

Tunel Žilina - podzemné dielo realizované v zložitých inžinierskogeologických podmienkach

Žilina tunnel – underground work carried out in complex engineering and geological conditions

Michal Fučík¹, Iveta Šnauková²

Abstrakt

Jedným z tunelov realizovaných na diaľnici D1 je tunel Žilina. Dĺžkou ani metódou razenia nie je ničím výnimočný. Tunel Žilina sa všakrazil vo veľmi zložitom inžinierskogeologickom a hydrogeologickom prostredí, čím sa v kombinácii s nízkym nadloží zaradil medzi najzložitejšie tunelové stavby na Slovensku. Zastihnuté geologické prostredie sa ukázalo komplikovanejšie, ako uvádzali predpoklady projektu. To si vyžadovalo neustále modifikovanie postupu razenia, spôsobu vystrojovania a predovšetkým zaist'ovania stability čelby. Komplikovaná geológia sa podpísala nie len na zmene podmienok razenia tunela, ale aj na realizácii sekundárneho ostenia. Článok popisuje rozdiely medzi projektovanými predpokladmi a skutočne zastihnutými geotechnickými podmienkami, dôsledky týchto rozdielov pre výstavbu tunela a spôsob, akým sa s nimi zhotoviteľ vyrovnáva.

Kľúčové slová

tunel, primárne ostenie, vystrojovacie prvky, sekundárne ostenie, harmonogram prác

Abstract

One of the tunnels that have been executed on the D1 Motorway is the tunnel named Žilina. In terms of length and tunnelling method is the tunnel nothing extraordinary. However, the tunnel has been executed in very complex geological and hydrogeological environment and that is why, in the combination with low overburden, it has been ranked among the most complicated tunnel structures in Slovakia. The geological environment has been proven to be more complicated as it was predicted in the design assumptions. It required constant modification of the tunnelling procedure, excavation support system methods, and above all ensuring the excavation face stability. Complicated geology caused not only the changes of the tunnelling conditions, but the changes in execution of secondary lining. The article describes the difference between the design assumptions and the real geological conditions, implications of these differences for the tunnel execution and the way, how the contractor deals with them.

Key words

Tunnel, primary lining, excavation support elements, secondary lining, construction time schedule

1 Úvod

V okolí mesta Žilina sa v nedávnej minulosti takmer súčasne realizovalo, prípadne ešte realizuje 6 tunelov. Na D1 – tunel Ovčiarско, Žilina, Višňové, na D3 – tunel Považský Chlmec, Svrčinovec, Poľana. Menované tunely boli až na výnimku tunela Višňové navrhované

¹ Michal Fučík, Doprastav, a.s., Jesenského 18, 010 37 Žilina, michal.fucik@doprastav.sk

² Ing. Iveta Šnauková, PhD., Doprastav, a.s., Drieňová 27, 826 56 Bratislava, iveta.snaukova@doprastav.sk

v podobných geologických podmienkach flyšového pásma s takmer identickým technickým riešením vzorového priečného rezu tunela. Taktiež zvolená metóda razenia tunelov - Nová rakúska tunelovacia metóda, v podmienkach flyšového pásma nebola ničím výnimočným. Preto nič nepoukazovalo na to, že tunel Žilina by mal byť na realizáciu výrazne náročnejší ako ostatné, súčasne budované tunely. Opak však bol pravdou a vďaka zastihnutým, veľmi komplikovaným inžinierskogeologickým pomerom, sa stal výzvou pre projektanta a výrazne preveril odbornú zdatnosť zhotoviteľa.

Základné charakteristiky tunel Žilina:

Kategória tunela:	2T – 8,0 [STN 73 7507]
Návrhová rýchlosť:	99,6 km/h [STN 73 7507]
Dĺžková kategória tunela:	stredný [STN 73 7507]
Dĺžka tunela:	STR 684 m, z toho razená časť 648,5 m JTR 687 m, z toho razená časť 657 m
Priečne prepojenia:	2, prechodné
Objednávateľ a budúci správca:	Národná diaľničná spoločnosť, a.s.
Zhotoviteľ tunela:	Doprastav, a.s. Bratislava, Metrostav a.s. Praha
Projektant tunela:	Basler & Hofmann Slovakia s.r.o.

2 Inžinierskogeologické pomery poskytnuté zhotoviteľovi v súťažných podkladoch a návrh raziacich prác

Podľa výsledkov inžinierskogeologického prieskumu poskytnutých objednávateľom pri súťaži, mal byť tunel Žilina situovaný v horninovom masíve budovanom paleogénnym súvrstvím ílovcov a pieskovecov, s prevahou ílovcov v celom hodnotenom úseku. Od východného portálu mala paleogén prekryvať formácia kvartérnych pokryvných útvarov reprezentovaných terasovým a deluviálnym komplexom. Kvartér bol reprezentovaný predovšetkým štrkom ílovitým až štrkom s prímiesou jemnozrnnej zeminy. Táto formácia mala zasahovať do vzdialenosti cca 165 m od východného portálu do profilu kaloty.

Zóna zvetrania podľa poskytnutých podkladov mala zasahovať do hĺbky viac ako 10,0 m od povrchu paleogénneho súvrstvia. V tejto zóne zvetrávanie degradovali poloskalné horniny paleogénu na zeminy. To pri malej výške nadložia tunela (5 – 28 m) znamenalo, že 48 % dĺžky tunela bude razená v zeminách. Vo zvyšnej dĺžke, ktorá mala byť situovaná v strednej časti tunela, prebiehala zóna zvetrania tesne nad klenbou kaloty.

Výsledky inžinierskogeologického prieskumu taktiež zdokumentovali viaceré tektonické zóny, ktorými je horninové prostredie v trase tunela porušené. Predpokladalo sa, že tektonicky porušené zóny budú prestriedané v celom úseku tunela, výraznejšie v jeho západnej časti.

Hladina podzemnej vody bola zadefinovaná v celej trase tunela nad projektovanou niveletou. Vo všeobecnosti je ílovec hodnotený ako málo priepustná hornina, čomu nasvedčoval aj stanovený koeficient filtrácie $k_f \leq 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$. Sťažené podmienky razenia spôsobené podzemnou vodou bolo možné očakávať na kontakte tektonických porúch, kde sa predpokladal výskyt sústredných prítokov podzemnej vody.

Podľa podkladov poskytnutých v súťaži sa javilo, že najväčším problémom pri výstavbe tunela bude tlačivá, poddajná hornina so všetkými jej dôsledkami – vysoké deformácie výrubu, sadanie (zabáranie) celej stavby. Na základe toho boli prijaté návrhové kritéria výstavby tunela. A to:

- Pre zníženie účinku tlačivosti horniny – návrh optimálneho, približne kruhového tvaru výrubu. Tvar výrubu sa menil s výškou nadložia. Vo vyššom nadloží (25 – 30 m) bola spodná klenba prehĺbená o 1,5 m.
- Pre elimináciu vplyvov vyplývajúcich z geotechnických parametrov poddajnej horniny – jednalo sa predovšetkým o rýchly nárast zaťaženia na ostenie v krátkej

vzdialenosti za čelbou. Táto charakteristika sa už pri návrhu javila významnou pre zaistenie stability primárneho ostenia a preto hlavným návrhovým kritériom razenia tunela bolo čo najrýchlejšie uzatváranie profilu výrubu spodnou klenbou.

Celú realizáciu výstavby tunela zhotoviteľ v ponuke uvažoval dovrchným razením zo západného portálu, čo bolo dokladované predloženým harmonogramom prác. Tomu bolo prispôsobené umiestnenie zariadenia staveniska, umiestnenie a veľkosť depónie, plocha na uskladnenie materiálu, počet strojných zostáv ako aj počet razičských skupín. Doba výstavby na prerazenie tunela bola v súťaži 395 dní od dátumu začatia prác.

3 Skutočne zastihnuté inžinierskogeologické pomery a úprava postup razenia

Hneď po vyrazení prvých metrov zo západného portálu sa však predpoklady deklarované v záveroch inžinierskogeologickej správy, ktorá bola súčasťou súťažných podkladov, nepotvrdili. Zhotoviteľ sa začal potýkať s nepriaznivými geologickými podmienkami a ich prejavmi:

- Razenie prebiehalo v rozložených ílovcoch extrémne nízkej pevnosti R6. V zónach zvetrania bol ílovec zmenený na íl vysokej plasticity, tuhej až pevnej konzistencie. Vysoká plasticita horniny sa prejavovala nadmernými deformáciami výrubu a zabáraním celého ostenia do horniny, ktoré dosahovalo hodnotu až cca 200 mm.

- Okamžite po otvorení výrubu sa prejavovala vysoká nestabilita vrchnej časti kaloty (Obr. 1). Tú tvoril úplne zvetraný ílovec až charakteru zemín, RQD = 0. Zvetraný ílovec sa choval ako nesúdržný málo uľahnutý, sypký materiál. Nepriaznivé účinky sypkého materiálu boli podporované prítomnosťou podzemnej vody, pričom horninový materiál nadobúdval nulové pevnostné parametre.



Obr. 1 Vysypávanie horniny z klenby kaloty

Zdroj: Doprastav, a.s.

Na razenie v rozložených plastických ílovcoch bol zhotoviteľ pripravený. I keď takto extrémne nízke pevnosti očakávané neboli.

Čo však bolo neočakávané a nedalo sa vopred predpokladať, bolo nadmerné vysypávanie horninového materiálu z čelby kaloty. Vysypávanie horniny nijak nezodpovedalo deklarovanému plastickému chovaniu horninového prostredia. Hornina sa hlavne vo vrchnej časti kaloty začala chovať ako sypký, nesúdržný materiál. Zabezpečenie kaloty kotvami z betonárskej ocele ako aj zaistenie klenby kaloty ihlami sa ukázalo ako neúčinné. Drobné úlomky zvetraného ílovca sa vysypávali medzi ihlami a ich vysypávanie z čelby znemožňovalo stabilizačný nástrek striekaným betónom. Nastal problém s vrtmi pre ihly a kotvy, ktoré sa už počas vrtania začali zavalovať a nebolo ich možné použiť pre inštaláciu vystrojovacích prvkov. Hlavné návrhové kritérium, ktorým bolo čo najrýchlejšie uzatváranie výrubu za čelbou síce znižovalo deformácie výrubu, ale na druhej strane malo nepriaznivý dopad na stabilitu čelby, pretože zvyšovalo riziko jej zosunutia

Zastihnuté nepriaznivé chovanie horniny v okolí výrubu postupovalo veľmi rýchlo a napriek operatívne prístupu zhotoviteľa vyústilo až do dvoch mimoriadnych udalostí - zavalov.

Po mimoriadnych udalostiach sa prioritou pre zhotoviteľa stalo zabezpečenie stability výrubu a čelby bez ohľadu na finančnú náročnosť prijatých opatrení. Riešenia sa hľadali na základe odborných diskusií na strane zhotoviteľa, projektanta ako aj tímu prizvaných odborníkov, ktorých cieľom bolo nájsť spôsob ďalšieho postupu razenia. Všetky tri menované skupiny sa zhodli na tom, že horninový masív sa chová inak ako je deklarované v súťažných podkladoch. Bolo konštatované, že chovanie horninového prostredia ako extrémne plastického a zároveň nesúdržného je úplne protichodné a zodpovedá dvom typom hornín – nesúdržným a súdržným. Takéto vlastnosti horninového prostredia sa štandardne nevyskytujú súčasne. Pri razení tunelov sú celkom dobre zvládnuté postupy razenia v súdržných alebo nesúdržných zeminách. Ale razenie tunela v horninovom prostredí, ktoré má prejavy súdržných a nesúdržných zemín súčasne, bežné nie je a vyžadovalo si vysokú dávku teoretických a praktických skúseností s razením v mäkkých horninách, ako aj cit pre sledovanie a hlavne vyhodnotenie odozvy horninového prostredia na jednotlivé pracovné operácie, podporené znalosťami geológie, geotechniky a dobrej orientácii v požadovaných technologických postupov. Pre optimálny návrh ďalšieho postupu prác bol zrealizovaný doplnkový IG prieskum.

I keď paleogénne súvrstvie nie je v zásade nepriaznivé pre výstavbu tunelov, zvetrávanie zasahujúce do veľkých hĺbok, tektonicky porušené zóny a prítomnosť podzemnej vody ho výrazne degraduje. V oblasti tunela Žilina sa všetky tieto tri činitele výrazne podpísali na zmene kvality horninového prostredia, čo potvrdil aj doplnkový IG prieskum. Dôsledkom silného tektonického porušenia horninového masívu, bol aj fakt, že sa ílovec ktorý je v podstate nepriepustný, zmenil na vysoko priepustnú horninu. Identifikovať miesta nadmerných prítokov podzemnej vody, prípadne zvodnené šošovky sa však ani doplnkovým prieskumom nepodarilo.

Geotechnické charakteristiky horninového materiálu sa v jednotlivých blokoch zásadne nezmenili. Jedinú zmenu doznala v najmenej priaznivom kvázihomogénnom bloku kohézia, ktorá bola nulová a na minimum sa znížil taktiež uhol vnútorného trenia. Takéto výsledky potvrdzovalo aj vysypávanie horniny z čelby pred závalom.

Výsledky doplnkového IG prieskumu poukázali však na zásadnú zmenu dĺžok kvázihomogénnych blokov v pozdĺžnom smere tunela. Najmenej priaznivé kvázihomogénne bloky sa presunuli aj do oblastí s vyšším nadloží, čo si v dôsledku väčšieho geostatického napätia vyžiadalo zmenu/zosilnenie primárneho ostenia.



Obr. 2 Pohľad na mikropilotový dáždnik a vrtanie čelbových kotiev
Zdroj: Doprastav, a.s.

Na základe poznatkov chovania sa výrubu a výsledkov doplnkového IG prieskumu boli opatrenia zamerané na zlepšenie pevnostných a deformačných parametrov samotnej horniny. Tieto opatrenia boli sústredené na horninové prostredie pred čelbou a na samotnú čelbu.

Po mnohých odborných diskusiách a skúšaní rôznych opatrení priamo na stavbe sa ako najefektívnejšie ukázalo použitie sklolaminátových čelbových kotiev, ktoré boli vrtané do vrtov priemeru \varnothing 150 mm a následne vyplnené cementovou zaliievkou. Čelbu zabezpečovalo 70 ks sklolaminátových kotiev dĺžky 16 m. Takýmto spôsobom sa čiastočne podarilo vymeniť horninový materiál pred čelbou. Čelbové kotvy však stále nedokázali zamedziť vypadávanie horniny z klenby kaloty. Pôvodne navrhovaný IBO dáždnik sa neosvedčil, preto bol nahradený tlakovo injektovaným mikropilotovým dáždnikom. Dáždnik tvorilo 40 ks mikropilót dĺžky 12 m, injektovaných cementovou zmesou (Obr. 2). Odvodnenie tunela bolo zabezpečované pomocou troch horizontálnych odvodňovacích vrtov dĺžky 40 m. Odvodňovacie vrty boli vrtané z čelby s presahom 15 – 20 m.

Aby sa s narastajúcou výškou nadložia zamedzilo deformáciám stien kaloty bola realizovaná v najťažších vystrojovacích triedach dočasná spodná klenba kaloty. Tá sa po uzatvorení celého výrubu v blízkosti čelby dodatočne vybúrala.

Realizácia mikropilotového dáždnika a čelbových kotiev aj s vysokotlakou injektážou prebiehala v časovom harmonograme 9 dní. To výrazne spomaľovalo postup razenia tunela. V severnej tunelovej rúre bolo takýmto spôsobom vyrazených 133 m z celkovej dĺžky 648 m a v južnej tunelovej rúre 76 m z celkovej dĺžky 657 m. Rýchlosť razenia v týchto úsekoch bola cca 14 m/mesiac. Vyššie popísane zabezpečovacie oparenia sa ukázali ako účinné, vyžiadali si však výrazné časové zdržanie.

Aby zhotoviteľ znížil časovú stratu spôsobenú nepredpokladateľnými IG podmienkami, bola zmenená organizácia razenia a razenie následne prebiehalo aj z východného portálu tunela. Doba výstavby aj napriek razeniu z oboch portálov bola 731 dní od začatia prác, čo predstavovalo predĺženie razenia tunela o 336 dní.

4 Sekundárne ostenie

Sekundárne ostenie tunela bolo navrhnuté železobetónové, s minimálnou hrúbkou 0,35 m, so spodnou klenbou po celej dĺžke. Realizácia ostenia bola navrhnutá v dvoch etapách – betonáž spodnej klenby a betonáž hornej klenby. Dĺžka blokov je 12,5 m pre bežný profil tunela. Ostenie jednej tunelovej rúry je rozdelené na 57 blokov, z toho sú 3 bloky hĺbené.

Nepriaznivé inžinierskogeologické podmienky pri razení sa prejavili taktiež pri návrhu a realizácii sekundárneho ostenia. Rozdiely boli zrejme predovšetkým v oblastiach, kde boli použité vystrojovacie triedy s mikropilotovým dáždnikom. V týchto úsekoch bola použitá prehĺbená spodná klenba, kde navýšenie objemu betónu hlbšej spodnej klenby oproti spodnej klenbe bolo 71,5 m³/blok. Pri realizácii hornej klenby sa zvýšilo oproti návrhu do súťaže predovšetkým množstvo výstuže. Množstvo výstuže v blokoch v oblasti s mikropilotovými dáždnikami (ťažké bloky) bolo cca 24 t/blok, pričom v ostatných úsekoch, bola hmotnosť výstuže hornej klenby cca 15 t/blok. To sa prejavilo aj na čase potrebnom na vyarmovanie jedného bloku. Armovanie bolo na tuneli Žilina kritickou pracovnou operáciou. Doba armovania jedného ťažkého bloku bola cca 5 dní. Po prechode do ľahších blokov sa armovanie skrátilo na cca 2,5 dňa/blok.



*Obr. 3 Pohľad na výstuž hornej klenby sekundárneho ostenia
Zdroj: Doprastav, a.s.*

Vlastná betonáž hornej klenby sa realizovala zo západného portálu. Doba betonáže každej tunelovej rúry bola cca 4 mesiace. Betonáž bloku ostenia sa realizovala cca každý druhý deň.

Realizácia sekundárneho ostenia (armovanie, hydroizolácie, betonáž – horná a spodná klenba) tunela Žilina trvala 362 dní, čo predstavuje navýšenie doby realizácie oproti súťaži o 115 dní.

5 Záver

V čase písania príspevku sú práce na sekundárnom ostení tunela Žilina ukončené. Je teda možné oprávnene konštatovať, že tunel Žilina sa vďaka zastihnutej geológii zaradil medzi najnáročnejšie tunelové diela budované na Slovensku.

Priebeh realizovaných prác predstihol obavy, ktoré boli deklarované už počas projektovania. Prostredie v ktorom je tunel razený sa ukázalo ako extrémne náročné. Prekvapivé bolo chovanie horninového masívu, ktoré napriek tomu že malo charakter ílov – mäkké plastické zeminy, s dlhodobou doznievajúcimi deformáciami, pre podzemnú vodu len málo priepustné, malo na čelbe charakter nesúdržných zemín, s nulovou kohéziou, nízkym uhlom vnútorného trenia a vysokou priepustnosťou až so sústrednými prítokmi podzemnej vody. Práce v takomto prostredí si vyžadovali operatívny prístup medzi zhotoviteľom, projektantom a stavebným dozorom. Prioritou pre zhotoviteľa sa stalo bezpečne realizovanie raziacich prác a finančná a časová náročnosť bola aj vďaka ústretovému prístupu skúsených zástupcov objednávateľa a stavebného dozora druhoradá. Dôkazom toho, že zhotoviteľ všetky náročné požiadavky splnil, je skutočnosť, že razenie si nevyžiadalo žiadne zranenia ani škodu na strojnom zariadení.