

AUTOMATICKÝ MONITORING PROVOZOVANÝCH ŽELEZNIČNÍCH TUNELŮ NA HEATHROW

AUTOMATIC MONITORING OF OPERATING RAILWAY TUNNELS AT HEATHROW

MATOUS HILAR, PAUL LYONS, AIDAN LAMBEER

1. ÚVOD

Stavba nového terminálu 5 na londýnském letišti Heathrow zahrnuje realizaci systému ražených tunelů o délce 13 km (Hilar a kol. 2005). Ražba tunelů pod používaným letištem přináší značné riziko pro jeho funkčnost. Snížení tohoto rizika na minimum bylo jedním z klíčových aspektů stavby (Williams 2005). Jedním z nejnáročnějších úkolů byla ražba tunelů v těsné blízkosti stávajících železničních tratí. Obě trouby silničního tunelu na letištní straně (Airside Road Tunnel – ART) procházely nad současným tunelem trati Heathrow Express (HEX) ve vzdálenosti 3,5 m. Obě trouby trati Heathrow Express Extension (HEEx) podcházely provozovaný tunel smyčky trati Piccadilly ve vzdálenosti 6,9 m a ražba trati Piccadilly Extension (PiccEx) podcházela ve vzdálenosti 3,9 m pod tunelem Piccadilly.

Všechny železniční tunely byly v průběhu ražeb, realizovaných v jejich těsné blízkosti, za provozu. Železniční svršek je velmi citlivý na deformace a větší deformace by mohly vést k zastavení provozu a značným finančním ztrátám. Následující článek popisuje různé systémy automatického monitoringu použitého na terminálu 5 společně s vyhodnocením naměřených hodnot.

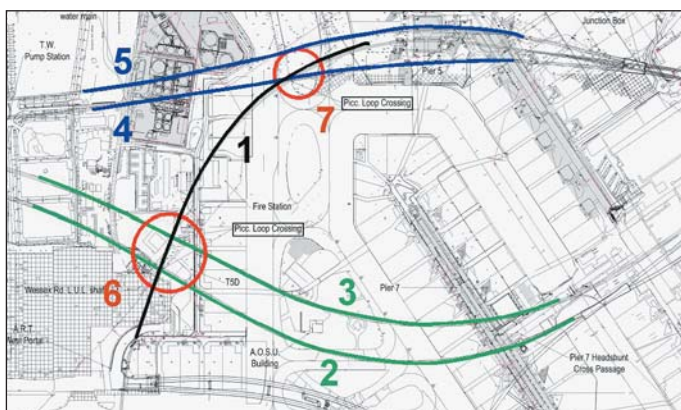
2. ORGANIZACE STAVBY

Investor, společnost BAA plc, si najal společnost Mott MacDonald jako generálního projektanta všech podzemních staveb a sdružení Morgan-Vinci Joint Venture (MVJV) jako generálního zhotovitele tunelů. Firma Mott MacDonald zaměstnala specializované subdodavatele na instalaci monitorovacích systémů a obsluhu těchto systémů během ražeb. Společnost Mott MacDonald odpovídala za návrh systémů monitoringu, dozor osazení monitoringu, testování citlivosti monitoringu a za vyhodnocování výsledků monitoringu během ražeb. Všechny postupy musely být schváleny zúčastněnými stranami, především majiteli stávajících tunelů, kterými jsou London Underground Limited (LUL) a Heathrow Express/Network Rail spolu se zhotovitelem tunelů a firmou BAA.

3. RAŽBA POD TUNELEM SMYČKY TRATI PICCADILLY

3.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE

Smyčka trati Piccadilly tvoří podzemní železniční spojení mezi stanicemi Hatton Cross, Terminal 4 a Central Terminal Area (CTA) na Heathrow. Jedná se o tunel s vnitřním průměrem 3,81 m, který byl vybudován v roce 1983 a jde především o prefabrikované betonové ostění s klínovým zámekem. Dílce ostění jsou z prostého betonu a ostění není po obvodu injektováno. Dokončený a vystrojený úsek tunelu Piccadilly zahrnuje i rozšířený úsek (délka 1 m,



Obr. 1 Relativní poloha ražeb pod smyčkou trati Piccadilly: 1 - Smyčka trati Piccadilly, 2 - HEEx DL, 3 - HEEx UL, 4 - PiccEx WB, 5 - PiccEx EB, 6 - Ražba HEEx, 7 - Ražba PiccEx WB

Fig. 1 Relative position of Piccadilly Loop crossings: 1 - Piccadilly Line Loop, 2 - HEEx DL, 3 - HEEx UL, 4 - PiccEx WB, 5 - PiccEx EB, 6 - HEEx crossings, 7 - PiccEx WB crossing

1. INTRODUCTION

Construction of new Terminal 5 at Heathrow considers excavation of a 13km long system of driven tunnels (Hilar et al. 2005). Tunnelling under the live airport brings a significant risk to its operation; the reduction of this risk to a minimum was one of the project key issues (Williams 2005). One of the most challenging tasks was tunnelling in close proximity to existing railways. Both drives of the Airside Road Tunnels (ART) were excavated above existing Heathrow Express (HEX) tunnel with clearance 3.5m. Both drives of Heathrow Express Extension (HEEx) and one drive of Piccadilly Line Extension (PiccEx) were excavated below existing Piccadilly Loop tunnel with clearances 6.9m and 3.9m respectively.

All the existing railway tunnels were in operation during the tunnelling in their proximity. Railway infrastructure is very sensitive to deformation and high movement could lead to services being stopped and substantial financial losses. The following paper describes different automatic monitoring systems used at Terminal 5 together with the evaluation of monitored values.

2. ORGANISATION OF WORKS

The client, BAA plc, employed Mott MacDonald as the principal designer of all underground structures and Morgan-Vinci Joint Venture (MVJV) as principal tunnel constructor. Mott MacDonald employed specialist subcontractors for installation of the monitoring systems and control of the systems during crossings. Mott MacDonald was responsible for the design of the monitoring systems, supervision of installation, commissioning, interrogation and interpretation of monitored values during the crossings. All procedures had to be agreed with the stakeholders, the owners of the existing tunnels - London Underground Limited (LUL) and Heathrow Express/Network Rail in conjunction with the constructor and BAA.

3. PICCADILLY LOOP CROSSINGS

3.1 BASIC DATA

The Piccadilly Line Loop forms an underground rail link between Hatton Cross station, Terminal 4 station and Central Terminal Area station at Heathrow. The 3.81m internal diameter tunnel was constructed in 1983 and is primarily of pre-cast concrete expanded segmental lining. The segments are not reinforced and the lining is not grouted. The instrumented section of the tunnel incorporates the Wessex Road escape shaft emergency access platform which includes a large (17m long, 8.25m diameter) bolted cast iron section along the platform area.

Construction of three new tunnels had to cross very close under this existing tunnel: PiccEx Westbound (WB), HexEx Downline (DL) and HexEx Upline (UP). Fig. 1 shows the overview indicating the relative position of the mentioned tunnels. HEEx tunnels crosses under the Piccadilly Loop perpendicularly. PiccEx WB tunnel crosses under the existing tunnel at a skewed angle, thus a longer section of the tunnel was within the zone of influence.

All PiccEx and HexEx tunnels were constructed using Dosco shields (Hilar et al. 2005). The pre-cast concrete segments were erected immediately behind the shield and expanded against the exposed London Clay (wedgeblock construction). Between the Piccadilly tunnel invert and crowns of new tunnels there was a design clearance of 3.89m for PiccEx tunnel and 6.86m for HEEx tunnels.

3.2 REMOTE MONITORING SYSTEMS

The extent of the zone of influence within the Piccadilly Loop was considered to be within 30m either side of the crossing centre line for HEEx tunnels and 40m either side of the crossing centre line for PiccEx tunnels (skewed crossing). For this reason the instrument scheme extended double length of the zone of influence with reference points located a further 36 metres either side.

The remote system enabled real-time readings with detailed structural movements to be obtained during both traffic and engineering hours. This

průměr 8,25 m) s ostěním ze šroubovaných litinových dílců, ve kterých je nástupiště a vstup do únikové šachty.

Pod tunelem Piccadilly bylo nutné podejít ve velmi malé vzdálenosti s ražbou tří následujících tunelů: PiccEx Westbound (WB), HexEx Downline (DL) a HexEx Upline (UP). Situace uvedených tunelů je vidět na obr. 1. Tunely HexEx podchází pod Piccadilly v kolmém směru. Tunel PiccEx WB podchází v ostrém úhlu, takže v zóně sedání se nacházel delší úsek.

Všechny tunely PiccEx a HexEx se razily štíty Dosco (Hilar a kol. 2005). Prefabrikované betonové dílce byly osazovány ihned za štítem a byly rozpínány do výrubu v londýnském jílu pomocí klínových dílců. Mezi dnem tunelu Piccadilly a vrcholy klenby nových tunelů byla projektovaná vzdálenost 3,89 m (tunel PiccEx) a 6,86 m (tunely HexEx).

3.2 SYSTÉMY DÁLKOVĚ ŘÍZENÉHO MONITORINGU

Rozsah zóny sedání na trať Piccadilly byl uvažován do 30 m na každou stranu od místa křížení osy tunelů HexEx a 40 m na každou stranu od místa křížení osy tunelů PiccEx (šikmé křížení). Schéma měřících přístrojů zahrnovalo dvojnásobek délky zóny sedání. Referenční body byly umístěny na obou stranách o dalších 36 m dále.

Systém dálkově řízeného monitoringu umožnil měření v reálném čase, takže byly získány podrobné informace o deformacích jak při provozu, tak v době údržby metra. Použitý systém automaticky měřil deformace a dával číselné i grafické výstupy ve speciálním vyhodnocujícím softwaru. Tento software umožňoval vložení konkrétních varovných hodnot pro jednotlivá čtení. Kromě toho byly v systému zahrnuty i výpočty relativních deformací mezi přístroji, což sloužilo jako další kritérium. Systém se skládal z elektrických trámových vodováh, sklonometrů a potenciometrických dilatometrů (obr. 2).

Pro měření zvlnění kolejového lože byly ke dnu tunelu připevňovány **elektrické vodováhy**, které měřily svislý profil v reálném čase. Kotevní body byly umístěny po 2 m, srovnávací bod byl mimo očekávanou zónu sedání (obr. 3 a 4).

Sklonoměry byly použity v měřeném úseku pro určení natočení a zkroucení trati. Tyto přístroje byly umístěny na betonu podél trati a byly orientovány kolmo k ose tunelu (obr. 3 a 4).

Sady **potenciometrických dilatometrů** byly instalovány v pěti předem vybraných profilech uvnitř monitorovaného úseku trati Piccadilly. Jejich účelem bylo měření pohybů spár skládaného ostění po jeho obvodu (obr. 4).

Každý přístroj byl napojen přes multiplexor k elektronickému záznamníku dat. Záznamník byl napájen ze sítě napětím 240V, které bylo transformováno na stejnosměrné napětí 55V, vedené do kapkovitě dobíjené zabudované baterie 12V, používané k napájení přístrojů a zajišťující náhradní napájení v případě výpadku proudu. Záznamník byl pak napojen na kancelář zpracování dat, umístěnou na Wessex Road. Napojení bylo provedeno přes modem na krátkou vzdálenost s kabeláží vedenou skrz šachtu Wessex Road. Záznamník slouží pro vyhodnocování a shromažďování dat v jakémkoliv požadovaném časovém intervalu. Bylo nutné, aby interval byl větší, než je vyšetřovací cyklus (cca 3 minuty). V období křížení byl systém nastaven tak, aby shromažďoval data v intervalech po 15 minutách.

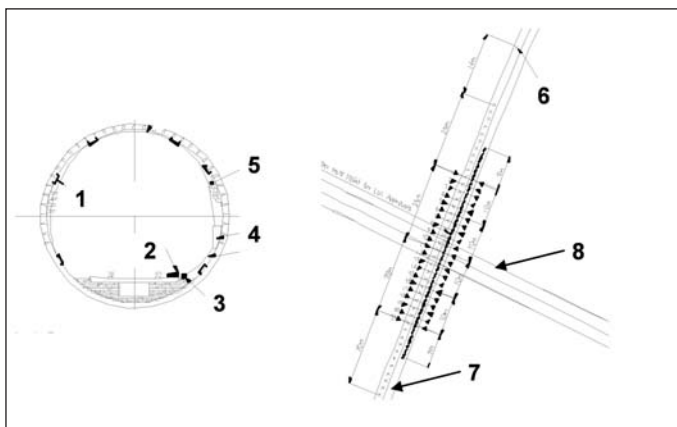
Zpracování dat bylo prováděno jednorázovým systémem, složeným z běžného serveru se čtyřmi PC, který umožňoval prohlížení různých aspektů monitoringu současně. Pro případ poruchy na některém z ostatních PC byly k dispozici náhradní počítače. Toto uspořádání umožňovalo přímý sběr, ukládání, zpracování a vyšetřování výsledků monitoringu. Typické uspořádání softwarových prezentací je zobrazeno na obr. 5 a 6. K zajištění nouzového napájení v případě výpadku proudu v kancelářích byly do tohoto uspořádání zapojeny také dva systémy nepřetržitě dodávky proudu (UPS).

3.3 SYSTÉM MANUÁLNÍHO MONITORINGU

Systém manuálního monitoringu byl zcela nezávislý na automatickém systému. Jelikož provoz v železničním tunelu byl zachován po celý den, data



Obr. 3 Elektrické vodováhy (vlevo) a sklonoměry (vpravo) instalované na trati
Fig. 3 Electrolevel beams (left) and tiltmeters (right) installed on track



Obr. 2 Typické uspořádání přístrojů (HexEx UL): 1 - Dilatometr, 2 - Sklonometr, 3 - Elektrická vodováha, 4 - Multiplexor nebo záznamník dat, 5 - Kabely, 6 - Referenční bod, 7 - Smyčka trati Piccadilly, 8 - HexEx UL
Fig. 2 Typical arrangement of instruments (HexEx UL): 1 - Jointmeter, 2 - Tiltmeter, 3 - Electrolevel beam, 4 - Multiplexer or data logger, 5 - Cables, 6 - Reference point, 7 - Piccadilly Line Loop, 8 - HexEx UL

system automatically read and provided numerical and graphical outputs in specialist software presentation software, the software allowed specific safety trigger values to be inputted for individual readings. In addition, calculations between instruments were included to provide further parameters. The system consisted of electrolevels in the form of beams, tiltmeters and potentiometric crackmeters (Fig. 2).

To measure undulation of the track bed, a string of **electrolevel beams** were fixed to the invert of the tunnel, to provide a real time measurement of the vertical profile. The anchorage points were spaced at 2m intervals with the datum outside the predicted zone of influence (Figs. 3 and 4).

To identify track twist and cant, **tiltmeters** were used within the instrumented section. These were positioned on the track secondary concrete and orientated perpendicular to the line of tunnel (Figs. 3 and 4).

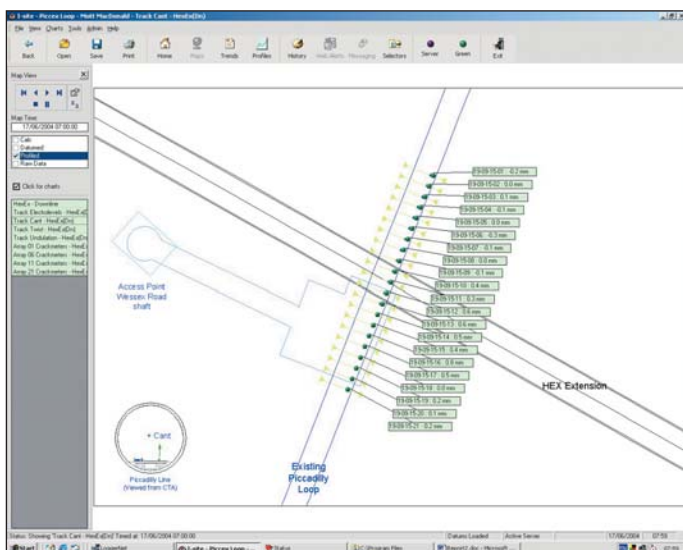
Arrays of **potentiometric crackmeters** were installed at five pre-selected arrays within the instrumented section of the PiccLoop to monitor segmental joint movements around its circumference (Figs. 4).

Each instrument was hard wired via a multiplexor to an electronic data logger. The logger was powered from a 240v mains spur, which was stepped down to 55vAC and fed in to 12v trickle charge integral logger battery, which was used to power the instruments and provide back up power in the event of power failure. The logger was then linked to a data processing centre in at offices situated at Wessex Road via a short haul modem with the cabling routed through the Wessex Road shaft. The logger was used to interrogate and capture data at any time interval required which was greater than the interrogation cycle interval of circa 3minutes. During the crossing period the system was set to capture data at 15minute intervals.

The data processing was undertaken by a dedicated system comprised common server with four PC's, allowing different aspects of the monitoring to be viewed at the same time. In the event of any of the other PC developing a fault, back up PC's were available. This configuration enabled direct collection, storage, process and interrogation of the instrumentation system. Typical software presentation layouts are shown in Figs. 5 and 6. To provide emergency power in the event of the office power failure two U.P.S.'s were linked to this configuration.



Obr. 4 Fotografie ukazuje (zprava doleva) sklonometr, elektrickou vodováhu, potenciometrický dilatometr a kabeláž vedenou na ostění tunelu
Fig. 4 Photo shows (from right to left) tiltmeter, electrolevel beam, potentiometric crack meter, and cabling routed up tunnel lining.



Obr. 5 Program I-site ukazuje místo a označení sklonoměřů (ražba HExEx DL); buňky ukazují monitoringem zjištěný pohyb – jejich zelená barvy znamená, že nebylo dosaženo žádné varovné hodnoty

Fig. 5 I-site software shows position and identification of the tiltmeters (HExEx DL crossing). Boxes indicate monitored movement; their green colour indicates that no trigger has been reached.

z manuálně prováděného monitoringu byla získávána v době údržby metra, kdy nebyl tunel v provozu. Tento manuálně prováděný monitoring zahrnoval přesnou nivelaci trati, lože a vrcholu klenby ostění, měření tvaru oblouku trati, konvergenční měření pásmovými extenzometry a geodetická měření konvergenčních bodů.

Manuální systém umožňoval:

Získání dat neměřených automatickým systémem (tvar oblouku trati a konvergence).

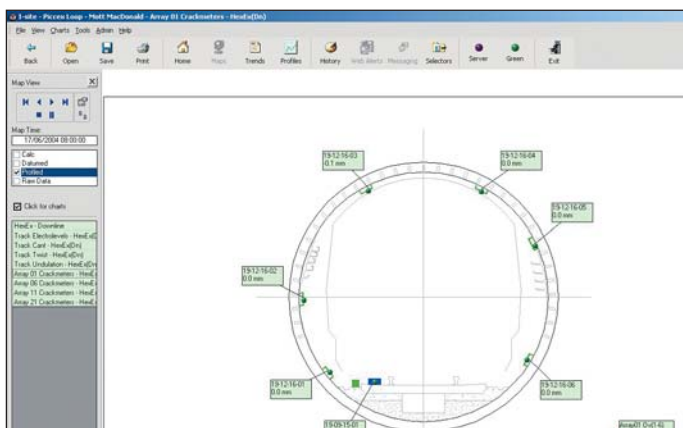
Jistý stupeň zálohy pro automatický systém.

Systémovou kontrolu a kontrolu dat, získaných automatickým systémem.

Před zahájením ražby pod metrem byla prováděna přesná nivelace pro získání skutečného podélného profilu trati. Tato informace byla potřebná, aby bylo možno odvodit bezpečnostní varovné hodnoty. Aby byly získány informace o zvlnění, zkroucení, příčném naklonění trati a deformacích vrcholu klenby, bylo používáno přesné nivelace, ze které vyplynuly svislé posuny zóny sedání. Niveláčnické body byly umístěny na obou stranách trati. Umístění těchto bodů se shodovalo s umístěním automatického monitoringu. Další niveláčnické body byly umístěny v určité vzdálenosti od zóny sedání, aby je bylo možné použít jako referenční body. Měření tvaru oblouku trati po celé délce zóny sedání bylo získáváno pomocí totální stanice. Pro získávání údajů o průjezdním profilu po délce úseku automatického monitoringu byly používány pásmové extenzometry.

3.4 VÝSLEDKY RAŽBY PICCEX WB

Během ražby pod trasou Piccadilly byla rychlost postupu štítu okolo 50 metrů za den. Přístroje začaly reagovat na vibrace štítu, když se přiblížil na vzdálenost 25 – 30 m. Reakce se projevila jako zvýšený rozptyl dat, i když celkový trend zůstal horizontální. Když byl štít ve vzdálenosti 18 m od přístroje, byl již vývoj deformačních změn v příslušném souboru dat znatelný.



Obr. 6 Program I-site ukazuje místo a označení dilatometrů (ražba HExEx DL)
Fig. 6 I-site software shows position and identification of the crackmeters (HExEx DL crossing)

3.3 MANUAL MONITORING SYSTEM

The manual monitoring system was entirely independent of the automatic system. Because the rail tunnel was operational throughout the day all data from the manual system was obtained during Engineering hours whilst the tunnel and rail system was closed. This manual monitoring system comprised of precise levelling of the track, bed and crown, track versine, tape extensometer measurements and total station/prism survey.

The manual system enabled:

Data that was otherwise unobtainable such as track versine and convergence.

A degree of redundancy to the remote monitoring system.

A systems and data check to the remote system.

Prior to the crossings a precise level track survey was undertaken to attain the true vertical profile of the track, with this information safety trigger values could be derived. In order to obtain track information for undulation, twist and cant and crown profile movements, precise levelling techniques were used to obtain vertical displacements along the length of the zone of influence. The levelling points were positioned in sets of three, one in the tunnel crown to obtain an invert level and one either side of the track. The position of the points coincided with the instrument arrays. Additional levelling points were positioned some distance away from the zone of influence to be used as reference objects. Using a total station, track versine was obtained along the length of the zone of influence. To obtain the kinetic envelope along the length of the instrumented zone, tape extensometer measurements were taken.

3.4 RESULTS OF PICCADILLY EXTENSION WEST BOUND CROSSING

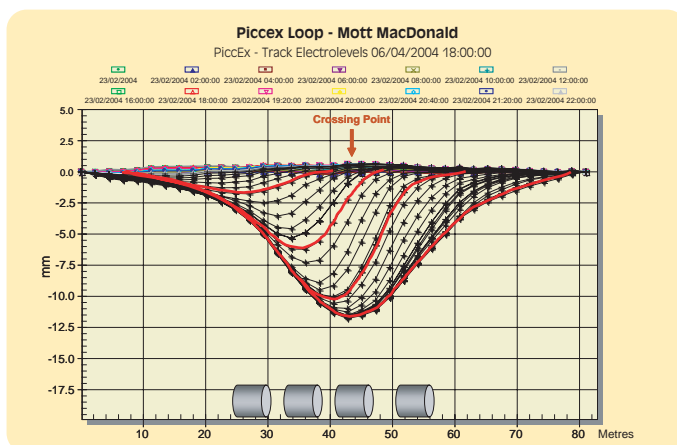
During the crossing period the shield rate of advancement was around 50 metres per day. The instruments began to react to the shield vibration 25-30m away, the reaction showed up as increased data scatter, although the overall trend remained horizontal. When the shield was within 18m of the instrument the development of the deformation trend within the relevant data set was apparent.

Fig. 7 shows the track bed response at the centre of the section where the maximum deflection of 11.7mm occurred. There was an initial apparent heave, which obtained a maximum value of 0.7mm; this may be attributed to the shield skin being pushed in to the cutting face. When the shield face was approximately 14m from the crossing centre line, the entire heave had dissipated and the settlement trend had been established. Over a period of 24 hours all the settlement occurred. The track bed then exhibited a partial elastic response and came to rest at a final value of 11.3mm. Comparison to other Piccadilly crossings is shown on Fig. 8.

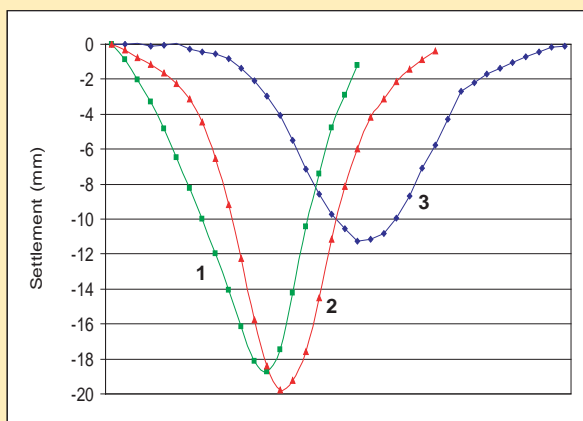
One of the criteria to be measured was vertical deviation between track levels over 5 metre intervals known as track undulation, this was obtained by subtracting alternate electrolevel beam settlement results from each other. Initial alert trigger values, in places, were extremely close prior to any construction activity. These values were set according to the track position prior to the crossing in relation to a point at which track maintenance would be required in accordance to LUL specifications. During the crossing period initial triggers were encroached upon for a brief period; however the final at rest position was well outside any of these triggers (Fig. 9).

3.5 RESULTS OF HEATHROW EXPRESS EXTENSION, DOWN LINE CROSSING

Because the geometry of the Piccadilly Loop within the zone of influence is not uniform through out (enlarged section), the track and crown displacement



Obr. 7 Časový průběh reakce kolejového lože (ražba PiccEx)
Fig. 7 Track bed response in time (PiccEx crossing)



Obr. 8 Srovnání konečného sedání kolejového lože trati Piccadilly na monitorovaných kříženích: 1 - HEEx DL (očekávané sedání 18,9 mm), 2 - HEEx UL (očekávané sedání 20,2 mm), 3 - PiccEx WB (očekávané sedání 11,7 mm)

Fig. 8 Comparison of the final Piccadilly track bed settlements for monitored crossings: 1 - HEEx DL (18.9mm predicted settlement), 2 - HEEx UL (20.2mm predicted settlement), 3 - PiccEx WB (11.7mm predicted settlement)

Na obr. 7 je vidět reakce kolejového lože uprostřed úseku, kde došlo k maximálnímu sedání. Došlo tam k počátečnímu zdánlivému zdvihnutí, které nabylo maximální hodnoty 0,7 mm. To lze přisoudit plášti štítu, který byl zatlačován do čela výrubu. Když bylo čelo štítu asi 14 m od osy křížení, veškeré nadzdvížení vymizelo a začal vznikat trend sedání. Během 24 hodin se odehrálo celé sedání. Kolejové lože pak vykazovalo částečnou pružnou reakci a ustálilo se na konečné hodnotě 11,3 mm. Na obr. 8 je porovnání s ostatní ražbou pod tratí Piccadilly.

Jedním z kritérií, která byla vyhodnocována, byla svislá odchylka mezi výškami kolejí po 5 metrech, známá jako zvlnění trati. Ta byla získávána vzájemným odečítáním sousedních výsledků měření elektrickými vodováhami. Naměřené hodnoty byly někde velmi blízké počátečním varovným hodnotám ještě před započítím ražby tunelu pod tratí. Varovné hodnoty byly stanoveny na základě polohy trati před prováděním křížení a její vzdálenosti od polohy, při které by byla vyžadována údržba (rektifikace polohy) dle technických podmínek LUL. V období provádění křížení byly některé varovné hodnoty na krátkou dobu překročeny, avšak konečná klidová poloha byla značně mimo varovné hodnoty (obr. 9).

3.5 VÝSLEDKY RAŽBY HEXEX DL

Jelikož tvar smyčky trati Piccadilly v zóně sedání nad tratí HexEx UL není jednotný po celé délce (úsek s rozšířeným profilem), není sedání trati a vrcholu klenby symetrické podle osy ražby tunelu. Maximální posunutí ve vrcholu klenby (hodnota -24,6 mm) se nachází s odsazením +4,5 m od osy spodního tunelu. Maximální posunutí levé a pravé kolejnice se nachází s odsazením +6,75 m (hodnota -24,7 mm u levé a -24,6 mm u pravé kolejnice). Výše uvedené odsazení jsou známkou ztužujícího účinku úseku s rozšířeným profilem, kde bylo litinové ostění. Maximální naměřené zkroucení na 10 m mělo hodnotu 6,91 mm. Došlo k němu v oblasti osy. Počáteční vypočtená varovná hodnota byla 29,5 mm. Maximální zkroucení na 2 m bylo 2,9 mm s odsazením +6,75 m, což je podstatně méně, než byla počáteční varovná hodnota 16 mm. Maximální zvlnění trati bylo 5,08 mm a 6,71 mm. Vzniklo v úseku s ostěním z betonových prefabrikátů ve vzdálenosti +6 m respektive +19 m. Příslušné počáteční varovné hodnoty pro tyto body byly +11,1 mm a -8,7 mm.

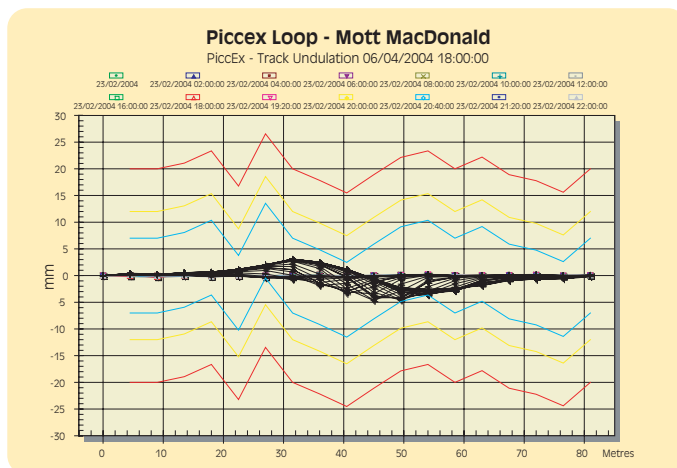
3.6 VÝSLEDKY RAŽBY HEXEX UL

Symetrický tvar trati Piccadilly v zóně sedání nad tratí HexEx UL se promítá do deformací trati a vrcholu klenby, které vykazují symetričnost kolem osy ražby spodního tunelu. Maximální posunutí ve vrcholu klenby bylo -20,3 mm. Maximální posunutí kolejnic bylo -1,8 mm u levé a -21,7 mm u pravé kolejnice. Výsledky zkroucení na 10 m leží v rozmezí pásma +/-2 mm, což zdůrazňuje velmi nízké naměřené hodnoty. Pro porovnání první varovná hodnota byla stanovena výpočtem na 31,9 mm. Maximální zkroucení na 2 m bylo 1,4 mm, což bylo značně pod původní varovnou hodnotou 18 mm. Maximální zvlnění trati bylo 6,7 mm (pro odsazení -12 m) a -9,1 mm (pro odsazení +12 m).

4. RAŽBY NAD TRATÍ HEATHROW EXPRESS

4.1 POPIS

Tunel na letištní straně (ART) je 1250 m dlouhý s dvěma tunelovými trouhými, který spojuje oblast centrálního terminálu (Central Terminal Area - CTA) se stáním letadel na západním okraji letiště a s novým terminálem 5, který je



Obr. 9 Vývoj zvlnění trati, vyvolané ražbou PiccEx, a jeho srovnání s varovnými hodnotami

Fig. 9 Development of track undulation caused by PiccEx crossing and its comparison to trigger limits.

sections are not symmetrical about the tunnel drive centre line. The maximum crown displacement occurs at +4.5m offset from centreline with -24.2mm. The maximum left and right rail displacement occurs at a +6.75m offset with -24.7mm and -24.6mm respectively. The offsets mentioned above are indicative of the stiffening effect from the enlarged cast iron sections. The maximum monitored 10m twist had a value of 6.91mm occurring around the centre line. The initial trigger value has been calculated at 29.5mm. The maximum 2m twist was 2.9mm at +6.75m offset well below the initial trigger value of 16mm. The maximum track undulation was 5.08mm and -6.71mm occurring in the precast concrete section at +6m and +19m respectively. The respective initial triggers for these points were +11.1mm and -8.7mm.

3.6 RESULTS OF HEATHROW EXPRESS EXTENSION, UP LINE CROSSING

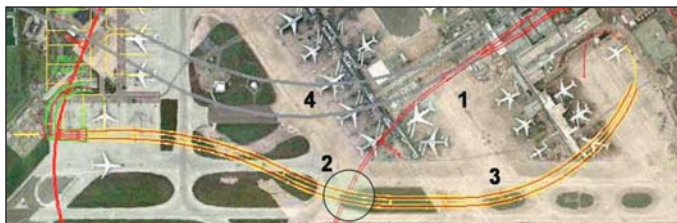
The geometry of the Piccadilly Loop crossing within the zone of influence of the HexEx Up Line was to a great extent symmetrical, this is reflected in the track and crown displacement sections which are exhibiting symmetry about the tunnel drive centre line. The maximum crown displacement was -20.3mm. The maximum left and right rail displacement was -21.8mm and -21.7mm respectively. The 10m twist results mainly lie within a +/-2mm band highlighting the small readings obtained. For comparison the initial trigger was calculated at 31.9mm. The maximum 2m twist was 1.4mm, which was well within the initial trigger value of 18mm. The maximum track undulation was of 6.7mm and -9.1mm occurring at -12m and +12m offset respectively.

4. HEATHROW EXPRESS CROSSINGS

4.1 DESCRIPTION

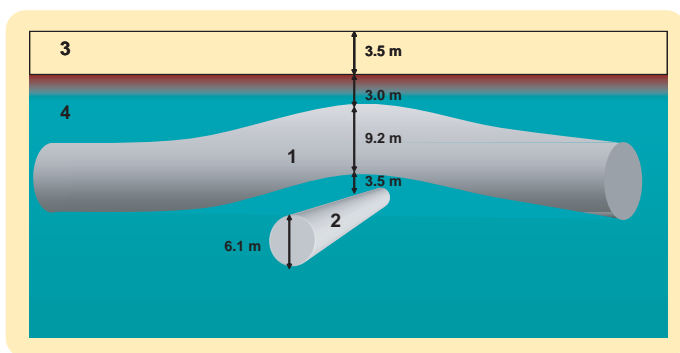
The Airside Road Tunnel (ART) is a 1250 m long twin-bored tunnel that connects the Central Terminal Area (CTA) of Heathrow Airport with outlying aircraft stands located on the western perimeter of the airfield and the new Terminal 5 building which is in the process of construction (Hilar et al. 2005). The ART has been constructed in two passes: the first pass is the construction of the Eastbound (EB) tunnel and the second pass is the construction of the West Bound (WB) tunnel. Both tunnels were constructed using 9.2m full-face TBM by driving from West to East (Williams et al. 2003).

Almost bisecting the ART route is the subsurface running tunnel of the Heathrow Express (HEX), which is the principal passenger connection



Obr. 10 Situace přechodu tunelů ART nad tunelem trati HEX: 1 - Tunel trati Heathrow Express, 2 - Tunel ART procházející nad tunelem HEX, 3 - Silniční tunel na letištní straně (Airside Road Tunnel - ART), 4 - Nové tunely prodloužení trati HEX (HexEx)

Fig. 10 Layout of ART crossing above HEX: 1 - Heathrow Express Tunnel, 2 - ART crossing above HEX, 3 - Airside Road Tunnel (ART), 4 - New HexEx tunnels



Obr. 11 Příčný řez ražby ART nad HEX: 1 - Silniční tunel na letištní straně (Airside Road Tunnel – ART), 2 - Tunel trati Heathrow Express (HEX), 3 - Terasové štěrky, 4 - Londýnský jíl

Fig. 11 Cross section of ART crossing above HEX: 1 - Airside Road Tunnel (ART), 2 - Heathrow Express Tunnel, 3 - Terrace Gravels, 4 - London Clay

nyní ve výstavbě (Hilar a kol. 2005). Tunel ART byl staven ve dvou etapách. První byla stavba východní trouby (Eastbound – EB), druhá byla stavba západní trouby (West Bound – WB). Oba tunely byly stavěny pomocí plnoprofilového tunelovacího stroje (TBM) o průměru 9,2 m, ve směru od západu k východu (Williams a kol. 2003). Trasu tunelu ART protíná téměř v polovině ražený tunel trati Heathrow Express (HEX), který je pro cestující hlavním spojením mezi CTA a terminálem 4 (obr. 10). Mezi zmíněnými stanicemi funguje obousměrná trať HEX ve směru od severu k jihu, v jedné tunelové trubě o průměru 5,67 m se skládaným klínovým ostěním z betonových prefabrikátů.

Niveleta obou trub tunelu ART je převážně vedena tak, že je osa tunelu v hloubce kolem 20 m pod povrchem. Z důvodu existujícího tunelu HEX bylo ale nutné niveletu tunelu ART ve střední části navýšit tak, aby prošla nad tunelem HEX. Nejmenší vzdálenost vnějších líců ostění je pouhých 3,5 m (obr. 11). Tunel ART prochází přes letiště přibližně ve směru od západu k východu a tunel HEX má trasu ve směru od severu k jihu. Oba tunely se protínají pod úhlem 80 stupňů.

Povolené tolerance kolejí, platné pro údržbu trati, jsou velmi přísné, jelikož koleje jsou upevněny přímo na průběžné betonové kolejové lože, díky čemuž je kolej velmi tuhá. Proto i malé deformace jsou problémem. Tolerance jsou také omezeny tratí v oblouku, což vede k rozdílu výšky kolejnic až 150 mm.

4.2 SYSTÉM MONITORINGU

Hlavním faktorem pro monitoring byla skutečnost, že během ražby bude v tunelu HEX zachován železniční provoz. Bylo zjištěno, že kritické oblasti, které musí být monitorovány, budou blízko průjezdního profilu (obzvláště hrana pochozí lávky, závěsy trakčního vedení a kolejí). Uspořádání monitorovacích přístrojů v tunelu HEX je znázorněno na obr. 12.

Systém monitoring se skládal ze 112 terčů. Jelikož bylo požadováno, aby byla monitorována dvě křížení, bylo původní rozmištění monitoringu navrženo tak, aby byly co nejvíce pokryty deformační zóny od obou trub tunelu ART. Proto byl požadován pouze malý počet hranolů, které měly být přemístěny pro druhé křížení. Obecně byly použity dva druhy měřicích profilů – jednoduché tříbodové profily, skládající se z jednoho bodu ve vrcholu klenby a dvou bodů na tratí. Kompletní profily obsahovaly další body umístěné ve spodní části opěří a v polovině výšky tunelu, což znamenalo 7 bodů po obvodu. Byl také přidán bod na pochozí lávce, který umožňoval hodnocení změn rozměrů průjezdního profilu. Navíc byl přidán další bod na závěsy trakčního vedení, aby bylo možno měřit jeho pohyby.

Pro porovnání s optickými měřeními a pro zajištění zálohy byly v blízkosti terčů v kolejišti instalovány také body pro přesnou nivelaci a sklonoměry (orientace kolmo ke kolejí). Profily se třemi body byly instalovány po 3 m, kompletní profily po 5 m.

Pro sledování všech terčů byly osazeny dva automatické teodolity. Ty byly řízeny pomocí speciálního komunikačního programu. Systém byl nainstalován na počítači určeném pro shromažďování dat. Počítač byl umístěn v únikové šachtě asi 100 m od monitorované zóny. Počítač dostával data od obou totálních stanic přes modem na přenos dat na krátkou vzdálenost. Data ze sklonoměrů dostával přes záznamník (sběrač) dat. Počítač shromažďující data byl napojen na tradiční analogovou telefonní linku, která umožňovala řízení a přenos dat do počítače umístěného v hlavní kanceláři monitoringu.

Data z tunelu byla potom analyzována a předkládána pomocí speciálního prezentačního programu, který vytvářel grafický výstup, a tabulek, ukazujících vazbu na předem stanovené varovné hodnoty. Když systém zjistil varovný stav, sdělil informaci přímo obsluze a předal tuto informaci dispečinku tunelu HEX, který je umístěn na letišti v oblasti centrálního terminálu.

4.3 VÝSLEDKY MONITORINGU

Před zahájením ražeb nad HEX byl posouzen skutečný stav tunelu, kolejí a trakčního vedení. Také bylo provedeno přesné geodetické měření. Výsledky

between the CTA and Terminal 4 (Fig. 10). Between these two stations the HEX operates a bi-directional line, in a north-south direction, in a single 5.67m internal diameter tunnel constructed with an expanded pre-cast concrete segmental lining.

The ART twin bores are typically aligned such that the depth of the tunnel axis is around 20m below the existing ground level. However, due to the existing HEX tunnel, the ART is forced to rise in its central zone to pass above the HEX with a closest distance of just 3.5m, extrados to extrados (Fig. 11). The ART runs approximately west to east across the airport, while the HEX tunnel runs in a north-south alignment; the two tunnels intersect at an angle of 80 degrees to each other.

The allowable track maintenance tolerances for the track are quite stringent as the rails are affixed directly to a continuous concrete track bed, resulting in a very stiff track that is intolerant to minor movements. The tolerance is also restricted by the curve of the tunnel, which requires the rails to be canted up to 150mm.

4.2 MONITORING SYSTEM

A main consideration for monitoring was that the HEX tunnel would be maintained as an operational railway during the construction process. It was identified that the critical areas necessary to monitor would be the structural envelope in particular at the edge of the emergency walkway, movement of the over head line catenary supports, and the track. Fig. 12 shows arrangement of monitoring instruments inside the HEX tunnel.

The monitoring scheme employed the use of 112 mini-prism targets. As the monitoring was required to cover two crossings, the initial prisms layout was designed to accommodate both ART tunnel zones of influence as much as possible, therefore, only requiring a small number of prisms to be relocated for the second crossing. Typically two types of array were installed, simple three point arrays comprising mini-prisms located at the crown position and two mini-prisms in the track. Full arrays included additional prisms located at the shoulder and mid-height of the tunnel giving seven circumferential points and an additional walk way prism was included to provide an assessment of the change in clearance of the structural envelope. In addition, at catenary support arms a further prism was attached to measure catenary movements.

To provide comparison with optical measurements and a degree of redundancy, precise levelling studs were positioned close to the track mini-prism locations and a tiltmeters were orientated perpendicular to the rail. The arrays were spaced at 3m or 5m intervals for three point arrays and full arrays respectively.

Two robotic total stations were positioned to view all prisms. These were controlled using specialist communication software. The system was installed on the data acquisition PC located in the emergency escape shaft some 100m from the monitoring zone. The PC received data from both the total stations via a short haul modem and from the electrolevel tiltmeters via a data logger. The data acquisition PC was connected to a standard analogue telephone line, which permitted control and data transfer to the monitoring PC located within the main site office.

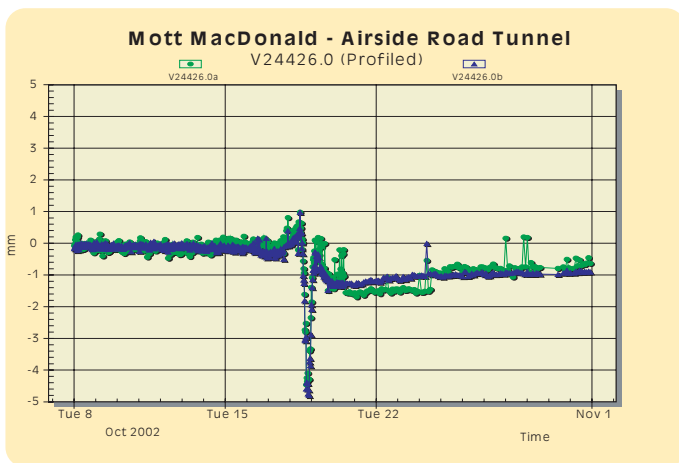
Data from the tunnel was then analysed and presented using specialist presentation software to produce graphical output and tables relating to the pre-defined trigger values. The system was alarmed and communicated its status directly to the operator and relayed this information to the HEX operations control room located in the airport's central terminal area.

4.3 RESULTS OF MONITORING

Prior to the crossings a condition and precise survey was undertaken to confirm the in situ condition of the tunnel, track and catenary. The results of the survey enabled permissible movements to be calculated and therefore suitable trigger values to be derived.



Obr. 12 Monitoring tunelu trati Heathrow Express (automatický teodolit a terče)
Fig. 12 Monitoring of Heathrow Express tunnel (robotic theodolite and targets)



Obr. 13 ART EB – Průběh svislých konverzí v čase
Fig. 13 ART EB - Development of vertical convergences in time

průzkumu umožnily provedení výpočtu přípustných deformací a tím i odvození vhodných varovných hodnot.

Východní trouba (East Bound – EB): Očekávalo se, že ve vrcholu klenby budou patrná větší svislá posunutí, jelikož trouby ART procházely blízko nad vrcholem tunelu HEX. Obr. 13 tento předpoklad potvrzuje. Větší pohyby se vyskytly 3 m od osy ART, maximální sedání dosáhlo 4,7 mm. Je patrné, že došlo k velké pružné reakci na přechod TBM. Po přechodu stroje se hodnoty vrátily na úroveň nižší než jeden milimetr. Zóna výrazně ovlivněná ražbou ART EB je cca 10 m na každou stranu od osy.

Maximální zjištěná deformace koleje zůstala pod 2,5 mm, maximální zjištěné zdvihnutí bylo 1,5 mm. Monitoringem zjištěné příčné naklonění trati, získané pomocí sklonoměrů, bylo také menší než 1,5 mm. K maximálním pohybům došlo v úseku do 5 m od osy křížení. Svislé posunutí trati po dokončení křížení nezmizelo, avšak naklonění se zmenšilo na hodnoty před ražbami krátce potom, co konec pláště TBM prošel za tunel HEX.

Západní trouba (West Bound – WB): Deformace vrcholu klenby měly menší velikost, i když jejich trend byl podobný, reakce opět byla pružná. Když se TBM nacházelo přímo nad tunelem HEX, tento tunel se „přikřčil“, vrchol klenby se prohnul o 1,5 mm. Když TBM přešlo, dostavila se okamžitá reakce na uvolnění tlaků nadloží a nakonec se průhyb ustálil na hodnotě o 1,3 mm vyšší, než byl počáteční stav.

Maximální pohyby trati byly v ose křížení. V průběhu ražby křížení bylo maximální zdvihnutí trati 0,8 mm. Další zdvih, ke kterému došlo po skončení přechodu, tuto hodnotu přivedl na výsledných 1,15 mm (zpoždění 18 dní).

U obou ražeb se posunutí vrcholu klenby nepříběžilo spodní hranici varovné hodnoty, což bylo 12 mm (obr. 14). Také maximální pohyby trati zůstaly pod původní počáteční varovnou hodnotou stanovenou na 4 mm. Automatická měření trati byla potvrzena manuálně prováděnými geodetickými měřeními.

5. ZÁVĚR

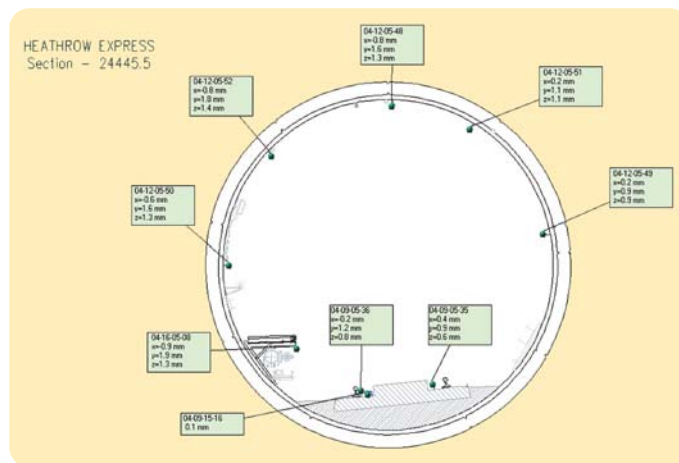
Systémy automatického monitoringu, použité pro monitorování železničních tunelů na terminálu 5, splnily požadavky zúčastněných strany. Účinnost využití automatizovaných monitorovacích systémů byla prokázána v prostředí provozovaných železničních tunelů. Robustní a spolehlivý režim monitoringu zajistil přesnost a trvalou dostupnost požadovaných dat. Použité systémy všeobecně zajistily výsledky s chybami v rozsahu 0,5 mm. Všechny výsledky monitoringu, zjišťované ve skutečném čase, velmi dobře odpovídaly denním manuálním měřením. Celkové deformace byly nižší, než byly očekávané hodnoty, a žádné výsledné deformace nepřekročily varovné hodnoty.

Dobře promyšlené a předem schválené havarijní plány umožnily všem zúčastněným ovlivnit přípravu realizací křížení. Umožnily, že si všechny strany byly plně vědomy svých povinností. Všechny ražby v blízkosti provozovaných železničních tratí byly dokončeny bez neplánovaných narušení jízdních řádů vlaků. Bezpečnost provozovaných tratí byla dostatečně zajištěna.

ING. MATOUS HILAR, MSc., PhD., CEng., MICE,
e-mail: hilar@d2-consult.cz

PAUL LYONS, BSc., e-mail: Paul-T5_Lyons@baa.com
Mott MacDonald Ltd., Croydon, U.K.

AIDAN LAIMBEER, BEng., e-mail: aidan.laimbeer@soldata.co.uk
SolData Ltd., London, U.K.



Obr. 14 Konečné naměřené pohyby vyvolané ražbou tunelu ART WB
Fig. 14 Final observed movements caused by ART WB excavation

East Bound tunnel: It was expected that the crown would exhibit some of the larger vertical movements as the ART tunnels passed over the top of the HEX. Fig. 13 confirms this assumption with the largest movements occurring 3m away from the ART centre line with a maximum deflection of 4.7mm. It is noticeable that there is a significant elastic response to the TBM passing with values returning to sub millimetre levels once the TBM has passed. The significantly zone effected by the construction process appears to be +/- 10m either side of the centre line.

Maximum monitored horizontal track displacement stayed below 2.5mm, the maximum monitored heave was 1.5mm. Monitored vertical track bed cant derived from the electrolevel tiltmeters was below also 1.5mm. The maximum movements occurred within 5m of the centre line of the crossing. Vertical track displacement did not recover after crossing however the cant parameter reduced back to near pre tunnelling values soon after the tail skin had past over the HEX tunnel.

West Bound tunnel: The crown movements were of a smaller magnitude though of a similar trend again with an elastic response. Whilst the TBM was immediately over the HEX the tunnel exhibits a squatting action, with the crown deflecting by 1.5mm, after the TBM had passed there was an immediate response to the release of the overburden pressures, eventually coming to rest 1.3mm above its starting value.

Maximum track movements were coincident to the ART crossing centre line. During the crossing the track maximum heave was 0.8mm further post construction heave brought this value to 1.15mm, 18 days later.

For both drives, the crown did not approach the lower value trigger level of 12mm (Fig. 14). Also maximum track movements stayed below the initial green trigger value set at 4mm. The manual surveys closely corroborate the remote track readings.

5. CONCLUSION

Automatic monitoring systems used for monitoring of railway tunnels at Terminal 5 satisfied the requirements for the stakeholders. The effective use of automated monitoring systems was proven within a live railway tunnel environment. A robust and reliable monitoring regime ensured accuracy and continuous availability of the required data. The systems generally provided results within a 0.5mm error band; all results of real-time monitoring well complied with daily manual surveys. The total movements were less than predicted values and all final movements did not breach any trigger levels.

With well thought out, pre-agreed emergency preparedness plans enabled all stakeholders to input into the planning of the crossing and ensured that all parties were fully aware of their responsibilities. All tunnelling adjacent to operating railways has been completed without any unplanned interruption to the schedule of trains; safety of the operational railway has been ensured.

ING. MATOUS HILAR, MSc., PhD., CEng., MICE,
e-mail: hilar@d2-consult.cz

PAUL LYONS, BSc., e-mail: Paul-T5_Lyons@baa.com
Mott MacDonald Ltd., Croydon, U.K.

AIDAN LAIMBEER, BEng., e-mail: aidan.laimbeer@soldata.co.uk
SolData Ltd., London, U.K.

LITERATURA / REFERENCES

- I. Williams, S. Thacker (2003): The ART of success under Heathrow. Tunnels & Tunnelling, September 2003.
I. Williams (2005): Managing risk at T5. Tunnels & Tunnelling, April 2005.
M. Hilar & A. H. Thomas (2005): Tunnels Construction under the Heathrow Airport. Tunnel 3/2005.