořádána tak, že segment je zatěžován tlakem ve střednicové ploše. S ohledem na možnosti zatěžovacího zařízení (maximální síla 10 MN – 1000 t) byla zkouška koncipována ve dvou variantách, a to zatížení jedním břemenem (obr. 1b) s možností dosažení celkové únosnosti prvku a zatížení dvěma břemeny (obr. 1c) bez možnosti dosažení únosnosti prvku.

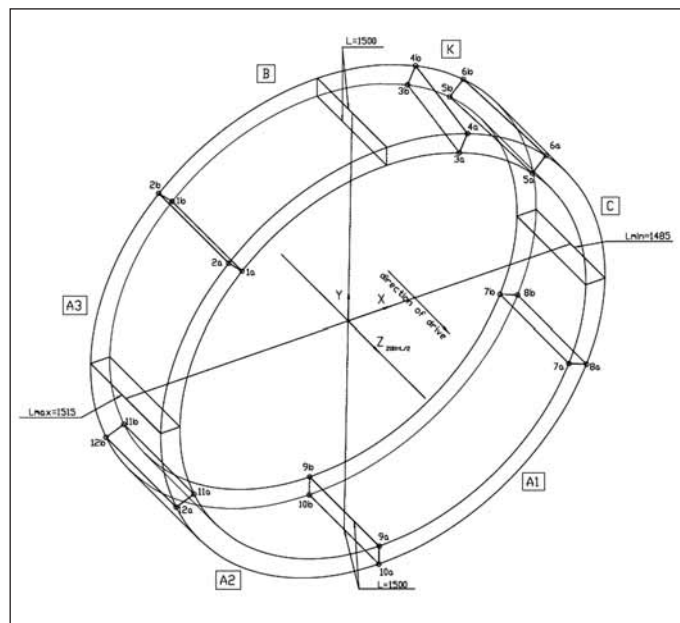
### C) Simulace zatížení axiálními lisami štítu – nerovnoměrné uložení segmentu:

Segmenty v prstencích ostění jsou provázány vazbou podobně jako cihelné zdivo, což přináší řadu výhod včetně zvýšení tuhosti ostění. Při zatížení tunelovacím štítem je zatěžovací síla přenášena do dvou segmentů předcházejícího prstence. Pokud dojde k tomu, že segmentové ostění není smontováno geometricky přesně, tak je segment zatěžován lisy podepřen nerovnoměrně. V posuzovaném případě je jeden segment vystaven 3 působícím zatížením (simulace 3 lisů) a uložen na 3 podporách. S ohledem na fakt, že se v podstatě jedná o staticky neurčitou konstrukci, při poklesu podpory je prvek namáhán ohybem. Tomu je přízpusobena i zkouška, kdy je segment zafixován na dvou podporách, krajní je vynechána, a zatížen jedním břemenem působícím ve střednicové rovině v krajním působišti (obr. 1d). Prvek je tedy zatížen jako vysoká konzola.

## 3 ZKOUŠENÉ SEGMENTY

Pro výrobu prefabrikovaných segmentů určených pro zatěžovací zkoušky byly využity formy používané k výrobě segmentů pro mechanizovanou ražbu traťových tunelů prodloužení trasy A pražského metra. Geometrie segmentů je patrná z obr. 2. Prstencem ostění má vnitřní průměr 5,3 m, vnější průměr 5,8 m, mocnost ostění (segmentů) je 0,25 m, délka jednoho prstence (šířka segmentů) je 1,5 m. Všechny prstence mají shodný tvar. Svislé průměty osazených prstenců mají tvar lichoběžníků, přičemž vzájemným natočením prstenců kolem jejich osy lze zajistit vedení v přímém směru i změnu směru tunelu (směrové a výškové oblouky). Tři největší segmenty (A1, A2 a A3) mají rovnoběžné ložné hrany, dva další segmenty obdobné velikosti (B a C) jsou na straně klenáku zkosené, závěrečný uzavírací segment (K – klenák) je zkosený na dvou ložných stranách a má přibližně třetinovou velikost. Segmenty jsou vzájemně spojovány šrouby (v podélném i příčném směru), proto má každý segment otvory a kapsy pro umístění šroubů. Vodotěsnost ostění je zajišťována pomocí pryžových pásků, které jsou osazeny do obvodových drážek každého segmentu. Prostor mezi rubem prstence a lícem výrubu se při dalším záběru souběžně začerpává výplňovou maltou.

Během výstavby je každý prstencem ostění zatížen pomocí 16 dvojic hydraulických lisů umístěných v zadní části tunelovacího štítu. Lisy jsou po obvodu prstence rozmístěny rovnoměrně (úhel rotace 22,5°). Na pět velkých segmentů působí vždy tři dvojice lisů, na klenák působí pouze jedna dvojice lisů. Pro účely zkoušek byly vyrobeny dva prstence segmentů z drátkobetonu bez prutové výztuže s dávkováním drátků v betonu 40 kg/m<sup>3</sup> a 50 kg/m<sup>3</sup>. Pro porovnání byly také zkoušeny běžné železobetonové segmenty vyztužené 105 kg/m<sup>3</sup> prutové výztuže. Při zkouškách byly zaznamenávány hodnoty působících sil, velikosti deformací měřené osazenými potenciometrickými snímači dráhy a signály z odporových tenzometrů nalepených na povrch segmentů.



Obr. 2 Geometrie segmentů v prstenci ostění  
Fig. 2 Geometry of segments in a lining ring

## 3 TESTED SEGMENTS

The pre-cast segments for the loading tests were produced using moulds for the production of segments for mechanised excavation of running tunnels of the Prague metro Line A extension. The geometry of the segments is presented in Fig. 2. The lining ring has the inner diameter of 5.3 m and outer diameter of 5.8 m and thickness (of segments) of 0.25 m. One lining ring is 1.5 m long (the width of one segment). The shape of all segments is identical. Vertical views of completed rings are trapezoidal. The straight alignment of the tunnel as well as changes in its direction (horizontal and vertical curves) can be secured by rotating the rings against each other around the axis. Three largest segments (A1, A2 and A3) have parallel edges of radial joints, whilst other two segments of a similar size (B and C) are angled on the key side and the closing segment (the key) has angled radial edges on both sides and its size is about one third of the other segments. The segments are interconnected with bolts (both longitudinally and transversally). For that reason each segment has holes and boxes for the installation of bolts. The waterproofing of the lining is secured by means of rubber gaskets installed in peripheral grooves in each segment. The annular gap between the outer side of the ring and the excavated tunnel wall is concurrently backfilled with grout.

During the course of the construction, each lining ring is loaded by 16 pairs of hydraulic rams located in the rear section of the tunnelling shield. The rams are uniformly distributed around the circumference (the angle of rotation of 22.5°). Each of the five large segments is loaded by 3 pairs of rams, whilst only one pair of rams acts against the key. Two rings were produced for the testing purposes using steel fibre reinforced concrete (SFRC) without traditional reinforcement, with the doses of steel fibres of 40 kg/m<sup>3</sup> and 50 kg/m<sup>3</sup>. Common steel bar reinforced concrete segments with 105 kg/m<sup>3</sup> of the reinforcement were also tested to allow comparison. The values of the acting forces, the magnitude of deformations measured by installed potentiometric path transducers and signals from the strain gauges glued to the surface of segments were recorded during the testing.

A hydraulic testing press Amsler 10000 kN 1523 (metrology number KÚ S 07 010 M) was used for the testing. The



Obr. 3 Segment zatížený ohybem kolmým na rovinu segmentu  
Fig. 3 A segment loaded by bending perpendicular to the segment plane

Při zkouškách byl používán hydraulický zkušební stroj Amsler 10000 kN 1523 (metrologické číslo KÚ S 07 010 M). Při všech provedených zkouškách byly zaznamenávány hodnoty působících sil, velikosti deformací měřené osazenými potenciometrickými snímači dráhy NOVOTECHNIK TR10 a TR25. Dále byly zaznamenávány signály z odporových tenzometrů Mikrotechna typu X350 s délkou mřížky 100 mm nalepených na povrch segmentů. Pro sběr dat byla využita měřicí ústředna PEEKEL Autolog 2100.

#### 4 ZATÍŽENÍ SEGMENTŮ OHYBEM KOLMO NA ROVINU SEGMENTU

Při dané zkoušce byly segmenty zkoušeny v ohybu kolmo na rovinu segmentu, zkouška simulovala namáhání ohybovými momenty při manipulaci, dopravě, skladování a při zatížení tlakem horninového masivu. Segmenty byly položeny zakřivenou částí nahoru (obr. 3), spodní hrany byly podloženy kluznými podporami, které umožňovaly vodorovný pohyb a zabráňovaly svislému pohybu. Rovnoměrné zatížení segmentů po celé délce vrcholu klenby vyvolávalo řízenou svislou deformaci. To znamená, že zatěžovací síla vnášená hydraulickým válcem byla upravována tak, aby deformace na pístu zatěžovacího lisu byla postupně rovnoměrně zvyšována. Zatěžovací síla tedy nejprve rostla a po vzniku trhlin byla snižována až do vyčerpání kapacity (tj. do okamžiku rozlomení). Celý sofistikovaný systém byl řízen počítačem se speciálním softwarem. Nespornou výhodou zatěžování „řízenou

values of acting forces, the magnitude of deformations measured by installed potentiometric path NOVOTECHNIK TR10 a TR25 were recorded during all tests. In addition, signals from X350-type Mikrotechna strain gauges with the grid length of 100 mm, which were glued to the surface of segments, were recorded. A PEEKEL Autolog 2100 data logger was used for data collection.

#### 4 SEGMENT LOADING BY BENDING PERPENDICULAR TO SEGMENT PLANE

During the course of the particular test, segments were subjected to bending perpendicular to the segment plane. The test simulated the loading by bending moments during handling, transport, storing and loading by the pressure induced by ground mass. Segments were placed with the curved surface upward (see Fig. 3); bottom edges were supported by sliding supports allowing horizontal movement and preventing vertical movement. The uniformly distributed load, acting on segments throughout the length of the top of the vault, induced controlled vertical deformation. This means that the loading force introduced by the hydraulic cylinder was adjusted with the aim of regular, evenly increasing of the deformation on the loading ram cylinder. This means that the loading force initially grew and subsequently, after the origination of cracks, was reduced until the capacity was exhausted (i.e. until the moment of breaking). The entire sophisticated system was controlled by a computer with a special software. Undisputable advantage of the loading through “controlled deformation” was the fact that a complete diagram, including the descending branch, was obtained. The decision to terminate the test was made only when the element no more supported its own weight. The above procedure was applied to 4 steel fibre reinforced segments A3. The test results are presented in Table 1.

Petty cracks started to appear in a strip with variable width on the bottom face of the segment before the maximum loading force was reached. They gradually developed and subsequently localised themselves in a single crack (see Figures 4 and 5). This crack gradually opened, with a corresponding decrease in the loading force. It was possible during the course of the process of the crack opening to directly observe steel fibres being gradually pulled out. Typical spreading of cracks in the SFRC was registered, characterised by a number of thin cracks developing in the close vicinity of the most stressed cross section and one of them later propagating itself further.

Tab. 1 Výsledky zatížení segmentů ohybem kolmo na rovinu segmentu  
Table 1 Results of segments loading by bending perpendicular to the segment plane

Segment Segment	Množství drátků (kg/m <sup>3</sup> ) Amount of steel fibres (kg/m <sup>3</sup> )	Přírůstek síly (kN) Increments in force (kN)	Snižování zatížení na hodnotu (kN) Load decreasing to the value of (kN)	Maximální dosažená působící síla (kN) Maximum acting force reached (kN)
A3 – S1	40	kontinuálně continually	neodtěžováno not unloaded	115
A3 – S2	50	kontinuálně continually	neodtěžováno not unloaded	106
A3 – S3	40	kontinuálně continually	neodtěžováno not unloaded	124
A3 – S4	50	kontinuálně continually	neodtěžováno not unloaded	154



Tab. 2 Výsledky zatěžování zbytků segmentů prostým tlakem (L – levá část, P – pravá část)

Table 2 Results of uniaxial compression of the remainders of segments (L – left-hand part, P – right-hand part)

Segment	Množství drátků (kg/m <sup>3</sup> ),	Přírůstek síly (kN)	Snižování zatížení na hodnotu (kN)	Síla při vzniku první trhliny (kN),	Síla při vzniku trhliny přes celou tloušťku segmentu (kN)	Maximální dosažená působící síla (kN)
Segment	Amount of steel fibres (kg/m <sup>3</sup> )	Increments in force (kN)	Load decreasing to the value of (kN)	Force in origination of first crack (kN)	Force at the origination of crack throughout segment thickness (kN)	Maximum acting force reached (kN)
K	50	300	90	4200	4200	7247
S1 – L	40	600	200	6000	6000	6600
S2 – L	50	600	200	4800	4800	7500
S3 – L	40	600	200	6000	6000	6600
S3 – P	40	600	200	6000	6000	7480
S4 – L	50	600	200	5400	6000	8300
S4 – P	50	600	200	6000	6600	7900

deformací“ bylo získání celého pracovního diagramu včetně sestupné větve. K ukončení zkoušky bylo přistoupeno teprve tehdy, když prvek neunesl svoji vlastní tíhu. Daným způsobem byly zkoušeny čtyři drátkobetonové segmenty A3. Výsledky zkoušek jsou patrné z tab. 1.

Před dosažením maximální zatěžovací síly se v pásu proměnné šířky na spodní ploše segmentu začaly objevovat drobné trhliny, které se postupně rozvíjely a následně se lokalizovaly do jediné trhliny (obr. 4 a 5). Ta se postupně rozevírala, čemuž odpovídal příslušný pokles zatěžovací síly. Během rozvírání trhliny bylo možné přímo v trhlíně sledovat postupné vytažování drátků. Bylo zaznamenáno typické šíření trhlin v betonu s rozptýlenou výztuží, kdy se v těsném okolí nejvíce namáhaného průřezu vytváří řada velmi tenkých trhlin, z nichž se jedna později propaguje dále.

Rovněž je zajímavé, že nevyšší a nejnižší únosnosti bylo dosaženo na vzorcích vyztužených 50 kg/m<sup>3</sup>, zatímco vzorky vyztužené 40 kg/m<sup>3</sup> vykazují podobnou únosnost. Hodnoty byly získány vždy jen na dvou vzorcích, nelze je proto považovat za statisticky významné. Přesto se nabízí vysvětlení, že beton s množstvím 50 kg/m<sup>3</sup> drátků je již obtížněji mísitelný, lze tedy obtížněji zajistit rovnoměrné rozptýlení drátků, a proto dochází k většímu rozptýlu v únosnosti. Zřejmě v případě realizovaných zkoušek byl testován jeden segment s velmi vhodným a druhý segment s velmi nevhodným rozptýlením drátků. Záměrně je použit termín vhodný místo rovnoměrný. Vysoká únosnost může být dána soustředěním drátků při dolním povrchu prvku – tedy v tažené oblasti. To může být způsobeno např. intenzivní vibrací. Nejedná se tedy o jev veskrze příznivý, neboť lze usuzovat, že naopak únosnost při opačném směru namáhání (tah v horní části prvku) bude úměrně snížena. Ve skutečnosti jsou segmenty namáhány v obou směrech.

## 5 ZATÍŽENÍ ZBYTKŮ SEGMENTŮ PROSTÝM TLAKEM

Při dané zkoušce byly zkoušeny zbytky segmentů, které vznikly při ohybovém zatěžování segmentů kolmo na rovinu segmentů. Zbytky segmentů byly zatěžovány prostým tlakem ve svislém směru. Působící síla byla zvyšována s přírůstkem 600 kN a mezi jednotlivými zatěžovacími stupni byl zbytek segmentu odtížen na hodnotu 200 kN. Zbytek segmentu byl zatěžován až do vyčerpání kapacity. Daným způsobem bylo zkoušeno šest zbytků segmentů a jeden segment K. Výsledky zkoušek jsou patrné z tab. 2.

Na rozdíl od předchozí zkoušky byl segment zatěžován ve svislé poloze, a proto byl dobře pozorovatelný vznik trhlin na

Another interesting thing is that the highest and lowest values of the loading capacity were reached on samples reinforced with 50 kg/m<sup>3</sup> of fibres, whilst samples reinforced with 40 kg/m<sup>3</sup> exhibit similar loading capacity. The values were always obtained only on two samples, it is therefore impossible to consider them to be statistically significant. In spite of that, an explanation offers itself that concrete with the amount of steel fibres of 50 kg/m<sup>3</sup> is already more difficult to mix and it is therefore more difficult to secure even dispersing of steel fibres and large scattering of the loading capacity values therefore occurs. It is likely that, in the case of the conducted tests, one segment with very favourably dispersed fibres was tested, whilst the dispersion in the other segment was very unfavourable. The term ‘favourable’ is used instead of ‘even’ on purpose. The high loading capacity can be caused by the concentration of steel fibres at the bottom surface of the element, i.e. in the tensioned area. This may be caused, for example, by intense vibration. It is therefore not an entirely favourable phenomenon because of the fact that it is possible to presume on the contrary that the loading capacity in the case of the opposite direction of loading (tensioning in the upper part of the element) will be proportionally reduced. In reality, segments are loaded in both directions.



Obr. 4 Segment zatížený ohybem kolmo na rovinu segmentu po porušení (pohled zespoda)

Fig. 4 A segment loaded by bending perpendicular to the segment plane (view of the underside)



Obr. 5 Segment zatížený ohybem kolmým na rovinu segmentu po porušení (boční pohled)

Fig. 5 A segment loaded by bending perpendicular to the segment plane after becoming broken (side view)

vnitřním i vnějším líci segmentu. První trhliny se lokalizují na vnitřním povrchu nad nikou pro šroub. Dále se trhliny šíří nikou většinou podél jedné hrany. Je evidentní, že oslabení nikou působí nepříznivě a vede k lokalizaci napětí do hran. Lze tedy konstatovat, že hranatý tvar nik je nevhodný, oblý tvar by byl vhodnější. Během dalšího zatěžování se trhliny rozvíjely směrem dolů v jednom nebo více pásech pod nikou, nebo mírně stranou. Postupně se všechny trhliny rozvířaly, teprve pak se výrazně lokalizovala jedna z nich, kde následně nastalo rozštípnutí prvku příčnými tahy (obr. 6).

## 6 ZATÍŽENÍ V PROSTÉM TLAKU DVĚMA BŘEMENY

Při dané zkoušce byly segmenty zkoušeny v tlaku, zkouška simulovala zatížení ostění lisy tunelovacího štítu, při kterém je směr působící síly rovnoběžný s podélnou osou tunelové trouby. Zkoušky byly provedeny s působením dvou sil (simulace dvou lisů pomocí masivního roznášecího nosníku – obr. 7). Vzhledem ke způsobu uložení segmentu do zkušebního stroje působily síly svisle. Segmenty byly na vozík zkušebního stroje položeny včetně sololitových desek bez těsnicích pásků. Na horní tlačnou plochu byla osazena jedna deska z novoduru tloušťky 9 mm a jedna deska z ocelového plechu P20 odpovídající dosedacím plochám lisů štítu. Působící síly byly navyšovány v rovnoměrných přírůstcích, po každém navýšení zatěžovací síly byly segmenty odtíženy. Síly byly navyšovány až do vyčerpání kapacity segmentu. Během zkoušky byly zaznamenávány vzniklé trhliny. Celkem byly zkoušeny dva drátko-betonové segmenty A3. Výsledky zkoušek jsou patrné z tab. 3.

Tab. 3 Výsledky zatěžování drátkobetonových segmentů prostým tlakem  
Table 3 Results of uniaxial compression of SFRC segments

Segment	Uspořádání	Množství drátků (kg/m <sup>3</sup> )	Přírůstek síly (kN)	Snižování zatížení na hodnotu (kN)	Vznik první trhliny (kN)	Vznik trhliny přes celou tloušťku segmentu (kN)	Maximální dosažená působící síla (kN)
Segment	Arrangement	Amount of steel fibres (kg/m <sup>3</sup> )	Increments in force (kN)	Load decreasing to the value of (kN)	Origination of first crack (kN)	Origination of crack throughout segment thickness (kN)	Maximum acting force reached (kN)
A3 – S5	2 x F/2	40	1200	400	3600	6000	9000
A3 – S6	2 x F/2	50	1200	400	3600	6000	9300



Obr. 6 Rozštípnutí zbytku segmentu příčnými tahy

Fig. 6 A segment remain split by transverse tensions

## 5 LOADING BY UNIAXIAL COMPRESSION APPLIED TO REMAINS OF SEGMENTS

The particular testing was conducted on the remains of segments which originated during the segment loading by bending perpendicular to the segment plane. The remains of the segments were loaded by uniaxial compression in the vertical direction. The acting force was being increased with 600 kN increments and the remaining segment was unloaded between individual loading stages down to the value of 200 kN. The remainder of the segments was loaded until the loading capacity was exhausted. This particular method was applied to the testing of 6 remainders of segments and one segment K. The testing results are presented in Table 2.

In contrast to the previous test, the segment was loaded in a vertical position; the origination of cracks on both the inner and outer surface of the segment was therefore well observable. First cracks are localised on the inner surface, above the





Obr. 7 Segment zatížený v prostém tlaku dvěma břemeny  
Fig. 7 A segment loaded by uniaxial pressure induced by two loads

Uspořádání zkoušky bylo obdobné jako v předchozím případě, proto byl obdobný i charakter porušení. Zásadní výhodou této zkoušky byla možnost sledování namáhání segmentu v prostoru mezi zatěžovanými místy. Pro tento prostor byl charakteristický vznik tahových namáhání. Trhliny (nejčastěji jedna malá trhлина) se v této části objevily v raných fázích zatěžování. S rostoucím zatížením se již trhлина nerozevírala, omezovala se výhradně na okraj segmentu a rovněž nebyla významná pro snížení únosnosti prvku. Vznik trhliny mezi zatěžovacími místy byl pouze lokální záležitostí, a to přesto, že tato trhлина vznikala jako jedna z prvních. Další rozvoj trhlin byl prakticky identický s případem, kdy bylo zatěžováno jen jedno místo, pouze probíhal téměř paralelně pod oběma zatěžovacími místy. Obvykle byl rozvoj trhlin v okolí jednoho zatěžovacího místa o jeden zatěžovací krok zdržen za druhým místem, což na rozdíl od teorie odpovídalo nahodilostem materiálových charakteristik i náhodné excentricitě zatížení. Zkouška končila možnostmi zatěžovacího stroje, který vyvine celkové zatížení do 9 MN, tedy na jedno zatěžovací místo připadala maximální síla 4,5 MN, což je nižší hodnota oproti únosnosti segmentu.

## 7 KOMPARATIVNÍ ZKOUŠKY ŽELEZOBETONOVÝCH SEGMENTŮ ZATÍŽENÍM V PROSTÉM TLAKU

Při dané zkoušce byly zkoušeny v tlaku železobetonové segmenty. Zkouška simulovala zatížení ostění lisy tunelovacího štítu, při kterém je směr působící síly rovnoběžný s podélnou osou tunelové trouby. Některé zkoušky byly provedeny s působením jedné síly (simulace jednoho lisu), některé zkoušky byly provedeny s působením dvou sil (simulace dvou lisů). Vzhledem ke způsobu uložení segmentu do zkušebního stroje

bolt box. Subsequently the cracks propagate themselves through the box, along one edge. It is evident that the weakening by the box acts in an unfavourable way and leads to the localisation of stress to edges. It is therefore possible to state that the angular shape of the boxes is improper; a rounded shape would have been more proper. During the course of further loading the cracks developed downward, in one or more strips under the box or slightly aside. All cracks were gradually opening and only then did one of them significantly localise itself. The element subsequently got split by transverse tensions in that particular location (see Fig. 6).

## 6 LOADING BY UNIAXIAL COMPRESSION INDUCED BY TWO LOADS

During this particular test, segments were tested in compression; the test simulated the loading induced on the lining by rams of the tunnelling shield, where the direction of the acting force is parallel with the longitudinal axis of the tunnel tube. The tests were carried out with two forces acting (the simulation of two rams by means of a solid distribution beam – see Fig. 7). Taking into consideration the placement of the segment in the testing machine, the forces acted vertically. The segments were placed on the carriage of the testing machine including solit boards without sealing gaskets. One 9 mm thick hardened PVC plate and one steel sheet P20 plate matching the area of contact of the shield rams were fitted to the upper compressed surface. The acting forces were increased in equal increments; after each increasing of loading forces, the segments were unloaded. The forces were increased until the loading capacity of the segment was exhausted. The cracks which originated during the test were recorded. In total, two SFRC segments A3 were tested. The testing results are presented in Table 3.

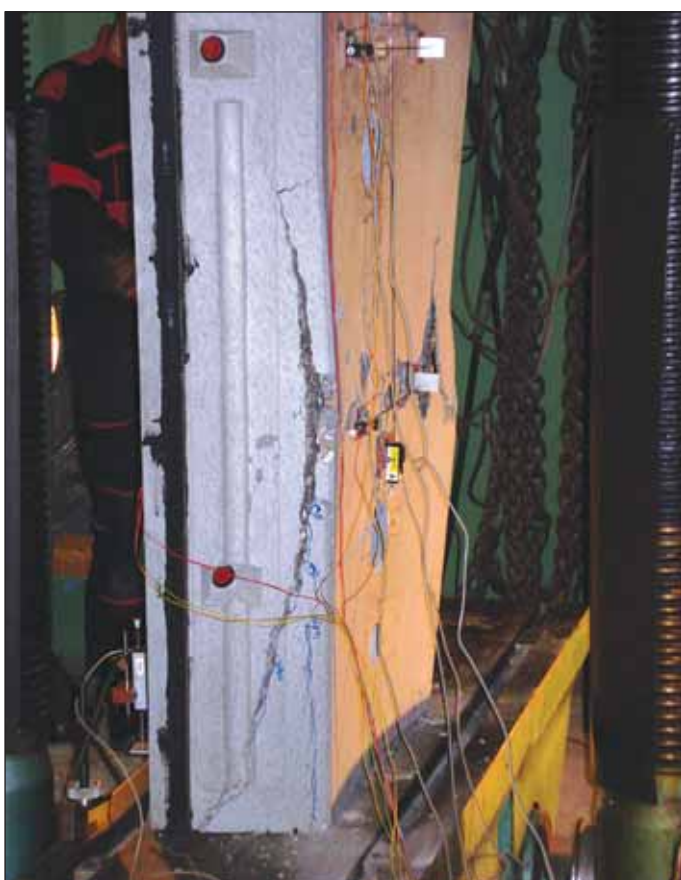
The test arrangement was similar to that used in the previous case, the character of the disturbance was therefore also similar. The principal advantage of this test was that it was possible to observe the segment stressing in the space between the points being subjected to loading. This space was characterised by the origination of tensile stresses. Cracks (most frequently one small crack) appeared in this part during the early phases of the loading process. The crack no more opened with the increasing load; it restricted itself solely to the edge of the segment. In addition, it was not significant for the reduction of the element load-bearing capacity. The origination of the crack between the points of loading was only a local matter, despite the fact that this crack originated as one of the first cracks. The subsequent development of cracks was virtually identical with the case where only a single point was loaded, with the only difference that it ran nearly in parallel under both loading points. The development of cracks in the surroundings of one loading point was usually delayed for one loading step. As opposed to theory, it corresponded to the accidental nature of material characteristics and the accidental eccentricity of the loads. The test ended when the capacity of the loading machine (the total load force of 9 MN) was exhausted. At that moment the maximum force attributed to one loading point reached 4.5 MN, which value is lower than the loading capacity of the segment.

## 7 COMPARATIVE UNIAXIAL COMPRESSION LOADING TESTS OF TRADITIONALLY REINFORCED CONCRETE SEGMENTS

These compression tests were conducted on traditionally reinforced concrete segments. The test simulated the lining loading by rams of the tunnelling shield, where the direction

Tab. 4 Výsledky zatěžování železobetonových segmentů prostým tlakem  
 Table 4 Results of uniaxial compression of traditionally reinforced concrete segments

Segment	Uspořádání	Množství drátků (kg/m <sup>3</sup> )	Přírůstek síly (kN)	Snižování zatížení na hodnotu (kN)	Vznik první trhliny (kN)	Vznik trhliny přes celou tloušťku segmentu (kN)	Maximální dosažená působící síla (kN)
Segment	Arrangement	Amount of steel fibres (kg/m <sup>3</sup> )	Increments in force (kN)	Load decreasing to the value of (kN)	Origination of first crack (kN)	Origination of crack throughout segment thickness (kN)	Maximum acting force reached (kN)
K	1 x F	105	300	90	3300	3300	5868
B	1 x F	105	600	200	5400	5400	8448
C	2 x F/2	105	1000	300	6000	6000	8608
A1	1 x F	105	600	200	4800	4800	7235
A2	2 x F/2	105	1200	400	4800	5800	–
A1	1 x F	105	600	200	5400	5400	7260
A3	2 x F/2	105	1200	400	6000	7200	8960



of the acting force is parallel with the longitudinal tunnel tube axis. Some tests were carried out with the action of a single force (the simulation of a single ram), some tests were conducted with two forces acting (the simulation of two rams). Taking into consideration the system of the placement of the segment in the testing machine, the forces acted vertically. The segments were placed on the carriage of the testing machine including sololit boards without sealing gaskets (with the exception of segment K, which was tested with gaskets on it). One 9 mm thick hardened PVC plate and



Obr. 8–11 Delaminace železobetonových segmentů zatížených prostým tlakem  
 Figures 8–11 Delamination of traditionally reinforced concrete segments loaded by unilateral pressure



Tab. 5 Výsledky zatížení segmentů ohybem v rovině segmentu  
Table 5 Results of segment loading by bending in the segment plane

Segment	Množství drátků (kg/m <sup>3</sup> )	Přírůstek síly (kN)	Snižování zatížení na hodnotu (kN)	Vznik první trhliny (kN)	Vzniku trhliny přes celou tloušťku segmentu (kN)	Maximální dosažená působící síla (kN)
Segment	Amount of steel fibres (kg/m <sup>3</sup> )	Increments in force (kN)	Load decreasing to the value of (kN)	Origination of first crack (kN)	Origination of crack throughout segment thickness (kN)	Maximum acting force reached (kN)
A3 – S11	50	100	neodtěžováno / unloaded	200	400	500
A3 – S12	50	100	neodtěžováno / unloaded	300	560	753
A3 – S13	40	100	neodtěžováno / unloaded	300	530	629
A3 – S14	40	100	neodtěžováno / unloaded	300	500	610
A1 – S15	105	100	neodtěžováno / unloaded	300	370	610
A2 – S16	105	100	neodtěžováno / unloaded	200	350	991

působily síly svíse. Segmenty byly na vozík zkušebního stroje položeny včetně sololitových desek bez těsnící gumy (pouze segment K byl zkoušen s těsněním) a na horní tlačnou plochu byla osazena jedna deska z novoduru tloušťky 9 mm a jedna deska z ocelového plechu P20 odpovídající dosedacím plochám lisů štítu. Působící síly byly navyšovány v rovnoměrných přírůstcích, po každém navýšení zatěžovací síly byly segmenty odtíženy. Síly byly navyšovány až do vyčerpání kapacity segmentu, přičemž během zkoušky byly zaznamenávány vznikající trhliny. Celkem bylo zkoušeno 7 železobetonových segmentů (2xA1, A2, A3, K, B, C), všechny zkoušené segmenty byly vyztužené 105 kg/m<sup>3</sup> prutové výztuže. Uspořádání zkoušek a výsledky zkoušek jsou patrné z tab. 4.

I když je tento článek zaměřen především na segmenty s rozptýlenou výztuží, tak je jistě namístě uvést také porovnání se zkouškami železobetonových prvků. Zkoušky byly uspořádány identicky jako v případech drátkobetonových segmentů. Hodnoty zatížení při vzniku trhlin procházejících celou tloušťkou prvku jsou u železobetonových i drátkobetonových segmentů téměř shodné. Rovněž únosnost klasického železobetonového segmentu je srovnatelná s drátkobetonovým, nicméně způsob porušení je zcela odlišný. Železobetonový segment byl ve všech dosud testovaných případech porušen v ploše rovnoběžné se střednicovou plochou. Došlo tedy k delaminaci materiálu, kdy se při vyčerpání únosnosti oddělila krycí vrstva a uvnitř prvku vzniklo jádro betonu sevřeného výztuží (obr. 8–11). Při krytí výztuže 5 cm a tloušťce segmentu 25 cm mělo jádro tloušťku pouhých 15 cm.

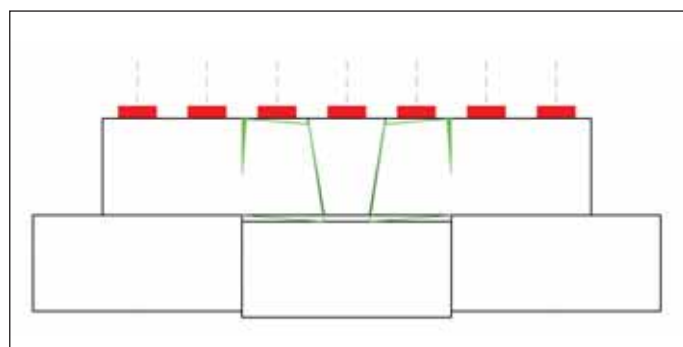
## 8 ZATÍŽENÍ SEGMENTŮ OHYBEM V ROVINĚ SEGMENTU

Při dané zkoušce byly segmenty zkoušeny v ohybu v rovině segmentu, zkouška simulovala zatížení ostění lisů tunelovacího štítu při nerovnoměrném podložení segmentů (tj. simulace posunutě geometrie předchozího prstence – obr. 12). Segmenty byly zatíženy jedním břemenem umístěným na kraji segmentu. Opačný okraj segmentu byl uchycen, aby bylo zabráněno svislému posunu. Dále byl segment nesymetricky podložen na straně uchycení tak, aby zatěžovaná polovina segmentu nebyla podepřena. Působící síla byla zvyšována s přírůstkem 100 kN bez odtěžování až do vyčerpání kapacity. Daným způsobem bylo zkoušeno šest segmentů A (4 drátkobetonové se 40 a 50 kg/m<sup>3</sup> drátků, dva železobetonové se 105 kg/m<sup>3</sup> výztuže). Výsledky zkoušek jsou patrné z tab. 5.

Uvedené zkoušky byly charakteristické nízkými hodnotami sil, při nichž začaly vznikat trhliny. Trhliny se lokalizovaly v prostoru nad nikou pro šroub a pak se dále šířily směrem

one steel sheet P20 plate matching the area of contact of the shield rams were fitted to the upper compressed surface. The acting forces were increased in equal increments; after each loading forces increasing, the segments were unloaded. The forces were increased until the loading capacity of the segment was exhausted. The cracks which originated during the test were recorded. In total, 7 traditionally reinforced concrete segments (2xA1, A2, A3, K, B, C) were tested. All of the tested segments were reinforced with 105 kg/m<sup>3</sup> of steel bars. The arrangement of tests and testing results are presented in Table 4.

Even though this paper is first of all focused on steel fibre reinforced concrete segments, it is certainly in order to present the comparison with the tests of steel bar reinforced concrete elements. These tests were carried out identically with the tests of the SFRC segments. The values of the loading applied at the moment of the origination of cracks running throughout the thickness of the element are nearly identical for both the steel bar reinforced concrete segments and steel fibre reinforced concrete segments. Even the load-carrying capacity of the traditionally reinforced concrete segment is comparable with that of a SFRC segment; nevertheless, the failure mode is totally different. The traditionally reinforced concrete segment was in all tested cases disturbed in the plane parallel with the central plane. It means that the material became delaminated, with a cover layer separated after the load-carrying capacity was exhausted and a core of concrete clamped between reinforcing bars originated inside the element (see Figures 8-11). At the concrete cover to the reinforcement of 5 cm and the thickness of the segment of 25 cm, the core was a mere 15 cm thick.



Obr. 12 Grafické znázornění nerovnoměrného podepření segmentů  
Fig. 12 Graphical depiction of non-uniform support of segments



Obr. 13 a 14 Porušení drátkobetonového segmentu zatíženého ohybem v rovině segmentu

Figures 13 and 14 Steel fibre reinforced concrete segment broken by loading by bending in the segment plane

dolů. U segmentů vyrobených z drátkobetonu bylo možné pozorovat vznik řady nepatrných trhlin, z nichž se jedna postupně rozevírala a následně došlo ke ztrátě únosnosti (obr. 13 a 14). Železobetonové segmenty byly porušeny odlišně, vznikla jedna trhlina, která se rozevírala a začala se větvit teprve při dosažení vysokého zatížení (obr. 15). Meze únosnosti nebylo dosaženo, avšak takto zatížený prvek by byl zcela nevyhovující (s ohledem na rozevření trhlin v ostění).

Charakter odezvy na zatížení byl u zkoušených materiálů zcela odlišný, ovšem z hlediska použitelnosti lze považovat materiály za srovnatelné.

Obecně lze v případě obou materiálů konstatovat, že segmenty jsou křehké a náchylné na porušení již při nízkých silách. Vznik trhlin při 300 kN a propagace trhlin na plnou tloušťku segmentu při 500 kN znamená v porovnání

## 8 SEGMENT LOADING BY BENDING IN THE SEGMENT PLANE

During this particular test, segments were subjected to bending in the segment plane. The test simulated the tunnel lining loading by rams of the tunnelling shield at a uniform support of segments (i.e. the simulation of the shifted geometry of the previous ring – see Fig. 12). The segments were loaded by a single load acting on the segment edge. The opposite edge of the segment was clamped so that vertical shifting was prevented. In addition, the segment was supported non-symmetrically on the side of the clamping so that the segment half exposed to loading was not supported. The acting force was increased with 100 kN increments, without unloading, until the load-bearing capacity was exhausted. This procedure was used for the testing of 6 segments A (4 steel fibre reinforced concrete segments with 40 and 50 kg/m<sup>3</sup> of fibres, 2 traditionally reinforced concrete ones with 105 kg/m<sup>3</sup> of reinforcement). The results are presented in Table 5.

The above-mentioned tests were characterised by low values of forces at which cracks started to originate. The cracks localised themselves in the area above the box for a bolt and continued to extend downwards. It was possible at the segments produced from steel fibre reinforced concrete to observe the origination of numerous minute cracks; one of them gradually opened and, subsequently, the load-carrying capacity got exhausted (see Figures 13 and 14). The traditionally reinforced concrete segments were disturbed in a different way. One crack originated and started to open; it started to branch out only when a high load value was reached (see Fig. 15). Failure limits were not reached, but the element loaded in this way was completely unsatisfactory (with respect to the extension of cracks in the lining).

The character of the response of the tested materials to the loading was totally different, but the materials can be considered to be comparable as far as the serviceability is concerned.

In general, it is possible to state in the case of both materials that the segments are brittle and susceptible to fracturing even when loaded by small forces. The origination of cracks at 300 kN and the propagation of cracks to throughout thickness of the segment at 500 kN, if compared with the design load of 2400 kN, means significant problems with the serviceability of segments. The deformation (the deflection of the element subjected to bending) of about 1 mm on the origination of cracks and about 2 mm on the origination of cracks running throughout the element thickness, which values are very low, corresponds to this information. The deflection at the failure load of the SFRC elements varied around 6 mm. The rigidity of the lining providing support for the machine thrust forces is relatively low because the rubber gaskets sealing the joints can be subject to creeping. It follows from the results of the experiment that the difference in the position (pushing in) of two neighbouring segments of 1-2 mm means significant risk of the origination of a crack in the segment, which may affect the waterproofing capacity of the lining in the case it propagates throughout the segment thickness. It is therefore necessary during the course of the excavation to secure uniform support of the segments being subjected to loading, which means that the lining has to be installed as accurately as possible so that the origination of cracks is prevented. In addition, the above-mentioned factor should be taken into consideration when the arrangement of segments is being designed – which can



s návrhovým zatížením 2400 kN značné problémy použitelnosti segmentů. Tomu odpovídá deformace (průhyb ohýbaného prvku) cca 1 mm při vzniku trhlin a cca 2 mm při vzniku trhlin na plnou tloušťku prvku, což jsou hodnoty velmi nízké. Průhyb na mezi únosnosti drátkobetonových prvků se pohyboval kolem 6 mm. Tuhost ostění jako podpory pro přítlak stroje je poměrně nízká, neboť se mohou dotlačovat spoje těsněné gumovými pásy. Z výsledků experimentu vyplývá, že rozdíly v poloze (zatlačení) dvou sousedních segmentů 1–2 mm znamená tedy značné riziko vzniku trhliny v segmentu, která při propagaci na celou tloušťku segmentu může ovlivnit vodonepropustnost ostění. Během ražby je proto nezbytné zajistit rovnoměrné podepření zatěžovaných segmentů, což znamená co nejpřesnější instalaci ostění, aby nedošlo ke vzniku trhlin. Uvedený faktor by měl být také zohledněn při návrhu uspořádání segmentů, které může být v porovnání s posuzovaným uspořádáním výhodnější.

## 9 ZÁVĚR

Provedené experimentální testování drátkobetonových a železobetonových segmentů přineslo velké množství velmi cenných informací. Přírozeně nejdůležitější byly informace o únosnosti segmentů (velikost maximálního zatížení, které segmenty přenesou) a o použitelnosti segmentů (vznik prvních trhlin, propagace trhliny přes celou tloušťku segmentu) při různých způsobech zatěžování. Výsledky výzkumu prokázaly, že ostění vyrobené z drátkobetonu ve specifikovaných podmínkách může nahradit ostění železobetonové. Z hlediska mezního stavu použitelnosti lze spatřovat určité výhody ve větším rozptýlení trhlin, což vede k menšímu riziku ovlivnění vodopropustnosti.

Obdobně byly také značným přínosem zkušenosti s technologií výroby drátkobetonových segmentů, která v porovnání s tradičními železobetonovými segmenty přináší řadu problémů, které bylo nutné vyřešit. Obecně lze konstatovat, že množství drátků 50 kg/m<sup>3</sup> a 40 kg/m<sup>3</sup> vede k mechanickým vlastnostem, které jsou srovnatelné. S ohledem na malé množství zkoušek nelze výsledky věrohodně statisticky vyhodnotit a porovnat. Lze však usuzovat, že při použití většího množství drátků nastávají větší problémy s rovnoměrným rozptýlením drátků v betonu. Tento technologický problém je nutné řešit během běžné velkovýroby betonu s využitím profesionálních dávkovacích a rozptylovacích zařízení pro drátky. Drátky během výroby betonových vzorků pro experimenty byly dávkovány ručně, kdy lze jen stěží zajistit reprodukovatelnost výrobku se stejným výsledkem.

V oboru segmentového ostění se jednalo o první ucelený soubor experimentálních výsledků na moderních tunelových segmentech skutečné velikosti v ČR. Ukazuje se, že odezva na zatížení segmentů má zcela jiný charakter než u malých vzorků (tj. testovací trávce délky 70 cm). Nelze tedy výsledky experimentu na malých vzorcích aplikovat na celé konstrukce jednoduchými výpočetními postupy (teorie pružnosti).

Na základě provedených zkoušek byly provedeny i zpětné numerické výpočty pomocí metody konečných prvků v programu ATENA (Havlásek a kol., 2011), které umožnily odvození některých důležitých parametrů zkoušeného materiálu. Pro zodpovědnou numerickou analýzu je třeba využít dostatečně sofistikované analytické vybavení zohledňující energetické principy modelování rozvoje trhlin. Realizovaný komplexní soubor experimentů vedl k získání dat pro výpočty, kterými by bylo možné spolehlivě modelovat odezvu reálných prvků na požadované zatížení. Výsledky experimentu podpořily fakt, že na návrh segmentů je třeba pohlížet velmi komplexně a vzít v úvahu řadu návrhových faktorů. Úzký a jednostranný pohled na problematiku vede k zanedbání některých vlivů, které pak



Obr. 15 Porušení železobetonového segmentu zatíženého ohybem v rovině segmentu

Fig. 15 Traditionally reinforced concrete segment disturbed by loading by bending in the segment plane

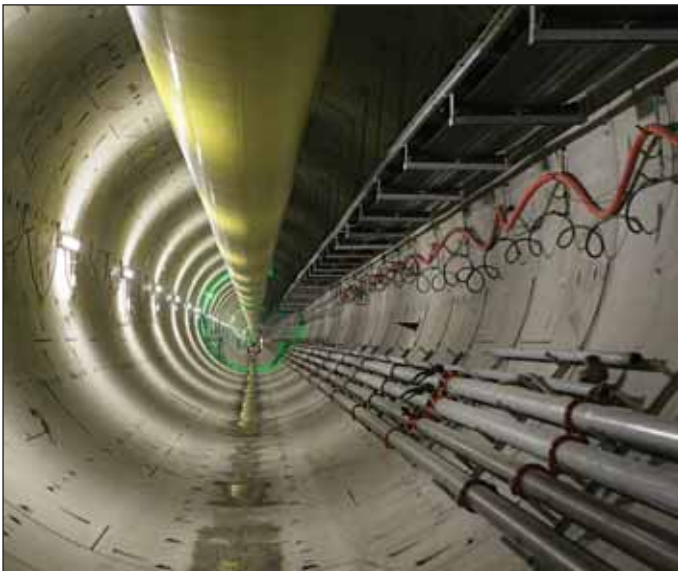
be more advantageous if compared with the arrangement being assessed.

## 9 CONCLUSION

The completed experimental testing of SFRC segments and traditionally reinforced concrete segments brought a big amount of very precious information. Naturally, the information on the load-bearing capacity of segments (the magnitude of the maximum load the segments can carry) and on the serviceability of the segments (the origination of first cracks, crack propagation throughout the segment thickness) at various manners of loading is of the highest importance. The results of the tests proved that a lining produced from steel fibre reinforced concrete in specified conditions can replace traditionally reinforced concrete segments. As far as the limit state of serviceability is concerned, it is possible to consider the greater scattering of cracks, leading to the smaller risk of influencing the waterproofing capacity, to be certain advantage.

Similarly significant contribution lied in the experience with the technology of the production of SFRC segments, which, in comparison with traditionally reinforced concrete segments, brings numerous problems which had to be solved. In general, it is possible to state that the amount of steel fibres of 50 kg/m<sup>3</sup> and 40 kg/m<sup>3</sup> leads to mechanical properties which are comparable. Because of the small number of tests it is not possible to credibly statistically assess and compare the results. However, it is possible to conclude that bigger problems with the dispersion of steel fibres in concrete occur when a greater amount of fibres is used. This technological problem has to be solved during common large-volume production of concrete using professional steel fibre dosing and dispersion equipment. During the course of the production of concrete samples for experiments, steel fibres were dosed manually; at this process it was therefore difficult to secure reproducibility of the product with an identical result.

In the field of segmental linings this was the first comprehensive set of results of experiments on modern real-size tunnel lining segments in the Czech Republic. It has turned out that the character of the response to segment loading



Obr. 16 Segmentové ostění tratového tunelu trasy A pražského metra  
Fig. 16 Segmental lining of a running tunnel on the Line A of Prague metro

mohou komplikovat proces provádění i dosažení požadovaných užitečných vlastností prefabrikovaného ostění tunelu.

Po zohlednění výsledků provedeného výzkumu bylo rozhodnuto, že vyrobené drátkobetonové segmenty splňují veškeré požadavky kladené na ostění pražského metra. Mohly být proto vyrobeny a smontovány prstence (v počtu 10 prstenců, tj. 15 bm tunelu) zkušebního úseku ostění v trase A pražského metra z drátkobetonových segmentů (s dávkováním drátku 40 kg/m<sup>3</sup>). Dané ostění bylo instalováno na tratovém tunelu uvedené stavby v červnu 2012 (obr. 16). Po prohlídce osazeného zkušebního úseku bylo ověřeno, že na daných segmentech nevznikly žádné trhliny.

Výsledky byly získány za finanční podpory z prostředků Grantové agentury České republiky (GAČR) v rámci projektu 104/10/2023 „Vývoj a ověření vlastností vláknobetonu splňujícího současné požadavky pro prefabrikovaná ostění dopravních tunelů“.

DOC. ING. MATOUŠ HILAR, Ph.D.,  
matous.hilar@fsv.cvut.cz,

FSv ČVUT v Praze a 3G Consulting Engineers, s. r. o.,  
DR. ING. PETR VÍTEK, petr.vitek@metrostav.cz,  
METROSTAV, a. s.

Recenzoval: Ing. Pavel Polák

completely differs from the character determined in the cases of small samples (i.e. testing beams 70 cm long). It is therefore impossible to apply results of experiments on small samples to complete structures using simple calculation procedures (the theory of elasticity).

Even backward calculations using the Finite Element Method in the ANTENA program (Havlásek et al., 2011) were carried out on the basis of the completed tests. Owing to them the deriving of some important parameters of tested materials was possible. A responsible numerical analysis requires the use of sufficiently sophisticated analytical equipment taking into account energetic principles of modelling the development of cracks. The completed comprehensive set of experiments led to the obtaining of data for calculations which could be used for reliable modelling of the response of real elements to the required loading. The experiment results supported the fact that a segment design must be viewed in a very comprehensive manner and a range of design factors must be taken into consideration. A narrow and one-sided view of the problems leads to neglecting of some influences, which may subsequently complicate the process of the execution of pre-cast tunnel lining and reaching required end-use properties of the lining.

The conclusion was made after taking into account the results of the completed research that the produced SFRC segments meet all requirements placed on the lining of Prague metro. For that reason lining rings were produced and assembled (10 rings, i.e. 15 lm of the tunnel) on a trial section on the alignment of the Line A of Prague metro, using steel fibre reinforced concrete segments (with dosing of steel fibres of 40 kg/m<sup>3</sup>). This lining was installed on a running tunnel of the above-mentioned construction in June 2012 (see Fig. 16). It was verified after the inspection of the completed trial section that no cracks originated on the particular segments.

The results were obtained with financial support from the means of the Grant Agency of the Czech Republic (the GAČR) within the framework of the project No. 104/10/2023 “The development and verification of properties of fibre reinforced concrete meeting current requirements for pre-cast lining of transport tunnels”.

DOC. ING. MATOUŠ HILAR, Ph.D.,  
matous.hilar@fsv.cvut.cz,

FCE CTU in Prague and 3G Consulting Engineers,  
s. r. o.,  
DR. ING. PETR VÍTEK, petr.vitek@metrostav.cz,  
METROSTAV, a. s.

## LITERATURA / REFERENCES

- Vokáč, M., Bouška, P. *Experimentální zkoušky segmentů prefabrikovaného ostění metra*. Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2011
- Vokáč, M., Bouška, P. *Experimentální zkoušky segmentů z drátkobetonu prefabrikovaného ostění metra*. Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2011
- Hilar, M., Beňo, J. Segmentová ostění tunelů z drátkobetonu. *Tunel* 3/2012
- Vodička, J., Krátký, J., Hilar, M., Ráček, V. *Structural SFRC for Precast Segments of the Tunnel Lining*. 8th Central European Congress on Concrete Engineering „Durability of Concrete Structures“. Plitvice, 2012
- Hilar, M., Vítek, J., Vítek, P. *Testing of SFRC Tunnel Segments*. *Proceedings of the World Tunnelling Congress*. Bangkok, 2012, s. 311–313
- Sajdllová, T., Pukl, R. *Identifikace materiálových parametrů pro nelineární modelování drátkobetonových konstrukcí*. Betonářské dny, 2011
- Havlásek, P., Pukl, R., Červenka, V. *Počítačová simulace testů železobetonových a drátkobetonových tunelových segmentů*. Betonářské dny, 2011
- Froněk, M. *Ostění tunelů z vláknobetonových segmentů*. Bakalářská práce. FSv ČVUT v Praze, 2011
- Vítek, P., Šebesta, B. *Segmentové ostění tunelů metra*. Betonářské dny, 2010.



# TUNEL BLANKA, TUNEL DO HISTORIE PRAHY

## BLANKA TUNNEL, A TUNNEL TO PRAGUE HISTORY

IVA HERICOVÁ, IVANA FRIDRICOVÁ-SÝKOROVÁ, KATEŘINA TOMKOVÁ

### ÚVOD

Archeologický výzkum prováděný Archeologickým ústavem AV ČR Praha, v. v. i. provází výstavbu tunelového komplexu Blanka v úseku Špejchar – Střešovice od jejího počátku v roce 2008. Výzkum je koncipován jako rozsáhlá krajinná sonda, která umožňuje nahlédnout do minulosti severního a západního předpolí Pražského hradu a Hradčan. Specifikem je možnost studia pozůstatků lidských aktivit v kontextu s vývojem reliéfu historické krajiny i georeliéfu a jeho geneze, což je dáno abnormálními hloubkami stavebních jam sahajícími za hranice běžných stavebních prací. Význam archeologického výzkumu je ovlivněn nejen exponovaností prostoru v těsné blízkosti Pražské památkové rezervace a Národní kulturní památky Pražský hrad, ale i skutečností, že těžební práce navždy a s definitivní platností odstraňují paměť rozsáhlého výseku zdejší krajiny od starších čtvrtohor po současnost.

### METODY PRÁCE

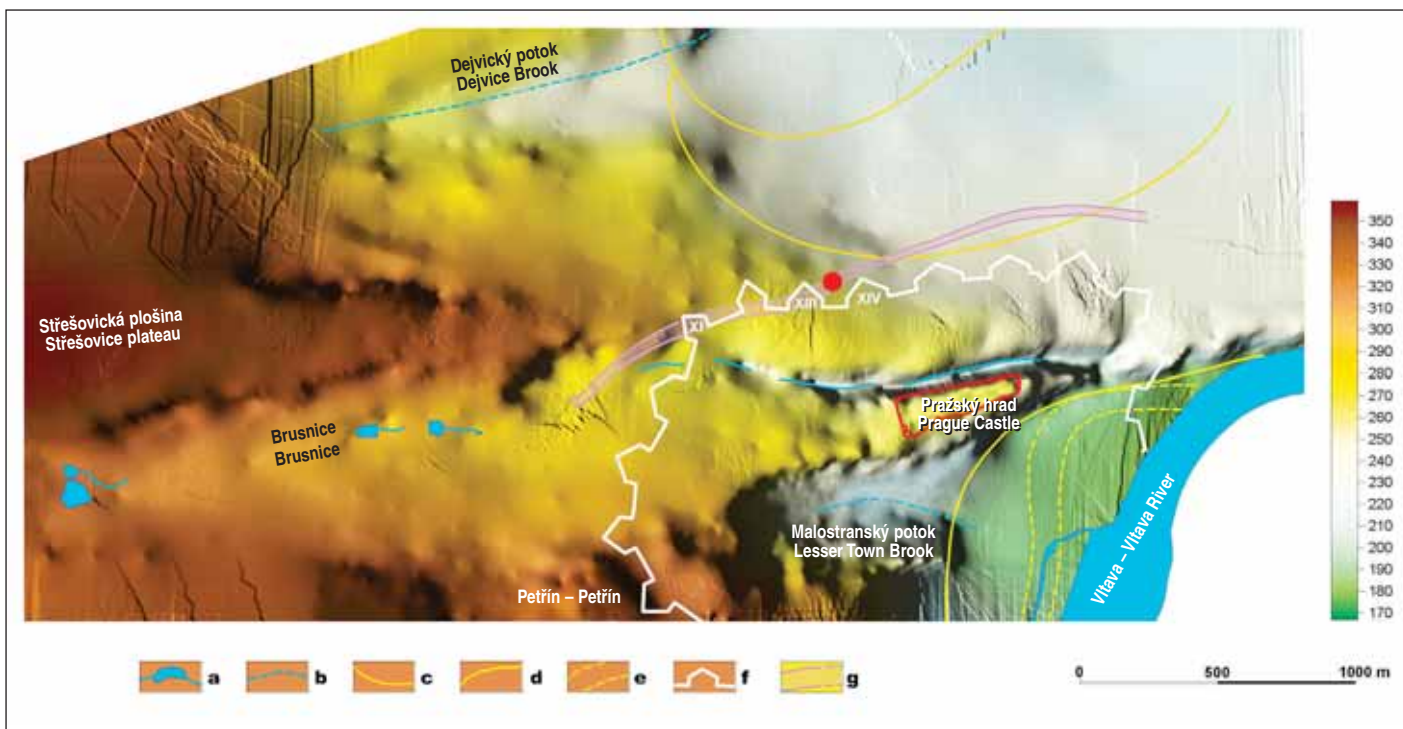
Archeologický výzkum při stavbě tunelového komplexu Blanka si vyžádal vytvoření vlastní metodiky, která spočívá v aplikaci standardních oborových metod (dokumentace vertikálních řezů, dílčí plošná sondáž, celoplošný výzkum) v nestandardních podmínkách několik let kontinuálně probíhajících stavebních prací. Neustává ani za obtížných klimatických podmínek a musí respektovat harmonogram stavby či s ním být harmonizován. Od počátku je akce prezentována jako

### INTRODUCTION

Archaeological research carried out by the Institute of Archaeology of the Czech Academy of Sciences, Prague, v. v. i., has accompanied the construction of the Blanka complex of tunnels within the Špejchar-Střešovice section since the beginning of the works in 2008. The investigation is conceived as an extensive landscape probe making a view into the past of the northern and western surroundings of Prague Castle and Hradčany. A specific feature lies in the possibility of studying remains of human activities in the context of the development of the relief of the historic landscape and the georelief and its genesis, which is possible owing to the abnormal depths of construction pits reaching beyond the limits of common construction works. The significance of the archaeological research is influenced not only by the exposed character of the space found in close vicinity of the Prague Conservation Area and Prague Castle, a national cultural monument, but also by the fact that ground excavation operations forever and with definite force remove the memory of an extensive section of this landscape from the Pleistocene to the present.

### WORK METHODS

The archaeological excavation carried out during the course of the construction of the Blanka complex of tunnels required its own



Obr. 1 Model současného povrchu terénu části území vnitřní Prahy na levém břehu Vltavy (katastrální území Břevnov, Střešovice, Dejvice, Hradčany a Malá Strana; hmotově eliminováno těleso barokní fortifikace) a) nádrže a otevřená koryta vodotečí, b) rekonstruovaný průběh zaniklých toků, c) rozsah dvou terasových stupňů středopleistocénní Vltavy, d) rozsah holocénní nivy Vltavy, e) zaniklé holocénní rameno Vltavy, f) barokní fortifikace, g) trasa budovaného tunelového komplexu Blanka, hloubené a ražené (čárkované) úseky (b–e podle [1] a [2])

Fig. 1 A model of the current surface of the terrain of a part of the area of inner Prague on the left bank of the Vltava River (cadastral districts of Břevnov, Střešovice, Dejvice, Hradčany and Malá Strana-Small Town; the Baroque fortification walls thickness is not indicated) a) reservoirs and open channels of streams, b) reconstructed course of extinct streams, c) the extent of two terrace benches of the Middle Pleistocene Vltava River, d) the extent of the Holocene flood plain of the Vltava River, e) former Holocene arm of the Vltava River, f) the routing of the Baroque fortification, g) the alignment of the Blanka complex of tunnels, cut-and-cover sections and mined sections (dashed) (b–e according to [1] and [2])



Obr. 2 Pleistocenní sprašové komplexy s fosilními půdami dokumentované v prostoru křižovatky M. Horákové/Svatovítská (foto ARÚ Praha)

Fig. 2 Pleistocene loessal complexes with fossil soils documented in the area of the intersection between M. Horákové Street and Svatovítská Street (Photo ARÚ Praha)

**komplexní archeologický výzkum** mapující kulturní (a přírodní) dědictví v časové škále od paleolitu až po 20. století. Základním pilířem výzkumu uloženin je dokumentace vertikálních řezů terénem, která je cestou jak k uchování informace o sekvencích uloženin a objektů, tak k budoucí 3D rekonstrukci georeliéfu a historického reliéfu. Během plošného výzkumu jsou zkoumány konkrétní objekty spojené se sídlištními aktivitami (zahlobené objekty, zdiva, cesty) či pohřbíváním (hroby). Digitalizace dokumentace pořizené v terénu slouží při tvorbě celkových plánů jako zdroj informací i jako ilustrace v budoucích publikacích. Vzorky odebírané z uloženin přispějí k rekonstrukci přírodního prostředí a paleoklimatu. Zpracování shromážděného fondu nálezů, vzorků a informací proběhne po ukončení výzkumu za účasti dalších odborníků z Archeologického ústavu AV ČR i dalších institucí.

## GEOMORFOLOGICKÝ VÝVOJ OD STARŠÍCH ČTVRTOHOR DO SOUČASNOSTI

Jednotlivé zkoumané úseky stavby se nacházejí v geologicko-morfologicky rozdílných oblastech. Východní část od Letné až ke křižovatce Svatovítská – Milady Horákové leží v prostoru formovaném pleistocenním tokem Vltavy, která si své koryto vyhloubila ve staropaleozoickém skalním podkladu. Řeka zasahující svým meandrem hluboko do území dnešních Dejvic zde zanechala akumulace náplavů, které náležejí středopleistocennímu stupni vltavských teras. Po ustoupení koryta k SV se na fluvialní akumulace začaly postupně ukládat svahové a eolické sedimenty tvořící sprašové komplexy s fosilními půdami. Kvartérní vývoj byl v holocénu ukončen vznikem recentní půdy.

Prostřední zkoumané území v blízkosti výše uvedené křižovatky dosahující na západě až k baroknímu bastionu XIII se rozprostírá na severním úbočí návrší, které vybíhá ze středošovicke plošiny a zvolna klesá k letenské pláni. Patu hřbetu tvoří nárazový břeh (terasový stupeň) středopleistocenního meandru Vltavy. Povrch skalního podkladu sklánějící se poměrně prudce k severu pokrývají svahové uloženy a deluviofluvialní sedimenty výplavového kužele. Svah úbočí byl brázděný a erodovaný občasnými toky a splachy, které přinášely materiál od JZ. Jak mocné souvrství se uložilo na patě terasového stupně, ukazuje profil dokumentovaný ve spadišti kanalizace, kde se báze kvartérních sedimentů nachází v hloubce 39 m. V historické době se zásadním způsobem do podoby reliéfu zapsala výstavba barokní fortifikace.

Poslední, západní úsek se rozprostírá na severním svahu údolí potoka Brusnice, podél Patočkovy ulice. Svah byl v minulosti členitý, formovaný vodotečemi a erozí. Během pleistocénu a patrně i holocénu docházelo k ukládání a transportu eolického materiálu silně promíseného s opukovým detritem, jehož zdroj pochází ze svrchnokřídových hornin středošovicke plošiny. Eolické a eolicko-deluvialní sedimenty se staly významnou cihlářskou surovinou, která byla těžena nejintenzivněji v průběhu 19. století. Dobývání cihlářské suroviny poprvé výrazně zasáhlo do podoby údolí. Jsou s ním spojeny i první archeologické

methodology to be developed. It lies in the application of standard professional methods (the documentation of vertical cross sections, large-scale trenches) in non-standard conditions of the several years continually running construction activities. It even does not cease in difficult climatic conditions and has to have regard for the works programme and be harmonised with it. The activity is presented from the beginning as a **comprehensive archaeological research**, mapping the cultural (and natural) heritage within the time scale from the Palaeolithic to the 20<sup>th</sup> century. The basic pillar of the excavation of deposits is the documentation of vertical cross sections through the terrain, which is the way to preserving information on the sequences of deposits and structures and future 3D reconstructions of the georelief and historic relief. Specific structures associated with settlement activities (sunken features, stone and brick masonry, roads) or burials (graves) are investigated during the large-scale excavation. The digitisation of documents provided in situ serve in the process of the creation of general plans as a source of information as well as illustrations for future publications. Samples collected from the deposits will contribute to the reconstruction of the natural environment and paleoclimate. The analysis of the gathered fund of findings, samples and information will take place after the excavation is completed, with the participation of other experts from the Institute of Archaeology of the Czech Academy of Sciences and other institutions.

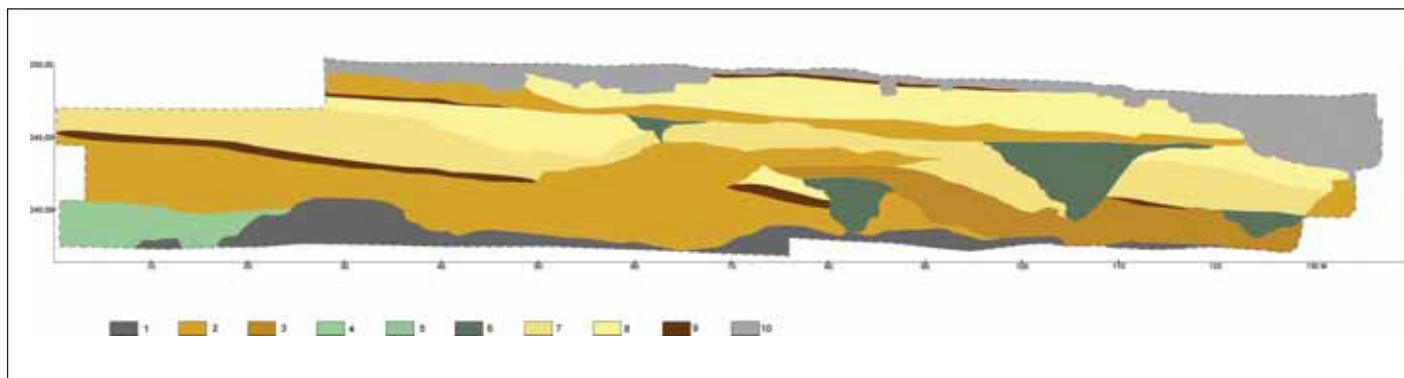
## GEOMORFOLOGICAL DEVELOPMENT FROM THE PLEISTOCENE TO THE PRESENT

The individual excavated construction sections are located in geological-morphological different areas. The eastern part of Letná up to the crossing of Svatovítská Street and Milady Horákové Street lies in the space formed by the Pleistocene flow of the Vltava River, which eroded down its channel through Palaeozoic bedrock. The river paleomeander extended deep into the area of the current district of Dejvice, where left fluvial accumulations, which constitute the part of the Middle Pleistocene bench of the Vltava River terraces. After the channel receded to the NE, deluvial and aeolian sediments forming loess complexes with fossil soils gradually started to be deposited on the fluvial accumulations. The Quaternary development was terminated in the Holocene by the evolution of recent soil.

The central investigated area in the vicinity of the above-mentioned intersection, extending in the west up to the Baroque bastion XIII, spreads out on the northern flank of a rise, which juts out from the Střešovice plateau and gradually descends toward the Letná plateau. The foot of the ridge forms a Middle Pleistocene meander cut-bank (a terrace bench) of the Vltava River. The bedrock surface, sloping relatively steeply toward the north, is covered with colluvial deposits and deluvio-fluvial sediments of an outwash cone. The flank slope was scored and eroded by occasional flows and rain wash, which brought materials from the SW. The thickness of the series of strata deposited at the foot of the terrace bench can be seen in the profile documented in a sewer drop manhole profile, where the base of the Quaternary sediments is found at the depth of 39 m. In the historic period, the development of the Baroque fortification affected the shape of the relief in a fundamental way.

The last section, the western one, spreads on the northern slope of the Brusnice Brook valley, along Patočkova Street. The slope was dissected in the past, formed by streams and erosion. During the Pleistocene and probably even Holocene, aeolian material intensely mixed with Cretaceous marlite detritus the source of which was in Upper Cretaceous rocks forming the Střešovice plateau. The aeolian and aeolian-deluvial sediments became an important brick raw material, which was most intensely dug during the 19<sup>th</sup> century. The extraction of the brick raw material for the first time significantly affected the shape of the valley. Even first archaeological findings are associated with it – from the remains of Pleistocene fauna up to the Early Middle Ages settlement structures and burials. A change





Obr. 3. Generalizovaný řez severní stěnou stavební jámy mezi bastiony XIII a XIV barokního opevnění, 1 – zvětralé letenské vrstvy a eluvia, 2 – deluviální (svahové) sedimenty, 3 – smíšené deluvioeolické a deluviální sedimenty výplavového tělesa, 4 – jemnozrnné deluviofluviální/fluviální sedimenty, 5 – kamenovalounové šterky, 6 – deluviofluviální sedimenty výplně koryt, 7 – deluvioeolické sedimenty, 8 – spraše a sprašové hlíny, 9 – půdy fosilní, zčásti redeponované, 10 – antropogenní sedimenty

Fig. 3 Generalised cross section through the northern wall of the construction pit between bastions XIII and XIV of the Baroque fortification, 1 – weathered rocks of Letná formation and its eluvium, 2 – deluvial sediments, 3 – mixed deluvial-aeolian and deluvial sediments of the colluvial body, 4 – fine-grained deluvial-fluvial/fluviál sediments, 5 – stone-boulder gravels, 6 – deluvial-fluvial sediments filling stream channels, 7 – deluvial-aeolian sediments, 8 – loess and secondary loess, 9 – fossil soils, partly re-deposited, 10 – anthropogenic sediments

nálezů – od ostatků pleistocénní fauny až k raně středověkým sídlištním objektům a pohřbům. Změnu tvárnosti krajiny přinesla městská výstavba ve 20. a 30. letech a opět v 50. letech 20. století. Brusnice byla z větší části kanalizována, terény v severním svahu částečně odstraněny a dno údolí zavezeno navážkami o mocnosti až 7 m. V podloží eolicko-deluviálních uložených byly zastíženy fluviální sedimenty vyplňující soustavu koryt pleistocénní Brusnice. Obloukovitě stočené a drobně meandrující koryto původně zasahovalo hlouběji do severního svahu údolí, než jak ho známe například z počátku 20. století, svahovými a eolicko-deluviálními sedimenty bylo však postupně zatlačeno k jihu. Vývoj svahů údolí byl v holocénu stabilizován vznikem půd.

## KRAJINA NEJSTARŠÍCH LIDÍ

Paleomeandr Vltavy dejvické oblasti patří v Praze ke klíčovým místům, které již několik desetiletí přitahuje velkou pozornost specialistů na období paleolitu. Archeologické výzkumy opakovaně přinášejí nové doklady o životě našich nejstarších předků, jako např. nedávno zjištěné osídlení z počátku středního paleolitu (mladý acheuléen) na Flemingově náměstí (ohnišťe, kamenné nástroje, [3]). Také záchranný archeologický výzkum při stavbě tunelového komplexu Blanka přinesl nálezy kamenných artefaktů z přelomu starého a středního paleolitu, z období mezi 0,35–0,3 mil. let př. n. l. (mladší přezleticien – součást acheuléenu). Vzhledem k tomu, že na sobě nenesou stopy po působení ohně a jejich typologická škála je relativně úzká, patří se jedná o nálezy pocházející z krátkodobého loveckého stanoviště, které bylo již v minulosti silně postiženo postdepozičními vlivy. Poměrně častými jsou nálezy ostatků velkých savců, zejména ve sprašových sedimentech. Během těžebních prací bylo v úseku od Špejcharu po barokní bastion XIII nalezeno několik fragmentů jako např. paroh soba (*Rangifer tarandus*), kosti pratura (*Bos sp.*), losa (*Alces sp.*) nebo zub prakoně (*Equus sp.*).

## PRAVĚKÉ OSÍDLNÍ

Archeologický výzkum doplnil poznatky shromažďované od 19. století o poměrně hustém pravěkém osídlení Střešovic, a to v údolí Brusnice. Zatímco na jejím severním břehu – na vyvýšených místech – se koncentrovala pohřebiště i sídlištní objekty, na jižní straně údolí – v méně svažitém terénu na Hradčanech – byla lokalizována pouze sídliště. Nositelem informací o vývoji pravěké krajiny, erozních procesech a sídlištních aktivitách od mladší doby kamenné až do doby železné byly jednak zahloubené objekty v oblasti Patočkovy ulice, jednak souvrství redeponovaných holocénních půd, které vyplňovaly nerovnosti modelující severní svah údolí Brusnice. Celkem bylo odkryto a zdokumentováno 12 pravěkých objektů, převážně jam, podle keramiky předběžně datovaných do pozdní doby bronzové (1300–800 př. n. l.). K pozoruhodným nálezům patří bronzová čepel dýky z doby únětické kultury starší doby bronzové (2200–1600 př. n. l.), která se spolu se zlomky kamenů, keramiky a zvířecích kostí

in the terrain configuration was brought by urban development in the 1920s and 1930s, and again in the 1950s. The Brusnice Brook was partially culverted, terrains on the northern slope were partly removed and the bottom of the valley was filled with made-ground with the height of up to 7 m. Fluvial sediments filling the system of channels of the Pleistocene Brusnice Brook were encountered in the subbase of the aeolian-deluvial deposits. The curved and slightly meandering channel originally extended deeper to the northern slope of the valley than we know it e.g. from the beginning of the 20<sup>th</sup> century, but it was gradually pushed to the south by the deluvial sediments and aeolian-deluvial sediments. The development of the valley slopes was stabilised in the Holocene by the evolution of soils.

## COUNTRY OF THE OLDEST HUMANS

The Palaeomeander of the Vltava River in the Dejvice area belongs among key locations in Prague, which has been attracting significant attention of specialists in the Palaeolithic period for several decades. Archaeological excavations repeatedly bring new documents about the life of our oldest ancestors, such as, for example the recently found settlement from the beginning of the Middle Palaeolithic (Upper Acheulian) in Fleming Square (fireplaces, stone tools, [3]). Even the rescue archaeological excavation during the course of the construction of the Blanka complex of tunnels brought findings of stone artefacts from the end of the old Palaeolithic and beginning of the Middle Palaeolithic, from the period between 0.35 – 0.3 million years BC (Upper Prezleticien – part of Acheulian).



Obr. 4 Mezi ostatky pleistocénních savců pocházejících z eolických a deluvioeolických sedimentů těžených ve stavební jámě byl i paroh soba nalezený poblíž barokních hradeb (foto ARÚ Praha)

Fig. 4 Among the remains of Pleistocene mammals which were discovered in aeolian and deluvial sediments excavated in the construction pit there was even a reindeer horn, which was found near the Baroque ramparts (Photo ARÚ Praha)



Obr. 5 Jedním z nejcecnějších pravěkých nálezů ze stavební jámy v Patočkově ulici byla bronzová čepel dýky ze starší doby bronzové – kultura únětická (foto ARÚ Praha)

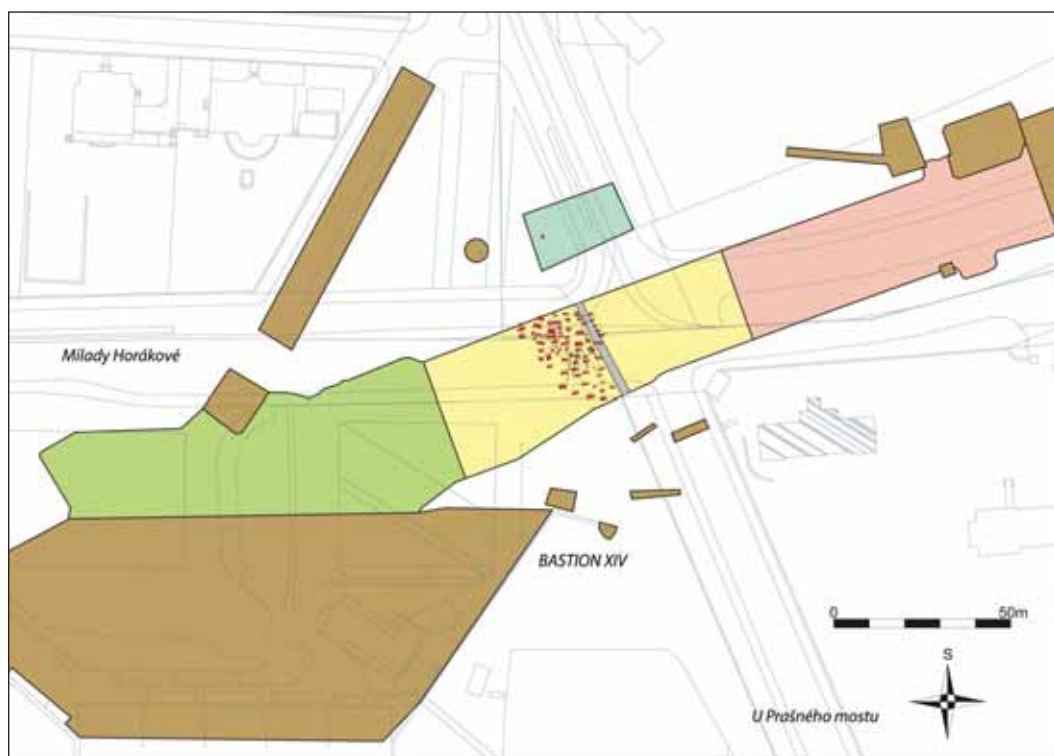
Fig. 5 One of the most valuable prehistoric finds from the construction pit in Patočkova Street was a bronze dagger blade from the Early Bronze Age – the Únětice culture (Photo ARÚ Praha)

nacházela ve vrstvě – splachu – v jedné ze dvou zjištěných přírodních depresí. Eroze břehu musela probíhat současně nebo po zániku osídlení ze starší doby bronzové v blízkém okolí. Teprve poté vznikly půdy, které již obsahují doklady osídlení nejmladší doby bronzové a železné.

## ŘANĚ STŘEDOVĚKÁ POHŘEBIŠTĚ

Východně od výše uvedených objektů, jižně od křižovatky Patočkova – Střešovická se podařilo ve výsypce odpadního materiálu bývalé strahovské cihelny zachytit pozůstatky sekundárně přemístěných lidských ostatků a jednotlivých nálezů z jednoho již dříve známých raně středověkých pohřebišť. Zatímco členové přemyslovské knížecí rodiny našli místo posledního odpočinku přímo na Pražském hradě, výše uvedené pohřebiště patřilo k věnci nekropolí obklopujících na sklonku 9. a v 10. století hradčanskou ostrožnu, na nichž pohřbívali další obyvatelé různorodého sociálního složení z tohoto území [4].

K nečekaným patřil objev dosud neznámého raně středověkého pohřebiště v třídě Milady Horákové při křižovatce se Svatovítskou ulicí v roce 2011. Odkryto bylo 77 hrobů, z toho 29 dětských včetně kojenců. Hroby jsou v souladu s dobovými zvyklostmi uspořádané v ne zcela pravidelných řadách a s převážující orientací nebožtíků hlavou k západu. Charakteristickým znakem je barvitost hrobových úprav, doložených pozůstatky dřevěných konstrukcí/rakví či kamenných prvků. Nejčastěji byli mrtví vybaveni pouze keramickou nádobou či nožem. Na základě nálezů bronzových a stříbrných náušnic, zlacených gombíků, korálků ze skla a jantaru v ženských a dětských hrobech můžeme pohřebiště předběžně datovat od sklonku 9. do 1. poloviny 10. století, tedy do doby počátků českého státu a vlády prvních přemyslovských knížat. Poloha nově objeveného pohřebiště i relativně chudší výbava nebožtíků naznačuje, že na něm našli místo posledního odpočinku zřejmě lidé z nám



Obr. 6 Praha 6 – tř. Milady Horákové, poloha raně středověkého pohřebiště, barevně vyznačena území, na nichž probíhal záchranný archeologický výzkum v letech 2008–2011

Fig. 6 Prague 6 – Milady Horákové Street, situation of Early Medieval cemetery; the areas where the rescue archaeological excavation was conducted in 2008–2011 are highlighted in colour

With respect to the fact that they do not bear traces of fire exposure and their typological scale is relatively narrow, the findings probably originated at a short-term hunting camp, which was already in the past affected by post-deposition effects. Relatively frequent findings consist of remains of large mammals, first of all found in loess sediments. During the course of the excavation operations several fragments, e.g. a reindeer horn (*Rangifer tarandus*), aurochs (*Bos sp.*) and elk (*Alces sp.*) bones or an extinct horse tooth (*Equus sp.*).

## PREHISTORIC POPULATION

The archaeological investigation added new information to the findings regarding the relatively dense prehistoric population of Střešovice, in the Brusnice Brook valley, which have been gathered since the 19<sup>th</sup> century. Whilst both cemeteries and settlement structures were concentrated on the northern bank (on high spots), only settlements were located on the southern side, where the terrain slope was smaller. The carrier of information about the development of the primeval landscape, erosion processes and settlement activities from the younger Stone Age to the Iron Age comprised sunken features in the area of Patočkova Street and series of strata of Holocene re-deposited soils filling the undulation modelling the northern slope of the Brusnice Brook valley. In total, 12 prehistoric features were uncovered, mostly pits, preliminarily dated according to ceramics to the Late Bronze Age (1,300 – 800 BC). Among noteworthy findings there are a bronze dagger blade from the Únětice culture period of the Late Bronze Age (2,200–1,600 BC), which was found together with fragments of stone, ceramics and animal bones in a layer – outwash – in one of the two identified depressions. The bank erosion had to take place concurrently or after the end of the population from the Late Bronze Age in the close vicinity. Only then did soils already containing documents about the population of the youngest Bronze Age originated.

## EARLY MEDIEVAL CEMETERIES

Remnants of secondarily replaced human remains and individual findings from one of already earlier known Early Medieval





Obr. 7 Praha 6 – tř. Milady Horákové, raně středověké pohřebiště poškozené cestou ze 17. století

Fig. 7 Prague 6 – Milady Horákové Street, Early Medieval cemetery damaged by the road from the 17<sup>th</sup> century

neznámého sídliště ležícího severně od Pražského hradu. Dochované nálezy umožňují archeologům nahlédnout do světa raně středověkých řemesel a technologií, stejně jako si například vytvořit představu o zapojení Čech do dálkového obchodu 10. století.

## HRADBY A VOJENSKÉ LEŽENÍ

V průběhu archeologického výzkumu při stavbě tunelu se potvrdil potenciál studia barokních hradeb, tvořených věncem bastionů a kurtin. Poprvé od doby jejich výstavby v průběhu 17. a 18. století tak bylo možné nahlédnout do základů bastionů XIII (sv. Benedikta) a XIV (sv. Václava) severně od Pražského hradu a upřesnit dosavadní představy o jejich výstavbě a konstrukci základových zdív [5, 6]. Základ zděné armatury zpevňující hlinitý val byl tvořen opukovými kameny. Nadzemní zdivo mělo také opukové jádro, provázané s vnitřními zpevňujícími pilíři. Vnější plášť tvořilo zdivo cihlové, jehož nároží, paty a vrchní kordony byly tvořeny z pískovcových prvků. Překvapením se stala bohatá stratigrafie objektů (jam různých tvarů a výplní) „staveniště“ hradeb. Na základě výsledků výzkumu byla potvrzena též existence zemního tělesa z konce 17. století před bastionem XIV a získány podklady pro jeho rekonstrukci. Toto těleso překrylo koleje „cesty z města“, která spojovala Pražský hrad s krajinou na sever od něj v době, která dokonce předcházela době výstavby hradeb.

Výzkum přispěl též k poznání severozápadního sektoru opevnění. Západně bastionu XI bylo při odtěžování pozůstatků činnosti strahovské cihelny objeveno neznámé zdivo, které lze s největší pravděpodobností ztotožnit s retranchementem budovaným Francouzi v rámci nástupnických válek v roce 1742.

V této době se v prostoru severně od Písecké brány (širší okolí stanice metra Hradčanská) rozkládalo vojenské ležení, s nímž je spojováno objevené torzo liniového objektu s nálezem kostry koně (obr. 12) a řada objektů svědčících o práci s ohněm. Pravděpodobně ze stejné doby pochází izolovaný pohřeb nebožtíka v dřevěné rakvi sbíjené hřebíky. Cennou součástí shromážděného fondu novověkých nálezů z prostoru Dejvic i areálu severně od hradeb jsou především mince.



Obr. 8 Pohřebiště na tř. Milady Horákové – dětské hroby – H 68, 69 (foto ARÚ Praha)

Fig. 8 Cemetery in Milady Horákové Street – children's graves – H 68, 69 (Photo ARÚ Praha)

cemeteries were captured east of the above-mentioned objects, south of the crossing of Patočkova Street and Střešovická Street, in a spoil dump of the former Strahov brickwork. Whilst the graves of members of the princely Přemyslide family there were directly at Prague Castle, the above-mentioned cemetery was one of necropolises forming a ring around the Hradčany promontory at the end of the 9<sup>th</sup> century and during the 10<sup>th</sup> century, in which other people of various social milieu from this area [4] were buried.

Unexpected there was the discovery of unknown Early Medieval cemetery in Milady Horákové Street, at its intersection with Svatovítská Street, in 2011. There were uncovered 77 graves, 29 of them child's including suckling's graves. They are arranged in not completely regular rows and with the prevailing orientation of the skeletons heads toward west. The variability of grave constructions is documented by remains of wooden structures/coffins or stone elements. The deceased were most frequently equipped with a ceramic vessel or a knife. On the basis of the findings of bronze or silver earrings, gilded spherical pendants, glass beads and amber in woman's graves, we can preliminarily date the graveyards back to the 9<sup>th</sup> century to the 1<sup>st</sup> half of the 10<sup>th</sup> century, which is the period in which the Czech state, ruled by first Přemyslide princes, originated. The location of the recently excavated cemetery and the relatively poorer equipment of the deceased indicate that people who were buried here probably lived in the unknown settlement north of Prague Castle. The preserved findings enable archaeologists to look into the world of early medieval crafts and technologies, and to create a notion of Bohemia involvement in the long-distance trade in the 10<sup>th</sup> century.

## FORTIFICATION AND MILITARY CAMP

The potentiality of the study on Baroque fortification formed by a wreath consisting of bastions and kurtins was confirmed during the course of the archaeological investigation. It was for the first time since the time of their construction in the course of the 17<sup>th</sup> century that it was possible to look into the foundations of Bastions XII (St. Benedikt's) and XIV (St. Wenceslas) north of Prague Castle and refine the existing notions of their construction and the structure of foundation walls [5, 6]. Clay body of bastion was reinforced by limestone masonry in the basis. The above ground masonry structure had also a limestone, which was tied to inner reinforcing pillars. The outer cladding was formed by brickwork. Corners, feet and upper cornices were hewn from sandstone. The rich stratigraphy of the objects (pits with various shapes and fills) of the 'construction site' for ramparts has become a surprise. The existence of clay dyke known from written sources from the end of the 17<sup>th</sup> century in front of bastion XIV was



Obr. 9 Pohřebiště na tř. Milady Horákové – hrob muže vybaveného velkým nožem – H 17 (foto ARÚ Praha)

Fig. 9 Cemetery in Milady Horákové Street – the grave of a man equipped with a big knife – H 17 (Photo ARÚ Praha)

## NOVOVĚKÝ HŘBITOV

Nečekaným nálezem byla také skupina hrobů, která byla objevena na východní straně křižovatky ulic Patočkovy a Na Hubálce. Rozsah pohřebiště byl s velkou pravděpodobností určen morfologií terénu, protože leželo v nevelkém „amfiteátru“ na severním svahu údolí potoka Brusnice. Jednotlivé hroby byly uloženy pravidelně v paralelních řadách směru JZ – SV, hlavou orientovány přibližně k SZ. Mezi nebožtíky jednoznačně převažují dospělí jedinci (59 hrobů). Odkryty byly též dětské pohřby (7 včetně novorozence či plodů), ty však byly vždy uloženy v jedné hrobové jámě společně s dospělými. Celkem tak bylo objeveno 66 koster uložených v úzkých dřevěných rakvích, což dokládá i poloha skeletů. Dřevo rakví se dochovalo v reliktech téměř ve všech hrobech. V jednom případě bylo možné rozlišit jednotlivé části schránky – víko, boční díly i dno, kde dokonce zůstaly patrné zářezy z opracování dřeva. Rakve byly často podkládány kameny, úlomky cihel, dlaždic nebo prežů. Pohřbení jedinci obdobně jako nebožtíci z raně středověkého pohřebiště vesměs leželi nataženi na zádech, na rozdíl od nich však ruce měli složené v několika polohách – volně podél těla, zkřížené na klíně nebo na hrudi. Jeden z nebožtíků ležel otočený na břiše, pravděpodobně z důvodu převrácení rakve při jejím ukládání.

Asi v jedné třetině hrobů se bezprostředně u mrtvých nebo v záspy hrobových jam dochovaly drobné osobní předměty. Kromě součástí oděvu (knoflíky, úchyty a háčky) to byly především závěsky – křížky, medailonky a korálky (např. korálky z růžence v hrobě H14). Nejbohatší byl dětský pohřeb se dvěma křížky, kostěným a skleněným knoflíkem a pravděpodobně věnečkem. Knoflíky se vyskytovaly především dvojité – manžetové, někdy i s dochovanými relikty textilu. Soubor knoflíků čítal



Obr. 10 Pohřebiště na tř. Milady Horákové – dokumentace hrobů (foto ARÚ Praha)

Fig. 10 Cemetery in Milady Horákové Street – documentation of graves (Photo ARÚ Praha)

also confirmed during the excavation. The dyke covered a beaten track of the ‘road from the town’, which interconnected Prague Castle with the country north of it in the period which even preceded the building of bastions.

The archaeological research even contributed to the knowledge of the north-western sector of the fortification. Unknown masonry, which in all probability can be identified with the retrenchment which was built by Frenchmen within the framework of wars of Austrian succession in 1742, was discovered west of Bastion XI during the excavation of remains of activities of the Strahov brickwork.

At that time a military camp spread itself in the area north of the Písek Gate (the wider surroundings of Hradčanská metro station). The torso of a linear feature (ditch?) with a finding of a horse skeleton (see Fig. 12) and numerous objects showing evidence of work with fire are linked with this camp. The isolated burial of a deceased person in a nailed wooden coffin probably originated at the same time. Coins form a valuable part of the fund of findings from the Modern Age found in the area of Dejvice and the area north of the bastions.

## MODERN AGE CEMETERY

The group of graves which was discovered east of the crossing of Patočkova Street and Na Hubálce Street was also an unexpected finding. The extent of the cemetery was with high probability determined by the land surface morphology. It was located in a small ‘amphitheatre’ on the northern slope of the Brusnice Brook valley. Individual graves were placed regularly in parallel SW – NE rows, with heads oriented approximately NW. Adult individuals unambiguously prevail among the deceased (59 graves). Children’s burials (7, including newborn babies or foetuses) were also discovered, but these were buried in the grave together with adults. In total, 66 skeletons were discovered. They were placed in narrow wooden coffins, which fact is documented even by the position of the skeletons. The coffin wood was preserved in relics nearly in all graves. It was possible in one case to distinguish individual parts of the casket – the cover, side parts and bottom, where even woodworking grooves remained visible. The coffins were frequently bottomed up on stones, fragments of bricks, tiles or convex roof tiles. The buried individuals, similarly to the deceased from the Early Medieval cemetery, mostly lay flat on their backs. In contrast to them, they had their arms folded up in several positions – loosely along the body, crossed on the lap or on the chest. One of the deceased lay turned on the stomach, probably because of the coffin tumbling over during its burying.

Small personal objects remained approximately in a third of graves, either immediately on the deceased or in the backfill of burial pits. Apart from parts of clothing, they consisted first of all of drops – crosses, lockets and beads (for example rosary beads in





Obr. 11 Pohřebiště na tř. Milady Horákové, k nejbohatším patřil hrob mladé dívky s gombíky a se stříbrnou perlou na krku, kterou doprovázely jantarové korále – H 2 (foto ARÚ Praha)

Fig. 11 Cemetery in Milady Horákové Street, the grave of a young girl with studs and a silver pearl on her neck, accompanied by amber beads belonged among the richest graves – H 2 (Photo ARÚ Praha)

množství druhů kovových nebo lisovaných skleněných, výjimečně i kostěných/rohovinových. Nalezené předměty nám především pomáhají pohřby časově zařadit. Příkladem je odlévaný mosazný křížek pravděpodobně typu Immaculata conceptio (podle sdělení M. Omelky). Na lícové straně je reliéf ukřižování Krista, na rubové straně by měla být znázorněna Panna Maria (zatím nečitelné). Tento typ je z jiných nálezných situací datován do období kolem poloviny 18. století. Bližší okolnosti pohřbívání na severním svahu údolí Brusnice zatím neznáme. Podle datování výše uvedeného mosazného křížku však můžeme situaci nejspíše spojit s působením vojsk při obléhání Prahy během války o habsburské dědictví v 18. století (zde 1740–1748). Tomu by mohla nasvědčovat i kulka v týlu lebky jednoho z pohřbených.

## INDUSTRIÁLNÍ PAMÁTKY

Předmětem výzkumu jsou též dochované části komunikací a technické památky 19. až 20. století v prostoru Dejvického nádraží a v jeho nejbližším okolí, mj. neznámý opakovaně využívaný kanalizační systém vložený do bývalého úvozu jedné z cest směřujících od Písecké brány k severu (u stanice metra Hradčanská) či zaniklé objekty související s provozem nádraží. Existence koněspřežné dráhy se v archeologických pramenech neodrazila.

Západně bastionu XI v údolí Brusnice vznikla na sklonku 18. století cihelna Strahovská, která zpracovávala místní surovinu – sprašové sedimenty. Fungovala téměř po celé 19. století, kdy dodávala stavební materiál pro prudce se rozvíjející průmysl a budovanou městskou zástavbu. Na přelomu 19. a 20. století zanikla a v jejích objektech se rozběhl provoz octárny. Zástavba 19. století byla na severní straně omezena komunikací, která ve 40. letech již v podstatě vytyčovala trasu dnešní Patočkovy ulice, tenkrát však ještě podstatně užší. Od severní strany se k hlavní komunikaci připojovala přibližně v místě dnešních schodů do ulice Nad octárnou další cesta. Během výzkumu byl zdokumentován složitý systém zděných konstrukcí zaniklých



Obr. 12 Praha 6-Dejvice, kostra koně objevená v příkopu z 18. století nedaleko stanice metra Hradčanská (foto ARÚ Praha)

Fig. 12 Prague 6-Dejvice, the horse skeleton discovered in a ditch from the 18<sup>th</sup> century near Hradčanská metro station (Photo ARÚ Praha)

grave H14). The richest burial was probably a child's funeral with two crosses, a bone button and a glass button and, probably, a small wreath. Double cuff buttons, sometime even with textile relics, were most frequently encountered buttons. The set of buttons contained many types of metal or pressed glass, exceptionally even bone/horn ones. The found objects help us first of all to determine the periods of funerals. The molten brassy cross, probably of the Immaculata Conceptio type (according to information from M. Omelka) is an example of it. On the obverse side there is a Jesus Christ crucifixion relief, whilst Virgin Mary should be depicted on the reverse side (for the time being illegible). This type is dated from other discovery situations by the period around the half of the 18th century. Closer circumstances of burying on the northern slope of the Brusnice Brook valley are as yet unknown. Anyway, according to the dating of the above-mentioned brassy cross we most probably can link the situation with the activities of armies during the siege of Prague during the war of the Habsburg heritage in the 18<sup>th</sup> century (here 1740 – 1748). It could even be suggested by a bullet in the back of the skull of one of the buried.

## INDUSTRIAL MONUMENTS

Preserved parts of roads and technical monuments from the 19<sup>th</sup> through 20<sup>th</sup> century in the area of the Dejvice railway station and its closest surroundings, among others an unknown repeatedly used sewerage system inserted into one of the former narrow-sunken roads heading northward from the Písek Gate (near Hradčanská metro station) or former structures associated with the station operation are also the subject of the survey. The existence of the horse-drawn railway did not reflect itself in archaeological sources.

The Strahov brickwork, processing a local raw material – loess sediments, originated west of Bastion XI, in the Brusnice Brook valley, at the end of the 18<sup>th</sup> century. It was in operation nearly for the entire 19<sup>th</sup> century, during which it supplied the building material for the rapidly developing industry and urban building construction. It ceased to exist at the turn of the 19<sup>th</sup> to 20<sup>th</sup> century and a vinegar factory started to operate in its objects. The 19<sup>th</sup> century buildings was limited on the north side by a road, which in the 1840s in substance determined the alignment of the current Patočkova Street, which was significantly narrower at that time. Another road was connected to the main road from the north, approximately in the location of the staircase to Nad Octárnou Street. A complicated system of masonry structures of former buildings of the brickwork/vinegar works with production buildings and their rear area, which have been preserved on two floor levels, was documented during the course of the excavation. The structures consisted of external walls delimiting individual buildings and





Obr. 13 Patočkova ulice, severní část novověkého pohřebiště z 18. stol., prozkoumané a vybrané hrobové jámy vyhloubené v pravidelných řadách (foto ARÚ Praha)  
Fig. 13 Patočkova Street, northern part of the Modern Age cemetery from the 18<sup>th</sup> century; examined and emptied burial pits dug in regular rows (Photo ARÚ Praha)

staveb cihelny/octárny s výrobními objekty a jejich zázemím, dochovaných ve dvou úrovních podlaží. Konstrukce tvořily obvodové zdi vymezující jednotlivé budovy a místnosti s mnoha architektonickými detaily – jeden nezasypaný sklípek, otopná zařízení, stáje se stánkami a žlaby, komíny, síť kanálků, zahlušené obezděné jámy (nádrže či zásobníky), dochované úrovně různých typů podlah, včetně dřevěných, cihlová studna kruhového půdorysu, která zasahovala hluboko do skalního podloží, pravděpodobně i relikty venkovní výdlažby nezastavěných ploch a mnohé další prvky. Určení funkce jednotlivých objektů, rozlišení vývojových fází staveb a spojení nálezových situací s historickými provozy bude předmětem dalšího zpracování. S rozšiřováním vozovky dnešní Patočkovy ulice v 50. letech 20. století je spojen zánik všech staveb východně Myslbekovy ulice.

## ZÁVĚR

Dosavadní průběh archeologického výzkumu přinesl nejen řadu nových objevů a cenných zjištění o severním a západním předpolí Pražského hradu, ale prokázal, že skloubení technologických postupů stavbařů a archeologů je možné i za tak složitých podmínek, jaké přináší výstavba tunelového komplexu Blanka. Díky oboustranné spolupráci zůstane odtěžená „paměť krajiny“ prostřednictvím dokumentace shromážděné při archeologickém výzkumu zachována i pro budoucí generace.

RNDr. IVA HERICHOVÁ, herichova@arup.cas.cz,  
PhDr. IVANA FRIDRICHOVÁ-SÝKOROVÁ, Ph.D.,  
ivanasykorka@seznam.cz,  
PhDr. KATEŘINA TOMKOVÁ, tomkova@arup.cas.cz,  
ARCHEOLOGICKÝ ÚSTAV AV ČR

Recenzoval: Ing. Pavel Šourek



Obr. 14 Dochované relikty zástavby z 19. a 1. poloviny 20. století jižně od Patočkovy ulice – zaniklé objekty cihelny a octárny, odkrývání podlahy stáji a obvodového zdiva se žlaby (foto ARÚ Praha)

Fig. 14 Preserved relics of buildings from the 19<sup>th</sup> and first half of the 20<sup>th</sup> century south of Patočkova Street – former objects of the brickwork and the vinegar factory; exposing the floor of stables and external walls with troughs (Photo ARÚ Praha)

rooms with many architectural details – one non-filled cellar, heating appliances, stables with stands and troughs, chimneys, a network of gutters, sunk walled pits (tanks or reservoirs), preserved levels of various types of floors including wooden ones, a brick-lined well with circular ground plan extending deep into the bedrock, probably even relics of external pavement of non-built up areas and numerous other elements. The determination of individual objects, distinguishing of development phases of buildings and linking of situations of finds to historic production units will be the subject of further processing. The widening of the roadway of the today's Patočkova Street in the 1950s is associated with the demolition of all structures east of Myslbekova Street.

## CONCLUSION

The course of the archaeological investigation to date brought not only numerous new findings and valuable information about the northern and western surroundings of Prague Castle, but it also proved that joining of technological procedures of builders and archaeologists is possible even in such complicated conditions which are brought by the development of the Blanka complex of tunnels. Owing to the bilateral collaboration, the removed 'memory of landscape' will remain preserved even for future generations through the documents gathered during the course of the archaeological research.

RNDr. IVA HERICHOVÁ, herichova@arup.cas.cz,  
PhDr. IVANA FRIDRICHOVÁ-SÝKOROVÁ, Ph.D.,  
ivanasykorka@seznam.cz,  
PhDr. KATEŘINA TOMKOVÁ, tomkova@arup.cas.cz,  
ARCHEOLOGICKÝ ÚSTAV AV ČR

## LITERATURA / REFERENCES

- [1] Zavřel, J. 2001 Geologie, morfologie a osídlování malostranské kotliny. Geological and morphological conditions of the Prague Lesser Town basin and their influence on the beginnings of settlement in this area. *Mediaevalia Archaeologica*, 3. Pražský hrad a Malá Strana, 7–27.
- [2] Záruba, Q., Šimek, R. 1964 Rozbor inženýrsko-geologických podmínek území Malé Strany. *Sbor. geol. věd*, řada HIG, sv. I, 109–132.
- [3] Fridrich, J., Fridrichová-Sýkorová, I., Tyráček, J. 2010 Mladoacheuléenské osídlení dejvického paleomeandru Vltavy. *Staletá Praha*, XVI/1, 40–56.
- [4] Tomková, K., Frolík, J. 2005 Topografie pohřbívání v areálu Pražského hradu a na jeho předpolích. In TOMKOVÁ, K. (ed.) *Pohřbívání na Pražském hradě a jeho předpolí, díl I.1.* Castrum Pragense, 7, s. 7–24. ISBN 80-80-86124-56-8, 80-86756-505-X.
- [5] Bartošová, V., Herichová, I., Kašička, F., Tomková, K. 2010 Barokní opevnění Prahy v trase stavby tunelu Blanka. *Zprávy památkové péče*, 70, s. 239–247.
- [6] Kupka, V. 2008 *Pražská opevnění*. Praha, 471 s., ISBN 978-80-7277-126-4.



# STIMULACE HORNINOVÉHO MASIVU PRO VYTVOŘENÍ PUKLINOVÉHO REZERVOÁRU PRO JÍMÁNÍ GEOTERMÁLNÍ ENERGIE

## STIMULATION OF ROCK MASSIF TO ESTABLISH FRACTURE RESERVOIR FOR CAPTURE OF GEOTHERMAL ENERGY IN THE HOT-DRY-ROCK SYSTEM

HANA JIRÁKOVÁ, JAN VINTERA, MICHAL STIBITZ, MICHAL VANĚČEK

### ÚVOD

Při využívání horninového prostředí je v některých případech nutné uměle navýšit míru rozvolněnosti horninové matrice. Na četnosti puklin a jejich dostatečném rozevření je často závislá možnost exploatace některých zdrojů surovin, ložisek a energie (např. jímání ropných uhlovodíků, geotermální energie metodou hot dry rock, podzemní vody z puklinových kolektorů).

V podzemním stavitelství či činnostech prováděných hornickým způsobem jsou situace, kdy k rozvolnění nejsou použitelné ani klasické destruktivní metody (odštěl), ani kumulativní nálože či obdobné metody. Netradiční přístup k rozvolňování hornin, resp. ke zvýšení četnosti puklinové sítě, nabízí princip založený na hydraulickém štěpení (hydrofracturing), tedy bez použití výbušnin.

V rámci projektu STIROMAS (STImulation of ROck MASSif) probíhá výzkum zaměřený na ověření schopnosti vytvořit puklinovou síť hydraulickým štěpením při spolupůsobení tzv. pulzního tlaku. Výzkumný projekt zahrnuje jak laboratorní výzkum v mikroměřítku a v makroměřítku, tak i výzkum in-situ doplněný simulačními modelovacími technikami a přehledem vhodných dostupných horninových typů v Českém masivu. Zatímco laboratorní výzkum je prováděn na odebraných horninových vzorcích, výzkum in-situ se zaměřuje na test v rostlém horninovém masivu. Zabudováním výzkumné etapy do podmínek horninového masivu se výzkum přiblíží reálným podmínkám. Dojde k ovlivnění testu přirozenými napjatostními, přetvárnými a pevnostními silami rostlého masivu za spoluúčasti četných rozdělovacích ploch typu puklina, lineace, foliace atp.

Výsledkem projektu bude:

- ověření metody rozvolnění horniny pomocí pulzního hydraulického štěpení;
- stanovení tlaků nutných k rozvolnění pro zkoumané typy hornin;
- ověření prostorového dosahu rozvolnění v závislosti na technologii hydraulického štěpení, tlaku a charakteristických vlastnostech horniny;
- stanovení zákonitostí/vztahu mezi výsledky laboratorního měření a tlakem (metodou) potřebným pro rozvolnění horniny in-situ;
- modelování a predikce dosahu lineárního/pulzního hydraulického štěpení v horninovém masivu.

### VÝZKUMNÝ PROGRAM PROJEKTU

Řešení výzkumného projektu je rozloženo do čtyř etap/let v období 2011–2014.

První přípravná etapa (2011) byla zaměřená na studium zahraničních zkušeností s hydraulickým štěpením hornin. Součástí rešerše bylo studium geomechanických a hydromechanických vlastností hornin, metod a technologií hydraulického štěpení a možností matematického modelování zmíněných problémů. Bylo nezbytné získat podklady pro materiální, technickou a metodickou přípravu výzkumu pulzního štěpení mikrovzorků. Důležitou částí

### INTRODUCTION

In crystalline rocks, it is sometimes necessary to increase artificially the fracture density. In many cases, the frequency of fractures and their degree of openness determines the limits of exploitation of natural resources and energy (e.g. hydrocarbons, geothermal energy, groundwater from fracture reservoir).

Underground construction industry often encounters situations requiring the rock massif fracturing without application of classical destructive (blast) or similar methods.

The presented unconventional rock fracturing approach for the enhancement of fracture network is based on the principle of hydraulic fracturing (hydrofracturing), i.e. without use of explosives.

In the framework of the STIROMAS (STImulation of ROck MASSif) project, the research aims at verifying the capability of creating a fracture network using hydraulic pulse fracturing method.

The research project comprises of laboratory micro-sample, macro-sample and in-situ testing supported by simulation modelling techniques as well as review of rock types available in the Bohemian Massif. While the laboratory experiments are carried out on representative rock samples, the in-situ research is focused on tests in rock massif. In-situ experiments will therefore demonstrate natural conditions of rock massif, as the test will be affected by natural stress, deformation and stability of the rock environment considering also natural occurrence of cracks, fractures, lineation and foliation planes.

Expected results:

- verification of rock fracturing applying the hydraulic pulse fracturing;
- determination of pressures necessary for rock fracturing depending on rock properties;
- verification of the spatial extent of the fracture development depending on hydraulic fracturing technique, pressure and characteristic rock properties;
- determination of relationship between laboratory results and the pressure (method) required for in-situ fracturing;
- modelling and prediction of the fracture extend during linear/pulse hydrofracturing experiments.

### PROJECT RESEARCH PROGRAMME

The research project is divided into 4 phases/ years within the 2011 – 2014 period.

The first (preparation) stage (2011) included bibliographic study with emphasis on hydraulic fracturing experience worldwide. The bibliographic study primarily focused on geomechanical and hydromechanical rock properties,

etapy byly návrh a příprava zařízení pro hydraulické zkoušky a příprava specializovaného podzemního pracoviště.

Druhá etapa (2012) je zaměřena na zkoušení vzorků v mikroměřítku, nejprve za lineárního zatěžování, posléze při pulzním zatížení.

Náplní třetí etapy (2013) je ověření metod lineárního a pulzního porušování hornin v makroměřítku na vzorcích větších bloků hornin v režimu uplatněném na vzorcích v mikroměřítku. Výzkum in-situ předpokládá provést hydraulickou tlakovou zkoušku v jádrových vrtech v podzemní laboratoři Josef. Do čelby ve vybrané rozrážce jsou vyvrtány aplikační a monitorovací vrty. Prostor předpokládaného ovlivnění při pulzních tlakových zkouškách bude vystrojen monitorovacími čidly.

Poslední etapa výzkumu (2014) je zaměřena na vyhodnocení dat a poznatků získaných při všech etapách výzkumu. Výstupem bude metodika pro získávání popisných charakteristik hornin a postup pro matematické modelování v případě hydraulického štěpení lineární a pulzní technologií.

## HYDRAULICKÉ ŠTĚPENÍ

Hydraulické štěpení od svého počátku představuje hlavní metodu pro zlepšení produktivity podzemních rezervoárů ať už z hlediska získávání uhlovodíků, nebo geotermální energie (Economides a Nolte, 2000). Štěpení vodou lze použít v málo propustných, nebo nepropustných horninách k vytvoření sítě rozsáhlých a úzkých trhlin. Hydraulické štěpení hornin představuje komplexní problém ovlivňovaný mnoha faktory. Mechanismus vzniku puklinového systému v krystalinické hornině závisí na stavu napjatosti masivu, struktúře a textúře hornin, na charakteru porušení masivu trhlinami (vlastnostech diskontinuit) a na konkrétních geotechnických parametrech, které určují míru a typ reakce prostředí na působící tlak.

Obecně lze říci, že tlakové štěpení vodou umožňuje vytvořit pukliny v řádech několika stovek metrů o mocnosti až 1 mm. Vodivost závisí na šířce poruchy ovlivněné střížným napětím, nerovností poruchy a pevnosti horniny (Rushing, Sullivan, 2003 In Reinicke et al., 2010). Úspěch metody tedy záleží na cílových parametrických vlastnostech poruchy.

Hydraulického štěpení se nejčastěji používá s cílem propojení vzájemně nekomunikujících oblastí s přirozeným puklinovým systémem s nově vytvořenou sítí puklin, a tím zvýšení přítoku v dané oblasti. V prostředí Hot Dry Rock se hydraulické štěpení aplikuje za účelem propojení několika vrtů v tvrdých krystalinických horninách a snadnějšího získávání geotermální energie.

## PODZEMNÍ EXPERIMENTÁLNÍ PRACOVIŠTĚ

Pro experimentální část, tj. lineární štěpení a pulzní štěpení na mikrovzorcích, makrovzorcích a in-situ, byl vyhrazen prostor v Podzemní laboratoři Josef v lokalitě Čelina-Mokrsko, kterou provozuje Fakulta stavební ČVUT v Praze. Pro tyto účely byly ve štolě Josef vybrány rozrážky JP-2 a SP-4 v oblasti Mokrsko východ (obr. 1). Hlavními výhodami provádění zkoušek v podzemí je jednoduché zajištění bezpečnosti pracovního prostředí, zabezpečení měřicí aparatury a uchování zkoušeného materiálu při stabilní teplotě a vlhkosti.

## TLAKOVÉ ZKOUŠKY

Pro ověření v projektu stanovených hypotéz byly zvoleny dva typy tlakových zkoušek.

Při prvním typu tlakové zkoušky jsou vzorky zatěžovány stupňovitým lineárním nárůstem tlaku až do překročení meze pevnosti, kdy dojde k rozštěpení vzorku.

hydraulic fracturing methods and equipment and potential tools for reliable mathematical modelling of the above-mentioned problems. It was necessary to study scientific and technical documents for material, technical and methodological preparation phase for the pulse micro-sample testing. The key part of this project phase was to develop an appropriate facility for hydraulic testing and site preparation in the specialized underground laboratory.

The second stage (2012) is focused on micro-sample testing, first with linear pressure increase, later with pulse regime.

The matter of interest of the third phase (2013) is to verify the methodology of linear and pulse rock fracturing in macro-scale on large-dimension samples of rock types being previously tested in micro-scale. Subsequent hydraulic fracturing test in-situ will be carried out in core boreholes in the Josef Underground Laboratory. Heading of the selected exploration working will be equipped by application and monitoring wells. Monitoring sensors will be placed within the range potentially affected by pressure pulse testing.

The last project phase (2014) aims at data treatment and interpretation of all findings acquired within the whole project. The major project output will describe methodological approach to obtain descriptive rock characteristics and the procedure of mathematical modelling dealing with linear vs. pulse technology.

## HYDRAULIC FRACTURING

Hydraulic fracturing represents the main method to enhance the underground reservoirs productivity either for hydrocarbon or geothermal energy extraction (Economides and Nolte, 2000). Hydrofracturing can be applied on low permeable or impermeable rocks in order to develop the network of both extensive and very narrow fractures. Hydraulic fracturing is considered as a complex mechanism affected by numerous factors. The mechanism of the fracture system development in crystalline environment reflects the stress field of the rock massif, structure and texture properties, the character of the rock massif failure (discontinuity properties) as well as particular geotechnical parameters.

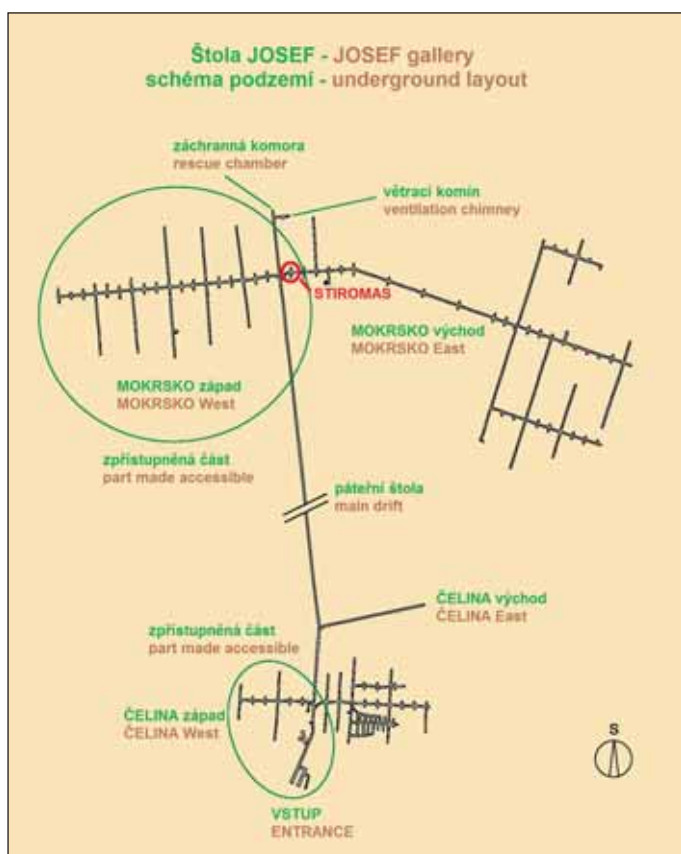
In general, the pressure fracturing can induce fractures up to hundreds meters long and 1 mm thick. The conductivity reflects the width of the fracture affected by the shear stress, fracture surface heterogeneity and rock strength (Rushing and Sullivan, 2003 In Reinicke et al., 2010).

The hydraulic fracturing is most frequently used for interconnection of not communicating areas with natural enhanced fracture system which leads to inflow increase. The purpose of hydrofracturing in Hot Dry Rock environment is to interconnect boreholes and facilitate the geothermal energy extraction from the crystalline basement.

## UNDERGROUND EXPERIMENTAL SITE

The experimental part of the project, i.e. the linear and pulse fracturing tested on micro-samples, macro-samples and in-situ, is carried out in Josef Underground Laboratory operated by the Faculty of Civil Engineering of the Czech Technical University in Prague. Particularly, side drifts JP-2 and SP-4 in the Mokrsko-East belt have been selected for experimental purposes (see Fig. 1). The underground testing advantages include working safety and constant temperature and constant humidity conditions for storage of tested material.





Obr. 1 Umístění výzkumného pracoviště STIROMAS v oblasti Mokrsko východ, Podzemní laboratoř Josef (ČVUT)

Fig. 1 Location of the STIROMAS research workplace in the Mokrsko-East area, Josef Underground Laboratory (Czech Technical University)

Druhý typ testu slouží pro ověření pulzního štěpení. Provedení zkoušky se předpokládá v několika stupních. V první fázi je vzorek zatížen na třetinovou hodnotu tlaku odpovídající porušení vzorku zjištěného při zkoušce lineárního zatěžování a po dosažení této hodnoty přejde zařízení do režimu pulzů. Zatížení pulzním režimem je poté zopakováno na 2/3 hladině zatížení

## HYDRAULIC TESTS

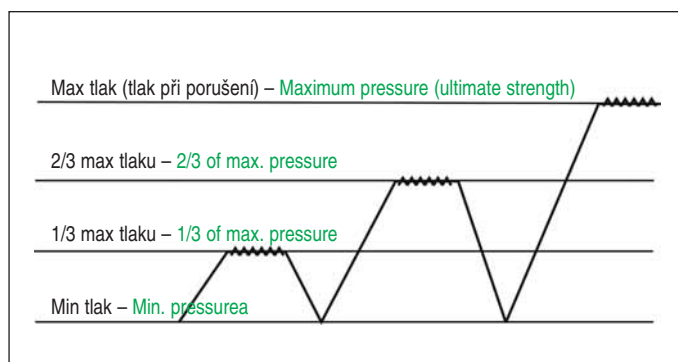
Two types of hydraulic tests have been selected for the project hypothesis verification.

The first type of hydraulic tests is based on linear pressure increase in several steps up to the rock failure.

The second type of hydraulic test intends to verify the pulse technology. The test will be performed in several steps. In the first step, the rock sample is tested up to the pressure corresponding to 1/3 value of the maximal pressure (the maximal pressure was determined previously during the linear test and correspond to the rock failure). Reaching this value (1/3 the critical pressure), the facility will switch into the pulse regime following by pressure increase up to 2/3 value of the maximal pressure. After repeated pulse regime, the pressure is at the final stage increased to its maximal value (see Fig. 2).

## REPRESENTATIVE ROCK TYPES FOR TESTING

Considering the objective of the project, i.e. to develop a technology for pulse fracturing suitable for the most current representatives of non-plastic rocks, a representative set of



Obr. 2 Schéma zkoušky hydraulického pulzního štěpení  
Fig. 2 Hydraulic pulse fracturing chart

Tab. 1 Vybrané horninové typy a lokality odběrových míst pro testování v mikro a makro měřítku  
Table 1 Selected rock types and quarry sampling sites selected for micro-scale and macro-scale testing

Typy hornin Rock Type	Vybrané lokality Quarry Sites	Mikrovzorky Micro-samples	Makrovzorky Macro-samples
Metamorphy (Metamorphic rocks)			
Pararula kvarciticá (Quartzite paragneiss)	Těchobuz	x	-
Pararula migmatitická (Migmatite paragneiss)	Bílkovice	x	x
Spilit (Spillite)	Sýkořice	x	-
Ortorula (Orthogneiss)	Předklášteří (obr. 3 / Fig. 3)	x	-
Amfibolit (Amphibolite)	Markovice	x	x
Magmatity (Magmatic rocks)			
Granit (Granite)	Mokrsko – štola Josef / Josef gallery	x	-
Granit (Granite)	Panské Dubénky	x	x
Vulkanity (Volcanic rocks)			
Ryolit (Rhyolite)	Malé Žernoseky (obr. 3 / Fig. 3)	x	x
Bazalt (Basalt)	Dobkovičky	x	-
Dacit (Dacite)	Mokrsko – štola Josef / Josef gallery	x	-
Referenční vzorek / Reference sample			
Beton (Concrete)	x	x	

a naposledy při definované maximální hodnotě tlaku, při níž dojde k porušení (obr. 2).

### VÝBĚR HORNINOVÝCH TYPŮ PRO TESTOVÁNÍ

S ohledem na cíl projektu, tj. návrh technologického postupu pulzního štěpení, vhodného pro nejrozšířenější reprezentanty neplastických hornin, byla pro účely testů v mikro- a makroměřítku navržena reprezentativní sestava vzorků podle tab. 1.

Jak vyplývá z tab. 1, dva zástupci z testovaných typů hornin (tj. granit a dacit) jsou vybrány ze štoly Josef, aby tak byla umožněna korelace výsledků experimentů na mikrovzorcích a makrovzorcích s identickými experimenty in-situ v Podzemní laboratoři Josef (Semíková et al., 2012).

### VÝZKUM MIKROVZORKŮ

Od každého horninového typu byly vytvořeny tři sady mikrovzorků o výšce 200 mm a průměru 96 mm:

- První sada vzorků byla použita ke stanovení základních geomechanických parametrů (objemová hmotnost, měrná hmotnost, pevnost v prostém tlaku, pevnost v prostém tahu, pevnost v příčném tahu, propustnost, pórovitost, moduly).
- Druhá sada vzorků slouží pro testování stimulace hydraulickým tlakem v laboratorních podmínkách za stupňovitě lineárního nárůstu tlaku až do překročení meze pevnosti.
- Třetí sada mikrovzorků je určena pro ověření metody pulzního hydraulického štěpení.

Pro simulaci skutečných napjatostních podmínek v horninovém masivu je po obvodu pláště válcového vzorku vytvořen komorový tlak, který má odpovídat hodnotě geostatického napětí podle simulované hloubky. Pro vytvoření analogie se zkušebním místem v podzemní laboratoři Josef byla zvolena hodnota komorového tlaku 2,5 MPa (cca 100 m nadložní horniny).

První testy byly provedeny na zkušebních vzorcích betonu třídy C30/37 (obr. 4). Účelem zkušebních testů bylo ověřit chování vzorku při odlišných schématech průběhu zkoušek, stejně tak vliv komorového tlaku. Prvním schématem zkoušek je nastavení hodnoty pracovního tlaku nad hodnotu předpokládané hodnoty kritického tlaku (tlaku, při kterém dojde k porušení) tak, aby došlo k porušení vzorku v lineární nástupové křivce pracovního tlaku (varianta A, obr. 5). U druhého schématu zkoušek je nastavena hodnota pracovního tlaku pod hodnotou kritického tlaku a po jejím dosažení se udržuje konstantní až do porušení vzorku (varianta B, obr. 5).

rock samples designated for testing in micro and macro-scale have been introduced (Table 1). Table 1 reveals that two rock types (granite and dacite) come from the Josef gallery where will be possible further comparison of results acquired from micro/macro testing with in-situ experiments (Semíková et al., 2012).

### MICRO-SAMPLE TESTING

Three sets of cylindric micro-samples (200 mm high, 96 mm in diameter) were prepared for each rock type.

- The first set of samples was used for the determination of basic geomechanical parameters (volume density, specific density, unconfined compressive strength, direct tensile strength, tensile splitting strength, permeability, porosity, modules).
- The second set of samples is used for hydraulic testing in laboratory conditions, with the stepwise pressure load.
- The third set of samples is designed for the pulse hydraulic fracturing.

The simulation of real stress conditions is ensured by chamber pressure corresponding to the geostatic stress depending on the simulated depth. Considering the analogy with the Josef site conditions, the chamber pressure is fixed at 2.5 MPa (corresponding to the 100 m thickness of the top layer).

Initial tests were carried out on trial concrete samples of C30/37 grade (see Fig. 4). The purpose of the trial tests was to investigate the behavior of the sample at various test schemes as well as the effect of the chamber pressure. During the first testing scheme, the working pressure was fixed at value exceeding the assumed value of the critical pressure (the pressure corresponding to rock sample failure) so that the sample fractures within the linear start-up working pressure curve (variant A, see Fig. 5). In the second testing scheme, the working pressure value is fixed under the critical pressure value and, after it is reached, it is maintained constant until the rock sample failure (variant B, Fig. 5).

Fig. 6 shows tests development with the linear loading conducted on concrete samples with parameters introduced in Table 2. These tests contributed to the specification of testing methodology on rock samples both for linear and pulse fracturing.



Obr. 3 Odběrové lokality (foto ISATech); vlevo: Předklášteří (ortorula), vpravo: Malé Žernoseky (ryolit)

Fig. 3 Sampling sites (Photo courtesy of ISATech). Left side: Předklášteří (orthogneiss), right side: Malé Žernoseky (rhyolite)



Tab. 2 Parametry lineárních zkoušek při testování mikrovzorků betonu  
Table 2 Parameters of linear tests during concrete micro-samples testing

Vzorek Sample	Komorový tlak (MPa) Chamber Pressure (MPa)	Pracovní tlak (MPa) Working Pressure (MPa)	Nárůst tlaku (s) Pressure Increase (s)	Doba držení tlaku (s) Duration of keeping the pressure (s)
C1	2,5	30	180	120
C2	2,5	30	180	120
C3	2,5	30	120	120
C4	2,5	30	120	120
C5	2,5	30	120	120
C6	2,5	40	120	120
C7	6	40	120	120
C8	10	40	120	120
C9	2,5	17	20	180
C10	2,5	13,5	20	180



Obr. 4 Vzorek betonu C10 po zkoušce: komorový tlak 2,5 MPa, pracovní tlak 13,5 MPa, čas nástupu 20 s, čas po dosažení pracovního tlaku 180 s (foto ISATech)

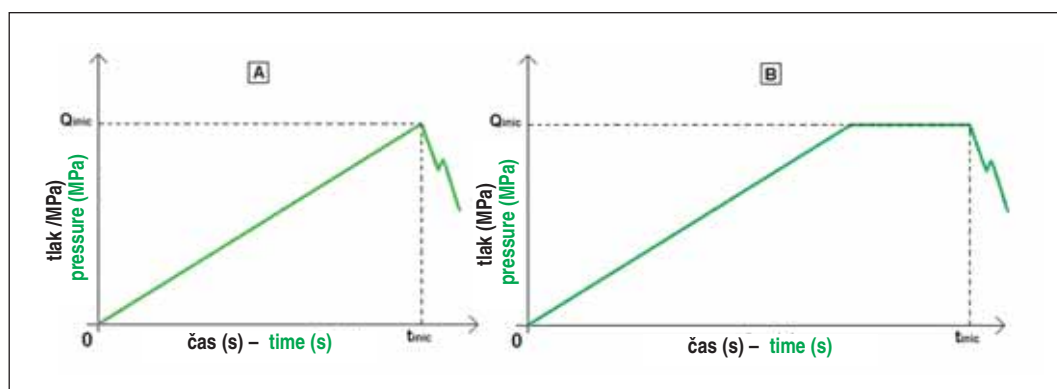
Fig. 4 Concrete sample C10 after testing: Chamber pressure 2.5 MPa, working pressure 13.5 MPa, start-up time 20 s, time interval with constant pressure 180 s (photo courtesy of ISATech)

Na obr. 6 je zobrazen průběh zkoušek s lineárním zatěžováním na vzorcích z betonu, jejichž parametry jsou uvedeny v tab. 2. Výsledkem těchto zkoušek je navržení konečného schématu metodiky zkoušek jak pro lineární, tak i pro pulzní štěpení vzorků.

Vzhledem k tomu, že zkoušené betony nebyly zcela vyzrálé, lze považovat naměřené hodnoty tlaku, při kterých došlo k porušení vzorku, pouze za orientační a při dalších testovacích zkouškách bude nutné zkoušet vzorky normovaně vyzrálé (tj. po 28denním zrání). Přesto lze z průběhů provedených zkoušek odvodit závěr, že na hodnotu pracovního tlaku, při kterém dojde k porušení vzorku, má vliv schéma průběhu zkoušky. Při schématu s lineárním nárůstem tlaku do předem definované hodnoty a následném držení tlaku po určitou dobu na této hodnotě (varianta B) je možné docílit porušení vzorku při nižším pracovním tlaku, než jaký by byl potřeba při variantě schématu zkoušky s lineárním nárůstem tlaku bez roviny držení tlaku (varianta A).

## ZÁVĚR

Výzkumný projekt si stanovil za hlavní cíl definovat vztah mezi působením lineárního a pulzního tlaku na kompaktnost



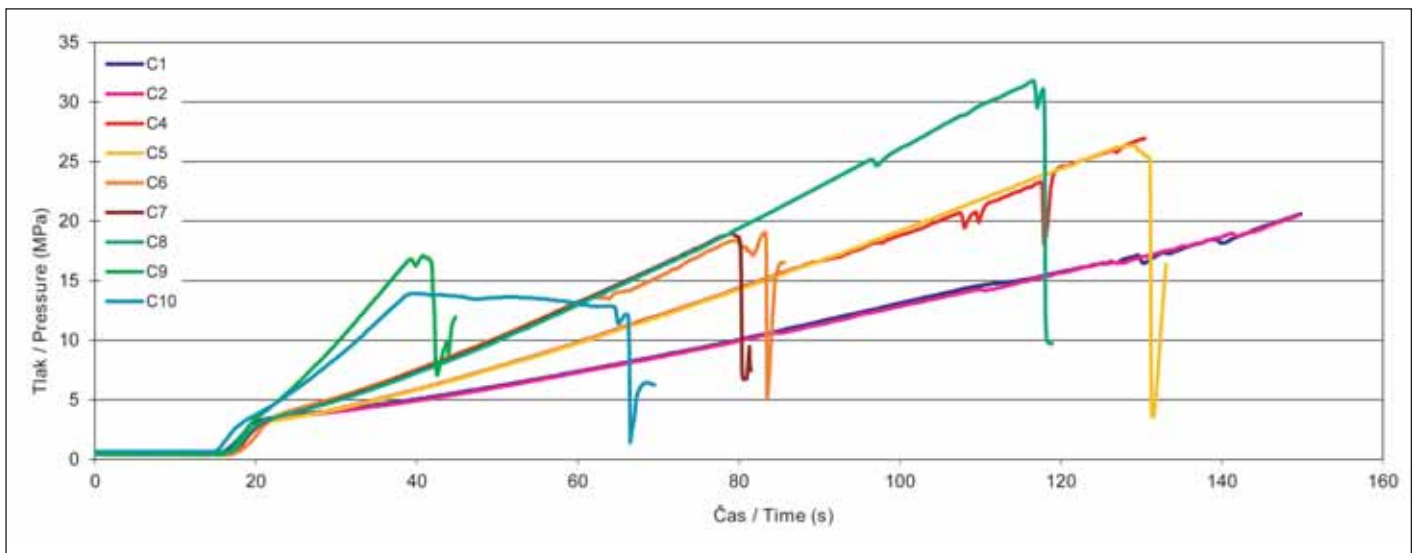
Obr. 5 Rozdílná schémata průběhu zkoušek: A. Pracovní tlak nastaven nad hodnotu kritického tlaku – k porušení dojde v lineární nástupové křivce pracovního tlaku; B. Pracovní tlak nastaven pod hodnotu kritického tlaku – držení konstantního tlaku až do porušení při tlaku  $Q_{inic}$

Fig. 5 Various schemes of the course of tests: A. Working pressure is fixed above the critical pressure value; the sample fractures within the linear start-up working pressure curve. B. Working pressure is fixed under the critical pressure value – constant pressure maintained until the rock failure under the  $Q_{inic}$  pressure

As the tested trial concrete samples were not mature enough, acquired values provide only orientation results which have to be verified and consequently tested on fully mature samples in compliance with the standard (min. 28 days of maturing). Nevertheless, it is already possible to deduce several findings based on pilot trial tests. The value of pressure at the moment of the rock failure is considerably influenced by the test scheme variant. The scheme involving the pressure load up to the pre-defined value and there subsequent maintaining the pressure value for a certain time (variant B) confirmed the sample failure at lower working pressure values than would be necessary for linear pressure increase without maintaining pressure constant (variant A).

## CONCLUSION

Principle objective of the research project is to determine the relationship between linear and pulse pressure load and its effects on the rock stability. The conventional hydraulic fracturing method based on gradual linear pressure increase until the rock failure is tested in order to determine pressures necessary for the rock fracturing depending on the rock type.



Obr. 6 Průběh zkoušek s lineárním zatěžováním na vzorcích betonu  
 Fig. 6 The course of tests with linear loading conducted on concrete samples

vytypovaných hornin. Při klasické metodě hydraulického štěpení je hornina rozrušována lineárním tlakem, tzn. prostředí je zatěžováno pozvolným nárůstem tlaku až do porušení horniny. Tato metoda je v rámci projektu testována za účelem stanovení tlaků nutných k rozvolnění pro jednotlivé typy hornin.

Z aktuálně dostupných výsledků testování zkušební sady nevyzrálých betonů je zřejmé, že režim působení tlaku v průběhu zkoušky má zásadní vliv na hodnotu tlaku, při kterém dojde k porušení.

Výsledky pilotních zkoušek umožní upřesnění metodiky, která bude kromě referenčního vzorku betonu dále aplikována na 10 odlišných typů hornin a povede tak k ověření prostorového dosahu rozvolnění v závislosti na charakteristických vlastnostech horniny.

#### Poděkování

Výzkumný projekt je realizován za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu (ev. č. FR-TI3/523). Na řešení projektu spolupracují následující organizace: GEOMEDIA, s. r. o. (koordinátor), ARCADIS Geotechnika, a. s., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, ISATech, s. r. o., Subterra, a. s.

MGR. HANA JIRÁKOVÁ, Ph.D., hana.jirakova@geomedia.cz,  
 RNDr. MICHAL STIBITZ, michal.stibitz@geomedia.cz,  
 GEOMEDIA, s. r. o.,  
 ING. JAN VINTERA, jvintera@subterra.cz,  
 SUBTERRA, a. s.,  
 MGR. MICHAL VANĚČEK, vanecek@isatech.cz,  
 ISATech, s. r. o.

Recenzoval: prof. Ing. Jiří Barták, DrSc.

Based on currently available results from concrete samples is obvious that the type of the pressure regime, i.e. linear versus pulse, has a fundamental influence on the pressure value corresponding to the rock failure.

The results of pilot tests already carried out will lead to methodology specification further applied on 10 different types of rock including the mature concrete sample. This will facilitate the determination of spatial extent of the fracture development depending on different rock properties.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The research project was carried out with the financial support of the Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic (Ref. No. FR-TI3/523). Following organisations are involved in the project: GEOMEDIA s.r.o. (coordinator), ARCADIS Geotechnika a.s., Faculty of Civil Engineering of Czech Technical University in Prague, ISATech, s.r.o., Subterra a.s.

MGR. HANA JIRÁKOVÁ, Ph.D., hana.jirakova@geomedia.cz,  
 RNDr. MICHAL STIBITZ, michal.stibitz@geomedia.cz,  
 GEOMEDIA, s. r. o.,  
 ING. JAN VINTERA, jvintera@subterra.cz,  
 SUBTERRA, a. s.,  
 MGR. MICHAL VANĚČEK, vanecek@isatech.cz,  
 ISATech, s. r. o.

#### LITERATURA / REFERENCES

- ECONOMIDES, M. J., NOLTE, K. G. *Reservoir Stimulation*. 3. vyd. NY: Wiley, 2000, 856 s. ISBN 0 471 491926.
- REINICKE, A., RYBACKI, E., STANCHITS, S., HUENGES, E., DRESEN, G. Hydraulic fracturing stimulation techniques and formation damage mechanism – Implication from laboratory testing of tight sandstone – proppant system. *Chemie der Erde – Geochemistry*, roč. 70, č. 3, s. 107–117.
- RUSHING, J. A., SULLIVAN, R. B. Evaluation of a Hybrid Water-Frac Stimulation Technology in the Bossier Tight Gas Sand Play. Society of Petroleum Engineers. Sborník z konference „SPE Annual Technical Conference and Exhibition“ konané ve dnech, 5.–8. října 2003, Denver, Colorado. ISBN 978-1-55563-152-9.
- SEMÍKOVÁ, H., BÍLÝ, P., KRÁSNÝ, O. Stimulace horninového masivu pro vytvoření puklinového rezervoáru pro jímání geotermální energie systémem Hot Dry Rock (STIROMAS). Příspěvek na konferenci „OZE 2012 – Výsledky výzkumu, vývoje a inovací pro obnovitelné zdroje energie“ konané ve dnech. 23.–27. 4. 2012, Kouty nad Desnou.



# PRAVDĚPODOBNOSTNÍ ANALÝZA METODOU LATIN HYPERCUBE SAMPLING

## PROBABILISTIC ANALYSIS USING LATIN HYPERCUBE SAMPLING METHOD

TOMÁŠ SVOBODA, MATOUŠ HILAR

### 1 ÚVOD

Mechanické parametry horninového masivu získané v rámci geotechnického průzkumu pro návrh podzemních staveb (případně i jiných konstrukcí) mají často značný rozptyl. Daná skutečnost vyplývá nejen z vlastností geologického prostředí, které zpravidla není homogenní, ale je zapříčiněna také nepřesnostmi prováděných laboratorních či polních zkoušek.

Nejistoty ve vstupních parametrech jsou v deterministických výpočtech v geotechnické praxi zohledněny pomocí bezpečnostních koeficientů. Ty do výpočtů podle Eurokódu 7 (EC7 – ČSN EN 1997-1) vstupují ve formě dílčích součinitelů aplikovaných na materiálové parametry, samotná zatížení, jejich účinky, nebo případně oboje. Při standardním výpočtu mohou být výsledky značně konzervativní, model s redukovánými vstupními parametry se může výrazně odlišovat od skutečného chování. V normě EN 1990:2002 je povoleno použití pravděpodobnostních metod, které zohledňují variabilitu vstupních parametrů a zatěžovacích stavů. Pravděpodobnostní výpočet je formulován jako alternativa, která má být ověřena standardním výpočtem s využitím dílčích součinitelů. Pomocí pravděpodobnostních metod lze určit pravděpodobnost poruchy a index spolehlivosti, jejichž minimální hodnoty pro mezní stav únosnosti a jednotlivé třídy spolehlivosti jsou doporučeny v EC 7. Výsledkem pravděpodobnostního přístupu pak je nejen, zda konstrukce vyhoví, či nikoli, ale i stanovení míry rizika porušení souvisejícího s navrženou konstrukcí.

Pravděpodobnostní výpočty se stávají stále dostupnějším nástrojem pro řešení geotechnických úloh. Jejich rozšíření v běžné praxi brání zejména vyšší časové nároky na zpracování výpočtů, nároky na výstupy z geotechnického průzkumu, dále také chybějící implementace pravděpodobnostních metod v běžně používaném programovém vybavení. Následující příspěvek se proto zabývá redukční pravděpodobnostní metodou Latinských hyperkrychlí (Latin Hypercube Sampling), která je alternativou k časově náročné simulační metodě Monte Carlo. Obsahem článku je především popis algoritmu metody, její vývoj, současný stav poznání a aplikace v české geotechnické praxi.

### 2 NÁHODNÉ PROMĚNNÉ

Výsledky numerického modelování geotechnických úloh jsou velmi citlivé na vstupní parametry (v souvislosti s pravděpodobnostními analýzami lze hovořit o proměnných). Nejistota spojená se stanovením parametrů vede k nejistotě určení výsledku celého systému – řešeného problému. Pro jejich vyjádření je vhodné brát v úvahu jejich charakter náhodných veličin. Náhodná veličina nabývá různých hodnot a je charakterizována rozdělením hustoty pravděpodobnosti. Z praktického hlediska studie dále uvažuje pouze spojité náhodné veličiny, které mohou nabývat všech hodnot z daného intervalu. Náhodné vstupní veličiny jsou u pravděpodobnostních výpočtů reprezentovány sadou deterministických čísel (tzv. realizací, vzorků), která jako celek

### 1 INTRODUCTION

Mechanical parameters of rock mass obtained for the purpose of designing underground structures (or other structures) within the framework of geotechnical investigation often display significant scatter. This fact follows not only from the properties of the geological environment, which usually is not homogeneous, but it is also caused by inaccuracies in the executed laboratory of field tests.

Uncertainties in input parameters are allowed for in deterministic calculations in the geotechnical practice by means of safety coefficients. They enter the calculations to Eurocode 7 (EC7 – ČSN EN 1997-1) in the form of partial coefficients applied to material parameters, loads themselves, their effects, or both of them. In a standard model calculation the results may be significantly conservative; a model with reduced input parameters may substantially differ from the real behaviour. The EN 1990:2002 standard permits the use of probabilistic methods, which take into consideration the variability of input parameters and loading cases. A probabilistic calculation is formulated as an alternative, which should be verified by a standard calculation using partial coefficients. By using probabilistic methods it is possible to determine the probability of a defect and the index of reliability, the minimum values of which for the ultimate limit state and individual reliability classes are determined in the EC 7. The result of the probabilistic approach is then not only the information whether the structure will or will not satisfy requirements, but also the determination level of the risk of a failure connected with the designed structure.

Probabilistic calculations have been becoming an ever more attainable tool for solving geotechnical problems. Their spreading in the common praxis is prevented first of all by the higher consumption of time for executing the calculations, requirements for outputs from geotechnical investigation and, in addition, due to the absence of the implementation of probabilistic methods in a commonly used software. The following paper therefore deals with the Latin Hypercube Sampling reduction probabilistic method, which is an alternative to the time-intensive Monte Carlo simulation method. The paper content comprises first of all the description of the method algorithm, its development, current state of knowledge and application within the Czech geotechnical practice.

### 2 RANDOM VARIABLES

Results of numerical modelling of geotechnical problems are very sensitive to input parameters (it is possible in the context of probabilistic analyses to speak about variables). The uncertainty associated with the determination of parameters leads to an uncertainty in the determination of results of the entire system – the problem to be solved. For their formulation it is advisable to take into consideration their character of random quantities. A random quantity assumes various values and is characterised by the probability density distribution. From the practical point of view, the study further takes into consideration only continuous random

tvoří jednu z deterministických úloh, ze kterých se skládá řešený náhodný problém. Vstupní sady parametrů jsou tak použity pro získání odezvy (např. stupeň stability) geomechanického modelu, u níž hledáme statistické a pravděpodobnostní charakteristiky.

Spojité náhodné veličiny  $X$  je charakterizována *funkcí hustoty pravděpodobnosti*  $f(x)$  a *kumulativní distribuční funkcí*  $F(x)$  (1), pro něž platí:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx \quad (1)$$

Polohu hodnot náhodné veličiny  $X$  nejlépe vystihuje střední hodnota značená  $EX$  (též  $\mu$ ), variabilitu (varianci, rozptýlenost) dat vyjadřuje *rozptyl*  $Var X$ , též  $\sigma_X^2$  (2):

$$EX = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x) dx \quad Var X = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - EX)^2 f(x) dx \quad (2)$$

Odmocnina z rozptylu je nazývána *směrodatnou odchylkou* ( $\sigma_X = \sqrt{\sigma_X^2}$ ). Dalšími charakteristikami (třetím a čtvrtým momentem) náhodné veličiny vhodnými pro určení asymetrie pravděpodobnosti rozdělení jsou *šikmost* a *špičatost*.

## 2.1 Závislost náhodných proměnných

Důležitou vlastností náhodných proměnných je stupeň jejich vzájemné závislosti. Ta je charakterizována kovariancí  $cov(X_i, X_j)$ , respektive koeficientem korelace  $corr(X_i, X_j)$  (3), který se na rozdíl od kovariance nemění při lineární transformaci proměnných. Korelační koeficient nabývá hodnot od  $-1$  do  $1$ .

$$cov(X_i, X_j) = E(X_i X_j) - E(X_i)E(X_j) \quad corr(X_i, X_j) = \frac{cov(X_i, X_j)}{\sigma_{X_i} \sigma_{X_j}} \quad (3)$$

kde  $i, j = 1, \dots, n$

Při prostorovém popisu mechanických vlastností horninového masivu se předpokládá, že hodnoty dané proměnné ve dvou vzájemně blízkých bodech budou podobné. Naopak ve dvou vzdálených bodech se již výrazně liší a parametry jsou téměř nekorelované. Změnu korelačního koeficientu vzhledem ke vzdálenosti dvou bodů v prostoru popisuje *korelační funkce*  $\rho(X_i, X_j)$ . Z uvedených vlastností vyplývá, že s rostoucí vzdáleností bodů hodnota korelačního koeficientu klesá. Závislost jeho poklesu je obvykle popisována exponenciálním tvarem korelační funkce definované polohou bodů  $x_i, x_j$  náhodných proměnných  $X_i, X_j$  a korelační délkou.

## 2.2 Pravděpodobnostní rozdělení

Pro statistické zpracování variabilních vstupních parametrů je nejprve nutné tyto parametry popsat pravděpodobnostním rozdělením. Existuje řada metod k tomu určených, například  $\chi^2$  (chi kvadrát) test, Kolmogorov–Smirnov test a další, případně je vhodné využít statistických analýz implementovaných do uživatelských programů (např. QC Expert). Pokud je k dispozici málo vstupních dat, či známe pouze interval hodnot, ve kterých se parametry pohybují, je obtížné stanovit odpovídající rozdělení.

Převážná většina studií a prací zabývajících se pravděpodobnostní analýzou geotechnických problémů (např. Hamm a kol., 2006, Flores, 2010) poukazuje na skutečnost, že parametry horninového (zeminného) masivu je vhodné popsat normálním, či log-normálním rozdělením. Výjimkou je použití Weibullova rozdělení, případně exponenciálního rozdělení, a to především z důvodu existence jednoduchého řešení distribuční funkce.

## 3 METODA LATIN HYPERCUBE SAMPLING

Metoda Latin Hypercube Sampling (LHS) je numerická simulační metoda typu Monte Carlo (MC). Metoda Monte Carlo (obr. 1) je běžně používána pro řešení náhodných problémů, u kterých požadujeme statistické a pravděpodobnostní informace odezvy problému. K jejich přesnému odhadu však metoda

quantities, which can assume all values from a particular interval. Random input quantities are represented in probabilistic calculations by a set of deterministic figures (the so-called realisations, samples), which as a whole forms one of deterministic problems which the random problem being solved consists of. The input sets of parameters are subsequently used for obtaining the response (e.g. the degree of stability) of the geomechanical model at which we seek statistical and probabilistic characteristics.

A continuous random quantity  $X$  is characterised by the *function of probability density*  $f(x)$  and the *cumulative distribution function*  $F(x)$  (1), for which it applies:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx \quad (1)$$

The position of the values of random quantity  $X$  is best fitted by the *mean value* denoted as  $EX$  (also  $\mu$ ); data variability (variance, dissemination) is expressed by *scatter*  $Var X$ , also  $\sigma_X^2$  (2):

$$EX = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x) dx \quad Var X = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - EX)^2 f(x) dx \quad (2)$$

The square root of scatter is titled as *standard deviation* ( $\sigma_X = \sqrt{\sigma_X^2}$ ). Other characteristics (third and fourth moment) of the random quantities suitable for the determination of the probability distribution asymmetry are *skewness* and *kurtosis*.

## 2.1 Dependence of random variables

An important property of random variables is the degree of their interdependence. The interdependence is characterised by covariance  $cov(X_i, X_j)$ , or the correlation coefficient  $corr(X_i, X_j)$  (3), which, in contrast with covariance, does not change when variables are being linearly transformed. The correlation coefficient assumes values from  $-1$  to  $1$ .

$$cov(X_i, X_j) = E(X_i X_j) - E(X_i)E(X_j) \quad corr(X_i, X_j) = \frac{cov(X_i, X_j)}{\sigma_{X_i} \sigma_{X_j}} \quad (3)$$

where  $i, j = 1, \dots, n$

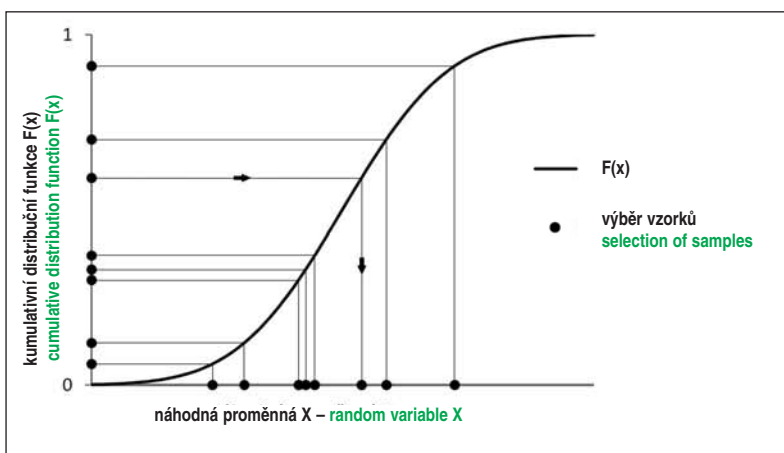
In the case of a spatial description of mechanical properties of rock mass it is assumed that the values of the particular variable in two points found close to each other will be similar. On the contrary, in two remote points the values already significantly differ and the parameters are nearly uncorrelated. The change in the correlation coefficient with regard to the distance between the two points in space is described by the *correlation function*  $\rho(X_i, X_j)$ . It follows from the above-mentioned properties that the correlation coefficient value drops with the growing distance between the points. The dependence of the drop is usually described by means of the exponential shape of the correlation function defined by the positions of points  $x_i, x_j$  of random variables  $X_i, X_j$  and the *correlation length*.

## 2.2 Probability distribution

It is necessary for the statistic processing of variable input parameters to start with the description of the probability distribution. There are several methods available which are designed to this purpose, for example the  $\chi^2$  (chi-squared) test, Kolmogorov - Smirnov test and other, or it is advisable to use statistical analyses implemented into user programs (e.g. QC Expert). If the amount of input data is insufficient or we know only the interval of the values within which the parameters vary, it is difficult to determine the relevant distribution.

The overwhelming majority of studies and works dealing with the probabilistic analysis of geotechnical problems (e.g. Hamm et al. 2006, Flores 2010) point out the fact that it is recommendable to describe ground (soil) mass parameters by a normal or log-normal distribution. The use of Weibull distribution or exponential distribution is an exception, first of all because of the existence of a simple solution to the distribution function.





Obr. 1 Princip výběru vzorků metody Monte Carlo  
Fig. 1 The principle of the Monte Carlo method sampling

Monte Carlo vyžaduje obvykle velmi mnoho pokusů (běhů programu, simulací), aby bylo dosaženo požadované chyby. Z důvodu snížení počtu simulací a z nich vyplývající značné časové náročnosti byla vyvinuta řada redukčních metod.

První zavedení metody Latinských hyperkrychlí souvisí s řešením a zpracováním nejistot v analýzách bezpečnosti nukleárních elektráren ve Spojených státech amerických. Metoda byla prvně publikována Conoverem a jeho kolegy v roce 1979 a její praktické použití v práci Imana a Conovera (1982). LHS je velmi účinným nástrojem pro provádění statistických analýz, které jsou zaměřeny na stanovení nižších statistických momentů výsledných proměnných. Výrazně snižuje počet simulací při zachování vysoké přesnosti odhadů (počet simulací  $N$  je v řádu desítek až prvních stovek). LHS tak konverguje výrazně rychleji ke správnému řešení než metoda Monte Carlo. Výhoda metody plyne ze způsobu výběru realizací, kdy celý rozsah vstupní náhodné proměnné je pokryt rovnoměrně vzhledem k distribuční funkci. Žádná reálná hodnota není předem vyloučena. Současně metoda zachovává zjištěné (odhadnuté) funkce hustoty pravděpodobnosti pro jednotlivé náhodné proměnné a stanovené korelační koeficienty mezi nimi. Aby bylo dosaženo těchto výhod, LHS sestavuje vysoce závislou sdruženou hustotu pravděpodobnosti vektoru náhodných veličin.

### 3.1 Výběr vzorků náhodné proměnné

Principem metody je  $N$  násobné generování vzorků každé náhodné proměnné. Definiční obor kumulativní distribuční funkce  $F(x)$  odpovídající funkci hustoty pravděpodobnosti  $f(x)$  dané proměnné je rozdělen na  $N$  disjunktivních intervalů (vrstev). Jednotlivé intervaly nabývají shodné pravděpodobnosti  $1/N$ . Z každé vrstvy je vybrána jedna hodnota, která reprezentuje celý interval a v simulaci se použije právě jednou. Jedná se tedy o stratifikační metodu. Pomocí inverzní transformace distribuční funkce je získána reprezentativní hodnota náhodné proměnné.

Existuje více způsobů výběru vzorků z jednotlivých intervalů na oboru distribuční funkce. Jednou z metod je vygenerování  $N$  náhodných čísel  $n$  z intervalu  $\{0,1\}$  o rovnoměrném rozdělení. Tato čísla jsou následně lineární transformací přiřazena k odpovídajícím intervalům a výše zmíněnou inverzní transformací distribuční funkce stanoveny hodnoty vzorků  $x_{i,k}$  (4) proměnné  $X_i$ :

$$x_{i,k} = F_i^{-1} \left( \frac{n + (k - 1)}{N} \right) \quad (4)$$

kde  $k$  je  $k$ -tý vzorek (též vrstva, interval)  $i$ -té náhodné proměnné  $X_i$ ,  $F_i^{-1}$  je inverzní distribuční funkce této proměnné,  $n$  je náhodně vygenerované číslo z rovnoměrného intervalu  $\{0,1\}$ ,  $N$  je počet intervalů a současně počet simulací. Způsob výběru a samotná metoda je často označována jako „LHS – random“.

### 3 LATIN HYPERCUBE SAMPLING METHOD

The Latin Hypercube Sampling (LHS) method is a numerical simulation method of the Monte Carlo (MC) type. The Monte Carlo method (see Fig. 1) is commonly used for solutions to random problems in which we require statistical and probabilistic information on the problem response. However, for the exact estimation the Monte Carlo method usually requires very many trials (program runs, simulations) to achieve the required error. Several reduction methods have been developed with the objective to reduce the quantity of simulations and the significant time demands following from them.

The first implementation of the Latin Hypercube Sampling method is associated with the solving and processing of uncertainties in analyses of the safety of nuclear power plants in the United States of America. The method was published for the first time by Conover and

his colleagues in 1979 and its practical use was first described in the work by Iman and Conover (1982). The LHS is a very effective tool for executing statistical analyses which are focused on the determination of lower moments of order statistics of resultant variables. It significantly reduces the number of simulations with the high precision of estimations (the number of simulations  $N$  is in the order of tens to several hundreds) maintained. In this way the LHS converges to the correct solution significantly faster than the Monte Carlo method. The advantage of this method follows from the method of the selection of realisations, where the entire scope of the input random variable is covered by uniformly with respect to the distribution function. No real value is a priori excluded. The current method preserves the identified (estimated) functions of the density of probability for individual random variables and the determined coefficients of correlation between them. The LHS makes up the highly dependent composite probability of the density of the random values vector.

#### 2.1 Random variable sampling

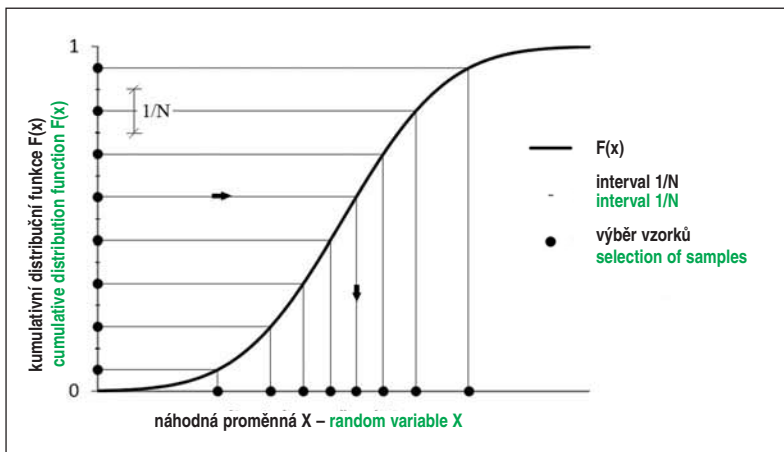
The method principle lies in repeating  $N$  times the generation of samples of each random variable. The domain of the cumulative distribution function  $F(x)$  corresponding to the probability density function  $f(x)$  for the particular variable is divided into  $N$  disjunctive intervals (layers). Individual intervals assume identical probabilities of  $1/N$ . One value is selected from each layer to represent the entire interval and is to be used only once in the simulation. It is therefore a case of a stratification method. The representative value of the random variable is derived by means of the inverse transformation of the distribution function.

There are more methods available for the selection of samples from individual intervals within the domain of the distribution function. One of the methods lies in generating  $N$  uniformly distributed random numbers  $n$  from the interval  $\{0,1\}$ . These numbers are subsequently bound to corresponding intervals using linear transformation and the values of samples  $x_{i,k}$  (4) of the variable  $X_i$  are determined by means of the above-mentioned inverse transformation of the distribution function:

$$x_{i,k} = F_i^{-1} \left( \frac{n + (k - 1)}{N} \right) \quad (4)$$

where  $k$  is the  $k^{\text{th}}$  sample (also layer, interval) of the  $i^{\text{th}}$  random variable  $X_i$ ,  $F_i^{-1}$  is the inverse distribution function of this variable,  $n$  is a randomly generated number from the interval  $\{0,1\}$ ,  $N$  is the number of intervals and, at the same time, the number of simulations. The method of the selection and the method itself are often referred to as „LHS – random“.

Another method of generating samples of a random variable which is applied in the majority of studies is selecting a value



Obr. 2 Princip výběru vzorků metody „LHS median“  
Fig. 2 The principle of the LHS Median method sampling

Dalším způsobem generování vzorků náhodné proměnné, který je aplikován v převážné většině studií, je výběr hodnoty ze středu intervalu  $1/N$  na distribuční funkci, který je spojený opět s přímým použitím inverzní distribuční funkce (5):

$$x_{i,k} = F_i^{-1} \left( \frac{k-0,5}{N} \right) \quad (5)$$

Tato metoda je někdy označována jako „LHS median“. Obr. 2 znázorňuje kumulativní distribuční funkci  $F(x)$ , která je rozdělena na osm intervalů o stejné pravděpodobnosti  $1/N$ . Body na vertikální ose představují středy těchto intervalů a následně vyznačují odpovídající hodnoty proměnné  $X$ .

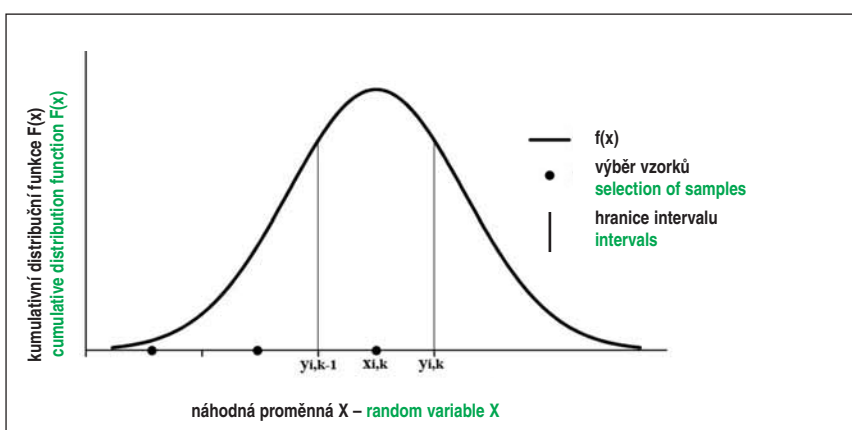
Autoři Huntington a Lyrantzis (1998), Keramat a Kielbasa (1999) poukazují na nevýhody této stratifikační metody. Ty se týkají především krajních vrstev oboru distribuční funkce, které nejvíce ovlivňují hodnotu rozptylu, šikmosti a špičatosti rozdělení vstupních veličin. Zatímco tato metoda poskytne odpovídající, či velmi blízkou střední hodnotu vzorků té požadované, rozptyl se většinou výrazně liší.

Huntington a Lyrantzis navrhují řešit výběr reprezentativních vzorků  $x_{i,k}$  (6) jako střední hodnotu intervalu vymezeného na funkci hustoty pravděpodobnosti dané proměnné  $X_i$ . Vzorky se tak nacházejí přesně v těžších rozdělovacích ploch.

$$x_{i,k} = N \int_{y_{i,k-1}}^{y_{i,k}} xf(x)dx \quad (6)$$

Meze integrálu  $y_{i,k}$  lze určit ze vztahu (7):

$$y_{i,k} = F_i^{-1} \left( \frac{k}{N} \right) \quad (7)$$



Obr. 3 Princip výběru vzorků metody „LHS mean“  
Fig. 3 The principle of the LHS Mean method sampling

from the mid-point of the interval  $1/N$  on the distribution function, which is again associated with the direct use of the distribution function (5):

$$x_{i,k} = F_i^{-1} \left( \frac{k-0,5}{N} \right) \quad (5)$$

This method is sometime referred to as the „LHS median“. Fig. 2 depicts the cumulative distribution function  $F(x)$ , which is divided into eight intervals with equal probability of  $1/N$ . Points on the vertical axis represent mid-points of these intervals and subsequently mark the corresponding values of the variable  $X$ .

Authors Huntington and Lyrantzis (1998), Keramat and Kielbasa (1999) point out disadvantages of this stratification method. These disadvantages are first of all related to extreme layers of the distribution function domain, which most of all affect the variance of input quantities. Whilst this method provides the adequate value or a mean value very close to the required value of samples, the variance is mostly significantly different.

Huntington and Lyrantzis propose that the selection of representative samples  $x_{i,k}$  (6) should be solved as a mean value of the interval delineated on the function of the density of probability of a particular variable  $X_i$ . In this case the samples are located exactly in the median points of dividing areas.

$$x_{i,k} = N \int_{y_{i,k-1}}^{y_{i,k}} xf(x)dx \quad (6)$$

Limits of integration  $y_{i,k}$  can be determined from the relationship (7):

$$y_{i,k} = F_i^{-1} \left( \frac{k}{N} \right) \quad (7)$$

The method referred to as the LHS Mean (see Fig. 3) catches the probability density function, where the mean value is determined exactly and the estimation of the variance of the particular variable is significantly closer to the required variance. The improvement of the sampling method is demonstrated by the authors by comparing the statistical accuracies of the two methods for exponentially distributed random variables with various number of samples (simulations). The values of the samples selected using the two methods are nearly identical; they differ only at the distribution boundaries. Fig. 4 demonstrates the difference in the selection of samples using both methods for a normally distributed variable  $f(x)$ , which is in this particular case characterised by Young's modulus  $E$ . The influence of the number of simulations on the dissimilarity of the selection of samples is obvious.

The LHS Mean method converges to a correct solution faster than the LHS Median method, therefore it requires smaller number of simulations. This fact is even confirmed by Vořechovský (2009).

### 3.2 Form of samples and their arrangement

When the LHS method is applied, one of the two forms of samples arranged in sets for individual simulations is usually taken into consideration. In the first set, after generating representative samples for all random variables taken into consideration, samples for individual simulations are selected in the form of random permutations of whole numbers 1, 2, ... to  $N$  (table 1).

The permutation table lines define the number of simulations  $N$  and their sequence, whilst the columns define the number of variables  $X_i$  taken into consideration when solving the random



Metoda, často nazývaná „LHS mean“ (obr. 3), lépe vystihuje funkci hustoty pravděpodobnosti, kdy střední hodnota je stanovena přesně a odhad rozptylu dané proměnné je značně bližší požadovanému. Vylepšení vzorkovací metody autoři demonstrují na srovnání statistické přesnosti obou metod pro exponenciálně rozdělené náhodné proměnné o různém počtu vzorků (simulací). Hodnoty vzorků vybrané oběma způsoby jsou téměř identické, liší se pouze „okrají“ rozdělení. Obr. 4 demonstruje rozdíl ve způsobu výběru vzorků obou metod pro normálně rozdělenou proměnnou  $f(x)$ , která je v daném případě charakterizována Youngovým modulem  $E$ . Patrný je vliv počtu simulací na odlišnost výběru vzorků.

Metoda „LHS mean“ konverguje ke správnému řešení rychleji než metoda „LHS median“, a tudíž vyžaduje menší počet simulací. Tuto skutečnost potvrzuje i Vořechovský (2009).

### 3.2 Forma vzorků a jejich uspořádání

Při aplikaci metody LHS se většinou uvažuje jedna ze dvou forem vzorků uspořádaných do sad pro jednotlivé numerické simulace. V první, po vygenerování reprezentativních vzorků pro všechny uvažované náhodné proměnné, jsou vzorky do jednotlivých simulací vybírány ve formě náhodných permutací celých čísel 1, 2, ... až  $N$  (viz tabulka 1).

Řádky permutační tabulky definují počet simulací  $N$  a jejich pořadí, sloupce počet proměnných  $X_i$  uvažovaných při řešení náhodného problému. Jednotlivé prvky, čísla permutační tabulky určují  $k$ -tou vrstvu (interval), ze které je vybrán vzorek  $x_{i,k}$  proměnné  $X_i$ . Jakmile jsou pořadová čísla nahrazena vzorky, můžeme hovořit o matici  $\mathbf{X}$   $K \times N$ , kde  $K$  označuje počet proměnných a  $N$  počet simulací.

Druhá forma uvažuje normalizované vzorky uspořádané do matice  $\mathbf{U}$   $K \times N$ .

$$u_{ij} = \frac{x_{i,j} - u_j}{\sigma_j}$$

Tab. 1 Permutační tabulka – počet simulací  $N$ /proměnných  $X_i$

Table 1 Permutation table – number of simulations  $N$ /variables  $X_i$

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_i$
1	3	1	4	3	5
2	5	2	2	1	4
3	1	4	3	5	1
4	4	3	5	2	3
$N$	2	5	1	4	2

problem. Individual elements, numbers in the permutation table, determine the  $k^{\text{th}}$  layer (interval) which the sample  $x_{i,k}$  of the variable  $X_i$  is selected from. As soon as the sequence numbers are replaced by samples, we can speak about an  $\mathbf{X}$   $K \times N$  matrix, where the  $K$  denotes the number of variables and  $N$  is for the number of simulations.

The second form considers standardised elements arranged in a  $\mathbf{U}$   $K \times N$  matrix.

$$u_{ij} = \frac{x_{i,j} - u_j}{\sigma_j}$$

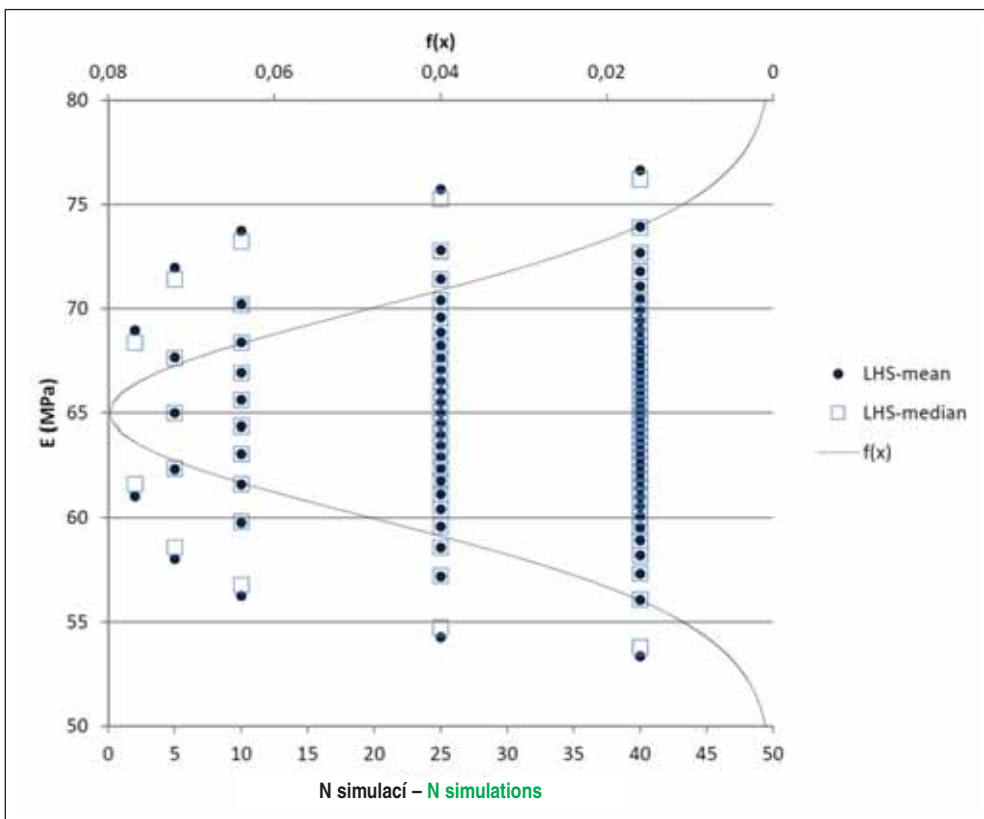
where  $u_j$  and  $\sigma_j$  are the mean value and standard deviation of the  $j^{\text{th}}$  variable respectively. This transformation will ensure that all columns (variables) have a zero mean value and unit variance. Other options are to work directly with the values of samples of individual variables or with random variables from the uniform distribution (0,1) generated in the columns of a  $K \times N$  matrix.

However, significant undesired correlations affecting the accuracy and quality of results usually originate among individual variables. The random permutation described above represents the simplest permutation method. The assumption is adopted that the generated vectors of the  $\mathbf{X}$  matrix are independent, or the dependences which originate are sufficiently small.

### 3.3. Methods for introducing statistical dependence

It is advisable to verify the measure of statistical dependence of individual vectors (columns of the permutation table) using a Pearson's linear correlation coefficient or a Spearman's rank correlation coefficient. The majority of works (see below) solve the implementation of statistical correlation in the form of exchanging the sequence of samples at individual variables and do not change their values. In this way, the probability distribution of each random quantity is preserved.

There are several methods for selecting samples proposed for the simulation of correlated random vectors available within the framework of Monte Carlo type of simulations, where random variables have arbitrary probability distribution and values of correlation coefficients. This paper is further focused on a brief description and assessment of a group of methods which are based on the optimisation of the sequence of samples



Obr. 4 Porovnání výběru vzorků metodami „LHS median“ a „LHS mean“ se zohledněním vlivu počtu simulací  
Fig. 4 Comparison of sampling using the LHS Median and LHS Mean methods with the number of simulations taken into consideration

kde  $u_j$  a  $\sigma_j$  jsou střední hodnota a směrodatná odchylka  $j$ -té proměnné. Tato transformace zajistí, že všechny sloupce (proměnné) mají nulovou střední hodnotu a jednotkový rozptyl. Dalšími možnostmi je pracovat přímo s hodnotami vzorků jednotlivých proměnných nebo s náhodnými hodnotami z rovnoměrného rozdělení (0,1) vygenerovaných ve sloupcích matice  $K \times N$ .

Mezi jednotlivými proměnnými však dochází zpravidla ke vzniku značných nežádoucích korelací, které ovlivňují přesnost a kvalitu výsledků. Výše popsaná náhodná permutace představuje nejjednodušší permutační metodu. Je přijat předpoklad, že vygenerované vektory matice  $X$  jsou nezávislé, případně vzniklé závislosti dostatečně malé.

### 3.3 Metody zavedení statistické závislosti

Míru statistické závislosti jednotlivých vektorů (sloupců permutační tabulky) je vhodné ověřit využitím Pearsonova lineárního korelačního koeficientu nebo Spearmanova koeficientu pořadové korelace. Většina prací (viz dále) řeší implementaci statistické korelace formou záměny pořadí vzorků u jednotlivých proměnných a nemění již jejich hodnoty. Tímto způsobem je zachováno pravděpodobnostní rozdělení každé náhodné proměnné.

Existuje řada metod výběru vzorků navržených pro simulaci korelovaných náhodných vektorů v rámci simulací typu Monte Carlo, kdy náhodné proměnné disponují libovolným pravděpodobnostním rozdělením a hodnotami korelačních koeficientů. Článek se dále zaměřuje na stručný popis a hodnocení skupiny metod, která je založena na optimalizaci pořadí vzorků ve sloupcích matice  $K \times N$ , které byly generovány bez přihlídnutí ke korelacím.

Ortogonalní transformace nezávislých náhodných proměnných v korelované představuje nejrozšířenější způsob zavádění korelace v metodě LHS a vychází z metody publikované autory Scheuerem a Stollerem (1962). Ti navrhli způsob generování korelovaných proměnných s Gaussovým rozdělením, jenž je založený na Choleského dekompozici kovarianční matice (viz dále). Iman a Conover (1982) popsali metodu využívající Spearmanův koeficient korelace k popisu statistické závislosti mezi sloupci matice pořadových čísel a Choleského dekompozici korelační matice. Navržená metoda má obecnější charakter ve srovnání s návrhem autorů Scheuera a Stollera, jelikož není omezena na normálně rozdělené náhodné proměnné. Nevýhodou však zůstává předpoklad nekorelovaných vstupních proměnných a přetrvávající významná chyba v korelacích mezi proměnnými vzhledem k požadované korelační matici.

Metoda nazvaná „Updated Latin Hypercube Sampling“ (ULHS) (Florian 1992) vychází z postupu Iman a Conover a byla vyvinuta pro redukci nežádoucí korelace s cílem obdržet nekorelované proměnné. Spearmanův koeficient korelace (8) popisuje závislost mezi sloupci matice náhodně generovaných pořadových čísel  $\mathbf{R}$  ( $K \times N$ ):

$$c_{i,j} = 1 - \frac{6 \sum_k (R_{ki} - R_{kj})^2}{N(N-1)(N+1)} \quad (8)$$

kde koeficienty  $c_{i,j}$  jsou Spearmanovy koeficienty pořadové korelace mezi proměnnými  $i$  a  $j$  v intervalu  $\{-1,1\}$  a  $R$  jednotlivé prvky matice  $\mathbf{R}$ . Korelační matice  $\mathbf{C}$  je symetrická a pozitivně definitivní vyjma případů, kdy některé sloupce mají identická pořadí. Choleského dekompozice (9) vyžaduje, aby matice  $\mathbf{C}$  byla pozitivně definitivní, což současně znamená, že počet simulací (realizací) musí být větší než počet proměnných, tzn.  $N > K$ . V případě UHLS má  $\mathbf{C}$  tvar jednotkové matice.

$$\mathbf{C} = \mathbf{L}^T \mathbf{L} \quad (9)$$

$\mathbf{L}$  je dolní trojúhelníková matice. Upravená matice pořadí  $\mathbf{R}^*$  vychází ze vztahu (10):

in the columns of a  $K \times N$  matrix, which were generated without taking correlations into consideration.

The orthogonal transformation of independent random variables into correlated variables represents the most widely spread method for introducing correlation in the LHS method; it is based on a method published by authors Scheuer and Stoller (1962). They proposed a method for generating correlated variables following the Gaussian curve of distribution, which is based on Cholesky decomposition of covariance matrices (see below). Iman and Conover (1982) described a method using Spearman's coefficient of correlation for the description of statistical dependence between columns of a sequential numbers matrix and the Cholesky decomposition of a correlation matrix. The proposed method has a more general character in comparison with the proposal of authors Scheuer and Stoller because of the fact that it is not restricted to normally distributed random variables. Anyway, the assumption of uncorrelated input variables and a persisting significant error in correlation between variables with respect to the required correlation matrix remain to be disadvantage.

The method referred to as the Updated Latin Hypercube Sampling (ULHS) (Florian 1992) starts from the Iman and Conover procedure and was developed for the reduction of undesired correlation with the aim of obtaining uncorrelated variables. Spearman's coefficient of correlation (8) describes the dependence among columns of a matrix of randomly generated sequential numbers  $\mathbf{R}$  ( $K \times N$ ):

$$c_{i,j} = 1 - \frac{6 \sum_k (R_{ki} - R_{kj})^2}{N(N-1)(N+1)} \quad (8)$$

where coefficients  $c_{i,j}$  are Spearman's coefficients of correlation among variables  $i$  and  $j$  within the interval  $\{-1,1\}$  and  $R$  is for individual elements of matrix  $\mathbf{R}$ . The correlation matrix  $\mathbf{C}$  is symmetrical and positively definite with the exception of cases where some columns have identical serial numbers. The Cholesky decomposition (9) requires the matrix  $\mathbf{C}$  to be positively definite, which at the same time means that the number of simulations (realisations) must be greater than the number of variables, i.e.  $N > K$ . In the case of the UHLS, the  $\mathbf{C}$  has the shape of a unit matrix.

$$\mathbf{C} = \mathbf{L}^T \mathbf{L} \quad (9)$$

$\mathbf{L}$  is a lower triangular matrix. The modified matrix of sequence  $\mathbf{R}^*$  is derived from the relationship (10):

$$\mathbf{R}^* = \mathbf{R} \mathbf{L}^{-1} \quad (10)$$

The sequential numbers in each column of the matrix of sequence  $\mathbf{R}$  are subsequently aligned in a way securing that their sequence is identical with the sequence of numbers in corresponding columns of matrix  $\mathbf{R}^*$ . This system of modifying the sequential matrix can be realised iteratively and it theoretically allows significant reduction of correlation (Huntington and Lyrantzis 1998). Thus the matrix  $\mathbf{R}$  will contain significantly lower level of undesired correlation in its result. Although, other authors caution that, when used in praxis, the ULHS method tends to converge to sequences which continue to provide erroneous generation among variables. In the case of the simulation of correlated variables, the technique described above encounters certain problems. First of all it is necessary to use the ULHS iterative method to minimise the correlation. Subsequently the matrix  $\mathbf{T}$  with required correlation coefficients is subjected to the Cholesky decomposition and a new sequential matrix is obtained using the equation for  $\mathbf{R}^*$ . This correlation method can be used exclusively once, without possibility for the improvement by iterations.

Huntington and Lyrantzis (1998) propose an optimisation method called „single-switch“. Instead of using serial numbers it



$$\mathbf{R}^* = \mathbf{R}\mathbf{L}^{-1} \quad (10)$$

Pořadová čísla v každém sloupci pořadové matice pořadí  $\mathbf{R}$  jsou následně srovnána tak, aby měla stejná pořadí jako čísla v odpovídajících sloupcích matice  $\mathbf{R}^*$ . Tento způsob úpravy matice pořadí může být realizován iterativně a teoreticky dovolí výrazné snížení korelace (Huntington a Lyrantzis, 1998). Matice  $\mathbf{R}$  tak ve výsledku bude zahrnovat značně nižší úroveň nežádoucí korelace. Další autoři však upozorňují na skutečnost, že při použití v praxi má metoda ULHS tendenci konvergovat k pořadím, která i nadále poskytují chybnou korelaci mezi proměnnými. V případě simulace korelovaných proměnných má popsaná technika určité problémy. Nejprve je nutné použít iterativně metodu ULHS k minimalizaci korelace. Následně je matice  $\mathbf{T}$  s požadovanými korelačními koeficienty podrobena Choleského dekompozici a využitím rovnice pro  $\mathbf{R}^*$  získána nová pořadová matice. Tato korelační metoda může být použita výhradně jednou, již zde není možnost zlepšení iteracemi.

Huntington a Lyrantzis (1998) navrhuji optimalizační metodu nazvanou „single-switch“. Ta nepracuje s pořadovými čísly, ale přímo uspořádává upravené vzorky a pro stanovení korelací využívá Pearsonův korelační koeficient. Matice  $\mathbf{R}$  obsahuje neseřazené modifikované vzorky (11):

$$\mathbf{s}_{i,j} = \frac{(x_{i,j} - u_j)}{\sigma_j} \quad (11)$$

kde  $u_{i,j}$  je střední hodnota  $j$ -té proměnné a  $\sigma_j$  je odpovídající směrodatná odchylka. Následující procedura je řešena postupně pro každý sloupec  $m$  z uvažovaného (řešeného)  $m-1$  počtu sloupců. Vektor  $\mathbf{T}$ , obsahující aktuální korelační koeficienty mezi  $m$ -tým a každým předchozím sloupcem je definován (12):

$$T_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{ij} R_{im} \quad (12)$$

kde  $1 \leq j \leq m-1$ . Chyba  $E$  korelačních koeficientů (nezaměnit s efektivním zatížením  $E$  v EC7) je (13):

$$E = \sum_{j=1}^{m-1} (T_j - T'_{jm})^2 \quad (13)$$

kde  $\mathbf{T}'$  je matice obsahující požadované korelační koeficienty. Jsou-li uvažovány nekorelované proměnné, tyto koeficienty nabývají nulových hodnot. Principem optimalizační metody je výpočet změny  $E$  pro každý pár vzorků  $m$ -té proměnné, který nastane při jejich vzájemném prohození. Pár poskytující největší redukci  $E$  je prohozen. Tento postup je pro  $m$ -tou proměnnou realizován iterativně až do okamžiku, kdy není možné žádné další zlepšení, nebo se korelační koeficienty nacházejí uvnitř definovaných intervalů. Postupně je procedura opakována pro všechny proměnné. Na závěr je k získání matice vzorků  $\mathbf{S}$  použita přetříděná matice vzorků  $\mathbf{R}^*$ . Autoři ve své studii vyhodnocují nově navrženou metodu na základě porovnání s technikou UHLS. Metoda „single-switch“ poskytuje výrazně vyšší korelační přesnost při nižším počtu proměnných a vzorků ve srovnání s UHLS.

Velmi efektivní a přesnou proceduru pro zavedení požadovaných korelací představuje metoda simulovaného žíhání (např. Morris a Mitchel, 1995, Vořechovský, 2009). Metoda pracuje jak se Spearmanovým koeficientem, tak s klasickým lineárním Pearsonovým a dalšími koeficienty korelace. Pro hodnocení kvality statistických závislostí upřednostňuje normu  $E$ , která zohledňuje deviaci všech koeficientů korelace s druhou mocninou (14), před maximálním rozdílem, který není vhodný pro přímou minimalizaci.

directly arranges modified samples and uses Pearson's correlation coefficient for the determination of correlations. The matrix  $\mathbf{R}$  containing unaligned modified samples (11):

$$\mathbf{s}_{i,j} = \frac{(x_{i,j} - u_j)}{\sigma_j} \quad (11)$$

where  $u_{i,j}$  is the median value of  $j$ th variable and  $\sigma_j$  is the corresponding standard deviation. The subsequent procedure is solved step-by-step for each column  $m$  from the  $m-1$  number of the columns being considered (solved). The vector  $\mathbf{T}$  containing current topical coefficients between the  $m$ th column and each preceding column is defined (12):

$$T_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{ij} R_{im} \quad (12)$$

where  $1 \leq j \leq m-1$ . The error  $E$  of correlation coefficients (not to mistake with effective load  $E$  in EC7) is (13):

$$E = \sum_{j=1}^{m-1} (T_j - T'_{jm})^2 \quad (13)$$

where  $\mathbf{T}'$  is a matrix containing required correlation coefficients. If uncorrelated variables are taken into consideration, these coefficients assume zero values. The principle of the optimisation method lies in the calculation of the change  $E$  for each pair of samples of the  $m$ th variable, which originates when they are swapped. The pair providing the greatest reduction  $E$  is swapped. This procedure is realised for the  $m$ th variable iteratively until no other improvement is possible or the correlation coefficients are found inside the defined intervals. The procedure is repeated step by step for all variables. In conclusion, the resorted matrix of samples  $\mathbf{R}^*$  is used for obtaining the matrix of samples  $\mathbf{S}$ . In their study, the authors assess the newly proposed method on the basis of a comparison with the UHLS technique. The Single-Switch method provides significantly higher correlation accuracy at a lower number of variables and samples in comparison with the UHLS.

A very effective and accurate procedure for the implementation of required correlations is represented by the Simulated Annealing Method (e.g. Morris and Mitchel 1995, Vořechovský 2009). The method operates with both Spearman's coefficient and classical linear Pearson's coefficient and other correlation coefficients. It prefers the standard  $E$  for assessing the quality of statistical dependences, allowing for deviations of all correlation coefficients with a square (14), to the maximum difference, which is not suitable for direct minimisation.

$$E = \sum_{i=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{N_V} (A_{i,j} - T_{i,j})^2 \quad (14)$$

where  $N_V$  is the number of variables and in brackets there is the difference between topical correlation coefficients  $A_{i,j}$  and required  $T_{i,j}$  quantities  $i$  and  $j$ . The method starts from a simple probabilistic method which swaps the serial numbers of a random pair of samples of a randomly selected variable in matrix  $\mathbf{X}$  (e.g. standardised samples, serial numbers of samples). In the case of the standard  $E$  reduction, the matrix  $\mathbf{X}$  was adopted as a new generation, i.e. the initial matrix. But the above-mentioned procedure in the majority of cases ends in a state where no change brings the reduction of the standard and the new matrix cannot be adopted. The method therefore finds the so-called local minimums, without a chance of finding the actual global minimum. The principle of the Simulated Annealing Method is therefore based on the violation of the condition that a new generation of samples may be adopted only in the case of the standard  $E$  having been reduced. A new generation originates in each iteration. It is either adopted or not. The simulated annealing is in line in the other case and the

$$E = \sum_{i=1}^{N_V} \sum_{j=1}^{N_V} (A_{i,j} - T_{i,j})^2 \quad (14)$$

Kde  $N_V$  je počet proměnných a v závorce rozdíl korelačních koeficientů aktuálních  $A_{i,j}$  a požadovaných  $T_{i,j}$  veličin  $i$  a  $j$ . Metoda vychází z jednoduché pravděpodobnostní metody, která zaměňuje pořadí náhodné dvojice vzorků náhodně vybrané proměnné v matici  $\mathbf{X}$  (např. normalizované vzorky, pořadová čísla vzorků). V případě, že došlo ke snížení normy  $E$ , byla matice  $\mathbf{X}$  přijata jako nová generace, tedy výchozí matice. Uvedený postup však ve většině případů končí ve stavu, kdy jakákoli změna nepřináší snížení normy a nová matice nemůže být přijata. Metoda tak nachází tzv. lokální minima bez šance nalezení skutečného globálního minima. Princip metody simulovaného žhání je tedy založen na porušení podmínky, že nová generace vzorků může být přijata pouze v případě, že došlo ke snížení normy  $E$ . V každé iteraci dochází k vytvoření nové generace, která je buď přijata, nebo ne. Simulované žhání přichází na řadu v druhém případě a nový vektor s vyšší energetickou konfigurací ( $\Delta E > 0$ ) je přijat s určitou pravděpodobností, která se řídí Boltzmannovo rozdělením (15).

$$P \approx \exp\left(\frac{-\Delta E}{t}\right) \quad (15)$$

Toto rozdělení uvažuje systém, který se nachází v teplotní rovnováze  $t$  a má svou energii pravděpodobnostně rozloženou mezi možné energetické stavy  $\Delta E$ . Nenulová pravděpodobnost v přijetí nové generace vzorků zvyšuje možnost nalezení konfigurace, která se vyhne lokálnímu minimu.

Další vybrané permutační metody budou zmíněny již méně podrobně. Mezi ně náleží i metoda „Symmetric Latin Hypercubes Design (SLHD)“ (Ye a kol., 2000), která vychází ze symetrické matice  $N \times K$ . SLHD je založen na algoritmu „columnwise-pairwise (CP)“. Ten při hledání optimální symetrické matice v každém kroku dané iterace prohazuje současně pořadí dvou párů vzorků uvnitř sloupce. Na konci iterace je vybrána nejlepší záměna vzhledem ke kritériu minimalizace a použita k úpravě matice. Podoba výsledné matice je výrazně citlivá na počáteční náhodné vygenerování permutační matice, tudíž by celý algoritmus měl být opakován vícekrát s různými počátečními permutacemi. Metodu autoři vyhodnocují na základě porovnání s algoritmem simulovaného žhání a Choleského dekompozicí. Dalším příkladem algoritmu založeného na optimalizaci pořadí prvků pořadové matice, svým řešením blízký Choleského dekompozici, je Gram-Schmidtova pořadová ortogonalizace. Existuje řada dalších metod založených na optimalizaci pořadí vzorků matice prvků, případně pořadové matice, které byly implementovány do metody LHS z důvodu zohlednění korelací mezi proměnnými a nejsou zde podrobněji popsány. Jejich princip je však velmi podobný algoritmům popsaným výše.

Ke spolehlivému stanovení korelovanosti proměnných je nutné mít k dispozici značné množství výsledků z geotechnického průzkumu. Tento předpoklad je velmi obtížné naplnit, jelikož finanční náklady projektu určené na laboratorní experimenty jsou v současné době s ojedinělými výjimkami velmi omezené. Většina prací zaměřených na pravděpodobnostní řešení geotechnických problémů se tak potýká s nedostatkem vhodných statistických dat a je proto nutné hledat možné vztahy v databázích projektů realizovaných v obdobném geologickém prostředí, ačkoli tak dochází k vnášení nepřesností do analýz. I z tohoto důvodu studie, zabývající se vlivem variability vstupních proměnných, často řeší experimentální problém, kde potřebná data jsou dostupná.

new vector with a higher energy configuration ( $\Delta E > 0$ ) is adopted with a certain probability which follows Boltzmann's distribution (15).

$$P \approx \exp\left(\frac{-\Delta E}{t}\right) \quad (15)$$

This distribution takes into consideration a system which is found in temperature balance  $t$  and has its energy in terms of probability distributed among possible energy states  $\Delta E$ . The non-zero probability in the adoption of a new generation of samples increases the chance of finding a configuration which will avoid the local minimum.

Other selected permutation methods will be mentioned in smaller detail. The Symmetric Latin Hypercubes Design (SLHD) method (Ye et al. 2000), starting from a symmetric matrix  $N \times K$ , belongs among them. The SLHD is based on a Columnwise-Pairwise (CP) algorithm. When an optimum symmetric matrix is being sought, this algorithm concurrently swaps the sequence of two pairs within a column in each step of a particular iteration. The swap which is best with respect to the minimisation criterion is selected at the end of the iteration and is used for the matrix modification. The shape of the resultant matrix is significantly sensitive to the initial random generation of the permutation matrix, therefore the whole algorithm should be repeated several times with different initial permutations. The authors have assessed the method on the basis of a comparison with the simulated annealing algorithm and Cholesky decomposition. Another example of an algorithm based on the optimisation of the sequence of elements of a sequential matrix, which is close to Cholesky decomposition in terms of its solution, is the Bram – Smith sequential orthogonalisation. There are several other methods available based on the optimisation of the sequence of samples of the matrix of elements or sequential matrix, which were implemented into the LHS method with the aim of allowing for correlations among variables and are not described in this paper in more detail. Anyway, their principle is very similar to the algorithms described above.

If the determination of the degree of correlation of variables is to be reliable, it is necessary to have a significant number of the geotechnical investigation results available. Although, it is very difficult to meet this condition because of the fact that financial expenses of a project allocated to laboratory experiments are today, with isolated exceptions, very limited. The majority of works focused on probabilistic solutions to geotechnical problems fight with the lack of suitable statistical data and it is therefore necessary to seek potential relationships in the databases of projects which were realised in a similar geological environment, despite the fact that in this way inaccuracies are inserted into analyses. It is also for this reason that studies dealing with the influence of the variability of input variables frequently solve an experimental problem where there is the required data available.

### 3.4 Other modifications of the LHS method

In comparison with the Monte Carlo method, the fundamental concept of the LHS method suffers from a significant disadvantage. It does not allow arbitrary adding simulations to the realisations for which the calculations were already completed. This disadvantage follows from the formulation itself and from the method principle, where it is necessary from the very beginning of solving the problem to choose the exact number of simulations. If we randomly added other simulations to the already completed realisations, the loss of consistency, or the uniform distribution within the distribution function domain, would follow. If an insufficient accuracy of the problem response is identified, it is necessary to proceed to solving the problem from the very



### 3.4 Další úpravy metody LHS

Ve srovnání s metodou Monte Carlo má základní koncept metody LHS výraznou nevýhodu, neumožňuje libovolně přidávat simulace k již vypočteným realizacím. Tato nevýhoda plyne z vlastní formulace a podstaty metody, kdy hned na začátku řešení problému je nutné zvolit přesný počet simulací. Pokud bychom k již vypočteným realizacím nahodile přidali další, došlo by ke ztrátě konzistence neboli rovnoměrného rozdělení na oboru distribuční funkce. V případě zjištění nedostatečné přesnosti odezvy problému je nutné přistoupit k řešení od samého počátku tentokrát s vyšším počtem simulací. Řešení výše popsané nevýhody nabízí Sallaberry a kol. (2008). Autoři navrhnou algoritmus pro rozšíření výchozí LHS o počtu vzorků  $m$  a korelovaných proměnných s odpovídající korelační maticí  $C$  na LHS s  $2m$  vzorky a korelační maticí blízkou originální. Hierarchical Subset Latin Hypercube Sampling je metoda navržená Vořechovským (2009, 2010) z důvodu řešení možného rozšíření počtu simulací pro korelované náhodné proměnné. Principem metody HSLHS je přidávání simulací v podobě obsazení pouze konkrétních vybraných subintervalů. Přidávané simulace nemají podobu LH – vzorků jako takových, a nelze je tudíž vyhodnotit samostatně. Vždy musejí být zkombinovány se sadou vzorků na nižší úrovni a vyhodnoceny společně již jako přesný LHS celek rovnoměrně rozložený na intervalu (0,1) jako v případě metody LHS – median.

Další úprava LHS a její aplikace, vztažená především k akademické půdě, souvisí se zohledněním prostorové variability vlastností horninového masivu. Metoda je založena na teorii náhodných polí a autokorelace prostorových vlastností geologického prostředí vstupuje do výpočtu ve formě korelační funkce, která je nejčastěji vyjádřena exponenciálním vztahem (např. Markovova funkce).

## 4 APLIKACE METODY LHS PRO ŘEŠENÍ GEOTECHNICKÝCH ÚLOH V ČR

Využití metody LHS v geotechnické praxi v České republice není příliš časté, převážná většina prací zabývajících se touto tematikou byla vypracována na akademické půdě.

Statistická analýza numerického modelu tunelu Mrázovka je součástí práce Hilara (2000), kde pomocí LHS byl vyhodnocován vliv pěti základních parametrů Mohr-Coulombova modelu na deformace ostění a povrchu. Dalším příkladem je využití metody LHS pro výpočty tunelu Valík (Hrubešová a kol., 2003), kde je pomocí LHS vyhodnocován vliv 10 vstupních parametrů (např. také součinitel anizotropie, úklon puklin, atd.). Vaněčková (2008) využívá metody LHS pro řešení stability skalního svahu prostoupeného systémem diskontinuit. Geotechnické parametry a další vlastnosti ploch nespojitosti mohou nabývat čtyř různých pravděpodobnostních rozdělení. Součástí práce Paráka (2008) je využití metody LHS pro stanovení vlivu geotechnických parametrů geologických vrstev, parametrů stříkaného betonu a počátečních podmínek na strukturní síly v ostění tunelu kruhového průřezu. Využití LHS v geotechnice se dlouhodobě věnuje doc. J. Pruška (např. Pruška, Šedivý, 2010).

Výše uvedené práce předpokládají lineárně nezávislé vstupní geotechnické parametry, proto v nich nebyla řešena jejich korelace. Dále všechny uvedené práce uvažují typ metody LHS – median (střed intervalu na oboru distribuční funkce). Tato metoda ve srovnání s LHS – mean konverguje k výsledku výrazně pomaleji, pro dosažení uspokojivé přesnosti je doporučován větší počet simulací. Dále je v uvedených pracích zpravidla uvažováno normální pravděpodobnostní rozdělení vstupních parametrů.

Výrazné uplatnění v ČR nachází metoda LHS v oboru železobetonových konstrukcí. Ústav stavební mechaniky Stavební fakulty

beginning, this time with a higher number of simulations. The solution to the above-mentioned disadvantage is offered Sallaberry et al. (2008). The authors propose an algorithm for the expansion of the initial LHS with the number of samples  $m$  and correlated variables with the corresponding correlation matrix  $C$  to the LHS with  $2m$  samples and correlation matrix close to the original matrix. The Hierarchical Subset Latin Hypercube Sampling is a method proposed by Vořechovský (2009, 2010) with the aim of solving possible extension of the number of simulations for correlated random variables. The principle of the HSLHS method lies in adding simulations in the form of occupying only concrete selected sub-intervals. The simulations being added do not have the form of LH-samples as such and it is therefore impossible to assess them independently. They must always be combined with a set of samples at the lower level and be assessed jointly, already as an accurate LHS complex evenly distributed within the interval (0,1), in the same way as in the case of the LHS – Median method.

Another modification of the LHS and its application, relating first of all to university premises, is connected with allowing for the spatial variability of ground mass properties. The method is based on the theory of Random Fields and the autocorrelation of spatial properties of geological environment enters the calculation in the form of a correlation function, which is most frequently expressed by an exponential relationship (e.g. mark correlation function).

## 4 THE LHS METHOD APPLICATION TO SOLVING GEOTECHNICAL PROBLEMS IN THE CZECH REPUBLIC

The use of the LHS method in geotechnical practise in the Czech Republic is not too frequent; the majority of works dealing with this topic was carried out on university premises.

The statistical analysis of the Mrázovka tunnel numerical model is part of the work of Hilar (2000), where the LHS was used for assessing the influence of five basic parameters of the Mohr-Coulomb model on deformations of the lining and terrain surface. Another example is the use of the LHS method for the Valík tunnel calculations (Hrubešová et al. 2003), where the LHS is applied to the assessment of the influence of 10 input parameters (e.g. the anisotropy coefficient, dipping of discontinuities etc.). Vaněčková (2008) uses the LHS method for solving problems of stability of a rock slope interspersed by a system of discontinuities. Geotechnical parameters and other properties of discontinuity surfaces can assume four different probability distribution forms. Part of the work by Parák (2008) is the application of the LHS method to the determination of the influence of geotechnical parameters of geological strata, parameters of sprayed concrete and initial conditions on structural forces in a circular tunnel lining. Doc. J. Pruška devotes himself to the use of the LHS in geotechnics in the long term (e.g. Pruška, Šedivý 2010).

The above-mentioned works assume linearly independent input geotechnical parameters, which is the reason why they did not deal with their correlation. In addition, all of the above-mentioned works consider the LHS-Median method type (the mid-point of an interval within the domain of the distribution function). This method, in comparison with the LHS-Mean, converges to the result significantly slower; a higher number of simulations is recommended for the purpose of achieving a satisfactory accuracy. Further, normal probability distribution of input parameters is usually assumed in the above-mentioned works.

The LHS method finds significant use in the CR in the field of reinforced concrete structures. The Institute of Building Mechanics of the Faculty of Civil Engineering of the University of Technology in Brno, represented by Prof. Novák and others,

VUT v Brně v zastoupení doc. M. Vořechovského, prof. Nováka a dalších se dlouhodobě zabývá úpravami a vylepšeními metody LHS pro praktické aplikace.

## 5 SHRNUŤÍ

Metoda Latinských hyperkrychlí (LHS) představuje efektivní pravděpodobnostní metodu typu Monte Carlo pro statistické zpracování vstupních proměnných a odhad statistických momentů odezvy řešeného problému. Největší výhodou je možnost značného snížení počtu simulací oproti standardní metodě Monte Carlo při zachování vysoké přesnosti odhadů. Metoda LHS zachovává pravděpodobnostní rozdělení přiřazené všem simulovaným proměnným a umožňuje zohlednění korelovanosti mezi nimi. Byla vyvinuta a přijata řada modifikací, které zvyšují přesnost metody a současně snižují časovou náročnost simulací. Metoda LHS nachází své uplatnění v řadě oborů, mezi nimiž má své místo i geotechnika včetně podzemního stavitelství. Využití metody LHS pro statické výpočty podzemních staveb může výrazně zpřesnit představu o předpokládaném chování posuzované konstrukce (zejména pak o pravděpodobnosti výskytu extrémních stavů).

Tento příspěvek byl zpracován s podporou grantů TAČR TA01011816 a GAČR P105/12/1705.

**RNDr. TOMÁŠ SVOBODA, Ph.D., svoboda.tomas@3-g.cz,  
3G Consulting Engineers, s. r. o.,  
DOC. ING. MATOUŠ HILAR, Ph.D., hilar@3-g.cz,  
3G Consulting Engineers, s. r. o., a FSv ČVUT**

Recenzoval: doc. Dr. Jan Pruška

deals with problems of modifications and improvements of the LHS method for practical applications in the long term.

## 5 SUMMARY

The Latin Hypercube Sampling (LHS) method represents an effective probabilistic method of the Monte Carlo type for statistical processing of input variables and estimation of statistical moments of the response of the problem being solved. The greatest advantage lies in the possibility of significant reducing the number of simulations in comparison with the standard Monte Carlo method with the high accuracy of estimations maintained. The LHS method maintains the probability distribution assigned to all variables being simulated and makes allowing for the degree of correlation among them possible. Several modifications improving the method accuracy and at the same time reducing the time intensity of simulations were developed and adopted. The LHS method finds its use in many fields, among which geotechnics including underground construction industry has its position. The LHS use for structural analyses of underground structures may significantly improve the accuracy of the conception of the anticipated behaviour of a structure being assessed (first of all regarding the probability of occurrence of extreme states).

This paper was carried out with the support by grants TAČR TA01011816 and GAČR P105/12/1705.

**RNDr. TOMÁŠ SVOBODA, Ph.D., svoboda.tomas@3-g.cz,  
3G Consulting Engineers, s. r. o.,  
DOC. ING. MATOUŠ HILAR, Ph.D., hilar@3-g.cz,  
3G Consulting Engineers, s. r. o., a FSv ČVUT**

## LITERATURA / REFERENCES

- Flores, A. N., Entekhabi, D., Bras, R. L. Reproducibility of soil moisture ensembles when representing soil parameter uncertainty using a Latin Hypercube-based approach with correlation control. *Water Resources Research*, Vol. 46, 2010, 13 pp.
- Florian, A. An efficient sampling scheme. *Updated Latin Hypercube Sampling Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 7, 1992, pp. 123–130.
- Hamm, N. A. S., Hall, J. W., Anderson, M. G. Variance-based sensitivity analysis of the probability of hydrologically induced slope instability. *Computers & Geosciences*, Vol. 32 2006, pp. 803–817.
- Hilar, M. Numerická analýza tektonicky porušeného horninového masivu s primární výstrojí při aplikaci NRTM. Disertační práce, 2000, ČVUT, Praha.
- Hrubešová, E., Aldorf, A., Ďuriš, L., Vojtasík, K., Svoboda, J. Pravděpodobnostní přístup ke statickému a stabilitnímu řešení ostění tunelu Valík. Sborník konference Podzemní stavby Praha 2003. pp. 131–138.
- Huntington, D. E., Lyrantzis, C. S. Improvements to and limitations of Latin hypercube sampling. *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 13, No. 4, 1998, pp. 245–253.
- Iman, R. L., Conover, W. J. A distribution-free approach to inducing rank correlation among input variables. *Communications in Statistics – Simulations and Computing*, Vol. 11, No. 3, 1982, pp. 311–334.
- Keramat, M., Kielbasa, R. Modified Latin Hypercube Sampling Monte Carlo (MLHSMC) Estimation for Average Quality Index. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, Vol. 19, 1999, pp. 87–98.
- Morris, M., Mitchel, T. Exploratory design for computer experiments. *Journal of Statistical Planning and Inference*, Vol. 43, pp. 381–402.
- Parák, T. Použití pravděpodobnosti a matematické statistiky při výpočtech geotechnických konstrukcí. Disertační práce, 2009, ČVUT, Praha.
- Pruška, J., Šedivý, M. Aplikace metody latinských hyperkrychlí. *Geotechnika*. 2010, roč. 13, č. 3–4, s. 31–34. ISSN 1211-913X.
- Sallaberry, C. J., Helton, J. C., Hora, S. C. Extension of Latin hypercube samples with correlated variables. *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 93, 2008, pp. 1047–1059.
- Scheuer, E. M., Stoller, D. S. On the generation of normal random vectors. *Technometrics*, Vol. 4, pp. 278–281.
- Vaněčková, V. Výpočet stability skalních svahů. Disertační práce, 2008, ČVUT, Praha.
- Vořechovský, M., Novák, D. Correlation control in small-sample Monte Carlo type simulations I. A simulated annealing approach. *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 24, Issue 3, 2009, pp. 452–462.
- Vořechovský, M. Extension of sample size in Latin Hypercube Sampling with correlated variables. In Michael Beer, M. Rafi L. Muhanna, Robert L. Mullen, editors, REC 2010, *Proc. of 4th International Workshop on Reliable Engineering Computing*, Singapore, 2010, pp. 353–368.
- Ye, K. Q. Column Orthogonal Latin hypercubes and their application in computer experiments. *Journal of American Statistical Association*, Vol. 93, 1998, pp. 1430–1439.



# NÁLEZ A LIKVIDACE PODZEMNÍHO PROSTORU POD RODINNÝM DOMKEM V BRNĚ

## DISCOVERY AND LIQUIDATION OF UNDERGROUND SPACE UNDER FAMILY HOUSE IN BRNO

VLADISLAV HORÁK, JIŘÍ ŠRUBAŘ

### ÚVOD

Poměrně zhusta se setkáváme s (častěji) drobnými či (méně obvykle) s rozsáhlejšími podzemními prostory historicky či technicky spojenými s objekty pozemní občanské zástavby. A někdy je to i ve zcela nečekaných případech nebo souvislostech.

Jeden z autorů tohoto příspěvku nezapomene ve spojitosti s návrhem sanace chátrající rozsáhlé skalní stěny za rodinnými domky na ul. Práčata v Brně-Bosonohách na to, jak mu majitelka jedné z postižených nemovitostí živě líčila situaci z období osvobození Brna na jaře 1945. Do tehdy skrytého sklípku zřízeného během okupace v předmětném skalním tělese ji její otec ukryl před nežádoucí pozorností osvoboditelů.

Podobným případem takovéto podzemní konstrukce je velmi rozsáhlý sklep v hoře na pozemku našeho profesního kolegy Ing. Tomáše Justa z fy OHL – ŽS. V současné době jej rekonstruuje společně s rodinným domkem na ul. Výпустky v Brně-Obřanech (ilustrační obr. 1). Zde se s přihlédnutím k historii nemovitosti (domek pochází z 30. let 20. stol.) opět jedná



Obr. 1 Brno-Obřany, ul. Výпустky; sklep za rodinným domkem (ilustrační foto T. Just)

Fig. 1 Brno – Obřany, Výпустky Street. A cellar behind a family house (illustration picture by T. Just)

### INTRODUCTION

We relatively often encounter (more frequently) petty or (less usually) larger underground spaces which are historically or technically associated with community and residential underground construction. Sometime this is even in absolutely unexpected cases or relations.

One of the authors of this paper will not forget, in connection with a design for the stabilisation of an extensive dilapidating rock wall behind family houses in Práčata Street in Brno –Bosonohy, how one woman, the owner of one of the affected real properties, vividly described a situation from the time of the Brno liberation in the spring of 1945. Her father then hid her from undesired attention of liberators in a then concealed cellar built during the occupation in the rock massif in question.

The case of a very extensive cellar in a mountain on the real property of our professional colleague Ing. Tomáš Just from OHL-ŽS a. s. is similar. He is currently reconstructing it together with a family house in Výпустky Street in Brno – (see illustration Fig. 1). In this case it is again, in the highest probability, a working from the period just before or from the beginning of World War 2.

Both above-mentioned illustration cases have many common features:

- The above-ground structures – family houses – are located in periphery areas of Brno.
- The related underground structures are basically non-standard basement spaces situated within internal sections of built-up lots of land.
- They use the advantage of expressive morphology formed by the rising terrain level behind the dwelling structures. In addition, by coincidence, the underground structure is realised in more or less slightly weathered granodiorite of the Královo Pole type Brno massif.
- With the exception of negligible parts, the underground spaces are not lined with brick and they were created using old-fashioned and slow hand excavation.
- Both cases are characteristically bound in terms of time to the period just before or after the beginning of World War 2 and the underground spaces were created first of all for the purpose of storing (larger) food stocks. In the largest probability they were used as shelters for property users. The first of all air-raid shelters was later, at the end of the war, intended to be used in the case of the passage of the front across the area.

The third case which is known to us has many features in common with the two previous cases, nevertheless, it significantly differs in some important, first of all technical, relations. At the same time it is the most interesting of the cases.

### STRUCTURE LOCATION, ITS HISTORY AND FACTS ENCOUNTERED

The family house in question is again located in a peripheral part of Brno, the district of Juliánov, on Bělohorská Street No. 83



Obr. 2 Situace rodinných domků na ul. Bělohorské 83–85 v Brně-Juliánově; v bezprostřední blízkosti se na východ nachází tovární areál Zetoru (za 2. světové války zbrojovka) [1]

Fig. 2 Layout plan of family houses in Bělohorská Street No. 83-85 in Brno – Juliánov. The Zetor factory (an armament factory during WW2) premises found in the immediate proximity in the east [1]

s nejvyšší pravděpodobností o dílo z období těsně před nebo z počátku 2. světové války.

Oba uvedené ilustrační případy mají mnoho společného:

- Nadzemní objekty – rodinné domky – se nacházejí v okrajových částech Brna.
- Související podzemní konstrukce jsou v zásadě nestandardními sklepními prostory situovanými ve vnitřních traktech zastavěných pozemků.
- Výhodně využívají výrazné morfologie zvyšujícího se terénu za obytnými objekty a shodou okolností je v obou uváděných případech podzemní struktura realizována ve víceméně navětralých granodioritech brněnského masivu typu Královo Pole.
- Podzemní prostory nejsou až na zanedbatelné části vyzděny a byly zřizovány přezilou a pomalou ruční ražbou.
- Oba případy jsou charakteristicky časově vázány na dobu těsně před nebo již po počátku 2. světové války s tím, že vytvořené podzemní prostory byly určeny především pro uložení (i rozsáhlejších) zásob potravin. S nejvyšší pravděpodobností však současně posloužily i jako úkryt pro uživatele nemovitostí. Kryt především protiletectký, později, ke konci války, i pro případ přechodu fronty.

Nám třetí známý případ má s oběma předchozími mnoho společného, nicméně v některých významných, především technických, souvislostech se od nich velmi liší. A současně je i nejzajímavější.

## SITUOVÁNÍ OBJEKTU, JEHO HISTORIE A ZASTIŽENÉ SKUTEČNOSTI

Předmětný rodinný dvojdomek se nachází opět v okrajové části Brna, v místní části Juliánov, na ulici Bělohorské 83 a 85 (obr. 2). Jedná se o klasicickou, v zásadě řadovou zástavbu, typickou jak pro okrajové části Brna, tak i pro dobu jejího vzniku – tj. 30. léta 20. stol. Dvojdomek byl dokončen roku 1938 brněnským stavitelem Ing. Josefem Vystavělem. Ještě téhož roku tento stavební podnikatel oba domky prodal pradědovi dnešního vlastníka. Ten je pronajal až do roku 1946, kdy obě nemovitosti převedl na své děti.

Dispozičně jde o dva příčné, celkově čtyřpodlažní trojtraktory z cihelného zdiva na železobetonových základových pasech, v patrech ztužené železobetonovými věnci. V průběhu let byla u objektu Bělohorská 85 v 1. PP zřízena garáž. Odvodnění sníženého vjezdu do této garáže bylo provedeno „po sousedsku“ do

and 85 (see Fig. 2). It is a classical attached-houses development, which is typical for both for peripheral parts of Brno as well as the time of its origination, i.e. the 1930s. The semi-detached house was completed in 1938 by Ing. Josef Vystavěl, a Brno building contractor. He sold both houses to the grandfather of the current owner in the same year, who rented them until 1946, when he transferred both properties to his children.

In terms of the spatial arrangement, the houses are two transverse triple-span, four-storey brick structures on reinforced concrete wall footings, reinforced at individual floor levels by reinforced concrete spandrel beams. During the course of years, a garage was built on the first basement level of the house on Bělohorská Street No. 85.

The drainage of the depressed entrance to the garage was carried out in a “neighbourly” way, connecting it to a waste-water downcomer of the sister property Bělohorská No. 83. The connection functioned without substantial problems, only with infrequent moisture appearing in the cellar on the basement level. This situation continued for more than 20 years.

In 2011, the owner of the Bělohorská No. 83 property decided that she would prevent this brickwork moistening. The decision was made that the brick wall should be “undercut” and new waterproofing be inserted into the slot. And on this occasion, the job was to be performed comprehensively, including the reconstruction of the whole house basement and house utility networks, including sewerage. A TV camera was used for the assessment of the current sewer condition. Unfortunately, the advance of the camera was stopped because it sank down approximately after 2 metres. It was evident that the sewerage reconstruction would be probably more difficult than expected. But the reality was even far more complicated. A probe was carried out in the TV camera sinking location (a basement landing under the staircase, next to the wall). During the work on the probe the pick hammer all of a sudden fell down about 1.5 m lower and an unexpected underground space opened. A volunteer was found among present people who roped down the hole, equipped with a lamp, and stayed there for long 15 minutes – see Fig. 3.

The discovery was shocking for the house owner (and not only for her). Two spaces, perpendicular to each other and intersecting in the ground plan, with the volume of 45 m<sup>3</sup> and the cross-sectional area of roughly 2.15 m wide x 2.6 m high, were discovered under the two houses. The opened underground spaces occupied a significant area within the ground plan of the above-ground structures in question (see Figures 4 and 5). Their origination can be deduced only and solely from the activities of the tenant of both properties during the war (see above). For reasons we no more can reveal, he undermined both family houses using a very simple mining method. It is only possible to guess that the fundamental role was played by the war time, the obvious lack of foodstuffs and the need to store them secretly. In highest probability, the fact that the locality was found in immediate vicinity of the at that time new armament factory (today Zetor company) and was therefore extremely threatened by bombing played its role. In this way, the tenant also provided an air-raid shelter for his family under the houses. The fact that the space was intended for standing people, niches



kanalizačního svodu sesterské nemovitosti Bělohorská 83. Fungovalo bez větších problémů, jen s občasným zavlháním sklepa v 1. PP. Tato situace trvala dobrých 20 let.

V roce 2011 se majitelka nemovitosti Bělohorská 83 rozhodla toto zavlhání zdiva odstranit. Bylo rozhodnuto zdivo „podřezat“ s vložením nových izolací. A když, tak řádně, včetně rekonstrukce celého suterénního prostoru domu a domovních inženýrských sítí, a tedy i kanalizace. Pro posouzení jejího aktuálního stavu byla použita TV kamera. Postup kamery byl však zastaven cca po 2 m s tím, že se propadla. Bylo jasné, že rekonstrukce kanalizace bude patrně složitější, než se očekávalo. Skutečnost však byla ještě daleko komplikovanější. V místě propadu TV kamery (sklepní podesta pod schody, u schodišťové zdi) byla provedena sonda. Při jejím otevření se sbíječka propadla náhle o cca 1,5 m níže a otevřela se nečekaná podzemní prostora. Mezi přítomnými se našel dobrovolník, který se do ní, vybaven lampou, na dlouhých 15 minut spustil – obr. 3.

Pro majitelku domu (a nejen pro ni) byl nález šokující: Pod oběma domy (Bělohorská 83 i 85) byly zjištěny dvě, půdorysně na sebe kolmé, protínající se prostory o zběžně odhadnutém objemu 45 m<sup>3</sup>, příčného profilu velmi zhruba 2,15 m (š) x 2,6 m (v). Nafárané podzemní prostory zaujímaly významnou plochu v půdorysu dotčených nadzemních objektů (obr. 4 a 5). Jejich původ lze odvodit jen a jediné u válečného nájemce obou nemovitostí (viz výše). Z důvodů nám dnes již nezjistitelných podkopal velmi jednoduchým hornickým způsobem oba rodinné domky. Lze se pouze domnívat, že zásadní roli v tomto případě hrála válečná doba, zřejmý nedostatek potravin a potřeba jejich utajeného uskladnění a s nejvyšší pravděpodobností patrně i to, že lokalita se nacházela v bezprostřední blízkosti v té době nové zbrojní továrny (dnes firma Zetor) a byla tedy mimořádně ohrožena bombardováním. Nájemce si tak současně zřídil pod domy i rodinný protiletectký kryt. Jistým potvrzením předchozích dedukcí je to, že prostora byla určena pro stojící osoby, ve stěnách byly provedeny výklenky a byl zde nalezen dokonce i zapomenutý plechový hrnčiček. Proč nájemce neinformoval o této skutečnosti při předávání nemovitosti v roce 1946 jejího majitele lze již jen spekulovat. Jako důvod se nabízí to, že majitel by přirozeně trval na likvidaci (nebo přinejmenším řádné úpravě – vyztužení) tohoto prostoru.

Jak je uvedeno již v předchozím textu, snížení terénu se zásahem do kanalizace při zřízení garáže u objektu Bělohorská 85 bylo příčinou pronikání vody do této (v té době dosud neznámé) podzemní prostory a vedlo, mimo jiné, i k postupné erozi dotčeného horninového prostředí v tomto nevyzděném prostoru. Výsledkem byla odplavená základová půda pod schodišťovou zdí v délce cca 4 m a obdobné postižení se vyvíjelo postupně i u střední nosné zdi. Štěstím bylo, že obě nemovitosti vystavěl současně stejný stavitel. Zbudoval je solidně a ani při jejich úzkém půdorysu a relativní výšce neutrpěly zřetelné škody. Oba domy se o sebe v pravém slova smyslu opřely a navzájem velmi dobře spolupůsobily.

### GEOTECHNICKÉ POMĚRY LOKALITY

Podloží lokality je budováno marinními vápnatými jílovitými písky spodního badenu s podřízenými polohami drobného šterku (obr. 6). Písky jsou ulehle až velmi ulehle. Tato fakta byla potvrzena při makroskopickém ohledání stěn zastížené podzemní prostory. Stejný horninový materiál byl v minulosti v bezprostřední blízkosti našeho objektu rovněž těžen v řadě, často rozsáhlých, jámových pískoven. Charakter této zeminy současně umožnil zřizovateli podzemních prostor bezproblémově manuální odtěžování horniny a současně i její likvidaci (příp. i její racionální využití). To, že se jedná o písky lehce jílovité a současně i ulehle, zaručilo rovněž poměrně stabilní a dlouhodobé zachování výrubu. Přesto, že byla podzemní prostora zcela nevyztužena, tak ani statické zatížení konstrukcí rodinných domků ani dynamické zatížení od okolní (dnes intenzivní) dopravy nepůsobilo na výrub destruktivně. Pomalé porušování stěn erozí však způsobovala pronikající voda



*Obr. 3 Nafáraná podzemní prostora pod rodinnými domky Bělohorská 83 a 85 v Brně-Juliánově*

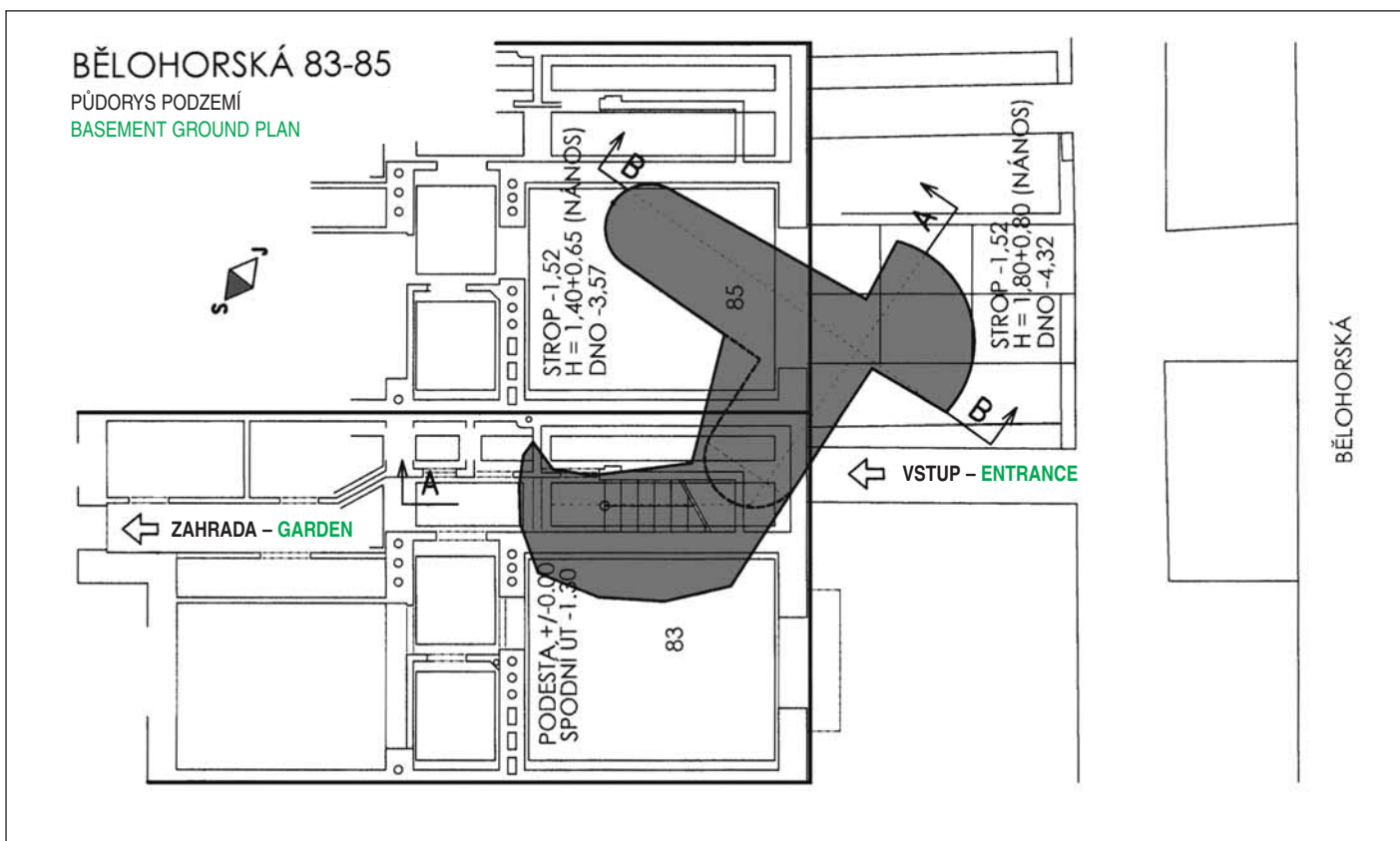
*Fig. 3 Underground space opened under family houses No. 83 and 85 in Bělohorská Street in Brno - Juliánov*

were provided in walls and even a forgotten tin mug was found there is a certain proof of the above deductions. Today it is only possible to speculate why the tenant did not inform the property owner about this situation when he handed the property over to the owner in 1946. The reason offers itself that the owner would have insisted on the liquidation (or at least proper stabilisation) of this space.

As stated in the previous text, the lowering of the terrain surface level combined with the intervention into the sewerage during the work on the new garage attached to the house No. 85 in Bělohorská Street was the cause of the inflow of water into this (till then unknown) underground space and led, among other consequences, to gradual erosion of the affected ground environment in this unlined space. This process resulted in the washing of ground away from underneath the staircase wall along a length of about 4.5 m; a similar affection gradually developed under the central structural wall. It was a matter of good luck that both buildings were constructed simultaneously by one contractor. He built them in a reliable way and, despite the narrow ground plan and relatively great height they suffered no obvious damage. The two buildings in the true sense of the word leaned against each other and developed a very good composite action.

### GEOTECHNICAL CONDITIONS IN THE LOCALITY

The locality sub-base is formed by marine calcareous clayey sands of the Lower Baden formation with subordinate layers of fine-grained gravel (see Fig. 6). The sands are compacted to very compacted. These facts were confirmed during the macroscopic examination of the walls of the underground space encountered. Identical ground material was excavated in the past in the immediate vicinity of our structure in a series of, often extensive, sand pits. The character of this ground at the same time allowed the founder of the underground spaces to excavate ground without problems manually, simultaneously with disposing it (or even rationally using it). The fact that the sands are slightly clayey and at the same time compacted guaranteed that the excavated space would be relatively stable and would be preserved for a long time. Neither the static load induced by the family house structures nor the dynamic loading induced by (today busy) traffic in the vicinity did not negatively affect the excavated space, despite the fact that the underground space lacked any support. However, the walls were slowly deteriorated by erosion caused by the inflow of water into the space (see above) – an about 0.8 m thick layer of eroded sand was gradually accumulated at the bottom. It was only



Obr. 4 Půdorys podzemního prostoru pod domky Bělohorská 83 a 85 v Brně-Juliánově

Fig. 4 Ground plan of the underground space under family houses No. 83 and 85 in Bělohorská Street, Brno - Juliánov

(viz výše) – v počtvě se postupně nahromadilo až okolo 0,8 m erodovaného písku. A bylo jen šťastnou shodou okolností, že pronikající voda nemohla napáchat větší škody na ohrožené nadzemní konstrukci.

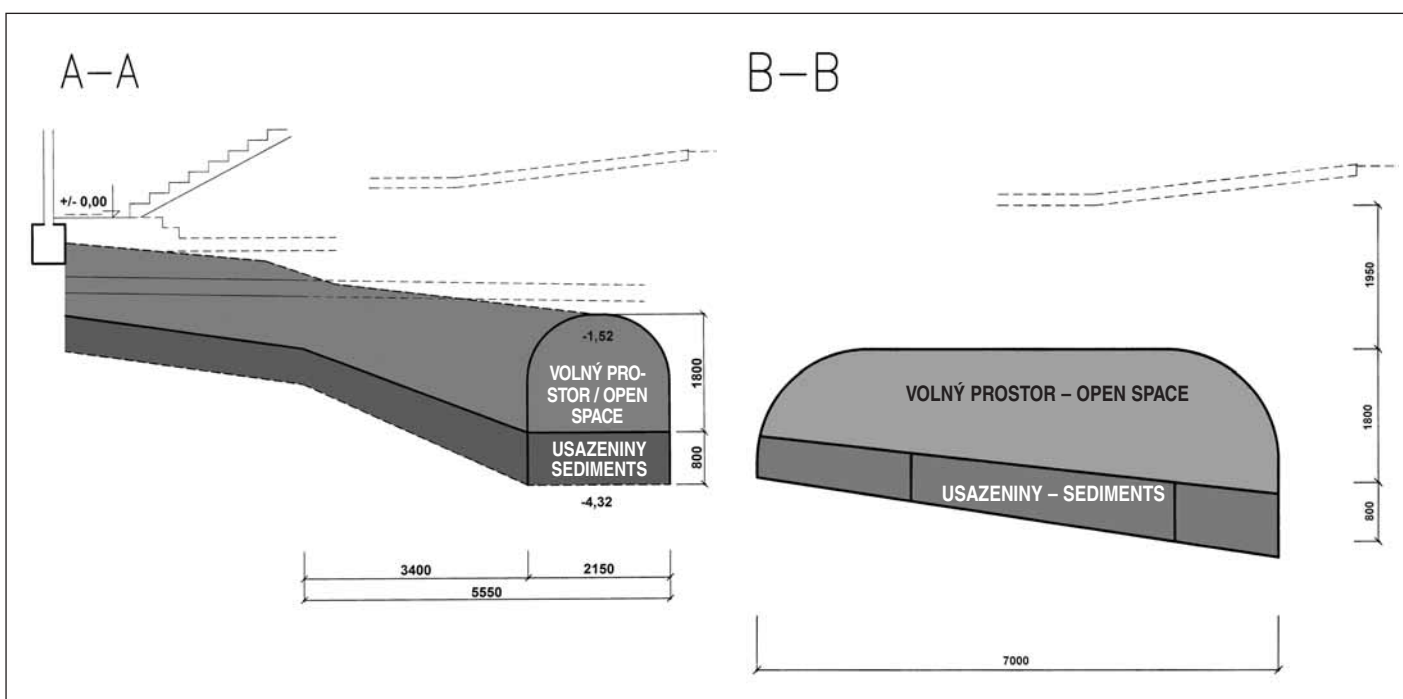
### ŘEŠENÍ PROBLÉMU

Po otevření nečekaných podzemních prostor musel majitel nemovitosti bez prodlení rozhodnout co s nimi. Jediné, co bylo

owing to lucky coincidence that the inflowing water could not cause greater damage to the threatened structure.

### PROBLEM SOLUTION

Once the unexpected underground spaces had been opened, the property owner had to without delay decide what to do with them. The only thing which was obvious in the first phase was that the encountered condition could not be preserved.



Obr. 5 Příčný průřez podzemního prostoru pod domky Bělohorská 83 a 85 v Brně-Juliánově

Fig. 5 Cross-section through the underground space under family houses No. 83 and 85 in Bělohorská Street, Brno - Juliánov





Obr. 6 Marinní jílovité písky spodního badenu s polohami drobného šterku; zastižené stěny podzemní prostory jsou nepodpřené; v počtvě je patrný uložený erodovaný písek

Fig. 6 Marine clayey sands of the Lower Baden formation with layers of fine-grained gravel. The encountered underground spaces are unsupported. Deposited eroded sand is visible at the bottom

v první fázi zřejmé, bylo to, že zastižený stav nemůže zůstat zachován.

Z pohledu statika lze takovéto prostory buď zajistit výztuží (a to buď nic zásadního neřešící dočasnou výdřevou, nebo lépe výztuží trvalou) s jejich dalším využitím (jako sklep...), nebo jednou provždy podzemní prostor zlikvidovat jeho vyplněním. Většinová reakce **nezúčastněných** byla: Zřídit sklep. Vzhledem k velmi omezenému přístupu do podzemí, a dalším omezujícím pracovním podmínkám však bylo po velmi krátké diskusi rozhodnuto majitelkou tento, v podstatě velmi nežádoucí, podzemní prostor vyplnit. Bylo zvoleno jeho postupné zalití cementopopílkovou směsí KOPOS s následným doinjektováním. Nejprve byly podél dotčených obvodových zdí osazeny injektážní jehly a ve dně a pod stropem injektážní hadice. Prostora byla postupně vyplněna 4 vrstvami KOPOSU 3 (minimální pevnost 2 MPa/28 dnů) po cca 1,0 m. Před napuštěním další vrstvy bylo vždy vyčkáno sednutí předchozí s oddrénováním nadbytečné vody (výšky asi 0,1 m) do okolního propustného prostředí písků. Volbu tohoto postupu podpořilo i postupně se zvyšující nivó stropu. Na závěr byly prostory pod zdmi a pod stropem tlakově doinjektovány cementem, s přísnou kontrolou tlaku a spotřeby směsi (obr. 7). Injekční tlak byl odhadem omezen na 0,5 MPa za stálé kontroly objektu. Sanace zmiňovaných podzemních prostor si vyžádala 32 m<sup>3</sup> KOPOSU a 4 m<sup>3</sup> cementové injektáže. Práce proběhly hladce a horní stavba obou rodinných domků je v současné době využívána bez jakýchkoli problémů.

DOC. ING. VLADISLAV HORÁK, CSc.,  
horak.vl@fce.vutbr.cz, Ústav geotechniky FAST VUT,  
ING. JIRÍ ŠRUBAŘ, jiri.srubar@pris.cz,  
PRIS projekční kancelář, spol. s r. o., Brno

Recenzoval: Ing. Jan Korejčík

**Poděkování:** Tento příspěvek byl vypracován s finanční pomocí EU „OP Výzkum a vývoj pro inovace“, projekt reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0097, v rámci činnosti regionálního centra AdMaS „Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie“ a výzkumného záměru MSM0021630519 Progresivní trvanlivé nosné stavební konstrukce.



Obr. 7 Hadice pro doinjektování cementem  
Fig. 7 Hoses for final injection of cement grout

From structural designer's point of view, such spaces can be either stabilised by the installation of support (either temporary timbering, which solves nothing fundamental, or permanent support, which is better) allowing the further use of the spaces (as a cellar ...), or, once for all, can be liquidated by backfilling. The majority reaction of **the disinterested** was: A cellar should be built. Anyway, the decision was made by the owner after a very short discussion that, with respect to the very limited access to the underground and other limiting working conditions, this, in substance very undesired, underground space should be backfilled. Gradual pouring of KOPOS cinder concrete mix into the space with subsequent injection of grout was chosen. The first step consisted of installing grouting needles along the affected external walls and fixing grouting hoses at the bottom and under the ceiling. The space was gradually backfilled by 4 layers of KOPOS 3 (minimum strength of 2 MPa after 28 days) each about 1.0 m thick. The next layer was not poured until the previous layer settled and excessive water (an about 0.1 m thick layer) was drained away into the permeable sand environment. The selection of this procedure was even supported by the gradually rising level of the ceiling. In the conclusion, the spaces under the walls and under the ceiling were filled by pressure injecting of cement grout, with strict checking on the pressure and grout consumption (see Fig. 7). The grouting pressure was limited by guessing to 0.5 MPa, with concurrent continuous monitoring of the building. The stabilisation of the above-mentioned underground spaces claimed 32 m<sup>3</sup> of KOPOS and 4 m<sup>3</sup> of cement grout. The work proceeded smoothly and the superstructure of both family houses is at present used without any problem.

DOC. ING. VLADISLAV HORÁK, CSc.,  
horak.vl@fce.vutbr.cz, Ústav geotechniky FAST VUT,  
ING. JIRÍ ŠRUBAŘ, jiri.srubar@pris.cz,  
PRIS projekční kancelář, spol. s r. o., Brno

**Acknowledgements:** The article was processed under financial support of the Research Fund No. CZ.1.05/2.1.00/03.0097, within the activities of the Regional Centre AdMaS "Advanced Materials, Structures and Technologies" and Research Fund MSM0021630519.

## LITERATURA / REFERENCES

- [1] www.mapy.cz
- [2] Geologická mapa ČR – mapa předčtvrtohorních útvarů M 1:200 000. List Brno. ÚÚG, Praha, 1996

## FOTOREPORTÁŽ ZE STAVBY PRODLOUŽENÍ TRASY V.A PRAŽSKÉHO METRA (STAV K 26. 11. 2012)

### PICTURE REPORT FROM THE CONSTRUCTION OF THE FIFTH EXTENSION OF THE PRAGUE METRO LINE A (THE STATE AS OF 26. 11. 2012)



Obr. 1 Propojení traťových tunelů u stanice Petřiny (foto: Husák)  
Fig. 1 Interconnection between running tunnels at Petřiny station (photo: Husák)



Obr. 2 Stanice Petřiny a počátek realizace definitivního ostění (foto: Chotár)  
Fig. 2 Petřiny station and the beginning of the final lining installation (photo: Chotár)



Obr. 3 Stříkaná izolace a armatura definitivního ostění ve stanici Velešlavín (foto: Chotár)  
Fig. 3 Spray-on waterproofing and steel reinforcement of the final lining in Velešlavín station (photo: Chotár)



Obr. 4 Primátor MUDr. Bohuslav Svoboda a Dr.-Ing. E.h. Martin Herrenknecht – významní hosté slavnostní prorážky 26. 11. 2012 (foto: Husák)  
Fig. 4 Lord Mayor, MUDr. Bohuslav Svoboda, and Dr.-Ing. E.h. Martin Herrenknecht, the distinguished guests of the ceremonial breakthrough on 26/11/2012 (photo courtesy of J. Husák)



Obr. 5 Dva EPB štíty současně prorazily do prostoru odstavných kolejí stanice Dejvická (foto: Junek)  
Fig. 5 The two EPB shields broke out into the space of the dead-end tail track tunnel at Dejvická station (photo courtesy of J. Junek)



Obr. 6 Pracovní týmy při úspěšném dokončení ražeb EPBS (foto: Husák)  
Fig. 6 Two working teams during the successful completion of the EPBS drives (photo courtesy of J. Husák)



# FOTOREPORTÁŽ ZE STAVBY TUNELOVÉHO KOMPLEXU BLANKA (STAV K 1. 11. 2012)

## PICTURE REPORT FROM THE CONSTRUCTION OF BLANKA COMPLEX OF TUNNELS (THE STATE AS OF 1. 11. 2012)



Obr. 1 Klenbový úsek hloubeného tunelu pod Patočkovou ulicí (foto: Jakub Karlíček)

Fig. 1 Vaulted cut-and-cover tunnel section under Patočkova Street (photo courtesy of Jakub Karlíček)



Obr. 3 Dokončené úpravy milánských stěn v hloubeném tunelu u Špejcharu (foto: Jakub Karlíček)

Fig. 3 Finished treatment of surface of diaphragm walls in the Špejchar cut-and-cover tunnel (photo courtesy of Jakub Karlíček)



Obr. 5 Axiální ventilátory v raženém strojně pod Letnou (foto: Jakub Karlíček)

Fig. 5 Axial fans in the mined cavern for ventilation plant under Letná Plain (photo courtesy of Jakub Karlíček)



Obr. 2 Dokončovací práce v raženém tunelu Brusnice (foto: Jakub Karlíček)

Fig. 2 Finishing work in the Brusnice mined tunnel (photo courtesy of Jakub Karlíček)



Obr. 4 Obklad stěn raženého tunelu pod Stromovkou (foto: Jakub Karlíček)

Fig. 4 Wall cladding in the mined tunnel under Stromovka Park (photo courtesy of Jakub Karlíček)



Obr. 6 Odstavný záliv s napojením průjezdné propojky TP17 a technického centra TGC5 (foto: Jakub Karlíček)

Fig. 6 Breakdown bay with the cross passage passable for vehicles TP17 and the technical services centre TGC5 (photo courtesy of Jakub Karlíček)

**PARTNEŘI MEZINÁRODNÍ KONFERENCE  
PODZEMNÍ STAVBY PRAHA 2013**  
**PARTNERS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE  
UNDERGROUND CONSTRUCTION PRAGUE 2013**



• PLATINOVÍ PARTNEŘI • PLATINUM PARTNERS •



• ZLATÍ PARTNEŘI • GOLD PARTNERS •



• STŘÍBRNÍ PARTNEŘI • SILVER PARTNERS •



PARTNER SPOLEČENSKÉHO VEČERA  
CONFERENCE RECEPTION PARTNER







Photograph: CTRL103 (Thameslink) - By kind permission of HS1

# Dramix®

 **BEKAERT**

better together

## Výhody betónu s ocelovými vláknami v TBM segmentoch

### TBM segmenty

- 100% ocelové vlákna
- Kombinovaná výstuž
- Požiarna odolnosť

### Vysoká výkonnosť

- Zvýšená absorpcia energie pri zaťažení
- Húževnatý betón so zvýšenou únosnosťou
- Vysoká odolnosť voči rázom a únave
- Zlepšená kontrola vývoja a šírenia trhlin

### Ekonomické výhody

- Náhrada klasickej výstuže a drahých armokošov
- Redukovaná spotreba betónu
- Rýchle a jednoduché použitie



Bekaert Hlohovec a.s.  
Pražská 4  
040 01 Košice  
Slovakia

building.slovakia@bekaert.com  
<http://dramix.bekaert.com>





## Metrostav a.s. – partner konference Podzemní stavby Praha 2013 / Partner of the International Conference Underground Construction Prague 2013

**Kvalita, přesnost a důslednost v každém detailu. Společná koordinovaná práce lidí desítek oborů a profesí. Schopnost řešit náročná zadání a odvaha hledat nová řešení. Je tohle umění? Možná ne. Jen to dobře umíme.**  
 Quality, accuracy and consistency in every detail. The coordinated effort of professionals from many fields. The ability to solve problems and the courage to search for new approaches. Is this an art-form? Maybe. In either case we do it well.

- |   |   |   |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 1/ Metro V.A, jednolodní ražená stanice Petřiny / Metro Line VA, Petřiny Single-vault Mined Station   |
|   | 3 | 2/ Městský okruh v Praze, tunelový komplex Blanka / City Circle Road in Prague, Blanka Tunnel Complex |
| 4 | 3 | 3/ Metro V.A, traťový tunel vyražený strojem TBM / Metro Line VA, TBM-driven Running Tunnel           |
|   | 4 | 4/ Velký městský okruh v Brně, Královopolský tunel / Great City Circle in Brno, Královo Tunnel        |





# SikaProof® A

**Inovační, plně přilnutý hydroizolační systém,  
který vám výrazně zjednoduší práci!**

**Partner konference Podzemní stavby Praha 2013**

[www.sika.cz](http://www.sika.cz)



**20 let**

**inovací  
v České  
republice**





Pozemní  
stavby

Železniční  
stavby

Podzemní  
stavby

Modernizace trati Votice–Benešov  
u Prahy - Zahradnický tunel



Výstavba stanice metra Veleslavín



Královopolský tunel,  
Velký městský okruh Brno



Metro IV.C2, Praha



Kolektor Václavské náměstí –  
trasa C, Praha



Jsme spolehlivý partner  
v podzemí, na železnici  
i na povrchu, působíme  
v České republice  
i v zahraničí.

**SUBTERRA** 

[www.subterra.cz](http://www.subterra.cz)

Nedržíme se při zemi

Subterra a.s.  
Bezová 1658  
147 14 Praha 4-Braník





## BUILDING THE FUTURE TOGETHER.

Underground Construction  
Prague 2013  
Conference Partner

Herrenknecht is a technology and market leader in the area of mechanized tunneling systems. As the only company worldwide, Herrenknecht delivers cutting-edge tunnel boring machines for all ground conditions and in all diameters – ranging from 0.10 to 19 meters. In addition, Herrenknecht develops solutions for the production of vertical and sloping shafts.

The tailor-made machines create underground supply tunnels for water and sewage, for gas, oil, electricity, internet and telephone lines (Utility Tunnelling) as well as efficient infrastructure for car, metro and railway traffic (Traffic Tunnelling) around the world. Our tunnel boring machines are forging ahead with the world's longest railway tunnel and the largest metro lines. They help to cross under water with supreme accuracy and to lay pipelines throughout continents.

The Herrenknecht Group employs around 4,000 members of staff worldwide. With 77 subsidiaries and associated companies working in related fields in Germany and abroad, a team of innovative specialists has formed under the umbrella of the Group, which is able to provide integrated solutions with project-specific equipment and service packages – close to the project site and the customer.

Herrenknecht AG  
D-77963 Schwanau  
Phone + 49 7824 302-0  
Fax + 49 7824 3403  
marketing@herrenknecht.com

www.herrenknecht.com



## A winning team for superior productivity



Visit us at the 12<sup>th</sup> International Conference "Underground Construction Prague 2013", 22 – 24 April 2013

Atlas Copco s.r.o.  
Průmyslová 10  
102 00 Praha 10  
www.atlascopco.com

*Sustainable Productivity*





Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavební  
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství  
realizuje projekt financovaný ESF a státním rozpočtem ČR



## “Inovace studijního oboru Geotechnika“

reg. č. CZ.1.07/2.2.00/28.0009



odborné tuzemské a zahraniční exkurze



přednášky a prezentace odborníků z praxe



odborné praxe studentů u firem



studijní webový portál



prezentace studentských prací na konferencích



inovace odborných předmětů a laboratorního vybavení



## ZPRÁVY Z TUNELÁŘSKÝCH KONFERENCÍ / NEWS FROM TUNNELLING CONFERENCES

### 13. ROČNÍK MEZINÁRODNÍ KONFERENCE GEOTECHNIKA 2012

#### 13<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE GEOTECHNIKA 2012

The already 13<sup>th</sup> International Conference GEOTECHNIKA 2012 was held in Horní Smokovec, the High Tatras, Slovakia, from 26<sup>th</sup> to 28<sup>th</sup> September 2012. It resumed, after a four-year break, the previous traditional two-year cycle of these geotechnical conferences. Together with the main conference organisers, the Faculty of Civil Engineering of the VŠB - Technical University of Ostrava and ORGWARE company, even other universities and scientific and research organisations from the Czech Republic, Slovakia and Poland participated in the conference dealings. The conference was attended by the total of 133 experts from professional firms, scientific and research organisations and universities, with the majority coming from the Czech and Slovak Republics.

The conference focus was wide. The topics of the 61 papers which were read covered virtually all geotechnical regions.

Ve dnech 26.–28. 9. 2012 se konal v Horním Smokovci již 13. ročník mezinárodní konference GEOTECHNIKA 2012, který navázal po čtyřleté přestávce na předchozí tradiční dvouletý cyklus geotechnických konferencí ve Vysokých Tatrách. Společně s hlavními organizátory konference, Fakultou stavební VŠB-TU Ostrava a firmou ORGWARE, se na realizaci konference podílely i další vysoké školy a vědecko-výzkumné organizace z České republiky, Slovenska a Polska. Vědeckou záštitu nad konferencí převzaly tunelářské asociace České i Slovenské republiky a dále

Česko-slovenská společnost pro mechaniku zemin a geotechnické inženýrství. Odborným garantem semináře byl prof. Aldorf, celkem se konference zúčastnilo 133 odborníků z odborných firem, vědecko-výzkumných organizací a vysokých škol převážně z České a Slovenské republiky.

Obsahové zaměření konference bylo dosti široké, celkem bylo v průběhu jednání předneseno 61 příspěvků, které svým zaměřením prakticky pokrývaly všechny geotechnické oblasti.

V úvodu konference zástupci vysokých škol prezentovali hlavní problémy výuky geotechnických a inženýrskogeologických oborů, které se týkaly především rozsahu a koncepce výuky geotechniky, problematiky klesající úrovně znalostí studentů přicházejících na technické vysoké školy ze škol středních, uplatnění bakalářů na trhu práce a možností zvýšení zájmu studentů o studium geotechnických a inženýrskogeologických oborů. K zamyšlení nad současnými aktuálními problémy a budoucností oboru inženýrská geologie přiměl účastníky konference příspěvek doc. Rozsypala s názvem *Je budoucnost inženýrské geologie skutečně tmavě fialová?*

V oblasti příspěvků zaměřených na nové technologie v podzemním stavitelství jistě účastníky zaujal příspěvek kolektivu autorů z firmy Metrostav, a. s., prezentující použití technologie TBM-EPV na prodloužení trasy metra V.A v Praze (ing. Cyroň, ing. Šebesta, Dr.Vítek). Dalším zajímavým příspěvkem z oblasti inovace v podzemním stavitelství byl příspěvek zabývající se





Obr. 1 Zahájení konference Geotechnika 2012 prof. Aldorfem  
Fig. 1 Prof. Aldorf opening the Geotechnika 2012 conference

porovnáním nejčastěji používané fóliové hydroizolace a inovativní alternativní stříkané hydroizolační membrány (ing. Zámečník, ing. Dohnálek).

Problémy spojenými s prodloužováním doby realizace tunelů na dálnici D8 přes České středohoří se zabývali ve svém příspěvku autoři ing. Hnilička a ing. Svoboda z firmy PRAGOPROJEKT, a. s. Zajímavé výsledky geotechnického monitoringu při realizaci tunelového komplexu Blanka, především s ohledem na vznik známých mimořádných událostí na této stavbě, přednesl ing. Butovič. Součástí konference byl rovněž blok příspěvků, zabývajících se podrobněji některými specifickými faktory chování ostění tunelů a možnostmi vyhodnocení vlivů těchto faktorů na napětový a deformační stav ostění (vliv tuhých liniových prvků v ostění tunelu, vliv teplotních změn, aplikace objemových přetvoření pro stanovení kvality materiálu).

Další velká skupina příspěvků byla zaměřena do oblasti geotechnických problémů spojených s výstavbou dopravních komunikací – v této tematické skupině byl mimo jiné jistě zajímavý a přínosný příspěvek kolektivu autorů ing. Badíková, Michalica (ARCADIS Geotechnika, a. s.), kteří shrnuli své poznatky a zkušenosti získané v pozici nezávislého dozoru při realizaci PPP projektu výstavby rychlostní silnice R1 Nitra – Tekovské Nemce a poukázali na nejdůležitější problematické faktory úspěšnosti těchto typů projektů.

Jednání konference potvrdilo stále aktuální problematiku svahových pohybů na různých typech svahových těles (přírodní svahy, násypy, výsypky, odkaliště, ochranné hráze), byly prezentovány možnosti jejich sanace a vyhodnocení úspěšnosti aplikovaných sanačních opatření.



Obr. 2 Předsednictvo úvodní sekce konference Geotechnika 2012  
Fig. 2 The Geotechnika 2012 conference initial section board

Část přednesených příspěvků se zabývala rovněž technologiemi a problémy spojenými se zakládáním staveb. Příspěvek kolektivu autorů z firem SG-Geoinženýring, s. r. o., a Green GAS, a. s. (ing. Hájovský, ing. Sojka) představil rizika spojená se zakládáním staveb na termicky aktivních starých odvalech. Protipovodňovým opatřením a zakládáním staveb v zaplavovaných územích se věnoval příspěvek kolektivu autorů prof. Bednářová, prof. Hulla z STU Bratislava. V příspěvku autorek z Výzkumného ústavu vodohospodářského z Bratislavy byl představen model TRIWACO, aplikovaný při modelování ovlivnění režimu podzemních vod v důsledku realizace podzemní liniové stavby.

Hornická problematika dimenzování výztuže porubových chodeb podle metodiky používané v OKR a v německých dolech byla prezentována v příspěvku doc. Šňupárka (Ústav Geoniky AVČR). Polští kolegové z Univerzity Slaske z Gliwic (Dr. Kleta, ing. Jendrys, ing. Heyduk) zaměřili své příspěvky do oblasti modelování porušení ostění jam a představili možnosti jejich monitoringu moderními sofistikovanými metodami založenými na tzv. Augmented Reality.

Jednání konference a diskuse v průběhu jednání i mimo jednací sál přinesly jistě mnoho informací a zkušeností z různých geotechnických oblastí, poukázaly na aktuální problémy, se kterými se v geotechnice setkáváme, a prezentovaly možnosti jejich řešení s využitím nových postupů, technologií a materiálů. Konference potvrdila interdisciplinární charakter geotechniky a potřebu stále užší spolupráce různých inženýrských oborů pro bezpečnou, ekonomickou a efektivní realizaci geotechnických staveb.

DOC. RNDr. EVA HRUBEŠOVÁ, Ph.D.,  
eva.hrubesova@vsb.cz,  
Fakulta stavební VŠB-TU Ostrava

## RAKOUSKÝ TUNNELTAG A 61. GEOMECHANICKÉ KOLOKVIUM V SALCBURKU AUSTRIAN TUNNELTAG AND 61<sup>ST</sup> GEOMECHANICAL COLLOQUIUM IN SALZBURG

One of the largest meetings of European tunnellers was held as every year in Salzburg in October 2012. The Austrian Tunnel Day ('Tunneltag') was held first, on the 10<sup>th</sup> October 2012. It was followed by the two-day negotiation of the 61<sup>st</sup> Geotechnical Colloquium. In addition it was possible on Saturday the 14<sup>th</sup> October 2012 to take part in a technical excursion to tunnels on the new route of a high-performance railway track running along the Inn valley near Innsbruck.

Within the framework of the colloquium, a representative of the ITA-AITES Czech Tunnelling Association presented an invitation for the Tunneltag attendees to attend the international conference Underground Construction Prague 2013. It will be held in April 2013 under the auspices of the ITA-AITES (for more information visit [www.ita-aites.cz](http://www.ita-aites.cz)).

Jedno z největších setkání evropských tunelářů proběhlo jako každý rok v říjnu roku 2012 v Salcburku. Nejprve se ve středu



Obr. 1 Ing. Martin Srb (3G Consulting Engineers, s. r. o.) pozval účastníky kolokvia do Prahy na mezinárodní konferenci Podzemní stavby Praha 2013 (foto: Libor Mařík)

Fig. 1 Ing. Martin Srb (3G Consulting Engineers s. r. o.) inviting the Colloquium attendees to Prague to the International Conference Underground Construction Prague 2013 (photo courtesy of Libor Mařík)

10. října 2012 konal rakouský tunelářský den („Tunneltag“) a pak následovalo dvoudenní jednání 61. Geomechanického kolokvia. V sobotu 14. října 2012 byla ještě možnost zúčastnit se odborné exkurze na tunely nové železniční trasy vysokorychlostní železnice v údolí Innu poblíž Innsbrucku.

Termín „vysokorychlostní“ znamená, že rakouská koncepce rozvoje se liší např. od koncepce německé, která je označována jako „vysokorychlostní“. Nové trasy umožní nejen jízdu osobních vlaků vysokou rychlostí, ale bude na ně také převedena nákladní doprava a tím se výrazně sníží ekologická zátěž okolí železnice.

**Rakouský tunelářský den** pořádá v dvouletém intervalu Rakouská tunelářská asociace ITA-AITES. V úvodu vystoupil její předseda Dipl.-Ing. W. Stipek s informacemi o aktivitách asociace v domácím prostředí, tj. v Rakousku. Mezinárodní aktivity asociace komentoval následně prof. R. Galler. Potom pozdravil účastníky současný prezident mezinárodní tunelářské asociace ITA-AITES prof. In-Mo Lee. Úvodní Key note Lecture přednesl H. Pöchlhammer.



Obr. 2 Pohled do sálu při jednání kolokvia, kterého se zúčastnilo více než 1000 odborníků (foto: Libor Mařík)

Fig. 2 A view inside the hall during the Colloquium, which was attended by more than 1000 professionals (photo courtesy of Libor Mařík)

Další jednání proběhlo ve dvou sekcích.

Dopolední sekce 1 byla zaměřena na **Specifické výzvy současných tunelových staveb** a zazněly v ní následující přednášky:

Tunelování na nové vysokorychlostní železniční trase VDE 8.1 Ebersfeld – Erfurt – příklad tunel Eierberge (Ch. Anhalt, A. Karlbauer),

Hraniční ražba/práce na tunelu Södermalm ve Stockholmu (H. Gamsjäger),

Geologické a logistické výzvy pro použití TBM na 26 km dlouhém tunelu Pinglu v Číně (M. Müller, P. Bargmann),

Rozsáhlý projekt Stuttgart 21 – nová trasa Wendlingen – Ulm: partnerství vytvořené pro zvládnutí rozsáhlého projektu v obtížných podmínkách (V. Weiss, M. Holzhuber).

Dopolední sekce 2 měla téma: **Inovace a kreativita při optimalizaci staveb tunelů**

V úvodu sekce vyhlásil prof. Galler výsledky soutěže o cenu za nejlepší inovaci při stavbě tunelů.

Pak následovaly přednášky, které optimalizaci stavby tunelů popisovaly z různých hledisek:

Tunelové projekty potřebují spolupráci (H. G. Jodl – TU Vídeň),

Zlepšené modely pro udělení zakázky (M. Eder – Laabmayr Salzburg),

Podněty/stimuly pro optimalizaci projektu (W. Purrer – Univerzita Innsbruck),

Pohled investora (Ch. Bauer – Asfinag Vídeň),

Plánování inženýrského přístupu/ÖBA (A. Leitner – IGT Salzburg),

Pohled dodavatele (J. Arnold – Alpine Berno Tunnelling).

Text přednášek, které zazněly v rámci Tunneltagu, bude uveřejněn v čísle 6/2012 časopisu rakouské společnosti pro geomechaniku Geomechanics and Tunnelling/Geomechanik und Tunnelbau.

Jednání rakouského tunelářského dne uzavřel opět W. Stipek. Společenské setkání se tradičně konalo v prostorách restaurace na terase salcburského hradu (pevnosti), tentokrát ale za deštivého počasí.

## 61. Geomechanické kolokvium

Pořadatelem salcburských geomechanických kolokvií je Rakouská geomechanická společnost. V úvodu připomněl její předseda prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Wulf Schubert z TU Graz dvě významná výročí, která nemohla být v programu kolokvia opomenuta.

Především to je 50. výročí vzniku Mezinárodní společnosti pro mechaniku hornin (International Society for Rock



Mechanics – ISRM). Ta byla ustavena 25. května 1962 právě v Salcburku. Dnes má více než 6500 členů organizovaných ve 48 národních skupinách. Tomuto výročí se ve svém vystoupení věnoval současný prezident ISRM prof. Xia-Ting Feng z Číny.

Druhé výročí, které připomněl prof. Wulf Schubert, je padesát let Nové rakouské tunelovací metody (NRTM). Pojmenování této metody v Salcburku v roce 1962 při přednášce na geomechanickém kolokviu poprvé uvedl prof. L. v. Rabcewicz. „Nové“ proto, aby byla odlišena od původní rakouské metody, která patřila do „národnostně“ pojmenovaných metod tunelování, jako byly německá metoda, belgická metoda apod.

Jak uvedl prof. Schubert, NRTM se během desetiletí stala synonymem pro konvenční tunelování. V rámci svého vývoje dokázala, že může být používána i ve velmi obtížných geotechnických podmínkách při přijatelných (rozumných) nákladech. Občasné útoky na NRTM a její zastánce nic nemohou změnit na skutečnosti, že je používána na celém světě samozřejmě ve variantách odpovídajících té které lokalitě.

Tak významné výročí se výrazně odrazilo v programu kolokvia a stalo se tématem přednášek čtvrtědenního dopoledne.

Než ale byly přednášky zahájeny, byl promítnut předtočený rozhovor s legendou rakouského podzemního stavitelství prof. Franzem Pacherelem. Pan profesor byl přítomen a ve svých více než devadesáti letech vypadal v neobyčejně dobré kondici.

Díky dobrým vztahům s pořadatelem vystoupil v rámci odpoledního bloku přednášek Ing. Martin Srb a pozval účastníky na konferenci Podzemní stavby Praha 2013 (obr. 1).

O oblíbenosti a úspěšnosti salzburského kolokvia svědčí i fakt, že se ho letos účastnilo přes 1000 návštěvníků z mnoha zemí Evropy i světa (obr. 2).

Všechny přednášky přednesené na kolokviu, jejichž přehled následuje, jsou otištěny v čísle 5/2012 časopisu Geomechanics and Tunneling/Geomechanik und Tunnelbau.

### 1. blok přednášek – Vývoj NRTM

Používání NRTM ve Spojeném království od r. 1970 do současnosti (Maurice Gooderham, David Hindle),

Pokrok v užití NRTM v Brazílii (Tarcísio B. Celestino),

Korejská praxe v konvenčním tunelování (In-Mo Lee, Kwang-Joon Park),

NRTM – od stavební metody k systému (Wulf Schubert, Harald Lauffer).

### 2. blok přednášek – Hydrotechnické stavby z hlediska mechaniky hornin

Zakládání (základová oblast) přehrady Zillergründl (Pius Obernhuber),

Inženýrskogeologická hlediska související s výběrem staveniště nové horní zásobní nádrže v projektu zvýšení výkonu vodní elektrárny Kaunertal (Sebastian Perzimaier, Bernhard Hofer, Michael Holzmann),

Projektová opatření přijatá pro překonání nepříznivých geotechnických podmínek při stavbě 93 m vysoké rockfillové (balvanité) přehrady s betonovým lícem (Markus Verdianz, Zafer Koray Özbeck, Johannes Linortner, Gerald Jung),

Zpevňující opatření a analýza levobřežního závazání klenbové přehrady Jin Ping (Li Ning, Yao Xianchun a další),

Posouvání hranic při použití předpjatého tunelového ostění (Urs H. Grunicke, Mladen Ristič),

Renovace tlakového přivaděče a protirázové ochrany hydroelektrárny Kaunertal (Paul Bonapace),

Hodnocení eroze (vymýlání) skalního nezpevněného vývaru pomocí metody Block Scour Spektrum (Daniel Scott Kieffer).

### 3. blok přednášek – Penetrace, opotřebení a leplivost u řezných nástrojů a související problémy při ražbě tunelovacími stroji

Prognóza penetrace a opotřebení při ražbě TBM v tvrdých horninách – poznatky z výzkumného projektu ABROCK (Eckart Schneider, Kurosch Thuro, Robert Galler),

Poznatky ze zkoušek valivých dlát v alpské litologii (Martin Entacher, Klaus Lassning),

Penetrační testy pro tunelovací stroje a jejich využití v praxi (Christian Frenzel, Robert Galler, Heiko Käsling, Marlène Villeneuve),

Rozpojování pevných jílu a jílovců při hydraulickém a mechanickém namáhání (Tobias Baumgärtel, Jochen Fillibeck, Norbert Vogt),

Odhad tendence k ucpávání a oddělování jemnozrnných částic při ražbě štůty (Fritz Hollmann, Markus Thewes),

Geotechnické zkušenosti z ražeb hydroštůty na tratových úsecích H 3-4 a H8 stavby Unterinntal (Manfred Köhler, Ulrich Maindl, Marcus Scholz, Katharina Wendl).

### 4. blok přednášek – Jaké jsou rozumné náklady na bezpečnost?

Vyhodnocení rizik jako základ pro rozhodování o investicích. Investiční rozhodování založené na odhadu rizik (Reiner Poisel, Robert Hofmann, Michael Mölk),

Efektivní náklady jako základ pro rozhodování o bezpečnostních opatřeních (Charles Fermaud, Vasiliki Malioka, Wolfgang Frenzl),

Bezpečnost na staveništích tunelu Koralm (Dagmar Lauffer-Neumann, Sussane Fehleisen),

Zdraví a bezpečnost, náklady na prevenci a na likvidaci mimořádných událostí ve stavebnictví v mezinárodním porovnání (Leo Falkner, Johann Schneider, Josef Arnold),

Velký význam bezpečnosti přehrad v Rakousku (Gerald Zenz, Pius Obernhuber, Helmut Czerny),

Bezpečnostní vybavení nové železniční trati ve spodní části údolí Innu „Unterinntal“ (Michael Saischek).

Při **sobotní exkurzi** měli její účastníci možnost si prohlédnout tunely na dokončeném úseku vysokovýkonné železnice v údolí Innu mezi Kundlem a Baumkirchenem označovaném jako Unterinntal. Dopraveni tam byli mimořádným vlakem vypraveným z nádraží v Innsbrucku. Jedná se o úsek trati délky cca 40 km kde 34,5 km trasy je vedeno ve dvoukolejných železničních tunelech, vanách a galeriích. Ražba tunelů probíhala konvenčně, pomocí



Obr. 3 Exkurze – nenápadný vjezd do tunelu délky téměř 35 km (foto: Libor Mařík)

Fig. 3 Excursion – the inconspicuous entrance to the nearly 35 km long tunnel (photo courtesy of Libor Mařík)



Obr. 4 Exkurze – průjezd hloubeným tunelem a přejezd do ražené části (foto: Libor Mařík)

Fig. 4 Excursion – the passage through the cut-and-cover tunnel and further to the mined tunnel part (photo courtesy of Libor Mařík)



Obr. 5 Exkurze – pohled z kabiny strojvedoucího (foto: Libor Mařík)

Fig. 5 Excursion – a view from train operator's cabin (photo courtesy of Libor Mařík)

těsněnými podzemními stěnami. V úsecích umožňujících efektivní nasazení konvenční tunelovací metody byly tunely raženy pomocí NRTM. Jako doprovodná opatření byly v nestabilních úsecích použity mikropilotové dešťníky délky 18 m. K zamezení přítoku vody ve zvodnělých materiálech byla nasazena ražba ve stlačeném vzduchu, která vyžaduje dodržování přísných bezpečnostních opatření a provádění dekomprese při opuštění pracoviště. Maximální pracovní tlak vzduchu dosahoval 1,3 baru.

Velká pozornost byla věnována minimalizaci vlivů při provozování tunelů na okolní prostředí. Tunely procházejí osídlenými oblastmi, kde je nutné ochránit obyvatelstvo před vlivem vibrací přenášených z kolejového svršku do ostění tunelů a dále do horninového masivu. Proto bylo na 24 km trasy použito speciálního systému upevnění kolejnic do masivních betonových „bloků“, které jsou bodově uloženy přes elastické bodové podpory na ostění tunelů. Tím dojde k výraznému utlumení přenosu vibrací do objektů v nadloží. Dimenzování tohoto systému probíhalo v letech 2008 až 2010. Přímo v tunelech byly simulovány účinky železničního provozu a pomocí četných měření na vytípaných 240 budovách byly shromažďovány potřebné údaje. Výsledky měření byly zohledněny v projektu a stavební práce na tomto úseku byly dokončeny na jaře roku 2011.

Úsek je navržen na maximální cestovní rychlost 220 km/h. Vzhledem k tomu, že v době konání kolokvia byla trať ještě ve zkušebním provozu, projeli se účastníci exkurze rychlostí „pouze“ 160 km/h, což je maximální rychlost na tratích v České republice. Během jízdy se zejména při pohledu z kabiny vlakvedoucího naskytla výjimečná podívaná, neboť bylo zapnuto nouzové osvětlení tunelu, které při běžném provozu není ve funkci. Jedná se o osvětlení záchranných cest podél trati



Obr. 6 Exkurze – osvětlení v místě rozšíření tunelu a únikové cesty (foto: Libor Mařík)

Fig. 6 Excursion – illumination in the tunnel enlargement and escape route location (photo courtesy of Libor Mařík)

tunelovacího stroje i hloubením. V silně zvodnělých sedimentech řeky Inn byly nasazeny dva tunelovací stroje Otto a Jenny o průměru 13 m. V nejtěžších geotechnických podmínkách vyrazily celkem 9,5 km dlouhý úsek. Betonáž 45 000 kusů tybinků zajišťovala betonárna nedaleko staveniště tunelu. Celkem 6 km tunelů bylo prováděno v otevřené stavební jámě zajištěné



Obr. 7 Exkurze – vlaková souprava v místě rozšíření tunelu (foto: Libor Mařík)

Fig. 7 Excursion – a train in the tunnel enlargement location (photo courtesy of Libor Mařík)



a zvláštní osvětlení v místech únikových cest do propojek k šachtám či štolám.

Požárněbezpečnostní řešení dvoukolejných tunelů si vyžádalo výstavbu 34 únikových šachet a v místě s vyšším nadložím 6 přístupových štol v celkové délce 9 km. O zásobování požární vodou se starají 3 studny v majetku Rakouských spolkových drah ÖBB. Čerpací stanice dodávají do systému vodu pod tlakem 6–10 barů. Požární potrubí vedené po ostění téměř 35 km dlouhého tunelu je trvale zavodněné a připravené k použití. Všechny vstupy a přístupové komunikace jsou navrženy na úroveň stoleté vody.

Trať je napojena na již provozovaný železniční obchvat Innsbrucku a přes připravené odbočení v Inntaltunnelu bude napojena na Brennerbasistunnel. Převedením dálkové i regionální dopravy do tunelů vede k výraznému zklidnění celé oblasti. S uvedením do provozu tohoto velkolepého, nejen tunelářského díla se počítá 9. 12. 2012.

O účast na exkurzi projeví zájem kromě Rakušanů především zahraniční účastníci kolokvia, kteří si tuto jedinečnou příležitost nenechali uniknout.

Příští již **62. Geomechanické kolokvium** se bude konat 10. a 11. října 2013 a témata jeho sekcí budou:

- Šachty jako výzva
- Velké mezinárodní projekty
- Tlakové vodní přivaděče
- Speciální opatření v zeminách

Pozn.: Pohledu na tunelářství v České republice bude věnováno číslo 2/2013 časopisu Geomechanics and Tunneling/Geomechanik und Tunnelbau, které vyjde před konáním pražské konference Podzemní stavby Praha 2013.

**ING. LIBOR MAŘÍK**, *libor.marik@ikpce.com*,  
*IKP Consulting Engineers, s. r. o.*,

**ING. MILOSLAV NOVOTNÝ**, *ita-aites@metrostav.cz*,  
*sekretář CzTA ITA-AITES*

## 1. VÝCHODOEVROPSKÁ TUNELÁŘSKÁ KONFERENCE (EETC 2012) 1<sup>ST</sup> EAST EUROPEAN TUNNELLING CONFERENCE (EETC 2012)

The 1<sup>st</sup> East European Tunnelling Conference (EETC 2012) was held from 18<sup>th</sup> to 21<sup>st</sup> September 2012 in Budapest, Hungary. The conference was attended by 137 delegates from 29 countries. During two days, 41 papers were read in 2 rooms in technical sections.

A session of representatives of East European countries was held prior to the conference itself. The discussion was focused on the main aspects of East European tunnelling conferences (EETCs). Apart from representatives of East European countries (usually presidents of tunnelling associations), there were also the ITA representatives (Olivier Vion, Markus Thewes) present in the conference. The basic idea regarding the origination of the EETC is providing support to sharing technical information within the framework of the East European region.

Východoevropská tunelářská konference (EETC 2012) se uskutečnila 18.–21. září 2012 v Budapešti v Maďarsku. Konference se zúčastnilo 137 delegátů z 29 zemí, z ČR bylo přítomno 8 delegátů. Během dvou dní bylo v technických sekcích předneseno ve 2 sálech 41 příspěvků, z ČR byly předneseny tři příspěvky (Ing. Valeš – Metroprojekt Praha, a. s.,

doc. Hilar – 3G CE, s. r. o., doc. Vojtasík – VŠB TU Ostrava). Ve sborníku bylo celkem otištěno 44 příspěvků. Vlastní konference probíhala ve dvou jednacích jazycích se simultánním tlumočením (anglicky a maďarsky).

Před vlastní konferencí proběhlo jednání zástupců východoevropských zemí, kde byly diskutovány hlavní aspekty východoevropských tunelářských konferencí (EETC). Kromě zástupců východoevropských zemí (zpravidla prezidenti tunelářských asociací) byli přítomni i zástupci ITA (Olivier Vion, Markus Thewes). Základní myšlenkou pro vznik EETC je podpora sdílení odborných informací v rámci východoevropského regionu, vložné EETC by mělo být obecně výrazně nižší než vložné WTC, proto by EETC měly přitahovat i odborníky z ekonomicky méně vyspělých zemí, ze kterých je účast na WTC z ekonomických důvodů obtížná. Pro zajímavost vložné EETC 2012 bylo 290–340 eur (asi 7250–8500 Kč) včetně DPH, vložné nejbližšího WTC 2013 ve Švýcarsku bylo stanoveno na 1200–1400 CHF (asi 24600–28700 Kč) bez DPH. Na jednání bylo odsouhlaseno, že následující EETC se uskuteční v září 2014 v Aténách v Řecku, v rámci EETC 2014 proběhne také zasedání



Obr. 1 Tibor Horváth – předseda Maďarské tunelářské asociace  
Fig. 1 Tibor Horváth – the chairman of the Hungarian Tunnelling Association



Obr. 2 Prof. Markus Thewes odsouzený králem k sezení na židli s hřebíky  
Fig. 2 Prof. Markus Thewes sentenced by the king to sit on a chair with nails sticking out of it



Obr. 3 Rytířský turnaj  
Fig. 3 Knightly tournament

předsednictva ITA. Konference EETC budou v budoucnu probíhat pravidelně s intervalem 2 roky. Ze strany ČR byla nabídnuta možnost organizace EETC v Praze v termínu některé z našich konferencí Podzemní stavby (tj. např. v roce 2016).

Vlastní konference EETC 2012 probíhala standardně jako jiné obdobné konference. Konferenci zahájil Tibor Horváth (předseda Maďarské tunelářské asociace a hlavní organizátor konference EETC 2012) – obr. 1. Následně promluvila Etelka Pataky-Barsi (prezidentka maďarské komory inženýrů). Poté následovaly dvě úvodní přednášky. První přednáška maďarského řečníka Zoltána Lopperta byla zaměřena na využití podzemí pro rozvoj dopravy v Budapešti. Druhá přednáška Markuse Thewese (viceprezident ITA) byla zaměřena na vývoj tunelování pomocí zeminových štítů. Následně Olivier Vion (výkonný ředitel ITA) zmínil současné aktivity Mezinárodní tunelářské organizace ITA a Davorin Kolic (prezident Chorvatské tunelářské asociace) pozval všechny na WTC 2015 konané v Chorvatsku.

Odpoledne pak následovaly odborné přednášky v sekcích. Řada přednášek byla zaměřena na maďarské podzemní stavby. Největší pozornost byla soustředěna na aspekty přípravy a výstavby nové trasy metra v Budapešti (ražba zeminovými štíty zahrnující podchod Dunaje), dále byla probírána příprava a výstavba úložiště jaderného odpadu Bábaapáti na jihu Maďarska. Podle očekávání velmi živou diskusi rozpoutala přednáška, kterou prof. Jozsef Mecsi zaměřil na obrovský



Obr. 4 Královská hostina  
Fig. 4 Royal banquet

propad tunelu A na dálnici M6 na jihu Maďarska blízko města Pécs (v roce 2008 se propadlo zhruba 200 m tunelu, havárie s propagací na povrch zasáhla obě tunelové trouby ražené pomocí NRTM ve spraších). V současnosti je již dálnice zahrnující čtyři nové tunely ražené NRTM v provozu. Nový úsek dálnice M6 byl také cílem odborné exkurze, dále také bylo možné v rámci exkurze navštívit novou trasu metra, kde již byly dokončeny ražby a probíhá instalace technologií. Exkurze mimo jiné umožňovala průchod tunelem metra pod Dunajem.

Z pohledu organizace je třeba ocenit úsilí pořadatelů, během kongresu nenastal žádný výraznější problém. Kongres probíhal v lázeňském hotelu Hélia, ubytování v hotelu umožňovalo využít bazény a sauny.

Velký úspěch sklídl společenský večer, který byl zorganizován ve středověkém duchu na pevnosti ve Visegrádu. Účastníky přivítali hostitelé ve středověkých kostýmech, cestu na pevnost provázeli bubeníci, účastníci si zvolili krále (Olivier Vion) a královnu, král si zvolil trestance (Markus Thewes – obr. 2) a šaška (Davorin Kolic), pak následoval rytířský turnaj (obr. 3) a královská hostina (obr. 4) doprovázená hrou na loutnu.

Více údajů o konferenci včetně fotografií lze nalézt na webové stránce [www.eetc2012budapest.com](http://www.eetc2012budapest.com)

**DOC. ING. MATOUŠ HILAR, Ph.D., [hilar@3-g.cz](mailto:hilar@3-g.cz),  
3G Consulting Engineers, s. r. o.**

## KONFERENCE NO DIG V LUHAČOVICÍCH NO-DIG CONFERENCE IN LUHAČOVICE

The 17<sup>th</sup> conference on trenchless technology, traditionally titled “the No-Dig Conference”, was held in Luhačovice on 17<sup>th</sup> through 19<sup>th</sup> September 2012. As usual, it was organised by the Czech Society for Trenchless Technology (the CzSTT), joining companies having their businesses in the underground, town building and water resources construction engineering.

The conference was attended by 150 professionals from the entire republic and over twenty papers were read there. The conference topic was the quality of work.

Ve dnech 17. až 19. září 2012 se konala v Luhačovicích již 17. Konference o bezvýkopových technologiích, tradičně nazývaná „NO DIG“. Pořádala ji jako obvykle Česká společnost pro bezvýkopové technologie (CzSTT), sdružující firmy

z oboru podzemního, městského a vodohospodářského stavitelství.

Konference se zúčastnilo na 150 odborníků z celé republiky a zaznělo zde přes dvacet referátů. Tématem letošní konference byla kvalita prováděných prací. Zejména se porovnávala kvalita klasických ražeb nebo ražeb nemechanizovanými štíty s panelovým ostěním s kvalitou ražeb prováděných moderními bezvýkopovými technologiemi. Poznatky lze nalézt na webových stránkách CzSTT anebo ve sborníku z konference.

**ING. KAREL FRANCZYK,  
[franczykk@subterra.cz](mailto:franczykk@subterra.cz),  
SUBTERRA a. s.**



## ZE SVĚTA PODZEMNÍCH STAVEB / THE WORLD OF UNDERGROUND CONSTRUCTIONS

FRANCIE – METRO GRAND PARIS EXPRESS  
FRANCE – GRAND PARIS EXPRESS METRO

March 2012 saw the preliminary engineering geological survey for the Grand Paris Express (the Regional Super-Metro around Paris) commence. The existing system of public transport within the wider Paris agglomeration has mostly radial character and the new circular-route metro is intended to provide better interconnection among suburban regions, allowing their general development, together with the reduction of vehicular traffic flow and easing of links to the city centre. The plan comprises three main lines and one supplementary line with the aggregate length of around 200 km and about 70 stations.

V březnu 2012 byl zahájen předběžný inženýrskogeologický průzkum pro projekt Grand Paris Express – „regionální supermetro“ okolo Paříže. Stávající soustava veřejné dopravy v širší pařížské aglomeraci má převážně radiální charakter, nové okružní metro tak má zaručit lepší propojení a celkový rozvoj předměstských oblastí spolu s úbytkem automobilové dopravy a odlehčením spojů do

centra. Plánovány jsou tři hlavní linky a jedna doplňková, o celkové délce kolem 200 km s asi 70 stanicemi. Nové metro bude obsluhovat současná i projektovaná výzkumná, technologická a finanční centra v předměstských částech Paříže, hustě obydlené periferie, železniční nádraží i tři pařížská letiště. Je projektováno jako plně automatizované, podobně jako současná linka 14, která bude prodloužena a stane se jeho součástí. První soupravy mají vyjet v roce 2018, dokončení celé soustavy se předpokládá v roce 2025. Společnost ARCADIS při průzkumných pracích vystupuje jako asistent (dozor) investora pro většinu trasy, kterým je veřejný subjekt Sociétés du Grand Paris. Menší část projektu spadá pod Syndicat des transports d'Île-de-France.

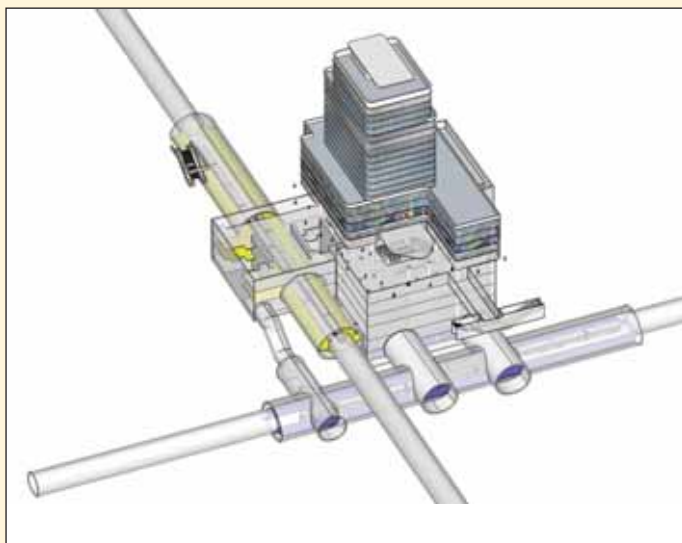
MGR. TEREZA ŠMEJKALOVÁ,  
smejkalova@arcadisgt.cz,  
ARCADIS Geotechnika, a. s.

METRO SANTIAGO DE CHILE – NOVÉ TRASY LÍNEA 3 A LÍNEA 6  
SANTIAGO DE CHILE METRO – NEW LINES LÍNEA 3 AND LÍNEA 6

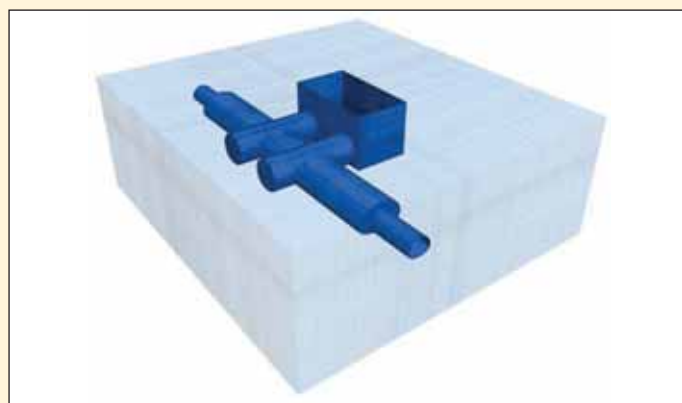
Designing work for the expansion of the metro network in the Chile capital, the six-million modern South American metropolis of Santiago de Chile, is currently underway. The ambitious public network expansion project comprises the development of two complete new metro lines, Línea 3 and Línea 6, with the aggregate length of 37 km. The design is being carried out even with the participation of the Czech branch of ARCADIS company.

V současné době probíhají projekční práce na rozšíření stávající sítě metra hlavního města Chile, šestimilionové

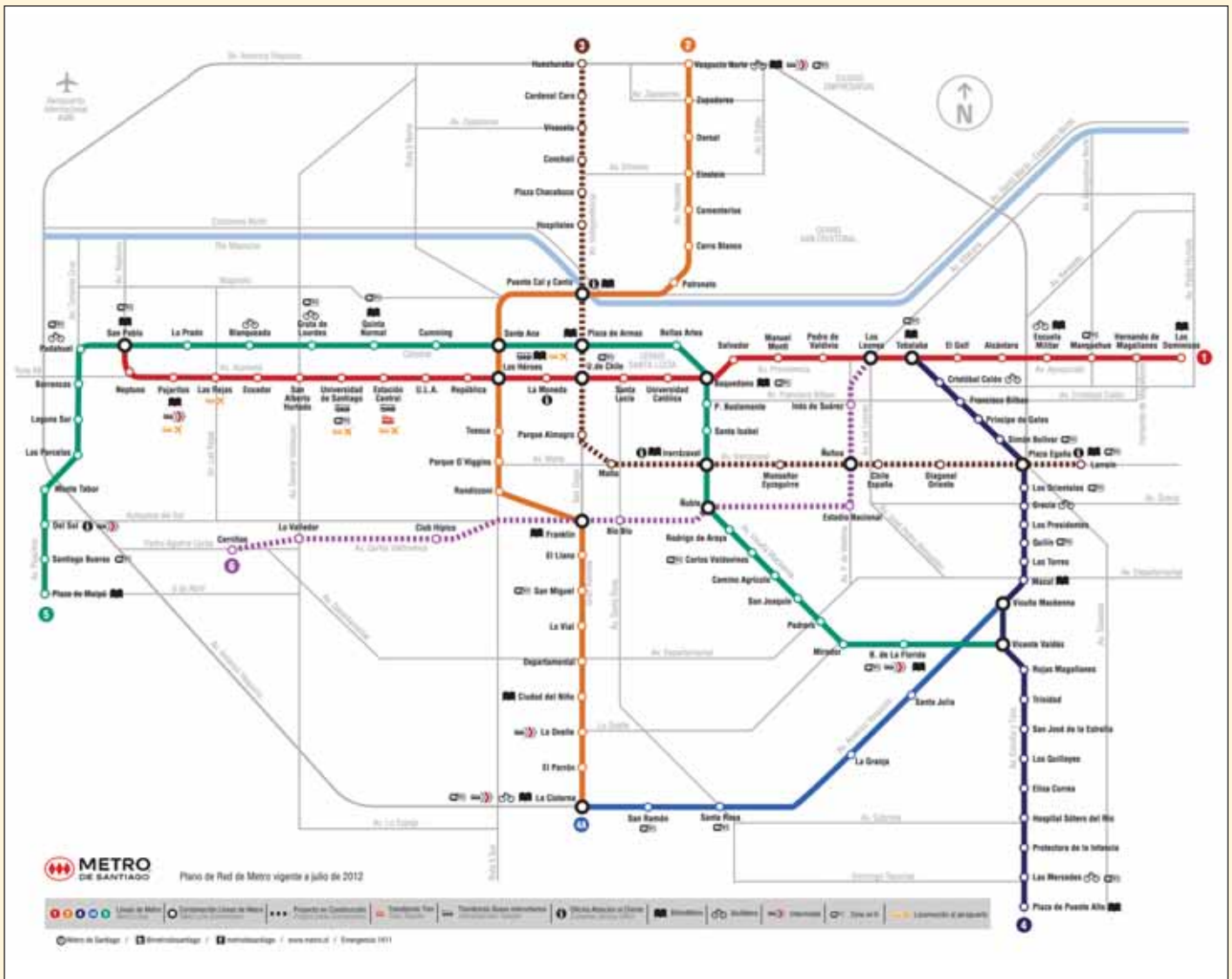
moderní jihoamerické metropole Santiago de Chile. Ambiciózní projekt na rozšíření sítě veřejné dopravy zahrnuje projekt výstavby dvou kompletních nových tras metra, Línea 3 a Línea 6, o celkové délce 37 km. Tím dojde k rozšíření současné sítě čítající 4 trasy o celkové délce 106 km o více než třetinu. V číslech tento projekt znamená výstavbu 28 nových podzemních stanic, kdy 9 z nich řeší křížení a přestup na nynější trasy metra. Nové linky spojí západní a severní část metropole s rychle se rozvíjejícím východem města. Projekt má za cíl nejen ulehčit přetíženým existujícím trasám metra a razantním způsobem zvýšit kapacitu a plynulost veřejné dopravy, ale zajistit moderní a komfortní způsob dopravy napříč dynamicky se rozvíjející metropolí. Projekt počítá se zavedením automatických vlaků bez řidičů, s klimatizovanými vozy, s moderním systémem řízení a kontroly dopravy.



Obr. 1 Stanice Carmelitas – křížení Línea 3 a Línea 6 (Burgemeister architectos)  
Fig. 1 Carmelitas station – the crossing between Línea 3 and Línea 6 (Burgemeister architectos)



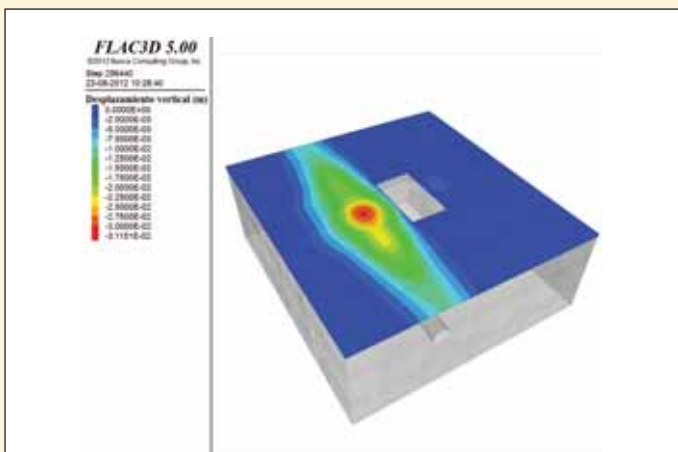
Obr. 2 3D model (FLAC) typické stanice metra – Terminal Norte, Línea 3 (Arcadis)  
Fig. 2 3D model (FLAC) of a typical metro station – Terminal Norte, Línea 3 (Arcadis)



Obr. 3 Síť metra Santiago de Chile, stávající trasy a projektované Línea 3 a Línea 6 (Metro Santiago)

Fig. 3 Santiago de Chile metro network; existing lines and the Línea 3 and Línea 6 being designed (Metro Santiago)

V současné fázi projektu probíhají projekční práce v rámci Basic Design a Detail Design pro obě dvě nové trasy. Basic designem pro obě dvě trasy (Línea 3 a Línea 6) a navíc detail designem pro Línea 3 bylo oceněno konsorcium Arcadis/Ara-Worley Parson/Sener. Na kontraktu za



Obr. 4 Línea 3, Terminal Norte – stanovení deformace na povrchu (3D model FLAC) (Arcadis)

Fig. 4 Línea 3, Terminal Norte – determination of terrain surface deformation (3D model FLAC) (Arcadis)

celkem 9 mil. USD je za projekt veškerých podzemních objektů zodpovědný Arcadis, projekt je prováděn Arcadis Chile za spolupráce s Arcadis NL a Arcadis Geotechnika CZ. Konsorcium současně vyhrálo soutěž na supervizi stavby. Kompletní trasy obou linek jsou projektovány jako ražené, podzemní stanice o ploše výrubu 195 m<sup>2</sup> jako jednolodní. Trasa metra Línea 3 podchází historické centrum včetně chráněných objektů, kříží existující linky a stanice metra s minimálním nadložím, v geologických podmínkách kohezních štěrků. Trasy metra i stanice budou raženy klasickou sekvenční metodou. Komplexnost problému si vyžaduje detailní 3D modelování postupu ražeb, jeho účinku na nadloží a existující objekty. Ostění je navrhováno jako jednovrstevné, stříkaný beton bude použit jak pro primární, tak sekundární ostění, úseky s výskytem podzemní vody nevyjímáje. Součástí projektu je návrh komplexního geotechnického monitoringu.

Prováděcí projektová dokumentace (detail design) bude dokončena v prosinci 2012, tendr na stavební práce proběhne v 1. Q/2012 a vlastní stavební práce pak v období 1. Q/2013–2015.

ING. VÁCLAV VESELÝ, Ph.D.,  
ARCADIS Geotechnika, a. s.



## **NEDOŽITÉ SEDMDESÁTINY ING. GEORGIE ROMANCOVA, CSc. SEVENTIETH BIRTHDAY ING. GEORGIJ ROMANCOV, CSc.. NEVER LIVED TO SEE**

Mnozí z nás si často vzpomenou na kolegu, přítele a dobrého člověka Ing. Georgie Romancova, CSc. Byl dlouholetým členem předsednictva České tunelářské asociace ITA-AITES a taktéž dlouholetým členem redakční rady časopisu Tunel. Nejen dlouholetým, ale velmi aktivním. Připomenu jen jeho iniciativu, aby se naše asociace přihlásila k pořádání světového tunelářského kongresu v roce 2007 – WTC 2007. Kandidatura CzTA byla úspěšná a velmi úspěšný byl i vlastní kongres, jeho přípravu Ing. Romancov řídil coby předseda přípravného výboru.

Ing. Georgii Romancov, CSc., nás opustil 13. ledna 2009. Pamětní medaile CzTA mu tedy mohla být udělena in memoriam.

V pátek 12. října 2012 by se dožil sedmdesáti let. Další důvod si na něj vzpomenout.

**ING. MILOSLAV NOVOTNÝ,  
sekretář CzTA ITA-AITES**



Many of us often remember Ing. Georgij Romancov, CSc., our colleague, friend and a good man. He was a long-standing member of the ITA-AITES Czech Tunnelling Association Board and also a long-standing member of the Editorial Board of TUNEL journal. He was not only a long-standing member, but also a very active member. For example, I remember his initiative for our Association to seek the right to hold the world tunnel congress in 2007, the WTC 2007. The CzTA candidature was successful and even the Congress itself was very successful. Ing. Romancov managed its preparation in the position of the chairman of the Steering Committee.

Ing. Georgii Romancov, CSc., abandoned us on 13<sup>th</sup> January 2009. The CzTA Commemorative Medal could therefore be awarded to him only in memoriam.

On Friday the 12<sup>th</sup> October 2012 he would have reached his seventieth birthday. This is another reason for remembering him.

**ING. MILOSLAV NOVOTNÝ, CzTA ITA-AITES Secretary**

## **AKTUALITY Z PODZEMNÍCH STAVEB V ČESKÉ A SLOVENSKÉ REPUBLICĚ CURRENT NEWS FROM THE CZECH AND SLOVAK UNDERGROUND CONSTRUCTION**

### **ČESKÁ REPUBLIKA**

#### **SOUBOR STAVEB MO V ÚSEKU MYSLBEKOVA – PELC-TYROLKA**

#### **TUNEL ŠPEJCHAR – PELC-TYROLKA (KRÁLOVSKÁ OBORA)**

V obou dvoupruhových tunelech JTT i STT probíhají montáže obkladů. V technologických propojkách i obou tunelech zbývá dokončit montáž drobných ocelových konstrukcí, nátěry pochozích ploch, protipožární ucpávky a finální nátěry svislých šachet. Podařilo se také pomoci dokončení a uzavření injektážního systému vyrovnat hladinu spodní vody na původní předrealizační hodnotu. V listopadu by měla být potom zahájena instalace portálů dopravního značení v obou tunelových troukách.

#### **TUNEL MYSLBEKOVA – PRAŠNÝ MOST (BRUSNICE)**

Dokončovací práce na tunelu MYPRA se blíží ke konci. V JTT byly osazeny šterbinové žlaby a obrubníky včetně zabetonování chrániček kabelovodů, v STT jsou potom tyto práce již dokončeny. Také byly dokončeny betonáže chodníků v STT i JTT. V STT byla zahájena montáž obkladů, dokončeny záklopy a nátěry vzduchotechnických kanálů. V JTT jsou dokončeny i nátěry horní klenby. Byly dokončeny zednické práce v propojkách TP 1.3.a a TP 1.3.b včetně dokončení betonáže čelních stěn. Zbývá dokončit instalaci informačního systému na portálech dopravního značení v STT i JTT.

#### **PRODLOUŽENÍ TRASY METRA V.A**

Poslední období bylo na projektu metra V.A ve znamení ražeb jednokolejných tunelů na závěrečném úseku ražeb na

### **THE CZECH REPUBLIC**

#### **CITY RING ROAD STRUCTURES: MYSLBEKOVA – PELC-TYROLKA**

#### **ŠPEJCHAR – PELC-TYROLKA TUNNEL (KRÁLOVSKÁ OBORA PARK)**

Wall cladding is being installed in both double-lane tunnel tubes, the STT and NTT. The work in service cross passages remaining to be completed comprises the installation of minor steel structures, paint coating of walkways, fire sealing and final coating of vertical shafts. In addition, the water table level was successfully returned to the original pre-construction level by completing and closing the grouting system. November should see the installation of portals for traffic signs commence in both tunnel tubes.

#### **MYSLBEKOVA – PRAŠNÝ MOST (BRUSNICE) TUNNEL**

The finishing work on the MYPRA tunnel is drawing to a close. Slotted drains were being installed and kerbs were being placed including embedding cable ducts in concrete in the STT, whilst this work had been finished in the NTT. The casting of walkways was also finished both in the NTT and STT. In the NTT, the installation of wall cladding started and the placement of covers of ventilation ducts and paint coating of the ducts was finished. In the STT, even the coating of the upper vault was finished. Brickwork, including the casting of concrete intersections with the tunnel tubes, was completed in cross passages TP 1.3.a and TP 1.3.b. The installation of the information system on traffic signalling portals remains to be finished in the NTT as well as STT.

#### **METRO LINE A EXTENSION NO. 5**

As far as the Metro VA extension project is concerned, the past period of time was into token of the excavation of single-track



Z výstavby stanice Motol na trase V.A  
From the construction of the Motol station on V.A line

oddíle SO-02 (úsek mezi Červeným Vrchem a stanicí Dejvická). Tento nejdelší a technicky nejkomplikovanější úsek z pohledu zastižené geologie, nízkého nadloží a umístění obou jednokolejných tunelů pod dopravně velmi zatíženou ulicí Evropská je dlouhý 1750 m.

S ohledem na předchozí událost, kdy došlo k propadu vozovky při ražbě LTT, bylo rozhodnuto o pokračování ražby na zbývajícím úseku ražeb za pomoci strojů EPB v režimu s plnou podporou čelby tzv. uzavřeným modelem. Vyhodnocování zastižené geologie, výsledků geofyziky a nivelačních profilů nad tunely potvrzují, že toto rozhodnutí bylo správné.

Štít Adéla zahájil ražbu PTT tohoto úseku 26. 7. 2012 s asi měsíčním odstupem za štítem Tonda. V době psaní tohoto příspěvku se odstup Adély snížil na pouhý týden. Oba stroje pak bude čekat společná prorážka ve stanici Dejvická na konci listopadu 2012. Tím dojde k faktickému propojení nově budovaného úseku metra V.A s nynější trasou A, a tím i ke kompletnímu dokončení všech ražeb traťových tunelů nové trasy.

Kromě ražeb v opravdu komplikovaném geologickém prostředí pod ul. Evropská byl na tomto úseku k vidění ještě průjezd obou strojů otevřeným prostorem budoucího vzduchotechnického objektu na E1. Tato událost, kdy můžete pozorovat stroje EPB při práci „in natura“, tedy na vlastní oči, není totiž vůbec obvyklá.

Pro průjezd štítů bylo mimo jiné nutné vybourat primární ostění s ocelovou výztuží v průjezdném profilu štítu. Tento požadavek si vyžádal realizaci masivních podpěrných konstrukcí, aby byla po vybourání primárního ostění zajištěna stabilita díla. Tyto práce byly ukončeny 14. 9. 2012.

Vedle strojních ražeb traťových tunelů v současné době probíhá i ražba propojek na stavebním oddíle 06. Z celkového počtu pěti propojek jsou čtyři kompletně vyraženy a na poslední propojce razičské práce finišují. Ražby budou na tomto úseku dokončeny do konce listopadu. V souběhu byly také zahájeny práce na hydroizolaci a definitivním ostění všech již vyražených propojek.

V jediné stavební propojce na stavebním oddíle 08 se pracuje již na definitivním ostění. Propojka je kompletně zaizolována fóliovou hydroizolací, je provedeno definitivní ostění dna a připravuje se betonáž horní klenby.

Práce na projektu výstavby prodloužení trasy metra A probíhají podle harmonogramu. Všechny ražené stanice již zahájily nebo zahájí práce na definitivních obezdívkách, povrchová stanice Motol úspěšně vystupuje na povrch se

running tunnels in the final excavation section of the construction lot SO-02 (between Červený Vrch and Dejvická station). This section, which is the longest and technically most complicated from the aspect of the geology encountered, shallow overburden and the location of both single-track tunnels under very busy Evropská Street, is 1750 m long.

Taking into consideration the recent event during which the roadway sank down above the LTT excavation, the decision was made that the excavation of the remaining tunnel section be carried out using EPB machines in the closed mode, with the face fully supported. The assessments of the geology encountered, geophysical measurement results and levelling profiles above the tunnels have confirmed that this decision was correct.

Adéla shield started to excavate the RTT in this section on 26th July 2012, with an approximately one-month lag time after Tonda shield. At the time of writing this paper, the lag was reduced to a mere week. The two machines will break through into Dejvická station simultaneously at the end of November 2012. As a result, the metro section VA being newly built will as a matter of fact be connected the existing Line A, thus the drives of all running tunnels on the new line will be completed.

Apart from the driving through the really complicated geological environment under Evropská Street, it was possible in this section to watch the passage of both EPB machines through the open space of the future ventilation structure on the E1 construction site. This event, during which you can watch the machines at work in natura with your own eyes, is not at all commonplace.

Among other operations, it was necessary during the passage of the shields to demolish the existing primary lining with steel reinforcement extending into the clearance profile of the shield. This requirement claimed the installation of a massive support structure intended to ensure the stability of the working after the primary lining was broken out. These operations were finished on 1st September 2012.

Apart from the mechanical driving of running tunnels, cross passages are currently being excavated in the construction lot 06. The excavation of four of the total number of five cross passages has been completed and the excavation work on the last cross passage is in the final stage of work. The tunnelling operations will be ended in this section by the end of November. The work on the waterproofing system and the final lining in all of the completely excavated cross passages started at the same time.

The work on the final lining has already proceeded in the only construction cross passage in construction lot 08. The installation of the waterproofing membrane has been completed, the final lining of the bottom has been finished and the casting of the concrete upper vault is under preparation.

The work on the Metro Line A extension project proceeds in compliance with the programme. All of the mined stations have the work on final linings commenced or before commencement, whilst the Motol at-grade station has been successfully emerging from the ground with its definite structures. We will therefore be next time able to provide information how, after the completion of the underground excavation, the entire project will head toward the commissioning planned for the autumn of 2014.

As to Veleslavín station, the spray-on waterproofing of the side-wall station tunnels was completely finished, the final lining of the left-hand side-wall station tunnel profile was finished and it is being completed in the right-hand tunnel. At present, the excavation of the central profile has started, to be finished at the end of January 2013. The waterproofing and final lining will be installed subsequently. In this way the station will assume the resultant triple-span geometry.



svými definitivními konstrukcemi, takže příště se již budeme moci informovat o tom, jak po ukončených ražbách celý projekt směřuje k uvedení do provozu na podzim roku 2014.

Ve stanici Veleslavín byly kompletně dokončeny stříkané izolace bočních staničních profilů, provedeno definitivní ostění levého a nyní je dokončován definitivní ostění pravého profilu. V současné době jsou zahájeny ražby středního profilu, které budou ukončeny v závěru ledna 2013, následně budou provedeny jeho izolace a definitivní obehřívky a bude tak vytvořen výsledný trojloďný tvar stanice.

## DÁLNIČE D8 – 0805 LOVOSICE – ŘEHLOVICE

Dne 5. května 2012 nabylo právní moci dlouho očekávané stavební povolení pro zbývající objekty části A a F stavby dálnice D8 – 0805 Lovosice – Řehlovice, mezi něž patří i objekt SO F 602 tunel Radejčín. Tím ovšem obstrukce dostavby dálnice D8 – 0805 ze strany občanských sdružení neskončily. V červenci 2012 vydal správce stavby pokyn k přerušení prací na základě rozsudku Krajského soudu, čímž v květnu nabyté stavební povolení pozbylo právní moci. Zhotovitel mohl provádět pouze nezbytné stavební úpravy pro zajištění bezpečnosti a stability rozestavěných konstrukcí. Práce byly opětovně zahájeny 30. 8. 2012, kdy Krajský úřad Ústeckého kraje vydal nové rozhodnutí o odvolání proti rozhodnutí Městského úřadu Lovosice ve věci stavebního povolení. Tímto rozhodnutím Krajského úřadu bylo podané odvolání zamítnuto a rozhodnutí Městského úřadu Lovosice potvrzeno.

V tunelu Prackovice (SO E 601) jsou momentálně dokončeny podkladní spádové betony, základy pod obrubník, kabelovody a mezerovité betony v rámci výstavby objektu SO E 601.10 – konstrukce vnitřního vybavení (SO E 601.10). Je proveden objekt SO E 601.12 – rekultivace a terénní úpravy a dokončuje se stavební objekt SO E 601.16 – požární nádrž a vodovod.

V tunelu Radejčín je kompletně dokončeno sekundární ostění včetně izolace v ražených částech tunelu (SO F 602.07), betonáže bloků spodních a horních kleneb obou tunelových trub v hloubené části u Pražského portálu (SO F 602.03) a v hloubené části u Ústeckého portálu (SO F 602.04). Dále pak probíhá výstavba provoznětechnického objektu – kabelový kanál (SO F 602.05) a zásypy hloubených konstrukcí (SO F 602.11). Byly také zahájeny práce na objektu SO F 602.10 – konstrukce vnitřního vybavení.

## PPO (PROTIPOVODŇOVÁ OPATŘENÍ) JABLONEC NAD NISOU

V současné době naplno probíhají ražby na obou hlavních ražených objektech. Na prvním z nich – přívodní štole – Metrostavu zbývá do konce listopadu dorazit 90 m. Na druhém objektu – nové odpadní štole – je potom vyraženo 630 m, což je více než polovina trasy. Kromě toho se také otevírá další pracoviště s vloženou těžní šachtou s cílem urychlit dokončení ražeb. Na ostatních stavebních objektech (rozdělovací objekty, vtokový objekt, přeložky IS) probíhají stavební práce podle HMG s max. snahou dokončit je před blížící se zimou.

## KRÁLOVOPOLSKÉ TUNELY V BRNĚ

K 31. 8. 2012 byly Královopolské tunely v Brně uvedeny do plného provozu. Stavbu realizovalo sdružení firem OHL ŽS, a. s., Subterra, a. s., a Metrostav, a. s. Dvě tunelové trouby, z nichž jednu stavebně realizovala Subterra, a. s., a druhou OHL ŽS, a. s., významně přispějí k plynulosti automobilové dopravy v Brně.

## D8 MOTORWAY – CONSTRUCTION LOT 805: LOVOSICE–ŘEHLOVICE

The long-awaited building permit for remaining parts A and F of the construction lot 0805 of the D8 motorway between Lovosice and Řehlovice became legally valid on the 5th May 2012. Structure SO F 602, the Radejčín tunnel, belongs among the structures. Unfortunately, the obstructions to the completion of D8 – 0805 motorway carried out by civic associations have not ended by this act. In July 2012, the construction administrator issued an instruction to suspend the works on the basis of a decree issued by the Regional Court. The building permit which became valid in May therefore became invalid. The construction contractor was permitted to carry out only the construction work necessary for securing safety and stability of the still incomplete structures. The work was resumed on 30th August 2012, when the Regional Authority of the Ústí nad Labem Region issued a new order regarding the appeal against the order of the Municipal Authority Lovosice in the case of the building permit. The submitted appeal was rejected by this order of the Regional Authority and the order of the Municipal Authority Lovosice was approved.

At present, the work completed in the Prackovice tunnel (construction lot SO E 601) comprises cambered blinding concrete layers, foundations under kerbs, cableways and porous concrete required within the framework of the structure SO E 601.10 Internal Equipment Structures. The structure SO E 601.12 Reclamation and Terrain Finishes has been finished and the structure SO E 601.16 Fire Protection Reservoir and Water Main is under completion.

In the Radejčín tunnel, the completed works comprise the secondary lining including the waterproofing in the mined parts of the tunnel (structure SO F 602.07), the casting of the blocks of the invert and upper vaults in both tunnel tubes in the cut-and-cover section at the Prague portal (SO F 602.03) and in the cut-and-cover section at the Ústí nad Labem portal (SO F 602.04). In addition, the construction of the operating and technical structure of the cable duct (SO F 602.05) and back-filling of the cut-and-cover structures are underway. The work on the structure SO F 602.10 – Internal Equipment Structures has started.

## FLOOD PREVENTION MEASURES FOR JABLONEC NAD NISOU

The excavation is at the moment in full swing on both main mined structures. On the first of them, the Intake Tunnel, the excavation of 90 m remains for Metrostav to finish till the end of November. On the other structure, the New Outlet Tunnel, a 630 m long section of the excavation, exceeding a half of the route, has been completed. In addition, a new working place has been opened, containing a hoisting shaft, which was added with the objective to accelerate the completion of the tunnel excavation. The work on the other structures (the water distribution structures, the intake structure and relocations of utility networks) has proceeded in compliance with the works programme, with the maximum endeavour to finish it before the coming winter.

## KRÁLOVO POLE TUNNELS IN BRNO

As of 31<sup>st</sup> August 2012, the Královo Pole tunnels were fully opened to traffic. The construction was carried out by a consortium consisting of OHL ŽS a. s., Subterra a. s. and Metrostav a. s. The two tunnel tubes, one of them constructed by Subterra a. s. and the other by OHL ŽS a. s., will significantly contribute to the fluency of vehicular traffic in Brno.

## JABLONKOV NO.2 RAILWAY TUNNEL

September 2012 saw the complete end of all mining work on the tunnel being reconstructed. It meant successful completion

## ŽELEZNIČNÍ TUNEL JABLUNKOV Č. 2

V září byly kompletně ukončeny všechny razičské práce na rekonstruovaném tunelu. Byl tím také úspěšně dokončen proces procházení havarovaného úseku tunelu. Tyto práce prováděla Subterra, a. s., prostřednictvím divize 1. Nyní bylo staveniště předáno firmě Firesta, která bude provádět betonáž definitivní obezdívky.

## PLZEŇ – ÚSLAVSKÝ SBĚRAČ

Na stavbě Úslavského sběrače v Plzni již byly dokončeny práce v profilu DN 800 mm, kde byl nasazen stroj Iseki Unclemole TCC 980 s modifikovanou hlavou. V daném profilu bylo dohromady provedeno 450 m. Od srpna byl nasazen zakoupený stroj Iseki Unclemole TCC 1280 opět s flexibilní modifikací řezné hlavy. V době uzávěrky čísla dokončil stroj úspěšně čtyři další úseky o celkové délce 500 m. Celkově se tak stavba nachází zhruba ve své polovině.

*ING. BORIS ŠEBESTA, sebesta@metrostav.cz,  
METROSTAV, a. s.,*

*ING. KAREL FRANČZYK, Ph.D., kfranczyk@subterra.cz,  
SUBTERRA, a. s.*

## SLOVENSKÁ REPUBLIKA

### TUNEL ŠIBENIK

Ešte v roce 2011 Národná diaľničná spoločnosť vyhlásila niekoľko súťaží na projekt a výstavbu úsekov diaľnice D1, ktorých súčasťou by mali byť aj tunely. Prvým a zároveň jediným s ukončeným obstarávaním je úsek D1 Jánovce – Jablonov, (II. úsek) s dĺžkou 9,5 km s tunelom Šibenik dĺžky 0,6 km. V máji 2012 bola uzatvorená zmluva so združením EUROVIA SK, a. s., EUROVIA CS, a. s., STAVBY MOSTOV SLOVAKIA, a. s. Ukončenie stavby a uvedenie diaľničného úseku do prevádzky je plánované na rok 2015. Nakoľko ide o stavbu podľa podmienok žltej knihy FIDIC, súčasťou výkonov zhotoviteľa je aj zabezpečenie projektovej dokumentácie.

Tunel Šibenik bude mať dve rúry s jednosmernou premávkou, šírka vozovky je 8,0 m. Tunel bude razený v paleogénnych ílovcoch a pieskovcoch. V súčasnosti prebieha projektová príprava, pričom by sa v zimných mesiacoch mali začať práce na portáloch tunela. Začiatok razenia tunela je možné očakávať v prvej polovici roku 2013.

*ING. MILOSLAV FRANKOVSKÝ,  
frankovsky@terraprojekt.sk,  
TERRAPROJEKT, a.s., Bratislava*

of the process of passing through the collapsed section of the tunnel. This work was carried out by Subterra a. s., which employed its Division 1 for this purpose. Today the construction site has been handed over to Firesta company, which will cast the concrete lining.

## PLZEŇ – ÚSLAVA RIVER INTERCEPTOR SEWER

The work on the DN 800 mm profile using an Iseki Unclemole TCC 980 machine with a modified cutterhead was finished on the Úslava River Interceptor Sewer construction site in Plzeň. About 450 m of this profile tunnel excavation were completed. The newly purchased Iseki Unclemole TCC 1280 machine, again with a flexibly modifiable cutterhead, has been operated since August. As of this journal issue copy deadline, the machine has successfully finished other four sections at the aggregate length of 500 m. On the whole, the construction is found roughly in its middle.

*ING. BORIS ŠEBESTA, sebesta@metrostav.cz,  
METROSTAV, a. s.,*

*ING. KAREL FRANČZYK, Ph.D., kfranczyk@subterra.cz,  
SUBTERRA, a. s.*

## THE SLOVAK REPUBLIC

### ŠIBENIK TUNNEL

It was still in 2011 that the National Motorway Society issued several tender notices for the design and construction of sections of the D1 motorway, parts of which were to be tunnels. The first and only tender with the concluded procurement is for the D1 section Jánovce – Jablonov, the 9.5 km long section (section II) containing the 0.6 km long Šibenik tunnel. May 2012 saw the contract with a consortium consisting of EUROVIA SK, a. s., EUROVIA CS, a. s., and STAVBY MOSTOV SLOVAKIA, a. s. concluded. The works completion and commissioning of the section is planned for 2015. Because this construction is managed in compliance with requirements of the FIDIC Yellow Book, the providing of the design documents is also the part of the contractor's obligations.

The Šibenik tunnel will have two tubes carrying unidirectional traffic; the roadway will be 8.0 m wide. The tunnel will be driven through Palaeogene mudstone and sandstone. At present, the project is in the design stage. The work on the tunnel portals should start in the winter months. The tunnelling operations can be expected to be commenced in the first half of 2013.

*ING. MILOSLAV FRANKOVSKÝ,  
frankovsky@terraprojekt.sk,  
TERRAPROJEKT, a.s., Bratislava*

## ZPRAVODAJSTVÍ ČESKÉ TUNELÁŘSKÉ ASOCIACE ITA-AITES CZECH TUNNELLING ASSOCIATION ITA-AITES REPORTS

[www.ita-aites.cz](http://www.ita-aites.cz)

## PŘÍPRAVA 12. MEZINÁRODNÍ KONFERENCE PODZEMNÍ STAVBY PRAHA 2013 22.–24. DUBNA 2013, PRAHA, ČESKÁ REPUBLIKA

## PREPARATION OF 12<sup>TH</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE UNDERGROUND CONSTRUCTION PRAGUE 2013 22<sup>ND</sup> – 24<sup>TH</sup> APRIL 2013, PRAGUE, THE CZECH REPUBLIC

V minulém čísle časopisu Tunel byla uveřejněna informace o tématech a přednášejících Keynote Lectures a vyzvaných přednášek v jednotlivých sekcích.

The previous TUNEL journal issue contained the information about the topics and lecturers of Keynote Lectures and invited lectures in individual sections.



Příprava konference samozřejmě dále pokračuje. Česká tunelářská asociace ITA-AITES (pořadatel konference) i přípravný výbor s potěšením konstatují, že k 1. listopadu 2012 bylo přihlášeno **175 abstraktů příspěvků**. To, že z tohoto počtu přišlo 59 abstraktů ze zemí mimo Českou i Slovenskou republiku, významně podtrhuje mezinárodní zaměření konference.

Příspěvky zpracované podle pokynů pro autory měly být dodány do 1. prosince 2012, nicméně pořadatelé konference jsou připraveni přijmout příspěvky zaslané i začátkem roku 2013. Výběr příspěvků k ústní prezentaci bude proveden k **15. lednu 2013**, o čemž budou následně autoři informováni.

Nadále trvá pro podnikatelské organizace možnost stát se partnerem konference.

Všechny potřebné informace lze nalézt na [www.ita-aites.cz](http://www.ita-aites.cz). Přes tyto webové stránky probíhá také veškerá komunikace s organizátory konference, zaslání příspěvků i registrace účastníků. **Zvýhodněný účastnický poplatek** (early bird) využije ten, kdo se zaregistruje do 15. ledna 2013.

Na shledanou v Praze v dubnu 2013!!!

*ING. MILOSLAV NOVOTNÝ, sekretář CzTA ITA-AITES, [ita-aites@metrostav.cz](mailto:ita-aites@metrostav.cz)*

Of course, the preparation of the Conference further continues. The ITA-AITES Czech Tunnelling Association (the Conference organiser) and the Steering Committee are delighted to announce that, as of the 1<sup>st</sup> November 2012, **175 abstracts of papers** have been registered. The fact that 59 of them arrived from other countries than the Czech and Slovak Republics significantly emphasises the international focus of the Conference.

Papers processed in compliance with the requirements of the Instructions for Authors were to be submitted not later than 1<sup>st</sup> December 2012. However, the Conference organisers are prepared even to accept papers sent until the beginning of 2013. The selection of papers for oral presentation will be carried out from those received not later than **15<sup>th</sup> January 2013**. Authors will be informed about it subsequently.

The opportunity for entrepreneurial organisations to become conference partners continues to exist.

All information necessary is available on [www.ita-aites.cz](http://www.ita-aites.cz). All communication with the Conference organisers, submitting of papers and registration of attendees is to be made through these web pages. **The early bird fee** will apply to the attendees who will register themselves till 15<sup>th</sup> January 2013.

We are looking forward to seeing you in Prague in April 2013!!!

*ING. MILOSLAV NOVOTNÝ, CzTA ITA-AITES Secretary, [ita-aites@metrostav.cz](mailto:ita-aites@metrostav.cz)*

## ODBORNÝ ZÁJEZD ČESKÉ TUNELÁŘSKÉ ASOCIACE ITA-AITES DO BRNA A RAKOUSKA VE DNECH 3. AŽ 6. ŘÍJNA 2012

### TECHNICAL TRIP OF THE ITA-AITES CZECH TUNNELLING ASSOCIATION TO BRNO AND AUSTRIA FROM 3<sup>RD</sup> TO 6<sup>TH</sup> OCTOBER 2012

The October 2012 technical trip of the ITA-AITES Czech Tunnelling Association headed to Brno, the Moravian capital, and Austria.

In Brno, the trip attendees visited historic underground spaces, which had recently been made accessible to the public. Mined cellars were built under burgher houses in Brno from the Middle Ages. They spread not only under the ground plans of the houses but also under adjacent public areas. The unique underground ossuary neighbouring with Saint Jakub church was visited at the same time.

Two excursions took place in Austria. The first one was to the virtually completed Wienerwald tunnel, where the excursion attendees walked from the western portal through the northern tube up to the first cross passage and subsequently returned back through the southern tube. The second excursion led to the Koralm rail tunnel construction site.

Původním záměrem pro odborný zájezd v roce 2012 byla návštěva staveb nedaleko za hranicemi. Tomu odpovídal plán podívat se na metro a železnici ve Vídni, případně tunel Turecký Vrch u Nového Mesta nad Váhom. Zjistilo se ale, že na vídeňském metru se toho času žádné tunely nestaví (prodlužování linky metra U1 na jih hustě obydlenou oblastí ve zvodněných sedimentech začne pravděpodobně příští rok). Na rakouské největší stavbě – Hauptbahnhof Wien, která začala v roce 2009, v současnosti žádné geotechnicky zajímavé práce neprobíhají. Je to ovšem úcty-

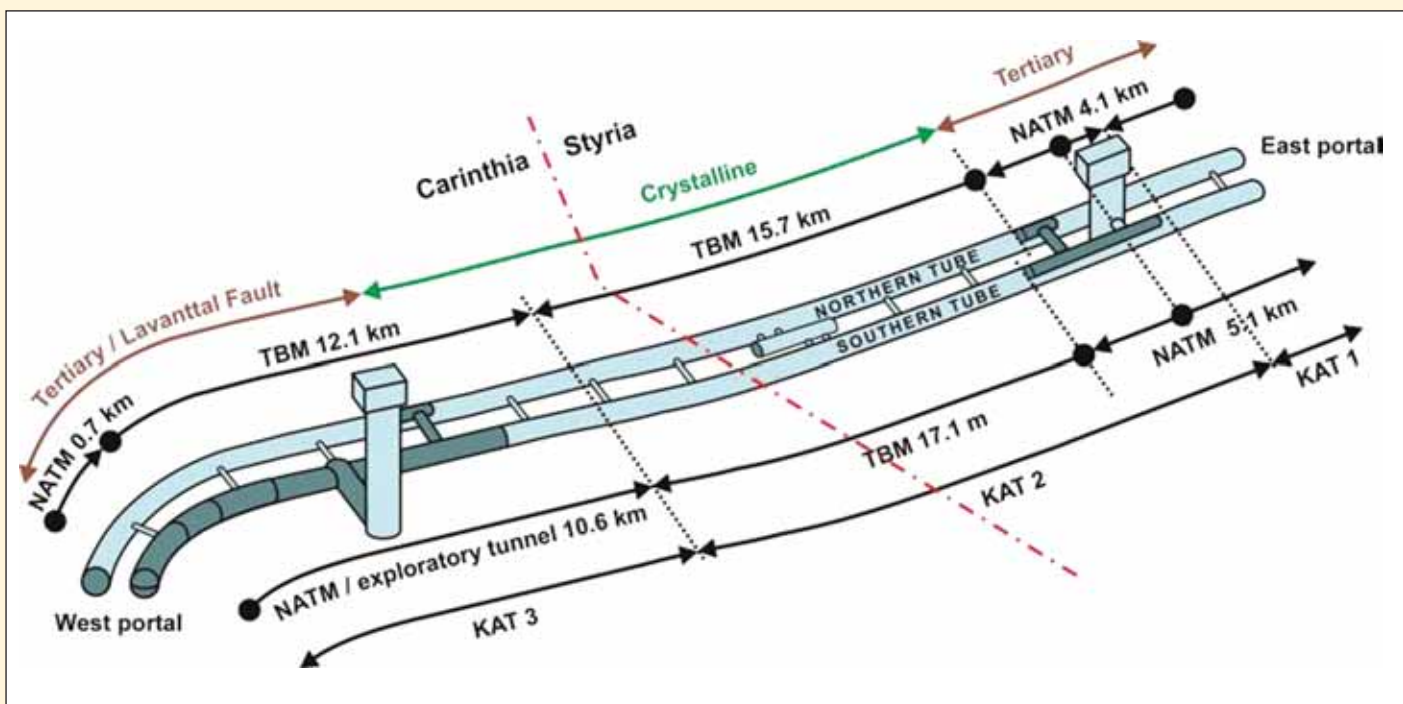
hodná stavba. Nové nádraží propojí transevropské koridory sever-jih a východ-západ. Rozkládá se na území celé městské čtvrti o rozloze 109 ha, přitom je blízko centra Vídně, ke katedrále sv. Štěpána je to jen 2,5 km. Na stavbě bylo vytěženo více než 1 mil. m<sup>3</sup> zeminy a bude zabudováno 285 tis. m<sup>3</sup> betonu. Od návštěvy Vídně bylo tedy upuštěno.

Výsledný program zájezdu:

- Brno, prohlídka nedávno otevřeného historického podzemí,
- návštěva dokončeného tunelu Wienerwald (u západního portálu),
- exkurze na stavbu tunelu Koralm.

**Návštěva Brna** byla zdařilá. Ražené sklepy byly pod měšťanskými domy v Brně budované již od středověku. A nejen pod půdorysy domů, ale i pod přiléhajícím veřejným prostranstvím, což se sice ani tehdy nesmělo, ale toto nařízení překračovali nejen obyčejní měšťané, ale i radní. Takže nebyl nikdo, kdo by na nelegální rozšiřování sklepů poukázal. Například pod Zelným trhem se sklepy postupně propojily v labyrint podzemních chodeb a prostor. Součástí prohlídky byly i prostory, které nejsou součástí oficiálních prohlídek pro turisty. Poutavý výklad podal jeden z duchovních otců zpřístupnění Ing. Svoboda. Další prohlídka jedinečné podzemní kostnice u kostela sv. Jakuba byla pěkným rozloučením s Brnem.

Ve čtvrtek ráno cesta vedla z Mikulova k západnímu portálu železničního **tunelu Wienerwald**.



Obr. 1 Schéma železničního tunelu Koralm  
Fig. 1 Schematic diagram of the Koralm tunnel

Z vídeňského hlavního nádraží povede vysokovýkonná železniční trať (rakouský termín používaný pro vysokorychlostní železnici) na západ přes tunel Wienerwald do St. Pölten a dále. Dlouhý **tunel Wienerwald** je součástí nového úseku modernizované **rakouské západní dráhy** a je nyní ve zkušebním provozu. Vlaky s cestujícími by měly začít jezdit od prosince 2012. Jedná se o dlouhý železniční tunel pro vysoké rychlosti, a bylo tady zajímavé zjistit hlavní technické parametry, prohlédnout si pevnou jízdní dráhu, portály, vybavení, bezpečnostní zařízení atd. Hlavní západní část tunelu Wienerwald délky zhruba 11 km představují dvě paralelní jednokolejné tunelové trouby. Na ně směrem k Vídni navazuje bezpečnostní a ventilační kaverna a šachta, dvoukolejný tunel vyražený NRTM dlouhý 2,5 km a pak hloubený tunel Leinzer délky 10 km.

Stavba začala v roce 2005. Jednokolejné tunelové trouby byly vyraženy mechanizovaně dvěma plnoprofilovými tunelovacími stroji. V rámci ražby bylo zabudováno primární ostění z železobetonových tybinků, prorážka do kaverny byla v roce 2007. V tunelových rourách pak byla na tybinky provedena izolace s bočními drenážemi a definitivní monolitické ostění ukončené v roce 2010. Následně bylo instalováno vybavení – pevná jízdní dráha, trakční vedení, požárněbezpečnostní zařízení včetně tlakově odolných dveří do propojek, větrání propojek, spojovací vedení, železniční signalizační a zabezpečovací zařízení, osvětlení, napájení elektrickou energií a další. Každých 500 m je mezi tunely bezpečnostní propojka a technologické místnosti. Profil tunelu je navržen pro maximální rychlost 250 km/hod s vnitřním průměrem 8,95 m. Nezvykle velký světlý profil tunelu tak umožňuje splnit lékařské kritérium maximálních změn tlaku a tím také tlakový komfort pro cestující uvnitř vlaku při vysoké rychlosti. Rovněž tvar portálu je řešen tak, aby zmírnil tlakové rázy při vjezdu do tunelu.

V pátek 5. 10. 2012 následovala návštěva stavby **Koralmtunnelu** na nově budované „vysokovýkonné“ železniční trati Koralmbahn mezi Grazem a Klagenfurtem na takzvané balticko-adriatické ose. Jeden z největších projektů evropské železniční infrastruktury Koralmtunnel je 32,9 km dlouhý, tvoří ho dvojice jednokolejných tunelů s propojkami, větracími šachtami, nouzovou podzemní stanicí, montážními šachtami a dalšími objekty (obr. 1). První zastávkou bylo staveniště KAT 2 u Leibenfeldu. Na něm se nacházejí 60 m hluboké montážní šachty, jednou z nich se spouští první plnoprofilový tunelovací stroj Wirth průměru 9,93 m. Díky tomu, že na stavbě pracuje firma 3G, následovala prohlídka staveniště KAT 1 u východního portálu. Účastníci zde byli seznámeni s tím, jak byl z této strany realizován hloubený tunel a přilehlý úsek ražený technologií NRTM až k montážním šachtám.

Příjemnou tečkou za pracovními exkurzemi byla při zpáteční cestě do Grazu zastávka v sedle masivu Koralpe, pod kterým budoucí tunel povede. Dlužno poznamenat, že čtvrt hodiny zdaleka neumožnilo vychutnat si nádherný rozhled při krásném slunečném podzimním počasí nebo uskutečnit vycházku do přilehlých kopců. Škoda, byla to daň za to, že se exkurze předcházející den protáhla a obsáhlý program redakční rady časopisu Tunel již vyžadoval dodržení časového plánu.

Co říci závěrem? Program zahrnoval hodně cílů a hodně času se proto strávilo jízdou autobusem. Příště by bylo možná lepší držet se hesla, že méně někdy znamená více. Přesto byl program zajímavý, určitým nenaplněním očekávání bylo, že ani povolených dvacet osob se nakonec nedostalo na staveništi Leibenfeld do ražených tunelů Koralm.

ING. OTAKAR HASÍK, [hasik@metroprojekt.cz](mailto:hasik@metroprojekt.cz),  
METROPROJEKT Praha, a. s.



## FOTOREPORTÁŽ Z ODBORNÉHO ZÁJEZDU ČESKÉ TUNELÁŘSKÉ ASOCIACE ITA-AITES DO BRNA A RAKOUSKA

### PICTURE REPORT FROM THE TECHNICAL TRIP OF THE ITA-AITES CZECH TUNNELLING ASSOCIATION TO BRNO AND AUSTRIA



Obr. 1 Brněnské historické podzemí – kostnice u kostela sv. Jakuba  
Fig. 1 Brno historic underground – the ossuary neighbouring with Saint Jakub church



Obr. 2 Západní portál tunelů Wienerwald  
Fig. 2 Western portal of the Wienerwald tunnel



Obr. 3 Úniková cesta – propojka mezi tunely Wienerwald  
Fig. 3 Escape route – a cross passage between the Wienerwald tunnel tubes



Obr. 4 Zařízení staveniště KAT 2 u Leibenfeldu, v pozadí hala výroby segmentů  
Fig. 4 KAT 2 construction site utility near Leibenfeld with a segment casting yard in the background



Obr. 5 Montážní šachta Leibenfeld – na dně probíhá montáž prvního tunelovacího stroje  
Fig. 5 Leibenfeld assembly shaft with the first full-face tunnelling machine being assembled at the bottom



Obr. 6 Výrobní hala segmentů  
Fig. 6 Segment casting yard