



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

Fakulta stavební  
*Katedra mechaniky*

Bakalářská práce

**Kategorizace ocelových železničních mostů v ČR podle  
aerodynamických vlastností**

**Categorization of steel railway bridges in CR with  
respect to its aerodynamic properties**

Studijní program:

Stavební inženýrství

Obor:

Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.  
doc. Ing. Stanislav Pospíšil, Ph.D.

---

**Karolína Šorelová**

Praha 2017



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: ŠORELOVÁ	Jméno: Karolína	Osobní číslo: 410823
Zadávající katedra: Katedra mechaniky		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Kategorizace ocelových železničních mostů v ČR podle aerodynamických vlastností	
Název bakalářské práce anglicky: Categorization of steel railway bridges in CR with respect to its aerodynamic properties	
Pokyny pro vypracování: Vypracujte bakalářskou práci v daném tématu. Práce bude obsahovat: -stručný přehled daného tématu ve světě a především v ČR (články i normy) -základy nauky o stavební aerodynamice-charakteristiky větru, vztah zatížení/konstrukce, základní fyzikální vztahy -popis experimentu, obrazový i textový -stanovení aerodynamických součinitelů (hlavní úkol) -závěry a rozřídění daných modelů mostů dle jejich aerodynamických vlastností	
Seznam doporučené literatury: M. Pirner, O. Fischer: Zatížení staveb větrem, ČKAIT ČKAIT: Studie budov a konstrukcí ve větrných tunelech (překl. M. Jirsák)	
Jméno vedoucího bakalářské práce: prof. Ing., Jiří Máca, CSc doc. Ing. Stanislav Pospíšil, Ph.D. (ÚTAM AV ČR)	
Datum zadání bakalářské práce: 6.10.2016	Termín odevzdání bakalářské práce: 15.01.2017
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
-----------------------	---------------------

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Karolína Šorelová

.....

.....

## Poděkování

Ráda bych poděkovala oběma vedoucím této bakalářské práce. A to panu doc. Ing. Stanislavu Pospíšilovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, trpělivost a velmi přínosné konzultace. A panu prof. Ing. Jiřímu Mácovi, CSc. za odborné finální posouzení práce.

Dále bych chtěla poděkovat prof. Ing. Sergeii Kuznetsovovi, DrSc. za odborný dozor a rady při měření ve větrném tunelu v Telči. Také děkuji Ing. Arsenii Trushovi za asistenci a poskytnutí užitečných informací ohledně tunelu a jeho zařízení.

Děkuji i doc. Ing. Pavlovi Ryjáčkovi, Ph.D. (a zároveň děkuji státní organizaci SŽDC) za svolení k využití výsledků a obrazových materiálů probíhajícího projektu *„Pokročilé metody posuzování existujících ocelových mostů na účinky zatížení větrem, brzdných a rozjezdových sil“* k analýze obsažené v této bakalářské práci.

Ráda bych také poděkovala Ing. Michaelovi Macháčkovi, který se se mnou podělil o své zkušenosti s měřením ve větrném tunelu a o své znalosti týkající se dané problematiky.

Nakonec děkuji svým rodičům za korekci textu a podporu ve všem, co dělám.

## **Anotace:**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou zatížení větrem, zejména se soustřeďuje na statické (kvazistatické) účinky větru na konstrukce železničních mostů.

Cílem práce je stanovení aerodynamických součinitelů vybraných typů mostů a jejich následné rozřídění do kategorií dle aerodynamických vlastností. Jednotliví aerodynamičtí součinitelé jsou stanoveni na základě experimentálního měření ve větrném tunelu pro každý model mostu zvlášť. Takto je zkoumáno celkem sedm vybraných reprezentativních mostů nacházejících se na území České republiky.

## **Klíčová slova:**

aerodynamika, aerodynamické součinitele, experiment, kategorizace mostů, větrný tunel, zatížení větrem

## **Annotation:**

This bachelor thesis provides a general introduction to wind load and especially focuses on static (quasi static) wind effects on railway bridges.

The main objective of the thesis is to determine the aerodynamic coefficients of selected bridges and sort them into categories according to the aerodynamic properties. Respective aerodynamic coefficients are determined experimentally in the wind tunnel. Measurement is done for each bridge model separately and there are seven selected representative bridges in total being examined. All of them are located in the Czech Republic.

## **Keywords:**

aerodynamics, aerodynamic coefficients, experiment, bridge categorization, wind tunnel, wind load

## Seznam použitých veličin

$A_{ref}$	referenční plocha
$A_i$	součet ploch všech dalších prvků zasahujících do návětrné oblasti
$b$	charakteristický rozměr konstrukce, popř. překážky
$B$	šířka modelu mostu
$c_D$	aerodynamický součinitel čelního odporu
$c_L$	aerodynamický součinitel vztlaku
$c_M$	aerodynamický součinitel momentu
$d$	průměr obtékaného válce
$D$	výška modelu mostu
$g$	tíhové zrychlení
$k_f$	koeficient tření
$l$	rameno síly
$L$	délka úsekového modelu mostu
$m$	hmotnost závaží
$m_m$	střední molekulová hmotnost vlhkého vzduchu
$p$	celkový tlak vzduchu
$p_i$	parciální tlak
$p_D$	parciální tlak vodní páry
$p_D'$	tlak sytých vodních par při příslušné teplotě
$p_L$	parciální tlak suchého vzduchu
$p_s$	statický tlak naměřený Prandtl - Pitotovo trubicí
$R$	univerzální plynová konstanta
$r_D$	plynová konstanta pro vodní páru
$r_L$	plynová konstanta pro suchý vzduch
$Re$	Reynoldsovo číslo
$s$	vzdálenost mezi válci
$t$	teplota
$T$	termodynamická teplota
$\Delta U$	změna elektrického napětí na čidle
$v$	rychlost vzdušného proudu
$\alpha$	úhel náběhu
$\rho$	měrná hmotnost vzduchu
$\nu$	kinematická vazkost vzduchu
$\varphi$	relativní vlhkost vzduchu

# Obsah

Úvod.....	9
<b>1. Vítr a jeho vlastnosti .....</b>	<b>10</b>
1.1 Mezní vrstva.....	10
1.2 Střední rychlost větru a fluktuace.....	10
1.3 Reynoldsovo číslo .....	11
1.4 Vlastnosti větru .....	11
<b>2. Zatížení větrem .....</b>	<b>13</b>
2.1 Kvazistatické zatížení větrem.....	13
2.1.1 Čelní odpor .....	14
2.1.2 Vztlak .....	14
2.1.3 Moment .....	14
2.2 Dynamické zatížení větrem .....	15
2.2.1 Odtrhávání vírů .....	15
2.2.2 Oválování .....	16
2.2.3 Buffeting.....	17
2.2.4 Galloping.....	18
2.2.5 Kroutivě ohybový flutter.....	18
2.3 Zatížení mostů .....	18
<b>3. Měření ve větrných tunelech .....</b>	<b>20</b>
3.1 Aerodynamický tunel .....	20
3.2 Modely .....	21
3.3 Referenční plocha.....	21
3.4 Teorie blokování .....	23
<b>4. Sestavení modelu pro experiment .....</b>	<b>24</b>
4.1 Klimatický tunel Vincenc Strouhal .....	24
4.2 Použité přístroje.....	25
4.3 Použité modely mostů .....	28
4.3.1 Příhradový most s dolní mostovkou.....	28
4.3.2 Příhradový most s mezilehlou mostovkou .....	30
4.3.3 Příhradový most s horní mostovkou.....	32
4.3.4 Plnostěnný most s dolní mostovkou.....	34
4.3.5 Plnostěnný most s mezilehlou mostovkou .....	36

4.3.6	Plnostěnný most bez mostovky .....	37
4.3.7	Plnostěnný most s přímým upevněním kolejnic.....	39
4.4	Použité modely vlaků .....	41
4.4.1	Motorová souprava Regionova řady 814 – 914 .....	42
4.4.2	Krytý vůz Kils 12 .....	43
4.4.3	SGS s kontejnerem High - Cube .....	44
4.4.4	471 City Elefant .....	45
<b>5.</b>	<b>Experimentální měření aerodynamických součinitelů.....</b>	<b>46</b>
5.1	Kalibrace aerodynamických vah .....	46
5.2	Znaménkové konvence.....	50
5.3	Rychlostní profily větru pomocí CTA .....	50
5.4	Součinitel čelního odporu válce .....	51
5.5	Volba vhodné rychlosti proudění pro experiment.....	52
5.6	Experimentální měření aerodynamických součinitelů mostů.....	53
5.7	Vizualizace.....	54
<b>6.</b>	<b>Výsledky experimentálního měření ve větrném tunelu .....</b>	<b>55</b>
6.1	Aerodynamické součinitele mostů .....	55
6.1.1	Prostřední žleb - hlavní pole.....	55
6.1.2	Červená.....	57
6.1.3	Znojemský viadukt.....	59
6.1.4	Babín .....	62
6.1.5	Prostřední žleb - vedlejší pole .....	64
6.1.6	Brniště .....	66
6.1.7	Jizera .....	70
6.2	Porovnání mostů.....	72
	<b>Závěr.....</b>	<b>75</b>
	<b>Literatura a použité zdroje.....</b>	<b>76</b>
	<b>Přílohy .....</b>	<b>78</b>
	Příloha 1: Tabulky výsledků měření ve větrném tunelu.....	78
	Příloha 2: Tabulky s porovnáním výsledků.....	81



# Úvod

V současné době se čím dál více rozrůstá trend zvyšování budov a zvětšování rozpětí mostů či lávek. Zároveň je zde snaha o snížení hmotnosti těchto konstrukcí použitím lehkých materiálů. Vznikají tak dlouhé štíhlé (a lehké) konstrukce, u kterých výrazně roste význam zatížení větrem a vzniká tak nutnost konstrukci posoudit na statické a dynamické účinky větru.

Obor aerodynamiky od svých prvopočátků prodělal různé stupně vývoje, než se dostal do podoby, jakou má dnes. Během této doby vyšlo i mnoho publikací, které se působením větru na konstrukce odborně zabývají. Mezi světové publikace věnující se aerodynamice mostů patří např. *Theory of Bridge Aerodynamics* (Einar N. Strømmen, 2010). Z české literatury stojí za zmínku *Zatížení staveb větrem* (O. Fischer, M. Pirner, 2003). Vedle knižních forem vychází hned několik světových periodik, které publikují převážně články se zaměřením na problematiku větru. Jedním takovým je např. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (Elsevier B.V., 1975 - ), který je jeden z původních časopisů, jako další můžeme uvést například žurnál *Wind and Structures* (Techno-Press, 1998 -).

K navrhování a posuzování konstrukcí na zatížení větrem existují normy, které stanovují jak danou problematiku řešit. Mezi známou světovou normu zmiňující zatížení větrem, která má svou působnost zejména v USA, patří *AASHTO (Bridge Design Specifications, Section 3.8 Wind load)*. V Evropě je jednou z hlavních norem *EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on Structures - Part 1-4: General actions - Wind actions*, která se běžně používá i v České republice a více méně tím „nahradila“ starou normu *ČSN 73 0035*.

První kapitola této práce se zabývá základními charakteristikami větru a potřebnými fyzikálními vztahy. Druhá kapitola pojednává o zatížení větrem a jsou zde stručně popsány i některé aeroelastické jevy. Třetí kapitola se věnuje základním pojmům při měření ve větrném tunelu. Čtvrtá kapitola popisuje prostředí, ve kterém probíhala experimentální měření. Jsou zde stručně charakterizovány i reprezentativní mosty a vybrané železniční vozy. Pátá kapitola uvádí postupy při experimentálním měření aerodynamických koeficientů v obrazové i textové podobě. V šesté kapitole jsou obsaženy a vzájemně porovnány dosažené výsledky měření. Závěrem práce je shrnutí výsledků experimentálních měření a jejich význam pro budoucí zkoumání.

# 1. Vítr a jeho vlastnosti

Vítr je definován jako proudění vzduchu, které je způsobeno tepelnými a tlakovými poměry v atmosféře. Tento pohyb vzduchu způsobuje obtékání zemského povrchu a všech překážek na něm postavených. Kromě proudění se vyskytuje i vírové pole, které vzniká na pomezí (styku) dvou proudů o různých rychlostech. V případě, že takovéto vírové pole dosáhne až na zem, vznikají tornáda, cyklony a tajfuny.

## 1.1 Mezní vrstva

Přemísťování vzduchových mas v zemské atmosféře ovlivňují zejména sluneční teplo, zemská přitažlivost, setrvačné síly od rotace Země a utváření jejího povrchu. Tyto vlivy vyvolávají přemísťování mas vzduchu ve velkých výškách (nad 300 – 600m) zhruba stálou rychlostí a nazýváme je větry gradientní. Těsně u zemského povrchu je rychlost větru nulová. Oblast, kde dochází k vyrovnání rychlosti od nuly těsně u povrchu až po rychlost gradientního větru, se nazývá mezní vrstva. Velikost této vrstvy a kvalita proudění se liší v závislosti na drsnosti terénu. Pokud rychlost pohybu jednotlivých vrstev stoupá s uspořádanými dráhami proudění, jedná se o mezní vrstvu laminární. Takový charakter mezní vrstvy může nastat při obtékání hladkých ploch a obvykle jen při malých rychlostech. Při vyšších rychlostech a při obtékání drsných povrchů nebo hranatých těles dochází ke vzniku většího množství izolovaných vírů a proudění je neuspořádané povahy. V takovémto případě hovoříme o mezní vrstvě turbulentní.

## 1.2 Střední rychlost větru a fluktuace

Pohyb přízemních větrů je narušován nerovnostmi zemského povrchu, přírodními či umělými překážkami a stavbami. To má za následek, že proudění je turbulentního charakteru a nastává problém, jelikož rychlost a směr větru už není v čase konstantní. Proto je nutno na vítr nahlížet jako na náhodný proces, který lze popsat pouze pomocí pravděpodobnosti. Stanovuje se střední rychlost větru, která je závislá na smluvní integrační době. Rozdíl rychlosti větru a střední složky rychlosti je potom nazýván proměnná neboli fluktuační složka rychlosti. Ta je reprezentována intenzitou turbulence.

Pro získání těchto hodnot musíme vycházet z měření skutečného větru za různých geografických a meteorologických podmínek.

### 1.3 Reynoldsovo číslo

Režim obtékání tělesa obecného tvaru je určen intenzitou turbulence, drsností povrchu obtékaného tělesa a velikostí bezrozměrného parametru zvaného Reynoldsovo číslo. Reynoldsovo číslo je definováno vztahem (1), kde  $v$  je rychlost vzdušného proudu,  $b$  je charakteristický rozměr překážky (např. průměr válce) a  $\nu$  je kinematický součinitel tření (kinematická vazkost), který je při teplotě 15°C a tlaku 0,098 MPa roven  $1,455 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ .

$$Re = \frac{v \cdot b}{\nu} \quad (1)$$

Při modelování v aerodynamickém tunelu je důležité, abychom splnili podobnost režimu obtékání na skutečné konstrukci. Toho se dá docílit, pokud na modelu dodržíme stejnou hodnotu  $Re$  jako na reálné konstrukci. To se nám však ne vždy podaří splnit a zvláště pro velké konstrukce by bylo potřeba na zmenšených modelech provádět měření při velmi vysokých rychlostech. Je ale možné určit interval, ve kterém je režim obtékání tělesa téměř neměnný. Tyto kapitoly vznikly za přispění literatury [1],[2] a [3].

### 1.4 Vlastnosti větru

Z hlediska obtékaných staveb můžeme vzduch při rychlostech proudění odpovídajících rychlostem větru považovat za ideální a nestlačitelnou tekutinu. V ideální tekutině jednotlivé elementy působí mezi sebou pouze silami kolmými k dotykovým plochám, tedy neexistuje tření. Tato idealizace nám umožňuje používat jednoduché vztahy, jako je např. Bernoulliho rovnice (2), která vyjadřuje závislost, jak se při vodorovném proudění při zvětšování rychlosti proudu zmenšuje tlak v tekutině a naopak.

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + p + h g \rho = \text{konst.} \quad (2)$$

Atmosférický vzduch není čistě suchý vzduch, ale obsahuje jisté množství vody ve tvaru syté nebo přehřáté vodní páry, mlhy nebo jinovatky. Takováto směs se nazývá vlhký vzduch.

Měrná hmotnost vlhkého vzduchu se určí ze stavové rovnice, zde uvedena pro 1 kg vlhkého vzduchu (3), a Daltonova zákona (4).

$$p = \frac{R}{m_m} \rho T, \quad (3)$$

kde  $p$  je celkový tlak vzduchu,  $R$  je univerzální plynová konstanta 8,314 J/(Kmol),  $m_m$  je střední molekulová hmotnost vlhkého vzduchu,  $\rho$  je měrná hmotnost vlhkého vzduchu a  $T$  je termodynamická teplota v K.

$$p = \sum p_i, \text{ pro naše potřeby pak: } p = p_L + p_D \quad (4)$$

Podle Daltonova zákona je celkový tlak směsi plynů  $p$  dán součtem parciálních tlaků jednotlivých složek  $p_i$ . V našem případě sčítáme parciální tlak suchého vzduchu  $p_L$  a parciální tlak vodní páry  $p_D$ .

Úpravou těchto vztahů vznikne vztah pro měrnou hmotnost vlhkého vzduchu (5). Tento vztah byl použit pro výpočet měrné hmotnosti vzduchu během experimentálního měření.

$$\rho = \frac{p_L}{r_L T} + \frac{p_D}{r_D T} = \frac{1}{r_L T} [p - p_D \left(1 - \frac{r_L}{r_D}\right)] = \frac{1}{r_L T} (p - 0,378 \Phi p_D''), \quad (5)$$

kde  $r_L$  je plynová konstanta pro suchý vzduch rovna 287,11 J/(kgK),  $r_D$  je plynová konstanta pro vodní páru rovna 461,5 J/(kgK),  $\Phi$  je relativní vlhkost vzduchu, pro kterou platí vztah (6) a  $p_D''$  je tlak sytých vodních par při příslušné teplotě, vypočten ze vztahu (7). [4]

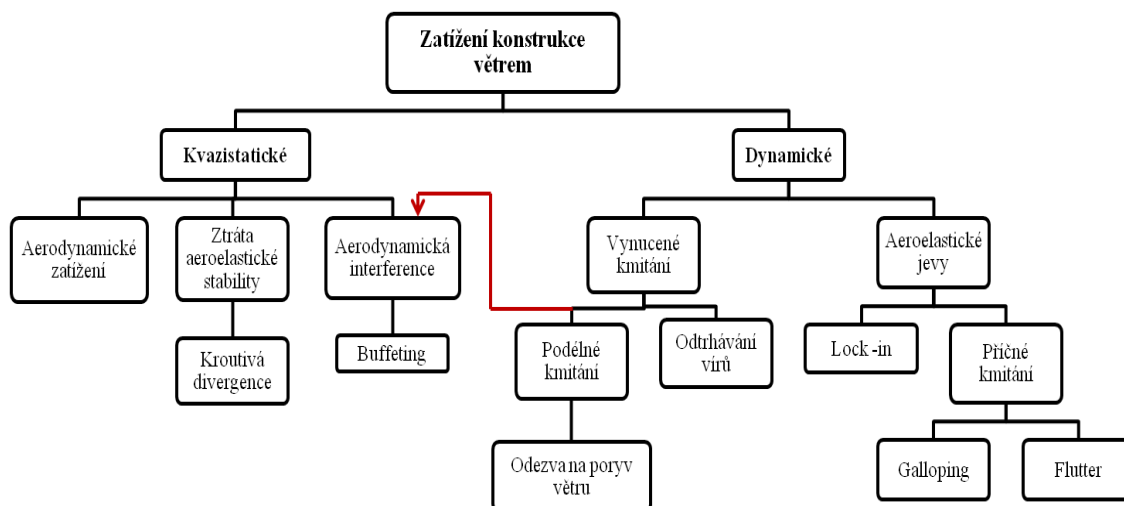
$$\Phi = \frac{p_D}{p_D''} \quad (6)$$

$$p_D'' = 610,78 e^{\frac{17,2694t}{t+238,3}}, \quad (7)$$

kde  $t$  je teplota v °C. Vzorec je získán ze zdroje [5].

## 2. Zatížení větrem

Zatížení větrem a vlivy větru lze rozdělit podle závislosti na čase na dva základní typy. Na účinky v čase neproměnné, neboli kvazistatické působení větru a na účinky v čase proměnné, tedy dynamické působení větru.



Obr. 1 Schéma rozdělení zatížení větrem

### 2.1 Kvazistatické zatížení větrem

Statickým působením větru se rozumí jeho tlak v čase neproměnný a konstrukce na toto zatížení reaguje též odezvou v čase neproměnnou. Takový nepřetržitý výskyt větru však reálně neexistuje a proto míru stálosti posuzujeme poměrem doby trvání odezvy k době kmitu konstrukce a zavádíme pojem „kvazistatický“. Jestliže doba trvání odezvy je alespoň 100krát větší než perioda vlastního kmitání konstrukce, lze při analýze konstrukce na statický tlak předpokládat trvalý tok vzdušného proudu na ni narážející.

Řešení kvazistatického působení větru spadá do oboru aerodynamiky. Jedná se buď o stanovení dynamického tlaku, a to v dostatečném počtu bodů povrchu konstrukce, nebo se zjišťují tlakové síly a momenty působící na celou konstrukci. Určení tlakových sil a momentů, působících na skutečnou konstrukci, je teoreticky obtížné a mnohdy nemožné. Proto se obvykle stanovují na modelech v aerodynamickém tunelu ve formě aerodynamických součinitelů sil.

V experimentální části této práce se zabývám právě zjišťováním aerodynamických sil, působících na celou konstrukci - část (úsek) mostu, a stanovením příslušných aerodynamických součinitelů.

### 2.1.1 Čelní odpor

Působení kvazistatického větru se projevuje především v jeho hlavním (podélném) směru. Celkovou sílu působící na konstrukci ve směru větru pak lze vyjádřit pomocí výrazu (8), kde  $c_D$  je celkový aerodynamický součinitel čelního odporu a  $A_{ref}$  je referenční plocha (blíže viz kap. 3.3), v tomto případě se jedná o průmět konstrukce do roviny kolmé ke směru větru.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 c_D A_{ref} \quad (8)$$

Ze vztahu pak lze lehce vyjádřit výraz pro výpočet součinitele čelního odporu:

$$c_D = \frac{2F_D}{\rho v^2 A_{ref}} \quad (9)$$

### 2.1.2 Vztlak

Druhou důležitou statickou složkou účinku větru je síla kolmá k jeho směru. Je nazývána vztlakem a lze ji vyjádřit vztahem (10), kde  $c_L$  je aerodynamický součinitel vztlaku a  $A_{ref}$  je tentokrát průmět konstrukce do roviny rovnoběžné se směrem větru.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho v^2 c_L A_{ref} \quad (10)$$

Aerodynamický součinitel vztlaku se tedy vyjádří:

$$c_L = \frac{2F_L}{\rho v^2 A_{ref}} \quad (11)$$

### 2.1.3 Moment

Poslední hlavní složkou statického účinku větru jsou momenty aerodynamických tlaků, způsobujících moment hlavní výslednice sil k posuzovanému bodu (např. centra rotace). Vyjadřujeme jej obdobně jako v předchozích případech (12), kde  $c_M$  je aerodynamický součinitel momentu.

$$M = \frac{1}{2} \rho v^2 c_M A_{ref} \quad (12)$$

Dále vztah pro aerodynamický součinitel momentu:

$$c_M = \frac{2M}{\rho v^2 A_{ref}} \quad (13)$$

## 2.2 Dynamické zatížení větrem

Dynamickým zatížením označujeme tlaky větru, které jsou v čase proměnné. Především jde o účinek flukтуаční složky rychlosti na čelní rovinnou plochu obtékané konstrukce. Flukтуаční složka rychlosti větru se projevuje opakovanými nárazy, které při periodickém působení mohou u konstrukce vyvolat i rezonanční rozkmitání s konečnou amplitudou, případně samobuzené kmitání. Oddělení flukтуаční složky rychlosti větru je závislé na definici střední rychlosti větru.

Při řešení dynamického působení větru se zjišťuje buď proměnná složka dynamického tlaku v dostatečném počtu bodů povrchu konstrukce, nebo se stanovují dynamické složky tlakových sil a momentů, působících na celou konstrukci.

Podobně jako při stanovení tlaků nebo tlakových sil při kvazistatickém zatížení větrem je teoretické stanovení výsledných sil a momentů obtížné až nemožné a nahrazujeme jej měřeními na skutečných konstrukcích nebo na modelech ve větrném tunelu.

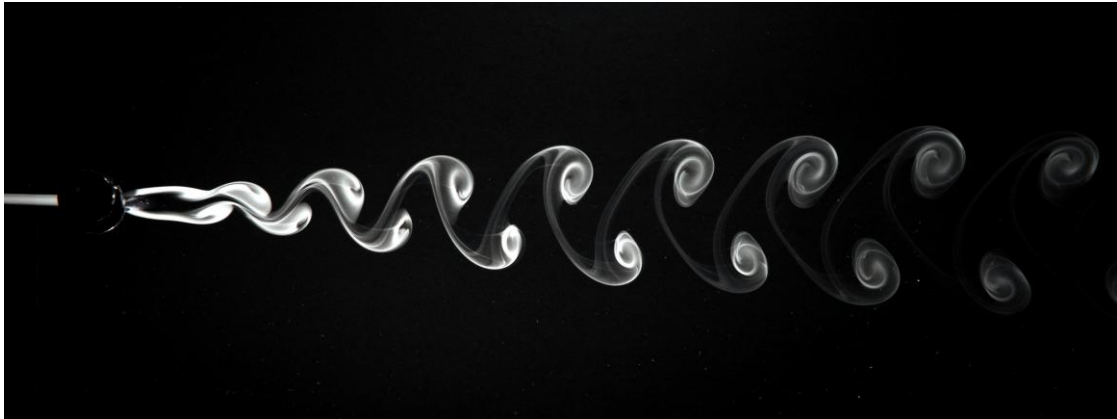
Konstrukci, která setrvává ve své poloze dané zatížením, podporovými reakcemi a vnitřními silami a která se po jakémkoli malém vychýlení (včetně změny deformace nebo změny amplitudy ustálených kmitů) do této rovnovážné polohy vrací, nazýváme (aerodynamicky) stabilní. Pokud se však po vychýlení konstrukce v proudě vzduchu převrhne, popř. zřítí, nebo pokud se amplitudy jejich kmitů dále zvětšují, hovoříme o aerodynamické případně aeroelastické nestabilitě.

Některé jevy aeroelastické stability mohou teoreticky nastat i při stálé rychlosti větru bez flukтуаční složky, nejsou tedy způsobeny dynamickým zatížením větru. Přesto jsou do této kategorie zahrnuty, protože ztráta aeroelastické stability při působení těchto jevů se projevuje jako dynamická odezva konstrukce.

### 2.2.1 Odtrhávání vírů

Při obtékání těles některých profilů se vytvářejí víry, v úplavu za válcem pak mluvíme o tzv. Karmánově řadě vírů (*obr. 2*). Tyto víry se za vhodných podmínek oddělují střídavě na obou stranách a zároveň vzniká periodická příčná síla. Síly vzniklé oddělováním vírů nejsou příliš velké, ale při rovnoměrném větru působí delší dobu s frekvencí, kterou těleso rozkmitávají v rovině kolmé ve směru větru. Odezvou tělesa je pak příčné kmitání.

Pokud je budící frekvence velmi blízká nebo shodná s vlastní frekvencí tělesa, či konstrukce, dochází k rezonanci a nastává kmitání s vysokou amplitudou. Je-li konstrukce tlumená, ustálí se amplituda na určité hodnotě a tou pak kmitá s velkým počtem zatěžovacích cyklů, což vede k zatížení konstrukce hlavně na únavu.

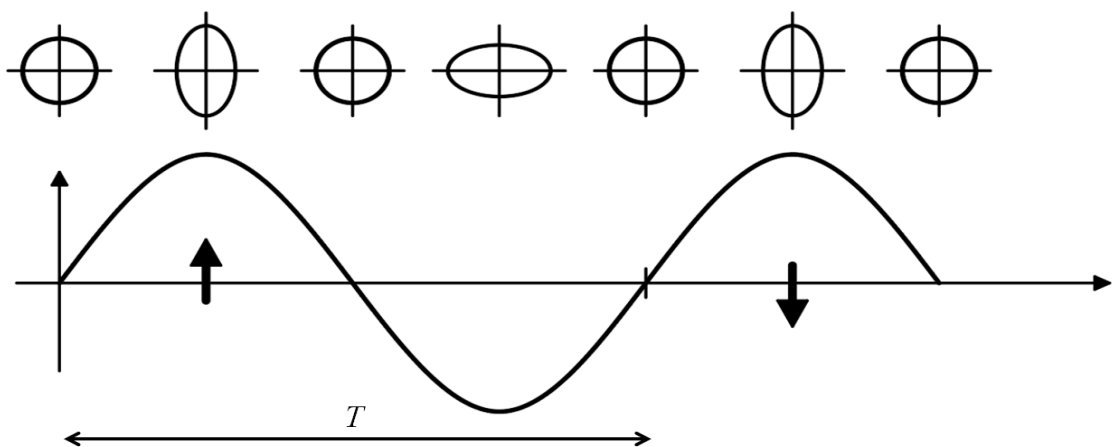


**Obr. 2 Karmánova řada vírů za válcem**

**Zdroj:** [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Karmansche\\_Wirbelstr\\_gro%C3%9Fe\\_Re.JPG#filehistory](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Karmansche_Wirbelstr_gro%C3%9Fe_Re.JPG#filehistory)

### 2.2.2 Oválování

U tenkostěnných těles tvaru válce, jako jsou např. vysoké ocelové nádrže, chladicí věže, zásobníky nebo komíny, odtrhávání vírů (popsáno v kap. 2.2.1) způsobuje deformaci v příčném řezu konstrukce. Kmitání zapříčiňuje, že původně kruhový tvar se mění na ovál. Pokud je vlastní frekvence konstrukce dvakrát větší než budící frekvence vírů, pak má ovál osy ve směru větru a kolmo na směr větru, ve kterých se periodicky mění (*obr. 3*). Když se frekvence vírů a konstrukce rovnají, pak se tvoří ovál s osami  $\pm 45^\circ$  od směru větru.



**Obr. 3 Oválování při vlastní frekvenci dvakrát větší než budící frekvence**

**Zdroj:** [1]

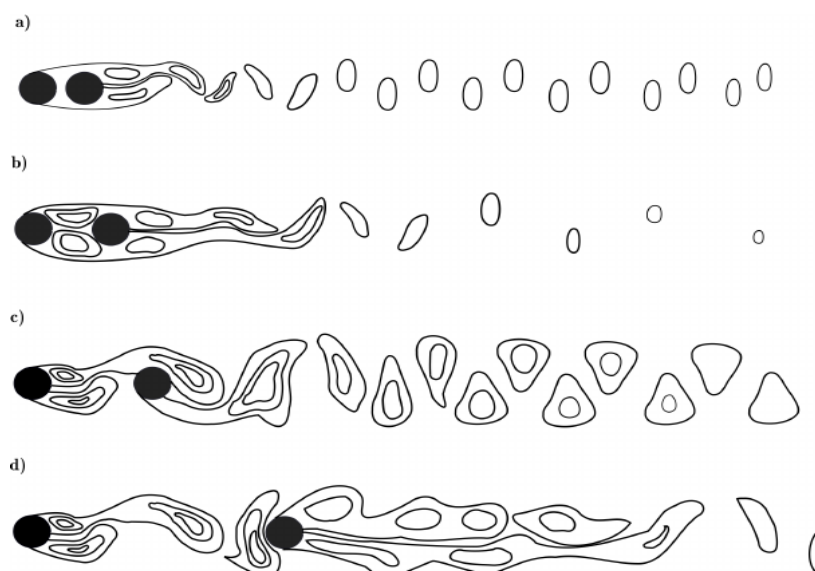


Dochází tedy zejména k namáhání pláště konstrukce a úlohu je třeba řešit jako napjatost skořepiny.

### 2.2.3 Buffeting

Anglické označení buffeting by se dalo přeložit jako „buzení střídavými nárazy z obou stran“. Tento jev nastává, když jedno těleso kmitá v závětrí za jiným tělesem. Za návětrným tělesem (tvaru válce) dochází k rozvíření proudu (viz kap. 2.2.1) s převažující jednou frekvencí. Pokud je v takto rozvířeném prostředí umístěno další těleso a jeho vlastní frekvence je blízká frekvenci proudění, dojde k jeho rozkmitání. Zvláště výrazně se jev projevuje, pokud je závětrné těleso také válec. Rovněž intenzita je větší, pokud jsou válce podobného průměru.

Víření mezi dvěma válci závisí na tom, jak daleko jsou válce postaveny od sebe (obr. 4). Pro a) platí, že  $s/d < 1.2 - 1.8$  (v závislosti na  $Re$ ), kde  $s$  je vzdálenost mezi válci a  $d$  je průměr válce. Pro takto malé vzdálenosti má proudění charakter stejný, jako při obtékání jednoho tělesa. V případě b), kde  $1.2 - 1.8 < s/d < 3.4 - 3.8$ , se jedná o tzv. kritickou oblast, kde nejvíce dochází k projevu buffetingu. U c) a d) je poměr větší než kritické hodnoty, proudění je stabilnější a můžeme pozorovat vznik Karmánových vírů za návětrným válcem. [6]



**Obr. 4 Víření mezi dvěma válci v závislosti na jejich vzdálenosti**  
Zdroj: [6]

Ve stavebnictví můžeme tento jev zaregistrovat na mostních stojkách, prutech příhradové konstrukce, komínech ve skupině apod.

## 2.2.4 Galloping

Gallopingem rozumíme jev, jehož základním rysem je pohyb, který není vázán na jiný pohyb a probíhá v rovině kolmé ke směru větru. V tomto případě však kmitání není způsobeno odtrháváním vírů, ale počátek těchto samobuzených kmitů může být vyvolán buď náhodným impulsem, nebo turbulencí větru. Energie pohybu tělesa je čerpána z pohybové energie větru.

Podmínkou nutnou - nikoliv však postačující - pro vznik gallopingu je, aby těleso mělo vhodný tvar příčného řezu. Může to být např. hranol směřující stěnou proti proudu, průřez „D“, mostní profily „H“, nebo stačí, aby měl profil drobné nepravidlosti tvaru. Takové nepravidlosti mohou být způsobeny námrazou, dešťovými kapkami, či stékajícími pramínky deště. Tyto jevy vyvolávají galloping zejména u lan, drátů, závěsů a kabelů. Existuje také tzv. úplavový galloping, který se vyskytuje u štíhlého tělesa, umístěného za jiným obtékaným tělesem zpravidla stejného charakteru. Těleso tedy kmitá v „úplavu“ onoho tělesa před ním. Často lze tento jev pozorovat např. v řadě komínů, nebo u paralelních venkovních potrubí.

## 2.2.5 Kroutivě ohybový flutter

Tento jev se často objevoval na nosných plochách letadel a vyskytuje se zejména u konstrukcí štíhlých a plochých, jako je právě tvar křídla letadla. Při tomto typu nestability dochází k výchylkám kolmo ke směru větru a zároveň k otáčení kolem aeroelastického středu. Pokud je tlumící síla konstrukce menší než výslednice aerodynamických sil, může dojít k neomezenému růstu amplitud kmitání a k destrukci konstrukce.

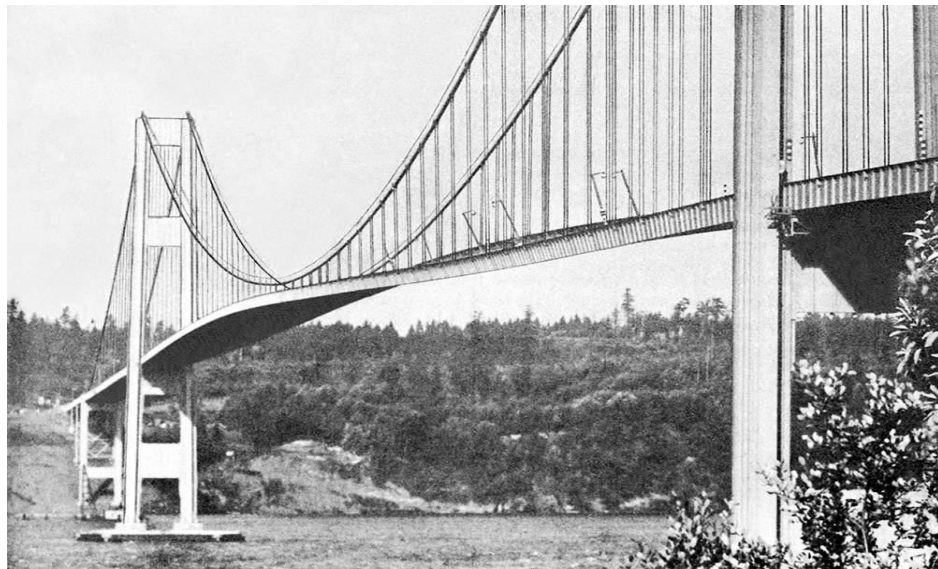
Některé ze stavebních konstrukcí, jako jsou např. mosty velkých rozpětí a lehké mosty, mají vhodné podmínky pro vznik kroutivě ohybového flutteru a je třeba důkladně ověřit podmínky stability.

## 2.3 Zatížení mostů

Právě na mostech se začaly poprvé projevat dynamické účinky větru, jednalo se zejména o poruchy litinových mostů z první poloviny minulého století a o zavěšené mosty velkých rozpětí, kde došlo dokonce i ke zřícení následkem rozkmitání větrem. Typickým příkladem zavěšeného mostu, který se takto zřítíl, je Tacoma Narrows (*obr. 5 a 6*). Příčinou destrukce mostu byl jev zvaný kroutivý flutter (více v literatuře [20]).

Kvazistatické působení větru na mosty se projevují jako čelní odpor (kap. 2.1.1), vztlak (kap. 2.1.2), klopný moment v rovině kolmé k podélné ose mostu (kap. 2.1.3) popř. jiné lokální účinky. Na základě poměru těchto složek můžeme určit možnost vzniku gallopingu (kap. 2.2.3), nebo kroutivě ohybového flutteru (kap. 2.2.5). Zde se tedy jedná o případ, kdy kvazistatické zatížení vyvolá dynamickou odezvu.

Kapitoly 2.1, 2.2 a 2.3 vznikly za přispění literatury [1], [2] a [3].



**Obr. 5 Rozkmitání mostu Tacoma Narrows**

**Zdroj:** [http://www.txstate.edu/news/news\\_releases/news\\_archive/2015/November-2015/TacomaNarrows110315.html](http://www.txstate.edu/news/news_releases/news_archive/2015/November-2015/TacomaNarrows110315.html)



**Obr. 6 Zřícení mostu Tacoma Narrows**

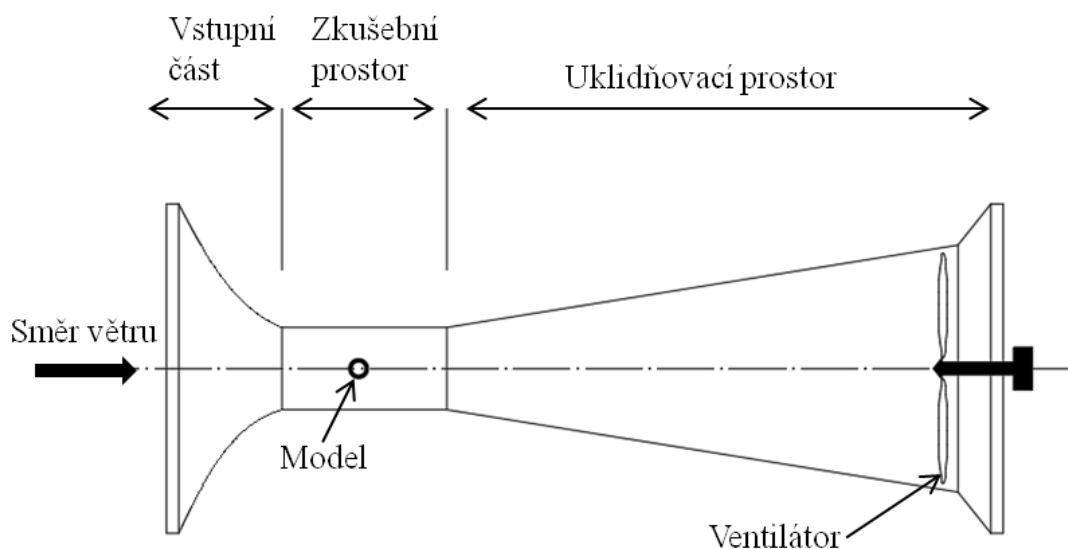
**Zdroj:** [http://www.txstate.edu/news/news\\_releases/news\\_archive/2015/November-2015/TacomaNarrows110315.html](http://www.txstate.edu/news/news_releases/news_archive/2015/November-2015/TacomaNarrows110315.html)

### 3. Měření ve větrných tunelech

Měření ve větrných tunelech je potřeba, pokud nemůžeme provést měření přímo na reálných konstrukcích nebo je geometrie konstrukce velmi složitá. Výhodou takového měření je, že můžeme přesně stanovit charakteristiky základního materiálu modelu, okrajové podmínky modelu i charakteristiky a „kvalitu“ vzdušného proudu. V laboratorním prostředí můžeme také minimalizovat, či úplně odstranit rušivé vlivy, jež by mohly nastat při měření na skutečných konstrukcích např.: nestacionaritu proudění, či vlivy počasí.

#### 3.1 Aerodynamický tunel

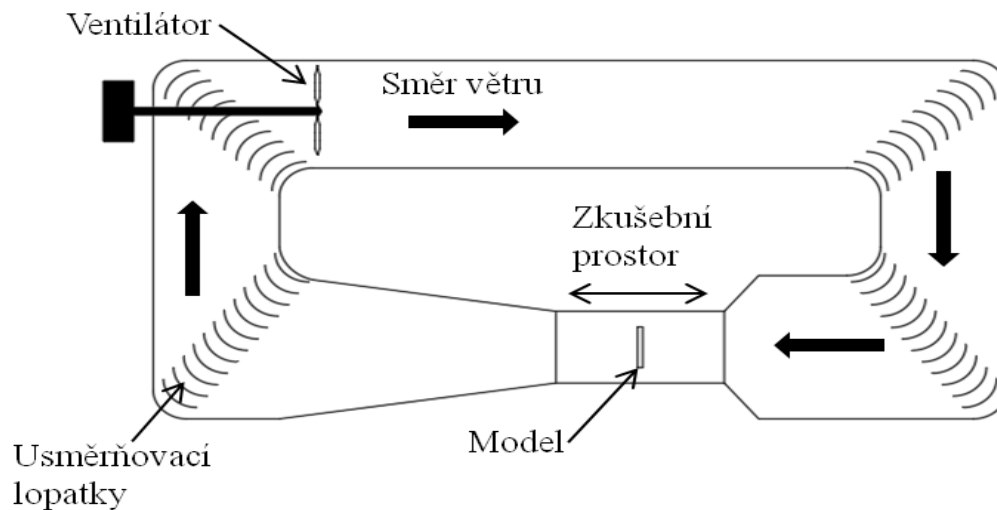
Obecně rozdělujeme větrné tunely na dva základní typy. Aerodynamické tunely s otevřeným oběhem (obr. 7) a tunely s uzavřeným oběhem (obr. 8). Oba tyto typy pak mohou mít ještě zkušební prostor otevřený, nebo uzavřený.



**Obr. 7 Příklad aerodynamického tunelu s otevřeným oběhem**

Při měření v aerodynamickém tunelu je důležité, abychom správně vymodelovali i vzdušný proud, který v něm proudí, tak, abychom se s výsledky co nejvíce přiblížili skutečnosti. Často potřebujeme vytvořit vhodnou turbulentní mezní vrstvu. Ta může být utvářena několika způsoby. Většinou se jedná o umístění překážky, mříže (také můžeme nazývat jako generátor turbulence), hrotů apod. v blízkosti vstupu do měřicího (zkušebního) prostoru. Lze také kombinovat se zdrsněním dna tunelu před zkoušeným modelem. Různými úpravami např. změnou umístění tohoto příslušenství je tedy možné různě navyšovat, či naopak snižovat intenzitu turbulence.

Abychom mohli vymodelovat správnou turbulentní mezní vrstvu, potřebujeme znát charakteristiky proudění v tunelu, ve kterém měříme, bez zvláštních úprav. [2], [8]



**Obr. 8 Příklad aerodynamického tunelu s uzavřeným oběhem**

### 3.2 Modely

Modely můžeme rozdělit také na dva základní typy, na aerodynamické a na aeroelastické. U aerodynamických modelů stačí pouze splnit geometrickou podobnost se skutečnou konstrukcí a používáme je zejména při řešení úlohy stanovení aerodynamických součinitelů, zvláště pokud jejich hodnoty nelze stanovit z norem či jiné odborné literatury. Aeroelastické modely musí kromě geometrické podobnosti splňovat i určité modelové zákony a je nutno modelovat tuhost, hmotnost a útlum konstrukce.

Pro pozorování působení větru na mostní konstrukce nám stačí jak úsekové tak i úplné modely. Pro oba typy však musí být zaručena geometrická podobnost průřezu mostovky s modelem. [1], [2], [7]

### 3.3 Referenční plocha

Referenční plocha není pevně a exaktně stanovena, a proto si ji mnozí autoři definují různými způsoby. Při přebírání a porovnávání aerodynamických koeficientů z jiných zdrojů proto musíme věnovat zvláštní pozornost tomu, jak byla referenční plocha u těchto koeficientů počítána.

V případě stanovování aerodynamického součinitele, popř. stanovování velikosti čelního odporu, existují autoři, kteří definují referenční plochu  $A_{ref}$  jako průmět konstrukce do roviny kolmé ke směru větru při úhlu náběhu  $\alpha = 0^\circ$ .

Najdou se však i tací, kteří volí  $A_{ref}$  nikoli konstantní, ale závislou právě na úhlu náběhu. Zejména při užívání tabulek a grafů je nutno sledovat tuto závislost  $A_{ref}$ . Způsob výpočtu referenční plochy se také může lišit podle toho, zda se jedná o příhradovou konstrukci, v našem případě tedy příhradový most, či „neprodyšnou“ konstrukci, tedy mosty s plnostěnnými nosníky. V této práci jsou jednotlivé referenční plochy definovány následujícími způsoby:

### $A_{ref}$ pro výpočet čelního odporu

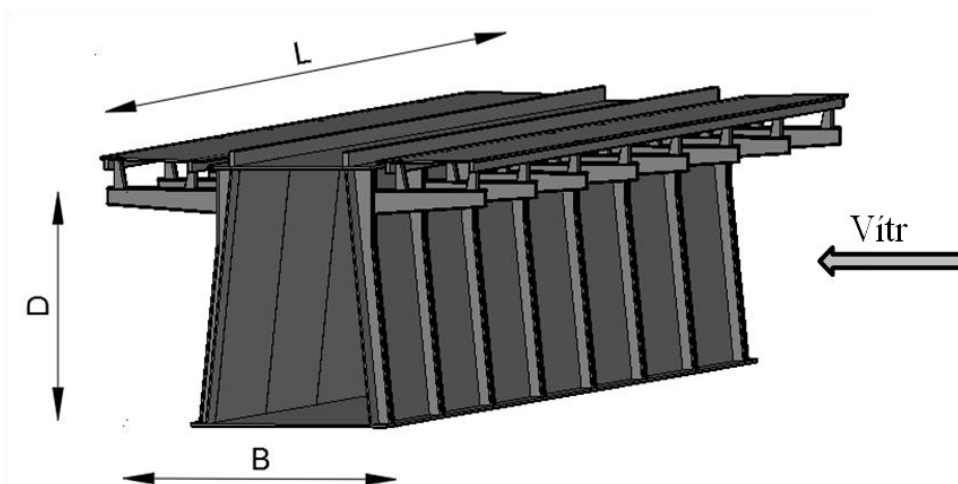
V případě výpočtu aerodynamického součinitele čelního odporu pro mosty s plnostěnnými nosníky je  $A_{ref}$  zvolena jako průmět konstrukce do roviny kolmé ke směru větru při úhlu náběhu  $\alpha = 0^\circ$  (14), kde  $D$  je výška modelu mostu a  $L$  délka úsekového modelu mostu. Schéma jednotlivých rozměrů je zobrazeno na obr. 9. V případě simulace zatížení dopravou se do referenční plochy započítá i návětrná plocha modelu příslušného vlaku.

$$A_{ref} = D \cdot L \quad (14)$$

Pro příhradové mosty byla zvolena metoda podle kapitoly 8 normy ČSN EN 1991-1-4 (pro mosty) [10], kde se pro příhradové mosty pro kombinace zatížení bez zatížení dopravou má referenční plocha  $A_{ref}$  určit jako součet ploch neprodyšných částí všech hlavních příhradových nosníků, čelní plochy jedné římsy nebo koleje s kolejovým ložem a neprodyšných svodidel nebo protihlukových bariér. V našem případě tedy:

$$A_{ref} = 2x \text{ hl. příhr. nosník} + A_i, \quad (15)$$

kde  $A_i$  je součet ploch všech dalších prvků zasahujících do návětrné oblasti např. střední ztužidlo, podélník, kolejnice, mostnice apod.



Obr. 9 Schéma jednotlivých rozměrů pro výpočet  $A_{ref}$  (3D model mostu Jizera [19])

### **$A_{ref}$ pro výpočet vztlaku**

Pro určení aerodynamického součinitele vztlaku se referenční plocha vypočte jako průmět do roviny rovnoběžné se směrem větru při úhlu náběhu  $\alpha = 0^\circ$  (16). Kde  $B$  je šířka modelu mostu a  $L$  je délka úsekového modelu mostu (viz obr. 9).

$$A_{ref} = B \cdot L \quad (16)$$

### **$A_{ref}$ pro výpočet momentu**

Pro stanovení aerodynamického součinitele momentu je referenční plocha vypočtena následujícím vztahem:

$$A_{ref} = B^2 \cdot L \quad (17)$$

Tato podkapitola vznikla za přispění literatury [1] a [9].

## **3.4 Teorie blokování**

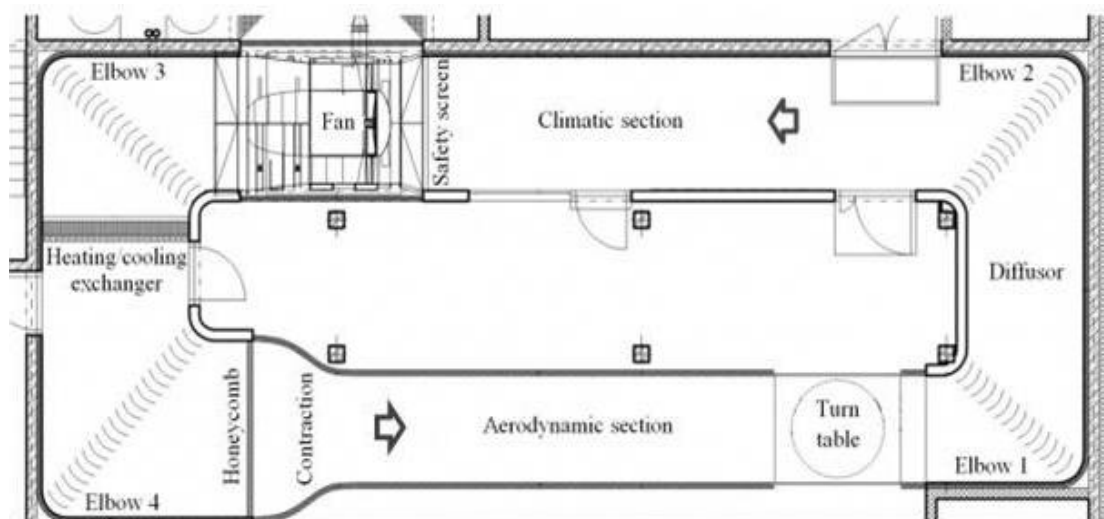
Při měření ve větrném tunelu dochází k jevu, který se nazývá tzv. blokování, anglicky pak „blockage“. Tento jev je způsoben umístěním modelu do prostoru aerodynamického tunelu. Dochází ke změně rychlosti a deformaci vzdušného proudění v okolí modelu, což může výrazně ovlivnit i výsledky měření. Proto je při každém měření nutné vyhodnotit, zda je blokování proudění vzduchu zanedbatelné, či je třeba provést korekci deformovaného obtékání. Pokud blokování způsobuje např. zvýšení rychlosti, ale deformace proudění jsou zanedbatelné, pak je korekce jen na zrychlení proudění dostatečná. Pokud však dochází i k větším změnám charakteru obtékání, pak je nutno provést daleko náročnější korekce, někdy je třeba i doplňková zkouška s menším modelem. Míru blokování lze odhadnout tzv. poměrem blokování, což je poměr čelního průřezu modelu k průřezu zkušebního prostoru. [7], [8]

## 4. Sestavení modelu pro experiment

### 4.1 Klimatický tunel Vincenc Strouhal

Všechna experimentální měření v této práci byla provedena v klimatickém větrném tunelu pro zkoumání konstrukcí a materiálů nazvaný po významném českém fyzikovi „Vincenc Strouhal“, který se nachází v prostorách Centra Excellence v Telči. Celé výzkumné centrum spadá pod Ústav teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd České republiky, v. v. i.

Jedná se o aerodynamický tunel s uzavřeným oběhem (kap. 3.1) a je rozdělen na dvě pracovní sekce. Na aerodynamickou, která je určena k aerodynamickému měření účinku větru na konstrukce, a na klimatickou, která slouží k modelování klimatických jevů jako je teplota, déšť, nebo mráz. Jedním ze základního vybavení tunelu je ventilátor o výkonu 200kW, který je schopen vyrobít vítr o rychlosti až 100 km/h.



Obr. 10 Schematický půdorys větrného tunelu v Telči

Zdroj: <http://cet.arcchip.cz/klimatick-vtrn-tunel>

#### Aerodynamická sekce

Aerodynamická sekce se skládá z pracovního prostoru, který je obdélníkového průřezu o šířce 1,9 m a výšce 1,8 m. Délka sekce je celkem 11 m a součástí je i prostor pro vývoj atmosférické mezní vrstvy. Za tímto účelem se v laboratoři nacházejí prvky, jako jsou mříže (obr. 11), bariéry, podlahové desky o různé drsnosti apod., které nám umožňují modelovat intenzitu turbulence i šířku mezní vrstvy. V prázdné pracovní sekci je rozsah rychlosti větru v rozmezí 1,5 – 33 m/s .





**Obr. 11 Pohled na prostor pro vývoj mezní vrstvy s generátorem turbulence**

V aerodynamické sekci je možné provádět různé experimenty spadající do oblasti lokálních podmínek proudění větru, jevy aerodynamické (popř. aeroelastické) nestability apod.

### **Klimatická sekce**

V této sekci se nacházejí různé simulátory klimatických účinků. Jedním z nich je tepelný výměník, který slouží pro simulaci teplotních cyklů v rozsahu  $-5$  až  $30^{\circ}\text{C}$ . Jsou zde umístěny i simulátory deště a infračervené lampy, které nám umožňují simulovat zatížení konstrukce hnaným deštěm, či sálavým teplem. Klimatická sekce byla vybudována za účelem zkoumání kombinace účinku větru s dalšími faktory, jakými mohou být např. vznik námrazy, či pronikání dešťové vody do konstrukce.

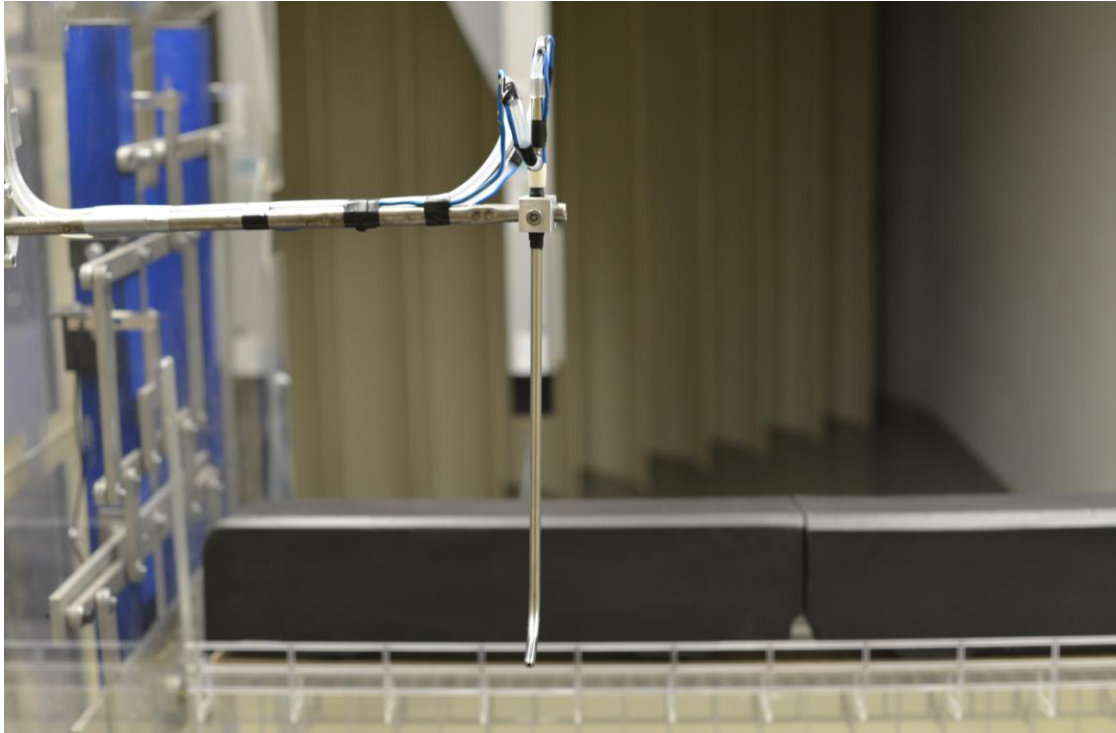
## **4.2 Použité přístroje**

Laboratoř klimatického tunelu v Telči je vybavena spoustou moderních přístrojů, které slouží za účelem co nejkvalitnějšího provedení měření. V této kapitole jsou uvedeny pouze ty přístroje, které byly použity při experimentálním měření popsaném v této práci.

### **Prandtl - Pitotova trubice**

Rychlost proudu větru při zkouškách ve větrném tunelu měříme pomocí Prandtl - Pitotovy trubice, která bývá umístěna před modelem v dostatečné vzdálenosti tak, aby

vzdušný proud v místě umístění trubice nebyl modelem nijak ovlivněn (viz kap. 3.4). Princip měření rychlosti spočívá v porovnávání tlaků tekutin (celkový a statický tlak) s využitím Bernoulliho rovnice.



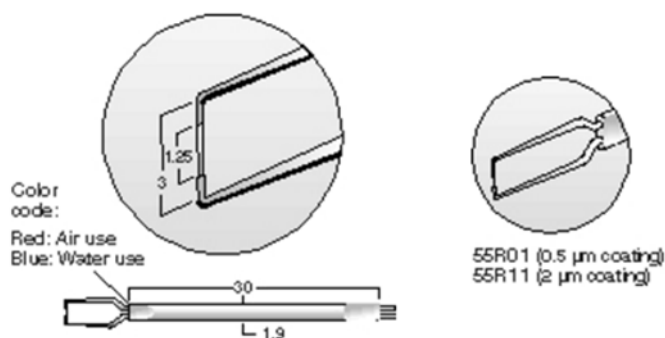
**Obr. 12 Umístění Prandtl - Pitotovy trubice před modelem**

Rychlost tak určíme ze vztahu (18), kde  $p$  je celkový tlak proudícího vzduchu (měřen čidlem v ústí trubice, které je umístěno proti směru proudění),  $p_s$  je statický tlak (měřen čidlem umístěným ve stěně trubice, kolmo na proud větru) a  $\rho$  je hustota vzduchu. [2]

$$v = \sqrt{\frac{2(p-p_s)}{\rho}} \quad (18)$$

### **Constant Temperature Anemometry (CTA)**

Prandtl - Pitotova trubice není schopna zachytit rychlé změny rychlosti, tudíž není vhodná pro měření flukтуаční složky rychlosti a proto se pro měření turbulencí používá drátková anemometrie (CTA). Tato metoda funguje na principu změny elektrického odporu žhavého drátku (elektricky ohříváné čidlo), u kterého dochází vlivem proudění vzduchu k ochlazení. K měření uvedenému v této práci byl použit model čidla Dantec Dynamics 55R01 (*obr. 13*). Čidlo je tvořeno kovovým drátkem, který má délku cca 3 mm a průměr 70  $\mu\text{m}$ . Čidla jsou většinou zhotovena z platiny, wolframu nebo tungstenu (wolfram na povrchu potažen platinou). [11]



**Obr. 13 Čidlo model 55R01**

**Zdroj: [11]**

Tato metoda má několik výhod a těmi jsou zejména vysoká citlivost, přesnost, vysoká frekvence a velký rozsah měřených rychlostí. Zároveň však má i určité nevýhody, mezi které patří křehkost a citlivost čidla na znečištění, jež dokáže značně ovlivnit vlastnosti drátku a tím i naměřené hodnoty. Proto byla metoda využita jen pro zjištění rychlostních profilů ve vahách bez přítomnosti modelu a ke kalibraci Prandtl -Pitotovy trubice.

Kalibrace metody CTA se provádí pomocí speciálního přístroje s kompresorem, který vyvolává proudění vzduchu na čidlo o dané rychlosti a následně jej kalibruje.

### **Tlakový Scanner Scanivalve**

Tento přístroj slouží k měření hodnot tlaku vzduchu. V našem měření byl použit k měření tlaku na Prandtl - Pitotově trubici. Využit se dá také i k měření rozdělení lokálních tlaků na povrchu konstrukce.

### **DEWETRON**

K zaznamenávání tlaků slouží v laboratoři moderní průmyslový a datový počítač DEWETRON. Je to multikanálový systém určený ke sběru dat s vysokým vzorkováním. Toto zařízení lze použít pro analogový signál i pro digitální signál s pokročilými metodami zpracování. Během experimentu ho lze použít pro jednotlivé měření tlaku pomocí snímačů tlaku, v kombinaci i s jinými typy dynamických snímačů.

K sepsání této kapitoly o přístrojích byl použit zdroj [12].

## 4.3 Použité modely mostů

Celkem bylo zvoleno sedm reprezentativních ocelových železničních mostů nacházejících se na území České republiky. Pro každý z nich byl sestaven zmenšený úsekový model ve vhodném měřítku, který posloužil k provedení zkoušky ve větrném tunelu.

### 4.3.1 Příhradový most s dolní mostovkou

Jako reprezentant příhradového mostu s dolní prvkovou mostovkou byl zvolen most v km 458,756 trati Všetaty – Děčín (*obr. 14*) **Prostřední žleb**.



**Obr. 14 Prostřední žleb: Poloha mostu**

**Zdroj:** [18]

Most má čtyři pole (celková délka mostu je 265,450 m) a vybranou částí jsou pole 2 a 3, kde jsou nýtované příhradové trémové konstrukce z roku 1916 (*obr. 15*). Rozpětí těchto polí je 2 x 99,4 m a hlavní nosníky jsou šikmo uloženy na kamenné spodní stavbě. Mostovka je tvořena příčnicí a podélníky. Mezi podélníky se nachází vodorovné ztužení, které se skládá ze dvou diagonál a jedné příčky. Zároveň jsou na podélníky příčně položeny dřevěné mostnice.

### Model konstrukce

Model konstrukce byl „vytištěn“ v 3D tiskárně, která je součástí vybavení laboratoře ÚTAM AV ČR, v. v. i. Nejprve se vytvořil 3D model konstrukce v programu AutoCAD 3D nebo jiném modelovacím prostředí (*obr. 16*) a následně

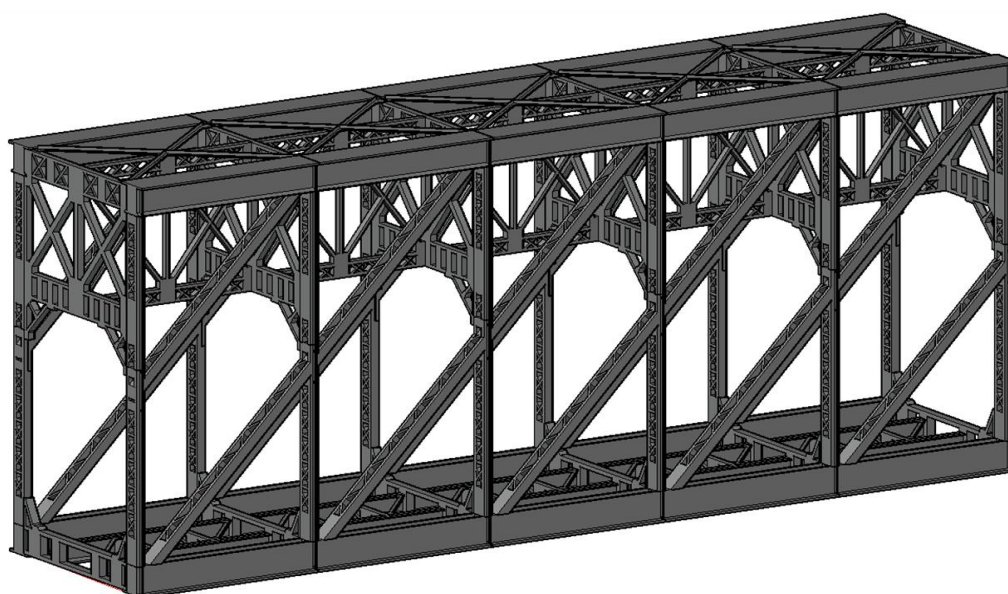


musel být vyexportován do formátu STL, který je využíván programem tiskárny. 3D tiskárna má jistá omezení maximálními rozměry tisknutého dílu, které jsou 250x350 mm, proto byl model rozdělen na celkem 76 samostatných dílů, které byly následně po vytištění slepeny dohromady. Model musel podstoupit určitá zjednodušení a tím je nahrazení prvků, které jsou na skutečném mostě nýtovány z úhelníků, obdélníkovými průřezy.

Úsekový model konstrukce byl vytvořen v měřítku **1:25,53** a rozměry modelu (LxDxB) jsou **983x435x238 mm**.



**Obr. 15 Prostřední žleb: Pohled na hlavní pole (2,3)**  
**Zdroj: [19]**



**Obr. 16 Prostřední žleb: Izometrický pohled na 3D model hlavního pole**  
**Zdroj: [19]**

### 4.3.2 Příhradový most s mezilehlou mostovkou

Reprezentantem pro příhradový most s mezilehlou prvkovou mostovkou byl vybrán most v km 41,791 trati Tábor - Písek (*obr. 17*) Červená.



**Obr. 17 Červená: Poloha mostu**  
**Zdroj: [18]**

Most má tři pole a jeho statický systém je Gerberův nosník. Rozpětí polí je 3 x 84,4 m (celková délka mostu je 254,2 m). Konstrukce je přímo uložena na zděnou spodní stavbu (*obr. 18*). Hlavní nosná konstrukce je tvořena dvěma nýtovanými příhradovými nosníky. Mostovka je tvořena příčnicíky a podélníky. Na nýtované podélníky jsou příčně položeny dřevěné mostnice.

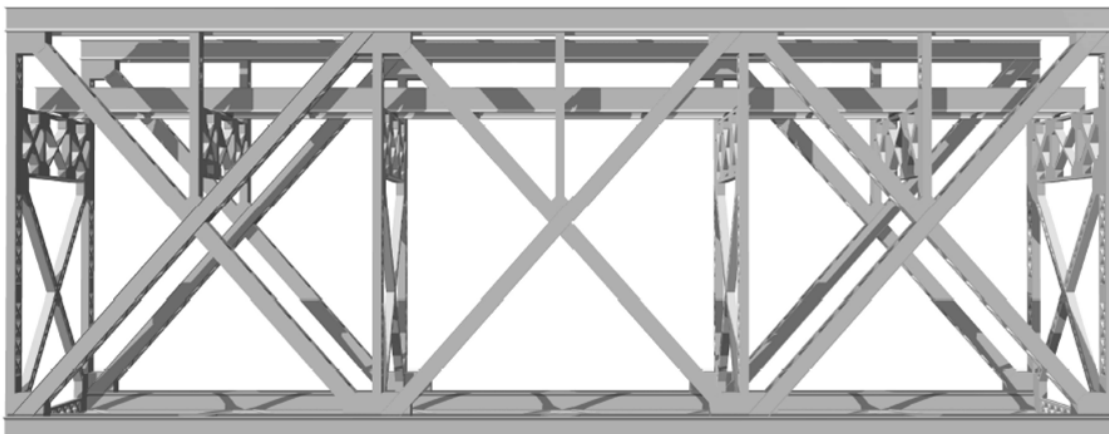


**Obr. 18 Červená: Pohled na most**  
**Zdroj: [13]**

## Model konstrukce

I tento model byl vytištěn na 3D tiskárně. Byl vytvořen jako první ze všech modelů a to Ing. Tomášem Vachutkou v rámci jeho diplomové práce na téma *Statické a dynamické chování mostu Červená*. Nejprve byl vymodelován 3D model v programu Autodesk Inventor Professional a následně exportován do formátu STL pro 3D tisk. Celkem je model složen z 31 slepených dílů a z konstrukce mostovky ze dřeva (obr. 20). [14]

Model konstrukce byl sestaven v měřítku **1:25,53** a určil tak měřítko pro ostatní modely (s výjimkou mostu Znojenský viadukt, který byl vyroben v měřítku 1:60). Jeho rozměry jsou **1000x387x227 mm**.



**Obr. 19 Červená: Boční pohled na 3D model**  
**Zdroj: [14]**



**Obr. 20 Červená: Detail na model mostu**



### 4.3.3 Příhradový most s horní mostovkou

Jako představitel pro příhradovou konstrukci s horní mostovkou a kolejovým ložem byl zvolen most v km 99,297 trati Šatov - Znojmo (*obr. 21*) **Znojemský viadukt**.



**Obr. 21 Znojemský viadukt: Poloha mostu**  
Zdroj: [18]



**Obr. 22 Znojemský viadukt: Pohled na most**  
Zdroj: [19]

Most má čtyři spojitá pole, jejichž rozpětí je  $49,95 + 2 \times 59,94 + 49,95$  m. Celková délka mostu je 220,970 m. Všechna pole obsahují příhradovou konstrukci s horní mostovkou s kolejovým ložem. Ortotropní mostovka se skládá z příčných a podélných

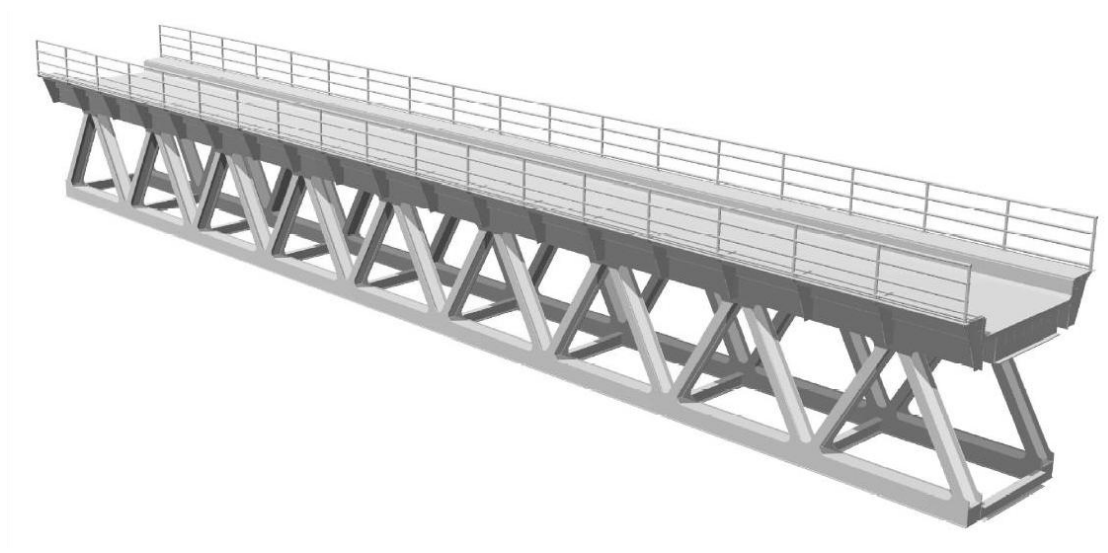


výztuh. Hlavní nosníky jsou kolmo uložené na kamenné spodní stavbě (obr. 22). Nosná konstrukce mostu je tvořena dvěma příhradovými svařovanými nosníky, které jsou v rovině horních pásů propojeny ortotropním kolejovým ložem. V rovině dolních pásů se nachází hlavní vodorovné ztužení konstrukce.

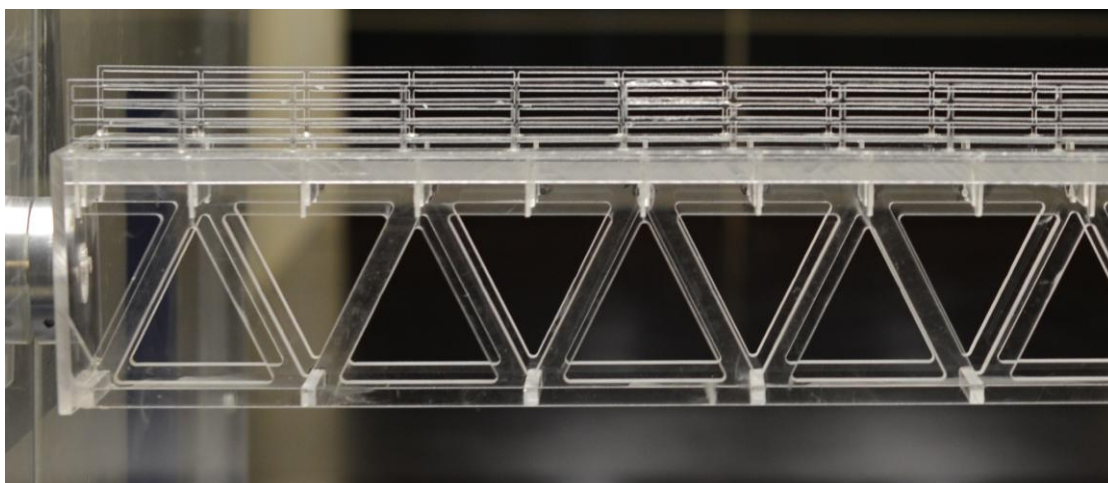
### **Model konstrukce**

Všechny části modelu i zábradlí byly slepeny z vyrobených dílů z plexiskla. Protože nebyla k dispozici výkresová dokumentace, byl model vyroben na základě 3D zaměření nosné konstrukce mostu.

Model konstrukce byl vyroben v měřítku **1:60** a bylo tak sestaveno celé jedno pole mostu o délce necelých 60 m. Rozměry vytvořeného modelu jsou **1011x96x101 mm**.



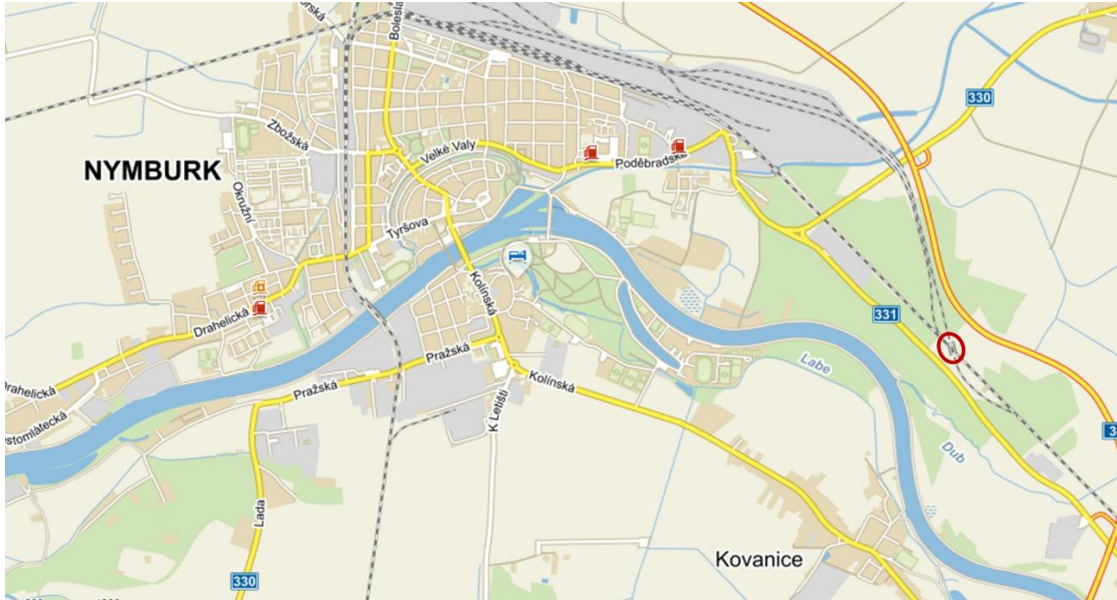
**Obr. 23 Znojenský viadukt: Izometrický pohled na 3D model**  
**Zdroj: [19]**



**Obr. 24 Znojenský viadukt: Detail na model mostu**

#### 4.3.4 Plnostěnný most s dolní mostovkou

Představitelem pro plnostěnný trémový most s dolní prvkovou mostovkou byl zvolen most v km 0,596 trati Babín - Nymburk seřadovací nádraží (*obr. 25*) **Babín**.



**Obr. 25 Babín: Poloha mostu**  
**Zdroj: [18]**

Most má jedno prosté pole a jeho celková délka je 44,70 m. Mostní konstrukce je šikmá a přímo uložena na zděné opěry (*obr. 26*). Hlavní nosná konstrukce je tvořena plnostěnnými svařovanými nosníky s horními zaoblenými a dolními rovnými pásy. Stěny nosníků jsou v místě každého příčniku vyztuženy příčnými výztuhami. Dřevěné mostnice jsou osazeny na podélníky a celá prvková mostovka je zakryta pochozím plechem.

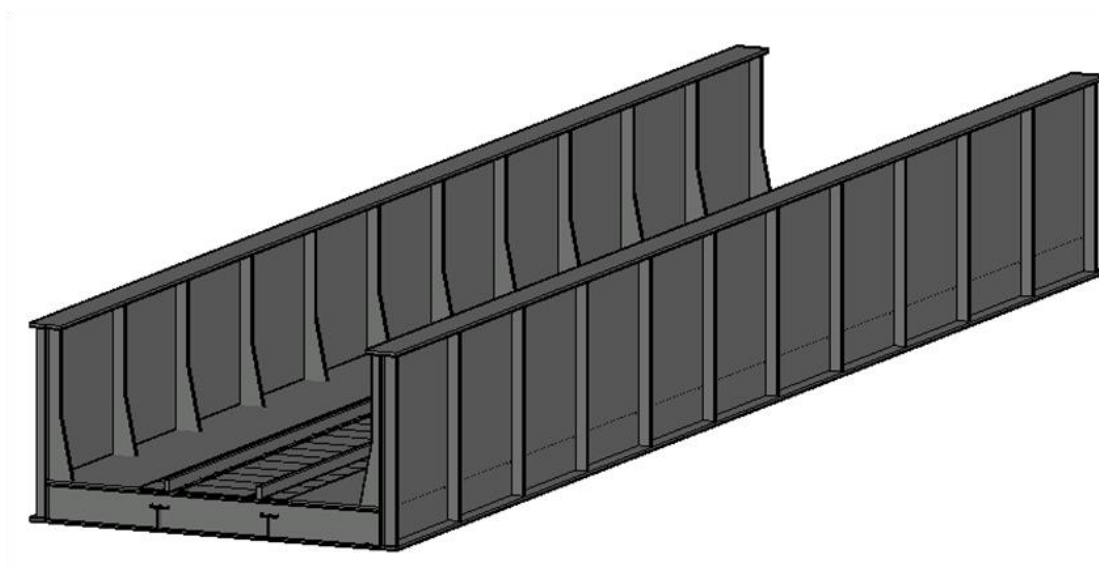


**Obr. 26 Babín: Pohled na most**  
**Zdroj: [19]**

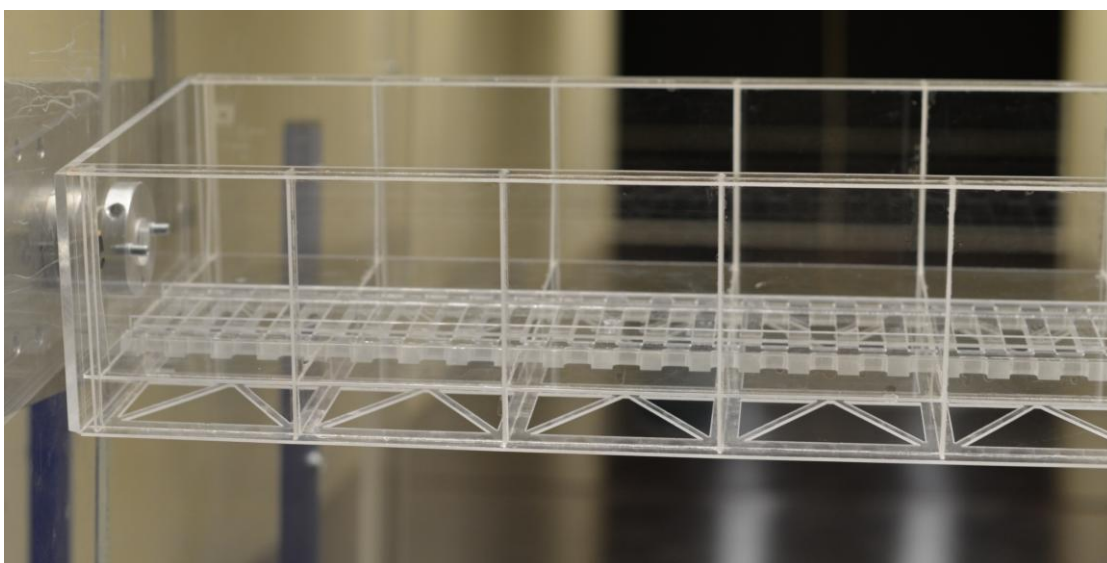
## Model konstrukce

Model byl vyroben z plexiskel o různých tloušťkách. Při tvorbě modelu došlo k jednomu hlavnímu zjednodušení oproti skutečné konstrukci a tím je zvolení konstantní výšky horního pásu plnostěnného nosníku místo původního zaoblení. Zdůvodněním je opět zobecnění na co největší skupinu mostů podobného typu nacházejících se na českých tratích, kde má většina těchto mostů hlavní nosník o konstantní výšce.

Model byl vyroben v měřítku **1:25,53** o rozměrech **1010x117x235 mm**.



**Obr. 27 Babín: Izometrický pohled na 3D model**  
**Zdroj: [19]**



**Obr. 28 Babín: Detail na model mostu**



### 4.3.5 Plnostěnný most s mezilehlou mostovkou

Jako reprezentant pro plnostěnný trémový most s mezilehlou prvkovou mostovkou byl vybrán most v km 458,756 trati Všetaty - Děčín (viz obr. 14) **Prostřední žleb**.

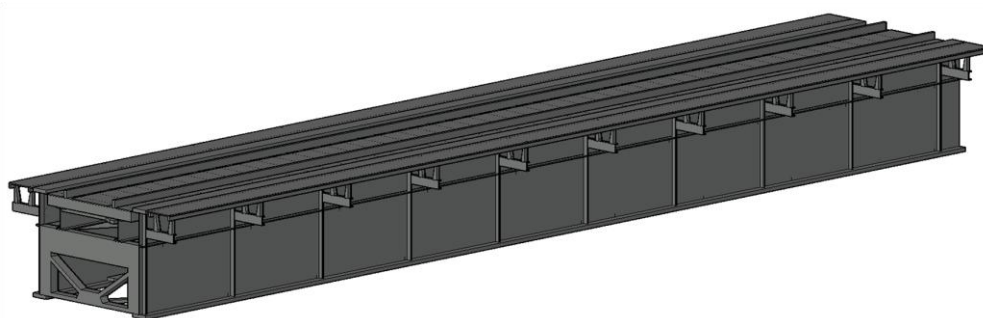
Most má celkem čtyři prostá pole a vybranou částí jsou pole 1 a 4 o rozpětí 25,0 a 25,7 m. V těchto polích jsou plnostěnné trémové konstrukce z roku 1972/1974. Nosníky jsou šikmo uloženy na kamenné spodní stavbě. Hlavní nosná konstrukce je tvořena plnostěnnými nýtovanými nosníky tvaru I, které mají konstantní výšku stěny 2,4 m. Stěny hlavních nosníků jsou vyztuženy podélnými i příčnými výztuhami a jsou z nich vykonzolovány obslužné chodníky. Na podélníky jsou osazeny dřevěné mostnice.



**Obr. 29 Prostřední žleb: Pohled na vedlejší pole 4**  
**Zdroj: [19]**

#### Model konstrukce

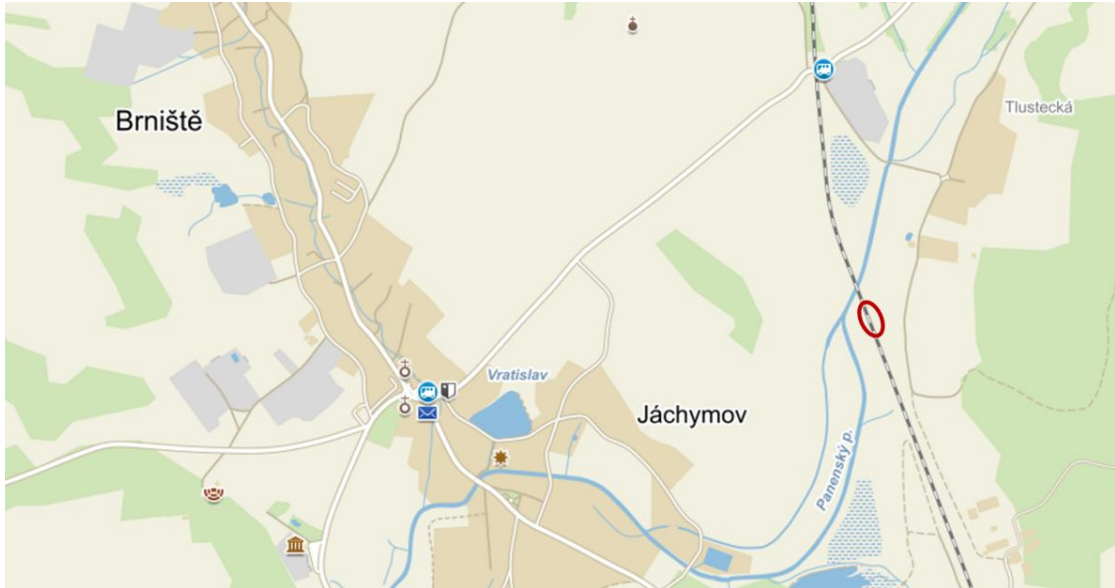
Model byl vyroben z plexiskel o různých tloušťkách a oproti skutečné konstrukci byly ztužující prvky z pravoúhlých profilů nahrazeny obdélníkovými průřezy. Model konstrukce byl vyroben v měřítku **1:25,53** o rozměrech **1011x100x201 mm**.



**Obr. 30 Prostřední žleb: Izometrický pohled na 3D model vedlejšího pole [19]**

### 4.3.6 Plnostěnný most bez mostovky

Reprezentantem pro plnostěnný trémový most bez mostovky byl vybrán most v km 108,493 trati Česká lípa hlavní nádraží - Liberec (*obr. 31*) **Brniště**.



**Obr. 31 Brniště: Poloha mostu**

**Zdroj: [18]**

Most má celkem dvě prostá pole a je celkové délky 42,55 m. Obě pole se skládají z plnostěnné trémové konstrukce z roku 1989. Jejich rozpětí je 2 x 16,80 m a obě jsou šikmo uložena na kamennou spodní stavbu (*obr. 32*).



**Obr. 32 Brniště: Pohled na most**

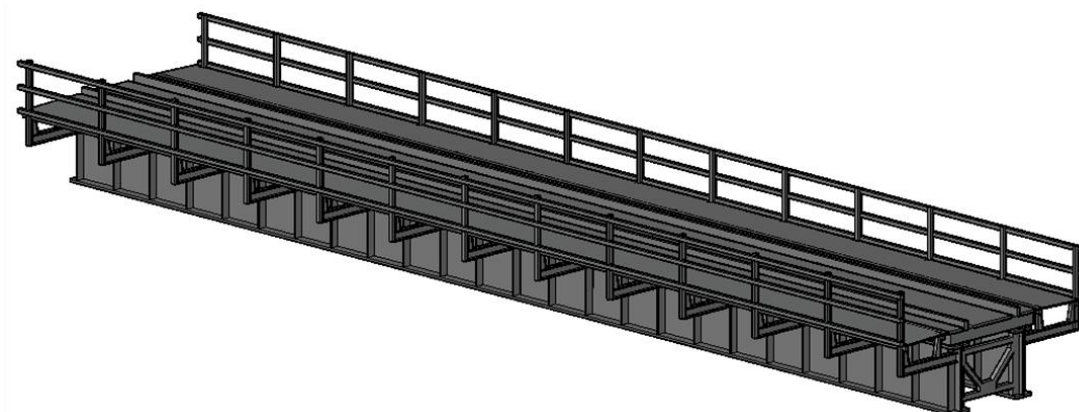
**Zdroj: [19]**

Nosná konstrukce je tvořena dvěma plnostěnnými svařovanými nosníky o výšce 1,44 m, jejichž stěny jsou vyztuženy příčnými výztuhami. Vodorovné ztužení je zajištěno základní svislicovou soustavou v horní úrovni hlavních nosníků. Přimo na hlavní nosníky jsou upevněny dřevěné mostnice. Mostní svršek je zakryt pochozími plechy a po celé délce mostu je zábradlí z úhelníků.

### Model konstrukce

Všechny části modelu včetně zábradlí (*obr. 34*) byly vyrobeny z plexiskel o různých tloušťkách. Pro zjednodušení bylo vypuštěno vodorovné ztužení. Také byl zúžen volný průjezdový prostor z VMP 3,0 na VMP 2,5, aby model charakterizoval co největší škálu mostů stejného konstrukčního typu. Model byl vyroben v měřítku **1:25,53** o rozměrech **1011x71x203 mm**.

Na modelu bylo přiděleno i zábradlí, které je svou konstrukcí jedním z nejběžnějších na mostech podobného typu, aby se mohly zkoumat i jeho účinky na zatížení větrem.



**Obr. 33 Brniště: Izometrický pohled na 3D model**  
**Zdroj: [19]**



**Obr. 34 Brniště: Detail na model mostu**



### 4.3.7 Plnostěnný most s přímým upevněním kolejnic

Pro plnostěnný trémový most s přímým upevněním kolejnic byl představitelem zvolen most v km 29,048 trati Nymburk hlavní nádraží - Mladá Boleslav hlavní nádraží (obr. 35) Jizera.



**Obr. 35 Jizera: Poloha mostu**  
**Zdroj: [18]**

Most má celkem čtyři prostá pole. V prvním a čtvrtém poli jsou příhradové nýtované nosníky se zapuštěnou mostovkou. Vybraná jsou však pole 2 a 3, které jsou tvořeny komorovým uzavřeným svařovaným nosníkem. Rozpětí těchto polí je  $2 \times 39,40$  m a celková délka mostu je 155,0 m. Hlavní nosníky jsou ve všech polích kolmo uloženy na železobetonové spodní stavbě.



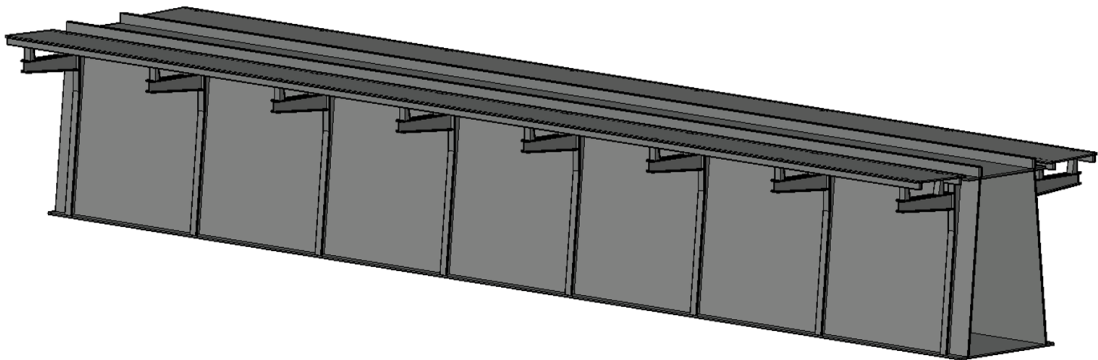
**Obr. 36 Jizera: Pohled na most**  
**Zdroj: [19]**

Ani tento most mostovku nemá a kolejnice jsou přímo upevněny na nosnou konstrukci. Hlavní nosná konstrukce se skládá z komorového nosníku. Nosník je svařovaný se svislými T výztuhami stěny. Ty jsou v místě příčných výztuh na obě strany vykonzolovány chodníky.

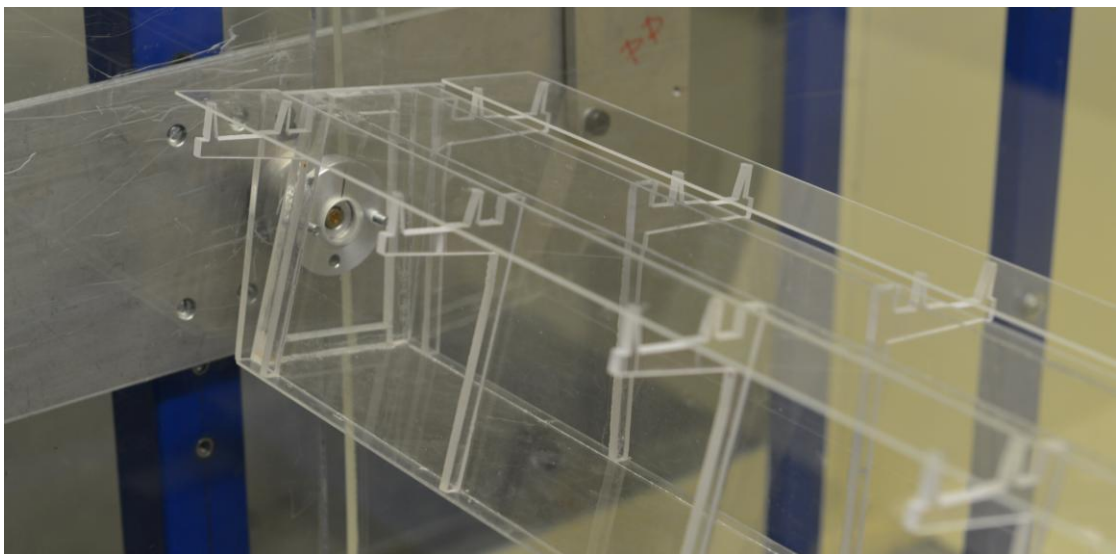
### **Model konstrukce**

Model byl díky jednoduchosti mostu vyroben z plexiskel o různých tloušťkách. Došlo také ke zjednodušení ve formě vypuštění všech výztuh, které se nacházejí uvnitř komory (*obr. 38*).

Model konstrukce byl vymodelován v měřítku **1:25,53** a jeho rozměry jsou **1011x131x198 mm**.



**Obr. 37 Jizera: Izometrický pohled na 3D model**  
**Zdroj: [18]**



**Obr. 38 Jizera: Detail na model mostu**



## 4.4 Použité modely vlaků

Celkem byly vybrány čtyři druhy železničních vozidel pro simulaci dopravního zatížení při experimentálním měření. Pro každé z nich byly vytvořeny dva modely soupravy daného vozidla dle příslušných měřítek, tj. **1:25,53** a **1:60**.

Vytvořené modely v měřítku 1:25,53 ve skutečnosti odpovídají jednomu celému železničnímu vozu a části druhého.

Modely vytvořené pro model Znojemského viaduktu (*obr. 39*), který je jako jediný v měřítku 1:60, ve skutečnosti odpovídají soupravě v rozmezí třech až necelých pěti vozů v závislosti na daném typu vozu.



**Obr. 39** Detail na zmenšené modely souprav v měřítku 1:60  
(vpředu City Elefant, za ním Kils 12)

#### 4.4.1 Motorová souprava Regionova řady 814 – 914

Tento vůz byl vybrán k simulaci typického dopravního zatížení, protože patří obecně mezi nejčastěji využívané vozy určené k osobní přepravě na českých tratích. Jeho tvar a rozměry vychází z předchozí verze vozu řady 810 a je svým tvarem podobný i ostatním vozům využívaným k osobní dopravě.



**Obr. 40 Regionova řady 814 - 914: Pohled na soupravu**  
**Zdroj: [15]**



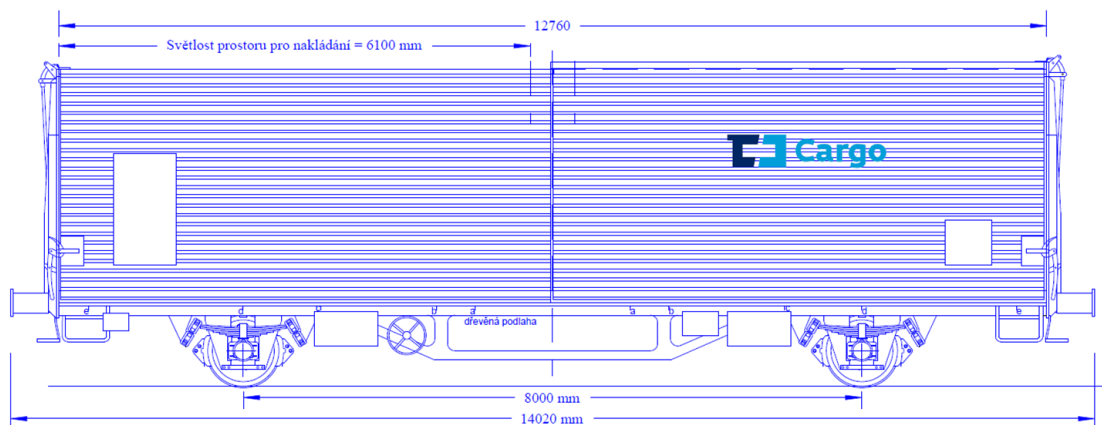
**Obr. 41 Regionova řady 814 - 914: Schéma soupravy**  
**Zdroj: [15]**

Model v měřítku 1:25,53 byl vyroben Ing. Tomášem Vachutkou v rámci jeho diplomové práce, který modely vyřezal z 2 mm tlustého kartonu, vyztužil polystyrenem a následně slepil. Rozměry (LxD) modelu jsou **970x145 mm**.

Model v měřítku 1:60 byl vyřezán z překližky o rozměrech **988x62 mm**.

#### 4.4.2 Krytý vůz Kils 12

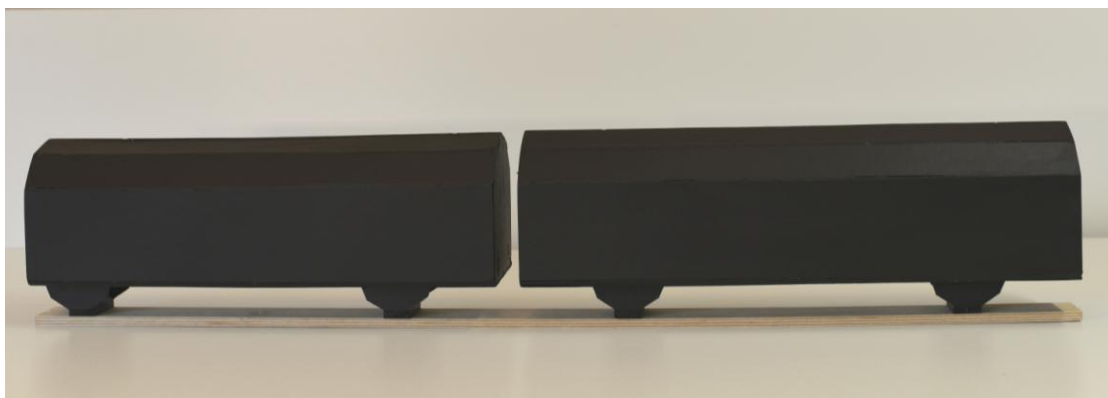
Tento vůz patří mezi kryté nákladní vozy a je tvořen dvěma nápravami (obr. 42). Jedná se o nejvyšší vůz, který se nachází v nabídce produktového katalogu ČD Cargo a.s. [16].



**Obr. 42 Kils 12: Boční schéma vozu**

**Zdroj: [16]**

Model v měřítku 1:25,53 (obr. 43) byl také vytvořen Ing. Tomášem Vachutkou a byl stejně jako model motorové soupravy Regionova vyřezán z 2 mm tlustého kartonu, vyztužen polystyrenem a následně slepen. Vymodelován byl celý jeden vůz Kils 12 a část stejného vozu. Rozměry modelu jsou **981x182 mm**.

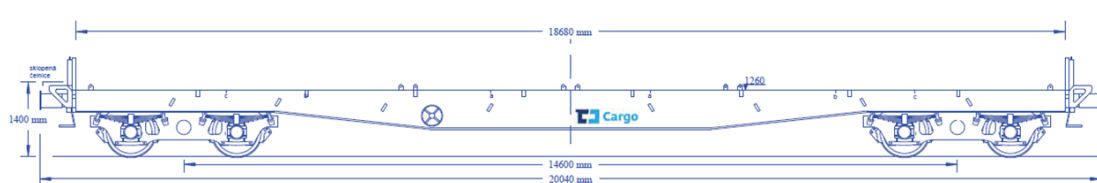


**Obr. 43 Kils 12: Pohled na model soupravy (1:25,53)**

Model v měřítku 1:60 byl vyřezán z polystyrenu o rozměrech **1001x72 mm**. Byla vyrobena souprava celkem 4 vozů a části pátého vozu.

#### 4.4.3 SGS s kontejnerem High - Cube

Vůz SGS je čtyřnápravový intermodální vůz (*obr. 44*), který slouží k přepravě velkých kontejnerů. Byl vymodelován s nejvyšším kontejnerem používaným pro intermodální přepravu v České republice, jímž je kontejner typu High - Cube.



**Obr. 44 SGS bez kontejneru: Schéma vozu**

**Zdroj: [16]**

Model v měřítku 1:25,53 (*obr. 45*) byl jako modely předchozích dvou vozů vyroben stejným způsobem také Ing. Tomášem Vachutkou. Rozměry modelu jsou **972x172 mm**.



**Obr. 45 SGS s kontejnerem High - Cube: Pohled na model soupravy (1:25,53)**

Model v měřítku 1:60 byl vyroben z polystyrenu o rozměrech **999x66 mm**. Vyřezána byla souprava celkem tří vozů.

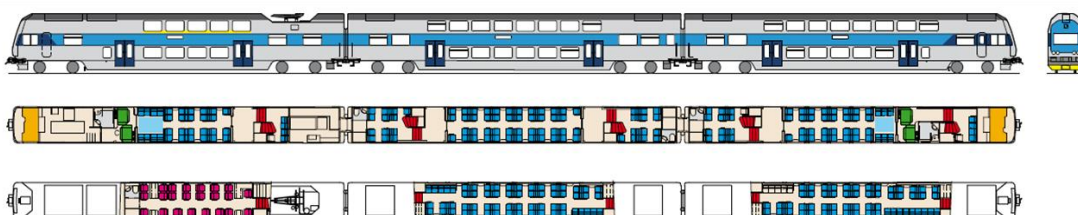
Popis těchto modelů byl čerpán z diplomové práce Ing. Vachutky [14].

#### 4.4.4 471 City Elefant

City Elefant je nejvyšší z modelovaných vlaků a jedná se o dvoupodlažní elektrickou jednotku. Vůz patří mezi novou generaci moderních železničních vozidel a je jeden z nejvyšších vozů, které se pohybují po českých tratích.



Obr. 46 City Elefant: Pohled na vůz  
Zdroj: [17]



Obr. 47 City Elefant: Schéma soupravy  
Zdroj: [17]

Model v měřítku 1:25,53 byl vyřezán z překližky o rozměrech **925x192 mm**. Vyroben byl jeden celý přední vůz a část druhého.

Model v měřítku 1:60 byl vyroben z polystyrenu a jeho rozměry jsou **990x78 mm**.



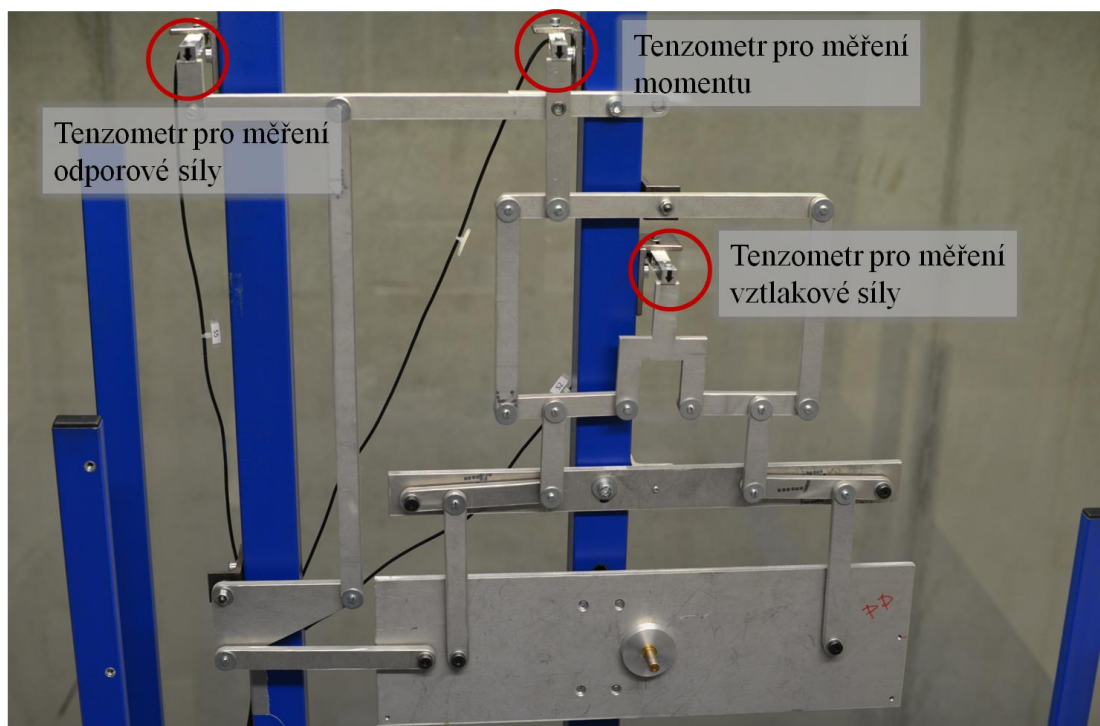
## 5. Experimentální měření aerodynamických součinitelů

Cílem experimentálního měření bylo získat aerodynamické součinitele reprezentativních mostů a využít výsledky k charakterizaci daných typů mostů na základě jejich aerodynamických vlastností. Aerodynamické součinitele lze získat tak, že se na aerodynamických vahách změří čelní odpor, vztlakové síly a momenty za působení určité rychlosti větru a z naměřených hodnot se pak podle vztahů zmíněných v kapitole 2.1 vypočtou jednotlivé aerodynamické koeficienty. K měření bylo využito již ověřených vah vyrobených na pracovišti ÚTAM CET, které umožňují měřit všechny tři složky sil najednou.

Před samotným měřením je nutné provést kalibraci každého z použitých přístrojů.

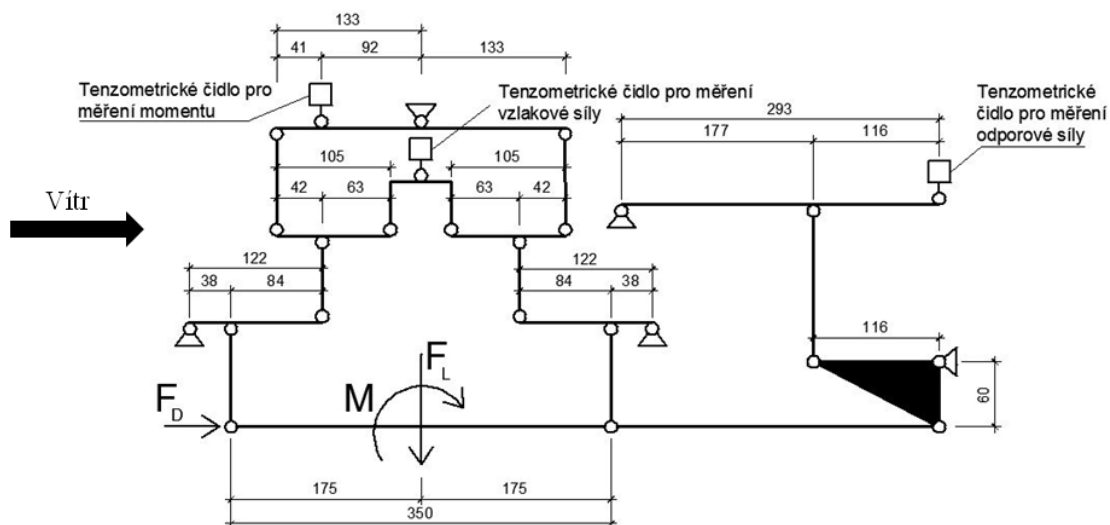
### 5.1 Kalibrace aerodynamických vah

Na použitých aerodynamických vahách (*obr. 48*) jsou síly měřeny tenzometry (zde použity tenzometry Megatron KM202), které fungují na principu změny odporu při jejich zkrácení nebo prodloužení a tato změna vyvolává i změnu elektrického napětí. Linearita Ohmova a Hookeova zákona umožňuje pomocí určitých kalibračních vztahů převádět tuto změnu elektrického napětí na deformace nebo síly. Celkem bylo k měření použito šest tenzometrů, protože se mechanismus nachází na obou stranách.



Obr. 48 Pohled na mechanismus aerodynamických vah

Kinematický systém vah je popsán na *obr. 49*. Mechanismus byl kalibrován s využitím závaží o známé hmotnosti.



**Obr. 49** Kinematické schéma aerodynamických vah  
Zdroj: [12]

### Kalibrace jednotlivých stran aerodynamických vah

Jako hlavní kalibrace byla použita kalibrace jednotlivých stran aerodynamických vah, kdy bylo kalibrační závaží zavěšeno zvlášť na každou stranu měřících vah. Při této kalibraci nejsou jednotlivé strany ničím propojeny a tím se tedy veškerá síla popř. moment přenese v celé své velikosti jen do té strany, která je v tu chvíli zatížena závažím. Na danou sílu jsou pak váhy kalibrovány. Ke kalibraci bylo využito celkem pěti zatěžovacích stavů (*obr. 50*).

Měření	1	2	3	4	5
Závaží [g]	0	702	1166,6	1554,2	1554,2 + 702

**Obr. 50** Tabulka zatěžovacích hodnot při kalibraci

V případě vztlaku kalibrace probíhá tak, že se závaží jednoduše zavěsí svisle dolů. Pro čelní odpor se závaží zavěsí přes kladku, která převádí svislý tah na vodorovnou sílu. V tomto případě se však nepřenesou celá svislá síla, ale jen její část, kterou získáme tak, že započítáme ztráty třením na kladce. Kalibrace momentu je provedena podobně jako u vztlaku zavěšením závaží svisle dolů, ale na určitém rameni. Jednotlivé síly pro kalibraci se pak dle příslušného zatížení určí následujícími vztahy:

$$F_L = mg; F_D = mgk_f; M = mgl, \quad (19)$$

kde  $m$  je hmotnost použitého závaží v kg,  $g$  je tíhové zrychlení ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),  $k_f$  je koeficient tření (0,95) a  $l$  je rameno síly (0,233 m).

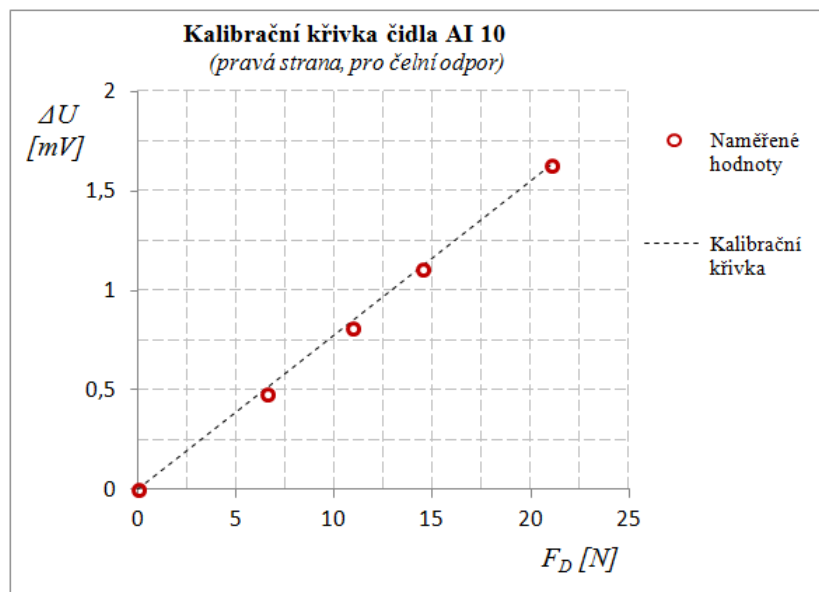
Pro samotnou kalibraci platí vztah (20), kde  $\Delta U$  je změna napětí.

$$F(M) = \Delta U \times \text{kalibrační konstanta} \quad (20)$$

Výsledné kalibrační konstanty jsou uvedeny v tabulce na obr. 51. a jednu z kalibračních křivek (zde pro čidlo AI 10, což je čidlo pro měření odporu u vah na pravé straně) si lze prohlédnout na obr. 52.

	čidlo	kalibrační konstanta
Odpor	Levé AI 5	13,312057
	Pravé AI 10	12,862783
Vztlak	Levé AI 1	29,873281
	Pravé AI 6	30,202944
Moment	Levé AI 11	-2,4109445
	Pravé AI 3	-2,4723606

Obr. 51 Tabulka kalibračních konstant



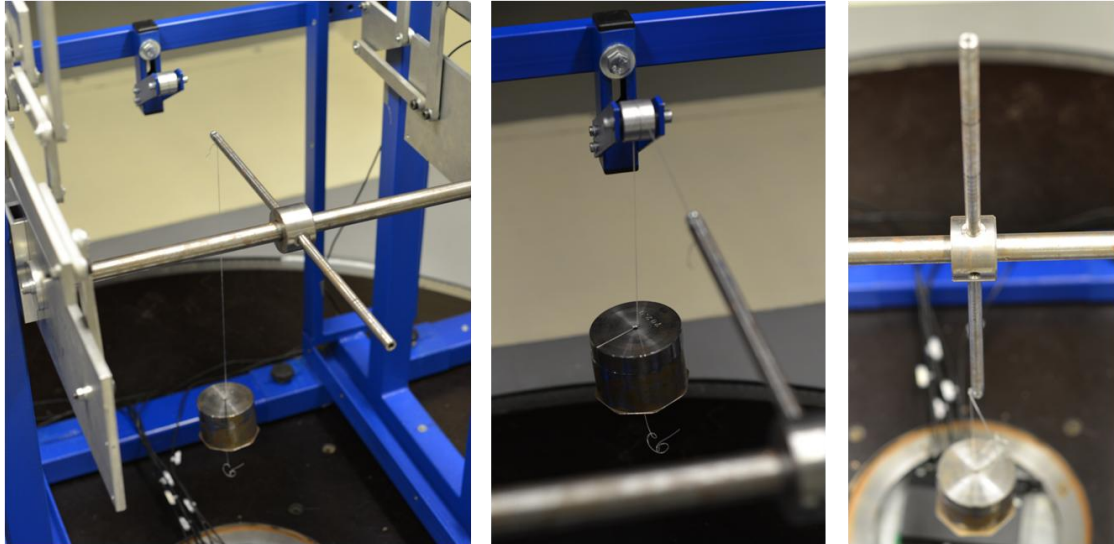
Obr. 52 Kalibrační křivka čidla AI 10

### Kalibrace celého systému pomocí kříže

Jako kontrolní kalibrace byla na úplném konci měření ještě provedena kalibrace celého systému pomocí kříže. Kříž slouží jako imitace modelu v aerodynamických vahách a zároveň se na něj zavěšují jednotlivá závaží (obr. 53). Způsob kalibrace je velmi podobný jako u kalibrace jednotlivých stran, jen tentokrát uvažujeme, že každá strana přenese polovinu vzneseného zatížení, a proto dostaneme kalibrační konstanty



jen tři a ne šest, jako tomu bylo v předešlém případě. Tato kalibrace byla provedena za účelem kontroly, zda první metoda byla udělána správně a zároveň jako kontrola, že nedošlo k uvolnění dílčích spojů či modifikaci naměřených hodnot způsobené opakovaným umístěním modelů do a odstraňováním z aerodynamických vah.



**Obr. 53 Kalibrace vah pomocí kříže (zleva: moment/odpor/vztlak)**

Porovnání absolutních hodnot výsledných kalibračních konstant je znázorněno v tabulce na obr. 54. Konstanty kalibrace jednotlivých stran se určily jako průměr součtu hodnot pravé a levé strany a jsou označeny jako  $k_I$ . Konstanty kalibrace pomocí kříže jsou pak označeny jako  $k_{II}$ .

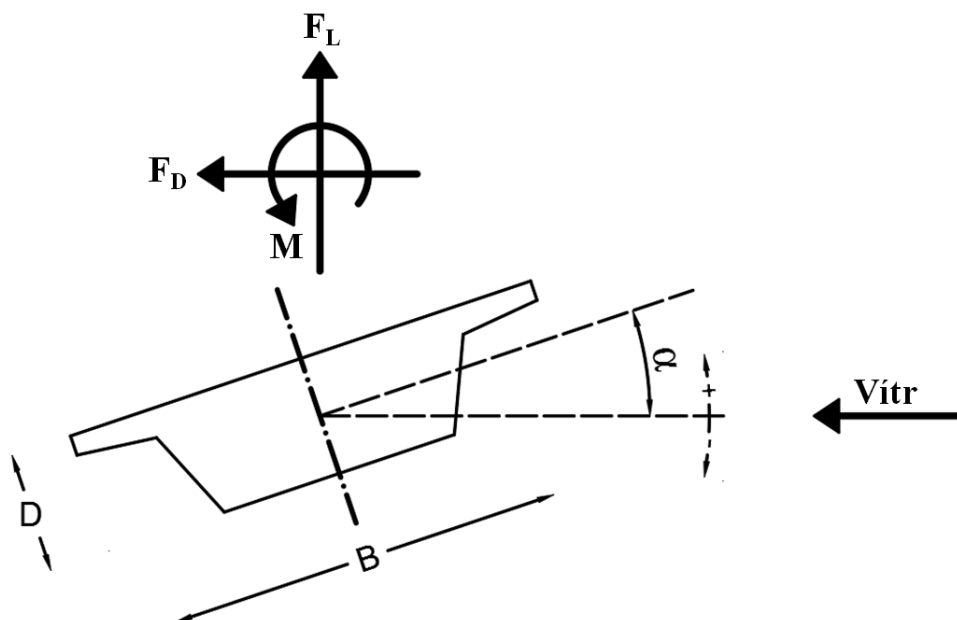
<i>Kalibrace</i>	$k_I$	$k_{II}$	$k_I/k_{II}$
<b>Odpor</b>	13,0874	12,9704	1,0090
<b>Vztlak</b>	30,0381	30,2898	0,9917
<b>Moment</b>	2,4417	2,4529	0,9954

**Obr. 54 Tabulka porovnání kalibračních konstant**

Z tabulky lze vidět, že vzájemná odchylka obou kalibrací je minimální a můžeme usoudit, že použité síly pro výpočet aerodynamických součinitelů, které byly naměřeny na základě počáteční kalibrace, odpovídají skutečným silám, které působí na model. [12]

## 5.2 Znaménkové konvence

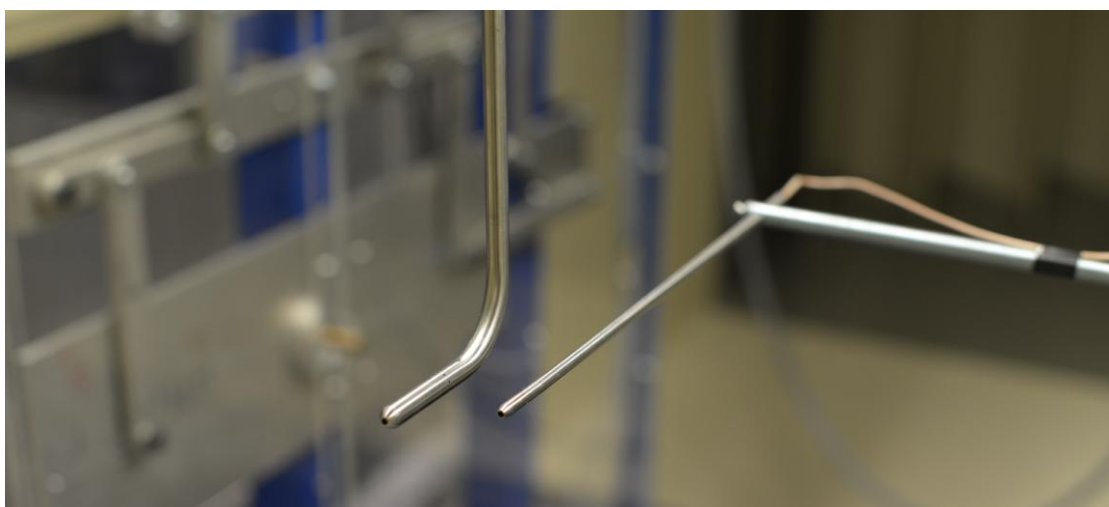
Kladná orientace jednotlivých sil, momentu a úhlu náběhu s ohledem na směr větru byly v celé této práci uvažovány tak, jak jsou uvedeny na *obr. 55*.



Obr. 55 Schéma znaménkové konvence použité v práci

## 5.3 Rychlostní profily větru pomocí CTA

Po kalibraci vah byla provedena i kalibrace Prandtl – Pitotovy trubice pomocí CTA (*obr. 56*, více o těchto přístrojích v kap. 4.2) a bylo následně provedeno měření rychlostních profilů (také využitím CTA) mezi vahami bez přítomnosti modelu, aby byl známý charakter proudění v „prázdném“ tunelu a bylo možno určit míru blokování, velikost mezní vrstvy v okolí vah apod.

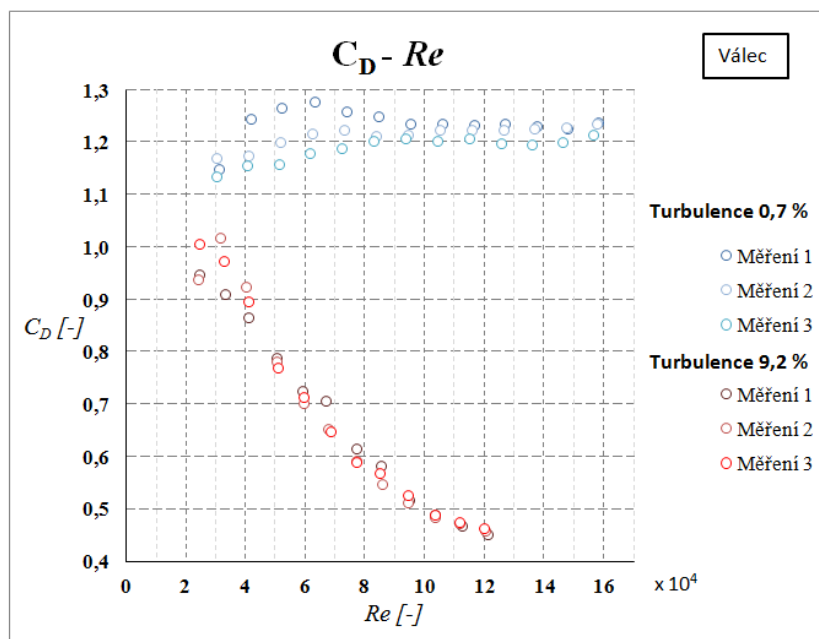


Obr. 56 Kalibrace Prandtl - Pitotovy trubice pomocí CTA

Na základě naměřených rychlostních profilů a jejich porovnáním s naměřenou rychlostí během experimentu se zjistilo, že by Prandtl- Pitotova trubice umístěná před modelem mohla vykazovat (zvláště v případě modelů větších rozměrů, které na sobě mají umístěný i model některého z vozů) lehce modifikovanou rychlost proudění vlivem blokování (kap. 3.4), což by vedlo ke značnému zkreslení i výsledných hodnot zjišťovaných koeficientů. Abychom dosáhli co nejpřesnějších výsledků, je nutno uvažovat rychlost, která není modelem nijak ovlivněna a proto se rychlost pro určení aerodynamických součinitelů stanovila ze vztahu, který vychází z naměřených rychlostních profilů a známého příkonu motoru ventilátoru. Tento postup pro určení ničím neovlivněné rychlosti vzduchu v tunelu a zároveň i správná kalibrace vah byly ověřeny pomocí zkušební měření pro stanovení „tabulkového“ součinitele čelního odporu válce.

## 5.4 Součinitel čelního odporu válce

Před samotným měřením na modelech mostů bylo ještě provedeno zkušební měření pro stanovení součinitele čelního odporu válce, který byl již několikrát podrobně zkoumán a jeho průběh v závislosti na rychlosti (popř. Reynoldsově čísle) je pro nás dobře známý. Hodnota  $C_D$  činí 1,2 pro celý měřený rozsah  $Re$ .



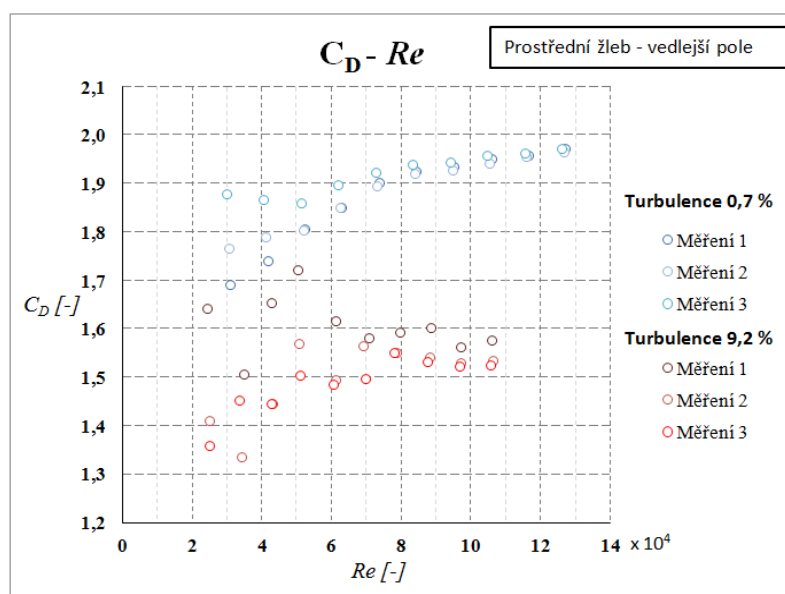
Obr. 57 Součinitel odporu válce v závislosti na  $Re$

Pozn.: Tabulky z různých zdrojů obecně uvádějí, že za minimální intenzity turbulence a pro režim obtékání  $10^3 < Re < 3 \cdot 10^5$  je  $C_D \approx 1 - 1,2$ .

Stanovení aerodynamického součinitele bylo provedeno pro dvě různé intenzity turbulence, první pro prázdný tunel rovna 0,7% a druhá při umístění generátoru turbulence rovna 9,2%, za výkonu ventilátoru v rozmezí 15 – 75%. Každé z měření bylo provedeno celkem třikrát. Výsledné hodnoty tohoto zkušebního měření jsou zobrazeny v grafu na obr. 57. Lze si povšimnout, že se hodnoty koeficientu v daném rozmezí Reynoldsova čísla pohybují okolo hodnoty 1,2. Z toho je možno usoudit, že kalibrace vah i způsob určení rychlosti jsou správné. Dále můžeme sledovat, že při zvyšujícím se  $Re$  dochází i jistému rozptylu naměřených hodnot, to je způsobeno přiblížením se tzv. kritickému Reynoldsovu číslu, kde při jeho překročení hodnoty koeficientu odporu prudce klesají.

## 5.5 Volba vhodné rychlosti proudění pro experiment

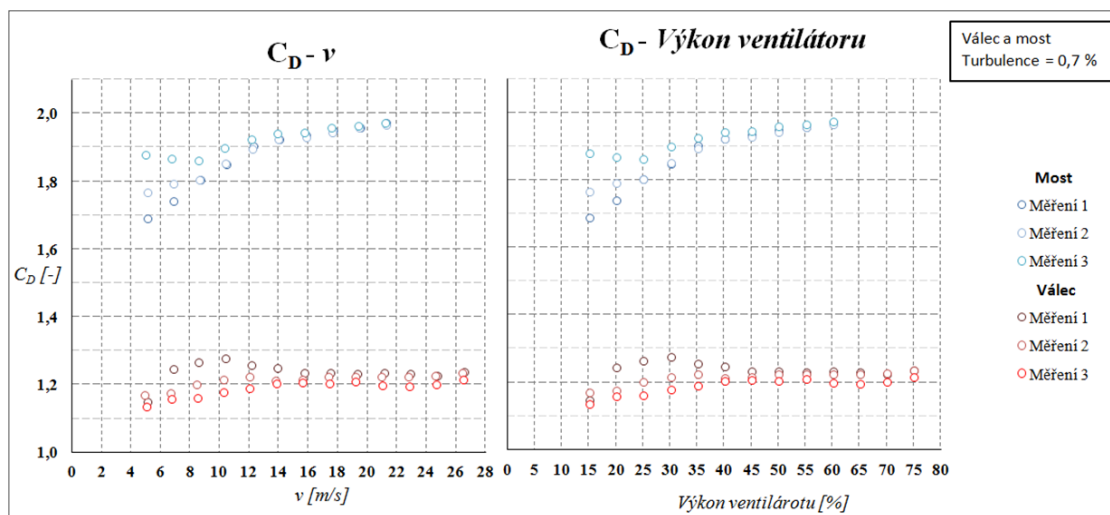
Všechna měření jsou provedena pro jednotnou rychlost proudění větru. Jak je již zmíněno v kap. 1.3, z hlediska nejvěrnější interpretace výsledků je nutné dosáhnout stejného  $Re$  jako je u skutečné konstrukce. K tomu, aby tato podmínka byla splněna, bychom museli provést měření za velmi vysoké rychlosti, což je nejen nemožné z hlediska provozu tunelu, nýbrž nepraktické kvůli možnému zničení vytvořených modelů. V našem případě však není bezpodmínečně nutné tuto podmínku dodržet, jelikož se charakter obtékání už od nízkých hodnot  $Re$  téměř nemění, protože v nízkých rychlostech dochází k turbulentnímu proudění. Abychom mohli stanovit vhodnou rychlost proudu, byl jeden vybraný model mostu (Prostřední žleb – vedlejší pole) testován při různých  $Re$  číslech (obr. 58).



Obr. 58 Součinitel čelního odporu mostu Prostř. žleb - vedl. pole v závislosti na  $Re$

Měření opět proběhlo pro obě intenzity turbulence. Bylo rozhodnuto, že stěžejní měření mostů proběhne pouze s intenzitou turbulence rovnou 0,7%. Důvodem je, že vyšší turbulence vyvolává snížení rychlosti proudění a na odezvu konstrukce působí oproti nízkým turbulencím spíše příznivě.

Bylo stanoveno, že všechny zkoušky budou provedeny při výkonu ventilátoru 45%, což odpovídá  $Re \approx 9 \cdot 10^4$  a rychlosti  $v = 16$  m/s (obr. 59).



Obr. 59 Součinitel čelního odporu válce a mostu (4.3.5) v závislosti na rychlosti a výkonu ventilátoru

## 5.6 Experimentální měření aerodynamických součinitelů mostů

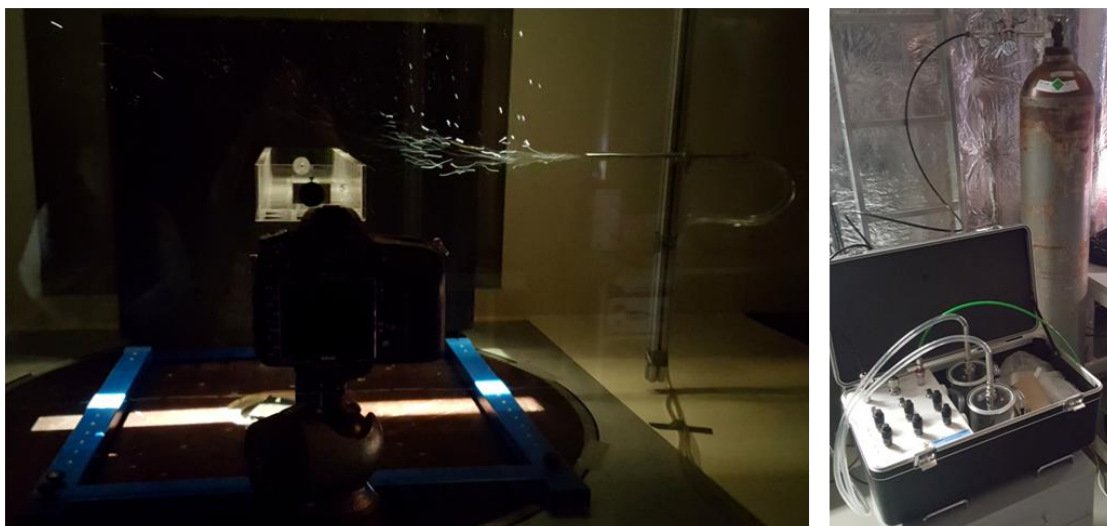
Modely mostů o daném měřítku musely být před každým měření na připraveném místě osazeny jednotnými úhlově nastavitelnými hliníkovými ložisky, díky kterým mohl být model ve větrném tunelu umístěn do experimentálního stojanu aerodynamických vah.

Měření bylo provedeno pro každý model mostu celkem v pěti konfiguracích: **prázdný most**, **most s vozem Regionova**, **most s vozem Kils 12**, **most s vozem SGS** a **most s vozem City Elefant**. Jednotlivé konfigurace byly měřeny v úhlech náběhu  $\alpha$  od  $10^\circ$  do  $-10^\circ$  po  $2,5^\circ$ . Pro vyšší přesnost výsledků byla všechna měření provedena třikrát.

Výsledné průběhy aerodynamických koeficientů v závislosti na úhlu náběhu jsou zobrazeny v kap. 6.1. Hodnoty stanovených aerodynamických součinitelů v závislosti na úhlu náběhu jsou uvedeny v tabulkách v Příloze 1. Stanovené hodnoty odpovídají průměru z naměřených třech hodnot. Uvedené grafy a tabulky byly zpracovány v excelu. Samotný výpočet součinitelů byl proveden v programu Matlab.

## 5.7 Vizualizace

V laboratoři větrného tunelu je možno provést i vizualizaci charakteru obtékání konstrukce. Celkem jsou přístupné tři hlavní metody, které se pro vizualizaci běžně používají i v ostatních větrných tunelech nejen v České republice. Tou z nejkvalitnějších je **PIV (Particle Image Velocimetry)**, jež probíhá tak, že se do vzduchu v tunelu vypustí částice aerosolu, které jsou v místě umístění modelu ozářeny a následně při dané rychlosti větru a v určitých okamžicích zaznamenávány na speciální fotoaparát s vysokou citlivostí. Snímky jsou dále zpracovány příslušným počítačem, který vypočítá rychlost proudění v každém bodě na základě posunu částic. U této metody je vhodné model nabarvit na černo s černým pozadím, abychom se vyhnuli odleskům od světla. Další z metod je **vizualizace kouřem**. Jedná se o páru glycerinu, která vzniká zahříváním glycerinové směsi pomocí el. spirály. I u této metody je lepší, aby model byl tmavé barvy a pozadí černé. Poslední z metod a použitou v této práci je **vizualizace bublinkami** (obr. 60). Princip metody spočívá ve vypuštění bublinek směrem k modelu, který je opět osvětlen a na černém pozadí. V tomto případě není nutné tmavě barvit model. K výrobě bublinek byl použit přístroj Helium bubble generator SAI Model 5, který bublinky vyrábí z doporučené směsi od výrobce (BFS – Bubble Film Solution), helia a vzduchu.



**Obr. 60 Sestavení aparatury pro vizualizaci pomocí bublinek**

Vizualizace byla provedena pouze jako doplněk k naměřeným výsledkům a pro znázornění charakteru proudění v místě modelu, nikoliv k hlubšímu zkoumání obtékání konstrukce, proto byla udělána jen pro některé vybrané mosty (4.3.3, 4.3.4 a 4.3.6).



## 6. Výsledky experimentálního měření ve větrném tunelu

### 6.1 Aerodynamické součinitele mostů

V tabulce základních rozměrů uvedené u každého z mostů se  $A_{ref}$  rozumí jako referenční plocha pro výpočet aerodynamického součinitele odporu, tedy průmět konstrukce do roviny kolmé na směr větru při úhlu náběhu  $\alpha = 0^\circ$ . Všechny referenční plochy byly vypočteny z ručně přeměřených rozměrů vytvořených modelů, a proto se hodnoty mohou trochu lišit od ploch vypočítaných z 3D modelu konstrukcí.

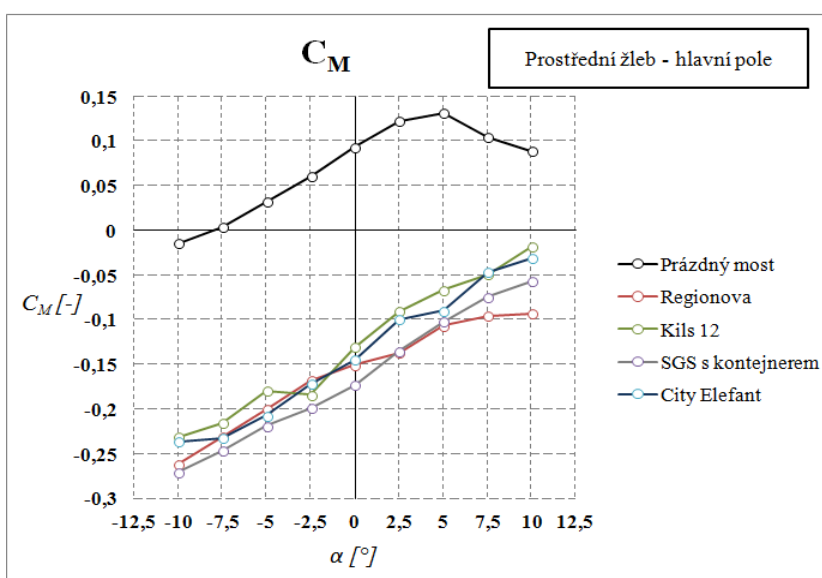
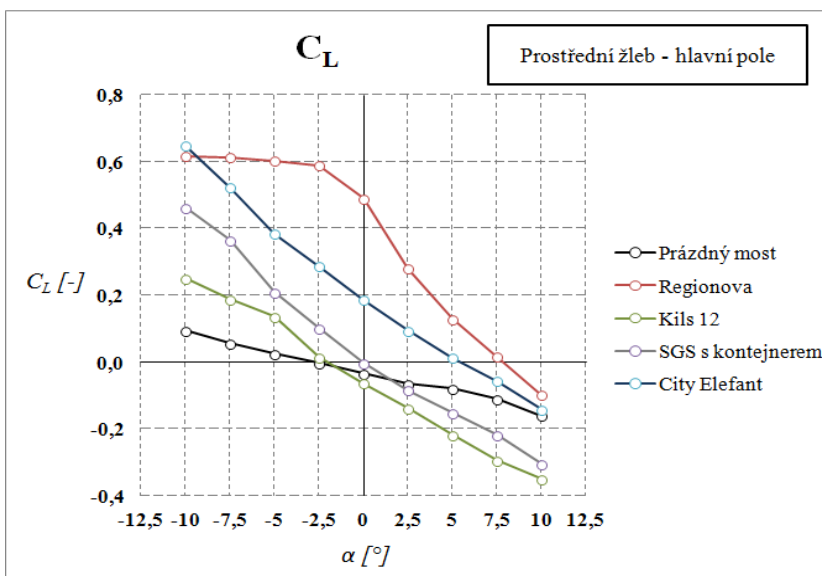
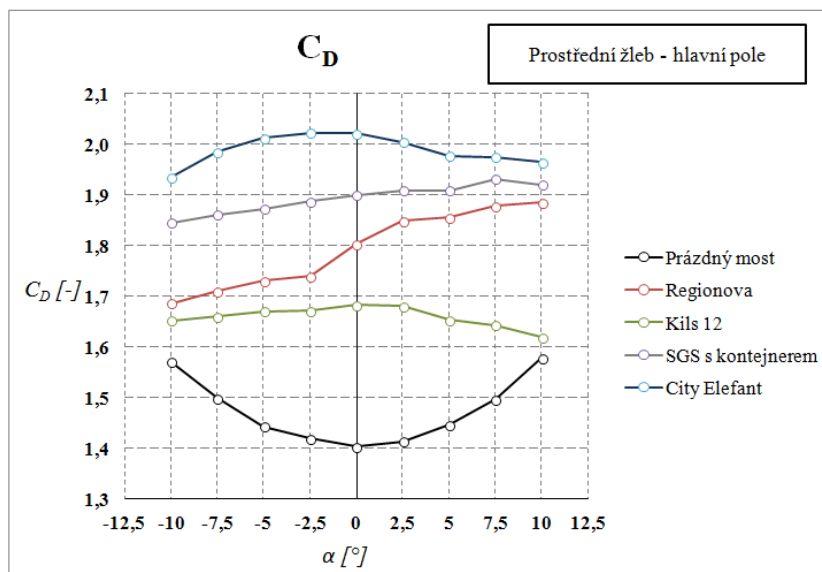
#### 6.1.1 Prostřední žleb - hlavní pole

PROSTŘEDNÍ ŽLEB - HLAVNÍ POLE			
B = 0,238 m	L = 0,983 m	$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	D [m]
PRÁZDNÝ MOST		0,2428	0,435
REGIONOVA		0,3229	0,435
KILS 12		0,3521	0,435
SGS s kontejnerem		0,3441	0,435
CITY ELEFANT		0,3541	0,435

Obr. 61 Prostřední žleb – hlavní pole: Tabulka základních rozměrů



Obr. 62 Prostřední žleb – hlavní pole: Model mostu se soustavou vozu Kils 12



Obr. 63 Prostřední žleb – hlavní pole: Výslední aerodynamičtí součinitelé



## 6.1.2 Červená

### ČERVENÁ

<b>B = 0,227 m</b>	<b>L = 1,000 m</b>	<b>A<sub>ref</sub> [m<sup>2</sup>]</b>	<b>D [m]</b>
<b>PRÁZDNÝ MOST</b>		<b>0,2398</b>	<b>0,387</b>
<b>REGIONOVA</b>		<b>0,3078</b>	<b>0,484</b>
<b>KILS 12</b>		<b>0,3456</b>	<b>0,520</b>
<b>SGS s kontejnerem</b>		<b>0,3343</b>	<b>0,511</b>
<b>CITY ELEFANT</b>		<b>0,3449</b>	<b>0,530</b>

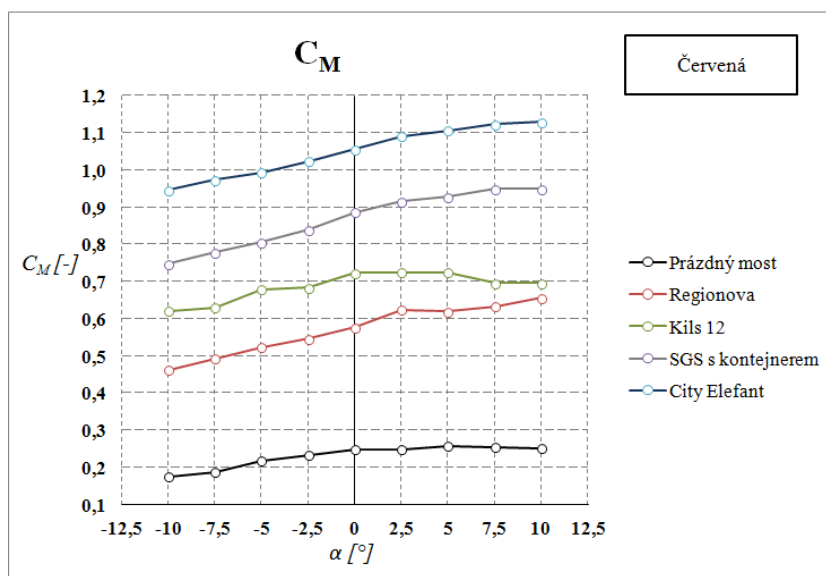
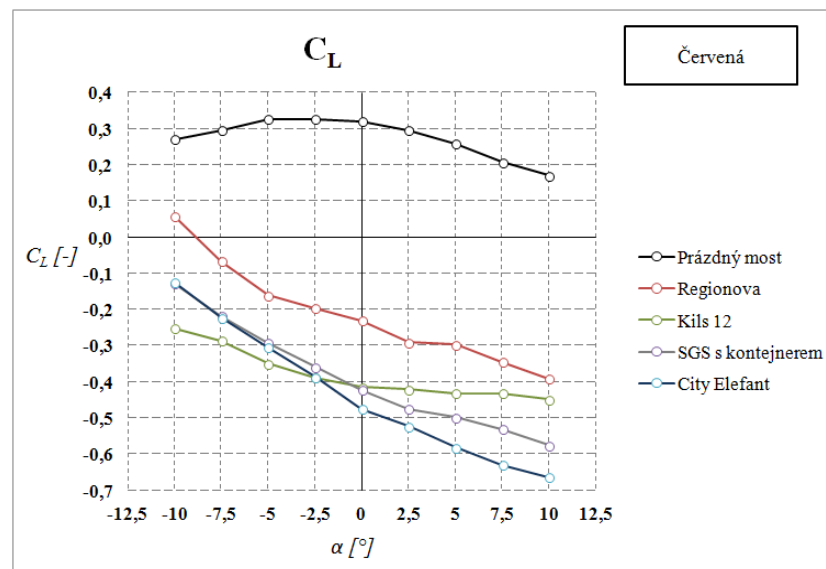
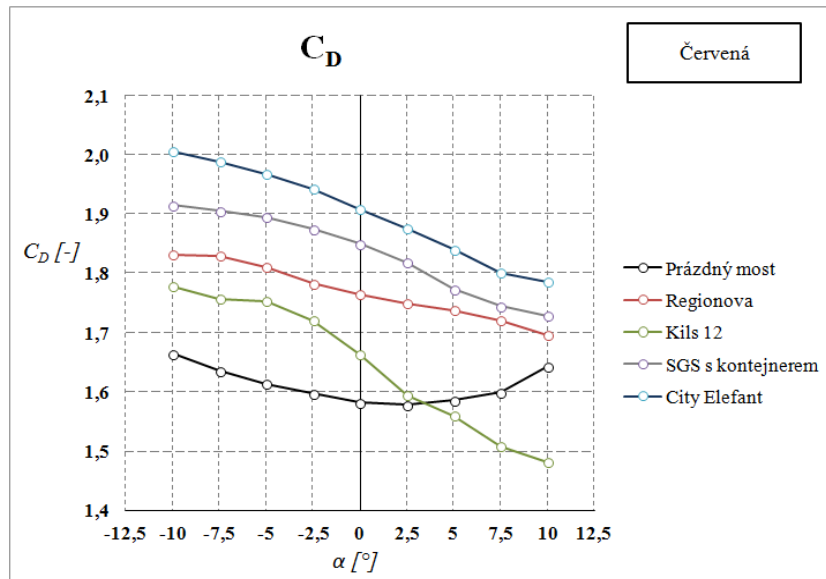
Obr. 64 Červená: Tabulka základních rozměrů



Obr. 65 Červená: Model mostu



Obr. 66 Červená: Model mostu se soustavou vozu City Elephant

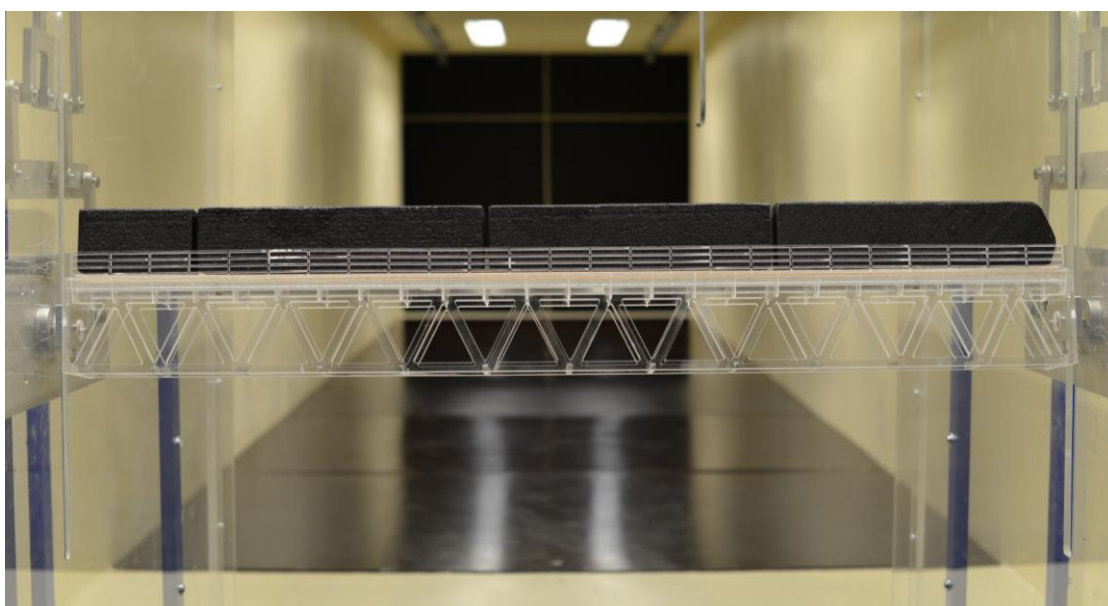


Obr. 67 Červená: Výslední aerodynamičtí součinitelé

### 6.1.3 Znojemský viadukt

ZNOJEMSKÝ VIADUKT			
B = 0,101 m	L = 1,011 m	$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	D [m]
PRÁZDNÝ MOST		0,1161	0,096
REGIONOVA		0,1744	0,155
KILS 12		0,1852	0,165
SGS s kontejnerem		0,1791	0,159
CITY ELEFANT		0,1904	0,171

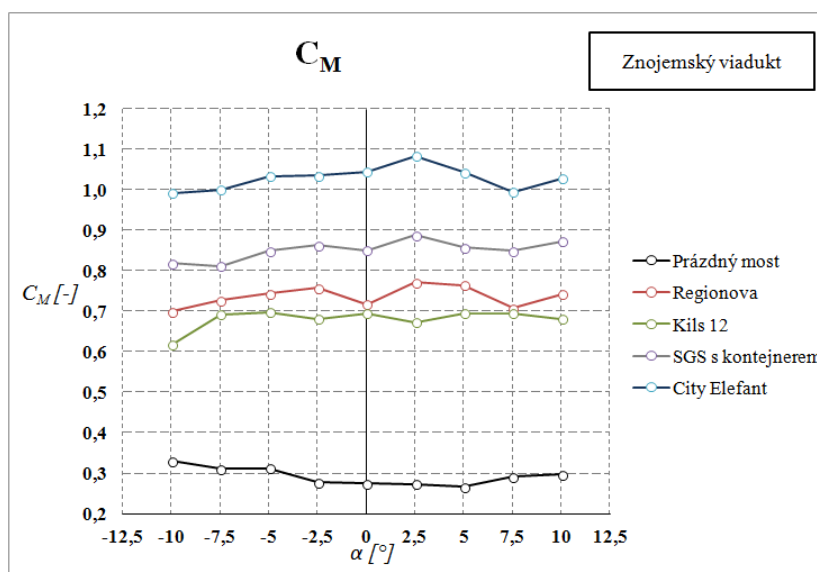
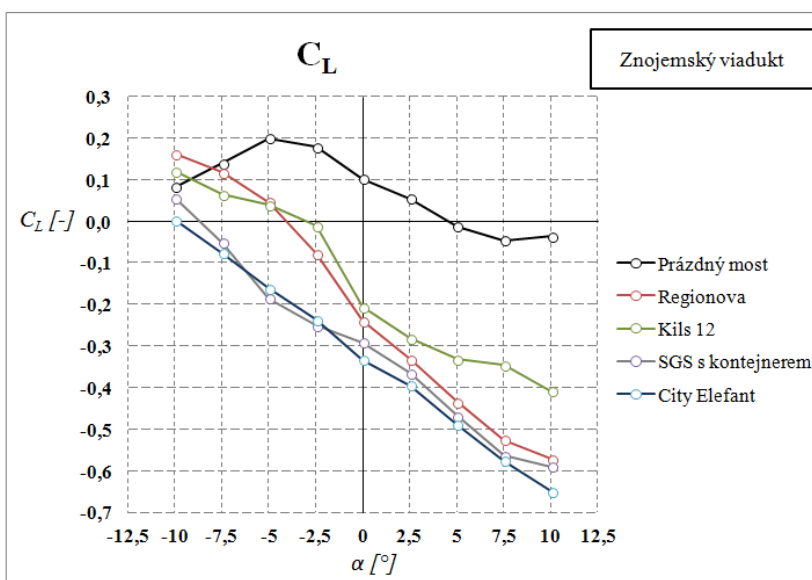
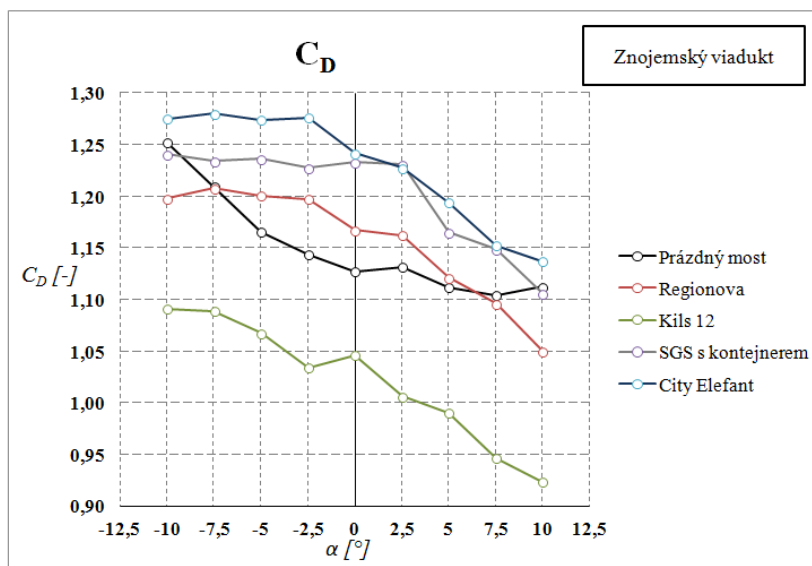
Obr. 68 Znojemský viadukt: Tabulka základních rozměrů



Obr. 69 Znojemský viadukt: Model mostu se soustavou vozu City Elephant

U tohoto mostu byl navíc zkoumán i vliv započtení zábradlí na koeficient  $C_D$  (obr. 71 a 72). Zábradlí zabírá zhruba 6,7 % celkové plochy mostu a jeho připočtením do  $A_{ref}$  nám vyvolá pokles výsledných hodnot  $C_D$  cca o 0,08. Z hlediska bezpečnosti tedy zanedbání plochy zábradlí nijak neškodí, protože konstrukce je posuzována na větší tlakové síly v daném směru.

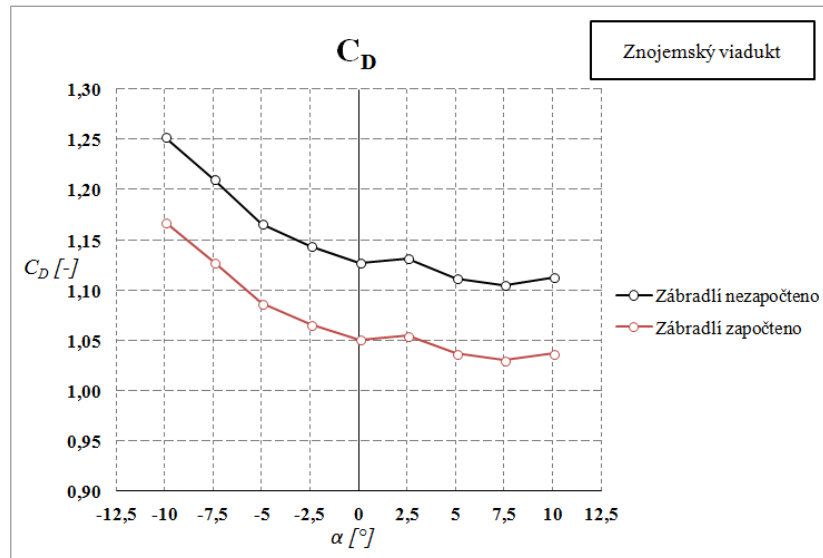
Byla také provedena jednoduchá vizualizace pro lepší představu o proudění v okolí konstrukce (obr. 73). Z obrázku lze vysledovat, že v případě prázdného mostu se proudění před a za modelem nijak výrazně neliší. To je způsobeno prodyšností příhradové konstrukce. Naopak v případě, kdy přidáme i vlak, se v závětrné oblasti (zejména za horní částí, kde se nachází vlak) začnou tvořit jasně zřetelné víry.



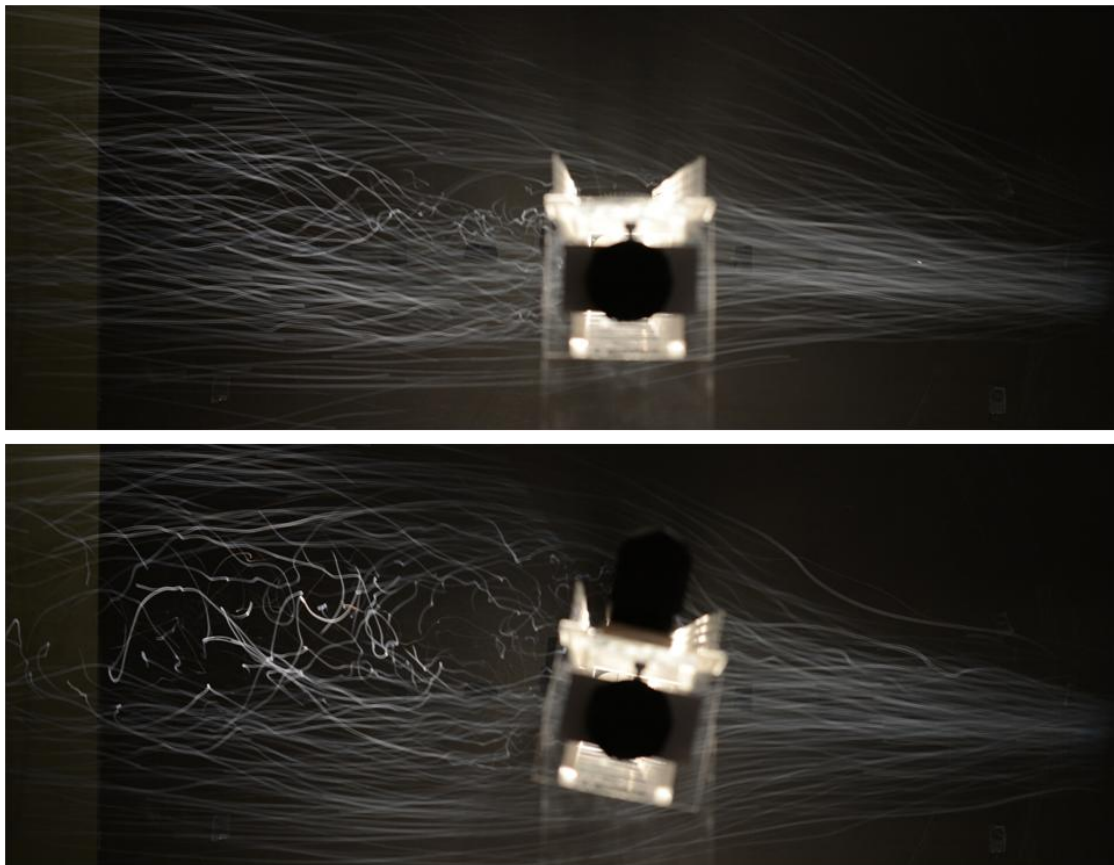
Obr. 70 Znojenský viadukt: Výslední aerodynamičtí součinitelé

ZNOJEMSKÝ VIADUKT			
PRÁZDNÝ MOST			
B = 0,101 m	L = 1,011 m	A <sub>ref</sub> [m <sup>2</sup> ]	D [m]
Zábradlí nezapočteno		0,1161	0,096
Zábradlí započteno		0,1245	0,121

Obr. 71 Znojemský viadukt: Tabulka základních rozměrů - zábradlí



Obr. 72 Znojemský viadukt: Vliv započtení zábradlí na C<sub>D</sub>



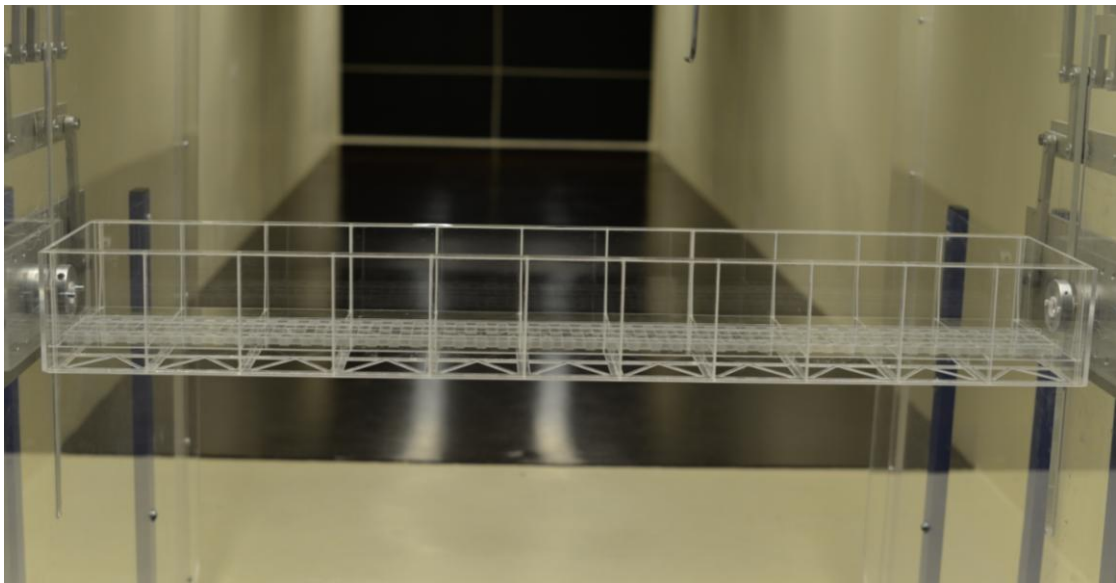
Obr. 73 Znojemský viadukt: Vizualizace bublinkami



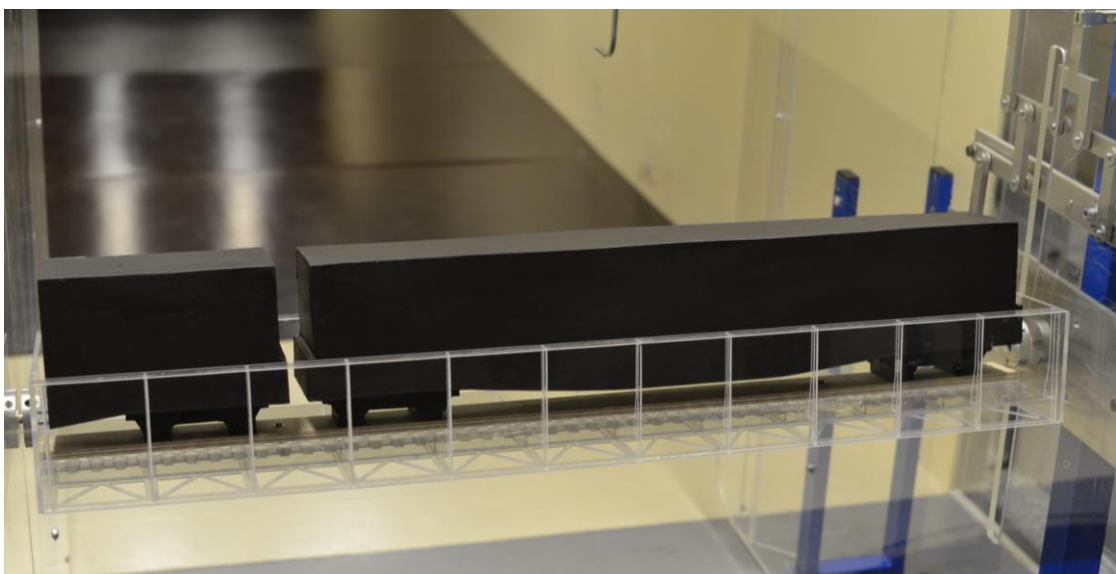
## 6.1.4 Babín

<b>BABÍN</b>			
<b>B = 0,235 m</b>	<b>L = 1,010 m</b>	<b>A<sub>ref</sub> [m<sup>2</sup>]</b>	<b>D [m]</b>
<b>PRÁZDNÝ MOST</b>		<b>0,1182</b>	<b>0,117</b>
<b>REGIONOVA</b>		<b>0,1706</b>	<b>0,171</b>
<b>KILS 12</b>		<b>0,2055</b>	<b>0,206</b>
<b>SGS s kontejnerem</b>		<b>0,1969</b>	<b>0,198</b>
<b>CITY ELEFANT</b>		<b>0,2107</b>	<b>0,217</b>

Obr. 74 Babín: Tabulka základních rozměrů

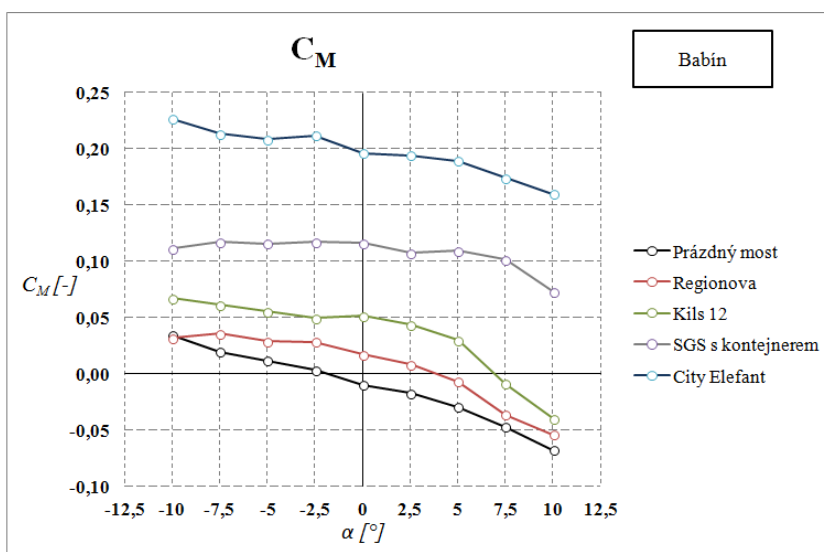
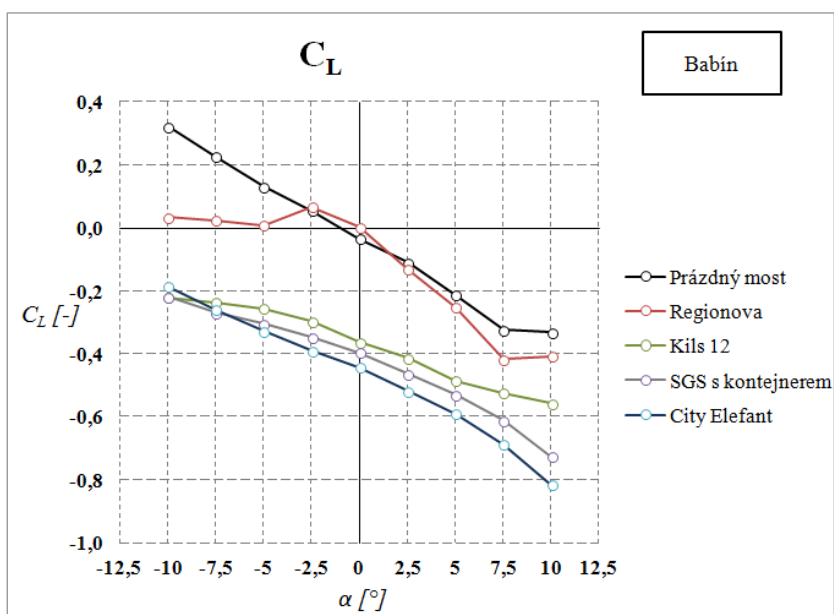
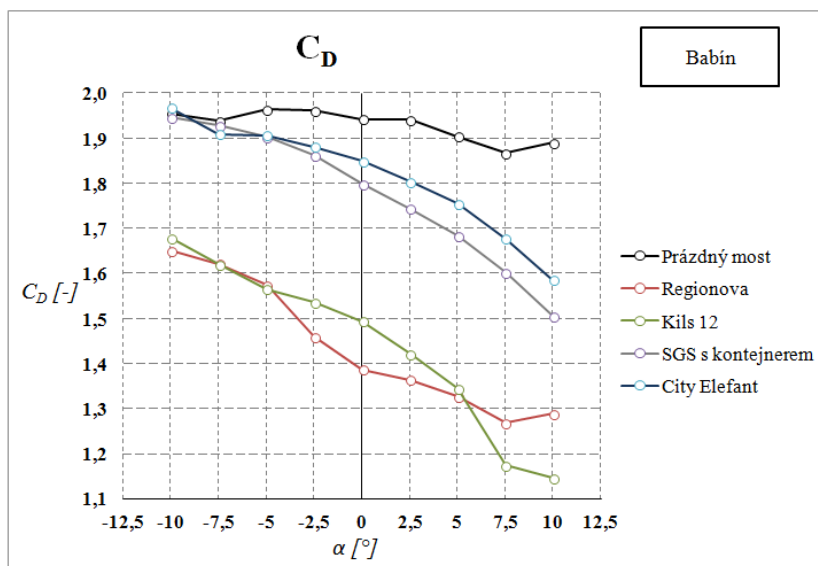


Obr. 75 Babín: Model mostu



Obr. 76 Babín: Model mostu se soustavou vozu SGS





**Obr. 77 Babín: Výslední aerodynamičtí součinitelé**

### 6.1.5 Prostřední žleb - vedlejší pole

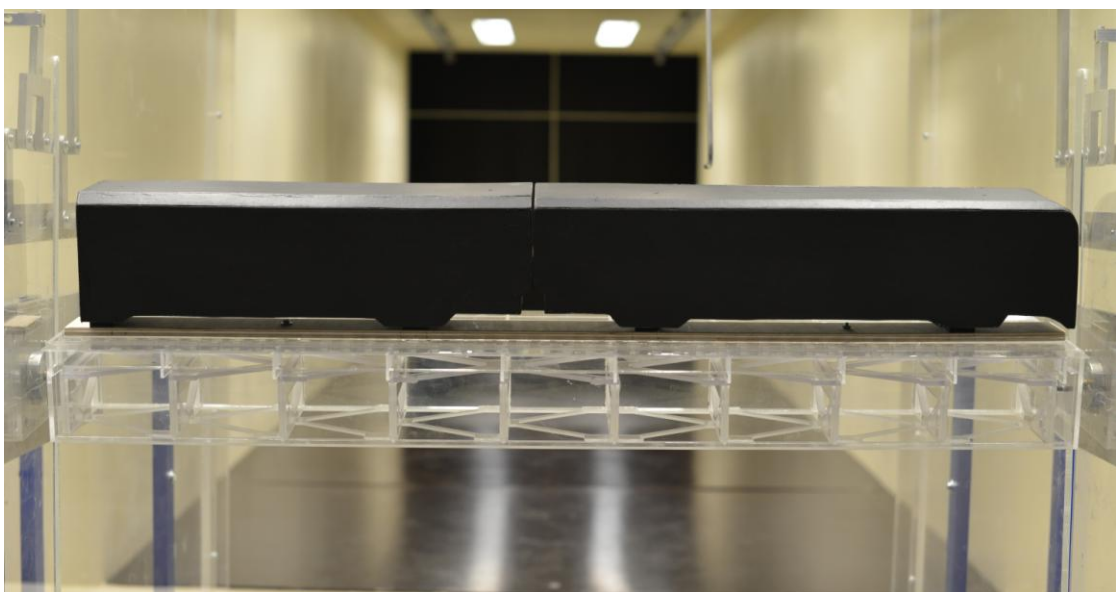
**PROSTŘEDNÍ ŽLEB - VEDLEJŠÍ POLE**

<b>B = 0,201 m</b>	<b>L = 1,011 m</b>	<b><math>A_{ref}</math> [m<sup>2</sup>]</b>	<b>D [m]</b>
<b>PRÁZDNÝ MOST</b>		<b>0,1011</b>	0,100
<b>REGIONOVA</b>		<b>0,2408</b>	0,244
<b>KILS 12</b>		<b>0,2787</b>	0,281
<b>SGS s kontejnerem</b>		<b>0,2673</b>	0,271
<b>CITY ELEFANT</b>		<b>0,2778</b>	0,291

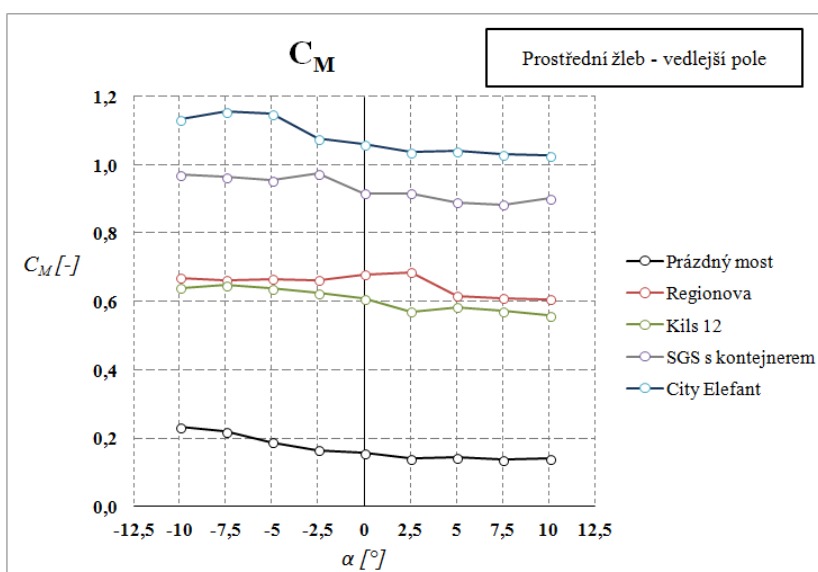
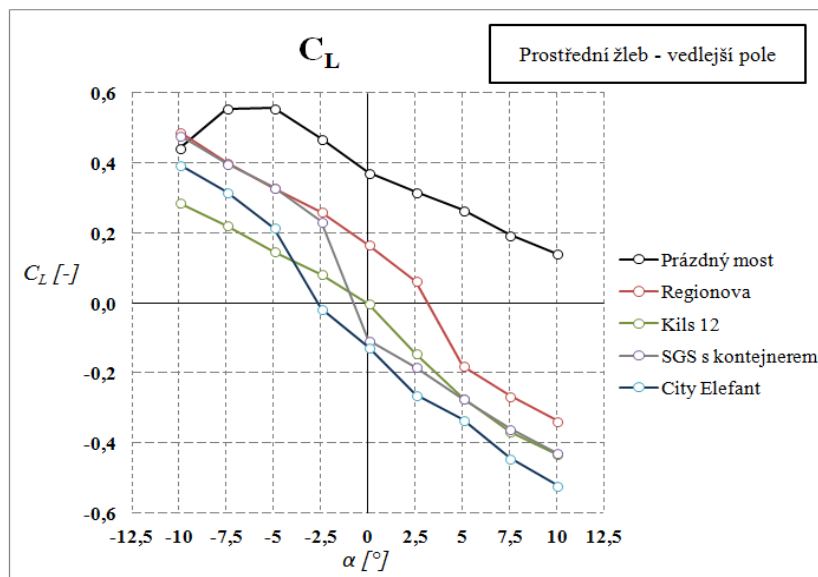
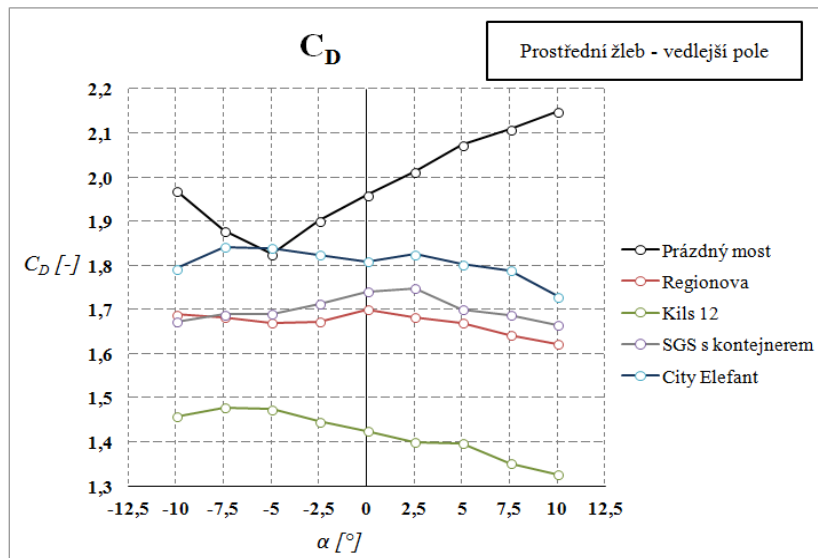
**Obr. 78** Prostřední žleb - vedlejší pole: Tabulka základních rozměrů



**Obr. 79** Prostřední žleb - vedlejší pole: Model mostu



**Obr. 80** Prostřední žleb - vedlejší pole: Model mostu se soupravou vozu Regionova



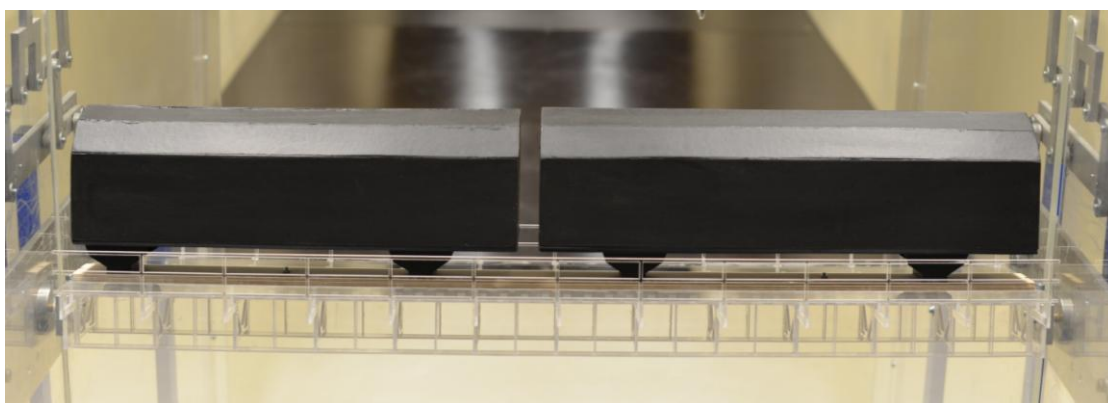
Obr. 81 Prostřední žleb - vedlejší pole: Výslední aerodynamičtí součinitelé

## 6.1.6 Brniště

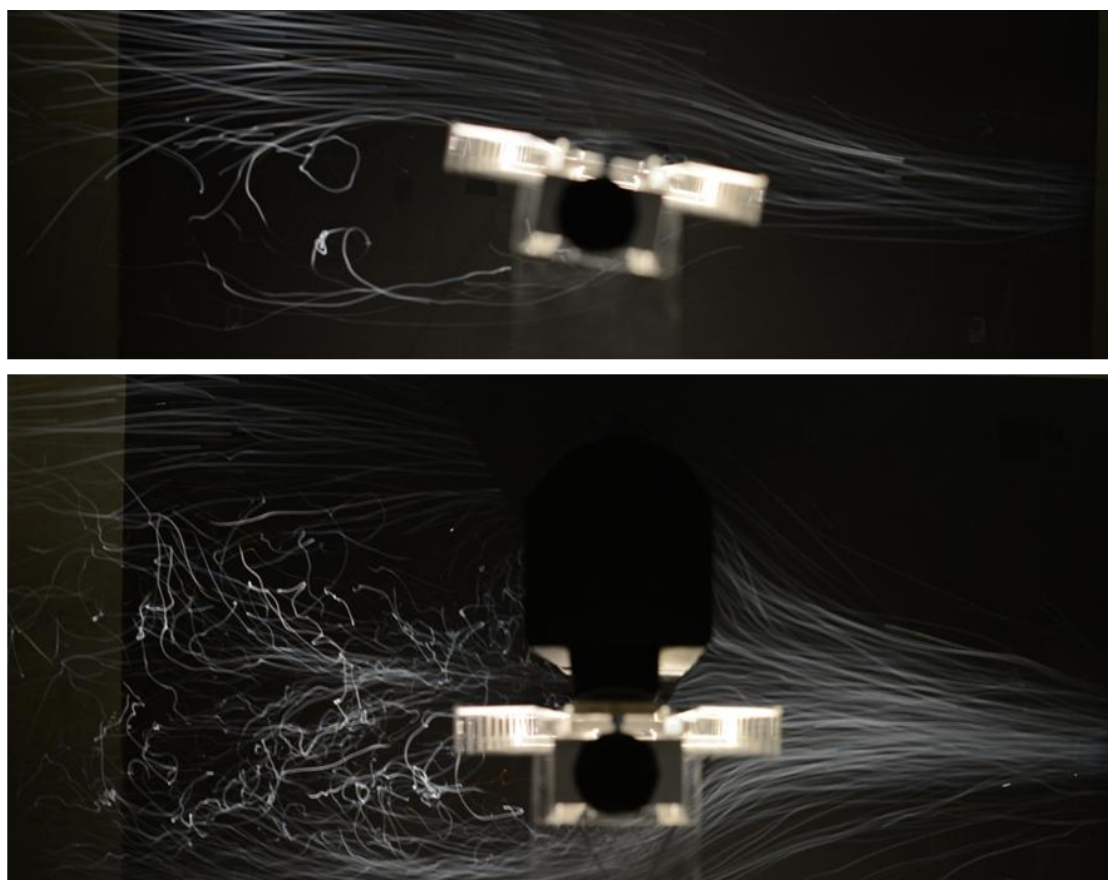
### BRNIŠTĚ

<b>B = 0,203 m</b>	<b>L = 1,011 m</b>	<b><math>A_{ref} [m^2]</math></b>	<b>D [m]</b>
<b>PRÁZDNÝ MOST</b>		<b>0,0718</b>	0,071
<b>REGIONOVA</b>		<b>0,2095</b>	0,213
<b>KILS 12</b>		<b>0,2464</b>	0,249
<b>SGS s kontejnerem</b>		<b>0,2351</b>	0,239
<b>CITY ELEFANT</b>		<b>0,2448</b>	0,258

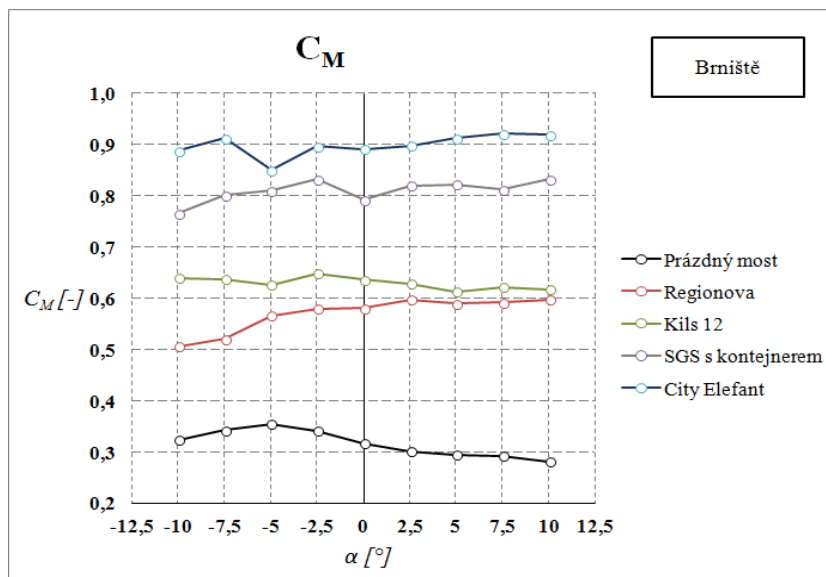
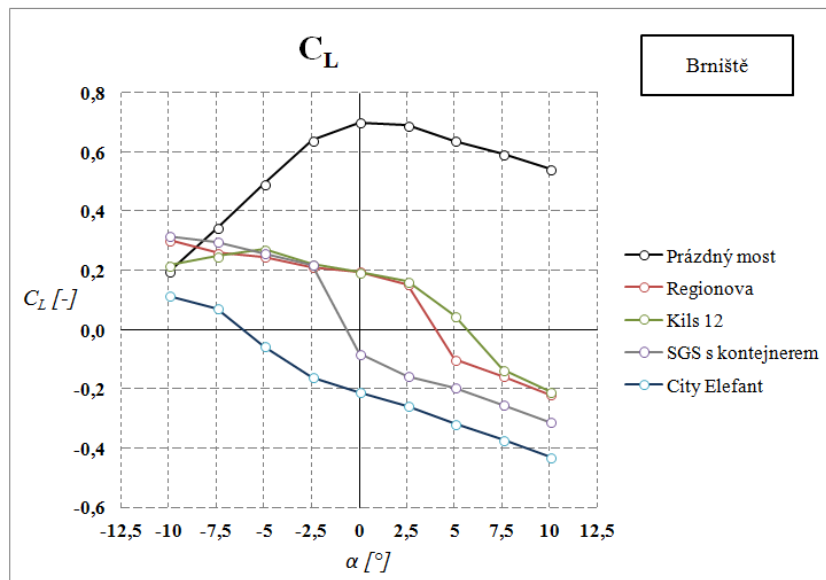
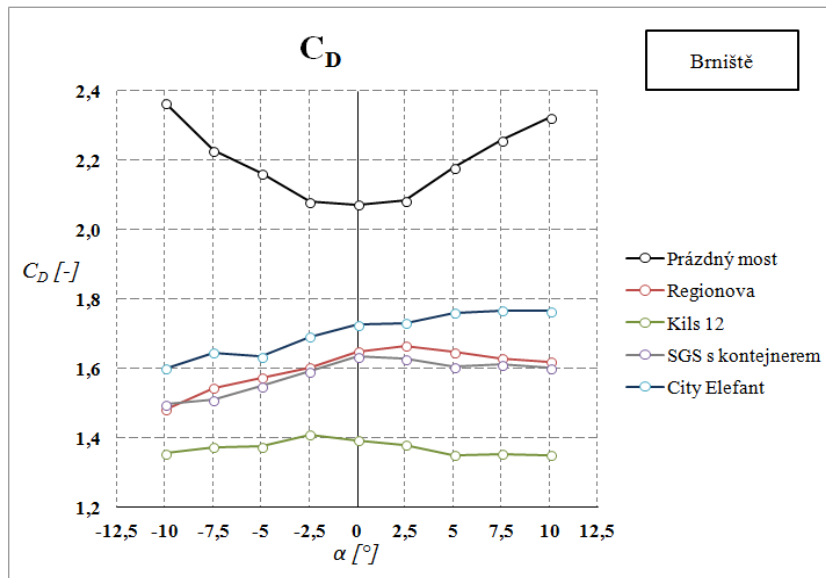
Obr. 82 Brniště: Tabulka základních rozměrů



Obr. 83 Brniště: Model mostu se soupravou vozu Kils 12



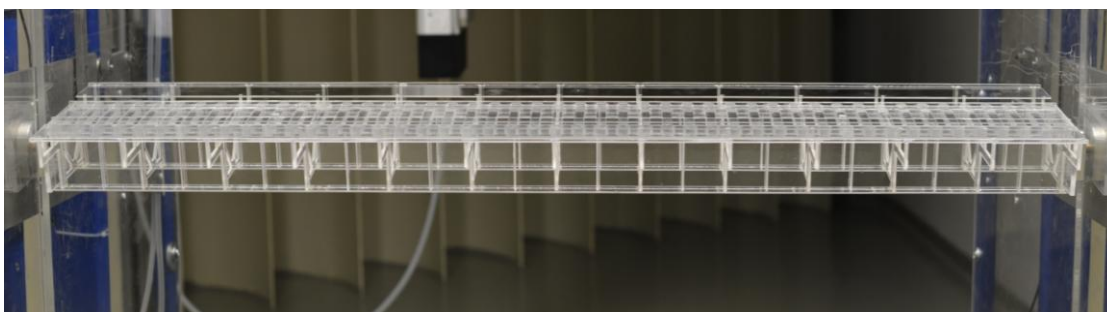
Obr. 84 Brniště: Vizualizace bublinkami



Obr. 85 Brniště: Výslední aerodynamičtí součinitelé

BRNIŠTĚ			
PRÁZDNÝ MOST			
B = 0,203 m	L = 1,011 m	A <sub>ref</sub> [m <sup>2</sup> ]	D [m]
Zábradlí nezapočteno		0,0718	0,071
Zábradlí započteno		0,0802	0,114
Bez zábradlí		0,0718	0,071

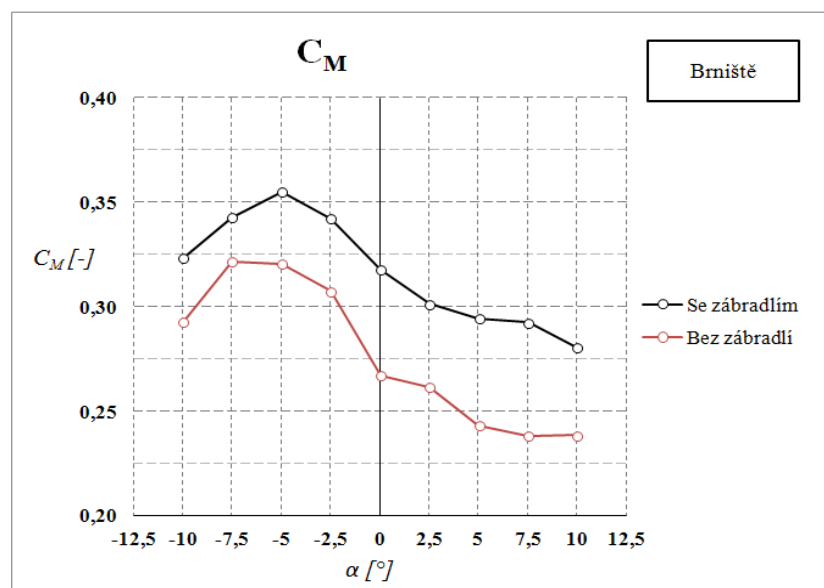
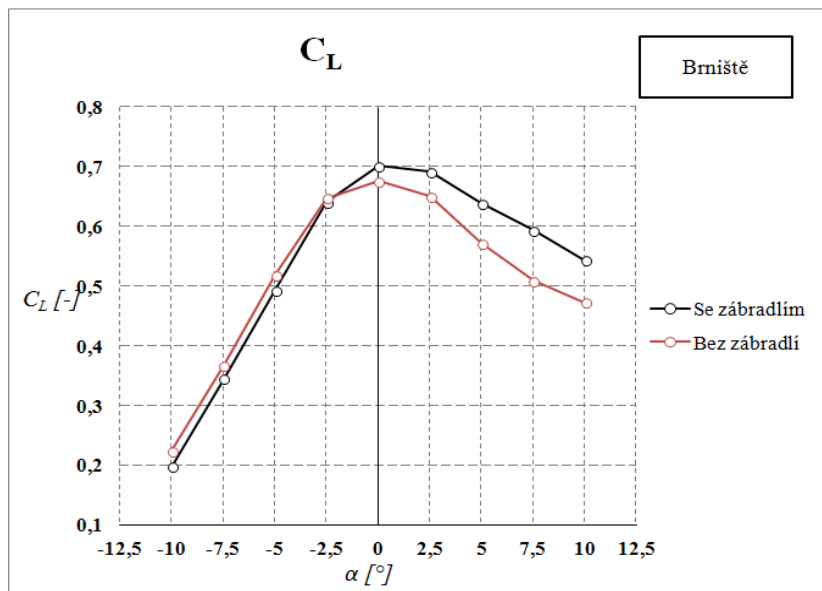
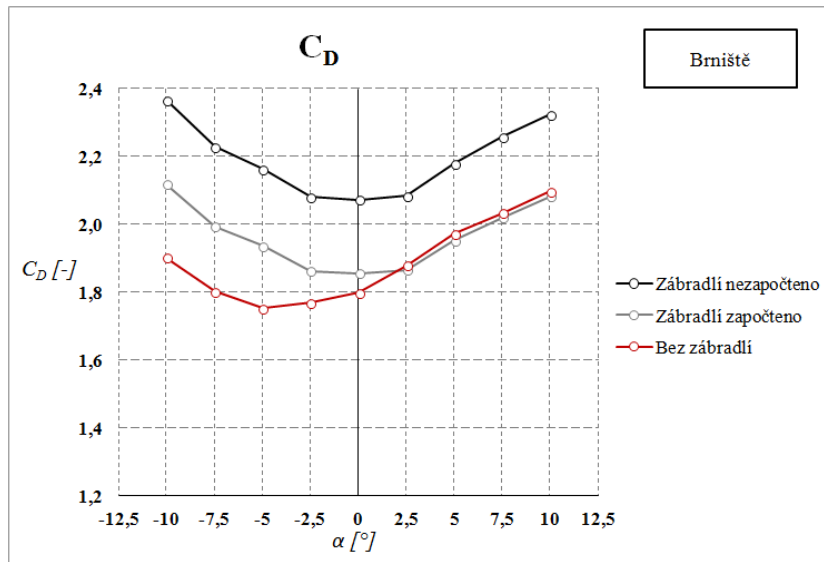
**Obr. 86 Znojemský viadukt: Tabulka základních rozměrů – zábradlí**



**Obr. 87 Brniště: Model mostu bez zábradlí**

Podobně jako Znojemského viaduktu (kap. 6.1.3) i u tohoto mostu byl zkoumán vliv zábradlí na aerodynamické vlastnosti konstrukce. V tomto případě zábradlí zabírá zhruba 10% celkové plochy. V rámci výzkumu bylo provedeno opakované měření pro konfiguraci prázdný most, kdy bylo z modelu zábradlí sejmuto. Můžeme tedy porovnat tři různé stavy: most se zábradlím bez započtení plochy zábradlí, most se zábradlím se započtenou plochou zábradlí a most bez zábradlí. V grafickém porovnání (*obr. 88*) můžeme vidět, že přítomnost zábradlí nám pro určité úhly náběhu vyvolává mírně vyšší hodnoty aerodynamického součinitele čelního odporu. Výsledky také vykazují o něco větší zatížení momentem pro model se zábradlím.



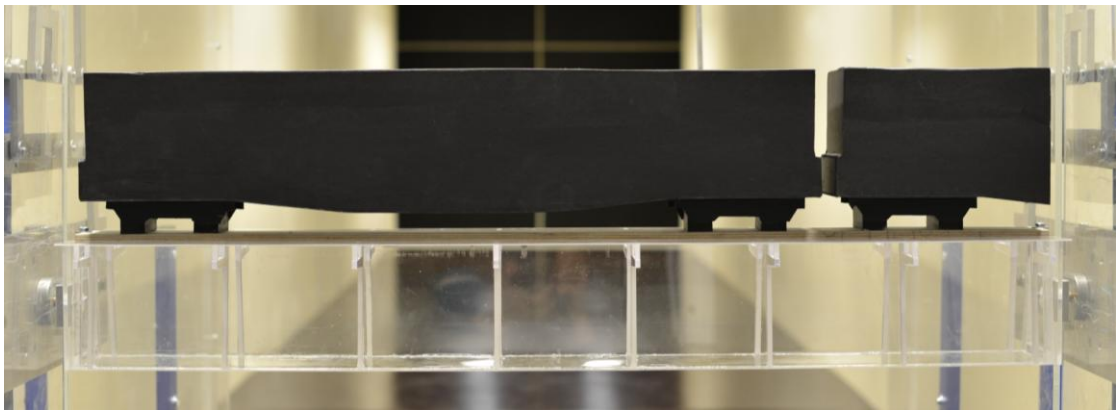


**Obr. 88 Brniště: Výslední aerodynamičtí součinitelé**

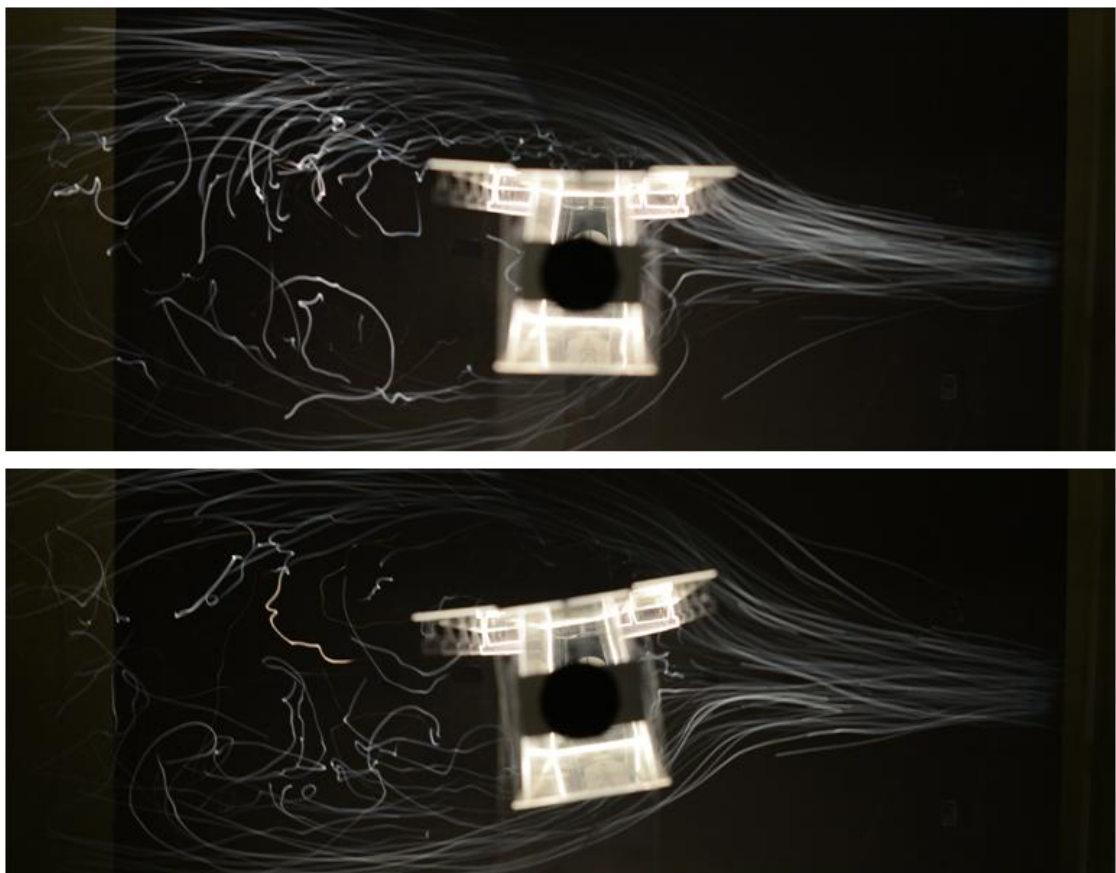
## 6.1.7 Jizera

JIZERA			
B = 0,198 m	L = 1,011 m	$A_{ref}$ [m <sup>2</sup> ]	D [m]
PRÁZDNÝ MOST		0,1324	0,131
REGIONOVA		0,2712	0,274
KILS 12		0,3080	0,310
SGS s kontejnerem		0,2977	0,301
CITY ELEFANT		0,3073	0,320

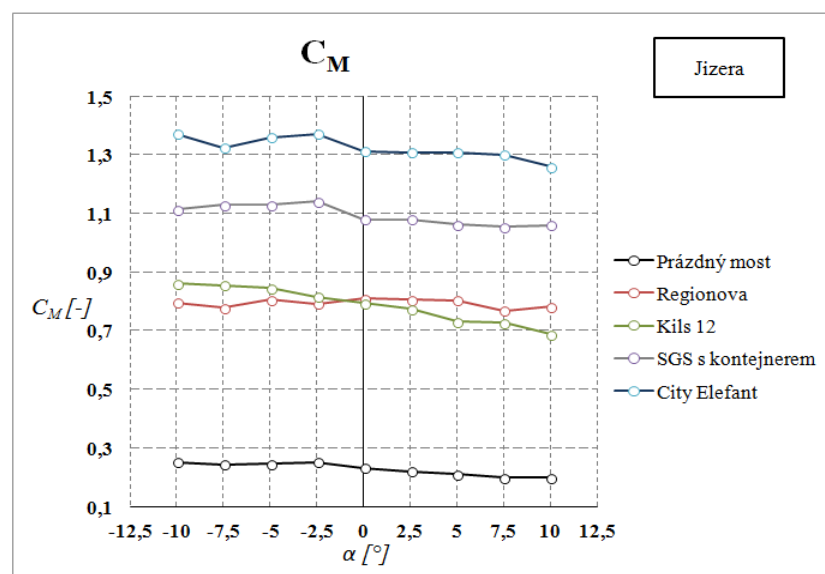
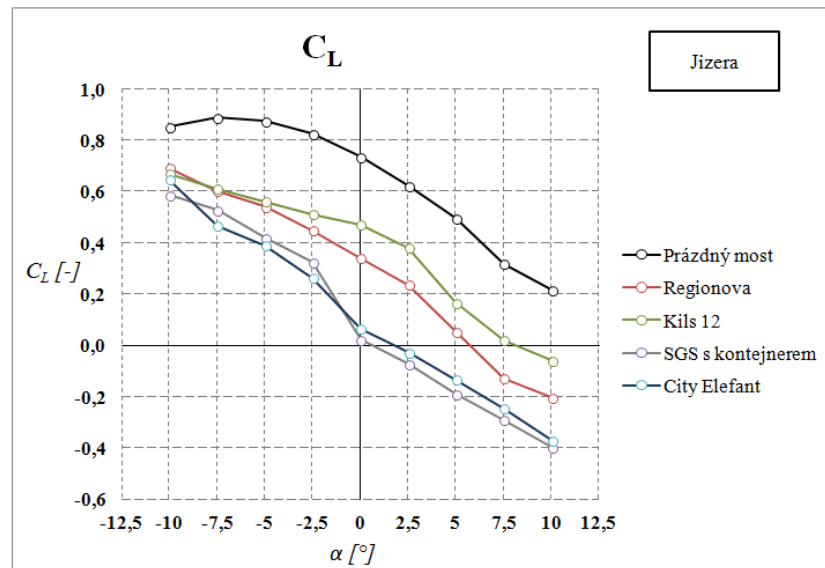
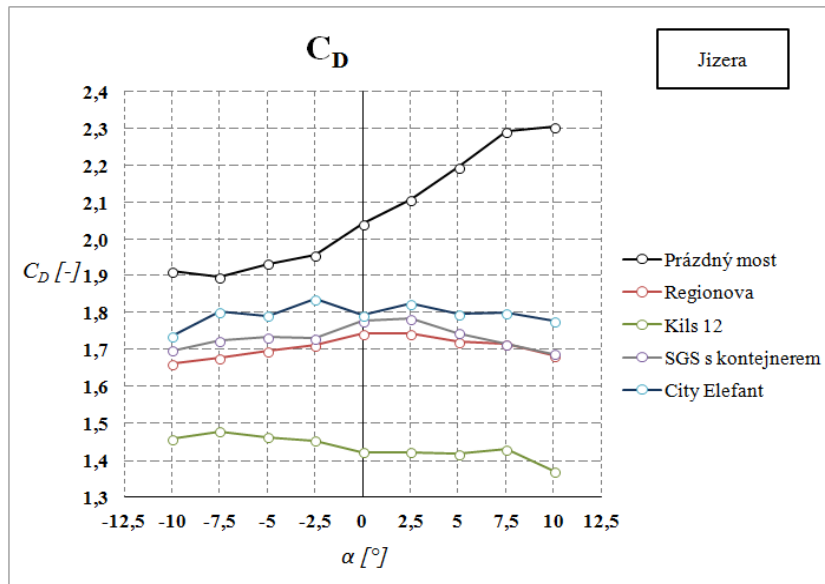
Obr. 89 Jizera: Tabulka základních rozměrů



Obr. 90 Jizera: Model mostu se soupravou vozu SGS



Obr. 91 Jizera: Vizualizace bublinkami



**Obr. 92 Jizera: Výslední aerodynamičtí součinitelé**

## 6.2 Porovnání mostů

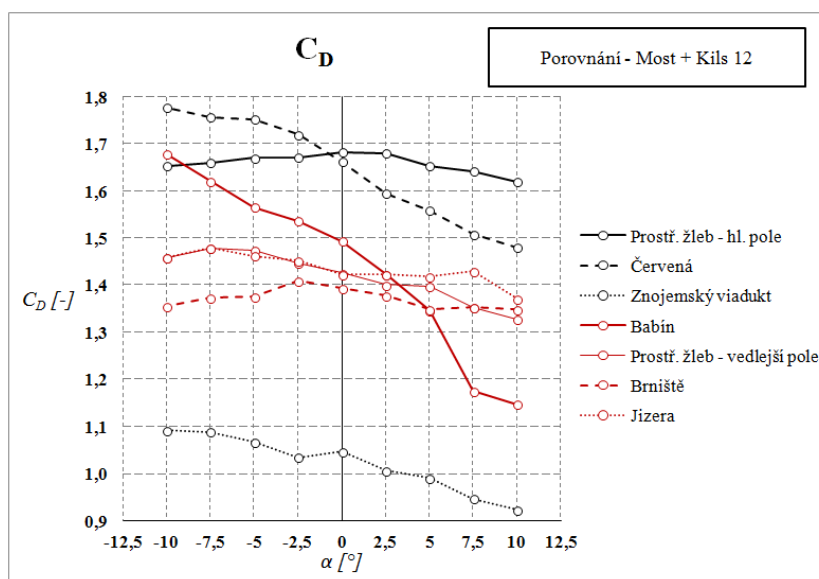
Abychom mohli mosty „kategorizovat“ musíme je nejprve porovnat mezi sebou. Pro porovnání byly zvoleny tři konfigurace, které obecně u všech mostů nejčastěji vykazovaly nějaký extrém mezi výslednými hodnotami. První konfigurací je **prázdný most**. V této konfiguraci dochází nejčastěji k maximálním hodnotám koeficientu  $C_D$  a  $C_L$  a obecně k minimálním hodnotám koeficientu  $C_M$ . Na této konfiguraci jsou také nejlépe vidět aerodynamické vlastnosti samotné konstrukce (*obr. 94*).

Druhou vybranou konfigurací je **most s vozem City Elephant**, kde nejčastěji vidíme minimální hodnoty aerodynamického součinitele vztlaku a maximální hodnoty aerodynamického součinitele momentu (*obr. 95*).

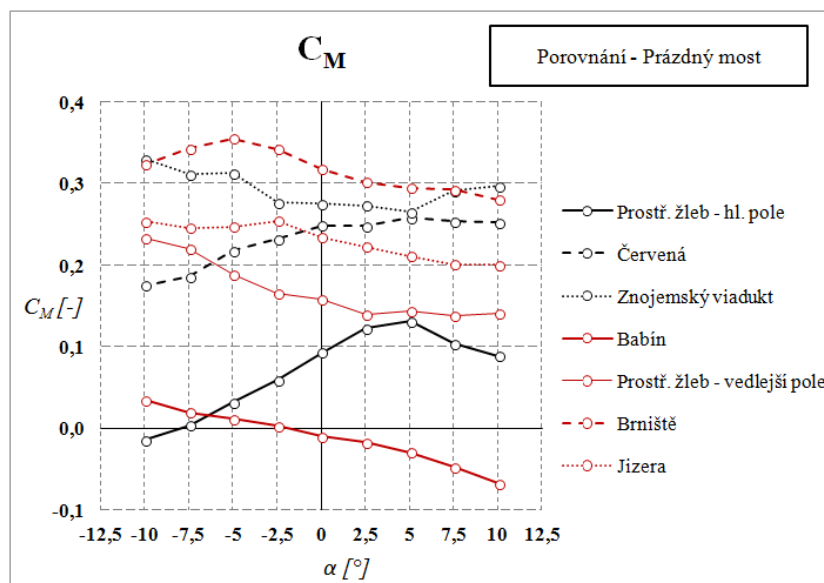
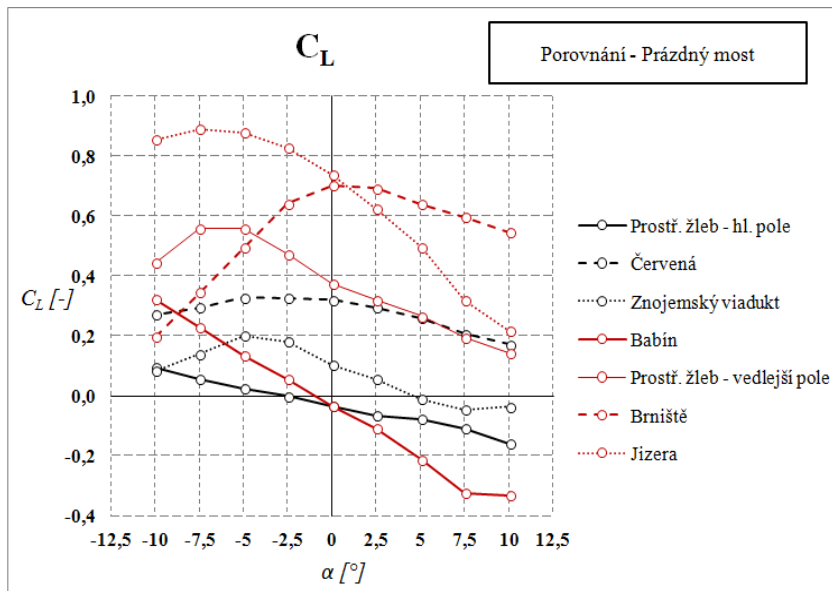
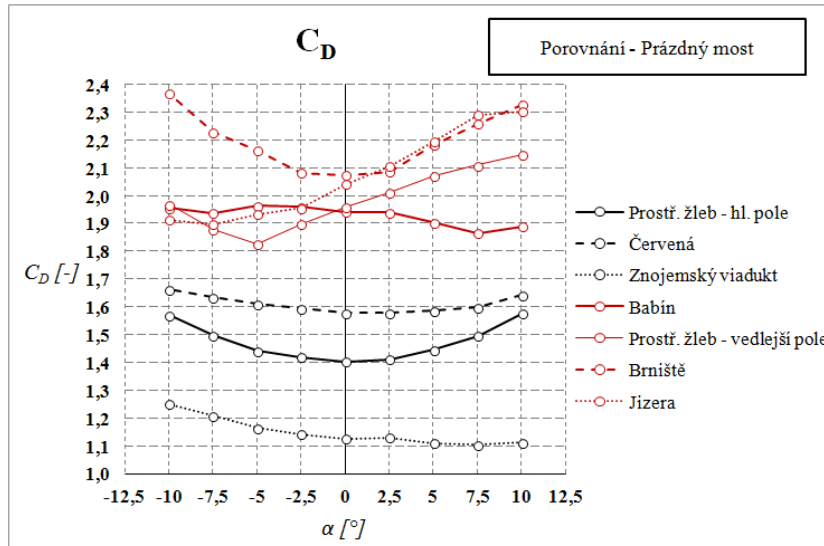
Poslední konfigurací je **most s vozem Kils 12**, u které jsou obecně nejnižší hodnoty čelního odporu. Tento jev si vysvětlují „zaobleným“ tvarem vozu, který působí pro proudění příznivě a nevzniká tak velký odpor jako u ostatních neaerodynamických ostrohranných vozů a konstrukcí mostů (*obr. 93*).

Tabulky, které porovnávají výsledné koeficienty jednotlivých mostů, jsou uvedeny v Příloze 2.

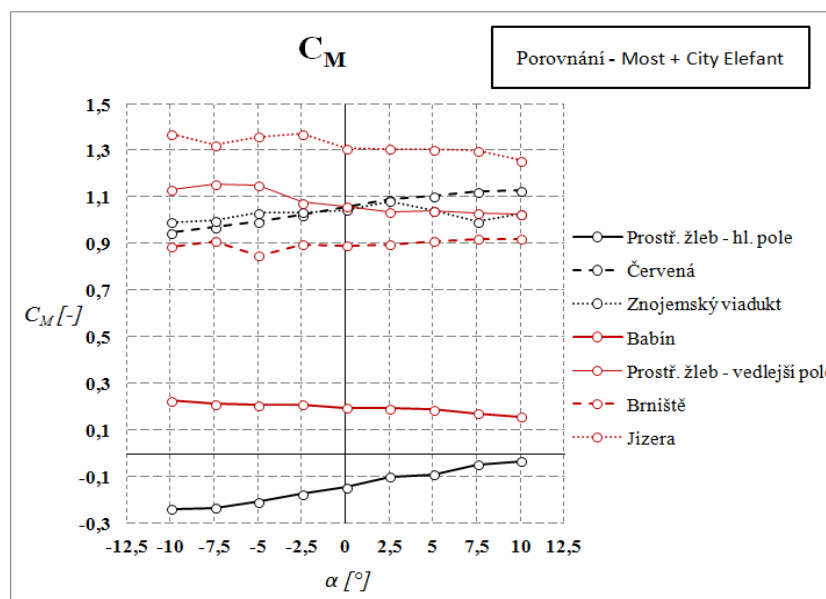
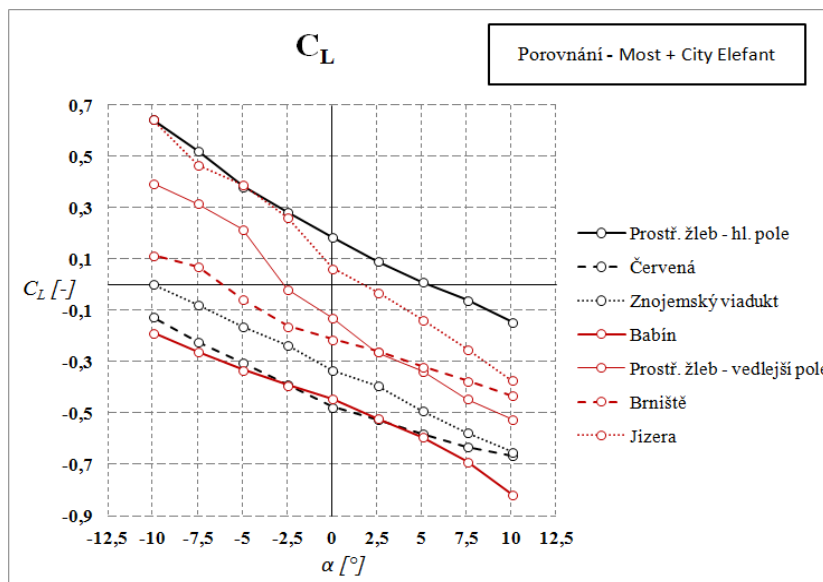
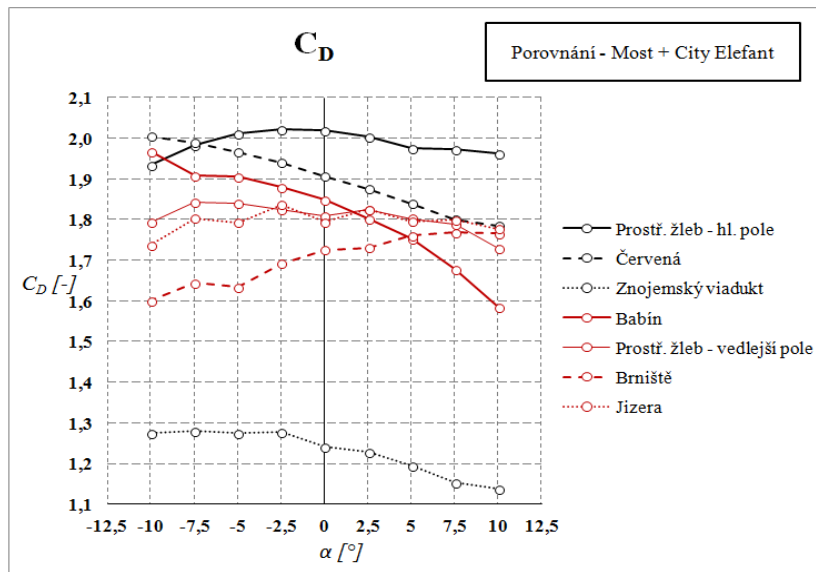
Ve srovnávacích grafech na obrázcích v této kapitole jsou pro lepší orientaci barevně odděleny příhradové (černá) a plnostěnné mosty (červená).



Obr. 93 Porovnání: Konfigurace most s vozem Kils 12



**Obr. 94 Porovnání: Konfigurace prázdný most**



**Obr. 95 Porovnání: Konfigurace most s vozem City Elefant**



## Závěr

Cílem této práce bylo získat aerodynamické součinitele reprezentativních ocelových železničních mostů v České republice, jejichž porovnáním můžeme dané mosty „kategorizovat“. Z hlediska čelního odporu u konstrukcí bez dopravního zatížení můžeme obecně říci, že příhradové mosty logicky vykazují nižší hodnoty (1,1 - 1,6) oproti plnostěnným mostům (1,9 - 2,2). Při porovnání součinitele vztlaku nám lehce vybočují mosty s vykonzolovanými prvky (Brniště, Jizera popř. Prostřední žleb - vedlejší pole). Velmi stabilní konstrukce z hlediska momentu je Babín, který v porovnání s ostatními mosty vykazuje nejnižší hodnoty (i s dopravním zatížením). Z výsledných grafů (popř. ukázkové vizualizace) vyplývá, že přítomnost dopravního zatížení může výrazně změnit i charakter proudění v okolí konstrukce a dochází tak ke značnému nárůstu či poklesu hodnot koeficientů. Celkem pravidelný jev je zvyšující se moment úměrně k velikosti vozu. Asi nejvíce zaznamenané změny charakteru proudění vlivem dopravního zatížení můžeme sledovat u mostu Prostřední žleb - hl. pole i vedlejší pole a Brniště. U některých mostů (Červená, Znojemský viadukt a Brniště) je pozorovatelný značný vliv zejména na součinitel vztlaku.

Zajímavé je sledovat výrazné snížení součinitele odporu (výjimkou jsou mosty Prostřední žleb - hl. pole a Červená) za přítomnosti soupravy vozu Kils 12. V případě Znojemského viaduktu, kde je při umístění železniční dopravy na most trend spíše nárůstu odporu, jako jediný z vozů vykazuje hodnoty dokonce nižší než prázdný most.

Naměřené hodnoty z experimentálního měření uvedeného v této práci se v budoucnu mohou využít k posouzení existujících mostů podobných typů na „statické“ zatížení větrem a výsledné hodnoty se mohou porovnat s těmi vypočtenými dle postupů uvedených v normách. Zároveň, jak je zmíněno v kap. 2.3, můžeme ze znalosti naměřených koeficientů stanovit kritérium pseudostatické stability s ohledem na galloping a torzní flutter.

## Literatura a použité zdroje

1. FISCHER, O., PIRNER, M. *Zatížení staveb větrem*. Praha: ČKAIT, 2003.
2. FISCHER, O., KOLOUŠEK, V., PIRNER, M. *Aeroelasticita stavebních konstrukcí*. Praha: Academia, 1977.
3. HUBOVÁ, O. *Aeroelasticita*. Bratislava: STU, 2013.
4. CHYSKÝ, J. *Vlhký vzduch*. Praha: SNTL, 1977.
5. CONSERVATION PHYSICS [online]. *Equations describing the physical properties of moist air*. Description of the calculations. [vid. 02.12.2016].  
Dostupné z: <http://www.conservaionphysics.org/atmcalc/atmocalc.php>
6. FORNARELLI, F., ORESTA, P., LIPPOLIS, A. *Flow patterns and heat transfer around six in-line circular cylinders at low Reynolds number* [online]. Cornell University Library, 2015 [vid. 12.12.2016].  
Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/1410.5836v1>
7. ČKAIT: *Studie budov a konstrukcí ve větrných tunelech*. Praha: ČKAIT, 2009.  
Přeložil Milan Jirsák.
8. SACHS, P. *Wind Forces in Engineering*. Oxford, New York: Pergamon Press, 1978.
9. KRÁL, J. *Navrhování konstrukcí na zatížení větrem příručka k ČSN EN 1991-1-4*. Praha: ČKAIT, 2010.
10. ČSN EN 1991-1-4 ed. 2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, duben 2013.
11. DANTEC DYNAMICS [online]. Single sensor fiber film probes. [vid. 28.12.2016]  
Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/products-and-services/single-sensor-fiber-film-probes>
12. MACHÁČEK, M. *Experimentální vyšetřování kmitání vybraných konstrukcí, tvorba jejich modelů a analýza samobuzených vibrací štíhlých prutů se dvěma stupni volnosti*. Ostrava: VŠB, 2014. Diplomová práce, VŠB – Technická univerzita Ostrava, fakulta stavební, katedra stavební mechaniky.
13. SUDOP PRAHA a.s. *Fotografie z prohlídky mostu a výkresová dokumentace*. Obec Červená, 2015 (pohled na most Červená)
14. VACHUTKA, T. *Statické a dynamické chování mostu Červená*. Praha: ČVUT, 2016. Diplomová práce, ČVUT – České vysoké učení technické v Praze, fakulta stavební, katedra ocelových a dřevěných konstrukcí.
15. PARS NOVA a.s. [online]. *Katalogové listy – Motorová souprava Regionova řady 814-914*. 2006. [vid. 29.12.2016]. Dostupné z: <http://parsnova.cz/ke-stazeni/katalogove-listy-zeleznicnich-kolejovych-vozidel-a-tramvaji-ke-stazeni>

16. ČD CARGO a.s. [online]. *Katalog železničních nákladních vozů*. [vid. 29.12.2016].  
Dostupné z: [www.cdcargo.cz/katalog-nakladnich-vozu](http://www.cdcargo.cz/katalog-nakladnich-vozu)
17. ŠKODA VAGONKA a.s. [online]. *Produktový list*. [vid. 29.12.2016].  
Dostupné z: <http://www.vagonka.cz/40001.asp?ids=1411>
18. MAPY.CZ © Seznam.cz, a.s. [online]. *Obecná mapa*. [vid. 1.1.2017]  
Dostupné z: <https://mapy.cz>
19. RYJÁČEK, P. et al. *Pokročilé metody posuzování existujících ocelových mostů na účinky zatížení větrem, brzdných a rozjezdových sil*. Průběžná zpráva za rok 2016. Praha: ČVUT, 2016
20. BILLAH, K. Y., SCANLAN, R. H. *Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks*. American Journal of Physics, Vol. 59, No. 2, Pg. 118–124, February 1991.

# Přílohy

## Příloha 1: Tabulky výsledků měření ve větrném tunelu

PROSTŘEDNÍ ŽLEB - HLAVNÍ POLE

Natočení $\alpha$ [°]	PRAZDŇNÝ MOST			REGIONOVA			KILS 12			SGS s kontejnerem			CITY ELEFANT		
	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$
10	1,57805	-0,15983	0,08898	1,88532	-0,09760	-0,09275	1,61953	-0,35027	-0,01788	1,92099	-0,30441	-0,05645	1,96460	-0,14174	-0,03092
7,5	1,49666	-0,11022	0,10445	1,87801	0,01603	-0,09539	1,64295	-0,29347	-0,04922	1,93187	-0,21826	-0,07412	1,97491	-0,05762	-0,04687
5	1,44719	-0,07934	0,13140	1,85595	0,12913	-0,10660	1,65363	-0,21711	-0,06631	1,90847	-0,15217	-0,10202	1,97674	0,01249	-0,08972
2,5	1,41339	-0,06532	0,12279	1,84966	0,27904	-0,13699	1,68042	-0,13820	-0,09017	1,90917	-0,08832	-0,13466	2,00482	0,09452	-0,09968
0	1,40381	-0,03304	0,09331	1,80421	0,49010	-0,15037	1,68270	-0,06232	-0,13021	1,90019	-0,00104	-0,17241	2,02179	0,18730	-0,14455
-2,5	1,41986	-0,00119	0,06009	1,74070	0,58817	-0,16732	1,67148	0,01472	-0,18381	1,88715	0,10123	-0,19819	2,02313	0,28565	-0,17207
-5	1,44295	0,02451	0,03230	1,73037	0,60291	-0,20010	1,67022	0,13724	-0,17887	1,87291	0,20987	-0,21869	2,01221	0,38522	-0,20700
-7,5	1,49878	0,05638	0,00392	1,70992	0,61276	-0,23098	1,66065	0,18983	-0,21581	1,86056	0,36561	-0,24606	1,98537	0,52303	-0,23227
-10	1,57100	0,09471	-0,01412	1,68689	0,61700	-0,26105	1,65281	0,25085	-0,23113	1,84549	0,46334	-0,27038	1,93551	0,64815	-0,23631

ČERVENÁ

Natočení $\alpha$ [°]	PRAZDŇNÝ MOST			REGIONOVA			KILS 12			SGS s kontejnerem			CITY ELEFANT		
	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$
10	1,64356	0,17098	0,25236	1,69502	-0,39117	0,65629	1,48076	-0,44839	0,69700	1,72878	-0,57580	0,95062	1,78517	-0,66421	1,13025
7,5	1,60030	0,20817	0,25367	1,72072	-0,34438	0,63435	1,50852	-0,43152	0,69672	1,74527	-0,53097	0,94976	1,80067	-0,62996	1,12442
5	1,58665	0,25979	0,25804	1,73770	-0,29627	0,62054	1,55967	-0,43073	0,72630	1,77400	-0,49818	0,93043	1,84025	-0,58121	1,10765
2,5	1,57924	0,29567	0,24833	1,74927	-0,29066	0,62502	1,59474	-0,42031	0,72554	1,81841	-0,47362	0,91758	1,87541	-0,52309	1,09290
0	1,58173	0,32193	0,24889	1,76518	-0,23051	0,57770	1,66297	-0,41438	0,72443	1,84978	-0,42137	0,88832	1,90780	-0,47523	1,05789
-2,5	1,59755	0,32649	0,23255	1,78264	-0,19633	0,54681	1,72043	-0,38792	0,68437	1,87474	-0,35859	0,84148	1,94202	-0,38655	1,02489
-5	1,61396	0,32788	0,21783	1,81090	-0,16011	0,52473	1,75286	-0,34878	0,67905	1,89478	-0,29244	0,80618	1,96694	-0,30462	0,99518
-7,5	1,63619	0,29577	0,18669	1,82940	-0,06586	0,49307	1,75756	-0,28483	0,63031	1,90580	-0,21792	0,77995	1,98919	-0,22263	0,97425
-10	1,66448	0,27222	0,17532	1,83147	0,05901	0,46319	1,77804	-0,25117	0,62145	1,91472	-0,12773	0,75036	2,00594	-0,12394	0,94806

ZNOJEMSKÝ VIADUKT

Natočení $\alpha$ [°]	PRAZDŇNÝ MOST			REGIONOVA			KILS 12			SGS s kontejnerem			CITY ELEFANT		
	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$
10	1,11285	-0,03597	0,29690	1,05036	-0,57138	0,74262	0,92348	-0,40777	0,68073	1,10646	-0,58978	0,87397	1,13768	-0,65005	1,02857
7,5	1,10481	-0,04462	0,29137	1,09656	-0,52530	0,70876	0,94681	-0,34568	0,69461	1,14888	-0,56193	0,85078	1,15273	-0,57567	0,99599
5	1,11221	-0,01126	0,26602	1,12183	-0,43347	0,76481	0,99034	-0,32989	0,69540	1,16533	-0,46713	0,85770	1,19454	-0,48898	1,04431
2,5	1,13175	0,05478	0,27340	1,16290	-0,33117	0,77165	1,00654	-0,28167	0,67384	1,23124	-0,36434	0,88885	1,22790	-0,39404	1,08517
0	1,12737	0,10279	0,27501	1,16795	-0,23815	0,71802	1,04674	-0,20477	0,69486	1,23398	-0,29032	0,85141	1,24243	-0,33301	1,04554
-2,5	1,14373	0,17941	0,27733	1,19765	-0,07612	0,75753	1,03420	-0,00958	0,68221	1,22828	-0,25068	0,86379	1,27689	-0,23556	1,03557
-5	1,16600	0,20080	0,31275	1,20094	0,04711	0,74502	1,06761	0,04052	0,69827	1,23710	-0,18397	0,85055	1,27430	-0,16084	1,03472
-7,5	1,21000	0,13997	0,31137	1,20800	0,11834	0,72847	1,08914	0,06655	0,69354	1,23498	-0,05003	0,81277	1,28030	-0,07552	1,00065
-10	1,25265	0,08234	0,33021	1,19813	0,16274	0,69935	1,09155	0,12121	0,61789	1,24129	0,05657	0,81874	1,27558	0,00336	0,99242

ZNOJEMSKÝ VIADUKT

$\alpha$ [°]	PRÁZDNÝ MOST					
	Zábradlí nezapočteno			Zábradlí započteno		
	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$
10	1,11285	-0,03597	0,29690	1,03777	-0,03597	0,29690
7,5	1,10481	-0,04462	0,29137	1,03027	-0,04462	0,29137
5	1,11221	-0,01126	0,26602	1,03717	-0,01126	0,26602
2,5	1,13175	0,05478	0,27340	1,05540	0,05478	0,27340
0	1,12737	0,10279	0,27501	1,05131	0,10279	0,27501
-2,5	1,14373	0,17941	0,27733	1,06657	0,17941	0,27733
-5	1,16600	0,20080	0,31275	1,08733	0,20080	0,31275
-7,5	1,21000	0,13997	0,31137	1,12836	0,13997	0,31137
-10	1,25265	0,08234	0,33021	1,16813	0,08234	0,33021

BABÍN

Natočení $\alpha$ [°]	REGIONOVA			KILS 12			SGS s kontejnerem			CITY ELEFANT		
	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$
10	1,89062	-0,33177	-0,06751	1,28977	-0,40676	-0,05380	1,14686	-0,55674	-0,03949	1,50569	-0,72518	0,07297
7,5	1,86763	-0,32278	-0,04719	1,26888	-0,41674	-0,03627	1,17500	-0,52474	-0,00855	1,60307	-0,61099	0,10154
5	1,90488	-0,21206	-0,02948	1,32697	-0,25267	-0,00697	1,34586	-0,48385	0,02983	1,68490	-0,52770	0,10956
2,5	1,94154	-0,10994	-0,01712	1,36418	-0,13128	0,00856	1,42256	-0,41307	0,04380	1,74471	-0,46099	0,10766
0	1,94288	-0,03370	-0,00964	1,38713	0,00392	0,01732	1,49419	-0,36260	0,05166	1,79982	-0,39445	0,11635
-2,5	1,96237	0,05656	0,00325	1,46072	0,06824	0,02857	1,53638	-0,29541	0,05014	1,86378	-0,34592	0,11745
-5	1,96452	0,13323	0,01177	1,57501	0,00852	0,02927	1,56605	-0,25596	0,05614	1,90362	-0,30201	0,11611
-7,5	1,93915	0,22735	0,01965	1,62221	0,02592	0,03574	1,62086	-0,23556	0,06140	1,92977	-0,26842	0,11755
-10	1,95640	0,32211	0,03442	1,65091	0,03487	0,03198	1,67892	-0,21927	0,06752	1,94700	-0,21751	0,11181

PROSTŘEDNÍ ŽLEB - VEDELEJŠÍ POLE

Natočení $\alpha$ [°]	PRÁZDNÝ MOST			REGIONOVA			KILS 12			SGS s kontejnerem			CITY ELEFANT		
	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_D$	$C_L$	$C_M$
10	2,15055	0,14266	0,14100	1,62188	-0,33500	0,60697	1,32776	-0,43395	0,55901	1,66612	-0,42814	0,90361	1,73061	-0,52151	1,03036
7,5	2,11103	0,19568	0,13878	1,64344	-0,26475	0,60986	1,35242	-0,36834	0,57316	1,68923	-0,35731	0,88430	1,78941	-0,44390	1,03375
5	2,07453	0,26664	0,14409	1,67049	-0,17920	0,61498	1,39752	-0,27191	0,58364	1,70088	-0,27265	0,89115	1,80351	-0,33371	1,04195
2,5	2,01300	0,31992	0,13965	1,68427	0,06473	0,68593	1,40113	-0,14279	0,57077	1,74910	-0,18180	0,91840	1,82622	-0,26105	1,03914
0	1,96027	0,37408	0,15763	1,70130	0,16787	0,67938	1,42620	-0,00104	0,60909	1,74159	-0,10556	0,91721	1,81001	-0,12525	1,06121
-2,5	1,90175	0,47072	0,16579	1,67331	0,26266	0,66232	1,44699	0,08336	0,62482	1,71381	0,23517	0,97468	1,82468	-0,01547	1,07842
-5	1,82731	0,55868	0,18879	1,67012	0,33064	0,66740	1,47503	0,14810	0,63841	1,69070	0,33235	0,95529	1,84053	0,21721	1,15140
-7,5	1,88123	0,55767	0,21999	1,68245	0,40309	0,66131	1,47916	0,22157	0,64791	1,68967	0,40163	0,96543	1,84326	0,31813	1,15766
-10	1,97144	0,44411	0,23316	1,68980	0,49037	0,66867	1,45915	0,28750	0,64083	1,67247	0,48108	0,97243	1,79391	0,39655	1,13408

## BRNIŠTĚ

Natočení $\alpha$ [°]	PRAZDNÝ MOST			REGIONOVA			KILS 12			SGS s kontejnerem			CITY ELEFANT		
	$C_b$	$C_L$	$C_M$	$C_b$	$C_L$	$C_M$	$C_b$	$C_L$	$C_M$	$C_b$	$C_L$	$C_M$	$C_b$	$C_L$	$C_M$
10	2,32621	0,54384	0,28067	1,61972	-0,21765	0,59837	1,34940	-0,20606	0,61789	1,60468	-0,31057	0,83290	1,76696	-0,42876	0,91924
7,5	2,25886	0,59459	0,29242	1,63032	-0,15541	0,59243	1,35369	-0,13483	0,62141	1,61198	-0,25466	0,81396	1,76878	-0,37167	0,92143
5	2,18236	0,63949	0,29444	1,64838	-0,09772	0,59009	1,34992	0,04745	0,61221	1,60748	-0,19646	0,82305	1,76121	-0,31716	0,91259
2,5	2,08582	0,69194	0,30144	1,66664	0,15522	0,59758	1,37895	0,16665	0,62896	1,63041	-0,15496	0,82076	1,73172	-0,25732	0,89865
0	2,07417	0,70202	0,31769	1,64966	0,19796	0,58085	1,39395	0,19446	0,63637	1,63593	-0,08066	0,79295	1,72672	-0,21089	0,89158
-2,5	2,08255	0,64091	0,34221	1,60334	0,21358	0,58039	1,40993	0,22288	0,64862	1,59369	0,21864	0,83273	1,69319	-0,16022	0,89743
-5	2,16409	0,49311	0,35518	1,57428	0,24824	0,56679	1,37529	0,27342	0,62617	1,55196	0,25846	0,81024	1,63448	-0,05472	0,85112
-7,5	2,22939	0,34530	0,34277	1,54418	0,26249	0,52100	1,37336	0,24992	0,63831	1,51176	0,29856	0,80203	1,64564	0,07234	0,91242
-10	2,36805	0,19765	0,32349	1,48197	0,30373	0,50644	1,35558	0,21915	0,63907	1,49715	0,31714	0,76636	1,60111	0,11623	0,88791

## BRNIŠTĚ

$\alpha$ [°]	Zábradlí nezapočítáno			Zábradlí započítáno			Bez zábradlí		
	$C_b$	$C_L$	$C_M$	$C_b$	$C_L$	$C_M$	$C_b$	$C_L$	$C_M$
10	2,32621	0,54384	0,28067	2,08201	0,54384	0,28067	2,09819	0,47321	0,23850
7,5	2,25886	0,59459	0,29242	2,02174	0,59459	0,29242	2,03461	0,50913	0,23824
5	2,18236	0,63949	0,29444	1,95327	0,63949	0,29444	1,97332	0,57314	0,24329
2,5	2,08582	0,69194	0,30144	1,86686	0,69194	0,30144	1,88028	0,65063	0,26139
0	2,07417	0,70202	0,31769	1,85643	0,70202	0,31769	1,80079	0,67646	0,26692
-2,5	2,08255	0,64091	0,34221	1,86394	0,64091	0,34221	1,76979	0,64806	0,30748
-5	2,16409	0,49311	0,35518	1,93692	0,49311	0,35518	1,75356	0,51924	0,32053
-7,5	2,22939	0,34530	0,34277	1,99536	0,34530	0,34277	1,80298	0,36822	0,32171
-10	2,36805	0,19765	0,32349	2,11946	0,19765	0,32349	1,90281	0,22512	0,29284

## JIZERA

Natočení $\alpha$ [°]	PRAZDNÝ MOST			REGIONOVA			KILS 12			SGS s kontejnerem			CITY ELEFANT		
	$C_b$	$C_L$	$C_M$	$C_b$	$C_L$	$C_M$	$C_b$	$C_L$	$C_M$	$C_b$	$C_L$	$C_M$	$C_b$	$C_L$	$C_M$
10	2,30525	0,21748	0,20034	1,68617	-0,20312	0,78329	1,37109	-0,05996	0,68854	1,68973	-0,39756	1,06147	1,77821	-0,37069	1,26009
7,5	2,29275	0,31888	0,20068	1,71716	-0,12778	0,77032	1,43043	0,01853	0,72879	1,71585	-0,29062	1,05558	1,80020	-0,24803	1,30066
5	2,19561	0,49571	0,21126	1,72139	0,05316	0,80621	1,41823	0,16621	0,73343	1,74598	-0,19000	1,06400	1,79662	-0,13410	1,30827
2,5	2,10685	0,62349	0,22263	1,74339	0,23700	0,80856	1,42295	0,37963	0,77597	1,78495	-0,07067	1,08219	1,82628	-0,02798	1,30898
0	2,04290	0,73643	0,23439	1,74457	0,33923	0,81120	1,42276	0,47280	0,79723	1,77769	0,02286	1,08236	1,79491	0,06563	1,31228
-2,5	1,95733	0,82757	0,25441	1,71468	0,44832	0,79356	1,45330	0,50951	0,81773	1,73085	0,32396	1,14195	1,83808	0,26369	1,37153
-5	1,93394	0,87601	0,24750	1,69705	0,54182	0,80737	1,46281	0,56086	0,84734	1,73514	0,42231	1,13056	1,79303	0,39072	1,36089
-7,5	1,89893	0,88951	0,24537	1,67952	0,60272	0,78155	1,47957	0,60913	0,85653	1,72593	0,53086	1,13022	1,80336	0,46811	1,32474
-10	1,91496	0,85394	0,25349	1,66338	0,69351	0,79764	1,45902	0,66974	0,86244	1,69880	0,58762	1,11480	1,73798	0,64800	1,37271



## Příloha 2: Tabulky s porovnáním výsledků

POROVNÁNÍ AERODYNAMICKÉHO SOUČINITELE ČELNÍHO OPORU  $C_D$  - PRÁZDNÝ MOST

Natočení $\alpha$ [°]	Prostř. Žleb - hlavní pole	Červená	Znojemský viadukt	Babin	Prostř. Žleb - vedlejší pole	Brniště	Jizera
10	1,57805	1,64356	1,11285	1,89062	2,15055	2,32621	2,30325
7,5	1,49666	1,60030	1,10481	1,86763	2,11103	2,25886	2,29275
5	1,44719	1,58665	1,11221	1,90488	2,07453	2,18236	2,19561
2,5	1,41339	1,57924	1,13175	1,94154	2,01300	2,08582	2,10685
0	1,40381	1,58173	1,12737	1,94288	1,96027	2,07417	2,04290
-2,5	1,41986	1,59755	1,14373	1,96237	1,90175	2,08255	1,95733
-5	1,44295	1,61396	1,16600	1,96452	1,82731	2,16409	1,93394
-7,5	1,49878	1,63619	1,21000	1,93915	1,88123	2,22939	1,89893
-10	1,57100	1,66448	1,25265	1,95640	1,97144	2,36805	1,91496

POROVNÁNÍ AERODYNAMICKÉHO SOUČINITELE VZTLAKU  $C_L$  - PRÁZDNÝ MOST

Natočení $\alpha$ [°]	Prostř. Žleb - hlavní pole	Červená	Znojemský viadukt	Babin	Prostř. Žleb - vedlejší pole	Brniště	Jizera
10	-0,15983	0,17098	-0,03597	-0,33177	0,14266	0,54384	0,21748
7,5	-0,11022	0,20817	-0,04462	-0,32278	0,19568	0,59459	0,31888
5	-0,07934	0,25979	-0,01126	-0,21206	0,26664	0,63949	0,49571
2,5	-0,06532	0,29567	0,05478	-0,10994	0,31992	0,69194	0,62349
0	-0,03304	0,32193	0,10279	-0,03370	0,37408	0,70202	0,73643
-2,5	-0,00119	0,32649	0,17941	0,05656	0,47072	0,64091	0,82757
-5	0,02451	0,32788	0,20080	0,13323	0,55868	0,49311	0,87601
-7,5	0,05638	0,29577	0,13997	0,22735	0,55767	0,34530	0,88951
-10	0,09471	0,27222	0,08234	0,32211	0,44411	0,19765	0,85394

**POROVNÁNÍ AERODYNAMICKÉHO SOUČiniteLE MOMENTU  $C_M$  - PRÁZDNÝ MOST**

Natočení $\alpha$ [°]	Prostř. Žleb - hlavní pole	Červená	Znojenský viadukt	Babín	Prostř. Žleb - vedlejší pole	Brníšť	Jizera
10	0,08898	0,25236	0,29690	-0,06751	0,14100	0,28067	0,20034
7,5	0,10445	0,25367	0,29137	-0,04719	0,13878	0,29242	0,20068
5	0,13140	0,25804	0,26602	-0,02948	0,14409	0,29444	0,21126
2,5	0,12279	0,24833	0,27340	-0,01712	0,13965	0,30144	0,22263
0	0,09331	0,24889	0,27501	-0,00964	0,15763	0,31769	0,23439
-2,5	0,06009	0,23255	0,27733	0,00325	0,16579	0,34221	0,25441
-5	0,03230	0,21783	0,31275	0,01177	0,18879	0,35518	0,24750
-7,5	0,00392	0,18669	0,31137	0,01965	0,21999	0,34277	0,24537
-10	-0,01412	0,17532	0,33021	0,03442	0,23316	0,32349	0,25349

**POROVNÁNÍ AERODYNAMICKÉHO SOUČiniteLE ČELNÍHO OPDRU  $C_D$  - SOUPRAVA CITY ELEFANT**

Natočení $\alpha$ [°]	Prostř. Žleb - hlavní pole	Červená	Znojenský viadukt	Babín	Prostř. Žleb - vedlejší pole	Brníšť	Jizera
10	1,96460	1,78517	1,13768	1,58590	1,73061	1,76696	1,77821
7,5	1,97491	1,80067	1,15273	1,67818	1,78941	1,76878	1,80020
5	1,97674	1,84025	1,19454	1,75532	1,80351	1,76121	1,79662
2,5	2,00482	1,87541	1,22790	1,80431	1,82622	1,73172	1,82628
0	2,02179	1,90780	1,24243	1,85017	1,81001	1,72672	1,79491
-2,5	2,02313	1,94202	1,27689	1,88149	1,82468	1,69319	1,83808
-5	2,01221	1,96694	1,27430	1,90787	1,84053	1,63448	1,79303
-7,5	1,98537	1,98919	1,28030	1,91010	1,84326	1,64564	1,80336
-10	1,93551	2,00594	1,27558	1,96919	1,79391	1,60111	1,73798

**POROVNÁNÍ AERODYNAMICKÉHO SOUČiniteLE VZTLAKU  $C_L$  - SOUPRAVA CITY ELEFANT**

Natočení $\alpha$ [°]	Prostř. Žleb - hlavní pole	Červená	Znojenský viadukt	Babín	Prostř. Žleb - vedlejší pole	Brníšť	Jizera
10	-0,14174	-0,66421	-0,65005	-0,81500	-0,52151	-0,42876	-0,37069
7,5	-0,05762	-0,62996	-0,57567	-0,68770	-0,44390	-0,37167	-0,24803
5	0,01249	-0,58121	-0,48898	-0,59076	-0,33371	-0,31716	-0,13410
2,5	0,09452	-0,52309	-0,39404	-0,51841	-0,26105	-0,25732	-0,02798
0	0,18730	-0,47523	-0,33301	-0,44163	-0,12525	-0,21089	0,06563
-2,5	0,28565	-0,38655	-0,23556	-0,39014	-0,01547	-0,16022	0,26369
-5	0,38522	-0,30462	-0,16084	-0,32763	0,21721	-0,05472	0,39072
-7,5	0,52303	-0,22263	-0,07552	-0,25867	0,31813	0,07234	0,46811
-10	0,64815	-0,12394	0,00336	-0,18458	0,39655	0,11623	0,64800

**POROVNÁNÍ AERODYNAMICKÉHO SOUČÍNITELE MOMENTU  $C_M$  - SOUPRAVA CITY ELEFANT**

Natočení $\alpha$ [°]	Prostř. Žleb - hlavní pole	Červená	Znojemský viadukt	Babin	Prostř. Žleb - vedlejší pole	Brmiště	Jizera
<b>10</b>	-0,03092	1,13025	1,02857	0,16013	1,03036	0,91924	1,26009
<b>7,5</b>	-0,04687	1,12442	0,99599	0,17411	1,03375	0,92143	1,30066
<b>5</b>	-0,08972	1,10765	1,04431	0,18966	1,04195	0,91259	1,30827
<b>2,5</b>	-0,09968	1,09290	1,08517	0,19441	1,03914	0,89865	1,30898
<b>0</b>	-0,14455	1,05789	1,04554	0,19626	1,06121	0,89158	1,31228
<b>-2,5</b>	-0,17207	1,02489	1,03557	0,21216	1,07842	0,89743	1,37153
<b>-5</b>	-0,20700	0,99518	1,03472	0,20876	1,15140	0,85112	1,36089
<b>-7,5</b>	-0,23227	0,97425	1,00065	0,21354	1,15766	0,91242	1,32474
<b>-10</b>	-0,23631	0,94806	0,99242	0,22708	1,13408	0,88791	1,37271

**POROVNÁNÍ AERODYNAMICKÉHO SOUČÍNITELE ČELNÍHO OPORU  $C_D$  - SOUPRAVA KILS 12**

Natočení $\alpha$ [°]	Prostř. Žleb - hlavní pole	Červená	Znojemský viadukt	Babin	Prostř. Žleb - vedlejší pole	Brmiště	Jizera
<b>10</b>	1,61953	1,48076	0,92348	1,14686	1,32776	1,34940	1,37109
<b>7,5</b>	1,64295	1,50852	0,94681	1,17500	1,35242	1,35369	1,43043
<b>5</b>	1,65363	1,55967	0,99034	1,34586	1,39752	1,34992	1,41823
<b>2,5</b>	1,68042	1,59474	1,00654	1,42256	1,40113	1,37895	1,42295
<b>0</b>	1,68270	1,66297	1,04674	1,49419	1,42620	1,39395	1,42276
<b>-2,5</b>	1,67148	1,72043	1,03420	1,53638	1,44699	1,40993	1,45330
<b>-5</b>	1,67022	1,75286	1,06761	1,56605	1,47503	1,37529	1,46281
<b>-7,5</b>	1,66065	1,75756	1,08914	1,62086	1,47916	1,37336	1,47957
<b>-10</b>	1,65281	1,77804	1,09155	1,67892	1,45915	1,35558	1,45902