

# ZAJÍMAVÁ TECHNICKÁ ŘEŠENÍ VÝSTAVBY TUNELŮ NA PŘÍKLADECH ZE ZAHRANIČNÍ PRAXE

Libor Mařík

## 1 Úvod

Použití betonu při výstavbě podzemních staveb má svou nezastupitelnou úlohu jak při zajištění dočasné či trvalé stability podzemního díla, tak při využití pro speciální účely. Provádění betonových konstrukcí v podzemí je zpravidla spojeno se složitými podmínkami aplikace a technologický postup práce je neoddělitelně spjat s použitou metodou tunelování. Příspěvek nabízí pohled do světa podzemních staveb ve třech rovinách.

První se zabývá originální technologií rozšíření starého železničního tunelu bez přerušení provozu, druhá ukazuje možnost využití prefabrikovaného tunelového ostění pro získávání geotermální energie z horninového masivu při ražbě tunelu pomocí tunelovacího stroje a třetí dává nahlédnout do světa ražení tunelů v extrémních podmínkách bobtnavých hornin pomocí konvenčního tunelování. Popisuje nutná doprovodná opatření pro zajištění stability díla a udržení celistvosti betonového ostění, které musí vzdorovat horninovému tlaku. Článek je napsán na základě zahraničních materiálů uvedených v literatuře a na základě informací získaných při návštěvě autora na zahraničních stavbách.

## 2 Rozšíření železničních tunelů bez přerušení provozu

### 2.1 Základní informace

Obdobně jako v České republice tvoří základ železniční infrastruktury v SRN tratě, jejichž parametry odpovídají požadavkům na trasování v 19. století. Německé spolkové dráhy provozují 380 železničních tunelů, které stářím i průřezovými parametry odpovídají době výstavby. Dvoukolejné železniční tunely z tohoto období mají osovou vzdálenost kolejí 3,5 m, světlou plochu 40 m<sup>2</sup> až 55 m<sup>2</sup> a jejich elektrifikace je při zachování původního ostění možná pouze za cenu prohlubování počvy tunelu a za použití speciálních konstrukcí pro uchycení trakčního vedení. Minimálního zvětšení profilu lze dosáhnout lokální výměnou původní kamenné obezdívky za stříkaný beton. To ale neumožňuje zvětšit osovou vzdálenost kolejí na požadované 4 m. Rozšiřování tunelu za provozu klasickými metodami je vázáno na noční výluky délky 5 až 6 hodin. Pracovní cykly a technologické postupy je nutno přizpůsobit etapovosti výstavby v krátkých výlukách, což vede k vysokým nákladům spojeným s neefektivním vytížením stavebních strojů i vysokému podílu neproduktivní práce stavebního personálu. Předmetný úsek se nachází na hustě provozované trati mezi městy Bingen nad Rýnem a Saarbrückenem. A je vytížen od časných ranních až do pozdních nočních hodin. Jeho součástí jsou více než 140 let staré dvoukolejné tunely Jähroder a Mausenmühlen. Vzhledem k vysoké frekvenci železniční dopravy by náhrada autobusovou dopravou nebyla hospodárná. Proto byla na jejich rozšíření bez přerušení provozu vyvinuta speciální metoda, která se dá využít v obdobných

podmínkách i při rekonstrukci dalších z provozního hlediska nevyhovujících starých tunelů.

## 2.2 Princip nového způsobu výstavby „tunel v tunelu“

Aby bylo možné použít nový způsob výstavby bez dlouhodobého přerušení provozu na stávající trati, bylo nutné provést přeložení kolejí a v úsecích před portály i ve vlastním tunelu nahradit dvokolejný provoz jednokolejným s umístěním koleje ve středu tunelu. Tím vznikl na bocích tunelu dostatečný prostor pro práce na rozšíření tunelu. Včasná úprava jízdního řádu, která zohledňovala lokální zjednokolejnění tratě, vedla k minimalizaci omezení pro cestující. Z hlediska provozování železnice představovala nová technologie výstavby vývoj stacionární ochranné skruže na portálech tunelu a pohyblivé skruže, která umožnila rozšíření tunelu za provozu. Pro vlaky průjezdná pohyblivá konstrukce, která pojížděla tunelem po vlastních kolejích, umožnila provádění veškerých prací souvisejících s rozšířením tunelu.

Jednalo se o tyto činnosti:

1. Demontáž stávajícího kamenného ostění tunelu;
2. Odstranění zakládky za ostěním;
3. Rozšíření tunelu bagrováním, dlátováním nebo pomocí trhacích prací;
4. Montáž výztuže primárního ostění;
5. Nástřik betonu primárního ostění;
6. Vrtání a instalace radiálních svorníků pro zajištění stability výrubu.

Před pohyblivou skruží, která byla po dokončení všech projekčních a konstruktérských pracích nazvána „razící tunelový portál“, byla stabilita tunelu zajištěna původním ostěním z kamene. Za pohyblivou skruží až do betonáže monolitického definitivního ostění zajišťovalo stabilitu výrubu primární ostění ze stříkaného betonu a sítě společně s prokotveným nosným prstencem horniny. Z provozního hlediska musel být průjezdný průřez uvnitř razícího tunelového portálu zachován i v případě mimořádného zatížení, jakým mohlo být např. zavalení horninou, nebo neodborné ovládání instalovaného zařízení, ke kterému by mohlo přes všechna opatření dojít. Nutnou podmínkou pro splnění tohoto požadavku bylo spojení konstrukce razícího portálu a železničního svršku uvnitř vedoucí koleje do jednoho neoddelitelného celku. V případě neočekávaného posunu tunelového razícího portálu se společně posunula i provozovaná kolej a nutný průjezdný průřez byl zachován. Výhodou navržené metody rozšiřování tunelu je minimální omezení provozu během výstavby. Práce, při kterých použité stroje zasahovaly do průjezdného průřezu, bylo možné provádět v přirozených provozních pauzách a nebylo nutné žádat o výluky. Po zajištění stability výrubu primárním ostěním následovala betonáž monolitického ostění. Postup výstavby odpovídal zvyklostem používaným při betonáži ostění v ražených úsecích tunelů. Po montáži samonosné výztuže byl blok betonáže zabetonován do pojezdného bednění.

## 2.3 Popis stávající konstrukce a cíle rozšíření tunelu

Stávající světlý profil tunelů má poloměr horní klenby 4 m se středem 2,2 m nad úrovní temene kolejnice. Boky tunelu mají poloměr 7,5 m a osová vzdálenost kolejí je jen 3,5 m. Aby tunel vyhověl novým požadavkům na zvětšení osové vzdálenosti kolejí na 4 m a elektrifikaci tratě, musel být stávající profil tunelu zvětšen o cca 1,5 m. Zvětšení tunelu

bylo navrženo tak, aby po zajištění výrubu stříkaným betonem a po betonáži definitivního ostění z monolitického betonu světlý líc horní klenba tvořil oblouk o poloměru 4,97 m a boky tunelu oblouk o poloměru 14,4 m. Po obou stranách rozšířeného profilu tunelu je navržen chodník o šířce 0,6 m. Při tomto šířkovém uspořádání není nutné v ostění provádět záchranné výklenky a personál údržby tunelu může tunelem bez problému procházet.



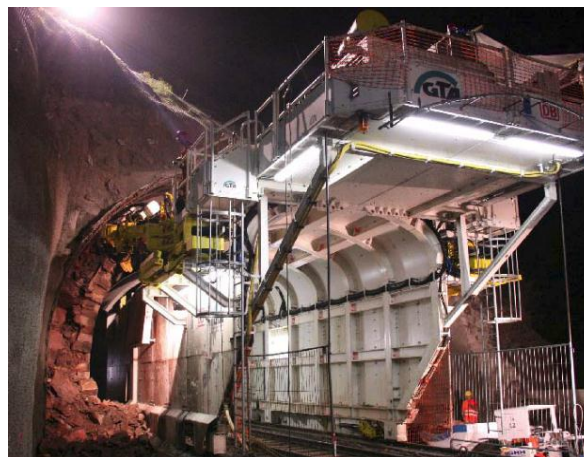
**Obr. 1** Základ a kolejnice pro pojezd razícího tunelového portálu a bednicího vozu



**Obr. 2** Průjezdny prostor pod razícím tunelovým portálem



**Obr. 3** Smontovaný razící portál



**Obr. 4** Razící portál před tunelem

#### 2.4 Praktické využití na tunelech Jährodter a Mausenmühlen

Pro použití metody „tunel v tunelu“ byly vybrány dva nedaleko od sebe ležící tunely Jährodter (149 m) a Mausenmühlen (129 m) na neelektrifikovaném traťovém úseku délky 1200 m mezi městy Bingen a Saarbrücken. Stavba byla po dobu realizace přístupná příjezdovou komunikací mezi oběma tunely. Po dobu jednoho roku byl celý úsek provozován jako jednokolejný s kolejí přeloženou do středu tunelů. Mezi tunely byla kolej umístěna ve své původní poloze, a prostor druhé koleje byl využit jako přístupová komunikace od centrálního zařízení staveniště k portálům tunelů. Stísněné podmínky před portály zde neumožňovaly vytvořit větší plochy zařízení staveniště, než cca 500 m<sup>2</sup>. Součástí těchto ploch byl stabilní tunelový portál zřízený jako ochrana pro projíždějící vlaky při dopravě materiálu přes provozovanou kolej. Podél koleje byly v tunelu vytvořeny tuhé základy, na které byly umístěny kolejnice pro pojezd razícího tunelového portálu

a bedničího vozu definitivního ostění. Kolejové lože mezi těmito základy bylo uložené jako v ochranné jímce, neboť oba základy vzájemně spínaly kotvy. Razičí tunelový portál byl smontován před tunelem a skládal se ze 6 m dlouhého ochranného límce, který umožňoval hydraulické zapření do původního tunelového ostění a zajišťoval jeho stabilitu po dobu výstavby. Za ochranným límcem následoval 2 m dlouhý pracovní prostor, ve kterém se odebírala zakládka za ostěním, která sloužila jako drenážní vrstva a demontovalo stávající tunelové ostění z pískovcových kvádrů tl. 450 mm. V pracovním prostoru byly na konstrukci razičího portálu osazeny kromě bouracího kladiva i 2 lafety na vrtání radiálních kotev a paralelních vrtů pro použití trhacích prací při rozpojování horniny. Lafety umožňovaly vrtání v libovolném směru. Trhací práce byly používány pro nakypření horniny k usnadnění rozpojování masivu za ostěním a probíhaly v pauzách mezi průjezdy vlaků. Primární ostění tvořil stříkaný beton vyztužený dvěma vrstvami sítí a radiální kotvy. Za pracovním prostorem chránila prostor provozovaného tunelu pod nově rozšířeným a primárním ostěním zajištěným tunelem 10 m dlouhá konstrukce razičího tunelového portálu. Při rozšíření tunelu bylo nutné vytěžit z jednoho běžného metru tunelu cca 30 m<sup>3</sup> horniny. Materiál z výrubu byl nakladači vyvážen v bočním prostoru podél razičího portálu k portálu tunelu a jeřábem přemístěn pod ochranou stabilní konstrukce před portálem na bok tunelu. Po ukončení razičských prací na tunelu Jährodter pokračoval razičí tunelový portál stejným postupem na rozšíření tunelu Mausenmühlen. Pod zajištěním výrubu primárním ostěním v celé délce tunelu byly vybetonovány patky tunelu, jejichž součástí byl i kabelový kanál pod budoucími služebními chodníky.



Obr. 5 Montážní vůz v tunelu



Obr. 6 Výztuž definitivního ostění

Definitivní ostění tvořila monoliticky vybetonovaná klenba minimální tloušťky 350 mm z betonu odolného proti průsakům. Izolační fólie nebyla v tunelech použita. Na závěr byl celý úsek zprovozněn jako dvoukolejný s osovou vzdáleností kolejí 4 m a s možností elektrifikace tratě. Bez zajímavosti nejsou ani termíny výstavby. Přípravné práce probíhaly v měsících říjen až prosinec 2006. Přestavba tratě na jednokolejný provoz proběhla ve víkendové 50 hodin trvající výluce od 15. do 17. prosince 2006. Vlastní razičské práce byly zahájeny 15. ledna 2007 a na konci října 2007 byly oba tunely rozšířeny a ve zbývajících 10 týdnech do konce roku probíhala betonáž definitivního ostění, demontáž základů pro pojezd razičského portálu a bedničího vozu. Do změny jízdního řádu 2007/2008 již byla trať opět provozována jako dvoukolejná a oba více než 140 let staré tunely byly modernizovány podle nejmodernějších požadavků s předpokládanou další životností 100 let.

### 3 Úprava ostění tunelu Jenbach pro získávání geotermální energie

Dvoukolejný železniční Tunel Jenbach celkové délky 3 474 m leží v Rakousku na severní přístupové trase budoucího Brennerského bázového tunelu, která je označována jako stavební úsek H8. Ražba tunelu probíhala pomocí tunelovacího stroje (Hydroschild) s aktivním pažením čelby o průměru 13 m a ploše výrubu 133 m<sup>2</sup>. Výška nadloží se pohybuje od 0,5D do 1,6D, kde D je průměr výrubu tunelu. Ostění tunelů tvoří železobetonové tybinky tloušťky 50 cm a jako protipožární ochrana monolitické ostění tloušťky 20 cm. Pro zajištění bezpečnosti provozu slouží 7 záchranných šachet a štola o průměru 4 m. Trasa železnice spadající to systému TEN-T na ose Berlin – Palermo vede údolím řeky Inn a vlastní tunel je ražen v prostředí zvodnělých sedimentů a pod úrovní hladiny podzemní vody. Železnice slouží jako alternativní způsob přepravy zboží k silniční nákladní dopravě. Při ražbě tunelovacím strojem TBM se standardně v obdobných geotechnických podmínkách využívá k zajištění stability výrubu prefabrikované ostění ze železobetonových tybinků. V průběhu výstavby navrhl zhotovitel investorovi změnu ve formě vývoje speciálního tybinku, který je díky osazenému potrubí pro vedení média schopen odnímat z horninového masivu geotermální energii a využívat ji pro vytápění provozní budovy na povrchu území. Do původně navržených tybinků je osazeno potrubí o vnějším průměru 20 mm, které je navázáno na vnitřní stranu vnější výztuže tybinku.



Obr. 7 Vedení potrubí v počvě tunelu



Obr. 8 Výztuž s vedením potrubí v tybinku

Tím je zajištěno, že nedochází k oslabení krycí vrstvy výztuže a potrubí je na rubu ostění přiléhající k horninovému masivu. Vzdálenost mezi trubkami se pohybuje mezi 20 cm a 30 cm a do jednoho prefabrikovaného dílce je osazeno cca 25 potrubí. Propojení trubek mezi jednotlivými tybinky je provedeno pomocí připravených spojek integrovaných do prefabrikátu. Prstenec ostění se skládá ze sedmi dílců a jednoho závěrového menšího dílce. Vsazené potrubí nemá vliv na celkovou únosnost ostění a nijak ji nesnižuje. Po sestavení prstence ostění je potrubí mezi jednotlivými tunelovými dílci pospojováno pomocí speciálně upravených spojek. Tunel Jenbach byl zhotovitelem vybrán jako pilotní projekt a zkušební úsek délky 54 m je prvním použitím tohoto typu tybinku při ražbě tunelu pomocí TBM. Důvodem výběru právě tunelu Jenbach je podchod obce a přítomnost potenciálních odběratelů energie v bezprostřední blízkosti vyústění záchranných šachet na povrch území. Výška nadloží dosahuje v místě obce Jenbach cca 16 m a tunel vede ve zvodnělých píscích a štěrcích paralelně s řekou Inn. To představuje optimální stav pro

využití tunelu k získávání geotermální energie. K rozhodnutí o nasazení zkušebního úseku došlo v okamžiku, kdy již běžela ražba tunelu a výroba tybinků. Proto musela být v návrhu zohledněna celá řada okrajových podmínek a zkušební úsek musel být integrován do projektové dokumentace tunelu. Vzhledem k velkému tlaku na dodržení termínu výstavby nesmělo dojít vlivem navržené změny technického řešení ke zdržení jednotlivých činností při ražbě tunelu. Potrubí dvou až tří prstenců ostění je spojeno do jednoho okruhu a vedeno k rozdělovacímu modulu, ze kterého je dále vedeno únikovou šachtou do objektu obce Jenbach na povrchu území cca 90 m od ústí šachty. Celý systém vedení, tepelné čerpadlo i tunelové ostění je osazeno rozsáhlým měřicím zařízením, aby bylo získáno maximum potřebných údajů pro budoucí projekty. Vzhledem k tomu, že do prefabrikovaného ostění je dále vybetonováno ještě ostění sloužící jako ochrana proti účinkům požáru, nebudou tybinky, ani spojení potrubí při provozování tunelu dostupná.



**Obr. 9** Spojování potrubí mezi tybinky



**Obr. 10** Montáž tybinků v tunelu Jenbach

Proto je od každého ze 13 samostatných okruhů vedeno potrubí k rozdělovači umístěnému za požárními dveřmi únikové šachty. To umožňuje obsluhu rozdělovače bez omezení provozu v tunelu. Komplikace přináší minimální prostor v místě napojení tunelu na záchrannou štolu, kde pro vedení kabelů není možné využít prostor již tak silně využitého kabelovodu. Proto bylo rozhodnuto vedení potrubí umístit do počvy tunelu. V průběhu výstavby bylo nutno řešit celou řadu detailů, které by odpadly v případě, že by bylo s využitím tunelu jako zdroje geotermální energie počítáno již v projektové dokumentaci. Vzhledem k tomu, že tunely mnohdy podcházejí zastavěná území a jsou zdrojem geotermálního potenciálu, mohou být určitým vylepšením zásobování energií objektů v nadloží. Prefabrikované ostění označované jako „Energietübbing“ je výsledkem společného vývoje firem Rehau AG a Züblin AG.

#### **4 Opatření pro ražbu a sanaci tunelů v bobtnavých horninách**

Přítomnost bobtnavých hornin komplikuje způsob zajištění stability výrubu jak při vlastní ražbě, tak i při provozování tunelu. Projevy bobtnání mohou být dlouhodobé a netýkají se zdaleka jen primárního ostění tunelů. Při provozu tunelu způsobují nadměrné deformace vlivem bobtnání poškození spodní i horní klenby ostění a mnohdy vedou i k destrukci mezistropu a větracích kanálů příčně, nebo polopříčně větraných tunelů. Na příkladu dvou

tunelů článek ukazuje, jakým způsobem bylo při výstavbě tunelů v bobtnavých horninách postupováno.

#### **4.1 Dálniční tunelu Bosruck na dálnici A9 v Rakousku**

##### **4.1.1 Základní informace a historie tunelování v masivu Bosruck**

Dálniční tunel Bosruck je součástí dálnice A9, která spojuje města Linec a Gratz a míří dále na jih do Slovinska. Historie tunelování pod masivem Bosrucku sahá do roku 1901, kdy byla zahájena výstavba 4 766 m dlouhého jednokolejného železničního tunelu. Ta trvala až do roku 1906 a geotechnické podmínky pro tuneláře připravily nejedno nemilé překvapení. Ražbu provázely četné průvaly vod až o přítocích 1100 l/s. Při prvním obrovském průvalu vod došlo v roce 1902 ke změně dodavatelské firmy a císařskou Státní správu železnic vystřídala italská firma Zaterande & Co. Ani této firmě se smůla nevyhnula a roce 1905 při dalším obrovském průvalu vod doprovázeném výbuchem metanu zahynulo 14 tunelářů. Negativní vliv tunelování na režim podzemních vod vedl k úplnému vyschnutí potoka u městečka Spital am Pyhrn, který byl oblíbeným výletním místem. Komplikace však provázely tunel i po uvedení do provozu a negativní vlivy horninového tlaku, průsaků vody a kouře z parních lokomotiv si vyžádaly rekonstrukci, která trvala od roku 1963 až do roku 1965. Zkušenosti z výstavby železničního tunelu vedly před výstavbou dálničního tunelu k rozhodnutí vyrazit v předstihu odvodňovací a větrací štolu. Její výstavba započala v roce 1978 a opět ji provázely průvaly vod a metanu, tentokrát s již menší intenzitou 300 l/s. Ražba byla ukončena v roce 1980 a ještě v tomtéž roce začala ražba první (východní) tunelové trouby 5500 m dlouhého tunelu, který je součástí dálnice A9. Tunel směrem od severu k jihu prochází nejprve tzv. „Lískovým pohořím“ (Haselgebirge), které je tvořeno převážně břidlicemi, dolomity, sádrovcí a slínovci. Pak přechází do pásma vápenců a dolomitů a následně opět do pásma označovaného jako „Haselgebirge“. Směrem jihu se geotechnické poměry zlepšují a tunel prochází pásmem tvořeným pískovci, jílovcí a slínovci. Ražba od severu probíhala bez větších komplikací a se sotva měřitelnými deformacemi výrubu. Měsíc po průchodu kaloty problematickým pásmem sádrovců se však na primárním ostění začaly objevovat první poruchy a nárůst deformací nebylo možné zastavit ani po dalších opatřeních. Deformace se úplně zastavily až po vestavění definitivního ostění. Jak se později ukázalo, ani zvětšením odporu vestavbou definitivního ostění se problém zcela nevyřešil. Tunel byl uveden do provozu v roce 1983 a již v roce 1994 bylo nutné provést sanační práce, a to nejen v provozované tunelové troubě, ale i v odvodňovací a větrací štolu. Vlivem zvýšeného horninového tlaku docházelo v provozovaném tunelu k praskání desek mezistropu, ale také k poškození bočních drenáží v poruchové zóně ve staničení TM 600, které vedlo k dalšímu zvodnění počvy tunelu. Vzhledem k závažnosti poruch byl navržen v problematických úsecích geomonitoring, jehož výsledky budou sloužit jako podklad pro návrh sanací.

##### **4.1.2 Výstavba druhé tunelové trouby**

V souvislosti s řadou tragických nehod v jednotroubových alpských tunelech došlo k úpravě evropské legislativy a definování bezpečnostních standardů pro provozování silničních tunelů. Markantní zvýšení bezpečnosti provozu lze dosáhnout výstavbou druhé tunelové trouby, která v případě požáru v tunelu slouží jako bezpečná úniková cesta. Stejně jako v případě tunelů Tauern, nebo Katchberg bylo rozhodnuto i o výstavbě druhé tunelové trouby dálničního tunelu Bosruck. Výstavba druhé tunelové trouby začala v roce 2009

a vlastní ražba byla zahájena v lednu 2010. Práce jsou plánovány do října 2013 a předpokládaná výše investičních nákladů činí 127,4 mil. EUR.



**Obr. 11** Čep pro stykování rámu výztuže



**Obr. 12** Deformační elementy v ostění

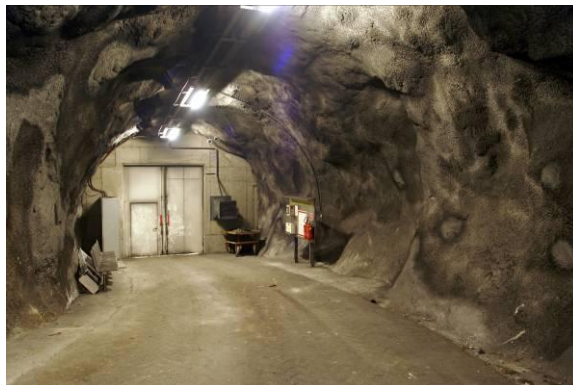
Profil dálničního tunelu je standardně navržen pro šířku mezi obrubníky 7,5 m a vzhledem k jeho délce je vybaven nouzovými zálivky. Průjezdny průřez umožňuje průjezd vozidlům do výšky 5,7 m. V místě tlačivých hornin přechází podkovovitý tvar tunelu na kruhový a tloušťka definitivního ostění z betonu C35/45 se zvětšuje ze 300 mm na 700 mm, přičemž tloušťka spodní klenby je min. 1 m. Hydroizolační fólie tloušťky 3 mm je navržena po celém obvodu tunelu jako tlaková. Při projektování byly zohledněny všechny doposud získané výsledky a zejména zkušenosti z předchozích ražeb. Mimořádná pozornost je věnována zejména průchodu problematickým pásmem „Haselgebirge“. Vzhledem k citlivosti horninového masivu na vodu, která způsobuje bobtnání sádrowce, hraje zásadní roli dokonalé odvodnění a minimalizace použití technologické vody. Vrtání pro trhací práce a kotvení proto probíhá bez vodního výplachu a používá se pouze výplach vzduchem. Vzhledem k očekávaným deformacím výrubu byly do primárního ostění navrženy kompenzační elementy, které se dnes nasazují i na dalších tunelech, kde lze očekávat zvýšené deformace primárního ostění a kde by vlivem deformací mohlo dojít k jeho podrcení a ztrátě integrity. Při průchodu problematickým úsekem se však očekávané deformace neprojevily a od dalšího osazování kompenzačních elementů bylo upuštěno.

Vzhledem k tomu, že při ražbě železničního i dálničního tunelu došlo ke zvýšení bobtnacích tlaků, lze dosažení dobrých výsledků přičíst výborné technologické kázně, zejména perfektně upravené a absolutně suché počvě tunelu. Technologická kázeň a sešranost osádky na čelbě je při ražbě v tak složitých geotechnických podmínkách klíčem k úspěchu. Projevuje se mimo jiné i vysokým pracovním nasazením. Průměrně bylo na tunelu za 24 hodin vyraženo 6 záběrů délky 1,7 m, přičemž rekord představovalo 8 záběrů za 24 hodin. Kromě zručnosti tunelářů přispívaly k vysokému výkonu i promyšlené detaily zjednodušující práci. K nim patřil např. detail napojení výztužných rámu primárního ostění mezi kalotou a jádrem. Zatímco rámy v kalotě byly klasicky spojovány šroubovanými spoji, které známe i z našich tunelů, styk rámu mezi kalotou a jádrem zajišťuje pouze čep, který umožňuje po nasazení rámu s protikusem rychlé upnutí pomocí ocelového klínu. K ražbě druhé tunelové patří i tunelové propojky, které spojují nově ražený tunel s tunelem provozovaným. Z hlediska geotechnických poměrů se jižní část tunelu jeví jako méně problematická. K bezpečnostním prvkům patří nouzové zálivky, které slouží pro bezpečné odstavení vozidla v případě poruchy. Šířka vozovky je v místě zálivky

zvětšena o 3,8 m. V tunelu je při jeho délce 5 425 m navrženo pět nouzových zálivů o ploše výrubu 160 m<sup>2</sup>, pět průjezdných tunelových propojek s plochou výrubu 60m<sup>2</sup>, šest průchozích propojek s plochou výrubu 45 m<sup>2</sup>, 43 výklenků nouzového volání a 48 požárních výklenků. Zásadní význam kladou rakouští tuneláři kotvení a preciznímu provádění primárního ostění. To má plnou tloušťku již ve druhém záběru od čelby. Ve druhém záběru od čelby je také provedeno plnohodnotné zakotvení kaloty. Hlavy kotev nejsou zastříkány do ostění a jejich vizuální kontrola umožňuje podle deformace plechu sledovat, jak je kotva namáhána.



**Obr. 13** Monolitické ostění  
vzduchotechnické štoly



**Obr. 14** Ostění tunelové propojky ze  
stříkaného betonu

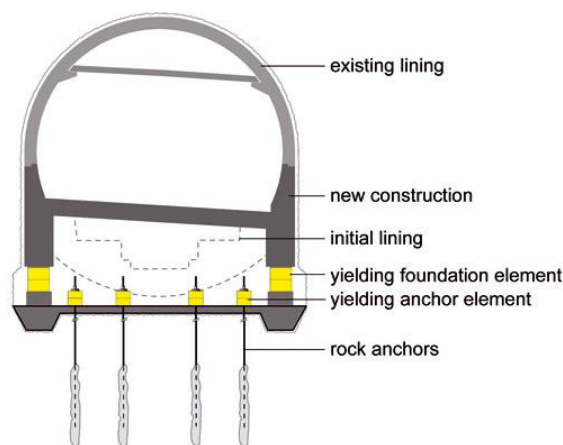
Již před ražbou první tunelové trouby tunelu Bosruck byla vyražena větrací a odvodňovací štola. Ta je částečně zajištěna pouze primárním ostěním ze stříkaného betonu, částečně monolitickým ostěním. Pohled do vzduchotechnické štoly zajištěné monolitickým ostěním ukazuje **Obr. 13**. Štola je s provozovaným tunelem spojena tunelovými propojkami a slouží zároveň jako úniková cesta. Propojku, stejně jako navazující úsek větrací a odvodňovací štoly zajišťuje pouze primární ostění. Propojka je od štoly a nouzového zálivu oddělena požárně odolnými dveřmi s panikovým kováním a je přetlakově větrána. Prostor propojky slouží jako čekací prostor a případný návštěvník je informován prostřednictvím tabule vpravo přede dveřmi (viz **Obr. 14**), že se nachází v bezpečném prostoru a záchranné složky již k němu míří. S dispečinkem tunelu může hovořit po stisknutí tlačítka telefonem.

Po uvedení druhé tunelové trouby do provozu bude první tunelová trouba uzavřena a bude provedena rozsáhlá rekonstrukce a modernizace vybavení tunelu. Opravy tunelu předpokládají v určitých úsecích vybourání definitivního ostění a jeho plnou náhradu novým. V takovém případě bude možné posoudit kvalitu primárního ostění ve značně agresivním prostředí po 30 letech od nástřiku, neboť pohoří „Haselgebirge“ obsahuje kromě uvedených hornin i vysoký podíl soli. Téma životnosti primárního ostění je spojeno s možností obrovských úspor investičních nákladů, pokud by se podařilo prokázat jeho dlouhodobou funkci a zejména zachování požadované únosnosti.

## 4.2 Rekonstrukce silničního tunelu Chienberg ve Švýcarsku

Silniční tunel Chienberg délky 2 294 m tvoří stávající část hlavního silničního tahu H2 z Liestal do Sisachu a leží 25 km jižně od Basileje. Po délce tunelu je použito několik konstrukčních systémů a technologických postupů výstavby. Od západu je tunel prováděn v délce 562 v otevřené stavební jámě. Hloubený úsek přechází do úseku délky 198 m

raženého pod zastropením. Z celkové délky ražené části tunelu 1443 m se polovina nachází v bobtnavých horninách s obsahem anhydritu. Východní příportálová oblast tunelu je opět prováděna v otevřené stavební jámě délky 91 m. Ražba tunelu probíhala konvenční metodou členěným výrubem zajištěným primárními ostěním ze stříkaného betonu. Vzhledem k očekávaným vysokým bobtnacím tlakům byl použit v problematickém úseku raženého tunelu kruhový tvar výrubu s tloušťkou definitivního ostění 0,7 m až 1,1 m. Pro úseky s nízkým nadložím a bobtnavými horninami pod úrovní počvy tunelu byla původně navržena plošná deformační zóna. Na základě nevhodného odhadu dlouhodobého chování bobtnavých hornin však bylo od návrhu této deformační zóny upuštěno. Ze stejných důvodů probíhala paralelně ražba i betonáž definitivního ostění, přičemž spodní klenba definitivního ostění byla uzavírána nejpozději 25 týdnů, resp. 450 m za výrubem kaloty. V prvním úseku raženého tunelu délky 90 m s nadložím 25 m až 30 m, kde se pod počvou tunelu vyskytovaly bobtnavé horniny, a nadloží tunelu tvořil zvětralý slínovec, se již 4 měsíce po uzavření spodní klenby objevilo nadzvedávání vrcholu tunelu, které se promítalo až na povrch území. Obdobné chování i časový průběh deformace byl zaznamenán i v dalším úseku délky 140 m s nadložím 40 m až 50 m. Po roce se zdvihání ve vrcholu klenby pohybovalo v prvním úseku do hodnoty 83 mm, v úseku s vyšším nadložím do 30 mm. Na povrchu se vytvořil příčný hřbet o šířce až 50 m kolmo k ose tunelu. Rychlost zdvihání tunelu se pohybovala 4,5 mm/měsíc. Na obou bocích tunelu byly osazeny ve vzdálenosti 15 m od osy kluzné mikrometry, jejichž výsledky potvrdily proces bobtnání nejen pod počvou tunelu, ale v širší oblasti ovlivněné ražbou tunelu. Tato skutečnost opět otevřela otázku výstavby tunelu obvyklým způsobem s využitím deformačních elementů.



**Obr. 15** Systém deformačních elementů



**Obr. 16** Kotvení počvy tunelu

Posouzením celé řady aspektů vyšla jako vítězná varianta řešení vzniklého problému metoda profesora Kovářího založená na konceptu modulárního deformačního systému. Již vyražený tunel byl v délce 430 m přestrojen podle nového návrhu, kdy bylo ostění uloženo na válcové základové elementy o výšce 1 m a o průměru 900 mm, které umožňovaly omezovat zatížení působící proti bobtnacímu tlaku horniny. Tuhostí elementu bylo možné regulovat jednak tlak ve vrcholu tunelu, jednak tlak způsobený bobtnáním horniny, čímž by nemělo dojít k přetížení ostění. Ploché dno mezi základy bylo zajištěno řadami těžkých předpjatých kotev. Aby nedošlo v krátkém čase k vyčerpání únosnosti kotev, byly jejich hlavy upraveny deformačními prvky tak, aby bylo možné v kotvách udržovat zhruba konstantní sílu. Materiál deformačních prvků pod hlavami kotev byl obdobný, jaký tvořil

základové prvky tunelu. Kotevní tyč byla protažena osou prvku a hlava kotvy dosedala na deformační element. Protože tlak ve vrcholu tunelu závisí na výšce nadloží, byly podél problematického úseku bobtnavých hornin nasazeny základové deformační elementy o různé tuhosti. Elementy byly vyrobeny ze speciálního materiálu tvořeného cementem, pískem, skelnou pěnou tvořící póry, ocelovými drátky a výztuží. Speciálním vyztužením elementů bylo omezeno jejich příčné protažení a při osovém zatížení docházelo k aktivaci trojosé napjatosti a postupnému uzavírání pórů. Nejednalo se jen o nový druh materiálu, ale o nový typ elementu s vysokou schopností deformace a vysokou únosností. Při laboratorních zkouškách dosahovalo při poměrném stlačení 45% napětí 8,5 MPa, čemuž odpovídá síla 5,4 MN. Při ukončení zkoušky dosahovala síla 11,4 MN.

Délka úseku tunelu určeného k přestrojení byla stanovena podle podmínky, kdy poloha anhydritu zasahovala méně, než 5 m pod počvu tunelu a nadloží nepřesahovalo 50 m. Podle tohoto kritéria byla provedena opatření na západním úseku tunelu v délce 370 m a na východním úseku v délce 60 m. V těchto úsecích bylo ostění tunelu vybouráno a původně kruhový profil tunelu upraven na tlamovitý s plochým dnem. Ostění tunelu bylo podepřeno celkem 570 deformačními elementy a do dna tunelu bylo osazeno 1000 skalních kotev o délce 21 m a únosnosti 1500 kN. K úpravám došlo v polovině roku 2005 a 20. 12. 2006 byl tunel uveden do provozu. Současné zkušenosti odpovídají očekávání. V první zóně došlo k úplnému uklidnění deformací, ve druhé zóně ještě zcela neodezněly. Velkou výhodou bylo, nejen že kotvení bylo instalováno do volného prostoru pod vozovkou, ale i že dno tunelu je přístupné a umožňuje provádění případných stavebních prací bez přerušení provozu v tunelu.

## 5 Závěr

Uvedené příklady ze zahraničí ukazují, že výstavba tunelů nemusí být rutinní záležitostí a extrémně složité geotechnické podmínky, nebo stávající stav provozovaných tunelů přináší inženýrům i barabům četná úskalí. Zahraniční zkušenosti ukazují cestu, jak se s úkoly podzemního stavitelství vypořádat. V České republice je dosud většina tunelů ražena konvenčními tunelovacími metodami. První nasazení tunelovacího stroje na trase V.A. pražského metra však ukazuje nový trend a nelze vyloučit nasazení TBM na některých železničních či silničních tunelech, jejichž délka ekonomické využití tak náročného zařízení umožní. Při hustotě zalidnění naší republiky je využití geotermální energie spojené s výstavbou tunelů určitě minimálně námětem k přemýšlení, neboť počáteční investice do hlubokých vrtů v tomto případě odpadá. Temperování technologických objektů tunelů či vytápění budov v nadloží s tunelem přímo nesouvisejících může být pro investory i provozovatele atraktivním a finančně zajímavým technickým řešením.

## Literatura

- [1] Breidenstein M.: Neues Bauverfahren zur Aufweitung historischer Bahntunnel unter Betrieb, Felsbau / Rock And Soil Engineering, Issue Number: 5, Volume: 25, VERLAG GLUECKAUF GMBH, ISSN: 0174-6979
- [2] Frodl S., Franzius J.N., Bartl T.: Planiny und Bau der Tunnel – Geothermieanlage in Jenbach, Geomechanics And Tunnelling/ Geomechanik und Tunnelbau, Volume 3, Issue Number 5, ERNST & SOHN GMBH, ISSN: 1865-7362

- [3] Lenz F., Marcher T., Neumayr T.: A9 Bosrucktunnel – Dimensionierungsansätze im quellenden Gebirge, Geomechanics and Tunnelling Volume 3 (2010), Issue 5, Ernst & Sohn A Wiley Copany.
- [4] Pachem F., Cottogni I., Stegbauer T.: Zweite Röhre Bosrucktunnel: Zyklischer Vortrieb in unterschiedlichen geologischen Formationen, Geomechanics And Tunnelling/ Geomechanik und Tunnelbau, Volume 3 (2010), Issue 6, ERNST & SOHN GMBH, ISSN: 1865-7362
- [5] Chiaverio F., Thut A.: Chienbergtunnel: Instandsetzung der Hebungsstrecke im Gipskeuper mit Knautschkörpern, Geomechanics and Tunnelling, Volume 3 (2010) Issue 5, Ernst & Sohn A Wiley Copany.
- [6] Kovari K., Chiaverio F.: Modulares Knautschsystem für Tunnel in stark quellfähigem Gebirge, Forschung und Praxis, Vorträge der STUVA-Tagung 2007 in Köln. Hrsg.: Studiengesellschaft für Unterirdische Verkehrsanlagen e.V. -STUVA-, Köln, Bauverlag BV 2007, Abb.,Lit.S.195-200, ISBN 978-3-7625-3623-9

---

**Ing. Libor Mařík**

✉ IKP Consulting Engineers, s r. o.  
Classic 7, budova C  
Jankovcova , 170 00 Praha 7

☎ +420 255 733 522

📠 +420 255 733 605

😊 libor.marik@ikpce.com

URL [www.ikpce.com](http://www.ikpce.com)