

ZKUŠENOSTI Z GEOTECHNICKÉHO MONITORINGU RAŽEB ŽELEZNIČNÍHO TUNELU DEBOREČ

EXPERIENCE FROM GEOTECHNICAL MONITORING OF DEBOREČ RAIL TUNNEL EXCAVATION

MILAN KÖSSLER, ALEŠ VÍDEŇSKÝ

ABSTRAKT

V létě roku 2018 byla zahájena modernizace 4. železničního koridoru v úseku Sudoměřice u Tábora – Votice. V rámci napřimování stávající tratě je prakticky celý modernizovaný úsek veden v nové trase v kopcovité krajině České Sibiře. Pro překonání členitého terénu byly navrženy dva nové dvoukolejné tunely Mezno a Deboreč. Tunely byly raženy konvenčně, observační metodou NRTM, jejíž součástí byl i soubor geotechnických měření a sledování horninového masivu. Tunel Mezno má celkovou délku 840 m, délka tunelu Deboreč činí 660 m. V době přípravy článku (druhá polovina srpna 2020) byly již kaloty obou tunelů proraženy. Na tunelu Deboreč jsou ukončeny i ražby opěří a dna. Zatímco kalota tunelu Mezno byla vyražena bez větších problémů a překvapení, na tunelu Deboreč se účastníci výstavby museli vypořádat s řadou problémů způsobených přítomností výrazné tektonické zlomové zóny v profilu tunelu. Na problematiku průchodu touto poruchou se především zaměřuje tento článek. Po předání této části železnice do provozu (termín dokončení leden 2022), zůstane na trati z Českých Budějovic do Prahy nedokončený úsek Nemanice – Ševětín (v současnosti ve stadiu přípravy) a úsek Soběslav – Doubí u Tábora (v současnosti modernizován, termín dokončení červenec 2023).

ABSTRACT

The modernisation of the Sudoměřice u Tábora – Votice section of the railway corridor No. 4 commenced in the summer of 2018. Virtually entire section being modernised is led in a hilly countryside of the Česká Sibiř within the framework of straightening the existing track. Two new double-track tunnels, the Mezno and the Deboreč, were designed for overcoming the rugged terrain. The tunnels were driven conventionally using the NATM observational method, a part of which was also a set of geotechnical measurements and monitoring of the ground mass. The Mezno tunnel is 840m long, the length of the Deboreč tunnel amounts to 660m. At the time of preparation of the paper (second half of August 2020), the top headings of both tunnels had already been broken through. In addition, the excavation of the bench and bottom has been finished in the Deboreč tunnel. Whilst the top heading of the Mezno tunnel was excavated without more significant problems and surprises, the Deboreč tunnel had to deal with numerous problems caused by the presence of a significant tectonic fault zone in the tunnel cross-section. This paper is primarily focused on problems of the passage through the fault zone. After handing of this part of the railway over for operation (completion deadline January 2022), the Nemanice – Ševětín section (currently at the stage of preparation) and the Soběslav – Doubí u Tábora section near Tábor (currently under modernisation, completion deadline July 2023) will remain unfinished on the track from České Budějovice to Prague.

ÚVOD

Jedním z objektů modernizovaného 4. železničního koridoru v úseku Sudoměřice u Tábora – Votice je tunel Deboreč ležící mezi obcemi Ješetice, Horní Borek, Nové Dvory, Říkov a Radíč. Tunel podchází pod vrchem Deboreč s nadmořskou výškou 598 m n. m., výška terénu v místě portálů je okolo 560 m n. m. Situování tunelu je patrné z obr. 1.

Stavební práce byly na tunelu Deboreč zahájeny v červenci 2018 hloubením pažené stavební jámy výjezdového portálu, ražba započala v lednu roku 2019 ze strany výjezdového portálu, prorážka kaloty proběhla v únoru roku 2020.

Tento článek navazuje na příspěvek autorů v časopisu Tunel 3/2019 [1] a důraz klade především na popis komplikací ražeb, spojených se zastížením geologické poruchy. Tato výrazná tektonická linie, průzkumnými pracemi neindikovaná, přinesla obtíže v podobě nestability nezajištěných částí výrubů a zvýšených deformací horninového masivu a primárního ostění.

Investorem představovaného projektu je Správa železnic, státní organizace, generálním zhotovitelem stavebních prací je společnost OHL ŽS, a.s. Podzhotovitelem stavebních prací tunelu Deboreč je společnost Tubau, a.s. Geotechnický monitoring a geotechnický dohled na tunelu provádí společnost SG Geotechnika, a.s. Na projekčních pracích tunelu Deboreč se podílely organizace

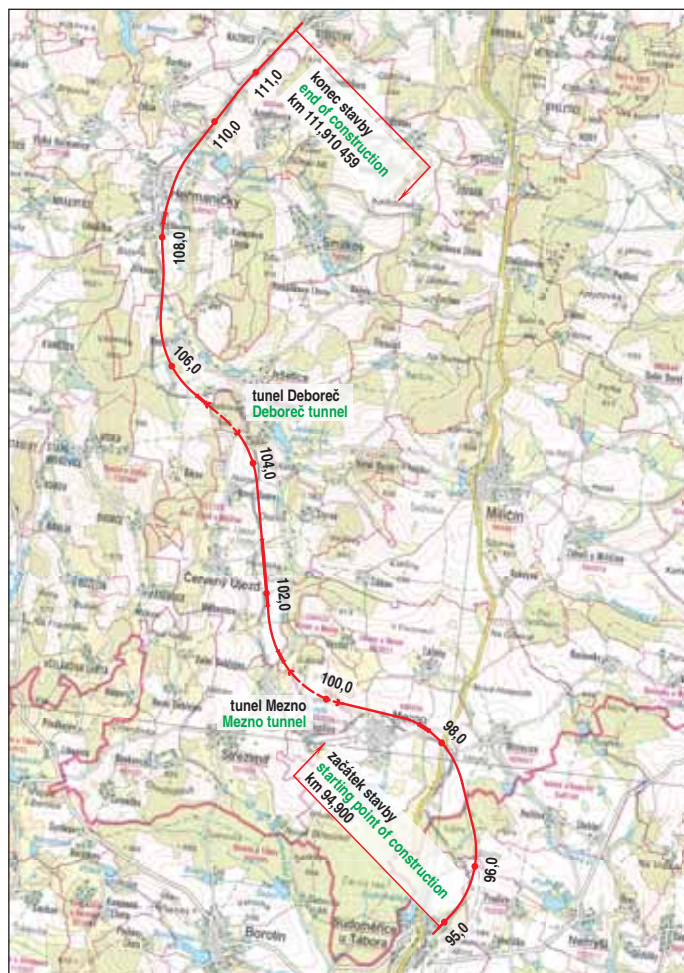
INTRODUCTION

The Deboreč tunnel located between the villages of Ješetice, Horní Borek, Nové Dvory, Říkov and Radíč is one of the structures on the railway corridor No. 4 being modernised. The tunnel passes under Deboreč hill with the altitude of 598m a.s.l.; the elevation of the terrain in the locations of tunnel portals is about 560m a.s.l. The tunnel location is obvious from Fig. 1.

The construction work on the Deboreč tunnel commenced in July 2018 by the excavation of the braced construction pit for the exit portal. The tunnel excavation started from the exit portal in January 2019; the top heading breakthrough took place in February 2020.

This paper is a follow-up to the paper by the authors published in TUNEL journal 3/2019 [1]. Stress is put first of all on the description of the excavation complications associated with encountering a geological fault. This significant tectonic line, which had not been identified by survey, brought difficulties in the form of lack of stability of unsupported parts of the excavated openings and increased deformations of the ground massif and primary lining.

Správa železnic, state organisation (railway administration), is the project owner, OHL ŽS, a.s., is the general contractor for construction work. Tubau, a.s., is the sub-contractor for construction work on the Deboreč tunnel. Geotechnical monitoring



zdroj zadávací dokumentace, Sudop Praha, a.s. source tender documentation, Sudop Praha, a.s.

Obr. 1 Situace širších vztahů
Fig. 1 Situation of wider relationships

METROPROJEKT Praha, a.s., coby zpracovatel dokumentace pro zadání stavby a MPI projekt s.r.o., coby zpracovatel realizační dokumentace stavby.

POPIS ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ DÍLA

Konstrukce tunelu Deboreč je tvořena dvěma portálovými úseky budovanými v otevřené stavební jámě a úsekem raženým Novou rakouskou tunelovací metodou (NRTM). Pro přehlednost bylo na tunelu zavedeno staničení v tunelmetrech (TM), které je nezávislé na oficiálním staničení tratě. TM 0,0 je v místě definitivního výjezdového (tj. pražského) portálu, počátek ražby byl v místě dočasného výjezdového portálu v TM 49,0. Délka konstrukce hloubených částí je 49 m na vjezdovém (jihovýchodním) portálu i na výjezdovém (pražském, severozápadním) portálu. Ražený tunel je navržen v délce 562 m. Celková délka tunelu v jeho ose je tedy 660 m. Výška stěny raženého portálu je na vjezdu 16,1 m (nadloží 6,9 m), na výjezdu 16,8 m (nadloží 7,0 m). Maximální výška nadloží raženého tunelu je cca 47 m ve staničení TM 290.

Profil tunelu je horizontálně členěn na kalotu, opěři a dno. V podélném směru byla vzdálenost čeleb jednotlivých dílčích výrubů závislá na zastižených geologických podmínkách, respektive na technologické třídě výrubu (dále TTV), kde nejkratší délka záběru byla v TTV 5b (0,8–1,0 m) a nejdelší v TTV 2 (2,0–2,2 m). Ražba tunelu probíhala dovrčně od výjezdového portálu směrem k vjezdovému portálu. Zastoupení jednotlivých TTV v kalotě po délce raženého tunelu (TM 49 až TM 611) je zpracováno v tab. 1.

and geotechnical supervision over the tunnel is conducted by SG Geotechnika, a.s., METROPROJEKT Praha, a.s., participated in designing for the Deboreč tunnel in the position of the author of design for tendering; MPI projekt s.r.o. was the author of the design of means and methods.

DESCRIPTION OF BASIC PARAMETERS OF THE WORK

The Deboreč tunnel structure is formed by two portal sections built in an open construction pit and a section mined using the New Austrian Tunnelling Method (NATM). The chainage measured in tunnelmetres (TM) was introduced in the tunnel for the purpose of clarity. It is independent of the official chainage of the track. TM 0.0 is found at the final exit portal (i.e. the Prague portal), while the beginning of the tunnel excavation was at the temporary exit portal at TM 49.0. The length of the cut-and-cover parts amounts to 49m at the entrance (southeastern) portal and 49m at the exit (Prague, northwestern) portal. The mined tunnel design length amounts to 562m. The total length of the tunnel on its centre line is therefore 660m. The walls of the mined portals at the entrance and exit are 16.1m high (overburden 16.1m high) and 16.8m high, respectively. The maximum height of the mined tunnel overburden amounts to ca 47m at TM 290 chainage.

The tunnel cross-section is divided horizontally into top heading, bench and bottom. Longitudinally, the distances between individual partial excavation faces depended on the geological conditions encountered, respectively on the excavation support class (hereinafter referred to as ESC), where the shortest excavation round length was at ESC 5b (0.8–1.0m) and the longest at ESC 2 (2.0–2.2m). The tunnel excavation proceeded uphill from the exit portal towards the entrance portal. The representation of individual ESCs throughout the length of the mined tunnel top heading (TM 49 to TM 611) is processed in Table 1.

Table 1 Representation of individual ESCs in top heading (Kössler, 2020)

tunnelmeter (TM)	ESC	length (m)
49.0 to 108.0	5b1	59.0
108.0 to 151.4	5a	43.4
151.4 to 188.3	4	36.9
188.3 to 193.6	3	5.3
193.6 to 353.2	2	159.6
353.2 to 374.0	3	20.8
374.0 to 384.8	4	10.8
384.8 to 389.7	5a	4.9
389.7 to 425.0	5b1	35.3
425.0 to 426.4	4	1.4
426.4 to 548.3	3	121.9
548.3 to 611.0	4	62.7

The tunnel lining is a double-shell structure with intermediate waterproofing membrane. The primary lining is formed by sprayed concrete layers 150, 200, 250, 300 and 400mm thick (for individual ESCs) reinforced with welded mesh, lattice girders, rockbolts, spiling and, in the case of the NATM excavation support class 5b, even by face-supporting anchors and canopy tube pre-support. The most subtle lining was designed for ESC 2, while ESC 5b is most massive. The secondary lining will be carried out by pouring concrete behind formwork. It will be 350mm thick for NATM ESCs 2 to 5a; thickness of 450mm is for class 5b. The length of concrete casting blocks of the final lining is set uniformly for the whole tunnel at 12m.

Tab. 1 Zastoupení jednotlivých TTV v kalotě (Kössler, 2020)

tunelový metr (TM)	TTV	délka (m)
49,0 až 108,0	5b1	59,0
108,0 až 151,4	5a	43,4
151,4 až 188,3	4	36,9
188,3 až 193,6	3	5,3
193,6 až 353,2	2	159,6
353,2 až 374,0	3	20,8
374,0 až 384,8	4	10,8
384,8 až 389,7	5a	4,9
389,7 až 425,0	5b1	35,3
425,0 až 426,4	4	1,4
426,4 až 548,3	3	121,9
548,3 až 611,0	4	62,7

Ostění tunelu je dvouplášťové s mezilehlou fóliovou izolací. Primární ostění je tvořeno stříkaným betonem tloušťky 150, 200, 250, 300 a 400 mm (pro jednotlivé TTV) vyztuženým svařovanými sítěmi, příhradovými nosníky, svorníky, jehlováním a v případě technologické třídy NRTM 5b i s čelbovými kotvami a mikropilotovým deštníkem. Nejsubtilnější ostění je navrženo pro TTV 2, nejmasivněji je vystrojená TTV 5b. Sekundární ostění bude realizováno monoliticky do bednění s tloušťkou 350 mm pro technologické třídy NRTM 2 až 5a a tloušťkou 450 mm pro třídu 5b. Délka bloku betonáže definitivního ostění je stanovena jednotně pro celý tunel a činí 12 m.

STRUČNÝ PŘEHLED ČINNOSTÍ GEOTECHNICKÉHO MONITORINGU

Mimo konvergenční měření, která jsou zmíněna v následující kapitole, byly na tomto tunelu aplikovány i další typy kontrolních měření.

Hloubené části tunelu Deboreč byly provedeny s kotvenou záporovou konstrukcí. Na portálech byly v průběhu stavebních prací sledovány pohyby stěn na 3D geodetických bodech (40 bodů na každém portálu) a na vybraných kotvách byly měřeny síly v kotvách na dynamometrech (pět dynamometrů na každém portálu). Oba portály jsou navíc sledované inklinometricky. Dva inklinometry jsou instalovány na vjezdovém portálu, jeden je instalován na výjezdovém portálu. Hodnoty deformací na stěnách pažené jámy výjezdového portálu dosahovaly v jednotlivých složkách (podélná, příčná, svislá) převážně hodnot do 20 mm. Pouze u portálové stěny vjezdového portálu byla nad výrubem tunelu naměřena hodnota sedání 23 mm, čímž byl nepatrně překročen první varovný stav stanovený na hodnotu 20 mm vyklonění/zatlačení/sedání portálové stěny. Na inklinometrech byly naměřeny deformace v hodnotách do 11 mm. První varovný stav, stanovený na hodnotu 20 mm vyklonění inklinometru do jámy, tedy dosažen nebyl.

Na povrchu nad tunelem byly instalovány dva profily sružené z extenzometrů a z nivelačních bodů v TM 59,5 a TM 438. Jeden profil zahrnoval tři extenzometry a jedenáct nivelačních bodů (celkem šest extenzometrů a 22 nivelačních bodů pro oba profily). V obou profilech byl prostřední extenzometr instalovaný v ose tunelu a byl trojúhelníkový, dva krajní extenzometry byly instalovány vždy 4,8 m vpravo a vlevo od osy tunelu a byly čtyřúhelníkové. Tři nivelační body byly u obou profilů instalovány na hlavách extenzometrů a po čtyřech bodech bylo instalováno dále vpravo a vlevo od trojice extenzometrů, aby byla pokryta celá poklesová kotlina. Na profilu v TM 59,5 situovaném v oblasti nízkého nadloží (mocnost nadloží v TM 59,5 činila cca 7,6 m) v blízkosti vjezdového portálu

BRIEF OVERVIEW OF GEOTECHNICAL MONITORING ACTIVITIES

Apart of the convergence measurements mentioned in the following chapter, even other types of check measurements were applied to this tunnel.

An anchored soldier beam and lagging structure was carried out for the cut-and-cover parts of the Deboreč tunnel. At the portals, movements of walls were monitored during the course of construction work on 3D survey points (40 points at each portal) and forces in selected anchors were measured with dynamometers (five dynamometers at each portal). Both portals are in addition monitored with inclinometers. Two inclinometers are installed at the entrance portal, one is installed on the exit portal. The values of deformations measured on the walls of the braced pit for the exit portal reached in individual displacement components (longitudinal, transverse, vertical) up to 20mm. The settlement value of 23mm was measured only above the tunnel excavation at the entrance portal wall. It slightly exceeded the first warning state set at 20mm of tilting out/pressing in/settling of the portal wall. Deformation values up to 11mm were measured on the inclinometers. It means that the first warning state, which was set at the value of 20mm of inclinometer tilting to the pit, was not reached.

Two combined profiles consisting of extensometers and levelling points at TM 59.5 and TM 438 were installed on the surface above the tunnel. One profile comprised three extensometers and eleven levelling points (six extensometers and 22 levelling points in total for both profiles). The middle extensometer installed at both profiles on the tunnel centre line was of the three-level type, while both side extensometers which were installed on the left and right sides, 4.8m from the tunnel centre line, were of the four-level type. At both measure profiles, three levelling points were installed on the heads of extensometers and four points were installed to the right and left of the three extensometers so that the whole settlement trough was covered. On the profile at TM 59.5 located in the area of low overburden (overburden thickness at TM 59.5 amounted to ca 7.6m) in the vicinity of the entrance portal, the terrain settlement up to 22mm was measured on the tunnel centre line. On the profile at TM 438 with high overburden (overburden at TM 438 was ca 28.4m high) negligible settlement with the values of initial millimetres was measured on the tunnel centre line. Therefore the first warning state of terrain settlement set at the value of 25mm was not reached. At the lower measured levels of the extensometers installed in the ground mass at the distances of 1.5m, 3.0m, 4.5m and 6.0m above the theoretical contour of the tunnel, 33mm settlement was measured at the profile at TM 59.5m and up to 20mm at the profile at TM 438. The warning states of the ground massif in the immediate vicinity of the excavation were reached on neither profile. The first warning state value for the profile excavation was categorised as support class ESC 5b1 (TM 59.5) amounted to 130mm. The first warning state for the profile belonging to TM 438 (ESC 3) amounted to 40mm.

For the purpose of excluding negative effects of tunnelling on buildings in the vicinity, a condition survey of five buildings adjacent to the entrance portal (cadastral district of Horní Borek) and eleven buildings in the cadastral district of Ješetice was carried out before the beginning of blasting. The effect of vibrations induced by blasting on buildings in the surroundings was observed on two properties adjacent to the tunnel throughout the tunnel excavation period by continuous monitoring of each blasting event. Throughout the period of seismic monitoring the vibration velocity measured on both seismic stations fluctuated under the value of 0.5mm/s. The measured values of dynamic load were fully within the permissible

bylo naměřeno sedání terénu v ose tunelu do 22 mm. Na profilu v TM 438 s vysokým nadložím (mocnost nadloží v TM 438 činila cca 28,4 m) bylo v ose tunelu naměřeno zanedbatelné sedání terénu v hodnotách prvních milimetrů. První varovný stav sedání terénu stanovený na hodnotu 25 mm tedy dosažen nebyl. Na spodních měřených úrovních extenzometrů instalovaných v horninovém masivu ve vzdálenostech 1,5 m, 3,0 m, 4,5 m a 6,0 m nad teoretickým obrysem tunelu bylo naměřeno na profilu v TM 59,5 sedání do 33 mm a na profilu v TM 438 sedání do 20 mm. Varovné stavy deformací horninového masivu v bezprostředním okolí výrubu nebyly na obou profilech dosaženy. První varovný stav pro profil náležející TTV 5b1 (TM 59,5) činil 130 mm. Pro profil v TM 438 (TTV 3) činil první varovný stav 40 mm.

Pro vyloučení negativních účinků od tunelování na okolní zástavbu byl před zahájením trhacích prací proveden pasport pěti objektů přilehlých vjezdovému portálu (katastrální území Horní Borek) a jedenácti domů v katastrálním území Ješetice. Vliv otřesů od trhacích prací na okolní zástavbu byl po celou dobu ražby monitorován kontinuálním sledováním každého odstřelu na dvou nemovitostech přilehlých k tunelu. Po celou dobu seismického monitoringu se rychlosti kmitání na obou seismických stanicích pohybovaly pod hodnotou 0,5 mm/s. Naměřené hodnoty dynamického zatížení byly zcela v přípustných mezích dle ČSN 73 0040 pro stupeň porušení «0», tj. s vyloučením možnosti vzniku poškození z titulu provádění trhacích prací pro objekty třídy odolnosti „B“ (běžné cihelné stavy), resp. „A“ (stavby v horším stavebně-technickém stavu). V průběhu odstřelů bylo rovněž třikrát provedeno kontrolní měření akustických účinků od trhacích prací s výsledkem okolo 50 dB pro denní dobu a okolo 60 dB pro noční dobu. Varovné stavy jsou u akustických účinků převzaty z nařízení vlády 272/2011 Sb., kde jsou stanoveny limitní hodnoty pro denní dobu 83 dB a pro noční dobu 40 dB. Noční odstřely tedy nebylo možno provádět, trhací práce byly realizovány pouze v době od 6:00 h do 22:00 h.

V rámci hydrogeologického monitoringu okolních objektů je od jara 2017 prováděno měsíční sledování hladin vodních zdrojů v potenciální zóně ovlivnění ražbami. V letech 2017, 2018, 2019 lze pozorovat dlouhodobý pokles hladin vody u řady studní, který se zastavil až v letošním roce. U monitorovaných objektů byly samozřejmě naměřeny rovněž sezónní výkyvy, kdy v jednotlivých letech docházelo k úbytku vody v letních měsících a nárůstu hladin v zimním období. Lze konstatovat, že úroveň hladin korespondovala s úhrnem srážek v jednotlivých letech (suché roky 2017 až 2019, deštivý rok 2020) a rovněž se sezónními srážkovými a teplotními výkyvy. Ovlivnění okolních vodních zdrojů tunelováním nebylo prokázáno.

Pro zdokumentování skutečného tvaru obnaženého výrubu, a tedy i případného množství nadvýrubů (podvýrubů), byl každý záběr zaměřen geodetickým přístrojem profiler. Po dokončení ražeb byl pak naskenován povrch primárního ostění, aby bylo možno určit místa, kde je povrch primárního ostění v kolizi s budoucím rubem sekundárního ostění, a tato místa vyfrézovat.

Součástí komplexního geotechnického monitoringu tunelu Deboreč bylo dále kontinuální inženýrskogeologické sledování kvality horninového masivu. Dokumentován byl každý stavební postup s výstupem v podobě fotodokumentace a geotechnického pasportu s nákresem čelby, textovým záznamem zjištěných skutečností, zhodnocením kvality horninového masivu podle zásad klasifikace RMR a komentáři či doporučeními ohledně technologických opatření a prvků, které přímo ovlivňují podmínky ražby, respektive stabilitu výrubu.

limits according to ČSN 73 0040 for the “0” degree of damage, i.e. with exclusion of the possibility of origination of a damage due to blasting operations for structures resistance class “B” (common brick buildings) respectively “A” (buildings in worse structural-technical condition). During the course of blasting, check measurements of acoustic effects of blasting were conducted three times, with the result of about 50dB for day time and about 60dB for night time. The warning states for the cases of acoustic effects are borrowed from the Decree No. 272/2011 Coll. of the Government of the Czech Republic, where limiting values of 83dB are set for day time and 40dB for night time. That is why night blasting events could not be carried out. Blasting was carried out only in the period from 6 am. to 10 pm.

Monthly monitoring of levels of water sources in the potential zone affected by tunnel excavation has been carried out since spring 2017 within the framework of hydrological monitoring of buildings in the vicinity. Long term drop of levels of water surfaces in many wells can be observed in 2017, 2018 and 2019. It did not stop until this year. Of course, seasonal fluctuations where decreasing of water sources occurred in summer months and increasing in winter months during individual years were also measured on the monitored objects. It can be stated that the level of water surfaces corresponded to the precipitation total in individual years (dry years 2017 to 2019, rainy year 2020) and also to seasonal precipitation and thermal fluctuations. Affecting of water resources in the surroundings by tunnelling has not been proved yet.

For documenting the actual shape of the exposed excavated opening, thus also the possible number of overbreaks (underbreaks), each excavation round was surveyed by a profiler. After completion of the tunnel excavation, the surface of the primary lining was scanned so that it was possible to determine places where the primary lining surface collided with the future external surface of the secondary lining and mill those places away.

Further on, continual engineering geological monitoring of the ground massif quality was part of the comprehensive geotechnical monitoring of the Deboreč tunnel. Each construction procedure was documented, with an output in the form of photodocumentation and a geotechnical passport with drawing of the excavation face, a text record of findings, assessment of the ground massif quality according to the RMR classification and comments or recommendations regarding technical measures and elements directly affecting the excavation conditions, respectively the excavation stability.

DEBOREČ TUNEL EXCAVATION IN DIFFICULT GEOTECHNICAL CONDITIONS OF FAULT ZONE

The construction work on the Deboreč tunnel started in July 2018 by stripping the soil profile at the exit portal; excavation at the entrance portal started in September 2018. The tunnel excavation itself commenced from the exit portal side in January 2019. In the section behind the portal, relatively unfavourable geotechnical conditions were encountered by the tunnel excavation. They were characterised by heavily weathered paragneiss with strength class mostly R5, with locations of R6 with extremely close joint spacing. From the mined portal (TM 49) to chainage TM 108, the excavation proceeded through massively supported ESC 5b1, under the protection of canopy tube pre-support. Along with gradual sumping of the excavation face into the rock massif, even geotechnical conditions improved. The excavation gradually passed through individual excavation support classes up to the most subtly supported ESC 2. A relatively long section (159.6m, TM 193 to TM 353.2) was excavated through compact ESC 2 paragneiss, quartziferous paragneiss to quartzite strength class R3 to R2.

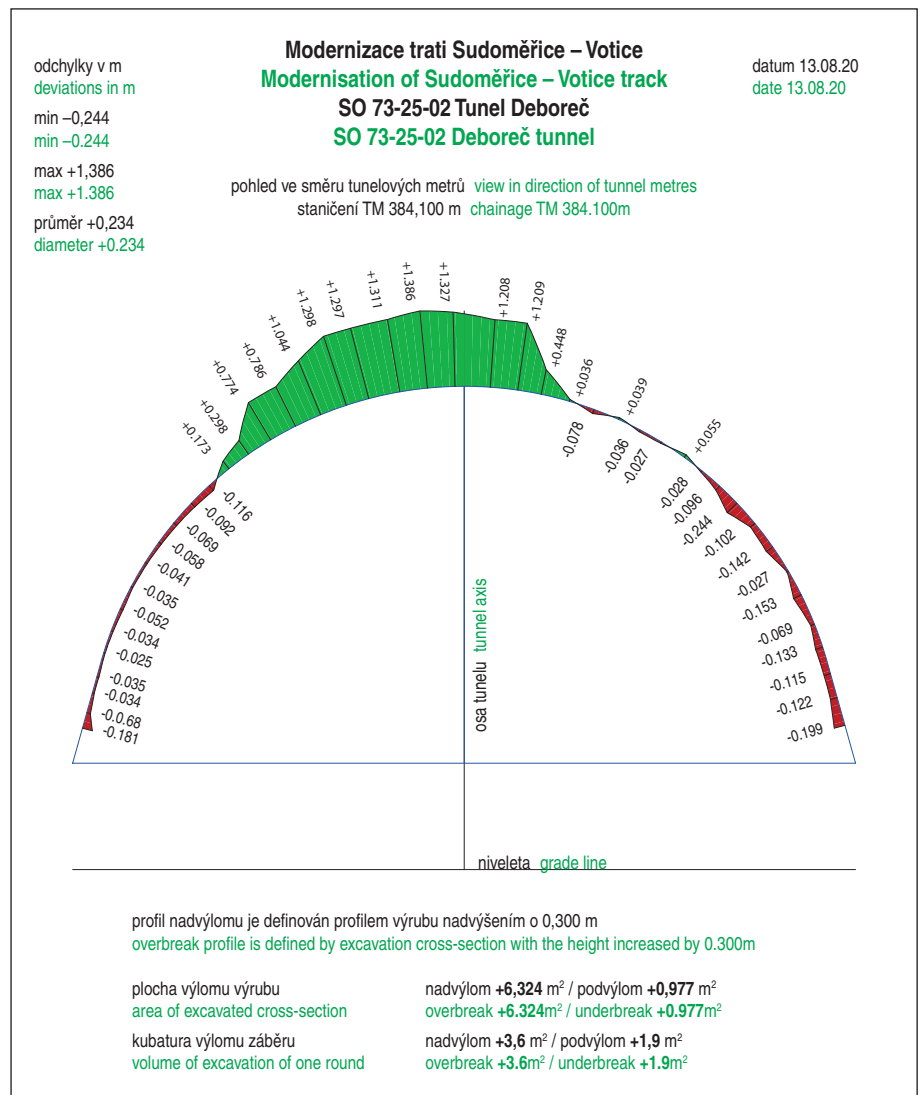
RAŽBY TUNELU DEBOŘEČ V OBTÍŽNÝCH GEOTECHNICKÝCH POMĚRECH ZLOMOVÉ ZÓNY

Stavební práce na tunelu Deboreč započaly v červenci 2018 skrývkou půdního profilu na výjezdovém portálu, hloubení na vjezdovém portálu započalo v listopadu 2018. Samotné ražby se rozběhly v lednu 2019 ze strany výjezdového portálu. V připortálovém úseku byly ražbami zastiženy relativně nepříznivé geotechnické poměry charakterizované silně zvětralými paraulami pevnostní třídy převážně R5 s polohami R6 s extrémně velkou hustotou diskontinuit. Od raženého portálu (TM 49) až do staničení TM 108 bylo tedy postupováno v masivně vystrojené TTV 5b1 pod ochranou mikropilotového deštníku. S postupným zahlabováním čelby do horninového masivu se zlepšovaly i geotechnické poměry. Ražby postupně přešly přes jednotlivé vystrojovací třídy až do nejsubtilnější vystrojené TTV 2. V TTV 2 byl ražen poměrně dlouhý úsek 159,6 m (TM 193,6 až do TM 353,2) v kompaktních paraulách, kvarcitic- kých paraulách až kvarcitech pevnostní třídy R3 až R2.

Od TM 340 se kvalita horninového masivu začala zhoršovat. Zastiženy byly postupně rozpukané horniny převážně pevnosti R4, které měly od TM 350 v přístropí zhoršenou stabilitu (vypadávání bloků horniny v řádu prvních metrů kubických). Proto došlo v TM 353,2 k přetřídění z TTV 2 do TTV 3. S následnou ražbou kaloty docházelo k dalšímu zhoršování inženýrskogeologických poměrů (v přístropí zastiženy zvětralé silně rozpukané parauly pevnostní třídy R5) a ražba postupně přešla do TTV 4 (TM 374,0) a TTV 5a (TM 384,8). Od staničení TM 370 začalo docházet k výraznějším nadvýlomům v řádu několika metrů kubických a od TM 376,4 už bylo možno postupovat jen pod ochranou předháněných jehel (příklad zaměření jednoho významného nadvýlomu z TM 384,1 je na obr. 2).

Ražby v kalotě byly dočasně pozastaveny 13. 8. 2019 v TM 384,8. Důvodem přerušení bylo zkrácení odstupů čelby opěří od čelby kaloty na projektovanou vzdálenost 20 m pro TTV 5a. Čelba opěří byla totiž k datu 13. 8. 2019 pozadu o 177 m z důvodu dlouhé předchozí ražby v TTV 2, kde byl max. povolený odstup čelby kaloty a opěří 200 m.

Ražby kaloty byly znovuobnoveny 5. 9. 2019. Následující den 6. 9. 2019 došlo v přístropí v TM 388,2 k nadvýlomu, který byl již v řádech desítek metrů kubických. Objem vypadnuté horniny byl odhadnut cca na 20 m³, geodetické zaměření nebylo z důvodu bezpečnosti provedeno. K tomuto nadvýlomu došlo i přes instalované jehly v přístropí, kdy

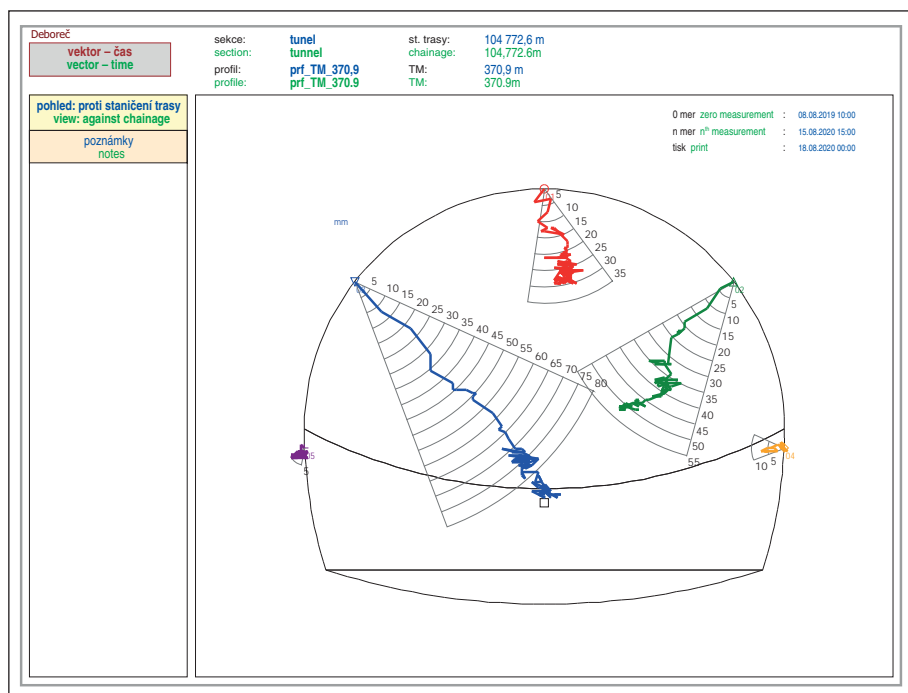


Obr. 2 Zaměření nadvýlomu v TM 384,1
Fig. 2 Survey of overbreak at TM 384.1



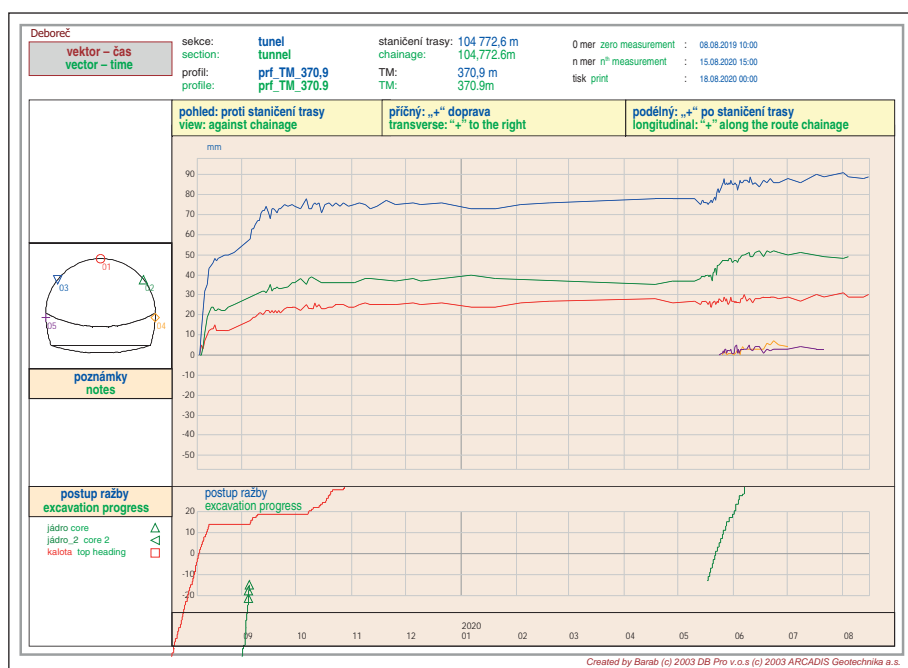
Obr. 3 Pohled na nadvýlom v TM 388,2
Fig. 3 View of overbreak at TM 388.2

foto Videňský, září 2019 photo Videňský, September 2019



zdroj Petřů, 2019 source Petřů, 2019

Obr. 4 Směr deformací konvergenčního profilu v TM 370,9
Fig. 4 Direction of deformations of convergence profile at TM 370.9



zdroj Farský, 2019 source Farský, 2019

Obr. 5 Vývoj hodnot vektoru deformací konvergenčního profilu v TM 370,9
Fig. 5 Development of values of deformation vector of convergence profile at TM 370.9

se hornina z přístropí vysypala v podobě nesoudržného materiálu (obr. 3).

Nestabilita obnažených částí horninového masivu byla doprovázena nepříznivým vývojem deformací primárního ostění na profilech instalovaných bezprostředně za čelbou. Po znovuobnovení ražeb kaloty 5. 9. 2019 se radiální deformace na měřených konvergenčních profilech instalovaných v TM 357,3, TM 370,9 a TM 382,9 začaly zvětšovat o několik milimetrů denně ve svislém i příčném směru. Nárůst deformací byl patrný především v levých bodech kaloty ve směru ražby. Na uvedených třech profilech byl překročen první varovný stav radiální deformace a na profilu

From TM 340, quality of the rock mass started to deteriorate. Fractured rock strength class R4, having worsened stability in the top heading from TM 350 (falling of rock blocks within the order of initial cube metres), started gradually to be encountered. For that reason the rock was reclassified at chainage TM 353.2 from ESC 2 to ESC 3. Along with the following excavation of the top heading, the engineering geological conditions further deteriorated (weathered, heavily fractured paragneiss strength class R5 was encountered in top heading) and the excavation gradually passed to ESC 4 (TM 374.0) and ESC 5a (TM 384.8). From chainage TM 370, more significant overbreaks within the order of several cube metres started to appear and, from TM 376.4, it was possible to proceed only under the protection of forepoles (an example of one significant overbreak from TM 384.1 is presented in Fig. 2).

The top heading excavation was temporarily suspended at TM 384.8 on 13 August 2019. The reason for the suspension was shortening of the distance between the excavation face of the bench and the face of the top heading to the distance of 20m designed for ESC 5a. As of 13 August 2019, the face of the bench lagged 177m behind due to the long previous excavation in ESC 2, where the maximum permissible distance between the top heading and bench faces amounted to 200m.

Top heading excavation was resumed on 5 September 2019. The following day, 6 September 2019, an overbreak, already in the order of tens cube metres, happened at the crown, TM 388.2. The volume of the fallen rock was guessed to amount to ca 20m³; survey measurement was not conducted for safety reasons. The overbreak occurred even despite spiles installed in the crown, where rock spilled from the crown in the form of incoherent material (see Fig. 3).

The instability of the exposed parts of the rock mass was accompanied by unfavourable development of deformations of the primary lining on profiles installed immediately behind the excavation face. After the resumption of excavation of the top heading on 5 September 2019, the radial deformations on the measured convergence profiles installed at

TM 357.3, TM 370.9 and TM 382.9 started to increase by several millimetres per day both vertically and transversally. The increase in deformations was apparent first of all in the left-hand points of the top heading (viewed in the direction of excavation). The first warning state was exceeded on the above-mentioned three profiles, whilst even the second warning state was exceeded on the profile at TM 370.9. The largest deformations were measured on the profile at TM 370.9. As of 9 September 2019, they amounted to ca 70mm in the radial direction on the left side of the top heading, whilst the first warning state for this profile installed in ESC 3 was set at 40mm and the second warning state at 50mm. The direction of deformations of

v TM 370,9 byl překročen dokonce i druhý varovný stav. Největší deformace byly naměřeny na profilu v TM 370,9 a k 9. 9. 2019 činily cca 70 mm v radiálním směru na levé straně kaloty, přičemž první varovný stav byl pro tento profil situovaný v TTV 3 stanoven na hodnotu 40 mm a druhý varovný stav na hodnotu 50 mm. Směr deformací konvergenčního profilu TM 370,9 v příčném řezu je znázorněn na obr. 4, vývoj hodnot vektoru tohoto profilu v závislosti na čase a postupu čeleb je pak patrný z obr. 5.

Výše popsany nepříznivý sled událostí vedl k pozastavení ražby kaloty k 9. 9. 2019 v TM 389,7. Bezprostředně po pozastavení ražeb byla zakonzervována čelba stříkaným betonem vyztuženým sítěmi, čelbovými injektovanými kotvami durglass a před čelbou byl ponechán opěrný horninový klín. V kalotě bylo v úseku mezi koncem opěrného klínu (cca TM 385) a čelbou opěří (TM 357) uzavřeno dno provizorní protiklenbou ze stříkaného betonu vyztuženého sítí. Po uzavření počvy kaloty (10. 9. 2019) se deformace začaly výrazně ustalovat a k jejich odeznění došlo zhruba na konci září 2019.

Na základě těchto událostí byl do čelby kaloty v ose tunelu realizován průzkumný jádrový předvrt ve výšce cca 1,5 m nad počvou kaloty, který ukázal, že cca do staničení TM 415 m bude raženo ve špatných geologických podmínkách (podrcené pararuly, místy bez výnosu jádra). Od TM 415 se kvalita vrtného jádra výrazně zlepšila, byly zastíženy kvalitní pararuly pevnosti R3. K znovuzahájení ražeb kaloty z TM 389,7 došlo 8. 10. 2019 v TTV 5b. Přístropí tunelu bylo zajištěno pomocí vrtných subhorizontálních mikropilotů a počva kaloty byla budována s provizorně uzavřenou protiklenbou. Ražba kaloty pod ochranou mikropilotového deštníku měla na vývoj deformací již minimální vliv (obr. 5). V TTV 5b byla kalota ražena až do staničení TM 425,0. Kvalita horninového masivu se začala opětovně zlepšovat a ražba kaloty přešla přes TTV 4 do TTV 3. V této třídě bylo raženo až do TM 548,3, kde bylo z důvodu zhoršování geotechnických poměrů v oblasti před provizorním raženým vjezdovým portálem zajištění výrubu přetříděno do TTV 4.

Po proražení kaloty se úsilí účastníků výstavby zaměřilo na ražbu opěří a dna v oblasti výše popsané geologické poruchy. Úsek zlomové zóny, který nebyl ražen pod ochranou mikropilotového deštníku a kde byly zaznamenány zvýšené deformace (TM 348,0 až TM 390,5), byl posílen dodatečnými systematickými radiálními svorníky z prvků IBO dl. 12 m, Ø 51 mm. V tomto úseku byly pro sledování deformací doplněny mezilehlé konvergenční profily tak, že vzdálenost mezi nimi činila cca 7,5 m. Následně tímto úsekem prošla čelba celého opěří a se zpožděním dvou záběrů i ražba dna. Při ražbě opěří a dna byly měřeny deformace na instalovaných konvergenčních bodech v oblasti poruchové zóny v četnosti 2x denně, vždy ráno a večer (v 7:00 h a v 19:00 h). V důsledku ražby opěří a dna došlo k nárůstu deformací na konvergenčních bodech v oblasti tektonické poruchy cca o dalších 15 mm (obr. 5). Největší hodnota radiální deformace byla naměřena na profilu v TM 370,9. Vektor posunu zde od počátku měření činil cca 90 mm.

Po ukončení ražeb byl plošně naskenován povrch primárního ostění v úseku tektonické zóny, kde bylo z důvodu zvýšených deformací aplikováno dodatečné zesílení radiálními svorníky IBO Ø 51 mm (TM 348,0 až TM 390,5). Z výsledků skenu bylo zjištěno, že část hlav svorníků čnějících do profilu tunelu zasahuje do rubu sekundárního ostění. V případě, že do rubu zasahovala jen horní část svorníku nad maticí, byla tato část odřezána. V případě, že do rubu zasahovala i matice, bylo nutno matici demontovat a podkladní deska byla ke svorníku přivařena. Část svorníku nad deskou byla pak odstraněna. Pokud do profilu zasahovala i podkladní deska a příp. i primární ostění, byla podkladní deska zapuštěna hlouběji do primárního ostění tak, aby nebyla v kolizi s rubem

the convergence measurement profile at TM 370.9 is presented on the cross-section in Fig. 4, the development of values of this profile vector with time and depending on the advance of excavation faces is apparent in Fig. 5.

The above-mentioned unfavourable sequence of events led to the suspension of the top heading excavation as of 9 September 2019, at TM 389.7. Immediately after stopping the excavation, the face was stabilised with shotcrete reinforced with welded mesh, durglass grouted face-supporting anchors and a supporting rock wedge was left before the excavation face. In the top heading section between the end of the supporting wedge (ca TM 385) and the bench excavation face (TM 357), the bottom was closed by a temporary invert made from shotcrete reinforced with welded mesh. After closing of the top heading bottom (10 September 2019), deformations started to significantly stabilise and faded away around the end of September 2019.

On the basis of these events, a survey cored borehole was carried out ahead of the excavation face at the level of ca 1.5m above the top heading bottom. It showed that up to chainage ca TM 415, the excavation would proceed in poor geological conditions (crushed paragneiss, locally without core recovery). From TM 415, the borehole core quality significantly improved, good quality paragneiss with R3 strength was encountered. The excavation from TM 389.7 was restarted on 8 October 2019 in ESC 5b. The tunnel crown was supported by means of bored sub-horizontal micropiles and the top heading bottom was constructed with a temporarily closed invert. The top heading excavation under the protection of the canopy tube pre-support affected the development of deformations only minimally (see Fig. 5). In ESC 5b, the top heading was excavated up to the chainage of 425.0. The rock mass quality started again to improve and the top heading excavation passed through ESC 4 to ESC 3. The excavation proceeded in this class up to TM 548.3, where the excavation support was reclassified to ESC 4 due to worsening of geotechnical conditions in the area before the temporary mined entrance portal.

After the top heading breakthrough, the efforts of the construction participants focused on the excavation of bench and bottom in the area of the above-mentioned geological fault. The section passing through the fault zone where the protection by canopy tube pre-support was not applied and where increased deformations were registered (TM 348.0 to TM 390.5), was reinforced with additional systematic radial rockbolts from 12m long, 51mm in diameter IBO elements. In this section, intermediate convergence profiles with the spacing of ca 7.5m were supplemented. The excavation face of the entire bench and bottom passed subsequently along this section and, with a delay of two excavation rounds, it was followed by the excavation of the bottom. During the excavation of the bench and bottom, deformations were measured on the convergence points installed in the area of the fault zone in the frequency of twice a day, always in the morning and in the evening (at 7 am. and 7 pm.). As a result of the excavation of the bench and bottom, deformations increased on convergence points in the area of the tectonic fault by other ca 15mm (see Fig. 5). The largest value of radial deformation was measured on the profile at TM 370.9. The displacement vector has amounted here to ca 90mm from the beginning of measurements.

After completion of the excavation, the surface of the primary lining was scanned in the tectonic fault section where additional strengthening with IBO Ø 51mm radial rockbolts were applied due to increased deformations (TM 348.0 to TM 390.5). It was found from the results of the scan that part of rockbolt heads that part of the heads of rockbolts protruding to the tunnel profile interfere with the external surface of the secondary lining. In the case that only the

sekundárního ostění. Část svorníku nad kotevní deskou byla pak odstraněna. Místa, kde do profilu sekundárního ostění zasahoval líc primárního ostění, byla vyfrézována. Celý úsek se zvýšenými deformacemi v TM 348,0 až TM 390,5 byl následně reprofilován novou vrstvou ze stříkaného betonu, čímž byly zakryty ostré hrany dodatečně instalovaných svorníků.

Popis inženýrskogeologických poměrů této tektonické poruchy je uveden v následující kapitole.

ZHODNOCENÍ INŽENÝRSKOGEOLOGICKÝCH POMĚRŮ V PROSTORU ZLOMOVÉ ZÓNY

Charakterizace inženýrskogeologických poměrů a stručné zhodnocení tektonických poměrů a přítomnosti podzemní vody bylo provedeno na základě kontinuální inženýrskogeologické dokumentace čeleb jako součásti komplexního geotechnického monitoringu tunelu Deboreč.

Poloha zlomové zóny, její významné tektonické struktury, zastoupení jednotlivých geotechnických typů, výrony podzemní vody a další významné geotechnické informace jsou graficky znázorněny v podélném inženýrskogeologickém řezu a mapě v obr. 6.

V TM 337–420 byly ražbou zastiženy svrchnoproterozoické metamorfované horniny moldanubika, konkrétně geotechnické typy foliovaných, silimanit-biotitických pararul silně tektonicky porušených, charakteru rul silně (geotechnický typ H2) a mírně (geotechnický typ H3) zvětralých a těž rul navětralých až zdravých (geotechnický typ H4), které se vyskytovaly převážně mimo samotnou zlomovou zónu. Lokálně, objemově v minimálním množství, jsou zastoupeny žíly granitoidů proměnlivého stupně zvětrání, obvykle kosé ke směru foliace.

upper part of the rockbolt above the nut interfered with the external surface, this part was cut off. In the case that the nut also interfered with the external surface, it was necessary to remove the nut and the face plate was welded to the rockbolt. The part of the rockbolt above the plate was subsequently removed. If even the face plate interfered with the profile, the face plate was embedded deeper into the primary lining so that it did not collide with the external surface of the secondary lining. The part of the rockbolt above the face plate was subsequently removed. The places where the inner surface of the primary lining interfered with the primary lining profile were milled out. The whole section with increased deformations at TM 348.0 to TM 390.5 was subsequently reprofiled by a new shotcrete layer, thus sharp edges of the additionally installed rockbolts were covered.

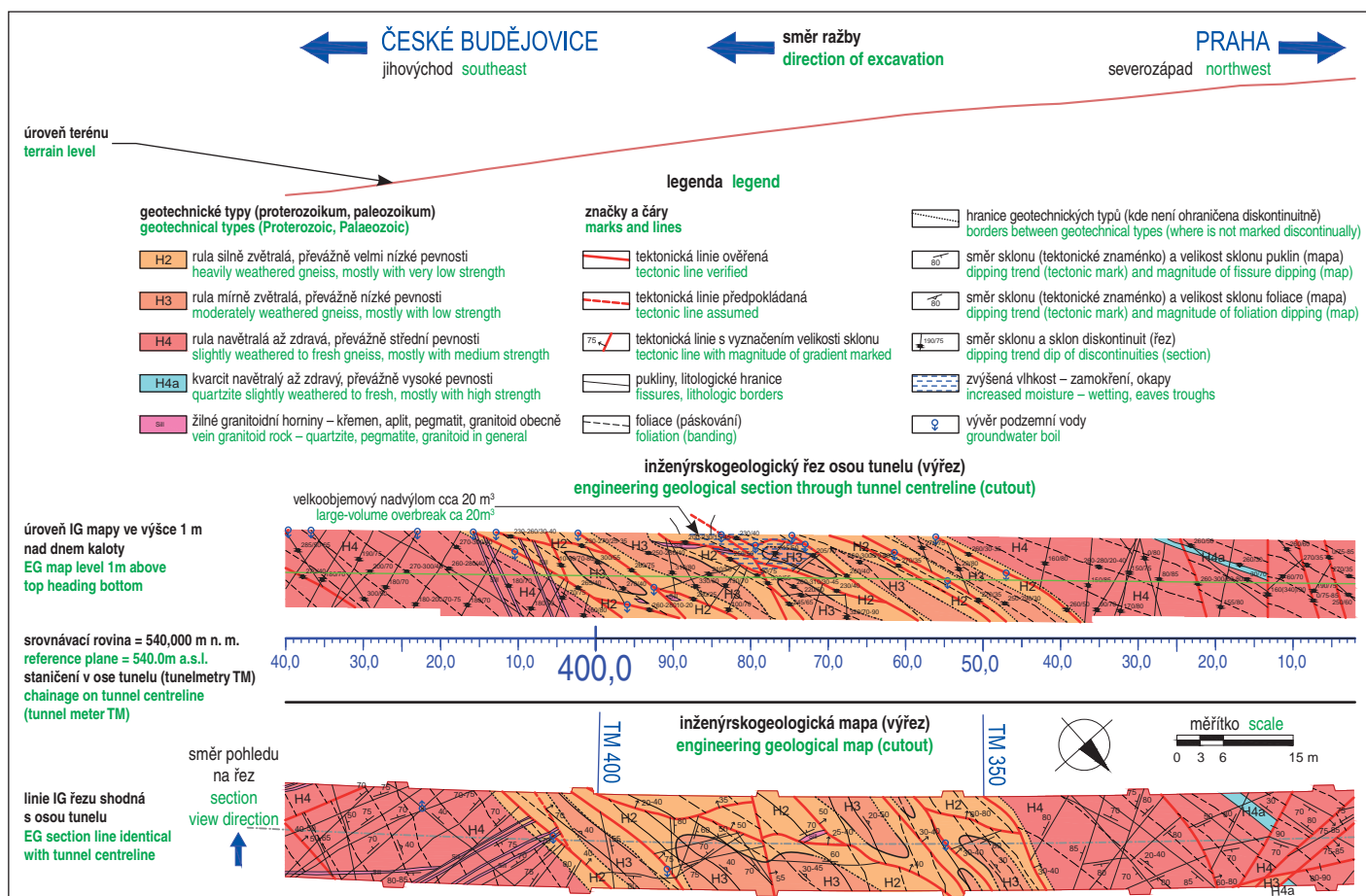
The description of the engineering geological conditions in this tectonic fault is contained in the following chapter.

EVALUATION OF ENGINEERING GEOLOGICAL CONDITIONS IN THE SPACE OF THE FAULT ZONE

The characterization of engineering geological conditions and a brief evaluation of tectonic conditions and the presence of groundwater was carried out on the basis of continuous engineering geological documentation of excavation faces as a part of the comprehensive geotechnical monitoring of the Deboreč tunnel.

The location of the fault zone, its significant tectonic structures, representation of individual geotechnical types, groundwater blowouts and other important geotechnical information are presented graphically in a longitudinal engineering geological section and in the map in Fig. 6.

At TM 337–420, upper Proterozoic metamorphosed rock of the Moldanubic Formation, concretely geotechnical types of foliated,



zdroj Vídeňský, 2020 source Vídeňský, 2020

Obr. 6 Výřez ze schematizovaného inženýrskogeologického řezu a mapy tunelu Deboreč zachycující zlomovou zónu a její bezprostřední okolí
Fig. 6 Cutout from a schematised engineering geological section and map of Deboreč tunnel showing a fault zone and its immediate surroundings

Jednotlivé geotechnické typy jsou vyčleněné a detailně popsány v podrobném geotechnickém průřezu [8] a stručně též v časopisu Tunel 3/2019 [1]. Proto zde bude jejich charakterizace maximálně zestručněna.

Pararuly silně tektonicky porušené charakteru rul silně zvětralých (H2) mají převážně velmi nízkou pevnost R5 (vyskytují se však i polohy s extrémně nízkou pevností R6). Jsou tmavě hnědošedé až tmavě šedé, páskované, zvrásněné, silně tektonicky porušené (podrcené), s velmi malou až extrémně malou vzdáleností diskontinuit, což způsobuje rozpad horniny na ploché úlomky velikosti v řádu centimetrů. Polohy s extrémně nízkou pevností se rozpadají až na jílovitopísčité zeminy. Na často až vyhlazených (tzv. tektonických zrcadlech) plochách diskontinuit jsou velmi hojné povlaky grafitu, jílu či oxidů a hydroxidů železa a manganu. Od TM 390 se grafitická příměs místy vyskytuje též v podobě čočkovitých či deskovitých poloh. Geotechnický typ tvoří řádově desítky procent výrubu kaloty v místech nejvýraznějších tektonických deformací, především mezi TM 350–410.

Pararuly tektonicky porušené charakteru rul mírně zvětralých (H3) mají převážně nízkou pevnost R4. Jsou hnědošedé až tmavě šedé, výrazně páskované, tektonicky porušené – zvrásněné a lokálně též podrcené, s velmi malou až malou vzdáleností diskontinuit v minimálně třech systémech, které způsobují rozpad horniny na kosoúhlé až ploché úlomky velikosti v řádu 4–20 cm. Geotechnický typ se vyskytuje především v relativně méně, stále však zřetelně tektonicky porušených oblastech mezi zlomovými strukturami.

Pararuly navětralé až zdravé (H4) mají střední pevnost R3. Jsou šedé až tmavě šedé, výrazně páskované, s malou až střední vzdáleností diskontinuit v minimálně třech systémech, které způsobují rozpad horniny na kosoúhlé až ploché úlomky velikosti v řádu 10–60 cm. Vyskytují se především v oblasti nástupu a vyznění zlomové zóny mezi TM 337–355 a 405–420.

Litologicky lze geologickou poruchu charakterizovat jako zónu silného tektonického porušení přítomných pararul. Přítomny jsou kromě zlomů níže zmíněného hlavního směru též četné konjugované zlomy a další křehké i duktilní struktury, které se společně projevují jílovitými výplněmi, vyhlazenými plochami s grafitickým povlakem, silným zvrásněním, rozpukáním až podrcením horniny, rychlým rozvolňováním a zároveň sníženou pevností masivu z původní pevnostní třídy R3 až k pevnostní třídě R5, místy až R6. Je zcela zřejmé, že horninový masiv je v oblasti zlomové zóny extrémně nehomogenní, především v geotechnických charakteristikách typu pevnosti v prostém tlaku, vzdálenosti diskontinuit, úhlu vnitřního tření či soudržnosti. Kolem TM 350 se zlomová zóna postupně rozšířila i do přístropí kaloty a stala se tak rozhodujícím faktorem pro celkové geomechanické chování masivu v profilu kaloty se všemi geotechnickými následky podrobně popsány v předchozí kapitole. Příklady vzhledu obnažených liců výrubů kalot uvnitř zlomové zóny jsou zachyceny na obr. 7 až 10.

Tektonické poměry

Diskutovaná zlomová zóna se v profilu tunelu vyskytuje mezi TM 337–420. Generelní orientace hlavních zlomů 250–270°/30–50° znamená s ohledem na směr

silimanite-biotitic paragneiss heavily tectonically faulted, with the character of gneiss heavily (geotechnical type H3) and moderately (geotechnical type H3) weathered, mostly outside the fault zone itself, and also slightly weathered up to fresh gneiss (geotechnical type H4) were encountered. Locally, in terms of volume in minimal amount, granitoid veins of a variable degree of weathering, usually oblique to the direction foliation, are also represented.

Individual geotechnical types are separated and described in detail in the detailed geotechnical investigation [8] and briefly also in TUNEL journal 3/2019 [1]. For that reason, their characterisation will be maximally abridged in this paper.

Paragneiss heavily tectonically faulted with the character of heavily weathered gneiss (H2) has mostly very low strength R5 (however, even layers with extremely low strength R6 occur). It is dark brown-grey to dark grey, banded, folded, heavily tectonically faulted (crushed), with very small to extremely small spacing of discontinuities, which causes disintegration of the rock to into flat fragments with the sizes within the order of centimetres. The layers with extremely small strength disintegrate even to clayey-sandy earth. On frequently polished (the so-called tectonic slickensides) discontinuity planes there are very abundant graphite, clay or iron and manganese oxide and hydroxide coatings. From TM 390, graphitic admixture locally occurs also in the form of lenticular or tabular layers. The geotechnical type makes up the top heading excavation in the order of tens percent in the locations of most significant tectonic deformations, first of all between TM 350–410.

Paragneiss tectonically faulted with the character of moderately weathered gneiss (H3) have mostly low strength R4. It is brown-grey to dark grey, noticeably banded, tectonically faulted – folded and locally also crushed, with very small to small spacing of discontinuities in minimally three systems, causing disintegration of rock into oblique fragments with the size within the order of 4–20cm. The geotechnical type occurs mainly in relatively less, but distinctly tectonically faulted areas between fault structures.

Paragneiss slightly weathered to fresh (H4) have medium strength R3. It is grey to dark grey, noticeable banded, with small to medium spacing of discontinuities minimally in three systems, causing rock disintegration into oblique to flat fragments with the



Foto Štoviček, 2019 photo Štoviček, 2019

Obr. 7 Čelba v TM 344,5 – rozhraní nastupující zlomové zóny (vlevo) a zdravých pararul
Fig. 7 Excavation face at TM 344.5 – interface between onsetting fault zone (left) and fresh paragneiss



foto Šlaviček, 2019 photo Šlaviček, 2019

Obr. 8 Čelba v TM 357,8 – dílčí rozhraní na jednom ze zlomů hlavního směru uvnitř zlomové zóny
Fig. 8 Excavation face at TM 357.8 – partial interface on one of faults of the main trend inside a fault zone



foto Videňský, 2019 photo Videňský, 2019

Obr. 9 Čelba v TM 378,8 – centrální partie zlomového pásma, patrná je extrémní deformace, zvrásnění, tektonické ohlady či extrémně malá vzdálenost diskontinuit
Fig. 9 Excavation face at TM 378.8 – central area of a fault zone; extreme deformation, folding, tectonic slickensides or extremely small spacing of discontinuities are visible

ražby nástup z levých dolních částí jednotlivých figur (v kalotě cca od TM 341, v opěři cca od TM 338 a ve dně v TM 337) a vyznívání vpravo nahoře s posledním záchytem v kalotě okolo TM 420 na cca 2. hodině. Rozhraní mezi zdravými rulami geotechnického typu H4 a zlomovou zónou silně tektonicky porušených rul (geotechnické typy H2 a H3) lze označit za relativně ostré, dobře lokalizované, jak při nástupu, tak při vyznívání poruchy (obr. 7 a 10). Podle jednotlivých dokumentací čelb lze zlomovou zónu charakterizovat jako desku se zvlněnými, a případně těž roztrepenými okraji o pravé mocnosti okolo 27 m, přičemž její generalizovaný směr $265^\circ/40^\circ$ svírá se směrem ražby úhel $42-44^\circ$.

size within the order of 10–60cm. It occurs first of all in the area of the onset and fading away of the fault zone between TM 337–355 and 405–420.

In terms of lithology, the geological fault can be characterised as a zone of heavy tectonic faulting of the present paragneiss. Apart from the faults of the below-mentioned main trend, also numerous conjugated faults and other brittle and ductile structures are present. They manifest themselves by clayey fillings, polished surfaces with graphitic coating, intense undulation, fracturing to crushing of the rock, rapid loosening and, at the same time, reduced strength of the massif from the original strength class R3 to strength class R5, locally up to R6. It is fully obvious that the rock massif in the area of the fault zone is extremely inhomogeneous, first of all in geotechnical characteristics of the unconfined compressive strength, spacing of discontinuities, angle of internal friction or coherence types. Around TM 350, the fault zone gradually expanded even to the top heading crown, thus it became the deciding factor for overall geomechanical behaviour of the massif within the top heading profile, with all geotechnical consequences described in detail in the previous chapter. Examples of the appearance of the exposed surfaces of the top headings inside the fault zone are presented in Figures 7 to 10.

Tectonic conditions

The discussed fault zone occurs in the tunnel profile between TM 337–420. The general orientation of the main faults of $250-270^\circ/30-50^\circ$ means that, with respect to the direction of tunnel excavation, means that the onset is from the left-hand parts of individual figures (ca from TM 341 in the top heading, from ca TM 338 in the bench and from TM 337 in the bottom) and fading away in the top on the right side, with the last catch in the top heading around TM 420, at the 2 o'clock position. The interface between fresh gneiss geotechnical type H4 and the fault zone of heavily tectonically faulted gneiss (geotechnical type H2 and H3) can be considered to be relatively sharp, well localised, both at the onset and fading away of the fault (see Figures 7 to 10). According

to individual documentations of excavation faces, the fault zone can be characterised as a plate with undulated and possibly also frayed edges, with the true thickness around 27m, whilst its generalised trend of $265^\circ/40^\circ$ forming a $42-44^\circ$ angle with the direction of tunnel excavation. Detailed courses of the brittle structures in the area of the fault zone are depicted by stereographic projections in Fig. 11 (here projections of discontinuity planes in the lower hemisphere in “equal area” projection). The black projection leading through the centre represents in both diagrams the tunnel tube centre line in the area of the fault zone. The direction of excavation was from NW to SE.

The projection in Fig. 11 left shows measurements of foliation (20 measurements in total). The prevailing trend/dip of foliation

Detailní průběhy křehkých struktur v oblasti zlomové zóny znázorňují stereografické projekce na obr. 11 (zde průměty rovin diskontinuit se spodní hemisférou v „equal area“ projekci). Černý, středem vedoucí průmět v obou diagramech reprezentuje osu tunelové trouby v oblasti zlomové zóny. Směr ražeb byl od SZ k JV.

Projekce na obr. 11 vlevo zobrazuje měření foliace (celkem 20 měření). Z diagramu je patrný převažující směr sklonu/sklon foliace v intervalu $265\text{--}285^\circ/30\text{--}50^\circ$, který se velmi blíží nejobvyklejšímu směru foliace v celé délce tunelu pohybující se v intervalu $250\text{--}275^\circ/30\text{--}40^\circ$. Ostatní měření odchylující se od těchto hodnot i poněkud větší rozptýlení v rámci převažujících směrů je zapříčiněno vytažením a vrásněním foliace na dislokacích zlomového pásma. Kromě zmíněného hojného zvlnění jsou foliační plochy obecně hladké, sevřené. Foliace, jinde jeden z nejvýraznějších strukturních prvků, ztrácí ve zlomové zóně na významu, je méně výrazná, mnohdy potlačena na úkor doprovodných křehkých struktur hlavních zlomů, respektive celkového deformačního podrcení. Úklon foliace byl šikmo proti směru ražby (šikmo do vyrubaného prostoru s průměrnou odchylkou směru rovin foliace od směru osy tunelu cca 53°), a vzhledem ke sklonu tak měl nepříznivou orientaci ve smyslu klasifikace RMR. To bylo předvídáno již z dat získaných z měření na obou portálech a v prvních metrech ražeb viz [1].

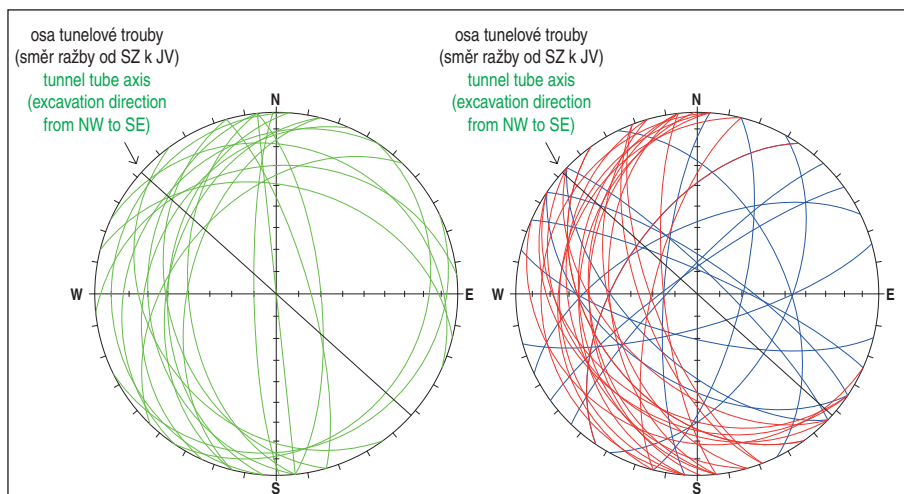
Stereografická projekce na obr. 11 vpravo prezentuje veškerá měření zlomů (červeně, celkem 22 měření) a vybraných puklin (modře, celkem 15 měření) v rámci dokumentace v prostoru zlomové zóny. Z diagramu je patrný převažující směr sklonu dokumentovaných zlomů pohybující se mezi $250\text{--}285^\circ$ s poměrně proměnlivými úklony v intervalu $25\text{--}70^\circ$. Středové hodnoty pak leží v intervalu $260\text{--}270^\circ/30\text{--}40^\circ$. Výrazně méně zastoupený směr sklonu/sklon měřených zlomů je $205\text{--}235^\circ/20\text{--}50^\circ$. Generalizovaný směr sklonu/sklon zlomové zóny byl s přihlédnutím k orientaci zlomů vymezujících zlomové pásmo zvolen ve výše zmíněné



Obr. 10 Čelba v TM 412,0 – vyznívání zlomové zóny (vpravo nahoře) na kontaktu s navětralými až zdravými pararulami

Fig. 10 Excavation face at TM 412.0 – fading away fault zone (right top) on contact with slightly weathered to fresh paragneiss

within the $265\text{--}285^\circ/30\text{--}50^\circ$ interval, which very much approximates the most usual trend of foliation throughout the tunnel length fluctuating within the $250\text{--}275^\circ/30\text{--}40^\circ$ interval is obvious from the diagram. The other measurements deviating from these values and the somewhat larger scatter within the framework of prevailing trends are caused by stretching-out and folding of the foliation on dislocations of the fault zone. Apart from the above-mentioned folding, the foliation surfaces are generally smooth, tight. Foliation, elsewhere one of most distinctive structural elements, loses its significance in the fault zone, is less conspicuous, often suppressed at the expense of accompanying brittle structures of main faults, respectively the total deformation crushing. The foliation dip was at an angle against the direction of excavation (obliquely into the excavated space with an average deviation of the trend of foliation planes from the direction of the tunnel centre line of ca 53°) and, with respect to the dip, its orientation was unfavourable in the meaning of the RMR classification. It was anticipated already from the data gathered from measurements at both portals and in the initial metres of the excavation, see [1].



Obr. 11 Stereografické projekce průmětů ploch diskontinuit se spodní polokoulí, foliace (vlevo), zlomy (červeně) společně s puklinovými plochami (modře, obě vpravo) v prostoru rozsahu zlomové zóny

Fig. 11 Stereographic reflections of projections of discontinuity planes in the lower hemisphere, foliation (left), faults (red) together with fissure planes (blue, both right) in the space of the extent of the fault zone

zdroj Videňský, 2020 source Videňský, 2020

hodnotě $265^\circ/40^\circ$. Jednotlivé zlomy jsou součástí téměř 27 m mocné zlomové zóny, jejíž litotektonická charakteristika je detailně popsána výše. Podobně jako u foliace lze orientaci zlomové zóny vzhledem ke směru ražby označit ve smyslu klasifikace RMR za nepříznivou.

Puklinové plochy (modré linie) o směrech sklonu/sklonech např. $305\text{--}335^\circ/55\text{--}80^\circ$, $25\text{--}45^\circ/75\text{--}80^\circ$, $215\text{--}225^\circ/50\text{--}60^\circ$ a mnoha dalších pak tvoří doprovodné struktury hlavních zlomových linií. Podobně jako u foliace je významnost, respektive přítomnost klasických puklinových systémů silně potlačena na úkor nepravidelného, často všesměrného rozpukání (tektonického podrcení).

Podzemní voda

Ve zlomové zóně byly nezajištěné výrubky během otvírek převážně vlhké, místy s lokálním zvlhčením čelby či boků. Mezi TM 350–370 až mokré, s lokalizovanými přítoky podzemní vody v řádu cca 0,1–0,3 l/s. Mezi TM 370 až TM 390 se při otvírce a bezprostředně po ní čelba jevila jako vlhká, následně v horizontu dnů byly patrné průsaky v primárním ostění, které v součtech činily řádově desítky l/s. Vzhledem k charakteru zlomové zóny (obecně málo propustná křehce duktilní zóna bez otevřených průběžných diskontinuit umožňujících volný pohyb podzemní vody) se autoři domnívají, že podzemní voda se nacházela především na rozhraní zlomové zóny a „neporušené“ horniny, a dále do zlomové zóny postupovala až ve chvíli, kdy vlivem ražeb došlo v okolí tunelové trouby k jejímu rozvolnění. Od cca TM 390 lze čelbu označit za pouze vlhkou, což je pravděpodobně způsobeno snížením vydatnosti lokálních zvodní v nadloží tunelu během měsíční, respektive dvouměsíční odstávky ražeb kaloty (rám č. 243 v TM 384,8 stavěn 13. 8. 2019, rám č. 248 v TM 389,7 stavěn 9. 9. 2019 a rám č. 249 v TM 390,5 stavěn dne 8. 10. 2019).

ZÁVĚR

Mezi TM 337–420 byla ražbou tunelu Deboreč zachycena neočekávaná výrazná tektonická porucha projevující se extrémní nehomogenitou a skokovým zhoršením kvality horninového masivu v podobě podrcení, zvrásnění, polohami s přítomností tektonických jíílů, grafitu apod., potažmo snížením hodnot geotechnických parametrů jako např. pevnosti v prostém tlaku, úhlu vnitřního tření či soudržnosti. Prává mocnost zlomové zóny je odhadována na cca 27 m, její generální prostorová orientace je vyjádřena směrem sklonu/sklonem $265^\circ/40^\circ$.

V důsledku zmíněného se zejména mezi TM 370–388 vyskytovaly v rámci jednotlivých postupů poněkud vyšší nadvýlomy (navzdory jehlování přístropí), s nejvyšší zaznamenanou hodnotou cca 20 m^3 v TM 388. I tento nadvýlom, jehož vývoj v danou chvíli již nebylo možno jakkoliv ovlivnit, se však samovolně stabilizoval dlouho před vyplněním prostoru tunelu charakteristickým půlkuželem rozvolněné horniny až k jeho přístropí.

Přítoky podzemní vody v prostoru zlomové zóny dosahovaly svých maxim v řádu desítek l/s mezi TM 350–370, se zpožděním v řádu dnů, a v podobě průsaků skrz primární ostění též v TM 370–390. Ani zde však celkové hodnoty přítoků nepřesahovaly řád prvních decilitrů za sekundu. Vzhledem ke své relativně nízké vydatnosti tak podzemní voda představovala méně významný faktor v celkové problematice ražeb v kritickém úseku.

Z geotechnického hlediska došlo v důsledku výskytu zlomové zóny na relativně krátkém úseku (36,5 m) k přechodu z nejsubtilněji vystrojené TTV 2 do nejmasivněji vystrojené TTV 5b. V tomto přechodovém intervalu byly u vystrojovacích tříd TTV 3 a TTV 4 překročeny varovné stavy na instalovaných konvergenčních profilech. To si vyžádalo dodatečná technologická opatření ke

$265^\circ/40^\circ$. Individual faults are parts of the 27m thick fault zone, the lithotectonic characteristic is described in detail above. Similarly to the foliation, the orientation of the fault zone with respect to the direction of excavation can be described as unfavourable in the meaning of the RMR classification.

Fissure planes (blue lines) with the trends of dips/dips e.g. $305\text{--}335^\circ/55\text{--}80^\circ$, $25\text{--}45^\circ/75\text{--}80^\circ$, $215\text{--}225^\circ/50\text{--}60^\circ$ and many others then form accompanying structures of the main fault lines. Similarly to the foliation, the significance respectively presence of classical fault systems is strongly suppressed at the expense of irregular, often omnidirectional jointing (tectonic faulting).

Groundwater

Unsupported underground excavations in the fault zone were at the time of openings and immediately after mostly damp, locally with moistening of the excavation face or sidewalls. Between TM 350–370 up to wet, with localised groundwater inflows in the order of ca 0.1–0.3L/s. Between TM 370 to TM 390, the face appeared damp at the time of opening; subsequently, in horizon of several days, leaks were visible in the primary lining, which, if aggregated, were of the order of tenths of L/s. Taking into consideration the character of the fault zone (generally little permeable, brittle ductile zone without open persistent discontinuities allowing free movement of groundwater) the authors believe that groundwater is present first of all at the interface between the fault zone and “non-faulted” ground and proceeds further to the fault zone only at the moment when it is loosened in the tunnel tube surroundings due to the excavation. From ca TM 390, the excavation face can be described only as damp, which fact is probably caused by decreasing the yield of local aquifers in the tunnel overburden during the one-month or two-month suspension of excavation of the top heading (frame No. 243 at TM 384.8, installed on 13 August 2019, frame No. 248 at TM 389.7, installed on 9 September 2019 and frame No. 249 at TM 390.5, installed on 8 October 2019).

CONCLUSION

An unexpected tectonic fault discovered by the Deboreč tunnel excavation was registered between TM 337–420. It manifested itself by extreme inhomogeneity and step worsening of ground mass quality in the form of crushing, folding, layers with presence of tectonic clay, graphite etc. or lowering of values of geotechnical parameters, for example unconfined compression strength, angle of internal friction or coherence. The true thickness of the fault zone is estimated at ca 27m; its general spatial orientation is expressed by trend of dip and dip of $265^\circ/40^\circ$.

As a result of the above mentioned fact, somewhat higher overbreaks (despite spiling into the crown) with the highest recorded volume of ca 20 m^3 at TM 388, occurred mainly between TM 370–388 within the framework of individual excavation rounds. Even this overbreak, the development of which at that time could no longer be influenced in any way, stabilised spontaneously long before the tunnel space was filled with a characteristic semi-cone of loosened ground up to the tunnel crown.

Groundwater inflow rates in the area of the fault zone reached their maximums in the order of tenths of L/s between TM 350–390, with the delay in the order of days, and in the form of seepage through the primary lining also at TM 370–390. However, even here the aggregated values of inflows did not exceed the order of the initial decilitres per second. With respect to the relatively low yield, groundwater represented a less significant factor in the overall problems of tunnel excavation in the critical section.

From the geotechnical point of view, transition from the most subtly supported ESC 2 to the most massively supported ESC

stabilizaci stávajícího ostění kaloty (provizorní protiklenba v kalotě, dodatečné radiální svorníky) a také dodatečná opatření monitoringu (nové vložené konvergenční profily, zvýšená četnost měření). Z časového vývoje hodnot deformací primárního ostění vyplývá, že na ustalování deformací mělo pozitivní vliv zejména co nejrychlejší uzavírání profilu tunelu protiklenbou, ať už dočasnou v rámci kaloty, či finálního dna.

Odhadované celkové zpoždění výstavby způsobené zastížením neočekávané zlomové zóny mezi TM 337–420 se pohybuje okolo dvou měsíců.

Ražby tunelu Deboreč nakonec díky všem výše zmíněným opatřením problematickým úsekem zdárně prošly a v současnosti je budováno sekundární ostění tunelu.

Poučení z ražby tunelu Deboreč

- 1) I v litologicky relativně homogenním prostředí regionálně metamorfovaných hornin se mohou vyskytovat a vyskytují široká zlomová pásma, která navíc nemají v podstatě žádný efekt na geomorfologii terénu (popisované zlomové pásmo má teoretický průmět s povrchem na východním svahu pravidelně tvarované elevace vrchu Deboreč).
- 2) V případě zastížení takovéto struktury profilem tunelu může být nutno skokově korigovat zajištění výrubu v rozsahu i několika vstrojovacích tříd. Zde, stejně jako při hledání specifických technologických řešení komplikovaných geologických podmínek ražby, je nutná intenzivní komunikace všech účastníků výstavby založená na vzájemném respektu a společné snaze nalézt technologicky dostatečná a zároveň hospodárná východiska.
- 3) Kvalitně provedený a správně interpretovaný geotechnický průzkum společně s dalšími faktory (kvalitou projektové přípravy, kvalitou práce zhotovitele, způsobem organizace výstavby, geotechnickým monitoringem prováděným zkušenými geotechniky) jsou jedinou možností, jak předvídat nepříznivé geologické poměry, respektive v nich technologicky efektivně, bezpečně a hospodárně realizovat ražbu tunelů metodou NRTM.

Ing. MILAN KÖSSLER, milan.kossler@geotechnika.cz,

Mgr. ALEŠ VÍDEŇSKÝ, ales.vidensky@geotechnika.cz,

SG Geotechnika a.s.

Recenzoval Reviewed: Ing. Tomáš Ebermann, Ph.D.

5b took place as a result of the occurrence of the fault zone in a relatively short section (36.5m). In this transition interval, warning states were exceeded at excavation support classes ESC 3 and ESC 4 on the installed convergence profiles. It required additional technical measures for stabilisation of the existing top heading lining (temporary invert in the top heading, additional radial rockbolts) and also additional monitoring measures (newly inserted convergence profiles, increased frequency of measurements). It follows from the development of deformations of the primary lining with time that stabilisation of deformations was positively affected mainly by as quick as possible closing of the profile by invert, whether temporary within the framework of the top heading or permanent within the framework of the final bottom.

The estimated total construction delay caused by encountering the unexpected fault zone between TM 337–420 is around two months.

The Deboreč tunnel excavation finally successfully passed through the problematic section owing to all above-mentioned measures and the secondary lining of the tunnel is currently under construction.

Lessons from the excavation of the Deboreč tunnel

- 1) Even in a lithologically relatively homogeneous environment of regionally metamorphosed rock, wide fault zones having in addition no substantial effect on terrain geomorphology (the described fault zone has a theoretical projection with the eastern slope of the shaped elevation of Deboreč hill) can occur and occur.
- 2) In the case that such a structure is encountered by the tunnel cross-section, it may be necessary to abruptly correct the excavation support within the extent of several support classes. Here, identically with searching for specific technical solutions for complicated geological conditions of excavation, intense communication among all construction participants based on mutual respect and joint effort to find technically sufficient and at the same time economical possibilities is necessary.
- 3) Correctly interpreted, good quality geotechnical survey, together with other factors (quality (quality of project planning, quality of the contractor's work, the system of construction organisation, geotechnical monitoring conducted by experienced geotechnicians) allows for technically effective and economical tunnel excavation using the New Austrian Tunnelling Method in unfavourable geological conditions.

Ing. MILAN KÖSSLER, milan.kossler@geotechnika.cz,

Mgr. ALEŠ VÍDEŇSKÝ, ales.vidensky@geotechnika.cz,

SG Geotechnika a.s.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] KÖSSLER, M., VÍDEŇSKÝ, A. *Tunel Deboreč*. Geotechnický monitoring v průběhu hloubení jam a ražby tunelu Deboreč na 4. železničním koridoru. *Tunel*, 2019, roč. 28, č. 3, str. 9–22
- [2] KÖSSLER, M., VÍDEŇSKÝ, A. *Tunel Deboreč*. Doplňující IG průzkum formou vyhodnocení geologické poruchy zastížené v průběhu ražeb v TM 338 až TM 420. SG Geotechnika, a.s., prosinec 2019
- [3] URBÁNEK, T. *Modernizace trati Sudoměřice Votice S0 73-25 Tunel Deboreč, obecná část*. MPI projekt s.r.o., září 2018
- [4] PRŮCHA, T., URBÁNEK, T. *Modernizace trati Sudoměřice Votice S0 73-25-01 Tunel Deboreč, hloubená část, vjezdový portál*. MPI projekt s.r.o., září 2018
- [5] URBÁNEK, T. *Modernizace trati Sudoměřice Votice S0 73-25-02 Tunel Deboreč, ražená část*. MPI projekt s.r.o., říjen 2018
- [6] URBÁNEK, T. *Modernizace trati Sudoměřice Votice S0 73-25-02 Tunel Deboreč, ražená část – Zesílení primárního ostění TM 336,0-390,5*. MPI projekt s.r.o., leden 2020
- [7] PRŮCHA, T., URBÁNEK, T. *Modernizace trati Sudoměřice Votice S0 73-25-03 Tunel Deboreč, hloubená část, výjezdový portál*. MPI projekt s.r.o., srpen 2018
- [8] SMOLAŘ, Z. *Modernizace trati Sudoměřice Votice, geotechnický a hydrogeologický průzkum, tunel Deboreč*. GeoTec – GS, a.s., leden 2013
- [9] KRAMEŠ, M., GRAMBLIČKOVÁ, I. *Modernizace trati Sudoměřice Votice, celková situace stavby*. Sudop Praha, a.s., leden 2013