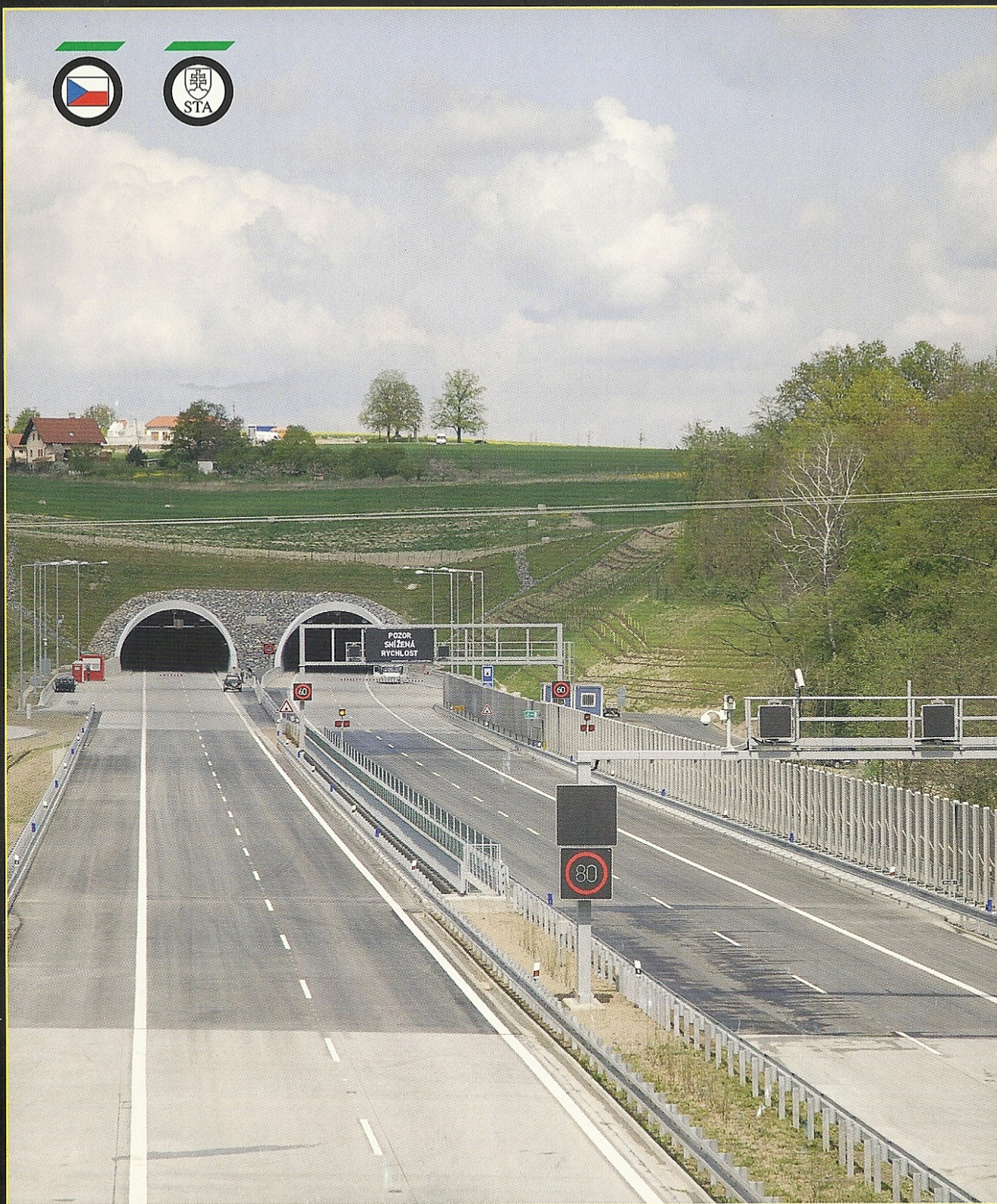
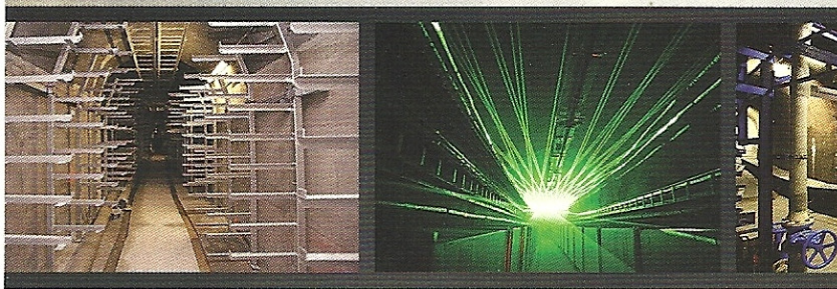


TUNEL

č. 3
2008

ČASOPIS ČESKÉHO TUNELÁŘSKÉHO KOMITÉTU A SLOVENSKEJ TUNELÁRSKEJ ASOCIÁCIE ITA-AITES
MAGAZINE OF THE CZECH TUNNELLING COMMITTEE AND SLOVAK TUNNELLING ASSOCIATION ITA-AITES





Vodičkova Collector Tunnel, Prague

Centrum Collector Tunnel, Ostrava

Centrum



SUBTERRA

Underground Construction (Development, Research, Design, Realization)
Magazine of the Czech Tunnelling Committee
and the Slovak Tunnelling Association ITA-AITES
Established by Ing. Jaroslav Grán in 1992

CONTENS

Editorials:

Ing. Matouš Hilar, Technical Editor and Member of the Editorial Board	1
Ing. Ondřej Fuchs, Vice-Chairman of the Board of Directors and Chief Executive Officer of SUBTERRA a. s.	2
Optimisation of the Railway Line between the SR Border – Mosty u Jablunkova – Bystrice nad Olší; Reconstruction of the Jablunkov No. 2 Rail Tunnel / Ing. E. Macháček, SUBTERRA a. s.,	3
Ing. P. Durkač, Ing. P. Vidur, ZEPRA	3
Initial Experience of Larger-Diameter Microtunnelling in Karviná	9
Ing. Karel Franczyk, SUBTERRA a. s.	9
Pankrác Cable Tunnel, Prague 4 Final Structures Design	13
Ing. P. Fatka, Ing. M. Sedláček, KO-KA, s. r. o., Ing. J. Šíma, SUBTERRA a. s., I. Kovačík, NEKAP, s. r. o.	13
Klimkovice Tunnel Inauguration / Ing. J. Pechman, Amberg Engineering, a. s., Brno, Ing. J. Stach, Geotest, a. s., Brno, Ing. O. Hort, SG-Geotechnika, a. s., Ing. D. Pohlodek, Metrostav a. s., Prof. Ing. J. Aldorf, DrSc., VŠB-TU Ostrava	18
Klimkovice Tunnel Equipment / V. Střežek, M. Robek, dipl.tech., METROSTAV a. s., Ing. P. Šmída, ELTODO EG, a. s.	26
Wenceslas Square Utility Tunnel – an Approach to Dealing with Regeneration of Public Utilities in the Centre of Prague / Fr. Dvořák, J. Sochůrek, L. Zapletal, INGUTIS, spol. s r. o.	34
D3 Motorway Section Svrčinovec – Skalítě: Svrčinovec Tunnel	39
Ing. P. Makásek, PRAGOPROJEKT, a. s.	39
King's Cross London Underground Station Redevelopment	45
Dr. Benoît D. Jones, M.Eng., Eng.D., Morgan Est, UK	45
The Use of Chemical Grouting during the Dobrovského Tunnel Excavation / Ing. J. Matějček, AMBERG ENGINEERING, a. s., Brno, Ing. Z. Cigler, MINOVA BOHEMIA, s. r. o.	55
Problems of Chemical Grouting Used for the Sealing off Water in the Rock Mass during the Ólafsjördur and Siglufjördur Tunnel Excavation in Iceland / Ing. D. Cyroň, METROSTAV a. s., Ing. P. Kučera, MINOVA BOHEMIA, s. r. o.	60
Excavation Control and Monitoring over Tunnels in Construction Lot 513 of the Prague City Ring Road / Ing. Petr Svoboda, D2 CONSULT PRAGUE, s. r. o., Ing. Igor Zemánek, MOTT MCDONALD, s. r. o.	64
Picture Report on the Inauguration of the Klimkovice Tunnel on the D47 Motorway near Ostrava	75
Picture Report on the Inauguration of the IVC2 Line of Prague Metro	74
News from Tunnelling Conferences	75
The World of Underground Constructions	76
Current News from the Czech and Slovak Underground Construction	81
Czech Tunnelling Committee ITA-ITES Reports	84

EDITORIAL BOARD

Chairman: Ing. Petr Vozarik – METROSTAV, a. s.
Prof. Ing. Josef Aldorf – VYSOKÁ ŠKOLA BÁNSKÁ TU Ostrava
Prof. Ing. Jiří Barták, DrSc. – ČVUT Praha
Ing. Matouš Hilar, MSc., Ph.D., CEng., MICE, D2 CONSULT PRAGUE s. r. o.
Ing. Josef Kutil – INŽENÝRING DOPRAVNÍCH STAVEB, a. s.
Ing. Libor Mařík – IKP CONSULTING ENGINEERS, s. r. o.
Ing. Soňa Pokorná, SUBTERRA a. s.
Prof. Ing. Pavel Přibyl – ELTODO EG, a. s.
Ing. Georgij Romancov, CSc. – METROPROJEKT Praha, a. s.
Doc. Ing. Alexandr Rozsypal, CSc. – SG-GEOTECHNIKA, a. s.
Ing. Stanislav Sikora – VOKD, a. s.
Ing. Boris Šebesta – METROSTAV a. s.
Doc. Ing. Richard Šňupárek, CSc. – Ústav geoniky AVČR
Ing. Pavel Šourek – SATRA, s. r. o.
Ing. Václav Torner – AQUATIS, a. s.
ČTuK ITA-AITES: Ing. Miloslav Novotný
STA ITA-AITES: Ing. Miloslav Frankovský – TERRAPROJEKT, a. s.
Ing. Viktória Chomová – DOPRAVOPROJEKT a. s.
Ing. Ondřej Vida – SKANSKA BS, a. s.

PUBLISHED FOR SERVICE USE

by the Czech Tunnelling Committee and the Slovak Tunnelling Association
ITA-AITES

DISTRIBUTION

ITA-AITES Member Nations
ITA-AITES EC members
CTuK and STA corporate and individual members
more than 40 external subscribers
obligatory issues for 35 libraries and other subjects

OFFICE

Dělnická 12, 170 00 Praha 7

tel./fax: +420 266 793 479

e-mail: ita-aites@metrostav.cz

web: http://www.ita-aites.cz

Editor-in-chief: Ing. Miloslav Novotný

Technical editors: Ing. Matouš Hilar, Ing. Pavel Šourek

Ing. Jozef Frankovský

Graphic designs: INNA REKLAMA, s. r. o., Plzeňská 113, Praha 5, http://www.inna-reklama.cz

Printed: H.R.G. spol. s r. o., Litomyšl

Cover photo: The Klimkovice tunnel portal

Nedržíme se při zemi
The more we dig down,
the more the future looks up

EDITORIAL

Vážení příznivci podzemních staveb, nejprve bych vás rád informoval o velmi potěšující skutečnosti: **Časopis Tunel byl zařazen mezi recenzovaná neimpaktovaná periodika vydávaná v České republice.** O co se jedná?

Rada pro výzkum a vývoj (odborný a poradní orgán vlády České republiky) v souladu se snahou o zavedení objektivního a kvalifikovaného hodnocení výsledků výzkumu a vývoje se rozhodla vytvořit seznam recenzovaných periodik vydávaných v České republice, kterým není přidělen indikátor databáze WoS společnosti Thomson Scientific Impact Factor. V seznamu recenzovaných jsou časopisy zahrnující všechny vědní obory, seznam schválený 20. června 2008 je dostupný na webové stránce: www.vyzkum.cz (sekce Hodnocení VaV). V oboru stavebnictví byly do seznamu mimo Tunel zařazeny například časopisy Stavební obzor, Stavebnictví či Silnice Železnice.

Zařazení jednotlivých periodik na seznam bylo podmíněno splněním kritérií, která zahrnují požadavky na vydávání původních vědeckých a odborných prací a podmínku recenzování jednotlivých prací nezávislými oponenty. Zohledňováno bylo dále zařazení periodika v mezinárodních indexech, forma vydávání periodika, jazyk publikovaných prací a historie periodika.

Umístění časopisu Tunel na seznam recenzovaných periodik je přínosem jak pro čtenáře, tak pro autory. Seznam bude Radou pro výzkum a vývoj využíván při hodnocení výsledků výzkumu a vývoje s podporou z veřejných prostředků, které jsou vykazovány jako články v odborném periodiku. Zařazení Tunelu do seznamu znamená přirozeně také výzvu pro udržení a další zvyšování kvality časopisu i do budoucna.

Toto číslo Tunelu je věnováno firmě Subterra a. s., jejíž autoři v úvodních příspěvcích představují některé stavby, na nichž se tato firma podílí v roli zhotovitele. Ke stavbám s podílem firmy Subterra a. s. patří i prezentované tunely Klímkovice a stavba 513 na silničním okruhu kolem Prahy (SOKP). Tunelu Klímkovice na dálnici D47 mezi Ostravou a Bílovcem, který se po otevření dne 6. května 2008 stal druhým nejdelším provozovaným dálničním tunelem v České republice, jsou věnovány dva články. V článku o SOKP 513 jsou popsány pozitivní zkušenosti s operativním způsobem řízení stavby, který byl umožněn zadávacími podmínkami dané stavby. Dalším tématem probraným v tomto čísle jsou chemické injektáže, jejichž vhodná aplikace může výrazně redukovat přítoky vody do tunelu. Zkušenosti s aplikací těchto injektáží v Brně a v extrémních podmínkách na Islandu jsou poměrně podrobně popsány. Injektáže (především tryskové) jsou také velmi často využívány pro ražbu kolektorů v nesoudržných zeminách a uvedený kolektor na Václavském náměstí nebyl v tomto ohledu výjimkou. Z připravovaných staveb je v tomto čísle prezentován statický výpočet slovenského dálničního tunelu Svrčinovec.

Kromě článků od českých autorů naleznete i jeden článek zahraniční. Jedná se o popis komplikovaných ražeb stanice londýnského metra King's Cross, kde probíhaly ražby v tuhých jílech v prostředí městské zástavby pomocí stříkaného betonu, litinového ostění i klasické dřevěvy. Kromě popisu stavby, postupu výstavby a využitých technologií jsou v článku uvedeny i některé použité inovativní postupy.

Obecně má redakční rada zájem na zvyšování množství kvalitních zahraničních příspěvků, tudíž všichni autoři z řad zahraničních odborníků jsou v tomto ohledu vítáni.

Přeji vám příjemné a poučné čtení.

ING. MATOUŠ HILAR, MSc., Ph.D., CEng., MICE
Odborný redaktor a člen redakční rady časopisu Tunel

EDITORIAL

Dear supporters of underground construction,

First of all, I would like to inform you about an exhilarating fact: **Tunnel magazine was incorporated into the List of non-impacted, reviewed journals released in the Czech Republic.** What is the point?

The Research and Development Council (an advisory body to the Government of the Czech Republic), in an effort to develop a system for objective and qualified assessment of the results of research and development projects, decided to create a list of the reviewed journals which are published in the Czech Republic and for which the Thomson Scientific Impact Factor, which is an indicator contained in the WoS database being maintained by Thomson company, has not been determined. The List contains reviewed journals covering all branches of science. The List which was approved on 20th June 2008 is available on the web page: www.vyzkum.cz (section Hodnocení VaV – not contained in the English version). Regarding the construction industry, the List contains, for example, Stavební obzor, Stavebnictví or Silnice Železnice journals.

The condition for the incorporation of individual journals into the list was the satisfying of criteria covering the requirements for the publication of original scientific and technical papers and the necessity for individual papers to be reviewed by independent opponents. In addition, the listing of the particular periodical in international indexes, the form of the publication of the journal, the language in which the papers are published and the history of the journal are taken into consideration.

The inclusion of Tunnel magazine in the List of reviewed journals is beneficial for both the readers and authors. The List will be used by the Research and Development Council for the assessment of the results of research and development projects which are subsidised by means of public money and are referred to as papers in technical journals. Of course, the listing of Tunnel magazine even means a challenge of maintaining and further improving the quality of the magazine in the future.

This Tunnel issue is dedicated to Subterra a.s. The authors, employees of this company, introduce some construction projects where Subterra a.s. participates as a contractor. The Klímkovice tunnels and construction lot 513 of the Prague City Ring Road (PCRR) project, which are presented, belong among the constructions with the participation of Subterra a.s. The Klímkovice tunnel on the D47 motorway between Ostrava and Bílovec, which has become since its opening to traffic on 6th May 2008 the second longest operating motorway tunnel in the Czech Republic, is dealt with in two papers. The paper on construction lot 513 of the PCRR describes the positive experience of the operative way of the construction management which has been possible owing to the project tender conditions. Another topic which is dealt with in this magazine issue is chemical grouting, which can significantly reduce inflows of water into a tunnel if a proper application is chosen. The experience obtained during the application of the grouting in Brno and under extreme conditions in Iceland is described in a relatively detailed manner. Grouting techniques (above all the jet grouting) are very frequently used even during the excavation of utility tunnels through cohesionless soils; in this respect, the Wenceslas Square utility tunnel, which is referred to, is no exception. Of the construction projects being in the planning stages, this magazine issue contains a structural analysis of the Svrčinovec motorway tunnel, Slovakia.

Apart from papers by Czech authors, you can even find one foreign paper. It presents a description of very complicated conditions of the King's Cross station, on the London Underground network, where the excavation passed through stiff clays, within an area of high-density urban development, using sprayed concrete, an SGI lining and classical timbering. In addition to the description of the project, the works procedures and applied techniques, the paper even describes some innovative procedures which were used.

In general, the Editorial Board is interested in the increasing of the number of quality foreign contributions. Therefore, in this respect, all authors from within the ranks of foreign professionals are welcomed.

I wish you to enjoy the informative reading.

ING. MATOUŠ HILAR, MSc., Ph.D., CEng., MICE
Technical Editor and Member of the Editorial Board



PŘESTAVBA STANICE LONDÝNSKÉHO METRA KING'S CROSS KING'S CROSS LONDON UNDERGROUND STATION REDEVELOPMENT

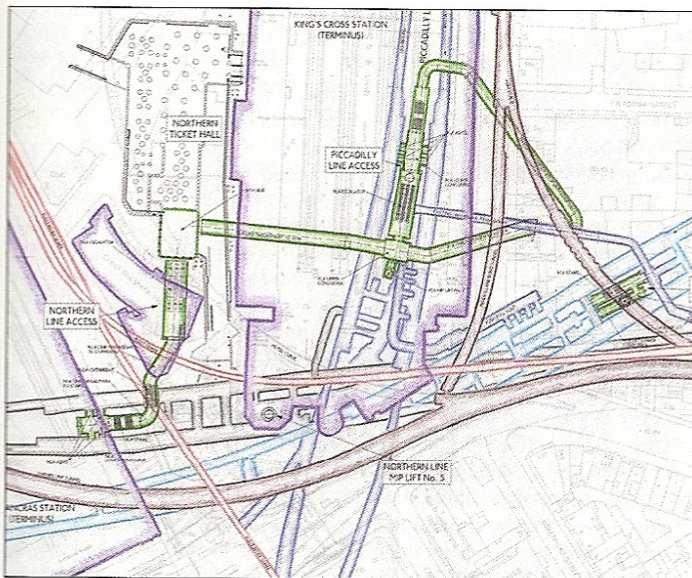
BENOIT JONES

ÚVOD

Oblast King's Cross je rušnou součástí centrálního Londýna a velkou dopravní křižovatkou. Při poslední přestavbě se přeměnila ze sešlé, zanedbané a zchátralé části města na oblíbené místo pro nové kanceláře, byty, bary a restaurace. Jsou zde nádraží King's Cross a St. Pancras a pod nimi stanice metra King's Cross St. Pancras. Nádraží St. Pancras bylo nedávno znovu otevřeno po přestavbě na koncovou stanici vlaků Eurostar. Kromě toho je v této oblasti několik silničních tepen, které jsou přeplněny autobusy a vozidly taxi, s chodníky vždy plnými chodců. Stanice metra je často v dopravní špičce zavřena kvůli přeplnění. V této souvislosti se považovalo za vhodné, aby se stanice metra modernizovala, zlepšila se přístupnost, zvýšila kapacita, a tak se získala stanice, která by více odpovídala hlavnímu městu dvacátého prvního století.

Stanice metra King's Cross St. Pancras je přestupní stanicí pro několik tras londýnského metra: trasy Northern Line, Piccadilly Line, Victoria Line, Metropolitan Line a trasy Circle Line (obr. 1). Cílem uvedeného projektu bylo zajistit nová spojení z navrhovaného tzv. „severního“ vestibulu přímo k nástupišťům tras Northern Line, Piccadilly Line a Victoria Line a umožnit přístup pohybově postiženým osobám na trasy Piccadilly a Victoria. Všechny práce, prováděné na této stavbě sdružením Morgan BeMo JV, tvořeným firmami Morgan Est a Beton- und Monierbau, jsou znázorněny na obr. 1 zelenou barvou. Na obr. 2 je znázorněno, jak budou vypadat práce na povrchu po dokončení. Severní vestibul je polokruhová konstrukce, připojená ze strany ke stanici King's Cross, na druhé straně silnice než je vstup do stanice St. Pancras vedoucí k vlakům Eurostar. Nyní, když byly dokončeny ražby tunelů, začínou práce na vybavení, tj. rozvodech sítí, eskalátorech a výtazích a na nadzemní části konstrukce vestibulu. Nejedná se jen o poskytnutí prostornějšího a příjemnějšího vestibulu cestujícím. Nové trasy pro příchod cestujících na nástupiště tras Piccadilly a Northern Line jsou na opačných koncích nástupišť, než jsou současné vstupy, což umožní rovnoměrnější rozdělení cestujících po délce nástupiště, a tím i zvětšení počtu cestujících nastupujících do každé soupravy metra. Kapacita metra se zvýší.

Hlavními problémy stavby byly omezené prostory pro stavební dvory, blízkost citlivých konstrukcí na povrchu a pod zemí a mnoho propojení s provozovanými tunely. Malé prostory pro stavební dvory znamenaly, že většina dodávek musela být přesně načasována z logistických center



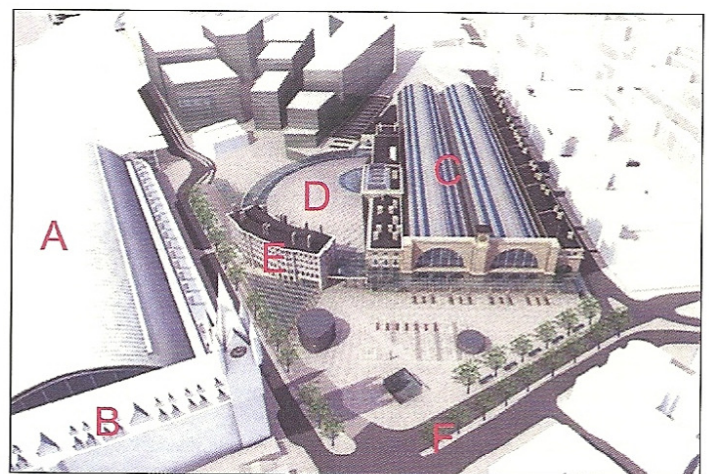
Obr. 1 Nové a stávající tunely pod oblastí King's Cross
Fig. 1 New and existing tunnels under King's Cross

INTRODUCTION

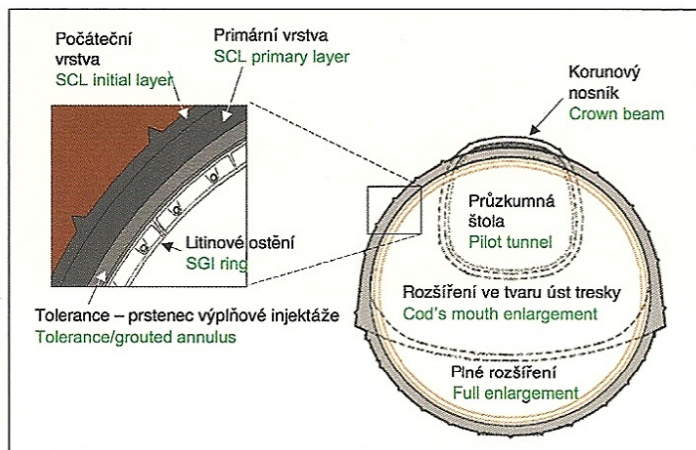
The King's Cross area is a busy part of Central London and a major transport interchange. Recent regeneration has seen it change from a seedy, deprived, run-down part of town into a popular location for new offices, apartments, bars and restaurants. There are the King's Cross and St. Pancras railway stations at the surface, and the King's Cross St. Pancras underground station beneath. St. Pancras railway station was recently refurbished and reopened as the terminus for the Eurostar trains. In addition, there are several major roads in the area crammed with buses and taxis, and the pavements are always jam-packed with pedestrian traffic. The underground station is frequently closed during rush hours due to overcrowding. In this context, it was considered desirable to upgrade the underground station to improve accessibility, increase capacity and to provide a station more fitting to a capital city in the 21st century.

King's Cross St. Pancras underground station is an interchange for several London Underground lines: the Northern Line, the Piccadilly Line, the Victoria Line and the Metropolitan and Circle Lines (Figure 1). The project aimed to provide new connections from a proposed new Northern Ticket Hall directly into the platforms of the Northern, Piccadilly and Victoria Lines, as well as providing step-free access for mobility-impaired persons to the Piccadilly and Victoria Lines. All the works undertaken for this contract by Morgan BeMo JV, a joint venture partnership between Morgan Est and Beton- und Monierbau, are shown in green on Figure 1. An artist's impression of what the finished works will look like at the surface is shown in Figure 2. The Northern Ticket Hall is the semicircular structure attached to the side of King's Cross station and across the road from the Eurostar entrance of St. Pancras station. Now that the tunnelling has been finished, work will now begin on the fit out of the services, escalators and lifts and the ticket hall superstructure. As well as providing a more spacious and pleasant ticket hall, the new passenger access routes to the Piccadilly Line and Northern Line platforms are at the opposite ends of the platforms to the existing entrances, allowing a more even distribution of passengers along the platform and hence allowing more passengers to board each underground train. In this way, capacity will be increased.

The main challenges faced by the project were the constricted site areas, the proximity of sensitive structures at the surface and below



Obr. 2 Vizualizace dokončeného „severního“ vestibulu
A – nádraží St. Pancras, B – Midland Hotel, C – nádraží King's Cross,
D – severní vestibul, E – Great Northern Hotel, F – Euston Road
Fig. 2 Artist's impression of the finished Northern Ticket Hall. A – St. Pancras railway station, B – Midland Hotel, C – King's Cross railway station, D – Northern Ticket Hall, E – Great Northern Hotel, F – Euston Road



Obr. 3 Příčný řez s typickým členěním ražby
Fig. 3 Cross-section showing typical construction sequence

v Southallu v západním Londýně, ze vzdálenosti asi 40 minut jízdy, která ale v běžné dopravě mohla trvat mnohem déle. Betonárna, která byla zřízena na stavebním dvoře v Milk Dock, kde byly umístěny i staveništní kanceláře, dodávala stříkaný beton v kteroukoli denní nebo noční dobu. Přístupy na trasu Piccadilly a na trasu Northern Line se budovaly z tzv. „uzlové šachty“ (Hub Shaft), zatímco přístup na trasu Victoria se budoval ze stavebního dvora I. Občas byl pěší provoz na chodníku před branami do stavebního dvora se společnou šachtou tak velký, že bylo zapotřebí až šesti dopravních strážníků, aby mohly nákladní vozy během špičky bezpečně vjíždět do dvora.

SMLOUVA A STYČNÉ PLOCHY S HLAVNÍMI TŘETÍMI STRANAMI

Investorem stavby byla firma Metronet, která ovládá trasy Victoria, Metropolitan a Circle Line včetně stanice metra King's Cross St. Pancras. Ke stavbě byl již na začátku přizván společný podnik Morgan BeMo JV, a to na základě dohody, která má formu ve Spojeném království známou jako ECI – Early Contractor Involvement (včasné zapojení dodavatele). To umožnilo lepší integraci projektu a stavebních prací a dodavatelé, aby se zapojil do práce na koncepci projektu, prosazoval stavební inovace a poskytoval jistotu, že stavba bude proveditelná. Také to znamenalo, že počáteční jednání se třetími stranami byla založena na reálném schématu a programu. Klíčovými představiteli třetích stran byly vodárenský podnik Thames Water, jehož kanalizační sběrač bude procházet pod přístupem k trase Northern Line (na obr. 1 červeně), společnost Network Rail, která provozuje nádraží King's Cross nacházející se přímo nad ražbami, společnost TubeLines, která provozuje trasy metra Northern Line a Piccadilly, a rada městské části Camden, u které se bude žádat o povolení z oblasti životního prostředí a která bude schvalovat plány řízení dopravy.

STRATEGIE RAŽEB TUNELŮ

Jako prostředek pro primární zajištění výrubu u většiny ražeb byl vybrán stříkaný beton, což je metoda, která přináší nejmenší riziko jak pro pracovníky, tak pro nynější konstrukce v blízkosti ražeb. S ohledem na složitou geometrii tunelů byla při volbě razicí metody vybrána jako jediná možná metoda s otevřeným čelem výrubu. Tradiční metodou v Londýně před devadesátými léty minulého století by téměř jistě byla ražba se zajištěním stropu klenby a čela výrubu dřevěným pažením a budování skládaného litinového ostění. Ostění ze stříkaného betonu poskytuje okamžitou oporu v dokonalém kontaktu s horninou a bylo známo, že pokud se ostění uzavře blízko čela výrubu, bude se sedání povrchu udržovat na nízkých hodnotách a ztráta objemu bude bezpečně nižší než 1 %. Vzhledem k blízkosti citlivých historických budov, provozovaných železničních tratí, velkého viktoriánského kanalizačního řadu a několika tunelů londýnského metra bylo přísné řízení deformací horninového masivu prvořadě důležité.

Kromě toho u metody LaserShell (Williams a kol., 2004, Hilar a kol., 2005), při které nejsou potřebné příhradové rámy nebo ocelové sítě a při které je skloněné čelo výrubu, nemusí osoby vůbec vstupovat do prostoru nevystrojeného výrubu. Odstraní se tak nebezpečné riziko padajících bloků a opadávání čerstvé nastříkaného betonu ze stropu výrubu. Dále je použití stříkaného betonu při užití manipulátoru plně mechanizované oproti primárnímu vystrojování výrubu dřevem, při kterém je obvykle potřebné velké množství ruční práce spojené s rizikem vzniku syndromu rukou způsobeného vibracemi pneumatických nástrojů. Bylo rozhodnuto, že se všechny tunely s ostěním ze stříkaného betonu budou razit nejprve s průzkumnou štolou (obr. 3). Ta se pak rozšířila do tvaru tresčích úst, což

ground, and the numerous connections with live tunnels. The small site areas meant that most deliveries had to be made on a just-in-time basis from a logistics hub in Southall in West London, approximately 40 minutes drive away, although with traffic this could be considerably longer. A batching plant was set up at the Milk Dock site to supply sprayed concrete at any time of day or night, which was also where the site offices were located. The Piccadilly Line Access and Northern Line Access were constructed from the Hub Shaft, and the Victoria Line Access was constructed from Site I. At times, the pedestrian traffic along the pavement in front of the Hub Shaft site gates could be so great that as many as six traffic marshals were required to allow trucks to enter the gates safely during peak times.

CONTRACT AND KEY THIRD PARTY INTERFACES

The client for the project was Metronet, who manage the Victoria Line and the Metropolitan and Circle Lines and King's Cross St. Pancras underground station. Morgan BeMo JV were brought in early on in the project, in what is known in the UK as an Early Contractor Involvement (ECI) contract. This allowed a better integration of design and construction and enabled the contractor to be involved in the concept development, driving innovation into the project and ensuring the scheme was buildable. It also meant that early discussions with third parties were based on a real scheme and a real programme. Key third parties included Thames Water, whose Fleet relief sewer would be underpinned by the Northern Line Access (in red on Figure 1), Network Rail, who manage King's Cross railway station directly above the tunnelling works, TubeLines, who manage the Northern and Piccadilly Lines and Camden Borough Council, from whom environmental permits had to be sought and traffic management plans agreed.

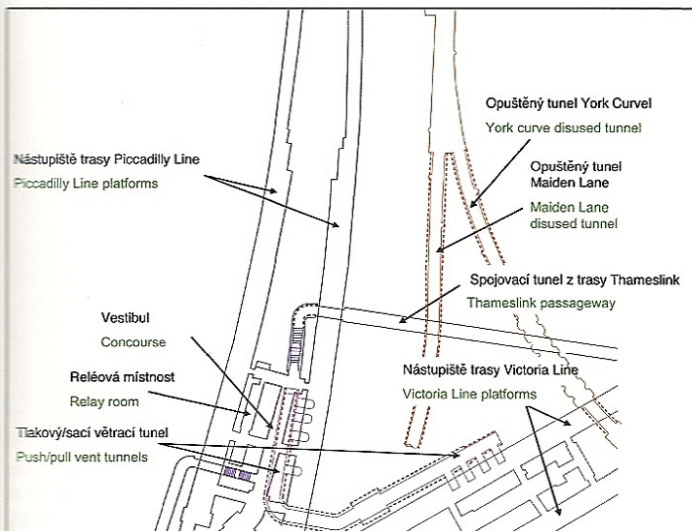
TUNNELLING STRATEGY

Sprayed concrete was chosen as the primary means of ground support for most of the tunnelling work because it was the method that carried the least risk, both to the workforce and to the nearby existing structures. Considering the complex geometry of the tunnels, an open face method was the only option. Traditionally in London, before the 1990s, such tunnels would almost certainly have been excavated while installing timber support to the crown and the face and constructing cast iron segmental linings. Sprayed concrete linings provide an immediate support in intimate contact with the ground, and it was known that if the ring were closed near to the face settlements would be kept to a low level with a volume loss well under 1.0 %. Considering the proximity of sensitive historic buildings, operational railway tracks, a large Victorian sewer and several London Underground tunnels, tight control of ground movements was paramount.

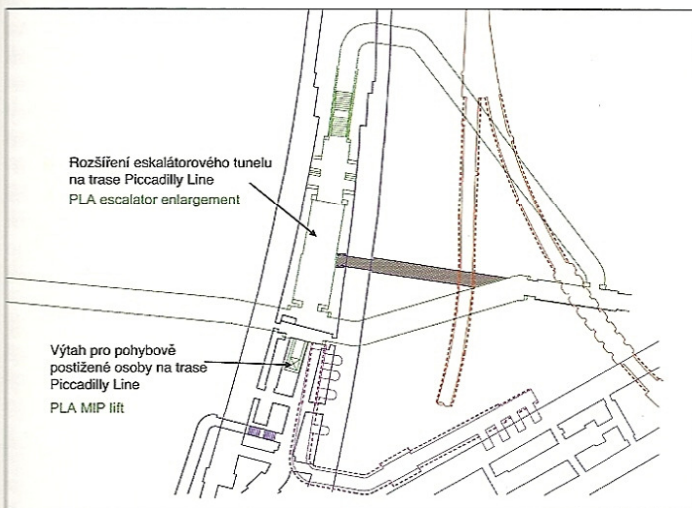
In addition, the LaserShell method (Williams et al., 2004, Hilar et al., 2005), which dispensed with the need for lattice girders or mesh and has an inclined face, obviated the need for operatives to enter the face at all. This removed the risk to the operatives from block falls and falls of green sprayed concrete from the crown. Also, the application of sprayed concrete, when using a robot, is fully mechanised whereas the use of timber for primary support usually requires a lot of manual handling of heavy timbers and the use of pneumatic clay spades with the associated risk to the operatives of Hand-Arm Vibration Syndrome.

It was decided that all the sprayed concrete lined tunnels would be constructed first with a pilot tunnel (Figure 3). This was then enlarged to form a cod's mouth enlargement – basically a semicircular crown with a flattened invert, and then again enlarged in the invert to complete a fully circular section. The pilot tunnel was set slightly above the profile of the finished tunnel, such that a 'crown beam' would always span between the enlargement and the pilot tunnel, helping to control ground movements and prevent block falls, since breaking out of the pilot tunnel caused vibrations that could loosen blocks of clay along existing fissures. Once a full circular ring of sprayed concrete was supporting the ground, a segmental lining made from spheroidal graphite iron (SGI) was then constructed inside and grouted up.

It may seem that the SGI lining was extraneous, but it must be remembered that these tunnels were very close to existing infrastructure in constant use, whose operation could not be put at risk. The client, in consultation with third parties, took a cautious approach, and knowing that an SGI lining could easily deal with the potential for high bending moments and distortions caused by construction so close to



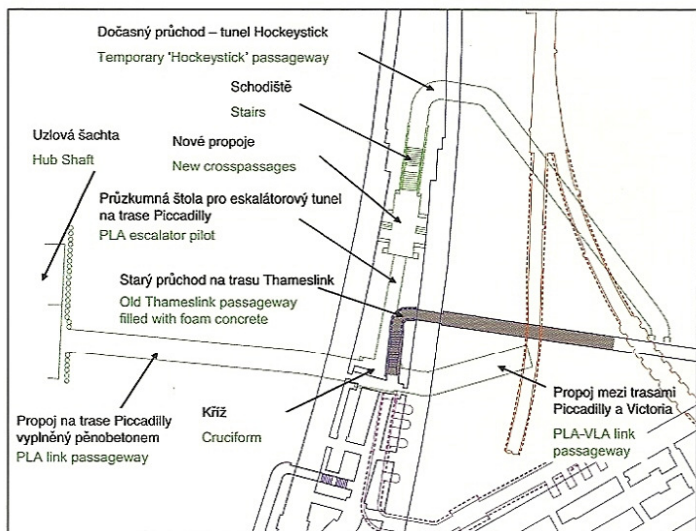
Obr. 4a Postup výstavby přístupu k trase Piccadilly Line před zahájením stavby
Fig. 4a Construction sequence of the Piccadilly Line Access: before construction



Obr. 4c Postup výstavby přístupu k trase Piccadilly Line: procházející spojovacím tunelem z trasy Thameslink, pro rozšíření eskalátorového tunelu a pro vytvoření spojovacího tunelu mezi přístupem k trase Piccadilly a přístupem k trase Victoria
Fig. 4c Construction sequence of the Piccadilly Line Access: mining through the Thameslink passageway for the escalator enlargement and the connection to form the PLA-VLA link passageway

je v podstatě polokruhová horní klenba se zploštělou protiklenbou, s následným opětovným zvětšením ve dně tak, že se vytvořil celý kruhový profil. Průzkumná štola výškově mírně přesahovala profil budoucího tunelu tak, aby mezi vrcholem klenby průzkumné štoly a vrcholem rozšířeného profilu vznikl „korunový nosník“, který pomáhal kontrolovat pohyby horniny a bránil vypadávaní bloků. Důvodem bylo to, že vybouřování průzkumné štoly by způsobovalo vibrace, které by mohly uvolnit bloky jílu po stávajících nespojitých plochách. Když již byla hornina zajištěna plným kruhovým prstencem stříkaného betonu, postavilo se uvnitř skládané ostění z tvárné litiny, které se uvnitř stříkaného betonového prstence zainjektovalo.

Může se zdát, že ostění z litiny bylo nepatřičné, avšak nesmí se zapomenout na to, že tyto tunely byly ve velké blízkosti trvale užívané infrastruktury, jejíž provoz se nesměl ohrozit. Po poradách se třetími stranami zaujal investor opatrný přístup a jelikož věděl, že ostění z tvárné litiny je schopné snadno se vypořádat s možnými velkými ohybovými momenty a deformacemi, způsobovanými prováděním prací v takové blízkosti stávajících tunelů, rozhodl, že trvalé ostění bude z litiny. Například eskalátorový tunel na přístupu na trasu Piccadilly Line, který měl vyražený profil o průměru 9,5 m, byl asi 10 m pod střední nosnou stěnou stanice King's Cross a klesal dolů mezi provozovanými nástupištními tunely, místnostmi se spínacím zařízením (řízení signalizace) a propojovacími tunely trasy Piccadilly Line a částečně byl ražen přes spojovací tunel, který byl následně vyplněn pórobetonem. Když bylo rozhodnuto o užití litiny, bylo z hlediska bezpečnosti razičů a požadované přísné kontroly



Obr. 4b Postup výstavby přístupu k trase Piccadilly Line: stavba tunelu Hockeystick pro převedení pěšího provozu, stavba spojovacího tunelu na přístup k trase Piccadilly, „kříž“ a směrová štola eskalátorového tunelu, vyplnění starého spojovacího tunelu z trasy Thameslink pěnobetonem a ražba nové průzkumné štoly pro eskalátorový tunel na trase Piccadilly
Fig. 4b Construction sequence of the Piccadilly Line Access: construction of the Hockeystick diversion tunnel, the PLA link passageway, the cruciform and the escalator pilot tunnel, and filling of the old Thameslink passageway with foam concrete

existing tunnels, decided that the permanent works should be SGI. For instance, the Piccadilly Line Access escalator was a 9.5 m diameter excavation approximately 10 m below the spine wall of King's Cross station, and descended between the live platform tunnels, switchgear rooms (that control the signalling) and crosspassages of the Piccadilly Line, and partially mining through a passageway tunnel that had been backfilled with foam concrete. Once the decision to use SGI had been made, the best approach for the primary support, in terms of the safety of the operatives and the tight control of ground movements required, was to use sprayed concrete.

SEQUENCE OF CONSTRUCTION

For the purpose of avoiding undue complication, only the sequence of the Piccadilly Line Access works will be described and shown in the figures to follow. The Northern Line Access began once the Hub Shaft had been sunk, and was constructed at the same time as, but independently of, the Piccadilly Line Access. The same could be said of the Victoria Line Access.

The situation in the area of the Piccadilly Line Access (PLA) before construction is shown in Figure 4a. The first tunnel to be built was the Hockeystick diversion tunnel (Figure 4b), which allowed the existing Thameslink passageway to be closed and filled with foam concrete while still allowing passengers to access the Piccadilly Line platforms. The Hockeystick was constructed from a shaft sunk from an existing disused brick railway tunnel called the Maiden Lane tunnel, which was locally lined and underpinned with concrete to strengthen it. Figure 5 shows the shaft bottom and the Hockeystick tunnel extending in both directions. The Hockeystick needed to be fitted out to London Underground standards for passenger use, as shown in Figure 6. In the meantime the PLA passageway was constructed from the Hub Shaft, including an enlarged section of tunnel with opening sets on both sides known as the 'cruciform'. Looking inbye, the opening on the left was for the PLA escalator, and the opening on the right was for the MIP lift upper lobby leading to the MIP lift shaft. The PLA escalator pilot tunnel was then constructed, as shown in Figure 4b. The right hand side of the invert of the pilot tunnel grazed the shoulder of the Thameslink passageway, and once the Hockeystick tunnel was opened and this tunnel had been closed to the public, a hole was cut in the lining of the Thameslink passageway for access to pour foam concrete (Figure 4b). The foam concrete enabled the tunnel to be partially mined through by the PLA escalator enlargement without compromising its stability. Similarly, the PLA-VLA link passageway was mined through the Thameslink tunnel until it was in the centre of the face (Figure 7), in order to create a connection as shown in Figure 4c. Eventually the Hockeystick will no longer be required once the new passageways, lifts and escalators are open to the public.

deformací horniny nejlepší metodou pro primární zajištění výrubu použití stříkaného betonu.

POSTUP VÝSTAVBY

Abyste nedošlo k nevhodnému zkomplikování výkladu, bude dále popsán a ukázán pomocí čísel pouze postup prací na přístupu k trase Piccadilly. Ražba přístupu k trase Northern Line začala po vyhloubení uzlové šachty a pokračovala současně s ražbou přístupu k trase Piccadilly, avšak nezávisle na ní. Totéž by se dalo říci o přístupu k trase Victoria.

Situace v oblasti přístupu k trase Piccadilly před zahájením stavby je na obr. 4 a. První tunel, který se budoval, byl tunel Hockeystick (obr. 4 b), sloužící pro převedení pěšího provozu cestujících ze spojovacího tunelu z trasy Thameslink, který měl být uzavřen a zaplněn pěnobetonem, na nástupišti trasy Piccadilly. Tunel Hockeystick se razil ze šachty, vyhloubené z nepoužívaného železničního tunelu s cihelným ostěním nazývaného Maiden Lane, který byl lokálně vystrojen a podepřen betonem z důvodu jeho zesílení. Na obr. 5 je spodek jámy a tunel Hockeystick vedoucí na obě strany. Bylo zapotřebí vybavit tunel Hockeystick podle standardů londýnského metra pro provoz s cestujícími (obr. 6). Mezitím se z uzlové šachty budoval spojovací tunel na přístup k trase Piccadilly, včetně rozšířeného profilu tunelu s prostupy na obou stranách, kterému se říká „kříž“. Při pohledu dovnitř byl na levé straně vstup pro eskalátor přístupu k trase Piccadilly a na pravé straně byl vstup pro výtahovou šachtu pro invalidy. Následovala ražba směrové štolky pro eskalátor do přístupu k trase Piccadilly (obr. 4 b). Pravá stěna dna směrové štolky se dotýkala okraje spojovacího tunelu z trasy Thameslink, a když byl otevřen tunel Hockeystick a tento tunel byl uzavřen pro veřejnost, byl v ostění spojovacího tunelu z trasy Thameslink vybourán otvor umožňující vstup a ukládání pórobetonu (obr. 4 b). Pórobeton umožnil, aby se tunel částečně razil přes rozšiřovaný eskalátorový tunel přístupu k trase Piccadilly, aniž by došlo k narušení jeho stability. Podobně se spojovací tunel mezi přístupem k trase Piccadilly a přístupem k trase Victoria razil skrz tunel Thameslink, dokud se nedostal do středu čela výrubu (obr. 7), aby se tak vytvořilo spojení znázorněné na obr. 4 c. Nakonec, až budou spojovací tunely, výtahy a eskalátory otevřeny pro veřejnost, tunel Hockeystick již nebude potřebný.

STŘÍKANÝ BETON

Složení stříkaného betonu bylo stejné, jako směsi používané na stavbě terminálu 5 (Williams a kol., 2004, Hilar a kol., 2005). Směs obsahovala



Obr. 5 Budování tunelu Hockeystick ze šachty Maiden Lane
Fig. 5 Construction of the Hockeystick tunnel from Maiden Lane shaft

SPRAYED CONCRETE

The mix design of the sprayed concrete was the same as that used at the Terminal 5 project (Williams et al., 2004, Hilar et al., 2005). The mix contained microsilica slurry, high strength steel fibres, a high cement content of 450 kg/m³, and a maximum aggregate size of 6 mm. Superplasticiser was used to reduce the water/cement ratio to 0.46 while retaining pumpability and retarder was used to give the sprayed concrete a pot life of 3 hours. In order to reverse the effect of the retarder, 7.5 % (by weight of cement) of alkali-free accelerator was introduced at the nozzle to induce an immediate set and kick-start the hydration of the sprayed concrete. The sprayed concrete produced was a dense, homogeneous concrete with a low permeability of less than 10⁻¹² m/s.

The quality of the sprayed concrete was verified throughout the project by a strict regimen of testing. The engineer would first check the slump flow of the sprayed concrete before pumping, to British Standard 1881 part 105 (1984). Once the sprayed concrete had been sprayed, the engineer would check the strength gain at 1 hour and at 3 hours using a Hilti penetration test. This involved firing 10 nails with a Hilti DX450 gun into the sprayed concrete and measuring the penetration. An empirical relationship was then used to relate penetration with compressive strength. If the sprayed concrete strength at 1 hour or 3 hours was below the ÖBV (1999) J2 curve, then further excavation would have to be halted until adequate strength was reached. As a further check on final strength, lining thickness and quality, 100 mm diameter cores were taken from the lining at a frequency in accordance with BS EN 206-1 (2000). A set of 4 cores were taken for every 30 m³ theoretical volume. In addition, 100 mm cube samples were made at the batching plant and taken to a laboratory for testing to ensure the quality of the base mix without accelerator. 28 day strengths were in excess of requirements, largely due to the high cement content required to achieve the early age strength. Over the whole project, the mean 28 day strength of cores tested under uniaxial compression was 59.0 MPa with a standard deviation of 12.1 MPa.

As well as having a good mix, the quality of sprayed concrete is highly dependent on good workmanship. Exhumation of the pilot tunnel lining during construction of the enlargement provided strong evidence of the quality, homogeneity and density of the sprayed concrete. Laminations of trapped rebound, poorly-formed joints, or joints that were visible at all were very rare; a tribute to the diligence and competence of the sprayers and the effectiveness of the 'TunnelBeamer' system. Similarly, cracks in the sprayed concrete lining were very rare and were never of structural significance.

THE TUNNELBEAMER SYSTEM

The TunnelBeamer system was previously used at Heathrow Terminal 5 (Williams et al., 2004, Hilar et al., 2005). At King's Cross, the system was upgraded and refined, as shown in Figure 8. Two reflectorless laser total stations with an aluminium hood and protective (and easily replaceable) perspex lens covers were linked using Bluetooth to a military-grade hardened laptop in a metal case containing the alignments and TunnelBeamer software. Despite the care of the engineers and the brightly painted armoured covers, the total stations were occasionally



Obr. 6 Dokončený tunel Hockeystick
Fig. 6 The finished Hockeystick tunnel



Obr. 7 Ražba spojovacího tunelu mezi přístupem k trase Piccadilly a přístupem k trase Victoria, procházející starým spojovacím tunelem z trasy Thameslink, vyplněného pěnobetonem

Fig. 7 Excavating the PLA-VLA link passageway through the old Thameslink passageway filled with foam concrete

mikrosilikovou kaši, vysokopevnostní ocelové drátky, velké množství cementu (450 kg/m^3) a kamenivo s maximální velikostí zrn 6 mm . Ke snížení vodního součinitele na $0,46$ při zachování čerpatelnosti se používal superplastifikátor a pro zajištění zpracovatelnosti stříkaného betonu po dobu 3 hodin se přidával zpomalovač tuhnutí. Aby se zvrátil účinek zpomalovače, začalo okamžité tuhnutí a odstartoval proces hydratace stříkaného betonu, přidával se v trysce nealkalický urychlovač v dávkování podle hmotnosti – $7,5 \%$ z hmotnosti cementu. Vzniklý stříkaný beton byl hutný, homogenní, s malou propustností (nižší než 10^{-12} m/s).

Jakost stříkaného betonu se ověřovala v průběhu celé stavby na základě přísného režimu zkoušek. Technik nejprve zkontroloval konzistenci stříkaného betonu před čerpáním zkouškou rozlitém podle britské normy British Standard 1881 část 105 (1984). Po nastříkání betonu technik kontroloval nárůst pevnosti po 1 hodině a po 3 hodinách penetračním Hilti testem. Při zkoušce se pistolí Hilti DX450 vstříklo do nastříkaného betonu 10 hřebů a měřilo se vniknutí. Pro odvození pevnosti betonu v tlaku z hloubky vniknutí se používal empirický vztah. Pokud by byla pevnost stříkaného betonu po 1 hodině nebo 3 hodinách pod křivkou J2 podle rakouské směrnice ÖBV z roku 1999, bylo by nutné zastavit další ražbu, dokud by se nedosáhlo požadované pevnosti. Pro další kontrolu konečné pevnosti, tloušťky ostění a jakosti se z ostění odebíraly jádrové vzorky o průměru 100 mm , s četností podle normy BS EN 206-1 (2000). Z každého teoretického objemu 30 m^3 se odebírala sada 4 jádrových odvrťů. Kromě toho se na betonárně vyráběly zkušební kostky $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$, které se předávaly do laboratoře k provedení zkoušek, aby byla zajištěna jakost základní směsi bez urychlovače. Pevnosti po 28 dnech byly vyšší, než bylo požadováno, hlavně díky vysokému obsahu cementu nutného pro dosažení pevnosti betonu malého stáří. Průměrná pevnost zkoušených vzorků v jednoosém tlaku byla po celou dobu výstavby 59 MPa se standardní odchylkou $12,1 \text{ MPa}$.

Stejně jako na vyrobení dobré směsi závisí jakost stříkaných betonů ve velké míře i na správném provedení prací. Bourání ostění směrové štoly v průběhu rozšiřování profilu poskytovalo doklad o dobré jakosti, homogenitě a hustotě stříkaného betonu. Vrstevnatost uzavřeného spadu, špatně vytvořené styky nebo vůbec viditelné styky se vyskytovaly velmi zřídka, za což je třeba poděkovat pečlivosti a umění obsluhy stříkacího zařízení a účinnosti systému TunnelBeamer. I trhliny v ostění ze stříkaného betonu se objevovaly velmi zřídka a z hlediska statického působení nebyly nikdy podstatné.

SYSTÉM TUNNELBEAMER

Systém TunnelBeamer byl dříve použit na stavbě terminálu 5 letiště Heathrow (Williams a kol., 2004, Hilar a kol., 2005). V případě King's Cross byl systém modernizován a upraven, jak je znázorněno na obr. 8. Dvě bezreflektorové totální stanice s aluminiovým krytem a ochrannými (a snadno vyměnitelnými) plexisklovými kryty objektivů byly napojeny pomocí bluetooth na laptop, zpevněný pro polní podmínky kovovým obalem, ve kterém byly uloženy údaje o niveletách a software TunnelBeamer. Přes pěči techniků a jasnou barvou natřené kryty byly totální stanice občas v průběhu ražeb srazeny z nástěnných konzol. Tím však obvykle došlo pouze k poškození upínacího podstavce přístroje a totální stanice byla obvykle dobře chráněná pancéřovým krytem.

knocked off their wall-mounted brackets during excavation. However, this usually only damaged the tribrac clamp at the base of the total station, and the total station itself was usually well-protected by the armoured cover.

The engineer could shoot the laser at any point and obtain the distance to the theoretical excavation, initial layer or primary layer profile, just as with any standard alignment software. However, due to the level of dust during spraying, getting an actual reading from the total station was often not possible. For this purpose two total stations could be used together, one on each side of the tunnel, with the 'master' total station being directed by the engineer and the motorised 'slave' total station automatically projecting its laser to cross the master laser beam at the point where the theoretical profile was intersected. This meant that the sprayer would see two laser dots on the wall of the tunnel, which would move closer together as he sprayed more concrete. Once the dots had moved together, the desired thickness had been sprayed. This required a close understanding between the engineer and the sprayer of where to position the laser and when to move it, since verbal communication during spraying was difficult while wearing dust-masks and airflow helmets. The engineer needed to be capable of quickly diagnosing and fixing any problems with the TunnelBeamer, since the lack of lattice girders meant that the sprayer would have to guess the profile if this happened. This put a lot of pressure on the engineers during spraying.

The engineers used the TunnelBeamer to record the profile of the excavation and the sprayed concrete by taking measurements at less than 0.5 m spacing, and making sure to measure at the trailing edge, centre and leading edge of the advance. This provided a record of the thickness of the lining and ensured that there were no areas where the lining was too thick (i.e. within the envelope of the SGI lining) or too thin.

THE RESS PROCESS

The TunnelBeamer profiles, sprayed concrete strength testing and face logs were reviewed at a 'Daily Review Meeting'. Details of compensation grouting, surface settlements and monitoring of existing structures, both at the surface and underground, as well as monitoring of the tunnels under construction were also reviewed. The Daily Review Meeting was commonly referred to as the 'RESS' meeting because the 'Required Excavation and Support Sheets' were also presented and reviewed. The RESS detailed the precise excavation sequences and sprayed concrete support requirements, and would usually cover the next few days of work.

SGI LININGS

The theoretical profile of the sprayed concrete primary lining intrados was 100 mm outside the extrados of the SGI linings (Figure 3). This was to allow for overspraying, to allow the necessary expansion of the ring to insert the key segment, and to allow the free flow of grout around the SGI lining once installed. The bottom half of the SGI lining up to axis level was installed on timber packing. Again, a reflectorless laser total station was used to ensure the accurate positioning of the segments, similar to the ones used with the TunnelBeamer, but without the armoured hood. This allowed greater accuracy to be achieved,



Obr. 8 Aplikace stříkaného betonu systémem TunnelBeamer
Fig. 8 Spraying concrete using the TunnelBeamer system

Technik mohl zaměřit laser na kterýkoli bod a zjistit jeho vzdálenost od teoretického líce výrubu, líce počáteční vrstvy nebo primární vrstvy stříkaného betonu, stejně jako pomocí jakéhokoli standardního softwaru pro niveletu. Kvůli množství prachu při stříkání bylo získání skutečných čtení totálních stanic často nemožné. Z toho důvodu se daly dvě totální stanice použít současně, na každé straně tunelu jedna s tím, že „hlavní“ totální stanice zaměřil technik a motorizovaná podřízená totální stanice automaticky vyslala laserový paprsek tak, aby překřížil hlavní laserový paprsek v bodu, kde byl prout teoretický líc. To znamenalo, že nastříkávač uviděl na stěně tunelu dvě tečky od laserů, které se s rostoucí tloušťkou nástřiku betonu přibližovaly k sobě. V okamžiku, kdy se tečky setkaly, bylo nastříkání požadované tloušťky skočeno. To vyžadovalo dokonalý systém dorozumívání mezi technikem a stříkačem, co se týče polohy laseru a jeho přesunutí, jelikož hlasová komunikace byla obtížná v průběhu stříkání, kdy se používaly respirátory a ochranné přilby s přívodem vzduchu. Technik potřeboval, aby mohl rychle zjistit a řešit jakýkoli problém se systémem TunnelBeamer, jelikož to, že nebyly používány příhradové rámy, znamenalo, že nastříkávač by musel v případě problému polohu obrysu odhadovat. To kladlo na inženýry při stříkání velké nároky.

Inženýři používali program TunnelBeamer k zaznamenávání obrysu výrubu a stříkaného betonu. Zaměřovaly se profily v intervalech menších než 0,5 m. Měření se provádělo na zadní hraně, uprostřed a na přední hraně záběru. Tým se získal záznam o tloušťce ostění a zajistilo se, že neexistovaly žádné oblasti, kde by bylo ostění příliš silné (tj. uvnitř obálky litinového ostění) nebo příliš tenké.

TABULKY VÝRUBŮ A ZAJIŠTĚNÍ

Zaměření profilů systémem TunnelBeamer, zkoušky pevnosti stříkaného betonu a popisy čelb výrubu byly kontrolovány na denních kontrolních schůzkách spolu s podrobnostmi o kompenzační injektáži, pohybech povrchu a monitoringu konvergenčí nových a stávajících tunelů. O denních kontrolních schůzkách se běžně mluvilo jako o jednáních o tabulkách s požadavky na ražbu a zajištění výrubu (dále jen tabulky ražby a zajištění), jelikož se na nich tyto tabulky také předkládaly a kontrolovaly. Tabulky ražby a zajištění obsahovaly podrobnosti o přesných postupech ražby a požadavcích na zajištění stříkaným betonem. Obvykle pokrývaly práci na několik následujících dnů dopředu.

OSTĚNÍ Z LITINY

Teoretický profil vnitřního líce primárního ostění ze stříkaného betonu byl 100 mm od vnějšího líce ostění z litiny (obr. 3). Tento prostor měl umožnit případné překročení tloušťky stříkaného betonu, rozepnutí prstence pro vložení zámkového dílce a dovolit volné proudění injektážní směsi kolem litinového ostění po jeho instalaci. Spodní polovina litinového ostění do úrovně osy tunelu se stavěla na dřevěné podložky. Opět se používala bezreflektorová laserová totální stanice, kterou se zajišťovalo přesné umístění dílců, podobná těm, které se používaly se zařízením TunnelBeamer, avšak bez pancéřového krytu. To umožnilo dosažení větší přesnosti, jelikož kryt bránil použití dalekohledu k proťování vzad a dal se používat pouze laser, který se zaměřoval na terč pouhým okem.

Pod úrovní osy tunelu se dílce z litiny ukládaly pomocí bagru, s použitím lan a závěsů. Nad úrovní osy se dílce ukládaly speciálně vyrobeným adaptérem – manipulátorem (obr. 9). Manipulátor umožňoval, aby bagr dílce zdvihal a umísťoval je při 6 stupních volnosti. Když byl dílec na místě, členové obsluhy použili pojízdnou plošinu a zasunuli spojovací šrouby.

Při použití totální stanice se daly dílce ukládat s vysokým stupněm přesnosti, bezpečně v daných tolerancích. Příležitostně, v závislosti na venkovním osvětlení, síle laseru a úhlu dopadu laseru na povrch, se mohla totální stanice špatně přečíst. Aby se toto nebezpečí zmírnilo, tmavošedé dílce byly v rozích, kde se čtení prováděla, nastříkány bílou netralou barvou. Aby se daly prstence snadno montovat, bylo důležité, aby se udržovaly uvnitř tolerancí. Dílce se daly rovnat do směru nivelety, do směru kolmého na niveletu, do svislice a do profilu pomocí špičatých kladiv nebo trnů, kterými se vystředovaly příslušné otvory pro šrouby. Efektivní a přesná montáž prstence z litinových dílců vyžadovala velmi zručné a zkušené montážníky.

Litinové prstence se lišily průměrem. Vnitřní průměr se pohyboval od 3500 mm do 8650 mm podle daného tunelu. K zatáčení kolem rohů a na spodu a na vrcholu eskalátorových a schodišťových tunelů se používaly klínové prstence. Tam, kde docházelo ke změně průměru, se prováděly monolitické betonové prstence. Všechny prstence měly délku 600 mm, s výjimkou klínových prstenců, u kterých se délky lišily, avšak nebyly nikdy v průměru větší než 600 mm. Jelikož primární zajištění bylo



Obr. 9 Bagr s nástavbou manipulátoru používaný k budování prstenců z litinových dílců v eskalátorovém tunelu NLA

Fig. 9 An excavator with a manipulator attachment being used to build an SGI ring in the NLA escalator barrel

since the hood prevented use of the telescope to resection and only the laser could be used and centred on the targets by eye.

The SGI segments were placed using an excavator. This was done using straps and shackles below axis level. Above axis level, the segments were placed using a specially-made 'manipulator' adaptor (Figure 9). The manipulator allowed the excavator to pick up the segments and position them with 6 degrees of freedom. Once the segment was in position, the operatives then used a mobile access platform to insert the bolts.

Using the total station, the segments could be placed with a high degree of accuracy well within the tolerances. Occasionally, depending on the ambient light, the strength of the laser and the angle of the laser to the surface, the total station could misread. To mitigate this, the dark-grey segments were spray-painted white in the corners where the readings were to be taken with non-permanent paint. It was important to keep the rings well within tolerance to ensure an easy build. The segments could be kept on line, square, plumb and profile by hammering pick heads or podgers through the right boltholes. Being able to build an SGI ring efficiently and accurately required highly skilled and experienced ringbuilders.

The SGI rings varied in diameter from 3500 mm internal diameter up to 8650 mm internal diameter, depending on the tunnel. Tapered rings were used to turn around corners and at the top and bottom of the slope in the escalator and stair barrels, and concrete collars were poured where there was a change in diameter. All the rings were 600 mm long, except the tapered rings which varied in length but were never more than 600 mm long on average. Since the primary support was being provided by the sprayed concrete lining, it was not necessary to grout after each ring. However, the rings had to be grouted before the excavator used to erect the segments could be moved forward onto them, so usually this meant that they were grouted every 5 or 6 rings.

TIMBER HEADINGS

On some occasions, because of the tight spaces where excavations had to be made, it was not possible to use sprayed concrete as the primary support and timber headings were used instead. One of these locations was the Piccadilly Line MIP (mobility-impaired persons) lift (Figure 4c). The MIP lift shaft went down between a push/pull vent tunnel, an existing relay room for track signalling, a crosspassage and a passenger concourse tunnel. The internal space required for the lift equipment was 2.4 x 2.8 m, and there was insufficient space to spray a near-circular sprayed concrete shaft outside of this envelope. Therefore the shaft was excavated by hand and supported by 1 m lengths of 225 x 100 mm timbers. The timbers were pushed against the ground by wedging them off steel frames, which were later concreted in as part of the permanent works, as shown in Figure 10. The steel frames were hung on threaded bars coupled together, with a nut supporting the frame and allowing it to be adjusted to the right level.

In Figure 10 one can see the opening for the lower lobby of the lift. The steel beams in this area could be unbolted to allow timber headings to be mined out from the shaft. A top heading was driven first, in three stages, firstly down the middle and then to each side (Figure 11). After the first heading was excavated, the crown beams were

pomocí ostění ze stříkaného betonu, nebylo nutné zainjektovat každý prstencík ihned po jeho postavení. Prstence se však musely zainjektovat před tím, než se na ně mohl přesunout bagr, používaný na jejich instalaci, což obvykle znamenalo, že se injektovalo vždy 5 nebo 6 prstenců.

RAŽBY ZAJIŠTOVANÉ VÝDŘEVOU

Při několika příležitostech nebylo z důvodu omezeného prostoru v místech ražby možné používat stříkaný beton jako primární zajištění výrubu a místo toho se použila výdřeva. Jedním z těchto míst byl výtah pro pohybově postižené osoby na trase Piccadilly (obr. 4 c). Spodek šachty pro tento výtah se nacházel mezi foukacím/sacím větracím tunelem, stávající reléovou místností pro zabezpečovací systém tratí, spojovacím tunelem a tunelem vestibulu. Vnitřní prostor, potřebný pro zařízení výtahu, byl 2,4 x 2,8 m a vně této obálky nebyl dostatek místa na provádění téměř kruhového ostění šachty ze stříkaného betonu. Proto se šachta hloubila ručně a byla vystrojována 1 m dlouhými dřevěnými hranoly 225 x 100 mm. Hranoly se přitlačovaly k hornímu zaklínováním proti ocelovým rámcům, které byly později zabetonovány jako součást trvalého díla (obr. 10). Ocelové rámy byly zavěšeny na spojovaných závitových tyčích, na kterých byly matice, které tyto rámy podpíraly a umožňovaly ustavení rámu do správné výšky.

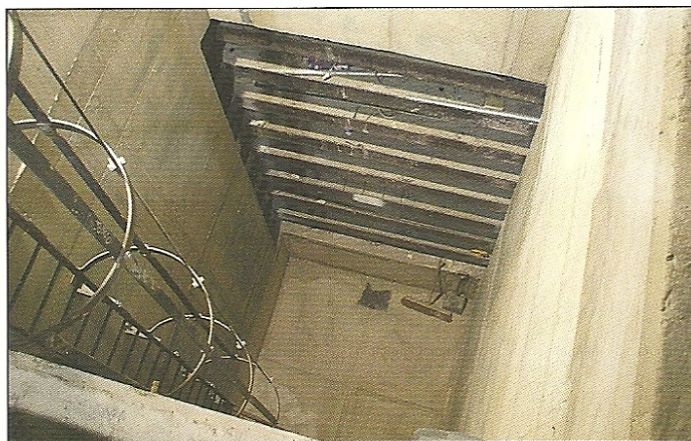
Na obr. 10 je možno vidět vstup do spodní výtahové haly. Ocelové nosníky mohly být v této oblasti odšroubovány, aby se umožnilo provádění ruční ražby s výdřevou z výtahové šachty. Nejprve se razila kalota. Její ražba byla rozdělena do tří fází, nejdříve prostřední část a potom boky (obr. 11). Po skončení první fáze ražby se instalovaly korunní nosníky, které byly na konci přiléhajícím k šachtě podepřeny konzolami, přišroubovanými do betonu šachty. Na druhém konci byly podepřeny dřevěnými podpěrami 300 x 300 mm, které stály na betonových podložkách 450 x 600 mm, vysokých 150 mm (obr. 12). Když se razily boční štoly, bylo možné opírat pažení stropu výrubu o pásnici korunního nosníku. Stojky výdřevy bočních štol byly uchyceny nahore pomocí „yankee brob“ (ocelových plechů ohnutých do tvaru S) a dole ležely na ostění sousedního stávajícího tunelu, které bylo z litinových dílů. Stojky výdřevy měly vzpěry 1:6. Následně se výrub prohloubil o další 1 m s tím, že dřevěné pažiny na levé straně byly podepřeny dřevěnými převážkami 300 x 150 mm a stojkami, které byly upevněny v ostění stávajícího tunelu vestibulu na pravé straně pomocí ocelových konzol. V tomto malém prostoru se na vnější straně odkrytého ostění musel instalovat překlad a horní část sloupků zárubně, které byly k ostění prošroubovány. Opět, jako u šachty, bylo nutno smontovat ocelové rámy, které se obalily ocelovou sítí, aby se zajistilo dostatečné krytí betonu. K pažení stropu se připevňovaly injektážní a odvodušovací trubky. Do všech spár v betonu se vkládal těsnicí pás a kolem celého prostupu do tunelu vestibulu se osazovaly těsnicí pásy. Potom se muselo uvnitř zhotovit bednění podhledu. Strop se betonoval shora, z horního vestibulu, čtyřmi otvory o průměru 250 mm, které byly předtím za tímto účelem vyvrtány. Použil se samozhutitelný beton, jelikož vibrace nebyly přípustné. Povrch betonu byl výborný a výplňovou injektáží nebyly zjištěny žádné dutiny. Úsilí a zručnost razičů, zámečnicků a tesařů, kteří překonávali potíže na této části díla a vytvořili tak kvalitní produkt, byly úctyhodné.

Když strop dosáhl pevnosti, při které byl schopen nést nadložní hornínu, bednění bylo odstraněno a zbytek spodní haly byl též směřem dolů ve dvou etapách s tím, že se instalovaly další dvě úrovně dřevěných převážek a stojek v každé etapě. Když byly tyto práce dokončeny, musel se smontovat a obalit sítí zbytek ocelových rámců. Dále se musely osadit spodní části sloupků zárubně a práh zárubně. Následovala betonáž protiklenby a stěn, v jejímž průběhu se postupně odstraňovaly jednotlivé úrovně stojek. Pracoviště tedy bylo velmi stísněné.

Všechny ruční ražby byly sledovány inženýry, aby bylo zajištěno, že pohyby budou v přijatelných mezích. Toho se dosáhlo nivelačním měřením korunních nosníků a měřením konvergencí stojek výdřevy. Nejprve se používala olovnice a pásmo, kterými se měřily pohyby stojek výdřevy ve vztahu k ose výrubu, na každé straně samostatně. Ukázalo se však, že to bylo nepřesné a příliš náchylné k chybám čtení, například z důvodu pohybu šňůry, vyznačující osu ražby. Proto se použil dálkoměr, kterým se měřila vzdálenost mezi protilehlými stojkami, což byl proces opakovatelný s přesností ± 1 mm.

TUNELOVÉ PROPOJKY

Propojky z nových tunelů do nástupištních tunelů se prováděly s použitím standardního postupu. Vzdálenosti byly obvykle krátké, v úrovni osy to bylo běžně 1–3 m. Nejprve se při montáži litinového ostění instalovala sada dílců, tvořící ocelový rám kolem prostupu, a pevně se zainjektovala do stříkaného betonu. Poté se stříkaný beton vybural



Obr. 10 Šachta výtahu pro pohybově postižené osoby u přístupu na trasu Piccadilly po betonáži

Fig. 10 The PLA MIP lift shaft after concreting

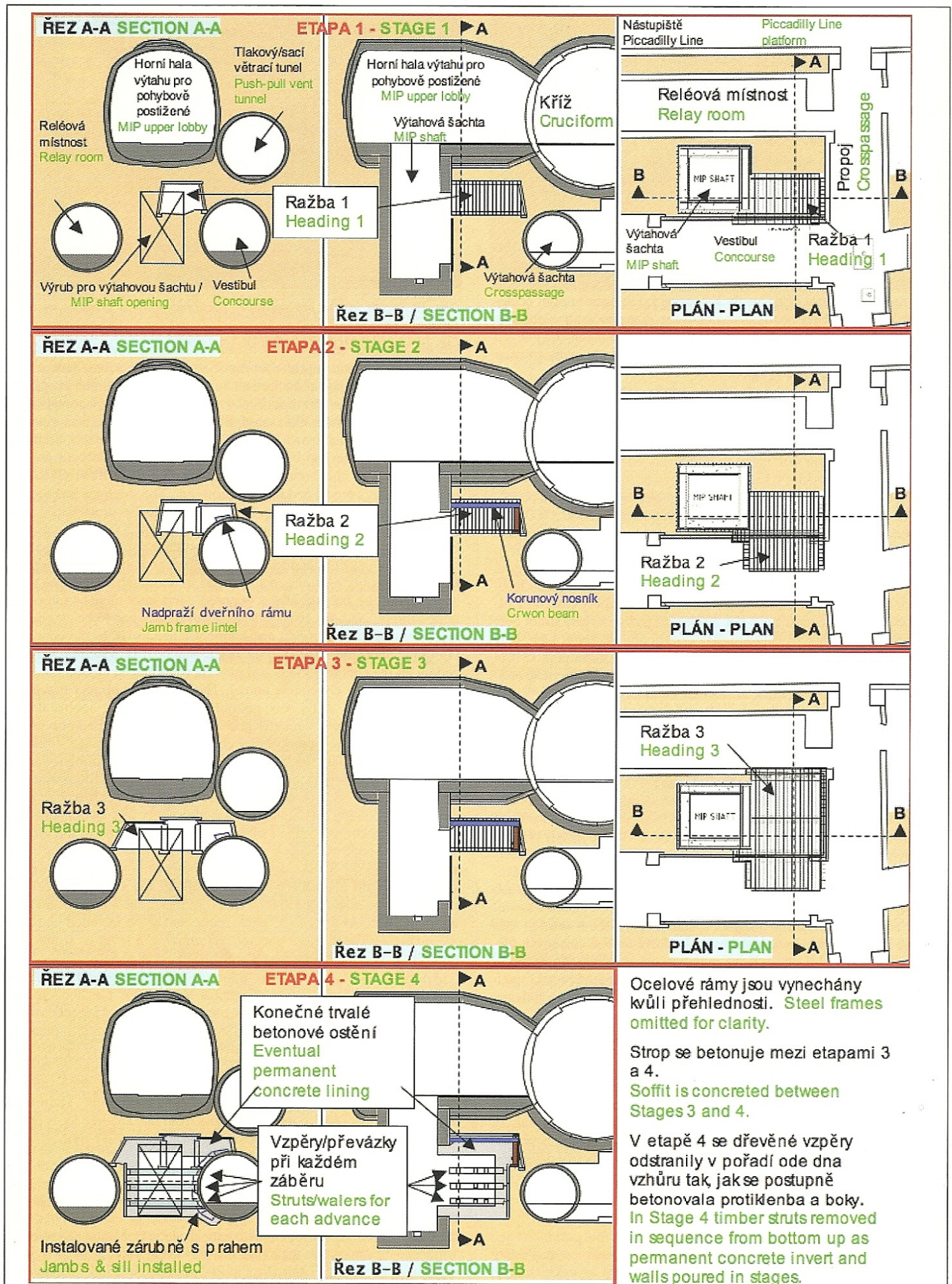
installed and were supported at the shaft end by brackets bolted into the shaft concrete and at the far end by 300 x 300 mm timber props resting on 450 x 600 x 150 mm deep concrete footblocks (Figure 12). As the side headings were excavated, the headboards could be supported by the flange of the crown beam. The sidetrees of the side headings were held in at the top by a yankee brob (a steel plate bent into an S-shape) and at the bottom rested on the adjacent existing tunnel linings, which were of cast iron construction. The sidetrees had a sprag of 1:6. Then another 1m was excavated vertically downwards with facing timbers on the left hand side supported by 300 x 150 mm timber walers and struts, held in place against the existing concourse tunnel lining on the right hand side by steel brackets. In this small space, the lintel and top sections of the jamb frame had to be installed on the outside of the exposed concourse tunnel lining, and bolted through. Again, like the shaft, steel frames had to be assembled and wrapped in steel mesh, ensuring sufficient cover to the concrete. Grout/breather tubes were affixed to the headboards, waterbar was placed on all the concrete joints and gaskets were placed around the future opening in the concourse tunnel. Then the soffit shutter had to be built inside. The soffit was poured from the upper lobby above, through four 250 mm diameter holes that had been drilled previously for this purpose. Self-compacting concrete was used, since vibration was not possible. The finish was excellent and back-grouting found no voids. The commitment and skill applied by the miners, fitters and carpenters in order to overcome the difficulties of this part of the work and produce such a high quality finished product was awe-inspiring.

Once the soffit had gained sufficient strength to support the ground above, the shutter was struck and the rest of the lower lobby was excavated downwards in two stages, installing two more levels of timber walers and struts at each stage. Once complete, the rest of the steel frames had to be assembled and wrapped in mesh, the lower sections of the jambs and the sill of the jamb frame had to be installed and then the invert and walls were concreted, removing a level of struts with each pour. The work area was therefore very congested.

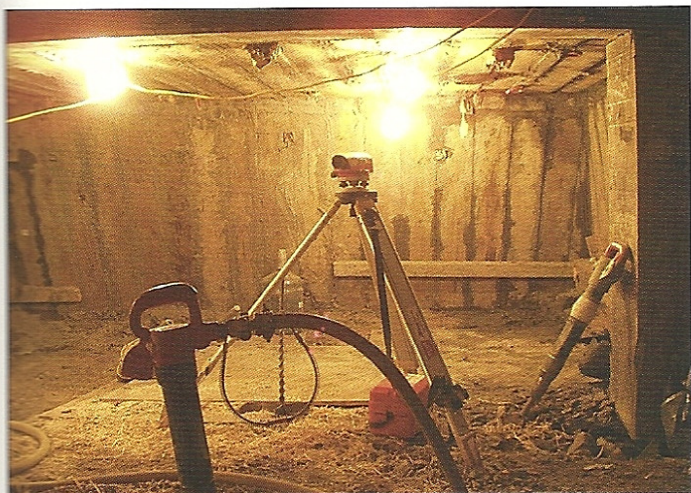
All the timber headings were monitored by the engineers to ensure that movements were within acceptable limits. This was achieved by levelling the crown beams and by measuring the convergence of the sidetrees. At first a plumb-bob and tape measure was used to measure the movement of the sidetrees relative to the centreline of the excavation on each side independently. However, this was found to be inaccurate and too susceptible to misreading caused by, for example, movement of the stringline marking the centreline. Therefore, a distometer was used to measure across from one sidetree to its opposite number, which was repeatable to an accuracy of ± 1 mm.

CROSSPASSAGES

Crosspassages from new tunnels into existing platform tunnels followed a standard sequence. Usually the distances were short, with a typical distance at axis level of 1-3 m. First, a steel frame opening set would be erected while installing the SGI lining, and grouted tight to the sprayed concrete. Then, the sprayed concrete would be broken out and the crosspassage would be excavated by hand in 9 stages. First, the central top heading would be excavated as shown in Figure 13, exposing the existing tunnel lining, and crown beams installed. Then the



Obr. 11 Dolní hala výtahu pro pohybově postižené osoby u přístupu na trasu Piccadilly – postup výstavby
Fig. 11 Construction sequence of the PLA MIP lift lower lobby



Obr. 12 Kalota dolní haly výtahu pro pohybově postižené osoby u přístupu na trasu Piccadilly – pohled od tunelu vestibulu

Fig. 12 Top heading of the PLA MIP lift lower lobby viewed from the concourse tunnel side of the excavation

a provedla se ruční ražba propojky, rozdělená do 9 fází. Nejprve se razil střed kaloty (obr. 13). Když se odkrylo ostění tunelu, osadily se korunové nosníky. Následovala ražba levé a pravé boční štoly kaloty, kde se pažení stropu výrubu opíralo na jedné straně o pásnice korunových nosníků a na druhé straně o stojky výdřevy. Potom se zabetonoval strop. Následovala ražba protiklenby ve třech stupních a betonáž protiklenby. Nakonec se vyrazil střed a vybetonovaly se stěny. Injektáž za výdřevu bylo obvykle možné provádět pouze v nočních směnách, kdy byly trasy metra zavřené, pro případ, že by si injektáž našla cestu až na nástupiště.

Spíše než zárubňovým rámem, přišroubovaným k vnějšímu líci ostění tunelu, který byl používán u výtahu pro pohybově postižené osoby, byly prostupy v litinovém ostění stávajících tunelů zajišťovány sadou dílců pro prostupy. Ty se instalovaly v nočních směnách, v nástupištích tunelech v době výluk provozu vlakových souprav, určených pro údržbu, před ražbou propojek. Nástupiště se musela každé ráno předávat zpět pro použití veřejnosti. Na obr. 14 je dvojice dokončených propojek v přístupu na trasu Northern Line. Prostupy na nástupiště se musely uzavřít, aby se pracoviště oddělilo od provozovaných nástupišť a byla zajištěna bezpečnost veřejnosti.

KOMPENZAČNÍ INJEKTÁŽ

Kompenzační injektáž se užívala k vyrovnávání sednutí způsobených ražbami. Sestava pro kompenzační injektáž byla instalována ve střední úrovni uzlové šachty (Hub Shaft), aby se snížilo sedání hotelu Great Northern Hotel při stavbě eskalátorového tunelu přístupu na trasu Northern Line. Podobně se sestava pro kompenzační injektáž instalovala z tunelu Maiden Lane (obr. 15) nad spojovacím tunelem na přístup k trase Piccadilly, „křížem“ a eskalátorem, aby se kompenzovalo sedání nádraží King's Cross, které je přímo nad nimi včetně citlivé střední nosné stěny mezi dvěma hlavními klenbami. Tři úrovně vrtů, které jsou vidět na obr. 15, se vrtaly pod různými úhly z tunelu Maiden Lane tak, aby se v půdorysném pohledu vytvořila mříž. Tím se zajistilo dosažení dobrého



Obr. 14 Dvojice dokončených propojek v přístupu na trasu Northern Line
Fig. 14 A pair of finished crosspassages in the Northern Line Access



Obr. 13 První ruční ražba s výdřevou v kalotě propojky; na konci lze vidět odkryté stávající tunelové litinové ostění

Fig. 13 The first timber top heading of a crosspassage. The existing cast iron tunnel lining can be seen exposed at the end

left and right top headings would be driven with the headboards supported by the flanges of the crown beams on one side and by the siderees on the other side. Then the soffit would be concreted. Next, the invert would be excavated in 3 stages and concreted, and finally the middle would be excavated and the walls concreted. Usually the timbers could only be grouted during the nightshift while the underground lines were closed, in case grout found its way through to the platforms.

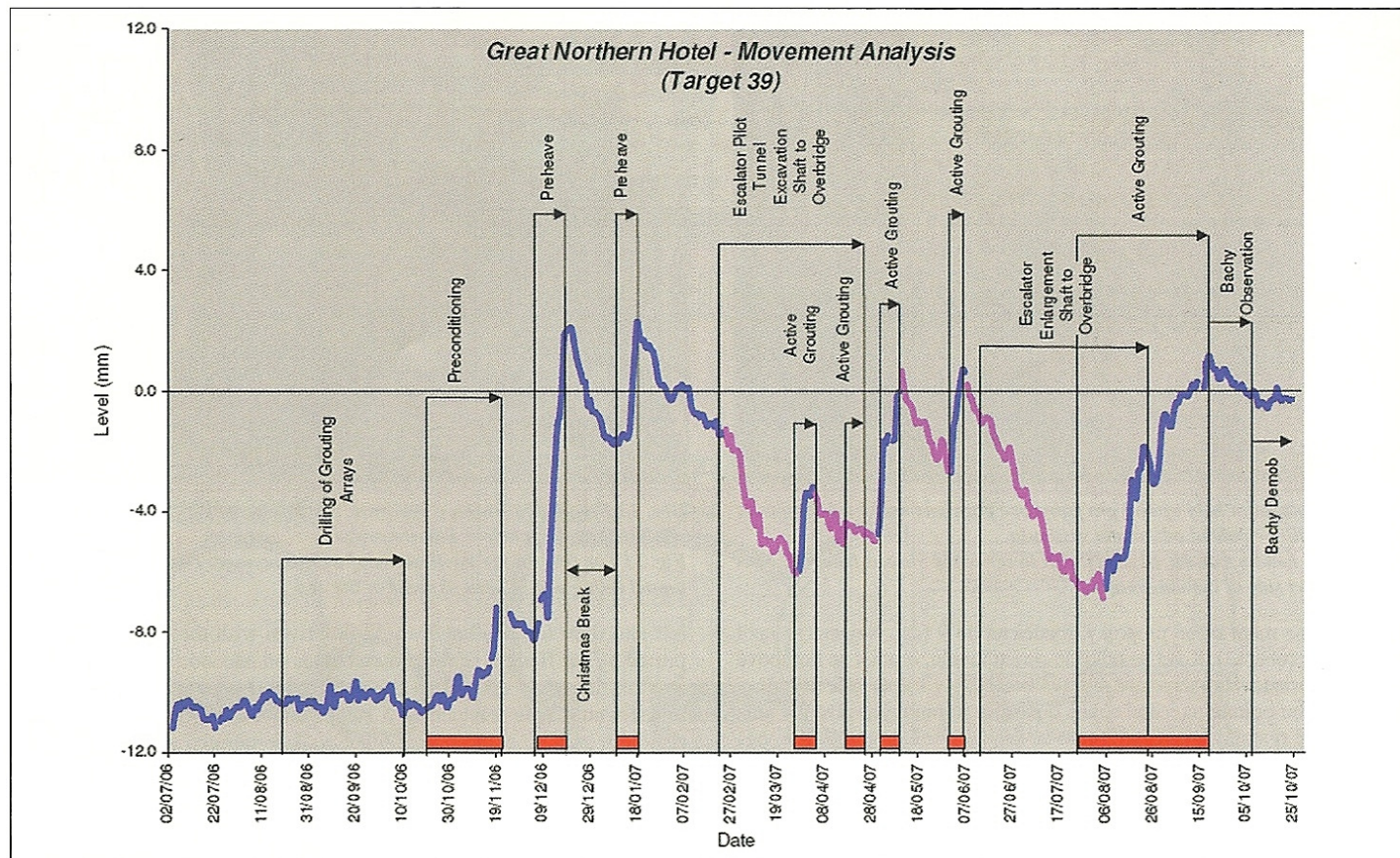
The openings in the existing cast iron tunnel linings were supported by an opening set, rather than a jamb frame bolted onto the outside of the tunnel lining as was done in the MIP lift. These were installed in the working platform tunnels at night during engineering hours when the trains were not running, before the crosspassages were excavated. Every morning the platform had to be handed back for public use. Figure 14 shows a pair of finished crosspassages in the Northern Line Access. The opening into the platforms had to be sealed to separate the worksite from the live platforms to ensure the safety of the public.

COMPENSATION GROUTING

Compensation grouting was used to counteract settlements caused by the tunnelling. A compensation grouting array was installed at an intermediate level in the Hub Shaft to mitigate settlement of the Great Northern Hotel while the Northern Line Access escalator tunnel was being constructed. Similarly a compensation grouting array was installed from the Maiden Lane tunnel (Figure 15) above the Piccadilly Line Access passageway, cruciform and escalator to mitigate settlement of King's Cross railway station directly above, including the sensitive spine wall between the two main arches. The three levels of boreholes that can be seen in Figure 15 were drilled at different angles from the Maiden Lane tunnel, to produce a lattice of boreholes in plan. This



Obr. 15 Vrtvy pro kompenzační injektáž ve starém tunelu Maiden
Fig. 15 Compensation grouting boreholes in the old Maiden Lane tunnel



Obr. 16 Účinek systému kompenzační injektáže z „uzlové šachty“ na sedání hotelu Great Northern Hotel
 Fig. 16 Effect of Hub Shaft compensation grouting array on settlement of the Great Northern Hotel

pokrytí oblasti a snížení vlivu případných chyb v důsledku nepřesností směru vrtání.

Pohyby hotelu Great Northern Hotel nad eskalátorem přístupu na trasu Northern Line jsou vidět na obr. 16. Kompenzační injektáž byla velmi úspěšná a udržela pohyby v přijatelných mezích hlavně tak, že se terén nadvzdvihl předem, před zahájením ražeb eskalátorového tunelu, a pohyby se vyrovnávaly následně.

ZÁVĚR

Ražby tunelů na projektu přestavby stanice metra King's Cross byly velmi úspěšné. Nedošlo k žádnému poškození stávající infrastruktury ani na povrchu ani v podzemí, a ohromné množství lidí, pohybujících se v ulicích, cestujících londýnským metrem nebo nastupujících na vlaky jedoucí na sever Anglie na nádraží King's Cross, nebylo nikdy vystaveno žádnému riziku. Jednou, a to brzy, snad budou potěšeni vylepšenou stanicí metra s její zvýšenou kapacitou a zlepšenou přístupností. Stavěli ji nikým nevidění pracovníci pouze několik metrů (a někdy i méně než metrů) od míst, kde každý den stáli a čekali na příjezd svého vlaku.

DR. BENOÎT D. JONES M. Eng. Eng. D.,
 benoitjones@yahoo.co.uk, MORGAN EST

Poděkování

Poděkování patří všem těm, kteří pro tento článek poskytli své nápady, diagramy a fotografie, včetně Albin Reinhart, David Terry and Andy Sindle. Projekt byl úspěšně dokončen díky velkému počtu zapojených lidí z firem Morgan Est, Beton- und Monierbau, jejich poddodavatelů a investora Metronet.

Recenzoval: Ing. Matouš Hilar, MSc., Ph.D., CEng., MICE

ensured that good coverage of the area would be achieved and errors due to inaccuracies of drilling alignment would have less effect.

The movements of the Great Northern Hotel above the Northern Line Access escalator are shown in Figure 16. The compensation grouting was very successful and kept the movements within acceptable limits, mainly by preheating the ground before excavation of the escalator tunnel and compensating for movements afterwards.

CONCLUSIONS

The tunnelling for the King's Cross Underground Station Redevelopment project was very successful. No damage was caused to existing infrastructure, either at the surface or underground, and the huge numbers of people walking through the streets, using the London Underground or boarding trains to the North of England in King's Cross railway station were never put at risk. One day soon they will hopefully be delighted by the improved underground station, with its increased capacity and improved accessibility, that was being built by an unseen workforce just metres (and sometimes much less than metres) from where they were standing every day waiting for their train to arrive.

DR. BENOÎT D. JONES M. Eng. Eng. D.,
 benoitjones@yahoo.co.uk, MORGAN EST

Acknowledgements

Thanks are due to all those that provided ideas, diagrams and photos for this paper, including Albin Reinhart, David Terry and Andy Sindle. The project was completed successfully due to a large number of dedicated people at Morgan Est, Beton- und Monierbau, their subcontractors and the client Metronet.

LITERATURA / REFERENCES

- BS1881 Part 105 (1984). *Testing concrete – part 105: Method for determination of flow*. London: British Standards Institution.
- Hilar, M., Thomas, A. H. & Falkner, L. (2005). Nejnovější inovace v provádění ostění ze stříkaného betonu – metoda LaserShell. *Tunel*, prosinec 2005, 11-19.
- Österreichischer Betonverein (1999). *Sprayed Concrete Guideline*, 83pp., Austrian Concrete Society. Vienna: ÖBV.
- Williams, I., Neumann, C., Jäger, J. & Falkner, L. (2004). Innovativer Spritzbeton-Tunnelbau für den neuen Flughafenterminal T5 in London (Innovative Shotcrete Tunnelling for London Heathrow's new Terminal 5). *Proc. Österreichischer Tunneltag 2004*, Salzburg, Austria, pp.41-61. Salzburg: Die SIGN Factory.