



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

Fakulta strojní

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**CFD simulace obtékání skříně vysokorychlostní kolejové jednotky**

**CFD simulation of the Flow Around High-Speed Carbody**

Josef Kruml

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.

Studijní program: Strojní inženýrství

---

**Praha 2017**

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci vypracoval samostatně za použití podkladů uvedených v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....

podpis

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Tomáši Hyhlíkovi, Ph.D. za ochotu, trpělivost a cenné rady, které mi pomohly při zpracování této práce.

## Anotační list

Jméno autora:	Josef Kruml
Název práce:	CFD simulace obtékání skříně vysokorychlostní kolejové jednotky
Title:	CFD Simulation of the Flow Around High-Speed Carbody
Rok:	2017
Studijní program:	Strojní inženýrství
Ústav:	Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Hyhlík, Ph.D.
Klíčová slova:	Aerodynamika, vysokorychlostní kolejová jednotka, průjezd tunelem, Ansys CFX
Keywords:	Aerodynamics, high-speed train, tunnel passing, Ansys CFX

### Abstrakt:

Cílem této diplomové práce je provést numerické řešení proudění vznikajícího v okolí vysokorychlostní kolejové jednotky při průjezdu třemi modelovými situacemi. V první z nich se jednotka pohybuje volným prostorem, ve druhé míjí protihlukovou stěnu a ve třetí projíždí tunelem. Řešení obsahuje popis modelu vysokorychlostní jednotky, nastavení jednotlivých výpočetních úloh a zhodnocení dosažených výsledků.

### Abstract:

The aim of this diploma thesis is to solve numerically the flow caused by the high-speed train passing for three model cases. In the first case the train passes through free space, in the second passes around noise barrier and in the third passes through tunnel. The solution includes the high-speed train model definition, the tasks solving and the evaluation of the obtained results.

# Obsah

Anotační list.....	5
Obsah.....	6
Seznam použitých symbolů a zkratek.....	7
Úvod.....	11
1 Aerodynamika kolejových vozidel.....	12
2 Problémy kolejových vozidel z hlediska aerodynamiky.....	13
2.1 Aerodynamický odpor.....	14
2.2 Tlakové změny při průjezdu tunelem.....	20
2.3 Nestabilita vozidel vznikající vlivem bočního proudění.....	26
2.4 Síly působící na vozidlo při míjení překážek.....	28
2.5 Aerodynamický hluk.....	33
2.6 Ventilace a přenos tepla v podzemních stanicích a tunelech.....	35
3 Návrh zjednodušené geometrie vysokorychlostní jednotky.....	37
4 Nastavení výpočtového modelu.....	41
4.1 Nastavení pro průjezd volným prostředím.....	42
4.2 Nastavení pro průjezd okolo protihlukové stěny.....	44
4.3 Nastavení pro průjezd tunelem.....	46
5 Výsledky.....	49
5.1 Průjezd volným prostorem.....	50
5.2 Průjezd okolo protihlukové stěny.....	53
5.3 Průjezd tunelem.....	56
Závěr.....	60
Použitá literatura.....	61

## Seznam použitých symbolů a zkratek

Značka veličiny	Název veličiny	Jednotka
$\vec{F}_T$	Tažná síla vozidla	N
$\vec{F}_P$	Odpor zrychlení vozidla	N
$\vec{F}_O$	Odporové síly	N
$m_V$	Hmotnost vozidla	kg
$\rho_d$	Součinitel rotačních hmot	l
$\vec{a}_V$	Zrychlení vozidla	m/s <sup>2</sup>
$\vec{O}_V$	Vozidlové odpory	N
$\vec{O}_T$	Traťové odpory	N
$\vec{R}_M$	Mechanické odpory	N
$\vec{R}_A$	Aerodynamické odpory	N
A	Koeficient mechanického odporu	N
B	Koeficient mechanického odporu	N · s/m
C	Koeficient aerodynamického odporu	N · s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
$\vec{v}$	Rychlost vozidla	m/s
$\lambda$	Koeficient závisící na druhu vozidla	kg <sup>1/2</sup> · m/s <sup>2</sup>
M	Celková hmotnost vlakové soupravy	kg
m	Hmotnost připadající na jednu nápravu	kg
$\rho$	Hustota vzduchu	kg/m <sup>3</sup>
$S_{\text{čel}}$	Čelní plocha vozidla	m <sup>2</sup>
$C_D$	Součinitel odporu	l
$C_S$	Součinitel odporu tření podél vozidla	1/m

<b>Značka veličiny</b>	<b>Název veličiny</b>	<b>Jednotka</b>
$C_P$	<i>Součinitel odporu na čele, respektive na konci vlaku</i>	<i>l</i>
$l$	<i>Délka vlaku</i>	<i>m</i>
$\vec{o}_V$	<i>Měrné vozidlové odpory</i>	<i>N/kN</i>
$a$	<i>Měrný koeficient mechanického odporu</i>	<i>N/kN</i>
$b$	<i>Měrný koeficient mechanického odporu</i>	<i>N · s / (m · kN)</i>
$c$	<i>Měrný koeficient aerodynamického odporu</i>	<i>N · s<sup>2</sup> / (m<sup>2</sup> · kN)</i>
$\vec{g}$	<i>Tíhové zrychlení</i>	<i>m/s<sup>2</sup></i>
$\vec{G}_V$	<i>Tíha vozidla</i>	<i>N</i>
$t$	<i>Čas</i>	<i>s</i>
$\vec{u}$	<i>Rychlost proudění okolo vozidla</i>	<i>m/s</i>
$\sigma$	<i>Vnější zdroj proudění</i>	<i>kg / (m<sup>3</sup> · s)</i>
$\theta$	<i>Vnější zdroj energie</i>	<i>J</i>
$p$	<i>Tlak</i>	<i>Pa</i>
$\vec{c}_z$	<i>Rychlost zvuku</i>	<i>m/s</i>
$\kappa$	<i>Poměr měrných tepelných kapacit</i>	<i>l</i>
$\vec{f}$	<i>Třecí síla</i>	<i>N</i>
$\varphi$	<i>Disipační energie</i>	<i>J</i>
$\lambda_{vlak}$	<i>Třecí koeficient na povrchu vlaku</i>	<i>l</i>
$\lambda_{tun}$	<i>Třecí koeficient na povrchu tunelu</i>	<i>l</i>
$d_{vlak}$	<i>Hydraulický průměr vlaku</i>	<i>m</i>
$d_{tun}$	<i>Hydraulický průměr tunelu</i>	<i>m</i>
$B$	<i>Poměr průřezů vlaku a tunelu</i>	<i>l</i>

<b>Značka veličiny</b>	<b>Název veličiny</b>	<b>Jednotka</b>
$p'$	<i>Tlak mezi stěnami vlaku a tunelu</i>	<i>Pa</i>
$\overrightarrow{R_C}$	<i>Aerodynamická složka vozidlových odporů</i>	<i>N</i>
$p_1$	<i>Hodnota tlaku před vlnou</i>	<i>Pa</i>
$p_2$	<i>Hodnota tlaku za vlnou</i>	<i>Pa</i>
$\Delta p_{21}$	<i>Rozdíl tlaků <math>p_1</math> a <math>p_2</math></i>	<i>Pa</i>
$\delta$	<i>Poměr průřezových ploch</i>	<i>l</i>
$M_a$	<i>Machovo číslo</i>	<i>l</i>
$p_{max}$	<i>Maximální hodnota tlaku v tunelu</i>	<i>Pa</i>
$r$	<i>Vzdálenost od konce tunelu</i>	<i>m</i>
$\overrightarrow{F_B}$	<i>Boční síla</i>	<i>N</i>
$C_B$	<i>Součinitel odporu ve směru příčném ke směru jízdy</i>	<i>l</i>
$S_{boč}$	<i>Boční plocha vozidla</i>	<i>m<sup>2</sup></i>
$\overrightarrow{w}$	<i>Výslednice rychlosti vozidla a rychlosti bočního proudění</i>	<i>m/s</i>
$\alpha$	<i>Úhel bočního proudění</i>	<i>°</i>
$E$	<i>Akustická energie</i>	<i>J</i>
$P_{aku}$	<i>Akustický výkon</i>	<i>W</i>
$P_{aku0}$	<i>Referenční hodnota akustického výkonu</i>	<i>W</i>
$L_{Paku}$	<i>Hladina akustického výkonu</i>	<i>dB</i>
$F_x$	<i>Síla ve směru osy x</i>	<i>N</i>
$F_y$	<i>Síla ve směru osy y</i>	<i>N</i>
$F_z$	<i>Síla ve směru osy z</i>	<i>N</i>



<b>Značka veličiny</b>	<b>Název veličiny</b>	<b>Jednotka</b>
$C_x$	<i>Součinitel odporu ve směru osy x</i>	<i>1</i>
$C_y$	<i>Součinitel odporu ve směru osy y</i>	<i>1</i>
$C_z$	<i>Součinitel odporu ve směru osy z</i>	<i>1</i>

## Úvod

Porozumění aerodynamickým jevům, jež provázejí pohyb moderní vysokorychlostní kolejové dopravy, představuje nezbytný základ jejího budoucího rozvoje. Zatímco při nižších rychlostech šlo tyto jevy zanedbat, s rostoucí rychlostí začínají hrát klíčovou roli jak pro funkčnost, tak především pro bezpečnost celého vozidla. Význam aerodynamiky tak roste. Již nyní má v kolejové dopravě vliv na celou řadu faktorů, jako například na maximální možnou rychlost vozidel, na jejich energetickou náročnost či na životní prostředí v důsledku aerodynamického hluku. Lze předpokládat, že její význam s dalším rozvojem vysokorychlostních kolejových vozidel poroste i nadále.

Cílem této práce je prostřednictvím jednoduchého výpočtového modelu řešit proudění vznikající v blízkosti vysokorychlostní kolejové jednotky při průjezdu třemi uvažovanými situacemi. V první z nich se jednotka pohybuje volným prostorem, ve druhé míjí protihlukovou stěnu a ve třetí projíždí tunelem.

Vlastní práce se skládá ze dvou částí, přičemž první z nich, teoretická, se zaměřuje na podrobný rozbor hlavních problémů týkajících se aerodynamiky kolejových vozidel. Zvláštní pozornost je přitom věnována vzniku tlakových vln při průjezdu tunelem, problematice sil působících při míjení překážek a aerodynamickému odporu. Druhá část práce, výpočetní, se věnuje postupu řešení výše zmiňovaných úloh. Zahrnuje popis výpočtových modelů pro jednotlivé řešené případy, nastavení okrajových podmínek a přehled dosažených výsledků, jehož součástí je i porovnání těchto výsledků s dostupnými, již dříve řešenými pracemi.

# 1 Aerodynamika kolejových vozidel

Druhá polovina 20. století a počátek 21. století s sebou přinesly překotný rozvoj leteckého průmyslu, k němuž přispělo rozsáhlé spektrum inženýrských oborů, od automatického řízení až po mechaniku tekutin. Právě mechanika tekutin, konkrétně pak aerodynamika, hrála v rozmachu tohoto průmyslového odvětví klíčovou roli. Kolejová vozidla se naproti tomu, alespoň co se týče aerodynamiky, vyskytovala spíše na okraji zájmu, a to především díky nízkým rychlostem, jichž dosahovala ve srovnání s letadly. S nástupem vysokorychlostní železnice a s posunem rychlostí až na 300 km/h se však již pozornost obrátila i tímto směrem. U vysokorychlostní kolejové dopravy totiž vystupuje do popředí řada problémů při nižších rychlostech zcela přehlížených. Jedná se například o aerodynamický odpor vozidel, tlakové změny při průjezdu tunelem, síly vznikající vzájemným míjením se dvou vlaků, aerodynamický hluk a další jevy úzce spjaté s prouděním okolo vozidel, jež si zasluhují hlubší pozornost. Jejich řešení může přispět k dalšímu rozvoji rychlejších a bezpečnějších železničních systémů při splnění nároků kladených na ekologičnost a provozní energetickou náročnost, což je i důvod, proč v řadě zemí (například Francie, Španělsko, Německo a Japonsko) již vytvářejí vhodnou alternativu k ostatním způsobům přepravy, využívajícím fosilních paliv. Přehled nejdůležitějších současných problémů spjatých s aerodynamikou kolejových vozidel udává tabulka 2.1 na následující straně [1].



Obrázek 1.1 Německá vysokorychlostní jednotka ICE 3 [2]

## 2 Problémy kolejových vozidel z hlediska aerodynamiky

Aerodynamický problém	Návazné problémy
Aerodynamický odpor vozidel	→ maximální rychlost → spotřeba energie
Tlakové změny při průjezdu tunelem	→ namáhání vozidel → komfort cestujících → ventilace
Nestabilita vozidel vznikající vlivem bočního proudění	→ bezpečnost
Síly působící na vozidlo při míjení se s překážkou či jiným vozidlem	→ namáhání vozidel
Proudění vznikající průjezdem vozidel	→ bezpečnost cestujících na nástupištích a dražních pracovníků
Aerodynamický hluk	→ životní prostředí
Ventilace a přenos tepla v podzemních stanicích a tunelech	→ komfort cestujících → bezpečnost

*Tabulka 2.1 Aerodynamické problémy kolejových vozidel [1]*

Tabulka 2.1 udává přehled nejdůležitějších problémů kolejových vozidel z hlediska aerodynamiky. Podrobným rozбором většiny z nich se zabývá následující text, přičemž pozornost je zaměřena především na aerodynamický odpor, tlakové změny při průjezdu tunelem a síly působící na vozidlo při míjení se s překážkou či vozidlem. Ačkoliv se text věnuje zejména vysokorychlostní dopravě, konvenční dopravu není možné zcela opomenout, proto některé pasáže odkazují i na ni [1].

## 2.1 Aerodynamický odpor

Pohyb kolejového vozidla, popřípadě soupravy několika vozidel po libovolné dráze lze popsat prostřednictvím takzvané pohybové rovnice vlaku

$$F_T - F_P - F_O = 0 . \quad (2.1)$$

Jedná se o tříčlenný vztah odvozený z 2. Newtonova pohybového zákona za užití zjednodušujícího předpokladu, že veškerá hmotnost vozidla je soustředěna v jeho těžišti. Jednotlivé členy odpovídají silám působícím na vozidlo ve směru jeho pohybu, viz obrázek 2.1. Pohybovou rovnici vlaku tudíž lze uvádět jak ve vektorovém, tak i ve skalárním tvaru, přičemž tento text, jak si již šlo povšimnout, pracuje s druhou možností [3].

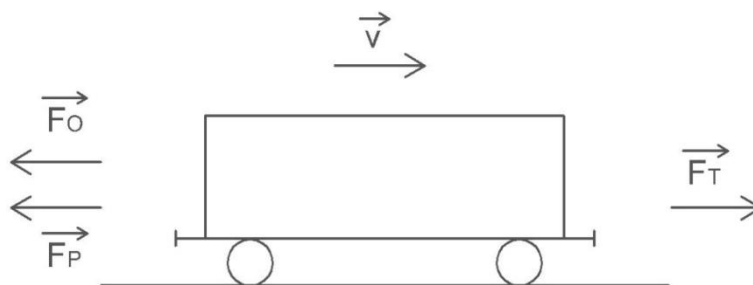
Člen  $F_T$  vyjadřuje tažnou sílu vozidla, v případě soupravy pak hnacího vozidla. Složka  $F_P$ , jejíž podobu udává rovnice

$$F_P = m_V \cdot (1 + \rho_d) \cdot a_V , \quad (2.2)$$

zastupuje odpor zrychlení vozidla. Parametr  $m_V$  značí hmotnost vozidla,  $\rho_d$  součinitel rotačních hmot a  $a_V$  velikost zrychlení vozidla.  $F_P$  se tedy projevuje pouze při nerovnoměrném pohybu, při konstantní rychlosti bude tato složka rovna nule. Poslední člen  $F_O$  značí takzvané odporové síly. Ty se skládají, jak lze vidět z rovnice

$$F_O = O_T + O_V , \quad (2.3)$$

ze dvou složek, z traťových odporů  $O_T$  a z vozidlových odporů  $O_V$ . Traťové odpory vyjadřují odpor vůči pohybu vozidla v důsledku změny směru nebo sklonu trati. Lze sem ale započítat i odpory vznikající při průjezdu výhybkou či tunelem. Rozborem vozidlových odporů se zabývají následující strany [4].



Obrázek 2.1 Pohyb kolejového vozidla, převzato z [3]

## 2.1.1 Vozidlové odpory

V průběhu minulého století proběhla celá řada snah kladoucích si za cíl stanovit teoretický popis odporových sil působících na kolejová vozidla. W. J. Davis navrhl v rámci těchto snah charakterizovat vozidlové odpory pomocí rovnice

$$O_V = R_M + R_A = A + B \cdot v + C \cdot v^2. \quad (2.4)$$

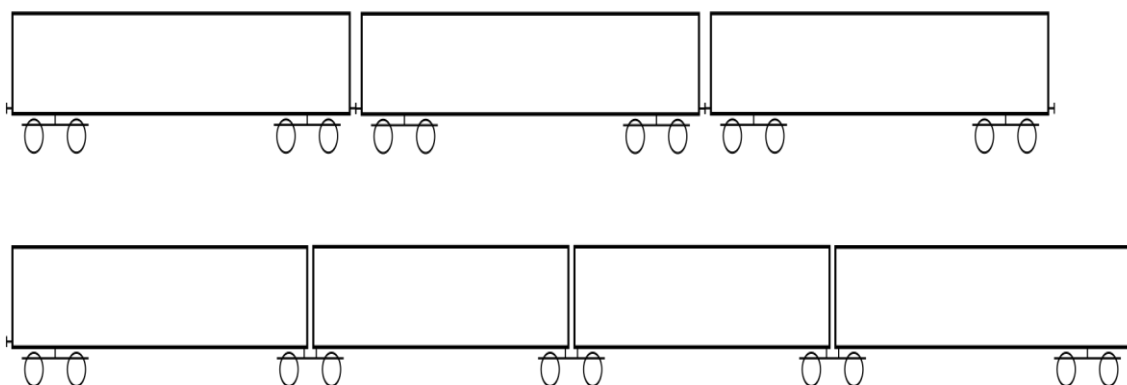
Tento následně široce přijatý vztah proto také někdy bývá označován jako Davisův. Skládá se ze dvou složek, mechanických odporů  $R_M$  a aerodynamických odporů  $R_A$ . Mechanické odpory v sobě zahrnují koeficienty  $A$  a  $B$ , aerodynamické pak  $C$  [5]. Z tvaru uvedené rovnice plyne, že při nižších rychlostech převažuje část  $A + B \cdot v$ , zatímco při vyšších získává na převaze člen  $C \cdot v^2$ . Neboli také jinak řečeno, pro vysokorychlostní dopravu má mnohem větší význam aerodynamická složka vozidlových odporů, zatímco například u příměstských vlaků bude naopak převládat složka mechanická. Vzhledem k tomu, že Davisův vztah představuje rovnici druhého řádu, bude potřebný trakční výkon vozidla, udávaný jako součin tažné síly a rychlosti, vzrůstat se třetí mocninou. Tento poznatek má poměrně zásadní význam. Zvyšovat rychlost vozidel lze totiž dvěma způsoby, buďto dosažením dostatečného výkonu, což však naráží na technické limity dostupných pohonů, konkrétně v případě rychlovlaku elektromotorů, anebo snížením aerodynamického odporu prostřednictvím úprav karoserie, což znamená například zmenšením drsnosti vnějšího povrchu, volbou vhodného tvaru čelní a koncové části vozidla nebo odstraněním větracích mřížek a jiných výstupků [1].

První člen pravé strany rovnice (2.4), koeficient  $A$ , vyjadřuje celkový odpor valení kol po kolejnici a odpor v ložiskách náprav. Ze vztahu

$$A = \lambda \cdot M \cdot \sqrt{\frac{10}{m}} \quad (2.5)$$

plyne, že závisí na celkové hmotnosti vlakové soupravy  $M$  a na hmotnosti připadající na jednu nápravu  $m$ . Snížení jeho hodnoty lze proto docílit například užitím Jacobsových podvozků, viz obrázek 2.2, kdy dojde ke snížení celkové hmotnosti soupravy. Hodnota parametru  $\lambda$  závisí na druhu vozidla a také na provedení trati [6,7].

Druhý koeficient na pravé straně rovnice (2.4) vyjadřuje odpory vznikající tlumením bočních oscilací a třením okolků o boky hlav kolejnic. Hodnota součinitele  $B$  je velmi nízká, v některých případech se proto složka  $B \cdot v$  zcela zanedbává, případně se zahrnuje do prvního členu Davisova vztahu [7].



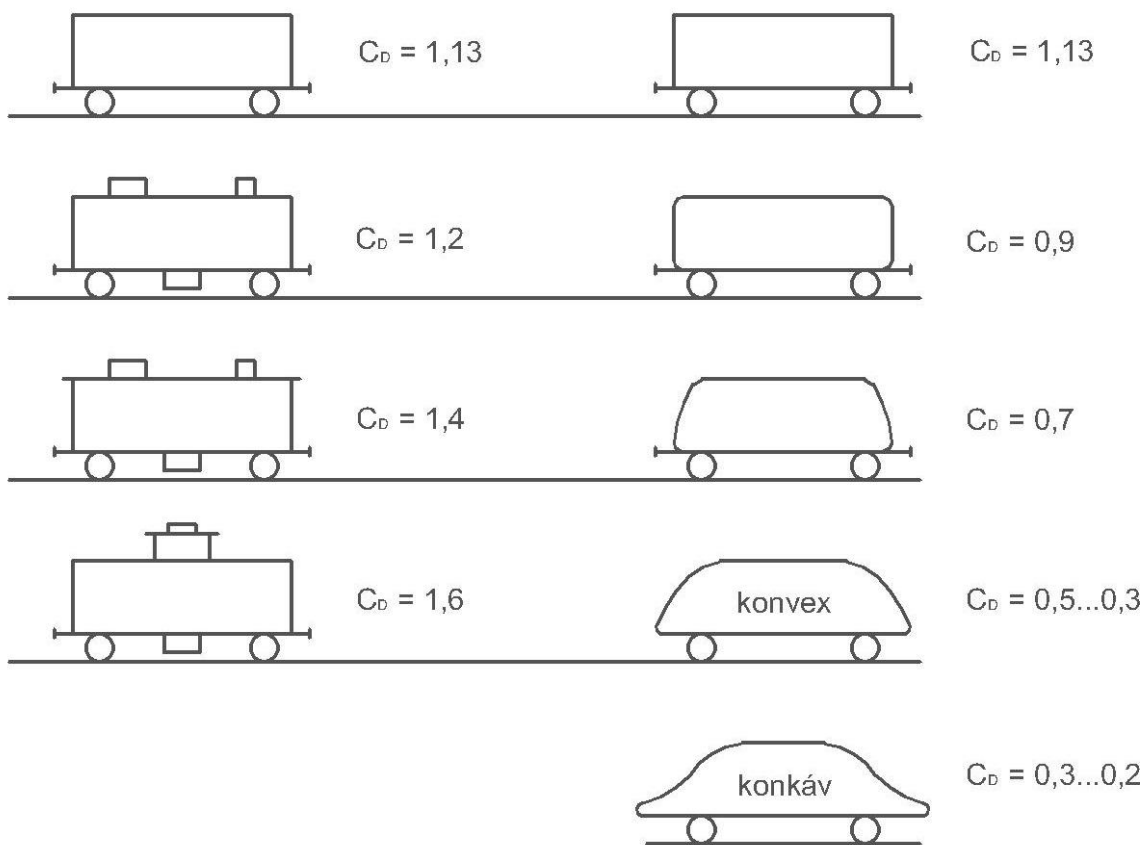
Obrázek 2.2 Rozdíl mezi Jacobsovým (nahore) a konvenčním podvozkem (dole), převzato z [8]

Poslední z koeficientů rovnice (2.4) se označuje jako koeficient aerodynamického odporu  $C$ . Jeho hodnotu lze stanovit pomocí vztahu

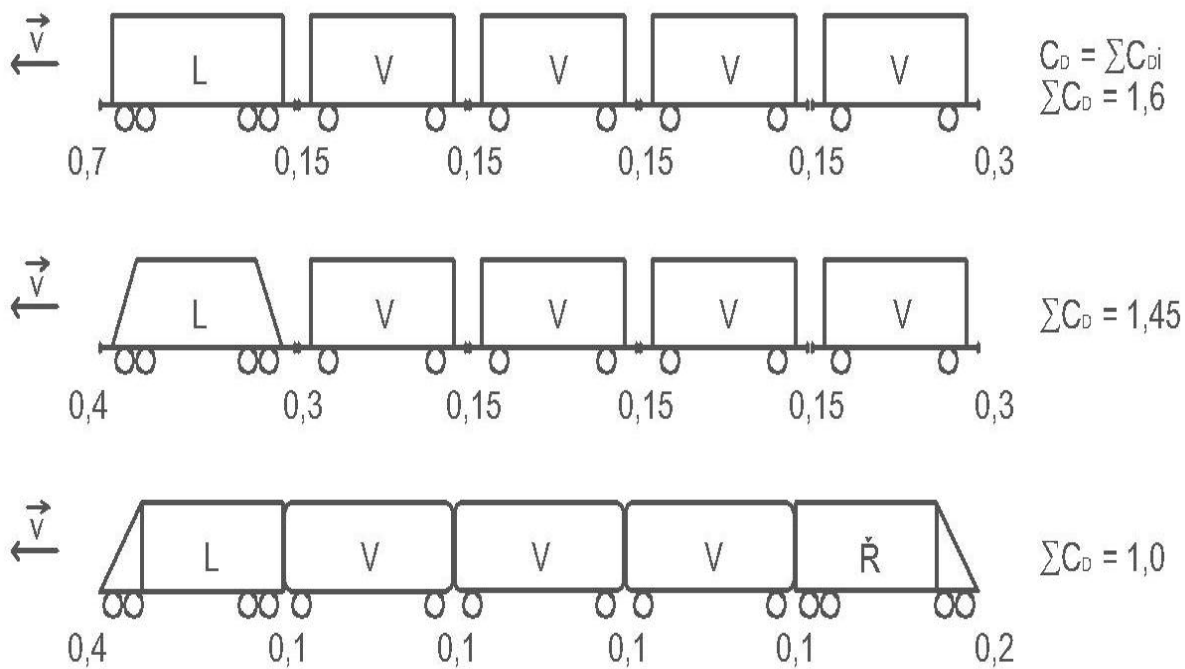
$$C = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot S_{\check{c}el} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (C_P + C_S \cdot l) \cdot S_{\check{c}el} \quad (2.6)$$

z něhož plyne, že  $C$  závisí na parametrech  $S_{\check{c}el}$ ,  $C_D$  a  $\rho$ .  $S_{\check{c}el}$  je velikost čelní plochy vozidla.  $C_D$  značí součinitel odporu, jenž závisí jednak na tvaru karoserie čelní a koncové části vozidla, což v sobě konkrétně zahrnuje koeficient  $C_P$ , obvykle označovaný jako odporový koeficient na čele, respektive na konci vlaku, a jednak na koeficientu  $C_S$ , násobeném délkou vozidla  $l$ . Ten se označuje jako odporový koeficient tření podél vozidla. Zahrnuje vliv přechodů mezi jednotlivými vozy, vliv tvaru bočních stěn, vliv drsnosti povrchu stěn, ale například i vliv nástavců a výstupků karoserie na povrchu vozidla, neboť i ty totiž mají podstatný vliv na výslednou hodnotu  $C_D$ , jak dokazuje obrázek 2.3 na následující straně. Zbývající parametr  $\rho$  značí hustotu prostředí, v němž se vozidlo pohybuje [9,10].

Při určování koeficientu aerodynamického odporu celé vlakové soupravy je potřeba započítat do celkové hodnoty příspěvek každého jednotlivého vozu, viz obrázek 2.4 na následující straně. Zároveň si lze povšimnout, že příspěvky na čelním a koncovém vozidle dosahují oproti ostatním vozidlům soupravy vyšších hodnot. V případě těchto vozidel totiž započítáváme i vliv tvaru čelní a koncové karoserie, zatímco v případě ostatních pouze vliv mezivozových přechodů [10].



Obrázek 2.3 Hodnoty součinitele  $C_D$  v závislosti na tvaru vozidla, převzato z [10]



Obrázek 2.4 Stanovení hodnot součinitele  $C_D$  pro celý vlak, převzato z [10]



Vozidlové odpory  $O_V$  se také někdy zapisují v měrném tvaru

$$o_V = \frac{O_V}{G_V} = a + b \cdot v + c \cdot v^2, \quad (2.7)$$

do něhož lze rovnici (2.4) převést pomocí následujících úprav

$$\begin{aligned} O_V &= m_V \cdot g \cdot a + m_V \cdot g \cdot b \cdot v + C \cdot v^2 = \left( a + b \cdot v + \frac{C}{m_V \cdot g} \cdot v^2 \right) \cdot m_V \cdot g = \\ &= \left( a + b \cdot v + \frac{C}{G_V} \cdot v^2 \right) \cdot G_V = (a + b \cdot v + c \cdot v^2) \cdot G_V \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$c = \frac{C}{G_V} = \frac{\rho \cdot C_D \cdot S_{\check{c}el}}{2 \cdot G_V} = \frac{\rho \cdot C_D \cdot S_{\check{c}el}}{2 \cdot m_V \cdot g}. \quad (2.9)$$

Při bližším pohledu na poslední uvedenou rovnici si lze povšimnout, že měrný koeficient aerodynamického odporu  $c$  je nepřímo úměrný hmotnosti vozidla  $m_V$ . V důsledku to znamená, že těžká vozidla mají nižší  $c$  než lehká vozidla totožných rozměrů. Tento jev se označuje jako paradox kvadratického členu [11].

Jak lze vypořádat z výše uvedených rovnic (2.4), (2.5) a (2.6), koeficienty  $A$ ,  $B$  a  $C$  závisí na rozsáhlém počtu proměnných. Vozidlové odpory proto není vhodné určovat prostřednictvím výpočtů. V praxi se provádí pro každé konkrétní vozidlo jízdní zkoušky, na jejichž základě se stanoví empirické vztahy, jež slouží ke snadnému určování vozidlových odporů. Některé z těchto vztahů uvádí tabulka 2.2 na následující straně [3].

Typ vysokorychlostní jednotky	Empirická forma jízdního odporu
TGV (obrázek 2.5)	$o_v = 2500 + 33 \cdot v + 0,543 \cdot v^2$
TGV-R	$o_v = 2700 + 33 \cdot v + 0,51 \cdot v^2$
AGV-11	$o_v = 2500 + 29 \cdot v + 0,45 \cdot v^2$
SJ X2	$o_v = 2240 + 43,53 \cdot v + 4,41 \cdot v^2$
Shinkansen 0	$o_v = 11,768 + 0,152 \cdot v + 0,0014347 \cdot v^2$
Shinkansen 100	$o_v = 12,484 + 0,04915 \cdot v + 0,0013543 \cdot v^2$
Shinkansen 200	$o_v = 11,523 + 0,15115 \cdot v + 0,0008833 \cdot v^2$

Tabulka 2.2 Empirické formy jízdního odporu pro různé typy jednotek [12,13,14,15]

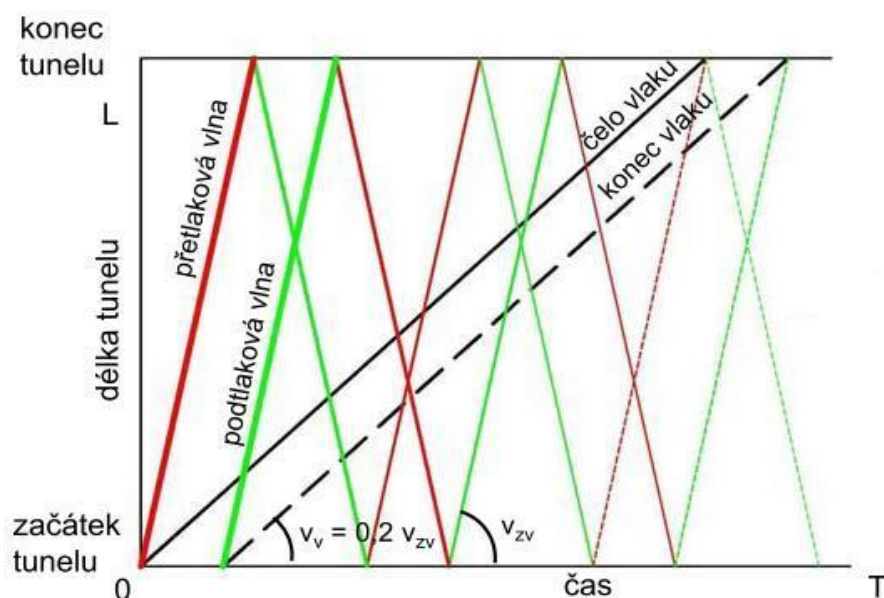


Obrázek 2.5 Vysokorychlostní jednotka TGV Duplex, převzato z [16]

## 2.2 Tlakové změny při průjezdu tunelem

V okamžiku vjezdu do tunelu vzniká na čele vlaku tlaková vlna, jež se následně šíří rychlostí blízkou rychlosti zvuku k opačnému konci tunelu, kde se odrazí a jako vlna s opačnou fází se vrátí v protisměru zpět k vstupnímu portálu. Tam opět dojde k jejímu odrazu a následuje opakování celého popsaného procesu. Vlna postupující směrem od soupravy se označuje jako přetlaková, v opačném směru jako podtlaková, viz obrázek 2.6. V důsledku tohoto jevu dochází k rozsáhlým tlakovým fluktuacím, jež způsobují zvýšené namáhání konstrukce vlaku i tunelu a jež mají rovněž negativní dopad na zdraví cestujících. Taktéž dochází ke znatelnému vzrůstu aerodynamického odporu, neboť i ten závisí na těchto tlakových výkyvech. Z hlediska aerodynamiky tedy představuje problematika průjezdu vysokorychlostní kolejové jednotky tunelem podstatně komplikovanější záležitost oproti jízdě volným prostorem. Při návrhu konstrukce je proto nutné uvažovat toto zvýšené namáhání a vzít v potaz i profil trati, pro niž je vlak určen.

Proudění vznikající při průjezdu tunelem má turbulentní charakter. Jeho řešení velmi často vyžaduje časově náročnou práci, proto bývá výhodné na celou úlohu aplikovat několik zjednodušujících předpokladů. Mezi nejpoužívanější patří, že průřezy vlaku a tunelu jsou po obou délkách konstantní, vlak dosahuje podstatně nižší rychlosti ve srovnání s rychlostí zvuku, vlna se šíří rychlostí zvuku a proudění je jednorozměrné [1].



Obrázek 2.6 Grafikon průjezdu vlaku a tlakových vln tunelem, převzato z [17]

Následující text vychází ze zdroje [1]. Popisuje postup umožňující řešit elementární problematiku pohybu a silových účinků působících na vlak v tunelu. Vychází z diferenciálního tvaru rovnice kontinuity se zdrojem

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{u}) = \sigma \quad (2.10)$$

a z diferenciálního tvaru rovnice hybnosti

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{u} \cdot \vec{u}) + \nabla p = \theta . \quad (2.11)$$

Uvedené rovnice jsou zapsány ve vektorovém tvaru. Za užití předpokladu, že proudění v tunelu je jednorozměrné, lze dále pracovat pouze s jednou složkou příslušných rovnic a to složkou  $x$  ve směru jízdy. Rovnici kontinuity (2.10) je pak možno pomocí upraveného vztahu pro rychlost zvuku

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.12)$$

převést do tvaru

$$a^2 \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = (\kappa - 1) \cdot \varphi , \quad (2.13)$$

kde  $a$  značí velikost rychlosti zvuku,  $u$  rychlost proudění vzduchu v tunelu,  $x$  vzdálenost od počátku tunelu,  $t$  čas,  $\varphi$  disipační energii,  $p$  tlak a  $\kappa$  poměr měrných tepelných kapacit plynu (uvažováno pro vzduch  $\kappa = 1,4$ ). Obdobný postup je možno aplikovat i na rovnici (2.11), z níž lze získat tvar

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = f, \quad (2.14)$$

kde parametr  $f$  představuje třecí sílu. Pro jednoduchost si nyní rozdělíme proudění uvnitř tunelu na tři oblasti: před vlakem, za vlakem a vedle vlaku, ve smyslu mezi stěnou tunelu a stěnou skříně vlaku. Pro oblasti před a za vlakem nabývají třecí síly a disipační energie na stěnách tunelu tvaru

$$f = -\frac{\lambda_{tun}}{2 \cdot d} \cdot u \cdot |u| \quad (2.15)$$

$$\varphi = \frac{\lambda_{tun}}{2 \cdot d} \cdot |u|^3 , \quad (2.16)$$

kteřé vychází z Weisbachova vztahu pro ztrátovou energii.

Pro oblast vedle vlaku mohou být třecí síla a disipační energie vyjádřeny jako

$$f = -\frac{\lambda_{vlak}}{2 \cdot d_{vlak}} \cdot \frac{1}{1-B} \cdot u' \cdot |u'| - \frac{\lambda_{tun}}{2 \cdot d_{tun}} \cdot \frac{1}{1-B} \cdot (u' - v) \cdot |u' - v| \quad (2.17)$$

$$\varphi = \frac{\lambda_{vlak}}{2 \cdot d_{vlak}} \cdot \frac{1}{1-B} \cdot |u'|^3 + \frac{\lambda_{tun}}{2 \cdot d_{tun}} \cdot \frac{B}{1-B} \cdot |u' - v|^3, \quad (2.18)$$

kde  $u'$  značí rychlost proudění mezi stěnou vlaku a tunelu, parametry  $d_{tun}$  a  $d_{vlak}$  představují hydraulické průměry tunelu, respektive vlaku,  $\lambda_{tun}$  a  $\lambda_{vlak}$  jsou třecí koeficienty na povrchu stěny tunelu a na povrchu stěn vlaku,  $B$  značí poměr průřezů vlaku a tunelu. Uvedené vztahy jsou oproti předchozím vztahům rozšířeny, neboť je potřeba uvažovat tření a disipační energii nejen na povrchu tunelu, ale i na povrchu vlaku. Pro spojení oblastí před, za a vedle vlaku v jeden celek je potřeba použít takzvaných rovnic kompatibility.

Za takové rovnice lze uvažovat zákony zachování hmotnosti a energie v následujících tvarech

$$(1 - B) \cdot (u' - v) = u - v \quad (2.19)$$

$$p' + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (u' - v)^2 = p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (u - v)^2, \quad (2.20)$$

kde  $p'$  značí tlak mezi stěnami vlaku a tunelu. Hned za koncem vlaku vzniká úplav, ve větší vzdálenosti od jeho konce však může být tok považován již za rovnoměrný. Pro oblast uzavřenou koncem vlaku a již rovnoměrným tokem lze zákon zachování energie upravit do tvaru

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (u - v)^2 = p' \cdot (1 - R) \cdot \rho \cdot (u' - v)^2 - C_P \cdot R_C \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (u' - v)^2, \quad (2.21)$$

kde  $C_P$  je součinitel odporu vlaku v otevřeném prostoru. Na začátku a na konci tunelu je předpokládáno, že vzduch vytéká do atmosférického tlaku a je také předpokládáno, že tlak se redukuje stejně jako dynamický tlak. Na počátku, respektive na konci tunelu tedy mohou být okrajové podmínky dány následovně:

$$p = \begin{cases} 0, & u < 0 \\ -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2, & u \geq 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

$$p = \begin{cases} -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2, & u < 0 \\ 0, & u \geq 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

Z rovnice (2.21) s aplikací příslušných okrajových podmínek lze získat aerodynamickou složku vozidlových odporů vlaku projíždějícího tunelem

$$R_C = \frac{S_{\check{c}el}}{2} \cdot \rho \cdot \{B\} \cdot (u' - v)^2 + \frac{S_{\check{c}el}}{2} \cdot \rho \cdot C_P \cdot \left\{ \frac{(u' - v)^2}{u^2} \right\} + \frac{S_{\check{c}el}}{2} \cdot \rho \cdot \frac{\lambda_{vlak}}{d} \cdot \left\{ \int_{in} (v - u') \cdot |v - u| \cdot dx + v^2 \int_{out} dx \right\} + \Delta p' \cdot S_{\check{c}el}. \quad (2.24)$$

$B$  a  $0$  v první složené závorce na pravé straně rovnice udávají hodnoty na čele vlaku, kdy první z nich dosadíme v případě, kdy se čelo vlaku nachází uvnitř tunelu, a druhou v případě, kdy se nachází mimo tunel. Obdobně ve druhé závorce  $(u' - v)^2$  a  $u^2$  představují hodnoty, z nichž první dosadíme v případě, kdy se konec vlaku vyskytuje v tunelu, zatímco druhou, pokud se pohybuje mimo tunel. Integrál ve třetí závorce je uvažován přes délku vlaku, příslušné indexy  $in$  a  $out$  znamenají uvnitř tunelu, respektive mimo tunel. Změna tlaku v posledním výrazu  $\Delta p'$  na pravé straně značí tlakový rozdíl mezi čelní a koncovou částí vlaku. V případě, že vlak zcela opustí tunel, redukuje se rovnice (2.24) do tvaru

$$R_A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_{\check{c}el} \cdot \left( C_p + \frac{\lambda}{d} l \right) \cdot v^2, \quad (2.25)$$

což je pouze jiný tvar výše zmiňované aerodynamické složky vozidlových odporů [1]

$$R_A = C \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot \left( C_p + \frac{\lambda}{d} l \right) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot (C_p + C_s \cdot l). \quad (2.26)$$

## 2.2.1 Tlaková vlna vznikající při vjezdu do tunelu

Vlak pohybující se uvnitř tunelu představuje jakýsi pomyslný píst působící proti mase vzduchu před sebou. Stlačením tohoto vzduchu vzniká vlna, již lze při vjezdu popsat rovnicí

$$\Delta p(x) = \Delta p_{21} \cdot \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \cdot \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{v \cdot t}{0,3 \cdot R_C} \right) \right]. \quad (2.27)$$

Jedná se o empirický vztah, v němž, stejně jako v předchozím textu,  $v$  značí rychlost jízdy vlaku,  $R_C$  aerodynamickou odporovou sílu,  $t$  čas od okamžiku vjezdu do tunelu a  $\Delta p_{21}$  rozdíl tlaků  $p_1$  a  $p_2$ , jež značí hodnoty statického tlaku těsně před a za tlakovou vlnou. Rozdíl  $\Delta p_{21}$  lze vyjádřit několika způsoby [1]. T.Hara jej například odvodil jako funkci Machova čísla  $M_a$  ve tvaru

$$\Delta p_{21} = \frac{1}{2} \cdot \kappa \cdot p_1 \cdot M_a^2 \cdot \frac{1 - \delta^2}{\delta^2 + (1 - \delta^2) \cdot M_a - M_a^2}. \quad (2.28)$$

Odvození tohoto vztahu zde vzhledem ke svému rozsahu nebude uvedeno. Parametr  $\delta$  zastupuje poměr průřezových ploch vlaku  $S$  a tunelu  $S'$  ( $S - S'$ )/ $S$ . Zároveň musí být pro platnost tohoto vztahu splněn předpoklad, že změna tlaku  $\Delta p_{21}$  je v porovnání s tlakem  $p_1$  velmi malá [18]. Chceme-li použít v předchozím textu zavedené  $B$  místo  $\delta$ , lze vztah (2.28) ještě upravit do tvaru

$$\Delta p_{21} = \frac{1}{2} \cdot \kappa \cdot p_1 \cdot M_a^2 \cdot \frac{1 - (1 - B)^2}{(1 - B)^2 + (1 - (1 - B)^2) \cdot M_a - M_a^2}. \quad (2.29)$$

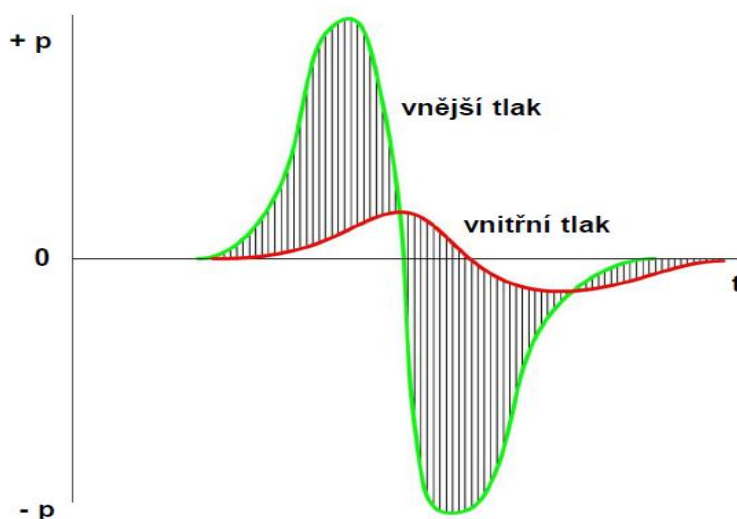
Vliv na průběh šíření vlny má rovněž i délka samotného tunelu. Ve velmi krátkých tunelech se tlaková vlna během jejího šíření zásadněji nezmění, ke zkreslení dochází v tunelech o větších délkách. Experimentálně bylo zjištěno, že pro relativně krátké tunely (asi do 1,5 km) délka tunelu neovlivňuje maximální hodnotu tlaku šířící se vlny, zatímco pro tunely nad 1,5 km délka maximální hodnotu tlaku již ovlivňuje. Je to důsledek útlumu vlny vlivem viskozity. Podoba vlny může být také ovlivněna tvarem portálů na koncích tunelu. Zmíněný maximální tlak  $p_{max}$  lze obdržet pomocí empirického vztahu

$$p_{max} = \kappa \frac{v^3}{r}, \quad (2.30)$$

kde  $r$  je vzdálenost od konce tunelu [1].

## 2.2.2 Tlakové změny uvnitř vlaku

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, v okamžiku vjezdu do tunelu vzniká na čele vlaku tlaková vlna, jež se následně šíří směrem k protilehlému konci tunelu, kde se odrazí a vrátí zpět. Posléze se tento proces ještě několikrát opakuje, což vede k silným tlakovým fluktuacím vně i uvnitř vlaku. Průměrný člověk je schopen odolávat náhlým tlakovým změnám až 500 Pa/s, při vyšších hodnotách již pociťuje nepříjemné bolesti a zaléhání uší. V případě průjezdu tunelem vysokými rychlostmi však dochází k situacím, kdy je vystaven hodnotám až čtrnáctkrát vyšším. Vysokorychlostní vozidla proto musí být navrhována jako tlakotěsná a tlakopevná, což vyžaduje dokonalé utěsnění vozové skříně při zachování vhodného klima uvnitř vozu. Toho lze docílit dvěma způsoby. První představuje takzvaná pasivní tlaková ochrana, která zajišťuje vzájemnou výměnu vzduchu mezi vnějším a vnitřním prostředím vozidla při jízdě otevřeným prostorem. V tunelu pak ventilační systémy přecházejí do režimu recirkulace, při němž již výměna neprobíhá a dochází pouze k filtraci vzduchu uvnitř. Ve vozidle tak stoupá koncentrace oxidu uhličitého. Tento způsob ochrany se používá zejména při jízdě po tratích s krátkými nebo málo početnými tunely. Druhým způsobem je takzvaná aktivní tlaková ochrana, jež nalézá využití na tratích s dlouhými a početnými tunely. Systémy několika ventilátorů přivádějí vzduch dovnitř a ven i během jízdy tunelem, přičemž uvnitř vozu zároveň udržují stálý tlak, aby nedošlo ke vzniku tlakových změn [17,19].



Obrázek 2.7 Průběh vnitřního a vnějšího tlaku při průjezdu tunelem, převzato z [17]



## 2.3 Nestabilita vozidel vznikající vlivem bočního proudění

Další z řady problémů, s nimiž se musí kolejová vozidla potýkat, představuje boční proudění. Jedná se o faktor, jehož působení ovlivňuje jízdní stabilitu vozidel a jehož význam vzrůstá nejen s rychlostí proudění, ale i s rychlostí pohybu vozidla. Z toho plynou důsledky zejména pro vysokorychlostní dopravu. Ta totiž ve snaze dosahovat co možná nejvyšších rychlostí pracuje s vozidly o nízkých hmotnostech, což však s sebou zároveň přináší i vzrůstající riziko jízdní nestability, respektive klesající bezpečnost jízdy. Moderní vysokorychlostní jednotky navíc využívají i takzvaného distribuovaného pohonu, zajišťujícího rovnoměrné zatížení všech dvojkolí, díky čemuž však také dochází ke značnému odlehčení čelního vozu, na nějž působí nejkritičtější síly. Riziko ztráty jízdní stability tak ještě více vzrůstá, což zavdává důvod, proč se touto problematikou dále zabývat [20].

Testování účinků bočního proudění probíhá zpravidla v aerodynamickém tunelu. Původně byl pro tento typ úlohy využíván statický přístup, jenž spočívá v měření účinků proudění na nepohybující se model. Nebere však v potaz relativní pohyb země a vozidla, což představuje problém zejména při rekonstrukci průjezdu exponovanými místy, jakými jsou například vysoké násypy, mosty či oblouky. Docílit toho, aby byl zahrnut i tento vliv, lze několika způsoby. Nejčastěji používaným řešením bývá umístění modelu na pohyblivý pás či podložku [21]. Lze se však setkat i s řadou nekonvenčních přístupů. Jeden takový reprezentuje metoda, čerpající inspiraci až ve starověkém Římě, kdy dochází k uvedení modelu do pohybu prostřednictvím jeho vystřelení z praku. Toho například využívá Ústav aerodynamiky a technologie proudění v německém Göttingenu [22].

Velikost síly vyvolané působením proudění na boční stěnu vozidla vyjadřuje rovnice

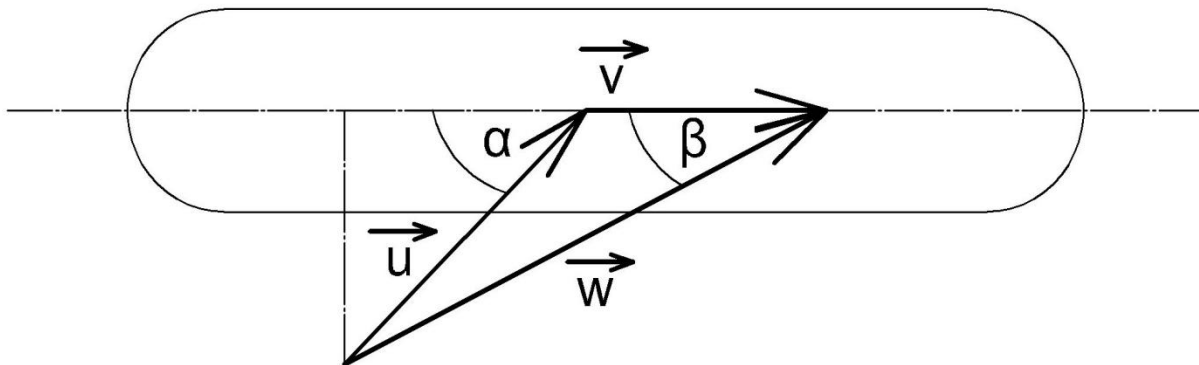
$$F_B = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_B \cdot S_{boč} \cdot w^2 . \quad (2.31)$$

Jedná se o vztah pro aerodynamickou odporovou sílu vozidla. Odporový koeficient  $C_B$  je uvažován v příčném směru ke směru jízdy.  $S_{boč}$  značí velikost boční plochy vozidla. Rychlost  $\vec{w}$  tvoří výslednici vzájemného působení rychlosti pohybu vozidla  $\vec{v}$  a rychlosti proudění  $\vec{u}$ , viz obrázek 2.8 [17]. Z rovnice

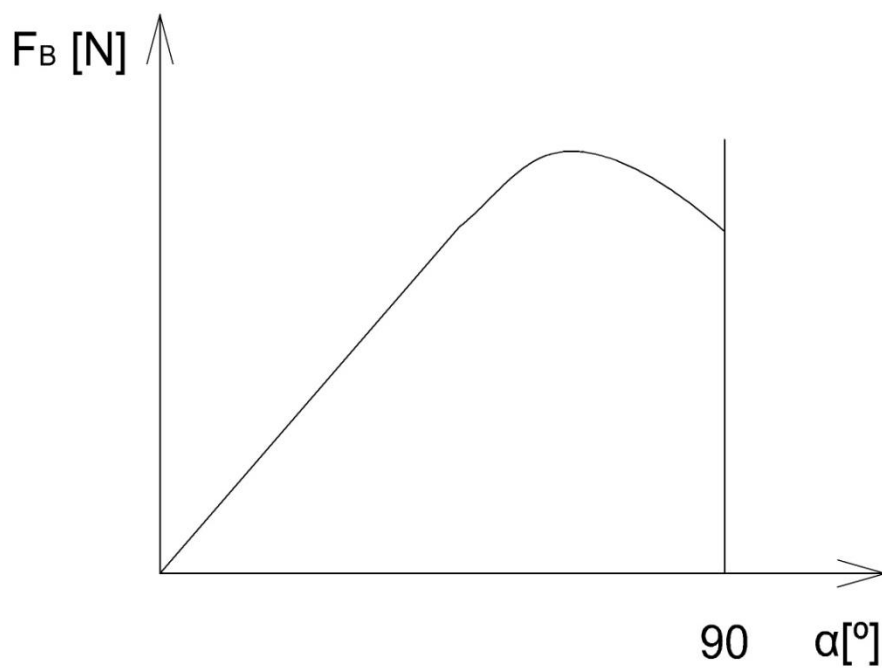
$$w = \sqrt{(v + u \cdot \cos\alpha)^2 + (u \cdot \sin\alpha)^2} , \quad (2.32)$$

jež udává velikost  $\vec{w}$ , lze vyvodit, že rychle jedoucí vozidlo představuje z hlediska namáhání bočním prouděním horší případ než vozidlo stojící [17]. Z obrázku 2.9, znázorňujícího závislost

velikosti boční síly  $F_B$  na úhlu  $\alpha$ , pak plyne další důležitý poznatek a to, že šikmé proudění na boční stěnu vozidla představuje horší případ než proudění kolmé, neboť s rostoucím úhlem roste i průmět výsledné síly v příčném směru [17].



Obrázek 2.8 Rozložení rychlostí, převzato z [17]



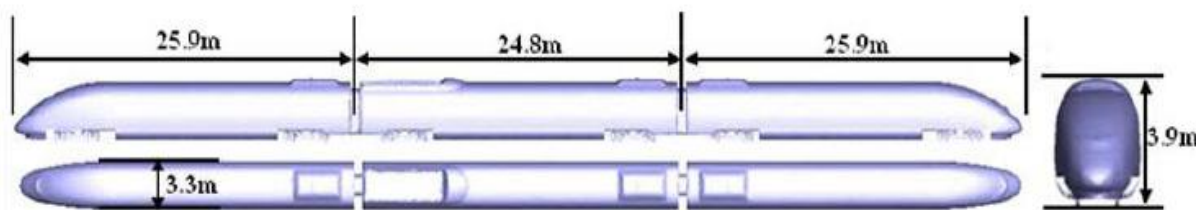
Obrázek 2.9 Závislost boční síly  $F_B$  na úhlu  $\alpha$ , převzato z [17]

## 2.4 Síly působící na vozidlo při míjení překážek

Průjezd okolo překážek, nacházejících se v těsné blízkosti trati, tvoří nedílnou součást pohybu všech vlaků. Ve většině případů se jedná o protihlukové stěny, sloupy trakčního vedení či nástupiště, méně často pak o odstavená, či pohybující se vozidla. Následující text se věnuje právě vzájemnému míjení se dvou protijedoucích vysokorychlostních jednotek, neboť se jedná o nejsložitější případ míjení překážky, jež může během jízdy vlaku nastat.

Vlak projíždějící otevřeným prostorem ve svém okolí vytváří velice komplikované proudové pole. V okamžiku míjení se s protijedoucí soupravou dochází k vzájemnému protnutí polí obou vlaků, což vede ke vzniku značných tlakových fluktuací na stěnách jednotlivých vozů, projevujících se sníženou jízdní stabilitou a zvýšeným namáháním konstrukcí uvažovaných souprav. Stanovit toto namáhání představuje vzhledem k relativní vzájemné poloze obou vlaků poměrně obtížný úkol. V minulosti se této problematice věnovalo pouze několik málo prací, z nichž většina byla založena na měřeních proudového pole v aerodynamickém tunelu. Získané výsledky však obsahovaly řadu nepřesností, neboť uvnitř tunelu není možno dosáhnout odpovídajícího pole. Znatelný posun přinesl až rozvoj výpočetní techniky, který umožnil simulaci i takto složitých úloh. V současnosti se tak již lze setkat s pracemi poskytujícími dostatečný náhled do uvedené problematiky a do problematiky míjení překážek obecně [23].

Následující text vychází ze zdroje [24]. Zabývá se dvěma případy vzájemného míjení se čínských vysokorychlostních kolejových jednotek CRH3, z nichž první se odehrává uvnitř jednotubusového tunelu, druhý pak v otevřeném prostoru. Model jednotky, použitý pro výpočty v programu Ansys Fluent, znázorňují obrázky 2.10 a 2.11. Kromě rozměrů si v nich lze povšimnout i vyznačených bodů *mh1*, *mh3*, *mb1*, *mt3* a *mt1*. Jedná se o místa, v nichž byly zjišťovány hodnoty tlaku.

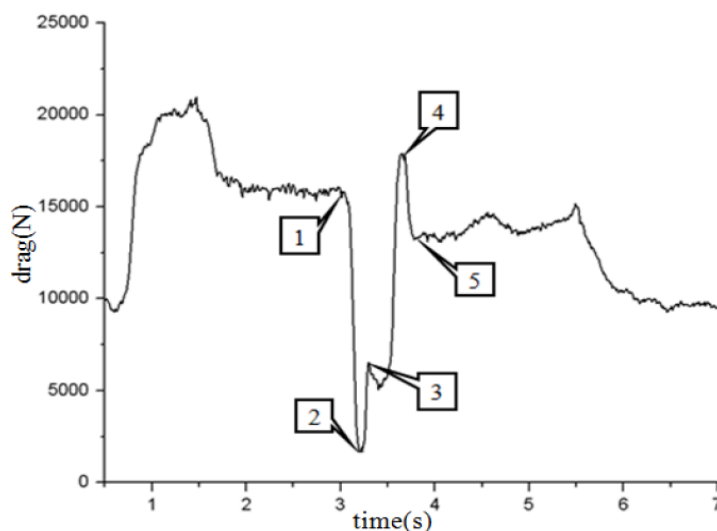


Obrázek 2.10 Použitý výpočetní model, převzato z [24]

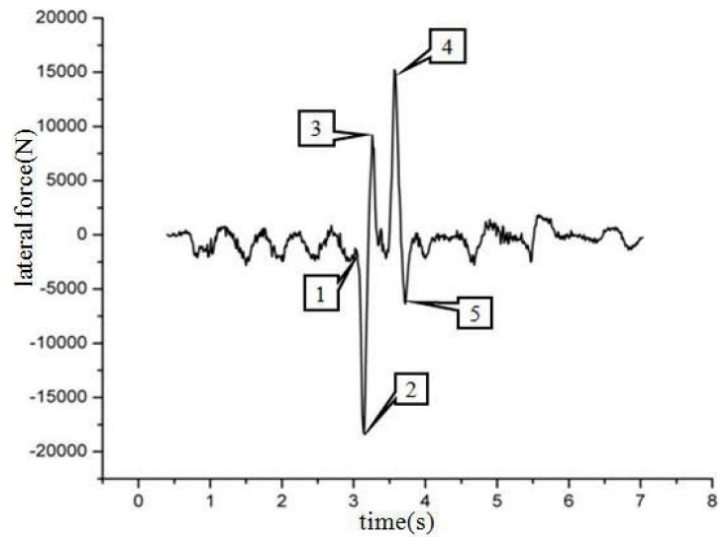


Obrázek 2.11 Použitý výpočetní model, převzato z [24]

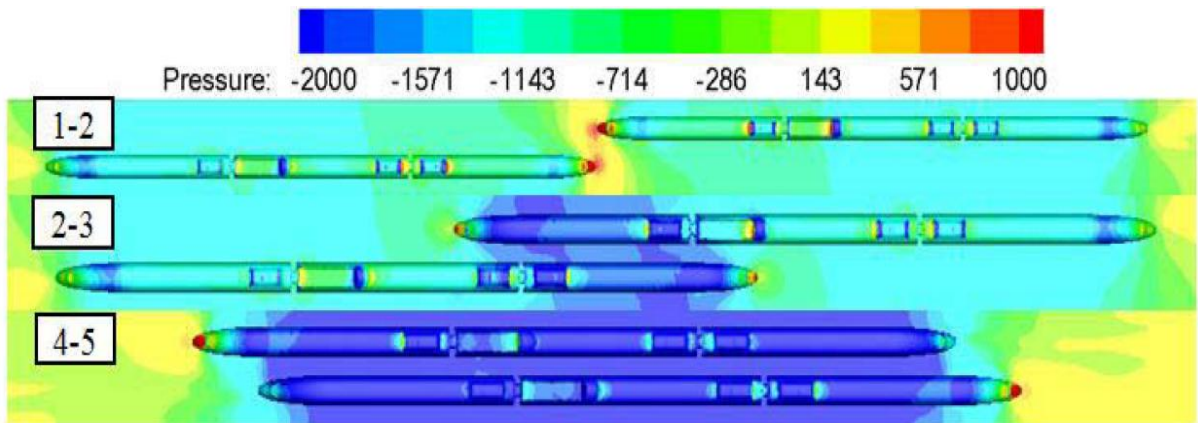
Při vzájemném setkání souprav uvnitř tunelu dochází v okolí každého z vlaků k náhlému zmenšení již tak omezeného prostoru, což vede k razantnímu nárůstu aerodynamického odporu (autoři uvádějí, že oproti situaci, kdy tunelem projíždí pouze jeden vlak, vzrůstá amplitudová hodnota aerodynamického odporu až o 115%) a bočních sil, jejichž průběh udávají obrázky 2.12 a 2.13. Lze si v nich povšimnout vyznačených fází 1-5. Odpovídají fázím zakresleným v obrázku 2.14, jenž znázorňuje rozložení tlaku v blízkosti obou míjejících se jednotek. Skládá se ze tří částí, přičemž první (fáze 1-2) znázorňuje situaci v okamžiku setkání čelních vozů, druhá (fáze 2-3) vzájemný průjezd a třetí (fáze 4-5) situaci při míjení čelního vozu s koncem druhé soupravy. Z obrázku lze odečíst, že při setkání dochází k náhlému prudkému tlakovému poklesu, což způsobuje zejména zmíněné zmenšení prostoru a následné zrychlení proudění po obou stranách vlaků. Obrázek 2.15 znázorňuje průběh tlaku na čelním voze v místě označeném *mt1* při různých rychlostech. Lze si všimnout, že rychlost má zásadní vliv na hodnotu tlaku, neboť ta je úměrná druhé mocnině rychlosti.



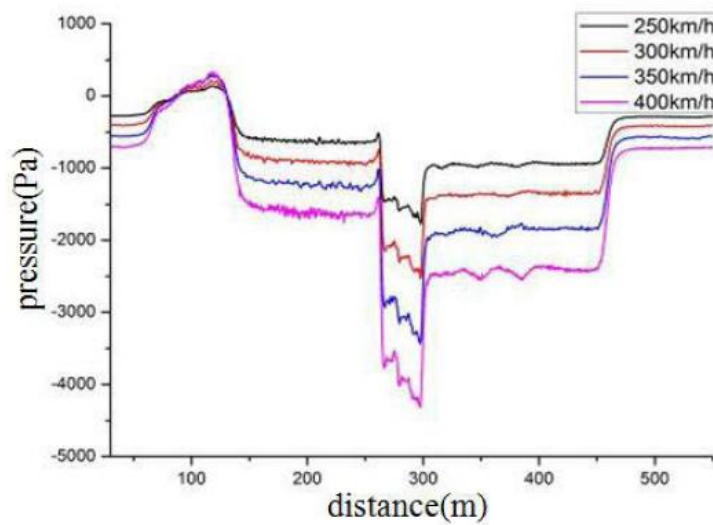
Obrázek 2.12 Průběh aerodynamického odporu, převzato z [24]



Obrázek 2.13 Průběh boční síly, převzato z [24]

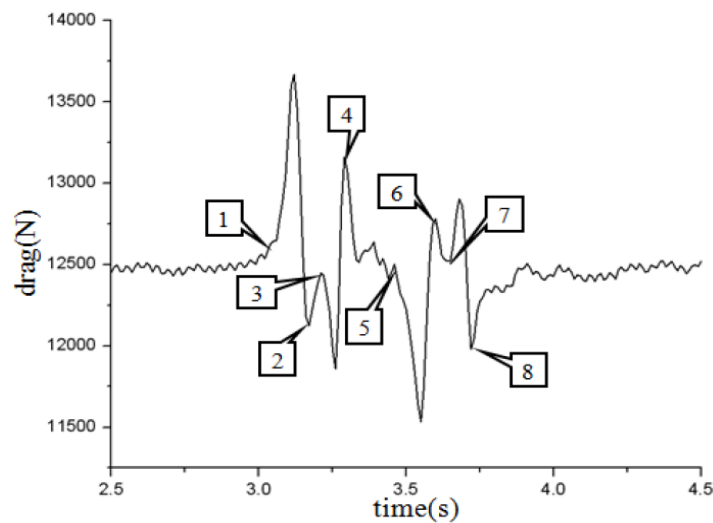


Obrázek 2.14 Rozložení tlaku v blízkosti souprav v jednotlivých fázích, převzato z [24]

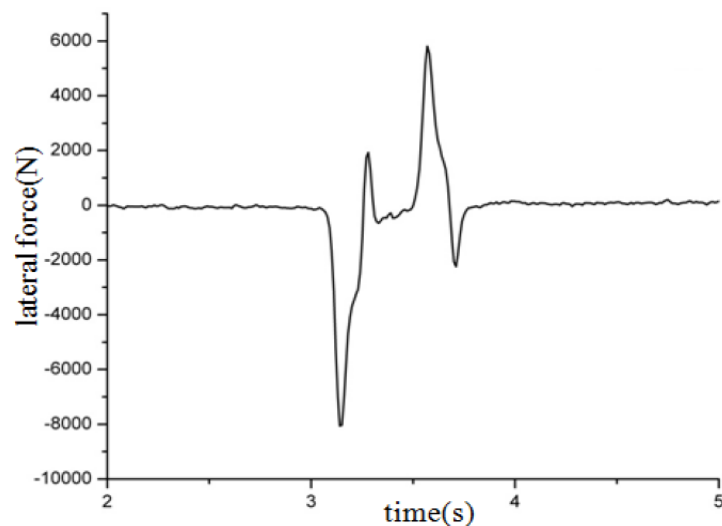


Obrázek 2.15 Průběh tlaku v místě mt1 pro různé rychlosti, převzato z [24]

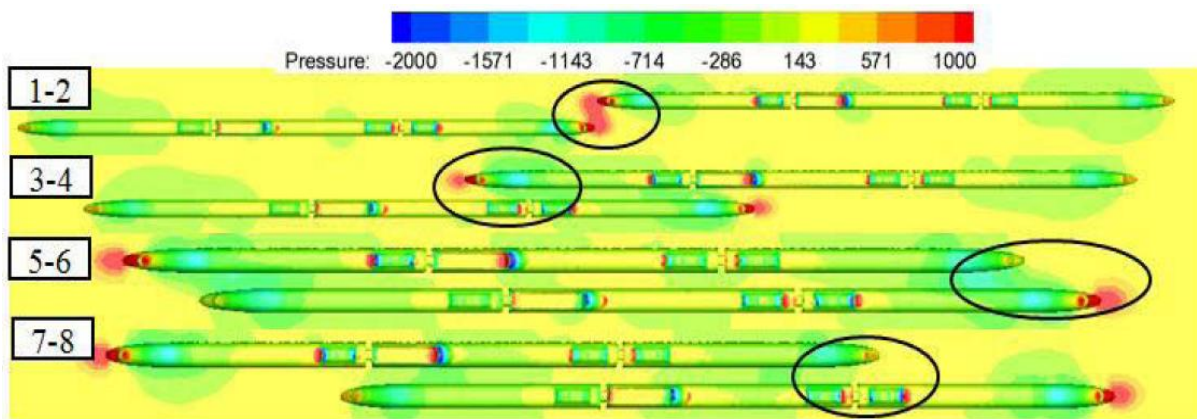
Při průjezdu otevřeným prostorem na rozdíl od předchozího případu nedochází k omezení proudění stěnami tunelu, tudíž tlakové vlny se mohou volně šířit do okolního prostředí. Mezi oběma soupravami opět nastává pokles tlaku, nicméně vzhledem k výše uvedenému důvodu je tento pokles znatelně menší. Rozložení tlaku v blízkosti obou souprav udává obrázek 2.18, přičemž opět lze vidět rozdělení na jednotlivé fáze. Vývoj aerodynamického odporu a boční síly znázorňují grafy 2.16 a 2.17, v nichž jsou pak tyto fáze vyznačeny. Poslední obrázek 2.19 udává hodnoty tlaku v místě  $mt1$  pro jednotlivé rychlosti.



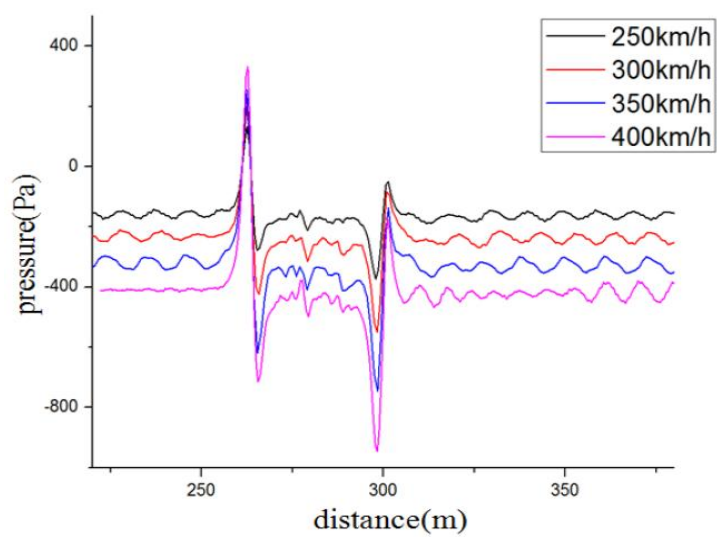
Obrázek 2.16 Průběh boční síly v čase, převzato z [24]



Obrázek 2.17 Průběh odporu v čase, převzato z [24]



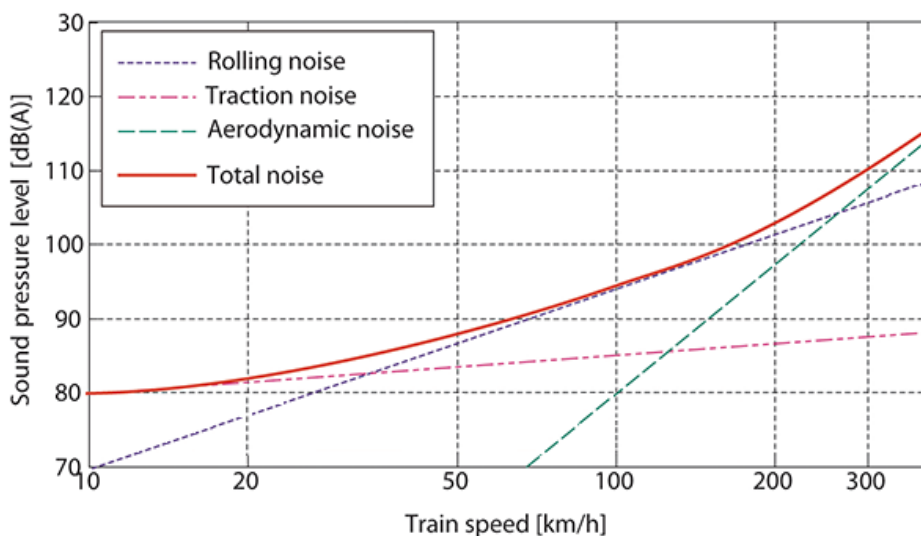
Obrázek 2.18 Rozložení tlaku v blízkosti souprav pro jednotlivé fáze, převzato z [24]



Obrázek 2.19 Průběh tlaku v místě mt1 pro jednotlivé rychlosti, převzato z [24]

## 2.5 Aerodynamický hluk

Další z řady problémů spjatých s aerodynamikou vysokorychlostních kolejových vozidel představuje aerodynamický hluk. Zatímco při nižších rychlostech tvoří většinu celkového hluku produkovaného vozidlem hluk mechanický, se vzrůstem rychlostí až na 300 km/h vystupuje do popředí a získává postupně na převaze hluk aerodynamický, viz obrázek 2.20. Hodnota a druh hluku tedy významně závisí na rychlosti, jíž se vozidlo pohybuje [25].



Obrázek 2.20 Srovnání průběhu složek mechanického a aerodynamického hluku, převzato z [25]

Zdroj hluku lze charakterizovat pomocí veličiny zvané akustický výkon  $P_{aku}$ , jež vyjadřuje celkovou akustickou energii vyzářenou zdrojem za jednotku času

$$P_{aku} = \frac{dE}{dt}. \quad (2.33)$$

Někdy se lze rovněž setkat i s hladinou akustického výkonu [26]

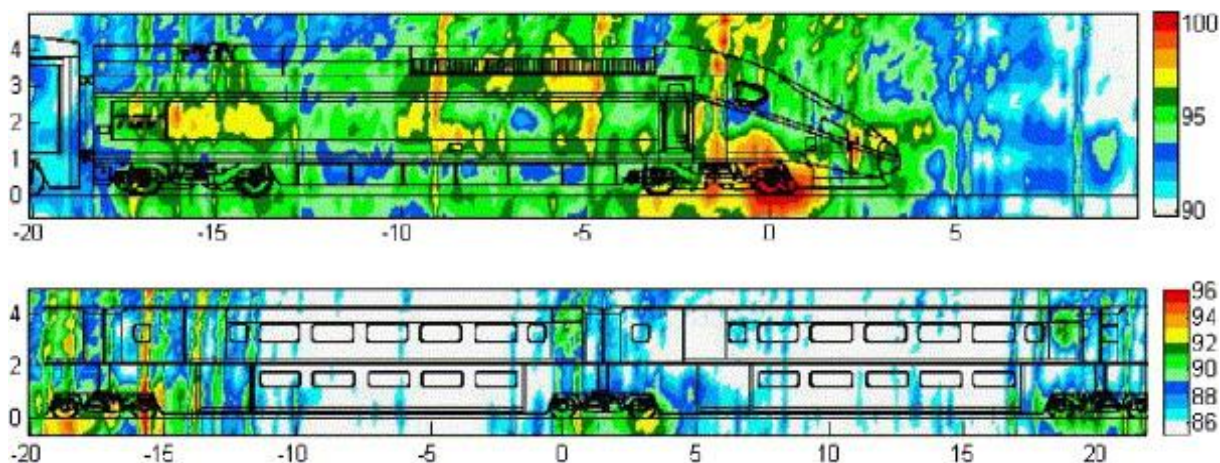
$$L_{P_{aku}} = 10 \cdot \log \frac{P_{aku}}{P_{aku0}}. \quad (2.34)$$

V případě železniční dopravy se akustický výkon skládá ze čtyř složek: klidové, trakční, valivé a aerodynamické, přičemž první tři uvedené reprezentují výše zmiňovaný mechanický hluk, čtvrtá pak hluk aerodynamický. Klidová složka zahrnuje hluk generovaný i v okamžiku, kdy se vlak zrovna nepohybuje. Vzniká činností topení, klimatizace a kompresorů. Její hodnoty se s rychlostí nemění. Do trakční složky patří hluk produkovaný trakčním pohonem a převodovkou. Roste



s první mocninou rychlosti. Valivá složka hluku vzniká odvalováním kola po kolejnici a odpovídá třetí mocnině rychlosti [27].

Aerodynamická složka akustického výkonu vzniká především obtékáním konstrukčních prvků vozidla. Mezi její hlavní zdroje patří podvozky a pantografy, přičemž první jmenované přispívají přibližně až o 15 dB více. Hlavní zásluhu na tom nese zejména první podvozek celé jednotky, jakožto největší zdroj hluku vůbec, viz obrázek 2.21. Svůj podíl však rovněž mají i druhý a poslední podvozek soupravy. Protihlukové stěny v blízkosti trati dokáží většinu hluku produkovaného těmito níže položenými částmi vlaku utlumit, co však nedokáží utlumit je příspěvek od pantografu. V současnosti tak většina snah směřuje ke snížení hluku produkovaného pantografem. Za další zdroje aerodynamického hluku bývají považovány mezivozové přechody a vnější povrch stěn, jenž sice sám o sobě představuje malý zdroj hluku, nicméně se rozkládá na značné ploše vozidla, tudíž v konečném důsledku se jedná rovněž o nezanedbatelný zdroj. Značné množství hluku produkují i větrací mřížky, které ale nelze zcela odstranit, neboť vlak má stálou potřebu chlazení a větrání. Aerodynamický hluk roste s vyššími mocninami, nejčastěji se šestou. Znalost vlivu jednotlivých konstrukčních prvků na celkovou hodnotu aerodynamického hluku představuje důležitý předpoklad pro snížení jeho celkové hodnoty [28].



Obrázek 2.21 Srovnání průběhu mechanického a aerodynamického hluku [28]

## 2.6 Ventilace a přenos tepla v podzemních stanicích a tunelech

K rozvoji vysokorychlostní železnice přispěla kromě rychlejších vozidel i výstavba moderních koridorových tratí, jejichž důležitou součástí bývají tunelové systémy. Tunely a stísněné prostory obecně s sebou přinášejí řadu charakteristických jevů, jako například zvýšení tlakových sil působících na stěny vozidel a tunelů, zvýšení aerodynamického odporu vozidel, výskyt tlakových vln a fluktuací či problémy s ventilací uvnitř vozidel. Je tedy zřejmé, že vzrůstá vliv aerodynamiky. Ta však hraje podstatnou roli nejen na vysokorychlostních tratích, ale i u tunelů metra, tunelů vystavených extrémním klimatickým podmínkám, tunelů vyznačujících se značnou délkou a strmostí a také u tunelů, v nichž se pohybují dieselová vozidla.

Z hlediska konstrukce se nejčastěji rozlišují dva typy tunelů: dvoutubusové (dva samostatné válce o jedné koleji) a jednotubusové (jeden válec obsahující dvě souběžné koleje). Prvně jmenované provedení zajišťuje díky pístovému efektu, vznikajícímu průjezdem vlaku, dostatečnou výměnu ovzduší mezi vnitřním a vnějším prostředím, díky čemuž dochází k udržování vhodného klima uvnitř tunelu. Toto klima lze popsat pomocí teploty, vlhkosti či rychlosti proudění vzduchu, případně někdy také pomocí koncentrace prachu a jiných nečistot. Ovlivňuje jej zejména odvětrávání a teplo produkované zemí, respektive technickým vybavením tunelu a vozidel. Z důvodu bezpečnosti by mělo splňovat určitá kritéria. V situacích, kdy vlak potřebuje zastavit například z důvodu zablokované trati, výpadku zdroje či jiných příčin, totiž delší doba zastavení vede k nárůstu teplot uvnitř i vně vlaku vlivem zmiňovaného odpadního tepla, což může vyústit i v ohrožení bezpečnosti cestujících.

Jednotubusová varianta tunelu díky svému většímu objemu umožňuje pohlcovat větší množství odpadního tepla. Při požáru se navíc plní pomaleji kouřem. Značnou výhodou představuje i to, že během údržbových prací lze zajistit alespoň částečný provoz po jedné z kolejí, zatímco v jednokolejném je nutné dopravu zastavit. Zároveň však poskytuje horší možnosti úniku cestujících a drážních pracovníků. Dále pak také kolísá výměna vzduchu, v některých případech zůstává uvnitř i několik dní.

Následující tabulka 2.3 obsahuje souhrn opatření aplikovaných v tunelech a jejich okolí za účelem zlepšení aerodynamických jevů uvedených v prvním odstavci. Lze si povšimnout, že některá opatření mají spíše negativní vliv, přesto v běžném provozu dochází k jejich použití, neboť mají význam například z důvodu bezpečnosti [29].

<b>Jev</b> <b>Opatření</b>	Krátkodobé fluktuace tlaku	Dlouhodobé fluktuace tlaku	Aerodynamický odpor	Tlakové mikrovlny	Proudění vzduchu ve stanicích	Cirkulace vzduchu uvnitř tunelů
Zvětšení průřezu tunelu	VP	VP	VP	VP	VP	N
Zúžení průřezu tunelu před vjezdem do stanice	N	0	N	0	P	0
Odvzdušňovací šachty v tunelech v těsné blízkosti stanic	P	P	P	VP	VP	0
Odvzdušňovací šachty ve stanicích	0	0	P	0	0	0
Odvzdušňovací šachty uprostřed tunelu	VP	VP	VP	P	VP	N
Oddělení nástupiště a vestibulu stanice otočnými dveřmi	0	0	N	0	0	N
Oddělení nástupiště a tunelu skleněnou stěnou	0	0	N	0	VP	0
Jeden dvojkolejný tunelový tubus místo dvou jednokolejných	VP	VP	VP	VP	VP	N

*Tabulka 2.3 Opatření prováděná za účelem zlepšení aerodynamiky tunelů a jejich okolí [29]*

#### Vysvětlivky

- VP velmi pozitivní vliv
- P pozitivní vliv
- 0 nemá vliv
- N nepříznivý vliv

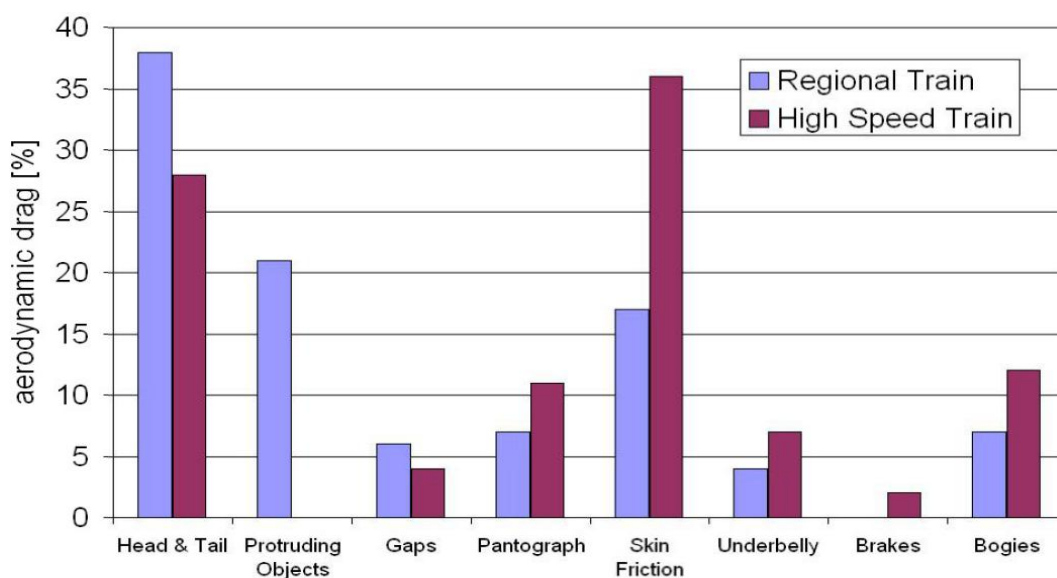
### 3 Návrh zjednodušené geometrie vysokorychlostní jednotky

Výchozí bod výpočetní části práce představovala úprava 3D modelu řešené kolejové jednotky do nejjednoduššího možného tvaru použitelného pro výpočty. Úpravy byly provedeny v programu Creo 3.0. Původní podobu modelu ukazují obrázky 3.2 a 3.3 (parametry viz tabulka 3.1), upravenou obrázky 3.4 a 3.5 a vzájemné srovnání obou pak nabízí obrázek 3.6. Z uvedených obrázků je patrné, že úpravami došlo k odstranění oken, dveří, reflektorů, mezivozových přechodů, pantografových systémů, podvozkových systémů a střešních nástaveb, přičemž pro výpočty bylo užito pouze samotné vozové skříň.

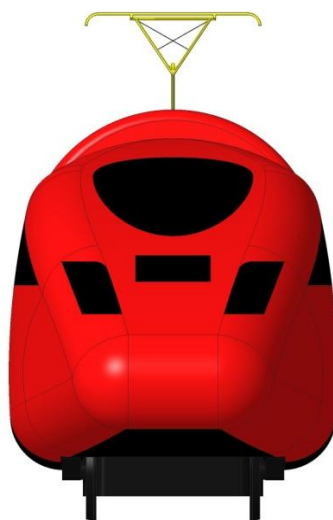
Celková délka jednotky	194 720 mm
Počet vozů jednotky	8
Délka jednotlivých vozů	24 340 mm
Vzdálenost otočných čepů	17500 mm
Šířka jednotky	3 070 mm
Rozchod kolejí	1 435 mm
Průměr kol	1 000 mm
Výška jednotky přes pantograf	4 846 mm
Výška jednotky bez pantografu	3 650 mm
Výška skříňe pro výpočty	3 150 mm
Celková hmotnost	409 t
Jízdní rychlost	300 km/h
Maximální rychlost	330 km/h
Trakce	elektrická
Napájecí systémy	3 kV DC 25 kV AC (50 Hz)
Výkon	8 000 kW
Maximální tažná síla	300 kN
Míst k sezení	460
Uspořádání pojezdu	Bo'Bo' + 2'2' + Bo'Bo' + 2'2' + + 2'2' + Bo'Bo' + 2'2' + Bo'Bo'

Tabulka 3.1 Parametry vysokorychlostní jednotky

Obrázek 3.1 vyjadřuje vliv jednotlivých konstrukčních částí vozidel regionální (modrá) a vysokorychlostní (purpurová) kolejové dopravy na celkový aerodynamický odpor. Z grafu plyne, že u vozidel regionální dopravy má největší vliv na odpor tvar čelní a koncové části karoserie, dále pak také výstupky karoserie a tření na vnějším povrchu stěn. Co se týče vysokorychlostních vozidel, zde největší podíl rovněž nese tření na vnějším povrchu stěn a tvar čela a konce. Z popisu úprav původního modelu na předchozí straně je tedy zřejmé, že i přes odstranění některých prvků došlo k zachování hlavních zdrojů aerodynamického odporu. Odporů původního a výpočtového modelu se pak budou na základě tohoto grafu lišit přibližně o 35 %.



Obrázek 3.1 Vliv jednotlivých částí vlaku na aerodynamický odpor, převzato z [30]



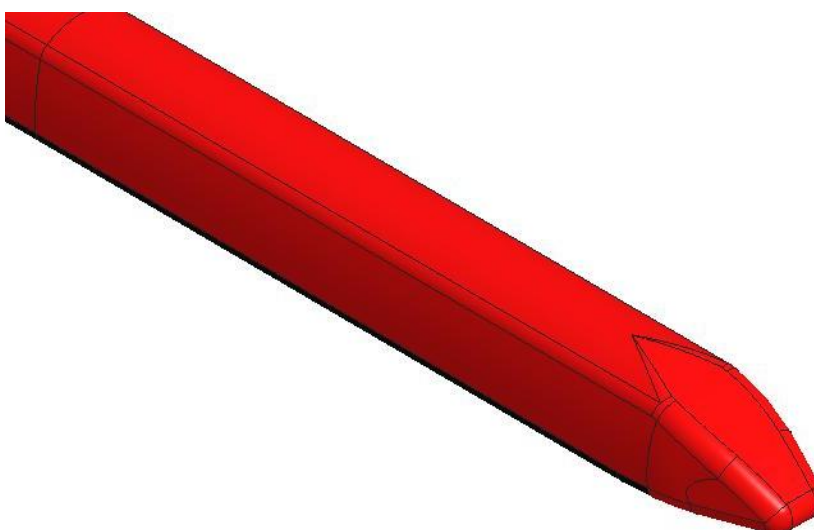
Obrázek 3.2 Původní model vysokorychlostní jednotky



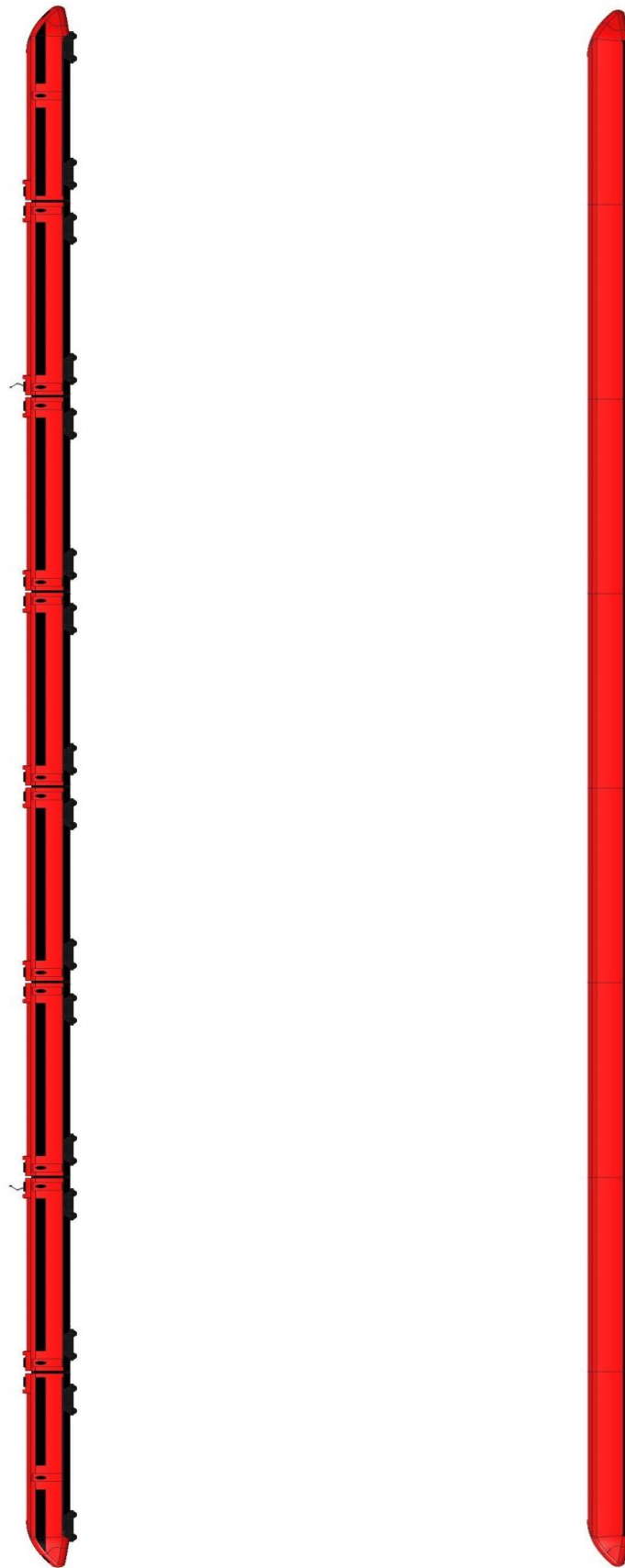
*Obrázek 3.3 Původní model vysokorychlostní jednotky*



*Obrázek 3.4 Upravený model použitý pro výpočty*



*Obrázek 3.5 Upravený model použitý pro výpočty*



*Obrázek 3.6 Srovnání modelu před úpravami (vlevo) a po úpravách (vpravo)*

## 4 Nastavení výpočtového modelu

Jednotlivé úlohy byly řešeny prostřednictvím programu Ansys CFX. Jedná se o výpočetní software firmy Ansys, jenž dokáže řešit širokou škálu úloh z oblasti počítačové mechaniky tekutin, od vícefázového proudění, přes turbíny až po optimalizaci čerpadel. Silnou stránku tohoto vývojového prostředí představují zejména rychlost, přesnost, flexibilita výpočetních sítí a uživatelská přívětivost. Lze jej spouštět pomocí uživatelského prostředí Workbench, které obsahuje programy DesignModeler a Meshing. První z nich slouží k tvorbě a úpravám výpočtových geometrií, druhý pak k práci s výpočetními sítěmi [32].

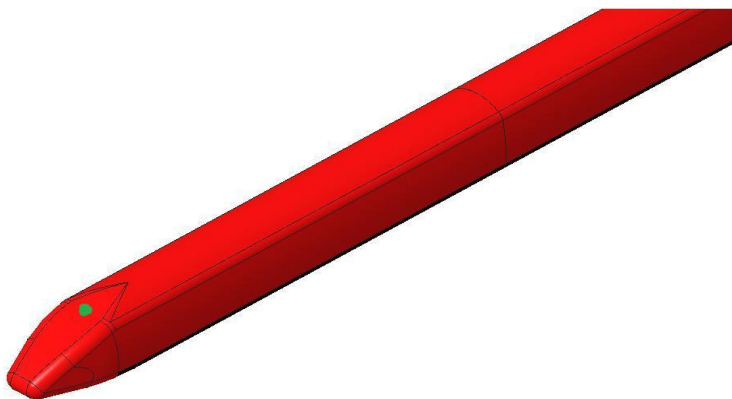
Cíl této práce spočíval ve stanovení charakteristik proudění vznikajícího průjezdem vysokorychlostní kolejové jednotky. Řešení všech tří uvažovaných případů proběhlo obdobným způsobem. Vzhledem k podélné symetrii modelu řešené jednotky, vytvořeného v programu Creo 3.0, byla vždy použita pouze jedna jeho polovina, okolo níž byl posléze v CFX vytvořen kvádrový objem (viz obrázky 4.2 až 4.10) představující vzduch v těsné blízkosti této poloviny jednotky. Oproti reálné úloze se takto získaná soustava odlišuje tím, že simulaci pohybu zajišťuje proudění vytvořeného prostředí okolo nepohybujícího se modelu jednotky, zatímco v realitě vykonává hlavní pohyb naopak vlak. Rychlost proudění přitom zůstává stejná jako uvažovaná rychlost jedoucího vlaku, tedy 80 m/s, což odpovídá přibližně 300 km/h. Uspořádání jednotlivých úloh znázorňují následující obrázky, průjezd volným prostorem zobrazují obrázky 4.2, 4.3 a 4.4, průjezd okolo protihlukové stěny obrázky 4.5, 4.6 a 4.7 a průjezd tunelem obrázky 4.8, 4.9 a 4.10. V rámci řešení je zjišťován i průběh tlaku na čele jednotky. Místo jeho měření znázorňuje obrázek 4.1. Nastavení řešiče v Ansys CFX shrnuje následující tabulka 4.1. Nastavení okrajových podmínek udávají tabulky 4.2, 4.3 a 4.4.

Model turbulence	K-epsilon
Vstupní rychlost proudění	80 m/s
Médium	vzduch (25 °C)
Tvar elementů	čtyřstěn
Maximální počet časových kroků	1000

*Tabulka 4.1 Základní nastavení řešiče*



Součástí řešení představuje i stanovení tlaku na čele vlaku. Místo, v němž je tlak určován znázorňuje zelená tečka v obrázku 4.1.



*Obrázek 4.1 Místo měření tlaku*

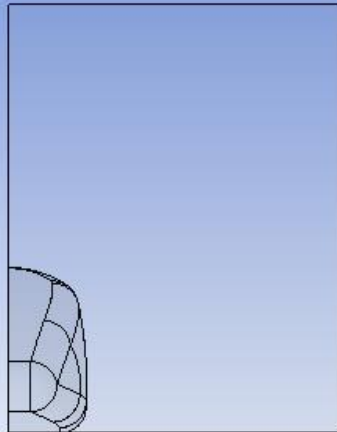
## **4.1 Nastavení pro průjezd volným prostředím**

Inlet	Velocity inlet
Outlet	Pressure outlet
Side	Symmetry top
Symmetry	Symmetry
Zug default	Wall
Wall1	Wall
Wall2	Symmetry side

*Tabulka 4.2 Nastavení okrajových podmínek v Ansys CFX pro průjezd volným prostředím*

Geometry  
28.03.2017 15:44

ANSYS  
R17.0  
Academic

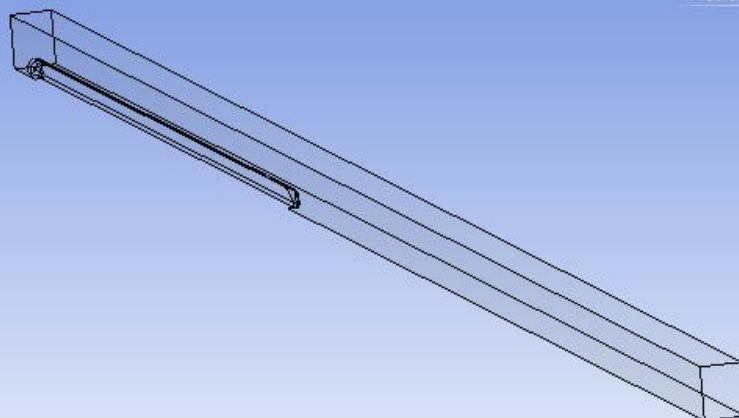


0 5e+003 (mm)  
2,5e+003

Obrázek 4.2 Průjezd volným prostředím - čelní pohled

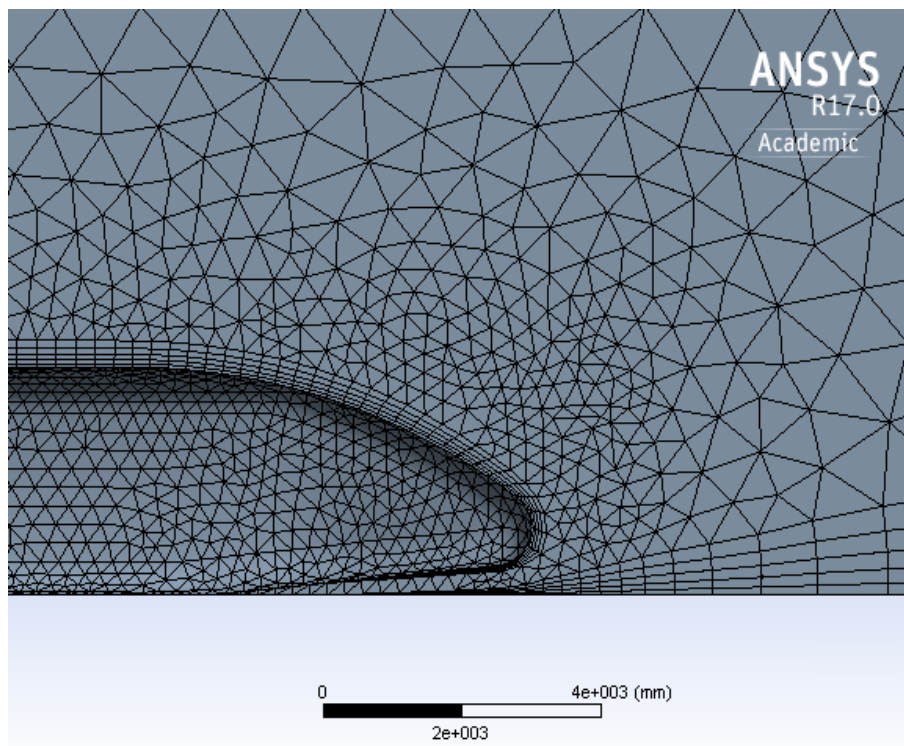
Geometry  
28.03.2017 15:50

ANSYS  
R17.0  
Academic



0 4e+004 (mm)  
2e+004

Obrázek 4.3 Vnější prostředí v blízkosti soupravy-obecný pohled

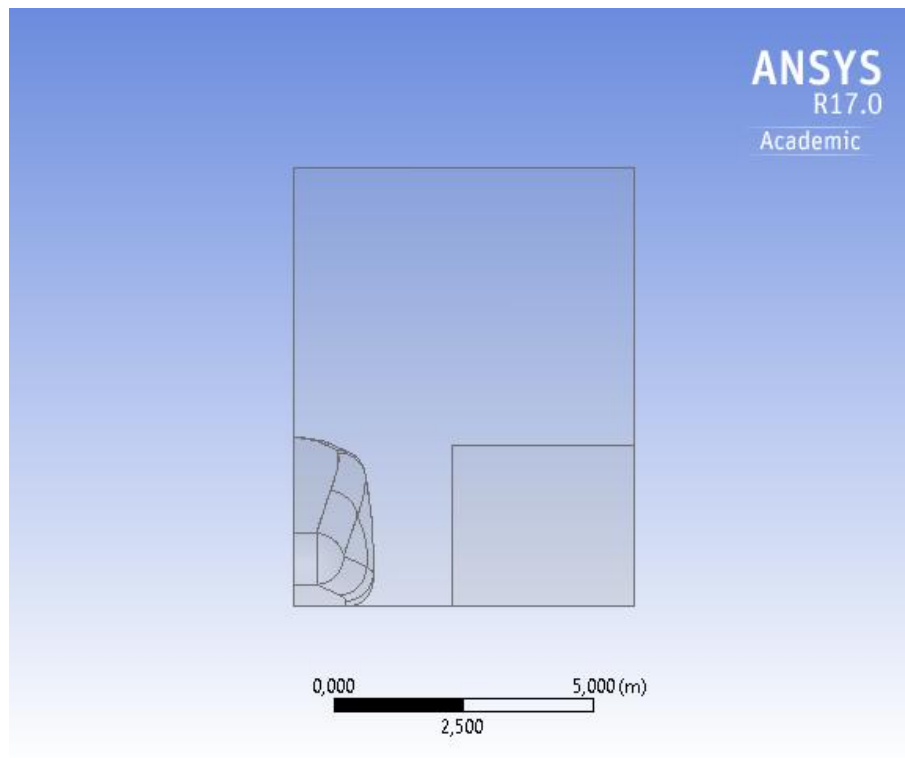


Obrázek 4.4 Síť v okolí čela jednotky

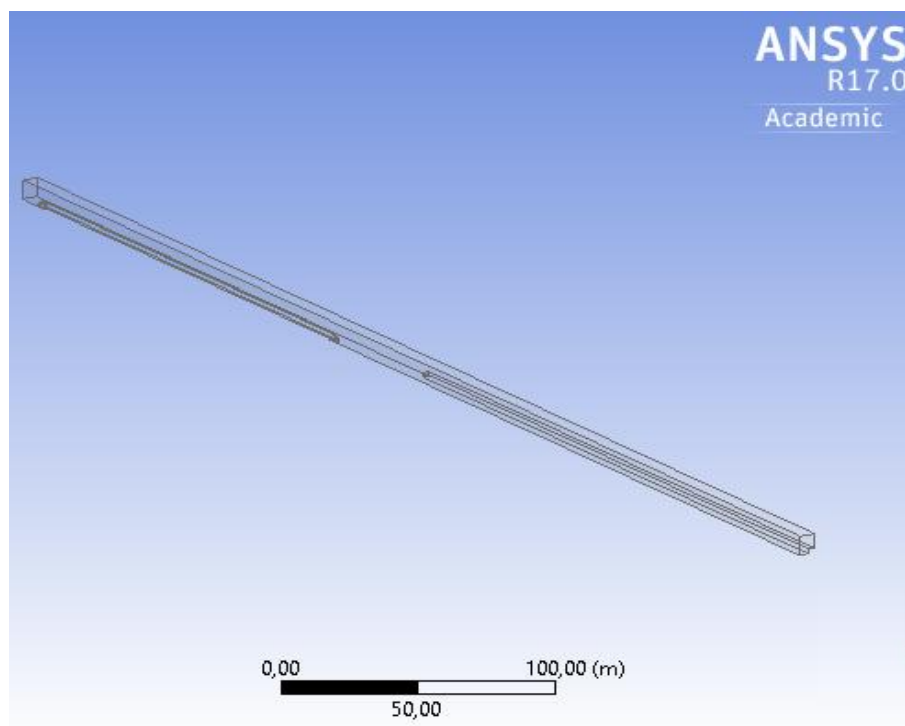
## 4.2 Nastavení pro průjezd okolo protihlukové stěny

Inlet	Velocity inlet
Outlet	Pressure outlet
Side	Symmetry top
Symmetry	Symmetry
Zug default	Wall
Wall1	Wall
Wall2	Symmetry Side
Wall3	Wall
Wall4	Wall
Wall5	Wall

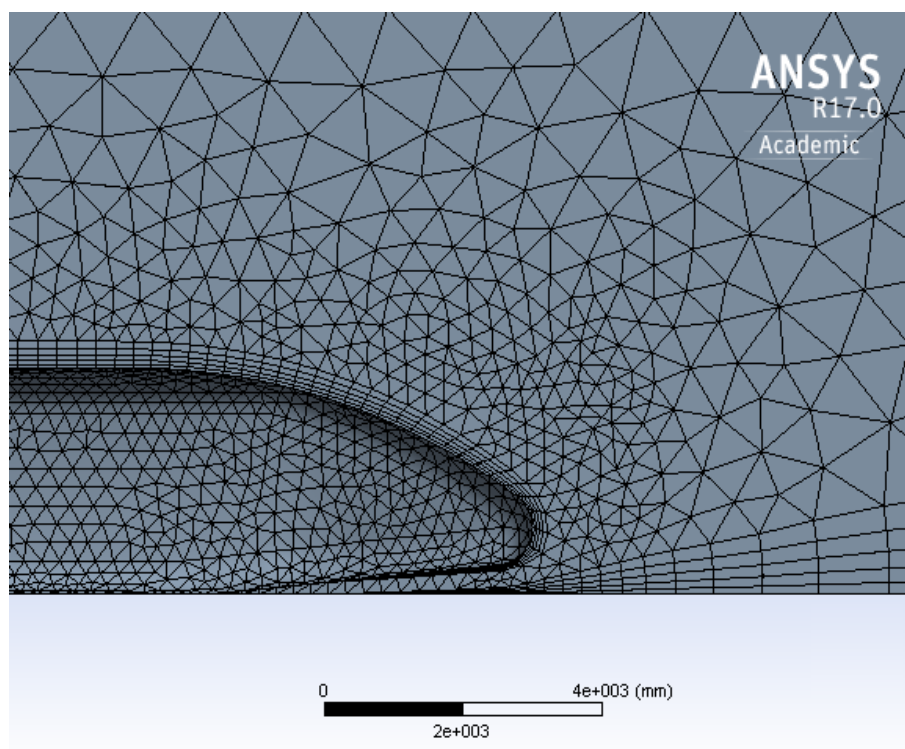
Tabulka 4.3 Nastavení okrajových podmínek v Ansys CFX pro průjezd okolo protihlukové stěny



*Obrázek 4.5 Průjezd okolo protihlukové stěny-čelní pohled*



*Obrázek 4.6 Průjezd okolo protihlukové stěny-obecný pohled*

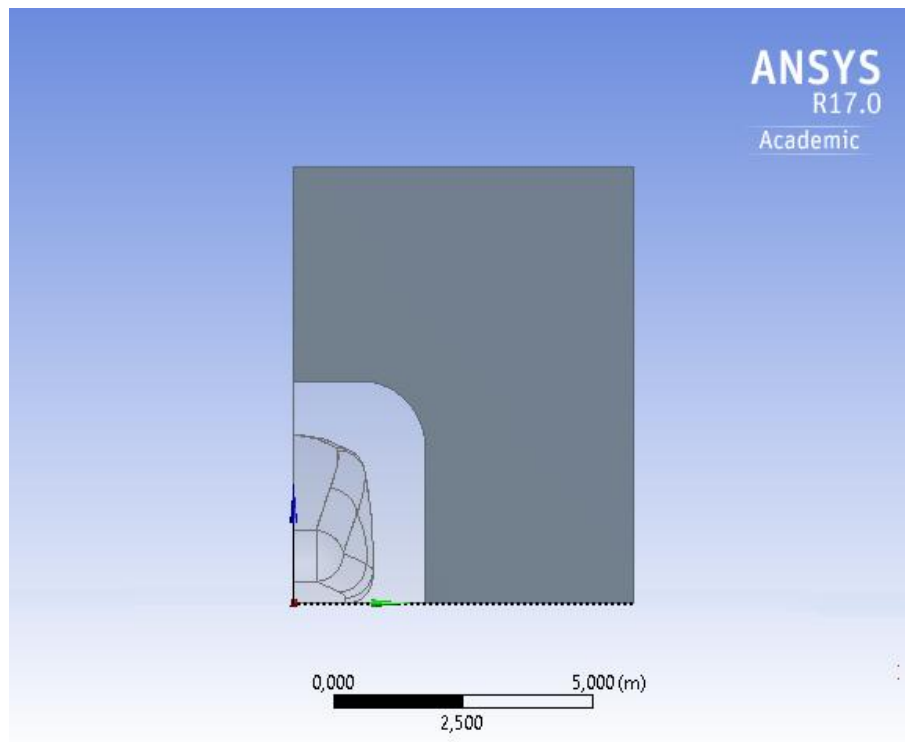


Obrázek 4.7 Síť v okolí čela jednotky

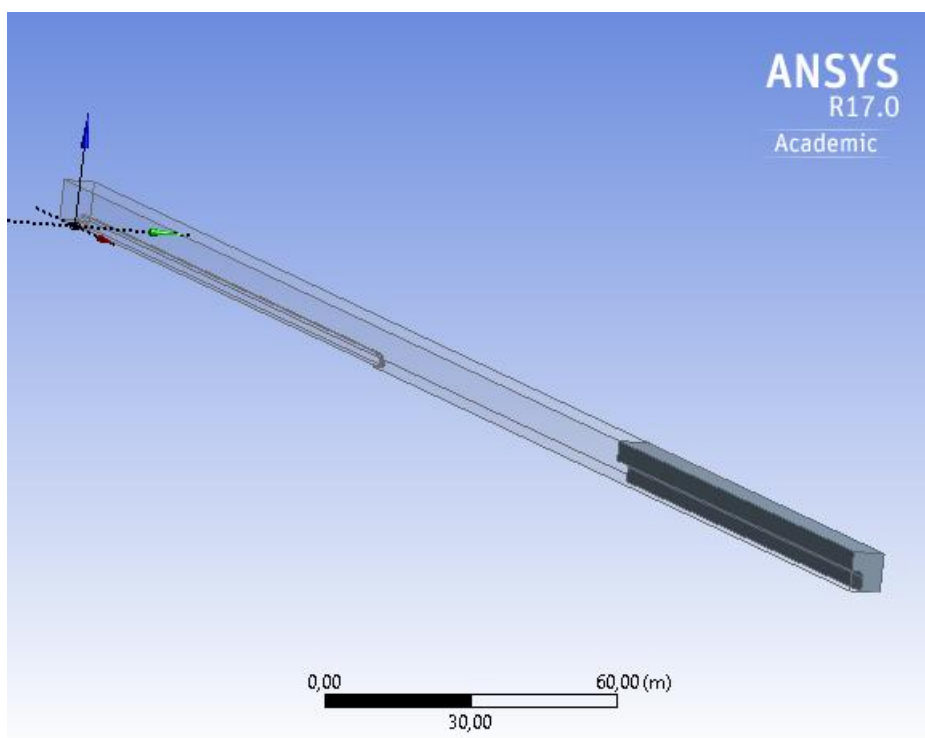
### 4.3 Nastavení pro průjezd tunelem

Inlet	Velocity inlet
Outlet	Pressure outlet
Side	Symmetry top
Symmetry	Symmetry
Zug default	Wall
Wall1	Wall
Wall2	Symmetry Side
Wall3	Wall
Wall4	Wall
Wall5	Wall
Wall6	Wall

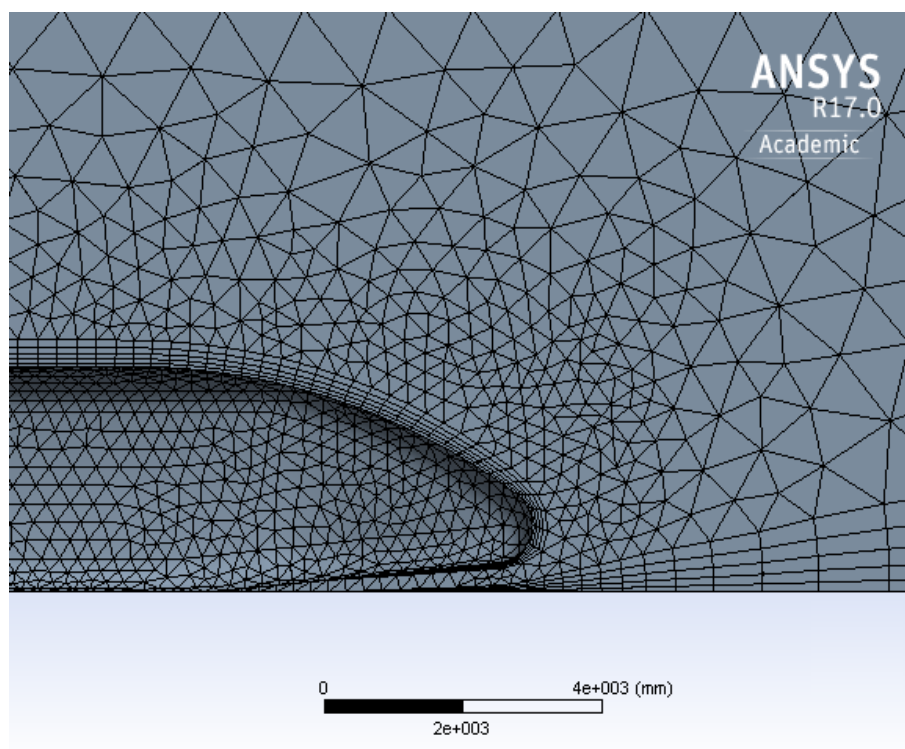
Tabulka 4.4 Nastavení okrajových podmínek v Ansys CFX pro průjezd tunelem



*Obrázek 4.8 Průjezd tunelem-čelní pohled*



*Obrázek 4.9 Průjezd tunelem-obecný pohled*



*Obrázek 4.10 Vnější prostředí v blízkosti soupravy*

## 5 Výsledky

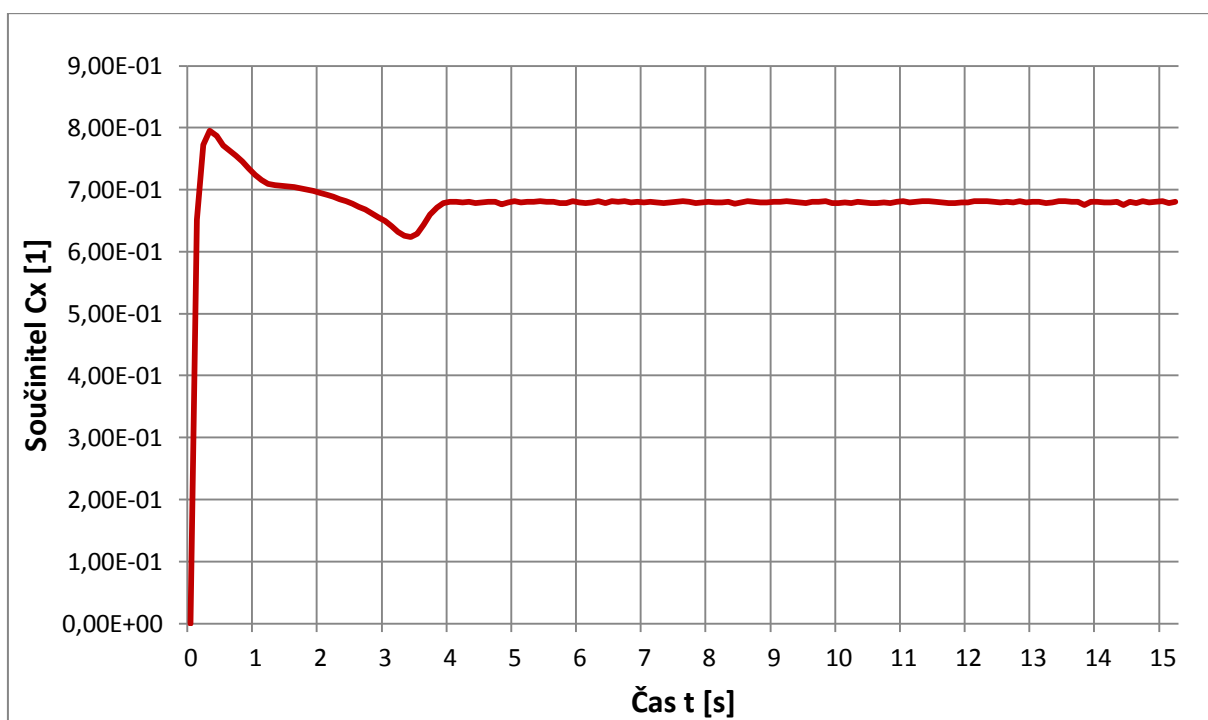
Cílem této práce bylo řešit proudění vznikající v okolí vysokorychlostní kolejové jednotky při průjezdu volným prostorem, okolo protihlukové stěny a tunelem. Pro každou z úloh byly stanoveny průběhy sil  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ . První uvedená síla představuje sílu působící na jednotku ve směru osy x (červená šipka v obrázku 4.9), tedy ve směru pohybu vozidla. Odpovídá aerodynamické složce Davisova vztahu, diskutovaného v kapitole 2.1. Mechanická složka daného vztahu byla při řešení zanedbána. Síla  $F_y$  je síla ve směru osy y (zelená šipka v obrázku 4.9), tedy se jedná o sílu působící na boční stěny vozidla. Poslední síla  $F_z$  představuje sílu působící ve směru osy z (modrá šipka v obrázku 4.9), tedy ve svislém směru k pohybu vozidla. Průběhy těchto sil byly následně pomocí vztahu pro aerodynamickou odporovou sílu převedeny na průběhy součinitelů odporu  $C_x$ ,  $C_y$  a  $C_z$  v příslušných osách.

Důležitý krok při řešení celé práce představovalo zjednodušení výchozího modelu vysokorychlostní jednotky, jež vedlo k odstranění některých jeho částí. V kapitole 3 bylo pomocí obrázku 3.1 odhadnuto, že aerodynamický odpor upraveného modelu se oproti výchozímu bude lišit přibližně o 35%. Do hodnot  $C_x$ ,  $C_y$  a  $C_z$  byl proto následně zahrnut i tento rozdíl a jejich průběhy byly znázorněny graficky. V rámci jednotlivých úloh byl rovněž stanoven a graficky znázorněn průběh tlaku na čele jednotky v místě vyznačeném v obrázku 4.1, viz předcházející kapitola.



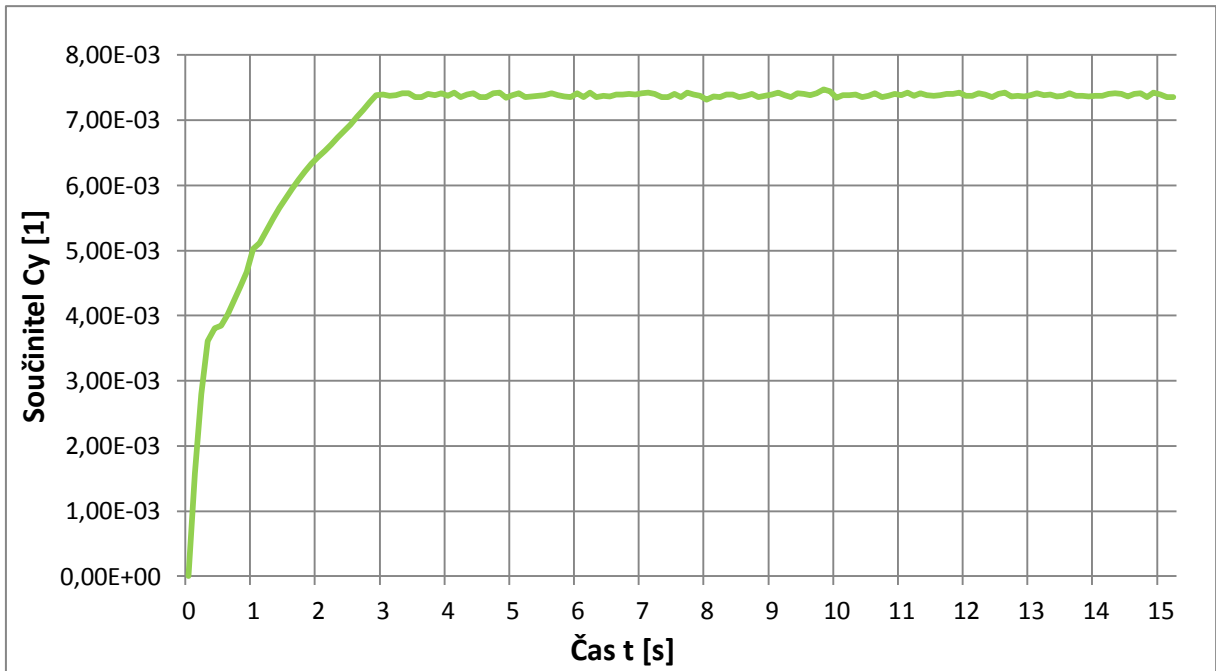
## 5.1 Průjezd volným prostorem

Obrázek 5.1 znázorňuje průběh součinitele odporu  $C_x$ . Lze si povšimnout, že v časovém úseku od 0 do 4 s dochází k prudkým změnám jeho hodnot, neboť proudění se v tomto úseku ještě nestačilo plně vyvinout. Více informací proto podává až následující úsek, kdy se  $C_x$  ustaluje na hodnotě přibližně 0,7 a kdy zůstává konstantní až do konce průjezdu. Zdroj [10] uvádí, že nejmodernější vysokorychlostní kolejové jednotky dosahují hodnot okolo  $C_x = 1$ . Rozdíl mezi touto hodnotou a hodnotou získanou výpočtem může mít mnoho příčin. Mohl být například způsoben zjednodušením modelu jednotky, viz kapitola 3, zejména odstraněním podvozků a střešních nástaveb. Při následném přepočtu na koeficienty byl navíc vzhledem ke geometrii na čele a na konci jednotky odhadnuta velikost čelní plochy, což vneslo do výpočtu další nepřesnosti.



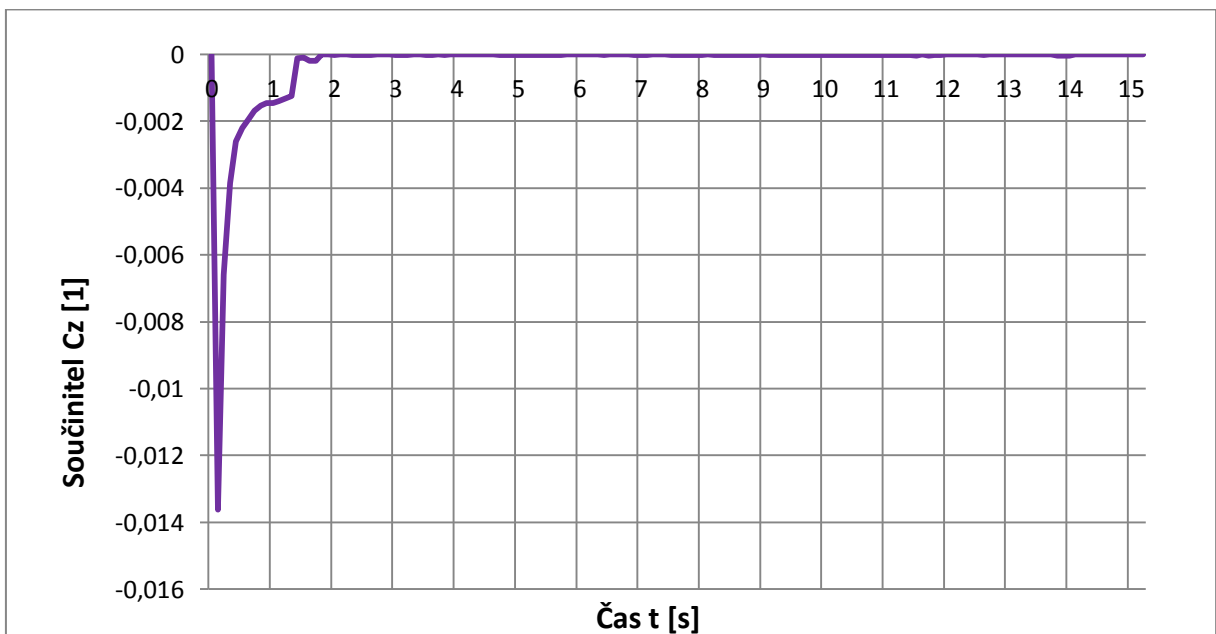
Obrázek 5.1 Průběh koeficientu  $C_x$  při průjezdu volným prostorem

Obrázek 5.2 znázorňuje průběh koeficientu odporu  $C_y$ . Stejně jako v předchozím případě si lze povšimnout, že průběh v časovém úseku od 0 do 3 s se výrazně liší od zbytku. Jedná se opět o oblast, v níž dochází k prudkým změnám hodnot součinitele, neboť se proudění ještě zcela nestihlo vyvinout. V následujícím úseku se však již hodnoty ustalují na 0,0075.



Obrázek 5.2 Průběh koeficientu  $C_y$  při průjezdu volným prostorem

Obrázek 5.3 znázorňuje průběh součinitele odporu  $C_z$ . Stejně jako v předchozích případech si lze povšimnout průběhu v časovém úseku od 0 do 2 s, kdy dochází k prudkým změnám hodnot součinitele, neboť proudění zde ještě nebylo zcela vyvinuto. V následujícím úseku se hodnoty  $C_z$  ustalují na hodnotě 0, neboť i velikost síly  $F_z$  byla nulová.



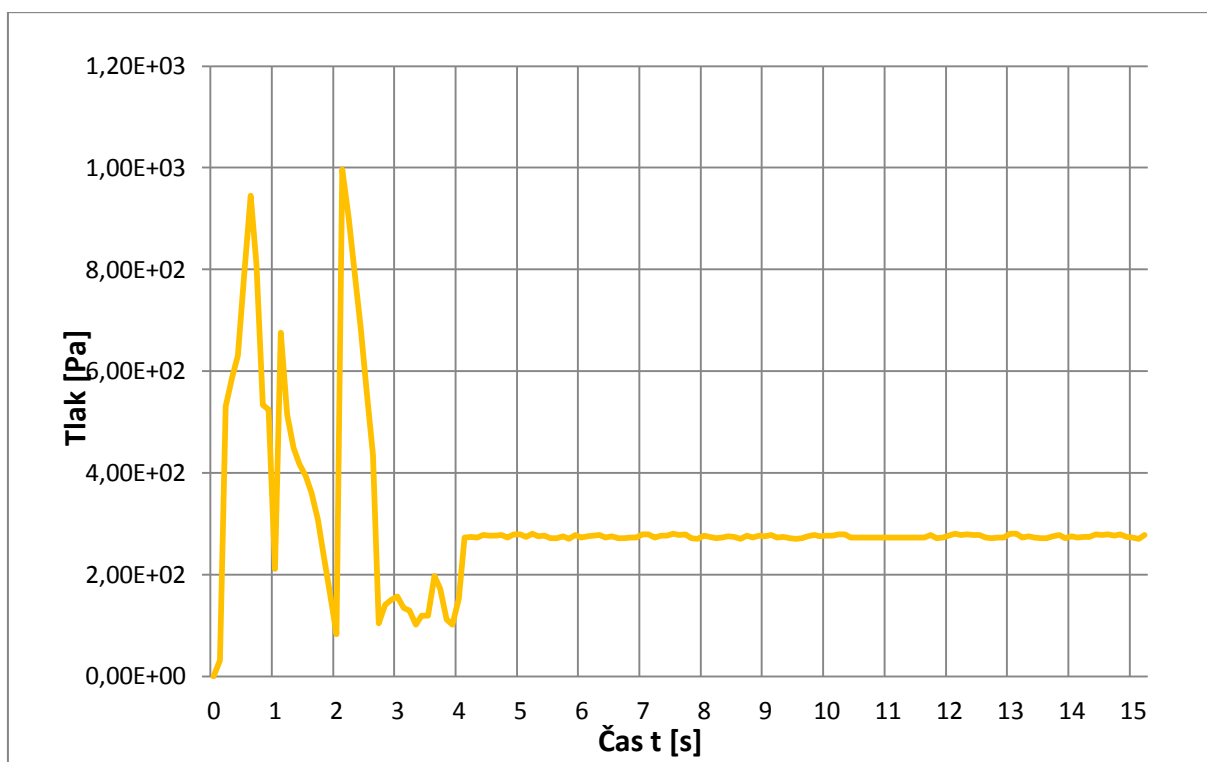
Obrázek 5.3 Průběh koeficientu  $C_z$  při průjezdu volným prostorem

Následující tabulka 5.1 udává přehled hodnot výše diskutovaných koeficientů odporu po ustálení.

Součinitel	$C_x$	$C_y$	$C_z$
Hodnota [1]	0,7	0,0075	0

Tabulka 5.1 Průběh koeficientů odporu při průjezdu volným prostorem

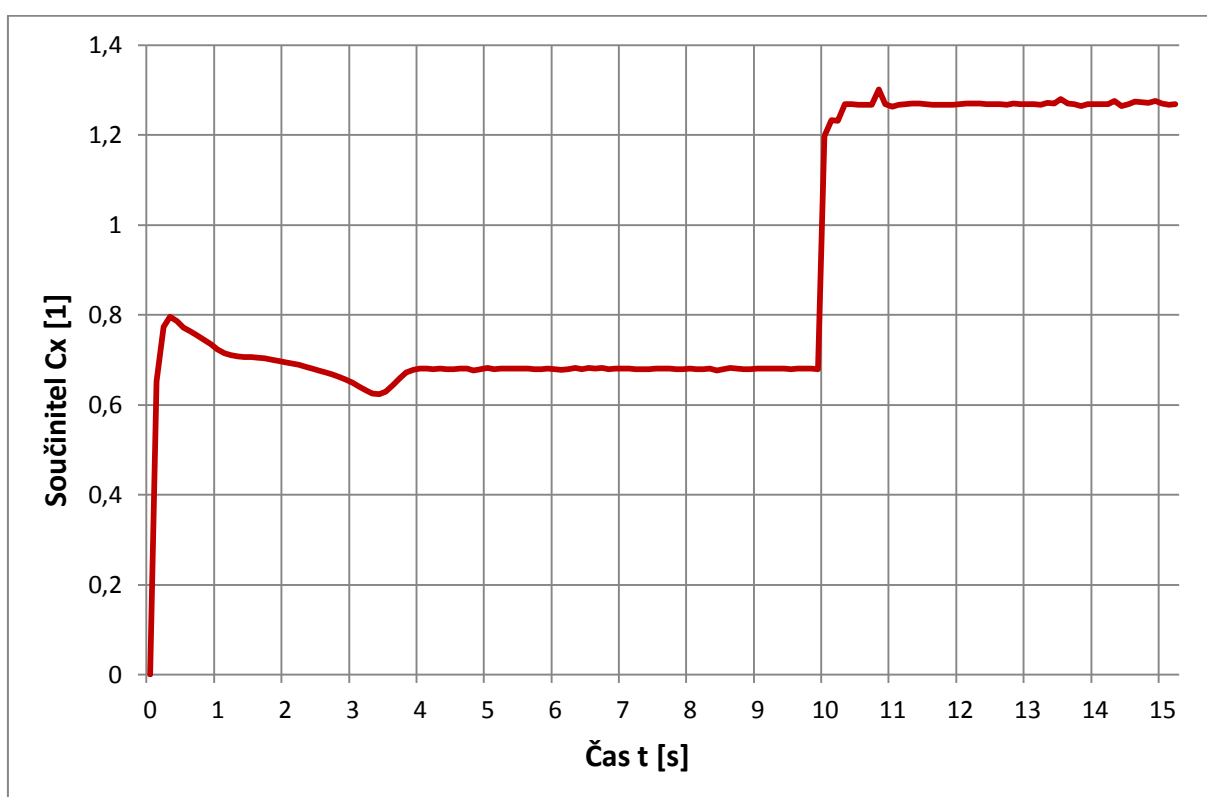
Obrázek 5.4 znázorňuje průběh tlaku na čele jednotky v místě vyznačeném na obrázku 4.1 v předešlé kapitole. Opět lze pozorovat prudké změny v časovém úseku 0 až 4 s. Posléze se hodnoty ustalují na hodnotě okolo  $p = 278$  Pa.



Obrázek 5.4 Průběh tlaku na čele jednotky při průjezdu volným prostorem

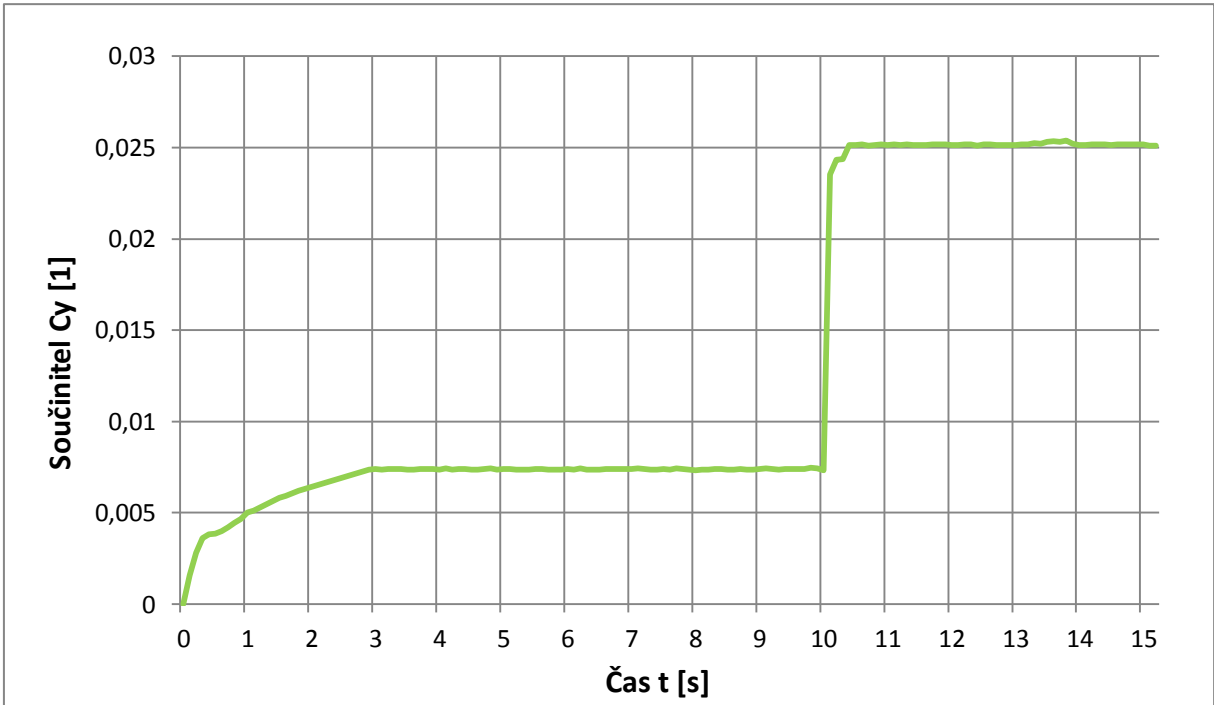
## 5.2 Průjezd okolo protihlukové stěny

Obrázek 5.5 znázorňuje průběh součinitele odporu  $C_x$ . Lze si povšimnout, že v časovém úseku od 0 do 4 s dochází k prudkým změnám jeho hodnot, neboť proudění se v tomto úseku ještě nestačilo plně vyvinout. Hodnoty  $C_x$  se v následujícím úseku od 4 do 10 s ustalují na hodnotě přibližně 0,7, což odpovídá úseku, kdy vlak projíždí volným prostorem, jak bylo zjištěno v předchozí úloze. V čase  $t=10$  s dochází k prudkému nárůstu součinitele. Jedná se o okamžik, kdy jednotka míjí začátek protihlukové stěny.  $C_x$  díky tomuto stísněnému prostoru povyskočí až na hodnotu 0,92 a vydrží tak až do konce průjezdu, neboť stěna se rozkládá až konce úseku.



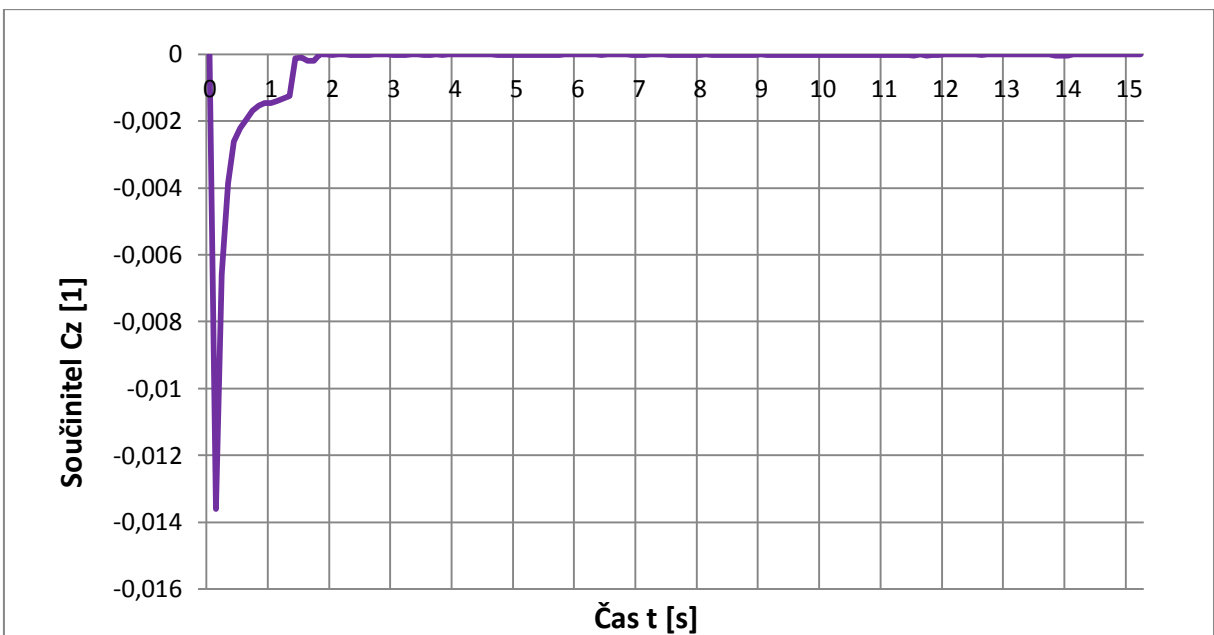
Obrázek 5.5 Průběh koeficientu  $C_x$  při průjezdu okolo protihlukové stěny

Obrázek 5.6 znázorňuje průběh koeficientu odporu  $C_y$ . Stejně jako v předchozím případě si lze povšimnout, že průběh v časovém úseku od 0 do 3 s se výrazně liší od zbytku. Jedná se opět o oblast, v níž dochází k prudkým změnám hodnot součinitele, neboť se proudění ještě zcela nestihlo vyvinout. V následujícím úseku se však již hodnoty až do času  $t=10$  s ustalují na 0,009. Posléze jeho hodnota roste vlivem míjení stěny až na hodnotu 0,025.



Obrázek 5.6 Průběh koeficientu  $C_y$  při průjezdu okolo protihlukové stěny

Obrázek 5.7 znázorňuje průběh koeficientu odporu  $C_z$ . Ten kopíruje svůj průběh z předchozí úlohy, neboť při jízdě volným prostorem i při jízdě okolo protihlukové stěny se síla  $F_z$  rovnala 0. Opět nejprve ale docházelo k vývinu proudění.



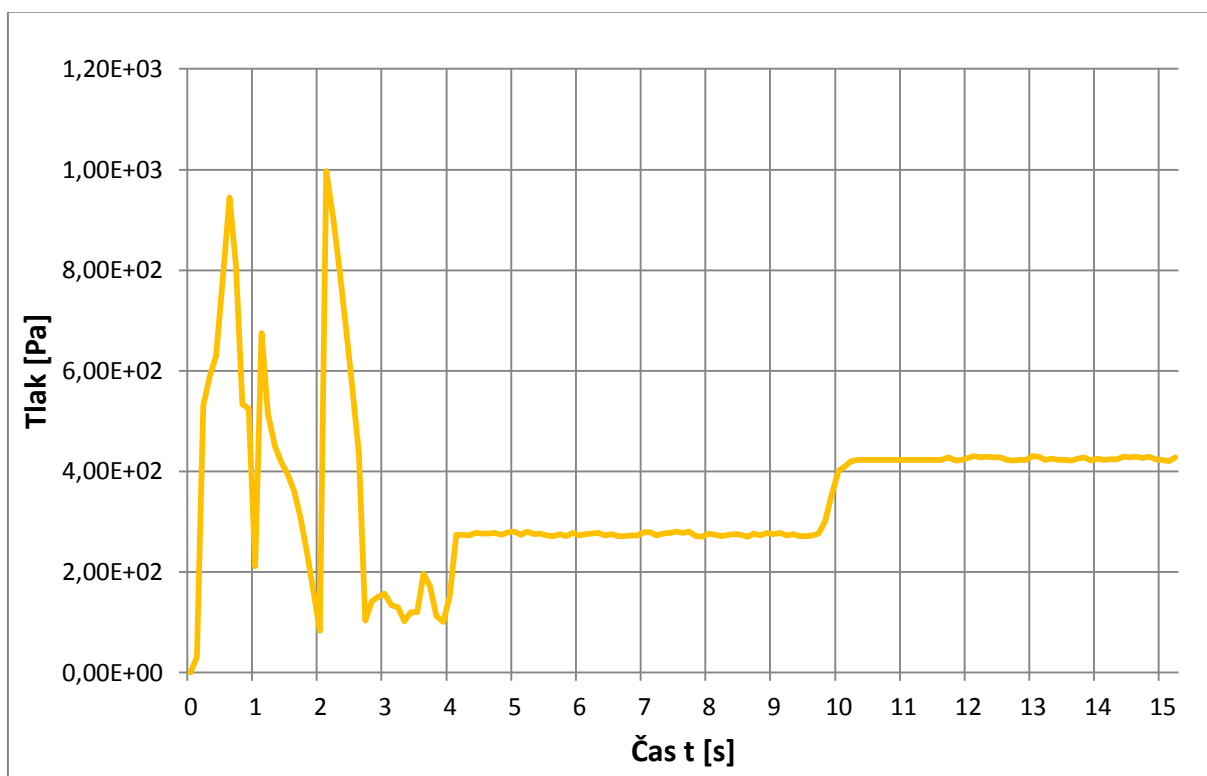
Obrázek 5.7 Průběh koeficientu  $C_z$  při průjezdu okolo protihlukové stěny

Následující tabulka 5.2 udává přehled hodnot výše diskutovaných koeficientů odporu po ustálení v blízkosti stěny.

Součinitel	$C_x$	$C_y$	$C_z$
Hodnota [1]	0,92	0,025	0

Tabulka 5.2 Průběh koeficientů odporu při průjezdu okolo protihlukové stěny

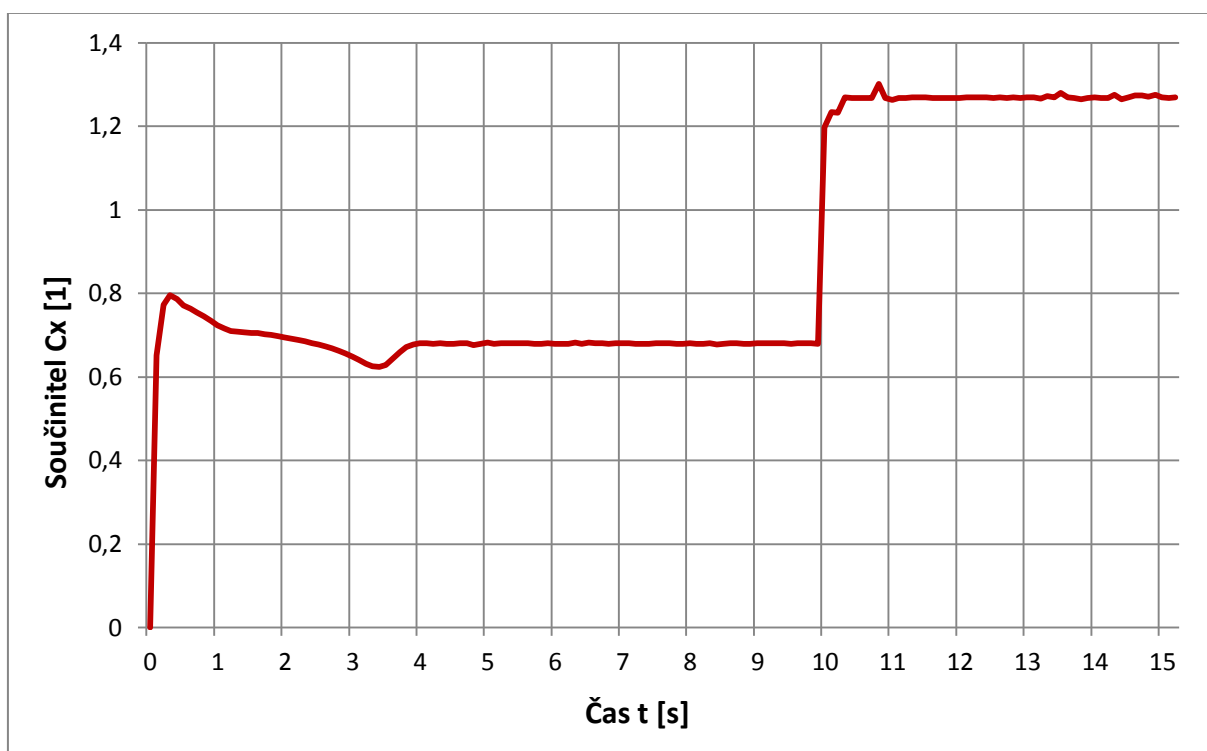
Obrázek 5.8 znázorňuje průběh tlaku na čele jednotky v místě vyznačeném na obrázku 4.1 v předešlé kapitole. Opět lze pozorovat prudké změny v časovém úseku 0 až 4 s. Posléze se hodnoty ustalují na hodnotě okolo  $p = 278$  Pa. Jednotka v tu chvíli projíždí volným prostorem. V čase  $t=10$  s však tlak vzrůstá až na hodnotu  $p = 422$  Pa. Je to přesně v momentě, kdy mívá počátek protihlukové stěny.



Obrázek 5.8 Průběh tlaku na čele jednotky při průjezdu okolo protihlukové stěny

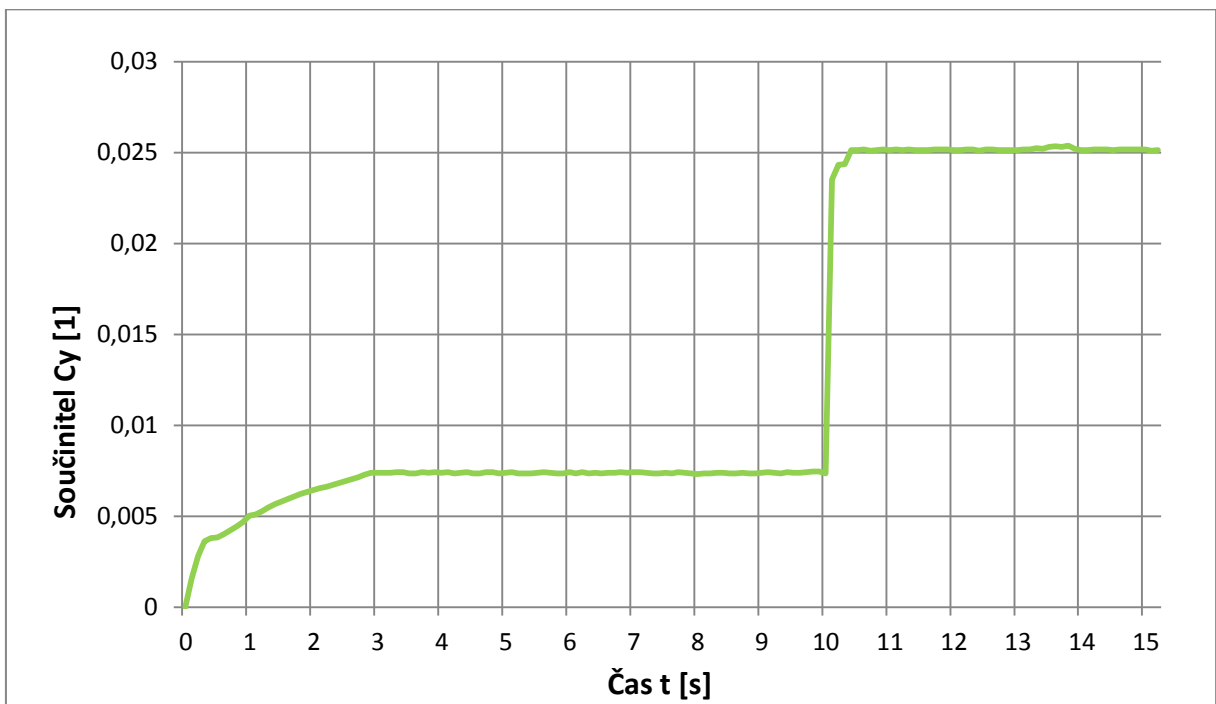
### 5.3 Průjezd tunelem

Obrázek 5.9 znázorňuje průběh součinitele odporu  $C_x$ . Lze si povšimnout, že v časovém úseku od 0 až do 4 s dochází k prudkým změnám jeho hodnot, neboť proudění se v tomto úseku ještě nestačilo plně vyvinout. Hodnoty  $C_x$  se v následujícím úseku od 4 do 10 s ustalují na hodnotě přibližně 0,7, což odpovídá úseku, kdy vlak projíždí volným prostorem, jak bylo zjištěno v první úloze. V čase  $t=10$  s dochází k prudkému nárůstu součinitele. Jedná se o okamžik, kdy jednotka vjíždí do tunelu.  $C_x$  díky tomuto stísněnému prostoru povyskočí až na hodnotu 1,27 a vydrží tak až do konce průjezdu, neboť tunel se rozkládá až konce jízdního úseku.



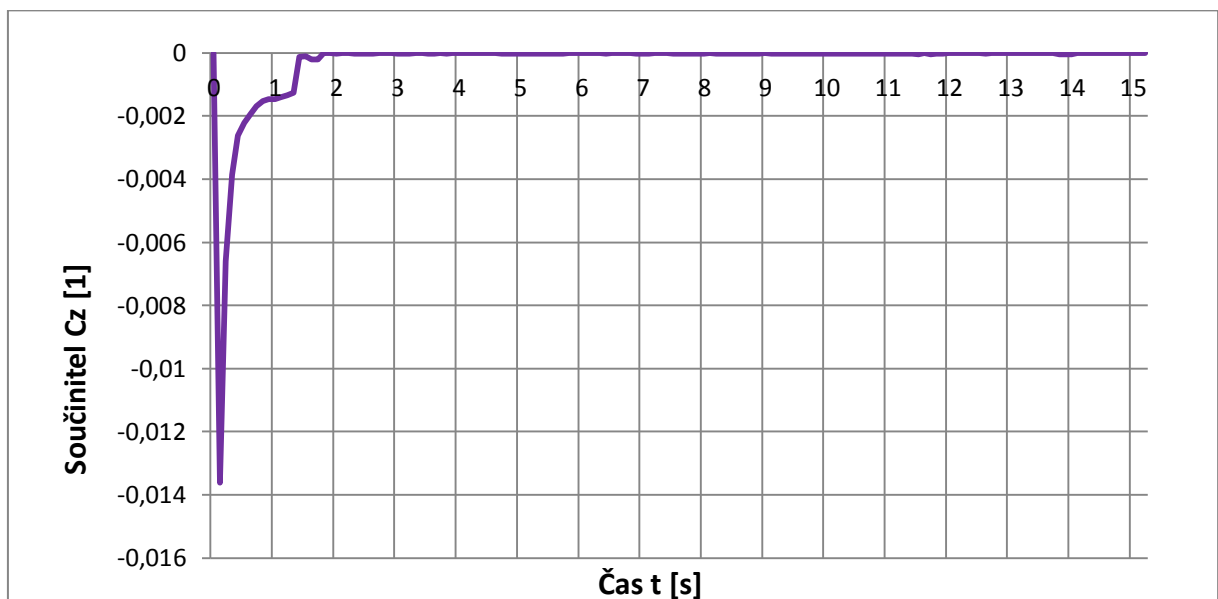
Obrázek 5.9 Průběh koeficientu  $C_x$  při průjezdu tunelem

Obrázek 5.10 znázorňuje průběh koeficientu odporu  $C_y$ . Stejně jako v předchozím případě si lze povšimnout, že průběh v časovém úseku od 0 do 3 s se výrazně liší od zbytku. Jedná se opět o oblast, v níž dochází k prudkým změnám hodnot součinitele, neboť se proudění ještě zcela nestihlo vyvinout. V následujícím úseku se však již hodnoty až do času  $t=10$  s ustalují na 0,009. Poté dochází k míjení počátku tunelu a součinitel roste až na hodnotu 0,025.



Obrázek 5.10 Průběh koeficientu  $C_y$  při průjezdu tunelem

Obrázek 5.11 znázorňuje průběh koeficientu odporu  $C_z$ . Ten kopíruje svůj průběh z předchozí úlohy, neboť při jízdě volným prostorem i při jízdě okolo protihlukové stěny se síla  $F_z$  rovnala 0. Opět nejprve ale docházelo k vývinu proudění.



Obrázek 5.11 Průběh koeficientu  $C_z$  při průjezdu tunelem

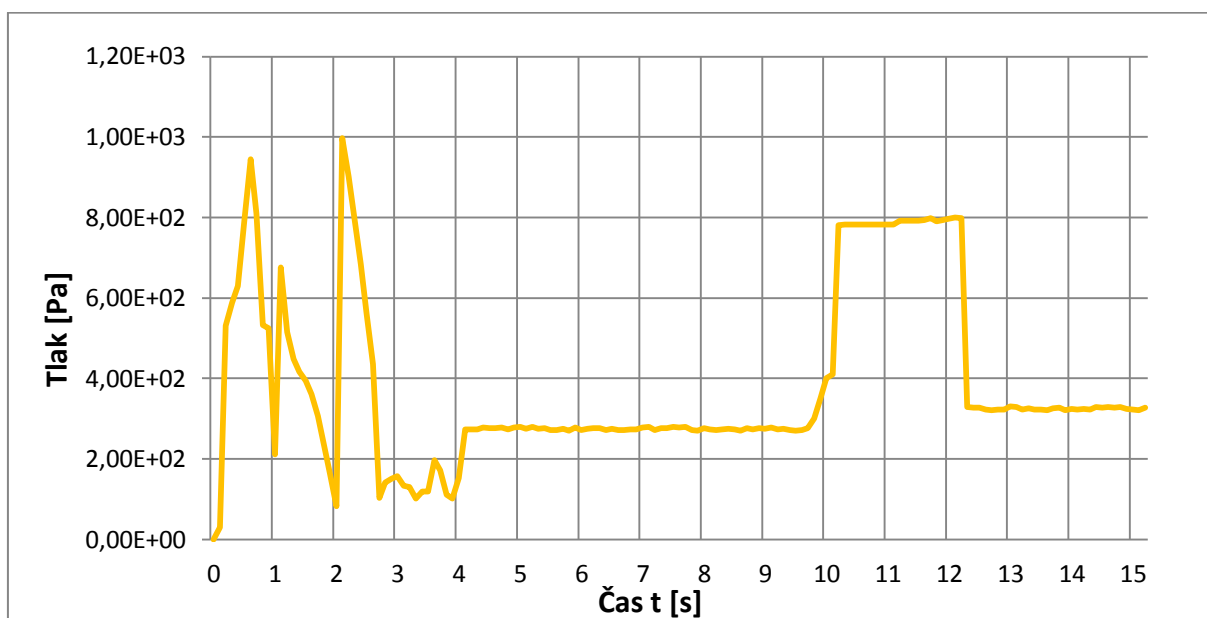


Následující tabulka 5.3 udává přehled hodnot výše diskutovaných koeficientů odporu po ustálení při vjezdu do tunelu.

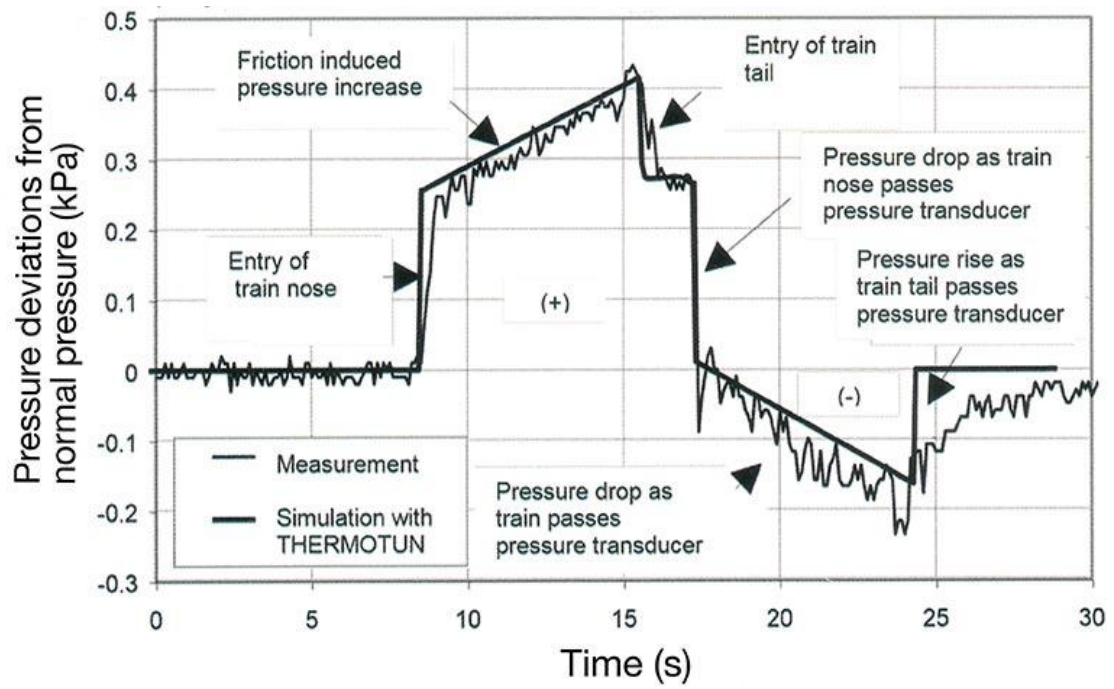
Součinitel	$C_x$	$C_y$	$C_z$
Hodnota [1]	1,27	0,025	0

Tabulka 5.3 Průběh koeficientů odporu při průjezdu volným prostorem

Obrázek 5.12 znázorňuje průběh tlaku při vjezdu do tunelu. V úseku od 0 do 4 s opět dochází k vývinu proudění, poté však dochází k ustálení. Jednotka projíždí volným prostorem. Tlak dosahuje hodnoty  $p = 278$  Pa. V čase  $t=10$  s dochází k prudkému nárůstu tlaku v důsledku vjezdu do tunelu. Následně dojde ke krátkému ustálení tlaku okolo hodnoty 800 Pa. V čase  $t=12$  s však náhle dochází k prudkému tlakovému poklesu až na hodnotu  $p = 320$  Pa. To je okamžik, kdy do tunelu vjíždí konec jednotky. Následující obrázek 5.13 znázorňuje průběh tlaku při vjezdu do tunelu dle zdroje [29]. Lze vidět podstatné rozdíly, které budou důsledkem mnohých zjednodušení, jichž bylo během zpracování užito. Pro přesnější výsledky by bylo zřejmě potřeba kvalitnější výpočetní software a delší čas na podrobné zpracování celé úlohy.



Obrázek 5.12 Průběh tlaku na čele jednotky při průjezdu tunelem



Obrázek 5.13 Průběh tlaku na čele vlaku při vjezdu do tunelu, převzato z [29]

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo řešit proudění vznikající v okolí vysokorychlostní kolejové jednotky při průjezdu třemi uvažovanými situacemi. V první z nich se vlak pohyboval volným prostorem, ve druhé okolo protihlukové stěny a ve třetí v tunelu. Problematika aerodynamických jevů vystupujících v těchto situacích byla diskutována v rešeršní části práce, v níž byla pozornost zaměřena na vznik tlakových vln při průjezdu tunelem, míjení se vozidel s překážkami a na aerodynamický odpor. Samotnému řešení uvedených úloh byla věnována druhá polovina práce.

Ze získaných výsledků vyplynulo, že při průjezdu volným prostorem dosahuje koeficient odporu  $C_x$  hodnoty 0,7. Tato hodnota poskytuje poměrně dobré srovnání pro následující úlohy, neboť průjezd volným prostředím představuje základní typ pohybu, k němuž ostatní představují modifikaci. Při pohybu okolo protihlukové stěny šlo z grafického vyjádření výsledků vyzorovat, že v okamžiku setkání s bariérou dochází k razantnímu nárůstu odporového koeficientu v důsledku zmenšení prostoru v okolí jednotky.  $C_x$  pro tento případ vyšlo 0,92. Stejná situace nastala i při průjezdu tunelem, kdy bylo dosaženo hodnoty 1,27. Získané výsledky byly pro přehlednost znázorněny pomocí grafů. Kromě koeficientu  $C_x$  byly stanovovány i hodnoty koeficientů  $C_y$  a  $C_z$  a také tlak na čele jednotky. Ten byl rovněž zpracován graficky. Při řešení byla aplikována řada zjednodušení, jež poskytují dostatek prostoru pro případné rozšíření těchto úloh o další vlivy či aerodynamické jevy. Předmětem dalších snah by tak například mohlo být zahrnutí bočního proudění, přičemž dosažené výsledky by opět mohly být diskutovány s výsledky uvedenými v této práci.

## Použitá literatura

- [1] RAGHUNATHAN, R.S., KIM, H.D., SETOGUCHI, T. *Aerodynamics of high-speed railway train*. Progress in Aerospace Sciences [online]. Elsevier. August-October 2002, 38(6-7), 469-514. [vid. 2017-05-12]. ISSN 0376-0421. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042102000295>
- [2] MORKOWSKY, M. *Ein ICE 3 in Köln/Messe Deutz*. Bahn.startbilder.de [online]. [vid. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://bahn.startbilder.de/bild/Deutschland~ICE~BR+403+ICE+3/102202/ein-ice-3-in-koelnmesse-deutz.html>
- [3] ŠIROKÝ, J. *Mechanika v dopravě* [online]. 1.vyd. VŠB-TU Ostrava, 2004. 121 s. [vid. 2017-04-24]. ISBN 80-2480-536-7. Dostupné z: [http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/skr\\_mv.pdf](http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/skr_mv.pdf)
- [4] ZÍTKO, M. *Co spotřebuje vagón?*. Vagóny. Vagony.cz [online]. [vid. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.vagony.cz/vagony/energie.html>
- [5] BREBBIA, C. A. TOMII, N. TZIEROPOULOS, P. NING, B. *Computers in Railways XIII. Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems* [online]. 1st ed. WIT Press, © 2013, 755 s. [vid. 2017-05-12]. ISBN 978-1-84564-617-2. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=f7eE3ZaTdMcC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gs\\_bse\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?id=f7eE3ZaTdMcC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gs_bse_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- [6] PROFILLIDIS, V.A. *Railway Management and Engineering* [online]. 3rd ed. Ashgate Publishing, © 2006, 469 s. [vid. 2017-05-12]. ISBN 0-7546-4854-0 Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=MumsYYDF2xAC&pg=PA351&lpg=PA351&dq=train+resistance+tg&source=bl&ots=vHkY2oUR5D&sig=6lcYkOzNOKecKVGeSTHeKC-NSWc&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjzuZmqh4bSAhWEExoKHUnWBd0Q6AEINTAD#v=onepage&q=train%20resistance%20tg&f=false>
- [7] GREGORA, S. OUŘEDNÍČEK, J. *Elektrotechnika a zabezpečovací technika v dopravní infrastruktuře* [online]. 1.vyd. Univerzita Pardubice, 2005. 128 s. [vid. 2017-05-18]. ISBN 80-7194-768-7. Dostupné z: <http://dmml4.wz.cz/EZDSkripta.pdf>

- [8] *Oben: Konventioneller Zug Mitte: Gliderzug mit Jakobs-Drehgestellen Unten: Gliederzug System Talgo*. Wikiwand [online]. [vid. 2017-04-24]. Dostupné z: [http://www.wikiwand.com/de/Gliederzug\\_\(Schiene\)](http://www.wikiwand.com/de/Gliederzug_(Schiene))
- [9] BOSCHETTI, G. MARISCOTTI, A. *The Parameters of Motion Mechanical Equations as Source of Uncertainty for Traction Systems Simulation* [přednáška]. Busan: XX IMEKO World Congress. September 2012 [online]. [vid. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.imeko.org/publications/wc-2012/IMEKO-WC-2012-TC3-P20.pdf>
- [10] POHL, J. *Trakční mechanika* [přednáška]. Praha: Fakulta strojní ČVUT. březen 2016.
- [11] HRABÁČEK, J. *Periodická doprava na dopravních sítích a její optimalizace* [online]. Pardubice, 2010. Dizertační práce. Univerzita Pardubice. Dopravní fakulta Jana Pernera. [vid. 2017-05-12]. Dostupné z: [http://dspace.upce.cz/bitstream/handle/10195/38468/HrabacekJ\\_Periodicka\\_doprava\\_PD\\_2010.pdf?sequence=4](http://dspace.upce.cz/bitstream/handle/10195/38468/HrabacekJ_Periodicka_doprava_PD_2010.pdf?sequence=4)
- [12] SPIRYAGIN, M. COLE, C. QUAN SUN, Y. MCCLANACHAN, M. SPIRYAGIN, V. MCSWEENEY, T. *Design and Simulation of Rail Vehicles*. [online]. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, © 2014, 337 s. [vid. 2017-05-12]. ISBN 978-1-4665-7567-7. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=1mXSBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbg\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?id=1mXSBQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbg_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- [13] *Carbon Impacts of HS2*. Factor affecting carbon impacts of HSR. Greengauge21.net [online]. Ver. 3.1. 28.11.2001. [vid. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.greengauge21.net/wp-content/uploads/SYSTRA-Factors-affecting-HSR-carbon-impacts.pdf>
- [14] LUKASZEWICZ, P. *Energy Consumption and Running Time for Trains*. Modelling of running resistance and driver behaviour based on full scale testing [online]. Stockholm, 2009. Doctor thesis. Royal Institute of Technology. Department of Vehicle Engineering. [vid. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:8954/FULLTEXT01.pdf>
- [15] MOCHIZUKI, A. *Conventional Line Speed Increases and development of Shinkansen*. Breakthrough in Japanese Railways 7 [online]. Japanese Railway & Transport Review. March 2011, 57(7), 42-49. [vid. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://www.ejrcf.or.jp/jrtr/jrtr57/pdf/42-49web.pdf>

- [16] TEUTSCHMANN, H. *SNCF-TGV 4707 im HB Zürich*. Bahnbilder.de [online]. [vid. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://www.bahnbilder.de/bild/frankreich~tgv~duplex-euroduplex-rame-201-289-701-825-4701-4730/871410/sncf---tgv-4707-im-hb.html>
- [17] POHL, J. *Rychlá železniční osobní doprava* [přednáška]. Praha: Fakulta dopravní ČVUT. 2008 [online]. [vid. 2016-12-12]. Dostupné z: <http://vrt.fd.cvut.cz/data/prednasky/pohl2008.pdf>
- [18] KRYLOV, V.V. TELFORD, T. *Noise and Vibration from High-speed Trains* [online]. 1st ed. Thomas Telford Publishing, © 2001, 435 s. [vid. 2017-05-12]. ISBN 0-7277-2963-2. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=2By9AgZYFLAC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?id=2By9AgZYFLAC&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- [19] POPL, J. *Vysokorychlostní vlaky a aerodynamika*. [online]. Praha: Fakulta dopravní ČVUT. 2013/2014. [vid. 2017-05-12]. Dostupné z: [http://vrt.fd.cvut.cz/data/seminarky/2013zs/popl\\_odpory-text.pdf](http://vrt.fd.cvut.cz/data/seminarky/2013zs/popl_odpory-text.pdf)
- [20] THOMAS, D. *Lateral Stability of High-Speed Trains at Unsteady Crosswind*. [online]. Stockholm, 2009. Licentiate Thesis in Railway Technology. Royal Institute of Technology. Department of Aeronautical and Vehicle Engineering. [vid. 2017-05-12]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:274978/FULLTEXT01.pdf>
- [21] SUZUKI, M. TANEMOTO, K. MAEDA, T. *Aerodynamic characteristics of train/vehicles under cross winds*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics [online]. Elsevier. January 2003, 91(1-2), 209-218. [vid. 2017-05-12]. ISSN 0167-6105. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016761050200346X>
- [22] GREEN, A. *German Aerospace Centre investigates ultra high-speed*. Railjournal.com [online]. 15.7.2013 [vid. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.railjournal.com/index.php/high-speed/german-aerospace-centre-investigates-ultra-high-speed.html>
- [23] FUJII, K. OGAWA, T. *Aerodynamics of high speed trains passing by each other*. Computers & Fluids [online]. Elsevier. November 1995, 24(8), 897-908. [vid. 2017-05-12]. ISSN 0045-7930. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0045793095000247>

- [24] SUN, Z. ZHANG, Y. GUO, D. YANG, G. LIU, Y. *Research on Running Stability of CRH3 High Speed Trains Passing by Each Other*. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics [online]. 19.11.2014, 140-157 [vid. 2015-05-12]. ISSN 1997-003X Dostupné z:  
<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/19942060.2014.11015504?needAccess=true>
- [25] VOGIATZIS, K. KOUROUSSIS, G. *Speed relation for the three noise sources: sound pressure level as a function of train speed*. Airborne and Ground-Borne Noise and Vibration from Urban Rail Transit Systems. Intechopen.com [online]. [vid. 2015-05-12]. Dostupné z:  
<https://www.intechopen.com/books/urban-transport-systems/airborne-and-ground-borne-noise-and-vibration-from-urban-rail-transit-systems>
- [26] ČERNÝ, M. *Akustický výkon zdroje hluku*. Physics.fme.vutbr [online]. 29.1.2013. [vid. 2017-06-12]. Dostupné z:  
<http://physics.fme.vutbr.cz/~mcerny/BF/labiny/Akvykon.pdf>
- [27] POHL, J. *Vědeckotechnický sborník ČD č.34. Systémové řešení hluku železniční dopravy*. [online]. září 2012. [vid. 2017-05-12]. Dostupné z:  
<https://vts.cd.cz/documents/142547/142769/3412.pdf/a972d0dc-3d65-43e1-a846-4e5af43a370f>
- [28] ZHU, J. *Aerodynamic Noise of High-speed Train Bogies* [online]. Southampton, 2015. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. University of Southampton. Faculty of Engineering and the Environment. [vid. 2017-06-12]. Dostupné z:  
[https://eprints.soton.ac.uk/379830/1/Thesis\\_Aerodynamic%2520Noise%2520of%2520High-speed%2520Train%2520Bogies\\_JianyueZhu.pdf](https://eprints.soton.ac.uk/379830/1/Thesis_Aerodynamic%2520Noise%2520of%2520High-speed%2520Train%2520Bogies_JianyueZhu.pdf)
- [29] RAVN, S. REINKE, P. *Tunnel aerodynamics of the magnetic levitation high-speed link in Munich (Maglev)*. Consequences for pressure comfort, micropressure waves, traction power and pressure loads. Hbi.ch [online]. 2005 [vid. 2016-12-12]. Dostupné z:  
[http://www.hbi.ch/fileadmin/downloads/pdf/publikationen/20\\_Aerodynamics-MAGLEV\\_Fachzeitschrift-2005.pdf](http://www.hbi.ch/fileadmin/downloads/pdf/publikationen/20_Aerodynamics-MAGLEV_Fachzeitschrift-2005.pdf)
- [30] ORELLANO, A. *Aerodynamics of High Speed Trains* [přednáška] Stockholm: Department of Mechanics KTH. 8.5.2012 [online]. [vid. 2017-05-12]. Dostupné z:  
[https://www.mech.kth.se/courses/5C1211/Orellano\\_2012.pdf](https://www.mech.kth.se/courses/5C1211/Orellano_2012.pdf)

[31] *Ansys CFX*. Techsoft-Eng [online] [online]. [vid. 2017-05-12]. Dostupné z:  
<http://www.techsoft-eng.cz/produkty/ansys/ansys-cfx/>