

PŘÍPRAVA A REALIZACE METRA D V PRAZE

DESIGN AND CONSTRUCTION OF METRO D IN PRAGUE

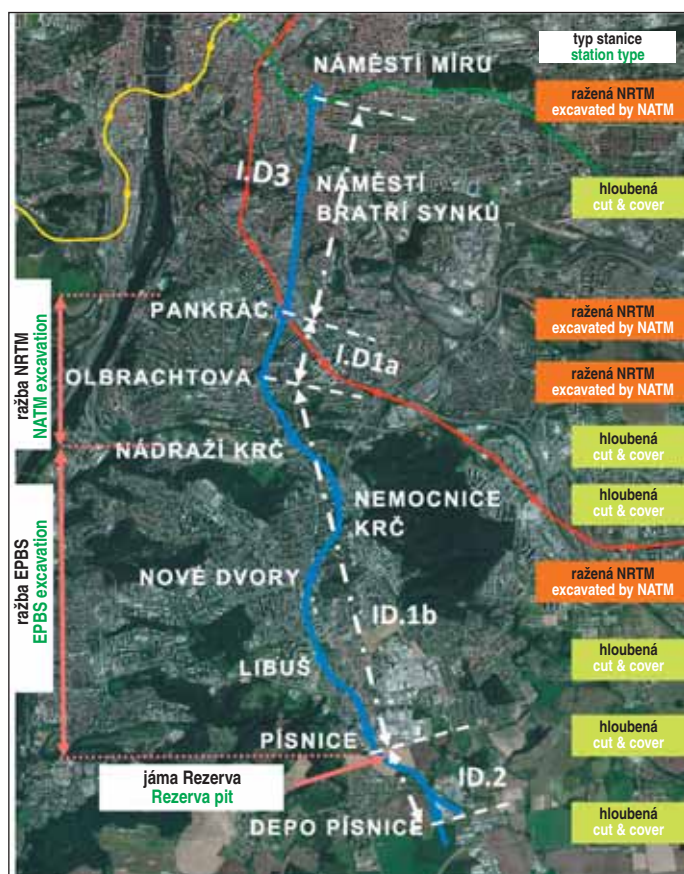
ZDENĚK ŽIŽKA, MAROŠ DÁVID, MIROSLAV KOCHÁNEK, PAVLÍNA SEHNALOVÁ, PETR VIŠŇÁK

ABSTRAKT

Článek se zabývá přípravou a realizací metra D v Praze, pro kterou je společnost METROPROJEKT Praha a.s. zpracovatelem projektové a realizační dokumentace. V úvodu je trasa metra D představena jako celek a popsána etapizace její postupné výstavby. Krátce jsou shrnuty již dokončené práce z jednotlivých stavenišť první etapy. Ponejvíce je článek zaměřen na specifické aspekty návrhu traťových tunelů realizovaných plnoprofilovými tunelovacími stroji v rámci etapy I.D1b (Olbrachtova – Nové Dvory). Závěrečná kapitola přibližuje specifika mezistaničního úseku raženého NRTM mezi stanicemi Nádraží Krč a Olbrachtova, který je rovněž součástí etapy I.D1b.

ABSTRACT

The article deals with the preparation and construction of Metro D in Prague, for which METROPROJEKT Praha a.s. is the author of the detailed design and the construction design documents. First, the Metro D line is presented as a whole, and the construction phases are described. The structures completed at the individual construction sites of the first phase are briefly summarised. The article is mainly focused on specific aspects of the design of the route tunnels excavated by full-face tunneling machines within the framework of Phase I.D1b (Olbrachtova – Nové Dvory). The last chapter introduces the specifics of the NATM excavation of the intermediate section between the stations Nádraží Krč and Olbrachtova, which is also part of Phase I.D1b.



Obr. 1 Situační schéma plánované trasy metra D
Fig. 1 Plan view of the planned Metro D Line

1. ÚVOD

Výstavba metra D je komplexním projektem, který je z důvodu svého rozsahu rozčleněn do několika etap, jež jsou prováděny postupně a v různých časových obdobích. Sama výstavba začala doplňkovým geologickým průzkumem v oblasti budoucích stanic Pankrác D a Olbrachtova (0-a). V současnosti pokračuje stavbou stanic Pankrác – Olbrachtova (I.D1a) včetně příslušného

1. INTRODUCTION

Metro D is a complex construction project which, due to its scale, is divided into several phases, which are carried out gradually and at different periods of time. The construction began with a complementary geological investigation in the area of the future Pankrác D and Olbrachtova (0-a) stations. Currently, the construction of the Pankrác – Olbrachtova stations (I.D1a) is continuing, including the section between the tunnels. Work on the I.D1b section between Olbrachtova (excluding) and Nové Dvory stations is also planned to begin in 2023.

The commissioning of D Line is also planned in phases, as follows:

- first, the Pankrác D – Nové Dvory section will be put into operation, which is planned for December 2029;
- the stations Libuš, Písnice and Depo Písnice will be put into operation after the acquisition of the land needed for their construction by the investor, therefore the date of their commissioning cannot be precisely determined at the moment;
- the last section put in operation will be the section of Metro D line between Pankrác and Náměstí Míru.

For easier orientation in the planned construction progress of the D Line, its phases are entered in the Table 1 and illustrated in Fig. 1.

2. I.D1A SECTION PANKRÁC – OLBRACHTOVA

The construction of Metro D line in I.D1a Section Pankrác D – Olbrachtova started in April 2022. The majority of the excavation works volume is being carried out from the three construction sites – PAD1b (Pankrác D 1b), VO-OL (Ventilation structure Olbrachtova) and OL2 (Olbrachtova 2). The listed construction sites are further briefly characterized below, and a summary of the current status of works as of the end of January 2023 is provided. A more detailed overview of the work being carried out is regularly presented in the Tunel magazine in “News update of underground construction in the Czech and Slovak Republic.”

Tab. 1 Etapizace výstavby metra D
Table 1 Construction Phases of Metro D

Etapizace výstavby Construction Phases					
proběhlé past		probíhající ongoing		budoucí future	
0-a	doplňkový geologický průzkum I.D1a complementary geological investigation I.D1a	1	I.D1a Pankrác – Olbrachtova (včetně) I.D1a Pankrác – Olbrachtova (including)	0-b	doplňkový geologický průzkum I.D3 complementary geological investigation I.D3
				2	I.D1b Olbrachtova (mimo) – Nové Dvory + traťové tunely do jámy Rezerva I.D1b Olbrachtova (excluding) – Nové Dvory + running tunnels towards the Rezerva pit
				3	I.D2 Stanice Libuš, Písnice, Depo Písnice, Depo – podle zajištěných pozemků I.D2 Station Libuš, Písnice, Depo Písnice, Depot – depending in the land acquisition
				4	I.D3 Pankrác (mimo) – Náměstí Míru I.D3 Pankrác (excluding) – Náměstí Míru

mezistaničního úseku. V roce 2023 je dále plánováno zahájení prací na úseku I.D1b mezi stanicemi Olbrachtova (mimo) a Nové Dvory.

Zprovoznování trasy D je rovněž plánováno v etapách, a to následujících:

- nejprve dojde ke zprovoznění úseku Pankrác D – Nové Dvory, které je plánováno na prosinec roku 2029;
- stanice Libuš, Písnice a Depo Písnice budou uvedeny do provozu podle zajištění pozemků potřebných k jejich výstavbě investorem, proto datum jejich zprovoznění není v současné době možné přesně určit;
- posledním zprovozněným úsekem pak bude část linky metra D mezi Pankrácem a Náměstím Míru.

Pro snazší orientaci v plánovaném postupu výstavby trasy D je její etapizace vepsána do tab. 1 a přehledně graficky znázorněna na obr. 1.

2. ÚSEK I.D1A PANKRÁC – OLBRACHTOVA

Výstavba linky Metra D v úseku I.D1a Pankrác D – Olbrachtova byla zahájena v dubnu roku 2022. Většina objemu razičských prací probíhá z celkem tří stavenišť – PAD1b (Pankrác D 1b), VO-OL (Větrací objekt Olbrachtova) a OL2 (Olbrachtova 2). Vyjmenovaná staveniště jsou dále krátce charakterizována a zároveň je poskytnut souhrn aktuálního stavu prací ke konci ledna roku 2023. Detailnější přehled prováděných prací je pravidelně představován v časopise Tunel v „Aktualitách z podzemních staveb v České a Slovenské republice.“

2.1 Staveniště PAD1b

Staveniště PAD1b se nachází na ploše uzavřené sjezdem z ulice 5. května do ulice Na Strži. Již v etapě doplňkového geologického průzkumu zde byla vyhloubena šachta, z níž bude ražena část stanice Pankrác D (obr. 2).



Obr. 2 Šachta na staveništi PAD1b
Fig. 2 Shaft at the construction site PAD1b

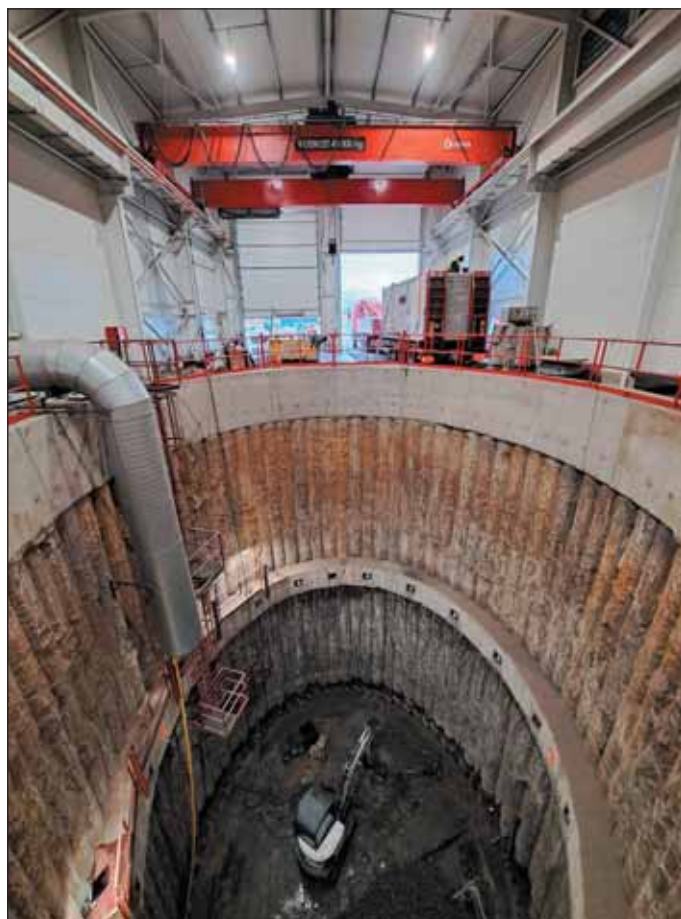


Obr. 3 Pohled do strojovny VZT (vlevo) a přístupové a VZT štol (vpravo)
Fig. 3 View into HVAC tunnel (left) and into the access and ventilation adit (right)

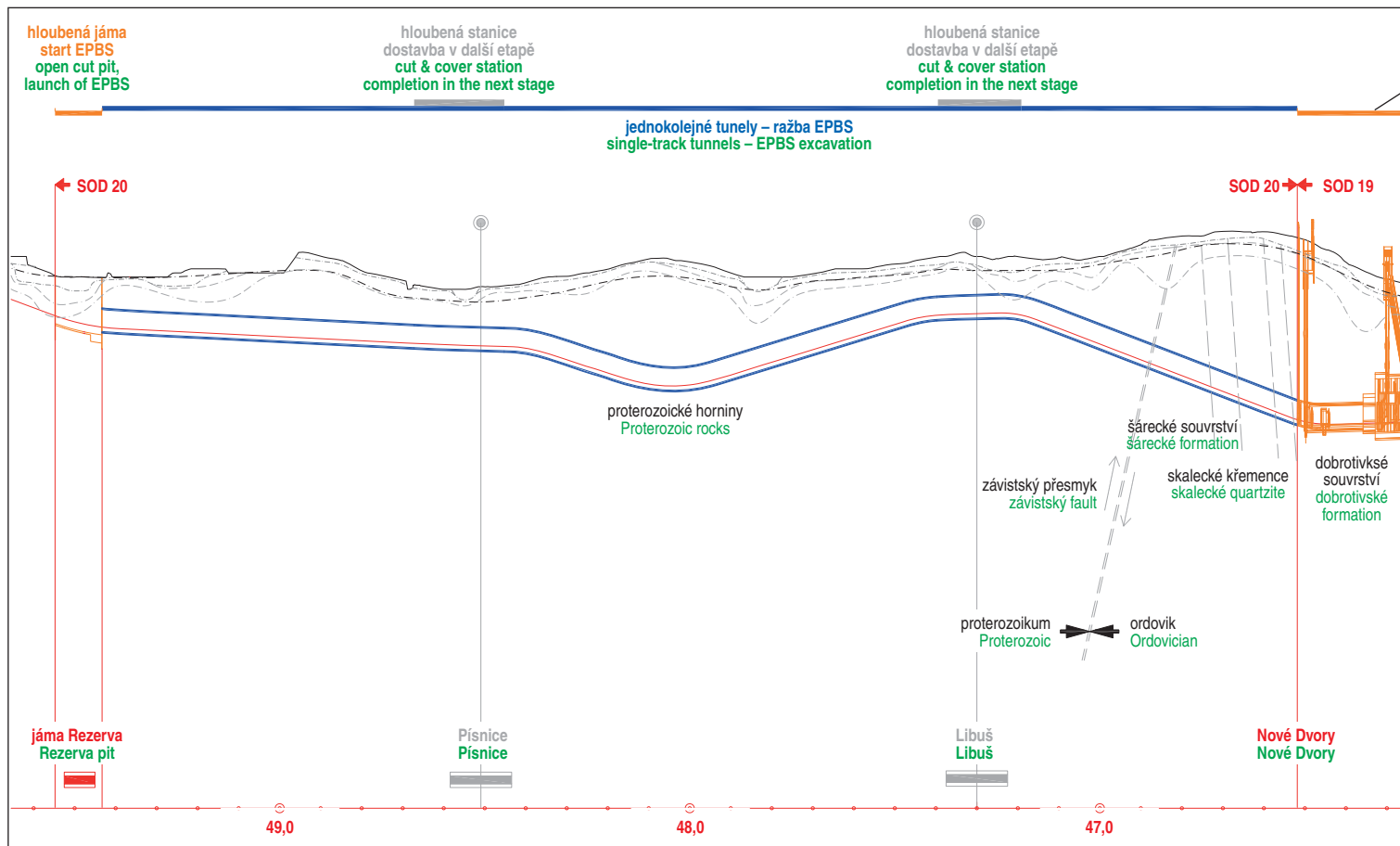


Obr. 4 Patní štola s prvkem svařované ocelové výztuže
Fig. 4 Bottom drift with welded steel reinforcement

Od zahájení prací do ledna 2023 byla provedena ražba přístupové a vzduchotechnické štoly v délce zhruba 205,0 m s plochou výrubu 60 až 64 m², v odbočení 81 m² (obr. 3). Výrub je zajištěn pomocí stříkaného betonu tl. 250 až 400 mm podle technologické třídy výrubu. Ostění je vyztuženo ocelovými sítěmi KARI s příložkovou výztuží a ocelovými příhradovými rámy. Klenba výrubu je zajišťována svorníky a předstihovým jehlováním, ve třídě 5b s doplněním chemickou tlakovou injektáží. Ke konci ledna byla zahájena ražba technologického tunelu.



Obr. 5 Přístupová šachta OL2 s protihlukovou halou
Fig. 5 Access shaft OL2 with sound-proof roof



Obr. 6 Podélný řez s předpokládanými geotechnickými poměry – etapa výstavby I.D1b
Fig. 6 Longitudinal section with predicted geotechnical conditions – construction phase I.D1b

2.2 Staveniště VO-OL

Staveniště je umístěno mezi ulicemi Na Strži a Jankovská. Veškeré práce v podzemí jsou podobně jako na ostatních staveništích prováděny přes šachty. Ta na staveništi VO-OL je využita pro postupy jak ke stanici Pankrác D, tak ke stanici Olbrachtova.

Výrub stanice Pankrác se neprovádí od kaloty, ale poněkud netradičně ode dna. První realizovaným dílčím výrubem je v současnosti prováděná patní štola. Celková délka patní štoly je 130,61 m, z čehož 43,7 m bylo provedeno v rámci doplňujícího geologického průzkumu jako první dílčí výrub (etapa 0-a). V rámci výstavby trasy metra I.D1a se tento úsek rozšířil na plný profil štoly a další ražba již pokračuje v plném profilu. Patní štola má celkovou plochu výrubu 50,6 m² a je zajištěna ostěním ze stříkaného betonu tl. 550 mm, vyztuženého ocelovými sítěmi KARI a ocelovými příhradovými rámy nebo rámy z válcovaných profilů (obr. 4). Klenba výrubu je zajišťována svorníky a předstihovými jehlami, které jsou ve třídě 5b doplněny chemickou tlakovou injektáží.

Ve směru ke stanici Pankrác D navázala na první dílčí výrub, vyražený v rámci doplňujícího geologického průzkumu, ražba druhého dílčího výrubu dvoukolejného tunelu v délce 66 m. Další činnost v tomto směru byla z důvodu přednostní ražby patní štoly ve stanici dočasně přerušena.

Ve směru ke stanici Olbrachtova byl vyražen dvoukolejný tunel pro osovou vzdálenost kolejí (o. v.) 5,0 m, který se následně rozšířil na o. v. 5,8 m. První dva úseky byly prováděny při horizontálním členění výrubu a nejširší profil při vertikálním členění. Celková délka dvoukolejného tunelu je cca 176 m. Z dvoukolejného tunelu pokračuje dále ražba levého jednokolejného traťového tunelu a ražba pravého traťového tunelu s rozpletem do kolejové spojky C-D. Na staveništi VO-OL byla také provedena vzduchotechnická šachta

2.1 PAD1b site

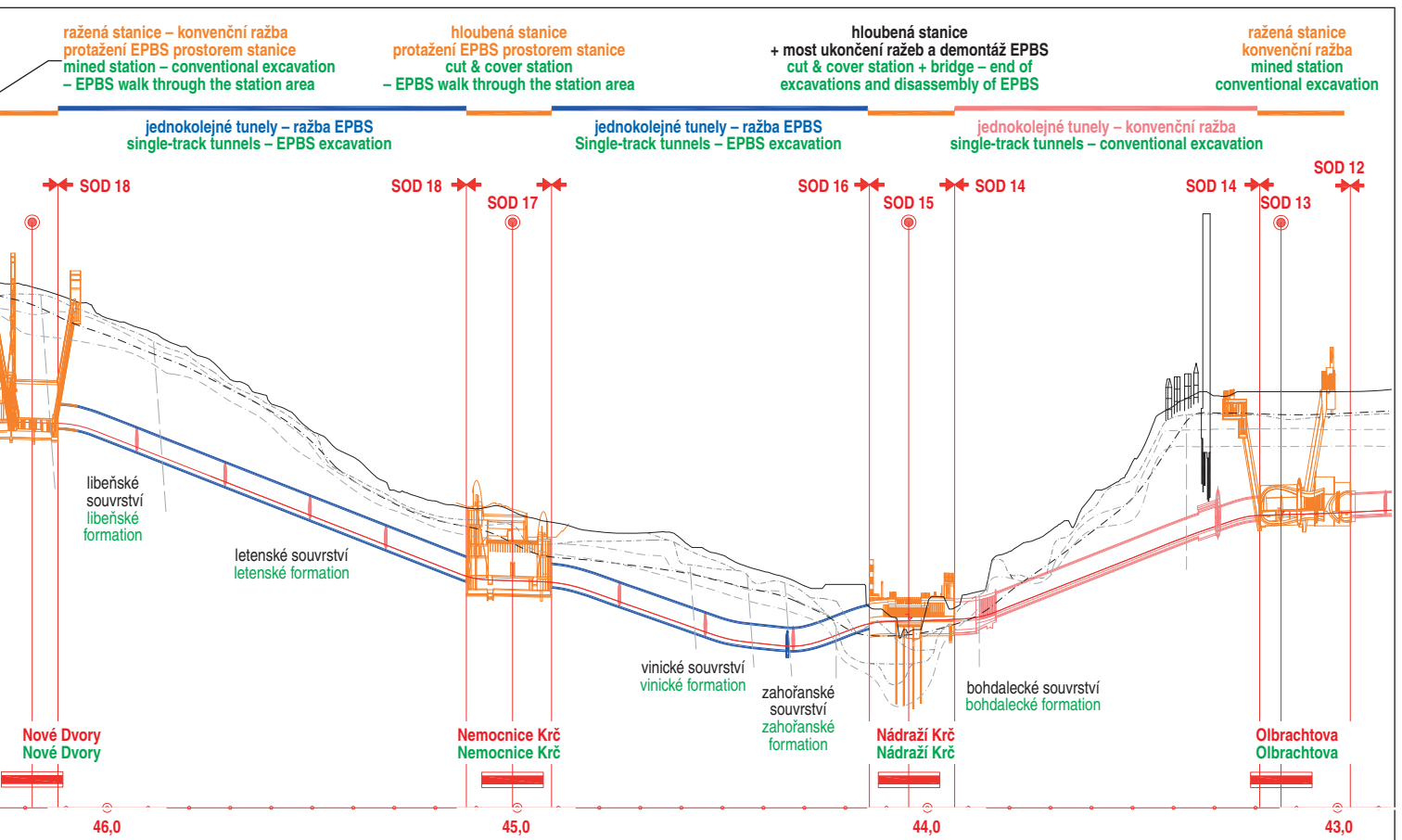
The PAD1b construction site is located in an area surrounded by the exit road of 5. května street and Na Strži street. In the phase of the complementary geological investigation, a shaft was excavated here, from which a portion of the Pankrác D station will be excavated (Fig. 2).

From the commencement of the works until January 2023, an access and ventilation tunnel was excavated with a length of approximately 205.0m with an excavation area of 60 to 64m², and 81m² in the branching-off section (Fig. 3). Excavation is supported with shotcrete 250 to 400mm thick, depending on the technological tunnelling class. The lining is reinforced with KARI steel meshes with additional rebar reinforcement and steel lattice girders. The arch of the excavation is reinforced with bolts and by spiling, and in class 5b a chemical high pressure grouting is added. Excavation of the technological tunnel began at the end of January.

2.2 VO-OL site

The construction site is located between Na Strži and Jankovská streets. All underground work is carried out through shafts, similar to other construction sites. The one at the VO-OL construction site is used for tunneling towards both the Pankrác D and Olbrachtova stations.

Excavation of the Pankrác station is not carried out from the top heading, but somewhat unconventionally from the bottom. The first excavated opening is the bottom drift which currently being under construction. The total length of the bottom drift is 130.61m, of which 43.7m was carried out with partial excavation profile (0-a Phase) as part of the complementary geological investigation. As part of the construction of the I.D1a metro line, this section was widened to the full profile of the bottom drift, and further excavation is already



do hloubky 34 m a navazující ražená strojovna vzduchotechniky v délce cca 50 m.

2.3 Staveniště OL2

Staveniště se nachází mezi ulicemi Kovařovicova a Na Strži v těsné blízkosti panelového domu. Z tohoto místa budou probíhat práce na ražbě stanice Olbrachtova. Pro přístup do podzemí je navržena elipsovité šachta, která je kryta protihlukovou halou (obr. 5). Zajištění šachty je navrženo z převrtávaných pilot, které jsou kotveny ve dvou úrovních pramencovými kotvami. Pilotová část šachty bude následně prohloubena o 18,3 m, s primárním ostěním a systémovým kotvením výrubu. Celková hloubka šachty bude 33,8 m. Aktuálně probíhají práce na dokončení kotvení a převázky druhé kotevní úrovně. Současně je prováděn mikropilotový dešťník, jako předstihové opatření pro navazující část šachty.

3. ÚSEK I.D1B TRAŤOVÉ TUNELY NÁDRAŽÍ KRČ – JÁMA REZERVA

Na úseku I.D1b je uvažováno s ražbou traťových tunelů metodou mechanizovaného tunelování z jámy Rezerva do stanice Nádraží Krč a s konvenční ražbou ve zbyvajících částech mezi stanicemi Nádraží Krč a Olbrachtova.

Půdorysně ražby traťových tunelů, které budou prováděny metodou mechanizovaného tunelování, zasahují do etap I.D1b a I.D2, ale časově budou realizovány již v etapě I.D1b.

Montáž plnoprofilových tunelovacích strojů bude provedena v hloubené stavební jámě Rezerva (obr. 1). Podélný řez úsekem je zobrazen na obr. 6. Od místa startu budou traťové tunely plynule raženy proti směru staničení až do stanice Nádraží Krč. Dvojice hloubených stanic Písnice a Libuš bude realizována až v etapě I.D2, ostění traťových tunelů bude proto v těchto místech rozebráno a zrušeno. Stanice Nové Dvory a Nemocnice Krč budou v předstihu stavebně připraveny do té míry, aby jimi mohly být oba tunelovací stroje postupně protaženy.

Traťové jednokolejné tunely budou v celém úseku raženy zeminovými štíty (Earth Pressure Balanced Shields – dále jen EPBS), kdy horninový/zemní tlak a hydrostatický tlak jsou během všech fází výstavby kompenzovány protitlakem v pracovní komoře stroje (obr. 7). Celková délka jednoho tubusu raženého EPBS je v součtu zhruba 4,8 km.

3.1 Stavební jáma Rezerva

Stavební jáma Rezerva je situovaná v oblasti retenční nádrže a její půdorys a umístění bylo navrženo za složitých podmínek vzhledem k blízkému vedení vodovodních řadů 3 × DN 1200, místní komunikace, retenční nádrže a navazujících navrhovaných traťových tunelů. Startovací kaverna pro start EPBS prováděná technologií NRTM je navržena z hloubené jámy Rezerva v místě pravé koleje v délce 75,0 m ve směru ražby. Start EPBS na levé koleji bude probíhat standardně z otevřené jámy.

3.2 Traťový úsek jáma Rezerva – Nové Dvory (SOD 20 a 19)

Vzhledem k faktu, že hloubené stanice budou realizovány do datečně do již vyražených tunelů, bude stavební oddíl (SOD) 20 a 19 délky cca 3,1 km ražen najednou, bez přerušení. Tunely budou od místa budoucího hloubeného portálu v km 49,433 podcházet Kunratickou spojkou do prostoru před bývalým písnickým maso-kombinátem. Osová vzdálenost obou tunelových trub se zužuje z původní hodnoty 35,6 m na 19,3 m. Trasa je dále vedena zastavěným územím Písnice pod Libušskou ulicí, přes Meteorologickou až k Novodvorské ulici. Zde se bude potkávat s tramvajovou tratí prováděnou v současné době, jejíž konečná stanice bude místně

continuing in the full profile. The bottom drift has a total excavation area of 50.6m² and is supported by a shotcrete lining of thickness 550mm, reinforced with KARI steel meshes and steel lattice girders or frames from rolled steel profiles (Fig. 4). The excavation arch is supported by bolts and spiling, which are supplemented by chemical high pressure grouting in class 5b.

In the direction of the Pankrác D station, the first partial profile, which was excavated as part of the complementary geological investigation, was followed by the second partial profile excavation of the double-track tunnel with a length of 66m. Further excavation in this direction was temporarily suspended due to the priority given to the excavation of the bottom drift in the station.

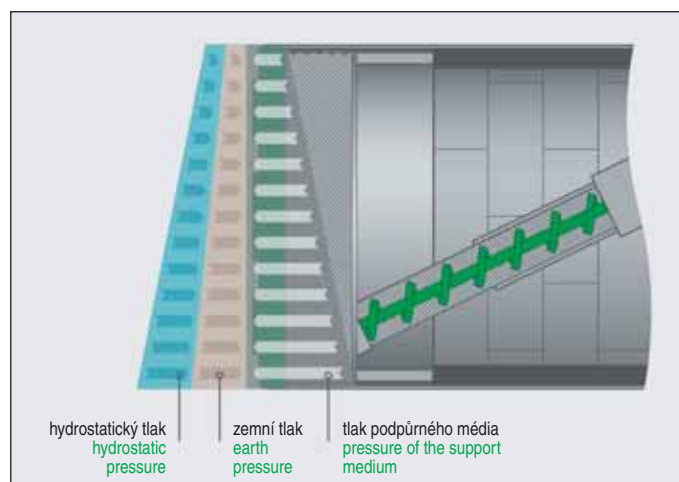
A double-track tunnel was excavated in the direction of the Olbrachtova station for track spacing of 5.0m, which was subsequently widened to an track spacing of 5.8m. The first two sections were excavated by the heading and bench method and the widest profile by the side drift method. The total length of the double-track tunnel is approx. 176m. From the double-track tunnel, the excavation of the left single-track running tunnel and the excavation of the right running tunnel with a branching into the C-D connection track continues. At the VO-OL construction site, a ventilation shaft 34m deep, and a connected technological room with a length of approx. 50m were excavated.

2.3 OL2 site

The construction site is located between Kovařovicova and Na Strži streets, in close proximity to the block of flats building. Excavations of the Olbrachtova station will take place from this location. For access to the underground, an elliptical shaft is designed, which is covered by a sound-proof roof (Fig. 5). The shaft is supported by drilled piles, which are anchored in two levels with cable anchors. The pile portion of the shaft will subsequently be deepened by 18.3m excavation, and supported with a primary lining and system bolting. The total depth of the shaft will be 33.8m. Work is currently underway to complete the anchors and waling beams of the second anchoring level. At the same time, a micro-pile umbrella is being drilled as an advance measure for the subsequent part of the shaft.

3. I.D1B SECTION – RUNNING TUNNELS BETWEEN NÁDRAŽÍ KRČ AND REZERVA PIT

In the section I.D1b, it is planned to use mechanized tunneling from the Rezerva pit to Nádraží Krč station, and conventional tunneling in the remaining part between Nádraží Krč and Olbrachtova stations.



zdroj Herrenknecht AG source Herrenknecht AG

Obr. 7 Princip podpory čelby při ražbě EPBS
Fig. 7 The principle of EPBS face support

odpovídat stanici metra Libuš. Pod Novodvorskou ulicí povedou tunely dále až po rozhraní s tunely větvení tras před stanicí Nové Dvory (SOD 19). Podél trasy metra je plánována v tomto úseku výstavba několika developerských projektů, se kterými musel být návrh traťových tunelů koordinován. Stanici Nové Dvory se štíty protáhnou a v zarážkách (startovacích kavernách) proběhne start tunelovacích strojů pro ražby navazujícího úseku do stanice Nemocnice Krč.

3.3 Traťový úsek Nové Dvory – Nemocnice Krč (SOD 18)

SOD 18, traťový úsek mezi hloubenou stanicí Nemocnice Krč a jednodílnou raženou stanicí Nové Dvory, řeší kolejové propojení pomocí dvojice ražených jednokolejných tunelů. Délka úseku, který prochází do svahu nad Nemocnicí Krč směrem k Novým Dvorem pod ulicemi Ružinovská, Hurbanova, Sládkovičova a Štúrova, je zhruba 0,9 km. V úseku bude podcházeno mnoho vysokých panelových domů. Kromě základních traťových tunelů (jednokolejných) obsahuje stavební oddíl vzduchotechnické propojky mezi traťovými tunely a základní nefekální jímku. Propojky umožní jednak snížení pístového účinku od jedoucího vlaku a rovněž případnou evakuaci osob se zásahem záchranných jednotek při zastavení vlaku. Za normálních provozních podmínek zůstávají dveře v propojkách otevřené.

3.4 Traťový úsek Nemocnice Krč – Nádraží Krč (SOD 16)

SOD 16, traťový úsek mezi hloubenými stanicemi Nádraží Krč a Nemocnice Krč, řeší kolejové propojení pomocí dvojice ražených jednokolejných tunelů se vzduchotechnickými propojkami a nefekální jímkou. SOD má celkovou délku cca 0,8 km a je charakteristický relativně nízkým nadložím s povrchovou zástavbou rodinnými domy.

3.5 Geotechnické poměry

V trase ražby se nacházejí dva významné geologické celky: proterozoikum a paleozoikum-ordovik. Rozhraní mezi těmito dvěma významnými celky pak tvoří tzv. Závistský přesmyk, který je spolu s očekávaným sledem souvrství hornin zobrazen na obr. 6. Podél struktury Závistského přesmyku jsou starší horniny proterozoika nasunuty na mladší horniny ordovického stáří. Závistský přesmyk je příkře ukloněn k JV a výškový pohyb podél něho se odhaduje na více než 1000 m. Předpokládá se, že je to široké poruchové pásmo vyplněné silně porušenými, drcenými a prohnětenými horninami charakteru až tektonické breccie, které jsou silně zvodnělé.

Ražba se tak bude v celém úseku odehrávat pod hladinou podzemní vody. Přičemž v případě proterozoických hornin je možné očekávat řádově vyšší propustnost než v případě hornin ordoviku.

Proterozoikum (Pt)

Nejstarší horniny zastížené v trase jsou součástí barrandienského proterozoika. Stratigraficky náleží svrchnímu proterozoiku, a to litostratigrafické jednotce označované jako štěchovická skupina. Tyto horniny jsou zastoupeny petrograficky nestejnorodými velmi slabě metamorfovanými jemnozrnnými horninami mořského původu – břidlicemi, prachovci a drobami. Lokálně se mohou vyskytovat také polohy drobových slepenců s dobře zaoblenými valouny. Horniny mohou obsahovat proniky bazických výlevných a žilných hornin doprovázených tufy, tufity a tufitickými břidlicemi. Proterozoické horniny celkově patří jednoznačně k nejpevnějším horninám zastíženým v trase metra. Typický je jejich rozpad nepravidelně polyedrický, deskovitý nebo roubíkovitý. Celé souvrství je při povrchu lokálně postiženo intenzivním fosilním zvětráním velmi proměnlivé hloubky, kdy jsou horniny rozpadlé (degradované) až na jíl s proměnlivou příměsí ostrohranných úlomků původních

The mechanized excavations of the running tunnels will be realized already in phase I.D1b although in the plan view they extend into sections I.D1b and I.D2.

Assembly of full-face tunneling machines will be carried out in the excavated Rezerva pit. The longitudinal section is shown in Fig. 6. From the launch, the running tunnels will be continuously excavated to Nádraží Krč station in the direction of decreasing stationing. The pair of excavated stations Písnice and Libuš will be realized in phase I.D2, the lining of the running tunnels will therefore be dismantled and removed in the stations. The stations Nové Dvory and Nemocnice Krč will be structurally prepared in advance to the extent that both tunneling machines can be gradually pulled through them.

The single-track running tunnels will be excavated for the entire section with Earth Pressure Balanced Shields (EPBS), where rock/earth pressure and hydrostatic pressure are supported by a pressure in the working chamber of the machine during all phases of construction (Fig. 7). The total length of one tube excavated with EPBS is roughly 4.8km in total.

3.1 Rezerva open pit

The Rezerva open pit is situated in the area of the retention pond, and its layout and location were designed in complex conditions due to the proximity of 3 × DN 1200 water supply lines, local road, retention pond and the adjacent proposed running tunnels. The lurching NATM cavern for the TM start is designed in the Rezerva pit at the location of the right track of a length of 75.0m in the excavation direction. The TM start on the left track will take place in a standard way from the open pit.

3.2 Line section Rezerva pit – Nové Dvory (SOD 20 and 19)

Due to the fact that the cut & cover stations will be excavated after the running tunnels, the running tunnels in construction sections (SOD) 20 and 19 with a length of approximately 3.1km will be excavated without being interrupted by stations construction. The tunnels will pass from the location of the future portal at km 49.433 under the Kunratická spojka to the area in front of the former Písnice meat processing plant. The spacing of the two tunnel tubes narrows from the original value of 35.6m to 19.3m. The route continues through the built-up area of Písnice under Libušská street, through Meteorologická to Novodvorská street. Here it will meet the tram line currently under construction whose terminus station will coincide with the Libuš metro station location. Under Novodvorská street, the tunnels will continue to the tunnels branching in front of Nové Dvory station (SOD 19). Several development projects are planned along the metro line in this section, with which the design of the running tunnels had to be coordinated. The shields will be pulled through the Nové Dvory station and will be restarted in the short excavations (launching caverns) for the excavations of the adjoining section towards the Nemocnice Krč station.

3.3 Line section Nové Dvory – Nemocnice Krč (SOD 18)

SOD 18, the line section between the open cut Nemocnice Krč station and the single-vault mined station Nové Dvory consists of twin single-track tunnels. The length of the section which enters the hill above the Krč Hospital in the direction of Nové Dvory under Ružinovská, Hurbanova, Sládkovičova and Štúrova streets is approximately 0.9km. The section will pass under many tall apartment buildings. In addition to the running tunnels (single-track), the section contains ventilation crosspassages between the running tunnels and a sump. The crosspassages will enable the reduction of the piston effect from the moving train as well as the possible evacuation of people and intervention of rescue units when

Tab. 2 Předpokládaná souvrství ordovíku na trase ražeb EPBS (pořadí podle směru ražby)

Název souvrství ordovíku	Charakteristika
Šárecké	Šárecké souvrství je nejstarším zastiženým ordovickým souvrstvím. Jedná se o jílovité, prachovité a písčité břidlice. Horniny jsou většinou deskovitě vrstevnaté a značně rozpukané. V šáreckých břidlicích je typický roubíkový rozpad hornin. Zvětrání šáreckých břidlic je převážně mechanické a horniny jsou často již při povrchu jen slabě navětralé.
Dobrotivské	V tomto souvrství jsou zastoupeny dvě facie: křemence skalecké a jílovito-prachovité břidlice dobrotivské. Skalecké křemence tvoří obvykle úzké pruhy hornin v nadloží šáreckých břidlic. Skalecké křemence jsou lavicovitě vrstevnaté a příčně rozpukané. Dobrotivské břidlice jsou jílovité až prachovité. Zdravé horniny mají poloskalní charakter a mají tendenci ke kusovitému, střípkovitému nebo roubíkovitému rozpadu. Obecně patří k málo pevným horninám pražského předkvartérního podkladu. Pokud je tato hornina tektonicky porušena, nabývá charakteru tektonického jílu.
Libeňské	Také v tomto souvrství se vyskytují dvě litologické facie hornin: křemence řevnické a jílovité břidlice libeňské. Libeňské břidlice jsou jílovité (místy až prachovité), měkké, petrograficky shodné s břidlicemi dobrotivskými. Jejich mocnost je kolem cca 50–150 m. Jsou to nejméně odolné horniny pražského podkladu.
Letenské	Charakteristické rychlým střídáním drob, písčitých a drobových břidlic, pískovců a křemenců. Celkově má souvrství flyšový charakter. Převažují droby z písčitých břidlic a desek křemenných pískovců. Horniny vrstev letenských mají typickou tlustě deskovitou odlučnost, velkou až střední hustotu diskontinuit s limonitovými povlaky na plochách diskontinuit a jsou hustě rozpukané. Souvrství patří mezi vcelku pevné a odolné proti denudaci.
Vinické	Jsou to měkké jílovité břidlice až jílovce. Svým petrografickým složením a technickými vlastnostmi jsou obdobné jako libeňské břidlice. Jsou tenké vrstevnaté, střípkovitě rozpadavé, na vrstevních plochách limonitizované. Velmi snadno a hluboko zvětrávají, přičemž zóna zvětrání dosahuje cca 6–8 m. Patří k nejměkčím pražským souvrstvím.
Zahořanské	Zahořanské souvrství je tvořeno převážně prachovci a břidlicemi. Pevnější prachovité sedimenty zahořanských vrstev na bázi a v nejvyšší části souvrství plynule přecházejí do jílovitých podložních i nadložních vrstev.
Bohdalecké	V základním vývoji tohoto souvrství jsou to převážně měkké jílovité břidlice. Místy jsou horniny jen málo zpevněné a působí spíše dojmem jílovců. Podzemní voda obvykle obsahuje mimořádně vysoká množství rozpuštěných síranů. Celkově se jedná o poměrně měkké souvrství podléhající intenzivnímu a hlubokému zvětrání, běžně do hloubek cca 4–6 m. Ve zvětralém stavu se horniny rozpadají v drobné a nepravidelné střípky a na jílovité hlíny.

Table 2 Predicted Ordovician formations along the EPBS excavation route (in the order of excavation direction)

Ordovician formation name	Characteristics
Šárecké	Šárecké formation is the oldest Ordovician formation recorded. The rocks are clayey, silty and sandy shale. The rocks are mostly plate-layered and highly fractured. Šárecké shales disintegrate typically in a gag-like manner. The weathering of Šárecké shales is mainly mechanical and the rocks are often only weakly weathered at the surface.
Dobrotivské	Two facies are represented in this formation: Skalecké quartzite and clay-silt Dobrotivské shale. Skalecké quartzite usually forms narrow bands of rocks in the overburden of Šárecké shales. Rock quartzite is plate-like layered and transversely fractured. Dobrotivské shale is clayey to silty. Sound rocks have a semi-rocky character and tend to disintegrate in a block-like, fragment-like or gag-like manner. In general, it belongs to the less strong rocks of the Prague Pre-Quaternary bedrock. If this rock is tectonically broken, it takes on the character of mylonitic clay. Libeňské Two lithological facies of rocks are also found in this formation: Řevnické quartzite and Libeňské clay shale.
Libeňské	Libeňské shales are clayey (in some places even silty), soft, petrographically similar to the Dobrotivské shales. Their thickness is around 50–150 m. They are the least resistant rocks of the Prague rock base.
Letenské	Characterized by rapid alternation of wacke, sandy and wacke shale, sandstone and quartzite. Overall, the formation has a flysch character. Wacke from sandy shale and quartz sandstone slabs predominate. The rocks of the Letenské formation have a typical thick plate-like separation, a high to medium density of discontinuities with limonite coatings on the surfaces of the discontinuities and are densely fractured. The formation is quite strong and resistant to denudation.
Vinické	They are soft clayey shale to claystone. Their petrographic composition and technical properties are similar to Libeň shales. They are thinly layered, fragment-like disintegrated, limonitized on the layered surfaces. They weather very easily and deeply, with the weathering zone reaching approx. 6–8m. They belong to the softest formations in Prague.
Zahořanské	Zahořanské formation consists mainly of siltstones and shale. Predominantly silty sediments of the Zahořany formation are found at the base, and in the uppermost part of the formation smoothly transforms into clayey underlying and overlying layers.
Bohdalecké	In the basic development of this formation, it is mainly soft clay shale. In places, the rocks are only slightly consolidated and give the impression of claystones. Groundwater usually contains extremely high amounts of dissolved sulfates. Overall, it is a relatively soft formation subject to intense and deep weathering, usually to a depth of approx. 4–6m. In the weathered state, the rocks break down into small and irregular fragments and into clay.

hornin. Charakteristická pro proterozoické horniny je velmi kolísající hodnota RQD, která často podle provedených vrtů vykazuje hodnotu 0.

Paleozoikum – ordovik (O)

V mezistaničním úseku SOD 20 od prostoru před stanicí Nové Dvory směrem na sever bude předkvartérní podklad tvořen horninami paleozoika (ordovíku). Bude zastiženo souvrství šárecké, dobrotivské, libeňské, letenské, vinické, zahořanské a bohdalecké (tab. 2). Poslední část ražby v oblasti Nádraží Krč pak bude probíhat v kvartérních pokryvech (zhruba 70 m).

Z kvartérních pokryvů se v oblasti Nádraží Krč nacházejí fluvialní a deluviální sedimenty. Z fluvialních sedimentů převažují

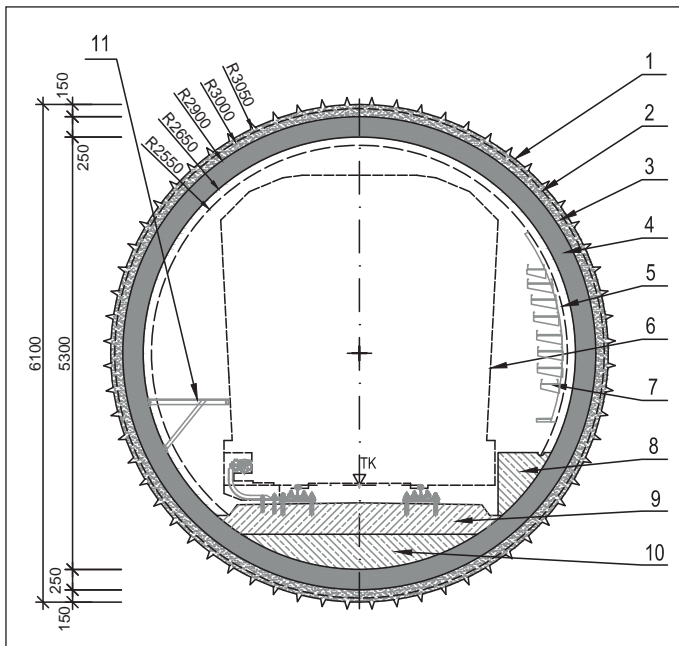
the train stops. Under normal operating conditions, the doors in the crosspassages remain open.

3.4 Line section Nemocnice Krč – Nádraží Krč (SOD 16)

SOD 16, the line section between the excavated stations of Nádraží Krč and Nemocnice Krč, consists of twin single-track tunnels with ventilation crosspassages and a sump. SOD has a total length of approx. 0.8km and is characterized by a relatively low overburden and family houses on the surface.

3.5 Geotechnical conditions

There are two important geological units along the excavations: Proterozoic and Paleozoic-Ordovician. The interface between these



Obr. 8 Příčný řez jednokolejným traťovým tunelem raženým EPBS; 1. maximální efektivní výrub D_{ME} , 2. teoretický výrub D_N , 3. injektovaný prostor za ostěním, 4. ostění traťového tunelu – prefabrikované železobetonové dílce, 5. stavební a geometrické tolerance, 6. příjezdní průřez metra, 7. kabelové konstrukce, 8. odstupová rampa, 9. kolejový svršek, 10. beton pod kolejovým svrškem, 11. evakuační lávka

Fig. 8 Cross-section of a single-track running tunnel excavated by EPBS; 1. maximum effective excavation D_{ME} , 2. theoretical excavation D_N , 3. grouted gap around the lining, 4. lining of the running tunnel – prefabricated reinforced concrete segments, 5. construction and geometric tolerances, 6. subway structure gauge, 7. cable structures, 8. walkway ramp, 9. track superstructure, 10. concrete under the track superstructure, 11. evacuation footbridge

hlinité písky a písky s kolísajícím podílem šterku. Deluviální sedimenty jsou zde převážně jílovitohlinité, hlinité a hlinitopísčité. Kvartérní vrstvy doplňují antropogenní navážky.

3.6 Příčný řez

Tvorba příčného řezu byla přizpůsobena smyslu zadávací dokumentace pro výběr zhotovitele. Zadavatel uvažoval jako nominální průměr stroje (= teoretický výrub) hodnotu $D_N = 6000$ mm (obr. 8). Hodnota nadvýšení nominálního průměru je volbou zhotovitele. Toto nadvýšení (nadřez) má zohlednit kompenzaci opotřebování rezných nástrojů během ražby, umožnit ražby v obloucích, poskytnout bezpečnou mezeru mezi štítem a horninou zabírající uvíznutí stroje atd. Projekt z hlediska průchodnosti uvažuje maximální efektivní průměr výrubu 6100 mm (D_{ME}), který již nadřez obsahuje. Nadřez bude následně (po sestavení prstence segmentového ostění) vyplněn injektážní maltou za zadní obálkou štítu.

Pro technologii ražby EPBS je navrženo prefabrikované segmentové železobetonové ostění $\varnothing 5,3/5,8$ m. Počet dílců v prstenci není zadavatelem předepsán a zhotovitel jej může zvolit. Tloušťka ostění je 250 mm. Střední délka prstenců je navržena 1500 mm. Skladba prstence může být modifikována v závislosti na dopravních a manipulačních možnostech u konkrétního razicího stroje. Geometricky je pro ražbu uvažován univerzální prsteneček, jehož různé natočení okolo vodorovné osy umožňuje realizaci směrových a výškových oblouků při ražbě.

Vodotěsnost segmentového ostění je zajištěna jednak vodonepropustným betonem a jednak elastomerovou (EPDM) izolací ve spárách mezi segmenty. Vnitřní plocha ostění může vykazovat jen mírný průnik vlhkosti maximálně na 10 % povrchu jednotlivých bloků (rozpoznatelné v důsledku tmavého zabarvení povrchu

two important units forms the so-called Závistský fault, which, together with the expected sequence of rock formations, is shown in Fig. 6. Along the structure of the Závistský fault, older Proterozoic rocks are pushed onto younger rocks of Ordovician age. The Závistský Fault is steeply dipping to the SE and the elevation of the fault movement is estimated to be more than 1000m. It is assumed that it is a wide fault zone filled with heavily fractured, crushed and kneaded rocks of the nature of tectonic breccias, which are saturated with groundwater.

Excavation will take place below the groundwater level in the entire section. Moreover, in the case of Proterozoic rocks, it is possible to expect an order of magnitude higher permeability than in the case of Ordovician rocks.

Proterozoic (Pt)

The oldest rocks encountered along the line are part of the Barrandien Proterozoic. Stratigraphically, they belong to the Upper Proterozoic, namely to the lithostratigraphic unit referred to as the Štěchovice group. These rocks are represented by petrographically inhomogeneous very weakly metamorphosed fine-grained rocks of marine origin – shales, siltstones and wackes. Locally, positions of fine conglomerates with well-rounded boulders can also occur. The rocks may contain intrusions of basic magmatic and vein rocks accompanied by tuffs, tuffites and tuffitic shales. Overall, the Proterozoic rocks clearly belong to the strongest rocks encountered along the subway line. Their breakdown is typically irregularly polyhedral, plate-like or gag-like. At the surface, the entire formation is locally affected by intense fossil weathering which is very variable with the depth, and where the rocks are broken down (degraded) to clays with a variable admixture of sharp-edged fragments of original rocks. Proterozoic rocks are characterized by a very variable RQD value, which often shows a value of 0 in the exploratory boreholes.

Paleozoic – Ordovician (O)

In the intermediate station section of SOD 20 from the area in front of Nové Dvory station towards the north, the pre-Quaternary bedrock will consist of Paleozoic (Ordovician) rocks. Formations of Šárecké, Dobrotivské, Libeňské, Leteňské, Vinické, Zahořanské and Bohdalecké will be encountered (Table 2). The last part of the excavation in the area of Nádraží Krč will then take place in Quaternary overburden (roughly 70m).

Fluvial and deluvial sediments are found in Quaternary sediments in the area of Nádraží Krč. Fluvial sediments are dominated by loamy sands and sands with a fluctuating proportion of gravel. The deluvial sediments here are mainly clay-loamy, loamy and loam-sandy. Quaternary layers include anthropogenic deposits.

3.6 Cross section

The design of the cross-section complied with the tender documentation purpose of selecting the contractor. The client considered the nominal diameter of the tunneling machine (= theoretical excavation diameter) to be $D_N = 6000$ mm (Fig. 8). The value above the nominal diameter is at the contractor's discretion. This increase of excavation diameter (overcut) is to take into account the compensation of the cutting tools wear during excavation, to allow excavations in curves, to provide a safe gap between the shield and the rock preventing the machine from getting stuck, etc. The project considers a maximum effective excavation diameter of 6100mm (D_{ME}), which already contains the overcut. The overcut will subsequently (after the assembly of the ring of the segment lining) be filled with grout mortar behind the tailskin of the shield.

Prefabricated segmental reinforced concrete lining $\varnothing 5.3/5.8$ m is designed for the EPBS excavation technology. The number of segments in the ring is not prescribed by the client and can be chosen

Tab. 3 Navrhované třídy ražby pro štít EPB

Třídy ražby EPBS	Charakteristika a popis třídy ražby
Třída 1 – otevřený mód	Podpora čelby je realizována pouze kontaktem mezi řeznými nástroji a masivem. Těžební komora není tlakována. Komora je naplněna (upravenou) rubaninou pouze tak, aby bylo možné odtěžovat rubaninu šnekovým dopravníkem. Mód je nasazen v místech se stabilní čelbou a případný přítok podzemní vody do těžební komory nezpůsobuje žádné hydrogeologické problémy pro okolí nebo provozní problémy pro ražbu.
Třída 2 – polo-uzavřený mód	Těžební komora je zčásti naplněna (upravenou) rubaninou. Výšku naplnění volí zhotovitel tak, aby byla zajištěna stabilita čelby a aby bylo případně možné udržet přetlak stlačeného vzduchu v komoře. Mód je nasazen tam, kde je zvýšen potenciál ke kolapsu čelby (např. vlivem proudící vody), nebo kde hrozí nutný rychlý přechod do uzavřeného módu. Mód je nasazen rovněž tam, kde je nutné omezení přítoku podzemní vody ze stabilitních důvodů či změně konzistence rubaniny (zalepování, odtěžování z pracovní komory atd.). Nasazení módu je možné i při problémech s říditelností stroje.
Třída 3 – uzavřený mód	Těžební komora je plně naplněna (upravenou) rubaninou a tlakována. Mód je nasazen tam, kde jsou očekávané silné přítoky podzemní vody spolu s nestabilní čelbou nebo v oblastech, kde je problematická říditelnost stroje (např. smíšená čelba). Mód se nasazuje i v místech, kde existují speciální požadavky na minimální deformaci masivu a povrchu, zvýšení bezpečnosti ražby a minimalizaci rizika plynoucího z ražby.

Table 3 Proposed tunneling classes for the EPB shield

EPBS tunneling classes	Characteristics and description of the tunneling class
Class 1 – open mode	The support of the face is realized only by contact between the cutting tools and the rock. The working chamber is not pressurized. The chamber is filled with (conditioned) muck to such a level that it is possible to transport the muck with a screw conveyor. The mode is used in rock with a stable face, and the possible inflow of groundwater into the working chamber does not cause any hydrogeological problems for the nearby structures or for the tunneling.
Class 2 – semi-closed mode	The working chamber is partially filled with (conditioned) muck. The filling level is chosen by the contractor in such a way as to ensure the stability of the face and to possibly maintain the overpressure of the compressed air in the chamber. The mode is used where there is an increased potential of the face collapse (e.g. due to flowing water), or where there is a potential need for rapid transition to a closed mode. The mode is also used where it is necessary to limit the inflow of groundwater for reasons of stability or for maintaining the muck consistency appropriate for transportation (to minimize stickiness, to enable mucking from the working chamber, etc.). The mode can be also used in case of the machine steering problems.
Class 3 – closed mode	The working chamber is fully filled with (conditioned) muck and pressurized. The mode is used where strong inflows of groundwater are expected together with an unstable face or in areas where the steering of the machine is problematic (e.g. mixed face). The mode is also deployed in places where there are requirements for minimal deformation of the ground and surface, increasing the safety of excavation and minimizing the risk arising from excavation.

betonu). Po dotyku slabě vlhkých oblastí suchou rukou by na ruce neměly být vidět žádné stopy vody. Příložený savý novinový papír nesmí měnit barvu kvůli absorpci vlhkosti.

3.7 Návrh ražeb

Proměnlivé geotechnické podmínky a zejména ražba v úsecích pod povrchovou zástavbou vyžaduje použití takové technologie, která zaručí minimální deformace terénu a zároveň vysokou rychlost ražby. Tyto podmínky splňuje ražba prováděná plnoprofilovými tunelovacími stroji, souhrnně označovanými zkratkou TM (Tunneling Machines). Konkrétně v případě metra D jsou navrženy dva zeminové štíty (EPBS) umožňující ražbu jak v režimu s úplnou podporou čelby (v zeminách a měkkých horninách charakteru zemin), tak i v režimu bez podpory čelby (v pevných skalních horninách). Projekt tedy uvažuje, že stroj bude schopen razit ve třech módech odpovídajících třem třídám ražby (tab. 3).

Požadavkem projektu je přesné řízení podpůrného tlaku na čelbě, tak aby docházelo k odchylkám od požadovaného tlaku maximálně ± 30 kPa (podpora čelby upravenou rubaninou) a ± 10 kPa (podpora čelby stlačeným vzduchem). Stabilita čelby musí být zajištěna jak během fáze ražby, tak během fáze sestavování ostění i během prostojů. Požadované tlaky na čelbě musí být tedy soustavně kontrolovány. O třídě ražby navržené v projektu do značné míry rozhoduje posouzení stability čelby podle předpokládaných geotechnických podmínek. Dalším zásadním kritériem je rovněž bezpečnost ražby s ohledem na nadzemní zástavbu.

3.8 Stabilita čelby a ovlivnění nadloží

Ověření stability čelby a interakce mezi masivem a EPBS bylo prováděno v několika krocích. Nejprve byl proveden výpočet stability čelby bez vlivu proudění uvažující plnou kompenzaci hydrostatického a zeminového tlaku.

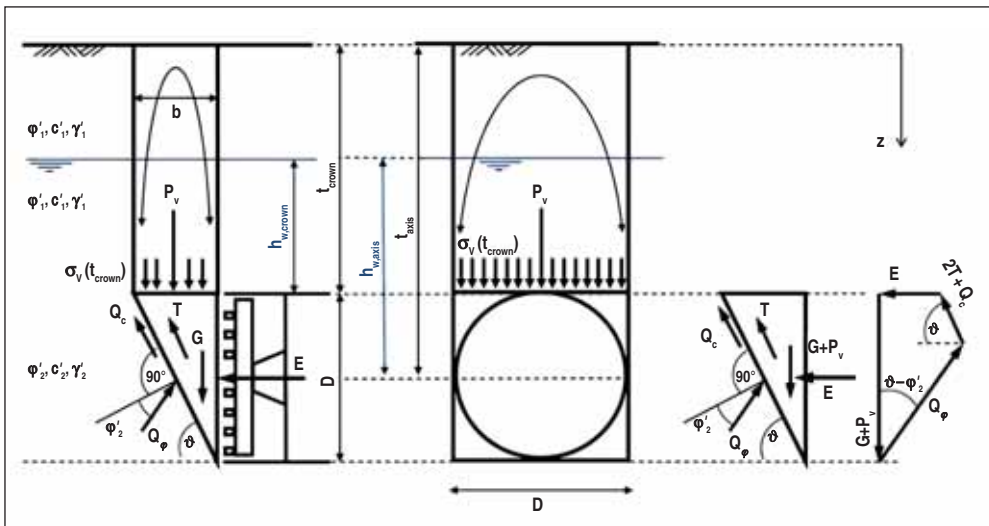
by the contractor. The wall thickness is 250mm. The mean width of the rings is designed to be 1500mm. The ring assembly can be modified depending on the transport and handling possibilities of a specific tunneling machine. A universal ring assembly is considered whose rotation around the horizontal axis enables the realization of horizontal and vertical curves during excavation.

The waterproofing of the segmental lining is ensured on the one hand by waterproof concrete and on the other hand by elastomeric (EPDM) gaskets in the joints between the segments. The inner surface of the lining can only show a slight penetration of moisture on a maximum of 10% of the surface of the individual blocks (recognizable by the dark color of the concrete surface). No traces of water should be visible on the hand after touching the slightly damp areas with a dry hand. The attached absorbent newspaper must not change color due to moisture absorption.

3.7 Excavations design

Variable geotechnical conditions and especially excavation in sections below surface structures require the use of such technology that guarantees minimal ground deformation and at the same time allows high excavation speed. Excavation carried out by full-face tunneling machines, collectively referred to as TM (Tunneling Machines), meets these conditions. Specifically, in the case of Metro D, two earth pressure shields (EPBS) are designed to allow excavation both in the mode with the full face support (in soils and soft rocks of soil-like character) and in the mode without the face support (in solid bedrock). The project therefore considers that the machine will be able to excavate in three modes corresponding to three tunneling classes (Table 3).

The project's requirement is to precisely control the face support pressure, so that deviations from the required pressure are no more than ± 30 kPa (face support by conditioned muck) and ± 10 kPa (face



zdroj DAUB, 2016 source DAUB, 2016

Obr. 9 Výpočtové schéma pro posouzení stability čelby
Fig. 9 Calculation scheme for assessing the stability of the face

Výpočet bez vlivu proudění

Pro stanovení podpůrného tlaku na čelbě existují obecně dvě meze. Jedná se o spodní a horní hranici a aplikovaný podpůrný tlak se má nacházet vždy mezi těmito hranicemi. Dolní mez odpovídá tlaku, který zajistí, aby nedošlo ke ztrátě stability čelby. Horní mez pak odpovídá maximálnímu možnému tlaku, aby nedošlo jeho vlivem k protržení nadloží nebo k úniku podpůrného média z pracovní komory štítu. Hodnoty zmíněných hraničních mezí se nacházejí v závislosti na podmínkách ražby různě daleko od sebe.

Spodní mez podpůrného tlaku musí zajistit minimálně podpůrnou sílu čelby (S). Celková podpůrná síla se při plné kompenzaci stanoví jako reakce ze součtu působení zemního a hydrostatického tlaku (pokud působí). Oba tyto tlaky, které působí negativně na čelbu, mají být násobeny odpovídajícími bezpečnostními součiniteli.

$$S = \eta_E \cdot E + \eta_W \cdot W,$$

η_E součinitel bezpečnosti pro zemní tlak má být vyšší nebo roven 1,5;

η_W součinitel bezpečnosti pro hydrostatický (pórový) tlak, obecně je uvažována hodnota 1,05;

S výsledná potřebná podpůrná síla na čelbě;

E potřebná podpůrná síla z důvodu zemního tlaku;

W potřebná podpůrná síla z důvodu hydrostatického (pórového) tlaku.

Tento bezpečnostní koncept pochází z dokumentu [9] a je doporučován [4], avšak neodpovídá [3]. V případě, že je zjištěno, že podpůrná síla z hlediska zemního tlaku není třeba, provede se výpočet znovu, avšak se sníženými smykovými parametry zemin či hornin. Výpočet pak odpovídá návrhovému přístupu 2 (kombinace A2+M2+(R1)) dle ČSN EN 1997-1-1. Podle tohoto návrhového přístupu jsou redukovány smykové parametry koeficientem 1,25.

Zemní tlak působící na čelbu se stanoví analyticky. Podpůrnou sílu vyrovnávající hydrostatický tlak lze jednoduše stanovit při uvažování odvodněných podmínek z výšky hladiny podzemní vody nad tunelem. Praktické zkušenosti ukázaly, že Hornův mechanismus porušení (obr. 9) představuje spolehlivý způsob pro určení potřebného podpůrného tlaku na čelbě (E_{RA}). Tato metoda je určena pro řešení stability čelby v nesoudržných zeminách nebo v prostředí s vrstvami soudržných a nesoudržných zemin i pro poloskalní

support by compressed air). The stability of the face must be ensured both during the excavation phase and during the lining assembly phase as well as during standstill. The required face pressures must therefore be continuously monitored. The tunneling class proposed in the design is largely determined by the assessment of the stability of the face according to the anticipated geotechnical conditions. Another fundamental criterion is also the safety of excavation with regard to the above-ground structures.

3.8 Face stability and impact on overburden

The face stability and verification of the interaction between the ground and the EPBS was carried out in several steps. First, the face stability calculation was performed without the influence of flow, considering full support of the hydrostatic and the earth pressure.

Calculation without the influence of flow

There are generally two limits for determining the face support pressure. These are the lower and upper limits, and the applied support pressure should always be between these limits. The lower limit corresponds to the pressure that will ensure that there is no loss of the face stability. The upper limit then corresponds to the maximum possible pressure, so that it does not cause the overburden break-up or the support medium to escape from the working chamber of the shield. The values of the mentioned limits vary depending on the excavation conditions.

The lower limit of the support pressure is represented by the minimum face support force (S). The support force is determined as the reaction to the sum of earth and hydrostatic pressures (if applicable). Both of these pressures, which have a destabilizing effect on the face, should be multiplied by the corresponding safety factors.

$$S = \eta_E \cdot E + \eta_W \cdot W,$$

η_E safety factor for earth pressure should be greater than or equal to 1.5;

η_W safety factor for hydrostatic (pore) pressure, a value of 1.05 is generally considered;

S the resulting support force required on the face;

E required support force to resist earth pressure;

W required support force to resist hydrostatic (pore) pressure.

This safety concept comes from document [9] and is recommended by [4], but does not correspond to [3]. If it is found that the support force in terms of earth pressure is not needed, the calculation is performed again, but with reduced shear parameters of soils or rocks. The calculation then corresponds to design approach 2 (combination A2+M2+(R1)) according to ČSN EN 1997-1-1. According to this design approach, shear parameters are reduced by a factor of 1.25.

The earth pressure acting on the face is determined analytically. The support force equal to the hydrostatic pressure can be easily determined when considering drained conditions from the height of the water table above the tunnel. Practical experience has shown that Horn's failure mechanism (Fig. 9) is a reliable method for determining the required face support pressure (ERA). This method

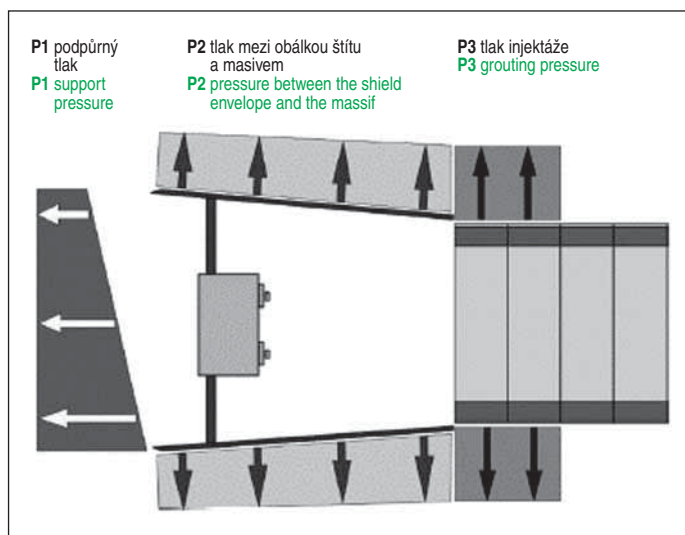
horniny. Ve výpočtu se používají efektivní smykové parametry. Z tohoto důvodu je tedy tato metoda vhodná pro určení podpůrného tlaku na čelbě jen pro odvodněné podmínky. Mechanismus porušení je tvořen smykovým klínem v oblasti čelby a sloupcem, který tento klín přitěžuje. Podmínka rovnováhy sil je sestavena na smykovém klínu. Destabilizujícími jsou v tomto případě vlastní tíha klínu a přitěžujícího sloupce. Mezi stabilizující síly patří protitlak na čelbě a tření na bocích smykového klínu.

Výpočet s vlivem proudového tlaku

V případě, že předchozí posouzení prokázalo stabilní čelbu pro zemní/horninový tlak se zohledněním koeficientů bezpečnosti, bylo možné prověřit stabilitu čelby s neúplnou kompenzací hydrostatického tlaku. V některých případech ražeb EPBS (v režimu bez podpory, s částečnou nebo úplnou podporou čelby) existuje pokus o snížení podpůrného (proti)tlaku pod hydrostatickou úroveň tak, aby se snížilo opotřebení a zlepšil postup stroje. V důsledku pouze částečné kompenzace může podzemní voda proudit k čelbě tunelu. Proto je třeba uvažovat účinky proudového tlaku vody za dodatečné síly destabilizující čelbu tunelu [1] (obr. 10). Velikost síly porušující rovnováhu v důsledku proudění podzemní vody je primárně definována rozdílem v piezometrických výškách mezi pracovní komorou a masivem. Těmito dodatečnými silami je pak zatěžován Hornův mechanismus porušení z předchozího odstavce. Pokud je i při dodatečném zatížení horninového klínu proudovým tlakem prokázána dostatečná stabilita čelby, je přikročeno k posouzení interakce mezi horninovým masivem a strojem, s cílem posouzení neúplné kompenzace hydrostatického tlaku na sedání povrchu a pozemní zástavby.

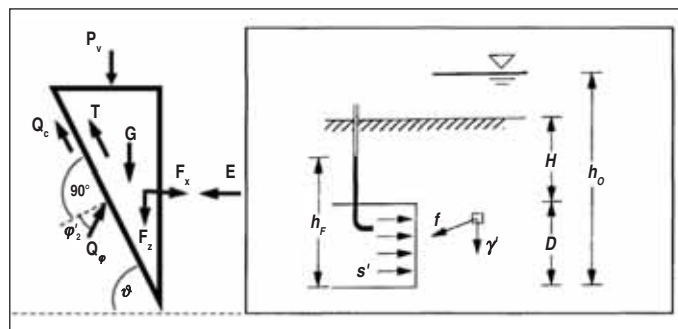
Posouzení interakce mezi tunelovacím strojem a masivem

Výpočet deformací byl proveden metodou konečných prvků programem MKP GEO5 firmy FINE. Prostorová napjatost v masivu byla vždy řešena jako dvojdimenzionální úloha s uvažováním stavu rovinné deformace. Postup vychází z předpokladu komunikace tlaků okolo EPBS (obr. 11). Tlak P2 mezi obálkou štítu a masivem je aktivně ovlivňován tlakem na čelbě (P1) a injektážním tlakem za rub ostění (P3). Horninové prostředí bylo uvažováno jako nehomogenní, izotropní a pružně-plastické s obálkou plasticity podle Mohr-Coulomba. S tlakem podzemní vody je počítáno podle hladiny zastížené při geologickém průzkumu a vzhledem k předpokládané propustnosti masivu. Je zohledněn vliv proudění podzemní



zdroj Maidl et al., 2012 source Maidl et al., 2012

Obr. 11 Tlakový model pro interakci s okolím při ražbě EPBS
Fig. 11 Model of pressures interaction with ground during EPBS excavation



zdroj Anagnostou & Kovari, 1996 source Anagnostou & Kovari, 1996

Obr. 10 Destabilizační síly F_x a F_z vzniklé prouděním podzemní vody
Fig. 10 Destabilizing forces F_x and F_z caused by groundwater flow

is intended for solving the stability of the face in non-cohesive soils or in soils with layers of cohesive and non-cohesive soils as well as for weak rocks. Effective shear parameters are used in the calculation. For this reason, this method is suitable for determining the support pressure on the face only for drained conditions. The failure mechanism consists of a shear wedge in the face area and a ground column that loads this wedge. The force balance condition is established on the shear wedge. In this case, the self-weight of the wedge and of the ground column represent destabilizing forces. Stabilizing forces include support pressure on the face and friction on the sides of the shear wedge.

Calculation with the effect of flow pressure

In the event that the previous assessment demonstrated a stable face for earth/rock pressure taking safety factors into account, it was possible to check the stability of the face for the case of insufficient support to resist hydrostatic pressure. In some cases of EPBS excavation (in mode with partial or full face support), there is an attempt to reduce the support pressure below the hydrostatic pressure level in order to reduce wear and improve machine progress. As a result of insufficient support pressure, groundwater may flow towards the tunnel face. Therefore, the effects of water flow pressure must be considered as additional forces destabilizing the tunnel face [1] (Fig. 10). The magnitude of the destabilizing force due to groundwater flow is primarily defined by the difference in piezometric levels between the working chamber and the massif. Horn's failure mechanism from the previous paragraph is then loaded with these additional forces. If, even in the case of additional load of the flow pressure acting the rock wedge, a sufficient face stability is confirmed, in the next step, the interaction between the rock massif and the machine is assessed to evaluate the settlement of the surface and surface structures.

Assessment of the interaction between the tunneling machine and the massif

The calculation of the deformations was carried out by using the finite element method executed with GEO5 FEM program of the FINE company. Ground stress in the massif was always solved as a two-dimensional problem with consideration of the of plane strain state. The calculation procedure is based on the assumption of pressures communication around the EPBS (Fig. 11). The pressure P2 between the envelope of the shield and the massif is actively influenced by the pressure on the face (P1) and the grouting pressure behind the lining (P3). The rock environment was considered as inhomogeneous, isotropic and elastic-plastic with Mohr-Coulomb failure criterion. The groundwater pressure is calculated according to the groundwater level measured during the geological investigation including assumed permeability of the massif. The effect of groundwater flow on massif deformations

vody na deformace masivu. Z důvodu proudění v horninách nebyl akceptován Terzaghiho princip efektivních napětí a proto byl zaveden Biotův koeficient. Jelikož se zde jedná o výpočet deformací, tedy o mezní stav použitelnosti, nebyly aplikovány žádné dílčí bezpečnostní koeficienty.

Prvním výstupem výpočtů jsou potřebné tlaky na čelbě pro její stabilizaci s případným zohledněním proudění podzemní vody tak, aby byl na jedné straně vyloučen kolaps čelby, a na druhé straně tak, aby nedošlo k úniku podpůrného média z čelby kvůli příliš vysokému tlaku. Dalším výsledkem výpočtů je citlivost deformací masivu na zvolený podpůrný tlak spolu s hodnocením ztráty objemu.

Pokud bylo výpočtem prokázáno, že sedání povrchu nepřekročilo stanovenou mez 10 mm se sklonem poklesové kotliny 1/800, byla navržena ražba pouze s částečnou kompenzací hydrostatického tlaku a odpovídající třídě ražby.

4. ÚSEK I.DB TRAŤOVÉ TUNELY NÁDRAŽÍ KRČ – OLBRACHTOVA

SOD 14, traťový úsek mezi raženou stanicí Olbrachtovou a hloubenou stanicí Nádraží Krč, řeší kolejové propojení pomocí dvojice ražených jednokolejných tunelů se vzduchotechnickými propojkami a hloubeným dvoukolejným tunelem. Stavební oddíl má celkovou délku 743 m (obr. 6).

Výstavba celého úseku bude probíhat směrem od stanice Nádraží Krč, s využitím stavenišť umístěných v blízkosti křižovatky ulic Branická, Na Strži a V Podzámčí. Otevřená stavební jáma v prostoru této křižovatky bude sloužit pro výstavbu celého SOD 14, tj. hloubeného tunelu, pro ražbu jednokolejných tunelů do stanice Olbrachtova a ražbu vzduchotechnických propojek. Pouze ochranná opatření před ražbou jednokolejných tunelů pod povrchovým objektem Rezidence Rozhledna v podobě ochranného deštníku z ocelových pilot (dále označovaná jako metoda pipe-roofing) se budou provádět ze staveniště umístěného poblíž stanice Olbrachtova

is taken into account. Due to flow in rocks, Terzaghi's principle of effective stresses was not accepted and Biot's coefficient was introduced. Since this is the calculation of deformations, i.e. the limit state of serviceability, no partial safety factors were applied.

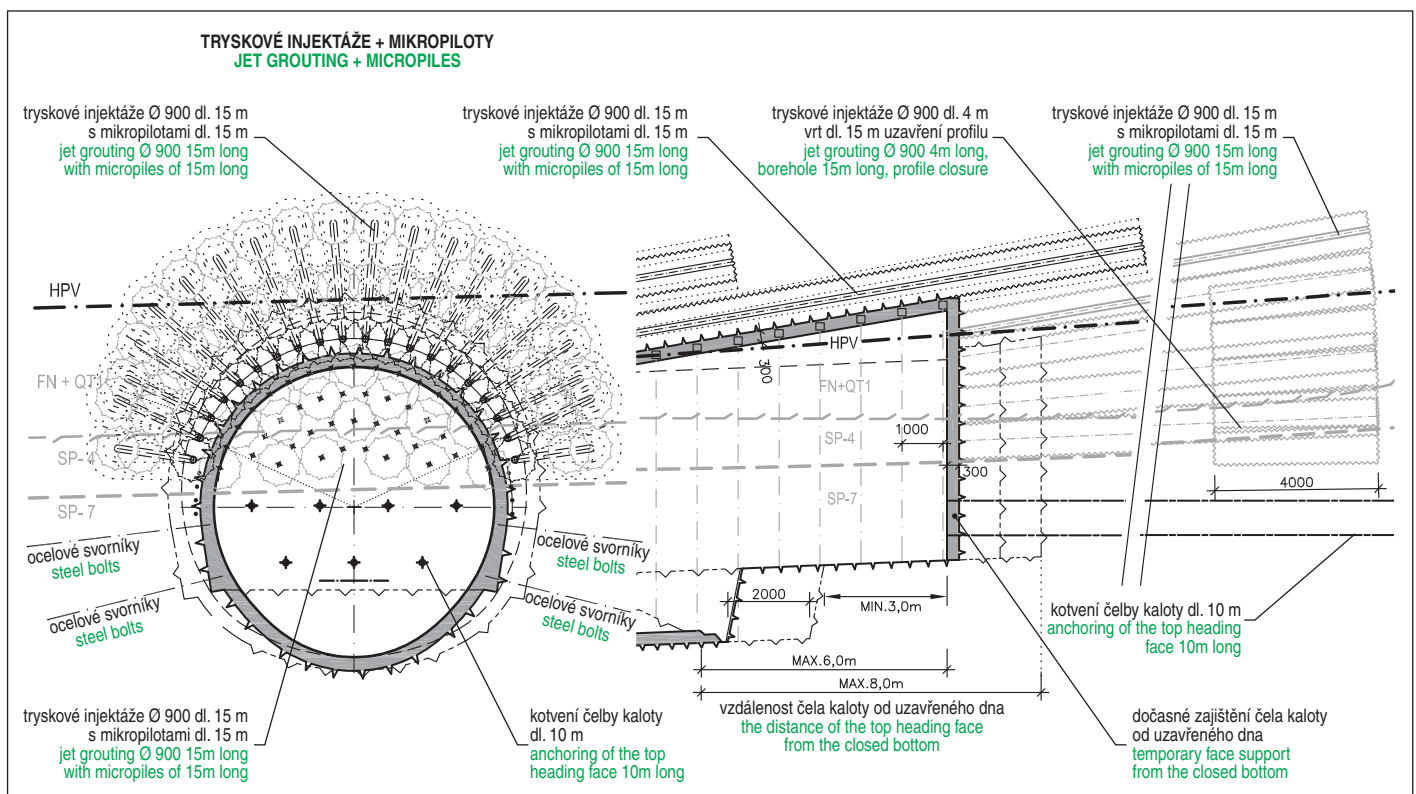
The output of the calculations is the required support pressures on the face, possibly taking into account the groundwater flow, so that on the one hand the collapse of the face is prevented, and on the other hand the blow-out of the support medium from face due to high pressure is prevented. Another result of the calculations is the sensitivity of the ground deformations to the selected support pressure together with the assessment of the volume loss.

If the calculation proved that the surface settlement did not exceed the specified limit of 10mm with a slope 1/800 of the settlement trough, the excavation was designed with only partial compensation of the hydrostatic pressure in correspondence to the tunneling class.

4. I.DB SECTION – RUNNING TUNNELS BETWEEN KRČ AND OLBRACHTOVA STATIONS

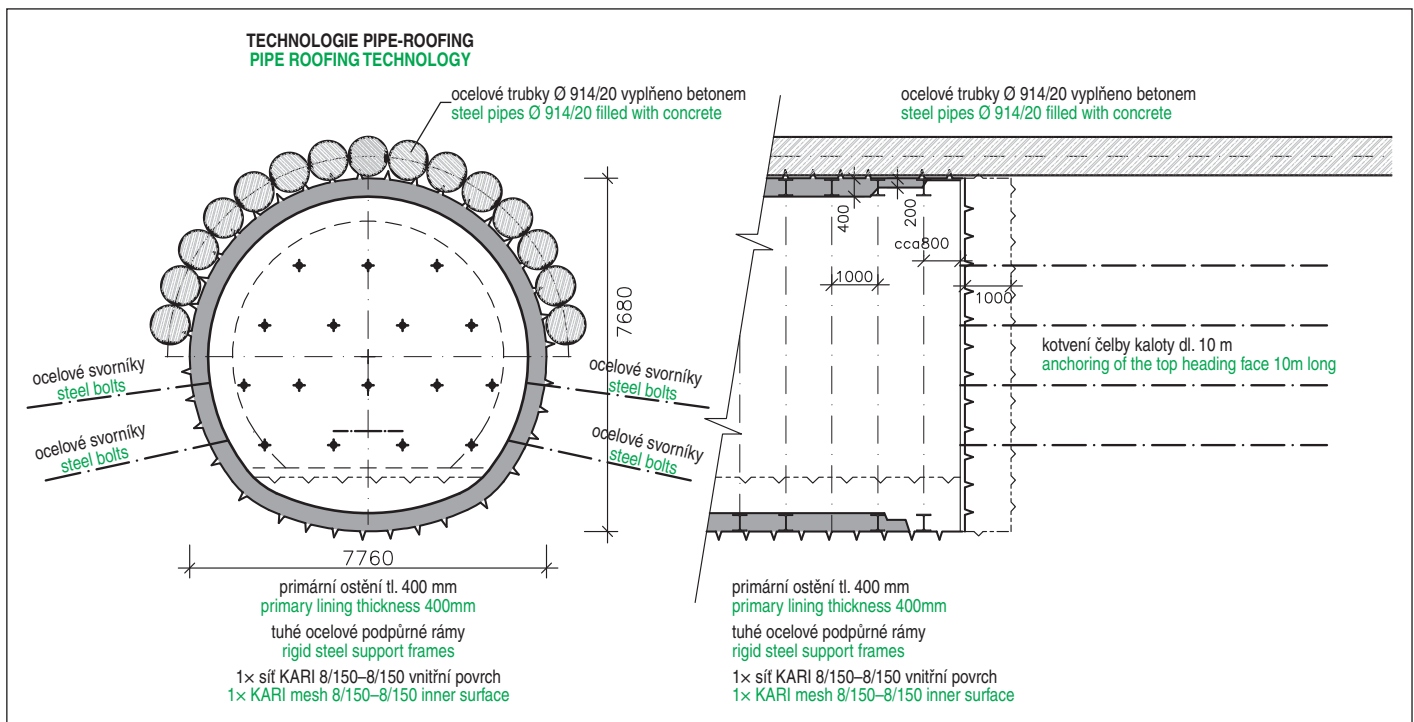
SOD 14, the line section between Olbrachtova mined station and Nádraží Krč open cut station, includes the rail connection by twin single-track tunnels with ventilation crosspassages and an cut & cover double-track tunnel. The section has a total length of 743m (Fig. 6).

Construction of the entire section will take place in the direction from Nádraží Krč station, using construction sites located near the intersection of Branická, Na Strži and V Podzámčí streets. The open pit in the area of this intersection will be used for the construction of the entire section 14, i.e. the cut & cover tunnel, single-track tunnels to Olbrachtova station and the excavation of ventilation crosspassages. Only the support measure of protective umbrella made of steel pipes (hereinafter referred to as the pipe-roofing method) under the surface structure Rezidence Rozhledna prior to the excavation of single-track tunnels will be carried out from the construction site located near Olbrachtova station. The height of the overburden at the portal



Obr. 12 Způsob zajištění stability výrubu při ražbě NRTM na rozhraní pokryvných útvarů a skalního podloží

Fig. 12 NATM excavation support at the interface of Quaternary sediments and bedrock



Obr. 13 Ražba tunelu NRTM pod ochranou obálkou z ocelových trubek
Fig. 13 NATM excavation under the protection of steel pipes

va. Výška nadloží u portálu stavební jámy činí cca 8 m a směrem ke stanici Olbrachtova se pozvolna zvyšuje až na 25 m před stanicí.

Traťové tunely se budou razit dovrčně NRTM, při horizontálním členění čelby a zajišťování výrubu primárním ostěním ze stříkaného betonu. Ražba se očekává v bohdaleckém souvrství (tab. 2), ve velmi proměnlivých geologických a hydrogeologických poměrech, s různým stupněm zvětrání břidlic. V portálovém úseku budou klenbou tunelu zastíženy deluviální sedimenty a terasové sedimenty Vltavy.

Těmto složitým a z geotechnického hlediska náročným poměrům odpovídá také široká škála navržených technologických tříd výrubu: 4, 5a, 5b, 5c1, 5c2 a 5c3 (obr. 12). Od portálu začne ražba pod ochranou mikropilotových deštníků s postupným zajišťováním výrubu pomocí jehel a svorníků. Následuje úsek se sníženým horninovým nadložím a výskytem terasových šterků, kde je nutné počítat se zpevňováním nadloží pomocí tryskových injektáží a s ražbou pod ochrannými mikropilotovými deštníky, později při zlepšení geotechnických poměrů se zajištěním výrubu pomocí jehel a svorníků.

Zhruba 100 m před stanicí Olbrachtova musí ražba překonat geotechnickou překážku pod objektem Rezidence Rozhledna. Stavba je založená na pilotách, jejichž paty jsou ukončeny cca 1,5 m nad vrchlíkem tunelu (obr. 13). Před jednokolejnými tunely je proto nutné zajistit pilotové základy ochranným deštníkem z vodorovných pilot, budovaných nad klenbami budoucích tunelů metodou pipe-roofing. Ochranná obálka bude prováděna mikrotunelováním ze zvětšené vzduchotechnické propojky. Ochranný deštník z ocelových pilot (pipe-roofing) je nutné vést v přímé, a proto i tunely budou v tomto úseku v přímé, se zvětšeným příčným profilem, který umožní pozdější realizaci kolejového svršku a vedení kolejí v oblouku.

Pipe-roofing je metoda, kdy jsou do prostoru mezi budoucí jednokolejné tunely a základové konstrukce (piloty) dotčeného objektu protlačeny ocelové, navzájem propojené, roury. Zainjektování spojí zajistí vodotěsnost a nebude docházet k přítokům přímo

of the pit is approx. 8m and towards Olbrachtova station it gradually increases up to 25m in front of the station.

The running tunnels will be excavated by NATM along rising alignment with heading and bench method and with support of a primary lining made of shotcrete. Excavation is expected in the Bohdalecké Formation (Table 2), in highly variable geological and hydrogeological conditions, with varying degrees of shale weathering. In the portal section, diluvial sediments and Vltava terrace sediments will be encountered by the tunnel arch.

These complex and geotechnically challenging conditions also correspond to the wide range of proposed tunneling technology classes: 4, 5a, 5b, 5c1, 5c2 and 5c3 (Fig. 12). Excavation will begin from the portal under the protection of micropile umbrellas, with the gradual implementation of excavation support by spiles and bolts. This is followed by a section with a reduced rock overburden and the occurrence of terrace gravels, where it is necessary to reinforce the overburden using jet grouting and micropile umbrellas, later when the geotechnical conditions are improved the excavation is supported with spiles and bolts.

Roughly 100m before the Olbrachtova station, the excavation must pass under the Residence Rozhledna building. The building is founded on piles whose footings are terminated approx. 1.5m above the tunnel canopy (Fig. 13). In advance of the single-track tunnels excavation, it is therefore necessary to support the pile foundations with a protective umbrella of horizontal pipes, built above the arch of the future tunnels using the pipe-roofing method. The protective envelope will be built by micro-tunneling from an enlarged ventilation crosspassage. The protective umbrella made of steel piles (pipe-roofing) must be built in a straight line, and therefore the tunnels will also be straight in this section but with an enlarged cross-section, which will enable the later realization of the curved track superstructure.

Pipe-roofing is a method where interconnected steel pipes are jacked into the space between the future single-track tunnels and the foundation (piles) of the structure in question. Grouting the joints will ensure water tightness and there will be no leakage directly from the

z přístropí. Pro zajištění ražby dvou traťových tunelů dojde k protlačení 2×15 ks ocelových rour, v levém traťovém tunelu v délce 47 m a v pravém 45 m. Předpokládá se nasazení mikrotunelovací soupravy s udržením přetlaku na čelbě. Před rourami je zatlačován plně mechanizovaný mikroštit s vlastním drticím a naváděcím systémem a s hydraulickým odtěžováním. Ve startovací kaverně je umístěn vodící rám, opěrná stěna, tlačná stanice a systém čerpadel a rozvodů. Odtěžování je pomocí bentonitového výplachu. Přesný druh a kvalita transportního média se určí podle geologických podmínek a poměrů na stavbě. Stroj vytváří tlakovou rovnováhu mezi výplachem a okolním horninovým prostředím, včetně podzemní vody. V projektu není počítáno s cílovou jámou, proto bude muset být stroj po každém doražení do cílové pozice opět zatažen zpět do startovací kaverny. Z toho důvodu je konstrukčním požadavkem pro mikrotunelovací soupravu možnost ponechání vnějšího ocelového pláště v masivu a její zatažení zpět do kaverny. Tento postup bude opakován pro každou ocelovou rouru. Po protlačení budou ocelové roury vyplněny betonem C 16/20, čímž vznikne roznašecí ocelobetonový nosník pod základy dotčeného objektu. Samotná ražba traťových tunelů bude posléze probíhat na plný profil při zabudování ocelových tuhých rámu v každém záběru. Rámy budou bezprostředně aktivovány vůči ocelovým pilotám ocelovými klíny a doplněny vrstvou výztužné sítě a stříkaným betonem. Stabilita čelby bude zajištěna pomocí čelbových kotev.

5. ZÁVĚR

Na úseku I.D1a v současné době probíhají intenzivní stavební práce. Pro úsek I.D1b byla projektová dokumentace ve stupni pro výběr zhotovitele odevzdána investorovi. V roce 2022 proběhla soutěž pro výběr zhotovitele. V současné době investor provádí vyhodnocení podaných nabídek.

Dr.-Ing. ZDENĚK ŽIŽKA,
zdenek.zizka@metroprojekt.cz,
Ing. MAROŠ DÁVID,
maros.david@metroprojekt.cz,
Ing. MIROSLAV KOCHÁNEK,
miroslav.kochanek@metroprojekt.cz,
Ing. PAVLÍNA SEHNALOVÁ,
pavlina.sehnalova@metroprojekt.cz,
PETR VIŠŇÁK,
petr.visnak@metroprojekt.cz,
METROPROJEKT Praha a.s.

Recenzoval *Reviewed:* Ing. Petr Hybský

roof. To protect the excavation of twin running tunnels, 2×15 pieces of steel pipes will be jacked, in the length of 47m in the left running tunnel and in the length of 45m in the right tunnel. It is assumed that a microtunneling technology with the maintenance of overpressure at the face will be used. A fully mechanized microtunneling machine with its own crushing and guiding system and hydraulic mucking is jacked ahead of the pipes. The launching cavern contains the guide frame, reaction wall, jacking station and pumps and pipe distribution system. Mucking is done using a bentonite slurry. The exact type and quality of the transport medium will be determined according to the geological conditions and site conditions. The machine creates a pressure balance between the slurry and the surrounding rock, including groundwater. The project does not include a receiving pit, so the machine will have to be pulled back into the launching cavern every time it reaches the target position. For that reason, the design requirement for the microtunneling technology is the possibility of leaving the outer steel skin in the massif and before pulling back the machine into the cavern. This procedure will be repeated for each steel pipe. After jacking, the steel pipes will be filled with concrete C 16/20, which will create a steel-concrete beam under the foundations of the building. Full face excavation of the running tunnels will take place later, with the installation of steel rigid frames in each excavation round. The frames will be immediately activated against the steel piles with steel wedges and completed with a layer of reinforcing mesh and shotcrete. The stability of the face will be ensured with the help of face anchors.

5. CONCLUSION

Intensive construction works are currently underway in I.D1a Section. The project documentation of I.D1b Section was handed over to the investor as tender documentation. The tender was conducted in 2022. Currently, the investor is evaluating the offers submitted by contractors.

Dr.-Ing. ZDENĚK ŽIŽKA,
zdenek.zizka@metroprojekt.cz,
Ing. MAROŠ DÁVID,
maros.david@metroprojekt.cz,
Ing. MIROSLAV KOCHÁNEK,
miroslav.kochanek@metroprojekt.cz,
Ing. PAVLÍNA SEHNALOVÁ,
pavlina.sehnalova@metroprojekt.cz,
PETR VIŠŇÁK,
petr.visnak@metroprojekt.cz,
METROPROJEKT Praha a.s.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] ANAGNOSTOU, G., KOVÁRI, K. (1996): Face Stability conditions with Earth-Pressure-Balanced Shields. *Tunnelling & Underground Space Technology* 11 (2).
- [2] BUNDESMINISTERIUM für Verkehr: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln (ZTV-ING) – Teil 5. *Tunnelbau, Abschnitt 3 Maschinelle Schildvortriebsverfahren*, 2017.
- [3] ČSN EN 1997-1 (EC7) *Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla*. Praha: Český normalizační institut, 2006. 137 s.
- [4] DAUB Recommendations for Face Support Pressure Calculations for Shield Tunnelling in Soft Ground. 11/2016.
- [5] MAIDL, B. et al. (2012) *Mechanised Shield Tunnelling*. 2nd edition, Ernst-Sohn Verlag.
- [6] METROPROJEKT PRAHA a.s. (2020) *Výstavba Trasy I.D v Praze – úsek Pankrác – Depo Písnice*. Stavebně-technologický celek – etapa Olbrachtova – Nové Dvory. Projekt pro provedení stavby.
- [7] ÖNORM B 2203-2 (2005) *Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb*.
- [8] STUVA Empfehlung für Dichtungsrahmen in Tübbingauskleidungen, 2019.
- [9] ZTV-ING Teil 5 – Tunnelbau.