

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**TEZE  
DISERTAČNÍ  
PRÁCE**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV<název>

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

*Portálový vír v úplavu  
hyperboloidního modelu*

*Veronika Barraclough*

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: *Termomechanika a mechanika tekutin*

Školitel: *Prof. Ing. Pavel Šafařík, CSc.*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

*září 2020*

Název anglicky: An Arch Vortex in a Wake of a Hyperboloid-shaped Model

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Veronika Barraclough

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky, Fakulta strojní  
ČVUT v Praze

Technická 4, 16607 Praha 6

Školitel: Prof. Ing. Pavel Šafařík, CSc.

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky, Fakulta strojní  
ČVUT v Praze

Technická 4, 16607 Praha 6

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze,  
Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru  
Termomechanika a mechanika tekutin.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní  
ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

předseda oborové rady oboru

Fakultastrojní ČVUT v Praze

## **Abstract**

### **An Arch vortex in a Wake of Hyperboloid-Shaped Model**

The mechanics of fluids task has been solved. Flow around a bluff body was measured, placed in a tunnel with a modelled boundary layer. The results required from such measurements focused on the flow behind the model and the Reynolds number for the measurement was subcritical, 42000 to 52000. Two models were compared, one similar to the cooling tower model with all its features like a vented base and an open top part, while the second model's features were close to the universal bluff body, but with the hyperboloid-like shape.

The measurement was realized by 2D Particle Image Velocimetry. The measurement revealed a vortex structure in the wake of the models. This structure is called an arch vortex. Geometrical and aerodynamical characteristics of this structure were calculated and analysed and this detailed description of the arch vortex contributes to the mechanics of fluids discipline knowledge.

## **Resumé**

### **Portálový vír v úplavu modelu rotačního hyperboloidu**

V disertační práci byl řešen případ mechaniky tekutin. Jednalo se o obtékání tupého tělesa umístěného v tunelu s atmosférickou mezní vrstvou.

Měření bylo soustředěno na proudění v úplavu a absolvovalo při nižších, podkritických Reynoldsových číslech: od 42 000 do 52 000. Byly měřeny a porovnány dva modely, jeden podobný modelu chladičí věže se všemi charakteristickými prvky, jako je profukovaná základna a otevřená vrchní část, zatímco druhý model se podobou blížil obecnému špatně obtékanému tělesu, pouze hyperboloidního tvaru.

Měření bylo provedeno pomocí systému PIV. Měření odhalilo vírovou strukturu v úplavu, nazývanou portálový vír. Tento portálový vír byl analyzován a uvedeny jeho geometrické a aerodynamické parametry.

## **Obsah**

1	Úvod.....	9
1.1	Proudění kolem špatně obtékaných těles .....	9
1.1.1	Obtékání hyperboloidního modelu .....	9
1.1.2	Vírové struktury a jejich identifikace.....	11
1.1.3	Experimentální výsledky.....	13
1.2	Cíle práce .....	15
2	Parametry experimentu .....	15
2.1	Aerodynamický tunel s modelovanou mezní vrstvou a nízkorychlostní aerodynamický tunel.....	15
2.2	Modely.....	16
2.3	Měřicí metoda velocimetrie pomocí obrazů částic, Particle Image Velocimetry .....	17
3	Experimentálně zjištěné vírové struktury.....	18
3.1	Proudění kolem Modelů .....	18
3.1.1	Obraz proudění v úplavu – zjištění portálového víru	19
3.2	Portálový vír – Analýza experimentálních dat .....	22
3.3	Geometrie vírového vlákna .....	22
3.4	Klasifikace portálového víru .....	23
3.4.1	Rozložení cirkulace podél portálového víru.....	23
3.4.2	Rozbor energetických módů - vlastní ortogonální rozklad	25
4	Závěr .....	26
5	Literatura .....	32
6	Publikace autorky, příspěvky na konferencích .....	34
7	Další publikace autorky.....	35

## Užitá označení

d	[m]	poloměr Modelu
D	[m]	základní poloměr Modelu
E	[-]	relativní energie vlastních tvarů
L	[m]	výška Modelů
r	[m]	poloměr víru
u, v, w	[m/s]	u-, v-, w-složky rychlosti
U	[m/s]	složka rychlosti ve směru x nabíhajícího proudu
x, y, z	[m]	souřadnice
X, Y, Z	[m]	rozměry aerodynamického tunelu BLWT
S	[m <sup>2</sup> ]	plocha
t	[m]	tloušťka stěny modelu

### Řecká abeceda

$\alpha$	[rad]	úhel
$\Gamma$	[m <sup>2</sup> /s]	cirkulace
$\omega$	[1/s]	Vířivost; úhlová rychlost
$\gamma$	[°]	úhel

### Indexy

1	Model 1
2	Model 2
M	modální
v	vír

### Zkratky

BL	mezní vrstva
BLWT	tunel s modelovanou atmosférickou mezní vrstvou (Boundary-Layer Wind Tunnel)
LSWT	nízkorychlostní větrný tunel (Low-Speed Wind Tunnel)
PIV	velocimetrie pomocí obrazů částic (Particle Image Velocimetry)
POD	vlastní ortogonální rozklad (Proper Orthogonal Decomposition)



# 1 Úvod

## 1.1 Proudění kolem špatně obtékaných těles

Úloha, která je řešena v této disertační práci, je postavena na základech experimentu provedeného pro účely stavebního inženýrství.

V aerodynamickém tunelu s modelovanou atmosférickou mezní vrstvou byl měřen model chladicí věže a sestavy chladících věží. V rámci tohoto měření se počítalo i s větším vědeckým přínosem, než jsou obvyklá data z tlakových snímačů umístěných vně a uvnitř věže či věží, proto se po získání těchto základních výsledků přikročilo k měření proudění okolo objektů.

Aby experimentátor získal alespoň dílčí představu, je úlohu proudění okolo složitého hyperboloidu možné zjednodušit. Například Zdravkovich [1] připodobňuje obtékání chladících věží k obtékání válce. Zdůrazňuje, že se jedná o vzdálenou podobnost. Typologii struktur, které se vyskytují v proudění kolem válce, nabízí například Pattenden et al. [2].

Velice podrobné zpracování proudění kolem válcových objektů, struktur a podmínek, za kterých vznikají, zároveň s velkým množstvím odkazů na literaturu, představili ve své disertaci Hajimirazie [3] a v diplomové práci Heseltine [4].

### 1.1.1 *Obtékání hyperboloidního modelu*

Rotační hyperboloid je těleso pro typologii proudění poměrně složité. Jeho průměr se po výšce mění, mění se tedy i lokální Reynoldsovo číslo.

Další komplikací pro obecnější popis struktur kolem hyperboloidu je prostředí, v němž byl experiment proveden – a to prostředí aerodynamického tunelu s modelovanou atmosférickou mezní vrstvou. Tloušťka mezní vrstvy nabíhajícího proudu převyšuje výšku modelu, což znamená, že rychlost proudu vzduchu nabíhajícího na model je po výšce modelu rozdílná.

Model, vycházející z typické chladicí věže, je navíc postaven na pilířích, které tvoří soustavu průduchů do vnitřního prostoru. Tento konstrukční prvek má vliv na charakter proudění. V práci Barraclough et al. [A] se autoři soustředili zejména na vliv těchto prvků na proudění.

Dalším konstrukčním prvkem zasahujícím do proudění, zde konkrétně do vývoje přechodu v mezní vrstvě na modelu, a tedy i do úplavu, je drsnost povrchu. O tomto vlivu podrobně píše například Zdravkovich [5] a Merrick a Bitsuamlak [6]. Teorie přechodu na drsném povrchu je podrobně rozepsána v knize od Schlichtinga a Gerstena [7].

Zajímavý výzkum byl zveřejněn Sakamotoem a Ariem [8]. Jde o zpřesnění poznatků o odtrhávání vírů. Tito vědci přišli při provádění experimentu mj. na válci umístěném v mezní vrstvě na způsob, jakým se mění odtrhávání vírů pro válce různých poměrů výšek k průměru. Původně asymetrické odtrhávání vírů při překročení poměru 2,5 (tedy pro štihlejší a vyšší válce) přejde v symetrické.

Pro úlohu, jejímuž experimentálnímu průzkumu je zasvěcena tato disertační práce, se jedná o významný poznatek, protože v případě

tohoto tělesa se poměr mění od  $\frac{L}{D} = 1,3 \div 2,54$  a nejvyšší hodnota tohoto poměru se nachází v nejužší části modelu, tedy přibližně ve dvou třetinách výšky.

### ***1.1.2 Vírové struktury a jejich identifikace***

Přesná definice víru je stále předmětem vědecké diskuse. Za její počátek považuje jeden z významných badatelů v této oblasti P. G. Saffman [9] rok 1858, kdy von Helmholtz uveřejnil svoji význačnou stať *O integrálech hydrodynamiky, které popisují vířivý pohyb* (originál byl publikován v německém jazyce) [10], ale ani za století a půl dlouhou historii této rozpravy nelze říci, že univerzálně platná matematická definice víru existuje.

V zásadě se vědci opírají o tenzor rychlostního gradientu a jeho rozklad na symetrickou a antisymetrickou část, případně o tenzor deformace elementárního objemu, kde „jádro víru je oblast v prostoru, kde vířivost je silná natolik, že tenzoru deformace dominuje tenzor rotace, tzn. tenzor deformace má komplexní vlastní hodnoty“ (přeloženo z publikace od Chonga et al. [11]).

Čínský tým vědců Tian et al. [12] vědeckému světu aktuálně předložil ambiciózní definici víru prostřednictvím vektoru víru (*vortex vector*) reprezentující rotující pohyb, mající směr rotace tekutiny a jehož velikost je rovna vířivosti.

Klasický přístup k identifikaci vírů je založen na řešení tensoru gradientu rychlosti a řešení vlastních hodnot tohoto tensoru ( $\Delta$ -kritérium, kritérium  $\lambda_2$ ) a nově v nalezení oblasti nejnižšího tlaku.

Víry dále lze identifikovat přímou metodou z pole vířivosti, spočítané z rychlostního vektorového pole.

Vzhledem k současnému stavu tohoto oboru, kdy je identifikace vírů intenzivně rozvíjena a zpřesňována, ale vířivost, přestože se jedná o nejdůležitější veličinu spojenou s vířivým polem, již dávno není hlavním nástrojem pro identifikaci. Je známo, že některé oblasti proudového pole nebyly při použití vířivosti pro identifikaci správně vyhodnoceny. Vířivost je například detekována ve smykové vrstvě, nikoliv pouze v oblasti výskytu vířivého proudění.

Zejména z poznatku, že rotace a smyk nemohou být rozlišeny za pomoci vířivosti, vzešly některé moderní metody pro identifikaci vírů. Metoda, založená na oddělení rotace od smyku, se nazývá trojitá dekompozice (Kolář [13]). Další moderní metody identifikují víry za pomoci nalezení tlakového minima (spolehlivě identifikující víry v turbulentní mezní vrstvě, viz například Robinson [14]), na uzavřených či spirálovitých proudnicích atd., speciální vývoj potřebují metody pro identifikaci vírů ve stlačitelném proudění. Pro podrobný přehled a popis lze doporučit diplomovou práci Vivianne Holmén [16].

Klasické a stále hojně používané metody selhávají i v případě, že se jedná o oblast interakce. K bližšímu studiu této konkrétní

problematiky lze odkázat na články autorů Chakraborty et al. [17] a Jeong a Hussain [18].

### *1.1.3 Experimentální výsledky*

Jednotlivé struktury obklopující špatně obtékané těleso se experimentálně zjišťují s většími komplikacemi než například tlakové rozložení. Vzhledem k rozvíjejícímu se tomografickému PIV (tedy zjednodušeně 3D PIV) však mohou být přeci jenom předloženy i experimentální výsledky. Vyčerpávající přehled o experimentech, které byly provedeny, podává F. Scarano např. v publikaci [20].

Kromě kolektivu kolem F. Scarana se o 3D PIV experiment pokusili i Zhu et al., kteří nedávno publikovali své výsledky z měření proudění kolem válce[21].

Před nástupem tomografického PIV se měřilo (a vzhledem k náročnosti tomografického PIV stále intenzivně měří) metodou, která 3D výsledky rovněž poskytuje. Nazývá se stereoskopické PIV a spočívá v proměření dvou rovin dvěma kamerami pod určitým úhlem, z čehož se třetí složka rychlosti v proudovém poli dopočítá.

Ovšem i v případě 3D proudění se stále sahá k metodě prostého 2D PIV se zajímavými výsledky, jak třeba ukázal Gonçalves a spol. [22] ve své studii válce s nízkým poměrem  $\frac{L}{D}$  při proudění ve vodním kanálu pro  $Re = 43000$ . Válec by se mohl zdát experimentálně vytěžený, ale nové články s novými pohledy na tuto úlohu dokazují,

že je stále co bádát: například Rostamy a spol. porovnali úplavy za válci o různých poměrech  $\frac{L}{D}$  při proudění o  $Re = 42000$ [23]. Park a Lee publikovali článek o strukturách, vznikajících za válcem ponořeným do modelované atmosférické mezní vrstvy [24].

## 1.2 Cíle práce

Cíle této disertační práce jsou následující:

- Experimentálně potvrdit existenci portálového víru pomocí měřicí metody 2D PIV za špatně obtékaným tělesem hyperboloidního tvaru.
- Změřit geometrické a proudové parametry portálového víru za tělesem hyperboloidního tvaru.
- Kvantifikovat geometrickou podobu portálového víru a rozložení cirkulace podél tohoto víru. Zhodnotit dynamické vlastnosti proudění v úplavu.

## 2 Parametry experimentu

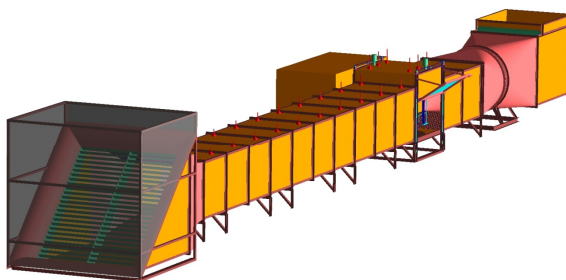
### 2.1 Aerodynamický tunel s modelovanou mezní vrstvou a nízkorychlostní aerodynamický tunel

Pro experiment byl využit zejména tunel s modelovanou

atmosferickou mezní vrstvou (z angličtiny Boundary Layer Wind Tunnel, BLWT, viz Obr. 2.1.).

Intenzita turbulence zde dosahuje vysokých hodnot, od hodnot kolem  $Tu = 30\%$  blízko terénu po hodnotu  $5\%$  ve výšce  $\frac{z}{Z} = 0.6$ .

Uzavřený měřicí prostor má tvar kvádru o délce 1,8, šířce 1,8 a výšce 1,5 m.



**Obr. 2.1.** Aerodynamický tunel s modelovanou atmosférickou mezní vrstvou BLWT.

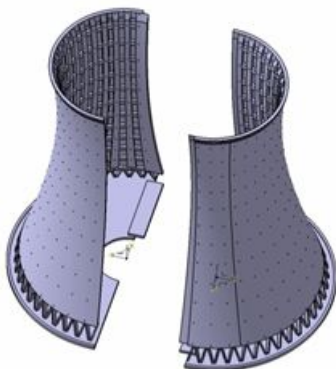
Druhý aerodynamický tunel, ve kterém byly experimenty provedeny, disponuje nízkou intenzitou turbulence  $Tu < 1\%$  a jedná se o tzv. tunel Eiffelova typu s otevřeným kruhovým měřicím prostorem o průměru 1,8 m (z angličtiny Low Speed Wind Tunnel, LSWT).

## 2.2 Modely

Měření bylo provedeno na stejném modelu, jaký byl použit při měření tlaků pro účely stavebního inženýrství. Bude nadále zván Model 1 (viz



Obr. 2.2.). Později byl tento model zjednodušen. Zůstal pouze jeho hlavní hyperboloidní tvar, ale jiné prvky typické pro chladicí věže byly eliminovány. Bude nadále zván Model 2. Výrazným prvkem Modelu 1 jsou pilíře tvořící průduchy výšky  $\frac{z}{L} = 0,06$ . Model 1 je dutý s otevřenou vrchní částí. Tloušťka stěny je  $\frac{t}{D} = 0,01$ .



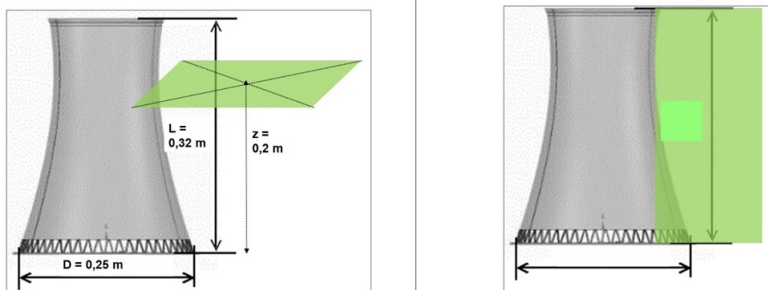
**Obr. 2.2.** Rozložený Model 1, konstrukce pro výrobu.

### **2.3 Měřicí metoda velocimetrie pomocí obrazů částic, Particle Image Velocimetry**

Měřicí metoda Particle Image Velocimetry, metoda velocimetrie pomocí zobrazení částic (PIV), pracuje na principu vpuštění částic do proudu vzduchu, osvětlení těchto částic, záznam obrazu částic a jeho vyhodnocení.

Výhoda použití této metody spočívá zejména v možnosti obsáhnout rozsáhlou oblast proudového pole.

Experiment byl proveden klasickým způsobem: do proudícího vzduchu byly zavedeny kapičky oleje generované Laskinovými tryskami a rovina byla osvětlena pevnolátkovým laserem Nd:YAG. Maximální frekvence pulsů laseru byla 15 Hz. Ovládání zařízení, ukládání dat a následné vyhodnocení bylo provedeno v softwaru DynamicStudio.



**Obr. 2.3.** Schemata pozice laserové roviny pro měření v rovinách **a)** rovnoběžných s terénem (vlevo) a **b)** kolmých k terénu (vpravo).

### 3 Experimentálně zjištěné vírové struktury

#### 3.1 Proudění kolem Modelů

Dostupná technika umožnila pořídít velkoplošné záběry proudového pole v mnoha řezech (rovnoběžných se zemí, kolmých k zemi, před Modelem, v jeho úplavu). Výsledná data poskytují dobrý přehled o větších vírových strukturách, které se v proudění vyskytují.

Z měření vzešlo několik vedlejších souborů dat a jeden hlavní. Mezi vedlejší patří:

- a) obraz proudění na návětrné straně Modelu,

- b) obraz proudění v úplavu ve větší vzdálenosti po proudě vzhledem k Modelu,
- c) porovnání proudění kolem Modelu 1 se zjednodušeným Modelem 2 (rotačním hyperboloidem zbaveným některých konstrukčních prvků).

Hlavními soubory potom jsou:

- d) výsledky z měření v úplavu do maximální vzdálenosti  $\frac{x}{D} = 1$  pro oba Modely, a to jak vertikální, tak horizontální roviny měření.

### **3.1.1 *Obraz proudění v úplavu – zjištění portálového víru***

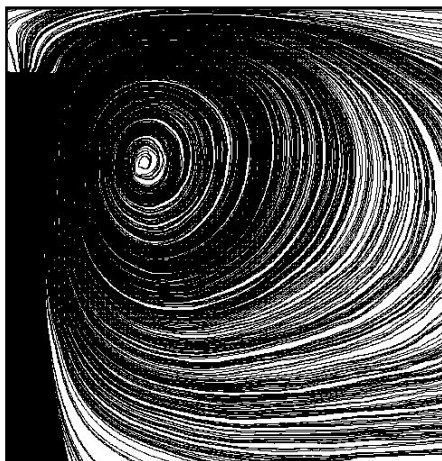
Aby bylo dosaženo geometrického zpřesnění portálového víru, proudění v úplavu bylo měřeno v rovinách rovnoběžných se zemí, s malými rozestupy jednotlivých rovin od sebe, od úpatí Modelu po její vrchol. Dále bylo měření provedeno v rovinách kolmých k zemi. Měření bylo provedeno podle schématu na Obr. 2.3. Měření v rovinách rovnoběžných se zemí bylo prováděno po krocích  $\frac{z}{L} = 0,06$ , přičemž rovina ve výšce  $\frac{z}{L} = 0,13$  byla nejbližší k zemi, která byla měřena. V této výšce již bylo měření silně zkreslováno dvěma zdroji odrazu laserového světla: od Modelu (měření v části v těsné blízkosti Modelu jsou výrazně ozářena odrazy od stěny Modelu – v této části svírá stěna Modelu s rovinou měření malý úhel) a od země z nopkové folie. Při pokusu měřit ještě blíže zemi už byl poměr

měřeného signálu k šumu velice nízký a naměřená data nebylo možné použít.

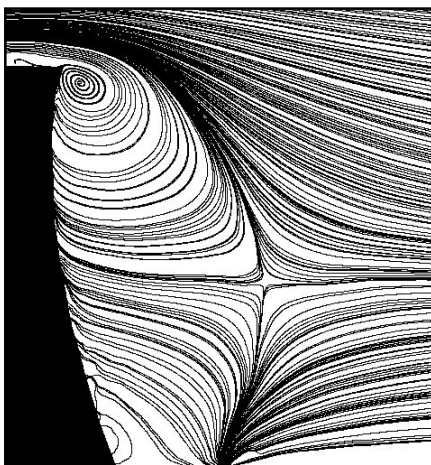
Měření poskytla ve výsledku časově průměrovaná rychlostní pole, plošně rozsáhlé. Na obrázcích výsledků, například na průměrovaných rychlostních polích či vektorových čarách těchto rychlostních polí, jsou zřetelné struktury (Obr. 3.1. a 3.2). Ve středu těchto struktur lze detekovat minimální rychlost.

Těmto vírům v měřených rovinách nad sebou lze určit střed. Při analýze a zobrazení souřadnic středů v 3D souřadnicovém grafu je očividné, že se jedná o součásti větší struktury – portálového víru, o jehož výskytu se na tomto místě uvažuje. Vizualizační měření metodou nití zavedených do proudového pole potvrdila přítomnost víru.

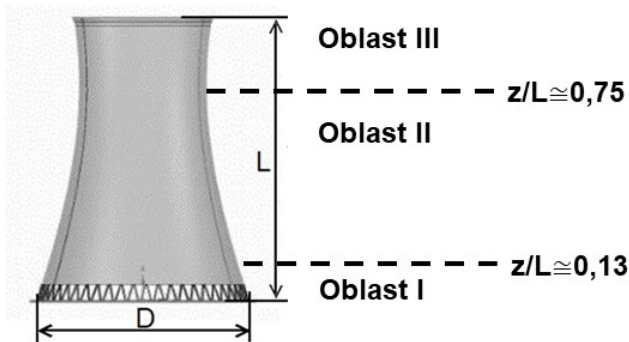
Analýza vektorových polí přinesla zjištění, že oblast úplavu může být s ohledem na portálový vír pro přehlednost rozdělena po výšce na tři části (viz schéma na Obr. 3.3.). Oblast I je charakterizována komplikovaností proudění, Oblast II přehledným vyvinutým portálovým vírem, Oblast III horizontálně vedenou strukturou.



**Obr. 3.1.** Vektorové čáry průměrovaného rychlostního pole úplavu za hyperboloidním modelem v tunelu LSWT.



**Obr. 3.2.** Vektorové čáry průměrovaného rychlostního pole úplavu za hyperboloidním modelem v tunelu BLWT.

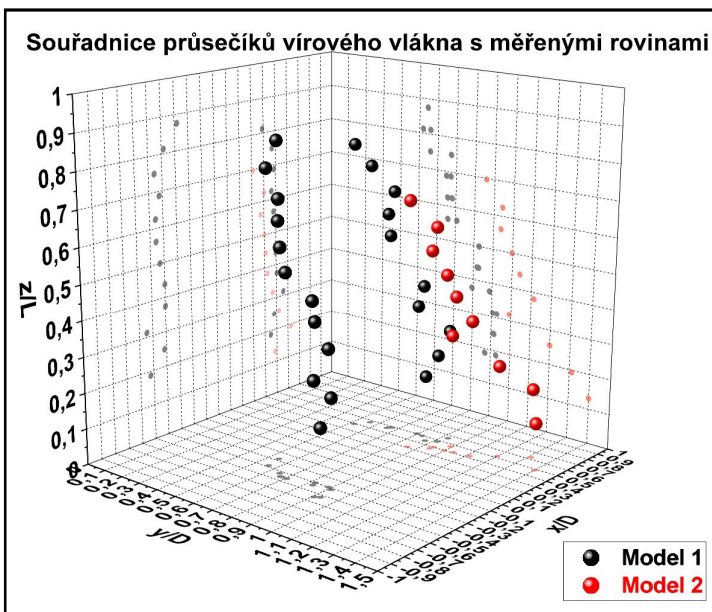


**Obr. 3.3.** Rozdělení oblasti úplavu za Modelem podle výšky.

### 3.2 Portálový vír – Analýza experimentálních dat

### 3.3 Geometrie vírového vlákna

V průměrovaných rychlostních polích byl identifikován střed portálového víru. Jednalo se vždy o bod s nejnižší rychlostí. Výsledky této analýzy posloužily pro rekonstrukci reálné 3D podoby víru. Graf na Obr. 3.4. představuje tedy zpřesněnou podobu portálového víru pro oba Modely v podobě vynesných průřezů vírového vlákna vedeného středem portálového víru s rovinami měření do 3D grafu.



**Obr. 3.4.** 3D zobrazení souřadnic průsečíků vírového vlákna s rovinami měření doplněné o projekci bodů do jednotlivých rovin.

### 3.4 Klasifikace portálového víru

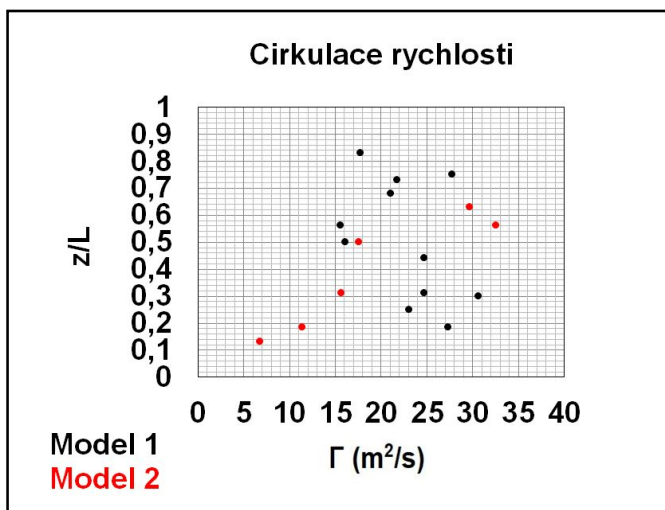
#### 3.4.1 Rozložení cirkulace podél portálového víru

Cirkulace víru po výšce byla převedena do jednoho čísla pro každou měřenou rovinu do grafu, viz Obr. 3.5.

Na grafu cirkulace je pozoruhodná jeho nepravidelnost. Hodnoty intenzity víru pro Model 1 oscilovaly mezi hodnotami  $\Gamma = 15 \div 31 \frac{m^2}{s}$ . Podle tohoto výpočtu vír vykazuje tři oblasti silnější intenzity

víru. Jedna se nachází blízko země ve výšce  $\frac{z}{L} = 0,19$ , kde je proudění pod vlivem profukované základny. Nejvyšší intenzita víru byla zjištěna v nížím charakteristické výšce  $\frac{z}{L} = 0,39$  a v pořadí třetí vysoká hodnota byla zjištěna v úplavu za místem, kde je Model nejužší.

U Modelu 2 byl zjištěn rozdílný průběh cirkulace. Na rozdíl od Modelu 1 zde se v blízkosti země nachází místo s nejnižší cirkulací. V místě, kde Model 1 vykázal nejnižší cirkulaci, zde je tomu naopak, Model 2 má v tomto místě ve výšce  $\frac{z}{L} = 0,56$ , cirkulaci nejvyšší.

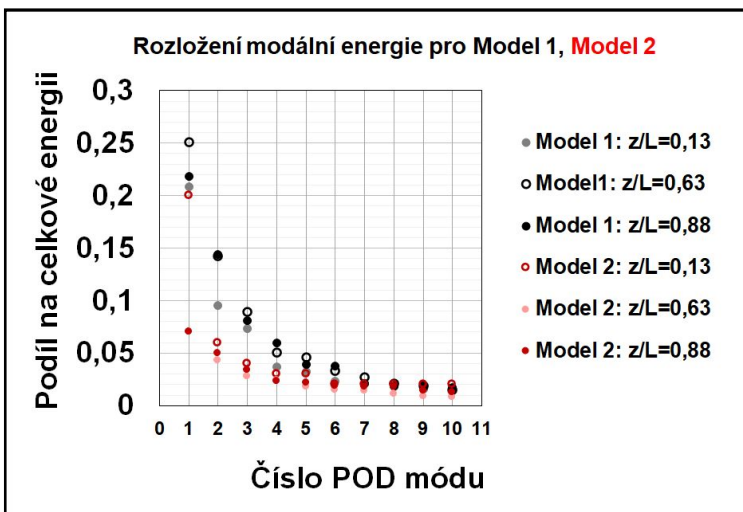




**Obr. 3.5.** Rozložení cirkulace rychlosti po výšce portálového víru.

### **3.4.2 Rozbor energetických módů - vlastní ortogonální rozklad**

Dále byla vektorová pole za Modelem 1 a Modelem 2 podrobena analýze POD, vlastnímu ortogonálnímu rozkladu. Prvním výsledkem tohoto rozkladu je analýza modální energie příslušející jednotlivým módům. Na grafu na Obr. 3.6. je vyneseno příklad rozložení modální energie pro horizontální roviny pro všechny tři oblasti portálového víru pro oba modely (tedy Oblast I, II a III). Prvních 10 módů POD proudění za Modelem 1 v součtu představuje nadpoloviční většinu celkové modální energie. Pro Oblast I je celková kumulativní energie těchto deseti módů rovna  $E_{M10} \cong 54\%$ , pro Oblast II  $E_{M10} \cong 69\%$  a pro Oblast III  $E_{M10} \cong 65\%$ . Z poměru modální energie, kterou v tomto případě kumulativně disponují následující módy, lze mj. usuzovat na složitost proudového pole. Pro Model 2 je kumulativní energie v jednotlivých řezech následující:  $E_{M10} \cong 46\%$  pro Oblast I,  $E_{M10} \cong 24\%$  pro Oblast II a  $E_{M10} \cong 28\%$  pro Oblast III.



**Obr. 3.6.** Energetické módy pro horizontální rovinu měření ve výšce  $\frac{z}{L} = 0,13; 0,63; 0,88$ , Model 1, Model 2.

Dalším výstupem POD jsou pole jednotlivých módů. Z vlastních tvarů rychlostního pole lze vypočítat globální pohyby pole.

## 4 Závěr

V této disertační práci byl řešen případ mechaniky tekutin z oblasti vnější aerodynamiky. V tunelu s modelovanou atmosférickou mezní vrstvou bylo metodou velocimetrie pomocí stopovacích částic (Particle Image Velocimetry) měřeno proudění za modelem hyperboloidního tvaru. Reynoldsovo číslo činilo 42000 až 52000, jednalo se tedy o případ podkritického proudění špatně obtékaného tělesa. Měření bylo soustředěno do oblasti úplavu.

Byly měřeny dva modely. V případě Modelu 1 se jednalo o model vycházející ze studie pro stavební inženýrství se všemi prvky původní geometrie, tedy například se základnou, kudy rozestupy mezi podpůrnými pilíři proudí vzduch vzhůru Modelem a s drsností povrchu urychlující přechod mezní vrstvy. Tyto prvky silně ovlivňují proudění kolem Modelu. Určení mohutnosti vlivu jednoho každého z nich na úplav sice přesahuje rámec této disertační práce, ale její podrobný rozbor je další z možných oblastí k řešení. Autorka řešení tohoto tématu přednesla na konferenci [B]. Model 1 byl následně zjednodušen: základna byla zakryta, vrch tělesa byl přikryt a drsnost povrchu odstraněna. Vznikl tak Model 2. Jeho geometrie se blíží zásadnímu případu mechaniky tekutin, válci konečné délky a malého poměru výšky ku průměru  $\frac{L}{D}$ .

Oba Modely byly měřeny v modelované atmosférické mezní vrstvě, pouze pro případ, kdy bylo potřeba kvantifikovat její vliv na úplav za Modelem, byl pro měření zvolen další typ tunelu bez atmosférické mezní vrstvy, a tudíž bez výrazné intenzity turbulence.

První bod z cílů disertační práce spočíval v experimentálním potvrzení existence portálového víru za Modely. Měření bylo vedeno v rovinách rovnoběžných se zemí a v rovinách kolmých k zemi, rovnoběžných s proudící tekutinou, s důrazem na proměření velké oblasti úplavu. Frekvence měření byla 15 Hz, pořizovalo se zpravidla 900 záběrů pro jednu konfiguraci. Z těchto dat byla vyhodnocena 2D

vektorová pole okamžité rychlosti, z nich posléze 1 průměrovaný obraz proudového pole.

Tento průměrovaný obraz odhalil silnou oblast téměř symetrické recirkulace v oblasti úplavu přilehlé těsně za Modely; ve vertikálních vektorových polích se tento obraz objevil rovněž (v těsné blízkosti odtokové hrany Modelů) a po zhodnocení těchto výsledků a jejich potvrzení vizualizační metodou pomocí nití bylo zřejmé, že za Modely se nachází velká struktura. Její doposud spíše knižní podoba potrubí ohnutého do tvaru U mohla získat realistický obraz a bylo možné započít s rekonstrukcí geometrie a posléze určení některých aerodynamických parametrů. Vír je v literatuře pojmenován portálový.

Druhý z bodů cílů se soustředil na získání experimentálních souborů dat pro podrobné popsání změřené struktury, na změření geometrických a proudových charakteristik.

Portálové víry za Modelem 1 a Modelem 2 byly proměřeny tak, aby mohly být porovnány z hlediska geometrie. Ukázalo se, že konstrukční prvky, často v textu této disertační práce zdůrazněné, měly na tvar, na polohu i na aerodynamické parametry víru vliv. Nejcitelnější rozdíl se projevoval ve spodní části modelu. Tato část byla zároveň i problematická z hlediska samotného měření; docházelo ke značnému odrazu silného laserového záření od země i od zakřiveného povrchu Modelů. Přesto bylo možné konstatovat, že portálový vír za Modelem 1 se nachází v jeho blízkosti, zatímco

proudění kolem Modelu 2, které nepřekonává pilíře základny jako u Modelu 1, posouvá spodní část víru po proudu výrazně dále od Modelu.

S tím je spjat i další význačný poznatek z hlediska geometrie o náklonu celé struktury. Střední vřív promítuté do roviny x-z byly jednoduše proloženy trendem, ze kterého byl určen úhel náklonu – úhel sevřený osou Modelu a přímkou trendu -  $\gamma_1 = 34^\circ$  pro Model 1 a  $\gamma_2 = 45^\circ$  pro Model 2.

Dále byl vyhodnocen aerodynamický parametr velikost gradientu rychlosti ve víru po výšce modelu. V každé změřené rovině byl vyhodnocen rychlostní profil pro složku x rychlosti a stanovena směrnice jeho tangenty, představující velikost gradientu. Pravidelnost či souměrnost ve směrnících tangenty se prokázala ve víru za Modelem 1, ve víru za Modelem 2 je průběh tohoto parametru silně neuspořádaný.

Podle třetího bodu cíle této disertační práce se zjišťovalo rozložení cirkulace portálového víru, kvantifikovala se jeho geometrie a některé dynamické vlastnosti.

Pro stanovení hranice víru (k výpočtu cirkulace) nelze pro tato naměřená data použít standardní metody identifikace vřív založené na derivacích rychlosti (vřívovost, kritérium  $\lambda_2$ ), navíc z vypočteného

průměrovaného rychlostního pole vychází rychlostní profil s pouze kladným gradientem a hranice víru se proto vymezuje smluvně.

Zajímavý výsledek přinesl vlastní ortogonální rozklad. Pro toto komplikované proudění se například ukázalo, že hlavnímu nultému modu proudění, představovanému průměrovaným obrazem rychlostního pole, přispívají další dva mody energeticky okolo deseti procent. Další mody se podílí jednotkami procent. Tyto mody s nízkým příspěvkem ale mohou představovat například pohyb víru pouze v jedné z os souřadného systému či rozpínání či smršťování samotného víru, proto jsou jejich zdánlivě bezvýznamné příspěvky také podstatné.

Dosud provedený experiment vyvolal další otázky ke studiu. Nejjednodušším problémem bude měření vrchní části víru, kde z vertikálního směřování vír zatočí do horizontální polohy. Tento „ohyb“ se stávajícím vybavením nemohl být zatím důkladně změřen. Dosud značně nejasná zůstává i spodní část víru *Oblast I*. Blízkost země téměř znemožňuje PIV měření v rovinách se zemí rovnoběžných. Zde by bylo vhodné použít metodu tzv. stereo-PIV, tedy měřit ve dvou rovinách kolmých k zemi a třetí složku vektoru rychlosti rekonstruovat.

Tato měření by dále zpřesnila geometrii víru, která byla v této disertační práci kvantifikována, a bylo by možné přistoupit k přímému měření dynamických vlastností víru a zjišťování jeho stability. Dále je

potřeba zkoumat dopad takto rozsáhlé struktury na bezprostřední okolí a její interakci s dalšími strukturami. Pokud by se portálový vír přenesl do reálného měřítka, tedy za skutečnou chladicí věž (či například silo), potom by znalosti jeho vlastností mohly například napomoci při stavbě soustav věží (sil), případně jako informace pro pozemní piloty bezpilotních prostředků v blízkosti těchto staveb.

## 5 Literatura

- [1] Zdravkovich, M. M.: Flow Around Circular Cylinders. Vol.2: Applications, *Oxford University Press* (2003).
- [2] Pattenden, R. J., Turnock, S. R., Zhang, X.: Measurements of the Flow over a Low-Aspect-Ratio Cylinder Mounted on a Ground Plane, *Experiments in Fluids* 39, pp. 10–21. (2005).
- [3] Hajimirzaie, S.M.: Flow Structure in the Wake of a Low-Aspect-Ratio Wall-Mounted Bluff Body, PhD Thesis, University of Iowa (2013).
- [4] Heseltine, J. L.: Flow Around a Circular Cylinder with a Free End. *A Thesis for the Degree of Master of Science*, The Department of Mechanical Engineering, University of Saskatchewan, Canada (2003).
- [5] Zdravkovich, M. M.: Flow Around Circular Cylinders, *Oxford University Press* (1997).
- [6] Merrick, R., Bitsuamlak, G. T.: Control of Flow around a Circular Cylinder by the Use of Surface Roughness: A Computational and Experimental Approach, [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net) (2014).
- [7] Schlichting, H., Gersten, K.: Boundary Layer Theory, Springer (2000).
- [8] Sakamoto, H., Arie, M.: Vortex Shedding from a Rectangular Prism and a Circular Cylinder Placed Vertically in a Turbulent Boundary Layer, *Journal of Fluid Mechanics*, pp. 147–165, vol. 126 (1983).
- [9] Saffman, P.G.: Vortex System Dynamics, Cambridge University Press, 1992.
- [10] Helmholtz, H.: Über Integrale der hydrodynamischen Gleichungen welche den Wirbelbewegungen entsprechen, *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik* (1858).
- [11] Chong, M.S., Perry, A.E., Cantwell, B.J.: A General Classification of Three-Dimensional Flow Fields, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics* 2, 765 (1990).
- [12] Tian, S., Gao, Y., Dong, X., Liu, C.: Definitions of Vortex Vector and Vortex, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 849, pp. 312–339 (2018).



- [13] Kolář, V.: Vortex Identification: New Requirements and Limitations, *In: International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 28, pp. 638-652 (2007).
- [14] Robinson, S.K.: The Kinetics of Turbulent Boundary Layer Structure, PhD Thesis, Stanford University (1991).
- [15] Kolář, V., Šístek, J.: Corotational and Compressibility Aspects Leading to a Modification of the Vortex Identification Q-Criterion, *AIAA Journal* 53 (8):1-5 (2015).
- [16] V. Holmén, Methods for Vortex Identification, Lund University Libraries, [lup.lub.lu.se/student-papers/record/3241710](http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/3241710) (2012).
- [17] Chakraborty, P., Balachandar, S., Adrian, R.J.: Kinematics of Local Vortex Identification Criteria, *Journal of Visualization*, vol. 10, pp. 137-140 (2007).
- [18] Jeong, J., Hussain, F.: On the Identification of a Vortex, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 285, pp. 69-94 (1995).
- [19] Sumner, D., Heseltine, J. L.: Tip Vortex Structure for a Circular Cylinder with a Free End, *In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96, pp.731-744 (2008).
- [20] Scarano. F.: Tomographic PIV: Principles and Practice, *In: Measurement Science and Technology*, Article ID: 012001 (2012).
- [21] Zhu, H.-Y., Wang, Ch.-Y., Wang, H.-P., Wang, J.-J.: Tomographic PIV Investigation on 3D Wake Structures for Flow over a Wall-Mounted Short Cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, vol 831, pp. 743-778 (2017).
- [22] Gonçalves, R. T., Franzini, G. R., Rosetti, G. F., Meneghini, J. R., Fujarra, A. L. C.: Flow Around Circular Cylinders with Very Low Aspect Ratio, *Journal of Fluids and Structures*, vol 54, pp. 122-141 (2015).
- [23] Rostamy, N., Sumner, D., Bergstrom, D. J., Bugg, J. D.: Local Flow Field of a Surface-Mounted Finite Circular Cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, vol. 34, pp. 105-122 (2014).
- [24] Park, Ch.-W., Lee, S.-J.: Flow Structure around a Finite Circular Cylinder Embedded in Various Atmospheric

## 6 Publikace autorky, příspěvky na konferencích

- [A] Barraclough, V., Novotný, J., Šafařík, P.: Experimental Investigation of 3D Vortex Structures in Wake of Hyperboloid-Shaped Model, *Topical Problems of Fluid Mechanics, Conference Proceedings* (2017).
- [B] Barraclough, V., Šafařík, P.: Study of the Effect of Turbulence on Cooling Tower Wakes, *Acta Mechanica Slovaca, vol. 23, pp. 56-60* (2019).
- [C] Barraclough, V., Novotný, J., Šafařík, P.: Experimental Investigation of Flow in Vicinity of Hyperboloid-Shaped Model by Means of Particle Image Velocimetry Measurement, presented on Conference *Computational Mechanics* (2017).
- [D] Barraclough, V., Novotný, J., Šafařík, P.: Experimental Investigation of Vortex Structures in Wake of Hyperboloid-Shaped Model by Means of D Particle Image Velocimetry Measurement, *Experimental Fluid Mechanics 2017, Conference Proceedings, EPJ Web of Conferences, 01/2017* (2017).
- [E] Barraclough, V., Novotný, J., Šafařík, P.: Study of Flow around Model of Cooling Tower by Means of 2D Particle Image Velocimetry Measurement. *Experimental Fluid Mechanics, EPJ Web of Conferences, 01/2017* (2016).
- [F] Barraclough, V., Novotný, J., Šafařík, P.: Compilation of Vortex Filament of Arch Vortex in Wake of Hyperboloid-Shaped Model, *Topical Problems of Fluid Mechanics, Conference Proceedings* (2018).
- [G] Barraclough, V., Šafařík, P.: Experimental and Numerical Research on Arch Vortex, *Engineering Mechanics, Conference Proceedings* (2019).
- [H] Barraclough, V., Šafařík, P.: An Arch Vortex in a Wake of Hyperboloid-Shaped Model, *Building and Environment, podáno k recenznímu řízení v září 2020*.

## 7 Další publikace autorky

- a) Schmidtová, V., Pick, P., Kozák, P.: PSP Measurement Results on a Model / PSP Development in Czech Aerospace Research Centre, Plc., *In:Letecký zpravodaj* (2010).
- b) Schmidtová, V., Pick, P.: Experimental Methods in Aerodynamics of High Speeds: Pressure Sensitive Paint, *Application of Experimental and Numerical Methods in Mechanics of Fluids and Energetics, Conference Proceedings* (2012).
- c) Schmidtová, V.: Parametry rázových vln ve vlhkém vzduchu, technická zpráva R-5511, Výzkumný a zkušební letecký ústav, Praha (2012).
- d) Barraclough, V.: Aerodynamické charakteristiky fluidického ventilu, technická zpráva R-7146, Výzkumný a zkušební letecký ústav, Praha (2019).

