

TUNEL VIŠŇOVÉ – OD ZÁKLADNÉHO KAMEŇA PO PRVÝ PREJAZD

P. Paločko, J. Boltvan

Amberg Enginnering Slovakia, s.r.o. Bratislava, Slovakia

ABSTRAKT: Príspevok predkladá retrospektívnu analýzu vývoja geotechnického poznania a manažmentu rizík počas prípravy a výstavby diaľničného tunela Višňové, najdlhšieho cestného tunela na Slovensku. Práca chronologicky mapuje transformáciu inžinierskogeologického modelu masívu Lúčanskej Malej Fatry, pričom reflektuje kľúčové poznatky získané z prieskumnej štôlne, dlhodobého monitoringu a samotnej realizácie hlavných tunelových rúr.

Osobitná pozornosť je venovaná identifikácii kritických geotechnických faktorov, akými sú extrémne hydrostatické tlaky (do 3,1 MPa), tektonicky drvené mylonitové zóny a časovo závislé fenomény – najmä síranová agresivita prostredia a kinetika tvorby inkrustácií v drenážnych systémoch. Príspevok detailne analyzuje zásadné projektové adaptácie vyvolané verifikovanými dátami a zmenou európskej legislatívy, vrátane zmeny systému vetrania a úpravy prieskumnej štôlne na centrálny odvodňovací zberač.

1. ÚVOD

Diaľničný tunel Višňové predstavuje z hľadiska rozsahu, geologických podmienok a technickej náročnosti jednu z najkomplexnejších inžinierskych výziev v regióne strednej Európy. Realizácia tohto diela nie je len výsledkom štandardného projektového cyklu, ale predstavuje vyvrcholenie procesu iteratívneho spoznávania anizotropného a tektonicky silne porušeného horninového masívu Lúčanskej Malej Fatry. Každá etapa projektu – od úvodných štúdií až po finálnu implementáciu technologického vybavenia – bola determinovaná progresívnym nárastom geotechnických vedomostí a nevyhnutnosťou adaptovať technické riešenia na reálne zistené podmienky in situ.

Hlavným cieľom predkladaného príspevku je chronologická analýza evolúcie geotechnického modelu masívu a posúdenie vplyvu týchto poznatkov na prípravu projektovej dokumentácie. Príspevok sa zameriava na identifikáciu kľúčových geotechnických rizík v jednotlivých fázach prípravy a výstavby, pričom analyzuje, ako validácia dát z prieskumnej štôlne a následný dlhodobý monitoring ovplyvnili voľbu raziacich metód, konštrukciu ostenia a systém odvodnenia. Dokument sleduje metodický posun od počiatočných geotechnických neurčitostí a hypotéz, založených na nepriamych metódach prieskumu, k verifikovaným dátam získaným počas razenia a následnej diagnostiky diela.

Analýza je štruktúrovaná do logických celkov: od počiatočného inžinierskogeologického (IG) modelu, cez kľúčové hydrogeologické a tektonické zistenia z prieskumnej štôlne, až po identifikáciu časovo závislých degradačných procesov (síranová agresivita, inkrustácia). V záverečnej časti príspevok reflektuje riziká spojené s technologickou disciplínou a manažmentom kvality počas finálnej fázy výstavby. Predkladaná syntéza tak slúži ako odborná prípadová štúdia (case study), definujúca nové referenčné štandardy pre prieskum, projektovanie a realizáciu podzemných diel v komplexných geologických podmienkach Západných Karpát.

2. FÁZA I: POČIATOČNÉ HYPOTÉZY A ORIENTAČNÝ PRIESKUM (1997 – 1998)

Orientačná fáza inžinierskogeologického prieskumu (IGP) predstavovala primárny krok v procese definovania geotechnických neurčitostí masívu. Jej hlavným cieľom nebola detailná kvantifikácia parametrov, ale identifikácia kritických oblastí a stanovenie rozsahu nevyhnutného podrobného prieskumu pre dielo celoštátneho významu.

Východiskový inžinierskogeologický model, odvodený z povrchového mapovania, archívnych údajov a limitovaného súboru jadrových vrto, definoval masív ako heterogénny celok tvorený kryštalickým jadrom s predpokladanými tektonickými líniami na kontakte s mezozoickými horninami. Hoci tento

model naznačoval vysokú mieru geotechnickej náročnosti, presná priestorové rozloženie a mechanické vlastnosti diskontinuit zostávali v dôsledku vysokého nadložia (miestami nad 500 m) neoverené.

Kľúčové geotechnické riziká boli v tejto fáze klasifikované v nasledujúcich oblastiach:

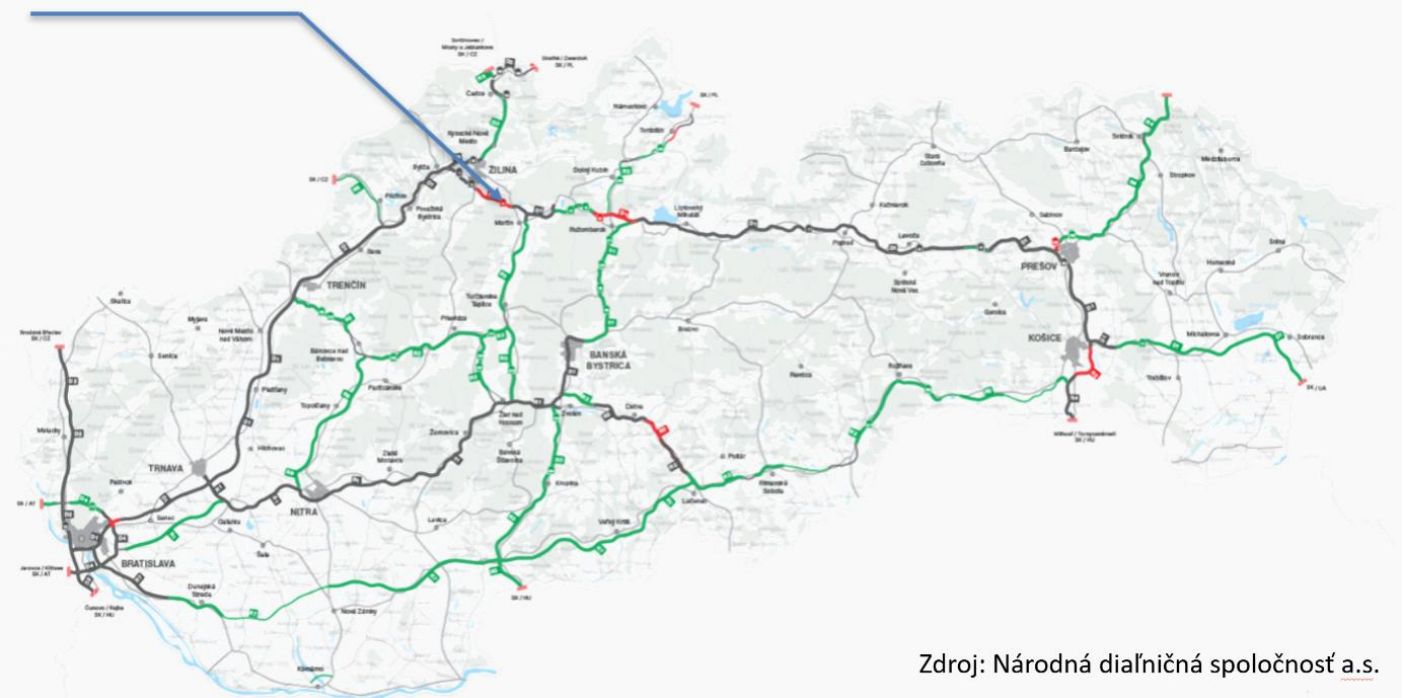
Predpoklad intenzívneho porušenia granitoidného masívu s výskytom zlomových systémov. Absentovali však exaktné údaje o orientácii, mocnosti a výplni poruchových zón, ako aj o kinematike zlomov.

Riziko bolo koncentrované najmä na tektonický kontakt kryštalinika a mezozoika, kde sa predpokladala prítomnosť oslabených zón so zníženou stabilitou výrubu.

Prognózy indikovali prítomnosť významných akumulácií podzemných vôd viazaných na puklinovo-zlomovú priepustnosť. Chýbali však kvantitatívne údaje o hydrodynamických parametroch a potenciálnom vplyve razenia na režim podzemných vôd.

Zásadným výstupom orientačného prieskumu bolo konštatovanie, že nepriame metódy a povrchový vrtný prieskum sú pri daných morfológických a geologických podmienkach nepostačujúce pre bezpečný a ekonomický návrh tunela. Na základe týchto záverov bola v trase tunela navrhnutá prieskumná štôľňa.

Tunel Višňové



Zdroj: Národná diaľničná spoločnosť a.s.

Obrázok 1: Poloha tunela Višňové na mape Slovenska

V dobovom kontexte (polovica 90. rokov) bola navrhnutá koncepcia jednorúrovňového tunela s obojsmernou premávkou, pričom prieskumná štôľňa mala po ukončení razenia slúžiť ako paralelná úniková cesta.

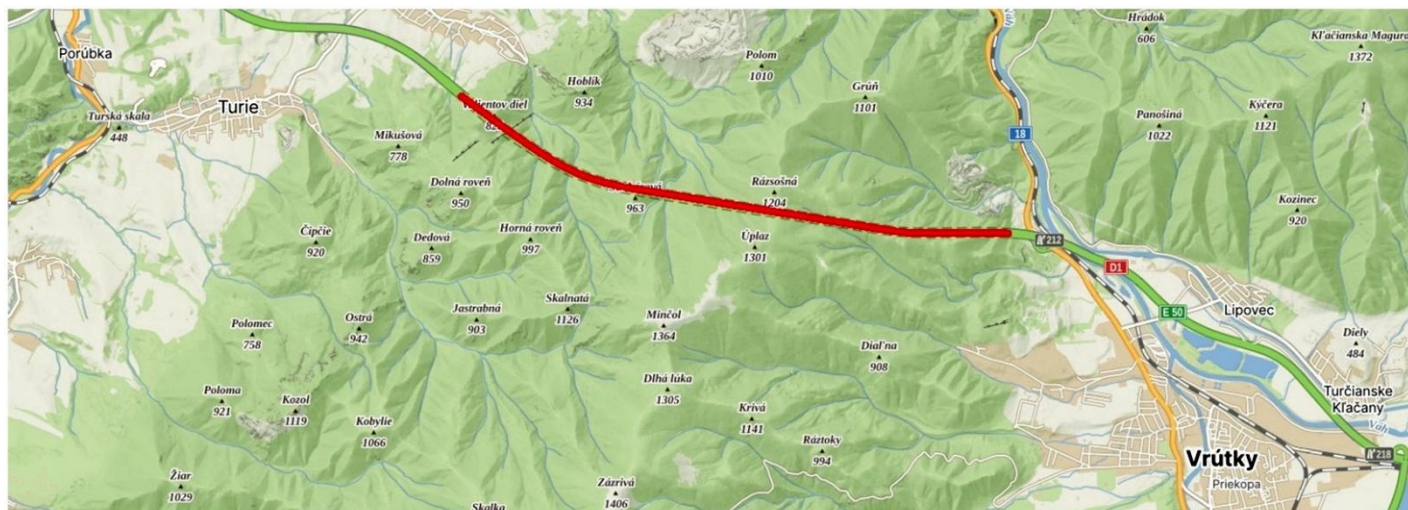
3. FÁZA II: ZISTENIA Z PRIESKUMNEJ ŠTÔLNE (1998 – 2002)

Realizácia prieskumnej štôľne v rokoch 1998 až 2002 predstavovala kľúčovú etapu v spoznávaní horninového masívu.

Tento krok umožnil prechod od teoretických predpokladov a interpretácií povrchového prieskumu k priamej *in situ* verifikácii horninového prostredia. Získané exaktné dáta odhalili extrémnu mieru geotechnickej komplexnosti, ktorá v mnohých aspektoch prekročila pôvodné prognózy.

Prieskumná štôľňa zásadne zmenila inžinierskogeologický model a transformovala identifikované riziká na merateľné technické parametre:

V granitoidnom jadre boli zdokumentované rozsiahle kataklastické a mylonitové zóny – pásma intenzívne drvenej a hydrotermálne premenenej horniny. Mocnosť týchto zón dosahovala lokálne až 12 metrov. Horninový masív v týchto úsekoch vykazoval vlastnosti vysoko anizotropného, prostredia s nízkou šmykovou pevnosťou.



Obrázok 2: Poloha tunela Višňové na medzi Žilinou a Martinom (zdroj podkladu: mapy.com)

Štôľňa prešla kľúčovú diskontinuitu – Kúneradský zlom. Táto zóna bola identifikovaná ako kritické geotechnické riziko, kde bola hornina transformovaná na tektonickú drvinu, ktorá pri kontakte s vodou nadobúdala charakter nesúdržnej zeminy.

Priamo boli zdokumentované úseky s nepriaznivými mechanicko-fyzikálnymi vlastnosťami, najmä gutensteinské vápence (Vgn, Vgtp) s prejavmi krasovatenia a zóny karbonatických ílovcov a kataklazitov (Iktp).

Najvýznamnejšie poznatky priniesla štôľňa v oblasti hydrogeológie. Kombinácia extrémneho tlaku vody a tektonicky rozdrveného materiálu vytvorila dokonalé podmienky pre sufóziu

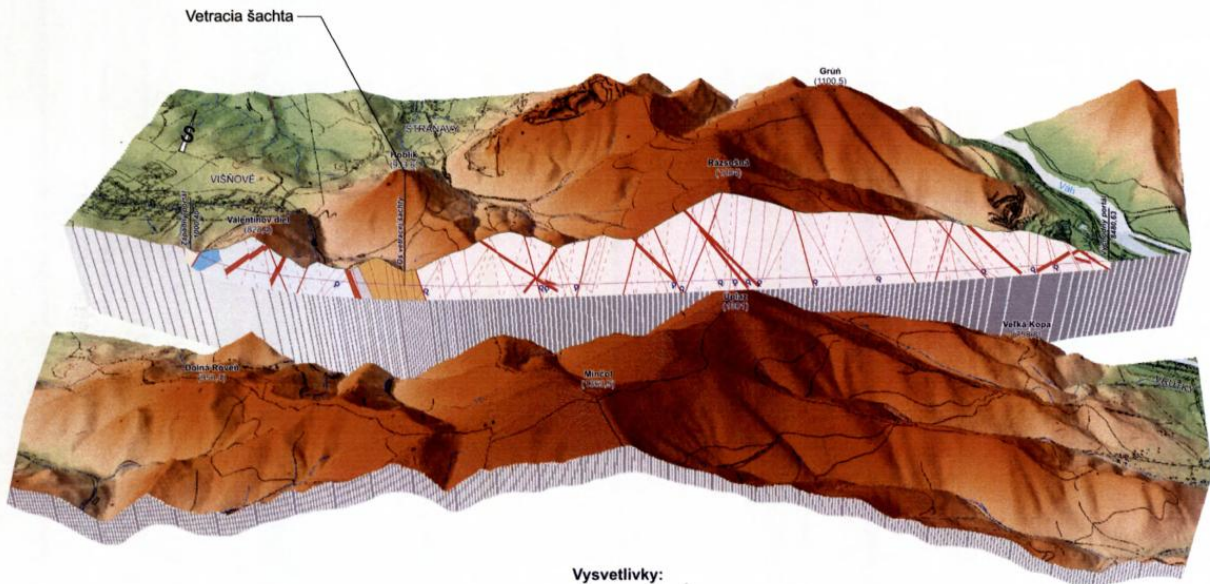
Tabuľka 1: Výber markantných hydrogeologických parametrov

Hydrogeologický Parameter	Zistená Hodnota (1998-2002)	Inžiniersky a Rizikový Dopad
Maximálny odtok z východného portálu	> 420 l/s	Indikátor rizika náhleho privalu vody; parameter pre dimenzovanie havarijného odvodnenia a čerpacích kapacít pri razení v úpadnom sklone (Matejček a Bohyník, 2006).
Maximálne prítoky na čelbe	80 – 160 l/s	Okamžité ohrozenie stability výrubu, riziko zaplavenia techniky a personálu, potreba masívnych čerpacích kapacít (Ondrášik et al., 2015)
Hydrostatický tlak vody	Až 3,1 MPa	Extrémne zaťaženie ostenia; sufóznny účinok, ktorý vyplavoval tektonickú drvinu, vytváral kaverny a viedol k závalom. (Ondrášik et al., 2015)
Stabilizovaný odtok z masívu	230 – 260 l/s	Potvrdenie, že tunel pôsobí ako permanentný lineárny drén, čo mení hydrogeologický režim a znižuje hladinu podzemnej vody v regióne. f (Bohyník et al., 2018)

Náhle privaly vody, strata stability v mylonitových zónach a extrémny tlak vody sa stali dominantnými faktormi, ktoré museli byť zohľadnené v každom ďalšom kroku projektovania .

4. FÁZA III: PRÍRAVA PROJEKTU NA ZÁKLADE NOVÝCH ZISTENÍ (2002 – 2007)

Obdobie po prerazení prieskumnej štôlne bolo venované vypracovaniu technických riešení. V tejto fáze sa stretli dva kľúčové vplyvy: inžinierska nevyhnutnosť reagovať na odhalené riziká a adaptácia projektu na novú európsku legislatívu - smernicu 2004/54/ES o minimálnych bezpečnostných požiadavkách na tunely v transeurópskej cestnej sieti.



Obrázok 3: 3D model masívu tunela Višňové s geologicko-tektonickou stavbou (Matejček a Bohyník, 2006)

Najvýznamnejšie projektové zmeny, ktoré boli priamou reakciou na zistenia z prieskumnej štôlne, možno zhrnúť nasledovne:

Prechod na dvojrúrový variant: Pôvodný koncept jednej tunelovej rúry, kde prieskumná štôlňa mala slúžiť ako úniková cesta (podobne ako Branisko), bol definitívne opustený. Dôvodom neboli len nové dopravné prognózy, ale aj prijatie spomínanej európskej smernice, ktorá zásadne sprísnila bezpečnostné požiadavky na dlhé cestné tunely.

Modifikácia konštrukcie ostenia: Vysoké horninové a hydrostatické tlaky zistené v kryštaliniku si vynútili zväčšenie hrúbky sekundárneho železobetónového ostenia. Pôvodne navrhovaná hrúbka 300 mm bola v rámci aktualizácie projektu zvýšená na 350 mm, aby sa zabezpečila dostatočná statická únosnosť a dlhodobá životnosť konštrukcie.

Technické riešenia prijaté v tomto období vytvorili nevyhnutný základ pre zvládnutie počas neskoršej výstavby.

5. FÁZA IV. DLHODOBÝ MONITORING A ČASOVO ZÁVISLÉ RIZIKÁ (2002 – 2014)

Obdobie po roku 2002 prinieslo situáciu, že dokončená prieskumná štôlňa začala slúžiť na dlhodobé monitorovanie podzemného diela aj horninového masívu. Táto fáza dlhodobého monitoringu umožnila sledovať správanie masívu dlhodobo a odhaliť nové, časovo závislé riziká, ktoré nebolo možné identifikovať počas krátkodobého procesu razenia.

Význam týchto zistení spočíval v potvrdení, že o životnom cykle tunela je nevyhnutné uvažovať nielen z hľadiska okamžitej stability pri výstavbe, ale aj z hľadiska dlhodobej trvácnosti materiálov a funkčnosti prevádzkových systémov.

Tabuľka 2: Vybrané riziká identifikované dlhodobým pozorovaním

<i>Identifikované Riziko</i>	<i>Popis a technický dopad</i>
<i>Síranová agresivita</i>	<i>V úseku staničenia 1 250 – 1 800 m (mezozoikum) sa potvrdila prítomnosť sadrovca a anhydritu, ktorých výluhy spôsobili viditeľnú degradáciu striekaného betónu primárneho ostenia. Podobné riziko (stupeň XA2) bolo identifikované aj v úseku 300 – 800 m od západného portálu. Tieto zistenia viedli k požiadavke na použitie betónov odolných voči síranom pre finálne ostenie (Geofos, 2007)</i>
<i>Tvorba sintrov (Inkrustácia)</i>	<i>Dlhodobé sledovanie v únikovej štôlni potvrdilo masívne vyzrážanie uhličitanu vápenatého, ktorý upchával drenážne žľaby a znižoval účinnosť odvodnenia. Analýzy ukázali, že uhličitan vápenatý sa vylúhoval primárne z betónových konštrukcií a urýchľovačov tuhnutia, nie z horniny. Toto riziko si vyžiadalo návrh drenážneho systému umožňujúceho pravidelnú údržbu a v niektorých prípadoch aj jeho úplné prebudovanie (Geofos, 2007)</i>
<i>Reaktivizácia svahových pohybov</i>	<i>Systematický monitoring (vrty HG-1, HG-2) potvrdil reaktivizáciu svahových deformácií nad prístupovou cestou západného portálu, ku ktorej došlo 4. 4. 2006 po extrémnom oteplení a zrážkach. Tieto dáta potvrdili vysokú citlivosť stability portálu na hydrogeologický režim a nevyhnutnosť permanentného geotechnického monitoringu a robustných stabilizačných opatrení (Matejček, 2011).</i>

6. FÁZA V: REALIZÁCIA A NOVÉ RIZIKÁ (2014 – 2025)

Hlavná fáza výstavby priniesla zásadný posun vo vnímaní rizík. Po dekádach podrobného prieskumu sa pozornosť zmenila. Už nešlo o zvládnutie geologickej *neistoty*, ale o zvládnutie *známych*, avšak extrémnych geologických podmienok. Dominantné riziko sa tak presunulo z oblasti zvládania *prírodného systému* do oblasti zabezpečenia kvality, technologickej disciplíny a manažmentu v náročnom prostredí.

6.1 ADAPTÁCIA RAZIACEJ METÓDY ADECO-RS

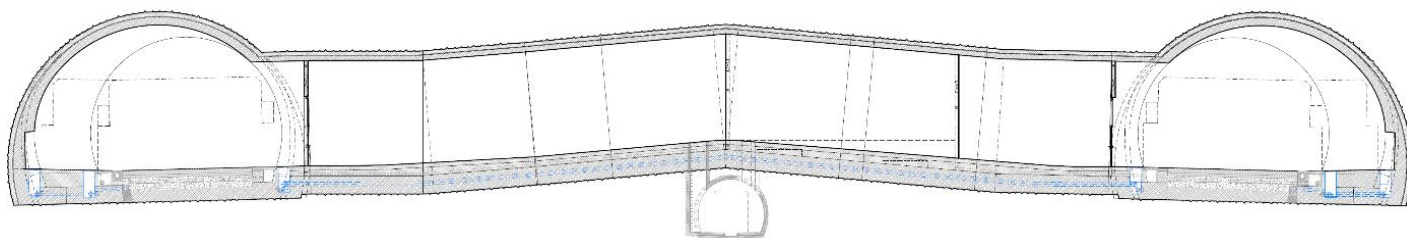
Pre podmienky v trase tunela, najmä v zónach tektonicky drvených a zvodnených mylonitov, sa presadila raziaca metóda ADECO-RS (Analysis of Controlled Deformation in Rocks and Soils). Na rozdiel od tradičnej NRTM, ktorá sa zameriava na riadenie deformácií za čelbou výrubu, kľúčovým princípom ADECO-RS je aktívna stabilizácia horninového masívu v predstihu pred čelbou.

6.2 ÚPRAVA PRIESKUMNEJ ŠTÔLNE NA CENTRÁLNY ODVODŇOVACÍ PRVOK

Jedným z najvýznamnejších rozhodnutí pri dostavbe tunela bola kompletná zmena funkcie pôvodnej prieskumnej štôlne, ktorá je nakoniec využitá ako centrálny zberač podzemných vôd.

Využitím existujúcej štôlne sa eliminovala potreba budovať rozsiahle kanalizačné zberače priamo pod vozovkou v oboch tunelových rúrach. Týmto prístupom sa predchádza budúcim poruchám vozovky v miestach revíznych šachiet, ktoré sú častou príčinou porúch v iných tuneloch. Horninová voda z rubovej drenáže je bezpečne zvedená do štôlne, ktorá ju odvádza mimo dopravný priestor.

Odvodňovacia štôľňa má celkovú dĺžku 7 446,75 metra a pozostáva zo štyroch úsekov: východný a západný portálový úsek štôlne musel byť vybudovaný na novo z dôvodu zmeny trasovania na portáloch a pôvodné úseky štôlne razené metódami NRTM a tunelovací stroj – TBM.

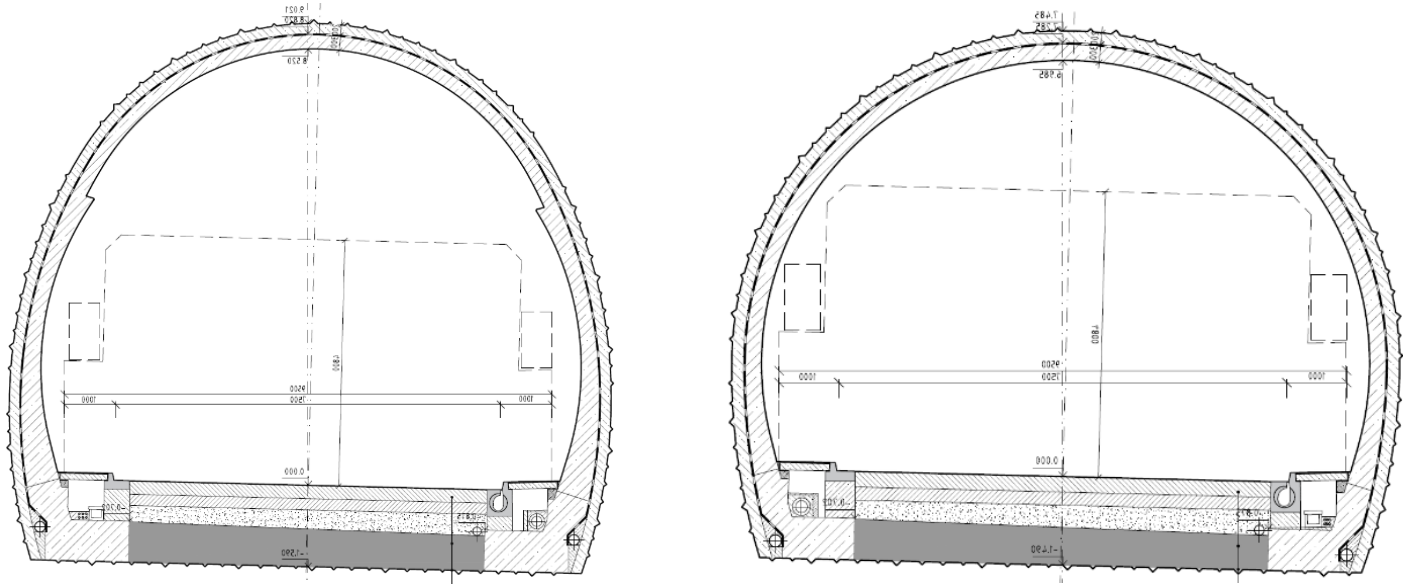


Obrázok 4. – Pozdĺžny rez priečnym prepojením č.1, odvodňovacia štôľňa je priamo pod priečnym prepojením

6.3 OPTIMALIZÁCIA TECHNICKÝCH RIEŠENÍ VO FINÁLNEJ ETAPE VÝSTAVBY

Vo finálnej fáze realizácie diela si vývoj technických noriem a zvyšujúce sa požiadavky na prevádzkovú bezpečnosť vyžiadali komplexnú optimalizáciu projektovej dokumentácie. Pre zabezpečenie plynulého napredovania prác bola vykonaná pasportizácia a diagnostika zrealizovaných častí sekundárneho ostenia, čím sa verifikovala ich statická integrita a súlad s návrhovými parametrami.

Projektový tím následne vypracoval súbor technických úprav, ktorých cieľom bolo maximalizovať využitie dovedy zrealizovaných konštrukcií a integrovať ich do nového, plne funkčného a bezpečného celku. Tieto projektové adaptácie sa zamerali predovšetkým na systémové zvýšenie dlhodobej udržateľnosti tunela.

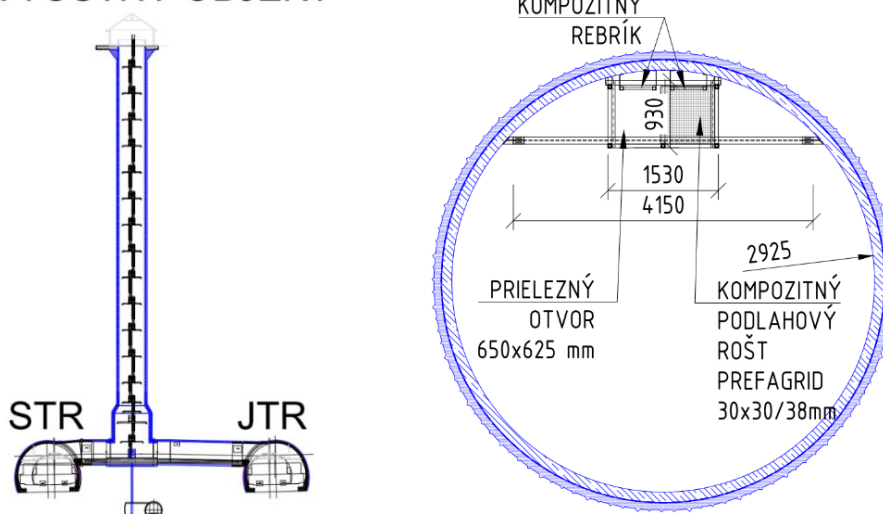


Obrázok 5: Vzorový priečný rez tunela, vľavo s medzistropom, vpravo bez medzistropu

6.3.1 Zmena koncepcie vetrania a finalizácia profilu tunelových rúr

Strategickým rozhodnutím, ktoré ovplyvnilo viacero aspektov projektu, bola definitívna zmena systému vetrania z pôvodne plánovaného polopriečného na finálne riešenie s pozdĺžnym vetraním. Tento prístup je realizovaný pomocou prúdových ventilátorov rozmiestnených v klenbe tunela.

VÝUSTNÝ OBJEKT



Obrázok 6: Vľavo priečný rez tunelom a vetracou šachtou, vpravo pôdorys vetracej šachty

Priamym dôsledkom tejto zmeny bola strata potreby budovať po celej dĺžke tunela medzistrop, ktorý mal pôvodne slúžiť ako oddelený vzduchotechnický kanál. Napriek tomu, že medzistrop nebol

realizovaný, fyzická príprava na jeho osadenie (vystužené ozuby v ostení) zostala v časti tunela (od bloku J399 v južnej rúre a S400 v severnej rúre) zachovaná, čo predstavuje trvalú konštrukčnú charakteristiku zdedenú z pôvodného projektu. Medzistrop bol nakoniec vybudovaný iba v špecifickom mieste – v núdzovom zálive č. 3 v oboch tunelových rúrach, a to z dôvodu napojenia vetracích kanálov vedúcich z už existujúcej vetracej šachty.

6.3.2 Nové funkčné využitie vetracej šachty

Vetracia šachta, takmer dobudovaná v čase prevzatia stavby, stratila v dôsledku zmeny koncepcie vetrania svoju pôvodnú funkciu. Namiesto jej demolácie bolo prijaté rozhodnutie adaptovať ju na nové účely.

7. ZÁVER A SKÚSENOSTI Z PROJEKTU TUNELA VIŠŇOVÉ

Chronologická púť spoznávania masívu Višňové predstavuje zaujímavý príklad evolúcie riadenia rizík v modernom tunelárstve. Projekt prešiel cestou od všeobecnej geologickej neistoty, cez identifikáciu konkrétnych a merateľných hydrogeologických hrozieb, následné odhalenie časovo závislých procesov degradácie materiálov, až po zásadné úpravy v procese výstavby.

Z tejto komplexnej prípadovej štúdie vyplývajú tri kľúčové skúsenosti, ktoré majú nadčasovú platnosť pre akýkoľvek budúci veľký podzemný projekt:

Projekt jednoznačne potvrdil, že v zložitých geologických podmienkach môžu byť povrchové metódy prieskumu nedostatočné. Bez priamych dát z prieskumnej štôlne by realizácia hlavných tunelových rúr mohla byť vysoko riziková.

Geotechnické riziko nie je statický parameter definovaný na začiatku projektu. Projekt Višňové ukázal, že riziko, respektíve jeho poznanie sa vyvíja v čase. Význam dlhodobého monitoringu sa preukázal pri odhalení časovo závislých fenoménov, ako sú síranová agresivita na betón a inkrustácia (upchávanie) drenážnych systémov, ktoré sú kľúčové pre dlhodobú životnosť a prevádzkyschopnosť diela.

Najdôležitejším záverom je, že v komplexnom podzemnom diele je kvalita a precíznosť stavebnej realizácie rovnako kritickým faktorom ako samotné zvládnutie geologických podmienok. zlyhanie v kontrole kvality môže úplne negovať všetky poznatky a bezpečnosť získanú náročným a nákladným prieskumom.

Tunel Višňové tak zostáva nielen kľúčovou dopravnou stavbou pre Slovensko, ale predovšetkým mementom a referenčnou prípadovou štúdiou pre budúce generácie geotechnických inžinierov a tunelárov. Jeho odkazom je, že najhlbšie poznanie horniny je bezcenné bez rovnako hlbkej zodpovednosti pri jej pretváraní.

LITERATURA

AMBERG ENGINEERING SLOVAKIA, s.r.o. *Dokumentácia skutočnej realizácie stavby. 2024–2025.*

BOHYNÍK, J.; COPLÁK, M.; MALÍK, P.; ŠVASTA, J. *Určenie infiltračnej oblasti a dopadov razenia tunela Višňové na podzemné vody. In Proceedings, Tunely a podzemné stavby 2018; Žilina, 2018.*

GEOFOS s. r. o. *Diaľnica D1 Višňové – Dubná Skala: Inžinierskogeologická časť – Záverečná správa. Žilina: GEOFOS s. r. o., 2007. Geofond, ev. č. 361-1/2006.*

MATEJČEK, A.; BOHYNÍK, J. *Význam realizácie prieskumnej štôlne pre tunel Višňové (The Importance of the Exploration Gallery Driven for the Višňové Tunnel). Tunel 2006, (4).*

MATEJČEK, A. *Základná geotechnická správa tunela Višňové. 2011.*

ONDRÁŠIK, R.; MATEJČEK, A.; DURMEKOVÁ, T. *Experience from Investigation of Tectonically Extremely Deteriorated Rock Mass for the Highway Tunnel Višňové, Slovakia. In Proceedings, Engineering Geology for Society and Territory - Volume 6; Springer: Cham, 2015.*

Ing. Peter Paločko, PhD.

Amberg Engineering Slovakia s.r.o. , Bratislava, Slovakia

ppalocko at amberg. sk

Ing. Ján Boltvan

Amberg Engineering Slovakia s.r.o. , Bratislava, Slovakia

jboltvan at amberg. Sk