

TECHNOLOGIE RAŽEB TUNELOVACÍMI STROJI SE PO 30 LETECH VRACÍ NA PRAŽSKÉ METRO

TUNNEL EXCAVATION TECHNOLOGY USING TUNNELLING MACHINES RETURNS TO PRAGUE METRO AFTER 30 YEARS

BORIS ŠEBESTA, FILIP SCHIFFAUER, PETR VÍTEK

ÚVOD DO HISTORIE

V prosinci roku 2009 se sen mnoha českých tunelářů stal skutečností, v tento čas totiž byla podepsána smlouva mezi objednatelem Dopravním podnikem hl. m. Prahy, a. s., a zhotovitelem Sdružení metro V.A (Dejvická–Motol) složeným z firem Metrostav a. s., a Hochtief CZ a. s., pro zhotovení prodloužení trasy metra VA v úseku mezi stanicemi Dejvická (mimo) a Motol (včetně).

Za radostnou událost můžeme jistě označit jakýkoli takový nebo podobně realizovaný projekt, který má schopnost zlepšit dopravní obslužnost a tím i životní komfort dotčené komunity, ale pro nás tuneláře dosažení a naplnění již výše zmiňovaného snu zde spočívá spíše v realizaci ražeb traťových tunelů tunelovacími stroji, v tomto případě zeminovými štíty, kde zodpovědnost za jeho uskutečnění získal vedoucí účastník vítězného sdružení firma Metrostav a. s. Ve světě se pro tyto stroje používá název TBM – EPBS, v České republice se označují „tunelovací stroj – zeminový štít“.

Přestože historie československého, resp. českého tunelářství nemá v porovnání se světovým podzemním stavitelstvím tak bohatou a košatou zkušenost s použitím tunelovacích strojů, tak je jistě nutné a spravedlivé se zmínit, že v letech 1970–1990 ražby tunelů technologií tohoto typu na našem území již probíhaly. Zde můžeme zmínit firmy Subterra, Metrostav a IPS, které již v té době poměrně úspěšně zrealizovaly několik projektů v profilech od \varnothing 2,4 m do \varnothing 5,8 m.

Pravdou ovšem zůstává, že období našich prvních ražeb, kdy bylo u nás prvně využíváno principů strojního ražení, nemá s dnešní kvalitou obdobného technologického vybavení srovnání. Proto si snad i z těchto důvodů můžeme dovolit prohlásit, že moderní technologie ražeb zeminovými štíty bude v ČR nasazena přece jenom poprvé.

POPIS PROJEKTU

Projekt na prodloužení metra A v Praze počítal s protažením linky až na letiště Ruzyně, jako logické propojení letecké a městské povrchové hromadné dopravy.

Celý úsek mezi Dejvicemi a letištěm Ruzyně byl rozdělen do několika částí, z čehož soutěž byla vypsaná na prodloužení metra A až do stanice Motol (obr. 2). V tomto úseku se nacházejí tři ražené stanice (Petřiny, Veveřská a Červený Vrch) a jedna hloubená



Obr. 1 Současná podoba technologie EPBS (archiv Metrostav a. s.)
Fig. 1 Current EPB technology (Metrostav a. s. archives)

INTRODUCTION INTO HISTORY

A dream of many Czech tunnellers was fulfilled in December 2009, when a contract between Dopravní Podnik hl. m. Prahy, a. s. as the client and Sdružení Metro VA (Dejvická–Motol) consortium, consisting of Metrostav a. s. and Hochtief CZ, a. s., as the contractor signed the contract for the extension of the Line VA from Dejvická station (existing) to Motol station (to be newly built).

Certainly, any project which is implemented in this or similar way, which is able to improve traffic and, therefore, also to improve the comfort of living in the given community, is a joyful event. For us, tunnellers, the reaching and fulfilling of the above-mentioned dream rather means the fact that running tunnels will be driven using tunnelling machines (shielded machines with the face supported by balanced earth pressure). Metrostav a. s. is the leading member of the winning consortium who has assumed responsibility for fulfilling of the dream. These machines are referred to as EPB TBMs in the world, while the name of “a tunnelling machine with the face supported by balanced earth pressure“ is used in the Czech Republic.

Despite the fact that the past experience gained by Czechoslovak or Czech tunnelling in the use of tunnelling machines is not as vast if compared with the underground construction sphere in the world, it is certainly fair to say that tunnels were driven by this type of technology in our country in the 1970–1990 period. We can mention the companies of Subterra, Metrostav and IPS, which relatively successfully implemented several projects in this period (2.4m and 5.8m diameters).

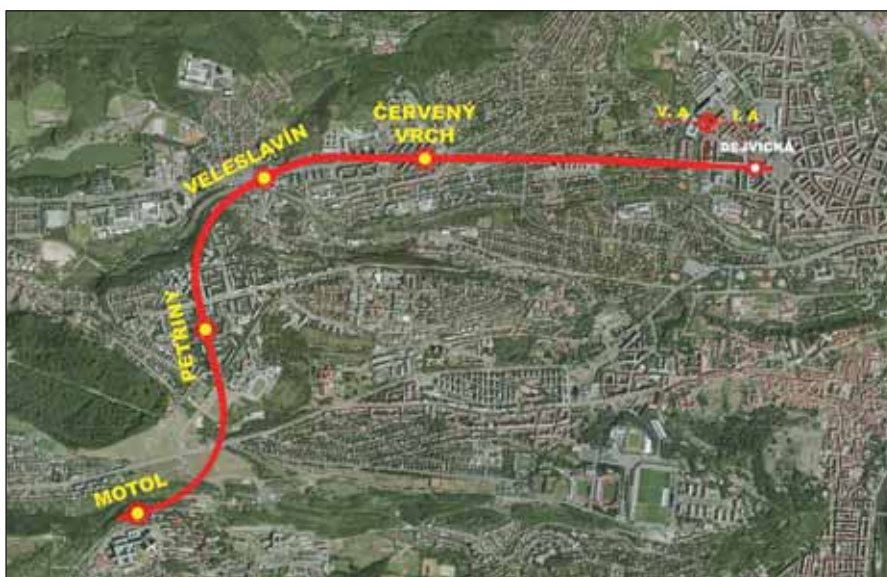
It is however true that the era of the initial cases of driving tunnels by shielded machines in our country has nothing in common with today's quality of similar tunnelling equipment. Probably even for this reason we can take the liberty of stating that modern EPB shielded machines will be really employed for the first time in the Czech Republic (see Fig. 1).

DESIGN DESCRIPTION

The design for the metro Line A extension expected that the line would be extended up to the Ruzyně Airport, as a logical connection between air traffic and underground urban mass transit systems.

The entire section between Dejvice and the Ruzyně Airport was divided into several parts, of which the extension of the metro Line A up to Motol station (see Fig. 2) was put out to tender. In this section, there are three mined stations (Petřiny, Veveřská and Červený Vrch) and one cut-and-cover station (Motol). In terms of the tunnelling techniques, the new line was divided into the Dejvice–Petřiny section, where two EPB TBMs will be employed, and the Petřiny–Motol section, where the NATM will be applied.

Running tunnels to be excavated by EPB shielded machines will be driven from Petřiny toward the existing Dejvice station, where the driving will be terminated. Individual basic parts of the EPB shielded machines will be assembled at the site facility before Petřiny station. Then the machines will be lowered through a shaft to an assembly chamber. The whole technological unit will be assembled in the assembly chamber, from which the machine will start the excavation in the direction of Petřiny station. The tunnelling machines will be pulled through each of the three stations, which means that the stations will be excavated by the NATM before the EPB shielded machines arrive. The construction trench in which all logistics for supplies and operation of the two machines will be switched over, thus the Petřiny–Veveřská section will be vacated for the con-



Obr. 2 Situace trasy Metra A: Dejvice – Motol (Metroprojekt a. s.)
Fig. 2 Dejvice – Motol metro Line A layout (Metroprojekt a. s.)

stanice (Motol). Z pohledu technologie ražeb se nová trasa rozdělila na úsek Dejvice–Petřiny, kde budou nasazeny dva zeminové štíty a úsek Petřiny–Motol, s ražbou pomocí NRTM.

Traťové tunely ražené zeminovými štíty se vyrazí od Petřin směrem ke stávající stanici Dejvice, kde ražbu ukončí. Na zařízení staveniště před stanicí Petřiny proběhne základní montáž jednotlivých dílů zeminových štítů, které budou následně spuštěny šachtou do montážní komory. Sestavení technologického celku proběhne v montážní komoře s následným zahájením ražeb ke stanici Petřiny. Razičí stroje budou všemi třemi stanicemi protaženy, což znamená, že se stanice vyrazí pomocí NRTM ještě před příjezdem zeminových štítů. Za stanicí Veveslavín je situována stavební jáma, ve které dojde k přepojení veškeré logistiky pro zásobování a obsluhu obou strojů. Tím se uvolní úsek Petřiny–Veslavín pro pokračování ve výstavbě obou stanic i vystrojení traťového úseku. Po přepojení logistiky za Veslavínem se přikročí k vyrazení úseku Veslavín–Červený Vrch a po protažení stanicí Červený Vrch dojde k ražbě posledního a nejdélšího úseku ke stávající stanici Dejvice.

PŘEDPOKLADY REALIZACE

V průběhu zpracovávání nabídky došla firma Metrostav a. s. k některým technickým úpravám projektu. Jednalo se především o přidání přístupové štoly do stanice Petřiny, změnu ve způsobu vyrazení stanice Petřiny, změnu systému skladby segmentového ostění a změnu systému odtěžení rubaniny z kolejové na pásovou dopravu.

Na zařízení staveniště u stanice Petřiny byla navržena jedna přístupová štola do trasy, která měla sloužit k ražbám dvoukolejných tunelů NRTM směrem k Motolu, jako přístup do montážní komory zeminových štítů a stejně tak i pro celý úsek strojního ražení do stavební jámy za stanicí Veveslavín. Po následném přepojení logistiky v tomto místě měla být štola u Petřin využita pro doražbu stanice Petřiny technologií NRTM, a to již přes razičími stroji vyražené traťové tunely s plně vystrojeným segmentovým ostěním. Nově navržená druhá přístupová štola vedená přímo do stanice Petřiny umožní vyrazit stanici ještě před příjezdem zeminových štítů. Toto řešení uspoří cca 2x200 m dříve nutně bouraného segmentového ostění včetně eliminace komplikované rozrážky stanice přes právě již vyražené traťové tunely. Současně tato změna pořadí průchodů technologií stanic v čase umožní optimalizovat její výstavbu.

Odtěžení rubaniny byla původně navržena pomocí kolejové a svislé dopravy, kde měly být jednotlivé kolejové vozy vytaženy pomocí portálových jeřábů na povrch a vysypány na mezideponii. Vzhledem i k hloubce šachty cca 27 metrů se jednalo o časově velice náročnou a z pohledu nutnosti strojního vybavení i o poměrně nákladnou operaci. Po zvážení všech možných kombinací volby nosného odtěžovacího média bylo nakonec jako nejlepší řešení zvoleno použití dopravníkových pásů přímo od štítů a dále kontinuálně v celé délce tunelů až na povrch s výsypem na mezideponii. Tento

tinuation of the construction of both stations and installation of trackwork and other tunnel equipment in this track section. After the change-over of the logistics behind Veveslavín, the excavation of the Veveslavín–Červený Vrch metro section will start and, after pulling the machines through Červený Vrch station, the last and the longest section to the existing Dejvice station will be driven.

CONSTRUCTION ASSUMPTIONS

Metrostav a.s. came to some technical modifications of the design during the work on the bid. The modifications comprised above all an addition of an access adit to Petřiny station, a change in the way of excavating Petřiny station, a change in the configuration of lining segments and a change in the system of mucking out (from rail-bound transport to belt conveyors).

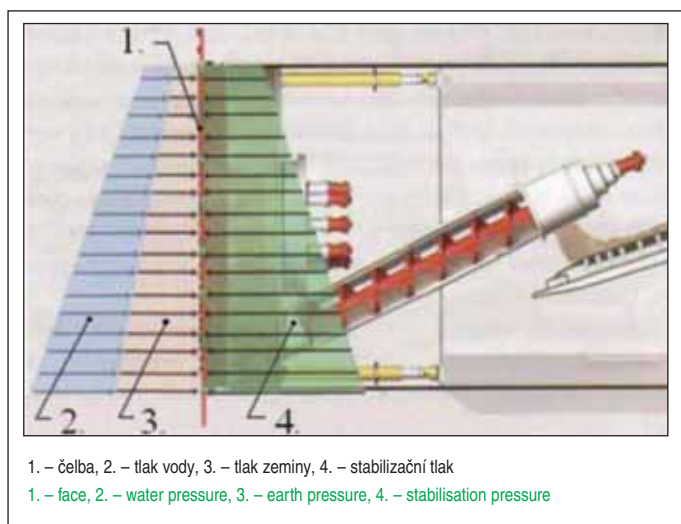
One access adit had been designed from the construction site at Petřiny station. It was expected that it would serve to the excavation of the NATM double-track tunnels toward Motol, providing access to the assembly chamber for EPB shielded machines and, at the same time, for the whole section to be driven mechanically up to the construction pit for Veveslavín station. After subsequent changing over of the logistics in this location, the adit was to be used for the completion of excavation of Petřiny station by the NATM, re-excavating the fully segmentally lined running tunnels pre-bored by the tunnelling machines. The newly designed second access adit, leading directly to Petřiny station, will allow the station to be excavated even before the arrival of the EPB shielded machines. This solution will save approximately 2x200m of the segmental lining which had originally had to be demolished, including elimination of complicated starting of the excavation via the just completed running tunnels. At the same time, this change in the order of passages of equipment through the station during the time will make optimisation of the construction process possible.

A rail-bound system with vertical shafts had originally been designed for the mucking out, with individual muck cars lifted by gantry cranes to the surface and discharged to an intermediate stockpile. Even because of the shaft depth of about 27 metres, this operation was time intensive and, in terms of requirements for mechanical equipment, also relatively expensive. After taking all possible combinations of the choice of the carrying medium into consideration, it was eventually decided that the best solution was the use of belt conveyors running directly from the shield and further continually throughout the tunnel length up to the surface, discharging to an intermediate stockpile. This mucking-out system completely separated the main logistic processes, i.e. the transport of lining segments to the tunnel up to the tunnelling machine and the transport of the muck to the surface. In the case of Petřiny station, this system is supplemented by a transfer point at which the muck is transferred from the belt conveyor running in the tunnel to an independent belt conveyor in the access adit which links to the double-track running tunnel. Owing to the separation into two independent transportation flows, a maximum support was obtained for reaching optimum tunnel excavation performance. In addition, the change of the cyclical transportation system to the continual system significantly simplifies the muck handling.

A rail-bound system with vertical shafts had originally been designed for the mucking out, with individual muck cars lifted by gantry cranes to the surface and discharged to an intermediate stockpile. Even because of the shaft depth of about 27 metres, this operation was time intensive and, in terms of requirements for mechanical equipment, also relatively expensive. After taking all possible combinations of the choice of the carrying medium into consideration, it was eventually decided that the best solution was the use of belt conveyors running directly from the shield and further continually throughout the tunnel length up to the surface, discharging to an intermediate stockpile. This mucking-out system completely separated the main logistic processes, i.e. the transport of lining segments to the tunnel up to the tunnelling machine and the transport of the muck to the surface. In the case of Petřiny station, this system is supplemented by a transfer point at which the muck is transferred from the belt conveyor running in the tunnel to an independent belt conveyor in the access adit which links to the double-track running tunnel. Owing to the separation into two independent transportation flows, a maximum support was obtained for reaching optimum tunnel excavation performance. In addition, the change of the cyclical transportation system to the continual system significantly simplifies the muck handling.

EARTH PRESSURE BALANCE SHIELD (EPB)

The main advantage of excavating tunnels by the EPBM technique are high advance rates and safety of excavation. The criterion for the excavation advance rate is the creation of a final lining together with waterproofing in one step, simultaneously with the continuing excavation, maintaining high level of safety as far as existing buildings and tunnelling crews are concerned. The entire tunnel length is covered either by the of EPB machine or a completed reinforced concrete lining. Owing to the controlled system of mucking out, loosening of the surrounding rock mass,



Obr. 3 Schéma vyrovnávání tlaků na čelbě (diplomová práce Filip Schiffauer)
Fig. 3 Balancing pressures at the face (Filip Schiffauer's diploma thesis)

způsob odtěžby zcela oddělil hlavní logistické procesy, což je doprava segmentového ostění dovnitř ke stroji a transport rubaniny ven na povrch. U stanice Petřiny je tento systém ještě doplněn o přesyp z tunelového pásu na nezávislý pás v přístupové štolě zaústěném do traťového dvoukolejného tunelu. Získáním nezávislosti obou dopravních proudů byla takto získána i maximální podpora dosahování optimálních výkonů ražeb, nehledě na to, že změna cyklické dopravy rubaniny na kontinuální výrazně zjednodušuje manipulaci s ní.

ZEMINOVÝ ŠTÍT – EARTH PRESSURE BALANCED SHIELD (EPBS)

Hlavní výhodou ražení pomocí technologie EPBS je její rychlost a bezpečnost. Kritériem rychlosti při realizaci tunelů je vytvoření definitivního ostění i s hydroizolací v jednom kroku při souběžně probíhající ražbě, a to s vysokou mírou bezpečnosti jak k povrchové zástavbě, tak i k dělníkům v tunelu. Celá délka tunelu je kryta buď vlastním štítem stroje EPBS, anebo již hotovým železobetonovým ostěním. Řízeným odtěžováním rubaniny se minimalizuje rozvolnění okolního prostředí a tím vznik poklesové kotliny. Porovnáním měsíčních postupů s metodou NRTM o adekvátních profilech se prokáže drtivá převaha technologie EPBS. Pro EPBS daného průměru již byl zaznamenán i špičkový postup více než 1000 metrů za měsíc, což obnáší vyražení i vystrojení tunelu definitivní konstrukcí se zabudovanou hydroizolací. Špičkový výkon pro NRTM se může pohybovat kolem 200 metrů za měsíc, ovšem pouze v primárním ostění, takže následují další operace v podobě reprofilace, realizace hydroizolace, armování a až poté je tunel dokončen betonáží definitivního ostění. Je samozřejmé, že vše nejvíce ovlivňuje zastižená geologie, avšak i v tomto ohledu je na tom lépe technologie EPBS, neboť z pohledu ražeb má na ni změna geologie výrazně menší dopad.

Existují dva základní typy razicího módu - otevřený a zavřený. Při otevřeném módu vyplňuje rubanina pouze část odtěžovací komory a při uzavřeném módu je odtěžovací komora zcela vyplněna rubaninou (obr. 3). Uzavřený mód dovoluje spolehlivě vytvářet protitlak k tlakům okolního prostředí, čímž eliminuje vznik rozvolňování okolí výrubu. Nevýhodou je pomalejší a dražší ražba. Uzavřený mód se používá při ražbě v nestabilním prostředí a při ražbě pod povrchovou zástavbou. Naproti tomu otevřený mód nechává část odtěžovací komory prázdnou, což má za následek rychlejší a levnější ražbu. Nevýhodou zůstává pomalejší reakce na nečekanou změnu tlakových podmínek na čelbě. Otevřený mód se používá pro ražbu ve stabilním prostředí. Ražby na trase VA budou střídavě probíhat v obou razicích módech.

Pro výrobu tunelovacích strojů byla vybrána firma Herrenknecht, která celosvětově zaujímá čelní místo ve vývoji a produkci těchto technologií. Nasazeny budou dva nové tunelovací stroje typu EPBS. Navržené stroje mají průměr 6 metrů, délku vlastního štítu 8 metrů a závěs o délce 80 metrů.

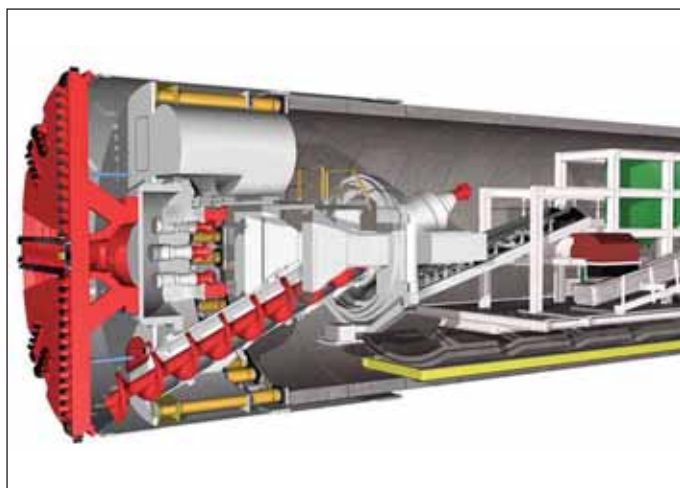
thus also the development of a settlement trough, is minimised. A comparison of monthly advance rates on adequate cross-sections will prove that EPB technologies greatly prevails over the NATM. An EPBM with the particular diameter has already achieved even a first-rate performance over 1000 metres per month, comprising excavation and installation of a final tunnel lining with a built-in waterproofing system. The peak advance rate achievable by the NATM may fluctuate about 200m per month, but only in a primary lining. Therefore, other operations follow comprising reprofiling, installation of the waterproofing, placement of reinforcement and, as the final operation, casting of the final lining. Of course, everything is most of all influenced by the geology encountered, but even in this respect the EPBM technology wins because, in terms of excavation, it is much less affected by changed geology.

There are two basic types of the mode of operation: an open mode and closed mode. With the open mode, the muck fills only part of the excavation chamber, while with the closed mode the excavation chamber is completely filled with the muck (see Fig. 3). The closed mode makes reliable formation of the counter-pressure acting against the pressures exerted by the surrounding environment possible, preventing the excavation surroundings from loosening. There is a disadvantage in this mode that the excavation is slower and more expensive. The closed mode is used when driving through an unstable environment and driving under existing buildings. By contrast, the open mode leaves a part of the excavation chamber empty; therefore driving is faster and cheaper. A disadvantage of this mode is the fact that its reaction to unexpected changes in the pressure conditions at the face is slower. The open mode is used for driving through a stable environment. The Line VA will be driven alternately using both driving modes.

Herrenknecht AG, a company keeping leading position in the development and production of this equipment, was selected to manufacture the tunnelling machines. Two new EPB tunnelling machines will be employed. The machines designed for the project are 6m in diameter, with 8m long shields and an 80m long back-up.

A combination of cutting tools is mounted on the cutterhead, both disc cutters and cutting knives. The combination is important with respect to the anticipated geological conditions. Disc cutters are ideal for the use in hard-rock conditions, whilst cutting knives are more suitable for disintegrating incohesive soil-type materials. The little protrusion of disc cutters ahead of the cutting knives protects the knives from a contact with hard-rock mass. Foam generating chemical additives are added to the material being disintegrated during the disintegration. It improves workability of the muck, its ability to exert the counter-pressure on the face and, at the same time, improves its consistency for the subsequent transport.

Once disintegrated, the muck is mixed with the foam in the extraction chamber. From the chamber, it is transported via a screw conveyor to a belt conveyor firmly connected with the EPB machine. It conveys the muck to the end of the trailing backup, where it is discharged on a tunnel belt conveyor to continue to an intermediate stockpile on the surface.



Obr. 4 Axonometrický řez štítem (Herrenknecht AG)
Fig. 4 Axonometric section through the shielded machine (Herrenknecht AG)

Řezná hlava je osazena kombinací řezných nástrojů, a to jak valivými dláty, tak i řeznými zuby. Kombinace je důležitá s ohledem na předpokládané geologické podmínky. Valivá dláta jsou ideální pro nasazení ve skalních podmínkách, zatímco řezné zuby se více hodí na rozpojování nesoudržných materiálů, typově zemin. Malé před-sazení valivých dlát chrání řezné zuby před kontaktem se skalním masivem. Již během rozpojování je do rozpojovaného materiálu přidávána stavební chemie, takzvaná pěna, která zlepšuje zpracovatelnost rozpojovaného materiálu, využitelnost materiálu pro držení protitlaku na čele a současně konzistenci pro následný transport.

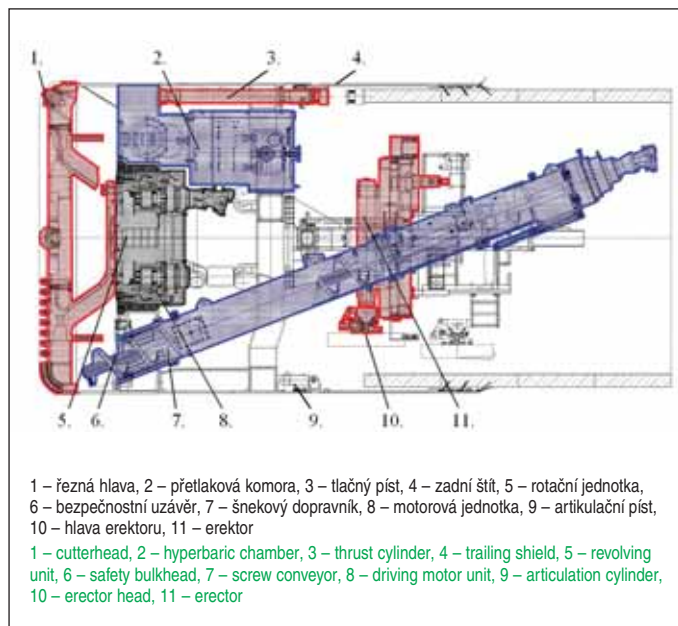
Po rozpojení se rubanina a stavební chemie promíchává v odtěžovací komoře. Odtud je transportována šnekovým dopravníkem na dopravníkový pás, pevně spojeným s vlastním strojem EPBS. Ten vynáší rubaninu na konec závěsu, kde se přesype na tunelový pás, vynášející rubaninu až na mezideponii na povrchu.

Popis základních technologických celků začíná řeznou hlavou s navazující odtěžovací komorou, která je oddělena tlakovou přepážkou od zbytku štítu, resp. tunelu (obr. 4). S touto přepážkou je spojena nejtěžší část stroje EPBS, protože je zde umístěna motorová jednotka, pohánějící řeznou hlavu. Spodní částí probíhá šnekový dopravník na rubaninu a v horní části se nachází přetlaková komora sloužící pro adaptaci pracovníků na zvýšený tlak v případě nutnosti vstoupit do odtěžovací komory, která se nachází v přetlakovém režimu. Tuto sekci po obvodě doplňují rozpínající lisы, tlačíci proti poslednímu zbudovanému prstenci ostění a tím posouvající celý komplex stroje i se závěsem vpřed.

Závěs stroje je s touto motorovou částí stroje spojen mostem. Ten je zde proto, aby celá spodní část tunelu zůstala volná pro transport a budování segmentového ostění. K montáži ostění slouží erektor, dopravující jednotlivé segmenty ostění do správné pozice (obr. 5). Na mostě se nachází vlastní erektor, řídicí kabina a další nezbytné prvky, jako například pásový dopravník, který probíhá celým komplexem závěsu stroje. Závěs tvoří jednotlivá technologická centra, potřebná pro chod celého systému. Jedná se o hydraulickou sekci, trafostanice, laserový naváděcí systém, sekci pro prodlužování veškerých vedení v tunelu atd.

Postup vlastních prací se odvíjí od rozpojení a odtěžení jednoho záběru, který je v délce 1,5 metru. Rotací řezné hlavy se rozpojuje čelba za současného dotování pěnou. Takto upravená rubanina prochází řeznou hlavou do odtěžovací komory, kde se mísí s další pěnou. Následný transport rubaniny obstarává šnekový dopravník. V průběhu ražby se stroj posouvá neustále dopředu. Vzniklý volný prostor za štítem, neboli prostor mezi již zabudovaným ostěním a výrubem, se musí kontinuálně vyplňovat. V našem případě se jedná o dvousložkovou výplňovou injektáž, která oproti jednosložkové lépe vyplňuje potřebný prostor a rychleji a operativněji reaguje na požadovanou rychlost tuhnutí. Po doražení jednoho záběru se ukončí odtěžování rubaniny šnekovým dopravníkem, následně je rubanina přenesena z pásu na stroji na tunelový pás. V tomto okamžiku se zastaví oba pásy a může začít montáž betonového ostění za pomoci erektoru. Segmenty jsou za pomoci erektoru dopraveny na cílová místa, posléze fixovány tlačnými písty a připojeny pomocí šroubů k předchozím segmentům. Po smontování celého prstence začíná ražba dalšího záběru.

Původní návrh stroje EPBS byl vylepšen o řadu technických detailů. Jedná se například o změnu pevného šnekového dopravníku za teleskopický, což přináší možnost zcela vysunout šnekový dopravník z odtěžovací komory a tu pak uzavřít. Příkon motorové jednotky pro rotaci řezné hlavy se zvýšil z 800 kW na 1200 kW s důrazem na větší jistotu při ražbách v tak různorodých geologických podmínkách, jakými je Praha proslavena. Přídavné vážení odtěžené rubaniny pomáhá eliminovat stav, při kterém se nevědomě odtěžuje více rubaniny, než odpovídá vyražené vzdálenosti. Tento stav by se mohl negativně projevit vytvořením poklesové kotliny na povrchu. Pro lepší kompatibilitu stroje s ostěním byl zmenšen průměr tlačných pístů a zvýšen jejich počet z 26 na 32 kusů (viz Vazba na EPBS). Přestože velká část změn znamenala nárůst ceny stroje, měly by se vynaložené prostředky promítnout v rychlejším a bezpečnějším průběhu ražeb, což by ve výsledku měly být dobře investované peníze.



Obr. 5 Popis základního strojního vybavení technologie EPB (archiv Metrostav a. s.)

Fig. 5 Description of the basic components of the EPB technology (Metrostav a. s. archives)

The description of basic equipment units starts by a cutterhead with an adjacent extraction chamber, which is separated by a pressure bulkhead from the remaining part of the shield or the tunnel (see Fig. 4). The cutterhead driving motor unit, which is the heaviest part of the EPB machine, is connected to the bulkhead. A screw conveyor transporting the muck is installed in the bottom part, whilst a hyperbaric chamber allowing adaptation of the crew to overpressure in the case of necessity of entering the extraction chamber operating in the overpressure regime is in the upper part. In addition, there are thrust cylinders in this section, pressing against the last completed lining ring and shifting the entire equipment complex with the trailing backup ahead.

The backup is connected with the driving motor part of the machine by a bridge (see Fig. 5). The bridge allows the entire lower part of the tunnel to remain free for the transport of lining segments and erection of the lining. The lining is assembled using an erector, which transfers individual lining segments to correct positions. The bridge carries the erector itself, operator's cabin and other necessary components, such as the belt conveyor running throughout the trailing backup length. The backup is formed by individual technological centres required for the operation of the entire EPBM complex, i.e. a hydraulic section, a transformer station, a laser guidance system, a section allowing all tunnel lines to extend etc.

The basic component of the tunnel driving procedure is the disintegration and excavation of ground within one excavation round, the length of which is equal to 1.5 metre. The excavation face is disintegrated by a rotating cutterhead, with foam being continuously added to the muck. The muck treated in this way passes through the cutter head to the extraction chamber, where it is mixed with additional foam. A screw conveyor ensures the subsequent transport. When driving, the machine continuously moves forward. The free space which originates behind the shield, which is the annulus between the completed lining rings and the rock face, must be continually backfilled. In our case, it is backfilled by injecting a two-component grout, which better fills the space than a one-component grout and reacts in a more operative way to requirements for the rate of setting. When the excavation of one round is completed, the muck is removed by the screw conveyor to be subsequently transferred from the machine-mounted belt conveyor to the tunnel belt conveyor. At that moment both belt conveyors are stopped and the assembly of the concrete lining using the erector can start. The lining segments are transported by the erector to the target points, fixed by pressure cylinders and connected to the previous segments with bolts. When the assembly of the ring is finished, the next round of the excavation can start.



Obr. 6 Uspořádání segmentů v tunelu (metro Budapešť)
Fig. 6 Configuration of segments in a tunnel (Budapest metro)

PREFABRIKOVANÉ SEGMENTOVÉ OSTĚNÍ TUNELŮ

Využití prefabrikovaného segmentového ostění není nová myšlenka. Tento druh ostění byl u nás již v minulosti široce využíván při výstavbě metra a na dalších železničních i silničních tunelech. U traťových i staničních tunelů metra se využívaly nejprve ocelolitvinové segmenty a následně pak betonové. Zásadním problémem, který prefabrikované ostění přinášelo, bylo těsnění tunelu proti účinkům tlakové vody. Těsnicí systémy byly nákladné (využívalo se např. olovo) a poněkud nespolehlivé.

Nová generace segmentového ostění je charakteristická velmi vysokou přesností výroby prefabrikátů. Geometrické odchylky jsou minimální, a proto těsnicí pásy vložené do zvláštních drážek ve spárách ostění kvalitně zatěsní ostění tunelu proti účinkům tlakové vody.

Volný prostor mezi vnějším povrchem ostění a výrubem se průběžně injektuje vhodnou injektážní směsí.

Návrhu systému ostění byla věnována velká péče a systém byl posuzován z mnoha hledisek. Ve světě se využívá řada různých systémů montovaného ostění, většina byla podrobně posouzena a zhodnocena. Snahou však bylo navrhnout optimální řešení pro dané podmínky místo prostého kopírování jiného systému s rizikem zavedení chyb, kdy původní systém v některém ohledu nerespektuje naše požadavky.

Geometrie

Ostění se skládá z jednotlivých prstenců. Délka prstence ve směru tunelu se volí v závislosti na směrovém a výškovém vedení trasy a na profilu tunelu. Traťové tunely trasy VA mají profil v řádu 6 m (5,8 vnější průměr ostění), délka prstence je navržena 1,5 metru. Prstence je rozdělen na několik segmentů. Dělení segmentů v rámci prstence se volí tak, aby se s jednotlivými prvky dalo dobře manipulovat. Pro daný profil je za optimální považován počet 6 kusů.

Prstence ostění se buduje postupně po obvodě od jednoho základního s příkládáním dalších segmentů až po segment závěrný, který se nyní nejčastěji vkládá ve směru podélné osy tunelu od stroje směrem k hotovému ostění. Smontovaný prstence se stabilizuje spojovacími šrouby, následně pak výplňovou injektáží.

Na obrázku číslo 6 je znázorněn tunel metra v Budapešti, kde je využíván obdobný systém.

Velikost závěrného segmentu lze volit buď obdobné velikosti jako ostatní segmenty, nebo výrazně menší, viz Vazba na EPBS. U malých závěrných segmentů s ohledem na geometrii postačuje menší úklon podélných spár.

Aproximace směrových a výškových oblouků

S ohledem na typizaci výroby není vhodné vyrábět každý prstence jiného tvaru tak, aby se vystihly směrové a výškové oblouky. Proto se většinou vyrábějí všechny prstence stejné s určitým úklonem – podstavy válce opsaného prstenci jsou různoběžné. Přímé vedení tunelu se zajišťuje střídavým ukládáním prstenců v určitých směrech. Oblouky libovolného poloměru (většího než je minimum dané úklonem) lze aproximovat postupnou rotací prstenců kolem podélné osy tunelu tak, aby odchylky oproti teoretické trase byly minimální. Schéma principu uspořádání je na obr. 7.

The original EPBM design was improved by a range of technical details which were added to it. For example, the firm screw conveyor was replaced by a telescopic one. Owing to this change, the screw conveyor can be completely retracted from the extraction chamber, thus the chamber can be closed. The power input for the motor unit providing rotation of the cutterhead was boosted from 800kW to 1200kW with stress placed on higher certainty during the driving through the highly variable geological conditions which have made Prague famous. The additional feature for weighing the excavated muck helps to eliminate the condition where more muck is being removed than it corresponds to the excavated tunnel length. This state could negatively manifest itself by the formation of a settlement trough on the surface. With the aim of ensuring better compatibility of the machine with the lining, the diameter of thrust cylinders was reduced and the number of the cylinders was increased from 26 to 32 (see Context of the EPBM). Despite the fact that a significant proportion of the changes meant an increase in the cost of the machine, the invested means should be reflected in faster and safer driving, it means that the money would be reasonably spent.

PRECAST SEGMENTAL TUNNEL LINING

The idea of using a precast segmental lining is not new. This type of the lining was widely used in our country in the past, during the construction of the Prague metro and on other railway and road tunnels. At the beginning, running tunnels were lined with cast steel segments, which were later replaced by concrete ones. The fundamental problem brought about by the precast lining was the sealing of the tunnel against pressure water inflows. Sealing systems were expensive (for example, lead was used) and a little unreliable.

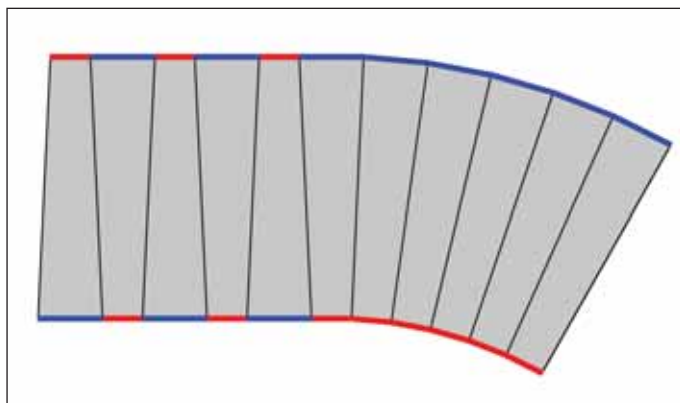
The new generation of segmental lining is characterised by very high precision of the lining segments manufacture. Geometrical deviations are minimised, therefore, sealing gaskets inserted into special grooves in the segments provide quality sealing of the tunnel lining against pressure water leaks.

The free annular space between the outer surface of the lining and the excavated ground surface is continuously filled by suitable grout injection.

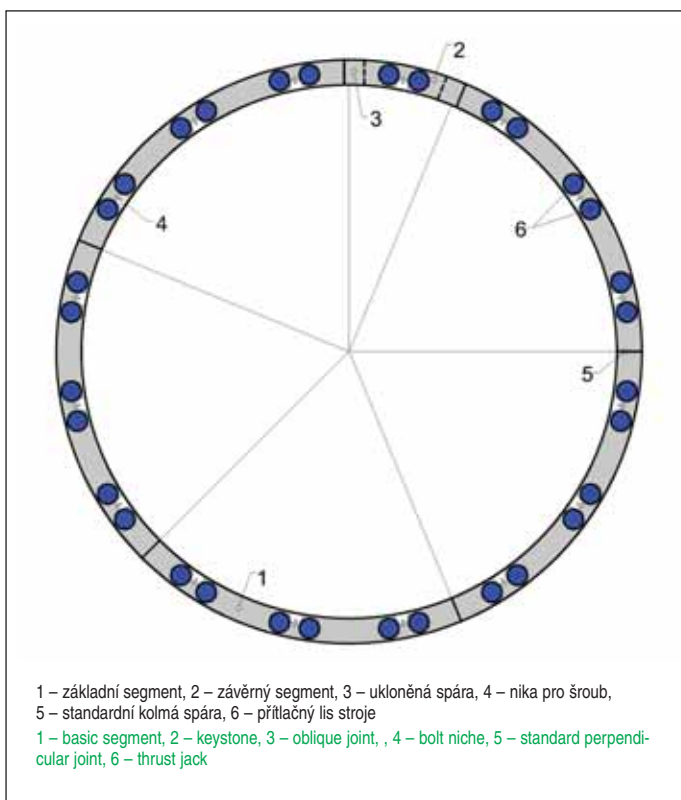
The lining system design received great care and the system was assessed from many points of view. Many various systems of segmental linings are used in the world; most of them were assessed and evaluated in a detailed manner. The objective was to propose an optimum solution for the given conditions, instead of simply copying another system accompanied by the risk that errors could be introduced causing that the original system would not comply with our requirements in some aspect.

Geometry

The lining consists of individual rings. The length of a ring in the axial direction is chosen depending on the horizontal and vertical alignment of the route and the tunnel profile. The diameter of running tunnels on the Line VA is in the order of 6m (the outer diameter of the lining is 5.8m), the ring is 1.5m long. The ring is divided into several segments. Such distribution of segments around the ring



Obr. 7 Schéma kladení prstenců v přímém a obloukovém úseku
Fig. 7 Scheme of the succession of rings on a straight and curved route respectively



Obr. 8 Členění segmentů v souladu s přitlačnými lisy

Fig. 8 Division into segments with respect to thrust cylinders

Systém navržený pro metro A umožňuje zajistit vazbu mezi segmenty (obdobně jako u cihelného zdiva) – tzn. eliminovat spojitou podélnou spáru – na rozdíl od obr. 6, kde je vidět porušení systému vazby vedením průběžné spáry. Dokonce je zde i křížové umístění spár, které se považuje za rizikové i z hlediska těsnosti styku izolačních pásek a tedy vodotěsnosti.

Existuje i řešení se shodnou modulární velikostí a všemi podélnými spárami šikmými. Při 6 segmentech pak je možné kterýkoliv ze tří segmentů ukládat jako závěrný. Podle požadované rotace prstence se ukládá jako závěrný ten segment, který je v horní části ostění.

Vazba na EPBS

Během ražby je přítlak stroje vyvíjen hydraulickými lisy proti hotové části ostění. Normálové zatížení ostění je poměrně velké. Pokud nejsou návrhy ostění a stroj kompatibilní, zatěžují se segmenty přítlakem stroje v libovolném místě, např. i přes podélnou spáru. Při návrhu ostění trasy metra VA bylo s ohledem na úsporu materiálu požadováno, aby zatížení lisy při ražbě působilo na segmenty vždy ve stejných místech nezávisle na rotaci prstenců. V uvedeném případě je zapotřebí dodržet soulad počtu lisů na stroji s počtem spojovacích šroubů prstenců a členěním jednotlivých segmentů.

Vzhledem k omezenému prostoru pro lisy při užití ostění o tloušťce 25 cm je výhodné využívat lisy menšího profilu uspořádané do skupin – dvojic.

Pro stavbu byly zvažovány 2 systémy:

- 6 stejně velkých segmentů, z toho 3 závěrné s 12 skupinami lisů na stroji a úhlem rotace prstenců v násobku 30°;
- 5 stejně velkých segmentů a 1 malý závěrný (velikosti 1/3 standardního) s 16 skupinami lisů a úhlem rotace prstenců v násobku 22,5° (obr. 8).

Oba systémy umožňují vazbu (střídání) podélných spár, tak aby žádná spára nebyla průběžná, a rovněž splňují uvedená kritéria pro působení zatížení během ražby. Po vyhodnocení všech přínosů a nevýhod byl zvolen systém uvedený pod bodem 2.

Vzhledem k robustnosti konstrukce se považuje přítlak na již namontované segmenty pomocí lisů stroje za dostatečný, tak aby nedocházelo k jejich sesedání. Následně vložení závěrného segmentu by tedy nemělo být problematické ani pokud bude vkládán v dolní části ostění.

is chosen which allows easy handling of individual elements. The optimum number for the given profile is six.

The lining ring is erected in steps around the circumference, from one basic segment and the others being added up to the keystone, which is most frequently inserted in the axial direction, from the machine toward the previously completed ring. Once assembled, the ring is stabilised by connection bolts and, subsequently, by annular grouting.

Figure 6 shows a Budapest metro tunnel, where a similar system is used.

Dimensions of the keystone can be selected to be either similar to dimensions of the other segments or significantly smaller (see Context of EPBM). Smaller keystones require smaller tapering of longitudinal joints with respect to the geometry.

Approximation of horizontal and vertical curves

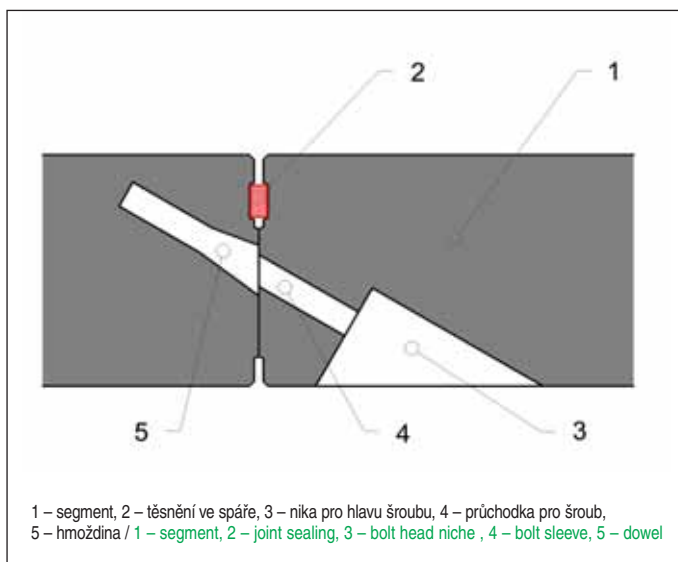
Taking into consideration the standardisation of the manufacture, producing each ring with different geometry with the aim of satisfying horizontal and vertical curves, is not reasonable. For that reason identical rings are mostly manufactured, with certain tapering – the bases of a cylinder circumscribing the ring are non-parallel. Straight alignment of the tunnel is achieved when the rings are installed alternately in certain directions. Various radius curves (smaller than the minimum given by the taper) can be approximated by staged rotation of the rings around the longitudinal axis of the tunnel so that deviations from the theoretical alignment are minimised. The system principle chart is shown in Fig. 7.

The system which is designed for the metro Line A allows a bond pattern to be created between segments (similar to brickwork), i.e. to eliminate continuous longitudinal joints, in contrast to Fig. 6, where the bond pattern is upset by a continual longitudinal joint. There is even a cruciform joint in the picture, which is considered risky in terms of the tightness of the joint between sealing gaskets, therefore also in terms of waterproofing properties.

A solution even exists with identical modular sizes and all longitudinal joints oblique. With 6 segments forming the ring, it is possible to install any of 3 segments to fulfil the role of a keystone. Depending on the required rotation of the ring, the segment which is found in the upper part of the ring is installed as the keystone.

Context of the EPBM

The machine thrust during the course of the excavation is produced by hydraulic cylinders, acting against the completed part of the lining. The normal forces acting on the lining are relatively large. Unless the lining design and the machine design are compatible, the segments are loaded by the machine thrust at random points, for example even through a longitudinal joint. When the design for the metro VA tunnels lining was being carried out, it was required with respect to material savings that the thrust cylinders during excavation acted on lining segments always at the same points, indepen-



Obr. 9 Uspořádání spáry mezi segmenty s těsněním

Fig. 9 Configuration of the joint between segments and gaskets



Obr. 10 Skládka segmentů vybavených těsněním a překližkami
Fig. 10 Stacking facility for segments fitted with sealing gaskets and plywood

Výroba segmentů

Segmenty se vyrábějí ve specializované výrobě ukládáním betonu do robustních velmi přesných forem, které zabezpečují geometrickou přesnost výrobků. Do forem jsou vloženy prvky vytvářející prohlubně pro vzájemné propojení segmentů kuželovými kolíky a vložky do bednění za účelem vytvoření nik pro hlavy šroubů. Výztuž se vkládá do forem jako předem vyrobený svařený armokoš. Uložený beton je vibrován příloženými vibrátory připevněnými na konstrukci formy.

Výrobu je možné uspořádat dvěma systémy:

Stacionární typ, kde jsou formy ustaveny na místě a veškerý materiál je dopravován na jednotlivé pozice forem.

Karuselový typ, kde se formy pohybují na kolejnicích mezi jednotlivými pracovišti. Součástí bývá i proteplovací komora, kde beton zraje.

V případě výroby pro trasu metra VA se předpokládá stacionární typ výroby.

Na vybetonované segmenty se osazuje těsnění proti tlakové vodě. Těsnění je předem vyrobeno ve tvaru uzavřeného rámu, který přesně odpovídá rozměrům daného segmentu. Těsnění se navlékne do drážky a následně přilepí k betonu (obr. 9 a 10).

V některých případech se na jednu stranu segmentů na styčnou plochu mezi prstenci ještě lepí překližka, která zajišťuje lepší roznesení napětí mezi prstenci při přítlaku stroje (obr. 10). Využití překližky je zvažováno i v našem případě.

Vystrojené segmenty se ukládají na skládku, a to buď nalezato v poloze "U", kdy mohou být plně vystrojeny, nebo případně nastojato, kdy je zapotřebí nalepit těsnění až následně, aby se při skladování nepoškodilo. Po zatvrdnutí betonu jsou segmenty připraveny pro montáž ostění.

Dimenze ostění

Během výstavby jsou betonové segmenty zatíženy různými typy zatížení, které můžeme rozdělit na dočasná a definitivní.

Úsporný návrh ostění vychází z předpokladů, že pro dimenzi ostění jsou rozhodující definitivní zatížení – vliv horninového prostředí a zatížení definitivním provozem.

Pro ostatní dočasná zatížení jako zejména manipulace a skladování je vhodné navrhnout taková opatření, aby tyto vlivy nevyžadovaly zesílení prvků ani navýšení procenta vyztužení. Výjimkou je lokální normálové zatížení ostění lisy při ražbě stroje, které je natolik významné, že vedlo k potřebě zvýšení pevnostní třídy betonu.

Injektáž za rub ostění

Volný prostor mezi rubem ostění a horninou je vyplňován injektážní hmotou. Hmotu je vpravována za rub ostění během ražby – tedy posunu stroje. Lze zajistit, že za ostěním je udržován permanentně injektážní tlak odpovídající tlaku horninového prostředí. Toto je další z efektů minimalizujících rozvolnění horniny a tedy poklesy na povrchu.

Injektážní hmota je vhaněna trubkami vedenými podél štítu za rub ostění. Není proto potřebné injektovat skrz ostění a narušovat tak celistvost segmentů a vyvážet místo s nebezpečím průniku vody do

dělního prostoru ostění. In this particular case it is necessary to maintain the number of thrust cylinders consistent with the number of circumferential joints between the rings and the configuration of individual segments.

Because of the constrained space for the cylinders applied when a 25cm lining is used, it is advantageous if smaller-diameter thrust cylinders are used and arranged in groups - couples.

The following two systems were considered for the construction:

1. 6 segments with identical sizes, 3 of them of the keystone type, with 12 groups of thrust cylinders on the machine and the ring rotation angles equal to multiples of 30°.
2. 5 segments with identical sizes and 1 small keystone (with the size equal to 1/3 of the basic segment), with 16 groups of cylinders and the ring rotation angles equal to multiples of 22.5° (see Fig. 8).

Both systems allow the bond (alteration of longitudinal joints) to be designed in a pattern where no joint is continuous and both meet the above-mentioned criteria for the action of loads during the tunnel excavation. When all benefits and disadvantages had been assessed, the system presented under point #2 was chosen.

With respect to the robust design of the structure, the thrust acting on the already installed segments by means of hydraulic cylinders installed on the machine is considered sufficient to prevent them from sinking. The subsequent insertion of the keystone should not be problematic even if it is to be inserted in the bottom part of the lining.

Manufacture of segments

Segments are manufactured in a specialised plant, where concrete is cast into robust, high-precision moulds, which guarantee dimensional and geometrical accuracy of products. Elements forming the recesses required for joining the segments by conical pins and the elements forming niches for heads of bolts are inserted into the mould. Reinforcement is inserted into moulds in the form of pre-fabricated welded cages. Concrete in the mould is compacted by means of external vibrators fixed on the mould body.

The production can be arranged in the two following systems:

1. A stationary type, where the moulds are installed on one spot and all materials are transported to them.
2. A carousel type, where moulds move on rails between individual work places. A heat curing chamber is usually part of the system.

As far as the production for the metro Line VA is concerned, the stationary type is planned.

After casting, the segments are fitted with high-pressure sealing gaskets. The sealing is prefabricated in the shape of a closed frame the dimensions of which precisely correspond to the dimensions of the particular segment. The gaskets are inserted into the grooves and glued to the concrete (see Figures 9 and 10).

In some cases, plywood is glued to one side of the segments, in the radial joints. This system provides better distribution of stress between the rings when the thrust is acting (see Fig. 10). The use of the plywood is under consideration even in our case.

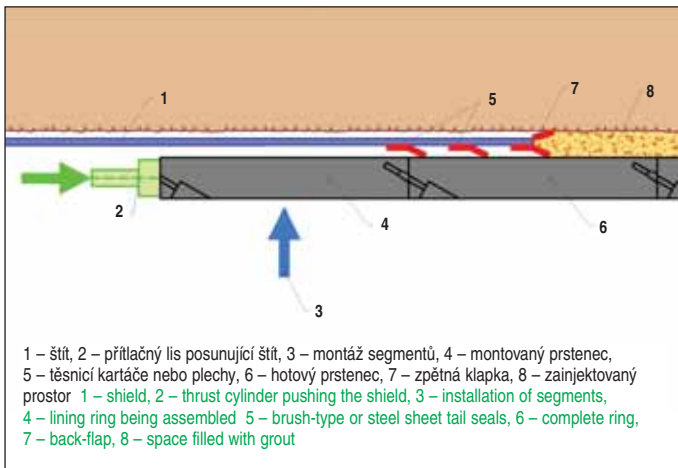
Complete segments with gaskets are stored at a stocking facility. They are either stacked in a "U" position, where they can be fully fitted with the gaskets, or on edges, where the gaskets must be glued subsequently so that damaging during the storage is prevented. When the concrete hardening process is finished, the segments are prepared for assembling of the lining.

Dimensions of the lining

During the course of the construction, the concrete segments are loaded by various types of loads, which can be categorised as temporary loads and permanent loads.

An economical design is based on assumptions that definite loads, i.e. the effects of the ground environment and loads induced by the final operation, are crucial for dimensions of a lining.

As far as other temporary loads are concerned, first of all segment handling and stocking, it is reasonable to propose measures owing to which no increasing of the thickness of the segments or increasing of the ratio of concrete reinforcement is required. The normal forces exerted by the thrust cylinders during the tunnel driving are an exception. This is so important that it led to a necessity of increasing the concrete grade.



Obr. 11 Schéma uspořádání výstavby ostění v prostoru štítu
Fig. 11 Assembly of a lining ring inside the shield

tunelu. Schéma uspořádání stroje je zobrazeno na obr. 11.

K injektáži existují dva základní přístupy:

- Jednosložková injektážní hmota na bázi běžných cementových malt, kde hlavními složkami jsou kamenivo, cement, voda a přísady upravující tuhnutí.
- Dvosložková injektážní hmota na bázi gelů, kde hlavními složkami jsou voda, cement, bentonit a gelovací přísada, která se přidává do směsi až v injektážní hlavici.

Hlavní výhodou gelové injektáže je její snadná doprava do tunelu čerpáním v potrubí. Jelikož je značné množství vody ve směsi vázáno především gelovou strukturou, vznikají obavy z dlouhodobé objemové stability hmoty, zda nebude vázaná voda vlivem zatížení vytlačována do okolí.

Problematika je věnována patřičná pozornost a dvousložková injektážní hmota bude dlouhodobě laboratorně zkoušena. V případě, že se potvrdí její objemová stabilita, bude v projektu uplatňován tento typ injektáže.

ZÁVĚR

Využití moderní technologie ražby zeminovými štíty poprvé v ČR je pro společnost Metrostav a. s. výzvou. Příprava a aplikace jednotlivých dílčích technologií vyžaduje komplexní náhled na problematiku se zhodnocením širokého spektra vlivů.

Velmi rozličná geologická struktura zájmové lokality vede na univerzální stroj, který zvládá ražbu jak v otevřeném, tak uzavřeném módu. Rovněž podmínky pro montáž a demontáž stroje ve stísněném podzemí jsou limitem určeným projektem.

Kromě vlastního stroje je věnován důraz na řešení logistiky – odvoz rubaniny a zásobování stroje, kde rovněž existuje několik přístupů a výběr nejvhodnějšího je ovlivněn řadou faktorů.

Prefabrikované segmentové ostění nové generace přináší řadu technologických problémů, které je třeba vyřešit. Nelze jen kopírovat zkušenosti ze států, kde je tento způsob výstavby již rozšířen, ale je zapotřebí technologii přizpůsobit našim podmínkám. Ať už se jedná o specifické podmínky horninového prostředí, nebo i výrobní možnosti v naší ekonomice.

Problematika je řešena velmi široce a veškeré možnosti jsou pečlivě zvažovány a ověřovány. Pevně věříme, že tak pečlivá předvýrobní příprava bude zúročena v podobě úspěšné realizace a schopnosti takto výjimečné technologie nám k tomu budou nápomocny.

Dosud se psalo, že ražba tunelovacími stroji znamená budoucnost pro realizaci podzemních děl. Jsme rádi, že firma Metrostav a. s. má možnost se chopit této výzvy a první ražbu v České republice s technologií EPBS provést.

ING. BORIS ŠEBESTA, boris.sebesta@metrostav.cz,
ING. FILIP SCHIFFAUER, filip.schiffauer@metrostav.cz,
DR. ING. PETR VÍTEK, petr.vitek@metrostav.cz,
METROSTAV, a. s.

Recenzoval: Ing. Martin Srb

Backgrounding

The empty annular space between the outer side of the lining and the rock face is backfilled with grout. The grout is injected behind the outer side of the lining during the excavation, during the shield pushing operation. It is possible to ensure that a permanent grouting pressure corresponding to the ground pressure is maintained behind the lining. This is another one of the effects minimising the rock loosening process, thus also minimising the surface settlement.

The grout is pumped behind the outer side of the lining through tubes running along the shield. It is therefore unnecessary to inject grout through the lining, thus to compromise structural integrity of the segments and create points at which leakage of water into the tunnel is a threat. The chart of the tail shield and the lining is presented in Fig. 11.

There are two approaches toward injecting the grout:

1. One-component grout based on common cement mortar, where the main components are aggregates, cement, water and additives regulating the rate of setting.
2. Two-component, gel-based grout, where the main components are water, cement, bentonite and a gelling additive, which is added to the mixture at the grouting head.

The main advantage of the gel-based grout is the fact that it is easy to transport into the tunnel by pumping through a pipeline. Since a significant amount of water in the grout is bound to the gel structure, there are fears about long-term stability of the material, whether the bound water will not be forced to the surroundings.

This problem is paid due attention and long-term tests will be conducted on the two-component grout. If its volumetric stability is confirmed, the design will apply this type of grout.

CONCLUSION

The application of the modern tunnelling technology using shielded machines with the face supported by balanced earth pressure for the first time in the Czech Republic poses a challenge for Metrostav a.s., the contractor. The preparation and application of particular partial technologies calls for comprehensive viewing of the problems combined with assessing of a wide range of influences.

The very variable geological structure in the area of operations leads to the decision to use a universal machine, which is capable of driving in both modes, closed and open. The conditions for the assembly and dismantling of the machine in the constrained underground space are also a limiting factor following from the design.

Apart from the machine itself, attention is paid to solving problems of logistics, i.e. the muck removal and supplying materials to the machine. There are also several attitudes possible and the selection of the most suitable is affected by many factors.

The new-generation precast segmental lining brings about a range of technological problems which must be solved. Simple copying of experience from the states where this construction technique has already been widely spread is impossible. The technology must be adjusted to our conditions, both in terms of the specific ground environment conditions and the production potential of our economy.

The problems are being solved in a very wide manner and all options are being duly considered and verified. We have complete confidence that the thorough construction planning will bear interest in the form of successful implementation of the works and the abilities of this outstanding technology will help us to achieve this target.

Constructing tunnels with tunnel boring machines is considered to be the future for the underground construction industry. We are happy that Metrostav a.s. has been given the opportunity to respond this challenge and carry out the first EPBM drives in the Czech Republic.

ING. BORIS ŠEBESTA, boris.sebesta@metrostav.cz,
ING. FILIP SCHIFFAUER, filip.schiffauer@metrostav.cz,
DR. ING. PETR VÍTEK, petr.vitek@metrostav.cz,
METROSTAV, a. s.