

03			
02	TECHNICKÝ PRŮKAZ PO ZAPRACOVÁNÍ PŘIPOMÍNEK	25.12.2019	
01	TECHNICKÝ PRŮKAZ K PŘIPOMÍNKÁM	25.11.2019	
REVIZE	POPIS	DATUM	PODPIS

OBJEDNATEL

SPRÁVA ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTY, STÁTNÍ ORGANIZACE
DLÁŽDĚNÁ 1003/7, 110 00 PRAHA 1

STAVEBNÍ SPRÁVA ZÁPAD, SOKOLOVSKÁ 1955/278, 190 00 PRAHA 9



ZHOTOVITEL

SAGASTA s.r.o.

SÍDLŮ: NOVODVORSKÁ 1010/14, 142 00 PRAHA 4
IČ: 04598555 DIČ: CZ04598555



JTSK

Bpv

ČÍSLO SOUPRAVY

ZPRACOVATEL ČÁSTI

VÝZKUMNÝ A ZKUŠEBNÍ LETECKÝ ÚSTAV, a.s.
BERANOVÝCH 130, 199 05 PRAHA - LETŇANY

ODPOVĚDNÝ PROJEKTANT	VYPRACOVAL	KONTROLA	HIP
			ING. MARKÉTA HAMPLOVÁ
PODPIS	PODPIS	PODPIS	PODPIS

OBSAH

Prověření zvýšení traťové rychlosti v úseku Ejpovice (mimo) - Plzeň (mimo)

B PROVOZNÍ A DOPRAVNÍ TECHNOLOGIE

NÁZEV PŘÍLOHY

**B.2 Simulace vlivu železničního tunelu na aerodynamický odpor vlaku
měřením v aerodynamickém tunelu**

ČÍSLO ZAKÁZKY 119 054

DOKUMENTACE TP

MĚŘÍTKO -

DATUM 12 / 2019

POČET FORMÁTŮ -

ČÁST

ČÍSLO PŘÍLOHY

B.2

-



VÝZKUMNÝ A ZKUŠEBNÍ LETECKÝ ÚSTAV, a.s.
... partner průmyslu

R-7116

SIMULACE VLIVU ŽELEZNIČNÍHO TUNELU
NA AERODYNAMICKÝ ODPOR VLAKU
MĚŘENÍM V AERODYNAMICKÉM TUNELU

ROBERT KULHÁNEK, Ing.
ZDENĚK PÁTEK, Doc. Ing. CSc.
NIKITA ŽIŽKOVSKÝ, Ing.

SOUHRN

V rámci ověřování možností jízdy vlaku jednokolejným železničním tunelem vysokou rychlostí byl fyzikální simulací na modelech v aerodynamickém tunelu zkoumán rozdíl ustáleného aerodynamického odporu vlaku v jednokolejném tunelu ve srovnání s aerodynamickým odporem vlaku na širé trati. Model jednokolejného tunelu odpovídá typickému průřezu tunelu na traťovém úseku Ejovice – Plzeň.

Aerodynamický odpor byl zjišťován experimentálně měřením aerodynamického odporu modelu vozů vysokorychlostního vlaku v měřítku 1:25.

Měření na modelech vlaku ICE 3 v aerodynamickém tunelu ukázala významné zvýšení ustáleného aerodynamického odporu všech vozů v jednokolejném železničním tunelu. Nejvýraznější, přibližně na čtyřnásobek, nárůst nastal u předního hlavového vozu, u vloženého vozu byl zjištěn nárůst přibližně dvojnásobek a u zadních vozů byl změřen nárůst přibližně na jedenapůlnásobek.

Celkové zvýšení aerodynamického odporu celé soupravy a tedy potřebný přírůstek trakčního výkonu pak závisí na počtu vložených vozů.

OBSAH

	Použitá označení.....	4
1	Úvod.....	5
2	Model.....	6
3	Měřicí zařízení a technika měření.....	10
3.1	Aerodynamický tunel.....	10
3.2	Měřicí zařízení	10
4	Způsob a rozsah měření.....	11
5	Výsledky	12
6	Potřebné zvýšení výkonu.....	14
7	Závěr	15
8	Literatura	16

Použitá označení

c	smluvní vztažná délka, pro model $c = 0,12$ m, pro skutečné dílo $c = 3$ m	[m]
$C_D = \frac{D}{qS}$	součinitel odporu	[-]
D	aerodynamický odpor	[N]
$q = \frac{1}{2} \rho V^2$	dynamický tlak zkušebního proudu vzduchu	[Pa]
$Re = \frac{V \cdot c}{\nu}$	Reynoldsovo číslo	[-]
S	smluvní vztažná plocha, pro model $S = 0,016$ m ² , pro skutečné dílo $S = 10$ m ²	[m ²]
V	rychlost zkušebního proudu vzduchu	[m·s ⁻¹]
ν	kinematická viskozita	[m ² ·s ⁻¹]
ρ	hustota vzduchu	[kg·m ⁻³]

Hodnoty smluvní vztažné délky $c = 3$ m a smluvní vztažné plochy $S = 10$ m² pro vyjádření aerodynamických součinitelů kolejových vozidel byly zvoleny podle ČSN EN14067-6 [1].

1 ÚVOD

V rámci ověřování možností jízdy vlaku jednokolejným železničním tunelem vysokou rychlostí byl fyzikální simulací na modelech v aerodynamickém tunelu zkoumán rozdíl ustáleného aerodynamického odporu vlaku v jednokolejném tunelu ve srovnání s aerodynamickým odporem vlaku na širé trati. Model jednokolejného tunelu odpovídá typickému průřezu tunelu na traťovém úseku Ejpovice – Plzeň.

Aerodynamický odpor byl zjišťován experimentálně měřením aerodynamického odporu modelu vozů vysokorychlostního vlaku v měřítku 1:25.

Měření proběhla v nízkorychlostním aerodynamickém tunelu Výzkumného a zkušebního leteckého ústavu, a.s. v říjnu 2019.

Měření zadala firma SAGASTA s.r.o.

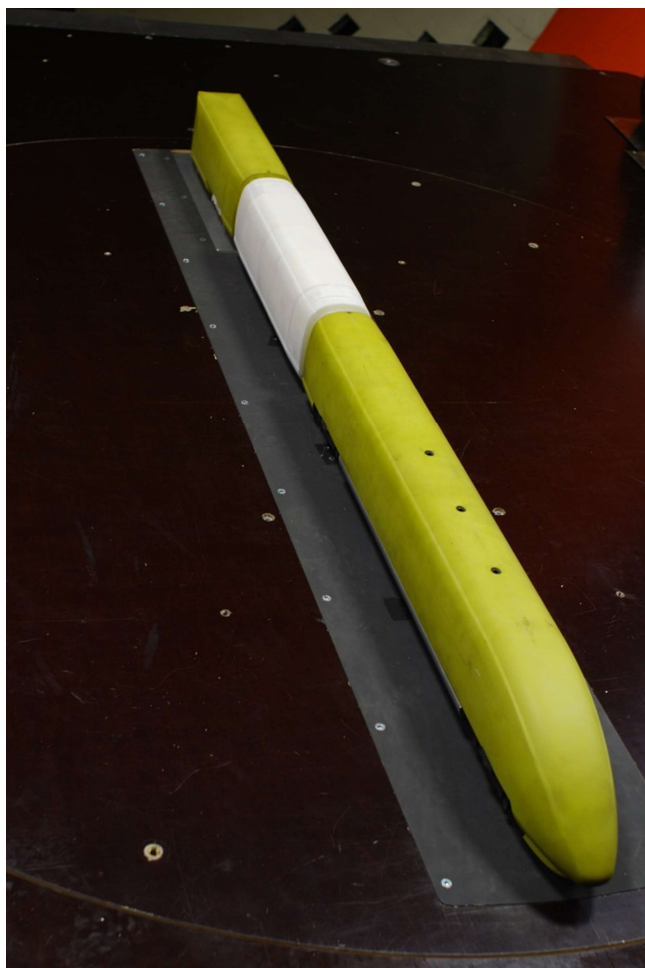
2 MODEL

K měření byl použit model části vysokorychlostní vlakové jednotky ICE 3 v měřítku 1:25. Geometrický tvar jednotky odpovídá údajům v [1].

Model sestával z hlavového vozu, vloženého vozu zkráceného na polovinu délky a z úplavového tělesa, které simuluje aerodynamický vliv dalších vozů vlaku na hlavový a vložený vůz. Geometrické detaily modelu byly vypracovány v souladu s [1]. Hlavový a vložený vůz mohly být vzájemně oddělené, nebo spojené dohromady. Model vlakové jednotky ukazují obr. 2.1 až 2.4.

Model tunelu (obr. 2.5 a 2.6) byl zhotoven z polystyrenových bloků s koncovými částmi s portály provedenými z kovových válcových úsečí. Průřez modelu tunelu odpovídal průřezu jednokolejného ejpovického tunelu v měřítku 1:25. Délka modelu tunelu umožňovala měření s modelem vlaku celým zasunutým v tunelu s odstupem čel vlaku od portálů tunelu dostatečným pro napodobení reálné situace. Ucpání čelního průřezu modelu tunelu modelem vlaku činilo 18,5 %. Geometrie tunelu je dále popsána v příloze (kapitola č.8).

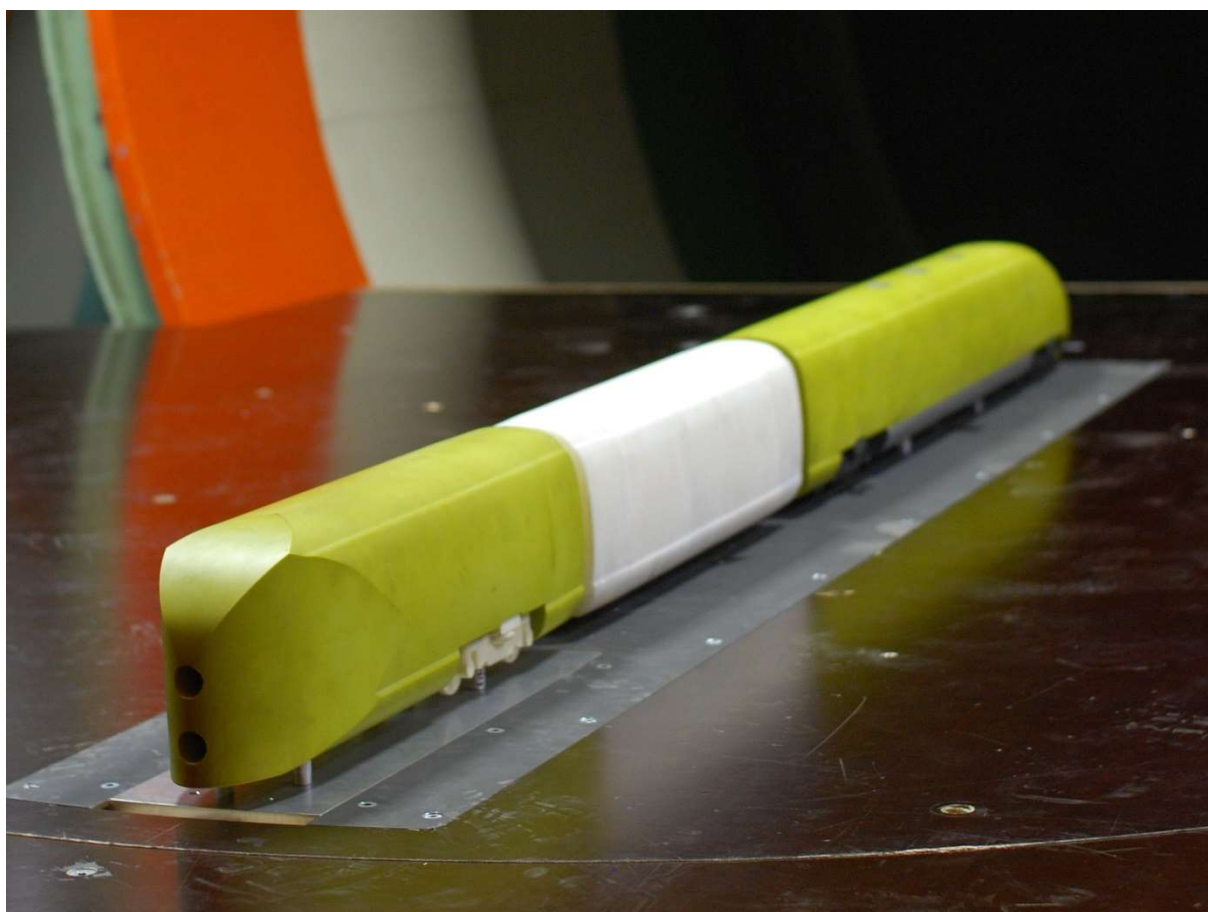
Model byl umístěn v měřicím prostoru aerodynamického tunelu na zemní desce simulující zemský povrch. Vzhledem k účelu měření, tj. srovnání součinitele aerodynamického odporu na širé trati a v tunelu, se neuvažoval boční vítr, a proto nebyl modelově simulován kolejový násep.



Obr. 2.1 Model ICE 3, pohled od hlavového vozu



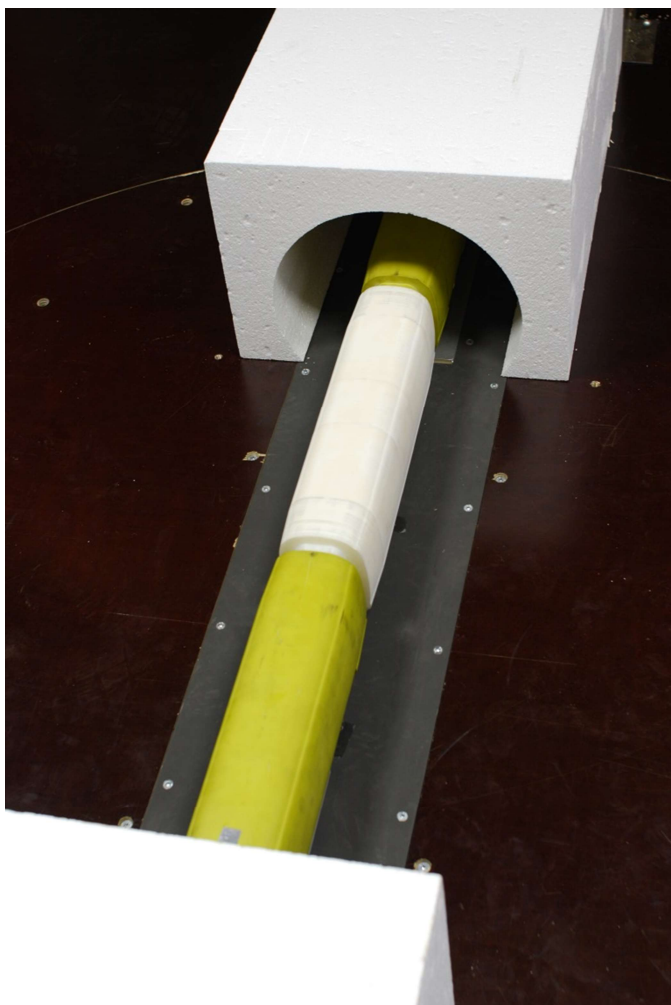
Obr. 2.2 Model ICE 3, pohled od hlavového vozu



Obr. 2.3 Model ICE 3, pohled od úpravového tělesa



Obr. 2.4 Model ICE 3 v tubusu modelu tuneelu



Obr. 2.5 Model vlaku v částečně rozebraném modelu tunelu



Obr. 2.6 Model tunelu v měřicím prostoru aerodynamického tunelu

3 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ A TECHNIKA MĚŘENÍ

3.1 AERODYNAMICKÝ TUNEL

Měření proběhla v nízkorychlostním tunelu 3mLSWT Výzkumného a zkušebního leteckého ústavu, a.s. v Praze – Letňanech.

Jedná se o atmosférický tunel s otevřeným zkušebním prostorem kruhového průřezu průměru 3 metry. Do proudovodu tunelu byl pro měření mezi třetí a čtvrté ohybové koleno zasunut chladič, který udržoval teplotu vzduchu v rozmezí několika kelvinů. Kvalita zkušebního proudu vzduchu v měřicím prostoru je popsána v [2].

Pro měření s instalovaným modelem železničního tunelu s modelem vlaku uvnitř byla zjištěna závislost mezi přetlakem na dýze standardně používaným pro určení dynamického tlaku v měřicím prostoru aerodynamického tunelu a mezi dynamickým tlakem na začátku modelu železničního tunelu. K zjištění závislosti byla použita pitot-statická sonda umístěná postupně podélně ve dvou místech v ose modelu železničního tunelu (150 a 300 mm od ústí tunelu). Potvrdilo se, že závislost je konstantní a dynamický tlak v modelu tunelu lze přímo určit z přetlaku na dýze.

3.2 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

Síly a momenty působící na části modelu vlaku byly měřeny interní tenzometrickou vahou I6B029 vloženou podélně do modelu čelního vozu.

Měřily se síly a momenty působící buď na samotný hlavový vůz zařazený jako přední, nebo na hlavový vůz spojený s vloženým vozem, nebo na hlavový vůz zařazený jako poslední vůz (této konfigurace se docílilo otočením celého modelu vlaku o 180°).

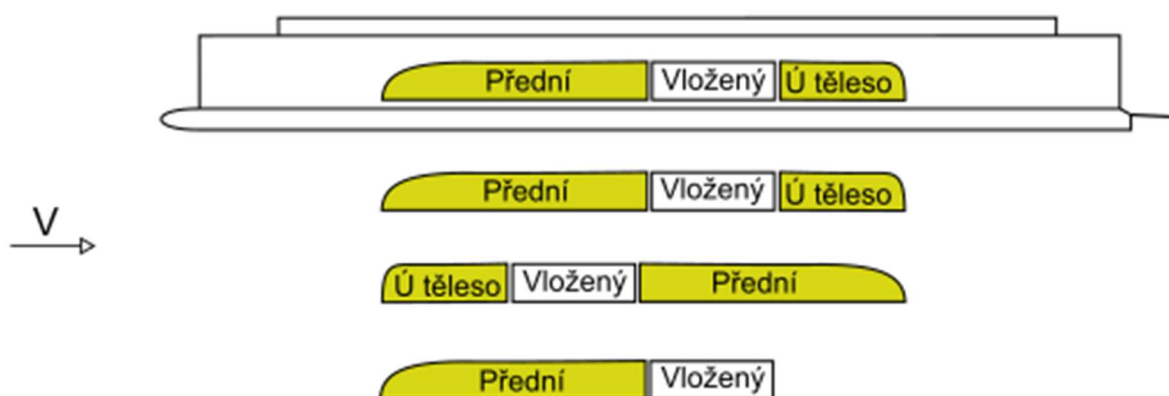
Při měření a při zpracování výsledků byly použity standardní postupy pro měření modelů v tunelu 3mLSWT [3].

4 ZPŮSOB A ROZSAH MĚŘENÍ

Měření probíhalo jednak s modelem vlaku v otevřeném měřicím prostoru, tím se simuloval vlak na širé trati, jednak s modelem vlaku umístěným v modelu tunelu. Obě situace se měřily se zkušebním proudem vzduchu nabíhajícím přímo čelně na model vlaku, rovnoběžně s jeho podélnou osou. Boční složka větru nebyla simulována, protože cílem měření bylo zjistit rozdíl aerodynamického odporu vlaku mezi širou tratí a tunelem, a proto bylo uvažování bočního větru irelevantní.

Před vlastním srovnávacím měřením byla zjišťována případná závislost součinitele odporu na Reynoldsově číslu. Ukázalo se, že při Reynoldsově číslu $0,52 \cdot 10^6$ jsou výsledky již ustálené. Hodnota dobře odpovídá Reynoldsovu číslu $0,60 \cdot 10^6$ doporučenému normou [1]. Rovněž změřená hodnota součinitele aerodynamického odporu čelního vozu 0,147 dobře odpovídá hodnotě uvedené v [1] pro model čelního vozu vlaku ICE 3.

Reynoldsovo číslo vztažené na smluvní délku c (pro model 0,12 m) činilo maximálně $0,52 \cdot 10^6$, Machovo číslo činilo přibližně 0,2.



Obr. 4.1 Měřené konfigurace

Měřené charakteristiky

Na modelu byl zjišťován součinitel aerodynamického odporu

- předního hlavového vozu
- předního hlavového vozu spojeného s vloženým vozem
- hlavového vozu zařazeného jako poslední vůz, tedy s modelem vlaku otočeným o 180° .
- vloženého vozu zařazeného jako poslední vůz, simuloval se tak poslední vůz vlaku s tupým čelem

Všechny varianty byly měřeny jednak s modelem vlaku na zemní desce v otevřeném měřicím prostoru, jednak s modelem jednokolejného tunelu instalovaným okolo modelu vlaku.

Z naměřených hodnot byl jak pro situaci na širé trati, tak pro situaci v tunelu vyhodnocen součinitel aerodynamického odporu C_D předního hlavového vozu, vloženého vozu a zadního hlavového vozu.

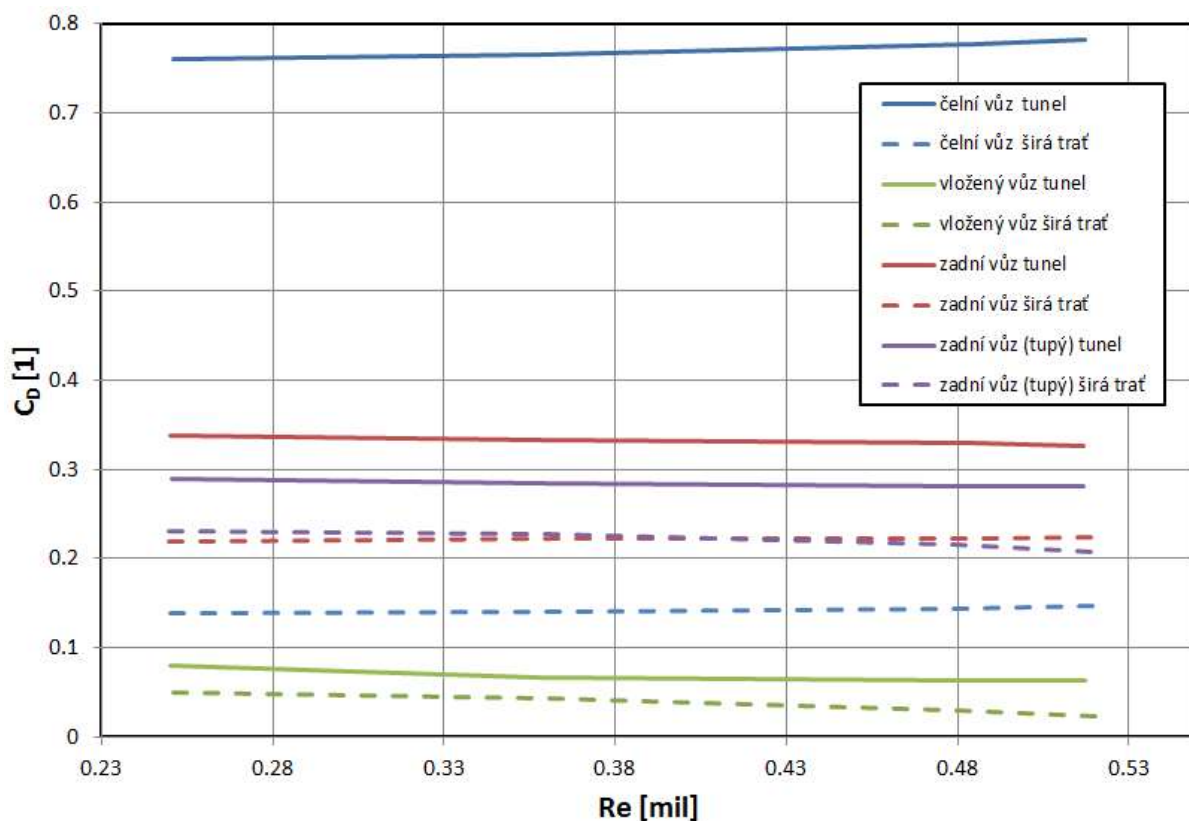
5 VÝSLEDKY

Měřením byly zjištěny změny součinitele aerodynamického odporu uvedené v v obr.5.1 a v tab. 5.1. Pro aerodynamické součinitele v obrázku č. 5 je použita stejná referenční plocha ($A = 0.016\text{m}^2$). Proto nelze výsledky v obrázku přímo porovnávat jako rozdíly mezi jednotlivými typy vozu z důvodů rozdílné délky modelu, ale pouze jako vliv jízdy v tunelu.

Z výsledků je zřejmé, že:

- součinitel odporu předního hlavového vozu vzrostl přibližně na čtyřnásobek
- součinitel odporu vloženého vozu vzrostl přibližně na dvojnásobek
- součinitel odporu zadního hlavového vozu vzrostl přibližně o 50 %.

Naměřené hodnoty se týkají vlakové jednotky ICE 3. Pro jiné geometrické tvary vlaků je třeba je považovat za změny orientační, zejména pokud se týká hlavového vozu.



Obr. 5.1 Vliv jednokolejného tunelu na aerodynamický odpor

Re [mil]	CD - přední		CD - vložený		CD - zadní		CD - zadní (tupý)	
	tunel	širá t.	tunel	širá t.	tunel	širá t.	tunel	širá t.
0.25	0.761	0.139	0.080	0.050	0.338	0.218	0.290	0.232
0.36	0.765	0.140	0.068	0.043	0.333	0.222	0.284	0.227
0.48	0.777	0.144	0.064	0.030	0.329	0.222	0.282	0.216
0.52	0.782	0.147	0.063	0.022	0.326	0.225	0.281	0.208

Tab. 5.1 Hodnoty součinitele aerodynamického odporu

Zvýšení aerodynamického odporu

$$\Delta P[kW] = \frac{1}{2} \rho V^3 \left(\Delta C_{Dp} \frac{L_p}{l_p} + n \Delta C_{Dv} \frac{L_v}{l_v} + \Delta C_{Dz} \frac{L_z}{l_z} \right) \frac{A}{1000M}$$

kde

M = 25	měřítko modelu
A = 10 m ²	vztažná plocha, standardizována podle [1]
V [ms ⁻¹]	rychlost jízdy
ρ [kgm ⁻³]	hustota vzduchu, při standardních podmínkách 1,225
ΔC _{Dp} , ΔC _{Dv} , ΔC _{Dz}	konstanty zvýšení aerodynamického odporu pro hlavový, vložený a zadní vůz (měřeny ve VZLÚ)
l _p , l _v , l _z [m]	délky vozů modelů; 1,02 pro přední a zadní vůz, 0,47 pro vložený nebo zadní vůz
L _p , L _v , L _z [m]	skutečné délky vozů
n	počet vložených vozů

ΔC _{Dp}	0,623
ΔC _{Dv}	0,086
ΔC _{Dz}	0,099
ΔC _{Dz} (tupé čelo)	0,155

Tab. 5.2 -Hodnoty aerodynamických koeficientů

6 POTŘEBNÉ ZVÝŠENÍ VÝKONU

Pro překonání zvýšeného aerodynamického odporu v jednokolejném tunelu při stejné rychlosti jízdy jako na širé trati je potřebný přírůstek výstupního výkonu pohonu vlaku uvedený v následujícím vztahu (2). I zde platí, že se jedná o změny zjištěné pro model vlakové jednotky ICE 3, pro jiné geometrické tvary vlaku je třeba považovat vztah za orientační.

$$\Delta P[kW] = \frac{1}{2} \rho V^3 \left(\Delta C_{Dp} \frac{L_p}{l_p} + n \Delta C_{Dv} \frac{L_v}{l_v} + \Delta C_{Dz} \frac{L_z}{l_z} \right) \frac{A}{1000 M} \quad (2)$$

Vztah 2 lze zjednodušit vyčíslením konstantních členů (rov. 3). Hodnoty aerodynamických koeficientů zahrnujících zvýšení aerodynamického odporu jízdou v tunelu jsou uvedeny v tabulce 5.2.

$$\Delta P[kW] = \rho V^3 (\Delta C_{Dp} L_p + n \Delta C_{Dv} L_v + \Delta C_{Dz} L_z) 0,0002 \quad (3)$$

7 ZÁVĚR

Měření na modelech vlaku ICE 3 v aerodynamickém tunelu ukázala významné zvýšení ustáleného aerodynamického odporu všech vozů v jednokolejném železničním tunelu (popsaným v příloze 8). Nejvýraznější, přibližně na čtyřnásobek, nárůst nastal u předního hlavového vozu, u vloženého vozu byl zjištěn nárůst přibližně dvojnásobek a u zadních vozů byl změřen nárůst přibližně na jedenapůlnásobek.

Celkové zvýšení aerodynamického odporu celé soupravy a tedy potřebný přírůstek trakčního výkonu pak závisí na počtu vložených vozů.

Vztah výsledků měření k normě **ČSN EN 14067-5 (281901) Železniční aplikace - Aerodynamika - Část 5: Požadavky a zkušební postupy pro aerodynamiku v tunelech**

Norma řeší pouze následující záležitosti:

- Metodika pro kvantifikaci změn tlaků za účelem splnění zdravotních kritérií.
- Tlakové zatížení protijedoucích neutěsněných vlaků.
- Tlakové zatížení utěsněných vlaků v tunelech.

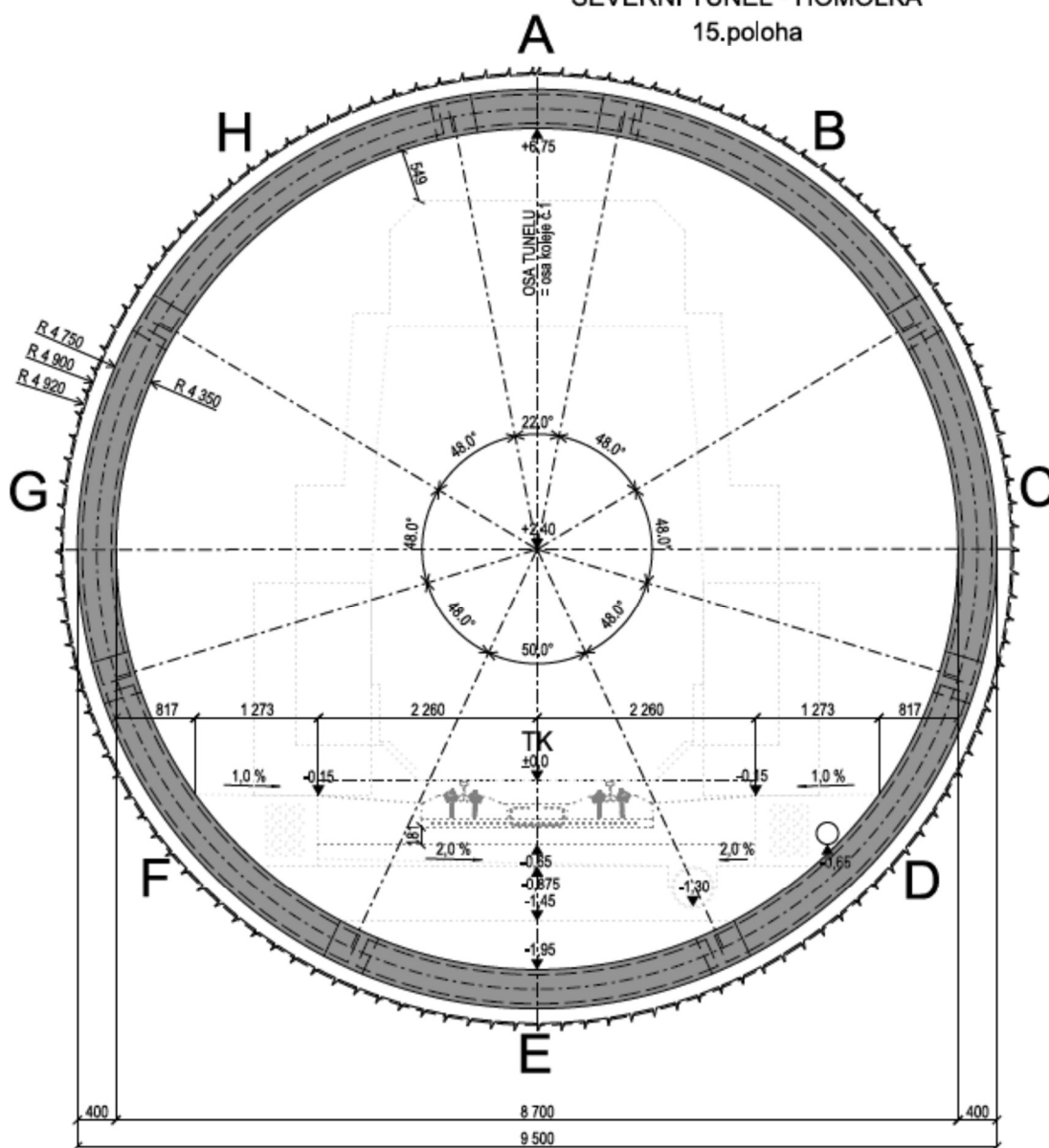
Experiment, který je popisovaný v této zprávě, se nevztahuje konkrétně k žádnému z bodů normy ČSN EN 14067-5.

Typický průřez tunelu použitý pro tvorbu průřezu modelu byl dodán objednatelem zakázky. Průřez modelu tunelu byl odvozen z dokumentace skutečného provedení stavby a to konkrétně SO 32-38-22 Tunel Homolka – ražená část, severní tunel. Konkrétně se vycházelo z toho, že tunel je kruhový s průměrem 8700mm, viz Obr. 8.1.

M 1:50

POHLED VE SMĚRU RAŽBY

SEVERNÍ TUNEL - HOMOLKA
15.poloha



Obr. 8.1 Typický průřez tunelu

9 LITERATURA

- [1] EN 14067-6 *Railway applications - Aerodynamics -Part 6: Requirements and test procedures for cross wind assessment*
- [2] Golda, M., Kulhánek, R., Pátek, Z. *Zkušební proud vzduchu v měřicím prostoru aerodynamického tunelu VZLÚ 3mLSWT*. Zpráva VZLÚ R-6587, Praha 2016
- [3] Kulhánek, R., Pátek, Z., *Metodika měření v tunelu 3mLSWT*. PV-AER-084, 2. vydání, VZLÚ Praha 2018
- [4] Barlow, J. B., Rae, H. W., Pope, A., *Low – Speed Wind Wunnel Testing, 3rd edition*. John Wiley 1999

