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

05/17
MK ČR E 17014

časopis stavebnictví

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



dopravní infrastruktura

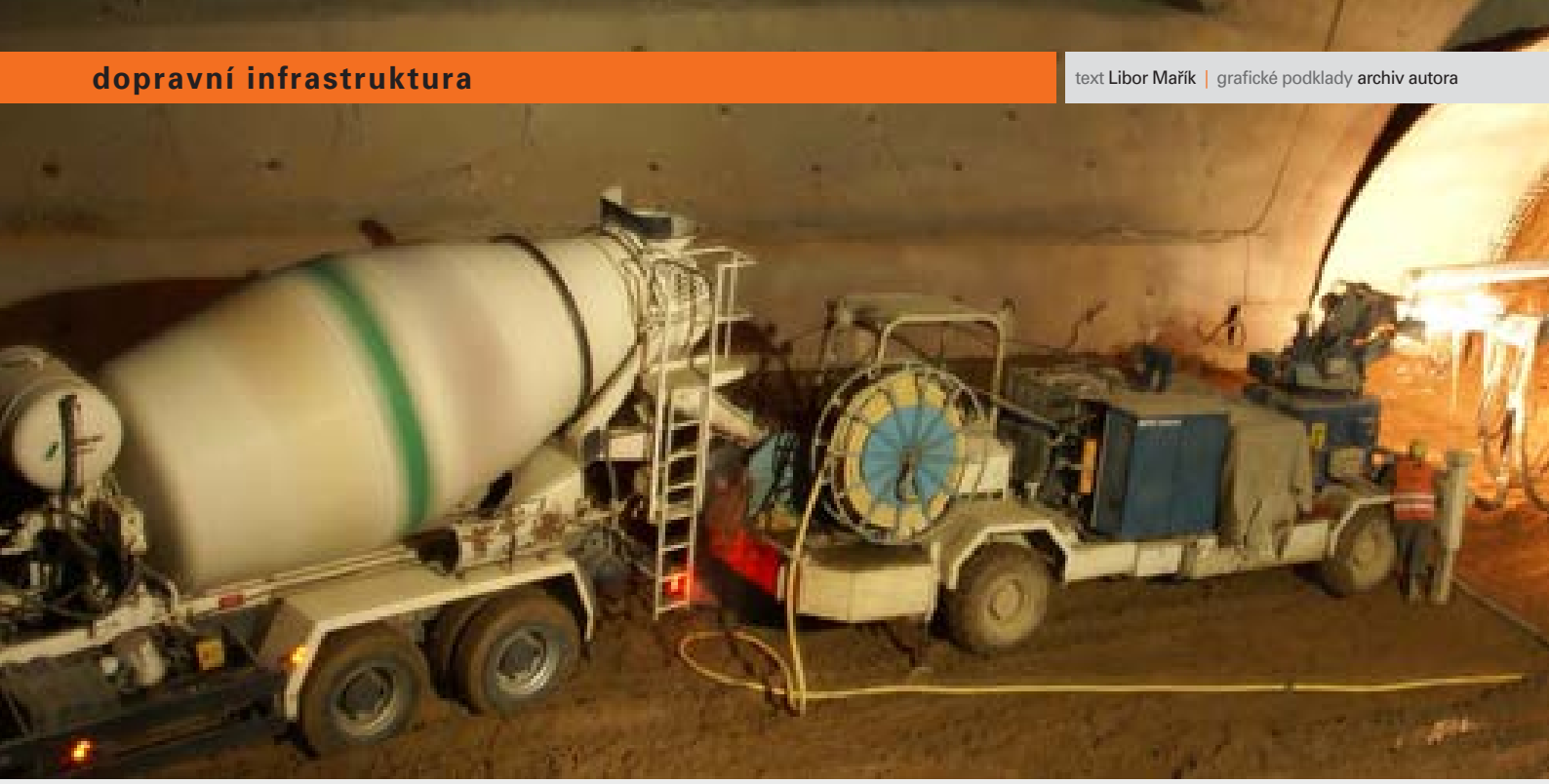
modernizace rychlostní komunikace S8, průtah Varšavou

55 let Nové rakouské tunelovací metody

cena 68 Kč

www.casopisstavebnictvi.cz

text Libor Mařík | grafické podklady archiv autora



▲ *Obr. 1. Zahájení ražby Olbramovického tunelu ve zcela zvětralých pararulách*

55 let Nové rakouské tunelovací metody, možnosti použití v ČR, 2. díl



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 prvním dílu článku publikovaném v předchozím čísle časopisu Stavebnictví se čtenáři měli možnost seznámit s počátky použití NRTM v České republice, s jejími základními principy a legislativním rámcem, umožňujícím, nebo naopak v některých směrech bránícím plnému využití těchto principů v našich podmínkách. Ve druhém dílu se zaměříme na další stavby železničních i silničních tunelů, které byly pomocí této metody raženy, a nad budoucností NRTM v konkurenci dalších tunelovacích metod.

Historický vývoj v ražbě železničních tunelů

Ražba tunelu Vepřek zahájila poměrně rozsáhlou a rychlou výstavbu dalších železničních tunelů, zejména ve spojitosti se snahou České republiky o začlenění do evropské železniční infrastruktury. Nutnost zlepšení přepravních parametrů tratí iniciovala vznik tranzitních železničních koridorů. Jedná se o vybrané železniční tratě, které po úpravě směrového i výškového vedení zajistí přepravu vyššími rychlostmi, než umožňuje stávající železniční síť z větší části postavená v 19. a v první polovině 20. století.
Na území České republiky vznikly čtyři tranzitní železniční koridory umožňující kvalitní železniční propojení přes celé území republiky v úsecích:

- I. tranzitní koridor: Děčín státní hranice – nádraží Praha-Holešovice – Pardubice – Brno hlavní nádraží – Břeclav státní hranice;
- II. tranzitní koridor: Petrovice u Karviné státní hranice – Ostrava hlavní nádraží – Přerov – Břeclav státní hranice;
- III. tranzitní koridor: Mosty u Jablunkova státní hranice – Ostrava hlavní nádraží – Přerov – Praha – Plzeň – Cheb státní hranice;
- IV. tranzitní koridor: Děčín státní hranice – Praha – České Budějovice – Horní Dvořiště státní hranice.

S výstavbou železničních koridorů je spojena i ražba většiny železničních tunelů na území republiky po roce 1989. Provozované tunely postavené po roce 1989 přehledně uvádí tab. 1.
Za čtrnáct let od zprovoznění tunelu Vepřek bylo postupně uvedeno do provozu čtrnáct železničních tunelů, jejichž společným znakem je kromě ražby pomocí NRTM dvoukolejnost, osová vzdálenost kolejí 4 m a v porovnání s alpskými zeměmi i malá výška nadloží. Tomu odpovídají poměrně malé deformační projevy při ražbě, kdy se při





▲ *Obr. 2. Portál Olbramovického tunelu – křížení s komunikací složek IZS*

ploše výrubu kolem 100 m² naměřené deformace primárního ostění standardně pohybují do 50 mm. Malá výška nadloží však znamená v případě nepříznivých geotechnických podmínek i při poměrně malých deformacích výrubu riziko závalu. Z toho důvodu je nutno při výstavbě věnovat odpovídající pozornost způsobu zajištění stability výrubu a sledování skutečně zastižených podmínek. Podcenění dostatečného zajištění stability čelby může vést při nepříznivém sklonu diskontinuit k vyjíždění ohraničených bloků horniny z čelby tunelu do výrubu a tím k nekontrolovatelnému prodloužení délky nezajištěného výrubu s následným prolomením nadloží až na povrch území. Příkladem tunelu raženého s nízkým nadložím v nepříznivých geotechnických podmínkách může být zahájení ražby Olbramovického tunelu na traťovém úseku Votice – Benešov u Prahy ve zcela zvětralých horninách charakteru zemin (obr . 1). Jako opatření ke stabilizaci nadloží a zajištění bezpečného postupu výstavby bylo použito jehlování pomocí IBO kotev délky 6 m po obvodě kaloty a postup ražby s délkou záběru nepřesahující 1 m. Celkový pohled od hloubeného Votického tunelu na portál Olbramovického tunelu po dokončení díla ukazuje obr. 2. V místě křížení s komunikací pro složky IZS dosahovala výška nadloží pouze 8 m. S nízkým nadložím byly na tomto úseku raženy i oba tunely Tomický I (obr. 3) a Tomický II (obr. 4).

S výjimkou Jablunkovského tunelu však u žádného z provozovaných železničních tunelů ražených NRTM zatím nedošlo při ražbě k havárii spojené se závalem. V případě Jablunkovského tunelu se nejednalo o standardní ražbu NRTM, ale o zvětšení profilu stávajícího tunelu Jablunkovský II délky 608 m s odstraněním původní obezdívky z kamenných kvádrů a zvětšením profilu na dvoukolejný tunel s osovou vzdáleností kolejí 4 m a průjezdným průřezem odpovídajícím současným požadavkům. Jedna z opěr starého tunelu byla ponechána jako součást nového primárního ostění. Během ražby tunelu došlo po uzavření profilu primárního ostění spodní klenbou k jeho destrukci horninovým tlakem a k závalu v délce cca 80 m (obr. 5). V současné době je již tunel znovu úspěšně vyražen a provozován. Při ražbě tunelů v zastavěném území je mnohdy nutné řešit i technické úlohy ne zcela související s geotechnickou problematikou. Příkladem může být zajištění jezdecké sochy Jana Žižky z Trocnova na Vítkově,

Název tunelu	Délka	Trať	Zprovozněn	Poznámka
Vepřek	390 m	Kralupy nad Vltavou – Děčín	2002	I. koridor
Krasíkovský I	1098 m	Česká Třebová – Bohumín	2004	III. koridor
Krasíkovský II	141 m	Česká Třebová – Bohumín	2004	III. koridor
Malá Huba	324 m	Česká Třebová – Bohumín	2005	III. koridor
Hněvkovský I	180 m	Česká Třebová – Bohumín	2006	III. koridor
Hněvkovský II	462 m	Česká Třebová – Bohumín	2006	III. koridor
Severní vítkovský	1316 m	Praha – Kolín	2008	
Jižní vítkovský	1364 m	Praha – Kolín	2008	
Olbramovický	480 m	Benešov u Prahy – České Budějovice	2011	IV. koridor
Zahradnický	1044 m	Benešov u Prahy – České Budějovice	2012	IV. koridor
Tomický I	324 m	Benešov u Prahy – České Budějovice	2012	IV. koridor
Tomický II	254 m	Benešov u Prahy – České Budějovice	2012	IV. koridor
Jablunkovský	612 m	Ostrava – státní hranice SR	2013	III. koridor
Sudoměřický	444 m	Benešov u Prahy – České Budějovice	2016	IV. koridor

▲ *Tab. 1. Provozované železniční tunely vyražené NRTM po roce 1989*



▲ *Obr. 3. Tunel Tomický I*

kde bylo nutné speciálním opatřením zajistit ocas koně, který by nebyl schopen přenést dynamické zatížení od vibrací způsobených trhacími pracemi v podzemí. Západní portál Vítkovských tunelů s přípravou falešného primárního ostění ze stříkaného betonu jako bednění hloubených úseků tunelu znázorňuje obr. 6.

V oblasti projektování se podařilo prosadit díky vstřícnému přístupu investora a zhotovitelských firem použití nevyztuženého sekundárního ostění i v případě železničních tunelů. Při návrhu se používají matematické modely zohledňující nelineární chování betonu sekundárního ostění. Zatížení je stanoveno na základě skutečně zastižených geotechnických podmínek a na základě deformačních projevů horninového masivu při ražbě tunelu, které jsou sledovány v rámci geotechnického monitoringu. Sekundární ostění bylo dosud použito na tunelech Nového spojení v Praze a na Olbramovickém a Sudoměřickém tunelu na IV. železničním koridoru. Sudoměřický



▲ *Obr. 4. Tunel Tomický II*

▼ *Obr. 5. Projev závalu Jablunkovského tunelu na povrchu území*



tunel je zatím posledním tunelem raženým pomocí NRTM. Při jeho výstavbě bylo na vjezdovém úseku tunelu použito speciální opatření, které umožnilo minimalizovat rizika spojená s ražbou s nízkým nadložím. V bezprostřední blízkosti portálu bylo nutné podejít provozovanou komunikaci první třídy s výškou nadloží necelé 3 m, přičemž horninový masiv tvořily zcela zvětralé pararuly a vrstvy kvartérního pokryvu. Až v průběhu výstavby se podařilo přesvědčit dotčené orgány i zástupce obcí o nutnosti dočasného krátkodobého přerušení provozu na komunikaci.

Jako nejvhodnější technické řešení byla použita ražba tunelu pod zastropením – metoda „želva". Po uzavírce komunikace byla vyhloubena pažená stavební jáma minimálních rozměrů, jejíž dno bylo vytvarováno do tvaru klenby tunelu, jak ukazuje obr. 7. Na takto vytvarované dno byla vybetonována železobetonová klenba, jejímž účelem bylo přenést zatížení zpětným zásypem a provozem na komunikaci v nadloží. Po betonáži klenby byla konstrukce zasypána a byl obnoven provoz na komunikaci. Celá etapa byla dokončena do dvou měsíců od přerušení provozu. Pod konstrukcí „želvy" již probíhala ražba tunelu podle principů NRTM, kdy v kalotě tunelu představovala klenba připomínající krunýř želvy primární ostění tunelu (viz obr. 8). Pod klenbu byla nainstalována mezilehlá fóliová izolace a bylo vybetonováno sekundární ostění. Při průjezdu tunelem již v současnosti jen málokdo tuší, s jakými technickými opatřeními byl tunel vystavěn.

Paralelně s projektováním a výstavbou železničních tunelů probíhaly práce i na podkladech pro projektování. Vytvořením vzorových listů dvoukolejného i jednokolejného železničního tunelu se podařilo unifikovat tvar železničních tunelů, což zjednodušilo proces projektování, realizace i následné údržby po uvedení tunelů do provozu.

Další vývoj v ražbě tunelů na pozemních komunikacích

Po ražbě silničního tunelu Hřebeč se další výstavba orientovala na ražbu dálničních a městských tunelů. Jednalo se o tunely na dálnicích D1, D5, D8 a městské tunely v Brně a Praze.

Tab. 2 uvádí provozované tunely na pozemních komunikacích, které byly raženy pomocí NRTM.

Z hlediska technologie výstavby se od běžně zažitého standardu odchyluje Pisárecký tunel v Brně, kde je primární ostění uvažováno jako trvalé. Je tvořeno stříkaným betonem SB30 tloušťky 200 mm a ocelovými výztužnými sítěmi. K trvalému vyztužení horninového

Název tunelu	Délka	Komunikace	Zprovozněn	Poznámka
Hřebeč	354,5 m	Silnice I/35 Svitavy – Moravská Třebová	1997	
Pisárecký	510,5 m	Silnice I/23 – Brno	1997	První trouba
	497,2 m	Silnice I/23 – Brno	1998	Druhá trouba
Mrázovka	1300 m	Městský okruh – Praha	2004	Západní trouba
	1254 m	Městský okruh – Praha		Východní trouba
	236 m	Odbočná větev A		
	153 m	Odbočná větev B		
Valík	390 m	Dálnice D5	2006	Severní trouba
	380 m			Jižní trouba
Panenská	2167,7 m	Dálnice D8	2006	Západní trouba
	2115,7 m			Východní trouba
Libouchec	519,8 m	Dálnice D8	2006	Východní trouba
	504 m			Západní trouba
	166,7 m			Galerie
Klimkovice	1076,8 m	Dálnice D1	2008	Brno – Ostrava
	1088,1 m			Ostrava – Brno
Komořanský	1937 m	SOKP 513	2010	Třípruhový tunel
	1921,5 m			Dvoukruhový tunel
Lochkovský	1661 m	SOKP 514	2010	Třípruhový tunel
	1620 m			Dvoukruhový tunel
Dobrovského	1237 m	Silnice I/42, VMO Dobrovského B	2012	Královopolský I
	1258 m			Královopolský II
Brusnický	1405 m	Tunelový komplex Blanka	2015	
Dejvický	1007 m			
Bubenečský	3090 m			
Prackovice	270 m	Dálnice D8	2016	Levá trouba
	260 m			Pravá trouba
Radejčín	620 m	Dálnice D8	2016	Levá trouba
	600 m			Pravá trouba

▲ *Tab. 2. Provozované tunely na pozemních komunikacích vyražené NRTM po roce 1989*

prstence jsou použity sklolaminátové lepené kotvy průměru 20 mm a délky 2,5 až 4,5 m. Sekundární ostění je potom navrženo z prostého betonu, nepředpokládá se u něj nosná funkce a tvoří vnitřní pohledový líc ostění. Jeho tloušťka ve vrcholu klenby je 300 mm a směrem k bokům se zvětšuje až na 750 mm. Standardním řešením v České republice je přisouzení hlavní nosné funkce sekundárnímu ostění, přičemž primární ostění je považováno za dočasnou konstrukci, která v průběhu životnosti tunelu (sto let) zcela ztratí svou nosnou funkci a její podpůrný účinek není do celkového nosného systému možné uvažovat. Možná z tohoto důvodu je většina silničních tunelů v ČR

▼ *Obr. 6. Vítkovské tunely Nové spojení v Praze*





▲ *Obr. 7. Tvarování dna stavební jámy pro betonáž klenby želvy*



▲ *Obr. 8. Ražba kaloty pod ochranou želvy*

navržena s vyztuženým sekundárním ostěním. S tím je spojeno zvýšené riziko poškození mezilehlé izolace při montáži samonosné výztuže a vzniku trhlin nebo nedostatečného krytí výztuže z hlediska dlouhodobého provozování tunelu.

Jako první se nevyztužené sekundární ostění s nosnou funkcí podařilo v České republice prosadit na dálničním tunelu Libouchec. Na žádných dalších silničních tunelech nebylo v České republice dosud nevyztužené sekundární ostění použito, i když např. v Rakousku je použití nevyztuženého sekundárního ostění standardem a použití vyztuženého sekundárního ostění spíše výjimkou. Důvodem mohla být i absence kritérií pro posuzování kvality nevyztuženého ostění, která se dostala do našich předpisů až deset let po uvedení tunelu Libouchec do provozu. Požadavky na posuzování vzniku a vývoje trhlin v nevyztuženém ostění a na kvalitu povrchu sekundárního ostění jsou uvedeny v předpise Ministerstva dopravy Technické

▼ *Obr. 9. Zvětšení profilu tunelu v místě připojovacího pruhu*



kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací, kapitola 18, Betonové konstrukce a mosty z roku 2016 (TKP-18:2016).

Profil silničního tunelu nebyl dosud v ČR unifikován a i když norma ČSN 737507:2013 definuje šířkovou kategorii tunelu, od které se profil tunelu odvíjí, návrh tvaru je dosud v kompetenci projektanta. Na rozdíl od železničních tunelů unifikaci silničních tunelů komplikují faktory ovlivňující tvar tunelu. Jedná se např. o použití mezistropu pro podélné nebo polopříčné větrání silničních tunelů, či o atypické profily např. v místě připojovacích pruhů nebo nouzových zálivů (viz obr. 9). Pro standardní tvary tunelu, kterých je na silnicích či dálnicích většina, by však unifikace přinesla obdobná pozitiva jako v případě železničních tunelů. Jednotný názor dosud není ani na použití šířkové kategorie tunelu, takže se na českých dálnicích objevují tunelové profily od kategorie T-8,0 (číslo udává šířku komunikace mezi obrubníky) až po kategorii T-9,5 na tunelech Prackovice a Radejčín na dálnici D8 (obr. 10). Plocha výrubu silničních tunelů se pohybuje v případě kategorie T-8,0 od cca 90 m^2 u tunelu bez protiklenby až po cca 110 m^2 u tunelu se spodní klenbou. V případě tunelu kategorie T-9,5 plocha výrubu narůstá na 105 m^2 (bez protiklenby) až 120 m^2 (s protiklenbou). Dosud největší profil provozovaného silničního tunelu byl v ČR vyražen na tunelu Mrázovka a jeho plocha činí 340 m^2. Jednalo se o tunelový rozplet v místě odbočení a jeho šířka dosahovala až 23,5 m.

Pomocí NRTM byly raženy i tunely Cholupice a Lochkov na silničním okruhu kolem Prahy. V případě tunelu Cholupice byla v celé délce v předstihu vyražena průzkumná štola, která u Komořanského portálu procházela vrstvou jemnozrnných písků o mocnosti 30 m. Komplikace se zajištěním stavební jámy v těchto geotechnických podmínkách způsobily, že zahájení ražeb tunelu bylo provedeno přes průzkumnou štolu. Za budoucím raženým portálem byla průzkumná štola rozšířena na profil kaloty tunelu a ražba takto pokračovala, dokud nebyla stavební jáma přeprojektována a vyhloubena na úroveň dna tunelů. Rozšíření průzkumné štoly na profil kaloty tunelu je patrné z obr. 11, který ukazuje i polohu průzkumné štoly v profilu budoucího tunelu. Pohled z již částečně demontovaného ostění průzkumné štoly na ražený portál obou Cholupických tunelů ve stavební jámě Komořany představuje obr. 12.

Nejvýznamnějším tunelovým dílem co do délky a rozlohy podzemních prostor je městský tunelový komplex Blanka v Praze, který je tvořen tunely Brusnice, Dejvice a Bubeneč. Součásti ražených částí tunelového komplexu je však kromě hlavních tunelů i celá řada podzemních prostor sloužících pro instalaci technologického vybavení tunelu a vzduchotechniky. Vzduchotechnický tunel, který mimoúrovňově kříží oba dopravní tunely, ukazuje obr. 13. Jedná se o místo, ve kterém je část vzduchu převedena do prvního z dopravních tunelů a profil pro odvětrání druhého tunelu je možno zmenšit na polovinu. Z celkové délky tunelů 12 139 m je 5539 m raženo technologií NRTM. Tunel byl uveden do zkušebního provozu v roce 2015. Složitost provádění tunelů, tunelových křížení i technologických prostor dokládá, že ražba tunelů pomocí NRTM je již z hlediska provádění na vysoké úrovni. Největším profilem tunelového komplexu Blanka byla kaverna vzduchotechniky o ploše výrubu 287 m^2 (obr. 14).

Budoucnost NRTM a podmínky jejího nasazení

V souvislosti s budoucností NRTM se často hovoří o masivním nasazení tunelovacích strojů a nahrazení NRTM tímto způsobem ražby. V České republice byly tunelovací stroje použity při výstavbě tunelů pražského metra v úseku Dejvice – Motol a v současné době tunelovací stroj razí železniční tunel Ejpovice v úseku Rokycany – Plzeň,



▲ *Obr. 10. Tunely Prackovice a Radejčín na dálnici D8*



▲ *Obr. 11. Tunel Cholupice – průzkumná štola v profilu kaloty*

který bude po dokončení při délce 4,1 km nejdelším železničním tunelem v České republice. Jedná se o dva jednokolejné tunely a nasazený tunelovací stroj proto ve skutečnosti urazí dvojnásobnou délku. Za hlavní výhodu tunelovacích strojů je považována rychlost ražby, bezpečnost provádění a pracovní podmínky. Jako každá mince má dvě strany, tak i použití různých tunelovacích metod má své výhody i nevýhody.

Tunelovací stroje spolehlivě pracují v geotechnických podmínkách, pro které jsou navrženy. Jejich hlavní výhodou je rychlost ražby a možnost prefabrikace tunelového ostění s řízením kvality jeho výroby v podmínkách výrobního závodu. Horninové prostředí je však prozkoumatelné jen do určité míry a zastižení anomálií v podobě tektonických poruch nebo hornin jiných vlastností, než které uváděla prognóza geotechnického průzkumu, může vést ke značným komplikacím a zdržení výstavby. Ze zahraničí jsou známa uvíznutí tunelovacích strojů v řádu měsíců a jejich vyprošťování vyžaduje náročná opatření i vysoké investiční náklady. Ani představa o minimalizaci nadvýrubů a vzniku kaveren není zcela přesná. K dalším nevýhodám patří pouze kruhový tvar tunelu a v porovnání s NRTM malá přizpůsobivost skutečně zastiženým podmínkám. Délka tunelu musí být adekvátní ceně a provozním nákladům použitého tunelovacího stroje. Jedná se o stroje v celkové délce až stovek metrů s rozsáhlým zázemím v podobě dopravníků transportu rubaniny, prefabrikovaných dílců ostění a dalších komponent nutných pro provoz stroje a ražbu tunelu.

Příklad tunelovacího stroje s napojením na zázemí před portálem tunelu Biel ve Švýcarsku ukazuje obr. 15. Ražba tunelovacími stroji má své nezastupitelné místo u dlouhých tunelů v relativně homogenním horninovém prostředí. Příklady dlouhých zahraničních tunelů, jakými jsou např. tunely Gotthard, Lötschberg, Koralm nebo Wienerwald však ukazují, že i na těchto stavbách má NRTM svou nezastupitelnou úlohu při ražení přístupových tunelů, technologických prostor, tunelových propojek, podzemních prostor atypických rozměrů nebo právě obchozích štol a kaveren pro vyprošťování uvízlých tunelovacích strojů. Česká republika je charakteristická pestrou geologickou minulostí, poměrně malou výškou nadloží i většinou malou délkou jak silničních, tak železničních tunelů. Lze proto předpokládat, že i v budoucnosti bude většina českých tunelů ražena konvenčně pomocí NRTM.

V průběhu času došlo na straně stavebních firem k vybavení strojní technikou na evropské úrovni, která umožňuje:

- vyšší rychlost aplikace radiálních kotev i vrtání pro použití trhacích prací;
- použití manipulátorů pro nástřik mokré betonové směsi primárního ostění;
- obecně celkové zrychlení ražby.

Velmi přesné provádění vrtů pro použití trhacích prací minimalizuje velikost nadvýlomů a v kombinaci s rychlým způsobem kotvení v krátkých vzdálenostech za čelbou se výrazně omezuje rozvolnění



▲ *Obr. 12. Tunel Cholupice – stavební jáma Komořany*

▼ *Obr. 13. Vzduchotechnický tunel pod dopravními tunely Blanka*





▲ *Obr. 14. Kaverna vzduchotechniky tunelu Blanka*

horniny v okolí výrubu. To přispívá k vyššímu využití samonosnosti horninového masivu. Téměř třicet let trvající časový handicap oproti používání NRTM v kolébce jejího vzniku v oblasti projektování i realizace tak pomalu mizí.

Podmínkou úspěšné aplikace NRTM však není jen znalost principů tunelovací metody a geologické stavby území, dokonalý projekt nebo špičková vybavenost dodavatelských firem. Toho si byli a jsou vědomi i rakouští kolegové a použití metody neustále zdokonalují především v oblasti smluvních vztahů, definování kompetencí, tj. práv a odpovědností při výstavbě. Vzhledem k tomu, že se jedná o metodu postavenou na změnách během výstavby reagujících na skutečně zastižené geotechnické podmínky, nelze při ní aplikovat model výstavby s přesným postupem podle předem schválené realizační dokumentace. Ta musí navrhovat pro předpokládané geotechnické podmínky postupy prací, způsob zajištění stability výrubu a uvádět podmínky pro nasazení těchto postupů. Hlavní rozhodovací proces však probíhá až při vlastní ražbě v podmínkách stavby. Zcela samostatnou kapitolou a závažným tématem k zamyšlení je proto obsah a forma zadávací dokumentace, která skutečné použití NRTM se všemi výhodami a možností ekonomicky efektivní výstavby tunelů zatím v tuzemských podmínkách plně neumožňuje. V Rakousku byla pro smluvní vztahy ve výstavbě tunelů pomocí NRTM vytvořena norma ÖNORM B 2203-1, která vytváří smluvní rámec mezi objednatelem a zhotovitelem pro případ operativních změn způsobu zajištění stability výrubu v průběhu výstavby. Norma se ve spolupráci všech účastníků výstavby neustále vyvíjí a ve svých revizích zohledňuje zkušenosti především z realizace velkých tunelových projektů. Sama za sebe mluví skutečnost, že principy popsané v této normě byly použity i u konvenčně ražených částí nejdelšího tunelu na světě – Gotthardského bázového tunelu ve Švýcarsku.

Vzhledem k tomu, že technologická třída výrubu, která popisuje způsob zajištění stability výrubu, není pouze ukazatelem ekonomického výsledku ražby tunelu, ale především nástrojem k bezpečnému provádění díla, musí zatřiďování při ražbě provádět pouze kompetentní osoby, které jsou za svá rozhodnutí ochotny nést odpovědnost a které disponují patřičným oprávněním v rámci platných právních předpisů. Ve smluvních vtazích je třeba přesně definovat náplň činnosti a kompetence jak zástupců geomonitoringu, tak především geotechnika stavby. V tunelářsky vyspělých zemích tato problematika souvisí s jednoznačně určenou dělbou rizik při výstavbě.

V tuzemských podmínkách máme dosud určité rezervy ve znění báňských zákonů a vyhlášek. I když změny zákona č. 61/1988 Sb. i vyhlášky č. 55/1966 Sb. již oproti původnímu znění zohlednily specifika NRTM, její plné využití dosud neumožňují. Veškerá odpovědnost leží na závodním stavby, který je zástupcem zhotovitele, a na báňském projektantovi, který je v případě realizačních projektů zpravidla rovněž na straně zhotovitele. Následkem právního vakua povinností definovaných zákony a vyhláškami na straně objednatele tunelové stavby vzniká nerovnováha, která se může promítnout jak do ekonomické, tak bezpečnostní stránky provádění tunelů. Technologické třídy výrubu definují způsob zajištění stability výrubu a tím i bezpečnost provádění, investor by proto neměl zasahovat do zatřiďování horninového masivu do technologických tříd výrubu. Tím se však zbavuje možnosti ovlivňovat ekonomický výsledek stavby, neboť tunel ražený v „lehčí" technologické třídě výrubu je proveden za vynaložení podstatně nižších investičních nákladů než ražba v „těžkých" technologických třídách s mnoha doprovodnými opatřeními k zajištění bezpečnosti práce. Technické normy, předpisy nebo smluvní podmínky nemohou tuto mezeru vyplnit, neboť zákony a vyhlášky jsou jim nadřazeny.

Zcela odlišný od běžných staveb je i výkon stavebního a geotechnického dozoru investora. Ražba tunelu probíhá zpravidla nepřetržitě 24 hodin denně a 7 dní v týdnu, přičemž je současně otevřeno více pracovišť. Tomu je nutno kapacitně i odborně přizpůsobit personální nasazení na straně stavebního dozoru, který by měl jednotlivé činnosti prováděné v podzemí kontrolovat a na základě vlastního úsudku, případně po konzultaci s geotechnickými dozorem, by měl být rovnocenným partnerem zhotoviteli díla. Bez prakticky stálé přítomnosti zkušených zástupců investora na čelbě při ražbě tunelu lze jen obtížně posoudit rozpojitelnost horniny, princip tvorby a opodstatnění vzniku nadvýrubů nebo nasazení doprovodných opatření k zajištění stability výrubu a bezpečnosti práce. Jiná zkušenost a odbornost je vyžadována při ražbě tunelu, jiná při činnostech spojených s hydroizolací, betonáží sekundárního ostění nebo montáží technologického vybavení tunelů. Spektrum činností při výstavbě tunelu vyžaduje znalosti od geotechniky přes betonové konstrukce až po elektroinstalace a vzduchotechniku.

V případě České republiky by měl být rozsah kompetencí báňského projektanta přímo úměrný odpovědnosti, která je na něj ze zákona kladena. Zpětná vazba a možnost porovnání předpokladů uvedených v realizační dokumentaci se skutečně zastiženými geotechnickými podmínkami při realizací poskytuje cenné zkušenosti a vede ke zvyšování úrovně projektové dokumentace. S ohledem na změny

▼ *Obr. 15. Tunelovací stroj před portálem tunelu Biel ve Švýcarsku*



prováděné při ražbě tunelu a odpovědnosti za bezpečnost provádění by přítomnost báňského projektanta na stavbě měla být trvalá. To však v českých poměrech není zejména z finančních, ale i kapacitních důvodů možné. Báňský projektant proto nese odpovědnost i za činnosti, které není z výše uvedených důvodů schopen zcela ovlivnit.

Velkou pozornost je nutno věnovat tvorbě technických norem, směrnic, technických podmínek nebo technických kvalitativních podmínek pro projektování a výstavbu tunelů, které jsou ve většině případů součástí souboru smluvních dohod při projektování i realizaci díla. Podrobnost a kvalita zpracování takových dokumentů zásadním způsobem ovlivňuje jak celkovou výši investičních i provozních nákladů tunelů, tak i životnost díla. Tyto náklady o mnoho řádů převyšují honoráře členů zpracovatelského týmu. Není výjimkou, že ti pracují na tvorbě předpisů zcela bez nároku na finanční odměnu s tichým souhlasem svého zaměstnavatele, nebo ve svém volném čase. Tento trend by bylo vhodné s ohledem na význam předpisů změnit, do jejich návrhu zapojit špičkové odborníky z oboru a finančním ohodnocením vytvořit prostor pro odpovídající kvalitu předpisů. Za pozitivní lze označit požadavek předpisu TKP-D7:2016 Ministerstva dopravy, který definuje požadavky na projektovou dokumentaci silničních a dálničních tunelů a který vyžaduje ve fázi DÚR i DSP nezávislé expertní posouzení zpracovávané dokumentace.

Zásadní změnu lze v případě NRTM očekávat v souvislosti s výzkumy životnosti a zbytkové únosnosti primárního ostění, které v současné době probíhají v Rakousku. V zájmu zajištění bezpečnosti provozu probíhá výstavba druhých tunelových trub původně obousměrně provozovaných alpských dálničních tunelů. Díky tomu lze při ražbě tunelových propojek nebo při sanaci horninovým tlakem porušeného definitivního ostění (např. tunel Bosruck na dálnici A9 – viz obr. 16) získat pro výzkum vzorky stříkaného betonu primárního ostění, hydroizolačních fólií i kotev vyztužujících nosný horninový prstenec v okolí výrubu. Dosavadní výsledky těchto výzkumů ukazují, že primární ostění neplní pouze dočasnou funkci, jak se při výpočtech dosud předpokládá, ale že i po čtyřiceti letech v reálných podmínkách podzemní stavby je jeho kvalita, a tím i schopnost vzdorovat hornino-vému tlaku na velmi dobré úrovni. To by mohlo vést ke zcela zásadní změně v přístupu k dimenzování dvouplášťových ostění, výrazným úsporám investičních nákladů a tím i zvýšení konkurenceschopnosti tunelových řešení dopravních tras.

Závěr

Budoucnost výstavby tunelů závisí na koncepci silniční a železniční dopravy v naší republice. Světový nebo minimálně evropský trend směřuje ke zvyšování rychlosti a kapacity železniční dopravy, další výstavbě dálničních tras i linek podzemních drah. V současné době se v České republice nerazí žádný tunel podle zásad NRTM. V nejbližším výhledu je realizace železničních tunelů Mezno a Deboreč na IV. železničním koridoru v úseku Sudoměřice – Votice. V delším časovém horizontu je plánována výstavba tunelů na úsecích dálnic D3, D11 a D35, které jsou všechny navrženy pro ražbu pomocí NRTM. Nová rakouská tunelovací metoda se v České republice rychle stala dominantní metodou pro výstavbu silničních i železničních tunelů. Proměnlivost geologických podmínek i poměrně malá délka nově navrhovaných tunelů vede k přesvědčení, že i v budoucnosti bude NRTM převažující tunelovací metodou. Díky schopnosti přizpůsobit se jak tvaru raženého tunelu, tak geotechnickým změnám nemá NRTM v těchto podmínkách konkurenci.

V okolních státech vzniká síť vysokorychlostních tratí, které jsou schopny nabídnout ekonomicky zajímavou a ekologicky přijatelnou alternativu k silniční nebo dokonce i letecké dopravě. Navrhování takových tratí klade zvýšené nároky na směrové a především výškové vedení trasy a bez navrhování tunelů se neobejde. Stejná situace je v oblasti dopravního řešení městských aglomerací a ve snaze o zvyšování kvality života ve městech. Jen málokterá moderní metropole vede hlavní dopravní tepny v centru města na povrchu území. Česká republika se proto dříve nebo později bez další výstavby dopravních tunelů neobejde. Tunelové stavitelství je proto potřeba ve všech směrech a na všech úrovních zdokonalovat a zohledňováním moderních trendů vytvářet předpoklady pro ekonomicky výhodnou a bezpečnou výstavbu tunelů. ■





▲ *Obr. 16. Zvětšování profilu tunelu Bosruck*

english synopsis

The New Austrian Tunnelling Method on its 55th Anniversary – Possible Applications in the Czech Republic, Part 2

The first part of this article published in the previous edition of the journal Stavebnictví gave readers the chance of becoming acquainted with the initial uses of the New Austrian Tunnelling Method in the Czech Republic, with basic principles and with the legislative framework allowing the use of these principles or, in certain cases, preventing the complete application of them in this country. Part two is to focus on further rail and road tunnel works driven with the use of this method and on the future of the New Austrian Tunnelling Method in the face of competition from other tunnelling methods.

klíčová slova:
Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM), stavby železničních tunelů, stavby silničních tunelů

keywords:
the New Austrian Tunnelling Method, rail tunnel works, road tunnel works

text Libor Mařík | grafické podklady AlpTransit Gotthard AG



▲ *Obr. 1. Severní portál Erstfeld po uvedení do provozu*

Bázový tunel Gotthard od prvních představ k uvedení do provozu, 1. díl



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

Článek pojednává o mimořádném technickém díle – železničním bázovém tunelu Gotthard, který podchází alpským masivem v úrovni jeho báze a je v současné době nejdelším tunelem světa. Příprava projektové dokumentace, výstavba i způsob bezpečného provozování tunelu vyžadovaly překonání celé řady těžkostí a zvládnutí technických úloh, které dosud nebyly řešeny.

První díl textu čtenáře seznámí se základními parametry stavby, historickým vývojem přípravy projektové dokumentace, způsobem financování a hlavními milníky realizace až po uvedení do provozu. Článek je napsán na základě podkladů a informací poskytnutých firmou AlpTransit Gotthard AG.

Úvod

Dne 1. června 2016 byl ze svého pomyslného trůnu pro nejdelší tunel světa sesazen dvoukolejný železniční tunel Seikan v Japonsku, který pod Cugarským průlivem v délce 53,85 km spojuje ostrovy Honšú a Hokkaidó. Jeho vláda od otevření 13. března 1988 trvala dlouhých 28 let, což je v dnešní době rychle se rozvíjející techniky obdivuhodná doba. Jeho prvenství neohrozila ani výstavba 50,45 km dlouhého eurotunelu pod kanálem La Manche, který byl uveden do provozu v listopadu roku 1994 a umožňuje železniční spojení mezi Francií a Spojeným královstvím.

Délka 57 km nového bázového tunelu Gotthard však není jediným parametrem, který si zaslouží pozornost technické veřejnosti. Při jeho výstavbě bylo nutné zvládat ražbu pod Gotthardským masivem ve složitých geologických podmínkách s výškou nadloží až 2300 m v často tlačivých horninách s deformacemi výrubu v řádu desítek centimetrů a teplotou přes 40 °C. Dále bylo třeba řešit způsob financování formou referenda, typickou pro Švýcary, logisticky zvládnout odvoz a uložení obrovského množství rubaniny i dopravu stavebního materiálu nutného pro výstavbu tunelu nebo



zajistit ekologickou a bezpečnou výstavbu i provozování tunelu. Zprávu o otevření nejdelšího tunelu světa většina médií v České republice zaregistrovala s uvedením základních parametrů díla. My se pokusíme tuto výjimečnou stavbu přiblížit podrobněji.

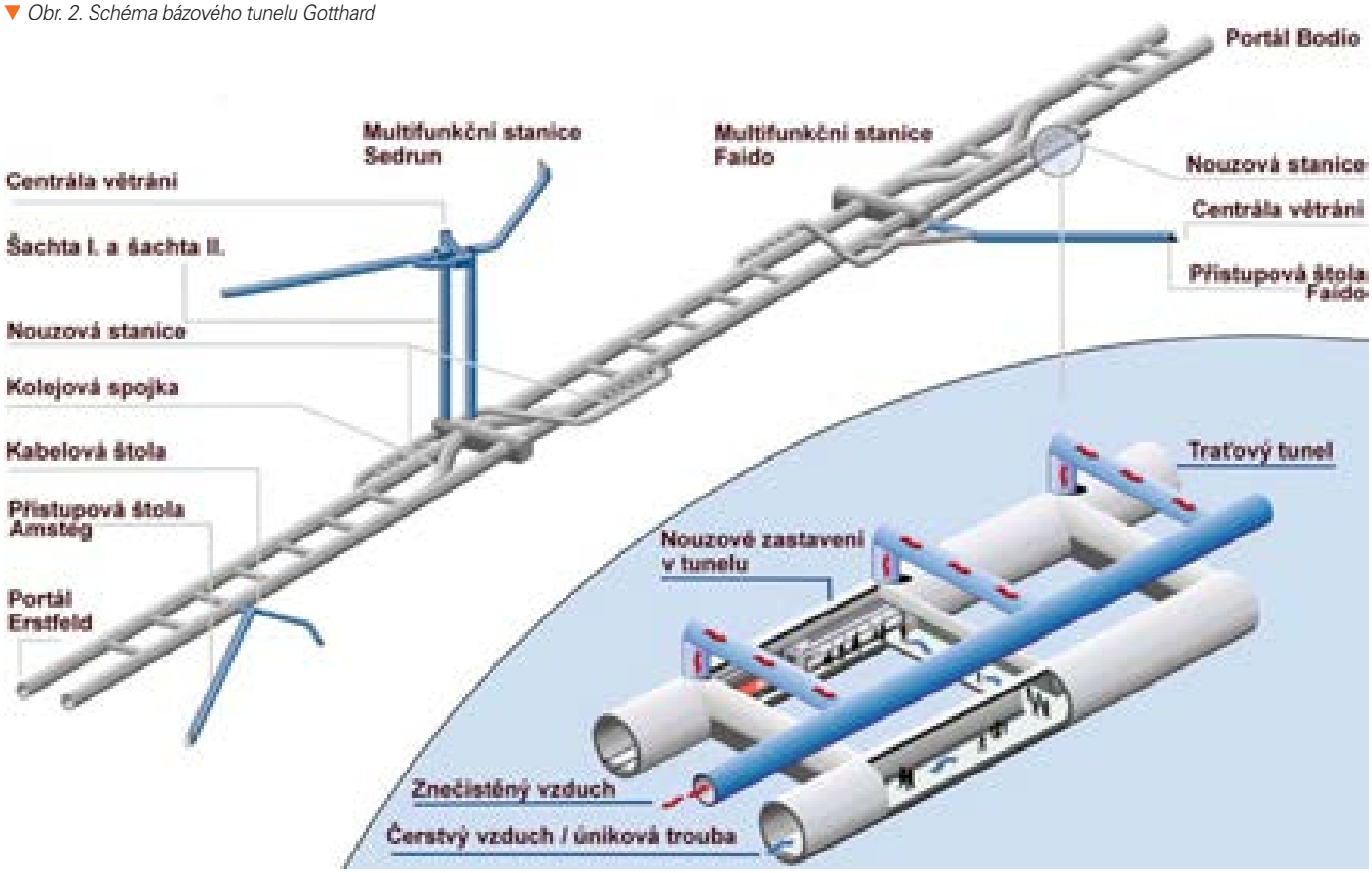
Základní technická data stavby

V souvislosti s délkou tunelu se uvádí číslo 57 km. Tunel má však dvě tunelové trouby, jejichž přesná délka je 57,104 km (východní tunelová trouba – VTT) a 57,017 km (západní tunelová trouba – ZTT). Celková délka jednokolejných traťových tunelů je 114,121 km. Tunel spojuje severní portál Erstfeld s jižním portálem Bodio a vzdušnou čarou měří tato spojnice 55,782 km (VTT), respektive 55,704 km (ZTT). Maximální výška nadloží dosahuje 2450 m a teplota horniny díky geotermálnímu gradientu až 46 °C. Maximální přípustná teplota prostředí pro práci v podzemí nesměla překročit 28 °C .

Trakční vedení je v tunelu situováno 5,2 m nad temenem kolejnice, na širé trati se výška zvětšuje na 5,4 m. Obě tunelové trouby spojuje celkem 178 příčných propojení v průměrné vzájemné vzdálenosti 325 m. Standardní vzdálenost tunelových trub činí 40 m s tím, že místy narůstá až na maximálně 70 m. V podélném směru jsou tunely navrženy tak, že nejvyšší místo je umístěno v trase tunelu a směrem k severu trať klesá ve sklonu 4,055 ‰ a směrem k jihu 6,76 ‰. Převýšení mezi severním portálem a vrcholem výškového oblouku dosahuje 89 m, k jižnímu portálu tunely klesají od nejvyššího bodu s převýšením 237 m. Tunel je navržen pro rychlost jízdy 250 km/h. Bezpečnost provozu zajišťují mimo dalších opatření i dvě multifunkční stanice Sedrun a Faido, které umožňují nouzové zastavení vlaku v případě poruchy a evakuaci cestujících.

Standardně se tunely razí pouze od portálů. V případě bázového tunelu Gotthard tento způsob vzhledem k jeho délce není možný a trasa tunelu je rozdělena do pěti úseků místně označených Erstfeld, Amsteg, Sedrun, Faido a Bodio. Kromě severního a jižního portálu tunelu, které byly přístupné z povrchu území, bylo pro ostatní pracoviště nutné vyrazit přístupové štoly, nebo šachty, kterými bylo možné tunelovací techniku i materiál dopravit do trasy tunelu a zajistit odvoz rubaniny.

▼ *Obr. 2. Schéma bázového tunelu Gotthard*



Úsek	Délka VTT	Délka ZTT
Erstfeld	7,778 km (7,151 km)	7,705 (7,151 km)
Amsteg	11,330 km (10,723 km)	11,350 km (10,703 km)
Sedrun	8,569 km	8,738 km
Faido	13,456 km (11,134 km)	13,523 (11,086 km)
Bodio	15,971 km (13,450 km)	15,702 km (14,113 km)

▲ *Tab. 1. Dílčí úseky tunelů a jejích délky*

V případě pracoviště Amsteg se jednalo o přístupovou štolu délky 2,222 km, pro pracoviště Sedrun byly vyhloubeny dvě šachty o hloubce 820 m a 850 m a přístupová štola o délce 909 m. Pro pracoviště Faido byla vyražena přístupová štola v délce 2,646 km a na jižním portále Bodio byla vyražena obchozí štola o délce 1,336 km. Schéma tunelu s rozmístěním tunelových propojek, multifunkčních stanic, přístupových šachet i štol znázorňuje obr. 2. Pro dopravu rubaniny na deponii byla v úseku Bodio – Buzza di Biasca vyražena štola o délce 3,162 km. Vlastní traťové úseky měly délku, kterou uvádí tab. 1. V závorce jsou uvedeny úseky vyražené tunelovacími stroji. Celková délka traťových tunelů vyražených pomocí tunelovacích strojů byla 42,458 km (VTT) a 43,019 km (ZTT). Ražba tunelovacími stroji představovala 64 % všech výrubů prováděných v souvislosti s výstavbou tunelu.

Tunelovací stroje razily kromě traťových tunelů i průzkumnou štolu Piora v délce 5,540 km pro ověření polohy a vlastností horninového masivu v tektonické poruše Piora-Mulde, štolu pro odvoz rubaniny Bodio v délce 3,162 km a kabelovou štolu Amsteg v délce 1,884 m. Na tunelu byly pro ražbu traťových tunelů použity celkem čtyři tunelovací stroje pojmenované Sissi, Heidi, Gabi I a Gabi II. Tunelovací stroj Sissi byl nasazen na úsecích Bodio – Faido (VTT) v délce 15 km a Faido – Sedrun (VTT) v délce 12 km. Tunelovací stroj Heidi pracoval na úseku Bodio – Faido (ZTT) v délce 15 km a Feido – Sedrun (ZTT) v délce 12 km. Tunelovací stroj Gabi I vyrazil úseky Amsteg – Sedrun (VTT) v délce 11,4 km a Erstfeld – Amsteg (VTT) v délce 7,1 km. Tunelovací stroj Gabi II. pracoval na úseku Amsteg – Sedrun (ZTT) v délce 11,4 km a Erstfeld – Amsteg (ZTT) v délce 7,1 km.

Průměr výrubu tunelu je v úseku Erstfeld a Amsteg navržen 9,58 m, v úseku Faido 9,43 m a nejmenší průměr tunelu 8,83 m byl použit v úseku Bodio. Délka tunelovacích strojů se pohybovala od 377 m až do 450 m a jejich váha od 2500 t do 3400 t. Přítlak na hlavu štítu osazenou 60 až 66 valivými dláty dosahoval 15 930 kN. Stopy dlát na čelbě při rotačním pohybu hlavy tunelovacího stroje ukazuje obr. 3. Hlavu razicího stroje při revizi a výměně řezných dlát znázorňuje obr. 4. Revize je prováděna v konvenčně vyražené kaverně v západní tunelové troubě úseku Faido. Průměrná rychlost ražby se pohybovala v rozmezí 10 m až 14 m za den a maximálního denního výkonu bylo dosaženo v úseku Erstfeld, kdy bylo za den vyraženo 56 m tunelu. V případě traťových tunelů uvedené tunelovací stroje vyrazily 80 % z jejich celkové délky, zbývajících 20 % připadá na konvenční způsob ražby s použitím trhacích prací a zajištěním stability výrubu pomocí stříkaného betonu a kotvení. Po započtení ražby multifunkčních stanic, tunelových propojek a dalších konvenčně ražených podzemních prostor se poměr mezi ražbou tunelovacími stroji a konvenční ražbou sníží z poměru 80/20 % na poměr 64/36 % (TBM/konvenční ražba). Při konvenční ražbě se délka záběru pohybovala od 1 m v nejhorších geotechnických podmínkách až po 4 m v nejkvalitnějším horninovém masivu. Průměrná rychlost ražby byla od 3 m do 4,5 m za den. Špičkového výkonu 11,5 m za den bylo dosaženo při ražbě z pracoviště Sedrun k jižnímu portálu ve východní tunelové troubě. Plocha výrubu konvenčně ražených profilů se pohybovala od 60 m^2 až do 250 m^2. Pro rozpojování horniny sloužila emulzní trhavina, která byla pumpována do vrtů délky

▼ *Obr. 3. Stopy dlát na čelbě – úsek Faido (VTT)*



až 4 m v počtu až 250 ks na čelbu a záběr v množství až 400 kg. V nejdelších záběrech bylo v jednom pracovním cyklu rozpojeno a vytěženo až 250 m^3 rubaniny.
Obdivuhodná byla i spotřeba materiálu na výstavbu tunelu: 4 000 000 m^3 betonu, 1 400 000 t cementu, 125 000 t oceli výztužných rámů primárního ostění, 3 000 000 m^2 výztužných sítí, 4800 km horninových kotev nebo 2 850 000 m^2 hydroizolační fólie. Na stavbě se na všech pracovních úrovních podílelo celkem 2600 zaměstnanců.

Historie projektu a časový postup prací

První myšlenky na nově otevřený tunelový podchod masivu Gotthard by pravděpodobně nevznikly bez realizace dlouhou dobu nejdelšího tunelu světa, starého Gotthardského železničního tunelu délky 15 km, jehož výstavba probíhala v letech 1871 až 1881. Ražba tunelu byla spojena s mnoha technickými i ekonomickými těžkostmi a vyžádala si 199 obětí na životech, včetně hlavního inženýra stavby, který v roce 1879 zemřel v tunelu na infarkt. Tunel byl proražen 29. února 1880 a uveden do provozu 1. června 1882, tj. přesně 134 let před slavnostním otevřením Gotthardského bázového tunelu.
První zmínka o tomto bázovém tunelu je spojena s rokem 1947 a inženýrem Eduardem Grunerem, který vizionářsky popisuje v technické eseji nazvané Cesta Gotthardským bázovým tunelem v roce 2000, jak má vypadat cesta 50 km dlouhým tunelem z Amstegu do Biasca, a to včetně vybudování podzemního nádraží. V textu se píše: *Vlak lehce přibrzdí a zastaví v hale tunelového nádraží Sedrun, která se hemží lidmi. Odtud je možno pohodlným výtahem umístěným v 830 m hluboké šachtě dosáhnout mondénního lyžařského centra do sedmi minut. Tak jsou lyžařské oblasti ve Vorderrheinu posunuty do hodinové vzdálenosti od Basileje, Curychu nebo Milána.* Tato jeho vize se znovu objevila při návrhu Gotthardského bázového tunelu a podzemní nádraží neslo název Porta Alpina. Z provozních i bezpečnostních důvodů však byla myšlenka veřejného podzemního nádraží pro obsluhu lyžařských areálů v nadloží tunelu opuštěna a v lokalitě Sedrun byla realizována jedna ze dvou podzemních stanic pro případ nouzového zastavení vlaku.
V roce 1961 byla vypsána soutěž na projekt dvoukolejného železničního tunelu v celkové délce 45 km, který by spojoval města Amsteg a Giornico a umožňoval jízdu vlaků rychlostí 200 km/h. Zhruba v polovině tunelu bylo navrženo předjížděcí nádraží. V roce 1970 navrhla komise výstavbu bázového tunelu Gotthard a výstavbu trasy Lötschberg. Dne 5. září 1980 byl po pěti letech výstavby otevřen silniční tunel Gotthard v délce 16,9 km. I tato skutečnost přispěla k novým poznáním a umožnila ověření funkčnosti tunelovacích metod v reálných podmínkách Gotthardského masivu. V letech 1990 až 1991 navrhla zemská rada a švýcarský parlament výstavbu nové transalpské železnice s bázovými tunely Gotthard a Lötschberg. Projekt je znám pod zkratkou NEAT (Neuen Eisenbahn-Alpentransversale). Výstavba tunelů a financování projektu NEAT 27. září 1992 bylo potvrzeno referendem s výsledkem 64 %. Dne 1. září 1993 přebrala projektová organizace švýcarských drah (SBB) s názvem AlpTransit od Spolkového úřadu pro dopravu odpovědnost za projekt AlpTransit Gotthard, který se skládal ze základní trasy od Arth-Goldau do Lugana a integrace východního Švýcarska do nově rozšiřované železniční sítě.
Velmi důležitý milník celého projektu představuje 20. únor 1994, kdy byla referendem odsouhlasena tzv. Alpská iniciativa, která zakotvuje ochranu Alp v ústavě Švýcarské konfederace. Spolkový parlament na žádost SBB schválil 12. dubna 1995 vedení trasy v tunelu Gotthard mezi Erstfeldem a Bodiem a v širé trati mezi Bodiem



▲ *Obr. 4. Hlava razicího stroje v ZTT úseku Faido*



▲ *Obr. 5. Těžní zařízení v šachtě Sedrun*



▲ *Obr. 6. Kaverna v patě šachty Sedrun*

▼ *Obr. 7. Kotvení výrubu za hlavou tunelovacího stroje – úsek Faido (VTT)*





▲ *Obr. 8. Zajištění stavební jámy portálu Erstfeld*



▲ *Obr. 9. Instalace hydroizolační fólie v úseku Amsteg (VTT)*

a Giustiziou. Dále bylo rozhodnuto, že tunel Gotthard bude tvořen dvěma jednokolejnými tunely spojenými zhruba 180 tunelovými propojkami, které budou sloužit jako záchranné cesty. Jako další provozně a bezpečnostně důležité prvky celkové koncepce tunelu byly navrženy dvě multifunkční stanice v oblasti Sedrunu a Faida, které měly sloužit mimo jiné k přejezdu vlaků mezi tunelovými troubami nebo k zastavení vlaku v případě mimořádné události. Celková délka ražených částí tunelového komplexu Gotthard ve schváleném návrhu přesahovala 153 km.

První přípravné a průzkumné práce v úseku Sedrun byly zahájeny 15. dubna 1996. Vzhledem ke způsobu financování stavby se kladl velký důraz na informovanost obyvatel. Za tímto účelem bylo otevřeno informační centrum AlpTransit – Sedrun. Krátce po zahájení prací v oblasti Sedrunu vydal 24. dubna 1996 Spolkový parlament rozhodnutí o stavbě a financování infrastruktury veřejné dopravy. Bylo rozhodnuto projekt NEAT etapizovat. Z celkové koncepce projektu podle referenda z roku 1992 rozhodl parlament o výstavbě trasy Gotthard v rozsahu bázových tunelů Zimmerberg, Gotthard a Ceneri, přičemž bázový tunel Lötschberg měl být provozován jako částečně jednokolejný. Spolkový parlament přijal 20. března 1998 dokument Výstavba a financování infrastruktury veřejné dopravy (FinöV) s upraveným programem výstavby a koncepce financování. Výše investic do velkých projektů v té době činila 30 mld. švýcarských franků. Projekt NEAT zahrnuje bázové tunely Gotthard, Lötschberg, Ceneri a Zimmerberg a dále napojení osy Gotthard na východní Švýcarsko v oblasti Curyšského jezera. Finanční prostředky tvoří z 55 % daně z provozu těžké dopravy, 19 % představuje zvýšení daně z pohonných hmot z 0,1 % na 10 % a zbývajících 26 % tvoří úvěry. Dne 12. května 1998 byla založena firma AlpTransit Gotthard AG. Jedná se o dceřinou společnost 100% vlastněnou SBB, která byla vytvořena z oddělení AlpTranzit původně pověřeným projektováním trasy Gotthard programu NEAT. Základní kapitál nově vzniklé firmy činil 5 mil. švýcarských franků.

V mnoha ohledech je jedním z významných roků v „životě" tunelu rok 1999. Konkrétně 4. února 1999 bylo zahájeno hloubení 850 m

▼ *Obr. 10. Betonáž sekundárního ostění v úseku Amsteg (VTT)*





▲ *Obr. 11. Pevná jízdní dráha v úseku Erstfeld*

hluboké šachty Sedrun, která sahá až do úrovně obou jednokolejných bázových tunelů a po dokončení hloubení i vystrojení šachty těžním zařízením umožňuje zahájit jejich ražbu. Výstavba šachty trvala až do 1. března 2000, celkem 391 dní. Oficiální zahájení ražby Gotthardského bázového tunelu na severní straně Alp proběhlo 4. listopadu 1999, kdy byla na staveništi Amsteg prvním odpalem zahájena ražba přístupové štoly v délce 1,8 km. Obdobná situace se opakovala o sedm měsíců později na jižní straně Alp a 10. června 2000 byla prvním odpalem na staveništi Bodio v oblasti Ticino v jižním Švýcarsku zahájena ražba obchozí štoly v délce 1,2 km. Vyhloubení šachty Sedrun umožnilo razit tunely nejen z portálů Erstfeld a Bodio, ale i z míst na trase tunelu. Dne 13. června 2001 byly stavebním firmám zadány první dva úseky tunelů. Jedná se o úsek z Bodia do Faida délky 15 km a úsek ze Sedrunu do Faida o délce necelých 14 km. Ražba jednokolejných traťových tunelů probíhala tunelovacími stroji TBM a 30. srpna 2001 byla ze staveniště Bodio dokončena ražba prvních 1000 m z celkem 57 km bázového tunelu Gotthard.

Součástí zakázky byla i konvenční ražba multifunkční stanice Faido. Její ražba započala 6. března 2002 po dokončení přístupové štoly. První tunelovací stroj zahájil ražbu z jižního portálu Bodio ve směru na Faido 7. listopadu 2002 a čekal ho úsek délky 15 km. První tunelovací stroj začal s ražbou ze severní strany Alp ze staveniště Amsteg 27. května 2003. Předtím byl hlavní pohon tunelovacího stroje o váze 177 tun naložen a po vodě dopraven z Lucernu do Flüelenu. Druhý tunelovací stroj započal ražbu ze stejného portálu 19. srpna 2003. Oba tunelovací stroje čekalo vyražení tunelů ve směru do Sedrunu v délce 11,4 km. Tam byla mezitím hloubena druhá šachta hloubky 820 m, vzdálená od první šachty pouhých 32 m. Vrtací stroj o hmotnosti 250 t šachtu prorazil 26. června 2003. Po dokončení ražeb byla šachta vybavena výtahem pro dopravu rubaniny a materiálu nutného pro výstavbu tunelu. Těžní zařízení a vstup do šachty ukazuje obr. 5. Na obr. 6 je pak zachycena konvenčně ražená kaverna v patě šachty, ve které probíhá nakládka rubaniny z důlních vozů do těžního zařízení šachty.

Na základě již provedených prací se vyhodnocovaly i ekonomické výsledky a porovnávaly s předpoklady projektu. Dne 10. září 2003 je vydána zpráva, ve které se koncept financování programu NEAT z roku 1998 ukazuje jako příliš optimistický. Jako okamžité opatření navrhuje Spolkový parlament pozastavení projektů tunelů Zimmerberg a Hirzel. Stavební práce na tunelu Gotthard dále pokračovaly a 19. června 2004 byly zahájeny práce také v Erstfeldu na severním portále Gotthardského bázového tunelu. Tak se paralelně pracovalo již v pěti úsecích tunelu. K datu 16. prosince 2004 prorazily tunelovací stroje Gabi I a Gabi II polovinu vzdálenosti mezi Amstegem a Sedrunem. Celkem je k tomuto datu vyraženo cca 40 % z celkem 151,840 km ražených úseků tunelu a jeho obslužných podzemních děl. Na dalších 10 %, tj. celkem 50 % z celkem předpokládaných ražeb, bylo nutno počkat dalších více než osm měsíců do 30. srpna 2005. I když se v souvislosti s ražbou tunelu mluvilo zejména o použití tunelovacích strojů, ražby byly k tomuto datu provedeny z poloviny razicími stroji a z poloviny konvenční ražbou rozpojováním horninového masivu trhacími pracemi a zajišťováním stability výrubu pomocí stříkaného betonu a kotvení.

Rivalita Švýcarů a Rakušanů v prvenství využití tunelovací metody s využitím samonosnosti horninového masivu a zejména dlouhotrvající spory o prvenství použití této metody či její název Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM) vedly k tomu, že je ve Švýcarsku pojem NRTM nepřijatelný a tunelovací metoda je označována např. jako metoda stříkaného betonu. Ten však tvoří jen část nosného systému ostění – hornina pomáhá spolu se systémovým kotvením udržet integritu nosného horninového prstence a zamezit jeho rozvolňování. Vyztužení horninového prstence kotvami není však jen výsadou konvenční ražby. Kotvení za hlavou tunelovacího stroje ukazuje obr. 7. Vzhledem k výšce nadloží a s ní spojenou geostatickou napjatostí by nebylo primární ostění ze stříkaného betonu v úsecích tlačivých hornin schopno vzdorovat velkým deformacím výrubu. Bez zvláštních opatření by docházelo k podrcení stříkaného betonu, vybočení výztužných rámů ostění a obecně ke ztrátě opory horninového prstence s následným snížením jeho nosné funkce. Z toho důvodu byly 21. září 2005 v úseku Sedrun poprvé navrženy pro zajištění stability výrubu v mimořádně tlačivém horninovém masivu deformovatelné ocelové rámy. Díky použité nové technologii provádění se podařilo zvládnout ražbu tunelu i v těchto velmi složitých geologických podmínkách.

K první prorážce na bázovém tunelu Gotthard došlo 6. září 2006. Téměř přesně čtyři roky po zahájení ražby z portálu Bodio se tunelovací stroj prorazil do konvenčně ražené multifunkční stanice Faido. Přesnost při prorážce byla horizontálně 50 mm a vertikálně méně než 20 mm. Další prorážka následovala 17. října 2007, kdy byla s devítiměsíčním předstihem proražena západní tunelová trouba v úseku Sedrun – Amsteg. Tunelovcí stroje razicí traťové tunely z pracoviště Amsteg byly po repasi nasazeny na ražbu tunelů ze severního portálu tunelu z pracoviště Ersfeld. Ražba byla zahájena v den svátku patronky horníků a tunelářů svaté Barbory 4. prosince 2007. Zajištění stavební jámy pro zahájení ražby na severním portále Erstfeld ukazuje obr. 8.

S probíhajícími ražbami tunelu probíhala příprava projektové dokumentace jeho stavebně technického vybavení. Smlouva na realizační dokumentaci a dodávku stavebně technického vybavení tunelu včetně napojení nové trasy na stávající železniční síť byla podepsána v Lucernu 29. dubna 2008. Objem dosud největší zakázky tohoto typu u firmy AlpTransit Gotthard AG činil 1,69 mld. švýcarských franků. Ve stejném roce schválil 16. září 2008 Spolkový parlament pro realizaci projektu NEAT úvěr v celkové výši 19,1 mld. švýcarských franků.



▲ *Obr. 12. Překonání světového rekordu prorážkou 15. října 2010, Sedrun*



▲ *Obr. 13. Vyhodnocení provozních parametrů při zkušebních jízdách*

Jednalo se o cenovou úroveň roku 1998 s výjimkou inflace, DPH a úroků v průběhu výstavby. Na trase Gotthard pro bázové tunely Gotthard a Ceneri vyčlenil parlament celkem 13,16 mld. švýcarských franků, čímž byl zacelen finanční deficit existující od roku 2004.

V roce 2008 se ražba traťových tunelů dostala do obávané tektonické poruchy Piora-Mulde. Východní tunelová trouba úspěšně prošla extrémně geotechnicky náročným úsekem a 15. října 2008 byla porucha v celé délce zdolána. V západní tunelové troubě byla ražba v poruše ukončena 3. února 2009. Práce na stavebním a technologickém vybavení tunelu bylo nutné provádět paralelně, aby bylo možné dosáhnout plánovaného harmonogramu výstavby. Z toho důvodu byly 18. května 2009 v Biascu zahájeny práce na technologickém vybavení tunelu. Zatímco v některých úsecích již probíhala montáž vybavení tunelu, v jiných úsecích ještě nebyla dokončena ražba. Od severního portálu byl proražen druhý úsek mezi pracovišti Erstfeld a Amsteg 16. června 2009. Přesnost při prorážce byla v tomto případě do 10 mm. V navazujícím úseku Amsteg – Sedrun a v západní tunelové troubě v úseku Bodio – Faido byla 18. prosince 2009 dokončena hrubá stavba obou tunelových trub. Instalaci hydroizolační fólie na primární ostění ze stříkaného betonu ukazuje obr. 9. Následně byla provedena betonáž monolitického sekundárního ostění (obr. 10). Obě fotografie zachycují pracoviště ve východní tunelové troubě úseku Amsteg. Pro montáž stavebnětechnického vybavení tunelu tak bylo připraveno 40 km tunelů, což představovalo více než třetinu z celkové délky. Práce na vybavení tunelu byly od jižního portálu zahájeny v západní tunelové troubě v úseku Bodio – Faido 25. června 2010. Do roku 2012 byl 16 km dlouhý dílčí úsek plně vybaven pevnou jízdní dráhou, trakčním vedením a sdělovacím i zabezpečovacím zařízením. Díky členění stavby na dílčí úseky probíhaly v průběhu výstavby jednotlivé prorážky v těchto úsecích a každá z nich představovala další významný krok k cíli. Tím bylo překonání světového rekordu v délce tunelu. Zlomový okamžik nastal 15. října 2010, kdy bylo kompletní prorážkou východní tunelové trouby v úseku Sedrun – Faido dosaženo světového rekordu v délce tunelu 57 km a starý rekord byl překonán o více než 3 km. Slavnostní okamžik prorážky a dosažení světového rekordu v délce tunelu ukazuje obr. 12. V západní tunelové troubě došlo ve stejném úseku ke kompletní prorážce 23. března 2011. Tím byly ražby obou tunelových trub bázového tunelu Gotthard ukončeny. Po úseku Bodio – Faido byly 2. září 2011 zahájeny práce na montáži stavebnětechnického vybavení tunelu i od severního portálu Erstfeld. V dalších čtyřech letech byla v tomto sledu provedena převážná část pevné jízdní dráhy (viz obr. 11), trakčního vedení, sdělovacího a zabezpečovacího zařízení i dalšího vybavení tunelu.

Výstavba tunelu není jen překonávání geotechnických úskalí, betonáž ostění nebo technologické vybavení tunelu. Primárním cílem stavby je ochrana životního prostředí v alpské oblasti Švýcarska a této problematice byla věnována po celou dobu výstavby mimořádná pozornost. Při rozsahu prací v podzemí bylo nutné vytěžit obrovské množství materiálu. Pro dopravu materiálu z tunelu byly použity pásové dopravníky v celkové délce cca 70 km. Celkem se z podzemí vytěžilo 28,2 mil. t horniny. Rubanina nebyla považována za odpad a snahou bylo najít pro ni v maximální možné míře v rámci stavby další uplatnění. To se podařilo a 33 % vytěženého materiálu se použilo jako kamenivo do stříkaného betonu primárního ostění i monolitického betonu sekundárního ostění. Pro zpětné zásypy, násypy a rekultivaci bylo použito 66,3 % vytěženého materiálu a jen 0,7 % materiálu bylo uloženo jako nepoužitelného k výše uvedeným účelům. S využitím materiálu byla tvarována krajina a vznikl i umělý ostrov pro hnízdění vodních ptáků. Pro zlepšení životní úrovně obyvatel byla 9. června 2012 po rekultivaci deponie materiálu z výrubu tunelu nedaleko Sedrunu v lokalitě Tujetsch slavnostně otevřena rekreační oblast Lag Claus Surrein s umělým jezerem o výměře 3200 m^2.

Hospodárné nakládání s rubaninou však nebylo jediným předmětem zájmu ekologického využití možností, které tunel nabízí. Jak již bylo řečeno, v úsecích s vysokým nadložím dosahovala teplota horninového masivu více než 40 °C Firma Basis57 proto zakoupila 18. září 2014 na západním portále tunelu pozemek o výměře 2,5 ha, na kterém využívá teplou drenážní vodu z tunelu k chovu domácích ryb a korýšů. Z tunelu drenážemi vytéká 150 až 400 l/s vody, která je zachycována a využívána k získávání geotermální energie.

S postupem času práce na technologickém vybavení tunelu pomalu převažovaly nad stavebními pracemi a 5. září 2012 vyjíždějí po definitivních kolejích zástupci vlády prvním osobním vlakem z Erstfeldu do Sedrunu. Prezidentka Eveline Widmer-Schlumpfová na místě zdůrazňuje význam projektu NEAT pro evropskou železniční síť. Svou roli stále hraje i snaha účastníků výstavby v maximální možné míře informovat obyvatele o vývoji projektu a dosažených úspěších při výstavbě tohoto mimořádně náročného technického díla. O zájmu laické i odborné veřejnosti svědčí i fakt, že 23. srpna 2013 uvítalo informační centrum Erstfeld miliontého návštěvníka stavby. První vlak projíždí za účasti novinářů celou 57 km dlouhou trasu tunelu z Bodia do Erstfeldu 30. srpna 2013. V té době chybí do úplného



▲ *Obr. 14. Tunel Gotthard uvedený do provozu*

zprovoznění tunelu ještě cca 1000 dní. Za necelé čtyři měsíce je však 16. prosince 2013 oficiálně zahájen zkušební provoz v západní tunelové troubě. Na 13 km dlouhé zkušební trase mezi Bodiem a Faidem jede vlak poprvé rychlostí 160 km/h. Zkušební provoz, který trval do 16. června 2014, byl po 650 úspěšných jízdách vlaků a 78 testovacích dnech v tunelu ukončen. Na zkušebním úseku mezi Bodiem a Faidem jezdily vlaky rychlostí až 220 km/h. Zkušební provoz poskytl důležité informace pro testovací provoz celého systému tunelu a zprovoznění tunelu v prosinci 2016. Záběry z monitorování provozních parametrů při zkušebních jízdách ukazuje obr. 13. Dne 11. prosince 2016 byl přesně 134 let po otevření prvního železničního tunelu pod masivem Gotthard nový bázový tunel Gotthard uveden do provozu (viz obr. 14).

Závěr první části

V prvním díle se měl čtenář možnost seznámit se základními informacemi o projektování a stavbě nejdelšího tunelu světa. V dalším díle se budeme podrobněji zabývat geologickými poměry v trase tunelu, zajímavými technickými řešeními, která byla v konkrétních podmínkách stavby použita, i komplikacemi, jež bylo nutné v průběhu výstavby překonat. I když je Gotthardský bázový tunel momentálně nejdelším tunelem na světě, již v tomto okamžiku je ve výstavbě Brennerský bázový tunel spojující Rakousko s Itálií, který svou délkou tunel Gotthard překoná. I když se po dokončení tunel Brenner zapíše do knihy rekordů, nejde v oboru podzemních staveb o dosažení „vítězství" z hlediska délky tunelu, množství vytěženého materiálu nebo velikosti plochy výrubu. I když se u tunelu uvádí životnost sto let, stavby významu bázových tunelů by měly stavebně i morálně tuto časovou hranici překonat. Díky prostředí, ve kterém jsou tunely raženy, je každé takové dílo unikátní a vyžaduje bez ohledu na rekordy pozitivní spojení sil všech účastníků výstavby, aby bylo cíle dosaženo bezpečně, s požadovaným přínosem do vedení trasy a za vynaložení nezbytně nutných investičních nákladů. V případě tunelu Gotthard se díky referendu ohledně jeho financování a tím i výstavbě aktivně a vědomě podílel každý občan Švýcarska. ■

english synopsis

The Gotthard Base Tunnel from Initial Ideas to Putting into Operation

The new Gotthard Base Tunnel's length of 57 km is not the only parameter that deserves to attract the attention of the technical community. During construction, the tunnel had to be driven beneath the Gotthard Massif under complicated geological conditions with an overlying stratum of as much as 2,300 metres in frequently winding rock with extraction deformation of the order of tens of centimetres, the method of financing had to be resolved in the typically Swiss form of a referendum, the removal and disposal of an enormous quantity of broken rock and the transportation of the building material required for the construction of the tunnel had to be secured logistically, and the safe and ecological construction and operation of the tunnel had to be assured. The media in the Czech Republic largely noted the news of the opening of the longest tunnel in the world merely by stating the work's basic parameters. This paper attempts to describe this extraordinary work in greater detail.

klíčová slova:
bázový tunel Gotthard, nejdelší tunel světa

keywords:
the Gotthard Base Tunnel, the longest tunnel in the world