text Libor Mařík | grafické podklady archiv BBT-SE

Brennerský bázový tunel: moderní železnice míří do podzemí



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., od roku 2005 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

Zatímco v České republice obor podzemních staveb pomalu skomírá, kontinuitu přípravy a výstavby tunelů se nedaří zachovat, dodavatelské firmy pro své přežití hledají práci v zahraničí a vysoké školy díky malé perspektivě oboru opouští čím dál méně studentů se zaměřením na geotechniku a podzemní stavby, v Evropě tento obor prožívá mimořádný rozmach. Ve výstavbě jsou tunelové stavby, které by ještě nedávno byly spíše námětem sci-fi literatury a jejichž projektování i provádění vyžaduje zkušené týmy odborníků v celé řadě profesí.

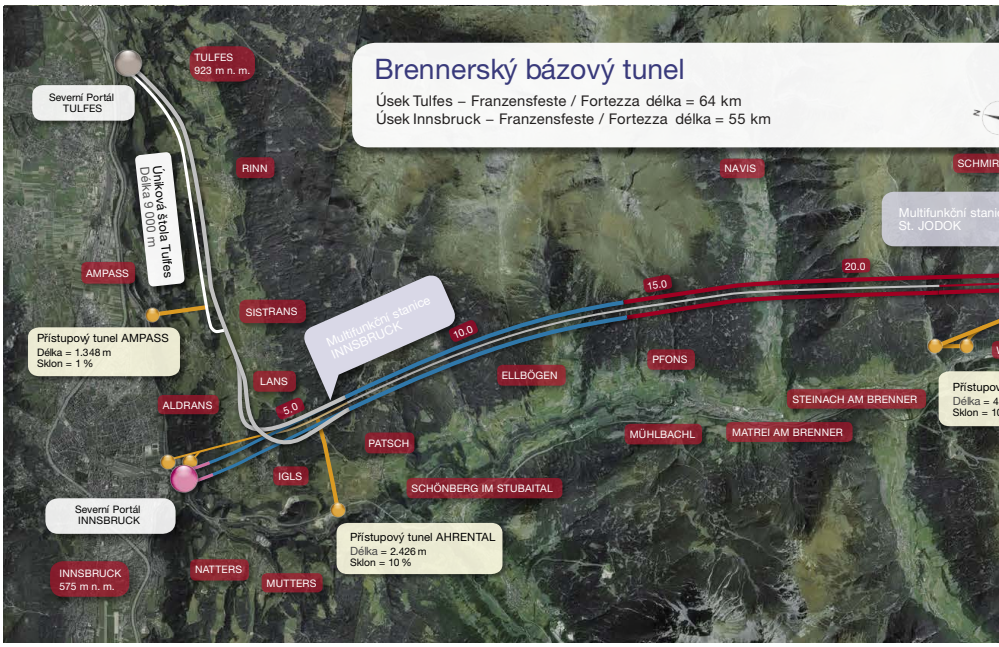
Ve snaze poskytnout v rámci Evropy alternativu k neekologické kamionové přepravě zboží i osobní letecké dopravě neustále vzrůstá význam vysokorychlostních tratí. Jejich páteřní sítě se mimo území ČR úspěšně rozrůstají a stávají se významným hospodářským i společenským prvkem propojení evropských zemí. Trasování vysokorychlostních tratí vyžaduje s ohledem na hospodárnost provozu, požadovanou rychlost i ekologické aspekty vedení trasy v tunelech mimořádných délek. Nejdelším tunelem na světě se po nedávno otevřeném 57 km dlouhém Gotthardském bázovém tunelu v historicky krátké době stane Brennerský bázový tunel délky 64 km, jehož výstavba je již v plném proudu.

Úvod

Výstavba vysokorychlostních tratí vyžaduje dlouhodobou koncepci vedení tras, technickou i politickou spolupráci na mezinárodní úrovni a z mnoha důvodů směřuje do podzemí. V současné době jsou např. rozestavěné bázové železniční tunely Semmering v délce 27,3 km nebo Koralm v délce 33,9 km, které tvoří součást rakouské železniční sítě. Pokud k těmto tunelům připočítáme 64 km dosud nejdelšího plánovaného tunelu světa, jehož výstavba započala již v roce 2011, dosahují jen tyto tři tunely v součtu délky 125 km. Toto číslo však není zdaleka konečné. Vzhledem k tomu, že tunely jsou raženy jako dvoutroubové, je délka traťových tunelů ve skutečnosti dvojnásobná, tj. cca 250 km. Součástí bázových tunelů jsou však i přístupové tunely a šachty, servisní tunely, tunelové propojky a podzemní multifunkční stanice. Jen v rámci výstavby Brennerského bázového tunelu o délce traťových tunelů 64 km bude vyraženo celkem 230 km podzemních děl, takže celková délka ražených objektů jen na uvedených třech bázových tunelech přesahuje 400 km. Každá z těchto staveb je svým způsobem unikátním technickým dílem a zaslouží si pozornost odborné veřejnosti.

▼ *Obr. 1 Trasa Brennerského bázového tunelu*



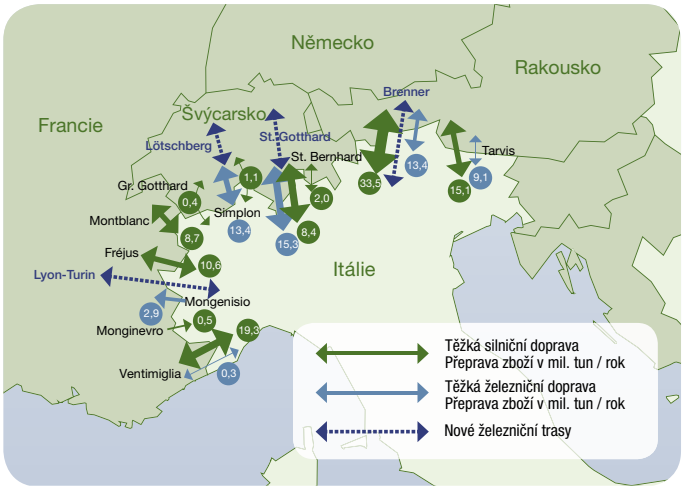


Další text se věnuje nejdelšímu z uvedených tunelů – Brennerskému bázovému tunelu, který by se měl po svém dokončení v roce 2026 a uvedení do provozu v roce 2027 stát nejdelším tunelem světa.

Proč stavět tunel pod Alpami?

Brennerský průsmyk tvoří již od doby bronzové významnou severojižní spojnici, kterou proudilo zboží od severního moře až po jih Evropy. Druh i objem přepravovaných komodit se v průběhu doby měnil, množství neustále narůstalo a narůstá. Ve 14. století, kdy se jednalo především o zeleninu, víno, cukr, olej a bavlnu, objem přepravy dosahoval 3000 t ročně. Na začátku 19. století se již jednalo o 15 000 t a o padesát let později přepravovaly koňské povozy Brennerským průsmykem ročně až 60 000 t zboží. K dalšímu velkému skoku došlo 24. srpna 1867 po uvedení Brennerské dráhy do provozu a zejména pak po výstavbě a uvedení do provozu Brennerské dálnice A13/A22 17. listopadu 1963, kdy se objem přepravovaného zboží vyšplhal až k 10 mil. t za rok. S narůstající intenzitou kamionové dopravy, zvyšováním možností železniční dopravy a celkovou globalizací narostl do roku 2008 objem přepravy zboží Brennerským průsmykem na 50 mil. t za rok. Hospodářská krize v roce 2009 sice objem o cca 20 % snížila, ale se zlepšením hospodářské situace opět každoročně stoupá, přičemž 70 % celkového objemu zboží přebírá kamionová doprava a 30 % železnice.

Mapka na obr. 2 ukazuje aktuální stav přepravy zboží přes Alpy, kdy Brennerským průsmykem směřuje 40 % veškerého objemu nákladní silniční a železniční dopravy. V roce 1994 se EU rozhodla čelit trendu zvyšující se těžké silniční dopravy a podpořit rozvoj železniční infrastruktury a jejího udržitelného rozvoje. S rozvojem dopravních os TEN v devadesátých letech 20. století byl v tomto směru učiněn první krok. V prosinci 2013 se EU rozhodla přepracovat koncepci TEN na nadnárodní multimodální dopravní spojení. Nové hlavní koridory TEN-T v současnosti spojují železniční infrastrukturou důležité evropské námořní přístavy. Nejdelším a nejdůležitějším spojením sever – jih v Evropě je koridor SCAN-MED (Skandinávie – Středomoří). Toto dopravní spojení je nesmírně důležité pro evropské hospodářství a mobilitu, neboť spojuje významná městská centra s přístavy ve Skandinávii a Středomoří. V koridoru SCAN-MED tvoří Brennerský bázový tunel centrální infrastrukturní projekt pro překonání přirozené bariéry Alp

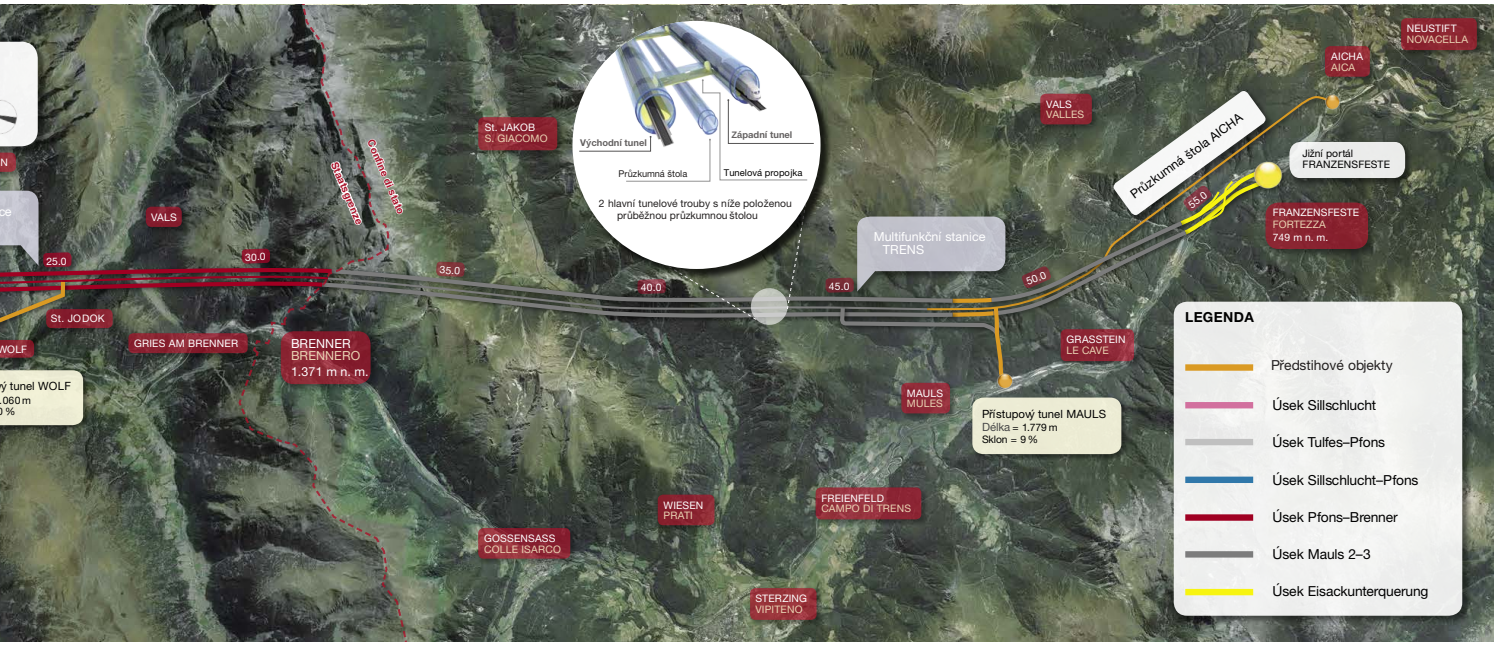


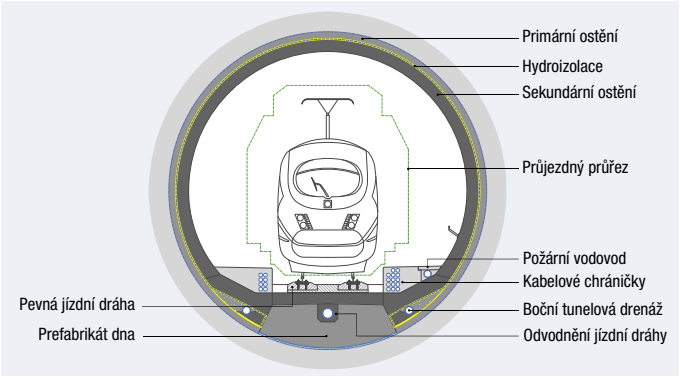
▲ *Obr. 2 Schéma vedení nákladní dopravy přes Alpy*

a má tak v EU nejvyšší prioritu, neboť zkrátí délku železničního spojení mezi Innsbruckem a Franzensfeste ze 75 km na 55 km a dobu jízdy z 80 min. na 25 min. V případě Brennerského bázového tunelu však nejde jen o zkrácení trasy nebo doby jízdy, ale při podzemním vedení trasy s malým podélným sklonem jde také o výraznou a především dlouhodobou úsporu energie a s ní spojených provozních nákladů.

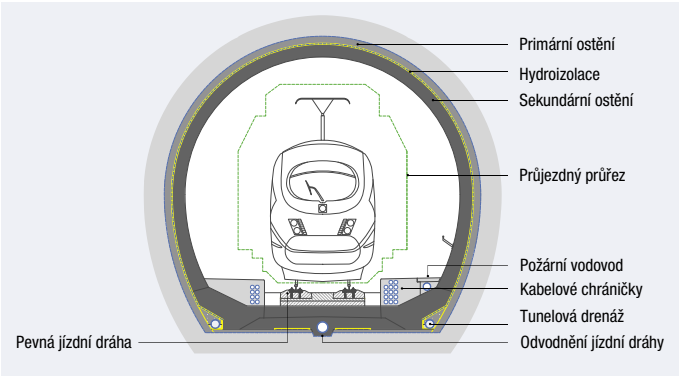
Základní informace o technickém řešení tunelu

I když Brennerský průsmyk s výškou 1371 m n. m. patří k nejnižším alpským průsmykům, vyžaduje výškové vedení železnice s provozně nutným minimálním sklonem ražbu tunelu na bázi masivu Brenner. Odtud pochází i název Brennerský bázový tunel. Tunel je navržen o dvou jednokolejných tunelových troubách průměru 8,1 m, které jsou od sebe vzdáleny 40 m až 70 m. Zhruba 12 m pod úrovní traťových tunelů je mezi nimi navržena průzkumná štola o průměru 6 m, která je ražena v předstihu před traťovými tunely a slouží k ověření a upřesnění prognózy inženýrskogeologických podmínek v trase tunelu. I když v rámci





▲ *Obr. 3 Tunel ražený TBM*



▲ *Obr. 4 Konvenčně ražený tunel*

vrtného průzkumu prováděného z povrchu území bylo realizováno 35 km vrtů, jedná se vždy o bodové informace s omezenou mírou možnosti extrapolace výsledků do trasy tunelu. Z celkového počtu 350 vrtů bylo 25 hlubších než 500 m a nejhlubší vrt dosahoval délky 1420 m. Podle prognózy se očekává, že 70 % délky traťových tunelů se bude razit razicími stroji a 30 % konvenční tunelovací metodou. Příčný řez traťového tunelu raženého TBM ukazuje obr. 3, příčný řez podkovovitého tvaru konvenčně raženým tunelem pak obr. 4. Tyto předpoklady se budou na základě výsledků získaných z průzkumné štoly dále upravovat s ohledem na minimalizaci rizik, výše investičních nákladů a doby výstavby. Po uvedení tunelu do provozu bude průzkumná štola sloužit především pro odvodnění traťových tunelů, ale také pro servis a logistiku.

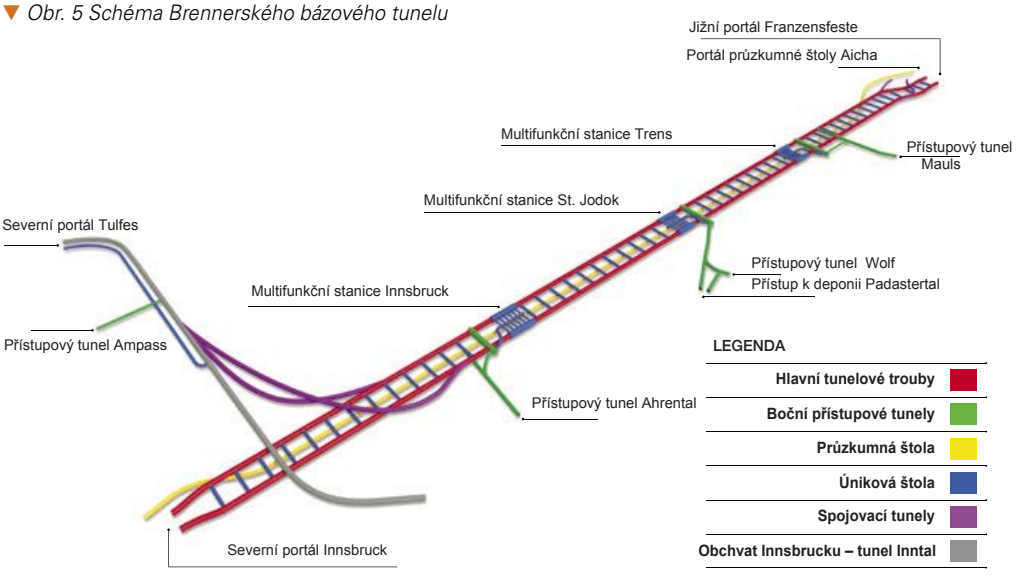
Z hlediska výškového vedení trať nejprve na rakouské straně stoupá ve sklonu 0,67 % k nejvyššímu bodu výškového oblouku v úrovni 790 m n. m., odkud na italské straně klesá ve sklonu 0,4 % k portálu Franzensfeste. Vrchol výškového oblouku se nachází přesně pod hranicí mezi Rakouskem a Itálií. Důvodem je údajně požadavek italské strany, aby horninová voda z italského území odtékala tunelem do Itálie. Přímým spojením severního a jižního portálu by měl tunel pouze jednostranný sklon a stoupal by plynule z portálu v rakouském Innsbrucku ve výšce 575 m n. m. k italskému portálu Franzensfeste ve výšce 749 m n. m., takže by veškerá podzemní voda tunelovými drenážemi odtékala na rakouské území.

Na rakouské straně má tunel dvě vyústění. Jedná se o portály Innsbruck a Tulfes, neboť po dokončení tunelu se jeho součástí stane i část dvoukolejného tunelu Inntal, jehož ražba probíhala v období od října 1989 do února 1993 a který byl jako obchvat Innsbrucku pro odklon nákladní železniční dopravy uveden do provozu již v roce 1994. Tunel Inntal v současné době propojuje Unterinntalbahn a stávající Brennerbahn, aniž by nákladní vlaky musely projíždět nádražím v Innsbrucku. Při výstavbě tunelu o délce raženého úseku 12 696 m se již tehdy počítalo s napojením na Brennerský bázový tunel a pro tento případ byla jako součást tunelu připravena odbočovací kaverna, ve které dvě koleje pokračují ve směru obchvatu Innsbrucku a dvě koleje odbočují do budoucího Brennerského bázového tunelu. Z portálu Innsbruck bude délka Brennerského bázového tunelu 55 km, z portálu Tulfes 64 km.

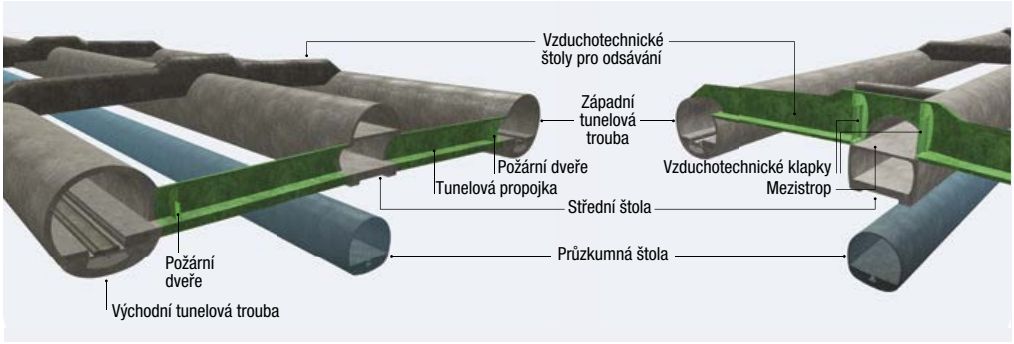
Stavební opatření k zajištění bezpečnosti provozu

Souběžně ražené traťové tunely jsou z důvodu zajištění bezpečnosti provozu každých 333 m propojeny příčným propojením, které slouží v případě mimořádné události jako úniková cesta do druhé tunelové trouby. Vzhledem k délce tunelu je kromě únikových cest tunel vybaven i třemi podzemními multifunkčními stanicemi v délce 470 m, které slouží pro nouzové zastavení vlaku a jsou s povrchem propojeny přístupovými tunely. Na rakouské straně se jedná se o podzemní stanice Innsbruck s přístupovým tunelem Ahrental, stanici St. Jodok s přístupovým tunelem Wolf a na italské straně stanici Trens s přístupovým tunelem Mauls. Stanice jsou od sebe vzdáleny 20 km. Přehledné schéma Brennerského bázového tunelu s napojením na tunel Inntal a doprovodnými podzemními stavbami ukazuje obr. 5. Mezi traťovými tunely je v místě stanice situována střední štola, která je s tunely propojena každých 45 m spojovací chodbou. Profil střední štoly je rozdělen mezistropem, přičemž dolní část profilu slouží ke shromažďování osob a jejich evakuaci, zatímco horní část profilu je každých 90 m propojena vzduchotechnickými kanály s traťovými tunely a v případě požáru slouží k odsávání znečištěného vzduchu. Schéma multifunkční stanice se systémem tunelových propojek a vzduchotechnických štol ukazuje obr. 6. Znečištěný vzduch ze vzduchotechnického systému štol je pak např. v případě stanice Innsbruck vypouštěn do ovzduší přes 200 m hlubokou šachtou situovanou do oblasti Patsch. Fotografii z hloubení šachty a jejího zajištění ostěním ze stříkaného betonu ukazuje obr. 7.

▼ *Obr. 5 Schéma Brennerského bázového tunelu*



Prostory pro cestující jsou zabezpečeny přetlakovým větráním tak, aby v případě otevření dveří z prostoru nástupiště do tunelových propojek nedošlo k vniknutí kouře do chráněné únikové cesty. Pro záchranu cestujících je primárně určen evakuační vlak, který by byl v případě nouzového zastavení vlaku přistaven v druhé tunelové troubě. Evakuace je možná i přímým propojením střední štoly stanice přes přístupový tunel na povrch území.



▲ *Obr. 6 Schéma multifunkční stanice*

Protože tunel Inntal byl ražen jako dvoukolejný a stane se součástí Brennerského bázového tunelu, je z důvodu zajištění bezpečnosti provozu navržena paralelně vedená úniková štola v délce 9,4 km o ploše výrubu 30 m^2 až 40 m^2. Pro potřeby výstavby je místně pojmenovaná Tulfes. I ražba této štoly neprobíhá pouze od portálu a je provedena ze tří čeleb – jednak od portálu Tulfes západním směrem, jednak z již v roce 2013 vyraženého přístupového tunelu Ampass východním i západním směrem. Stejně jako v případě nově ražených traťových tunelů bázového tunelu je tunel Inntal propojen s únikovou štolou po 333 m tunelovými propojkami. Obr. 8 ukazuje schéma napojení již provozovaného tunelu Inntal na Brennerský bázový tunel pomocí spojovacích tunelů, polohu přístupového tunelu Ampass, vedení únikové štoly i další podzemní objekty v této oblasti.

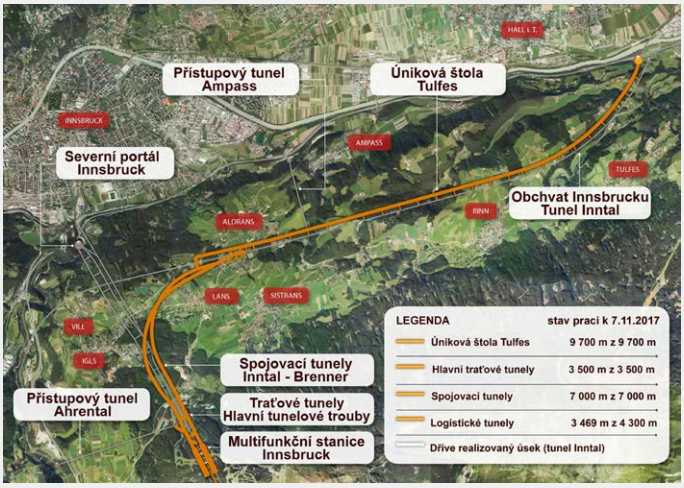
Zvláštní technické řešení si z hlediska zajištění bezpečnosti provozu vyžádalo napojení dvoukolejného tunelu Inntal s nově raženými traťovými bázovými tunely. V úseku spojovacích tunelů není vedena paralelní úniková štola a vzhledem k výškovému vedení obou tunelů není ani možné jejich vzájemné propojení příčnými propojkami. Z toho důvodu je u spojovacích tunelů zvolen profil příčného řezu o ploše výrubu 110 m^2, který umožňuje rozdělení tunelu na část určenou pro provoz a část určenou pro únik osob. Oba prostory odděluje svislá železobetonová stěna o tloušťce 450 mm. Příčný řez spojovacím tunelem ukazuje obr. 9. Spojovací tunely bylo nutné napojit na odbočovací kavernu provozovaného tunelu Inntal. Za tímto účelem byly naplánovány v úseku obchvatu Innsbrucku třídenní výluky, které trvaly od začátku února do konce března 2016 vždy od soboty 8.00 hod. do pondělí 17.00 hod. V těchto výlukách bylo možné provádět trhací práce i napojení stavebních konstrukcí na již dříve připravený zárodek Brennerského bázového tunelu z odbočovací kaverny tunelu Inntal.

Ve stěně spojovacích tunelů jsou každých 333 m umístěny dveře propojující oba prostory. V tunelovém rozpletu spojujícím nově ražené jednokolejné bázové tunely s tunelem Inntal zároveň dochází k přechodu z italského levostranného provozu na rakouský pravostranný železniční provoz. Oba spojovací tunely jsou zaústěny do odbočovací/připojovací kaverny ražené v rámci multifunkční stanice Innsbruck.

Atypické profily jsou raženy pomocí NRTM s dvouplášťovým ostěním a mezilehlou hydroizolací. Všechny nosné konstrukce bázového tunelu jsou navrženy na životnost 200 let.

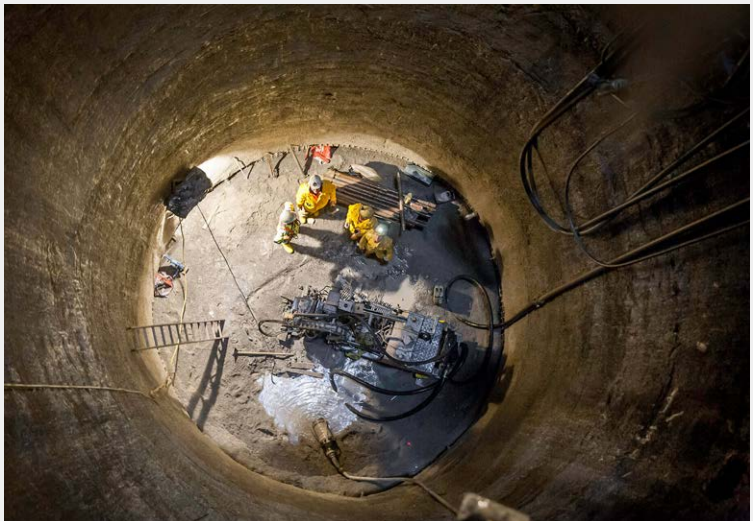
Členění stavby na úseky

Vzhledem k délce tunelu a množství doprovodných podzemních objektů je nutné stavbu rozdělit na úseky, které budou z časových i logistických důvodů prováděny paralelně. K přístupu mechanismů a pro dopravu materiálu i rubaniny je proto nutné v předstihu vyrazit přístupové tunely. Pro úseky ražené pomocí tunelovacích strojů slouží přístupové tunely pro dopravu dílů tunelovacího stroje, který se pak montuje v konvenčně ražených kavernách v trase budoucích traťových tunelů. Příčný řez tunelu musí proto odpovídat požadavkům na dopravu dílů tunelovacích strojů. Kromě portálů Tulfes, Innsbruck a Franzensfeste bude proto ražba probíhat i z přístupových tunelů Ampass, Ahrental, Wolf a Mauls. Tunel Ampass je navržen v délce 1,348 km, ploše výrubu 38 m^2 a ve

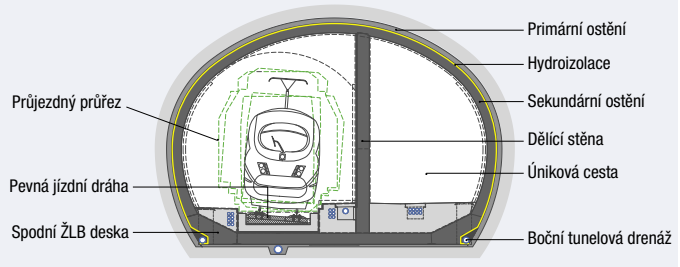


▲ *Obr. 8 Schéma napojení tunelu Inntal na Brennerský bázový tunel*

▼ *Obr. 7 Vzduchotechnická šachta Patsch*



▼ *Obr. 9 Příčný řez spojovacím tunelem*



sklonu 1 %. Přístupový dvoupruhový tunel Ahrental je navržen v délce 2,426 km o ploše výrubu 95 m² až 120 m² a je ražen úpadně ve sklonu 11,6 % směrem k trase bázového tunelu. Přístupové tunely z pracoviště Wolf mají celkovou délku 4,7 km. Vlastní tunel Wolf délky 4 km svou plochou výrubu 120 m² převyšuje rozměry běžného dálničního tunelu. Z pracoviště Wolf je vyražen i tunel Padaster délky 701 m, jenž zajišťuje přístup do údolí Padastertal, ve kterém je situována největší deponie vyrubaného materiálu v celé trase bázového tunelu. Do údolí by mělo být postupně uloženo až 7,7 mil. m³ rubaniny. Další deponie jsou navrženy v oblasti Hinterriger (4,6 mil. m³), Ahrental (2,7 mil m³), Ampas (0,77 mil. m³) a Genauen (0,15 mil. m³). Délka přístupového tunelu Mauls o ploše výrubu 92 m² a sklonu 9,3 % dosahuje 1,779 km.

Inženýrskogeologické poměry v trase díla

Brennerský bázový tunel geograficky prochází mezi Innsbruckem a Franzensfeste centrální oblastí východních Alp. Geologicky protíná střed kontaktní zóny evropské a jadranské kontinentální desky s metamorfovanými sedimenty, původními zbytky hornin mořského dna a jeho sedimentárního pokryvu. Horotvorné procesy zapříčinily v dané oblasti vznik celé řady tektonických poruch. Trasu tunelu ve směru od Innsbrucku k Franzensfeste tvoří následující základní geologické formace. Do vzdálenosti cca 14 km od portálu Innsbruck je tunel ražen ve fylitech, ve kterých je ražena i multifunkční stanice Innsbruck. Mezi hlavní minerály těchto přeměněných hornin patří křemen a slída. Na fylity navazují měkké, mírně tlačivé břidlice subpenninika, které se v tunelu vyskytují až do vzdálenosti 30 km od severního portálu. Jedná se o mořské sedimenty a níže položené vyvřelé horniny, které byly při alpských horotvorných pohybech za vysokých teplot a tlaků přeměněny na vápenaté, slídnaté nebo grafitické břidlice. Mezi významné minerály patří kalcit, slída, křemen, amfibolit a v případě grafitických břidlic grafit. V těchto horninách je ražena multifunkční stanice St. Jodok. Dalších 6 km tunelu se nachází v horninovém masivu tvořeném kompaktními a stabilními rulami. Tato oblast ležící přibližně pod hranicí mezi Rakouskem a Itálií se nazývá Altes Dach (stará střecha) nebo též centrální rulový masiv. Výška nadloží v tomto úseku přesahuje 1000 m. Na ni opět navazuje zóna břidlic, a to až do vzdálenosti 45 km od portálu. Dalších 5 km tunelu se nachází v masivu tvořeném horninami krystalinika. Přechod do úseku velmi tvrdých a houževnatých brixenských granitů, které se v trase tunelu vyskytují až k jižnímu portálu tunelu, komplikuje největší alpská tektonická porucha, známá pod názvem Periadriatický zlom. Ten se táhne v délce 700 km zhruba rovnoběžně s pobřežím Jaderského moře a odděluje jižní a východní Alpy. Jeho mocnost místy přesahuje 1000 m a Brennerský bázový tunel přetínal tuto poruchu v délce cca 700 m. Podél této poruchy docházelo v geologické historii k vertikálnímu i horizontálnímu posunu, přičemž v případě jižních Alp byly vyzdviženy geologické vrstvy v řádu kilometrů. Je také známo, že zhruba před 100 mil. let došlo oproti původní poloze k posunu jižních Alp o 50 km až 100 km.

V případě ražby tunelů se však častěji než o geologických podmínkách, které závisejí pouze na geologické stavbě území, hovoří o geotechnických podmínkách, jež kromě vlastností horninového masivu jako celku ovlivňují i další skutečnosti, jako je výška nadloží, tvar a velikost výrubu nebo schopnost horninového masivu po určitou dobu zachovat stabilitu nezajištěného výrubu. Na geotechnických podmínkách závisí i volba tunelovací metody nebo typ tunelovacího stroje. Pro ražbu tunelů ve složitých a proměnných geotechnických podmínkách bývají nasazeny konvenční tunelovací metody, ke kterým patří NRTM nebo v Itálii rozšířená metoda ADECO-RS. Konvenčními tunelovacími metodami byly úspěšně vyraženy i podzemní objekty v oblasti Periadriatického zlomu a jsou jimi raženy i geometricky složité tvary podzemních prostor, ke kterým patří podzemní multifunkční stanice, kaverny pro montáž tunelovacích strojů, složité prostupy nebo tunelové rozplety. Tunelovací stroje jsou na Brennerském bázovém tunelu nasazeny jak v uzavřené variantě, kdy zajištění stability výrubu tvoří prefabrikované dílce, nebo v otevřené variantě určené do zvlášť dobrých geologických podmínek, kdy je za řeznou hlavou tunelovacího stroje stabilita výrubu zajištěna stejně jako u konvenčních tunelovacích metod pomocí primárního ostění ze stříkaného betonu a kotvením nosného horninového prstence. Z těchto důvodů je správná prognóza geotechnických podmínek v trase tunelu významným podkladem pro správnou volbu tunelovací metody i použitého tunelovacího stroje.

Historie projektu Brennerského bázového tunelu a fáze výstavby

První dochované informace o návrhu železničního tunelu pod Brennerským průsmykem jsou spojené s rokem 1847 a italským inženýrem Giovannim Qualizzou. Jeho myšlenka však na dlouhou dobu upadla v zapomnění a brennerská železnice, která byla stavěna v letech 1859 až 1867, byla uvedena do provozu bez tohoto tunelu. I tak však její výstavba vyžadovala ražbu 22 tunelů v celkové délce 5233 m. Vzhledem k požadovanému maximálnímu sklonu železnice a nutnému zdolání výškového rozdílu se výstavba dráhy neobešla bez ražby spirálových tunelů v údolí Schmirntal a Pflerchstal. V té době byl Brennerský tunel při stávajícím stavu techniky a poznání považován za obtížně realizovatelné inženýrské dílo. Dodnes tvoří Brennerská dráha jako součást trasy Mnichov – Innsbruck – Verona základní železniční spojnici mezi Německem a Itálií.

V roce 1987 byla myšlenka Brennerského bázového tunelu oprášena ve formě studie proveditelnosti, která byla na setkání ministrů Německa, Rakouska a Itálie 16. dubna 1989 v italském Udine prohlášena za podklad pro další práce na projektu tunelu. Dne 10. dubna 1994 vyhlásila Rada Evropy Brennerskou osu s Brennerským bázovým tunelem jako projekt č. 1 v katalogu projektů TEN-T. V rámci železničního propojení Mnichova a Verony došlo v letech 1996 až 1997 k další technické i ekonomické optimalizaci trasy včetně Brennerského bázového tunelu. Vlastní projekt tunelu začal v roce 1999, kdy ministři dopravy Rakouska a Itálie založili Evropské hospodářské zájmové sdružení (EWIV) pro plánování Brennerského bázového tunelu a do roku 2002 probíhala jeho první fáze, v jejímž závěru byla určena základní definice trasy. Smlouvu o výstavbě tunelu podepsali ve Vídni 30. dubna 2004 ministři dopravy Rakouska a Itálie Hubert Gorbach a Pietro Lunardi. Ražbě vlastních tunelů měla předcházet ražba průzkumných štol a šachet v celkové délce 52 km s předpokládaným termínem dokončení v roce 2010. Rakouská spolková vláda se rozhodla 12. července 2005 převzít 12,5 % z předpokládaných nákladů na tato průzkumná díla, což v té době představovalo částku 430 mil. eur. Tirolská zemská vláda se na této částce podílela 54 mil. eur. Předpokládaný termín uvedení

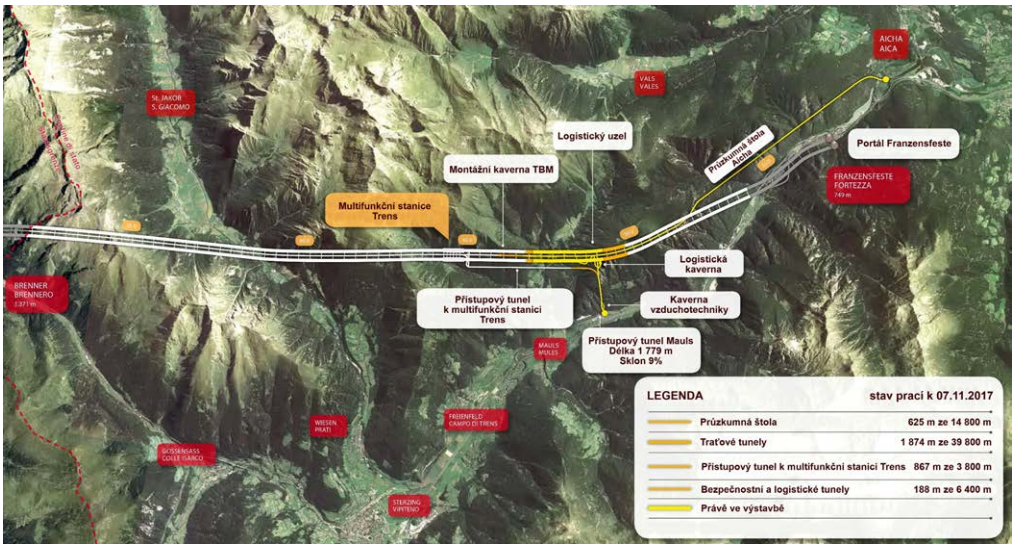
▼ *Obr. 10 Prefabrikované ostění průzkumné štoly Aicha-Mauls*



vlastních tunelů do provozu byl stanoven na rok 2015. Základní kámen byl symbolicky položen 30. června 2006.

Pracoviště Mauls

I když záměr vybudovat bázový tunel byl opakovaně potvrzen v mezivládních dohodách mezi Rakouskem a Itálií, např. memorandem z 15. července 2007 podepsaným zástupci obou států ve Vídni, otázka financování zůstávala stále otevřená. Přesto byly v srpnu 2007 z italské strany zahájeny přípravné stavební práce na ražbu prvního úseku průzkumné štoly mezi místy Aicha a Mauls v jižním Tyrolsku a 28. dubna 2008 zahájil tunelovací stroj o průměru 6,3 m ražbu průzkumné štoly v délce 10,5 km. Prefabrikované ostění průzkumné štoly ukazuje obr. 10. Ražba konvenčně raženého přístupového tunelu Mauls započala 20. srpna 2007 a trvala až do 23. října 2009. Dokončení tunelu otevřelo přístup k ražbě traťových tunelů i multifunkční stanici Trens. Dispozici úseku Mauls ukazuje obr. 11, na kterém je zobrazena průzkumná štola Aicha, přístupový tunel Mauls a kromě traťových tunelů i multifunkční stanice Trens a montážní komora štítu pro ražbu traťových tunelů.



▲ *Obr. 11 Dispozice úseku Mauls*

Pracoviště Innsbruck – Sillschlucht

V Rakousku vstoupilo v platnost stavební povolení vydáním posouzení vlivu na životní prostředí (EIA), které bylo pro bázový tunel vydáno 12. prosince 2008. Na mezinárodním jednání v Římě podepsali 18. května 2009 ministři dopravy Rakouska, Itálie a Německa, guvernéři a prezidenti zemí a provincií mezi Mnichovem a Veronou i zástupci železničních společností za přítomnosti koordinátora EU Karla van Mierta a místopředsedy Evropské komise Antonia Tajaniho základní dohodu o výstavbě bázového tunelu Brenner. Takzvaný akční plán na období 2009–2022 již obsahoval konkrétní závazná opatření ke zlepšení železniční logistiky a politická opatření zaměřená na přesun těžké nákladní dopravy ze silnice na železnici.

V prosinci 2009 začaly v Rakousku v oblasti severního portálu Innsbruck přípravné práce na prvním úseku průzkumné štoly Innsbruck-Ahrental. Staveniště se nacházelo v údolí řeky Sill, která se v Innsbrucku vlévá do řeky Inn. Štola byla místně pojmenována Sillschlucht a byla ražena konvenčně pomocí NRTM se zajištěním stability výrubu stříkaným betonem a systémovým kotvením. Geologické poměry na čelbě průzkumné štoly ukazuje obr. 12, masivní systémové kotvení nosného prstence v okolí výrubu, které vyztužuje horninový masiv a přispívá tak k jeho samonosnosti, ukazuje obr. 13.

Pracoviště Ahrental

V dalším roce byla 16. července 2010 zahájena konvenční ražba přístupového tunelu z pracoviště Ahrental, která zpřístupňuje oblast podzemní multifunkční stanice Innsbruck. Při převýšení začátku a konce tunelu více než 200 m a předpokládaných přítocích podzemní vody až 30 l/s byla ražba pomocí NRTM náročná zejména s ohledem na zajištění bezpečnosti práce. To vyžadovalo mimo jiné odvodnění čelby redundantním čerpáním, neboť při výpadku čerpadel by se pracoviště zatopilo velmi rychle podzemní vodou. Geologické poměry na čelbě jádra tunelu a plnění vrtu pro osazení SN kotev cementovou zálivkou ukazuje obr. 14. Prorážkou přístupového tunelu Ahrental do trasy průzkumné štoly Sillschlucht byla 11. října 2012 jeho ražba ukončena. Vlastní práce na průzkumné štole Sillschlucht byly dokončeny až 11. prosince 2013.

Mezitím probíhaly práce na italské straně a po 919 dnech prorazil 3. listopadu 2010 tunelovací stroj 10,5 km dlouhou průzkumnou štolu Aicha, raženou od jižního portálu tunelu.

Pracoviště Wolf I, tunely Saxaner, Padaster a Wolf

Jako další bylo v oblasti rakouského města Steinach am Brenner otevřeno pracoviště s názvem Wolf I, ze kterého byly 4. dubna 2011 zahájeny stavební práce na logistických tunelech Saxener a Padaster. Oba tunely byly určeny pro staveništní dopravu s cílem minimalizovat negativní vlivy výstavby na vesnice v okolí stavby. Dispoziční řešení úseku Wolf ukazuje obr. 15. Tunel Padaster v celkové délce 697 m byl ražen jako první a konvenční ražba pomocí NRTM probíhala z časových důvodů z obou portálů. Geologické poměry na čelbě kaloty tunelu ukazuje obr. 16. Ve stejných geologických podmínkách zachycuje obr. 17 nabíjení vrtů pro provedení záběru v jádře tunelu. Oba obrázky dávají představu o horizontálním členění profilu tunelu. Ze severu bylo vyraženo 235 m, z jihu 462 m, přičemž z jihu byla ražena pouze kalota tunelu. Po jedenácti týdnech byl tunel 24. června 2011

▼ *Obr. 12 Geologické poměry na čelbě průzkumné štoly Innsbruck-Ahrental*



▼ *Obr. 13 Kotvení výrubu průzkumné štoly Innsbruck-Ahrental*

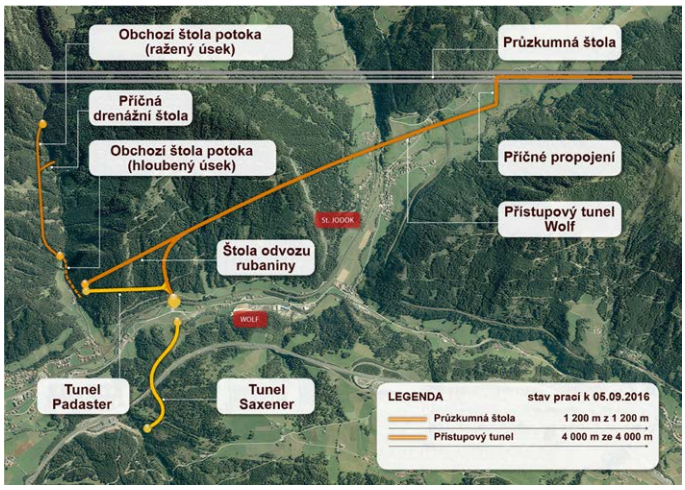




▲ *Obr. 14 Ražba přístupového tunelu Ahrental*



▲ *Obr. 18 Tunel Padaster – hydroizolace a bednící vůz*



▲ *Obr. 15 Dispoziční řešení úseku Wolf*



▲ *Obr. 16 Ražba kaloty tunelu Padaster*

▼ *Obr. 17 Nabíjení pro odpal v jádře tunelu Padaster*



slavnostně proražen. Po vyražení tunelu v plném profilu byla osazena hydroizolační fólie a provedena betonáž monolitického sekundárního ostění. Obr. 18 ukazuje hydroizolační fólii se signální vrstvou a bednicí vůz pro betonáž sekundárního ostění.

Ve stejný den, kdy byl proražen tunel Padaster, byla prvním záběrem zahájena konvenční ražba tunelu Saxener délky 1003 m, který při šířce 10 m umožňuje obousměrné vedení staveništní dopravy a v místě Plon ve dvou pruzích přímo napojuje areál stavby na brennerskou dálnici. Při jeho výstavbě se narazilo na 40 m mocnou tektonickou poruchu, která neumožňovala ražbu větší rychlostí než 1 m za den. Cena tunelu se vyšplhala na 8 milionů eur a slavnostní prorážka se uskutečnila 24. února 2012. Letecký pohled na obr. 19 ukazuje dispozici staveniště Wolf, kde je na levé straně situován portál tunelu Saxener a proti němu na pravé straně portál přístupového tunelu Wolf, ze kterého v podzemí odbočuje tunel Padaster pro odvoz rubaniny na deponii do údolí Padastertal. Vyústění tunelu Padaster (vpravo) a štoly pro odvoz rubaniny z traťových tunelů (vlevo) do prostoru deponie v údolí Padastertal zachycuje obr. 20.

Pracoviště Ampas

Požadavky na zajištění bezpečnosti provozu vyžadovaly doplnění stávajícího tunelu Inntal o únikovou štolu. Proto byla z rakouské strany nedaleko Innsbrucku 19. září 2011 zahájena ražba přístupového tunelu Ampass v délce 1,35 km a ploše výrubu 35 m^2. Tunel byl ražen úpadně ve sklonu 10 % a po dosažení osy únikové štoly 1. července 2013 umožnil její ražbu v obou směrech, tj. východním i západním směrem. Ražba probíhala v celé délce štoly konvenčně pomocí NRTM.

Pracoviště Periadriatische Naht

Dne 7. října 2011 zahájil zhotovitel na italské části tunelu stavební práce na obávaném úseku pojmenovaném podle největší alpské tektonické poruchy Periadriatische Naht (Periadriatický zlom), která trasu tunelu v tomto úseku křižuje v šířce cca 700 m. Součástí úseku byla ražba 3,7 km traťových tunelů a 1,5 km průzkumné štoly. Ražby byly na tomto úseku z obavy o uvíznutí tunelovacího stroje prováděny konvenční ražbou, která umožňuje operativně reagovat na skutečně zastižené podmínky. Ražba tunelu probíhala na plný profil. Obr. 21

▼ *Obr. 19 Dispozice staveniště Wolf (Saxenertunnel a Padastertunnel)*





▲ *Obr. 20 Vyústění tunelů v údolí Padastertal*



▲ *Obr. 21 Ražba v tektonické poruše Periadriatische Naht*

ukazuje primární ostění ze stříkaného betonu a masivní kotvení pro vyztužení horninového masivu. Obr. 22 zachycuje fázi zesilování primárního ostění další vrstvou sítí KARI. Práce byly dokončeny 25. března 2015 a objem investic vynaložených na výstavbu dosáhl 53,1 mil. eur.

Pracoviště Wolf II

Dne 4. prosince 2013 byly zahájeny razičské práce na rakouském úseku tunelu z pracoviště s názvem Wolf II. Jednalo se o 4 km dlouhý přístupový tunel Wolf o ploše výrubu 120 m^2, který končí v odbočovací kaverně traťových tunelů situované jižně od multifunkční stanice St. Jodok. Odbočovací kaverna má plochu výrubu 280 m^2. Ražba přístupového tunelu byla ukončena 22. prosince 2015. Součástí ražeb ze staveniště Wolf II je i 947 m dlouhá štola o ploše výrubu 52 m^2 ražená ve sklonu 10 %, která slouží pro dopravu rubaniny na deponii Padastertal. Konečnou úpravu deponie se zpevněním koryta potoka ukazuje obr. 23. Štola pro odvoz rubaniny byla proražena 14. února 2015. Investiční náklady pro činnosti na staveništi Wolf II podle smlouvy dosahovaly 104 mil. eur.

Vzduchotechnická šachta Patsch

Práce na vzduchotechnické šachtě Patsch hloubky 180 m, která slouží pro odvětrání multifunkční stanice Innsbruck, byly zahájeny 22. dubna 2014. Šachta byla hloubena za pomoci trhacích prací, které probíhaly necelých pět měsíců až do 4. září 2014. Výrub kruhové šachty byl zajištěn primárním ostěním ze stříkaného betonu a radiálním kotvením.

Pracoviště Tulfes-Pfons

Dne 18. září 2014 byly zahájeny razičské práce na rakouském stavebním úseku Tulfes-Pfons, který zahrnuje ražbu průzkumné štoly v úseku Ahrental-Pfons, únikové štoly podél tunelu Inntal, nouzové stanice Innsbruck, spojovacích tunelů, přístupového tunelu Ahrental a železniční tunelů o ploše výrubu 70 m^2 v délce 38 km, jejichž dokončení se předpokládá po 55 měsících. Investičně se jedná o úsek za 380 milionů eur. Na úseku ražby průzkumné štoly v délce 15 km byl při výstavbě poprvé použit tunelovací stroj.

Pracoviště Eisackunterquerung

Dne 31. října 2014 byly zahájeny práce na italském stavebním úseku Eisackunterquerung v délce hlavních tunelů 4,2 km a spojovacím tunelu o délce 1,8 km. Nákladově představuje tento úsek pro všechny stavební objekty částku 301 mil. eur.

Ahrental-Pfons

Dne 19. března 2015 byla v Ahrental na rakouském úseku Tulfes-Pfons za účasti evropské komisařky Violety Bulcové a ministrů dopravy sedmi alpských zemí (Rakouska, Itálie, Německa, Švýcarska, Francie, Lichtensteinska a Slovinska) slavnostně zahájena ražba hlavních tunelových trub. Mechanizovaná ražba průzkumné štoly v úseku Ahrental-Pfons v délce 15 km začala 26. září 2015. Pro ražbu byl použit otevřený tunelovací stroj typu Gripper. Stroj byl dovezen na 75 speciálních vozidlech, z nichž první na stavbu dorazilo 26. června 2015. Montáž stroje o délce 200 m, průměru 8 m a hmotnosti 1800 t trvala přesně tři měsíce. Na obr. 24 je znázorněno masivní zajištění stability výrubu pomocí ocelových rámů a výztužných sítí instalovaných za řeznou hlavou a pláštěm v čele tunelovacího stroje. Obr. 25 zachycuje nohy návěsu tunelovacího stroje rozepřené do obnaženého líce výrubu.

Průzkumná štola Wolf

Dne 5. ledna 2016 byly zahájeny razičské práce na průzkumné štole Wolf. Štola je ražena pomocí NRTM. V úsecích předpokládaných zvýšených deformací výrubu jsou v primárním ostění použity kompenzační elementy, které zamezují podrcení primárního ostění ze stříkaného betonu vlivem nadměrných deformací horninového masivu. Teprve po tangenciální deformaci kompenzačního elementu na sebe dosednou části primárního ostění a začnou plně přenášet namáhání normálovou silou. Ve vývoji konstrukce kompenzačních elementů došlo k velkému pokroku. Zkušenosti s nasazením této metody byly získávány i při výstavbě tunelu Inntal, kdy horninový tlak silně deformoval i masivní



▲ *Obr. 22 Zesilování primárního ostění – Periadriatische Naht*

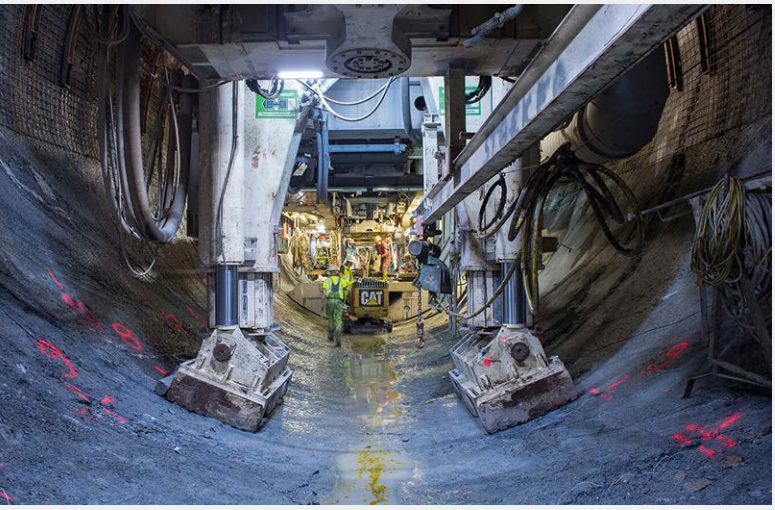
▼ *Obr. 23 Konečná úprava deponie Padastertal*



válcované profily výztužných rámů primárního ostění. Řešením bylo použití rámů umožňujících prokluz ve styčníku a místo kompenzačních profilů byl pruh primárního ostění vynechán. Tento způsob eliminace nadměrného namáhání primárního ostění bylo možné vidět i při exkurzi pořádané v rámci geomechanického kolokvia v Salzburgu v říjnu 2017. Obr. 26 ukazuje na přechodovém úseku osazení několika řad kompenzačních elementů v kalotě průzkumné štoly Wolf.



▲ *Obr. 24 Zajištění výrubu při ražbě TBM*



▲ *Obr. 25 Ražba průzkumné štoly pomocí TBM*



▲ *Obr. 26 Průzkumná štola Wolf*

▼ *Obr. 27 Sestavování TBM v montážní kaverně*



Způsob financování a investiční náklady

S průběhem projektových i stavebních prací se vyvíjí i cena tunelu. Podle první uveřejněné prognózy z roku 2002 měla výše investičních nákladů dosáhnout hodnoty 5,913 mld. eur. Předběžný projekt upřesnil v roce 2006 prognózu a navýšil cenu na hodnotu 7,764 mld. eur, což představovalo navýšení o 31 %. Po ukončení dalšího stupně projektové dokumentace se zohledněním nákladů na zkušební provoz a rizika při výstavbě se v roce 2010 cena navýšila o dalších 8 % na celkovou částku 8,407 mld. eur. Po zahájení prací na průzkumných dílech a vyhodnocení jejich výsledků se cena v roce 2013 zvýšila na částku 8,661 mld. eur, což znamenalo navýšení o 3 % oproti předchozí prognóze. Všechny ceny jsou z důvodu porovnání uvedeny v cenové úrovni roku 2013. Podle mezistátních dohod Rakouska a Itálie se obě země podílejí na výstavbě tunelu rovným dílem, přičemž 40 % z celkových nákladů zajišťují zdroje EU. Celkové náklady s předpokládaným dokončením stavby v roce 2026 činí 10,133 mld. eur. Financování na rakouské straně probíhá prostřednictvím firmy ÖBB-Infrastruktur AG, na italské straně prostřednictvím firmy Tunnel Ferroviario del Brenero Holding AG.

Aktuální stav prací k začátku listopadu 2017

Pracoviště Tulfes-Pfons

Zahájení ražeb v tomto úseku započalo v září 2014. Zakázku provádí sdružení Strabag/Salini-Impregilo. Předmětem prací je úniková štola Tulfes, přístupový tunel Ahrental, multifunkční stanice Innsbruck se střední štolou a vzduchotechnickými objekty, hlavní tunelové trouby včetně tunelových propojek, spojovací tunely mezi tunelem Inntal a bázovým tunelem a průzkumná štola Ahrental-Pfons. Předpokládaný objem investičních nákladů je 380 mil. eur. K začátku listopadu 2017 je dokončena úniková štola v délce 9,7 km o ploše výrubu 35 m^2, hlavní traťové tunely v délce 3,5 km a ploše výrubu 70 m^2 i propojovací tunely o délce 7 km a ploše výrubu 115 m^2. Traťové tunely jsou raženy pomocí otevřeného tunelovacího stroje typu Gripper, jehož sestavování v konvenčně ražené montážní kaverně ukazuje obr. 27. Z celkové délky 15 km je pomocí TBM vyraženo 8,5 km průzkumné štoly Ahrental-Pfons o ploše výrubu 49 m^2 a z celkové délky 4,3 km chybí vyrazit cca 850 m logistického a záchranného tunelu o ploše výrubu 115 m^2.

Pracoviště Wolf

Ražba na úseku Wolf byla zahájena 4. prosince 2013 a provádí ji firma Swietelsky Tunnelbau. Součástí úseku je přístupový tunel Wolf v délce 4 km a ploše výrubu až 120 m^2, průzkumná štola Wolf v délce 1,2 km a ploše výrubu 49 m^2, sekundární ostění tunelu Saxener, štola Padasterbach pro přeložení potoka pod deponií v údolí Padastertal, štola pro odtěžování rubaniny, přehrazení a vtokový objekt pro převedení potoka do obchozí štoly a sekundární ostění tunelu Padaster. Všechny práce již byly dokončeny.

Pracoviště Mauls

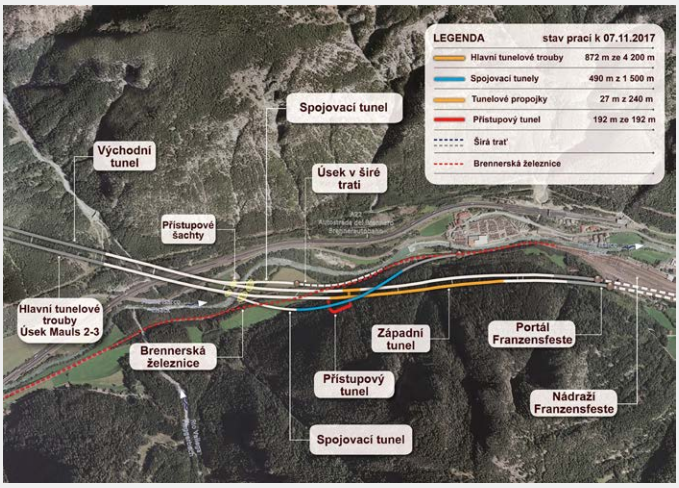
Prace na úseku Mauls „Periadriatische Naht" byly zahájeny v říjnu 2015 a v současné době jsou vyraženy hlavní traťové tunely v délce

3,7 km a průzkumná štola v délce 1,5 km. V rámci těchto ražeb byla úspěšně překonána tektonická porucha Periadriatische Naht. Práce na tomto úseku již byly úspěšně dokončeny.
Největším úsekem stavby s předpokládanými náklady 993 mil. eur je bezesporu úsek Mauls 2–3, jehož součástí je ražba přístupových tunelů Mauls o celkové délce 3,8 km a ploše výrubu 80 m^2, průzkumné štoly v délce 14,8 km multifunkční stanice Trens, logistických i bezpečnostních tunelů v délce 6,4 km a ploše výrubu 26 m^2 až 56 m^2 a traťových tunelů v délce 39,8 km vedoucích od severní hranice úseku Periadriatische Naht až po hranici s Rakouskem. Aktuálně je z celkové délky 3,8 km na přístupových tunelech vyraženo 867 m. Ražba traťových tunelů postoupila na 1874 m a průzkumná štola je vyražena v úseku délky 625 m. I ražba bezpečnostních a logistických tunelů je s délkou 188 m teprve v začátcích.

Pracoviště Eisackunterquerung
Posledním stavebním úsekem, který je momentálně ve výstavbě, je nejjižnější částí tunelu, tzv. Eisackunterquerung, který byl předán sdružení zhotovitelů RTI Salini-Impregilo S.p.A., Strabag AG, Strabag S.p.A., Consorzio Integra und Collini Lavori S.p.A. v říjnu 2014. V rámci tohoto úseku dojde k napojení trati vedené v Brennerském bázovém tunelu na stávající Brennerskou dráhu a nádraží Franzensfeste. Součástí úseku je celkem 4,2 km traťových tunelů, 1,5 km spojovacích tunelů, 240 m tunelových propojek a přístupového tunelu o délce 192 m. Ražba v tomto úseku probíhá z větší části v nezpevněných sedimentech a vyžaduje ke zpevnění tohoto pro ražbu nevhodného materiálu nasazení četných opatření včetně tryskové injektáže nebo zmrazování. Po zpevnění prostředí budou do úrovně dna traťových tunelů vyhloubeny čtyři šachty hloubky 20 m až 25 m, ze kterých bude probíhat vlastní ražba traťových tunelů. Situování šachet, hlavních traťových tunelů i dalších doprovodných podzemních děl je patrné z obr. 28. Práce by měly být dokončeny v roce 2022 a předpokládané investiční náklady by neměly přesáhnout částku 303 mil. eur. Traťové tunely jsou vyraženy v délce 872 m, spojovací tunely v délce 490 m, tunelové propojky v délce 27 m a dokončen je pouze přístupový tunel délky 192 m.

Závěr

První přípravné práce na ražbu průzkumné štoly Aicha byly zahájeny v roce 2007, tj. před deseti lety. Do předpokládaného termínu uvedení bázového tunelu do provozu zbývá dalších deset let. I když stavba tunelu je podle těchto údajů z hlediska času v polovině, povědomí naší odborné veřejnosti o tomto výjimečném inženýrském díle neodpovídá jeho významu. Článek je vypracován na základě podkladů a se souhlasem evropské akciové společnosti BBT SE. Jeho cílem je poskytnout základní informace o technickém řešení i historickém vývoji projektu Brennerského bázového tunelu a vzbudit tak zájem o sledování jeho dalšího vývoje. Stejně jako v případě Gotthardského bázového tunelu bude zajímavé sledovat poměr mezi konvenčně a strojně raženými úseky tunelu, porovnávat prognózu geologických podmínek se skutečně zastiženými podmínkami při výstavbě nebo vývoj investičních nákladů. Není důležité, zda Brennerský bázový tunel svou délkou překoná světový rekord Gotthardského bázového tunelu. Podstatné je, že zahraniční kolegové mají možnost na obdobných projektech pracovat a získané zkušenosti průběžně uplatňovat na dalších infrastrukturních projektech evropského významu. I když je obor podzemních staveb součástí stavebnictví, je svým způsobem výjimečný. Při návrhu a provádění podzemních staveb je nutno využívat nejen exaktní disciplíny tohoto oboru, ale je třeba vycházet i z dlouholetých zkušeností z výstavby podzemních staveb a empirických vztahů,



▲ *Obr. 28 Dispozice úseku Eisackunterquerung*

které lze získat pouze při ověřování předpokladů projektu na reálných stavbách.
Z aktuálního vývoje v oblasti podzemních staveb za hranicemi ČR je zřejmé, že tunelové stavby tvoří nedílnou součást především evropské sítě vysokorychlostních tratí. Podle dokumentu Program rozvoje rychlých železničních spojení v ČR vydaného Ministerstvem dopravy v lednu 2017 je možno v této oblasti v horizontu příštích patnácti až dvaceti let očekávat i nárůst požadavků na projektovou přípravu a realizaci tunelových staveb. Je otázkou, zda v tomto období budeme ještě schopni na odpovídající odborné úrovni nabídnout vlastní projektové i realizační kapacity, nebo bude příprava a výstavba tunelů na našem území pouze doménou zahraničních firem. ■

Literatura a podklady:
[1] Webové stránky www.bbt-se.com
[2] Bergmeister K., Reinhold Ch: Lernen und Optimieren vom Erkundungsstollen – Brenner Basistunnel, Geomechanik und Tunnelbau 5/2017
[3] Bericht des Rechnungshofes Bahnprojekt: Brenner Basistunnel, 02/2017
[4] Brandner R., Reiter F., Töchterle A.: Überblick zu den Ergebnissen der geologioschen Vorerkundung für den Brenner-Basistunnel, GeoAlp Volume 5, 2008

english synopsis

O
T

klíčová slova:
š

keywords:
I