

ODVODŇOVACÍ ŠTOLA STRAHOVSKÉHO AUTOMOBILOVÉHO TUNELU DRAINAGE GALLERY FOR THE STRAHOV AUTOMOBILE TUNNEL

VÁCLAV KRCH, RADOVAN CHMELAŘ, LIBOR SÍLA, RICHARD KUK, RADKO RIEGER

1 ÚVOD

Strahovský automobilový tunel je součástí městského okruhu v Praze. Jeho výstavba byla zahájena v 80. letech 20. století a do provozu byl uveden v roce 1997. Konstrukce tunelu odpovídá v té době dostupným a obvyklým materiálům a technologiím používaným v České republice. Již od počátku byly patry netěsnosti v ostění a průniky podzemních vod do vnitřních prostor tunelových trub. Viditelně se tyto průsaky projevují zejména v jižních partiích tunelu. To samozřejmě nepříznivě ovlivňuje bezpečnost provozu zejména v zimním období. Reálné řešení z vnitřního prostoru tunelů v podstatě neexistuje, aniž by dlouhodobě nebyla sanovaná tunelová trouba vyřazena z provozu. Tento způsob opravy by vyžadoval rozsáhlé vybourání vnitřních konstrukcí, vybudování celobvodového izolačního pláště a vložení „sekundární“ obezdívky. Těsnicí injektáže za rub stávajícího ostění nelze považovat za trvale účinné řešení. Proto byla zvolena metoda, která neomezí provoz v tunelu. Navržené řešení spočívá ve vybudování odvodňovací štoly umístěné mezi oba tunely pod úrovní jejich dna. Předpokladem správné funkčnosti štoly, tj. snížení hydrostatického tlaku za rubem ostění tunelů, je návrh takového ostění štoly, které dlouhodobě umožní průsaky podzemní vody do štoly. Původní řešení navržené v dokumentaci pro stavební povolení a v tendrové dokumentaci předpokládalo ze standardně vybudované štoly – ostění ze stříkaného betonu – lokálně, tj. v místech předpokládaných soustředěných přítoků – vybudování jímacích vrtů. Tento základní odvodňovací systém pak byl doplněn drenážní geotextilií vloženou mezi primární ostění ze stříkaného betonu a horninového masivu a dalšími odvodňovacími vrty po trase štoly, prováděnými do boků štoly. Po důkladné rozvaze z hlediska hydrotechnické funkčnosti a trvanlivosti navrženého systému bylo zvoleno nové řešení uplatněné při realizaci díla. V tomto článku je popsáno navržené řešení, jež se snaží v maximální míře spojit dva protichůdné, avšak zásadní požadavky na odvodňovací štoly:

- a) Zajistit co největší celoplošnou drenážní schopnost ostění štoly.
- b) Zajistit požadovanou statickou únosnost ostění s minimálními dopady ražby na povrchovou zástavbu a zejména na konstrukce tunelových trub Strahovského tunelu.

Investorem Strahovských automobilových tunelů a v současnosti i odvodňovací štoly je magistrát hl. města Prahy (hl. město Praha), pověřeným investorem – mandatářem firma VIS, a. s.

2 KONSTRUKCE A VÝSTAVBA STRAHOVSKÉHO AUTOMOBILOVÉHO TUNELU (SAT)

Strahovský automobilový tunel (SAT) je umístěn v západním sektoru městského okruhu mezi ulicemi Plzeňskou na Smíchově a Patočkovou v Břevnově. Vyražen je pod strahovskou náhorní plošinou s nedalekou dominantou Prahy – vrchem Petřín. Strahovský tunel se skládá ze dvou dvoupruhových tubusů, západního a středního (projektovaná třetí, východní tunelová trouba nebyla realizována). Jeho celková délka činí 2004 m, z toho 1560 m bylo raženo. Autorem projektu Strahovského automobilového tunelu byla firma PUDIS, zhotovitelem stavby byla firma Metrostav se subdodavatelem několika jejích částí firmou Vojenské stavby [2].

Ražba Strahovského tunelu byla prováděna z obou portálů současně. Použita byla modifikovaná jádrová metoda, používaná do tlačivých hornin. Nejprve byly pomocí prstencové metody v celé délce ražené části tunelů vyraženy opěrové tunely (s ostěním z prefabrikovaných železobetonových dílců – tubingů). Tyto opěrové tunely byly následně částečně vybetonovány, aby tvořily opěry pro ražbu přístropí (kaloty). Posléze byla pomocí speciálně sestaveného

1 INTRODUCTION

The Strahov Automobile Tunnel is part of the City Ring Road (the inner ring) in Prague. The construction work on the tunnel commenced in the 1980s and ended by the commissioning in 1997. The tunnel structure corresponds to the materials and technologies which were available in the Czech Republic at that time. It was since the very beginning that leaks in the lining and seepage of ground water into the internal spaces of the tunnel tubes had been observed. The leaks are visible first of all in the southern parts of the tunnel. Of course, they adversely affect the safety of traffic, most of all in winter seasons. In substance, there is no realistic solution to be implemented from within the tunnel without putting the tunnel out of operation for a long time. This way of repair would require extensive demolition of inner structures, installation of a closed waterproofing system and insertion of a “secondary” lining. Sealing grouting behind the existing lining cannot be considered to be a permanently effective solution. For that reason a method which will not threaten traffic in the tunnel was adopted. The proposed solution consists of a drainage gallery to be driven between the tunnel tubes, at the level of the tunnel bottom. A condition for proper functioning of the gallery, i.e. reduction in the hydrostatic pressure behind the tunnel lining, is that the gallery lining design must allow water to seep into the gallery in the long term. The original solution proposed in the final design and tender documents assumed that abstraction wells would be locally bored from a gallery driven in a standard manner (lined in shotcrete), in the locations where the concentrated inflows would be anticipated. This basic drainage system was subsequently modified by adding drainage geotextile between the primary shotcrete lining and the rock mass, together with additional drainage holes to be drilled to the gallery sides along the gallery route. After thorough consideration from the aspect of hydrotechnical functionality and longevity of the proposed system, a new solution was adopted, the one which was eventually applied to the works. This paper describes the proposed solution, endeavouring after joining the following two contradictory but principal requirements for the drainage gallery to the maximum extent possible:

- a) to ensure as large as possible full-area drainage capacity of the gallery lining.
- b) to ensure the required load-bearing capacity of the lining with minimum impacts of the excavation on existing buildings and, first of all, on structures of the Strahov tunnel tubes.

The owner of the Strahov automobile tunnel project and, currently, even of the drainage gallery project, is Prague Municipality, represented by VIS a.s. as a client-mandatar.

2 THE STRUCTURE AND CONSTRUCTION OF THE STRAHOV AUTOMOBILE TUNNEL (SAT)

The Strahov automobile tunnel (SAT) is located in the western sector of the City Ring Road (the inner ring) between Plzeňská Street in the district of Smíchov and Patočkova Street, the district of Břevnov. It passes under the Strahov Plateau with its dominant - Petřín Hill. The Strahov tunnel consists of two double-lane tubes, the western and central ones (the planned third tube, the eastern one, has never been built). The total length amounts to 2004m; 1560m of this length were constructed by mining methods. The author of the design for the Strahov automobile tunnel was PUDIS, the contractor was Metrostav with Vojenské Stavby acting as a sub-contractor for several parts of the project. [2].

nemechanizovaného pološtítu od jihu a pomocí ukladače – erektoru od severu ražena kalota, opěří a dno. Ostění kaloty je provedeno z prefabrikovaných dílců – železobetonových tubingů, vzájemně šroubovaných. Kontakt a těsnost tohoto ostění s okolním horninovým masivem jsou zajišťovány pomocí kontaktní a těsnicí injektáže [1]. Obdobně je provedena počva. Je tvořena ze tří železobetonových prefabrikovaných dílců, v ložných spárách spojených trny, ve styčných spárách bez spojovacích prostředků. Kontakt s opěrami byl aktivován pomocí lisů a následně zmonolitněn. Vzhledem k použitému příčnému systému větrání je pod horní klenbou zavěšen monolitický strop s dělicí příčkou, který vytváří prostor pro vzduchotechnické kanály. Odvodnění tunelů je zajištěno oboustrannými podélnými průběžnými odvodňovacími žlaby podél obrubníků vozovky. Do těchto žlabů je svedena jednak technologická voda z údržby tunelů, jednak podzemní voda, která pronikla do tunelů stropní konstrukcí. Voda ze žlabů je svedena u jižního portálu do jímky a dále do veřejné kanalizace. Podzemní voda, která nechtěně proniká do spodní klenby, se protlačuje skrz výplňový beton pod vozovkou a trhlkami v kontinuálně vyztužené a betonované vozovce tl. 200 mm na její povrch. Tato skutečnost zejména v zimním období představuje závažné dopravní riziko. Voda z vozovky se dále samovolně shromažďuje v kanalizačních šachticích, kde přes permanentní údržbu způsobuje ucpávání drenážního systému. Doposud skrytou, avšak dlouhodobě působící a mnohem nebezpečnější skutečností je působení vysoce agresivní podzemní vody na rub nosné konstrukce Strahovského tunelu. Koncentrace síranového iontu se podle hydrogeologických průzkumů, ale i nových provedených chemických rozborů pohybuje v rozmezí od 1096,3 mg/l do extrémní hodnoty 5224 mg/l, což je dle ČSN EN 206-1 (73 2403) stupeň XA2 (středně agresivní) až XA3 (vysoce agresivní prostředí). Tato skutečnost by v budoucnu mohla postupně vést i k poruše nosného systému tunelu.

Ražba Strahovských tunelů probíhala v ordovických horninách paleozoika barrandienu, převážně v břidlicích, méně v křemencích. Problematické z hlediska podmínek ražby byly výrazně podrcené zlomové zóny, při ražbě v nich byly zaznamenány zvýšené deformace jak v podzemí, tak i na terénu. Ražba Strahovských tunelů byla prováděna v celé své délce pod hladinou podzemní vody. Hladina podzemní vody vlivem ražby tunelů nejprve výrazně poklesla na dno tunelů a po ukončení výstavby tunelů opět nastoupala ve většině trasy nad tunelové trouby.

Ražba Strahovských tunelů probíhala v ordovických horninách paleozoika barrandienu, převážně v břidlicích, méně v křemencích. Problematické z hlediska podmínek ražby byly výrazně podrcené zlomové zóny, při ražbě v nich byly zaznamenány zvýšené deformace jak v podzemí, tak i na terénu. Ražba Strahovských tunelů byla prováděna v celé své délce pod hladinou podzemní vody. Hladina podzemní vody vlivem ražby tunelů nejprve výrazně poklesla na dno tunelů a po ukončení výstavby tunelů opět nastoupala ve většině trasy nad tunelové trouby.

3 PROJEKT ODVODŇOVACÍ ŠTOLY POD PROVOZOVANÝMI STRAHOVSKÝMI TUNELY

Účelem stavby odvodňovací štoly je docílit odvodnění horninového prostředí kolem tunelů, a tím zásadně eliminovat množství průsaků do interiéru Strahovského tunelu. Stávající systém odvodnění ve Strahovských tunelech se velmi rychle zanáší („zasyntrovává“) a přestává být funkční. Vybudováním odvodňovací štoly jako plno-profilového drénu s jímáckými rozrážkami doplněnými o jímácké vrty je vytvořena možnost odvodnění horninového prostředí kolem obou tunelů. Cílem projektované a v současné době budované stavby je dlouhodobé snížení hladiny podzemní vody kolem ostění tunelů a snížení hydrostatického tlaku (případně i vztlaku) na konstrukci Strahovských tunelů. Tím dojde k podstatnému snížení množství průsakových vod do tunelů. Autorem projektu odvodňovací štoly ve stupni pro povolení stavby (DSP) je firma SATRA, s. r. o., realizační projektovou dokumentaci zajišťuje pro dodavatele EUROVIA CS, a. s., firma PUDIS, a. s. Zhotovitelem stavby je EUROVIA CS, a. s., s podzhotovitelem PRAGIS, a. s.



Obr. 1 Přehledná situace Strahovských tunelů a odvodňovací štoly
Fig. 1 Synoptic layout of the Strahov tunnels and the drainage gallery

The Strahov tunnel was driven simultaneously from both portals. A modified side-drift method used for squeezing ground was applied. Abutment tunnels (with a segmental lining consisting of precast concrete tubings) were driven first throughout the length of the mined part of the tunnel. The abutment tunnels were subsequently partially filled with concrete to form supports for the calotte. Then the calotte, core and bottom excavation followed. A specially assembled non-mechanised semi-shield drove the tunnel from the south, whilst the erector method was used from the north. The lining of the calotte consists of precast segments – reinforced concrete tubings, bolted with each other. The contact of this lining with surrounding ground and its sealing was ensured by contact and sealing grouting [1]. The bottom lining is constructed similarly. It is made up of three reinforced concrete precast elements, connected in radial joints with dowels, whilst no means of joining were used in circumferential joints. The contact with the abutments was activated by hydraulic jacks and was subsequently made monolithic. Because of the transverse ventilation system used, a cast-in-situ slab is suspended under the upper vault, with a partition forming spaces for ventilation ducts. The tunnel drainage is ensured by means of continuous drainage troughs running on both sides along roadway curbs. These troughs collect process water from tunnel maintenance operations as well as ground water seeping to the tunnel through the suspended slab structure. Water from the troughs is directed to a sump at the southern portal and further to public sewerage. Ground water seeping accidentally to the invert forces itself through the infill concrete under the roadway and, through small cracks in the continually reinforced, 200mm thick concrete roadway to its surface. This fact poses significant risk to traffic, first of all during winter seasons. Water from the roadway is further spontaneously collected in sewerage manholes, where, despite permanent maintenance, it causes clogging of the drainage system. Much more dangerous in the long-term acting effect, which has remained hidden till now, is the impact of highly corrosive ground water on the external surface of the load-bearing structure of the Strahov tunnel (according to hydrogeological surveys as well as newly conducted chemical analyses, the concentrations of sulphatic ions vary from 1096.3mg/L to an extreme value of 5224mg/L, which is of the XA2 degree (medium corrosive) according to ČSN EN 206-1 (73 2403) to XA3 degree (highly corrosive environment). This reality could gradually lead to a defect of the structural system of the tunnel in the future.

The Strahov tunnel was driven through the Barrandian Palaeozoic Era, Ordovician Period rocks, mostly shales, less through quartzites. In terms of the excavation conditions problematic were significantly

4 HYDROGEOLOGICKÉ POMĚRY A ŘEŠENÍ ODVODNĚNÍ

Hydrogeologické poměry v oblasti Strahovských tunelů jsou relativně složité. Samotné automobilové tunely byly raženy v ordovických horninách – v horninovém prostředí s puklinovou propustností. Zde byla před ražbou tunelů a následně je i po výstavbě tunelů vyvinutá ordovická zvodně s úrovní hladiny podzemní vody v převážně většině trasy nad tunelovými tubusy. Kromě této ordovické zvodně existuje ještě v prostoru strahovské plošiny další zvodně v křídových pískovcích, které jsou od ordovických hornin odděleny izolátorem z vrstvy křídových jílovců. Křídové pískovce, na rozdíl od hornin ordoviku, jsou horninovým prostředím s průlinovou propustností. Tato křídová zvodně se v převážně většině přelévá na okraji křídových sedimentů do prostředí zvětralých ordovických hornin či do deluviálních sedimentů (pokryvných útvarů). Přeliv podzemní vody z křídových hornin do deluviálních sedimentů byl též příčinou sesuvu tělesa lanové dráhy na Petřín v 60. letech 20. stol. V prostoru Strahovských tunelů se však křídová zvodně přelévá pouze do puklinové ordovické zvodně. Při ražbě Strahovských tunelů, respektive při hloubení šachet u technologického centra na Strahově, došlo pravděpodobně i přes provedené injektáže k propojení těchto dvou zvodní. Na průsaky do interiéru Strahovských tunelů (nejen v oblasti Strahova, ale i v dalších úsecích) reagoval v 90. letech 20. stol. doplňující hydrogeologický průzkum s pokusy eliminovat přítoky podzemní vody do již hotových tunelů pomocí odlehčovacích vrtů. Účinnost těchto opatření však nebyla dostačující. Proto byla navržena koncepce odvodnění horninového prostředí v okolí Strahovských tunelů pomocí výstavby odvodňovací štol.

Principem odvodňovací funkce této štol a ochrání konstrukcí Strahovského tunelu před účinky tlakové, vysoce agresivní podzemní vody je vytvoření gravitačního dvouetážového drenážního systému. Je tvořen souvislou horní etáží, která je provedena ze 150 mm mocné propustné vrstvy praného kačírku frakce 8–16 mm. Tato horní etáž je hydraulicky zaústěná do dolní etáže odvodnění, kterou tvoří po obvodu perforované drenážní potrubí DN 200 mm. Podélné drenáže jsou dvě, umístěné na bocích štol. Provedení dvou drenáží je nezbytné pro oddělení rozdílných hydraulických tlaků, které mohou působit na obou stranách štol, a zajištění volného odtoku vody dolní etáží. Kačírek je pěchován za železobetonové pažiny a rámy z ocelové důlní výztuže profilu K 21. Celá tato skladba tvoří primární ostění. Sekundární ostění není v této fázi realizováno. Po vyhodnocení funkce štol, a jejich dopadů na snížení průsaků do Strahovských tunelů bude rozhodnuto o eventuálním prodloužení odvodňovací štol k severnímu portálu Strahovských tunelů. Teprve po vyrazení celého díla bude vybudováno sekundární ostění z monolitického betonu.

5. POLOHOVÉ A VÝŠKOVÉ VEDENÍ ODVODŇOVACÍ ŠTOLY

Portál odvodňovací štol se nachází v podzemním obslužném vjezdu do Strahovských tunelů. Přístup pro výstavbu štol je z ulice Kobrovy v Praze 5 (obr. 1). Odvodňovací štola se skládá ze dvou částí. Do staničení km 0,160 se jedná o přístupovou část odvodňovací štol, která zprava obchází jámu hloubeného úseku Strahovských



Obr. 2 Pohled na jižní portál Strahovských tunelů
Fig. 2 A view of the southern portal of the Strahov tunnels

sheared and faulted zones, where increased deformations were recorded during the excavation both in the underground and on the surface. The excavation of the Strahov tunnels passed throughout its length under the water table. In the beginning the water table substantially dropped owing to the tunnel excavation, but after the completion of the tunnel construction it again rose above the tunnel tubes along a prevailing part of the route length.

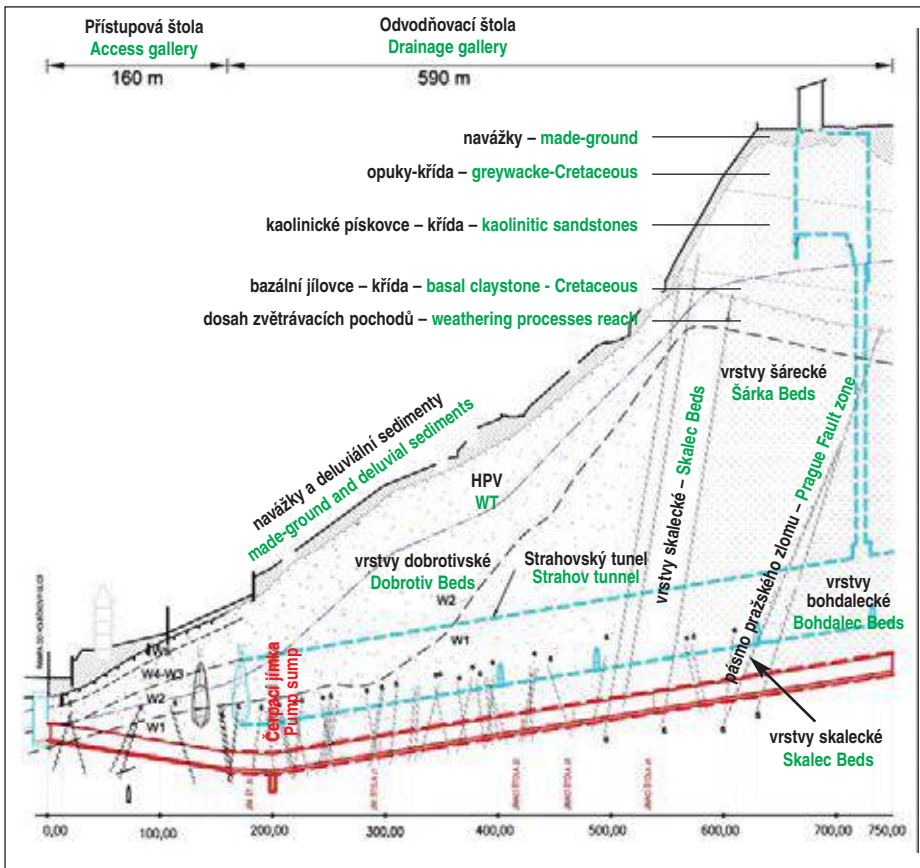
3 DESIGN FOR THE DRAINAGE GALLERY UNDER THE OPERATING STRAHOV TUNNELS

The purpose of constructing the drainage gallery is to drain the ground environment around the tunnels so that the amount of seepage into the Strahov tunnels interior is substantially minimised. The drainage system in existing Strahov tunnels has been quickly clogging (filling with sinter) and its functionality has been ending. The development of the drainage gallery as a full-profile drain with short abstraction adits supplemented by abstraction wells will make dewatering of the ground environment around the tunnels possible. The objective of the project which is currently under construction is to reduce the water table level around the tunnel lining and reduce the hydrostatic pressure (possibly even the uplift forces) acting on the Strahov tunnel structures in the long term. As a result, the amount of water seeping into the tunnels will be substantially reduced. The author of the final design for the drainage gallery is SATRA s.r.o., while PUDIS a.s. carries out the detailed design for EUROVIA CS, a.s., the construction contractor. PRAGIS is a sub-contractor for EUROVIA CS, a.s.

4 HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS AND THE SOLUTION FOR THE DRAINAGE

Hydrogeological conditions in the area of the Strahov tunnels are relatively complicated. The automobile tunnels themselves were driven through Ordovician rock forming an environment featuring fissure permeability. An Ordovician aquifer had developed in this environment before the tunnel excavation, with the water table level found to a major extent above the tunnel tubes. In addition to this aquifer there is another aquifer in the Strahov Plateau area, existing in Cretaceous sandstones, which are separated from Ordovician rocks by an isolator formed by a layer of Cretaceous claystone. The Cretaceous sandstones, in contrast with Ordovician rocks, form an intrinsic permeability rock environment. This Cretaceous aquifer in the majority overflows at the edge of Cretaceous sediments to a rock environment consisting of weathered Ordovician rocks or deluvial sediments (surface deposits). Overflowing of ground water from Cretaceous rocks to deluvial sediments was one of the causes of a slide of the Petřín funicular track in the 1960s. Fortunately, the Cretaceous aquifer in the area of the Strahov tunnels only overflows to the fissure-permeability Ordovician aquifer. Despite extensive grouting, the two aquifers got probably interconnected during the excavation of the Strahov tunnels (sinking the shafts at the service centre on Strahov hill). In the 1990s a supplementary hydrogeological survey responding to the seepage to the Strahov tunnel interiors (not only in the area of Strahov but also in other sections) was conducted and attempts were made to eliminate ground water inflows into the completed tunnels by means of relief wells. Unfortunately, effectiveness of these measures was insufficient. This is why the concept of draining the rock environment in the Strahov tunnels surroundings by means of a new drainage gallery was proposed.

The principle of the draining effect of this gallery and protecting the Strahov tunnel against effects of the highly corrosive ground water found in the condition of high pressure is the creation of a double-stage gravity drainage system. It consists of a continuous upper stage formed by a 150mm thick permeable layer of washed pea gravel with the grain-size fraction of 8 – 16mm (around the gallery circumference). This upper stage is hydraulically connected to the lower stage of the drainage system, consisting of DN 200mm drainage pipes perforated



Obr. 3 Podélný řez odvodňovací štolou (5x převýšeno)
Fig. 3 Longitudinal section through the drainage gallery (5 times exaggerated)

tunelů. Od staničení km 0,160 až do jejího konce km 0,750 se jedná o vlastní odvodňovací štolu, která je od staničení km 0,190 situována pod Strahovskými tunely (obr. 2). Zde štola již plní svou drenážní funkci.

V místech s největšími zaznamenanými přítoky do Strahovských tunelů jsou jako doplňující opatření navrženy jímací štoly délky 25 m, které jsou kolmé na odvodňovací štolu. Z těchto jímacích štol jsou ještě vyprojektovány u zvodněných úseků ve Strahovských tunelech jímací vrty. O umístění a provedení zmíněných doplňujících konstrukcí bude rozhodnuto až v průběhu budování díla na základě vyhodnocení přítoků do odvodňovací štoly.

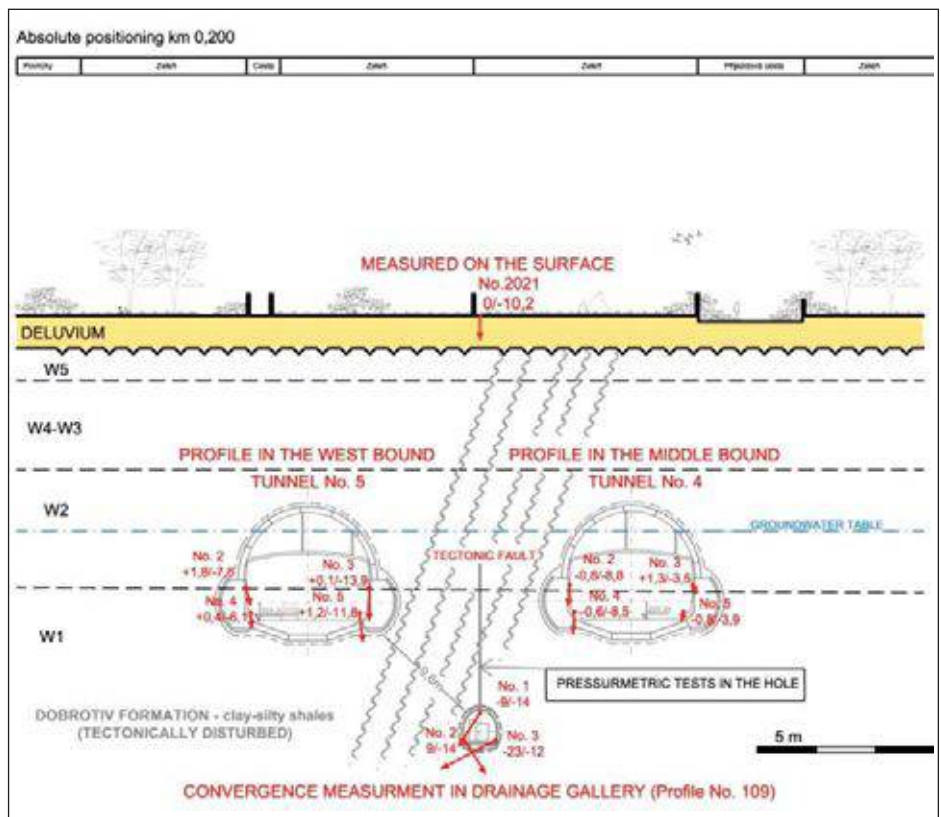
6 PROBLEMATIKA STATICKÉHO ŘEŠENÍ

Jak již bylo zmíněno v úvodu, do problematiky návrhu konstrukce a jejího statického řešení zasáhl zejména střet protichůdných požadavků geotechniků a vodohospodářů. Koncepce „skládaného ostění“, viz níže, vycházela z několika statických posouzení pomocí matematického modelování metodou konečných prvků (MKP). Výpočet MKP zohledňoval stav horninového masivu po realizaci ražeb Strahovských tunelů, tedy zhodnotil reálné zatěžovací podmínky vyplývající z dané geologické stavby a parametry zhučněné vrstvy kačírku zjištěné měřeními na stavbě. Právě diskuse o kvalitě uložení „kačírkové“ zakládky jako plnoprofilového drénu a její následné zavedení do výpočtů vyvolávalo značnou nejistotu. Proto byly provedeny ověřovací zkoušky „in situ“ pro ověření reálné

around the circumference. There are two longitudinal drains there, which are located on the sides of the gallery. Two drains are necessary so that the different hydraulic pressures potentially existing on the sides of the gallery are separated and free discharge of water through the lower drainage is secured. The pea gravel is tamped behind reinforced concrete lagging and K21-profile colliery arches. The complete above-mentioned assembly forms the primary lining. The secondary lining is not implemented in this phase. When the assessment of functioning of the gallery and its impacts on reducing the seepage into the Strahov tunnels is completed, the decision will be made whether the drainage will be extended up to the northern portal of the tunnels. Only after the completion of the whole gallery will the cast-in-situ concrete secondary lining be erected.

5 HORIZONTAL AND VERTICAL ALIGNMENT OF THE DRAINAGE GALLERY

The portal of the drainage gallery is found at the underground service entry to the Strahov tunnels. The access to the gallery excavation workplace is from Kobrova Street, Prague 5 (see the layout in Fig. 1). The drainage gallery consists of two parts. Up to chainage km 0.160 it is the part providing access to the drainage gallery, which usually bypasses the construction trench in the cut-and-cover section of the Strahov tunnels. From chainage km 0.160 up to



Obr. 4 Příčný řez (ve staničení 0,200 km) v blízkosti raženého jižního portálu Strahovských tunelů – patrné umístění odvodňovací štoly; ve Strahovských tunelech a odvodňovací štolě jsou vyznačeny pomocí šipek deformace změřené geotechnickým monitoringem ražby odvodňovací štoly a vyznačen presiometrický průzkumný vrt do horninového pilíře do nadloží odvodňovací štoly
Fig. 4 Cross section (at chainage km 0.200) in the vicinity of the mined southern portal of the Strahov tunnels with the location of the drainage gallery marked in it; Deformations measured in the Strahov tunnels and the drainage gallery by the monitoring of the drainage gallery excavation and a pressuremeter exploratory hole drilled into the rock pillar in the drainage gallery overburden are marked by arrows



Obr. 5 Rozpěrná statická zatěžovací zkouška použitá pro zjištění reálných hodnot modulu přetvárnosti drenážní šterkové vrstvy v ostění odvodňovací štoly

Fig. 5 The plate loading test used for the determination of real values of modulus of deformation of the drainage gravel layer in the gallery lining

hodnoty modulu přetvárnosti uložené vrstvy kačírku. Dvěma statickými rozpěrnými zatěžovacími zkouškami (obr. 5) byla ověřena reálná míra zhutnění drenážních zásypů v ostění odvodňovací štoly a zjištěné hodnoty byly doporučeny pro zmíněné statické výpočty. Návrh železobetonových pažin vychází též ze zatížení, která byla ověřována matematickým modelováním MKP.

Výsledkem celkové analýzy bylo stanovení hranice kvality horninového prostředí s danými geotechnickými charakteristikami, které spolehlivě zaručují stabilitu navržené konstrukce „skládaného ostění“ s plnoprofilovým drénem. Tato podmínka je pevně zakotvena v systému GTM a vyžaduje zvýšený geologický a geotechnický dozor. V případě zastížení nižších geotechnických charakteristik (lokální tektonická poruchová pásma apod.), není možné předpokládat stabilní chování systému „drenážního“ ostění a je nutno přejít do systému s ocelovými prvky a stříkaným betonem. Samozřejmě že v tomto okamžiku je potlačena drenážní schopnost štoly. Proto je v nezbytném rozsahu navržen systém střídání typu ostění, tj. ostění ze stříkaného betonu je po určité vzdálenosti přerušeno vložení „okna“ z drenážního ostění – kačírku.

7 ŘEŠENÍ PŘÍČNÝCH PROFILŮ

Původní projekt provizorního dočasného ostění odvodňovací štoly (autor Satra, s. r. o.) uvažoval s ostěním tvořeným stříkaným betonem se svařovanými sítěmi a výztužnými oblouky – podle zásad NRTM. Takto byla navržena jak přístupová, tak odvodňovací část štoly. Po podrobném posouzení požadovaných hydrotechnických vlastností odvodňovací štoly bylo rozhodnuto v odvodňovací části provést konstrukční změny. V odvodňovací části štoly od staničení km 0,190 do 0,750 je nyní navrženo ostění štoly jako silně propustné. Generelně toto ostění tvoří podajné železné výztužné důlní oblouky typu K 21 (korýtková výztuž) s roztečí 1 m se železobetonovými pažnicemi (o délce 1 m, šířce 0,15 m, tloušťce 0,06 m), za kterými se ukládá drenážní vrstva šterku – praného kačírku (frakce 8–16 mm) o tloušťce minimálně 150 mm.

Profil odvodňovací štoly je uzavřen kruhovou protiklenbou z ocelových oblouků a železnou sítí vyztuženého stříkaného betonu. Celková plocha teoretického výrubu odvodňovací štoly je 10,51 m². Šířka nezajištěného výrubu je 3,7 m a výška 3,9 m. Charakteristický příčný řez včetně provizorního ostění s drenážní šterkovou vrstvou je na obr. č. 6. V případě, že geotechnické poměry budou výrazně nepříznivé, například ražba odvodňovací štoly bude procházet mocnou zlomovou zónou, bude v těchto oslabených zónách horninového masivu použit ze statického hlediska výhodnější původně navrhovaný systém ostění z armovaného stříkaného betonu a ocelových výztužných oblouků bez šterkové drenážní vrstvy.

the end of the gallery at km 0.750 it is the drainage gallery itself. From chainage km 0.190 the gallery runs under the Strahov tunnels (see the longitudinal section in Fig. 2). Here the gallery already fulfils its drainage function.

Water extraction adits 25m long, perpendicular to the drainage gallery, are designed as an additional measure for the locations where the greatest inflows into the Strahov tunnels were registered. In addition, extraction wells are designed to be drilled from the extraction adits in the water-bearing sections of the Strahov tunnels. The decision on the locations and implementation of the above-mentioned structures will be made later, during the works, on the basis of assessment of inflows into the drainage gallery.

6 STRUCTURAL DESIGN PROBLEMS

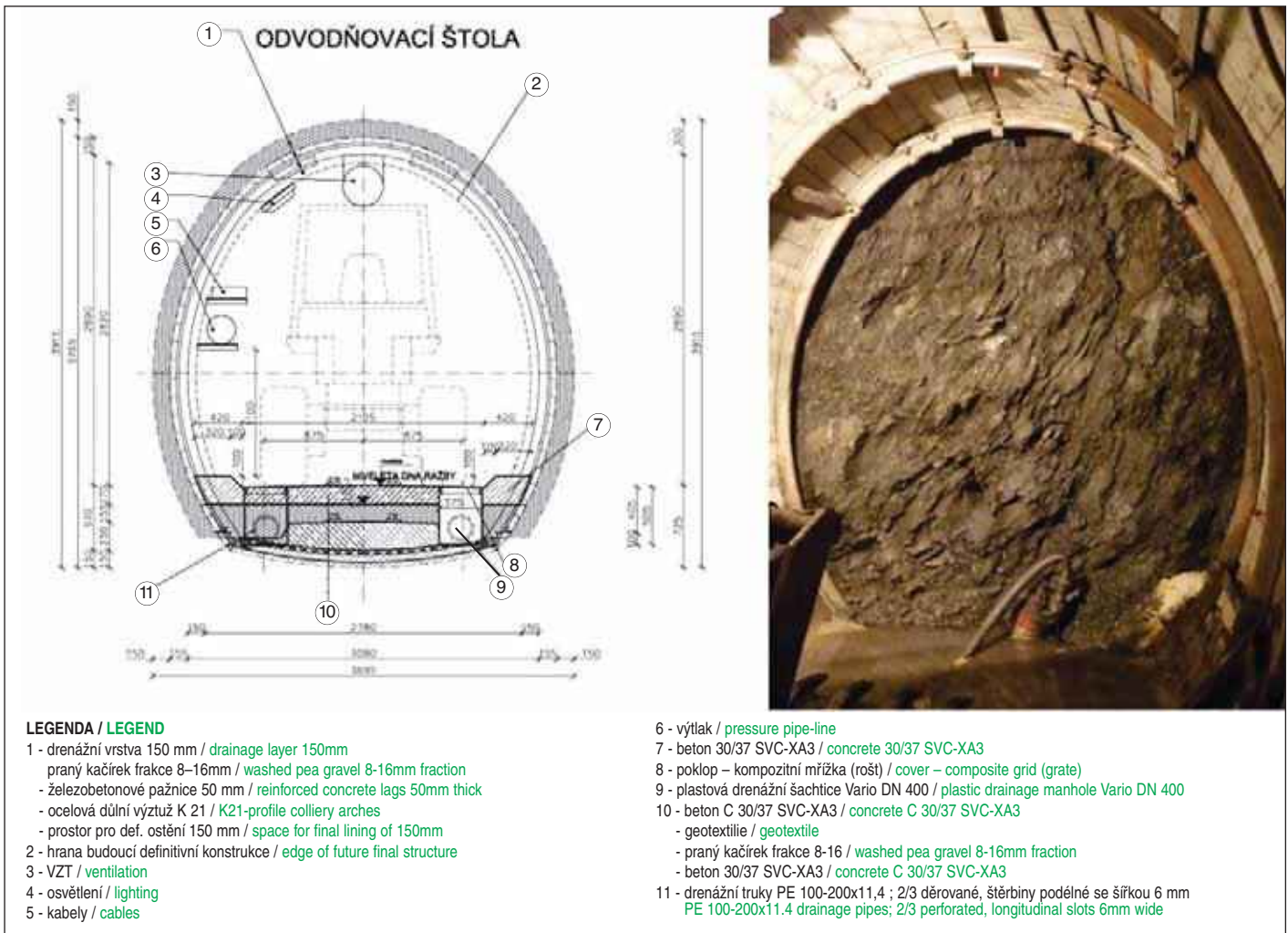
As mentioned in the introduction, the clash of contradictory requirements of geotechnical engineers and hydraulic engineers affected most of all the problems of the structural design and structural calculations. The concept of the segmental lining (see below) was based on several structural analyses using mathematical modelling by means of the Final Element Method (FEM). The FEM calculation took into consideration the condition of the rock mass after the completion of the Strahov tunnel excavation, which means that it assessed the real loading conditions following from the given geological structure and parameters of the compacted pea gravel layer determined by in-situ measurements. It was the discussion about the quality of the placement of the pea gravel packing serving as a full-profile drain and the subsequent introduction of the packing into calculations that was a source of a significant uncertainty. For that reason in-situ verification tests were conducted to verify real values of the modulus of deformation of the pea layer. Two plate loading tests (see Fig. 5) were conducted to verify the real degree of compaction of the drainage backfill of the drainage gallery and the values determined by the tests were recommended for the above-mentioned structural calculations. The structural design for the reinforced concrete lags is, among others, based on the loads which were verified by the FEM mathematical modelling.

The overall analysis resulted in the determination of limits for the quality of ground environment with the given geotechnical characteristics, which reliably guarantee stability of the proposed structure of the segmental lining with the full-profile drain around it. This condition is firmly incorporated in the GTM system and requires increased geological and geotechnical supervision. In the case that lower geotechnical characteristics are encountered (local fault zones etc.), it is impossible to assume that the “drainage” lining system will behave in a stable manner, therefore it is necessary to switch to the system employing steel elements and shotcrete. Of course, the draining capacity of the gallery is suppressed at that moment. For that reason, a system in which the lining designs alternate, meaning that the shotcrete lining is interrupted at certain intervals by “windows” where the gallery is provided with the draining lining using pea gravel, has been designed to the necessary extent.

7 DESIGN FOR CROSS SECTIONS

The original design for the temporary lining of the drainage gallery (by Satra s.r.o.) proposed a lining consisting of shotcrete with welded mesh and support arches – according to the NATM principles. This system was designed for both the access portion and draining portion of the gallery. A decision was made after a detailed assessment of required hydrotechnical properties of the drainage gallery that structural changes would be implemented in the draining portion. A heavily permeable lining is now designed for the draining portion of the gallery from chainage km 0.190 to km 0.750. In general, this lining consists of K21-type TH colliery yielding arches installed at 1.0m spacing and reinforced concrete lags (1m long, 0.15m wide and 0.06m thick), with a minimally 150mm thick drainage layer of gravel – washed pea gravel (size fraction 8 – 16mm) packed behind it.

The profile of the drainage gallery is closed by circular invert consisting of steel arches and shotcrete reinforced with welded mesh. The total theoretical excavated area of the drainage gallery is 10.51m². The width and height of the unsupported excavation is 3.7m and 3.9m



Obr. 6 Vzorový příčný řez a pohled na vybudované dočasné ostění odvodňovací štoly s drenážní štěrkovou vrstvou

Fig. 6 Typical cross-section and a view of the completed drainage gallery primary lining with the drainage gravel layer

Konstrukce provizorního dočasného ostění je navržena na dobu určitou (do 5 let od vybudování). V současnosti není ještě projektově řešené ostění definitivní. Předpokládá se však jako ostění z litého betonu. Na obr. 6 je ve vzorovém příčném řezu naznačen dosah definitivního ostění do výrubu. Samotná realizace definitivního ostění je odvislá od rozhodnutí případného prodloužení odvodňovací štoly, které by následovalo po vyhodnocení její dosavadní funkce. Ražba odvodňovací štoly je v současnosti prováděna v jílovitoprachovitých břidlicích pomocí razičského stroje – výložníkové frézy. S tím souvisí i to, že příčný profil štoly byl uzpůsoben strojovému vybavení stavby – nejen razičímu mechanismu, ale i kolové dopravě. Při následně uvažované ražbě v pevných křemencích se předpokládá použití trhačích prací.

8 DOPLŇUJÍCÍ GEOTECHNICKÉ PRŮZKUMY V PRŮBĚHU RAŽBY ODVODŇOVACÍ ŠTOLY

Pro vlastní projekt odvodňovací štoly se vycházelo pouze ze znalostí výsledků geotechnických průzkumů pro Strahovské automobilové tunely. Nebyly tedy před započítáním ražby štoly realizovány žádné nové průzkumné práce s terénními zkouškami mechaniky hornin, které by ověřily současné geotechnické charakteristiky vystihující stav horninového masívu po dokončení stavebních konstrukcí Strahovských tunelů.

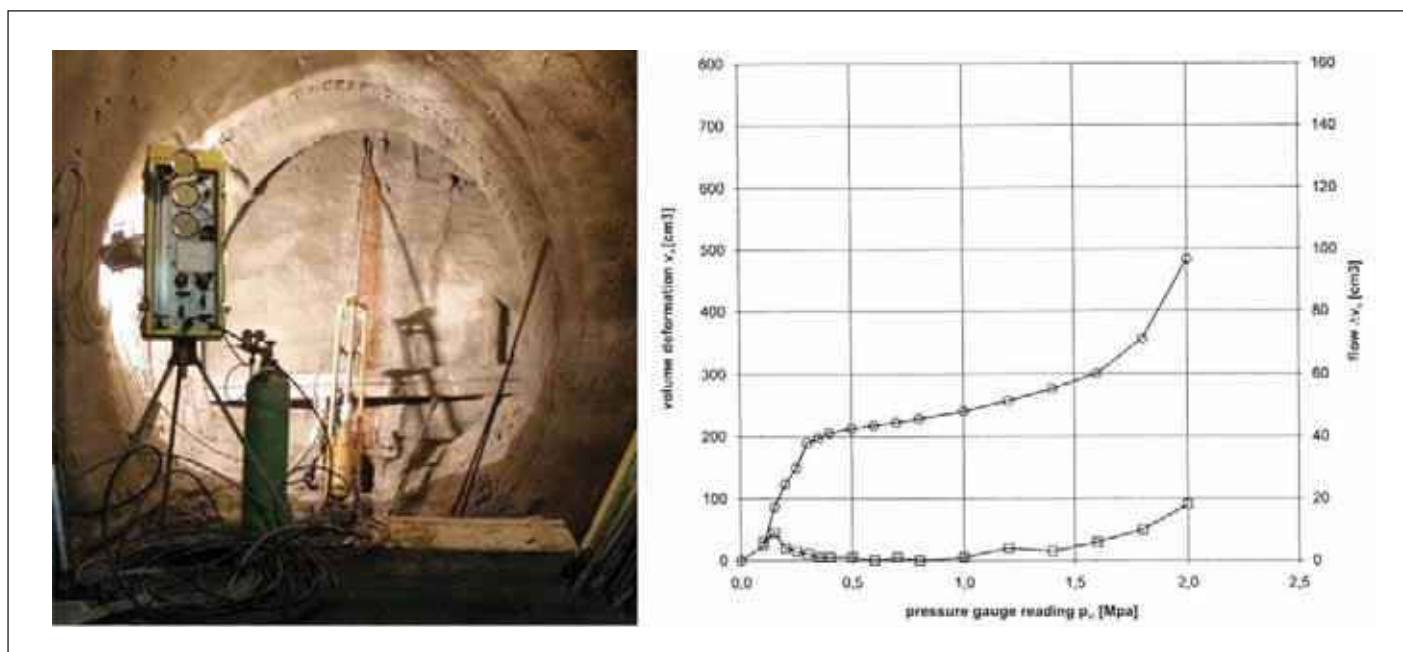
Proto bylo nutné provést v několika místech odvodňovací štoly doplňující geotechnické průzkumy, které by upřesnily současný stav geotechnických poměrů v okolí odvodňovací štoly. Jednalo se zejména o místo podchodu odvodňovací štoly přímo pod tubusem Strahovského tunelu [5], dále pak v blízkosti vyhodnocovacího sruženého profilu ve staničení 0,200 km [6] (obr. 4) a v současnosti také v předstihu

respectively. The typical cross-section, including the temporary lining with the gravel drainage layer, is shown in Fig. 6. If the geotechnical conditions are substantially unfavourable, for example if the excavation passes through a thick fault zone, the originally designed system of lining consisting of reinforced shotcrete and steel arches without the drainage gravel layer will be applied within such weakness zones of the rock mass. This solution is more favourable in terms of the structural calculation.

The temporary lining structure is designed for a determinate time (ending 5 years after its completion). The design for the final lining has not been finished yet. It is expected that the structure will be in cast-in-situ concrete. The reach of the final lining into the excavated space is outlined in Fig. 6. The construction of the final lining itself depends on the decision on contingent extension of the drainage gallery, which would follow after assessing its function till that time is carried out. The excavation of the drainage gallery is currently proceeding through clayey-silty shales using a tunnelling machine – a cutter boom. The fact that the cross-section of the gallery was adapted to the mechanical equipment (not only the driving equipment but also rubber-tyred haulage) also relates to the use of this machine. The drill and blast technique is expected to be used during the subsequent excavation passing through strong quartzites.

8 SUPPLEMENTARY GEOTECHNICAL SURVEYS DURING THE COURSE OF THE EXCAVATION OF THE DRAINAGE GALLERY

The design for the drainage gallery itself started only from the knowledge of results of geotechnical surveys which had been conducted earlier for the Strahov automobile tunnels. No new surveys comprising rock mechanics field tests, verifying the current geotechnical properties giving a true picture of the rock mass state after the completion of the Strahov tunnels had been carried out before the commencement of the gallery excavation.



Obr. 7 Provádění doplňujícího geotechnického průzkumu pomocí presiometrických zkoušek v průzkumných vrtech. Vpravo převrátný diagram – vyhodnocení presiometrické zkoušky

Fig. 7 Implementation of a supplementary geotechnical survey by means of pressiometric tests in survey boreholes. For the right – the stress-strain curve – evaluation of the pressiometric test

z tunelové propojky TP 1 Strahovských tunelů (ve staničení štolý 0,400 km – obr. 8). V posledních dvou uváděných příkladech byly průzkumné vrty a terénní geotechnické zkoušky (presiometrické zkoušky) zaměřeny na ověření současných geotechnických vlastností horninového pilíře Strahovských tunelů, který je v přímém nadloží odvodňovací štolý. Cílem prováděných doplňujících geotechnických průzkumů bylo získat aktuální geomechanické charakteristiky horninového masivu pro statické výpočty, prováděné pomocí matematického modelování, metodou konečných prvků. Všechny tři doplňující průzkumy výrazně upřesnily místní geotechnické charakteristiky, zejména převrátné vlastnosti horninového masivu. Zvláště presiometrické zkoušky prováděné ze štolý v blízkosti vyhodnocovacího profilu 0,200 km (obr. 4) a v předstihu i provedené zkoušky z tunelové propojky Strahovských tunelů (obr. 8) ověřily deformační vlastnosti výrazně zlomově tektonicky porušených pásem dobrotivských jílovitoprachovitých břidlic s nízkými hodnotami presiometrického modulu převrátnosti. U vyhodnocovacího profilu 0,200 km byla v navětralém, tektonicky porušeném horninovém masivu naměřena průměrná hodnota $E_{def,p}$ 54 MPa. U právě realizovaných zkoušek z tunelové propojky č. 1 Strahovského tunelu lze očekávat obdobné nízké hodnoty. Výsledky doplňujících geotechnických průzkumů jsou nejen používány pro úpravu statických výpočtů, ale i pro případnou volbu použití alternativního systému provizorního ostění např. v tektonicky oslabených zónách horninového masivu, kde očekáváme zvýšené deformace při ražbě odvodňovací štolý.

9 GEOTECHNICKÝ MONITORING RAŽBY ODVODŇOVACÍ ŠTOLY

V průběhu výstavby odvodňovací štolý jsou od počátku ražby X/2009 měřeny a následně vyhodnocovány deformace na realizované konstrukci odvodňovací štolý (konvergenční měření) a také deformace konstrukce Strahovských tunelů a povrchové zástavby včetně terénu (geodetická měření). V průběhu ražeb jsou též kontinuálně sledovány inženýrskogeologické, geotechnické a hydrogeologické poměry na nezajištěném čele výrubu. Náplní geotechnického monitoringu při ražbě odvodňovací štolý je průběžné ověřování shody předpokladů daných projektem se skutečností – zejména zda bylo, či nebylo dosaženo maximálních mezních deformací, resp. projektem definovaných varovných stavů.

V rámci geotechnického monitoringu jsou realizována i doprovodná měření a sledování jako jsou kontrolní dynamická a akustická měření, pasportizace objektů nadzemní zástavby apod.

For the above reason it was necessary to carry out supplementary geotechnical surveys in several locations of the drainage gallery, designed to refine the information on the current state of geotechnical conditions in the drainage gallery surroundings. Among the locations, there was for example the passage of the drainage gallery directly under one of the Strahov tunnel tubes [5], a location in the vicinity of the combined assessment profile at chainage km 0.200 [6] (see Fig. 4) and, currently, even in advance from the cross passage TP1 connecting the Strahov tunnel tubes (gallery chainage km 0.400 – see Fig. 8). In the latter two cases the exploration boreholes and field geotechnical tests (pressuremeter tests) were focused on the verification of current geotechnical properties of the rock pillar between the Strahov tunnel tubes, which is found directly above the drainage gallery. The objective of the supplementary geotechnical surveys which were conducted was to gather topical geomechanical characteristics of the rock mass required for structural analyses using mathematical modelling by means of the Finite Element Method. All of the three supplementary surveys significantly improved the existing information about local geotechnical characteristics, first of all the deformational properties of the rock mass. Especially the pressuremeter tests which were carried out from within the gallery in the vicinity of the monitoring profile at km 0.200 (see Fig. 4) and tests carried out in advance from within the cross passage connecting the Strahov tunnels (see Fig. 8) verified the deformational properties of the markedly faulted zones of the Dobrotiv clayey-silty shales, featuring low values of the pressiometric modulus of deformation. The average value of $E_{def,p}$ of 54 MPa was measured at the assessment profile at km 0.200, found in little weathered, tectonically disturbed rock mass. It is possible to expect that similarly low values will be determined by the tests which are currently being conducted in the cross passage No. 1. The results of the supplementary surveys are not only used for adjusting structural calculations but also for the contingent selection of an alternative system of the primary lining, e.g. for sections passing through fault zones in the rock mass, where increased deformations during the course of the drainage gallery are expectable.

9 GEOTECHNICAL MONITORING OF THE DRAINAGE GALLERY EXCAVATION

Deformations of the drainage gallery structure (convergence measurements) and deformations of the Strahov tunnel structures and existing buildings, including the settlement of the ground surface (topographical measurements), have been measured and assessed during the course of the drainage gallery excavation since the beginning of the excavation in October 2009. Engineering geological, geotechnical and hydrogeological conditions at the unsupported excavation face are also

9.1 Popis a výsledky vybraných měření

Geologicko geotechnické sledování výrubu

Průběžně s ražbou odvodňovací štoly je prováděna geologicko geotechnická dokumentace nezajištěného čela výrubu. V současné době (XI/2010) je štola vyražena do staničení km 0,340 a ražba prozatím probíhá v ordovických horninách dobrotivského souvrství. Z litologického hlediska se jedná o jílovité až prachovité břidlice, které jsou místně silně rozpukané a v některých místech se v nich vyvinula i několik metrů mocná poruchová pásma s výplní podrcené horniny charakteru zeminy. V těchto místech docházelo k zvýšeným deformacím nosného systému štoly.

Měření poklesů terénu a objektů nadzemní zástavby

V důsledku ražby odvodňovací štoly se na povrchu území vytváří poklesová kotlina sledující osu díla, a to jak v příčném, tak i podélném směru. Z matematického modelování vyplynul předpoklad jejího rozsahu, a tedy i dosahu ovlivnění ražby na nadzemní zástavbu. V projektu byly definovány očekávané i maximální dovolené hodnoty poklesů terénu (i zástavby), což bylo 12 mm a maximální dovolený sklon poklesové kotliny s ohledem na zástavbu 1:800.

Pro sledování průběhu poklesové kotliny byly osazené geodetické body jednak na terénu (nad osou štoly a ve 3 příčných vyhodnocovacích profilech) a také na objektech nadzemní zástavby uvnitř zóny ovlivnění. Maximální změřený pokles terénu prozatím činí 10,2 mm a byl zaznamenán v místech, kde byly měřeny nejen zvýšené deformace ostění v odvodňovací štolě, ale také i na konstrukci Strahovských tunelů. Horninovým masivem v těchto místech prochází výrazná tektonická poruchová (zlomová) zóna (obr. 4). Maximální změřený pokles objektů nadzemní zástavby prozatím činí 8,9 mm. Maximální změřený a vyhodnocený nerovnoměrný sedání prozatím činí 1:16000.

Měření deformací ve Strahovských automobilových tunelech

Odvodňovací štola se převážně ráží v horninovém pilíři mezi stávajícími Strahovskými tunely (respektive pod nimi), a tedy obě tunelové roury leží v poklesové zóně štoly. Pohyb konstrukcí tubusů Strahovských tunelů se proto kontroluje jednak nivelačním měřením bodů na okraji vozovky, a také pomocí 3D vyhodnocovacích profilů, které jsou měřeny trigonometricky a jsou osazovány do nosných konstrukcí Strahovských tunelů. U těchto profilů jsou vyhodnocovány příčné i podélné posuny vůči ose tunelu a především také sedání. Maximální dovolené hodnoty poklesů u bodů ve vozovce byly stanoveny na 14 mm. U 3D bodů byla stanovena maximální dovolená deformace ve svislém směru 14 mm a ve vodorovném 4 mm.

Pro sledování deformací ve Strahovských tunelech bylo osazeno celkem 22 geodetických bodů na vozovce a 17 3D vyhodnocovacích profilů. Maximální změřený pokles bodů na vozovce Strahovských tunelů prozatím činí 9,1 mm. U 3D profilů byl prozatím změřen maximální pokles 13,9 mm na profile 5 v blízkosti již zmíněné poruchové zóny (tyto deformace ve Strahovských tunelech jsou vyznačeny na obr. 4). Podélné deformace ve 3D profilech nejsou výrazné – pohybují se do 3 mm, příčné dokonce jen do 2 mm.

Měření deformací v odvodňovací štolě (konvergenční měření)

Pomocí konvergenčního měření získáváme informace o radiálních deformacích primárního ostění odvodňovací štoly s cílem ověřit jak stabilitu nosného systému, tak i tvarové změny vyztuženého profilu štoly. Deformace nosného systému jsou na odvodňovací štolě měřeny v tříbodových konvergenčních profilech. Vzdálenost konvergenčních profilů se zde pohybuje v rozmezí 15 až 25 m závislosti na výšce nadloží, předpokládaných inženýrskogeologických poměrech či na poloze předpokládaných rizikových míst stavby (např. podchod pod tunelovou troubou Strahovských tunelů). V případě zastižení zhoršených podmínek na čele výrubu (tektonická poruchová pásma) jsou vždy operativně vloženy další konvergenční profily.

Maximální dovolené konvergence byly definovány projektem jak pro ostění ze stříkaného betonu, tak pro ostění s drenážní šterkovou vrstvou mezi železobetonovými pažnicemi a horninovým masivem. Ve svislém směru byla definována projektem jako maximální dovolená hodnota 20 mm a ve vodorovném směru 15 mm. Při konvergenčním měření byla skutečně zaznamenána maximální hodnota

continually monitored during the course of the excavation. The focus of the geotechnical monitoring during the course of the drainage gallery excavation is to continually verify the agreement of assumptions contained in the design with the reality – first of all whether maximum limit deformations or the warning states specified by the design have or have not been reached.

In addition, the geotechnical monitoring comprises attending measurements and observations, such as checking dynamic and acoustic measurements, condition surveys of existing buildings etc.

9.1 Description and results of selected measurements

Geological and geotechnical monitoring of excavation

Geological and geotechnical documentation of the unsupported excavation face is maintained simultaneously with the drainage gallery excavation. As of today (November 2010), the gallery excavation, still passing through Ordovician rocks of the Dobrotiv Beds, has been completed up to chainage km 0.340. From the lithological point of view, the rocks comprise clayey to silty shales, which are locally heavily fractured, with several metres thick fault zones filled with broken rock of the soil character developed in these zones. Increased deformations of the gallery excavation support system were recorded in these locations.

Measurements of the settlement of ground surface and existing buildings

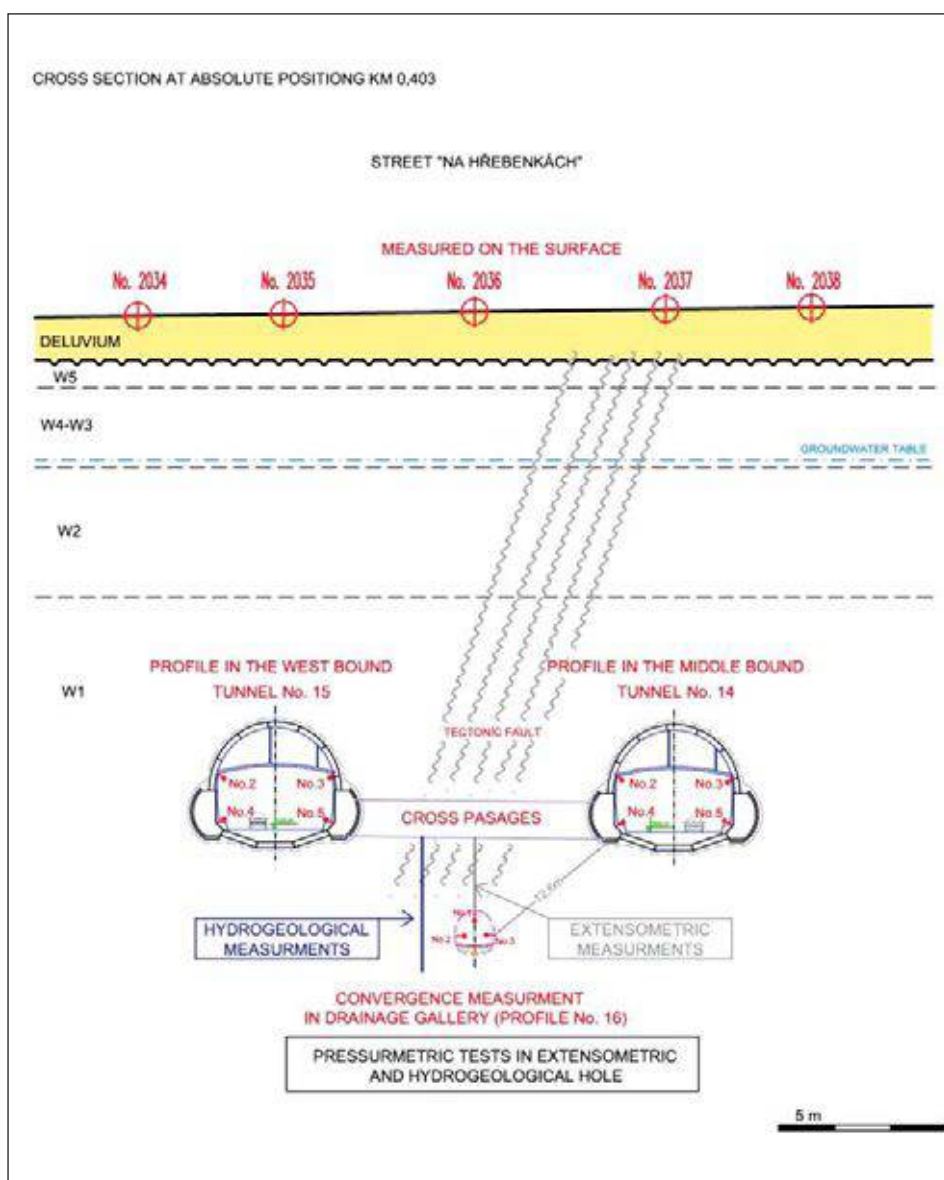
A settlement trough has been developing on the surface as a result of the underground excavation of the drainage gallery, following the centre line of the gallery both in transverse and longitudinal directions. The prediction for its extent and the reach of the impacts on existing buildings followed from the mathematical modelling. The design defined the anticipated and maximum permissible values of the terrain (and buildings) subsidence to be 12mm, and the maximum permissible settlement trough slope value taking into consideration the existing buildings to be 1:800.

Survey points for monitoring of the development of the settlement trough were installed both on the surface (above the gallery centre line and at 3 assessment profiles) and on the buildings found within the zone affected by the gallery excavation. The maximum till now measured terrain subsidence has amounted to 10.2mm. It was recorded in the location where increased deformations had been measured not only in the drainage gallery but also on the Strahov tunnel structures. In this location the rock mass is cut through by a significant fault zone (see Fig. 4). Till now the maximum subsidence of buildings has reached 8.9mm. The maximum measured and evaluated differential settlement value has amounted to 1:16000.

Measurements of deformations inside the Strahov automobile tunnel tubes

The drainage gallery is mostly driven through the rock pillar between the existing Strahov tunnel tubes (under their bottom level); therefore both tunnel tubes are found in the zone of settlement induced by the gallery excavation. For that reason the movement of the Strahov tunnel tubes is checked both by levelling survey of points installed at the edge of the roadway and by means of 3D assessment points, which are installed in load-bearing structures of the Strahov tunnel, to be surveyed trigonometrically. Transverse and longitudinal movements relative to the tunnel centre line and, first of all, the settlement values are assessed at these profiles. The maximum permissible settlement values set for the points in the roadway are 14mm. The maximum allowable vertical and horizontal deformations set for the 3D points are 14mm and 4mm, respectively.

The total of 22 survey points were installed in the roadway and 17 3D assessment profiles were established for the purpose of monitoring deformations inside the Strahov tunnel tubes. The maximum till now measured subsidence of the points in the Strahov tunnel roadways has amounted to 9.1mm. As far as the 3D profiles are concerned, maximum subsidence of 13.9mm was measured at profile No. 5, in the vicinity of the above-mentioned fault zone (these deformations in the Strahov tunnel tubes are marked in Fig. 4). The longitudinal deformations at the 3D profiles, reaching up to 3mm and transverse deformations not exceeding 2mm, are not significant.



Obr. 8 Navržený sdržený průzkumný a vyhodnocovací profil ve staničení 0,403 km v problematickém úseku ražby pod ul. Na Hřebenkách v Praze 5-Smíchov

Fig. 8 The combined survey and assessment profile proposed for the chainage km 0.403, found in a problematic excavation section under Na Hřebenkách Street

konvergence ve vodorovném směru 28,22 mm a ve svislém směru pak bylo změřeno max. 18,22 mm. Těchto hodnot bylo dosaženo na ostění z výše zmíněnou drenážní šterkovou vrstvou kačírku, a to při ražbě ve výrazném tektonickém poruchovém pásmu ve staničení 0,200 km. Bylo to přesně v místě, kde byly naměřeny jak maximální poklesy terénu, tak i maximální deformace na konstrukcích Strahovského tunelu (to je opět patrné na obr. 4). Z důvodu překročení maximálních hodnot deformací jak ve vodorovném, tak i ve svislém směru a z důvodu dalšího nepříznivého trendu deformací ostění štol se muselo v tomto úseku přistoupit k dodatečnému vyztužení tohoto ostění s drenážní vrstvou jednak pomocí dokotvení (radiálními kotvami o délce 6 m), a také byla dodatečně přidána vrstva stříkaného betonu vyztuženého ocelovými sítěmi.

Na základě poznatků z vyhodnocovacího profilu v km 0,200 (obr. 4), kde byly v poruchové zlomové zóně v prachovitějilovitých dobrotivských břidlicích naměřeny největší deformace v odvodňovací štolě, ve Strahovských tunelech i na terénu, byl navržen další sdržený průzkumný a vyhodnocovací profil ve staničení km 0,403 (obr. 6) – v místě tunelové propojky č. 1 mezi Strahovskými tunely, pod ul. Na Hřebenkách. Tento profil byl vybrán především z důvodů, že při ražbě Strahovských tunelů zde byly naměřeny největší deformace 81 mm, a to v extenzometru, situovaném do horninového pilíře mezi tunely [1]. Tyto deformace z úrovně tunelu se

Measurements of deformations in the drainage gallery (convergence measurements)

Convergence measurements provide information on radial deformations of the drainage gallery primary lining, allowing us to verify both the stability of the load-bearing system and changes in the geometry of the profile of the gallery profile provided with the primary support. Deformations of the load-bearing system of the drainage gallery are measured at three-point convergence profiles. The convergence profiles are installed at intervals ranging from 15 to 25m, depending on the overburden height, the anticipated engineering geological conditions or the locations where risk conditions are expected (e.g. the passage under the Strahov tunnel tube). If worsened conditions are encountered at the excavation face (fault zones), additional convergence measurement profiles are always operatively inserted.

The maximum permissible convergences were defined by the design for both the shotcrete lining and the lining containing the drainage gravel layer between reinforced concrete lagging and the rock mass. The values of 20mm and 15mm were defined by the design as maximum allowable for the vertical and horizontal directions, respectively. The maximum horizontal and vertical convergence values actually registered by the convergence measurements were 28.22mm and 18.22mm, respectively. These values were measured on the lining containing the above-mentioned drainage gravel layer, during the course of the excavation passing through the pronounced fault zone at chainage km 0.200. It was exactly the location where both the maximum ground surface settlement values and the maximum deformations of the Strahov tunnel structures were registered (this is also shown in Fig. 4). Because of exceeding the maximum values of deformations in this section, both horizontal and vertical, and with respect to the continuing unfavourable trend in deformations of the gallery lining, it was necessary to install additional reinforcement of this lining (containing the drainage gravel layer) not only by additional anchoring (6m long radial anchors), but also by adding a layer of shotcrete reinforced with welded mesh.

Based on findings gathered at the assessment profile at km 0.200 (see Fig. 4), where the greatest deformations were measured in the fault zone consisting of the silty-clayey Dobrotiv Shale (in the drainage gallery, in the Strahov tunnel tubes and on the ground surface), additional combined survey and assessment profile was designed for chainage km 0.403 (see Fig. 6), which is the location of the cross passage No. 1 between the Strahov tunnel tubes, found under Na Hřebenkách Street. This profile was selected first of all because of the fact that this was the location where the greatest deformations had been measured during the Strahov tunnel tubes excavation, reaching 81mm (on the extensometer installed in the rock pillar between the tunnel tubes [1]). These deformations gradually copied themselves from the tunnel level up to the terrain surface. The increase in the deformations induced by the Strahov tunnel tubes excavation was again caused by the presence of a fault zone.

A supplementary geotechnical survey by means of pressuremeter tests conducted in boreholes to be used both for extensometer measurements

postupně prokopírovaly na terén. Zvýšené deformace od ražby Strahovských tunelů byly způsobeny opět přítomností zlomové poruchové zóny.

Ve výše jmenovaném vyhodnocovacím profilu ve stráničení km 0,403 (v místě tunelové propojky Strahovských tunelů) byl nyní (XI/2010) v předstihu před ražbou (vzdálenou cca 60 m) realizován doplňující geotechnický průzkum pomocí presiometrických zkoušek, realizovaných ve vrtech, jež budou využité jednak pro extenzometrická měření a jednak pro hydrogeologická měření (piezometr). Kromě extenzometru a piezometru jsou zde také již instalovány na konstrukcích Strahovských tunelů vyhodnocovací 3D profily a na terénu nivelační body. To vše je patrné na obr. 8.

V tomto profilu se opět očekávají zvýšené deformace od ražby odvodňovací štoly.

10 ZÁVĚR

Ražba odvodňovací štoly je v dnešní době přibližně v jedné třetině celkové své plánované délky a zásluhou komplexního a včasného vyhodnocování geotechnického monitoringu a také zásluhou realizace doplňujících geotechnických průzkumů (presiometrické zkoušky, jádrové vrty do předpolí štoly apod.) nedošlo k žádným mimořádným událostem – žádným haváriím. Geotechnický monitoring přispěl i k úspěšnému překonání geotechnicky problematických míst v průběhu ražby, jako bezesporu bylo podcházení provozovaných Strahovských tunelů či ražba v tektonickém zlomovém pásmu, které mělo charakter zeminy. Právě v místech silného tektonického porušení horninového masivu se nám osvědčilo realizovat sdružené vyhodnocovací profily s měřeními v odvodňovací štole, na konstrukcích Strahovských tunelů, tak i na terénu. Zde na základě komplexního vyhodnocení všech těchto měření došlo v problematických úsecích ražby k včasnému zesílení ostění odvodňovací štoly, což přesně odpovídá principům observační metody návrhu ražby.

Výstavba odvodňovací štoly s nově navrženým systémem ostění (s šterkovou zakládkou jako plnoprofilovým drénem) je z hlediska statiky i z hlediska vyhodnocení prováděného geotechnického monitoringu bedlivě sledována a prověřována. Problematickými úseky ražby byly pro tento systém ražby výrazné tektonické poruchy (poruchová pásma) v horninovém masivu, kde tato metoda musela být operativně přizpůsobena zastíženým geologickým poměrům.

ING. VÁCLAV KRCH, vaclav.krch@pudis.cz,
RNDr. RADOVAN CHMELAR, Ph.D.,
radovan.chmelar@pudis.cz,

MGR. LIBOR ŠÍLA, libor.sila@pudis.cz,
ING. RICHARD KUK, richard.kuk@pudis.cz, PUDIS, a. s.,
ING. RADKO RIEGER, r.rieger@ko-ka.cz, KO-KA s. r. o.

Recenzoval: prof. Ing. Jiří Barták, DrSc.

and for hydrogeological measurements (a piezometer) was installed in November 2010, in advance of the excavation (at the distance of about 60m) at the above-mentioned assessment profile at chainage km 0.403 (the location of the cross passage between the Strahov tunnel tubes). Apart from the extensometer and the piezometer, 3D assessment profiles have been established in the Strahov tunnel tubes, and levelling points were installed on the ground surface. All of this is shown in Fig. 8.

Increased deformations induced by the excavation of the drainage gallery are again expected at the above-mentioned profile.

10 CONCLUSION

The excavation of the drainage gallery has till now proceeded approximately to one third of the total planned length and, owing to comprehensive and timely assessing of the geotechnical monitoring results and thanks to the implementation of supplementary surveys (pressuremeter tests, core holes drilled into the gallery excavation face-advance core etc.) no extraordinary events – no incidents – were experienced. The geotechnical monitoring also contributed to successful overcoming geotechnically problematic locations during the course of the excavation; the passage under the operating Strahov tunnels or driving the gallery through a fault zone having the character of soil undoubtedly belong among them. It was especially in the locations heavily disturbed by faulting that the implementation of combined assessment profiles proved itself best, allowing measurements to be carried out inside the drainage gallery, on the Strahov tunnel structures and on the ground surface. The lining of the drainage gallery was timely reinforced on the basis of the comprehensive assessment of all of the above-mentioned measurements, exactly in line with principles of the observational excavation method proposed by the design.

The construction of the drainage gallery with the newly designed lining system (comprising the gravel packing acting as a full-profile drain) has been thoroughly followed and examined in terms of structural calculations and the geotechnical monitoring being conducted. The excavation sections which were problematic for this tunnelling system comprised profound tectonic faults (fault zones) in the rock mass, where this method had to be operatively adapted to the actually encountered geological conditions.

ING. VÁCLAV KRCH, vaclav.krch@pudis.cz,
RNDr. RADOVAN CHMELAR, Ph.D.,
radovan.chmelar@pudis.cz,

MGR. LIBOR ŠÍLA, libor.sila@pudis.cz,
ING. RICHARD KUK, richard.kuk@pudis.cz, PUDIS, a. s.,
ING. RADKO RIEGER, r.rieger@ko-ka.cz, KO-KA s. r. o.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] KOLEČKÁŘ, M., HADRAVA, M. Výstavba Strahovského tunelu. *Silniční obzor*, 1997, roč. 58, č. 11, s. 359–367.
- [2] MAŘÍK, P., ČÍŽEK, J. Technické řešení konstrukcí SAT. *Silniční obzor*, 1997, roč. 58, č. 11, s. 354–359.
- [3] CHMELAR, R., ŠÍLA, L. *Realizační projekt geotechnického monitoringu odvodňovací štoly pod Strahovskými tunely (2. část)*. Praha : PUDIS, 2010, 39 s.
- [4] CHMELAR, R., ŠÍLA, L. *Souhrnné dílčí zprávy geotechnického monitoringu odvodňovací štoly pod Strahovskými tunely*. Praha : PUDIS, 2009–2010, 23 s.
- [5] HUDEK, J., ŠÍLA, L. *Ověření geotechnických parametrů v oblasti podchodu odvodňovací štoly pod Strahovským tunelem*. Praha : PUDIS, 2010, 22 s.
- [6] HUDEK, J., ŠÍLA, L. *Ověření geotechnických parametrů v oblasti pod horninovým pilířem mezi tunelovými troubami Strahovského tunelu*. Praha : PUDIS, 2010, 22 s.

Použité normy

ČSN EN 206-1 (732403): 2001. *Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha
Český normalizační institut 2001, 53 s.

Standards used

ČSN EN 206-1 (732403): 2001. *Concrete – Specifications, properties, production and compliance*. Prague
Issued by the Czech Standards Institute 2001, 53 p.