

Nové Vzorové listy světlých tunelových průřezů železničních tunelů

Michal Hnilička

Mott MacDonald CZ, spol. s r.o., Prague, Czech Republic

ABSTRAKT: Příspěvek se zabývá novým předpisem Vzorové listy světlých tunelových průřezů zpracovaným pro Správu železnic. Vzorové listy řeší příčné řezy tunelových staveb, jak na konvenčních, tak na vysokorychlostních tratích až do rychlosti 350 km/h. Předpis se zabývá jednokolejnými a dvoukolejnými tunelovými stavbami a zahrnuje řezy pro konvenčně ražené tunely, pro tunely prováděné pomocí mechanizované ražby (TBM) a pro rámové hloubené konstrukce. Po dokončení nahradí vzorové listy Světly tunelový průřez jednokolejného a dvoukolejného tunelu, které byly vydány v letech 2010–2011. V příspěvku jsou uvedeny základní vstupní parametry pro uvedené příčné řezy tunelů, a především provedené aerodynamické posouzení, které má při vyšších rychlostech zásadní vliv na velikost příčného profilu tunelu.

1. ÚVOD

Rozsáhlá příprava modernizací stávajících konvenčních tratí a především intenzivní plánování vysokorychlostních tratí po celém území vede v podmínkách České republiky k návrhu velkého množství tunelových staveb. Z tohoto důvodu zadala Správa železnic v roce 2024 zpracování aktualizace stávajících Vzorových listů světlých tunelových průřezů, které má vést ke zjednodušení a sjednocení návrhu tunelových staveb. Jedním z hlavních požadavků bylo provedení aerodynamického posouzení navržených příčných řezů, které se při vyšších rychlostech ukazuje jako zásadní parametr.

2. REŠERŠE ZAHRANIČNÍCH PŘEDPISŮ

První částí zadání aktualizace vzorových listů bylo zpracování rešerše obdobných zahraničních předpisů. V rámci této práce byly vyhledávány předpisy u správců železniční infrastruktury v Anglii, Polsku a Francii, ale dle dostupných informací nemají tito správci vypracovány žádnou obdobu vzorových listů. Naopak se podařilo získat předpisy zabývající se návrhem tunelových staveb ze Španělska, Rakouska, Švýcarska a Německa.

2.1 ŠPANĚLSKO

Španělský předpis pro železniční tunely Norma ADIF PLATAFORMA NAP 2-3-1.0 Túneles předepisuje základní požadavky na železniční tunely od příčného profilu, přes základní požadavky k výstavbě, konkrétním geologickým problémům a požární bezpečnosti (únikové cesty, záchranná místa, vodovod apod.) až po nejčastěji používané vzorové příčné řezy tunelů s tím, že předpokládá jejich adaptaci dle podmínek konkrétní stavby. Projektant z těchto řezů vychází a je povinen před zahájením dalších prací předložit kompletní příčný řez s vysvětlením odchylek k posouzení.

2.2 NĚMECKO

Předpis německých drah *Richtlinie 853 Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten* (Plánování, výstavba a údržba železničních tunelů) je velmi rozsáhlý dokument, který řeší tunelové stavby na železniční síti do rychlosti 300 km/h. Předpis obsahuje vzorové příčné řezy tunelů s tím, že jejich použití je závazné. V případě nutnosti jejich adaptace dle podmínek konkrétní stavby je projektant povinen před zahájením dalších prací předložit kompletní příčný řez s důvodovou zprávou ke schválení.

2.3 ŠVÝCARSKO

Ve Švýcarsku platí pro tunelové stavby norma *SIA 197/1:2003 Projektierung Tunnel – Bahntunnel* (Projektování tunelů – Železniční tunely). Norma neobsahuje žádné vzorové příčné řezy železničních tunelů a požadavky na velikost profilu řeší obecnými pokyny a odkazem na mezinárodní předpis UIC Code 779-11 *Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic*

considerations (Stanovení světlé plochy příčných řezů železničních tunelů na základě aerodynamického posouzení).

2.4 RAKOUSKO

Předpis rakouských drah *Richtlinien für das Entwerfen von Bahnanlagen Hochleistungsstrecken* (Směrnice pro navrhování vysoce výkonných železničních systémů) řeší kompletní návrh železničních tratí, které mají zvláštní význam pro efektivní mezinárodní nebo místní dopravu. Platnost je omezena na konstrukční rychlost 200 km/h (maximální provozní rychlost 250 km/h). Dodatek 3 tohoto předpisu obsahuje 16 výkresových příloh vzorových příčných řezů jak raženého, tak hloubeného tunelu.

2.5 VÝSTUPY

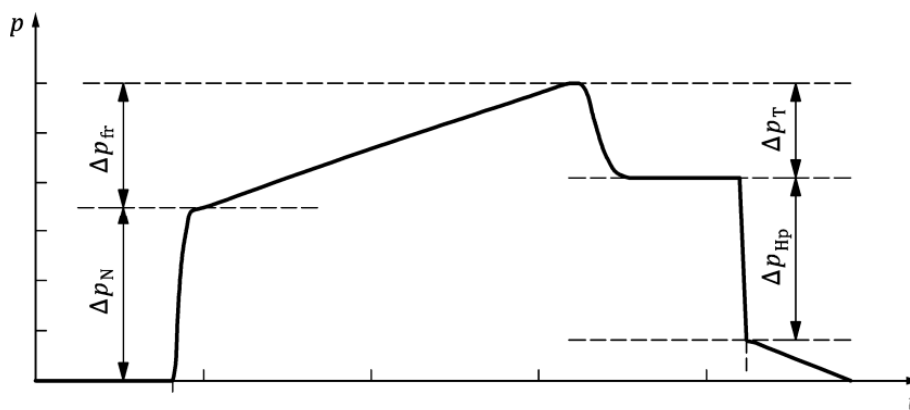
Z rešerše těchto předpisů vyplynulo, že obdobný komplexní předpis jako jsou vzorové listy je z dostupných dat zpracovaný částečně v Rakousku a především v Německu, odkud bylo zpracování stávajících vzorových listů inspirováno. Zároveň je evidentní, že je ve všech státech kladen důraz na vliv aerodynamických efektů a je nutné se s nimi při návrhu tunelových staveb podrobně zabývat.

3. AERODYNAMICKÉ POSOUZENÍ

3.1 AERODYNAMICKÉ EFEKTY

V rámci rešerše zahraničních předpisů, ale také u realizovaných tunelových staveb u nás i v zahraničí se projevuje nutnost posouzení aerodynamických účinků průjezdu vlakové soupravy tunelem. Je potřeba ověřit vliv na projíždějící soupravu, na vybavení tunelu (např. dveře do únikových cest) a především na samotné cestující.

V závislosti na rychlosti, příčném řezu a délce soupravy a délce a světlém řezu tunelu dochází v průběhu jízdy soupravy tunelem ke změnám tlaku vzduchu. Pro konkrétní místo v tunelu platí, viz Obrázek 1: Nejprve dochází k prudkému nárůstu tlaku způsobenému vjezdem čela soupravy do tunelu (Δp_N), dále pokračuje pozvolný nárůst tlaku vlivem jízdy celé soupravy (Δp_{fr}), vjezdem konce vlaku do tunelu dojde k ostrému poklesu (Δp_T) a v okamžiku kdy čelo vlaku projede místem měření dojde k ostrému poklesu tlaku (Δp_{Hp}).



Obrázek 1: Změny tlaku v konkrétním místě tunelu (ČSN EN 14067-5).

Tyto změny tlaku se následně šíří směrem od soupravy k portálům tunelu, jako vlny se vrací zpět a dochází k jejich skládání (zesilování a zeslabování). Ve dvoukolejném tunelu jsou tyto změny vyvolány dvěma protijedoucími soupravami, takže je nutné postupně vyšetřovat všechny vzájemné polohy souprav v tunelu v závislosti na čase jejich vjezdu. Pro každý případ se pak musí posoudit skládání jimi vyvolaných vln.

3.2 TLAKOTĚSNOST SOUPRAV

Projevy změny tlaku uvnitř soupravy závisí na tlakotěsnosti dané soupravy. Tlakotěsnost udává, za jaký čas se vnější změna tlaku projeví uvnitř soupravy. U netlakotěsné soupravy se tlakové změny ve vnějším

prostředí soupravy projevují prakticky ihned ve vnitřním prostoru soupravy, u tlakotěsné soupravy pak dochází ke zpoždění v závislosti na míře utěsnění vlaku a tím ke snížení výrazných krátkodobých výkyvů tlaku.

3.3 VLIV NA CESTUJÍCÍ

Vliv na cestující při průjezdu tunelem je posuzován v rámci hodnocení změny tlaku v čase. Základním parametrem je zdravotní kritérium pro maximální kolísání tlaku způsobené průjezdem vlaku jedoucím v tunelu maximální povolenou rychlostí, které je dáno *Nařízením komise (EU) o technických specifikacích pro interoperabilitu subsystému infrastruktura železničního systému v Evropské unii (TSI INF)*. Změna tlaku nesmí během doby průjezdu vlaku tunelem přesáhnout hodnotu 10 kPa.

Dále se posuzují tzv. kritéria komfortu pro cestující, která nejsou předpisy striktně požadována a jejich specifikace je na správci infrastruktury.

3.4 MIKROTLAKOVÉ VLNY

Dalším aerodynamickým efektem průjezdu soupravy tunelem jsou mikro-tlakové vlny. Jedná se o kompresní vlnu, která vzniká, když čelo vlaku vjede do tunelu, a šíří se tunelem rychlostí zvuku. U druhého portálu dojde k vyrovnání tlaku, ale menší část této vlny vychází z tunelu a šíří se od portálu v podobě impulsní mikro-tlakové vlny. Mikro-tlaková vlna působí jako aerodynamický (sonický) třesk, který může způsobit hlukové znečištění (dunivý hluk) a vést k drnčení konstrukcí v okolí portálu tunelu.

3.5 JÍZDNÍ ODPOR

Z pohledu energetické náročnosti jízdy tunelem je velmi důležitý jízdní odpor v tunelu, kdy při jízdě vlakové soupravy tunelem dochází, v porovnání s jízdou otevřenou krajinou, vlivem pístového efektu stísněného prostoru k nárůstu jízdního odporu. Tento vliv je vyjádřen takzvaným tunelovým faktorem a je to poměr mezi odporem v tunelu a odporem na volné trase.

4. STÁVAJÍCÍ VZOROVÉ LISTY

Stávající vzorové listy *Světlý tunelový průřez jednokolejného tunelu* byly vydány v roce 2010 a *Světlý tunelový průřez dvoukolejného tunelu* v roce 2011. Oba tyto předpisy byly zpracovány podle tehdy platné verze německého předpisu *Richtlinie 853 - Plánování, výstavba a údržba železničních tunelů*. Tento předpis obsahuje vzorové listy, ze kterých byla převzata rychlostní pásma a zároveň byly použity i obdobné rozměry světlého průřezu za účelem splnění požadavků na aerodynamické efekty při průjezdu soupravy tunelem, aby nebylo nutné zpracovávat velmi časově náročné aerodynamické výpočty.

Tabulka 1: Souhrn stávajících VL

Rychlostní interval [km/h]	VL jednokolejného tunelu		VL dvoukolejného tunelu	
	Způsob výstavby	Plocha příčného řezu nad TK [m ²]	Plocha příčného řezu nad TK [m ²]	Osová vzdálenost kolejí [mm]
0 - 160	Konvenční ražba	47,32	73,92	4000
	Mechanizovaná r.	50,56		
161 - 230	Konvenční ražba	52,44	78,68	4200
	Mechanizovaná r.	53,56		
231 - 300	Konvenční ražba	60,38	89,95	4500
	Mechanizovaná r.	61,20		

Kromě základního dělení na jednokolejné a dvoukolejné tunely jsou stávající vzorové listy rozdělené na tři rychlostní intervaly, ve kterých se zároveň mění i osová vzdálenost v případě dvoukolejného tunelu, viz Tabulka 1. Pro tato rychlostní pásma je vždy vypracován jeden vzorový příčný řez s kolejovým ložem a jeden s pevnou jízdní dráhou. V případě jednokolejných tunelů jsou navíc uvedeny také varianty provádění tunelu mechanizovanou ražbou (TBM).

5. ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA VZOROVÉ LISTY

Nové vzorové listy řeší jednokolejné a dvoukolejné tunely v rámci jednoho předpisu a obsahují příčné řezy tunelových staveb na konvenčních i vysokorychlostních tratích až do rychlosti 350 km/h. Řezy jsou rozděleny do několika rychlostních pásem a v každém pásmu jsou uvedena řešení pro konvenčně ražené tunely (s klenbou), pro hloubené tunely (rámová konstrukce) a v případě jednokolejných tunelů také pro tunely prováděné pomocí TBM. Každý vzorový příčný řez je zpracovaný jak pro kolejové lože, tak pro pevnou jízdní dráhu. Pro všechny světlé tunelové průřezy bylo provedeno aerodynamické posouzení pro splnění zdravotního kritéria 10 kPa dle TSI INF a dále byla prověřena kritéria komfortu pro cestující.

6. PARAMETRY A VÝCHOZÍ PŘEDPOKLADY PRO TVORBU VZOROVÝCH LISTŮ

6.1 DÉLKA TUNELU

V době přípravy tohoto příspěvku se předpokládá, že platnost vzorových listů bude omezena na tunely do délky 10 km. Nad tuto délku se jedná o specifické technické řešení, které vyžaduje individuální posouzení nejen z pohledu aerodynamiky. Délka tunelů byla jedním z velmi diskutovaných témat po celou dobu tvorby vzorových listů. Je totiž jedním z přímých parametrů pro výpočet tlakových změn. Nepřímo pak délka ovlivňuje celkové řešení tunelu z pohledu požární bezpečnosti (únikové cesty), větrání, trakční napájení atd.

6.2 OSOVÉ VZDÁLENOSTI

Příčné řezy dvojkolejných tunelů vycházejí z osových vzdáleností uvedených v ČSN 73 6320 - *Změna Z1 (2021) Prostorová průchodnost na dráze celostátní, dráhách regionálních a místních a vlečkách normálního rozchodu – Národní požadavky*, viz tabulka 2.

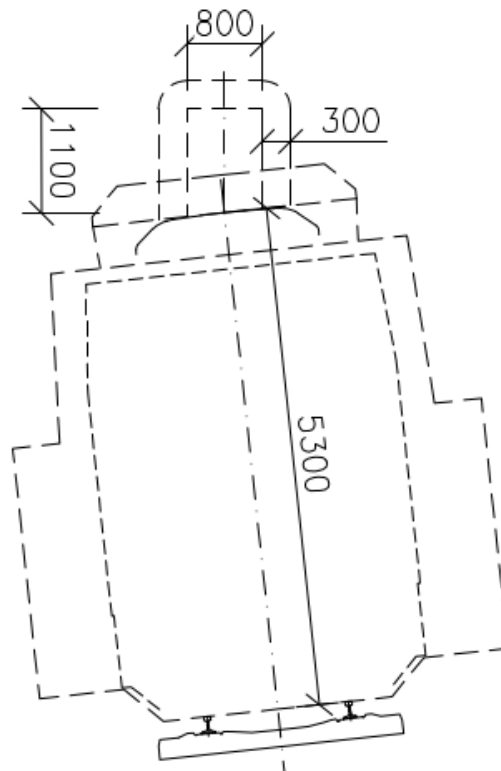
Tabulka 2: Normální osová vzdálenost kolejí dle ČSN 73 6320-Z1

Maximální povolená rychlost [km/h]	Normální osová vzdálenost kolejí [m]
V ≤ 200	4,00
V = 200	4,20
200 < V ≤ 360	4,50

6.3 PRŮJEZDNÝ PRŮŘEZ

Pro všechny vzorové příčné řezy je použit základní kinematický průjezdný průřez odvozený od mezinárodního referenčního profilu GC dle ČSN 73 6320 - *Změna Z1*, který se uplatňuje při novostavbách a rekonstrukcích celostátních a regionálních drah. Profil je doplněn nástavcem průjezdného průřezu pro elektrizované tratě, který byl na základě projednání s příslušným oddělením Správy železnic upraven na tyto parametry, viz Obrázek 2:

- Výška trolejového vedení je 5,3 m nad TK;
- Výška sestavy 1,1 m;
- Šířka sestavy 0,8 m;
- Izolační vzdálenost 0,3 m.



Obrázek 2: Sestava trakčního vedení

V tunelech přesahujících délku 1 km dochází k elektrickému a mechanickému dělení trakce, které vyžaduje větší prostor nad průjezdným průřezem. Vzhledem k možnému vlivu na světlý profil tunelu bylo řešení dělení trakce prověřováno pro všechny navržené profily tunelů.

6.4 VOLNÝ SCHŮDNÝ A MANIPULAČNÍ PROSTOR

Volný schůdný a manipulační prostor se dle ČSN 73 6320 – Z1 řídí v tunelech ČSN 73 7508. Zde je uveden požadavek na únikovou cestu podél stojící vlakové soupravy šířky min. 1,2 m a výšky nejméně 2,2 m. Vzhledem k tomu, že Nařízení Komise (EU) o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se „bezpečnosti v železničních tunelech“ (TSI SRT) požaduje volný prostor nad únikovým chodníkem min. 2,25 m, jsou všechny řezy VL zpracovány s průchozím prostorem šířky 1,2 m a výšky 2,25 m.

6.5 RYCHLOSTNÍ PÁSMA

Vzorové listy jsou opět zpracovány pro několik rychlostních pásem, ve kterých byla zároveň prováděna aerodynamická posouzení. Používaná pásma mají následující hraniční hodnoty:

- 160 km/h – Minimální řešená rychlost.
- 200 km/h – Základní limitní hodnota především pro dvojkolejné tunely určujících osovou vzdálenost kolejí dle ČSN 73 6320 - Změna Z1 (2021). Tato hranice vychází také z ČSN EN 14067-5, kde je pro rychlosti nad 200 km/h požadováno posouzení vzniku mikro-tlakové vlny v tunelu.
- 230 km/h – Jedná se hraniční hodnotu z pohledu aerodynamických charakteristik vlakových souprav.
- 250 km/h – Při této rychlosti už TSI INF požaduje řešit odlétávání šterku železničního svršku vyvolané aerodynamickými efekty při průjezdu soupravy.
- 270 km/h – Jedná se o rychlost, při které byly problémy s odletováním šterku železničního svršku sledovány.
- 300 km/h – Běžně užívaná hraniční hodnota.
- 350 km/h – Maximální řešená rychlost.

6.6 ŽELEZNIČNÍ SVRŠEK

Řešení železničního svršku má minimální dopad na aerodynamické výpočty. Vzorové listy tedy uvažují stejný světlý průřez pro obě varianty řešení železničního svršku - jak pro konstrukce s kolejovým ložem, tak pro konstrukce typu pevná jízdní dráha. Volba velikosti příčného řezu tunelu tak není ovlivněna řešením kolejového svršku, který se může v rámci vývoje projektu měnit.

Řešení železničního svršku má naopak výrazný vliv na vznik sonického třesku, kdy pevná jízdní dráha mikro-tlakové vlny odráží a kolejové lože je naopak pohlcuje a tím snižuje jejich efekt na portálech tunelu.

6.7 POJISTNÝ PROSTOR

Požadavek na pojistný prostor tunelu vychází z ČSN 73 7508 *Železniční tunely* (platnost normy je do rychlosti 160 km/h), kde je minimální šířka pojistného prostoru stanovena na 300 mm. Tato hodnota byla převzata do stávajících vzorových listů pro všechna rychlostní pásma i způsoby výstavby. Navíc je zde uvedeno, že jde o rezervní prostor pro dodatečné vestavění konstrukcí při opravě tunelu, pro přetvoření ostění a odchytky při výstavbě díla.

Při zpracování nových vzorových listů bylo na základě současných technologických možností rozhodnuto, že pojistný prostor pro dodatečné opravy je možné zmenšit. Zároveň bylo jasně specifikováno, jaká část pojistného prostoru je určena pro odchytky při výstavbě tunelu. Pojistný prostor byl tedy stanoven na celkovou hodnotu 150 mm a skládá se z 50 mm pro stavební tolerance, a 100 mm pro případné budoucí sanace.

Do světlého profilu tunelu, který má přímý vliv na aerodynamické výpočty, se započítává pouze prostor pro případné budoucí sanace s tím, že pokud v budoucnu dojde k zaplnění tohoto prostoru, musí být provedeno nové aerodynamické posouzení tunelu. Naopak prostor pro stavební tolerance není do aerodynamického posouzení započítáván – k jeho zaplnění může dojít již v rámci výstavby.

6.8 KRITÉRIA KOMFORTU

Pro posouzení kritéria komfortu pro cestující byly dle požadavku Správy železnic uvažovány hodnoty vyplývající z EN 14067-5, kde jsou v příloze B uvedeny následující informativní hodnoty:

- Změny tlaku pro cestujícího v netěsnícím vlaku by neměly překročit hodnoty:
 - Změny tlaku 4500 Pa za 4 s ve dvoukolejných tunelech.
 - Změny tlaku 3000 Pa za 4 s v jednokolejných tunelech.
- Změny tlaku pro cestujícího v těsnícím vlaku by neměly překročit hodnoty:
 - Změny tlaku 1000 Pa za 1 s.
 - Změny tlaku 1600 Pa za 4 s.
 - Změny tlaku 2000 Pa za 10 s.

7. VOLBA PŘÍČNÝCH ŘEZŮ

Při přípravě vzorových listů byly nejprve vytvořeny tzv. minimální profily, které byly zkonstruovány tak, aby obsahovaly samotný průjezdný průřez vozidel včetně nástavce pro elektrifikované tratě, osovou vzdálenost kolejí v případě dvoukolejného tunelu a volný schůdný a manipulační prostor.

Z důvodu zajištění prostoru pro dělení trakce musela být drobně korigována výška rámové hloubené konstrukce. V případě jednokolejného TBM došlo k minimálnímu zvětšení příčného řezu tunelu. Naopak u raženého tunelu umožňuje klenba v jednokolejném i dvoukolejném tunelu realizaci dělení trakce bez zvětšování profilu.

Tyto profily pak byly porovnány s výsledky aerodynamických výpočtů, které v souladu s příslušnou evropskou legislativou (TSI INF, ČSN EN 14067-5) prověřily především splnění zdravotního kritéria. Dále bylo posuzováno splnění požadovaných hodnot tlakového komfortu, tlakové zatížení na vozidla a na vybavení samotného tunelu při průjezdu soupravy tunelem. Výsledkem je, že pro nižší rychlosti (do

200 km/h) je dostačující minimální profil. Nad 200 km/h pak dochází ke zvětšování profilu tunelu na základě aerodynamického posouzení.

Následně proběhla optimalizace z pohledu reálného provozu, kdy v případě rychlostí do 200 km/h se předpokládá provoz netěsněných vlakových souprav, kde splnění komfortu cestujících musí zajišťovat velikost profilu tunelu. Naopak pro vyšší rychlosti by docházelo k výraznému nárůstu požadované světlé plochy profilu tunelu. Pro rychlosti od 200 km/h do 270 km/h je tak uvažováno s moderními soupravami, které tlakový komfort cestujících zajišťují právě tlakotěsností vozů.

Při vysokých rychlostech od 270 do 350 km/h z aerodynamických výpočtů vycházejí extrémně velké světlé plochy tunelů, které by z pohledu investičních nákladů byly nerealizovatelné. Zde je třeba zohlednit, že výpočty jsou zpracovány pro normovou soupravu, která má plochu příčného řezu 12 m². V současné době provozované vysokorychlostní soupravy mají menší plochu, a tedy při průjezdu tunelem vyvozují menší tlakové změny. Pro tyto rychlosti budou ve vzorových listech příčné řezy pouze informativně a příčný řez tunelu by měl být navržen na základě aerodynamického posouzení se zohledněním konkrétní délky tunelu, a především předpokládaných provozovaných souprav.

8. ZÁVĚR

Příprava vzorových listů světlých tunelových průřezů je velmi komplexní víceoborovou problematikou. Celý proces ukázal, jak výrazný vliv mají aerodynamické efekty v tunelu nejen na cestující ale také na vybavení tunelu a na samotné soupravy a jejich provoz. Během zpracování bylo nutné posoudit velké množství variant a vstupních parametrů, takže v době zpracování tohoto příspěvku ještě stále probíhá debata nad výslednými příčnými řezy. Výsledkem budou vzorové listy, které nejen zjednoduší přípravu železničních tunelových staveb, ale především přispějí ke snížení nákladů jak na přípravnou fázi projektu, tak především na samotnou realizaci tunelové stavby.

LITERATURA

Zákon č. 266/1994 Sb. Zákon o dráhách, 2023

ČSN 73 7508 Železniční tunely – Změna Z1, 2010

ČSN 73 6320 - Změna Z1 Prostorová průchodnost na dráze celostátní, dráhách regionálních a místních a vlečkách normálního rozchodu – Národní požadavky, 2021

ČSN 73 6360-1 Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 1: Projektování, 2020

ČSN 73 6360-2 Konstrukční a geometrické uspořádání koleje železničních drah a její prostorová poloha – Část 2: Stavba a přejímka, provoz a údržba, 2009

ČSN EN 14067-5 Železniční aplikace – Aerodynamika – Část 5: Požadavky a postupy posuzování pro aerodynamiku v tunelech, 2023

VL Světly tunelový průřez dvoukolejného tunelu, SŽDC 2011

VL Světly tunelový průřez jednokolejného tunelu, SŽDC 2010

Norma ADIF PLATAFORMA NAP 2-3-1.0 Túneles, ADIF, 1. vydání 07/2015 + M1: 06/2018

Richtlinie 853 Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten, DB Netz AG, 09/2018

Richtlinien für das Entwerfen von Bahnanlagen Hochleistungsstrecken, HL-AG, ÖBB, BEG 2002

SIA 197/1:2004 Projektierung Tunnel – Bahntunnel, Schweizerischer Ingenieur – und Architektenverein Postfach, 2019

UIC Code 779-11 Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations, UIC 2005

Nařízení komise (EU) č. 1299/2014 ze dne 18. listopadu 2014 o technických specifikacích pro interoperabilitu subsystému infrastruktura železničního systému v Evropské unii, upraveno prováděcím nařízením 2023/1694.

Nařízení Komise (EU) č. 1303/2014 ze dne 18. listopadu 2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se „bezpečnosti v železničních tunelech“ železničního systému Evropské unie, upraveno prováděcím nařízením 2024/191.

Ing. Michal Hnilička

Mott MacDonald CZ, spol. s r.o.

michal.hnilicka@mottmac.com