Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě
Český svaz stavebních inženýrů
Svaz podnikatelů ve stavebnictví v ČR

10/15
MK ČR E 17014

časopis stavebnictví

Časopis stavebních inženýrů, techniků a podnikatelů • Journal of civil engineers, technicians and entrepreneurs



realizace staveb

Stavba roku 2015: velké finále
osobnost stavitelství: Alois Negrelli

cena 68 Kč
www.casopisstavebnictvi.cz
9 771802 203005 10

text Libor Mařík | grafické podklady archiv autora



▲ *Obr. 1. Pohled na výstavbu dvoutroubového dálničního tunelu Považský Chlmec*

Tunel Považský Chlmec na dálnici D3 Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno)



Ing. Libor Mařík
Studoval na FSv ČVUT v Praze obor konstrukce a dopravní stavby se specializací na geotechniku. Po profesních začátcích ve firmě METROPROJEKT nastoupil k firmě ILF Consulting Engineers, s.r.o., a od roku 2005 k organizaci IKP Consulting Engineers, s.r.o. Nyní pracuje jako hlavní projektant ve firmě HOCHTIEF CZ a.s. Je členem předsednictva České tunelářské asociace ITA-AITES a výboru České betonářské společnosti ČSSI.
E-mail: libor.marik@hochtief.cz

V květnu 2014 byla zahájena výstavba dvoutroubového dálničního tunelu Považský Chlmec v úseku dálnice D3 Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno). Text článku popisuje práci konzultantů a projektantů od fáze poradenské činnosti při zpracování nabídky zhotovitele stavebních prací přes vlastní projektování realizační dokumentace tunelu v režimu „navrhni a postav" podle Žluté knihy FIDIC až po první zkušenosti z realizace, které umožňují porovnání předpokladů návrhu se skutečně zastiženými geotechnickými podmínkami.

V době vydání článku byly vyhloubeny stavební jámy západního i východního portálu i střední stavební jáma. Na západním portále dokončil zhotovitel zpětný zásyp obou želv a vyrazil pod nimi plný profil tunelu. Probíhá ražba kaloty i opěří v obou tunelových troubách. Ve střední stavební jámě je konstrukce želvy rovněž zasypána a ražba probíhá v obou tunelových troubách směrem k východnímu i západnímu portálu. Na východním portále se provádějí zajišťovací práce portálového svahu a ražba dosud nebyla zahájena. Vzhledem k tomu není v článku technické řešení východního portálu popsáno a bude předmětem některého z dalších článků.

Úvod a základní informace

Dálnice D3 prochází v úseku Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno) územím, které vyžaduje díky náročné morfologii terénu celou řadu umělých staveb. Trasa v celkové délce 4250 m překonává nejprve směrově rozdělenou mostní estakádou délky 1493 m (levý most) a 1437 m (pravý most) vodní nádrž Hričov. Ta plynule přechází na západním portále do tunelu Považský Chlmec, z nějž se po více než dvou kilometrech opět vynořuje a přechází na směrově rozdělený most přes řeku Kysucu délky 410 m (levý most) a 402 m (pravý most). Situaci nově realizovaného úseku ukazuje obr. 2. Stavba byla zahájena v květnu 2014 a plánovaný termín uvedení do provozu je v červnu 2017. Soutěž byla vypsána a realizace probíhá v režimu „navrhni a postav" s definováním smluvních podmínek podle Žluté knihy FIDIC. To projektantovi i zhotoviteli umožňuje v rámci pravidel uvedených v zadávací dokumentaci optimalizovat již ve fázi nabídky technické řešení i postup výstavby. Tunel je navržen jako dvoutroubový kategorie T2-8 s šířkou vozovky mezi obrubníky 8 m a výškou průjezdného průřezu 4,8 m.



Při provozování tunelu se nepočítá s obousměrným provozem. V případě uzavření jedné tunelové trouby bude doprava převedena na objízdnou trasu. To má vliv zejména na technologické vybavení tunelu. Tunel je ražen pomocí Nové rakouské tunelovací metody (NRTM) v celé délce s horizontálním členěním výrubu. Hloubené úseky jsou navrženy nejen v oblasti východního a západního portálu, ale i ve střední stavební jámě, kde kvalita horninového masivu a výška nadloží neumožňuje tunel razit. Z celkové délky jižní tunelové trouby 2186,5 m je raženo 2120,5 m. V severní tunelové troubě celkové délky 2249 m je raženo 2200 m. Plocha výrubu se pohybuje od 83 m^2 v případě tunelu na patkách až po 105 m^2 u tunelu se spodní klenbou a mění se s tloušťkou primárního ostění, velikostí nadvýšení teoretického tvaru o předpokládané deformace, stavební tolerance a tloušťku hydroizolačního souvrství. Výška nadloží dosahuje až 125 m.

Trasa tunelu však prochází i územím, kde naopak malá výška nadloží vede k ražbě pod zastropením, známé také pod názvem metoda „želva". Tato konstrukce je na západním portále použita na jižní tunelové troubě v délce 37,5 m a na severní tunelové troubě v délce 50 m. Ve střední stavební jámě je nasazena pro zahájení ražby v severní tunelové troubě směrem k východnímu portálu a délka úseku raženého pod želvou je 34,5 m. Ke zvláštnostem tunelu Považský Chlmec patří jistě i skutečnost, že napjatý harmonogram výstavby vyžaduje ražbu tunelu až z osmi čeleb. Po dvou ze západního a východního portálu a celkem ze čtyř čeleb z prostoru střední stavební jámy. Tato skutečnost je při tunelu této délky nepochybně raritou. Oblast Žiliny, ve které se tunel nachází, patří do území s možností výskytu zemětřesení. Z toho důvodu jsou dočasné i trvalé konstrukce tunelu a stavebních jam posuzovány i na seizmické účinky. Ražbu tunelu provádí ze střední stavební jámy firma HOCHTIEF CZ a.s., od západního portálu její subdodavatel firma TuCon, a.s.

Inženýrsko-geologické a hydrogeologické poměry

Území v trase tunelu je součástí pieninského bradlového pásma. Severní a jižní část koridoru tunelu je tvořena flyšovým souvrstvím vápnitých jílovců a pískovců. Ve vrchní části tohoto souvrství se nacházejí exotické slepence a pískovce, které převládají nad vrstvami jílovců a slínovců. Hlavní složku pískovců tvoří křemen (20–60 %), úlomky karbonátových hornin (5–56 %), granitoidních a metamorfovaných hornin (4–29 %) a úlomky vulkanitů (5 %). Tmel je karbonátový (3–30 %). Z hlediska tektoniky území leží tunel na východním okraji zóny paralelních zlomů severo-jižně orientovaného žilinského systému. Pokryvné útvary tvoří deluviální komplex kvarterních sedimentů vyvinutých na svazích údolí, které v menších mocnostech zasahují i do vrcholových částí území nad tunelem. Jedná se o jíly střední až nízké plasticity s polohami písčitého jílu a kamenito-jílovité sutě. V západní portálové oblasti a ve svahu nad západním portálem se pod těmito vrstvami nachází terasové sedimenty o mocnosti 1 m až 7 m. Jedná se o písky s příměsí jemnozrnné zeminy, jíl štěrkovitý, štěrk jílovitý a štěrk s příměsí jemnozrnné zeminy. Výškově zasahují tyto terasové sedimenty v oblasti západního portálu do kaloty tunelu a komplikují stabilitu přístropí.

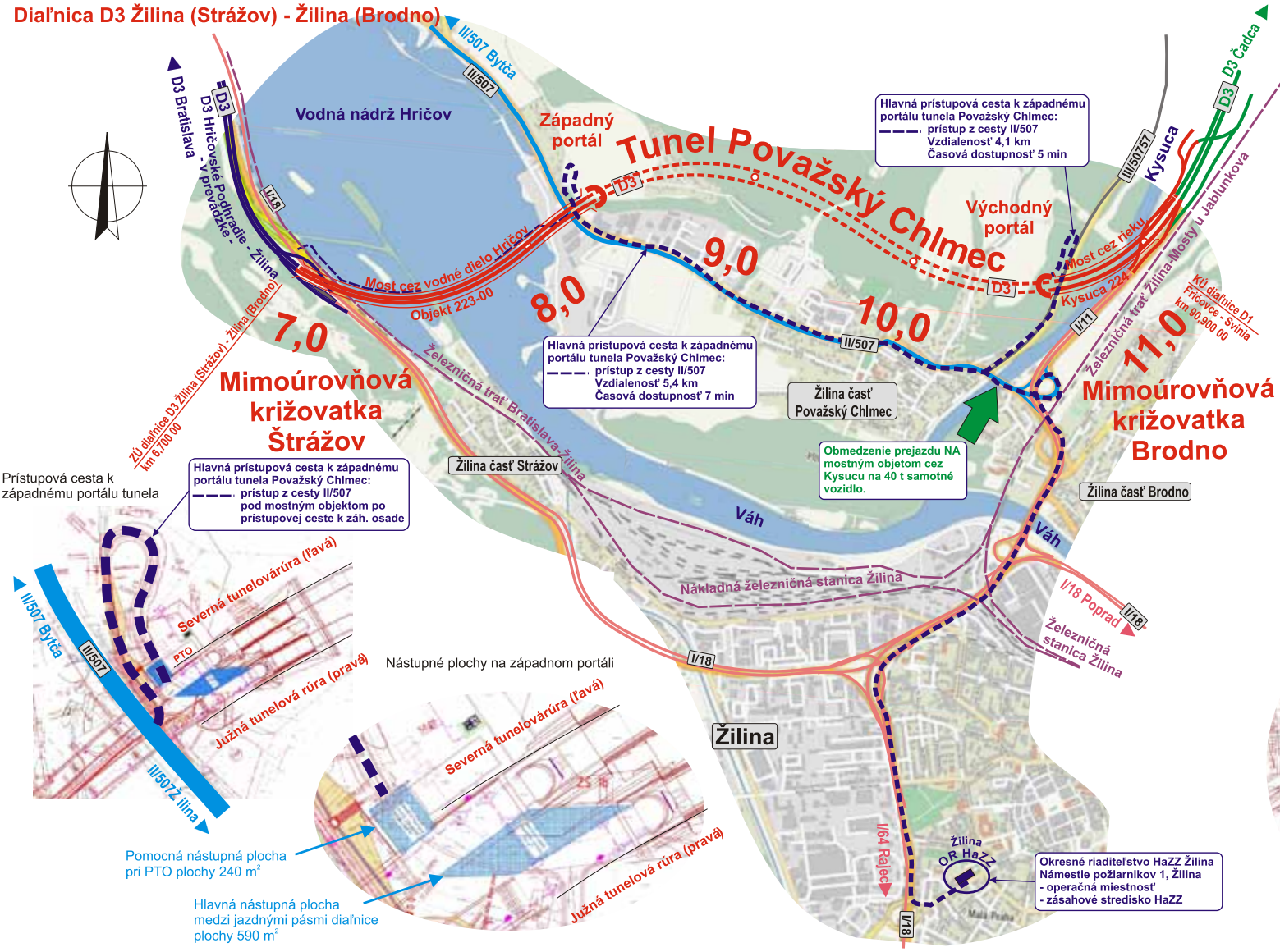
Hladina podzemní vody byla zjištěna jen lokálně v hloubce od 4 m do 15 m na bázi terasových sedimentů, respektive v podložních vrstvách mezozoického komplexu. Při provádění hydrogeologického průzkumu ani jeden vzorek odebrané vody nevykazoval agresivitu na betonové konstrukce.

V rámci inženýrsko-geologického průzkumu byl horninový masiv rozdělen do čtyř kvazihomogenních celků pro ražené úseky tunelu a tří celků pro hloubené portálové úseky a střední stavební jámu. Pro každý celek bylo popsáno očekávané chování masivu při ražbě nebo hloubení, byly stanoveny rizikové faktory a popsána doporučení pro zajištění stability výrubu, respektive svahů stavebních jam a pro bezpečnost provádění. Tato doporučení nejsou pro provádění závazná a zhotovitel si může vypracovat vlastní interpretaci výsledků průzkumu, který je součástí zadávací dokumentace. V takovém případě na sebe bere geotechnické riziko.

Spolupráce při přípravě nabídky v režimu „navrhni a postav"

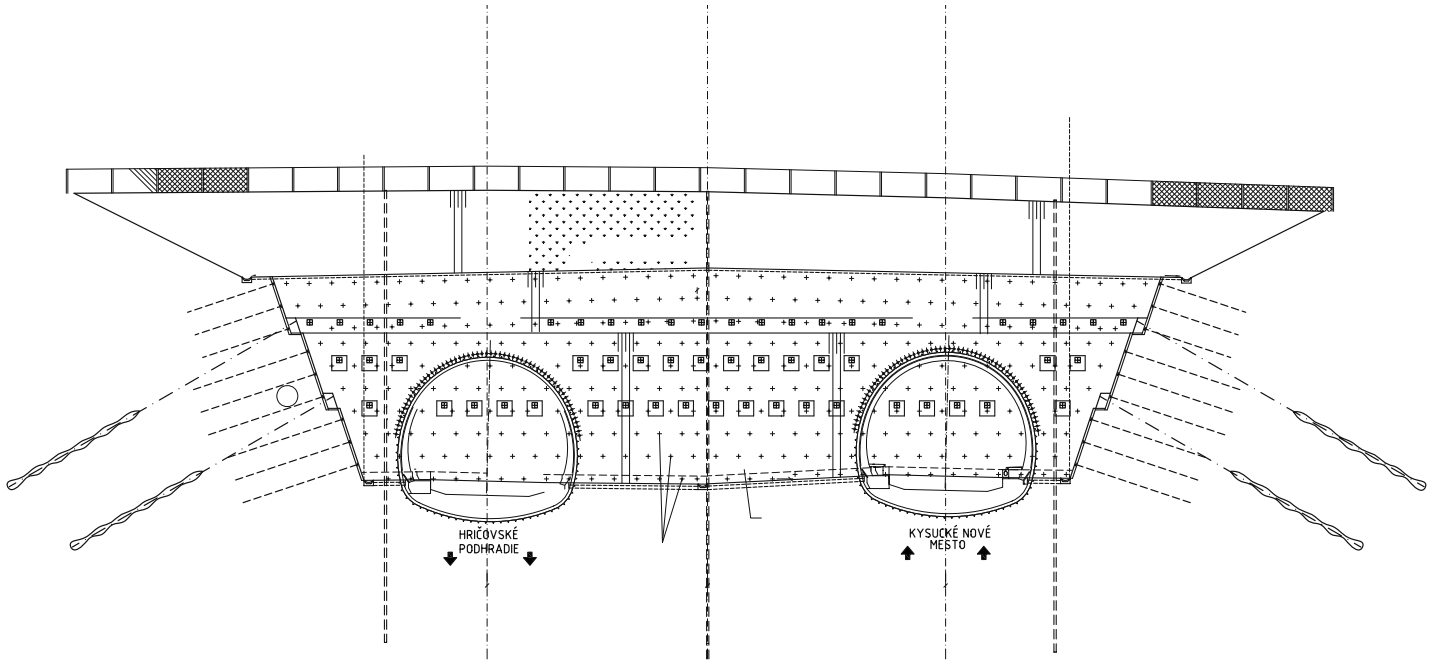
Soutěž na stavbu dálnice D3 v úseku Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno) byla vypsána v režimu Žluté knihy FIDIC. Vzhledem k tomu, že úsek tunelu tvoří 50 % trasy a jeho cena tvořila významnou část z celkové nabídkové ceny, začala úzká spolupráce mezi firmou HOCHTIEF CZ a.s. a IKP Consulting Engineers, s.r.o., již ve fázi zpracování nabídky na výběr zhotovitele. Na rozdíl od zadávací dokumentace podle Červené knihy FIDIC, kdy je technické řešení závazné, je v případě Žluté knihy FIDIC úloha projektanta a konzultanta nezastupitelná. Druhým konzultantem byli kolegové z firmy 3G Consulting Engineers s.r.o., jejichž úlohou byla vlastní interpretace výsledků inženýrsko-geologického průzkumu a v návaznosti na zjištěné informace optimalizace technologických tříd výrubu. Úlohou firmy IKP Consulting Engineers, s.r.o., byla optimalizace rozsahu a způsobu zajištění stavebních jam, rozsahu hloubených a ražených úseků tunelu, optimalizace tvaru příčného řezu tunelu, dimenzí definitivního ostění, prognóza nasazení nevyztuženého definitivního ostění, optimalizace blokového schématu a bezpečnostních prvků (počet a poloha tunelových propojek, nouzových zálivů, výklenků požárního hydrantu, skříní SOS, výklenků čistění drenáže atd.). Pro určení úseků definitivního ostění prováděného se spodní klenbou, nebo na patkách sloužily výsledky zpracované firmou 3G Consulting Engineers s.r.o. Na základě prognózy rozdělení ražené části tunelu do technologických tříd výrubu byla vytvořena prognóza úseků tunelu s různým stupněm vyztužení definitivního ostění, případně ostění bez výztuže. Vzhledem k času na zpracování nabídky i omezeným nákladům na konzultační činnost vycházel projektant ze zkušeností získaných při projektování tunelů v obdobných geotechnických podmínkách. V případě tunelu Považský Chlmec se jednalo i o zkušenosti získané při projektování realizační dokumentace dálničního tunelu Branisko obdobných rozměrů, který byl rovněž z části ražen v prostředí flyše.

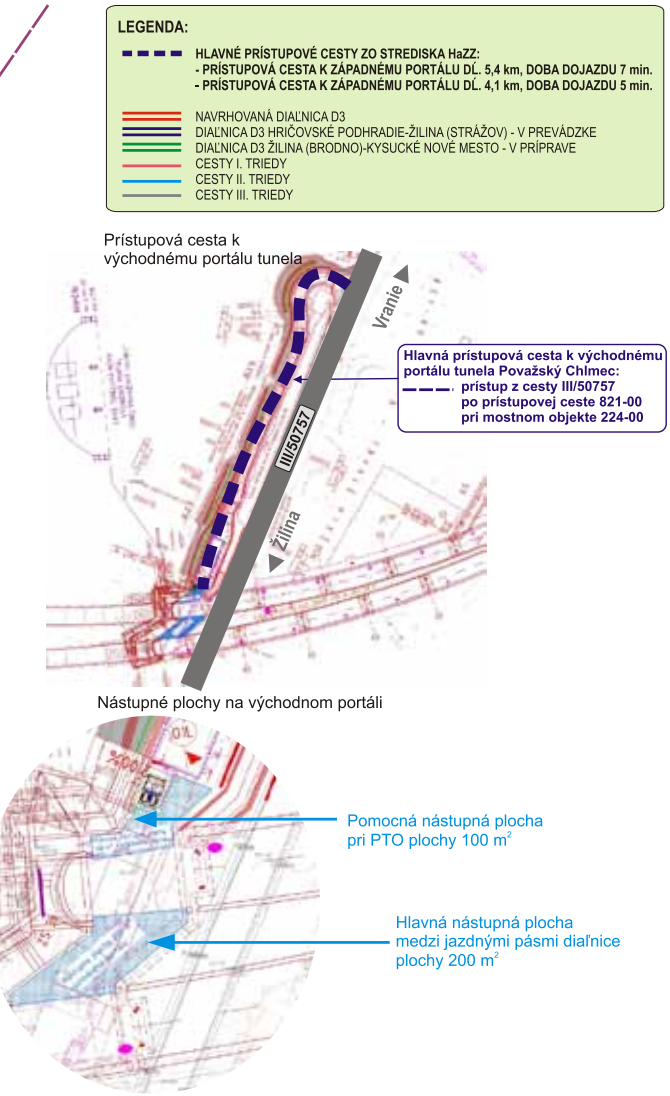
Vzhledem k avizovaným geotechnickým podmínkám bylo nutné stejnou pozornost jako raženým úsekům tunelu věnovat i stavebním jamám.



▲ *Obr. 2. Celková situace úseku Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno) (zdroj: Dopravoprojekt Bratislava)*

▼ *Obr. 3. Původní zajištění bočního svahu stavební jámy západního portálu*





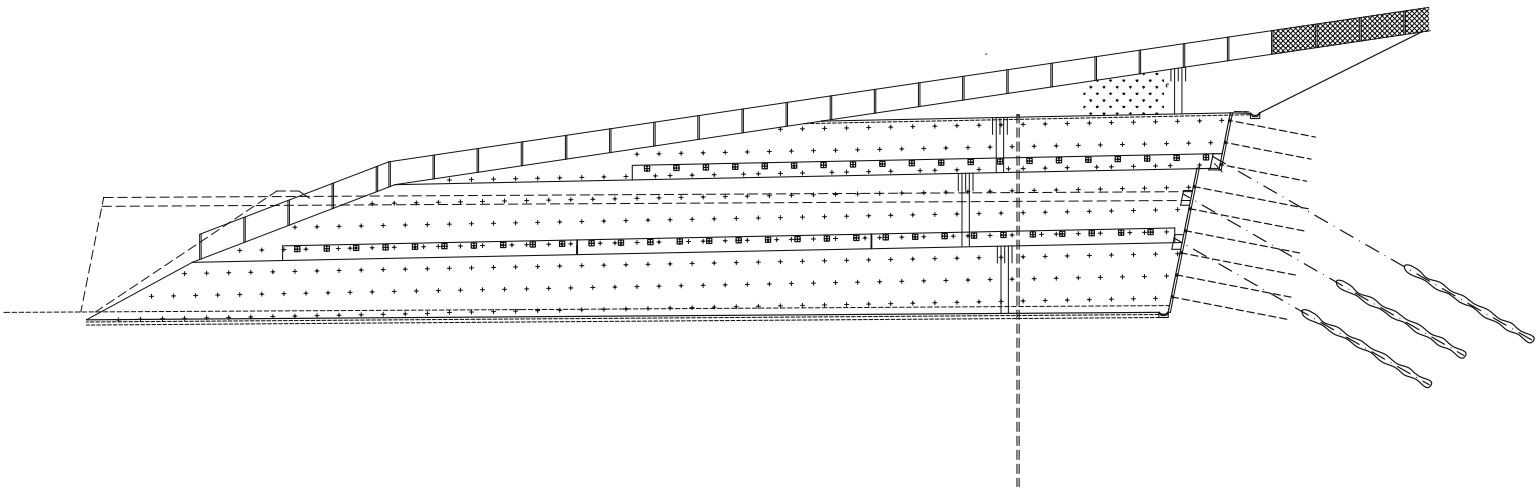
V oblasti portálů zastihly průzkumné vrty polohy pískovců, jílovců a slepenců různého stupně zvětrání. Poměrně hluboko zasahovala i vrstva pokryvných útvarů. V oblasti střední jámy situaci komplikovala přítomnost svahových sutí a skutečnost, že údolím, do kterého je střední jáma situována, protéká potok. Přeložkou jeho koryta nebylo ještě garantováno, že v prostředí propustných sedimentů neproudí podzemní voda, která bude mít negativní dopad na stabilitu svahů stavební jámy. Obecně proto byla navržena taková technická řešení, která byla méně citlivá na změnu geotechnických parametrů horninového prostředí a přítomnost podzemní vody. Snahou projektanta bylo minimalizovat hloubku a rozsah stavebních jam i čas potřebný pro výstavbu definitivních konstrukcí a provedení zpětných zásypů.

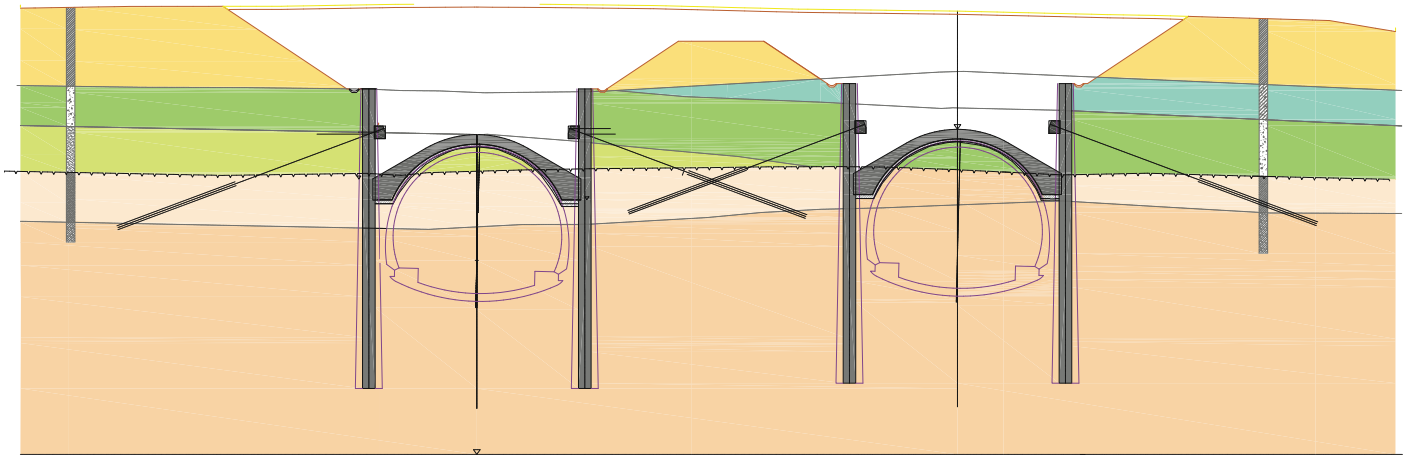
Veškeré návrhy technického řešení byly konzultovány se zástupci zhotovitele z hlediska nákladů, času potřebného pro provádění, logistiky dopravy materiálu i nasazení strojních sestav a personálu. Výsledkem byl hrubý výkaz výměr a návrh technologického postupu výstavby, který sloužil zhotoviteli pro stanovení ceny a doby výstavby. Na zpracování nabídky se podíleli i kolegové z německé centrály firmy HOCHTIEF. Příprava nabídky byla výzvou i zajímavou týmovou prací se společným cílem optimálního návrhu technicky náročného díla.

Technické řešení západního portálu

Svahy stavební jámy byly stabilizovány vrstvou stříkaného betonu o minimální tloušťce 150 mm se dvěma vrstvami sítí kari 100 x 100 x 6 mm. V dolních partiích skalního podloží byly použity kotvy SN průměru 32 mm a délky 8 m v šachovnicovém rastru 1,5 x 1,5 m. Vrstva pokryvných útvarů byla prokotvena kotvami SN průměru 32 mm a délky 6 m v šachovnicovém rastru 1,5 x 1,5 m. Stavební jáma byla dále kotvena ve dvou úrovních předpjatými lanovými kotvami. První kotevní úroveň 10 m nade dnem jámy tvořilo 29 předpjatých lanových kotev 6 ∅ Ls 15,5 mm, délky 22 m s délkou kořene 10 m. Druhou kotevní úroveň 5 m nade dnem jámy pak 44 předpjatých lanových kotev 6 ∅ Ls 15,5 mm, délky 20 m s délkou kořene 10 m. Příčný řez stavební jámou a pohled na portálový svah ukazuje obr. 3. Portálový svah byl zajištěn kromě již popsané vrstvy vyztuženého stříkaného betonu a SN kotev předpjatými lanovými kotvami ve třech úrovních. První kotevní úroveň 10 m nade dnem jámy tvořilo 22 předpjatých lanových kotev 6 ∅ Ls 15,5 mm,

▼ *Obr. 4. Původní zajištění bočního svahu stavební jámy západního portálu*





▲ *Obr. 5. Příčný řez v místě želv na západním portále*



▲ *Obr. 6. Obnažená výztuž pilot a vlepená kotevní železa pro napojení želvy*

délky 25 m s délkou kořene 10 m. Druhá kotevní úroveň 7 m nade dnem jámy byla tvořena patnácti předpjatými lanovými kotvami 6 ∅ Ls 15,5 mm, délky 22 m s délkou kořene 10 m a třetí kotevní úroveň 5 m nade dnem jámy byla tvořena devatenácti předpjatými lanovými kotvami 6 ∅ Ls 15,5 mm, délky 20 m s délkou kořene 10 m. Všech 129 lanových kotev v celkové délce 2778 m bylo navrženo v trvalém provedení a předepnuto přes železobetonovou převázku o rozměrech 600 x 1000 mm. Pro zahájení ražby ze stavební jámy zajišťoval přístropí nad každým tunelem mikropilotový deštník ze šedesáti mikropilot 76/10 mm délky 16 m vrtaných s osovou roztečí 300 mm. Způsob zajištění stavební jámy a sklony portálového svahu ukazuje pohled na severní svah jámy na obr. 4.

Objekt technického řešení západního portálu je v zadávací dokumentaci označen jako nezávazný. Proto se rozhodli zástupci dodavatele po konzultaci s projektantem již ve fázi nabídky upravit technické řešení s cílem zmenšit objem zemních prací, snížit objem činností s technologicky vynucenými pauzami (betonáž převázek, provádění lanových kotev ve třech úrovních) a zkrácení hloubeného úseku pro rychlé zahájení ražby tunelu. Při návrhu zajištění západního portálu vycházel projektant z technického řešení, které již dříve použil dodavatel na tunelu Euerwang v Německu. Jednalo se o konstrukci želvy po stranách v patách upnutou do řady velkoprůměrových pilot, zajišťujících stabilitu stavební jámy i boků tunelu. Vzhledem k reliéfu terénu se délka úseku raženého pod želvou v severní a jižní tunelové troubě liší. V jižní tunelové troubě délka úseku činí 37,5 m, v severní tunelové troubě je 50 m. Příčný řez v místě obou želv znázorňuje obr. 5.

Projektování konstrukce naráželo na četná úskalí. Jako největší se ukázal problém s volbou matematického modelu, který by výstižně a věrohodně dokázal zohlednit interakci kotvené, pilotové stěny a konstrukce želvy ve všech fázích výstavby, a to se zohledněním všech z toho plynoucích zatěžovacích stavů. Propojením výztuže klenby želvy a pilot vznikl styčník, který byl schopen přenášet vnitřní síly mezi oběma konstrukcemi. Citlivostní vyhodnocení ukázalo, že v závislosti na obtížně předvídatelné deformaci pilot se hodnoty vnitřních sil v klenbě želvy i ve styčníku pilot a želvy mění v řádu desítek procent. Vzájemné ovlivnění obou relativně tuhých konstrukcí bylo nutno posoudit z hlediska jejich možného chování v průběhu výstavby. Faktory ovlivňujícími výpočet byly nejen geotechnické parametry horninového prostředí a materiálové charakteristiky konstrukcí, ale i přesný způsob provádění ovlivněný matematicky obtížně stanovitelným lidským faktorem.

Výpočet byl prováděn v programech PLAXIS a SCIA Engineer s tím, že ani jeden z těchto programů nebyl schopen danou problematiku

▼ *Obr. 7. Zajištění čela jámy štětovnicovou stěnou*



řešit komplexně. V programu PLAXIS byly modelovány fáze výstavby včetně ražby tunelu pod želvou. Matematický model MKP zohledňoval interakci konstrukce s horninovým masivem. Z hlediska fází výstavby se jednalo o výkop stavební jámy do úrovně pro vrtání pilot, jejich vrtání a betonáž, vyhloubení stavební jámy do úrovně převázky pro předpínání lanových kotev, předepnutí lanových kotev, vyhloubení stavební jámy s tvarem dna pro betonáž želvy, rozepření pilot klenbou želvy, vyražení kaloty i jádra tunelu a provedení zpětného zásypu do úrovně hlavy pilot. Výpočet vycházel z modelu v programu PLAXIS. Následně byly v programu SCIA Engineer nastaveny takové okrajové podmínky, které v daném zatěžovacím stavu vystihovaly deformační a silové chování konstrukce, jak bylo modelováno v programu PLAXIS. Tak byla provedena kalibrace obou modelů. Konstrukce byla pak v programu SCIA Engineer podrobena dalšímu zatěžování nelineární kombinaci zatěžovacích stavů, které v programu PLAXIS nebylo možné simulovat. Jednalo se zejména o nelineární zatížení teplotou v zimě i v létě, smršťování s vlivem dotvarování betonu a seizmické účinky zemětřesení pro oblast Žiliny. Zatížení zásypem bylo v modelu rozloženo na vertikální a horizontální složku. Do kombinací zatěžovacích stavů tyto složky vstupovaly jako samostatné zatěžovací stavy, aby bylo možné vyšetřit jejich nejnepříznivější účinek z hlediska únosnosti celého systému „piloty – želva". Vypočtené vnitřní síly z programu SCIA Engineer byly vstupními hodnotami pro dimenzování konstrukce v programu FINE BETON.

Výstavba jámy západního portálu byla zahájena v listopadu 2014. Pro každou tunelovou troubu se vyhloubila nejprve mělká, svahovaná stavební jáma, z jejíhož dna byly vrtány vždy dvě řady velkoprůměrových pilot o průměru 800 mm a délky 19 m, 18 m a 16 m. Piloty vrtané s osovou vzdáleností 1 m nad konstrukcí želvy zajišťovaly stabilitu boků stavební jámy, pod konstrukcí želvy stabilizovaly boky tunelu. I když se zpočátku zhotovitel obával, zda bude možné požadovanou hloubku vrtání dosáhnout, a investor požadoval alternativní řešení pro případ, že by se díky pevnosti horniny nepodařilo piloty dovrtat, vše proběhlo podle předpokladů návrhu. Takto vzniklou pilotovou stěnu zajišťovala v jedné úrovni řada předpjatých lanových kotev délky 18 m a 16 m s kořeny délky 8 m, vrtaných s osovou vzdáleností 2 m.

Druhou úroveň zajištění pilotové stěny představovala klenba želvy, která sloužila jako rozpěra pro zachycení vodorovných sil. Konstrukci želvy propojovala s velkoprůměrovými pilotami speciální kotevní železa vlepená do betonu pilot. Pro vytvoření niky sloužící k napojení výztuže pilot a želvy byly v armokoši pilot naprojektovány „kapsy" vyplněné snadno odstranitelným materiálem (polystyrenem). Tam, kde se nepodařilo vložku do armokoše správně upevnit, musela být kapsa dodatečně vyšramována. Kapsu v pilotové stěně i s kotevními železy pro napojení želvy na piloty ukazuje obr. 6. Celkem bylo odvrtáno na severní tunelové troubě osmnáct pilot délky 16 m, dvanáct pilot délky 18 m a sedmdesát pilot délky 19 m. Na jižní tunelové troubě se jednalo o dvanáct pilot délky 16 m, čtrnáct pilot délky 18 m a padesát pilot délky 19 m. Celkem zajišťuje 87,5 m tunelu raženého pod želvou 3228 m pilot a 78 předpjatých kotev v délce 1326 m kotvených přes železobetonovou převázku o rozměrech 700 x 800 mm.



▲ *Obr. 8. Odtěžení stavební jámy do úrovně převázek*



▲ *Obr. 9. Tvarování dna jámy pro betonáž želvy*



▲ *Obr. 10. Vyrovnávací beton pro dosažení přesného tvaru želvy*

▼ *Obr. 11. Separační vrstvy a montáž výztuže želvy*



▼ *Obr. 12. Vyražení jádra pod želvou a podstříkání jejích patek primárním ostěním*





▲ *Obr. 13. Zásyp želv na obou troubách západního portálu*

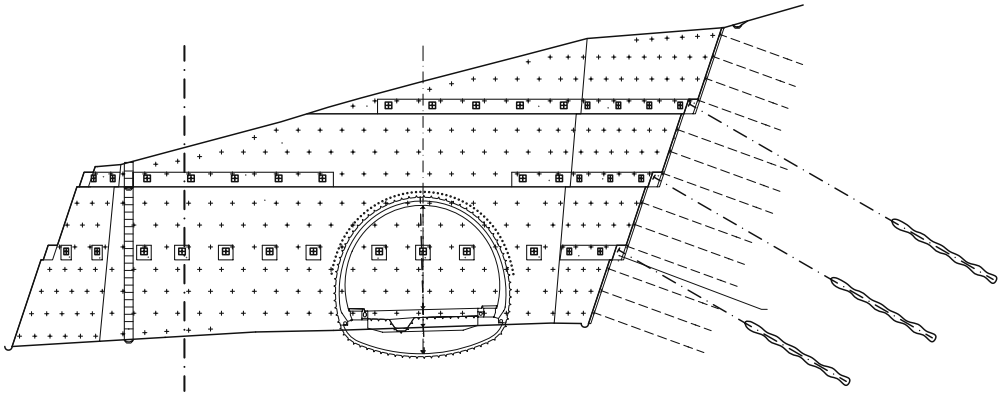
Čelo stavební jámy pro tvarování želvy stabilizovala štětová stěna kotvená v konečném řešení ve dvou úrovních předpjatými lanovými kotvami. Stěna stejné konstrukce zajišťovala stabilitu stavební jámy na rozhraní budoucího hloubeného a raženého tunelu (obr. 7). Po dokončení pilot zahájila firma EUROVIA CS, a.s., hloubení stavební jámy mezi pilotovými stěnami na úroveň převázky lanových kotev. Na této úrovni došlo k první technologické pauze spojené s vytvrdnutím betonu převázky a kořenů lanových kotev. Tuto fázi výstavby ukazuje fotografie na obr. 8. Následně probíhalo těžení stavební jámy na úroveň jejího dna ve tvaru klenby želvy. Díky použití vhodné mechanizace i kvalitě horninového masivu se zhotoviteli podařilo dosáhnout požadovaného tvaru bez větších odchylek od projektovaného tvaru. Zemní těleso, vytvářející bednění želvy, bylo tvořeno pokryvnými útvary a silně zvětralými slínovci a jílovci na jejich bázi. Zemní práce spojené s tvarováním dna stavební jámy do tvaru klenby ukazuje obr. 9. Menší odchylky vyplnil zhotovitel hubeným betonem stahovaným pomocí dřevěných šablon, jak zachycuje obr. 10. Na upravený povrch dna stavební jámy vyrovnaný do tvaru klenby želvy, pokrytý separační fólií a geotextilií, byla po blocích betonáže smontována výztuž a provedena betonáž klenby želvy (obr. 11). Vzhledem k napjatému harmonogramu výstavby použil zhotovitel pro bloky betonáže blíže k portálu vyšší pevnostní třídu betonu, než předepisovala stavební dokumentace, aby dříve dosáhl pevnosti potřebné pro zahájení ražby pod želvou. Ta byla ve smlouvě pro realizaci tunelu milníkem, jehož nesplnění by znamenalo penalizaci.

Projektové řešení umožňovalo ražbu pod želvou bez omezení délky záběru jak v kalotě, tak v jádře, a ražba proto postupovala díky dobré rozpojitelnosti masivu tunelovým bagrem velmi rychle. Po vyražení kaloty a jádra v úseku pod želvou došlo k vytvarování boků tunelu do tvaru raženého tunelu pomocí stříkaného betonu primárního ostění, nanášeného na stěny z velkoprůměrových pilot. Podstříkaní patek želvy zároveň sloužilo jako podpůrný prvek nutný pro zásyp želvy (obr. 12). Stavba postupovala bez větších technických komplikací a v době vydání časopisu jsou již obě želvy na západním portále zasypány (obr. 13), tunel pod nimi vyražen a ražba pokračuje dále v obou troubách pomocí NRTM s horizontálním členěním výrubu směrem do střední stavební jámy.

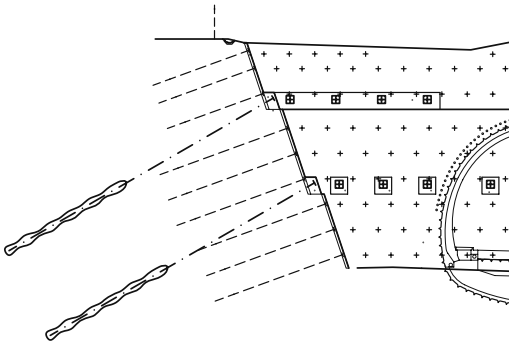
Střední stavební jáma

Nedostatečná výška nadloží zhruba ve středu trasy tunelu vyvolala nutnost otevření třetí stavební jámy, nacházející se v údolí situovaném do průběžné zlomové poruchy s orientací severovýchod – jihozápad. Dno výrazně asymetrického tvaru údolí vyplňují fluviální sedimenty horských toků. Povrchovou vrstvu náplav tvoří jíly s ostrohrannými úlomky horniny a valouny z rozložených slepenců skalních výchozů nad údolím. Pod touto vrstvou se nalézají štěrkovité zeminy různého stupně zahlinění i mocnosti. Na bázi pokryvů se nacházejí vrstvy hrubozrnných slepenců s vysokým obsahem opracovaných valounů, až balvanů, s pevným, karbonitickým tmelem. Východní, bradlový svah spadá prudce do údolí a na jeho úpatí lze pozorovat suťové kužele. Západní svah je spíše pozvolný s malou mocností pokryvných útvarů. Hladina podzemní vody byla zastižena v pokryvných útvarech ve hloubce 2 až 4 m pod úrovní terénu. Údolím protéká bezejmenný potok, který tvoří pravostranný přítok Váhu. Jeho vydatnost je úzce spojena s klimatickými poměry v dané lokalitě. Vzhledem k dotování potoka z pramenů vyvěrajících na úpatí okolních hor nevysychá ani v letních měsících. Podél potoka vede lesní cesta.

▼ *Obr. 14. Původní svahování a zajištění západního portálu severní tunelové roury*



▼ *Obr. 15. Původní řešení východního portálu severní tunelové trouby*





Před zahájením prací na hloubení stavební jámy bylo nutné přeložit jak cestu, tak koryto potoka. V zadávací dokumentaci byla stavební jáma navržena jako svahovaná a stabilitu jejích boků zajišťovaly kotvy (hřebíky) typu SN osazované do cementové zálivky a dále předpjaté lanové kotvy kotvené přes železobetonové prahy. Lokální stabilitu svahů zajišťovala vrstva stříkaného betonu se sítí kari. Stavební jáma hloubky 17 m až 21 m byla navržena s jednotným sklonem svahů 3 : 1 až k povrchu území, portálové svahy byly navrženy ve sklonu 5 : 1 až na úroveň terénu. Způsob původního zajištění je patrný z obr. 14, který znázorňuje západní portálový svah severní tunelové trouby. Svahy byly členěny na etáže s lavičkami. V patě každé etáže byla navržena kotevní úroveň lanových předpjatých kotev 6 ∅ Ls 15,5 mm v délkách 16 m, 18 m, 20 m, 22 m a 24 m vrtaných s roztečí 3 m. Celkem bylo navrženo 219 předpjatých lanových kotev v celkové délce 4266 m, stříkaný beton o celkové ploše 4590 m^2, výztuž stříkaného betonu ze sítí kari o hmotnosti 51,6 t a kotvy SN délky 6 m a 8 m v celkovém počtu 1874 a celkové délce 14 244 m. Do stavební jámy byly situovány v obou tunelových troubách nouzové zálivy a mezi nimi průjezdná tunelová propojka.

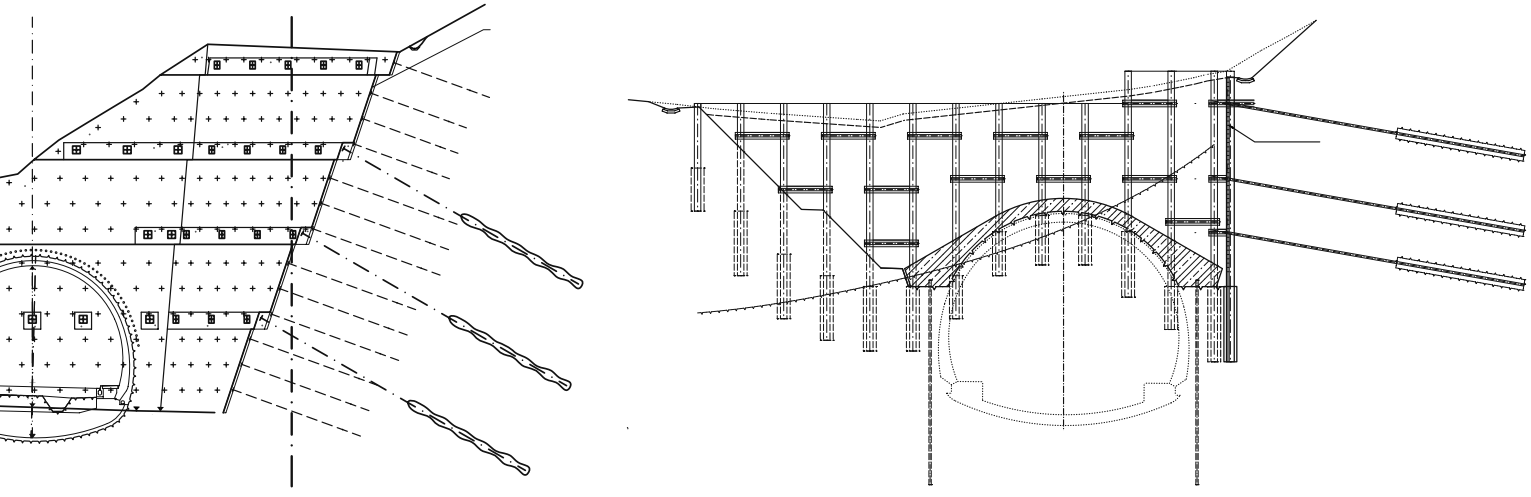
Ve fázi zpracování nabídky na výběr zhotovitele došlo v souvislosti s úpravou blokového schématu definitivního ostění a redukci počtu bezpečnostních stavebních úprav i k redukci počtu nouzových zálivů. Zmenšením počtu nouzových zálivů ze šesti na čtyři byly oba zálivy ze střední stavební jámy odstraněny. Cílem nového technického řešení v rámci zpracování nabídky bylo snížit objem zemních prací, zmenšit půdorysné rozměry stavební jámy a vzhledem k ne zcela příznivým geotechnickým podmínkám i dobu jejího otevření. Z toho důvodu byla jáma zkrácena ve směru tunelových trub a zúžena díky odstranění nouzových zálivů a v místě očekávaných přítoků podzemní vody došlo opět k návrhu želvy. Toto řešení umožňovalo zasypání části stavební jámy nad želvou ještě dříve než ostatní části jámy, čímž se minimalizovalo riziko neočekávaných situací. Vzhledem k omezené ploše záboru pozemků nebylo vždy možné zmírnit sklon svahů a projektant přistoupil v horních partiích stavební jámy k použití kotvených záporových stěn. Obr. 15 a 16 porovnávají původní a nové technické řešení východního portálu severní tunelové trouby, kde byla původně svahovaná stavební jáma nahrazena záporovou stěnou a konstrukcí želvy.

Před zahájením zemních prací byly dostupnou mechanizací provedeny kopané sondy, které potvrdily přítomnost zahliněných sutí a podpořily správnost rozhodnutí upustit od svahované stavební jámy ve sklonu svahů 3 : 1, respektive až 5 : 1. Stavební práce začaly vrtáním zápor, přičemž jejich hloubka vycházela z prognózy úrovně báze pokryvů určené na základě inženýrsko-geologického průzkumu, který byl součástí zadávací dokumentace. Obr. 17 dokumentuje počáteční fáze vrtání zápor a ukazuje geologické poměry na východním portálovém svahu severní tunelové trouby. Vzhledem k proměnnému horizontu pískovců a slepenců se musela hloubka vrtání podle informací zhotovitele často upravovat a projektant musel na tuto skutečnost rychle reagovat změnou úrovně převázek pro lanové kotvy. Vyhodnocení vrtů pro zápory po obvodu stavební jámy poskytlo poměrně přesnou představu o rozhraní pokryvných útvarů i kvalitě skalního podkladu, což projektant využil k přesnějšímu návrhu konstrukce želvy i zahájení ražeb na všech čtyřech portálech stavební jámy. Na rozdíl od západního portálu spočívají patky želvy ve střední stavební jámě na rostlém terénu vyztuženém vertikálně vrtanými mikropilotami. Vzhledem k posunu termínu zahájení ražeb do zimních měsíců byly původně nad profilem kaloty navržené železobetonové věnce nahrazeny kotvenými ocelovými převázkami, které nad tunely držely paty zápor. Zajištění svahů, fáze výstavby želvy a stísněné poměry střední stavební jámy dokumentuje obr. 19. Problematiku ražeb popisuje další kapitola.

Technologické třídy výrubu a ražba tunelu

V zadávací dokumentaci byly pro zajištění stability výrubu navrženy na základě interpretace výsledků inženýrsko-geologického průzkumu technologické třídy výrubu a jejich rozdělení po trase obou tunelových trub. Ve fázi zpracování nabídky na výběr zhotovitele tunelu prováděla firma 3G Consulting Engineers s.r.o. v rámci konzultační činnosti pro firmu HOCHTIEF CZ a.s. novou interpretaci geotechnických poměrů a úpravu jednotlivých prvků zajištění stability výrubu v rámci jednotlivých technologických tříd výrubu. Realizační dokumentace zpracovaná firmou IKP Engineers Group s.r.o. respektovala počet tříd výrubu a jejich rozdělení po trase tunelů ze zadávací dokumentace, zohledňovala však redukci prvků zajištění výrubu podle návrhu 3G Consulting Engineers s.r.o. Technologický postup výstavby byl ve fázi zpracování realizační dokumentace konzultován se zástupci firmy HOCHTIEF CZ a.s., která je garantem tunelového úseku

▼ *Obr. 16. Nové řešení s ohledem na inženýrsko-geologické podmínky*





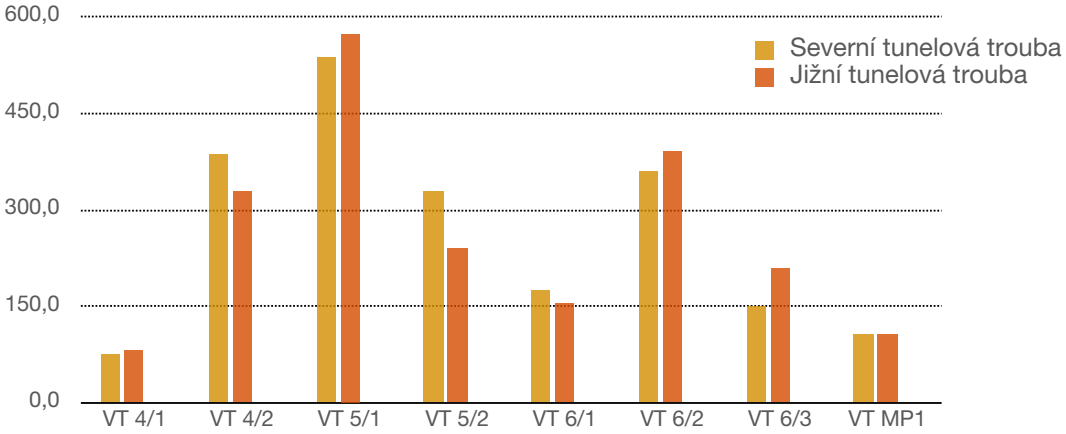
▲ *Obr. 17. Geologické poměry na východním svahu údolí (foto: L. Mařík)*

stavby. Grafické znázornění zastoupení jednotlivých tříd výrubu po délce tunelových trub ukazuje obr. 18.

Do nejtěžších geotechnických podmínek byly navrženy technologické třídy výrubu 6.3, 6.2 a 6.1. Tyto třídy jsou situovány do příportálových úseků a do tektonických poruch. V úsecích ražby, kde se očekávaly velmi špatné geotechnické poměry, byla v zadávací dokumentaci navržena ražba pod mikropilotovým deštníkem. Jednalo se zejména o úseky s nízkým nadložím, navazující na stavební jámu západního portálu. Tato třída nebyla při ražbě použita. Po překonání příportálových úseků a zlepšení inženýrsko-geologických poměrů byl v realizační dokumentaci plánován přechod do technologických tříd výrubu 5.2 a 5.3. V úsecích velmi pevných a stabilních hornin, tvořených zejména slepenci a neporušenými pískovci, jsou navrženy technologické třídy výrubu 4.2 a 4.1. Pro kotvení ve třídách 5 a 6 se používají kotvy SN, nebo v případě, kdy hrozí zavalování vrtu, kotvy IBO. Ve třídách 4 se s výhodou rychlé aktivace a snadného osazovaní používají hydraulicky upínatelné svorníky. Tloušťka ostění se mění od 250 mm v nejtěžších třídách až po 100 mm ve třídě 4.1. Tato tloušťka ostění již nemá z hlediska celého tunelu žádnou nosnou funkci a ve statickém výpočtu není uvažována. Zajišťuje pouze integritu horninového prstence a stabilizuje líc výrubu z hlediska bezpečnosti. Z tohoto důvodu je vyztužena jednou sítí kari Q188. Hlavním nosným prvkem je prokotvený horninový prstenec. V této třídě se nepoužívají výztužné rámy, což klade zvýšené nároky na raziče a dodržování tvaru výrubu. Zásadní rozdíly ve způsobu zajištění stability výrubu ukazují obr. 20 s třídami výrubu 6.3, 5.2 a 4.1.

V prostředí flyše se při střídání vrstev slínovců, jílovců a pískovců geotechnické podmínky mnohdy mění v každém záběru. Jde zejména o stupeň rozpukání a orientaci diskontinuit (obr. 21). V případě ražby v slepencích je situace příznivější. Pro stabilizaci obrysu výrubu jsou proto v dokumentaci navrženy jehly pouze počtem s tím, že jejich poloha po obvodě kaloty bude určena až na základě vyhodnocení skutečně zastižených podmínek.

Funkci inženýra NRTM na stavbě provádí firma 3G Consulting Engineers s.r.o., která zajišťuje trvalý geotechnický dohled, a společně se zástupci firmy HOCHTIEF CZ a.s. navrhují zatřiďování do technologických tříd výrubu. V případě, že dochází k úpravě způsobu zajištění v rámci třídy (rozmístění jehel po obvodu kaloty, změna typu a délky kotev, stabilizační opatření na čelbě atd.), posoudí a odsouhlasí tyto změny projektant realizační dokumentace. Pro rozhodování o způsobu zajištění výrubu a volbu technologické třídy výrubu slouží kromě vizuálního sledování výsledky geotechnického monitoringu, který pro zhotovitele provádí ARCADIS CZ a.s. Výsledky měření jsou po vyhodnocení v řádu hodin přístupné všem kompetentním účastníkům výstavby na webovém portále BARAB, který umožňuje zobrazování jak výsledků geotechnických měření, tak pasportizace čeleb a jejich fotodokumentace. Práce spojené s vytyčením tunelu, stejně jako měření pro osazování výztužných rámů primárního ostění a měření deformací výruby provádí na straně



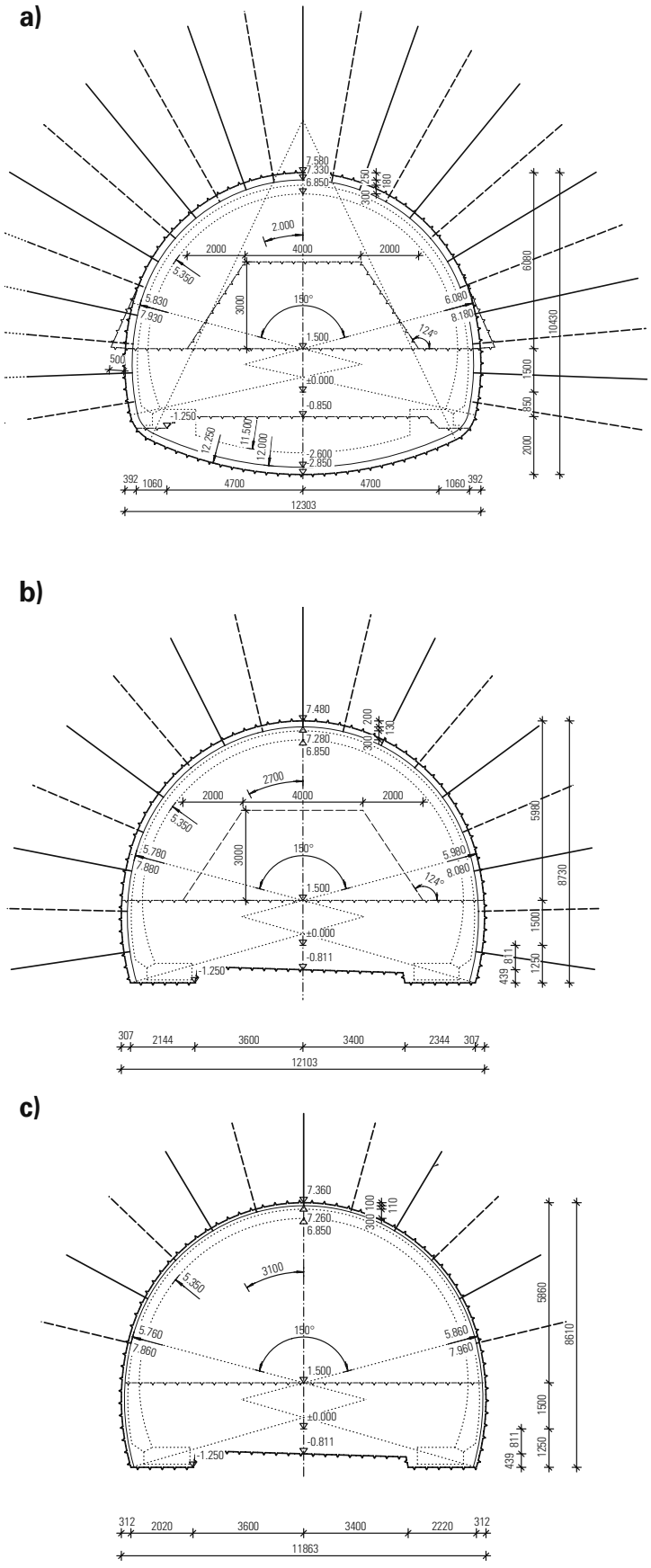
▲ *Obr. 18. Prognóza zastoupení tříd výrubu podle realizační dokumentace*

▼ *Obr. 19. Celkový pohled na východní svah stavební jámy (foto: L. Mařík)*



zhotovitele firma Angermeier Engineers. Kromě každodenního vyhodnocování geotechnických poměrů a optimálního nastavení způsobu ražby probíhají ve čtrnáctidenním rytmu kontrolní dny monitoringu, na kterých se za účasti zástupců Národní dálniční společnosti vyhodnocuje minulé období a stanovuje očekávaný postup výstavby pro další období. Způsob zajištění stability výrubu a postupu ražeb je pro jednotlivé technologické třídy výrubu přehledně uspořádán do tab. 1. Kromě technologických tříd výrubu uvedených v této tabulce byla připravena technologická třída výrubu pro ražbu pod želvou na západním portále, ve střední stavební jámě a pro ražbu pod mikropilotovým deštníkem. Mikropilotový deštník se použil pouze pro ražbu jižní tunelové trouby ze střední stavební jámy směrem na západ, která podcházela vysokotlaké vodovodní potrubí, zásobující Žilinu pitnou vodou, a nad kterou se nacházelo přeložené koryto potoka i staveništní komunikace, jež slouží pro odvoz rubaniny na deponii. Zahájení ražby jižní tunelové trouby směrem na východ a severní tunelové trouby směrem na západ zajišťovalo místo původně plánovaného mikropilotového deštníku pouze jehlování po obvodu kaloty. Jehly byly v tomto případě osazeny do cementové zálivky, při ražbě tunelu se již osazují na sucho. Ražba severní tunelové trouby ze střední stavební jámy směrem na východ probíhala pod konstrukcí želvy, která byla v době zahájení razičských prací již částečně zasypána. Stísněné poměry se vzdáleností portálů pouhých 12,5 m ukazuje obr. 22. Podél klenby želvy vede pod zásypem staveništní drenáž, která odvádí vydatný přítok podzemní vody zejména na severním boku konstrukce želvy. Díky tomu se podařilo omezit přítoky vody do tunelu. Před zahájením ražby pod želvou a provedením jejího zásypu byla oblast nad profilem kaloty úseku raženého za želvou zpevněna a zatěsněna výplňovou injektáží. Nad profilem kaloty byl navrtán dvojitý deštník, jehož vrty byly vyplněny injektážní směsí a vyztuženy vloženou betonářskou výztuží. Při ražbě v tomto úseku se netvořily nadvýruby. I tak je úsek ražený za želvou silně zvodněný a v kalotě jsou pro odvedení vody z masivu navrženy svodnice. Další přítoky se objevily při ražbě opěří jižní tunelové trouby směrem na západ, a to hned u portálu. Ražba hlouběji v hoře probíhá zatím bez větších přítoků a průsaky podzemní vody jsou většinou vázané na puklinový systém horninového masivu. Po prvních záběrech kaloty se ražba na všech čelbách ražených ze střední stavební jámy poměrně rychle dostala do pevného horninového masivu, tvořeného převážně slepenci, a délka záběru se prodloužila z 1 m až na 3 m.

Zvýšená pozornost byla věnována přechodu z ražby pod želvami do úseku raženého NRTM na západním portále. Důvodem byly jednak geotechnické podmínky, jednak skutečnost, že čelo stavební jámy paží štětovnice, které nebyly do masivu beraněny, ale vsazovány do vrtů, které byly následně vyplněny vytěženým materiálem. Ražba kaloty pod želvou poskytla přesné informace o horninovém masivu, který bude nutné stabilizovat, až kalotu nebude chránit konstrukce želvy. V obou tunelových troubách do přístropí zasahovala štěrková terasa, respektive vrstva silně zvětralých slínovců a jílovců. Štětová stěna tvořila překážku pro podzemní vodu a nešlo vyloučit zvodnění materiálu v nadloží. Pro další ražbu bylo proto navrženo zajištění nadloží pomocí hnaného pažení ocelovými pažnicemi UNION délky 4 m, které byly lafetou vrtacího vozu zahnány po obvodu želvy. V místech, kde štěrková terasa přecházela do vrstev jílovců, nahradily pažiny jehly osazované do cementové zálivky. Dále bylo nutné zabránit ztrátě stability čelby, která by vedla k nekontrolovatelnému prodloužení záběru. Proto byly do čelby navrtány kotvy IBO délky 8 m a na ně naplocho nasazeny pažiny UNION, které byly na čelbu přitlačeny pomocí matic a desek na IBO kotvách (obr. 23). Průběžný závit IBO kotev umožňoval okamžitě po provedení záběru pomocí pažin aktivně podepírat čelbu kaloty. Navržený technologický postup výstavby umožnil bezpečný průchod rizikovou zónou na kontaktu



▲ *Obr. 20. Technologické třídy výrubu 6.3, 5.2 a 4.1*

želvy a úseku raženého NRTM. I když stavební dokumentace předpokládala další ražbu v úseku cca 70 m pod mikropilotovým deštníkem, bylo po vyhodnocení geotechnických poměrů rozhodnuto o nasazení technologické třídy 6.3. Toto rozhodnutí se ukázalo jako správné a ražba v této třídě probíhala díky zkušenému přístupu zhotovitelské firmy TuCon, a.s., bez větších problémů. Délka záběru v tomto

Třída výrubu	Jed.	6.3	6.2	6.1	5.2	5.1	4.2	4.1
Délka záběru	[m]	0,75–1,3	0,75–1,3	0,75–1,3	1,0–1,7	1,0–1,7	1,5–2,2	bez omezení
Plocha výrubu	[m^2]	105,2	105,2	101,4	86,0	86,0	84,8	83,1
Plocha kaloty	[m^2]	58,9	58,9	56,2	56,2	56,2	55,3	54,0
Plocha opěří	[m^2]	29,8	29,8	29,2	29,8	29,8	29,5	29,1
Plocha dna	[m^2]	16,5	16,5	16,0	–	–	–	–
Tloušťka ostění	[mm]	250	250	200	200	200	150	100
Počet sítí KARI	[ks]	2 KY80	2 Q188	2 Q188	2 Q188	1 Q188	1 Q188	1 Q188
Počet kotev v kalotě	[ks]	9/10	8/9	7/8	6/7	6/7	5/6	5/6
Délka kotev v kalotě	[m]	6	4, 6	4	4	4	3	3
Počet kotev v opěří	[ks]	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	–
Délka kotev v opěří	[m]	6	4	4	4	4	3	–
Jehly	[ks]	20–30	20–30	15–20	15–20	podle potřeby	podle potřeby	–
Čelbový klín	–	ano	podle potřeby	podle potřeby	podle potřeby	ne	ne	ne

▲ *Tab. 1. Základní parametry zajištění výrubu v technologických třídách podle RDS*

úseku nepřesahovala 1 m. I přes plochu kaloty téměř 60 m^2 a nízké nadloží se deformace výrubu v úseku za želvou pohybují do 15 mm a s postupem ražby směrem dále do hory se snižují až na prakticky neměřitelné hodnoty. Malé deformační projevy horninového masivu jsou doposud společným jmenovatelem ražeb na všech čelbách a zůstávají daleko za hodnotami varovných stavů.

Závěr

Stavba tunelu Považský Chlmec probíhá v pestrých geotechnických podmínkách karpatského flyše od silně zvětralých poloh pískovců, slínovců a jílovců na západním portále až po velmi pevné slepence ve středních úsecích tunelu. Zadávací i realizační dokumentace definuje jednu technologickou třídu výrubu pro celý příčný profil tunelu. Skutečně zastižené geotechnické podmínky ukazují, že by bylo vhodné technologické třídy výrubu ve stavební dokumentaci definovat pro jednotlivé dílčí výruby (kalota, opěří, případně dno) a podle situace zastižené na čelbě provést zatřídění do příslušné technologické třídy pro každý dílčí výrub zvlášť. Nejmarkantnější byla v tomto smyslu situace ve střední stavební jámě, kde do kaloty zasahovaly vrstvy pokryvů s ražbou klasifikovanou do technologické třídy výrubu 6.3, zatímco opěří ražené v pevných slepencích již zdaleka nevyžadovalo tak masivní způsob zajištění, jaký předepisuje třída 6.3.

Díky vstřícnému přístupu zkušených zástupců investora NDS i stavebního dozoru ze sdružení firem EUTECH & ESP & MULLER & API-D3 se daří dosáhnout shody v názoru na způsob zajištění stability výrubu podle geotechnických podmínek zastižených při výstavbě a aplikovat v praxi základní principy NRTM. Návrh na zatřiďování do technologických tříd i jejich úpravy předkládají zástupci zhotovitele stavby. Při dosud provedených ražbách došlo již k celé řadě úprav způsobu zajištění výrubu, ať se jedná o změnu typu nebo délky kotev, rozsahu jehlování, vynechání výztužných rámů při ražbě opěří nebo vrstvy výztužných sítí. Napomáhá tomu realizace stavby podle Žluté knihy FIDIC. Tento smluvní vztah na rozdíl od Červené knihy nevyžaduje zdlouhavé a mnohdy odrazující projednávání změn oproti realizační dokumentaci a umožnuje tak skutečně ekonomickou a bezpečnou ražbu tunelů. Každou úpravu prvků zajištění stability výrubu autorizuje báňský projektant formou jeho oficiálního, písemného vyjádření.

Zadávací dokumentace vyžaduje vyhodnocovat technologické třídy výrubu uvedené v realizační dokumentaci podle metodiky uvedené v TP 06-1/2006. Jedná se o překlad rakouské normy ÖNORM B 2203-1, která definuje smluvní podmínky mezi investorem a zhotovitelem



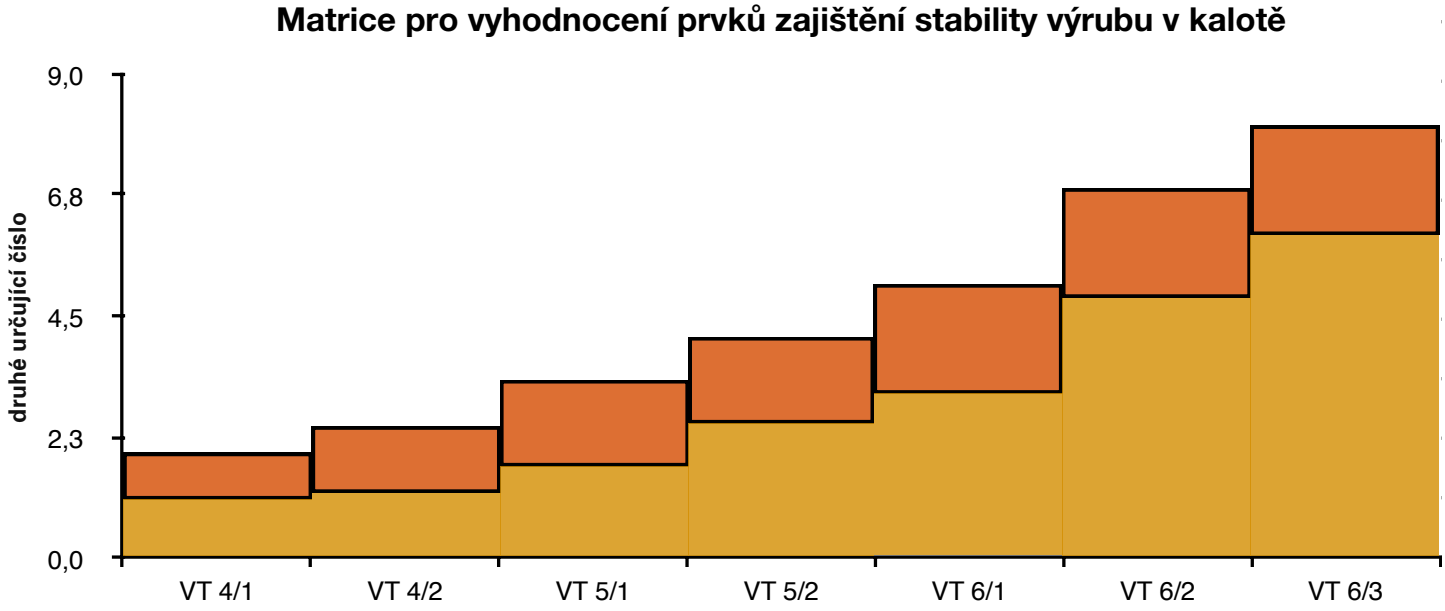
▲ *Obr. 21. Sklony diskontinuit na čelbě (foto: L. Mařík)*

▼ *Obr. 22. Stísněné poměry ve střední stavební jámě (foto: L. Mařík)*



▼ *Obr. 23. Čelba na rozhraní želvy a úseku NRTM na západním portále (foto: L. Mařík)*





▲ *Obr. 24. Vyhodnocení technologických tříd výrubu podle TP 06-1/2006*

při konvenční ražbě tunelů a mimo jiné určuje pomocí matric způsob účtování za ražbu v technologické třídě výrubu. V rámci realizační dokumentace byly proto vytvořeny pro každou technologickou třídu výrubu v závislosti na způsobu vystrojení, délce záběru a ploše dílčích výrubů matrice, které znázorňuje obr. 24. Vzhledem k tomu, že při výstavbě platí smluvní podmínky podle Žluté knihy FIDIC a nikoli podle pravidel uvedených v technických podmínkách TP 06-1/2006, má toto vyhodnocování pouze akademický význam a z hlediska smluvních vztahů mezi investorem a zhotovitelem nehraje žádnou roli. Při posuzování úprav způsobu zajištění stability výrubu a postupu prací nelze proto výsledky vyhodnocení ve smluvním vztahu použít. V porovnání s předpoklady zadávací i realizační dokumentace probíhá ražba v příznivějších geotechnických podmínkách. Deformační projevy horninového masivu jsou zlomkem očekávaných hodnot. Zastoupení technologických tříd výrubu zatím směřuje k lehčím třídám s menším počtem vystrojovacích prvků a delším záběrem. Celkové vyhodnocení ražeb bude možné provést až po vyražení celého tunelu. Unikátní ražba tunelu až z osmi čeleb je náročná na organizaci činností na jednotlivých pracovištích a je podmínkou pro dodržení harmonogramu výstavby. ■

Článek byl publikován v časopisu Tunel č. 3/2015.

Základní údaje o stavbě

Stavba:	Tunel Považský Chlmec na dálnici D3 Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno)
Investor:	Národná diaľničná spoločnosť, a.s.,
Zástupce investora:	sdružení firem EUTECH & ESP & MULLER & API-D3
Zhotovitel tunelu:	HOCHTIEF CZ a.s.
Projektant realizační dokumentace:	IKP Engineers Group, s.r.o., HOCHTIEF CZ a.s.
Geotechnický konzultant:	3G Consulting Engineers s.r.o.
Geodetické práce:	Angermeier Engineers, s.r.o.
Doba výstavby:	05/2014–06/2017

Použitá literatura:

[1] Diaľnica D3 Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno), súťažné podklady, Národná diaľničná spoločnosť, a.s., Mlynské nivy 45, 821 09 Bratislava, 05/2013.
[2] Diaľnica D3 Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno), realizační dokumentace stavby objektů SO 401-00, SO 403-00 a SO 410-00, IKP Engineers Group, s.r.o., Jankovcova 1037/49, 170 00 Praha.
[3] Technicko-kvalitatívne podmienky MDVRR TP 06-1/2006 Podzemné stavby Časť 1: Cyklické razenie, vystrojovacie triedy.
[4] ÖNORM B 2203 Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm, Teil 1: Zyklischer Vortrieb.

english synopsis

Považský Chlmec Tunnel at the D3 Motorway Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno)

In May 2014, the construction of the Považský Chlmec double-tube motorway tunnel in the D3 motorway section Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno) was started. The article describes the cooperation of consultants and design engineers starting from the consulting during the preparation of the building works contractor´s bid, going through the design of the tunnel implementation documentation in the mode „design and build" according to the FIDIC Yellow Book, up to the first experience in the implementation that makes it possible to compare the design prerequisites with the actual geotechnical conditions.

klíčová slova:
dálniční tunel Považský Chlmec, úsek dálnice D3 Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno)

keywords:
Považský Chlmec motorway tunnel, D3 motorway section Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno)

odborné posouzení článku:

Ing. Viktória Chomová
DOPRAVOPROJEKT, a.s.
Ing. Pavel Růžička, Ph.D.
HOCHTIEF CZ a.s.