

TECHNICKO-PROVOZNÍ STUDIE

TECHNICKÁ ŘEŠENÍ VRT

05/2017

4.3

TECHNICKÉ PARAMETRY VRT V EVROPĚ

SUBSYSTÉM INF – TUNELY

Zpracovatel: Jiří Velebil, Petr Svoboda



4.3

SUBSYSTÉM INF

TUNELY

OBSAH

1	ÚVOD	5
2	POČET KOLEJÍ V TUNELU.....	5
3	TECHNOLOGIE VÝSTAVBY	6
3.1	KONVENČNÍ TUNELÁŘSKÉ METODY	7
3.2	MECHANIZOVANÁ RAŽBA PLNOPROFILOVÝM RAZÍCÍM STROJEM	8
4	KONSTRUKCE TUNELŮ.....	10
4.1	KONSTRUKCE OSTĚNÍ	10
4.2	POUŽÍVANÉ MATERIÁLY	10
4.3	VNITŘNÍ VYBAVENÍ	10
4.4	ODVĚTRÁNÍ TUNELŮ	12
4.5	MONITORING	12
5	AERODYNAMIKA.....	12
5.1	OBEČNĚ	12
5.2	POŽADAVKY TSI	13
5.3	VÝSTUPY NĚKTERÝCH PROVEDENÝCH STUDIÍ ČI MĚŘENÍ	14
5.3.1	Aerodynamic effects caused by a train entering a tunnel – Sockel, H.	14
5.3.2	Aerodynamics of high-speed railway train – Raghu S. Raghunathan.....	14
5.3.3	Měření v Terranuova tunelu.....	15
5.3.4	Parametrická studie.....	15
6	POŽADOVANÉ PROFILY TUNELŮ (RYCHLOSTNÍ PÁSMO PARAMETRŮ)	24
6.1	RAKOUJSKO.....	24
6.1.1	Obecně	24
6.1.2	Zajímavosti konkrétních tunelů	25
6.2	NĚMECKO	26
6.2.1	Obecně	26
6.2.2	Zajímavosti konkrétních tunelů	27
6.3	FRANCIE	30
6.3.1	Obecně	30

6.3.2	Zajímavosti konkrétních tunelů	31
6.4	ŠPANĚLSKO.....	32
6.4.1	Obecně	32
6.4.2	Zajímavosti konkrétních tunelů	33
6.5	ITÁLIE.....	35
6.6	OSTATNÍ ZEMĚ	37
6.7	STAV V ČR.....	39
7	SEZNAM PŘÍLOH	39
8	ZDROJE.....	39

1 ÚVOD

Tunel jako součást liniových staveb umožňuje překonat různé území se složitým terénním reliéfem při zachování parametrů směrového a výškového vedení. Jako inženýrské dílo představuje tunel kombinaci řešení různých přírodních, technických, ale i společenských výzev a problémů. Rozhodnutí o stavbě některých dlouhých tunelů se stává vzhledem k finanční náročnosti obvykle předmětem rozsáhlé společenské diskuze a referend.

V Evropské unii se návrhy a stavby tunelů řídí společnými evropskými normami, ale i doplňujícími národními standardy a směrnici.

V tomto sešitě jsou uvedeny některé hlavní zásady, kterými se návrh tunelů řídí ve všech zemích.

Základním parametrem tunelových objektů je světlý tunelový průřez, tady plocha příčného řezu volného prostoru, který mohou vlakové soupravy projíždět. Tento základní parametr určuje několik různých vlivů, zejména:

- počet kolejí v tunelu
- splnění zdravotních kritérií a kritérií komfortu s ohledem na změny tlaků při jízdě vlaku tunelem

Počet kolejí v tunelu je odvislý na

- zvolené technologii výstavby
- konfiguraci tratě v okolí

Zvolená technologie výstavby je odvislá zejména od délky tunelu a požadavku na rychlost jeho výstavby. Konfigurace tratě v okolí v některých případech ztíží výstavbu dvou souběžných tunelových rour například s ohledem na blízké mostní objekty.

Splnění zdravotních kritérií a kritérií komfortu je odvislé od požadavků na maximální kolísání tlaku v tunelech a na maximální časovou změnu tlaku při jízdě tunelem.

Bezpečnostnímu řešení tunelů je věnován samostatný sešit *4.4 Subsyntém SRT*, který popisuje požadavky této části technických specifikací interoperability.

2 POČET KOLEJÍ V TUNELU

Rozhodnutí o tom, zda budovat dvoukolejné tunely s dostatečnou osovou vzdáleností a průřezem, nebo upřednostnit menší a delší jednokolejné tunely má více proměnných. Jak je patrné z popisu některých realizovaných tunelů v následující kapitole, je železniční doprava v „menších“ dvoukolejných tunelech VRT v několika případech omezena z důvodu komfortu cestujících ve starších soupravách, případně nákladní doprava je vyloučena zcela nebo provozována pouze v nočních hodinách.

U jednokolejných tunelů zase hrozí, že energetické nároky na dosažení potřebné rychlosti, maximálního počtu souprav v co nejkratších intervalech a tím dodržení plánovaného grafikonu železniční dopravy nebude možné splnit.

Velký vliv na rozhodnutí má i konfigurace trati v okolí tunelů. Při vysokých rychlostech jsou změny osových vzdáleností na trati a ve dvou souběžných tunelech velmi dlouhé a mohou vést ke zbytečným záborům pozemků, zemních prací, nebo dokonce i k potřebě budovat dva souběžné navazující mosty.

Proto bude pro dobrý výsledek přípravy vysokorychlostních tratí v ČR bezpodmínečně nutné se této oblasti věnovat a vždy provedení tunelu posuzovat komplexně.

Domníváme se, že po stavební stránce jsou již všechny potřebné profily jak dvoukolejných tak i jednokolejných tunelů technicky, materiálově a tím i ekonomicky „standardní“. I v případě výjimečných, extrémních nebo neočekávaných geologických podmínek v podzemí jsou zvládnutelné.

3 TECHNOLOGIE VÝSTAVBY

Rozhodnutí o technologii budování a zejména ražby tunelu není závislé na návrhové rychlosti železniční trati procházející nově navrženým tunelem.

Tunely na vysokorychlostních tratích jsou tedy z hlediska technologie výstavby budovány podle stejných zásad jako tunely na tratích konvenčních.

Z hlediska technologie výstavby, zejména ražby, dělíme metody na **konvenční tunelářské metody** (cyklické) a metody ražby pomocí plnoprofilového **mechanizovaného razícího stroje**, obecně označované jako TBM.

Tyto stroje nejsou univerzální do každého prostředí, navrhovány jsou vždy do konkrétních geologických podmínek. Variabilita použití těchto strojů je z tohoto pohledu značná. Z metod konvenčních pak v současnosti připadá do úvahy zejména Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM).

Vlastní rozhodnutí o technologii výstavby tedy zejména ovlivňují tyto faktory:

- geologické, hydrogeologické a geotechnické podmínky v ose tunelu
- délka tunelu
- velikost světlého tunelového průřezu (profil tunelu)

První faktor jsou pro všechny železniční tunely stejný, se stejnou vahou bez ohledu na návrhovou rychlost.

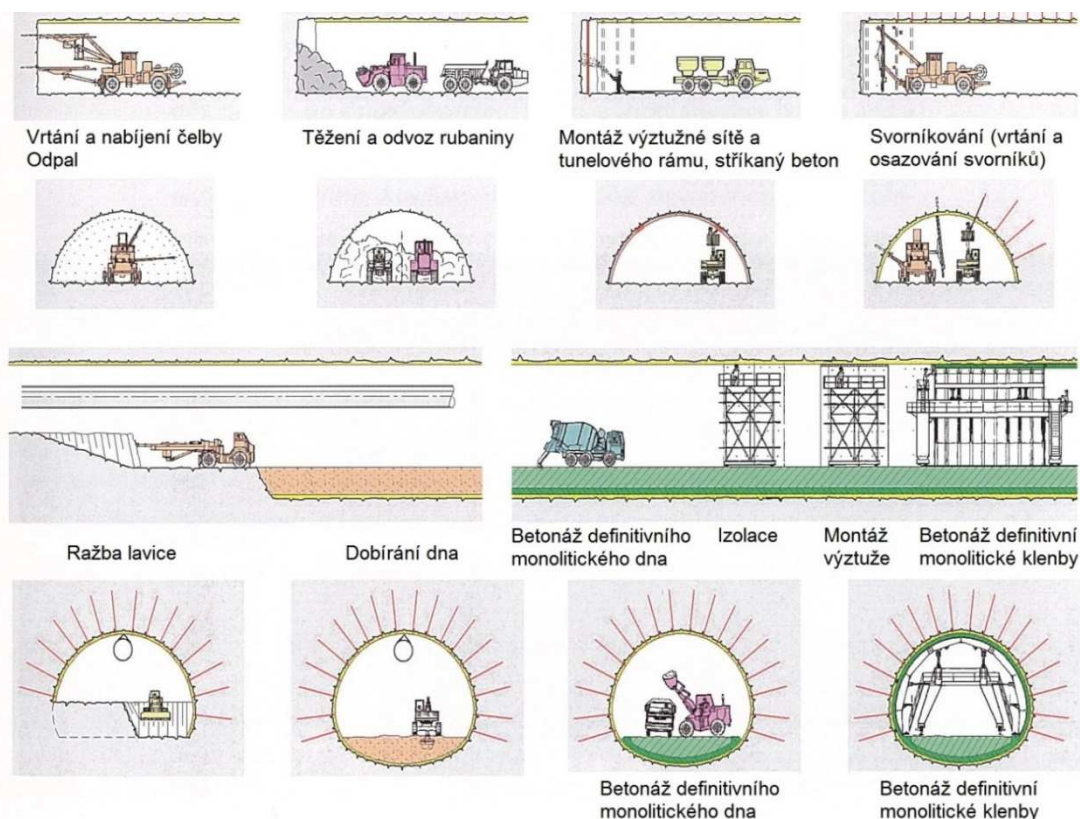
Délka tunelu se již promítá do stanovení velikosti světlého tunelového průřezu. **Tunelový průřez** se pak mění na základě aerodynamických poměrů při jízdě vlaku tunelem, nikoli však přímo úměrně.

U konvenčních tunelářských metod může mít světlý tunelový průřez dopad do způsobu členění výrubu tunelu a následné pobírání odtěžované rubaniny.

3.1 KONVENČNÍ TUNELÁŘSKÉ METODY

V evropských zemích je převládající a nejčastěji používanou konvenční tunelářská metoda Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM). V Itálii potom jako konvenční metoda tunelování převládá metoda ADECO RS, někdy také uváděná jako metoda Lunardi.

Základním konceptem NRTM je neuvažovat horninový masiv, ve kterém je ražen tunel pouze jako zatížení, ale naopak jako součást nosné konstrukce, kdy primární ostění ve spolupráci s okolním horninovým prostředím přenáší vyvolané zatížení.



Obrázek 1: Postup prací během výstavby tunelu Novou rakouskou tunelovací metodou.

Myšlenka, kdy se okolní horninový masiv podílí na přenosu zatížení, s sebou přináší nutnost neustále kontrolovat původní předpoklady návrhu a upravovat tak i vyztužení výrubu podle skutečné situace. Tato metoda je tedy metodou observační. To v praxi znamená, že během výstavby musí být prováděna kontrolní měření geotechnického monitoringu.

Observační metoda tedy znamená proces, který uznává a akceptuje přirozená omezení dostupných informací a řídí rizika s tím související. Všechny odchylky od očekávaného chování jsou pečlivě sledovány a vyhodnocovány.

Právě **pružnost v použití a možnost přizpůsobení postupu ražby skutečně zastiženým podmínkám lze považovat za největší výhodu této metody.**

Někdy také hovoříme o cyklické metodě, protože vlastní ražba probíhá v jednotlivých krocích tvořící uzavřený cyklus. Jedná se o otevření výrubu, vytěžení rubaniny a následné vyztužení. Za ražbou s odstupem následuje budování definitivního ostění jako prvku konečného vyztužení výrubu.

VÝHODY METODY:

- Možnost ražby různých tvarů příčného řezu (profilu) tunelu
- Nasazené strojní vybavení může být použito pro jiný účel a je možno jednotlivé stroje snadno měnit a nahradit
- Nižší prvotní náklady
- Snadná adaptace metody na změněné geologické podmínky
- Relativně malé zařízení staveniště a na něj navazující energetická náročnost

NEVÝHODY METODY:

- Vzhledem k tomu, že některé výkony je potřeba provádět pod otevřeným výrubem a otevřenou čelbou, je metoda relativně nebezpečná pro raziče
- Denní postupy ražeb metody jsou limitovány okolo 6 m/den
- Ve složitých geologických a geotechnických podmínkách musí být během ražeb uvažováno se stabilizací přístropí výrubu doplňkovým opatřením (injektáže atd.)
- Již v základních principech této metody je uvažováno s následným vybudováním definitivního ostění

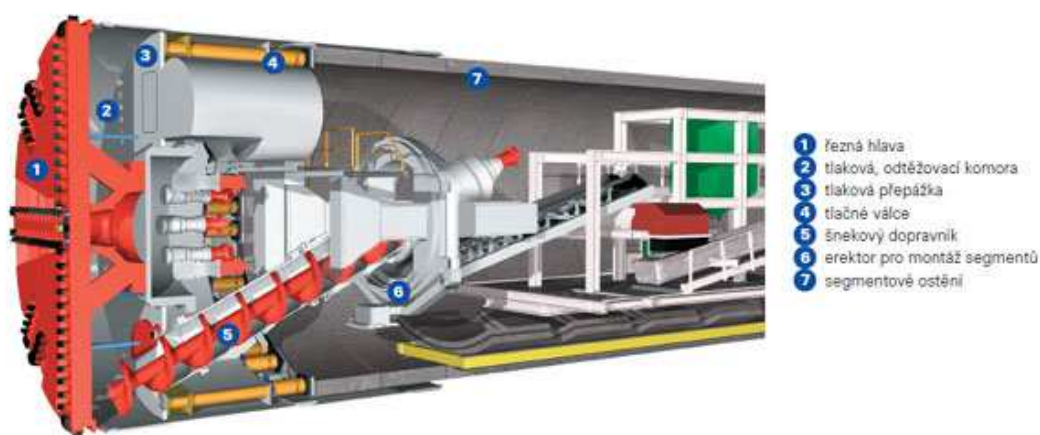
3.2 MECHANIZOVANÁ RAŽBA PLNOPROFILOVÝM RAZÍCÍM STROJEM

Mechanizovaná ražba znamená ražbu tunelu a vyztužování výrubu pomocí plnoprofilového razícího stroje, komplexu. Plnoprofilový razící stroj představuje sestavu zařízení a stojů, které umožňují mechanicky „vyvrtat“ do horninového masivu výrub kruhového průřezu a vyztužit ho proti zavalení.

Celý razící komplex je složitá strojní sestava o délce větší než 100 m. Nejedná se totiž pouze o razící hlavu, ale i další návěsy, na kterých jsou umístěna vedení, rozvody, pomocné mechanismy apod.

V souvislosti s pojmem mechanizovaná ražba se také někdy používá pojem ražba kontinuální jako protiklad k ražbě cyklické.

Ražba však ve skutečnosti neprobíhá bez přerušování. TBM pracuje kontinuálně pouze na délku zdvihu lisů, které se opírají do již vybudovaného ostění resp. na šířku nutnou pro zabudování dalšího prstence ostění nebo na vzdálenost na kterou je umožněno vysunutí razící hlavy. Po dosažení maximálního zdvihu je ražba přerušena a je montováno prefabrikované ostění nebo jsou přestavěny opěrné lisy.



Obrázek 2: Schéma stroje TBM a jeho hlavních částí

VÝHODY METODY:

- Použitelnost metody v zeminách a při ražbě pod hladinou podzemní vody
- Relativně dostatečná bezpečnost vzhledem k možnosti zajistit stabilitu čelby a okamžitému zajištění výrubu
- Snadné dodržení předepsaného profilu výrubu
- Po plném zacvičení osádky stroje je možné dosahovat relativně vysokých výkonů (denních) postupů ražby
- Vysoká kvalita ostění vzhledem k jeho prefabrikaci
- Při použití montovaného ostění z dílců není většinou potřeba následně budovat definitivní ostění
- Pokud je tunel dostatečně dlouhý vede použití razícího stroje ke snížení nákladů

NEVÝHODY METODY:

- Je možno použít pouze příčný řez kruhového tvaru
- Vysoké prvotní náklady (pořízení stroje)
- Relativně dlouhá doba potřebná pro zacvičení osádky razícího stroje
- Vysoké náklady při zahájení ražby (dodatečné výdaje)
- Malá možnost přizpůsobení změněným geologickým a geotechnickým podmínkám ražby
- Poškození stroje znamená kompletní odstavení ražby tunelu
- Vysoké náklady v případě „uvíznutí“
- Velká prostorová náročnost zařízení staveniště (zázemí pro razící stroj, hospodářství pro chemické přísady do rubaniny, výroba dílců, sklad dílců, ...)
- Vzhledem k použité technologii i poměrně velké požadavky

4 KONSTRUKCE TUNELŮ

4.1 KONSTRUKCE OSTĚNÍ

Konstrukce tunelového ostění je většinou spojena nebo je přímo závislá na technologii a metodě výstavby. U konvenčně ražených tunelů se nejprve výrub zajistí dočasným ostěním, poté s určitým časovým a technologickým odstupem je budováno definitivní většinou monolitické železobetonové ostění.

U mechanizovaných ražeb pomocí tunelovacích strojů TBM se většinou buduje již hotové zpravidla prefabrikované ostění ze segmentů (tybinků). Jednotlivé segmenty se ukládají do kruhu - prstence, podle profilu stroje. Možností tvarů jednotlivých segmentů je celá řada, nejčastěji mají půdorysný tvar obdélníku.

4.2 POUŽÍVANÉ MATERIÁLY

V zájmových zemích a prakticky v celé Evropě jsou používány pro definitivní ostění železobetonové konstrukce, při výstavbě konvenčními metodami obvykle monolitické. Tento typ konstrukcí může být použit i při strojní ražbě dlouhých tunelů. V mnohých (častých) případech se však pro definitivní konstrukce ražených strojem používají prefabrikované dílce – segmenty, tybinky apod., které po zabudování do ostění tunelu jsou plně funkční a neomezují stroj v plynulém postupu při ražbě.

Jiné dříve používané materiály, jako jsou například litinové tybinky, již prakticky s moderního tunelářství v Evropě vymizely.

Návrh konstrukce jednotlivých typů ostění se řídí především platnými evropskými standardy (Eurocode) včetně příslušných národních aplikačních dokumentů, ale národními předpisy a zvyklostmi jednotlivých zemí.

4.3 VNITŘNÍ VYBAVENÍ

Standardní vnitřní vybavení je společné pro všechny tunely: kabelové chráničky pro elektroinstalace – osvětlení, rozvody pro další zařízení, zásuvky atd. V tunelech je umístěno trakční vedení. Požadavek na jiné vybavení může vzniknout například v rámci projednání návrhu a následné výstavby nového tunelu s jednotkami integrovaného záchranného systému.



Obrázek 3: Únikový východ v tunelu Wienerwald na Westbahn, Vídeň – St. Pölten

Obrázek 4: Únikový východ v tunelu Silberberg na NBS Ebendfeld - Erfurt



4.4 ODVĚTRÁNÍ TUNELŮ

U železničních tunelů se uvažuje s přirozeným podélným větráním. V některých případech, např. délka tunelu, malý výškový rozdíl portálů, velká intenzita dopravy, dlouhé stoupání atd., se za předpokladu nepřipustné koncentrace škodlivin navrhuje umělé větrání tunelu.

Pro případ mimořádných událostí v tunelu (požár, nehoda) se navrhuje zařízení pro odvod tepla a kouře. V případě dvojice jednokolejných tunelů propojených spojovacími chodbami, sloužícími pro bezpečný únik ze zasažených prostor, jsou tyto chodby vybaveny přetlakovým větráním.

4.5 MONITORING

Neoddělitelnou součástí výstavby každého podzemního díla tedy nejen tunelů je kontrolní sledování a měření, komplexní geotechnický monitoring.

Při výstavbě tunelu probíhá soubor kontrolních sledování projevů horninového prostředí a jeho reakce na stavbu tunelu a to jednak ve vztahu k bezpečnosti výstavby a hospodárnému návrhu tunelové konstrukce, jednak ve vztahu k omezení a minimalizaci nepříznivých zásahů do životního prostředí a k zajištění bezpečnosti stávajících objektů zástavby v oblasti vlivů výstavby tunelu. Slouží také k ověření předpokladů geotechnického průzkumu včetně klasifikace a zatřídění hornin.

5 AERODYNAMIKA

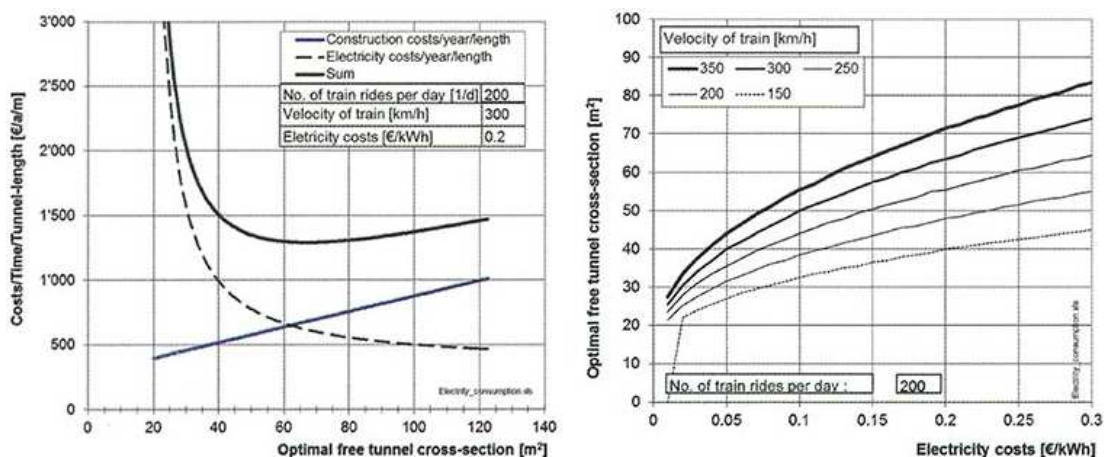
5.1 OBECNĚ

Aerodynamika ovlivňuje návrh tunelů na vysokorychlostních tratích ze dvou pohledů.

První pohled je spojen s hygienou, jízdním komfortem a pohodlím cestujících. Tuto část řeší ČSN EN 14067-5, Železniční aplikace - Aerodynamika - Část 5: Požadavky a zkušební postupy pro aerodynamiku v tunelech. Je zřejmé, že s postupujícím rozvojem techniky bude vzhledem k nově používaným vozidlovým skříním podíl tohoto vlivu postupně slábnout.

Druhý, důležitější vliv je projev rychlosti na jízdní dynamiku soupravy během průjezdu vlaku tunelem. Zde se jedná o zvýšené energetické nároky při průjezdu vlaku tunelem. Při řešení každého obdobného projektu by v ideálním případě mělo dojít k ekonomickému zhodnocení, porovnání investičních a provozních nákladů s ohledem na návratnost investice. S ohledem na měnící se ceně vstupů však takové porovnání není snadné.

Další údaje o aerodynamice jízdy vlaku jsou také v sešitě věnovaném vozidlům 4.8 *Subsystém RST* a podrobněji je problematika rozebrána v návrhové části studie v sešitu 10 *INF a SRT Tunely a bezpečnost*.



Graf 1: Znárodnění závislosti rychlosti, průřezu tunelu a nákladů na energii pro jízdu vlaku.

5.2 POŽADAVKY TSI

TSI INF definuje základní požadavek **na tunel** na maximální kolísání vlaku v tunelu:

„Pro každý tunel nebo podzemní konstrukci, které mají být provozovány při rychlostech 200 km/h nebo vyšších, se musí zajistit, aby maximální kolísání tlaku způsobeného průjezdem vlaku jedoucího v tunelu maximální povolenou rychlostí nepřesáhlo během doby průjezdu vlaku tunelem 10 kPa.“

Tento požadavek musí být splněn podél vnějších stran každého vlaku, který splňuje TSI lokomotivy a kolejová vozidla pro přepravu osob.

TSI RST definuje základní požadavek **na vozidla**, která musí být navržena tak, aby splňovala požadavek referenčního příkladu uvedeného níže.

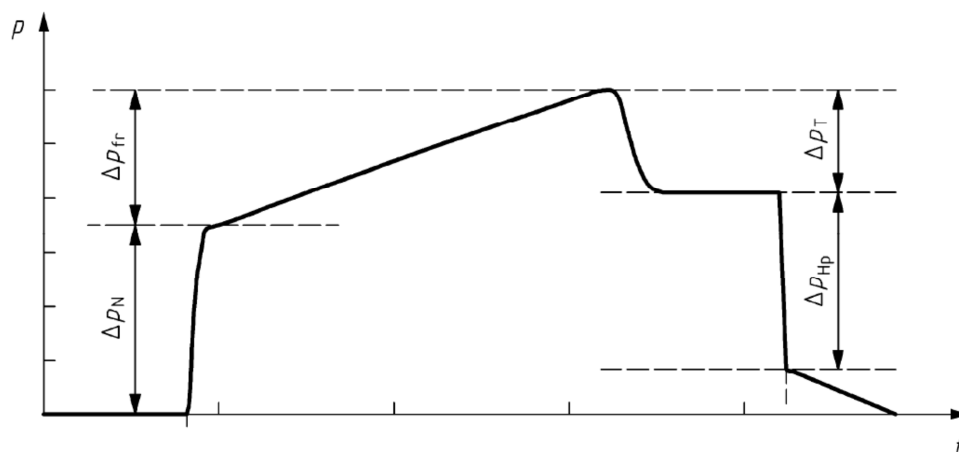
„Vozidla s maximální konstrukční rychlostí větší nebo rovnou 200 km/h musí být navržena aerodynamicky tak, aby pro danou kombinaci (referenční případ) rychlosti vlaku a průřezu tunelu v případě samostatného průjezdu tunelem ve tvaru jednoduché vodorovné trubice (bez jakýchkoli šachet apod.) byl splněn požadavek na charakteristické kolísání tlaku.“

Průběh tlaku v tunelu je schematicky zachycen na obrázku na následující straně.

Požadavky TSI RST na vozidla samostatně projíždějící tunelem ve tvaru vodorovné trubice

	Referenční případ		Kritéria týkající se referenčního případu		
	V_{tr}	A_{tu}	Δp_N	$\Delta p_N + \Delta p_{Fr}$	$\Delta p_N + \Delta p_{Fr} + \Delta p_T$
< 250 km/h	200 km/h	53,6 m ²	≤ 1 750 Pa	≤ 3 000 Pa	≤ 3 700 Pa
≥ 250 km/h	250 km/h	63,0 m ²	≤ 1 600 Pa	≤ 3 000 Pa	≤ 4 100 Pa

Tyto požadavky na tunely (a požadavky na vozidla) jsou vstupními parametry pro výpočty tlakových poměrů v tunelu.



Graf 2: Znárodnění veličin průběhu tlaku při jízdě tunelem (t – čas, p – tlak)

5.3 VÝSTUPY NĚKTERÝCH PROVEDENÝCH STUDIÍ ČI MĚŘENÍ

Níže uvádíme několik dostupných výsledků provedených měření a studií, které se problematikou aerodynamiky v tunelech zabývají.

5.3.1 AERODYNAMIC EFFECTS CAUSED BY A TRAIN ENTERING A TUNNEL – SOCKEL, H.

Vjezd přední části vlaku do tunelu způsobí vznik tlakové vlny s velkým gradientem, která je následována dalšími vlnami způsobenými třením mezi vzduchem a stěnami tunelu, tyto následné vlny už nejsou tak znatelné.

Výsledky pokusů: tunel délky 4 km, obsah profilu vlaku 10 m², obvod vlaku 11 m, délka nosu vlaku 14 m, délka ocasu vlaku 14 m, autor uvádí měření ve vzdálenosti 548 m od portálu tunelu.

- rychlost vlaku = 0,1 M a B (uzavřenost profilu) = 0,15, tlakový gradient dosáhl 0,45 KPa
- rychlost vlaku = 0,3 M a B = 0,25, tlakový gradient dosáhl 7,5 KPa

5.3.2 AERODYNAMICS OF HIGH-SPEED RAILWAY TRAIN – RAGHU S. RAGHUNATHAN

Když vysokorychlostní vlak vjede do tunelu vytvoří se před ním tlaková vlna, která se šíří tunelem téměř rychlostí zvuku.

Část tlakové vlny je odrážena zpět jako expanzní vlna od výjezdového portálu. Interakce obou vln pak probíhá v tunelu. Tyto vlny pak způsobují střídavé zatížení, což vede ke snížení komfortu pro cestující, proto je nutné brát ohled na tyto tlakové jevy při návrhu tunelu. Část tlakové vlny opouštějící výjezdový portál se mění ve vlnu impulsní, která způsobuje hluk a vibrace.

Dříve na tento jev nemusel být brán ohled, protože se vlaky v tunelu pohybovaly nízkými rychlostmi. Vznikající zvuk je nízké frekvence, má krátké trvání a jeho magnituda zhruba odpovídá rychlosti vlaku umocněné na třetí, proudění vzduchu v tunelu má nestabilní, turbulentní povahu.

Měření: rychlost vlaku 249 km/h, délka tunelu 471 m, volný profil tunelu 58,2 m², koeficient tření tunelových zdí 0,02, délka vlaku 100 m, plocha vlaku 13,7 m², koeficient tření vlaku 0,018, tlak 3 kPa, aerodynamický odpor dosahoval 80 kN, rychlost 200 km/h pro tunel s délkou 3264 m, délkou vlaku 400 m, volný profil tunelu 60,4 m², koeficient tření tunelových zdí 0,02, délka vlaku 100 m, plocha vlaku 13,7 m², koeficient tření vlaku 0,018, tlak 2,5 kPa, aerodynamický odpor dosahuje 150 kN.

Dva vlaky míjející se v tunelu, délka tunelu 5305 m

- vlak 1 (l) = 400m, rychlost (U) = 207km/h
- vlak 2 (l) = 300m, rychlost (U) = 201km/h
- vlak 2 vjede do tunelu o 29 s později než vlak 1

Předtím než se dva vlaky v tunelu setkaly vznikl tlak 3 kPa a po setkání se tlak změnil na -3 kPa.

Závěry: při rychlosti 350 km/h tvoří aerodynamický odpor 80 % všech odporů a v tunelu 90 %. Koeficient uzavření tunelu se uvažuje u vysokorychlostních železnic na 0,17.

5.3.3 MĚŘENÍ V TERRANUOVA TUNELU

Délka tunelu 2672 m, délka vlaku 276,5 m (souprava ETR 500), profil vlaku 10,94 m², koeficient uzavřenosti profilu 0,158, dvoukolejný tunel.

Tlak na střední vagon soupravy dosahoval od 500 až -2800 Pa.

Obecně se doporučuje před tunely instalovat vjezdy, které mají větší průměr než tunel. Tyto vjezdy musí obsahovat i otvory pro vyrovnání tlaku. Tím je snížena velikost vzniklých tlakových vln.

Modely pro výpočet proudění v tunelu vycházejí všeobecně z Navier-Stokesových rovnic, často je uvažováno více dimenzionální proudění.

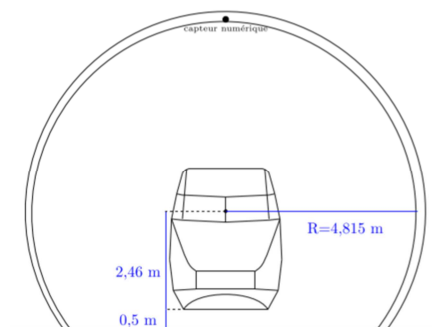
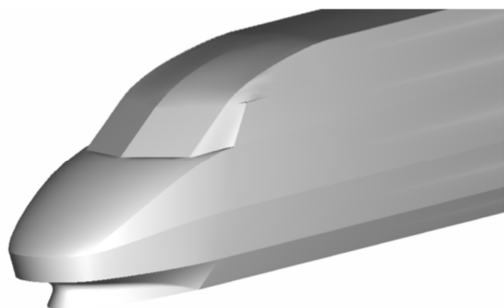
Možná praktická řešení vjezdů do tunely (markýz) uvádíme na dalších obrázcích.

5.3.4 PARAMETRICKÁ STUDIE

Níže uvádíme výstupy z francouzské parametrické studie (numerické simulace), která prověřovala vliv některých parametrů markýz na změny tlaku. Mohou být vodítkem pro základní úvahy a vstupem do dalšího prověření aerodynamických poměrů na portálech tunelů při prověřování návrhu konkrétních tunelů.

Vstupními parametry výpočtu byly:

- vlak TGV délky 100 m
- plocha průřezu vlaku 9,6 m²
- rychlost vlaku 250 km/h
- průřez tunelu 63 m² (pomeř ploch 0,1524, základní geometrie viz obrázek níže)



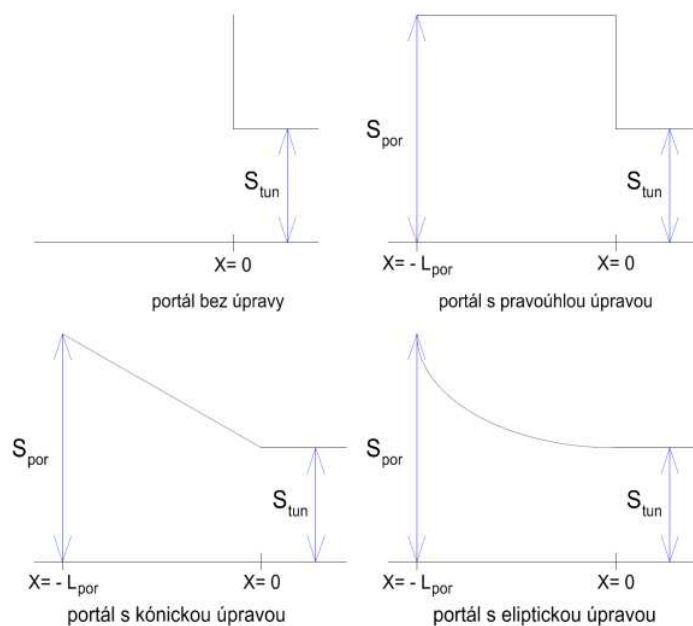
Obrázek 5: Podoba vlaku a základní tvar tunelu vstupujícího do výpočtu.

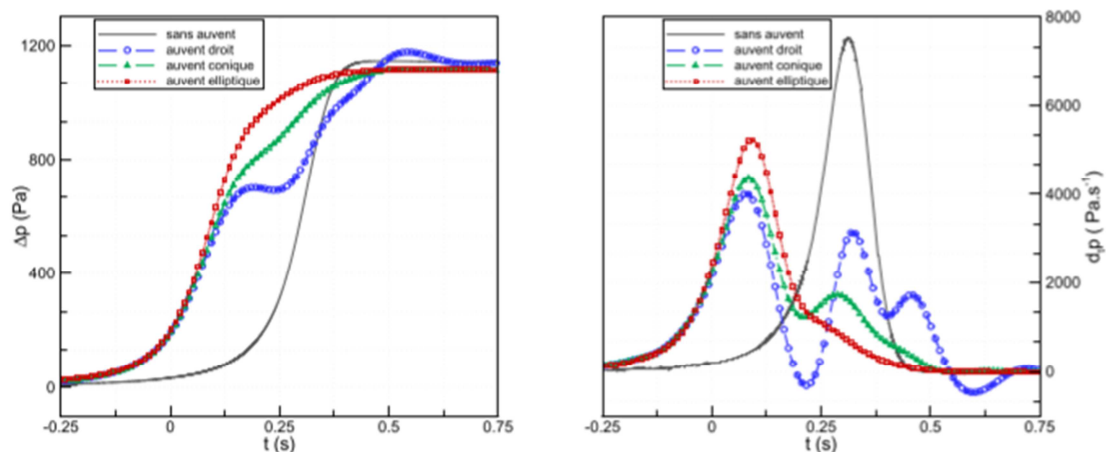
SMYSL MARKÝZY A ZÁKLADNÍ TVAR V PODÉLNÉM SMĚRU

Základní test ověřuje samotný smysl markýzy a jeho základní tvar. Testovány byly 4 možnosti změny příčného profilu, které jsou zobrazeny průběhy ve směru podélný profil osou koleje (vpravo).

Výsledky (grafy a tabulka níže) ukazují, že samotná existence markýzy snižuje maximální časovou změnu tlaku velmi výrazně, a to bez ohledu na to, jaký má tvar.

K nejnižším hodnotám vede pravoúhlý tvar změny průřezů. Při takovém řešení markýzy dochází k částečnému dorazu vyvolaných vln na rozhraní markýzy a samotného tunelu.



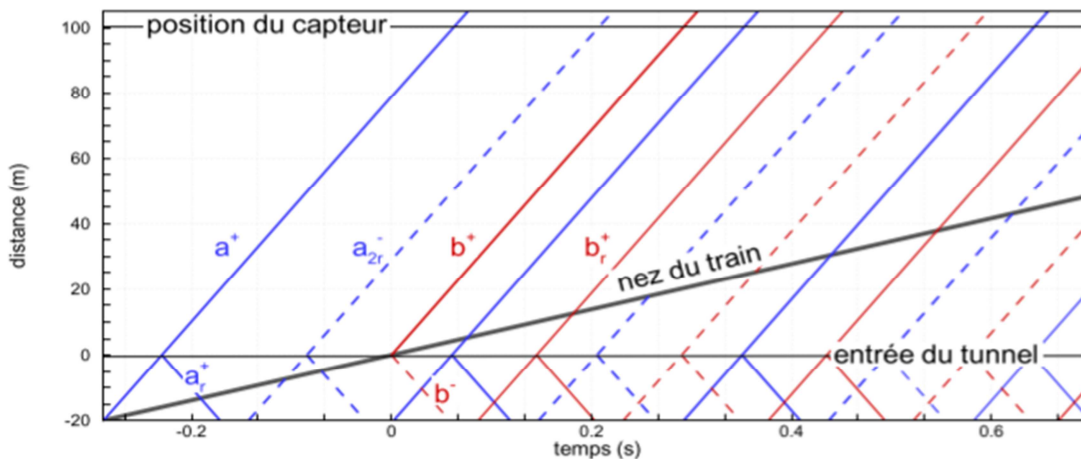


Graf 3: Průběh změny tlaku v čase (vlevo) a průběh časové změny tlaku v čase.

Tabulka 1: Hodnoty změn tlaku a časových změn tlaku pro jednotlivé případy, vč. porovnání.

	Změna tlaku ΔP_{max}		Změna tlaku v čase $\partial P / \partial t_{max}$	
	Hodnota (Pa)	rozdíl (%)	Hodnota (Pa/s)	rozdíl (%)
bez úpravy	1144		7522	
pravoúhlý (kolmý) portál	1177	+3	4018	-46
konický portál	1113	-3	4368	-42
eliptický portál	1116	-3	5326	-30

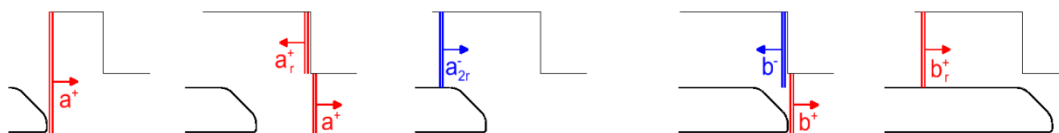
Graf 3: Grafické znázornění šíření tlakových a podtlakových vln v čase.



Graf ukazuje průběh vlny vyvolané vjezdem vlaku do tunelu v případě markýzy, která má v podélném směru konstantní průřez, který se v místě portálu samotného tunelu skokově mění.

Vlna „a“, vytvořena vjezdem čela vlaku do markýzy, je částečně odražena od místa změny průřezu a vrací se zpět k vjezdu do markýzy. Od okolního prostředí se odráží jako podtlaková vlna zpět do tunelu.

Vlna „b“ se vytvoří v okamžiku vjezdu čela vlaku do samotného tunelu. Ta pokračuje směrem do tunelu, zároveň se však její část odráží jako podtlaková zpět k místu vjezdu do markýzy a od okolního prostředí se odráží jako vlna tlaková.



Obrázek 6: Znárodnění odrazů vlny „a“ (vlevo), znárodnění odrazů vlny „b“ (vpravo).

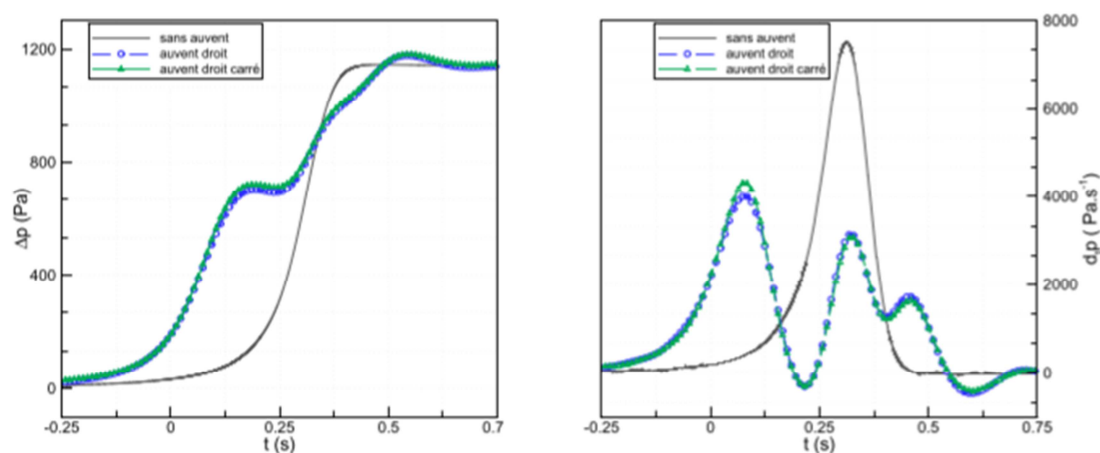
ZÁKLADNÍ TVAR V PŘÍČNÉM SMĚRU

Zároveň byl prověřován tvar kvádra a tvar válce. Výsledky jsou velmi podobné, mírně lépe vychází tvar válcový.

Obrázek 7: Znárodnění porovnávaných profilů markýz.



Graf 5: Průběh změny tlaku v čase (vlevo) a průběh časové změny tlaku v čase.

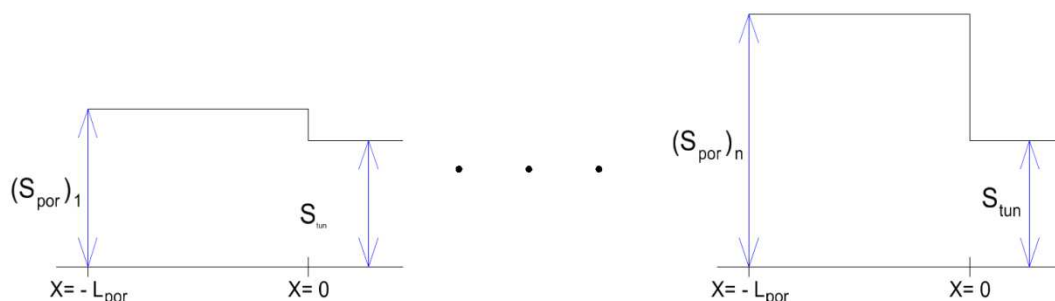


Tabulka 2: Hodnoty změn tlaku a časových změn tlaku pro jednotlivé případy, vč. porovnání.

	Změna tlaku $\Delta P \text{ max}$		Změna tlaku v čase $\partial P / \partial t \text{ max}$	
	Hodnota (Pa)	rozdíl (%)	Hodnota (Pa/s)	rozdíl (%)
bez úpravy	1144		7522	
kruhový (kolmý) portál	1177	+3	4018	-46
obdélníkový (kolmý) portál	1181	+3	4326	-42

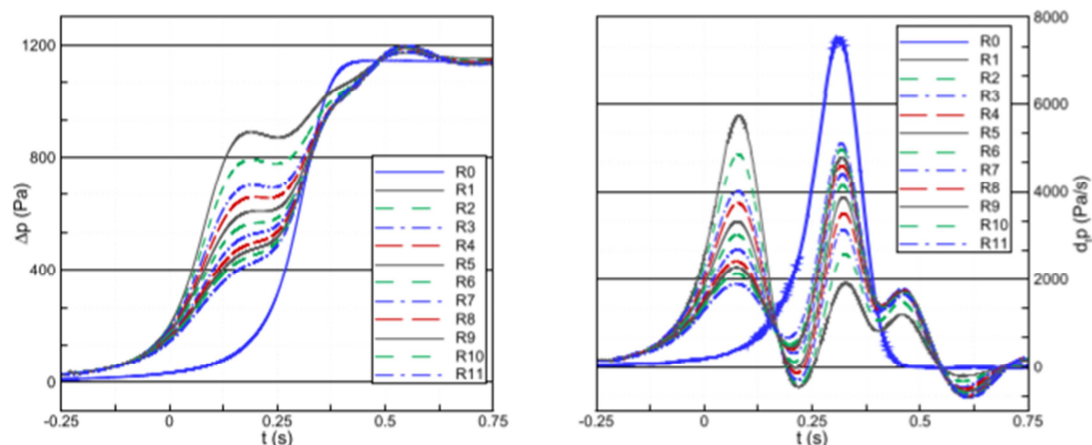
VELIKOST SVĚTLÉHO PŘÍČNÉHO PRŮŘEZU MARKÝZY

Další test byl proveden na vliv velikosti průřezu markýzy, vyjádřený poměrem mezi světlou plochou průřezu markýzy a světlym tunelovým průřezem. Testováno bylo několik hodnot, viz tabulka níže.



Tabulka 3: Testované případy, plocha průřezu markýzy, poměr plochy průřezu markýzy a tunelu, poměr plochy průřezu markýzy a průřezu vlaku.

	$j (R_{por} = \sqrt{j})$ R_{tun}	$S_{por} (m^2)$	S_{por} / S_{tun}	S_{por} / S_{vlak}
R1	1,5	88,01	1,397	0,1091
R2	1,75	100,17	1,588	0,096
R3	2	111,82	1,775	0,0858
R4	2,25	123,39	1,959	0,0778
R5	2,5	134,91	2,142	0,0711
R6	2,75	146,31	2,322	0,0656
R7	3	157,54	2,501	0,0609
R8	3,25	168,69	2,678	0,0569
R9	3,5	179,83	2,854	0,0534
R10	3,75	190,74	3,029	0,0503
R11	4	201,72	3,203	0,0476



Graf 6: Průběh změny tlaku v čase (vlevo) a průběh časové změny tlaku v čase.

Výstupy jsou znázorněny graficky i v tabulce níže. Vyplývá z nich, že největších snížení lze dosáhnout v případě R4, tedy při poměru cca 2, kdy je průřez markýzy zhruba dvojnásobný oproti průřezu tunelu.

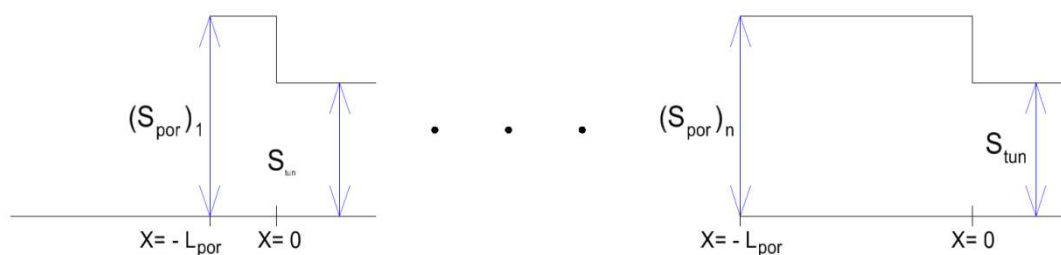
Tabulka 4: Hodnoty změn tlaku a časových změn tlaku pro jednotlivé případy, vč. porovnání.

	Změna tlaku ΔP_{max}		Změna tlaku v čase $\partial P / \partial t_{max}$	
	Hodnota (Pa)	rozdíl (%)	Hodnota (Pa/s)	rozdíl (%)
R0	1144	0	7522	0
R1	1173	+2,5	5732	-24
R2	1176	+2,8	4857	-35
R3	1178	+3	4326	-47
R4	1188	+3,8	3740	-50
R5	1190	+4	3873	-48
R6	1192	+4,2	4145	-45
R7	1197	+4,6	4407	-41
R8	1197	+4,6	4603	-39
R9	1197	+4,6	4796	-36
R10	1198	+4,7	4978	-34
R11	1198	+4,7	5105	-32

DÉLKA MARKÝZY V PODÉLNÉM SMĚRU

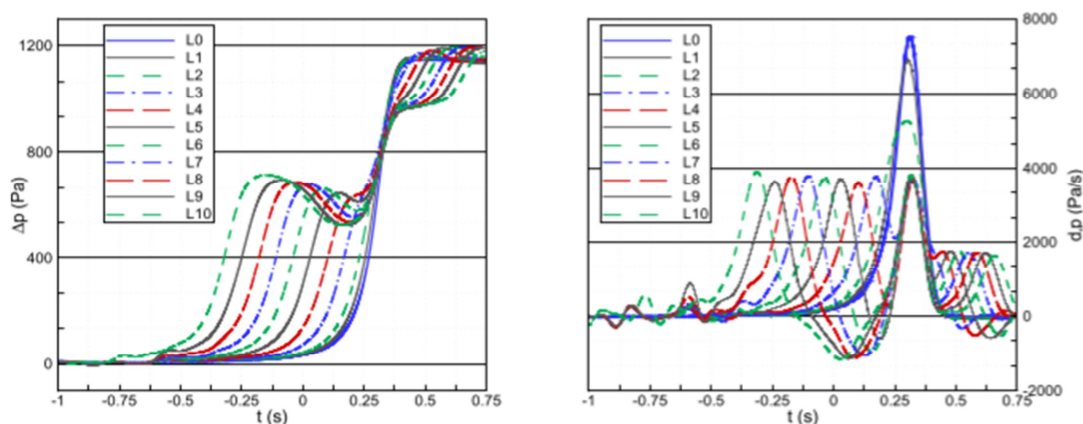
Čtvrtým testem bylo vyhodnocení vlivu délky markýzy. Testovány byly délky podle vzorce níže. Jsou odvozené od délky nosu testované soupravy (TGV, 6 m).

$$\begin{cases} (L_{au})_1 = \frac{L_{nez}}{2} = 3 \text{ m} \\ (L_{au})_i = (i - 1)L_{nez}, \text{ pour } i = 2, \dots, 10 \end{cases}$$



Z výsledků uvedených v grafu i tabulce níže vyplývá, že minimálních hodnot časové změny tlaku se dosahuje při délce markýzy 2.85násobku délky nosu vlaku. To v případě testovacího vlaku TGV odpovídá cca 17 m.

Graf 7: Průběh změny tlaku v čase (vlevo) a průběh časové změny tlaku v čase.

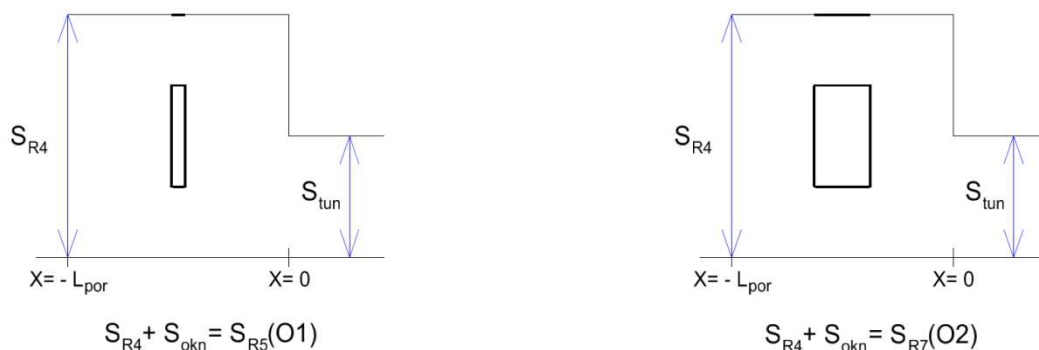


Tabulka 5: Hodnoty změn tlaku a časových změn tlaku pro jednotlivé případy, vč. porovnání.

	Změna tlaku ΔP_{max}		Změna tlaku v čase $\partial P / \partial t_{max}$	
	Hodnota (Pa)	rozdíl (%)	Hodnota (Pa/s)	rozdíl (%)
L0	1144	0	7522	0
L1	1157	+1,1	6897	-8
L2	1157	+1,1	5263	-30
L3	1173	+2,5	3772	-50
L4	1182	+3,3	3612	-52
L5	1191	+4,1	3708	-51
L6	1196	+4,5	3791	-50
L7	1195	+4,5	3810	-49
L8	1194	+4,4	3825	-49
L9	1190	+4	3830	-49
L10	1184	+3,5	3910	-48

DOPLNĚNÍ OTVORŮ DO STĚN A STROPU MARKÝZY

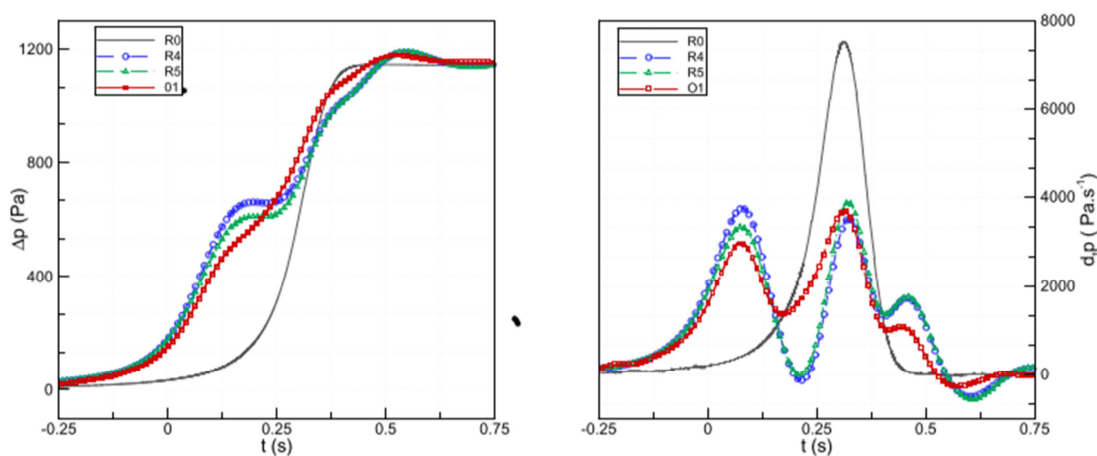
Posledním provedeným testem byl výpočet vlivu přidání otvorů do stěn markýzy. Pro výpočet byla využita markýza R4 (viz test příčného průřezu markýzy výše).



Rozměr přidávaných otvorů byl uvažovaný dle vzorce níže (velikost všech oken dohromady byla rovna rozdílu velikostí mezi průřezy R4 a R5, resp. R5 a R7). Okna byla umístěna po obou stranách i ve stropě markýzy.

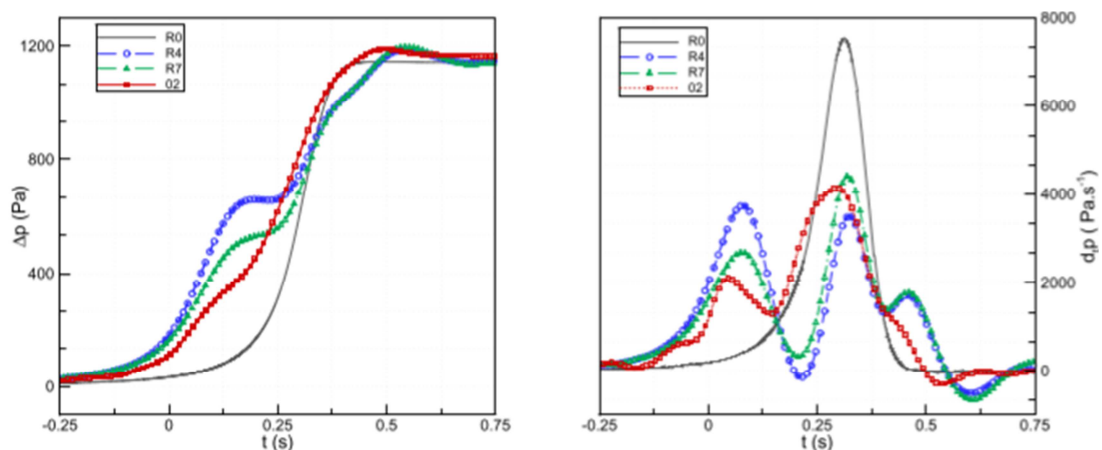
Výsledky jsou znázorněny v grafech níže (zvlášť) a porovnány s případy bez přidávaných oken (R0, R4 a R5, resp. R7).

Graf 8: Průběh změny tlaku v čase (vlevo) a průběh časové změny tlaku v čase.



Tabulka 6: Hodnoty změn tlaku a časových změn tlaku pro jednotlivé případy, vč. porovnání.

Změna tlaku v čase		
$\partial P / \partial t \text{ max (Pa/s)}$	rozdíl / R0 (%)	rozdíl / R5 (%)
3673	-51	-5,2



Graf 9: Průběh změny tlaku v čase (vlevo) a průběh časové změny tlaku v čase.

Tabulka 7: Hodnoty změn tlaku a časových změn tlaku pro jednotlivé případy, vč. porovnání.

Změna tlaku v čase		
$\partial P / \partial t \text{ max (Pa/s)}$	rozdíl / R0 (%)	rozdíl / R7 (%)
4138	-45	-6,1

Autoři studie konstatují, že problematika je daleko širší a závisí nejenom na velikosti oken, ale jejich rozmístění. Závěrem však konstatují, že k nejlepším výsledkům vede plocha oken, kterou lze uvést vzorcem:

$$S_{au} + S_{ouv} \simeq 2S_{tun}$$

Některá konkrétní provedení portálů uvádíme na obrázcích níže.

Obrázek 8: Úprava portálu proti akustickému třesku, dvoukolejný tunel Silberberg (NBS Ebensfeld – Erfurt, délka 7391 m)





Obrázek 9: Úprava portálu proti akustickému třesku, Finne tunel (NBS Erfurt – Leipzig / Halle, délka 6965 m)

6 POŽADOVANÉ PROFILY TUNELŮ (RYCHLOSTNÍ PÁSMO PARAMETRŮ)

Parametrem řídícím se podle návrhové rychlosti je u tunelů požadovaná plocha světlého tunelového průřezu. Velikost této plochy má rozhodující vliv na velikost jízdního odporu projíždějící vlakové soupravy a na zdravotní, hygienická hlediska a jízdní komfort cestujících i se zohledněním případného vlivu utěsněné jízdní soupravy.

Zároveň však není velikost nutně dána nastavením parametru ve vnitřním předpisu správce infrastruktury. Jak ukazují poznatky především z Francie a Španělska, může být efektivnější návrh tunelů individuální na základě aerodynamického posouzení každého z nich.

Na velikost světlého profilu tunelu má totiž vliv nejen rychlost, ale i délka tunelu a délka provozovaných souprav. A pak také požadavky na možnost provozu i netlakotěsných souprav.

V této kapitole uvádíme přehled přístupu k dimenzování profilu tunelu v jednotlivých zemích.

6.1 RAKOUKSKO

6.1.1 OBECNĚ

V rakouské směrnici Richtlinien für das Entwerfen von Bahnanlagen, Hochleistungsstrecken jsou uvedeny světlé tunelové průřezy pro jednotlivá konstrukční uspořádání tunelů.

Tato směrnice řeší otázku „vysokovýkonných“ železnic komplexně. Pojednává o trasování, vedení trasy, světlých profilech. Nejedná se tedy o směrnici určenou pouze pro tunelové objekty. Součástí směrnice je příloha Regelquerschnitte für Tunnel und Wannen.

Směrnice dělí tunely podle:

- počtu kolejí
 - Jednokolejné tunely
 - Dvoukolejné tunely
- způsobu výstavby
 - Konvenční ražba
 - Ražba plnoprofilovým razícím strojem (TBM)
- typu jízdní dráhy
 - Štěrkové lože
 - Pevná jízdní dráha
- tvaru příčného řezu
 - Klenbový
 - Krabicový (pravoúhlý) – pro hloubené tunely

Pro všechny uvedené varianty příčných řezů je uvažováno s návrhovou rychlostí do 200 km/h. Návrh by měl obsahovat rezervu 25% tak, aby bylo v budoucnu provozovat tyto tratě a návrhovou rychlostí 250 km/h (to je obecný požadavek při dimenzování i jiných prvků infrastruktury).

U dvoukolejných tunelů je uvažováno s osovou vzdáleností 4,70 m.

Nejsou zde uvedena žádná rychlostní pásma závazná pro návrh.

6.1.2 ZAJÍMAVOSTI KONKRÉTNÍCH TUNELŮ

Ze všech hledisek jsou tzv. bazické tunely raženy v Rakousku výjimečné. Jsou to tunely Brennerský, Koralm a Semmering.

BRENNERSKÝ BÁZOVÝ TUNEL

Mezi rakouským Innsbruckem a italským Franzensfeste jsou raženy dva jednokolejné tunely, které budou po předpokládaném dokončení v rok 2025 patřit mezi nejdelší tunely na světě (cca 55 km) a celkové náklady na projekt se odhadují na 8,6 mld. €.

Základní cena ražených tunelů se odhaduje na cca 380 mil. € a zahrnuje výstavbu dvou jednokolejných tunelů profilů 9,60 m, vnitřní šířky 8,10 m, jakož i úsek průzkumné štoly, novou záchrannou štolu stávajícího obchvatu Innsbrucku a dva spojovací tunely.

Dopravní tunely pro rychlost 250 km/h jsou od sebe vzdáleny cca 40 až 70 m, každých 333 metrů jsou spojeny příčnými propojkami, které v případě nouze slouží jako únikové cesty.

Ražby by měly trvat 55 měsíců od roku 2014 do roku 2019. Razící práce jsou prováděny z přístupových tunelů Ampass, Ahrental, Wolf a Mules. Z celkových více než 200 km tunelů má být podíl ražby tunelovacími stroji 70% oproti 30% konvenčních ražeb. Objem rubaniny činí celkem asi 22 mil.m3, předpokládá se, že přibližně 4 mil. m3 bude zpracováno na kvalitní kamenivo.

Zvláštností koncepce bazového tunelu je průzkumná štola o vnitřním průměru 6,0 m, které bude v celé délce tunelů vyražena v hloubce 4 až 12 m pod úroveň dopravních tunelů.

Průzkumná štola poskytne podrobné údaje o geotechnických podmínkách celé trasy, což by investora mělo vést k úspoře nákladů i času. V průběhu stavby bude také sloužit pro dopravu rubaniny a po jejím dokončení a uvedení do provozu bude odvádět průsaky z hlavních tunelů a současně umožní jejich inspekci a údržbu bez přerušení železniční dopravy.

V trase jsou budovány tři podzemní multifunkční stanice. Vstupy a výstupy z jednokolejných dopravních tunelů jsou navázány na dvoukolejné profily, v přístupových tunelech již byly vyhloubeny ventilační šachty, jedna hl. 180 m, hlavní ventilační kaverna dl. 230 m má ražený profil 225 m². Většina přístupových tunelů má profily mezi 100 až 120 m². Další dvě kaverny s plochou výrubu 350 m² se vybudovaly pro montáž tunelovacích strojů. Přesto se známé geologické poruchy, např. tzv. periadritická zmáhají NRTM.

BÁZOVÝ TUNEL KORALM

Výstavba Koralského tunelu byla zahájena v roce 2008 (předpoklad dokončení v r. 2022) s provozní délkou 32,9 km. Tunel propojí Graz (Štýrský Hradec) a Klagenfurt. Podzemní stavbu tvoří dva jednokolejné tunele pro rychlost 250 km/h.

BÁZOVÝ TUNEL SEMMERING

Výstavba tunelu Semmering byla zahájena v roce 2012, třetí rakouský tzv. bazický tunel celkem zahrnuje 62 km traťových tunelů s raženým profilem 82 m², doplněných 8 km přístupových, spojovacích tunelů a šachet. Celková cena projektu se odhaduje na 3,3 mld. € (cca třetina Brennerského tunelu) a předpokládá se v něm provoz rychlostí 250 km/h.

6.2 NĚMECKO

6.2.1 OBECNĚ

V německé směrnici RIL 853 Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten řeší problematiku železničních tunelů celkově. Je zde uveden seznam směrnic, souvisejících výstavbou tunelů. Jedná se komplexní předpis týkající se železničních tunelů, který řeší různá specifika návrhu, výstavby, ale i udržení tunelu v dobrém technickém stavu.

Mimo jiné jsou ve směrnici řešena i specifika návrhu s ohledem na aerodynamické vlivy vznikající při průjezdu vlaku tunelem.

V bodě 853.9001 této směrnice jsou uvedeny tzv. Richtzeichnungen, světlé tunelové průřezy pro jednotlivá konstrukční uspořádání tunelů.

Obecně jsou jednotlivé světlé tunelové průjezdní průřezy rozděleny podle návrhových rychlostí do jednotlivých skupin, viz následující stránka.

- Hochgeschwindigkeitverkehr (vysokorychlostní doprava) pro rychlost 231 – 300 km/h – dvoukolejné tunely s osovou vzdáleností kolejí 4,50 m
- Schnellverkehr (rychlá doprava) pro rychlost 161 - 230 km/h – dvoukolejné tunely s osovou vzdáleností kolejí 4,00 m
- Güter / Personenverkehr (nákladní / osobní doprava) do 160 km/h – dvoukolejné tunely s osovou vzdáleností kolejí 4,00 m
- S-Bahn – Verkehr (příměstská doprava) pro rychlost do 120 km/h

V rámci jednotlivých rychlostních intervalů je provedeno další dělení podobné rakouské směrnici.

- Podle počtu kolejí
 - Jednokolejné tunely
 - Dvoukolejné tunely
- Podle způsobu výstavby
 - Konvenční ražba
 - Ražba plnoprofilovým razícím strojem (TBM)
- Podle typu jízdní dráhy
 - Štěrkové lože
 - Pevná jízdní dráha
- Podle tvaru příčného řezu
 - Klenbový
 - Krabicový (pravoúhlý) – pro hloubené tunely

Směrnice je přehledně uspořádána a je závazná v síti DB.

6.2.2 ZAJÍMAVOSTI KONKRÉTNÍCH TUNELŮ

NÜRNBERG – INGOLSTADT

Otevření v roce 2006, délka 89 km, z toho tunely 27 km. Na trati je smíšený osobní provoz, nákladní doprava zde provozována není. Provozní rychlost je 300 km/h, maximální sklon 20 promile. Je instalována pevná jízdní dráha.





Obrázek 10: Portály tunelu Euerwang

Platí zde zvláštní podmínky přístupu na trať: strukturní pevnost vozových skříní musí být schopna pojmout zatížení okolo projíždějících souprav rychlostí až 300 km/h, rovněž při průjezdu tunely je nutné toto zatížení brát ve zřetel, nutnost uzavřeného systému toalet, zvýšená protipožární ochrana – stupeň 2, dle DIN 5510.

Nejdelšími tunely jsou Euerwang (7700 m) a Irlahüll (7260 m) ve kterých nastaly problémy s aerodynamikou.

V roce 2005, kdy proběhly na trati první jízdní testy (vlaky dosahovaly rychlosti 330 km/h), byly pozorovány při vjezdech do dlouhých tunelů aerodynamické třesky. Oba tunely jsou postaveny jako dvoukolejné se světlým průřezem 92 m² tvaru půlkruhu. Původně bylo plánováno trať vybavit klasickou svrchní stavbou – štěrkovým ložem. Později však bylo rozhodnuto o změně návrhu a na trati byla použita pevná jízdní dráha, avšak návrhové prvky již postavených tunelů změněny nebyly.

Za účelem snížení mikrotlakových vlnových emisí byly tyto dva tunely vybaveny akustickými pohlcovači. Pohlcovače jsou navrženy tak, aby působily proti železničnímu hluku a rovněž skrz tření a disperzi ovlivňují proces vzniku tlakových vln. Po instalaci těchto pohlcovačů přestaly být potíže s tlakovými vlnami.

Vznik tlakových vln závisí na délce tunelu a na tření. Tunelové ostění je hladké a obsahuje pravidelně za sebou následující spáry. Každých tisíc metrů jsou tunelu výklenky hluboké dva metry s únikovými dveřmi. Měření ukázala, že největší problémy (tlakové rozdíly) vznikají u severního portálu Euerwangského tunelu. Portál je tvořen příkrou zdí, která ukončuje

180 m dlouhý zářez. Svahy zářezu jsou zajištěny vertikálními zdmi. Na druhou stranu k emisi největšího počtu mikrotlakových vln dochází ze jeho jižního portálu.



Obrázek 11: Instalované pohlcovače značky LIAKUSTIK, které vyrábí firma Bausteine Briest GmbH. Skládají se z expandovaného jílu s pórovitostí 25 % a průměrnou hustotou 1027 kg/m^3 a proudovým odporem 9540 Pa/s.m^2 . Na svrchní straně se nacházejí žebra vysoká 30 mm. Desky pohlcovačů mají tloušťku 150 mm a šířkou 1000 mm. Přídavné desky ještě kryjí venkovní části pražců. Pohlcovače jsou přilepeny k podloží.

LICHTENFELS – ERFURT – LEIPZIG

Smíšená doprava, max. rychlost vlaků 300 km/h, pro míjení nákladní a osobních ve dvukolejných tunelech je omezena na 250 km/h.

Tunnel Eierberge, délka 3 756 m, dvukolejný, tři nouzové východy, dvě šachty, plocha výrubu 170 m^2 , světlý profil tunelu $101,1 \text{ m}^2$, pevná jízdní dráha. Vzorový příčný řez tunelu: osová vzdálenost kolejí 4,7 m, šířky postranních stezek v tunelu 0,8 m, vzdálenost osy koleje od postranní stezky 3,0 m

Bibratunnel, dva jednokolejné, délka 2 x 6 466 m, vnitřní průměr 9,60 m, plocha výrubu 86 m^2 , nadloží max 50m / min 15 m, vzdálenost os kolejí 25 m, cena 230 mil. E.

Obrázek 12: Portál dvukolejného tunelu Tragberg na VRT (NBS) Ebensfeld – Erfurt



Osterbergtunnel, dva jednokolejné, délka: 2 x 2 082 m, vnitřní průměr 9,60 m, plocha

výrubu: 86 m², nadloží max 35m , vzdálenost os kolejí 25,00 m , cena 120 mil. E.

Finne Tunnel, délka 6 886 m, dva paralelní tubusy, ražba pomocí TBM – kruhový profil, vzdálenost os tunelových tubusů 25 m, vnitřní poloměr tunelových tubusů $r = 4,65$ m

6.3 FRANCIE

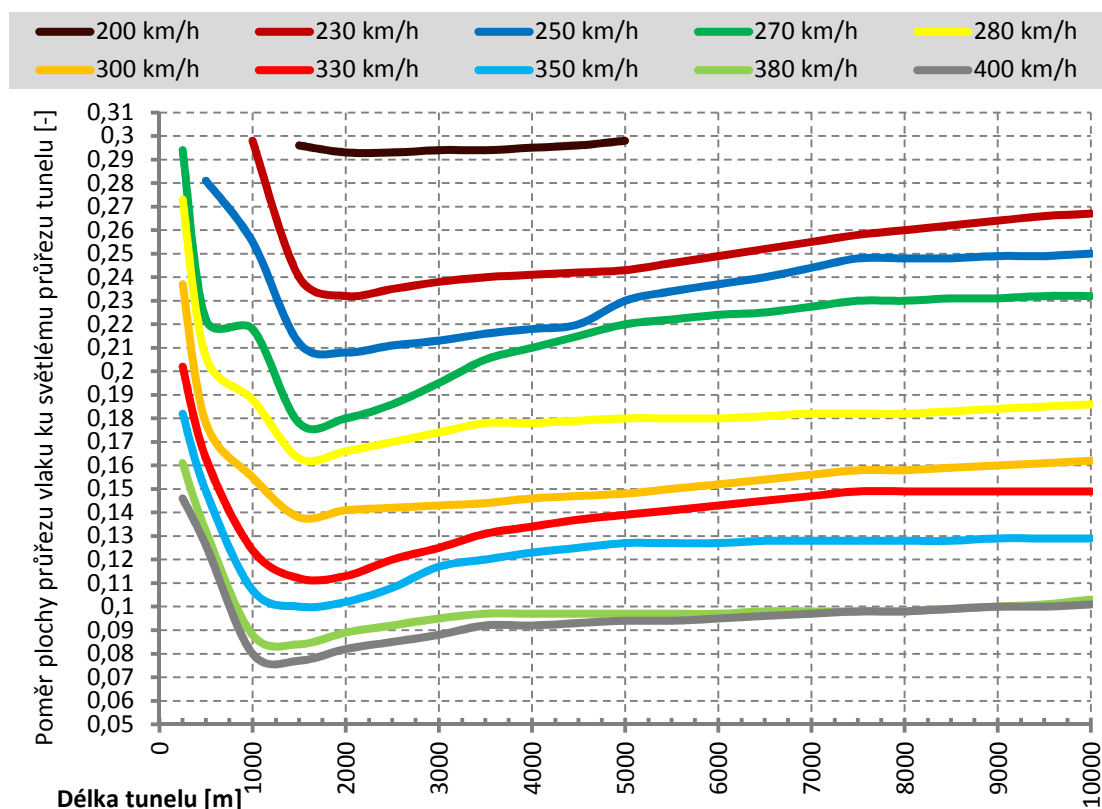
6.3.1 OBECNĚ

V dokumentu Doporučení francouzské tunelářské asociace jsou popsány doporučené a již použité technické řešení a konstrukční možnosti v železničních tunelech.

Dále je ve Francii standardem stanovovat základní technická předběžnou studií, která je v jednotlivých subsystémech navrhne.

Pro předběžné dimenzování tunelů je využíván graf níže. Požadovaný světlý tunelový průřez lze vyjádřit poměrem mezi plochou průřezu vlaku a plochou průřezu samotného tunelu. Pro potřeby výpočtů odporů apod. se uvažuje s průřezem vlaků 10–12 m². Poměr ploch 0,1 tak znamená, že tunelový průřez pro vlak s plochou 12 m² musí být 120 m².

Graf 10: Poměr ploch dvukolejného tunelu pro rychlosti 200 až 400 km/h a dl. vlaku 400 m.



Při návrhu profilu tunelu podle tohoto grafu má být splněno kritérium maximálního kolísání tlaku v tunelu (10 kPa).

Vzorové příčné profily podle rychlostních pásem se na vysokorychlostních tratích nepoužívají.

Požární bezpečnost a požadavky na vybavení v tunelech vychází z evropské TSI SRT.

V průběhu přípravy a zpracování projektu se pak provádí analýza aerodynamiky průjezdu vlaků v tunelu. Tato analýza dále ovlivňuje samotný návrh geometrie tunelu, ale i případné stavební úpravy portálů.

Pro konstrukce tunelů se používá zpravidla železobeton.

6.3.2 ZAJÍMAVOSTI KONKRÉTNÍCH TUNELŮ

LGV EST EUROPÉENNE PARIS – STRASBOURG

Délka tratě 301,4 km, návrhová rychlost 350 km/h, provozní 320 km/h, maximální sklon 35 promile. Na trati se nachází jediný dlouhý tunel Saverne délky 4 020 m. Je tvořen dvěma jednokolejnými tubusy se světlým profilem 52 m² o průměru 8,90 m.

Propojky jsou v max. vzdálenost 500 m. Ražba proběhla v letech 2011 až 2013, tunel byl otevřen v roce 2016. Celkové náklady na výstavbu byly cca 200 mil. €.

Linka byla původně postavena pro Réseau Ferré de France (RFF), která vlastní a provozuje infrastrukturu francouzské národní železniční sítě. Dnes je součástí SNCF.

Obrázek 13: Portál dvou jednokolejných tunelů – tunel Saverne na VRT Strasbourg - Paris



6.4 ŠPANĚLSKO

6.4.1 OBECNĚ

Projektování a výstavbu tunelů podléhá poměrně obecné a stručné normě NAP 2-3-1.0 Túneles. Jsou zde uvedeny požadavky na další zpracování dílčích projektů a posudků, které jsou součástí celkové dokumentace tunelu.

V kapitole 4 jsou rozděleny tunelové příčné profily na základě jejich budoucího využití – pouze osobní doprava a smíšená doprava.

Tyto kategorie se dělí na tunely, které jsou při návrhu posuzovány podle daných scénářů:

- jednokolejné pro rychlost 350 km/h
- dvoukolejné tunely pro rychlost 300 km/h vč. míjení s protijedoucí netlakotěsnou soupravou rychlostí 220 km/h, spolu s prokazatelnou 10 % rezervou.

Jsou stanoveny minimální hodnoty tunelových průřezů, které nesmí být překročeny:

- jednokolejný tunel 52 m²
- dvoukolejný tunel 85 m².

Minimální hodnoty pro jednokolejný i dvoukolejný tunel v závislosti na rychlosti jsou uvedeny v tabulkách na následující stránce.

Pro jednokolejný tunel jsou doporučené příčné řezy dále rozděleny podle metody výstavby na konvenční ražbu – podkovovitý profil se spodní klenbou a případně bez klenby a kruhový uzavřený profil pro ražbu strojem TBM.

U dvoukolejného tunelu je uvažováno pouze s konvenční ražbou a příčným profilem se spodní klenbou (protiklenbou).

Osová vzdálenost kolejí v tunelech se navrhuje 4,7 m, vnitřní poloměr zpravidla dvoukolejných tunelů 7,0 – 7,5 m. Návrh konstrukčních a stavebních prvků vychází z požadavků na aerodynamické analýzy a požadavků na přetlak, resp. komfort a pohodlí cestujících ve vlakových soupravách.

V tunelech na tratích VRT se v některých případech používá konstrukce svršku v provedení pevné jízdní dráhy, obvykle Rheda 2000 (s ohledem na dobré zkušenosti s údržbou tohoto typu PJD).

Požární bezpečnost a požadavky na vybavení v tunelech vycházejí z evropské TSI SRT.

Délka tunelu [m]	V = 350 km/h	V = 380 km/h	V = 400 km/h
1 000	<52	<52	56
1 500	<52	<52	60
2 000	<52	<52	59
3 500	<52	<52	56
5 000	<52	<52	53
7 500		<52	<52
10 000			<52

Tabulka 8: Minimální průřez tunelu pro $D_p(T) \leq 10$ kPa při různých rychlostech a délce tunelu pro netlakotěsný vlak dl. 400 m s průřezem 12 m^2 .

Délka tunelu [m]	V = 250 km/h	V = 300 km/h	V = 350 km/h	V = 400 km/h
200		<75	<75	81
500	<75	<75	80	94
1 000	<75	77	111	150
1 500	<75	86	120	155
2 000	<75	85	118	159
3 500	<75	83	104	131
5 000	<75	82	95	126
7 500	<75	76	94	123
10 000	<75	<75	92	117

Tabulka 9: Minimální průřez tunelu pro $D_p(T) \leq 10$ kPa při různých rychlostech a délce tunelu pro netlakotěsný vlak dl. 400 m s průřezem 12 m^2 .

6.4.2 ZAJÍMAVOSTI KONKRÉTNÍCH TUNELŮ

MADRID - VALLADOLID

Jako příklad dlouhého tunelu na vysokorychlostní trati můžeme uvést tunel Guadarrama na vysokorychlostní trati Madrid – Valladolid.

Je navržený pro rychlost 350 km/h. Tunel je uspořádán jako dva jednokolejné tunely s délkou 28,4 km. Ražba tunelu byla provedena pomocí 4 kusů plnoprofilových razících strojů.

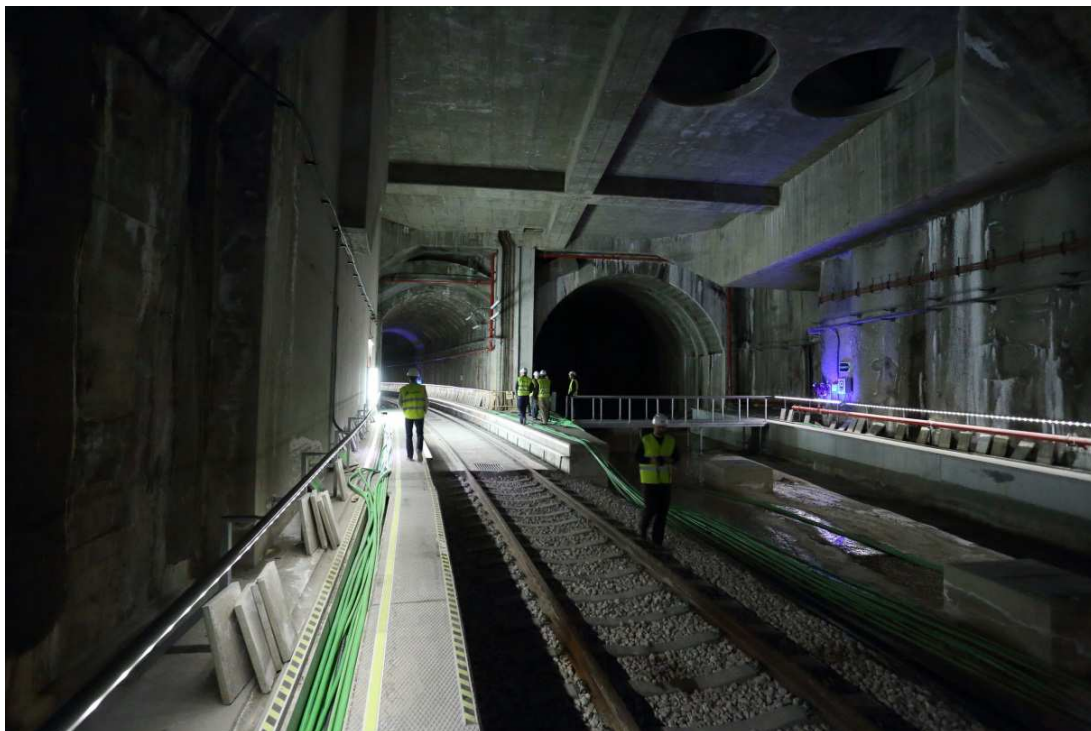
Vnitřní průměr tunelu je 8,50 m. Vzájemná vzdálenost tunelových rour je 30 m. Uprostřed tunelu se nachází podzemní stanice dl. 500 m. Celkem 22% rubaniny bylo recyklováno pro výrobu segmentů, injektáží apod. Výstavba proběhla v letech 2002 až 2007.



Obrázek 14: Portál tunelu Guadarrama (zdroj: www.megaconstrucciones.net)

Obrázek 15: Dvoukolejný tunel vyražený pomocí TBM. Propojení nádraží v Madrid – Atocha a Madrid - Chamartín, pevná jízdní dráha





Obrázek 16: Rozplet (přechod) dvoukolejného tunelu v Madridu, Atocha - Chamartín, pevná jízdní dráha x štěrkové lože

6.5 ITÁLIE

Většina tunelů v současnosti provozovaných je dvoukolejná.

Metody a technologické postupy pro výstavbu tunelů se postupně vyvíjely, nejstarší tunely byly ražené belgickou metodou, poté následovala rychle se po Evropě rozvíjející Nová rakouská tunelovací metoda. Dnes je v italském podzemním stavitelství nejpreferovanější metoda ADECO RS (**A**nalysis of the **C**ontrolled **D**eformation in **R**ocks and **S**oils).

Tato metoda byla vyvinuta v osmdesátých letech v Itálii profesorem Lunardim. Jedná se o metodu tzv. řízené deformace. Poprvé byla vyzkoušena profesorem Lunardim a doktorem Bindim v roce 1985 během výstavby tunelů na rychlostní železnici mezi Římem a Florencí v úseku Florence-Arezzo.

ADECO-RS je metodou vycházející z předpokladu, že existuje přímý vztah mezi deformací čelby, prekonvergenčními, konvergenčními výrubu a primárního ostění. Hlavním záměrem metody je řízené omezení deformací tunelového ostění a nadloží, a to zejména zvýšením tuhosti jádra (horninový masiv obsažený v prostoru teoretického výrubního profilu před čelbou) jeho vyztužením, použitím tuhého primárního ostění, ražbou tunelu plným profilem a betonáží tuhého definitivního ostění v technologicky minimálním odstupu od čelby s rychlým uzavíráním spodní klenby se snahou zachovat stav blížící se primární napjatosti horninového masivu.

K vyztužování prostoru před čelbou jsou pro vysokou pevnost a snadnou likvidaci využívány nejčastěji sklolaminátové horizontální kotvy. V horších geotechnických podmínkách je přístupováno k ochraně vyztuženého předčelbového jádra v předstihu před ražbou provedením obvodového vrubu, nebo k použití sloupů subhorizontální tryskové injektáže, případně mikropilotových dešťníků. Smykové parametry prostředí jsou vylepšovány pomocí radiálního kotvení obvodu výrubu. Při ražbě pod hladinou podzemní vody je jádro drénováno trubkami umístěnými po jeho obvodu.

VÝHODY:

- Ražba probíhá vždy plným profilem (prostor na čelbě)
- Industrializovaný postup ražby (konstantní výkony, jistota ve výši nákladů, zjednodušení vztahu objednatel – zhotovitel)

NEVÝHODY:

- Vyšší počáteční náklady
- Méně citlivá na změnu geotechnických podmínek (stabilizační opatření jsou prováděna s předstihem)
- Náročná instalace mohutných obloukových nosníků
- Větší dimenze primárního i sekundárního ostění
- Vysoké nároky na koordinaci prací

Tato metoda nebyla na území ČR zatím použita. Březenský tunel byl ražen její modifikací metodou Perforex (metod obvodového vrubu).

Obrázek 17: Tunelování metodou ADECO-RS



Dle názoru tunelového experta je délka 2 km rozhodující pro změnu uspořádání tunelu na dvukolejný trati na 2 jednokolejné tunely.

Osová vzdálenost kolejí v tunelech na VRT tratích je 5,0 m.



Obrázek 18: Portál dvukolejného tunelu na VRT Řím – Neapol

6.6 OSTATNÍ ZEMĚ

Níže uvádíme několik příkladů nestandardních technických řešení i z jiných zemí. V závěru uvádíme tabulku s přehledem tunelů a jejich základních parametrů v Evropě i ve světě.

HOLANDSKO

V létech 2001 až 2008 byl v Holandsku vyražen tunel Groene Hart dl. 7,20 km, pro rychlost 250 až 300 km/h. Tunel se realizoval TBM o průměru 14,87 m v rašelině a písku, s nadložím 30 m. **Dvukolejný tunel má uprostřed stěny / přepážku, přes kterou se dá do druhé části projít dvěma po 150 m.** Tunel má instalovanou ventilaci a pod železniční tratí se nachází kolektor, sloužící jako úniková cesta.

ŠVÝČASRKO, NBS MATTSTETTEN – ROTHRIST

Délka novostavby trati je 45 km, z toho délka tunelů 14,5 km. Návrhová rychlost je 200 km/h, nejvyšší sklon 20 promile. U Emmequerungstunnel (1 633 m) **mohl být světlý průřez tunelu snížen ze 105 m² na 76 m² díky instalaci dvou šachet pro vyrovnávání tlaku!**

PŘEHLED TUNELŮ VE SVĚTĚ

Z tabulky tunelů v Evropě a ve světě a jejich základních parametrů je zřejmá rozdílnost přístupu k dimenzování tunelů jak mezi jednotlivými zeměmi, tak jejich vývoj v čase.

Tunely s menším profilem jsou vykoupeny požadavky na tlakotěsnost vlaků. Je patrné ustálení profilu na cca 100 m² na evropských tratích pro rychlost 300 km/h.

Tabulka 10: Přehled tunelů v Evropě i ve světě a jejich základních parametrů, zdroj: Příloha k doporučením pro dimenzování tunelů (Španělsko).

Trasa	Rychlost [km/h]	Délka [km]	% trasy v tunelu	Průřez [m ²]	Poznámka
Tokaido (Tokio - Osaka)	300	515	13	61**	11 tlakotěsných vlaků/hod.
Sanyo (Osaka - Hakata)	300	554	48	62**	11 tlakotěsných vlaků/hod.
Tohoku	300		23	62**	11 tlakotěsných vlaků/hod.
Joetsu	300		39	62**	11 tlakotěsných vlaků/hod.
Zkušební úsek	500	18,4	87	70**	magnetická trakce, průřez vlaku 9 m ²
Hannover - Würzburg	280	327	32	82**	tlakotěsné vlaky
Mannheim - Stuttgart	280	100	25	82**	tlakotěsné vlaky
Nürnberg - Ingolstadt (ve výstavbě)	300	90		100**	
Cologne - Frankfurt (ve výstavbě)	300	186		100**	tlakotěsné vlaky
Paris - Lyon	260	417	0		netlakotěsné vlaky
TGV Atlántico (netlakotěsné vlaky)	220	282	6	46*, 71**	Dp(3)=5 kPa při křížení
TGV Est	400				
TGV Méditerranée	400				
Paris - Chunnel	300				
TGV Rhône-Alpes (tunel)		5,2	100	100**	
TGV Coreia (projekt)	300			100**	tlakotěsné vlaky
Roma - Florence	250	248	32	54-61-66**	vlaky tlakotěsné pro 300 km/h
Milán - Genova (projekt)	300			82-100**	tlakotěsné vlaky
Madrid - Sevilla	250	441	3	75**	
Madrid - Zaragoza - Lérida	350	420	7	75-115**	

* - jednokolejný tunel

** - dvukolejný tunel

6.7 STAV V ČR

Pro porovnání výše uvedených přístupů a parametrů uvádíme aktuální stav v ČR.

Platí dva interní přepisy. Vzorový list Světlý tunelový průřez jednokolejného tunelu a Vzorový list Světlý tunelový průřez dvoukolejného tunelu (konvenční ražba). Oba vzorové listy pokrývají interval rychlostních pásem podle ČSN 73 6360 Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha následovně:

- RP0-3 0 - 160 km/h - osová vzdálenost kolejí ve dvoukolejném tunelu 4,0 m
- RP4 161 - 230 km/h - osová vzdálenost kolejí ve dvoukolejném tunelu 4,2 m
- RP5 231 - 300 km/h - osová vzdálenost kolejí ve dvoukolejném tunelu 4,5 m

Jednotlivé světlé tunelové průřezy byly navrženy ve spojitosti s německou RiL 853 a s ohledem na velikost ploch světlych tunelových průřezů pro rychlostní intervaly 161 - 230 km/h a 231 – 300 km/h. Další dělení v obou vzorových listech je podle typu jízdní dráhy (pevná jízdní dráha a štěrkové lože).

Vzorový list pro jednokolejné tunely je určen pro tunely ražené konvenčně i tunely ražené plnoprofilovým razícím strojem. Dvoukolejné tunely vzhledem k velikosti profilu určeny pro tunely ražené konvenčně.

Pro případné použití uvedených vzorových listů pro návrh tunelů na vysokorychlostních tratích je nutné provést revizi.

7 SEZNAM PŘÍLOH

- 1. Profily tunelů v zahraničí

8 ZDROJE

- [1] Richtlinien für das Entwerfen von Bahnanlagen – Hochleistungsstrecken, Wien: ÖBB Infra, 2002
- [2] Richtlinie 853 – Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten, DB Netz AG, 2011
- [3] RÉSEAU FERRÉ DE FRANCE, Criteres de conception et de dimensionnement des sections de tunnels de lignes a grande vitesse, 2004
- [4] Recomendaciones para dimensionar túneles ferroviarios por efectos aerodinámicos de presión sobre viajeros, Dirección General de Ferrocarriles del Ministerio de Fomento: Madrid, 2001
- [5] UYSTEPRUYST, David, *Simulation numérique de l'entrée en tunnel d'un train à grande vitesse*, Université de Valenciennes, 2010
- [6] <http://tunneltalk.com/TunnelTECH-May2015-Aerodynamics-and-ventilation-in-rail-tunnels-civil-measures.php>