

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**Úplav za dvěma válci ve stupňovité
konfiguraci**

Disertační práce

Ing. Rut Vitkovičová

Studijní obor: Termomechanika a mechanika tekutin

Školitel: prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.
Školitel specialista: Ing. Jan Čížek, Ph.D.

Název:

Úplav za dvěma válci ve stupňovité konfiguraci

Anotace

Tato práce se zabývá ovlivněním úplavu válce pomocí druhého válce umístěného v úplavu. Pro sedm zvolených pozic druhého válce, čtyři poměry průměrů těchto válců a řadu režimů Reynoldsových čísel v rozmezí od 240 do 8700 byla sledována změna chování proudového pole. Z měření metodou CTA byly vyšetřeny frekvence vyskytující se v úplavech, vizualizace proudění poskytla informace o chování proudění, o interakcích smykových vrstev a úplavů, formování vírů a vírových stezek. Metodou PIV byla získána rychlostní pole a pole vířivost. Současně data z vizualizací a z PIV poskytla základ pro analýzu proudění pomocí metody POD. Z této metody byly získány vlastní tvary hlavních struktur proudění ve vztahu ke vstupním datům. POD módy z dat PIV z polí vířivosti a rychlosti pomohla analyzovat a identifikovat struktury v POD módech z dat z vizualizace. Z provedených experimentů a jejich následné analýzy tak mohly být definovány oblasti v úplavu válce z hlediska vlivu na lokální poruchy a celkovou nestabilitu úplavu. Podrobným rozborem výsledků byly nalezeny i mechanismy, které ovlivňují velikosti dominantních frekvencí v úplavu a jejich závislost na velikosti druhého válce a Reynoldsova čísla. Pro tři Reynoldsova čísla a čtyři poměry velikostí válců byla vytvořena schémata struktur charakterizující danou konfiguraci při daném Reynoldsově čísle.

Title:

The wake behind two cylinders in a staggered configuration

Summary

This work deals with an influence of a wake of a circular cylinder by a second cylinder placed in the wake. For seven selected positions of the second cylinder, four ratios of these cylinders diameters and a number of Reynolds numbers ranging from 240 to 8700, a change in the behavior of the flow pattern was observed. From the CTA method, frequencies occurring in the wakes were examined, a visualization of flow field provided information on flow behavior, interactions of shear layers and wakes, vortex formation and vortex streets. It was obtained by the PIV method a velocity field and a vortex field. The data from the visualization and the PIV measurement provided the basis for flow analysis using a POD method. It was obtained eigenmodes of the main flow structures in relation to the input data from this method. POD modes from the PIV data from vorticity and velocity fields helped to analyze and identify structures in POD modes from visualization data. From the experiments and their subsequent analysis, the regions in the wake of the circular cylinder could be defined in terms of influence on local disturbances and overall instability of the wake. A detailed analysis of the results has also found mechanisms that influence the magnitude of dominant wake frequencies and their dependence on the size of the second cylinder and the Reynolds number. For the three Reynolds numbers and the four cylinder size ratios, the schemes of the structures characterizing the configuration of the given Reynolds number were created.

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěla poděkovat mému školiteli prof. Ing. Jiřímu Nožičkovi, CSc. za vedení a rady poskytnuté během řešení práce. Poděkování taktéž patří i mému školiteli specialistovi Ing. Janu Čížkovi, Ph.D. za konzultace a rady, a také prof. Ing. Pavlu Šafaříkovi, CSc. a doc. Ing. Hyhlíkovi, Ph.D. za cenné připomínky při psaní práce. Velké díky náleží i prof. Yoshifumi Yokoiovi z National Defense Academy of Japan za jeho spolupráci na měření a jeho podporu.

Zvláštní poděkování si zaslouží můj muž Pavol, jednak za toleranci mého pracovního vytížení ale také za cenné odborné rady a technickou pomoc a podporu.

Prohlášení

Předkládám k posouzení disertační práci na téma „Úplav za dvěma válci ve stupňovité konfiguraci“. Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracovala samostatně s použitím literatury uvedené seznamu v kapitole 7.

V Praze dne 16. 8. 2018

.....

Obsah

Anotace	2
Summary	3
Poděkování	4
Prohlášení	5
Obsah	6
Seznam použitých symbolů a zkratek	8
Seznam tabulek.....	9
Seznam obrázků.....	10
1 Úvod.....	17
1.1 Motivace	17
1.2 Současný stav řešené problematiky	18
1.2.1 Proudění za jedním válcem.....	18
1.2.2 Proudění za dvěma vzájemně natočenými válci.....	20
1.2.3 Aplikace metody Proper Orthogonal Decomposition (POD).....	26
1.3 Cíle práce.....	27
2 Experiment.....	28
2.1 Nastavení	28
2.2 Experimentální metody	30
2.2.1 Metoda CTA	30
2.2.2 PIV měření.....	31
2.2.3 Vizualizace	31
3 Metodika zpracování experimentálních dat	32
3.1 Zpracování výsledků z měření CTA.....	32
3.2 Metoda Proper Orthogonal Decomposition (Vlastní ortogonální dekompozice).....	33
3.3 Zpracování výsledků z měření vizualizace	35
3.4 Zpracování výsledků z měření PIV.....	36

4	Výsledky měření	37
4.1	Vliv geometrického uspořádání válců a Reynoldsova čísla na struktury a mechanizmy v úplavech válců.....	37
4.2	Vliv geometrického uspořádání válců a Reynoldsova čísla na frekvence odtrhávání struktur v úplavu	52
4.2.1	$D/d = 2,5$	54
4.2.2	$D/d = 1$	62
4.2.3	$D/d = 1,67$	67
4.2.4	$D/d = 5$	69
4.2.5	Vliv válců na pohyb struktur v prostoru	71
5	Rozbor.....	73
5.1	Identifikace dominantních struktur z analýzy POD	73
5.1.1	Struktury v proudění.....	73
5.1.2	Energie a mohutnosti v módech POD.....	98
5.2	Určení závislosti Strouhalova čísla na čísla Reynoldsově.....	105
5.3	Zhodnocení poloh.....	110
5.4	Shrnutí a zhodnocení výsledků a poznatků	120
6	Závěr.....	124
6.1	Přínos oboru	128
6.2	Možnosti dalšího výzkumu.....	128
7	Literatura.....	129
7.1	Literatura autorky uvedená v disertační práci	131
7.2	Publikační činnost autorky nevztahující se k tématu disertační práce.....	132
8	Přílohy.....	136

Seznam použitých symbolů

Řecké symboly

α	[°]	úhel
ε	[m ² /s]	enstrofie
λ_i	[-]	i – tá vlastní hodnota matice
ν	[m ² /s]	kinematická viskozita
ρ	[kg/m ⁻³]	hustota
φ_i	[-]	i – tý POD mód
ω	[s ⁻¹]	vířivost

Latinské symboly

a_i	[-]	i- tý časově závislý POD koeficient
A	[-]	koeficient funkce Sh - Re
B	[-]	koeficient funkce Sh - Re
C	[-]	koeficient funkce Sh - Re
D	[m]	průměr prvního válce
d	[m]	průměr druhého válce
E_i	[-]	i – tá poměrná energie
f	[Hz]	frekvence
G	[-]	kovariační matice
K	[-]	počet módů
M	[-]	počet fluktuačních složek
N	[-]	počet snímků
R	[m]	vzdálenost středů válců
S	[m ²]	plocha
t	[s]	čas
t_n	[s]	zvolený časový okamžik
T_w	[K]	teplota povrchu válce
T_∞	[K]	teplota volného proudu vzduchu
U	[-]	matice fluktuačních složek
u_N	[-]	fluktuační složka
u_x, u_y, u_z	[-]	složky rychlostí ve směru x, y a z
u	[m/s]	rychlost ve směru x
v_i	[-]	i – tý vlastní vektor

w	[m/s]	rychlost ve směru y
x, y, z	[m]	kartézské souřadnice
i	[1]	indexová proměnná
i, j, k	[1]	kartézské složky

Podobnostní kritéria

Re	[-]	Reynoldsovo číslo
Sh	[-]	Strouhalovo číslo

Zkratky

BB	Base Bleed
CFD	Computational Fluid Dynamics
CTA	Constant temperature anemometry
IS	Induced Separation
LDA	Laser Doppler Anemometry
LDV	Laser Doppler Velocimetry
PIV	Particle Image Velocimetry
POD	Proper Orthogonal Decomposition
PSD	Power Spectral Density
SBB	Single Bluff-body
SLR	Shear Layer Reattachment
SVS	Synchronized Vortex Shedding
TR PIV	Time Resolved Particle Image Velocimetry
VI	Vortex Impingement
VPE	Vortex Pairing and Enveloping
VPSE	Vortex Pairing, Splitting and Enveloping

Seznam tabulek

Tabulka 1 Závislost Strouhalova čísla na Reynoldsově čísle od různých autorů	19
Tabulka 2 Souřadnice Pozic válců.....	28
Tabulka 3 Charakteristika Pozice 1 pro D/d =1, 1,67, 2,5 a 5	112
Tabulka 4 Stupnice hodnocení kritérií pro 4 poměry D/d	112
Tabulka 5 Charakteristika Pozice 2 pro D/d =1, 1,67, 2,5 a 5	113
Tabulka 6 Charakteristika Pozice 3 pro D/d =1, 1,67, 2,5 a 5	115
Tabulka 7 Charakteristika Pozice 4 pro D/d =1, 1,67, 2,5 a 5	115

Tabulka 8 Charakteristika Pozice 5 pro $D/d = 1, 1,67, 2,5$ a 5	117
Tabulka 9 Charakteristika Pozice 6 pro $D/d = 1, 1,67, 2,5$ a 5	118
Tabulka 10 Charakteristika Pozice 7 pro $D/d = 1, 1,67, 2,5$ a 5	120

Seznam obrázků

Obr. 1 Teoretická závislost Strouhalova čísla na Reynoldsově čísle tak, jak ji uvádějí někteří zmiňovaní autoři.....	20
Obr. 2 Regiony ovlivnění dvou válců v proudění dle Zdravkoviče, převzato z [13].....	21
Obr. 3 Porovnání oblastí definovaných autory Strykowski a Sreenivasan [14] (modré) a autory Hwang a Choi (červené) [15], převzato z [10].....	22
Obr. 4 Struktury proudění za dvěma válci o stejném průměru pro $Re = 850 - 1900$, a) SBB1 – Samostatné prizmatické těleso, typ 1, b) SBB2 – Samostatné prizmatické těleso, typ 2, c) BB – base bleed, d) SLR – Připojení smykové vrstvy, e) IS – Indukovaná separace, f) VI – Narážení vírů, g) VPE - Párování a zabalování vírů, h) VPSE - Párování, dělení a zabalování vírů, i) SVS - Synchronizované odtrhávání vírů, převzato z [16]	23
Obr. 5 Vyznačení hranic regionů jednotlivých typů proudových polí v úplavu za válcem, převzato z [16]	24
Obr. 6 Mapa regionů v oblasti za válcem, a) pro $Re = 1500$, b) pro $Re = 7000$, c) pro $Re = 20000$, převzato z [19].....	25
Obr. 7 Umístění středů druhého válce v proudovém poli za válcem prvním a zobrazení oblastí, jež potlačují nestability od autorů Hwang a Choi [15] a Strykowski a Sreenivasan [14]	29
Obr. 8. Souřadný systém a definice rozměrů	29
Obr. 9 Vizualizace úplavu za samostatnými válci, a) $D = 10$ mm, $Re = 500$, b) $D = 10$ mm, $Re = 1200$, c) $D = 10$ mm, $Re = 2500$, d) $D = 20$ mm, $Re = 1200$, e) $D = 20$ mm, $Re = 2500$	37
Obr. 10 Rychlostní pole za samostatným válcem o $D = 10$ mm pro $Re = 450$	38
Obr. 11 Porovnání úplavu válců pro Pozici 1, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$	39

Obr. 12 Rychlostní pole pro jednotlivé Pozice pro $Re = 500$, a) Pozice 1, b) Pozice 2, c) Pozice 3, d) Pozice 4, e) Pozice 5, f) Pozice 6, g) Pozice 7	41
Obr. 13 Porovnání úplavu válců pro Pozici 2, a) $D/d = 1, Re = 500$, b) $D/d = 1, Re = 1200$, c) $D/d = 1, Re = 2500$, d) $D/d = 1,67, Re = 500$, e) $D/d = 1,67, Re = 1200$, f) $D/d = 1,67, Re = 2500$, g) $D/d = 2,5, Re = 500$, h) $D/d = 2,5, Re = 1200$, i) $D/d = 2,5, Re = 2500$, j) $D/d = 5, Re = 1200$, k) $D/d = 5, Re = 2500$	43
Obr. 14 Porovnání úplavu válců pro Pozici 3, a) $D/d = 1, Re = 500$, b) $D/d = 1, Re = 1200$, c) $D/d = 1, Re = 2500$, d) $D/d = 1,67, Re = 500$, e) $D/d = 1,67, Re = 1200$, f) $D/d = 1,67, Re = 2500$, g) $D/d = 2,5, Re = 500$, h) $D/d = 2,5, Re = 1200$, i) $D/d = 2,5, Re = 2500$, j) $D/d = 5, Re = 1200$, k) $D/d = 5, Re = 2500$	45
Obr. 15 Porovnání úplavu válců pro Pozici 4, a) $D/d = 1, Re = 500$, b) $D/d = 1, Re = 1200$, c) $D/d = 1, Re = 2500$, d) $D/d = 1,67, Re = 500$, e) $D/d = 1,67, Re = 1200$, f) $D/d = 1,67, Re = 2500$, g) $D/d = 2,5, Re = 500$, h) $D/d = 2,5, Re = 1200$, i) $D/d = 2,5, Re = 2500$, j) $D/d = 5, Re = 1200$, k) $D/d = 5, Re = 2500$	47
Obr. 16 Porovnání úplavu válců pro Pozici 5, a) $D/d = 1, Re = 500$, b) $D/d = 1, Re = 1200$, c) $D/d = 1, Re = 2500$, d) $D/d = 1,67, Re = 500$, e) $D/d = 1,67, Re = 1200$, f) $D/d = 1,67, Re = 2500$, g) $D/d = 2,5, Re = 500$, h) $D/d = 2,5, Re = 1200$, i) $D/d = 2,5, Re = 2500$, j) $D/d = 5, Re = 1200$, k) $D/d = 5, Re = 2500$	49
Obr. 17 Porovnání úplavu válců pro Pozici 6, a) $D/d = 1, Re = 500$, b) $D/d = 1, Re = 1200$, c) $D/d = 1, Re = 2500$, d) $D/d = 1,67, Re = 500$, e) $D/d = 1,67, Re = 1200$, f) $D/d = 1,67, Re = 2500$, g) $D/d = 2,5, Re = 500$, h) $D/d = 2,5, Re = 1200$, i) $D/d = 2,5, Re = 2500$, j) $D/d = 5, Re = 1200$, k) $D/d = 5, Re = 2500$	51
Obr. 18 Porovnání úplavu válců pro Pozici 7, a) $D/d = 1, Re = 500$, b) $D/d = 1, Re = 1200$, c) $D/d = 1, Re = 2500$, d) $D/d = 1,67, Re = 500$, e) $D/d = 1,67, Re = 1200$, f) $D/d = 1,67, Re = 2500$, g) $D/d = 2,5, Re = 500$, h) $D/d = 2,5, Re = 1200$, i) $D/d = 2,5, Re = 2500$, j) $D/d = 5, Re = 1200$, k) $D/d = 5, Re = 2500$	53
Obr. 19 Porovnání Strouhalových čísel získaných z měření s dopočítanými hodnotami dle Fey et. al [7]	54
Obr. 20 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 2,5$ v Pozici 1, b) vizualizace Pozice 1 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava	55
Obr. 21 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 2,5$ v Pozici 2, b) vizualizace Pozice 2 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava	56

Obr. 22 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 2,5$ v Pozici 3, b) vizualizace Pozice 3 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava.....	57
Obr. 23 Frekvenční spektrum pro $D/d = 2,5, Re = 1660$, Pozice 3.....	58
Obr. 24 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 2,5$ v Pozici 4, b) vizualizace Pozice 4 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava.....	59
Obr. 25 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 2,5$ v Pozici 5, b) vizualizace Pozice 5 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava.....	60
Obr. 26 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 2,5$ v Pozici 6, b) vizualizace Pozice 6 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava.....	61
Obr. 27 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 2,5$ v Pozici 7, b) vizualizace Pozice 7 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava.....	62
Obr. 28 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 1$ v Pozici 1, b) vizualizace Pozice 1 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava.....	63
Obr. 29 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 1$ v Pozici 2, b) vizualizace Pozice 2 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava.....	63
Obr. 30 Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 1$ v Pozici 3, b) vizualizace Pozice 3 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava.....	64
Obr. 31 Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 1$ v Pozici 4, b) vizualizace Pozice 4 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava.....	65
Obr. 32 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 1$ v Pozici 5, b) vizualizace Pozice 5 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava.....	66
Obr. 33 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 1$ v Pozici 6, b) vizualizace Pozice 6 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava.....	66
Obr. 34 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 1$ v Pozici 7, b) vizualizace Pozice 7 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava.....	67
Obr. 35 Závislost $Sh - Re$ z analýzy POD pro $D/d = 1,67$, a) Pozice 1, b) Pozice 2, c) Pozice 3, d) Pozice 4, e) Pozice 5, f) Pozice 6, g) Pozice 7.....	68
Obr. 36 Závislost $Sh - Re$ z analýzy POD pro $D/d = 5$, a) Pozice 1, b) Pozice 2, c) Pozice 3, d) Pozice 4, e) Pozice 5, f) Pozice 6, g) Pozice 7.....	70

Obr. 37 Závislost $Sh - Re$ z měření pomocí 2 sond pro $D/d = 2,5$, a) Pozice 1, b) Pozice 2, c) Pozice 3, d) Pozice 4, e) Pozice 5, f) Pozice 6, g) Pozice 7	72
Obr. 38 První POD mód z PIV pro $D = 10$ mm a $Re = 450$	74
Obr. 39 První POD mód pro samostatný válec o $D = 10$ mm a $Re = 5800$ pro pole a) rychlostí, b) vířivosti, převzato z [23]	75
Obr. 40 První a třetí mód POD z vizualizací pro samostatný válec $D = 10$ mm, a) Mód 1, $Re = 500$, b) Mód 1, $Re = 1200$, c) Mód 1, $Re = 2500$, d) Mód 3, $Re = 500$, e) Mód 3, $Re = 1200$, f) Mód 3, $Re = 2500$	76
Obr. 41 První POD mód z rychlostního pole, a) pro směr x, b) pro směr y	76
Obr. 42 Identifikace struktur úplavu za jedním válce z různých dat POD (pole vířivosti [23])	77
Obr. 43 První mód POD z vizualizací pro Pozici 1, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$	79
Obr. 44 Třetí mód POD vizualizace, a) $D/d = 1$, $Re = 1200$, b) $D/d = 1$, $Re = 2500$, c) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, e) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, f) $D/d = 5$, $Re = 2500$	81
Obr. 45 Pozice 1, $D/d = 2,5$, $Re = 500$ m, a) první mód rychlostní pole ve směru X, b) první mód rychlostní pole ve směru Y, c) první mód vířivost, d) třetí mód vířivost	82
Obr. 46 Identifikace struktury za prvním válcem pro $D/d = 2,5$, $Re = 500$, a) první mód vizualizace, b) třetí mód vizualizace, c) první mód vířivost	82
Obr. 47 První mód POD z vizualizací pro Pozici 2, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$	84
Obr. 48 a) Třetí mód $D/d = 1$, $Re = 2500$, b) čtvrtý mód $D/d = 2,5$, $Re = 2500$	85
Obr. 49 Pozice 2, $D/d = 2,5$, $Re = 500$ m, a) první mód rychlostní pole ve směru X, b) první mód rychlostní pole ve směru Y, c) první mód vířivost, d) třetí mód vířivost	85
Obr. 50 První mód POD z vizualizací pro Pozici 3, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$,	

g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$	87
Obr. 51 Třetí mód, $D/d = 1$, $Re = 500$	88
Obr. 52 Pozice 3, $D/d = 2,5$, $Re = 500m$, a) první mód rychlostní pole ve směru X, b) první mód rychlostní pole ve směru Y, c) první mód vířivost, d) třetí mód vířivost.....	88
Obr. 53 První mód POD z vizualizací pro Pozici 4, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$	90
Obr. 54 Pozice 4, $D/d = 2,5$, $Re = 500m$, a) první mód rychlostní pole ve směru X, b) první mód rychlostní pole ve směru Y, c) první mód vířivost, d) třetí mód vířivost.....	91
Obr. 55 První mód POD z vizualizací pro Pozici 5, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$	92
Obr. 56 Třetí POD módy Pozice 5, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, c) $D/d = 2,5$, $Re = 500$	93
Obr. 57 Pozice 5, $D/d = 2,5$, $Re = 500m$, a) první mód rychlostní pole ve směru X, b) první mód rychlostní pole ve směru Y, d) třetí mód vířivost.....	93
Obr. 58 První mód POD z vizualizací pro Pozici 6, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$	95
Obr. 59 Třetí POD mód Pozice 6, $D/d = 2,5$, $Re = 500$	96
Obr. 60 Pozice 6, $D/d = 2,5$, $Re = 500$, a) první mód rychlostní pole ve směru X, b) první mód rychlostní pole ve směru Y, d) třetí mód vířivost.....	96
Obr. 61 První mód POD z vizualizací pro Pozici 7, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$	97

Obr. 62 Třetí POD mód Pozice 7, $D/d = 2.5$, $Re = 500$	98
Obr. 63 Pozice 7, $D/d = 2,5$, $Re = 500$, a) první mód rychlostní pole ve směru X, b) první mód rychlostní pole ve směru Y, c) první mód vířivost, d) třetí mód vířivost	98
Obr. 64 Průběh poměrné mohutnosti pro prvních 6 módů POD pro $D/d = 1$, a) $Re = 500$, b) $Re = 1200$, c) $Re = 2500$	100
Obr. 65 Průběh poměrné mohutnosti pro prvních 6 módů POD pro $D/d = 1,67$, a) $Re = 500$, b) $Re = 1200$, c) $Re = 2500$	101
Obr. 66 Průběh poměrné mohutnosti pro prvních 6 módů POD pro $D/d = 2,5$, a) $Re = 500$, b) $Re = 1200$, c) $Re = 2500$	102
Obr. 67 Průběh poměrné mohutnosti pro prvních 6 módů POD pro $D/d = 5$, a) $Re = 500$, b) $Re = 1200$, c) $Re = 2500$	103
Obr. 68 Průběh poměrné mohutnosti pro prvních 6 módů POD pro $D/d = 2,5$, $Re = 500$, a) z rychlostních polí, b) z polí vířivosti.....	104
Obr. 69 Závislost $Sh - Re$ pro $D/d = 1$ a) Pozice 1, b) Pozice 2, c) Pozice 3, d) Pozice 4, e) Pozice 5, f) Pozice 6, g) Pozice 7	107
Obr. 70 Závislost $Sh - Re$ pro $D/d = 2.5$ a) Pozice 1, b) Pozice 2, c) Pozice 3, d) Pozice 4, e) Pozice 5, f) Pozice 6, g) Pozice 7	108
Obr. 71 Porovnání závislostí $Sh - Re$ pro $D/d = 1$ a $2,5$, a) Pozice1, b) Pozice 2, c) Pozice 3, d) Pozice 4, e) Pozice 5, f) Pozice 6, g) Pozice 7.....	109
Obr. 72 Schéma typových struktur polohy 1, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$	111
Obr. 73 Schéma typových struktur polohy 2, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$	113
Obr. 74 Schéma typových struktur polohy 3, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$,	

Re = 500, h) $D/d = 2,5$, Re = 1200, i) $D/d = 2,5$, Re = 2500, j) $D/d = 5$, Re = 1200, k) $D/d = 5$, Re = 2500	114
Obr. 75 Schéma typových struktur polohy 4, a) $D/d = 1$, Re = 500, b) $D/d = 1$, Re = 1200, c) $D/d = 1$, Re = 2500, d) $D/d = 1,67$, Re = 500, e) $D/d = 1,67$, Re = 1200, f) $D/d = 1,67$, Re = 2500, g) $D/d = 2,5$, Re = 500, h) $D/d = 2,5$, Re = 1200, i) $D/d = 2,5$, Re = 2500, j) $D/d = 5$, Re = 1200, k) $D/d = 5$, Re = 2500	116
Obr. 76 Schéma typových struktur polohy 5, a) $D/d = 1$, Re = 500, b) $D/d = 1$, Re = 1200, c) $D/d = 1$, Re = 2500, d) $D/d = 1,67$, Re = 500, e) $D/d = 1,67$, Re = 1200, f) $D/d = 1,67$, Re = 2500, g) $D/d = 2,5$, Re = 500, h) $D/d = 2,5$, Re = 1200, i) $D/d = 2,5$, Re = 2500, j) $D/d = 5$, Re = 1200, k) $D/d = 5$, Re = 2500	117
Obr. 77 Schéma typových struktur polohy 6, a) $D/d = 1$, Re = 500, b) $D/d = 1$, Re = 1200, c) $D/d = 1$, Re = 2500, d) $D/d = 1,67$, Re = 500, e) $D/d = 1,67$, Re = 1200, f) $D/d = 1,67$, Re = 2500, g) $D/d = 2,5$, Re = 500, h) $D/d = 2,5$, Re = 1200, i) $D/d = 2,5$, Re = 2500, j) $D/d = 5$, Re = 1200, k) $D/d = 5$, Re = 2500	118
Obr. 78 Schéma typových struktur polohy 7, a) $D/d = 1$, Re = 500, b) $D/d = 1$, Re = 1200, c) $D/d = 1$, Re = 2500, d) $D/d = 1,67$, Re = 500, e) $D/d = 1,67$, Re = 1200, f) $D/d = 1,67$, Re = 2500, g) $D/d = 2,5$, Re = 500, h) $D/d = 2,5$, Re = 1200, i) $D/d = 2,5$, Re = 2500, j) $D/d = 5$, Re = 1200, k) $D/d = 5$, Re = 2500	119
Obr. 79 Mapa oblastí vlivu druhého válce a jednotlivé Pozice válců	121

1 Úvod

Zkoumání proudění kolem válce a možnost ovlivnění jeho úplavu je tématem mnoha prací z oboru mechaniky tekutin a oborů příbuzných, přesto se ale jedná stále o otevřený problém, který není zcela vyřešen. Jednou z mnoha možností ovlivnění úplavu válce a řízení proudu je umístění druhého válce do proudového pole za válcem prvním. Pochopení vzájemné interakce válců v proudění nám umožňuje mimo jiné porozumět dějům odehrávajících se v geometricky podobných aplikacích napříč mnoha technickými obory. Zároveň také umožňuje nalézt oblasti ovlivňující úplav dominantního válce a tím i optimalizovat činnosti strojů a zařízení.

Tato práce se věnuje charakteru proudění v úplavu válce a možnosti jeho ovlivnění právě pomocí druhého válce umístěného v úplavu. Na základě výzkumu jiných autorů byly stanoveny oblasti v úplavu za válcem, které mohou významně ovlivnit charakter proudění, resp. mají vliv na jeho stabilitu. Tyto oblasti byly prozkoumány a analyzovány pro odlišná nastavení a byl sledován význam vlivu těchto nastavení.

1.1 Motivace

Studování proudění a obtékání těles je výzvou pro vědce již několik století. Nicméně až z rozvojem techniky a strojů se začalo jednat o systematické soustavné studium. Člověka hnala nejen zvědavost a touha po poznání a porozumění jevům odehrávajících se v přírodě kolem něj, ale i čistě pragmatický přístup, který hledal stále nová a nová vylepšení pro lidskou techniku ať se jednalo o stroje a zařízení anebo o techniku staveb. Vědci a technici jako Osborne Reynolds, Ludwig Prandtl, Josef Ressel a mnozí jiní přispěli k posunu daného oboru nejen základním výzkumem jevů ale i aplikací poznatků do technické praxe. V období po průmyslové revoluci, kdy technické obory vzkvétaly a vědci, technici či samoukové se snažili přicházet s novými a novými nápaditými řešeními, vznikala mnohá zařízení pouze na základě intuice, nadšení a pýle. Nicméně s postupem času, kdy technický pokrok začínal mít čím dále větší vliv na ekonomiku, nestačila pro prosezení novinek jen zajímavost nápadu, ale i jeho ekonomická stránka. A tento trend s postupem času je mnohdy určující pro technické realizace.

Proto nejzajímavější optimalizační technická řešení jsou taková, která co nejjednodušším způsobem dosáhnou žádoucích vlastností či chování dané technické aplikace. Z tohoto důvodu je dlouhodobým trendem v technických aplikacích optimalizace pomocí jednoduchých prvků či úprav a rozmístění v konstrukci. Jedním z nabízejících se řešení je vhodné umístění těles ve tvaru válců pro usměrnění, řízení či pouze predikci chování proudových polí v anebo okolo těchto zařízení. Aby této možnosti mohlo být využito, je nutné dobře porozumět procesům a dějům, které se odehrávají v proudových polích kolem těchto těles. Zkoumání úplavu za válcem (patřící do skupiny těles nazývaných prizmatická tělesa – angl. bluff body) patří dlouhodobě k hlavním

tématům mechaniky tekutin. Nicméně přechod ze stabilního proudění do proudění nestabilního, vznik a chování turbulentních struktur a především možnosti tyto struktury a stabilitu proudění ovlivňovat a posléze i řídit jsou témata mechaniky tekutin, která stále nebyla plně prozkoumána. Právě pochopení těchto jevů, identifikace struktur v proudění a možnost jejich predikce umožňuje v technických aplikacích buď potlačit nežádoucí jevy, jako je hluk, vibrace apod. anebo naopak podpořit jevy žádoucí jako je např. promíchávání proudových polí.

1.2 Současný stav řešené problematiky

Pro řešení proudového pole kolem dvou válců a porozumění dějům, jež se zde odehrávají, je nutné zabývat se celým komplexem znalostí, jež se mohou podílet na pochopení této problematiky. Samozřejmým základem v této oblasti je znalost chování proudění okolo samostatného válce. Dalšími výchozími zdroji jsou výzkumy autorů, které se obdobnou problematikou – dva válce ve stupňovitém uspořádání (angl. staggered configuration) v proudovém poli, již zabývali. Pro hlubší vhled do problematiky mohou pomoci nové postupy a metody analýzy získaných dat, jako je například vlastní ortogonální dekompozice (POD).

1.2.1 Proudění za jedním válcem

Válec v proudovém poli je již klasickým tématem mechaniky tekutin a v posledních sto letech mu bylo věnováno mnoho prací. K popisu charakteristiky proudění je často využíváno bezrozměrných parametrů. Klasifikace režimů rychlostí je ve většině případů vztahována k bezrozměrnému Reynoldsově číslu Re , jenž dává do poměru síly setrvačné se silami vazkými a je vyjádřeno jako

$$Re = u \cdot D/\nu. \quad (1)$$

Bezrozměrná frekvence odtrhávání úplavu za válcem bývá vyjádřena nejčastěji v podobě Strouhalova čísla Sh

$$Sh = f \cdot D/u. \quad (2)$$

Roshko [1] proměřil pomocí žhaveného drátku frekvence v úplavu za válcem pro Reynoldsova čísla v rozmezí 40 až 10000 pro různé průměry válců křivku závislosti Strouhalova čísla na číslu Reynoldsově. Sumárně o základních poznatkách o úplavu za válcem a jeho chování píše Williamson ve [2]. Ve své práci rozděluje režimy v úplavu na základě velikosti Reynoldsova čísla a jevů, jež se v úplavu odehrávají. Shrnutí poznatků mnoha autorů za poslední desetiletí zpracoval ve své knize M. M. Zdravkovich [3].

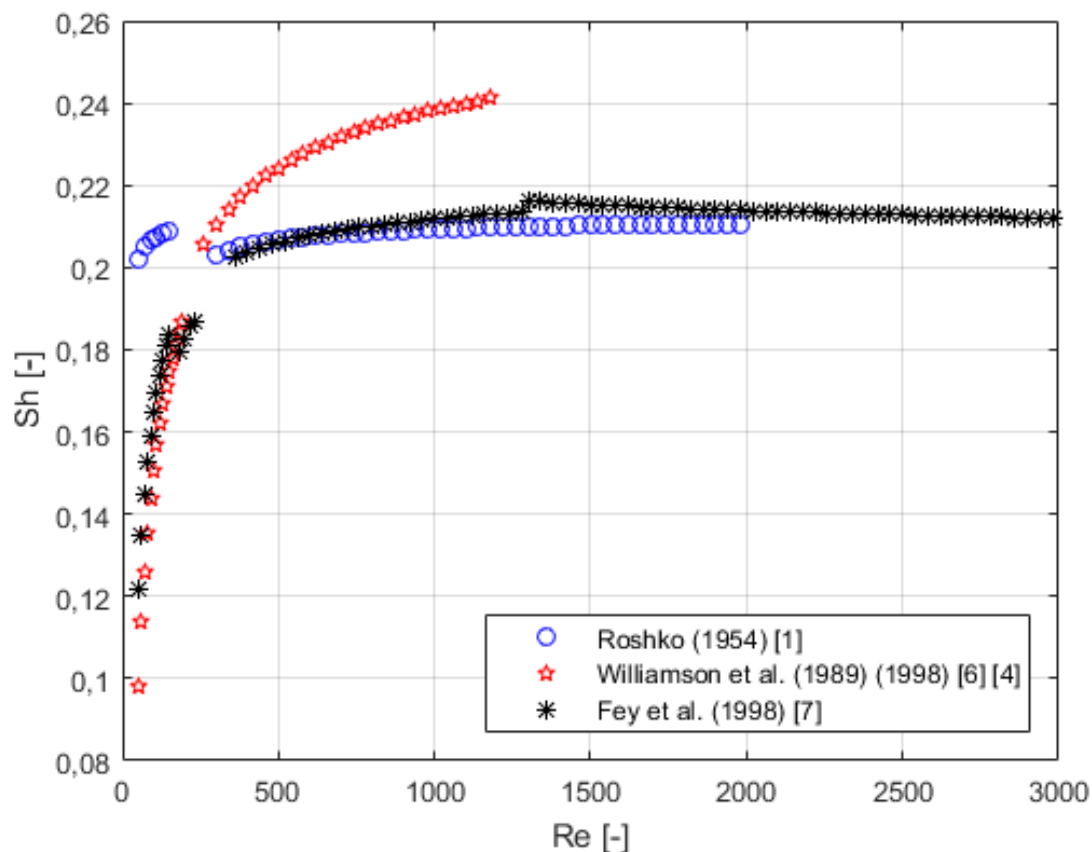
Mnoho autorů se ve svých výzkumech věnuje právě vztahu čísla Reynoldsova k číslu Strouhalovu. Na základě rozsáhlých experimentálních měření (např. [1], [4] a jiní) definovali tento

vztah pro různé režimy proudění. Autoři Vít et al. uvádějí ve své práci [5] závislost Strouhalova čísla nejen na čísle Reynoldsovu, ale zohledňují i potenciální rozdíl teplot válce a nabíhajícího proudu vzduchu. V tabulce 1 jsou uvedeny některé z těchto vztahů a rozsah jejich platnosti a v grafu na obr. 1 jsou některé tyto závislosti vykresleny.

Tabulka 1 Závislost Strouhalova čísla na Reynoldsově čísle od různých autorů

Vztah Re – Sh	Platnost	Autor
$Sh = 0,212 - \frac{0,494}{Re}$	$50 < Re < 150$	Roshko (1954) [1]
$Sh = 0,212 - \frac{2,692}{Re}$	$300 < Re < 2000$	Roshko (1954) [1]
$Sh = 0,285 - \frac{1,390}{\sqrt{Re}} + \frac{1,806}{Re}$	$Re < 190$	Williamson et al, (1989) [6]
$Sh = 0,2731 - \frac{1,1129}{\sqrt{Re}} + \frac{0,4821}{Re}$	$260 < Re < 1200$	Williamson et al. (1998) [4]
$Sh = 0,2684 - \frac{1,0356}{\sqrt{Re}}$	$47 < Re < 180$	Fey et al. (1998) [7]
$Sh = 0,2437 - \frac{0,8607}{\sqrt{Re}}$	$180 < Re < 230$	Fey et al. (1998) [7]
$Sh = 0,4291 - \frac{3,6735}{\sqrt{Re}}$	$230 < Re < 240$	Fey et al. (1998) [7]
<i>záleží na podmínkách</i>	$240 < Re < 360$	Fey et al. (1998) [7]
$Sh = 0,2257 - \frac{0,4402}{\sqrt{Re}}$	$360 < Re < 1300$	Fey et al. (1998) [7]
$Sh = 0,2040 + \frac{0,3364}{\sqrt{Re}}$	$1300 < Re < 5000$	Fey et al. (1998) [7]
$Sh = 0,1776 + \frac{2,2023}{\sqrt{Re}}$	$5000 < Re < 2 \cdot 10^5$	Fey et al. (1998) [7]
$Sh = \frac{1}{A + B/Re}$ ¹	$10 < Re < 3000$	Roushan a Wu (2005) [8]
$Sh = 0,2660 - \frac{1,0160}{\sqrt{Re}} \left(0,72 + 0,28 \frac{T_w}{T_\infty} \right)^{0,8887}$	$40 < Re < 170$	Vít et al. (2007)[5]

¹ koeficienty A a B jsou závislé na parametrech proudění a vírové řady, více v [8]



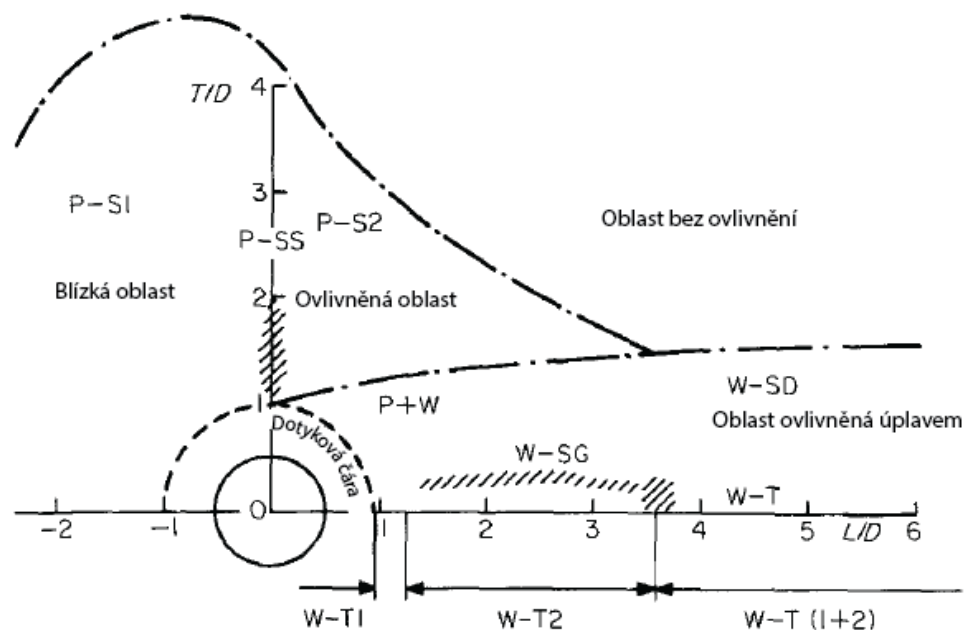
Obr. 1 Teoretická závislost Strouhalova čísla na Reynoldsově čísle tak, jak ji uvádějí někteří zmiňovaní autoři.

1.2.2 Proudění za dvěma válci ve stupňovitém uspořádání

Pokud je do blízkosti jednoho válce umístěno jiné těleso, resp. jiný válec, úplav změní své chování. Dochází zde k vzájemným interakcím smykových vrstev od obou válců, k interakcím vírů a úplavů a ke kombinovaným interakcím. Popisy dějů v úplavech shrnují ve svých review např. Zdravkovich [9], Choi et al. [10], Sumner [11] a Zhou a Alam [12].

Ke zkoumání úplavů, hledání jejich charakteristik a nalezení podstaty jevů se využívá mnoha přístupů a to jednak numerických a jednak experimentálních – metody, jež sledují rychlost a její fluktuaci v jednom bodě proudění (CTA, LDA), metody sledující celé proudové pole (PIV, vizualizace), měření silová a tlaková. Každý přístup má své výhody a nevýhody a vždy taktéž záleží na podmínkách a samotném nastavení provedeního experimentu. V závislosti na skutečnosti, který parametr či parametry jsou důkladně zkoumány a taktéž v závislosti na úrovni dostupné techniky (nemluvě o Reynoldsových číslech, velikost válců, poměru ucpání měřicího prostoru, apod.), různí autoři definují regiony v blízkém okolí válce ne zcela shodně.

Zdravkovich ve své práci [13] hovoří o čtyřech oblastech vycházejících z měření silových působení, jež se můžou v úplavu za válcem nalézat (obr. 2): Oblast P pravděpodobného vlivu, oblast W ovlivnění, oblast P+W kombinace oblastí předchozích a nakonec oblast, kde nedochází k žádnému nebo maximálně nepatrnému ovlivnění. Tyto oblasti dále rozděluje podle polohy druhého válce, kde P – S1 značí předřazení druhého válce prvním a P – S2 pozici druhého válce za válcem prvním, P – SS znamená umístění válců vedle sebe, W – T značí tandemovou pozici (číslování označuje skupiny vzdáleností válců, více [13]), W – SG je oblastí s výrazným prouděním mezi válci ve stupňovité konfiguraci a W – SD je regionem s odkloněným úplavem taktéž při stupňovité konfiguraci. Pruhované regiony označují bistabilní chování úplavů, kdy dochází k střídání režimů. Tyto oblasti jsou definovány pro interakci dvou válců o stejném průměru.

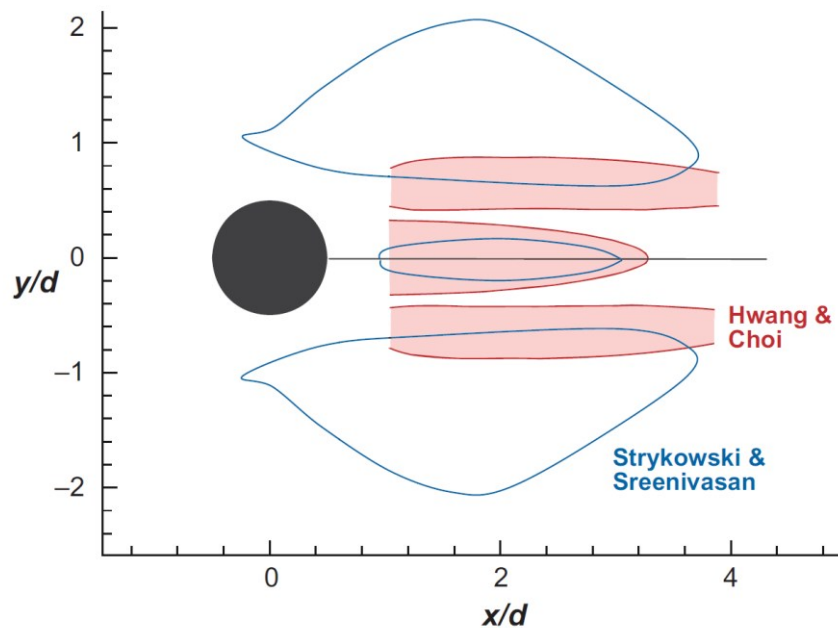


Obr. 2 Regiony ovlivnění dvou válců v proudění dle Zdravkoviče, převzato z [13]

Strykowski a Sreenivasan v [14] definují regiony na základě experimentálních měření (CTA, LDV, vizualizace) a numerických simulací pro nízká Reynoldsova čísla ($Re = 40 - 80$) a různé poměry průměrů válců ($D/d = 3-20$). Hwang and Choi ve své práci [15] se snaží najít oblasti v úplavu válce (numericky), jejichž ovlivněním by došlo ke zmírnění nestabilit v úplavu. V práci [10] pak autoři Choi et al. porovnávají tyto oblasti s regiony definovanými autory Strykowski a Sreenivasan [14], jak je vidět na obr. 2. Obecně lze říci, že se tyto autoři shodují v tom, že pokud je v regionu v ose válce po směru proudění v jeho těsné blízkosti umístěn menší válec, zvýší se tím stabilita proudění. Další regiony jsou shodné pouze částečně. Vzniká zde tedy otázka, jaký vliv na stabilitu má vyšší Reynoldsovo číslo a menší poměr dvou válců.

Pro studium úplavu a interakcí válců z hlediska pochopení principu výskytů jevů je účinným nástrojem vizualizace proudění. Rozsáhlá studie vizualizací a PIV měření byla provedena

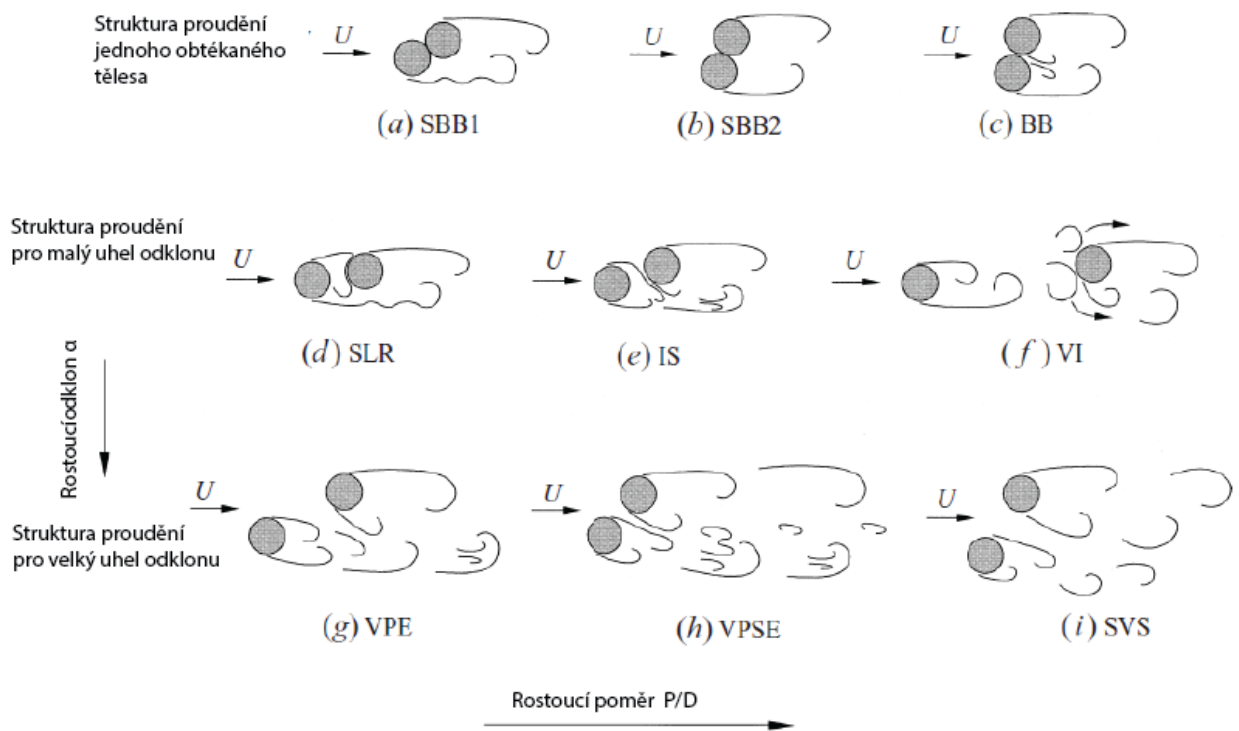
Sumnerem et al. [16]. Výzkum probíhal pro $D/d = 1$ a Reynoldsova čísla mezi 850 až 1900. Autoři definovali 9 charakteristických typů proudění okolo dvou válců, jež výrazně mění chování vírových struktur a smykových oblastí v úplavu. Tyto typy proudění v závislosti na poměru vzdáleností k velikosti prvního válce jsou ukázány na obr. 4.



Obr. 3 Porovnání oblastí definovaných autory Strykowski a Sreenivasan [14] (modré) a autory Hwang a Choi (červené) [15], převzato z [10]

Proudění typu SBB1 a SBB2 (Samostatné prizmatické těleso – angl. Single bluff body), kdy normovaná vzdálenost mezi středy válců R/D (R – vzdálenost středů válců) je 1 až 1,125, jsou charakteristické tím, že se proudové pole chová, jakoby zde bylo těleso jedno. Rozdíl mezi SBB1 a SBB2 je v úhlu natočení druhého válce, což v důsledku způsobuje, že v případě SBB1 (tedy natočení válce o 0° do 45°) se nestabilní smyková vrstva vyskytuje převážně u předního válce, kdežto při úhlu natočení v rozmezí 45° až 90° (SBB2) pokud se nestabilní smyková vrstva vyskytuje, tak u válců obou. Proudění BB (Base – bleed) je podobné jako předchozí typy s tím rozdílem, že mezi oběma válci je úzká štěrbin. V důsledku toho se zvětší úplav, ale stejně jako v předchozích dvou případech se v úplavu vyskytuje pouze jedna vírová řada. Pokud je vzájemný úhel natočení do 30° , lze pozorovat 3 typy proudění SLR (Připojení smykové vrstvy – angl. Shear layer reattachment), IS (Indukovaná separace – angl. Induced separation) a VI (Narážení vírů – angl. Vortex impingement). Při typu proudění SLR dochází k připojení smykové vrstvy z předního válce ke vnějšímu povrchu válce druhého, což způsobuje to, že proud neprochází mezerou mezi válci. Proudění IS je charakteristické tím, že smyková vrstva prvního válce se nepřipojí k válci druhému, ale stáčí se do mezery mezi válci a za prvním válcem vzniká malá oblast úplavu, která

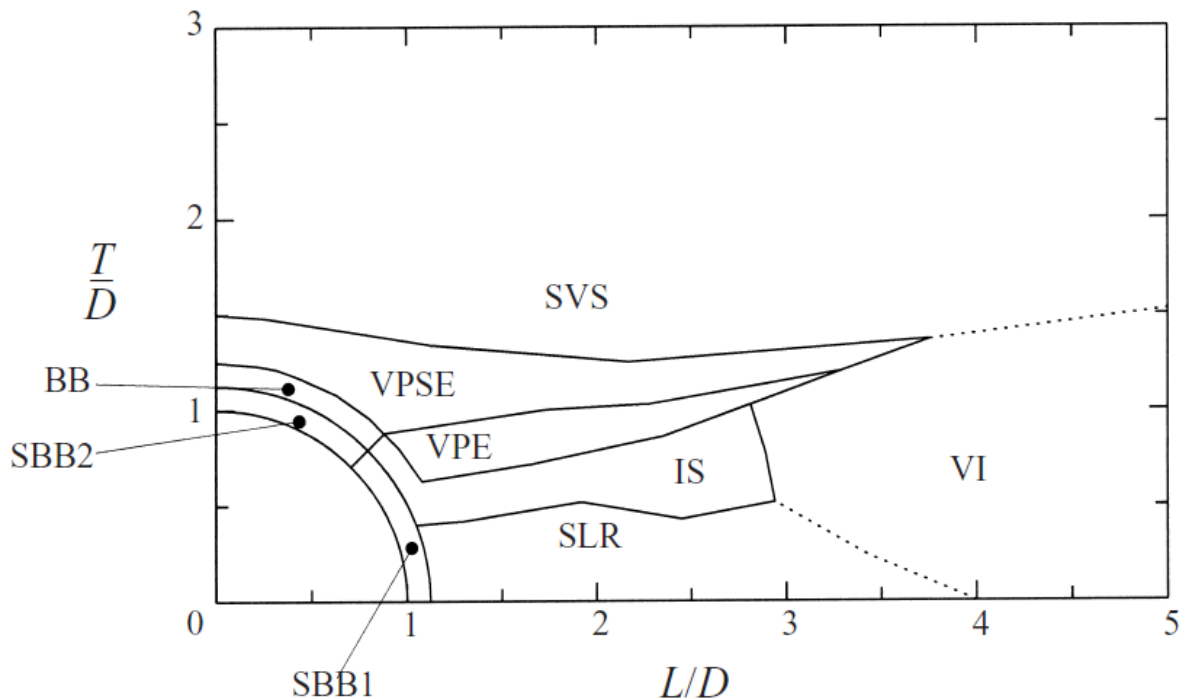
vede ke vzniku menších vírů s vyšší frekvencí odtrhávání než je tomu u samostatného válce. Při menších úhlech natočení a normované vzdálenosti válců R/D od 3 do 5 dochází k proudění typu VI. Za předním válcem se formuje vlastní úplav jako za válcem samostatným, který přímo interaguje s povrchem druhého válce a výrazně ovlivňuje úplav tvořící se za druhým válcem.



Obr. 4 Struktury proudění za dvěma válci o stejném průměru pro $Re = 850 - 1900$, a) SBB1 – Samostatné prizmatické těleso, typ 1, b) SBB2 – Samostatné prizmatické těleso, typ 2, c) BB – base bleed, d) SLR – Připojení smykové vrstvy, e) IS – Indukovaná separace, f) VI – Narážení vírů, g) VPE – Párování a zabalování vírů, h) VPSE – Párování, dělení a zabalování vírů, i) SVS – Synchronizované odtrhávání vírů, převzato z [16]

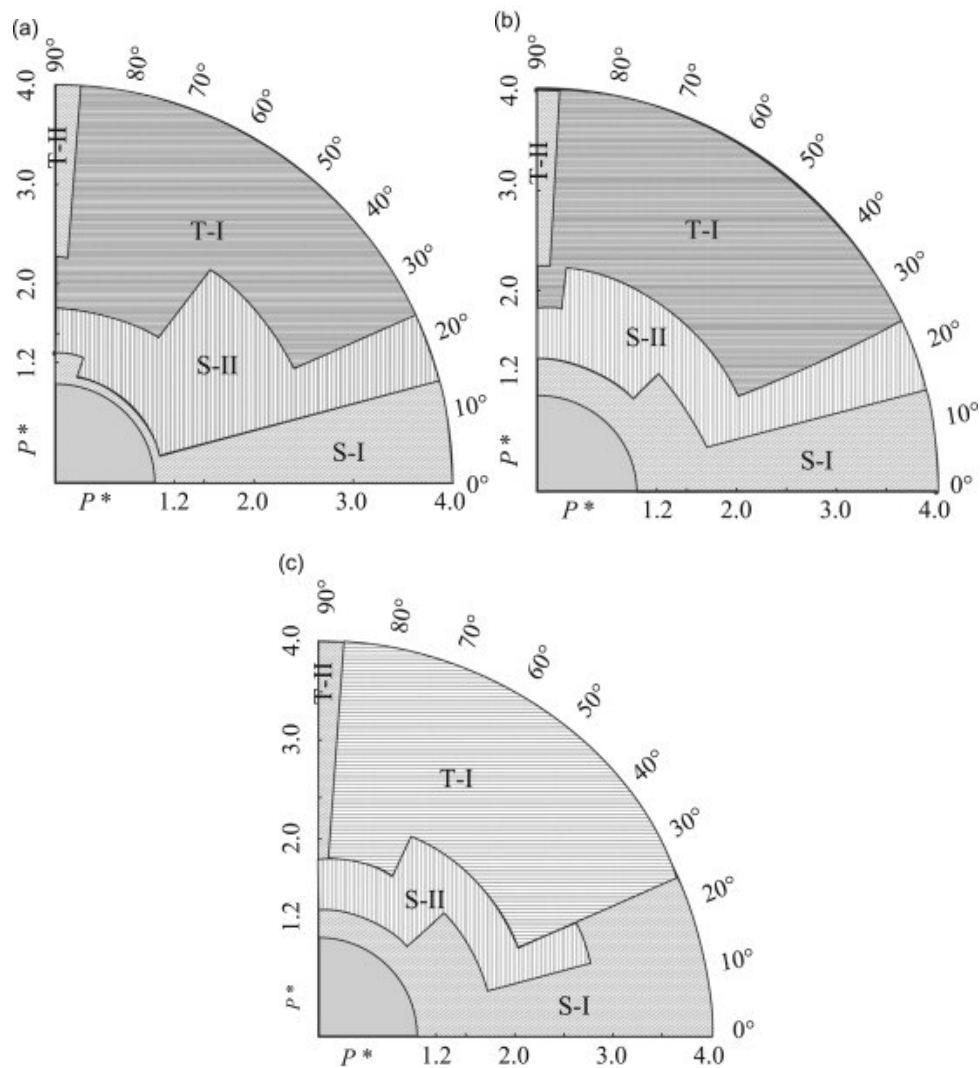
Poslední skupinu proudění tvoří typy VPE (Párování a zabalování vírů – angl. Vortex pairing and enveloping), VPSE (Párování, dělení a zabalování vírů – angl. Vortex pairing, splitting and enveloping) a SVS (Synchronizované odtrhávání vírů – angl. Synchronized vortex shedding). Pro tyto typy proudění je charakteristická přítomnost samostatných vírových stezek. V případě SVS se za válci formují samostatné vírové stezky, které se párují navzájem z obou stran mezery mezi válci. Pro VPE (P/D od 1,25 do 3,5, úhel od 20° do 45°) a VPSE (P/D od 1,25 do 4, úhel od 20° do 90°) je charakteristické párování a synchronizování vírů na vnitřní straně válců. Mezera mezi válci je užší než v případě SVS a tedy i víry se vytváří blíže sobě. Tyto páry vírů se následně spojují s Karmánovou vírovou stezkou formovanou vnější smykovou vrstvou od druhého válce. Rozdíl

mezi VPE a VPSE je v tom, že při typu VPSE dochází k rozdělení páru vírů formovaných podél mezery a vzniká v Karmánově vírové stezce třetí řada vírů. Na obr. 5 jsou ukázány hranice výše popsaných charakteristický typů proudění.



Obr. 5 Vyznačení hranic regionů jednotlivých typů proudových polí v úplavu za válcem, převzato z [16]

Výše uvedená měření probíhala pro nízká Reynoldsova čísla. Jak vypadají podobné konfigurace při vyšších Re , ukazuje ve své práci Hu a Zhou [17] ($Re = 7000$) a na ně navazující práce Zhou et al. [18] (Re od 1500 do $20 \cdot 10^5$) a Wong et al. [19] (Re od 1500 do $20 \cdot 10^5$). Hu a Zhou [17] na základě měření CTA a PIV pro $Re = 7000$ a vizualizace pro $Re = 300$ sestavili mapu pěti regionů založenou na změřených frekvencích a sledování změny struktury proudění vizualizací. Zhou et al. [18] ve své další práci tato měření zpřesnili zvýšením počtu sledovaných pozic a umístěním dvou žhavených sond do úplavů. Definují 4 typy proudění na základě závislosti $Sh - Re$ a schematicky zobrazuje změnu charakteru úplavu válců v závislosti na Reynoldsově čísle. Wong et al. [19] vychází z obou předchozích studií a zakresluje mapu regionů pro tři Reynoldsova čísla: 1500, 7000 a 20000. Tyto mapy jsou ukázány na obr. 6. Jak je patrné, autoři zaznamenali největší vliv Reynoldsova čísla na oblast zhruba do vzdálenosti normované rozteče $R/D = 2,5$ a úhly natočení $25^\circ - 50^\circ$. K této výrazné změně dochází mezi $Re = 1500$ a $Re = 7000$. Mezi $Re = 7000$ a 20000 tak výrazná změna nenastává, přesto je ale patrný posun některých regionů, jako například s rostoucím Reynoldsovým číslem se zmenšuje region S-II.



Obr. 6 Mapa regionů v oblasti za válcem, a) pro $Re = 1500$, b) pro $Re = 7000$, c) pro $Re = 20000$, převzato z [19]

Pokud jde o definici charakterů oblastí, dle výše zmíněných autorů, oblast S – I je oblastí, kde vnější smykové vrstvy od obou válců formují společnou vírovou stezku, a strukturu proudového pole určuje pět možných typů interakce smykových vrstev. Pokud jsou od sebe válce vzdáleny více jak $1,2 \times R/D$, může dojít ke třem možným interakcím. Obecně autoři charakterizují tuto oblast jako oblast, kde se válce chovají jako jedno prizmatické těleso a tomu i odpovídají zjištěné frekvence vírů v úplavu. V regionu S – II smyková vrstva od předního válce nepřiléhá k zadnímu válci, ale formuje se v samostatnou vírovou stezku, podobně je tomu i u válce zadního. Tyto vírové stezky spolu dále v úplavu interagují a vytvářejí jednu společnou stezku s frekvencí vírů nižší, než jaká je za předním válcem. Oblast T – I je charakteristická dvěma vírovými stezkami za každým z válců, kde přitom stezka za prvním válcem je užší a slabší než za válcem druhým. V regionu T – II, kdy válce jsou v podstatě v paralelním uspořádání, dochází k synchronizaci úplavů za každým z válců a frekvence vírů je totožná s frekvencí samostatného válce.

Většina studií zde uvedených, která vedla k zakreslení regionů a jejich charakteristice, vznikla na základě experimentálních měření a optických pozorování proudového pole válců o stejném průměru. Nicméně se tyto studie nezabývali tím, co se začne odehrávat v úplavu, když se změní poměr průměrů samotných válců a co je tou dominantní strukturou v daném proudění.

1.2.3 Aplikace metody Proper Orthogonal Decomposition (POD)

Jednou z možností řešení a analýzy charakteru proudových polí a jejich struktur, která se v posledních letech objevuje stále častěji, je metoda Proper Orthogonal Decomposition (POD) neboli vlastní ortogonální dekompozice. Tato metoda umožňuje analýzu velkého souboru dat tím, že zredukuje řád popisu děje. To vede ke snadnější identifikaci procesů, jež se ve sledovaném systému vyskytují. Pomocí metody POD lze zkoumat jevy jak fyzikálního tak matematického, biologického, environmentálního a dalšího charakteru, jež se vyznačují tím, že v nich lze rozpoznat dominantní vlastnosti a trendy procesů [20]. Metoda POD je napříč různými obory známa jako Karhunen-Loéva Dekompozice (Karhunen-Loéve Decomposition), analýza základních složek (principal components analysis), analýza singulárního systému (singular system analysis) a dekompozice singulární hodnoty (singular value decomposition). Mezi první, kdo uvedl do souvislosti metodu POD s turbulentním prouděním, byl John L. Lumley [21]. V následujících letech začali využívat metodu POD pro řešení problémů proudění další autoři, zejména v souvislosti s rozvojem nových experimentálních metod jako například PIV a s rozvojem CFD.

Použitím metody POD při řešení proudění v mechanice tekutin lze získat vlastní tvary proudění, které odpovídají strukturám s největším energetickým příspěvkem proudění. Tyto struktury nemusí nutně odpovídat koherentním strukturám proudění, ale spíše korespondují s ději, jež statisticky nejvíce přispívají k energii proudu [22]. Jako vstupní data, které jsou zpracovávány metodou POD, mohou být použity rychlostní pole, pole vířivosti [23], pole tlaků anebo i vizualizace proudění [24]. Analýzou proudového pole okolo dvou válců pomocí POD je možné získat jednak dominantní frekvence vyskytující se v úplavech válců, a jednak struktury, jež mají největší vliv na formování úplavu. Ze získaných výsledků lze zpětně rekonstruovat proudění ze zvoleného počtu módů pro zvolený časový okamžik.

Vzhledem k tomu, že tato metoda, jak již bylo uvedeno výše, zjednodušuje analýzu tak komplexních problémů, jako je proudění okolo jednoho nebo více válců, nabízí se hledat další možnosti jejího využití. Jak již bylo napsáno, nejčastěji se pomocí této metody analyzují rychlostní pole a pole vířivosti. Nicméně určitou možnost využití této metody skýtá i takováto analýza dat z vizualizací. Práci na toto téma není mnoho, např. práce Brevice a Garcii-Villalby [24] demonstruje, že pomocí POD lze z vizualizací proudového pole za jedním válcem získat užitečné informace o struktuře proudění a o mohutnosti jednotlivých struktur. Avšak momentálně v tuto chvíli nebyly

zjištěny žádné výzkumy, jež by se zabývaly uplatněním metody POD (ať z dat z PIV nebo z dat vizualizace) na řešení problémů proudění okolo dvou válců ve stupňovitém uspořádání.

Při použití vstupních dat z vizualizace pro POD metodu je třeba věnovat pozornost skutečnosti, že se zde nepracuje s fyzikální veličinou ale pouze s vizuální změnou. Proto se jeví jako velmi užitečné důkladněji prozkoumat, jakým způsobem lze takto analyzovaná data interpretovat.

1.3 Cíle práce

Po zhodnocení současné situace v problematice chování úplavu za dvěma válci ve stupňovitém uspořádání byly zvoleny jako hlavní cíle práce:

- 1) Stanovit vliv geometrického uspořádání válců a Reynoldsova čísla na stabilitu v úplavu, jeho topologii a dominantní frekvence.
- 2) Identifikovat základní struktury v proudění vzniklých interakcí smykových vrstev a struktur formovaných oběma válci a jejich vliv na výsledné dominantní frekvence v úplavu.
- 3) Vyšetřit experimentálně ovlivnění dominantní struktury v úplavu změnou polohy druhého válce.
- 4) Implementovat metodu analýzy proudění POD na identifikaci struktur proudění a zhodnotit použitelnost dosažitelných výsledků.

Ke splnění vytyčených cílů bylo nutné provést řadu dílčích kroků, mezi něž patří:

- a) Nezávislými experimentálními měřeními zjistit: Strouhalova čísla v několika místech v úplavu za oběma válci pro 7 konfigurací válců a řadu Reynoldsových čísel pomocí metody CTA, z PIV měření pro jedno Reynoldsovo číslo a 7 vzájemných poloh analyzovat úplav vyhodnocením rychlostních polí a vířivosti a z vizualizace získat popis struktur v úplavu pro 7 pozic válců, pro 3, resp. 4 poměry průměrů válců a pro 3, resp. 2 Reynoldsova čísla.
- b) Analyzovat proudová pole metodou POD z vizualizací, nalézt módy, frekvence, oblast vlivu úplavu válců, nalézt vztah jednotlivých módů k dějům probíhajících v úplavu.
- c) Porovnat pro jedno Reynoldsovo číslo výsledky POD z vizualizace a z PIV, identifikovat problémy spojené s analýzou vizualizace pomocí POD.

2 Experiment

Pro vyšetřování proudění v úplavu za válci byla provedena řada měření. Tato měření probíhala jednak přímo v laboratořích Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky Fakulty strojní ČVUT v Praze anebo ve spolupráci v laboratořích National Defense Academy v Japonsku.

V laboratořích Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky byla prováděna měření pomocí constant temperature anemometry (CTA) a pomocí time resolved particle image velocimetry (TR PIV). Měření TR PIV (dále v textu jen PIV) probíhala v cirkulačním aerodynamickém tunelu, měření metodou CTA probíhala jednak v stejném cirkulačním tunelu jako měření PIV a jednak v aerodynamickém tunelu Eiffelova typu (viz pododstavec 2.2.1).

V Japonsku v laboratořích National Defense Academy byly uskutečněny vizualizace proudění úplavu za válci. Tato měření byla provedena ve vodním tunelu (viz pododstavec 2.2.3).

2.1 Nastavení

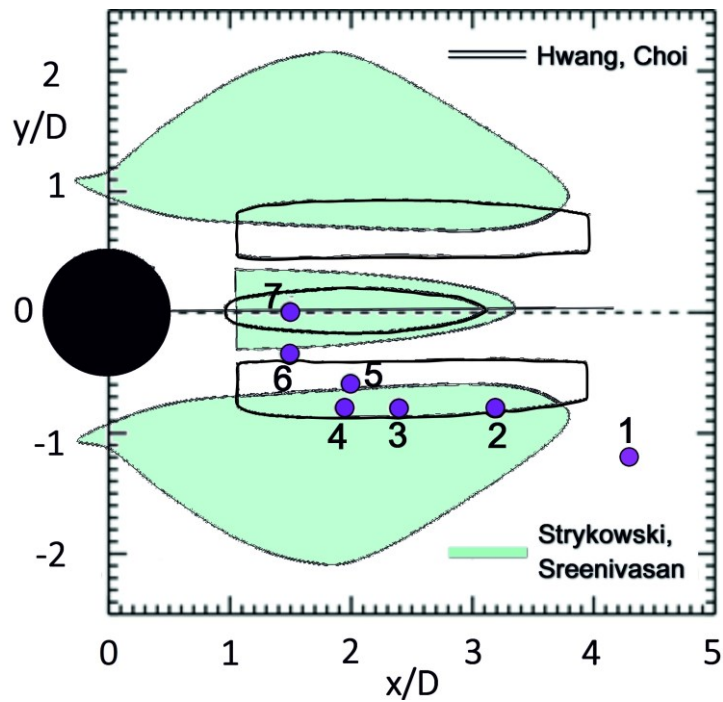
Pro vyšetření dějů odehrávajících se v úplavu dvou válců byla provedena měření pro řadu kombinací dvou válců o poměrech průměrů $D/d = 1, 1,67, 2,5$ a 5 , kde D vždy znamená průměr válce umístěného v předu (dále v textu uváděn jako první či přední) a d označuje průměr válce umístěného za prvním válcem ve směru proudění (dále v textu bude uváděn jako druhý či zadní). Pozice druhého válce v úplavu za válcem prvním byly zvoleny na základě výsledků výzkumů uvedenými v literatuře Strykowski a Sreenivasan v [14] a od Hwang and Choi [15]. Tito autoři ve svých pracích definují oblasti, jejichž ovlivněním pomocí dalšího válce v úplavu dojde k zmenšení nestabilit v úplavu při nízkých Reynoldsových číslech. Cílem bylo zjistit, zda a jak velký význam má tato oblast při vyšších Reynoldsových číslech. V tabulce 2 jsou uvedeny Pozice těchto válců, na obr. 7 jsou Pozice poloh porovnané s oblastmi uvedenými ve výše zmíněné literatuře a na obr. 8 je schematické znázornění těchto Pozic v souřadném systému.

Tabulka 2 Souřadnice Pozic válců

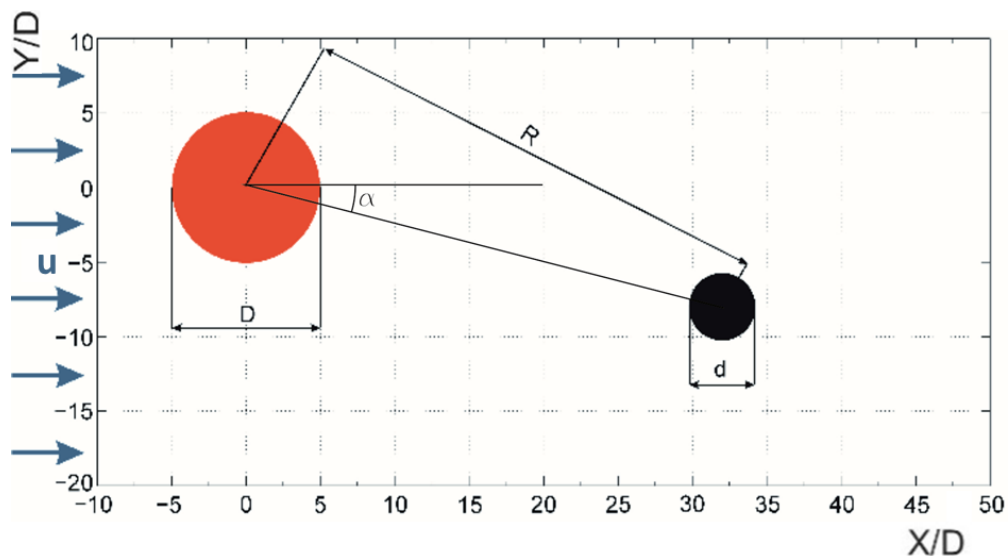
Číslo Pozice	x/D	y/D	R/D	α [°]
1	4,3	1,25	4,48	16
2	3,2	0,8	3,30	14
3	2,4	0,8	2,53	18
4	1,95	0,8	2,11	22
5	2	0,6	2,09	17
6	1,5	0,35	1,54	13
7	1,5	0	1,50	0

Pozice byly voleny v místech, které jednak zmiňují obě práce jako oblasti potlačující nestability (Pozice 2, 3, 4, 7), dále v místě, které definuje pouze jedna z prací (Pozice 5) a nakonec ve dvou místech, které se nacházejí mimo tyto definované oblasti (Pozice 1 a 6).

Rozsah Reynoldsových čísel vztažených k rozměrům prvního válce byl mezi 240 až 8700.



Obr. 7 Umístění středů druhého válce v proudovém poli za válcem prvním a zobrazení oblastí, jež potlačují nestability od autorů Hwang a Choi [15] a Strykowski a Sreenivasan [14]



Obr. 8. Souřadný systém a definice rozměrů

2.2 Experimentální metody

2.2.1 Metoda CTA

Metoda CTA byla zvolena pro přesné určení frekvencí v úplavu za válci a následnému vyhodnocení Strouhalových čísel.

Měření pomocí žhavené sondy probíhala na dvou stanovištích. Prvním stanovištěm byl cirkulační aerodynamický tunel Göttingenova typu s otevřeným měřicím prostorem s dýzou, jenž má na výstupu do měřicího prostoru osmiúhelníkový tvar pro potlačení tvorby vírů v rozích. Maximální šířka dýzy je 360 mm a výška 200 mm. Délka měřicího prostoru u tohoto tunelu je 395 mm. Intenzita turbulence se pohybuje kolem 1 %. Popis nastavení a uspořádání experimentů je uveden v [RV1]. Vzdálenost prvního válce od konce dýzy byla 140 mm. Všechny měřené válce měly šířku 300 mm.

Druhým stanovištěm byl aerodynamický tunel Eiffelova typu s uzavřeným měřicím prostorem. Tento tunel je speciálně uzpůsoben pro měření žhavenými sondami, na jeho vstupu jsou umístěny velmi jemná síta pro zachycení prachových částic. Intenzita turbulence se pohybuje kolem 1.1 %. Délka měřicího prostoru je 750 mm a jeho průřez je 300 mm x 200 mm. Pro měření fluktuací proudění byly využity dva měřicí systémy. Prvním byl systém MiniCTA 54T30 od firmy Dantec Dynamics s jednou sondou 55P16 HW a druhý byl vícekanálový systémem StreamWare Pro, opět od firmy Dantec Dynamics, se dvěma sondami 55P11 HW. Maximální zaplnění měřicího prostoru válci byla pro poměr válců $D/d = 1$, kdy oba válce zaplnily 10%, samostatný válec o průměru $D = 10$ mm blokoval 5%. Více je uvedeno v [RV2] a [RV3].

Měření pomocí žhavené sondy proběhla v několika etapách. V první etapě byly změřeny frekvence v úplavu za jedním válcem pro rozsah Reynoldsových čísel 147 – 8680. Pomocí těchto experimentů byl validován měřicí postup. Frekvence v úplavu byly měřeny v 15 bodech. V druhé etapě měření pomocí CTA byly již sledovány frekvence v úplavech za dvěma válci. Systémem MiniCTA bylo změřeno pro tři poměry průměrů válců $D/d = 1$ a 2,5 šestnáct režimů Reynoldsových čísel od 285 do 2500. Žhavená sonda byla v těchto případech polohována do 120 až 140 míst v úplavu válců v jedné rovině. Pomocí vícekanálového systému StreamWare Pro byla sledována změna fluktuace nejen v závislosti na čase, ale i v závislosti na poloze sondy v úplavu. Měření tímto systémem se uskutečnila pro jeden poměr průměru válců $D/d = 2,5$ a sadu patnácti Reynoldsových čísel od 240 do 8700. Sondy se nacházely vždy v jedné rovině kolmé na směr proudění ve vzdálenosti od 55 do 88 mm za prvním válcem. Rozteč mezi sondami byla 52 mm.

2.2.2 PIV měření

Měření PIV probíhalo v cirkulačním aerodynamickém tunelu s otevřeným měřicím prostorem, tedy ve stejném tunelu, v jakém se uskutečnila první měření CTA. Měřené válce byly taktéž identické s válci využitými pro měření žhaveným drátkem. Podrobnější popis a nastavení tohoto experimentu společně s parametry měřicího stanoviště jsou uvedeny v [RV3]. Byl měřen jeden režim pro $Re = 500$, $D/d = 2,5$ a sedm, dříve definovaných, Pozic dvou válců. Pro každou Pozici byla získána série 2500 snímků, která následně byla zpracována pomocí softwaru FlowManager od firmy Dantec Dynamics. Byla vyhodnocena rychlostní pole a pole vířivosti.

2.2.3 Vizualizace

Vizualizační měření byla provedena v malém cirkulačním vodním tunelu. Pro zviditelnění struktur a proudění okolo válců byla zvolena metoda vizualizace proudění pomocí barviva. Na povrch každého válce byl přiveden inkoust odlišné barvy. Dávkován byl rovnoměrně a tak, aby neporušil mezní vrstvu válce. Pomocí vizualizace bylo sledováno proudové pole pro poměry průměrů válců $D/d = 1, 1,67, 2,5$ a 5 , pro 7 dříve definovaných poloh a tři Reynoldsova čísla: 500 , 1200 a 2500 (Pro $D/d = 5$ byla vizualizace provedena pouze pro dvě Reynoldsova čísla: 1200 a 2500). Stejně jako v případě měření CTA a PIV měly válce šířku 300 mm. Maximální zaplnění měřicího prostoru válci byla pro poměr válců $D/d = 5$, kde samostatný první válec zaplnil 10% měřicího prostoru a v kombinaci s druhým, menším, válcem to bylo 12% . Detailnější popis, parametry měření a nastavení tohoto experimentálního zařízení jsou uvedeny v [RV4]. Pro každou zaznamenanou polohu a každé Reynoldsovo číslo byla získána obrazová data, která byla následně zpracována pomocí metody POD.

3 Metodika zpracování experimentálních dat

3.1 Zpracování výsledků z měření CTA

Z měření pomocí CTA byly získány obsáhlé soubory dat v různých formátech, jež musely být zpracovávány odlišnými postupy, které ale měly vždy stejný výstup: grafy spektrální výkonové hustoty pro každý měřený bod a soubor s hodnotou maximální frekvence a dopočteného Strouhalova čísla. Surová data z měření byla ukládána do textových souborů, v případě měření systémem MiniCTA, nebo do nich musela být exportována, v případě měření systémem StreamWare Pro.

Pro každý typ vstupních dat byl v programovém prostředí MATLAB naprogramovaný kód, který umožnil získat výše požadované výstupy. K získání závislostí spektrální výkonové hustoty (PSD) na frekvenci [RV3] byla využita funkce `peridogram` z knihovny MATLABu a pro ověření korektního nastavení byly výsledky získané z této funkce porovnány s výsledky získanými pomocí funkce `pwelch`, taktéž z knihovny MATLABu.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, v prvním měření konfigurací válců byla měřena rozsáhlá síť bodů. Body byly umístěny do vzdálenosti 14D (Pozice 7) až 17D (Pozice 1). Síť byla svázána s polohou druhého válce. Body byly zvoleny tak, aby pokryly významné oblasti z hlediska interakce válců. V regionu okolo prvního válce byly soustředěny měřicí body zejména do oblasti blízkého úplavu. Nad a pod druhým válcem byly body vždy umístěny do vzdálenosti 12 mm od jeho středu ve třech svislých řadách, každá po pěti bodech. Za oběma válci pak následovalo šest svislých řad měřených bodů po třinácti polohách.

Ze všech bodů byly získány výše zmíněné grafy průběhu spektrální výkonové hustoty. Z nich bylo možné určit významné frekvence vyskytující se v místě žhavené sondy. Jako dominantní frekvence byla stanovena ta frekvence, která ve většině z měřených bodů jasně dominovala svou nejvyšší hodnotou PSD. Měření zároveň ukázala, že se v okolí válců a v jejich úplavech vyskytují místa, kde nelze nalézt žádnou silnou frekvenci [RV5]. Tento poznatek byl důležitý pro další měření, protože vymezil lokality v proudění za válci, kde není možné získat jednoznačnou informaci o pravidelných fluktuacích rychlostí. V některých oblastech proudového pole se vyskytovaly dvě silné frekvence, přičemž byla místa, kde druhá frekvence převyšovala frekvenci určenou jako dominantní. Tyto frekvence hrají taktéž významnou roli v charakteristice proudění.

Druhé měření metodou CTA se zaměřilo na větší rozsah Reynoldsových čísel. V tomto případě byly dvě měřicí sondy polohovány do 10 bodů v úplavu válců, jež byly určeny jako významné na základě předchozích měření. Pozice bodů byly svázány se středem prvního válce. V horizontální

ose válce se nacházeli 4 body ve vzdálenosti od 4,1D do 7,5D. Dalších 6 bodů bylo v oblasti pod horizontální osou – v úplavu druhého válce ve vzdálenosti od 5D do 7,5D.

Ze všech výsledných frekvencí byly dopočítány Strouhalova čísla a jejich závislost na čísle Reynoldsovu byla vynesena do grafu pro každou Pozici a samostatný válec. Pokud se v proudovém poli okolo obou válců vyskytovala i druhá silná a lokálně dominantní frekvence (což bylo ve většině případů), byla taktéž vynesena do grafu ve formě Strouhalova čísla.

3.2 Metoda Proper Orthogonal Decomposition (Vlastní ortogonální dekompozice)

Jak již bylo řečeno v úvodu, metoda POD je statistická technika, kterou lze využít při analýze dějů, u nichž lze očekávat nějaké dominantní opakující se jevy [25]. K získání dominantních módů lze dospět dvěma způsoby: přímou metodou a metodou snímků (snapshots). [20]

Oba přístupy vycházejí ze stejného předpokladu, a to, že existuje okamžitá flukтуаční složka proudového pole, kterou můžeme vyjádřit jako:

$$u_N(x, t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) \varphi_i(x) , \quad (3)$$

kde $u(x, t)$ vyjadřuje flukтуаční složku, $a_i(t)$ reprezentují časově závislé POD koeficienty a $\varphi_i(x)$ představují vlastní nezávislé ortonormální funkce POD módů [RV6].

Metoda snímků, zformulovaná Sirovichem [26] usnadňuje řešení při hledání výše zmíněných koeficientů a funkcí, a proto je výhodné zvolit tuto metodu při analýze velkého počtu experimentálních dat. A vzhledem k tomu, že tato metoda je využita při zpracování dat předložených v této práci, dále bude v textu věnována pozornost pouze tomto přístupu.

Předtím, než je provedena samotná dekompozice, je nutné sestavit matici flukтуаčních složek $U = [u_1, u_2 \dots u_N]$ definovanou v prostoru a čase v M bodech a N snímcích. Flukтуаční složky mohou být jak skalární funkce, tak funkce vektorové. Pokud jsou například vstupními daty rychlostní pole, sestaví se matice U z obou složek rychlosti:

$$\mathbf{U} = [u(:,1), u(:,2), \dots u(:,N)]] = \begin{bmatrix} u(1,1) & u(1,2) & \dots & u(1,N) \\ u(2,1) & u(2,2) & \dots & u(2,N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u(M,1) & u(M,2) & \dots & u(M,N) \\ w(1,1) & w(1,2) & \dots & w(1,N) \\ w(2,1) & w(2,2) & \dots & w(2,N) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w(M,1) & w(M,2) & \dots & w(M,N) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Při hledání POD koeficientů a módů je v prvním kroku řešena pro N matic s flukтуаční složkou proudění U kovarianční matice G , pro kterou platí:

$$\mathbf{G} = \mathbf{U}^T \mathbf{U}. \quad (5)$$

Dalším krokem je nalezení vlastních hodnot a vlastních funkcí matice G ze vztahu:

$$\mathbf{G} \mathbf{v}^i = \lambda^i \mathbf{v}^i, \quad (6)$$

kde \mathbf{v}^i jsou vlastní vektory a λ^i jsou vlastní hodnoty. Z vlastních hodnot seřazených v sestupném pořadí ($\lambda^1 > \lambda^2 > \lambda^3 \dots > \lambda^N$), vlastních vektorů \mathbf{v}^i a matice fluktuací U lze dopočítat POD módy ze vztahu [27]

$$\varphi_i(\mathbf{x}) = \mathbf{U} \cdot \mathbf{v}^i \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda^i}}. \quad (7)$$

POD módy jsou seřazeny v sestupném pořadí dle vlastních vektorů, a proto první módy jsou co do významu dějů odehrávajících se ve sledované oblasti nejvýznamnější, je v nich obsažena většina energie fluktuací.

Časově závislé POD koeficienty, jejichž frekvenční spektrum odpovídá frekvencím dějů ve sledované oblasti, vyjadřuje vztah

$$a_i(t) = \mathbf{v}^i \sqrt{\lambda^i}. \quad (8)$$

Jak moc přispívají jednotlivé módy k celkovému charakteru proudění, lze dopočítat z vlastních čísel proudění. Ty reprezentují energii obsaženou v módech, jejíž poměrnou hodnotu je možné vyjádřit ze vztahu:

$$E_i = \frac{\lambda^i}{\sum_{i=1}^N \lambda^i}. \quad (9)$$

Zde je namístě poznamenat, že pokud se metoda POD využívá pro analýzu dat, jež nemají relevantní energetický význam, spíše než jako energii, resp. poměr energií, je třeba chápat význam vlastních hodnot jako mohutnost daného jevu v proudění. Proto bude v dalším textu hovořeno jako o mohutnosti v případě vstupních dat z vizualizací.

Ze získaných vlastních vektorů a vlastních čísel lze vykreslit jednotlivá pole módů, v nichž lze spatřit dominantní převládající vlastnosti proudu a jejich význam v závislosti na energii, resp. mohutnosti příslušného jevu. Jevy, které převážně utvářejí charakter proudění lze nalézt v prvních POD módech (počet „prvních“ módů se může lišit v závislosti na proudění a počtu

snímků). Z těchto „prvních“ módů pak lze sestavit rekonstruované snímky proudění ve zvoleném časovém okamžiku dle vztahu

$$u(x, t_n) = \sum_{i=1}^K a_i(t_n)\varphi_i(x), \quad (10)$$

kde t_n je zvolený časový okamžik a K je zvolený počet módů. Lze tak sledovat, jak které struktury proudění přispívají k celkovému proudovému poli.

3.3 Zpracování výsledků z měření vizualizace

Videosekvence se záznamem vizualizace proudění okolo dvou válců byly zpracovány dvěma způsoby.

Prvním bylo získání kvalitních snímků pro samotný popis dějů, tak jak to bude ukázáno v kapitole 4.1. Obrázky dobře dokumentující děje a jevy odehrávající se v úplavu byly po extrakci z videozáznamu upraveny tak, aby především mohly být dobře rozpoznatelné jednotlivé struktury. Původní videozáznamy jsou barevné s odlišnou značkovací barvou pro každý válec. Barvy usnadňují sledování formování vírů na videozáznamu, nicméně pro prezentaci a zvýraznění struktur je výhodnější převést barvy do odstínů šedé.

Druhý způsob zpracování byla analýza videosnímků metodou vlastní ortogonální dekompozice (POD). Tato analýza byla provedena pomocí vlastního kódu zapsaného v programovém prostředí MATLAB. Prvním krokem bylo převedení videosekvencí do odstínů šedé a zapsání jednotlivých snímků do matic. Následně se z videosekvence vybral takový úsek, který musel splňovat vizualizační kritéria. Prvním kritériem, jež bylo důležité pro eliminaci chyb vyhodnocení, bylo kritérium konstantního sycení. V dlouhém časovém úseku není možné v cirkulačním vodním tunelu zachovat stejnou intenzitu sycení a konstantní odstín pozadí. Proto byly pečlivě vybírány jen takové úseky, které toto kritérium splňovaly. Dalším důležitým požadavkem byla míra sycení. Pokud bylo vizualizačního barviva málo, nebyly jím zachyceny všechny pohyby a struktury úplavu válců. Pokud bylo ale barviva příliš, vlivem saturace proudění okolo válců nebylo taktéž možné rozeznat vývoj a změny struktur. Z tohoto důvodu nebyly vybrány úseky vždy o stejné délce, o délce úseku převážně rozhodovala kvalita dat a požadavek, aby byla zachycena kompletní perioda proudění. Počet snímků byl tedy obvykle v rozmezí 700 – 1300. Samozřejmě bylo ověření, jak velký vliv má rozdílný počet snímků na výsledné tvary proudění a zejména na jeho poměrnou mohutnost. Z testování vyplynulo, že vliv na vlastní tvary nebyl v podstatě patrný, u poměrné mohutnosti se jednalo u prvních módů o rozdíl do 1% z celkové mohutnosti. Tato diference nemusela být ale způsobena pouze počtem snímků, ale podstatné bylo, jestli také daný úsek zaznamenával kompletní periodu úplavu. Po zvolení úseku záznamu byly snímky upraveny mediánovým filtrem a mírně zesvětleny. Následně od všech

snímků byla odečtena jejich střední hodnota, aby první mód mohl odpovídat strukturám v úplavu válců a ne samotnému proudu. V dalším kroku následovaly výpočty korelační matice, vlastních vektorů a vlastních čísel (viz podkapitola 3.2). Z výpočtů byly získány POD koeficienty a , jednotlivé módy φ a poměrné mohutnosti. Následně byly vykresleny průběhy POD koeficientů pro prvních 7 módů. Z nich mohla být ověřena kvalita vstupních dat. V případě, kdy velikost amplitudy koeficientů a nebyla konstantní, ale výrazně se lišila, bylo třeba důkladně prověřit vybraný úsek záznamu, zda není v některém snímku snížena kvalita dle výše uvedených kritérií. Pokud daný úsek vyhovoval nárokům na snímky, byly opět pro prvních 10 módů z frekvenčního spektra POD koeficientů získány dominantní frekvence a dopočítána Strouhalova čísla. Z těchto POD módů byly dále vykresleny pole vlastních tvarů proudění. Všechny obrazové výstupy byly získány pouze pro prvních 7 módů. Důvodem bylo to, že v nižších módech se vyskytovaly struktury, které z hlediska celku měly velmi nízkou poměrnou mohutnost (pod 1%) a tudíž jejich role ve formování celkového úplavu neměla zas až tak veliký význam.

3.4 Zpracování výsledků z měření PIV

Z měření pomocí PIV byly získány pro definované polohy za válcem série snímků, které byly následně vyhodnoceny v programu FlowManager. Pro každou měřenou polohu bylo vyhodnocováno 2500 snímků. V programu FlowManager byly spočítány adaptivní korelace pro každý snímek a z nich vektorová statistika. Z adaptivních korelací byly v tomtéž programu dopočítány hodnoty vířivosti, kde je vířivost definována jako [28]

$$\omega = \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (11)$$

V programovém prostředí MATLAB byly takto získané dílčí výsledky dále zpracovávány. Z fluktuací rychlostí ve zvolených bodech byly dopočítány dominantní frekvence v úplavech válců a z vektorové statistiky rychlostí byla vykreslena rychlostní pole.

Pomocí metody POD, taktéž v programovém prostředí MATLAB, byly vyhodnoceny jednotlivé módy jednak z rychlostních polí a jednak z polí vířivosti. Postup analýzy metodou POD byl obdobný jako v případě vizualizace. V případě rychlostních polí se poměrná energie získala z obou vektorů rychlosti, stejně jako koeficient a a módy φ . Vlastní tvary byly ale vykresleny jednak ve vektorové formě z obou složek rychlostí a jednak byly získány vlastní tvary pro každou složku rychlosti zvlášť.

4 Výsledky měření

4.1 Vliv geometrického uspořádání válců a Reynoldsova čísla na struktury a mechanismy v úplavech válců

Z vizualizačních pozorování byly získány série snímků, na kterých lze pozorovat vývoj a interakce struktur v úplavu. Více jak minutové videozáznamy poskytují dobrý základ pro pochopení jevů odehrávajících se v úplavu [RV3]. Pro porovnání byly pořízeny i snímky samostatných válců (obr. 9). Popis chování úplavu samostatného válce je dobře popsána v literatuře, např. [3], [2] a jiné.

Pro pochopení dějů a proudění byly využity taktéž data získaná z měření PIV. Měření proběhla u samostatného válce pro několik velikostí Reynoldsova čísla, v [RV7] jsou prezentovány výsledky pro $Re = 147$ a na obr. 10 je ukázáno obecně známé rychlostní pole za jedním válcem o $D = 10$ mm tentokrát při $Re = 450$ pro porovnání s rychlostními poli zkoumaných konfigurací válců. Pro všech 7 poloh druhého válce byl proměřen režim Reynoldsova čísla 500. Kromě rychlostních polí byly vyhodnoceny z vektorové statistiky proudnice okolo válců a pole vířivosti [RV2]. Pole vířivosti a proudnice jsou ukázány na obr. P1 v Příloze 1.

D = 10 mm

Re = 500

Re = 1200

Re = 2500



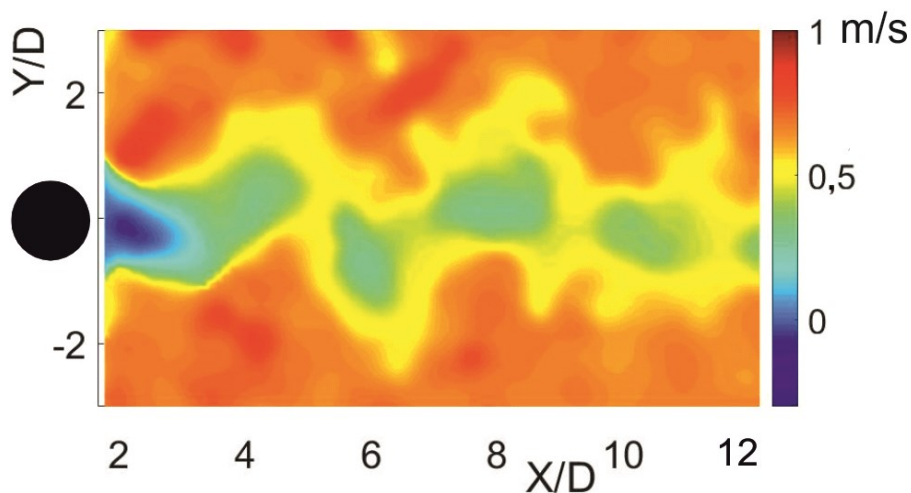
D = 20 mm

Re = 1200

Re = 2500



Obr. 9 Vizualizace úplavu za samostatnými válci, a) D = 10 mm, Re = 500, b) D = 10 mm, Re = 1200, c) D = 10 mm, Re = 2500, d) D = 20 mm, Re = 1200, e) D = 20 mm, Re = 2500



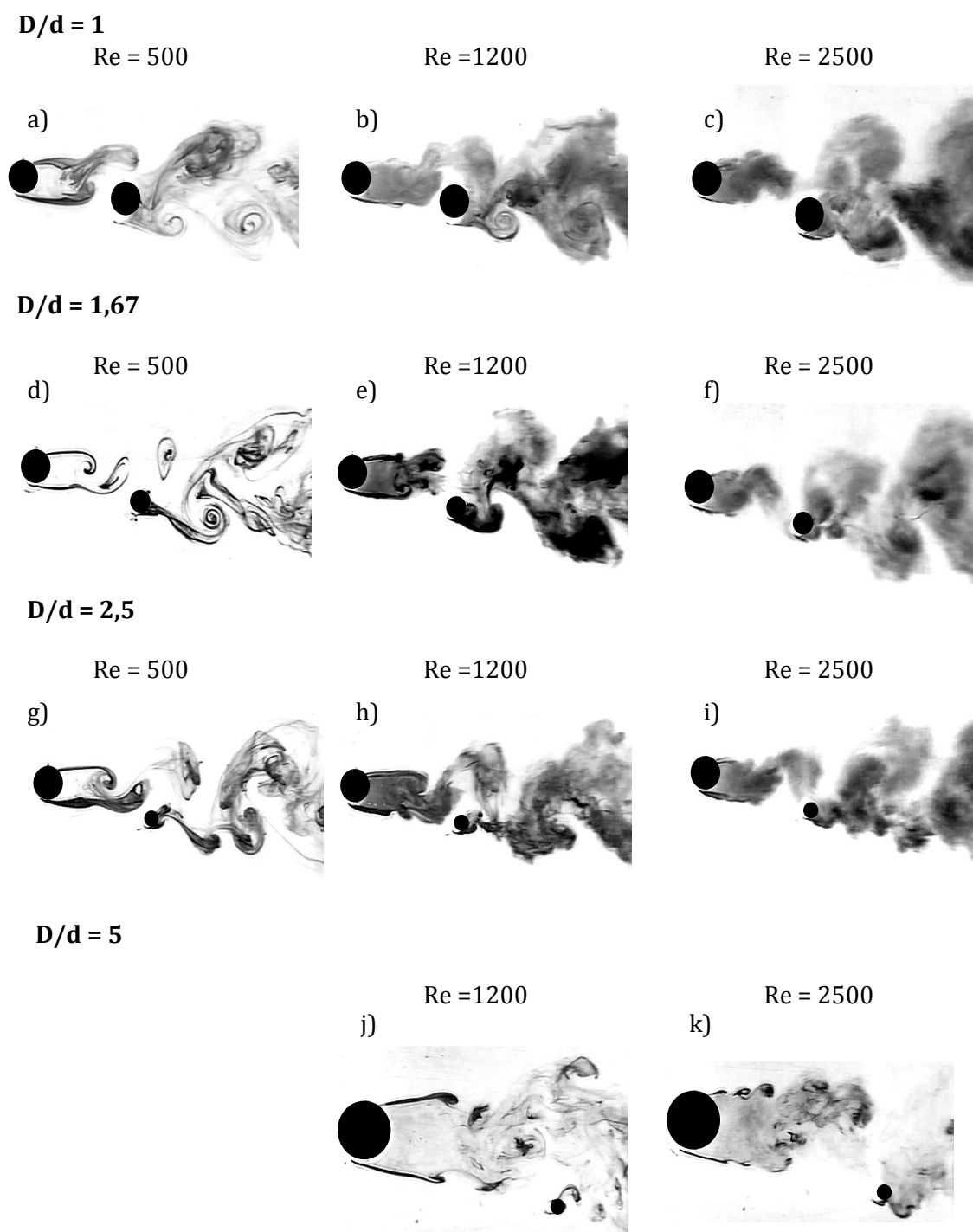
Obr. 10 Rychlostní pole za samostatným válcem o $D = 10$ mm pro $Re = 450$

Pozice 1 (obr. 11), jež má úhel natočení 16° a jejíž normovaná rozteč $R/D = 4,48$ se dle Sumnera et al. [16] nachází v oblasti VI (viz obr. 5). Tato oblast je charakteristická tím, že zde dochází k interakci úplavu, formujícího se ale ještě ne plně vyvinutého (jsou zde ale už rozeznatelné víry Karmánovy stezky), od předního válce s povrchem druhého válce a následné interakci s úplavem vzniklým za druhým válcem. Alam a Meyer v [29] popsali tuto oblast obdobným způsobem. Hu a Zhou v [17] ve své práci uvádějí výsledky pouze do $R/D = 4$. Všichni autoři se zaměřili pouze na poměr průměrů válců $D/d = 1$.

Na obr. 11 jsou ukázány snímky proudových polí pro poměry válců $D/d = 1, 1,67, 2,5$ a 5 a $Re = 500, 1200$ a 2500 . V případě, kdy $D/d = 1$, je možné pozorovat podobné výše zmíněné chování úplavu válců. Za prvním válcem se začíná formovat vírová stezka, jež ale záhy naráží (u nižšího Reynoldsova čísla se spíše jedná o obtečení povrchu druhého válce) na povrch druhého válce, kde se připojí k jeho vnitřní smykové vrstvě. Víry úplavů se následně synchronizují. Se vzrůstajícím Reynoldsovým číslem smykové vrstvy předního válce ztrácejí stabilitu v menší vzdálenosti od konce předního válce, takže s povrchem druhého válce interagují již částečně zformované víry.

Pro poměr válců $D/d = 1,67$ a $Re = 500$ lze nalézt náznak obdobného chování, nicméně zde je již patrný výrazný rozdíl v tom, že úplav za prvním válcem se zformuje a jeho interakce s povrchem válce druhého je zcela minimální. Vírová stezka za druhým válcem se také začíná formovat samostatně, ale záhy zde interaguje se s vírovou stezkou od válce prvního a dochází k zabalování vírů do sebe a tudíž se i úplavy synchronizují. Totéž platí v podstatě i pro vyšší Reynoldsova čísla s tím rozdílem, že už u $Re = 1200$ se začíná v některých okamžicích objevovat přímá interakce úplavu předního válce s povrchem druhého válce. Část úplavu se přimyká po vnější straně k mezní vrstvě druhého válce, část úplavu (z vnitřní strany válců) interaguje s úplavem druhého válce stejně, jako v případě nižšího Reynoldsova čísla. Tento jev se u $Re = 1200$ vyskytuje s podstatně

nižší frekvencí, než je dominantní frekvence v úplavu; u $Re = 2500$ sice výskyt tohoto jevu taktéž nedosahuje velikosti dominantní frekvence, nicméně již se této velikosti přibližuje (okolo $2/3 f$).



Obr. 11 Porovnání úplavu válců pro Pozici 1, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$

V případě poměru válců $D/d = 2,5$ při $Re = 500$ dochází k obdobné situaci, jako v případě $D/d = 1,67$ při stejném Re , tedy že úplav za předním válcem se formuje samostatně. Zde již

nedochází k zabalování vírů do sebe v místě, kde se střetnou úplavy obou válců, ale úplav od předního válce rozbíjí v místech za druhým válcem jeho úplav ve chvíli, kdy jsou jejich frekvence odtrhávání ve fázi. Pokud ve fázi nejsou, vírová stezka za zadním válcem se stačí zformovat a k jejím sloučení s vírovou stezkou předního válce dochází zhruba ve vzdálenosti $6D$, jak je to i vidět na obr. 11 g). U $Re = 1200$ už se úplav za zadním válcem ve většině případů nestíhá zformovat a je strháván úplavem předního válce, ačkoliv když se úplavy dostanou do opačné fáze, je za menším válcem pozorovatelná jeho vlastní vírová řada, maximálně ale do délky $9D$. Při režimu Reynoldsova čísla 2500 dochází, podobně jako v předchozích případech, k výraznému impaktu vírové stezky na povrch druhého válce. Nicméně ve většině případů se u tohoto poměru válců vírová stezka nerozdělí, aby se formovala z obou stran druhého válce, ale prochází a interaguje s vnitřní smykovou vrstvou druhého válce a strhává jeho úplav. I tak lze, jako u nižších Re , pozorovat stopy struktur vírové stezky druhého válce v úplavu prvního.

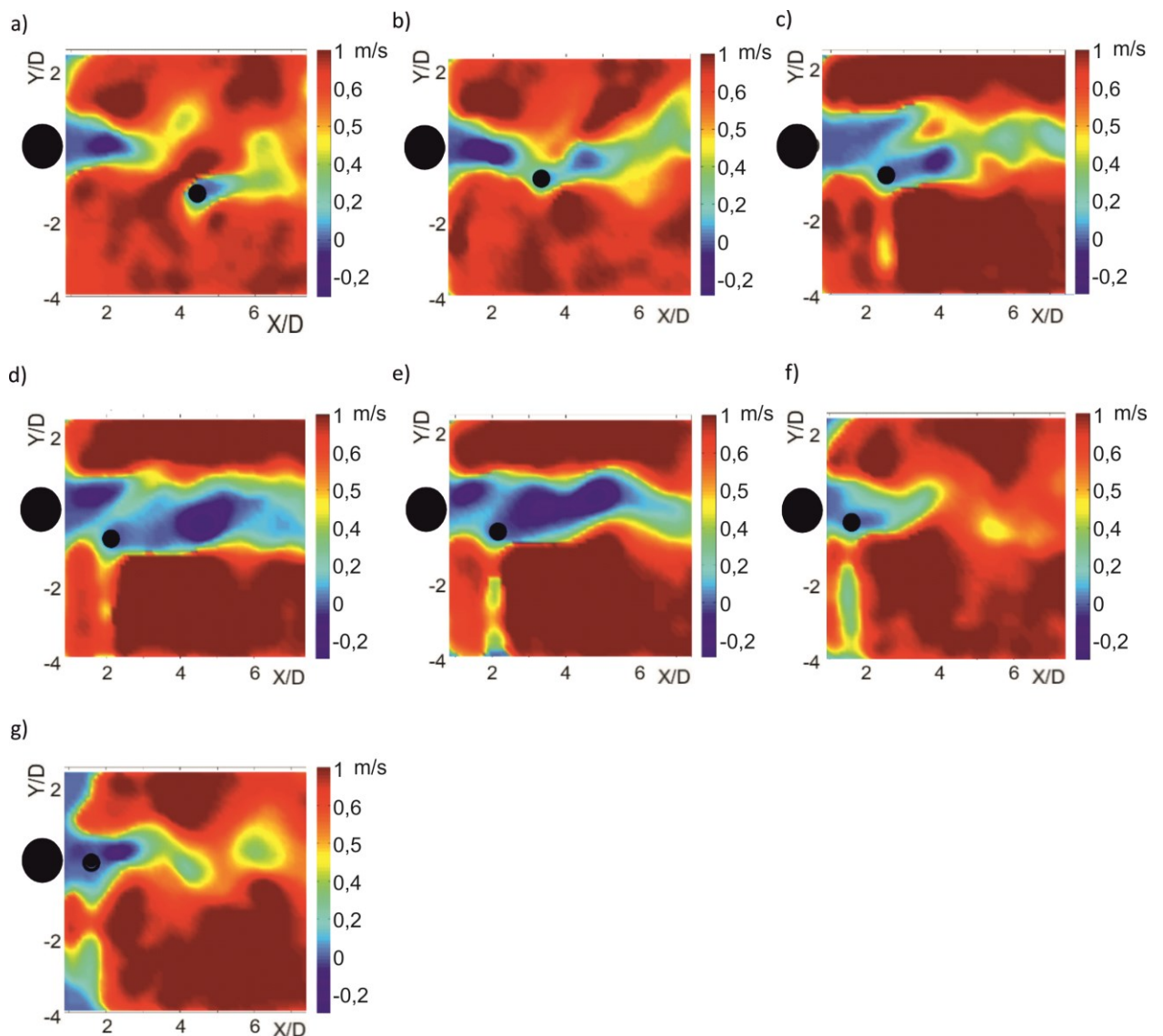
Pro zvolený poměr válců $D/d = 5$ je oproti předchozím případům složitější pozorovat celý blízký úplav kvůli velikosti snímané oblasti. I přesto je zde ale patrné, že pro tuto konfiguraci válců nemá druhý válec výraznější vliv na válec první, což je i v souladu s [14]. Se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem lze u předního válce pozorovat posunutí bodu separace ve směru proti proudění a ztráta stability obou smykových vrstev se posouvá směrem k povrchu válce. Menší válec vytváří svou vírovou stezku nezávisle na válci větším, avšak dále v úplavu dochází k jeho sloučení se stezkou prvního válce. Při vyšším Reynoldsově čísle pak dochází k pravidelnému impaktu povrchu válce úplavem prvního válce a i k rozbití formujících se struktur za menším válcem.

Z vykreslení pole z vektorové statistiky rychlostí pro $D/d = 2,5$ a $Re = 500$, které je pro tuto Pozici uvedeno na obr. 12a), je patrné, že za prvním válcem v jeho blízkém úplavu rychlost výrazně klesá. Což odpovídá situaci u samostatného válce (obr. 10). Změna ale nastává v oblasti před druhým válcem. Zde vlivem proudu mezi válci je narušena oblast snížené rychlosti v úplavu a nabíhající rychlost pro druhý válec jev podstatě totožná s nabíhající rychlostí na válec první.

Pozice 2 (obr. 13) s úhlem natočení 14° a $R/D = 3,3$ leží dle [16] taktéž v oblasti interakce úplavů a jejich vírových stezek stejně jako Pozice 1. Alam a Mayer [29] pro tuto Pozici definují region jako oblast interakce smykové vrstvy nebo úplavu s povrchem válce stejně jako Hu a Zhou [17].

Pro $D/d = 1$ je možné si všimnout, že při režimu $Re = 500$ formující se úplav přímo neinteraguje s povrchem, ale prouděním mezi válci je vnitřní smyková vrstva prvního válce protahována až za úroveň druhého válce. Tento jev pozorují Sumner et al. v [16] v jiné, sousední, oblasti, kterou nazývají Indukovaná separace (IS). Zde se za předním válcem formuje zmenšená oblast blízkého úplavu, která je sevřena právě prouděním mezerou nad zadním válcem. Pro režim

Re = 500 se protažená smyková vrstva od předního válce začíná formovat ve vírovou stezku až za druhým válcem ve směru proudění. Kvůli tomu, že tato smyková vrstva začíná vytvářet víry velmi blízko povrchu druhého válce, indukuje její vliv oddělení proudu z tohoto válce. Následně dochází k párování a synchronizaci vírů z úplavu předního válce a vnitřní smykové vrstvy zadního válce. Tento mechanismus je zřetelně patrný i u režimu Re = 1200, ačkoliv zde dochází k ztrátě stability smykových vrstev ještě před úrovní zadního válce, kde se zároveň začíná vytvářet vírová stezka, jež se vlivem proudění mezerou mezi válci stáčí okolo vnějšího povrchu druhého válce a opět indukuje oddělení proudění z jeho povrchu. Tatáž situace nastává i pro Re = 2500 jen s tím rozdílem, že se posouvají místa ztráty stability smykových vrstev prvního válce blíže k jeho povrchu, tedy proti směru proudění. Stejně tak začátek formování vírové stezky je posunuto ve směru proti proudu k prvním válci.



Obr. 12 Rychlostní pole pro jednotlivé Pozice pro Re = 500, a) Pozice 1, b) Pozice 2, c) Pozice 3, d) Pozice 4, e) Pozice 5, f) Pozice 6, g) Pozice 7

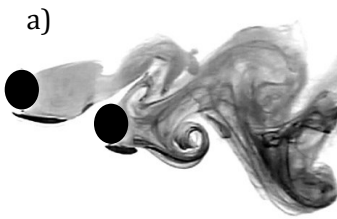
V případě $D/d = 1,67$ při nejnižším Reynoldsově čísle je blízký úplav prvního válce ohraničen taktéž mezerou, kterou proudí tekutina mezi válci. Vnitřní smyková vrstva předního válce se ohýbá téměř o 90° směrem k vnějšímu povrchu válce a setkává se zde s vnější smykovou vrstvou. Zde začíná formování vírů a vírové stezky. Stejně jako v případě $D/d = 1$, indukují smykové vrstvy prvního válce oddělení vnitřní smykové vrstvy druhého válce a výrazně se posouvá bod separace ve směru proti proudě. Dochází zde k zabalování obou smykových vrstev do sebe a ke vzniku společné vírové stezky. Od vnější smykové vrstvy zadního válce se taktéž formují víry ve stezku, ale vzhledem k rozdílnému průměru válců vytvořené víry jsou menší a tvoří se vyšší frekvencí. Ke sjednocení vírové stezky dochází až dále v úplavu, zhruba ve vzdálenosti $8D$. Při režimu $Re = 1200$ se blízký úplav za předním válcem zmenšuje a ještě před mezerou před válcem zadním dochází k začátku formování vírových struktur. Ty vlivem proudění mezerou jsou taktéž zbrzděny a odkloněny ve směru vnitřní strany zadního válce, ale už pod nižším úhlem, protože jsou zde strženy rozpadající se vnější smykovou vrstvou prvního válce. V tomto bodě dochází k formování vírů, jež, stejně jako u nižšího Reynoldsova čísla, odklánějí vnitřní smykovou vrstvu druhého válce. V tomto případě ale už nedochází k jednoznačnému zabalování vírů do sebe, ale vlivem rozdílných frekvencí odtrhávání vrstev dochází k narušení formace vírové stezky. Pro $Re = 1200$ a $Re = 2500$ bylo pozorováno drobné narušení periodických dějů, kdy na krátký okamžik a v nepravidelném intervalu vnější smyková vrstva prvního válce se nestočila před druhým válcem směrem k horizontální ose, ale na krátký okamžik obtekla druhý válec z vnější strany. V úplavu zadního válce dochází při těchto Reynoldsových číslech ke stejným jevům, jako u $Re = 500$ s tím rozdílem, že se zde už nestíhá zformovat vlastní vírová stezka. Víry předního válce zabalují do sebe smykové vrstvy válce prvního a vírová stezka se sjednocuje.

Pro poměr válců $D/d = 2,5$ při všech Reynoldsových číslech dochází v podstatě ke stejným jevům v úplavech obou válců, jako v případě $D/d = 1,67$. Jediným podstatnějším rozdílem je zmenšení vlivu proudění mezi válci mezerou, jež u menšího poměru válců mělo podstatný vliv na formování blízkého úplavu za předním válcem. Obtečení povrchu druhého válce z vnější strany vnější smykovou vrstvou prvního válce, tak jako v případě $D/d = 1,67$ bylo pozorováno pouze u $Re = 500$.

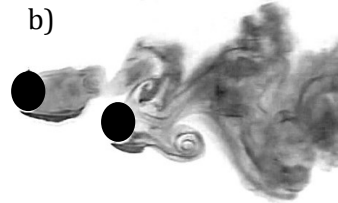
Pokud je poměr válců dále zvětšován, mizí tato formace, takže u poměru $D/d = 5$ již téměř není patrná. Rozpadající se vnitřní smyková vrstva velkého válce naráží na povrch malého válce a stáčí se kolem jeho vnitřního povrchu, aby rozrušila a pohltila jeho vznikající vírovou stezku. Bohužel oblast zachycená vizualizací neposkytuje dostatek informací o dalším formování vírové stezky, ale z pozorovaného chování lze usuzovat, že následně se vírové stezky válců rozvíjejí společně. Tomuto předpokladu nasvědčuje pozorované chování úplavů válců při vyšším Reynoldsově čísle, kde je tento jev zřetelně vidět.

D/d = 1

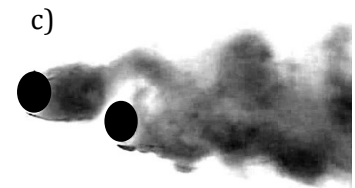
Re = 500



Re = 1200



Re = 2500



D/d = 1,67

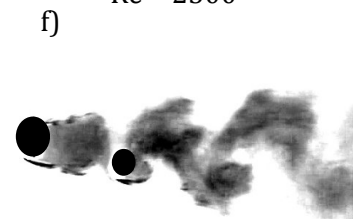
Re = 500



Re = 1200

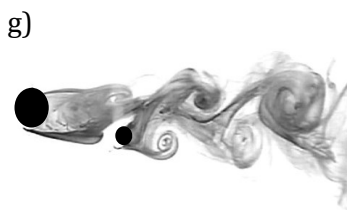


Re = 2500

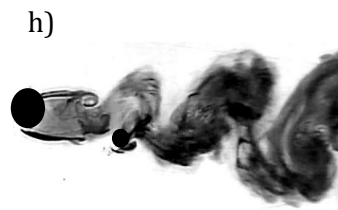


D/d = 2,5

Re = 500



Re = 1200

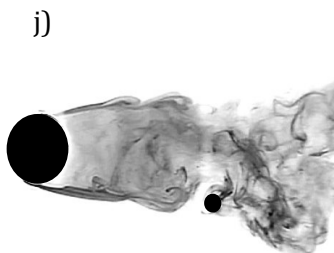


Re = 2500

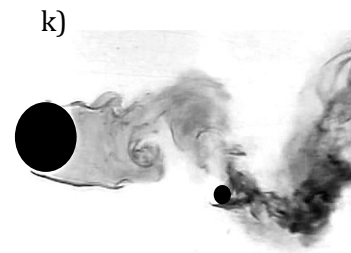


D/d = 5

Re = 1200



Re = 2500



Obr. 13 Porovnání úplavu válců pro Pozici 2, a) D/d = 1, Re = 500, b) D/d = 1, Re = 1200, c) D/d = 1, Re = 2500, d) D/d = 1,67, Re = 500, e) D/d = 1,67, Re = 1200, f) D/d = 1,67, Re = 2500, g) D/d = 2,5, Re = 500, h) D/d = 2,5, Re = 1200, i) D/d = 2,5, Re = 2500, j) D/d = 5, Re = 1200, k) D/d = 5, Re = 2500

Pokud jde o pole rychlostí pro D/d = 2,5 a Re = 500 (obr. 12b)) tak zde je vidět, že druhý válec se již nachází v oblasti, kam výrazně zasahuje úplav válce prvního. V oblasti před druhým válcem

je možné si povšimnout lehce narůstající rychlosti od proudu mezi válci, který je patrný i z obrázků vizualizací.

Pozice 3 (obr. 14) s úhlem natočení 18° a $R/D = 2,53$ leží dle [16] v oblasti IS – indukované separace. Charakter této oblasti, jak jej definují ostatní autoři, je popsán výše, u Pozice 2. Obě tedy tyto polohy spíše spadají do stejné oblasti, což je zřejmé i z obrázků vizualizací. Děje odehrávající se v úplavech jsou si velmi charakterově podobné.

Nicméně pro $D/d = 1$ v Pozici 3 dochází ke zkrácení blízkého úplavu prvního válce a tudíž i jeho vnější smyková vrstva není tak protažená (oproti Pozici 2 se zde tvoří pár konkrétně z vnitřních smykových vrstev předního a zadního válce), jako je tomu v případě Pozice 2. To vede k tomu, že k formování vírů od obou smykových vrstev zadního válce nedochází synchronizovaně a lze zde pozorovat zhruba do vzdálenosti $8D$ dvě vírové stezky. Pokud se střetnou víry z těchto dvou stezek, dochází k narušení jasných struktur úplavu a promíchání proudění. Obdobný mechanismus se vyskytuje ve všech třech sledovaných režimech Reynoldsových čísel.

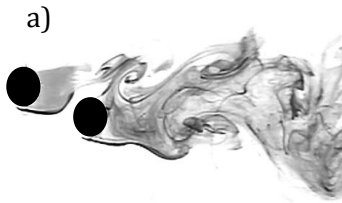
Proudění okolo válců o $D/d = 1,67$, stejně jako u $D/d = 1$, vykazuje obdobné mechanismy jako je tomu u Pozice 2 s tím, že k výraznějšímu rozdílu dochází po interakci obou smykových vrstev předního válce a vnitřní smykové vrstvy zadního válce. Protože velikost vírů těchto dvou válců je odlišná a je i odlišná frekvence odtrhávání, dochází v pravidelných intervalech k narušování formace vírové stezky od předního válce vnitřní smykovou vrstvou válce zadního. Za válcem zadním se kromě toho tvoří samostatná vírová stezka od vnější smykové vrstvy. Ta buď zaniká, resp. slučuje se s ostatními strukturami dříve, než se stačí její víry zformovat anebo se rozvine a ke spojení v jednu vírovou stezku za oběma válci dochází mezi $8D$ až $10D$ v závislosti na formování vírové stezky od ostatních smykových vrstev. Se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem dochází k intenzivnějšímu promíchávání smykových vrstev. Z videí a i z obr.14e) a f) je ale vidět, že za zadním válcem se stále tvoří samostatná vírová stezka od vnější smykové vrstvy, jenom se posouvá bod její interakce a spojení s vírovou stezkou vnitřní smykové vrstvy směrem proti proudu.

U poměru $D/d = 2,5$ je patrné, že dominantní vliv na celkovou formaci úplavu má už jednoznačně vírová stezka tvořící se z obou smykových vrstev předního válce. Stejně jako u Pozice 2, odděluje tato stezka mezní vrstvu zadního válce a zabaluje ji do sebe. Pouze v momentech, kdy oddělování struktur od obou válců je v opačné fázi, dochází k narušení synchronizace a vírová stezka se na krátký okamžik ztrácí. Pokud jde o stezku tvořící se od vnější smykové vrstvy menšího válce, dochází zde obdobné situaci jako u $D/d = 1,67$. Rozdíl je v menší intenzitě ovlivnění a narušení vírové stezky prvního válce smykovou vrstvou druhého válce. Chování úplavu se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem vykazuje stejné rysy jako je tomu v případě $D/d = 1,67$ s tím rozdílem, že se zde vyskytuje podobná anomálie jako v Pozici 2, kdy v nepravidelných intervalech

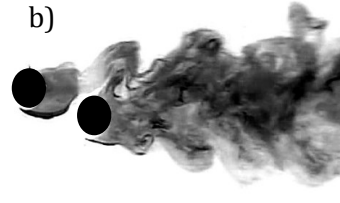
vnější smyková vrstva prvního válce se nestáčí, ale obtéká druhý válec z jeho vnější strany. Toto lze pozorovat pro $Re = 1200$ a $Re = 2500$.

$D/d = 1$

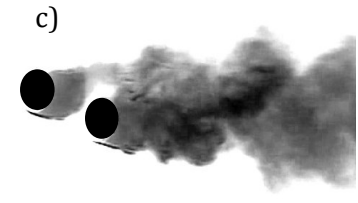
$Re = 500$



$Re = 1200$



$Re = 2500$

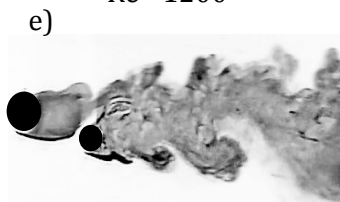


$D/d = 1,67$

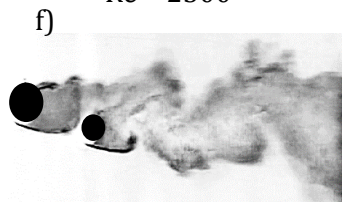
$Re = 500$



$Re = 1200$



$Re = 2500$



$D/d = 2,5$

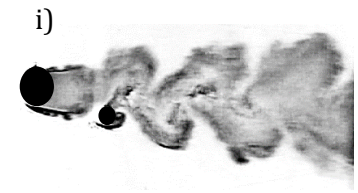
$Re = 500$



$Re = 1200$

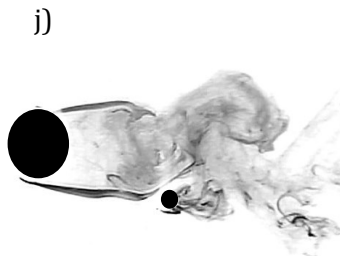


$Re = 2500$

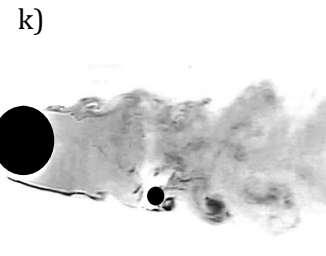


$D/d = 5$

$Re = 1200$



$Re = 2500$



Obr. 14 Porovnání úplavu válců pro Pozici 3, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$

Pro poměr $D/d = 5$ platí stejné mechanismy jako v předchozích případech, nicméně ovlivnění formování struktur velkého válce malým válcem je značně sníženo. I zde ale lze pozorovat ohnutí vnitřní smykové vrstvy předního válce prouděním mezi válci. Vírová stezka za menším válcem se vytváří s vyšší frekvencí, proto lze spatřit zformování dvou vírů v řadě, než dojde k interakci s vírovou řadou válce prvního. S vyšším Reynoldsovým číslem se i zvyšuje vliv menšího válce a dochází působením jeho vírové řady k intenzivnějšímu rozrušování formujících se struktur ze smykových vrstev většího válce. U $Re = 2500$ lze pozorovat obdobné chování vnější smykové vrstvy prvního válce jako u $D/d = 2,5$.

Z porovnání pole rychlostí Pozice 3 (obr. 12c)) pro $D/d = 2,5$ a $Re = 500$ s předešlými polohami je jasně patrné, že přítomnost menšího válce v úplavu má výrazný dopad na rychlostní profil v oblasti za prvním válcem. Značně (až na $2D$) se rozšířila oblast, kde je výrazně snížena rychlost. Nicméně je možné si povšimnout rysujících se proudů mezi válci podobně, jako tomu bylo u Pozice 2, ačkoliv v tomto případě je střední rychlost tohoto proudů nižší.

Pozice 4 (obr. 15) s úhlem natočení 22° a $R/D = 2,11$ spadá dle [16] do oblasti VPE - párování a zabalování vírů. V této oblasti, stejně jako v oblasti IS, hraje důležitou roli proudění mezerou mezi válci. Vzhledem k tomu, že válce jsou blíže sobě, je pozorovatelné u všech vzájemných poměrů výrazné stlačení blízkého úplavu za předním válcem. Zároveň je tato oblast charakteristická dle autorů [16] párováním a těsným zabalováním vírů do sebe.

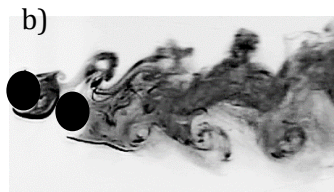
Pro poměr průměru válců $D/d = 1$ lze ze záznamů vizualizací vidět, že velmi zmenšená oblast blízkého úplavu za předním válcem se stáčí, stejně jako u Pozice 3, kolem vnitřního povrchu zadního válce. Stále je zde patrná výrazná mezera způsobená prouděním mezi válci, ale oproti předchozí Pozici se její šířka viditelně zmenšila. Opět se zde formující se vírová stezka za prvním válcem vychyluje a odděluje vnitřní smykovou vrstvu druhého válce a ve shodě s tím, co uvádí literatura, dochází k synchronizaci těchto vytvořených vírů, jejich párování a zabalování do sebe. Vnější smyková vrstva druhého válce vytváří stezku se stejnou frekvencí vírů, které mají opačný směr rotace než víry ze spojené vnitřní smykové vrstvy a stezky prvního válce. Při vyšších Reynoldsových číslech dochází k častější ztrátě stability struktur vznikajících z vnitřní smykové vrstvy druhého válce, což vede až k tomu, co je ukázáno na obr. 15c). Vlivem ztráty stability vnější smykové vrstvy prvního válce se naruší formování struktur od vnitřní smykové vrstvy druhého válce. Následně se obě vrstvy promíchávají a zhruba ve vzdálenosti $8D$ se připojují ke stezce vzniklé z vnější smykové vrstvy druhého válce. Se zvětšujícím se poměrem D/d si lze všimnout, že mezera vzniklá prouděním mezi válci má přibližně stejnou šířku jako v Pozici 3. Blízký úplav předního válce není tak stlačen.

$D/d = 1$

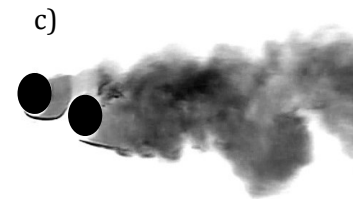
Re = 500



Re = 1200



Re = 2500

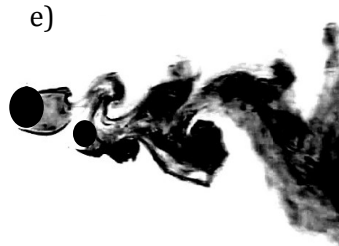


$D/d = 1,67$

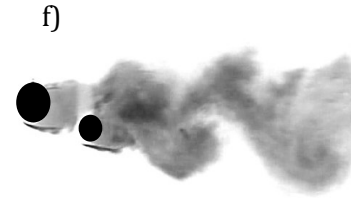
Re = 500



Re = 1200

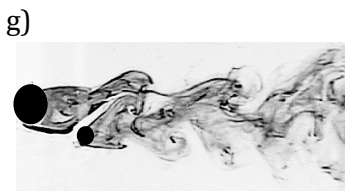


Re = 2500

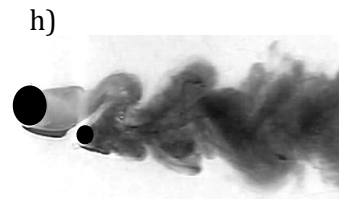


$D/d = 2,5$

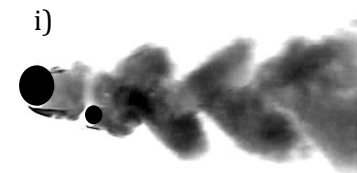
Re = 500



Re = 1200



Re = 2500

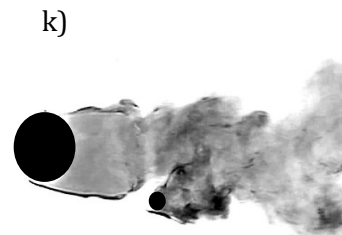


$D/d = 5$

Re = 1200



Re = 2500



Obr. 15 Porovnání úplavu válců pro Pozici 4, a) $D/d = 1$, Re = 500, b) $D/d = 1$, Re = 1200, c) $D/d = 1$, Re = 2500, d) $D/d = 1,67$, Re = 500, e) $D/d = 1,67$, Re = 1200, f) $D/d = 1,67$, Re = 2500, g) $D/d = 2,5$, Re = 500, h) $D/d = 2,5$, Re = 1200, i) $D/d = 2,5$, Re = 2500, j) $D/d = 5$, Re = 1200, k) $D/d = 5$, Re = 2500

U poměru $D/d = 1,67$ je také zřetelně vidět párování vírů úplavu předního válce a vnitřní smykové vrstvy zadního válce, ačkoliv velikost vírů druhého válce je zmenšena. Tímto mechanismem se do systému vnáší prvek, jehož působením může dojít až ke ztrátě stability. To

vede k obdobné situaci, jaká byla popsána výše u poměru $D/d = 1$. Tak jako v předchozích polohách je z obrázků zřejmé, že se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem se místo spojení obou vírových stezek posouvá ve směru proti proudu blíže k válcům.

U $D/d = 2,5$ u nejnižšího Reynoldsova čísla je patrný stejný mechanismus jako u $D/d = 1,67$ s tím rozdílem, že z vnější smykové vrstvy menšího válce vznikají podstatně menší víry, než je tomu u vnitřní smykové vrstvy spojené s úplavem většího válce. Tato nesymetrie vede k tomu, co je zřetelněji patrné u vyšších Reynoldsových čísel pro stejné D/d , a to že sjednocením vírových stezek dochází ke zmenšení struktur, resp. vírů oproti například samostatnému válci (obr. 9c) či menším poměrům D/d .

Pokud je $D/d = 5$, úplav tvořený za menším válcem je částečně odkláněn ve směru středové osy velkého válce, kde se spojuje s jeho úplavem. Víry tvořící se z vnější smykové vrstvy zadního válce tak nejsou zřetelně patrné, protože jsou zhruba ve vzdálenosti $3D$ až $4D$ spojeny se strukturami úplavu válce předního. U vyššího Reynoldsova čísla se úplavy spojují ve větší vzdálenosti od válců a vírová stezka za menším válcem zaniká ve vzdálenosti $4D$ až $5D$. Po detailnější analýze videozáznamu (z jednoho snímku to není tak zcela zřejmé) lze říci, že k tomu dochází patrně z důvodu rozpadu smykových vrstev v místech před menším válcem, což vede k začátku formování vírů úplavu, které je ale výrazně narušováno oddělující se vnitřní smykovou vrstvou druhého válce. V místech interakce těchto dvou dějů tedy nedochází k párování a zabalování, ale spíše k promíchání.

Na obrázku rychlostního pole pro $D/d = 2,5$ a $Re = 500$ (obr. 12d)) lze spatřit, že vliv druhého válce na střední rychlost v úplavu se projeví výrazným snížením této rychlosti. Je zde také patrné proudění mezerou mezi stlačeným blízkým úplavem prvního válce a povrchem válce druhého.

Pozice 5 (obr. 16) s úhlem natočení 17° a poměru $R/D = 2,09$ spadá dle [16] do regionu indukované separace - IS, jako Pozice 3, a proto zde budou popsány odlišnosti v chování proudění.

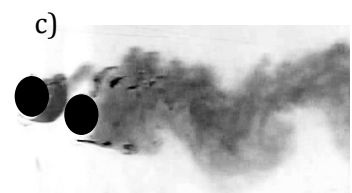
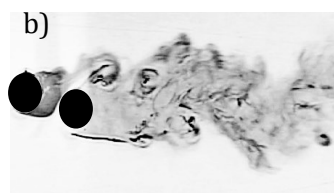
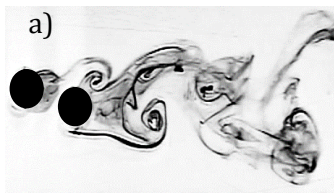
Pro poměr průměrů válců $D/d = 1$ hlavní rozdíl oproti Pozici 3 spočívá ve stlačení oblasti blízkého úplavu za předním válcem. Taktéž zde dochází k párování a zabalování vírů do sebe, ale v tomto případě se páruje vnitřní smyková vrstva zadního válce s vnější smykovou vrstvou předního válce. Dalším, ale méně zřetelným (nicméně podstatným) rozdílem je posunutí bodu separace vnitřní smykové vrstvy ve směru proti proudu a její odklon od povrchu válce až o 90° . K tvorbě vírů od vnější smykové vrstvy zadního válce a párů vírů z vnitřní smykové vrstvy nedochází synchronizovaně, což se nejvíce projeví při $Re = 1200$. Při tomto režimu je blízký úplav rozbíjen víry z různých smykových vrstev a k jeho sjednocení dochází až ve vzdálenosti zhruba $7D$. Při $Re = 2500$ tento jev již tak výrazně nezasahuje do úplavu a ke sjednocení dochází zhruba ve vzdálenosti $4D$.

D/d = 1

Re = 500

Re = 1200

Re = 2500

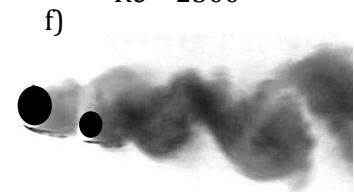


D/d = 1,67

Re = 500

Re = 1200

Re = 2500

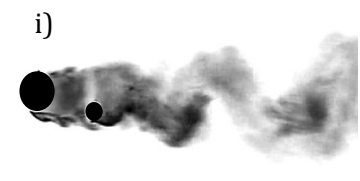
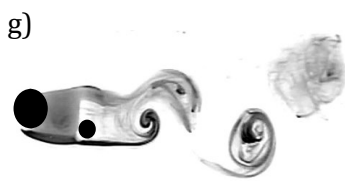


D/d = 2,5

Re = 500

Re = 1200

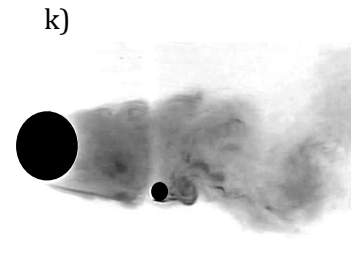
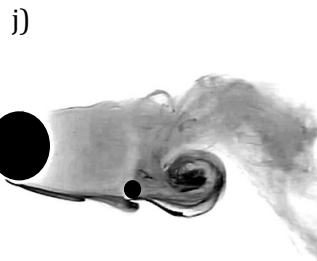
Re = 2500



D/d = 5

Re = 1200

Re = 2500



Obr. 16 Porovnání úplavu válců pro Pozici 5, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$

Pro poměr válců $D/d = 1,67$ nastává již podstatnější změna v chování úplavu vůči Pozici 3. Blízký úplav za prvním válcem je výrazně stlačen prouděním mezerou mezi válci. Díky tomu při režimu $Re = 500$ dochází k zajímavému jevu, kdy vnitřní smyková vrstva předního válce se před zadním válcem stáčí téměř o 90° a lehce nad úroveň horizontální osy prvního válce se spojuje s jeho vnější smykovou vrstvou. Bod separace vnitřní smykové vrstvy zadního válce je značně posunut ve směru proti proudění do čelní oblasti válce. Vlivem proudění mezerou je tato smyková vrstva odkláněna zhruba pod úhlem 75° a na úrovni úplavu prvního válce se s ním spojuje a vyváří jednu vírovou stezku. Zhruba ve vzdálenosti $5D$ se posléze synchronizuje s vírovou stezkou od vnější smykové vrstvy zadního válce. Podobné mechanismy formování úplavu je možné sledovat i u vyšších Reynoldsových čísel.

Při $D/d = 2,5$ a režimu $Re = 500$ je vliv menšího válce na úplav většího markantnější. Zde dochází k velmi zajímavé situaci, kdy vnitřní smyková vrstva prvního válce koliduje s povrchem druhého válce a rozdělí se na dvě vlákna. Jedno z vláken se stáčí nejdříve o 90° ve směru horizontální osy velkého válce a druhé obtéká menší válec z vnější strany a připojuje se k jeho vnější smykové vrstvě. Stočené vlákno nepokračuje dál k napojení na vnější smykovou vrstvu, jako tomu bylo v případě $D/d = 1,67$, ale cirkuluje v regionu blízkého úplavu. Do tohoto regionu je i částečně vtažena vnitřní smyková vrstva menšího válce, druhá část této vrstvy se odklání až o 90° kolmo vzhůru, kde se připojuje k vnější smykové vrstvě předního válce zhruba na úrovni $0,5D$. V důsledku těchto dějů je zformování celého úplavu posunuto ve směru proudění oproti Pozici 3 o $1D$ a není zde patrná samostatná vírová stezka od zadního válce. Při vyšších Reynoldsových číslech nabývá podstatnějšího významu rozpad obou smykových vrstev prvního válce. V jeho blízkém úplavu je v důsledku toho zmenšena oblast cirkulace a tvorba struktur celého úplavu se posouvá ve směru proti proudu. V případě $D/d = 5$ lze spatřit obdobný mechanismus jako u $D/d = 2,5$.

Z pole rychlostí pro $D/d = 2,5$ a $Re = 500$ (obr. 12e)) je patrné zmenšení mohutnosti úplavu a je zde patrný náznak charakteru proudového pole samostatného válce ve vzdálenosti zhruba $5D$ od prvního válce. Taktéž je zde stále zřetelné proudění mezerou mezi válci².

Pozice 6 (obr. 17) s úhlem natočení 13° a poměru $R/D = 1,54$ spadá dle [16] do oblasti připojení smykové vrstvy – SLR. Tato oblast je charakteristická připojením smykové vrstvy předního válce ke smykové vrstvě zadního válce. V tomto regionu se chování úplavu za oběma

² V oblasti přímo pod druhým válcem jsou vidět místa s výrazně sníženou rychlostí. To není způsobeno prouděním, ale pouze důsledek mírného zastínění laserového osvětlení.

válci blíží chování úplavu samostatného válce. To odpovídá i získaným snímkům z vizualizací pro čtyři poměry průměrů válců.

$D/d = 1$

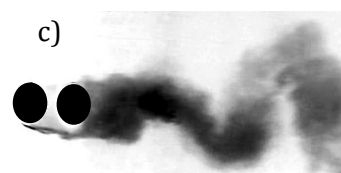
Re = 500



Re = 1200



Re = 2500



$D/d = 1,67$

Re = 500



Re = 1200



Re = 2500



$D/d = 2,5$

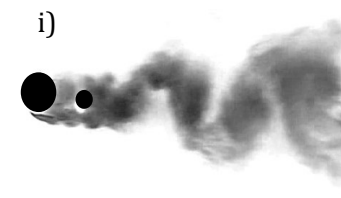
Re = 500



Re = 1200

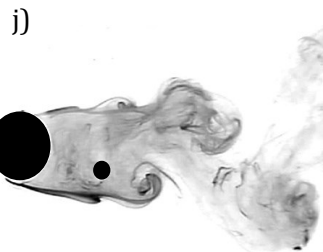


Re = 2500

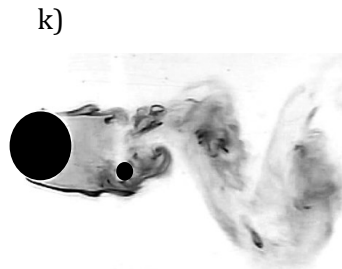


$D/d = 5$

Re = 1200



Re = 2500



Obr. 17 Porovnání úplavu válců pro Pozici 6, a) $D/d = 1$, Re = 500, b) $D/d = 1$, Re = 1200, c) $D/d = 1$, Re = 2500, d) $D/d = 1,67$, Re = 500, e) $D/d = 1,67$, Re = 1200, f) $D/d = 1,67$, Re = 2500, g) $D/d = 2,5$, Re = 500, h) $D/d = 2,5$, Re = 1200, i) $D/d = 2,5$, Re = 2500, j) $D/d = 5$, Re = 1200, k) $D/d = 5$, Re = 2500

Pro $D/d = 1$ je obzvláště patrné (pomine-li se intenzita sycení smykových vrstev barvivem), že viditelným rozdílem je pouze posunutí formace vírové stezky vlivem přítomnosti druhého válce. Obdobné chování se projevuje i u vyšších hodnot poměrů D/d . Hlavní rozdíl, patrný z videosnímků, oproti proudění za jedním válcem je v tomto případě častější ztráta stability úplavu vlivem odlišné frekvence odtrhávání smykových vrstev a nesymetrie způsobenou vyosením středů válců.

Pokud jde o pole rychlostí Pozice 6 pro $D/d = 2,5$ a $Re = 500$ (obr. 12f)), tak je zde vidět, že oproti ostatním pozicím gradient rychlosti v oblasti úplavu za válci klesá podstatně rychleji.

Pozice 7 (obr. 18) s úhlem natočení 0° a poměru $R/D = 1,5$ spadá dle [16] taktéž do oblasti připojení smykové vrstvy – SLR. V tomto případě by se dalo hovořit o této Pozici jako o tandemové nikoliv stupňovité konfiguraci. Co se týče vizuální stránky, je charakter proudění téměř totožný jako v případě samostatného válce. Oproti Pozici 6 je zdrojem nestabilit v úplavu převážně jen odlišná frekvence odtrhávání smykových vrstev u konfigurací válců s různými průměry.

Rychlostní pole pro $D/d = 2,5$ a $Re = 500$ (obr. 12g)) se svým charakterem blíží rychlostnímu poli samostatného válce.

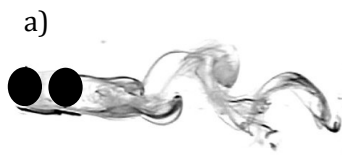
4.2 Vliv geometrického uspořádání válců a Reynoldsova čísla na frekvence odtrhávání struktur v úplavu

Ze všech provedených měření bylo možné získat frekvenční analýzy úplavu ve všech vzájemných pozicích válců. Z měření CTA, jak již bylo uvedeno v kap. 2.2.1, byly získávány informace o frekvencích v úplavu v rozsáhlé síti bodů za oběma válci [RV5], [RV8] a v některých případech i ze dvou sond najednou. Analýzou rychlostního pole pomocí metody PIV byly zjištěny dominantní frekvence dvěma způsoby: 1. ze zvoleného místa v úplavu z fluktuace rychlostí, 2. z následně provedené POD z frekvenční analýzy POD koeficientů. V případě vizualizace byl použit stejný postup získání frekvencí a to analýzou z POD koeficientů.

Mezi první měření patřila měření frekvencí a dopočítání Strouhalových čísel za samostatným válcem [RV7]. Jak již bylo uvedeno v úvodu, této problematice se věnovalo mnoho autorů a je obecně známo, v jakých hodnotách se bezrozměrný parametr frekvencí neboli Strouhalovo číslo pohybuje. Na obr. 19 jsou uvedeny výsledky provedených měření v porovnání s teoretickou hodnotou vycházející ze vztahů uvedených v tabulce 1 od autorů Fey et al. [7]. Hodnota Strouhalova čísla z POD analýzy rychlostních polí zde není uvedena, protože je totožná s hodnotou získanou z fluktuací rychlostního pole.

D/d = 1

Re = 500



Re = 1200



Re = 2500

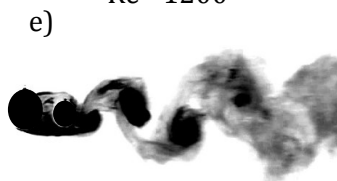


D/d = 1,67

Re = 500



Re = 1200



Re = 2500



D/d = 2,5

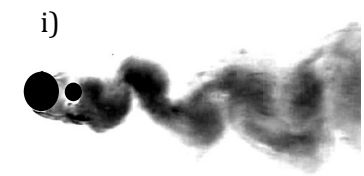
Re = 500



Re = 1200

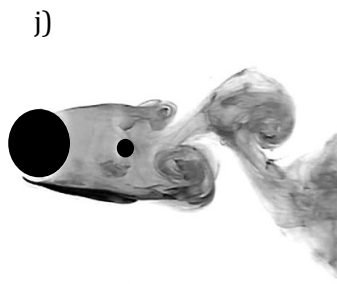


Re = 2500

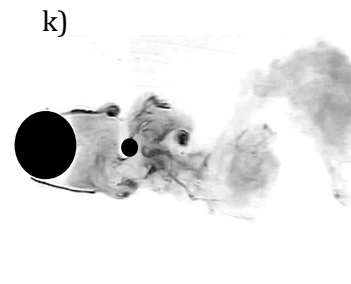


D/d = 5

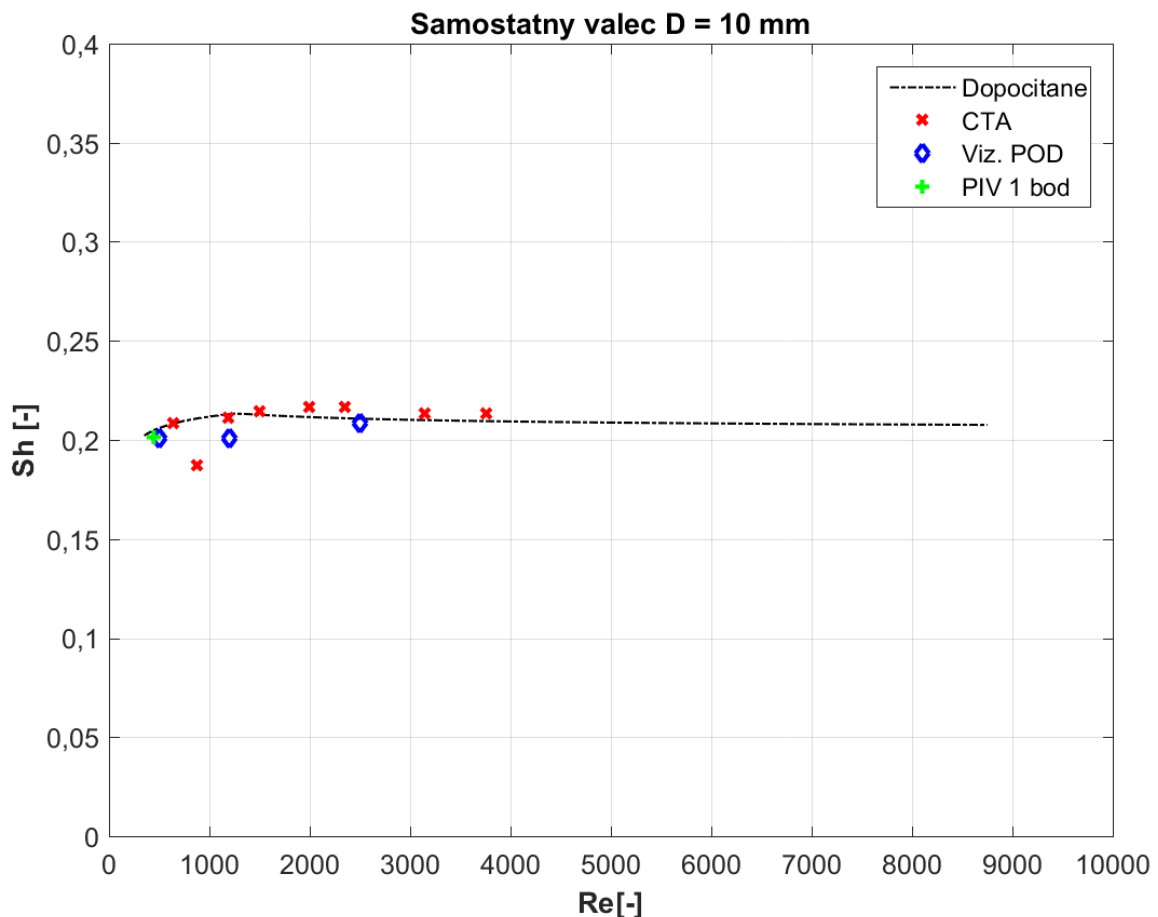
Re = 1200



Re = 2500



Obr. 18 Porovnání úplavu válců pro Pozici 7, a) D/d = 1, Re = 500, b) D/d = 1, Re = 1200, c) D/d = 1, Re = 2500, d) D/d = 1,67, Re = 500, e) D/d = 1,67, Re = 1200, f) D/d = 1,67, Re = 2500, g) D/d = 2,5, Re = 500, h) D/d = 2,5, Re = 1200, i) D/d = 2,5, Re = 2500, j) D/d = 5, Re = 1200, k) D/d = 5, Re = 2500



Obr. 19 Porovnání Strouhalových čísel získaných z měření s dopočítanými hodnotami dle Fey et. al [7]

Porovnáním naměřených hodnot s hodnotami dopočítanými lze konstatovat, že si veskrze odpovídají.

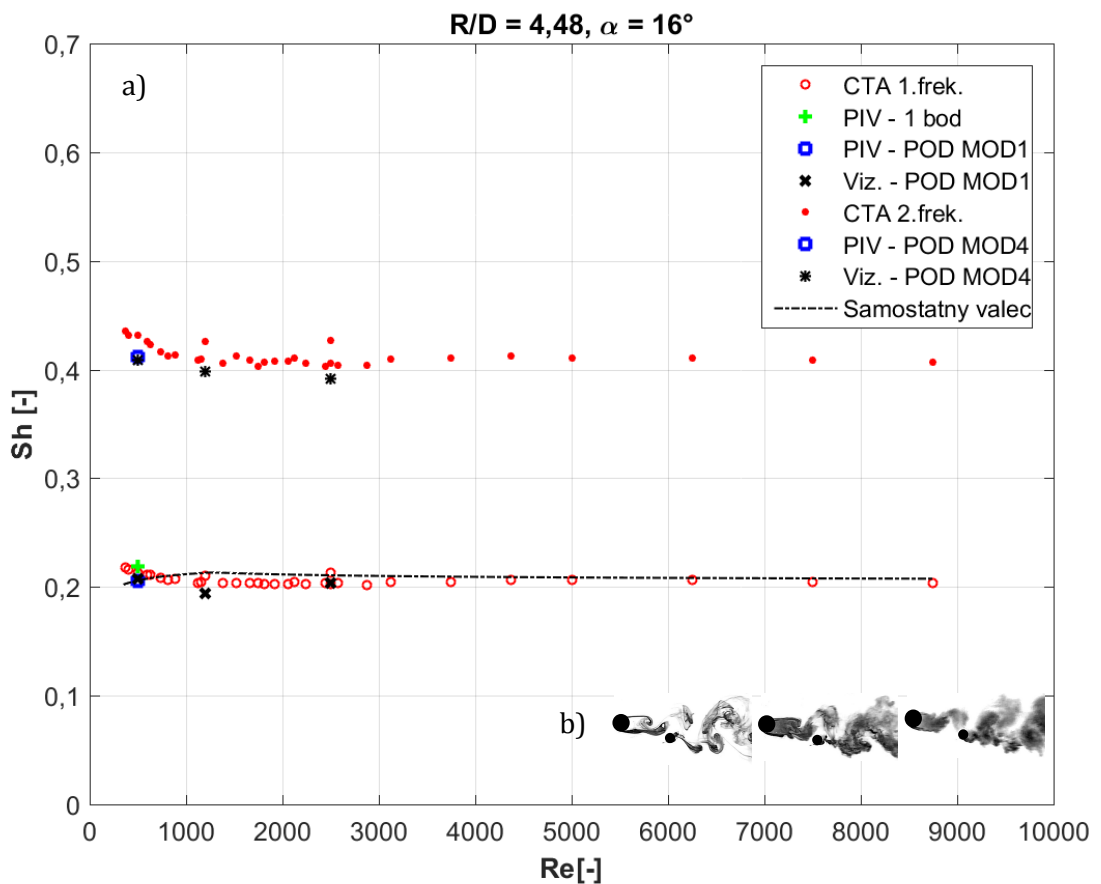
V případě umístění druhého válce do úplavu prvního se autoři jako Zdravkovich [13], Sumner et al. [16] a další zmiňují o skutečnosti, že v úplavech za těmito válci se obvykle objevují dvě dominantní frekvence – jedna související s předním válcem (vyšší frekvence) a druhá se zadním válcem (nižší frekvence). Proto jsou v následujících grafech pro většinu Reynoldsových čísel vyznačeny dvě hodnoty čísla Strouhalova. U měření fluktuací napětí, resp. rychlostí u metody CTA byly druhé frekvence určeny z frekvenčních spekter (konkrétně z hodnot spektrální výkonové hustoty – PSD) u metody POD byla jako druhá dominantní frekvence brána frekvence 4. módu. Důvod, proč byl vybrán zrovna 4. mód, objasňuje pododstavec 5.1.1.

4.2.1 $D/d = 2,5$

Nejvíce měření proběhlo pro poměr průměrů válců 2,5 [RV8], a proto tomuto nastavení bude věnována v této kapitole největší pozornost. Měření CTA byla proměřena široká škála Reynoldsových čísel, která byla doplněna PIV měření pro jedno Reynoldsovo číslo a

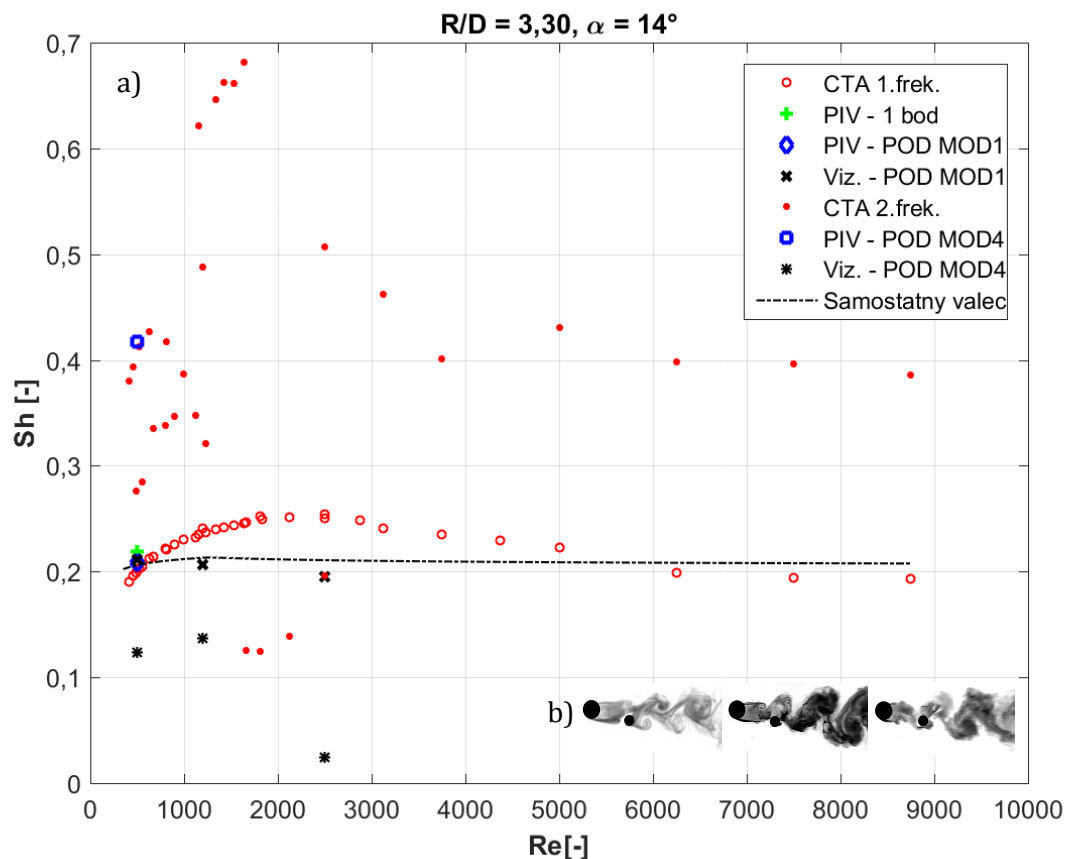
vizualizacemi pro tři Reynoldsova čísla. Obě optická měření tak doplnila informace o strukturách, jejichž frekvenci metoda CTA zjišťuje.

Druhý válec nacházející se na Pozici 1 (normovaná vzdálenost $R/D = 4,48$, úhel natočení $\alpha = 16^\circ$) se nalézá v místech, kdy by jeho vlivem nemělo docházet k výraznějším změnám frekvencí v úplavu prvního válce. Na obr. 20 a) je ukázáno porovnání Strouhalových čísel z jednotlivých měření v závislosti na číslu Reynoldsovu. Jak je patrné ze všech měřených frekvencí, předpoklad uvedený výše je potvrzen. Většina dopočítaných Strouhalových čísel koresponduje s hodnotami samostatného válce. Graf na obr. 20a) zároveň ukazuje dobrou shodu Strouhalových čísel získaných z různých typů měření. Jak bylo ukázáno v předchozí podkapitole, tvar a formování kompletního úplavu v této Pozici je převážně určován úplavem předního válce, úplav zadního válce se k němu připojuje, nerozbíjí ho, a dále s ním je ve většině případů synchronizován. Hodnoty druhých dominantních frekvencí se pohybují přibližně okolo dvojnásobku prvních frekvencí. Frekvenční spektra z rozsáhlé sítě bodů měřených žhavenou sondou dominantní frekvence vykreslují zcela jasně a čistě.



Obr. 20 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 2,5$ v Pozici 1, b) vizualizace Pozice 1 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava

Pokud se druhý válec nachází v Pozici 2 ($R/D = 3,3$, $\alpha = 14^\circ$) situace se oproti Pozici 1 výrazně mění (obr. 21). Druhý válec umístěný v této poloze do úplavu válce prvního zasahuje podstatně zřetelněji a v úplavu se objevuje více podobně „silných“ frekvencí. Z měření pomocí CTA, tak jak je ukázáno na tomto grafu, lze vyvodit, že dominantní frekvence úplavu jsou vyšší než je tomu u válce samostatného, což se neshoduje z frekvencemi získanými z POD. Nicméně podrobnější analýza frekvenčních spekter ze všech měřených bodů ukazuje, že v úplavech se vyskytuje více výraznějších frekvencí, jejichž výskyt závisí na poloze měřicí sondy v úplavu. V některých Pozicích v úplavu se vyskytuje „shluk“ frekvencí s podobnou hodnotou spektrální výkonové hustoty, v jiných místech má vrchol dominantní frekvence pouze o něco větší hodnotu PSD než zbytek spektra. Obecně lze říci, že u nižších Reynoldsových čísel se Strouhalova čísla dominantních frekvencí z jednotlivých měření v podstatě shodují (konkrétně se jedná pro režim $Re = 500$).

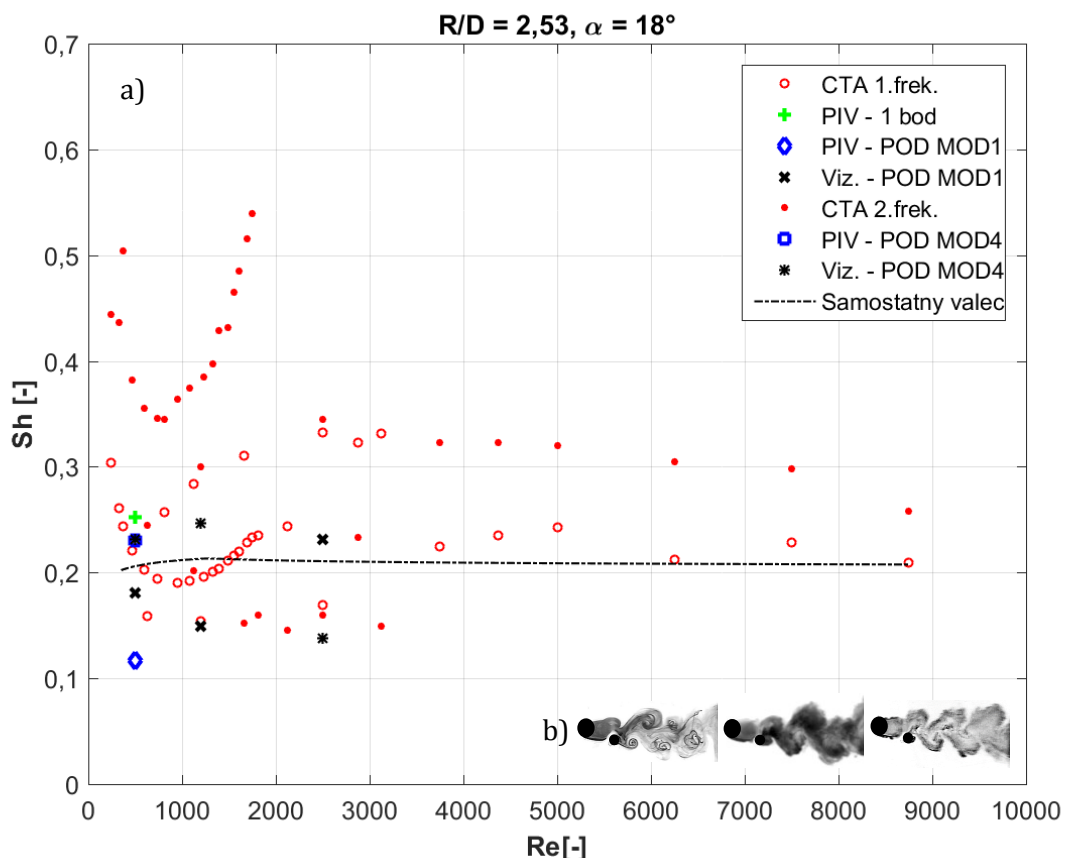


Obr. 21 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 2,5$ v Pozici 2, b) vizualizace Pozice 2 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava

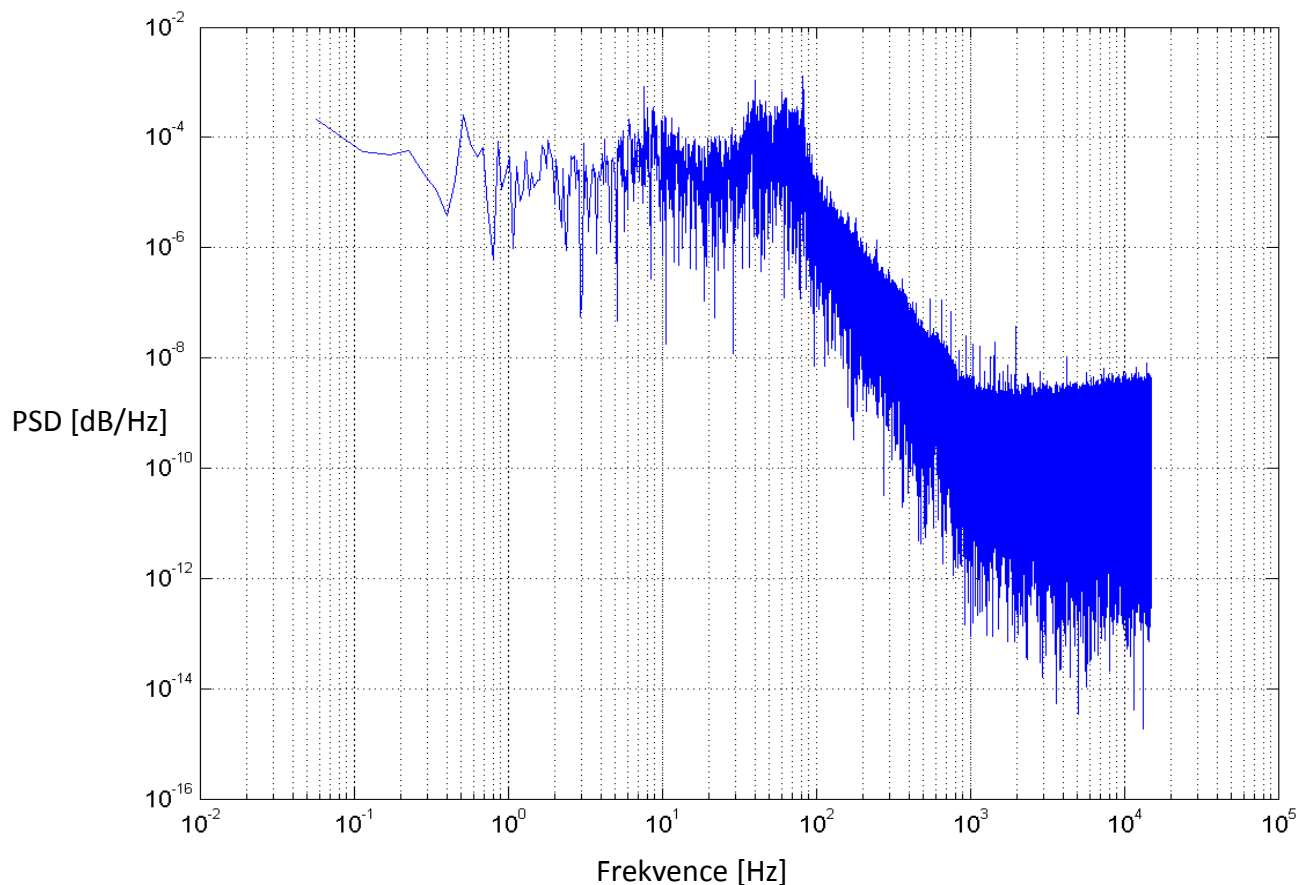
S narůstající rychlostí nabíhajícího proudu je vnášen do systému větší počet poruch vedoucích ke ztrátě stability, což může být způsobeno výrazně odlišnou dominantní frekvencí každého z válců. Rozdíl mezi Strouhalovými čísly z měření CTA a z analýzy POD je nejspíše způsoben tím, že metoda POD analyzuje proudové pole jako celek a v prvním módu je obsažena frekvence

nejsilnější struktury nezávislá na poloze v úplavu, kdežto výsledky z měření žhavenou sondou jsou v tomto případě značně závislé na poloze sondy.

Pokud se druhý válec nachází v Poloze 3 ($R/D = 2,53$, $\alpha = 18^\circ$) dochází při tomto D/d k nejvýraznějšímu rozrušení úplavu prvního válce, což je i patrné z grafu na obr. 22. Z měření CTA se velmi obtížně určuje, která frekvence je v tomto případě dominantní, protože (podobně jako tomu bylo u Pozice 2) silně závisí jednak na poloze žhavené sondy a jednak na okamžiku měření (viz pododstavec 4.1.5). Hlavním důvodem, proč jsou pozorovány takové rozdíly frekvencí napříč úplavem, je rozdílnost frekvencí formování smykových vrstev od jednotlivých válců a opakované narušování formování vírové stezky prvního válce smykovými vrstvami druhého válce. Z tohoto důvodu je jasné, že nelze dosáhnout shody v hodnotách Strouhalových čísel pro různé typy měření, což je i patrné z výše ukázaného grafu. Na obr. 23 je ukázáno frekvenční spektrum této Pozice pro $Re = 1660$. Z něj je jednoznačně patrné, že výrazných frekvencí, a tedy i dějů, je v úplavu více.

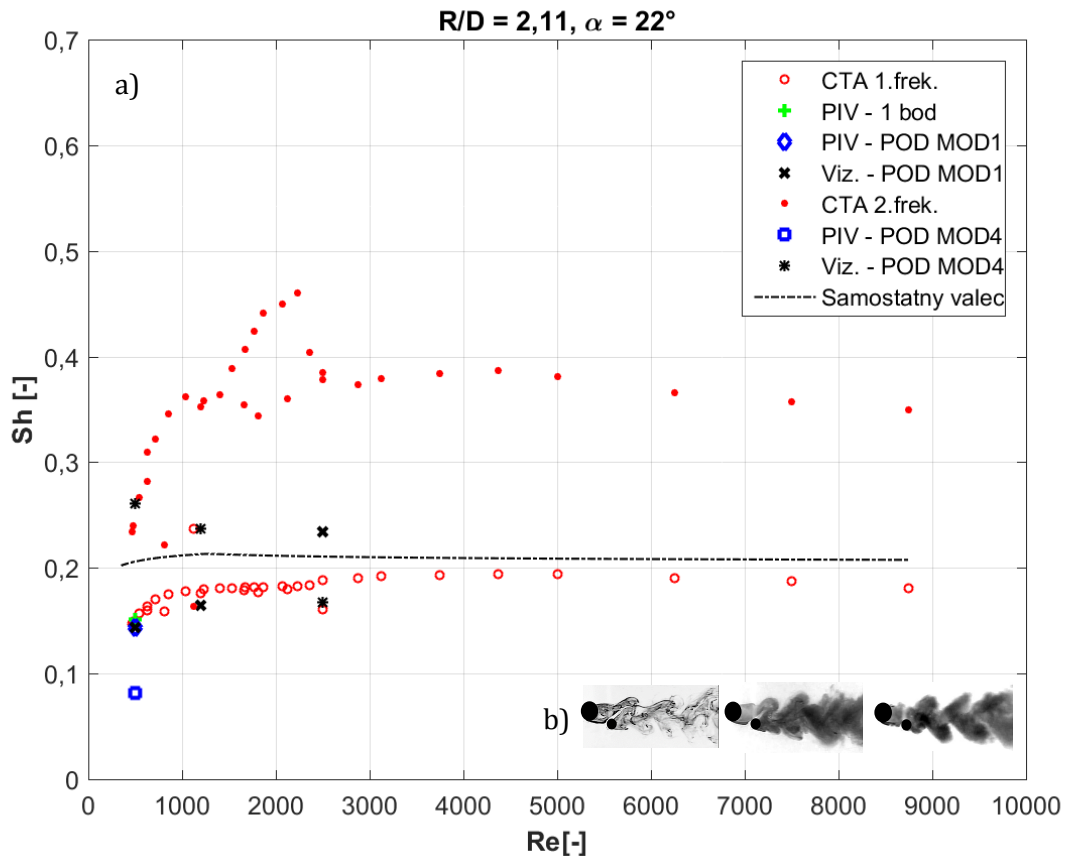


Obr. 22 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 2,5$ v Pozici 3, b) vizualizace Pozice 3 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava



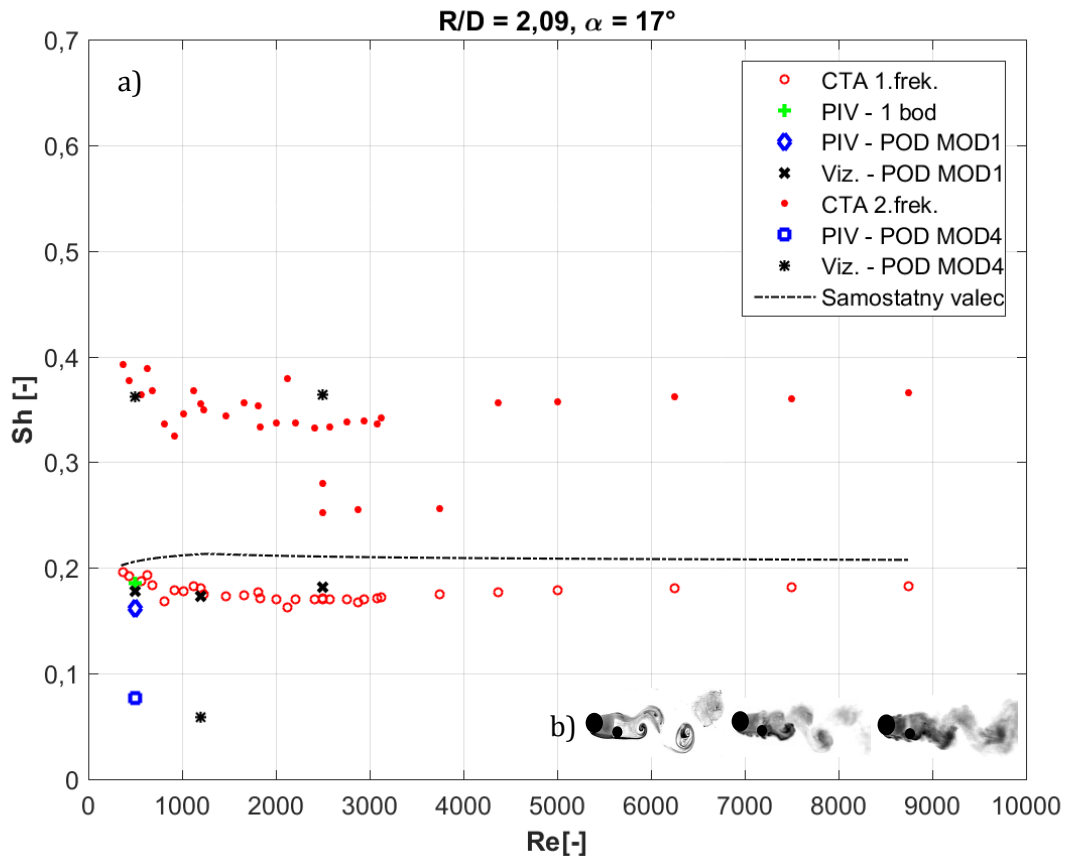
Obr. 23 Frekvenční spektrum pro $D/d = 2,5$, $Re = 1660$, Pozice 3

Pozice 4 ($R/D = 2,11$, $\alpha = 22^\circ$), ač velmi blízko Pozici 3, nevykazuje tak výrazně chaotický blízký úplav. Blízký úplav je více stlačen a tedy k formování vírových stezek dochází až za druhým válcem. To má patrně výrazný vliv na interakci dvou, de facto tří smykových vrstev – od předního válce (obě sloučené do jedné – viz popis v předchozí podkapitole) a od vnitřní smykové vrstvy zadního válce. Z grafu na obr. 24 je zároveň zřejmé, že tato Pozice druhého válce zmenšuje výrazně dominantní frekvence v úplavu (zejména tedy pro nižší Reynoldsova čísla). Graf současně ukazuje i velmi dobrou shodu výsledků z různých typů měření. Pouze pro $Re = 2500$ nastává zajímavá situace, kdy na nejsilnější strukturu proudu reprezentovanou módem 1 mají vliv převážně smykové vrstvy a úplav druhého válce a struktury formované prvním válcem jsou méně silné, ty reprezentuje až mód 4.



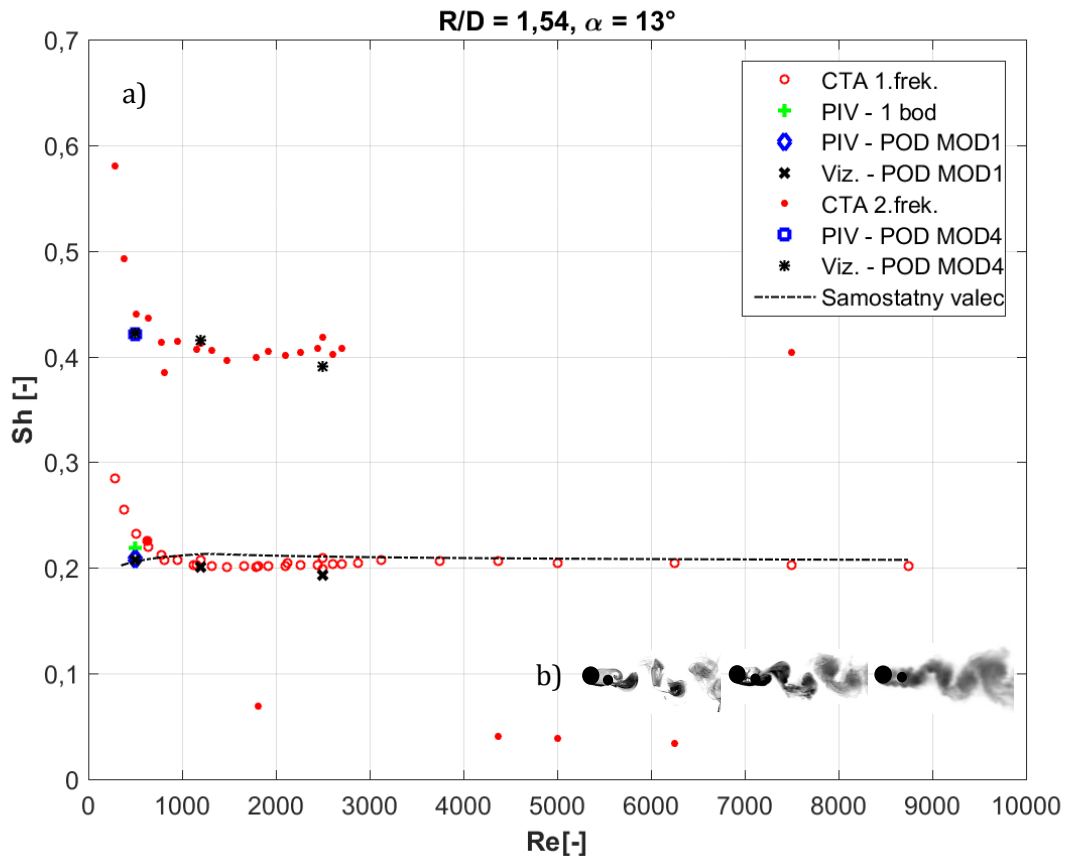
Obr. 24 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 2,5$ v Pozici 4, b) vizualizace Pozice 4 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava

V Pozici 5 ($R/D = 2,09, \alpha = 17^\circ$) druhého válce dochází k velmi zajímavým jevům, jak bylo popsáno v předchozí podkapitole. Nevytváří se zde samostatná vírová stezka za druhým válcem. Stlačením blízkého úplavu předního válce a rozdělením jeho smykových vrstev dochází k oslabení úplavu, což se projeví nižšími dominantními frekvencemi a tedy i nižšími Strouhalovými čísly oproti samostatnému válci, jak je vidět z grafu na obr. 25. U nižších Reynoldsových čísel (zhruba do $Re = 1000$) při měření CTA je vidět fluktuaci frekvencí – zřetelné rozdíly v dominantních frekvencích na malém rozsahu Reynoldsova čísla. Vysvětlení může poskytnout obrázek z vizualizace 16 g). V blízké oblasti kolem válců se neformují periodicky výrazné struktury, ty jsou zřetelně patrné až zhruba ve vzdálenosti $5D$. Proto při hledání dominantních frekvencí v úplavu i z velké sítě bodů, ale umístěných v převážné většině v oblastech blízkých úplavů, může dojít ke zkreslení interpretace, co je zde tou hlavní strukturou s dominantní frekvencí. Rozdíl je patrný u výsledků z POD – časově závislý POD koeficient a zohledňuje vyhodnocovanou oblast jako celek, proto je pro $Re = 500$ Strouhalovo číslo získané z POD o něco nižší než z CTA.



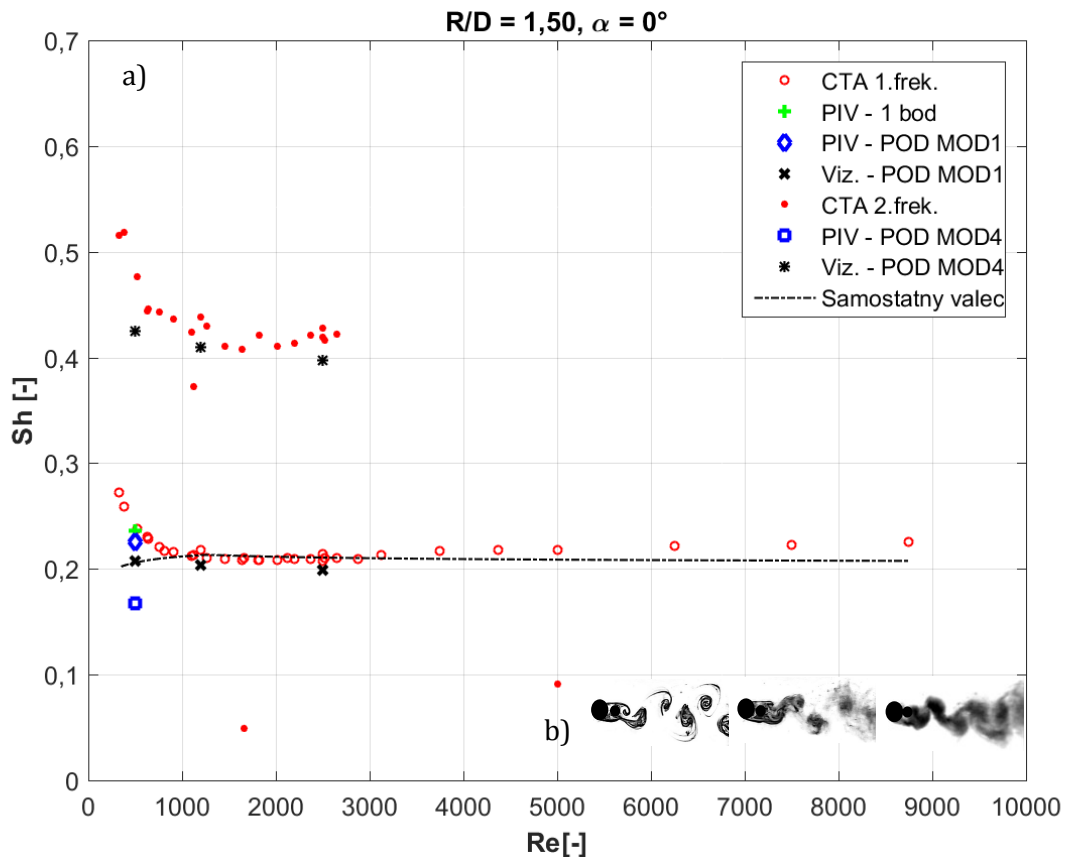
Obr. 25 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 2,5$ v Pozici 5, b) vizualizace Pozice 5 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava

Zadní válec nacházející v Pozici 6 ($R/D = 1,54, \alpha = 13^\circ$) v tomto místě výrazněji nenarušuje úplav válce prvního, pouze vnáší do systému více možných poruch. To se projevuje obzvláště u nižších Reynoldsových čísel, jak je vidět z hodnot Strouhalových čísel v grafu na obr. 26. Zhruba od $Re = 1000$ je vidět, že druhý válec v úplavu mírně snižuje velikost dominantní frekvence oproti samostatnému válci, což může být způsobeno protažením smykových vrstev předního válce až za úroveň zadního válce, kde teprve začíná vlastní formování vírové stezky (viz obr. 17 g) – 13 i)). Hodnoty Strouhalových čísel z CTA měření jsou opět v dobré shodě se Strouhalovými čísly z POD.



Obr. 26 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 2,5$ v Pozici 6, b) vizualizace Pozice 6 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava

V Pozici 7 ($R/D = 1,5, \alpha = 0^\circ$) se druhý válec nachází v oblasti blízkého úplavu prvního válce v tandemové Pozici. Zde mizí jako zdroj poruch v proudění drobné vyosení, jako bylo v Pozici 6. Přesto k jistému narušování tvorby vírové stezky přítomností druhého válce dochází. U menšího válce je tendence odtrhávání smykových vrstev při jiné frekvenci, než je tomu u válce prvního. Ač jsou hned v zárodku tyto odtrhávající se vrstvy absorbovány smykovými vrstvami prvního válce, vnáší do nich poruchy proudění. To je vidět, stejně jako u Pozice 6, převážně u nižších Reynoldsových čísel a posléze se to slabě projevuje u $Re > 3000$, jak je patrné z obr. 27. Přesto lze ale říci, že druhý válec v této poloze výrazněji nemění velikost dominantních frekvencí vůči samostatnému válci. Zajímavou skutečností je absence druhých výraznějších frekvencí u vyšších Reynoldsových čísel. To ukazuje na naprostou synchronizaci úplavů a „sjednocení“ obou válců do jednoho tělesa, z pohledu proudění.



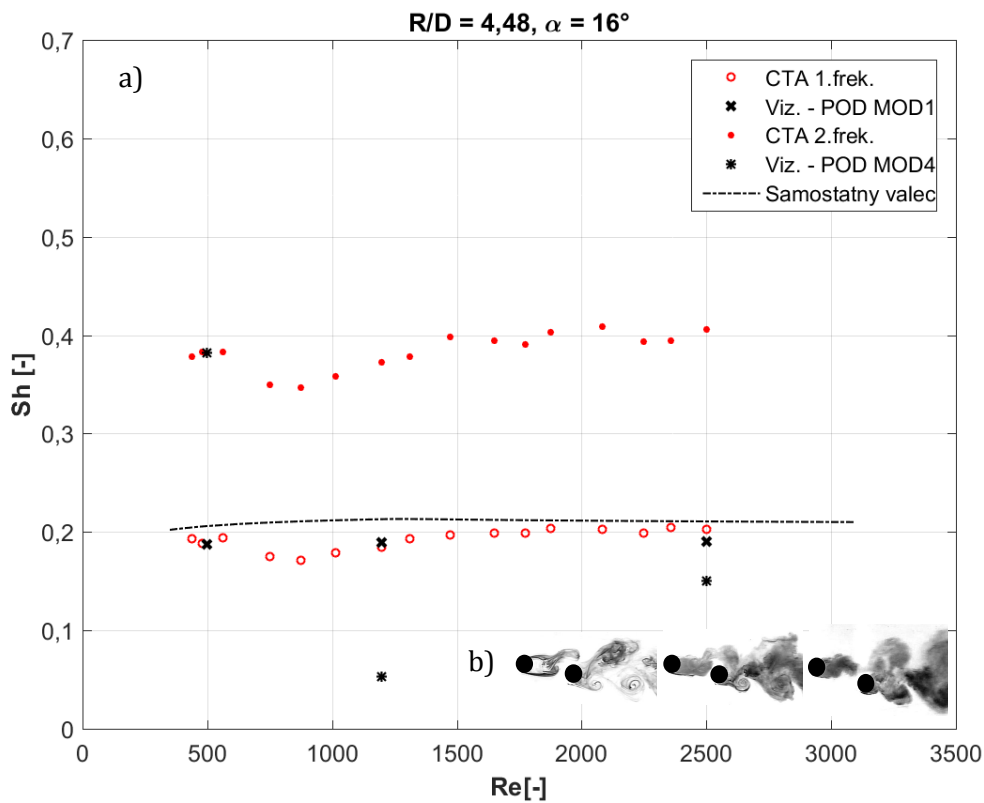
Obr. 27 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 2,5$ v Pozici 7, b) vizualizace Pozice 7 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava

4.2.2 $D/d = 1$

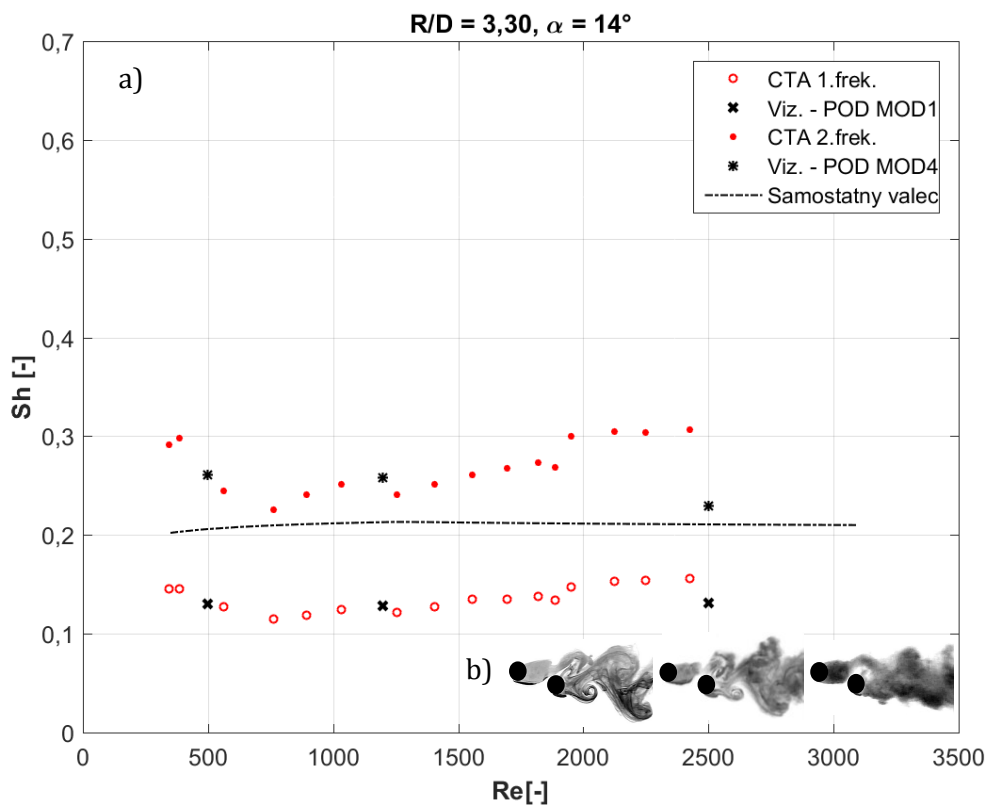
Pro poměr válců $D/d = 1$ byly získány frekvence ze dvou typů měření: vizualizace (3 režimy Re) a CTA (16 režimů Re) [RV8].

U druhého válce v Pozici 1 (obr. 28) si lze všimnout, že jeho vliv na celkový úplav je výraznější než tomu bylo u $D/d = 2,5$. To je dáno tím, že v této poloze už zadní válec více zasahuje do formující se vírové stezky za předním válcem, jak je více popsáno v podkapitole 4.1. Napojení a synchronizování smykových vrstev předního válce se smykovými vrstvami zadního válce lehce snižuje velikost dominantní frekvence vůči hodnotám frekvencí samostatného válce, což potvrzují obě provedená měření a jejich analýzy, viz graf na obr. 28.

Pozice 2 druhého válce pro toto D/d jednoznačně nemá tak výrazný destabilizující vliv na válec, jako to měla v případě $D/d = 2,5$. Důvod lze opět nalézt v analýze struktur proudění z vizualizací. Smykové vrstvy obou válců se synchronizují a následně formují společnou vírovou stezku. K plnému zformování dochází až za úrovní druhého válce. Patrně tyto mechanismy ovlivní výslednou velikost dominantních frekvencí, které jsou výrazně nižší oproti samostatnému válci, jak to potvrzují obě měření, což je vidět z obr. 29.

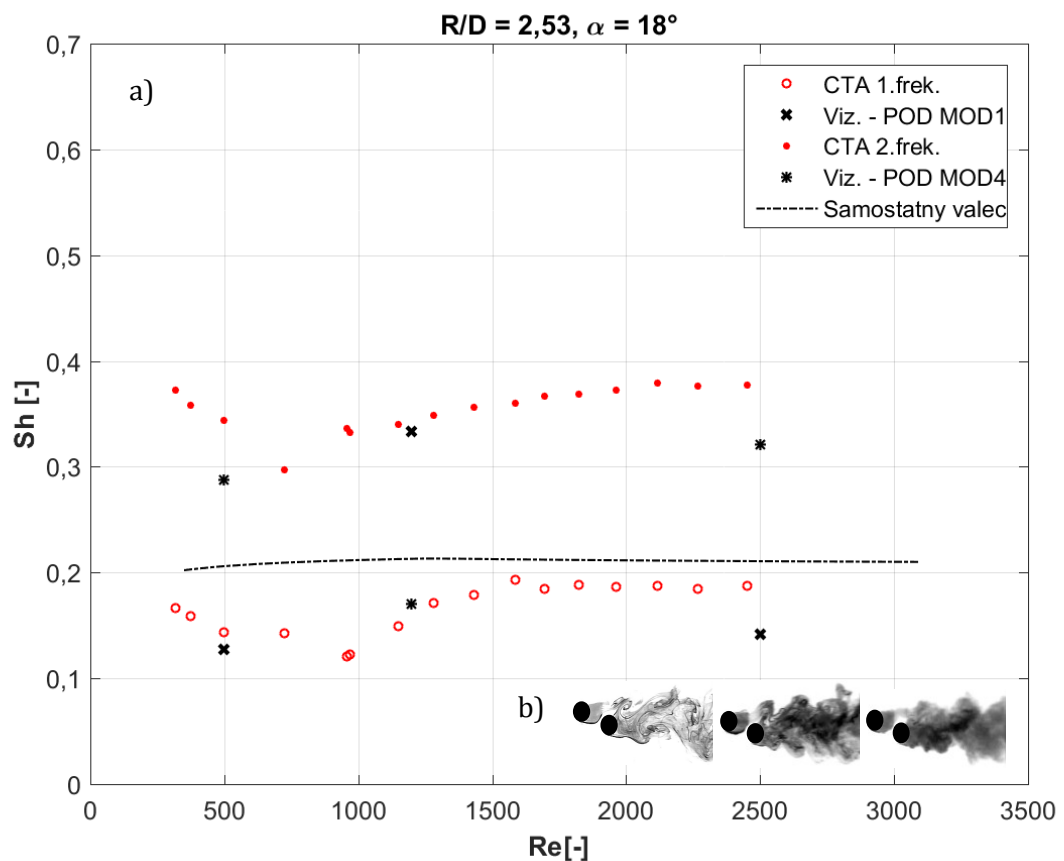


Obr. 28 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 1$ v Pozici 1, b) vizualizace Pozice 1 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava



Obr. 29 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 1$ v Pozici 2, b) vizualizace Pozice 2 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava

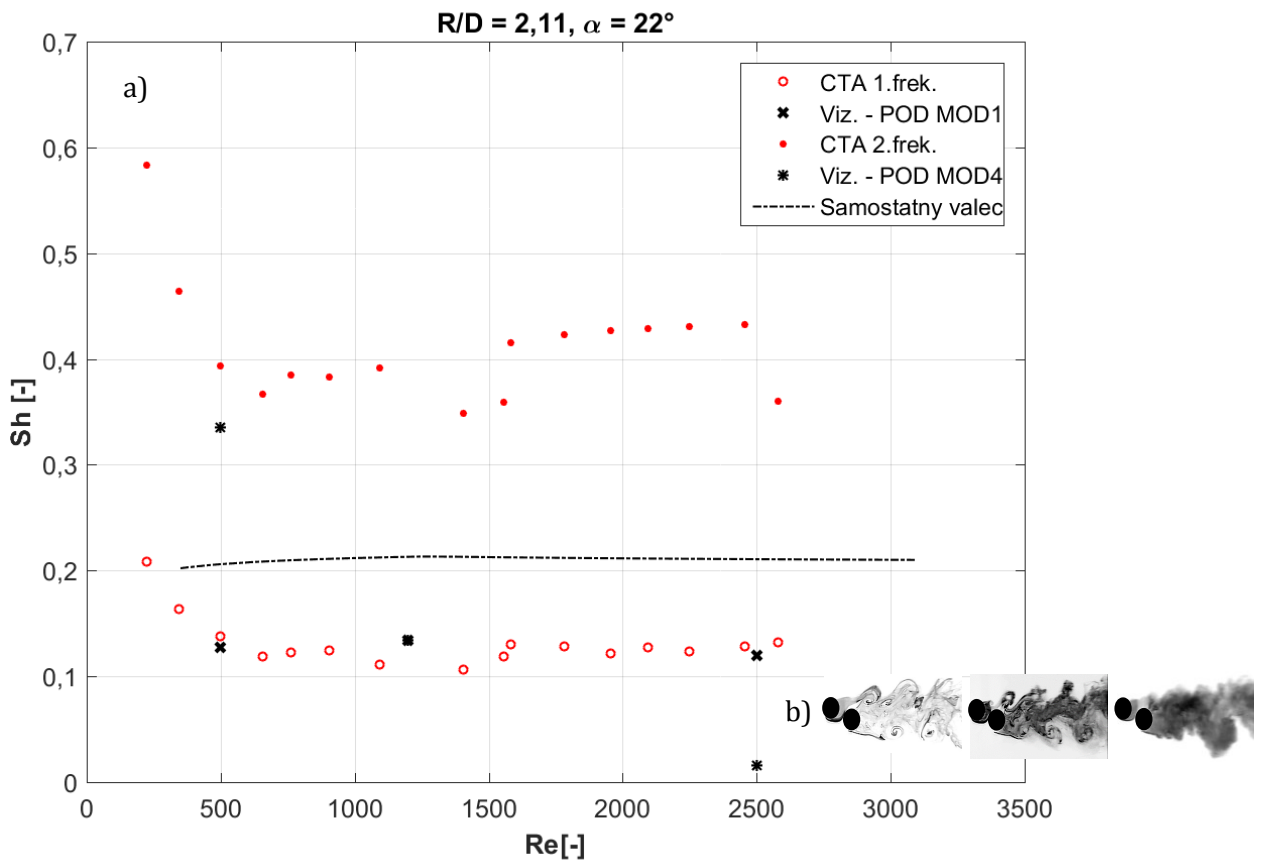
U Pozice 3 (obr. 30) dochází v jednotlivých částech úplavu k různým režimům. To je patrné z grafu na obr. 26, kde lze pozorovat, že u proudění s nejnižšími Reynoldsovými čísly mají Strouhalova čísla sklon s narůstajícím Re klesat, až zhruba do hodnoty $Re = 500$; do hodnoty $Re = 1000$ jsou přibližně stejné a pak mají následně vzrůstající tendenci. Jejich hodnota se ustaluje, v měřeném rozsahu Re , blízko hodnot samostatného válce. Strouhalova čísla z POD analýzy se shodují s výsledky CTA při $Re = 500$ a $Re = 1200$, ačkoliv pro $Re = 1200$ významnější struktura co do POD mohutnosti je ta související s druhou, vyšší, frekvencí od rozpadající se vnější smykové vrstvy prvního válce (viz podkap. 4.3). Výraznější rozdíl nastává u obou Strouhalových čísel u hodnoty $Re = 2500$. To je patrné dáno tím, že žhavená sonda polohovaná v síti bodů za úplavem je citlivější na drobné fluktuace, které se zde vyskytují, kdežto POD, jak již zde bylo několikrát zmíněno, bere sledovanou oblast jako celek.



Obr. 30 Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 1$ v Pozici 3, b) vizualizace Pozice 3 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava

Vývoj Strouhalových čísel s narůstajícím číslem Reynoldsovým u Pozice 4 (obr. 31.) vykazuje obdobný charakter jako u Pozice 2. Výraznější rozdíl je patrný u nižších Reynoldsových čísel (opět přibližně do $Re = 500$), kde jsou Strouhalova čísla vyšší. To je pozoruhodné ve srovnání se stejnou pozicí ale pro poměru $D/d = 2,5$, kde vývoj Strouhalových čísel má obrácených charakter: při

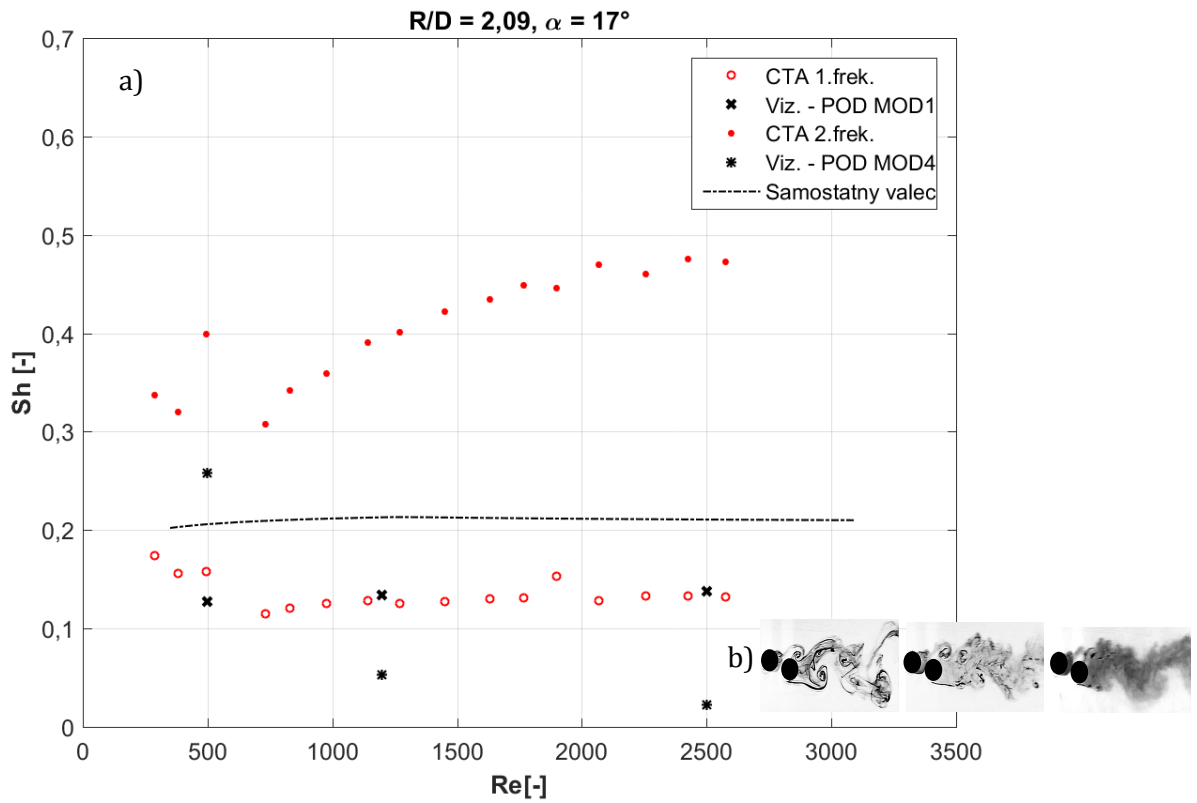
nízkých Reynoldsových číslech jsou čísla Strouhalova nejnižší. Při porovnání obou typů měření lze dojít k závěru, že v úplavu za válcem nedochází tak výrazně k lokálním poruchám, tak jak to bylo patrné u Pozice 3, protože Strouhalova čísla jak z CTA tak z POD analýzy se v podstatě shodují, pouze v rozmezí $Re < 1000; 1500 >$ se vyskytují menší rozdíly.



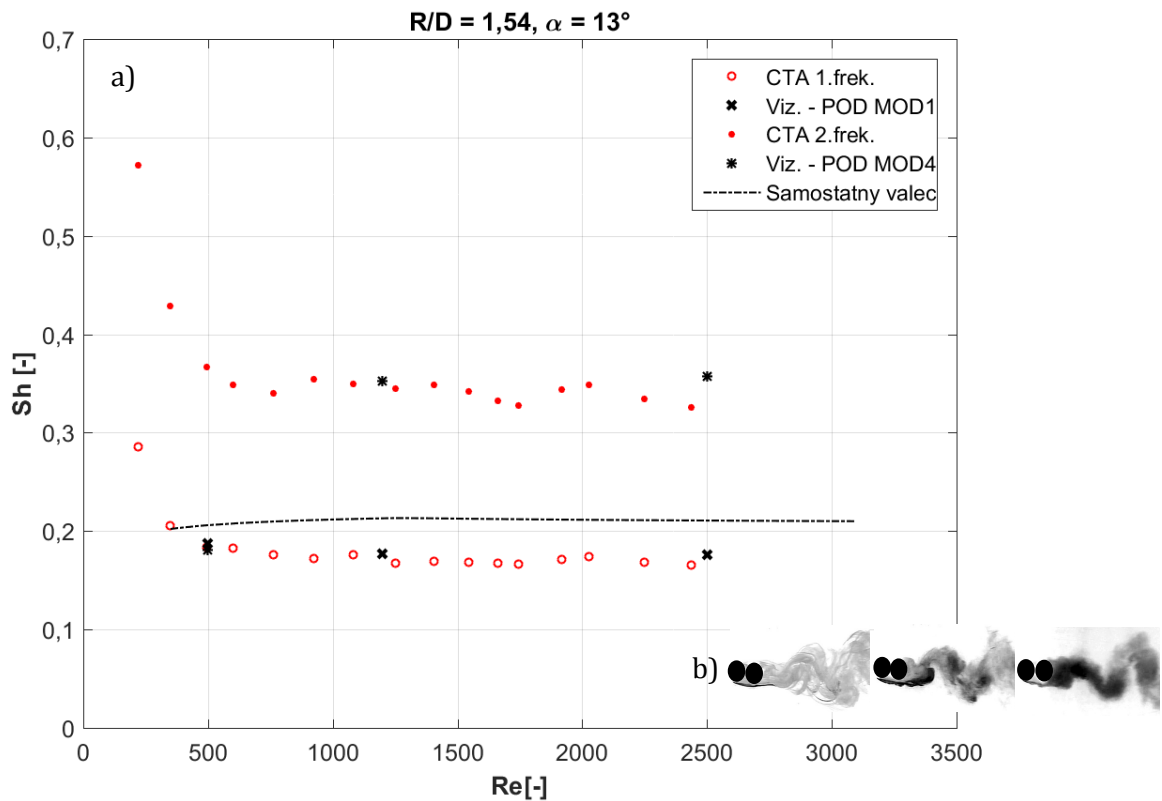
Obr. 31 Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 1$ v Pozici 4, b) vizualizace Pozice 4 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava

Při srovnání Strouhalových čísel Pozic 4 (obr. 31) a 5 (obr. 32) a jejich vývoje s rostoucím Reynoldsovým číslem lze dojít k myšlence, že se jedná o totožné polohy. Je pravdou, že tyto Pozice leží velmi blízko sebe, nicméně rozdíly zde jsou, pokud je tedy posuzován charakter proudění – viz podkap. 4.1. Charakter proudění se spíše promítá do Strouhalových čísel u 4. módu z POD analýzy pro $Re = 500$ a $Re = 1200$, kde u Pozice 5 hodnoty Strouhalova čísla jsou nižší.

V Pozici 6 (obr. 33) Strouhalova čísla kopírují trend Pozic 4 a 5 s tím, že hodnoty jsou posunuty blíže k hodnotám samostatného válce, ale stále jsou nižší. Z hladkého průběhu hodnot lze vyčíst, že v úplavech obou válců se neobjevují výraznější poruchy, čemuž i odpovídá velmi dobrá shoda Strouhalových čísel z obou měření.

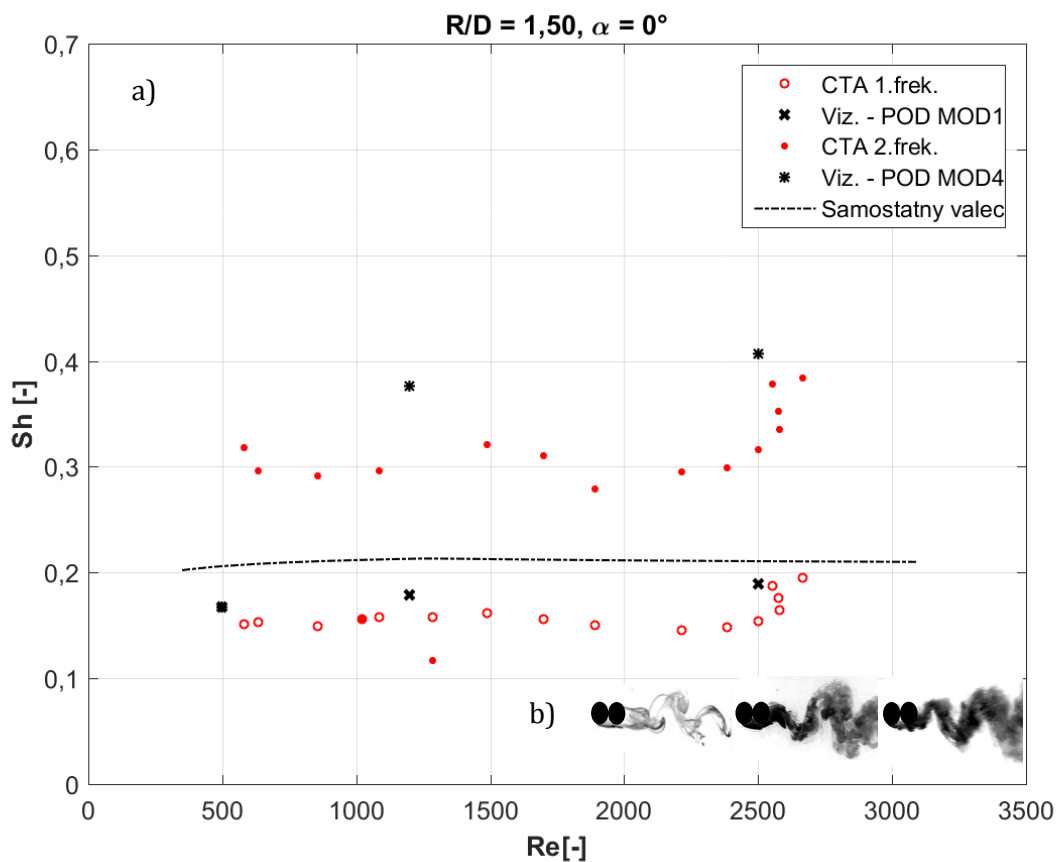


Obr. 32 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 1$ v Pozici 5, b) vizualizace Pozice 5 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava



Obr. 33 a) Závislost $Sh - Re$ z několika měření pro $D/d = 1$ v Pozici 6, b) vizualizace Pozice 6 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava

U Pozice 7 (obr. 34) jsou hodnoty Strouhalových čísel odlišné od předpokladu, že dva válce za sebou budou vykazovat obdobné chování jako samostatný válec. Zdravkovich [13] ve svém článku uvádí pro danou vzdálenost R/D dva možné mechanismy tvorby kompletního úplavu závisící na Reynoldsově čísle, a to buď tak, že smykové vrstvy prvního válce jsou protaženy až na úroveň druhého válce (to je patrné při nižších Re – viz obr. 18a)) anebo rozpadající se smyková vrstva za prvním válcem se napojuje na smykovou vrstvu druhého válce, jak to i uvádí [16], což je patrné nejvíce z obr. 18c). To může způsobovat drobné poruchy v úplavu, které se právě projeví v hodnotách dominantních frekvencí, ale pouze u měření pomocí žhavené sondy.

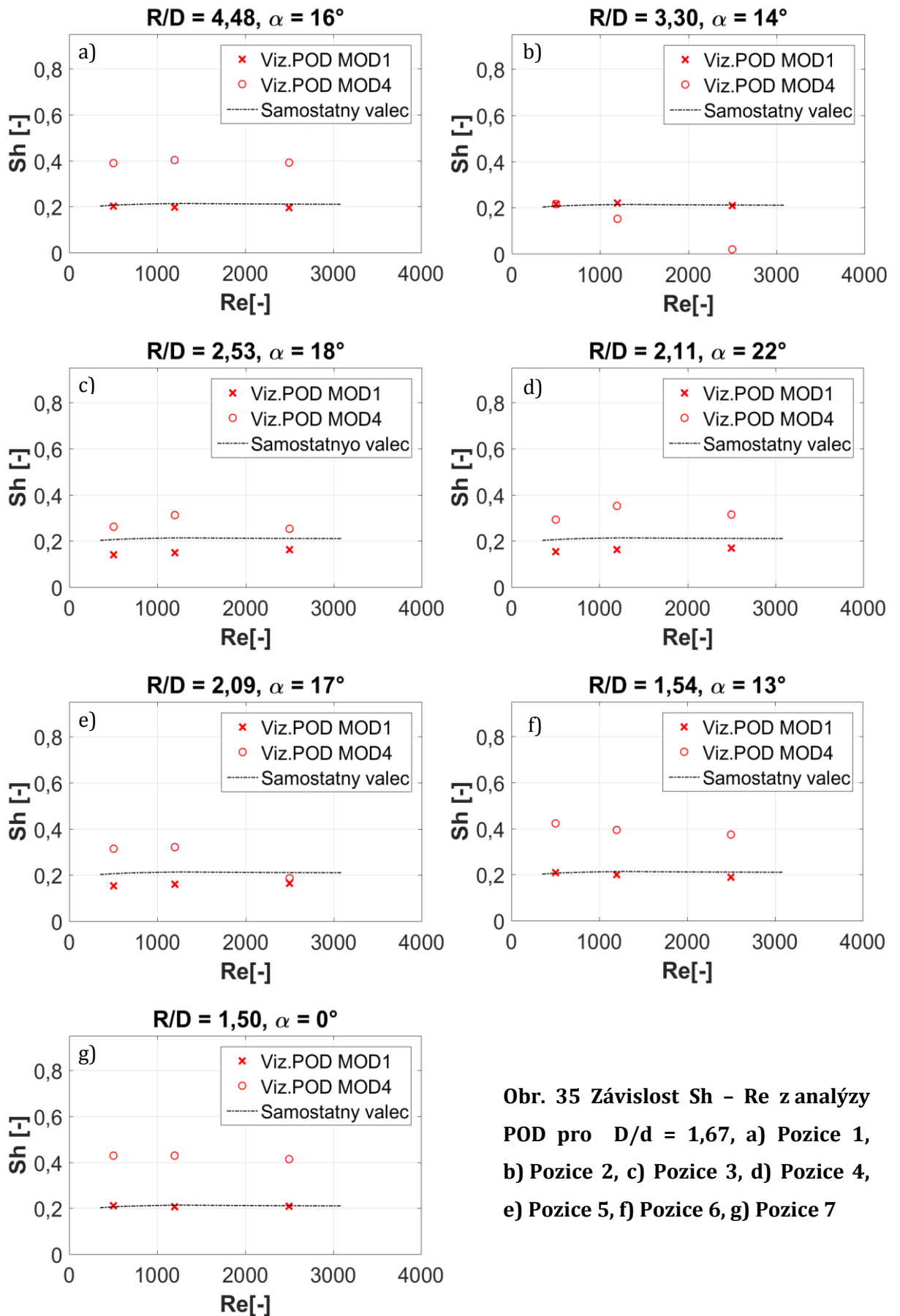


Obr. 34 a) Závislost Sh - Re z několika měření pro $D/d = 1$ v Pozici 7, b) vizualizace Pozice 7 pro $Re = 500, 1200$ a 2500 zleva doprava

4.2.3 $D/d = 1,67$

Pro poměr $D/d = 1,67$ byla zjištěna Strouhalova čísla pouze analýzou POD z vizualizací. Proto jsou pro přehlednost tyto výsledky ze všech 7 pozic shrnuty na obr. 35.

Pozice 1 (obr. 35a)) vykazuje obdobné výsledky, jako tomu bylo u poměrů $D/d = 1$ a $D/d = 2,5$, tedy hodnoty Strouhalových čísel se blíží hodnotám samostatného válce a současně i druhé dominantní frekvence mají stejný průběh, pouze jsou dvojnásobné. U Pozice 2 (obr. 35b)) je už



Obr. 35 Závislost $Sh - Re$ z analýzy POD pro $D/d = 1,67$, a) Pozice 1, b) Pozice 2, c) Pozice 3, d) Pozice 4, e) Pozice 5, f) Pozice 6, g) Pozice 7

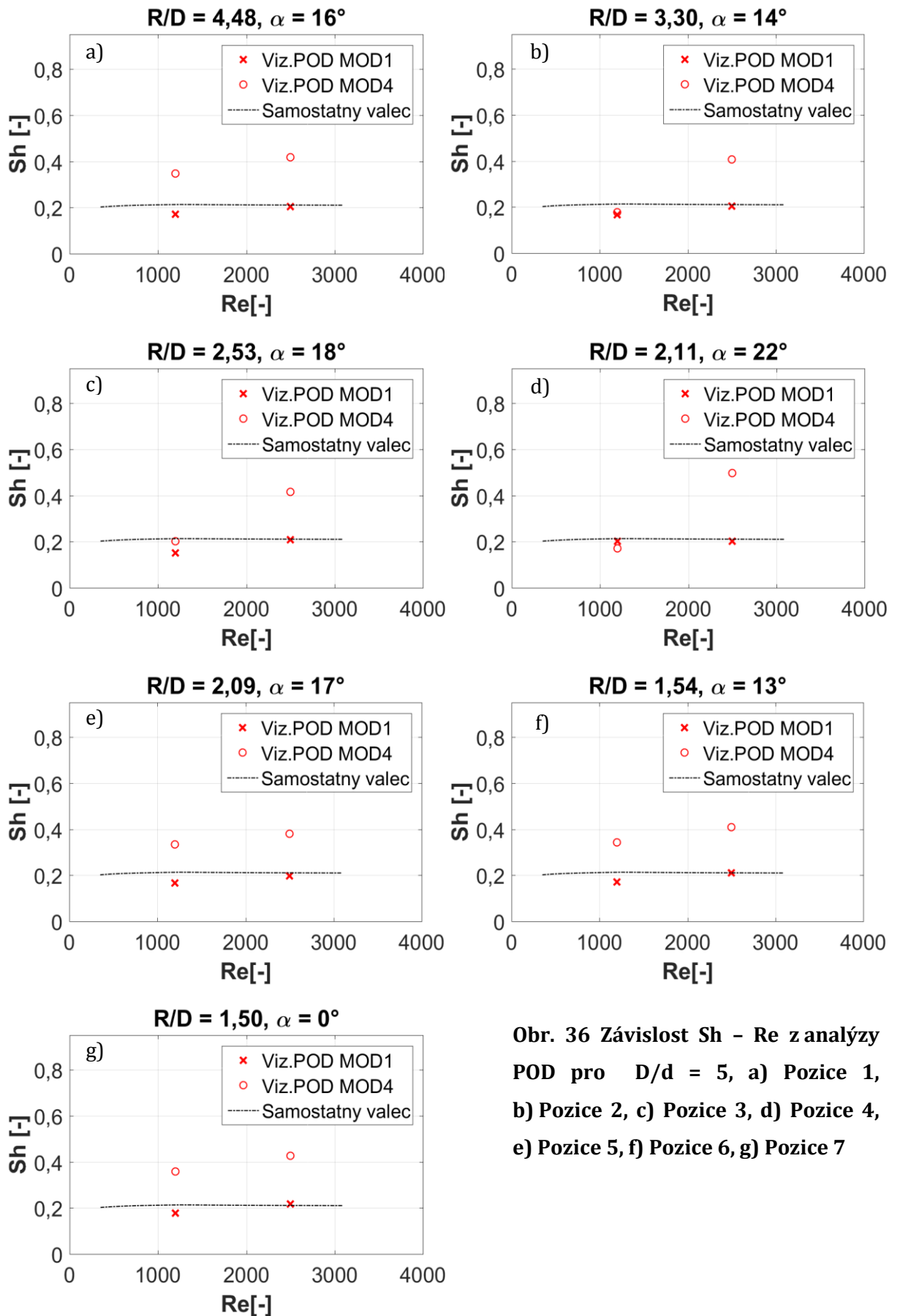
patrný vliv výskytu poruch, který se výrazně projevuje u již popsaného poměru $D/d = 2,5$. Ačkoliv první dominantní frekvence odpovídají taktéž hodnotám samostatného válce, další významné

frekvence v úplavu nemají jednotný charakter. Při prozkoumání frekvenčních spekter prvních 6 módů, byly patrné projevy lokálních poruch v tom, že se v některých módech vyskytují obdobné „shluky“ podobně silných frekvencí, jak to bylo popisováno u $D/d = 2,5$. Pozice 3 (obr. 35c)) má obdobný charakter, jako tomu bylo u předchozích poměrů válců, podobně i Pozice 4 (obr. 35 d)) a 5 (obr. 35 e)). Všechny dominantní frekvence, resp. frekvence příslušející prvnímu módu, jsou nižší než v případě samostatného válce. V Pozicích 6 (obr. 35f)) a 7 (obr. 35 g)) se charakter frekvencí spíše přibližuje charakteru poměru $D/d = 2,5$. V tom lze spatřovat velkou citlivost chování úplavu na zvětšení poměru průměru válců D/d .

4.2.4 $D/d = 5$

Stejně jako u poměru válců $D/d = 1,67$ tak i u $D/d = 5$ byly získány frekvence v úplavech pouze z analýzy vizualizace metodou POD a vzhledem k technickým možnostem byly sledovány jednotlivé nastavení konfigurací pouze pro dvě Reynoldsova čísla: 1200 a 2500. Dypočítaná Strouhalova čísla ze získaných frekvencí pro jednotlivé Pozice jsou ukázána na obr. 36.

Pokud je menší válec v Pozici 1 (obr. 36a)), tak při $Re = 1200$ s úplavem předního válce přímo neinteraguje, ale jeho menší částečně už zformovaná vírová stezka úplav narušuje. To se projevuje tím, že výsledná frekvence je menší, než u samostatného válce. Při vyšším Reynoldsově čísle úplav předního válce zcela pohlcuje úplav zadního a není jim příliš ovlivněn, o čemž svědčí velikost dominantní frekvence, která se blíží svou velikostí samostatnému válci. Nicméně zde je důležité poznamenat, že výsledná frekvence spojených úplavů se může pro tento poměr mírně lišit od skutečné, protože snímaná oblast nezaznamenává kompletní vývoj spojených vírových stezek (více zřetelné to může být u $Re = 1200$). Obdobný charakter Strouhalových čísel vykazuje i Pozice 2 (obr. 36b)): pro $Re = 1200$ dochází k snížení dominantní frekvence, pro $Re = 2500$ je hodnota srovnatelná s hodnotou samostatného válce. To, co vede k tomuto charakteru, je popsáno v podkapitole 4.1 a zároveň to dobře ilustrují obr. 13j) a 13k). Za povšimnutí stojí Strouhalovo číslo ze 4. módu. Ve většině případů 4. mód představuje v proudění strukturu s druhou výraznou frekvencí úplavu, pokud tedy taková jednoznačná druhá frekvence existuje. Ale jak již bylo ukázáno u rozboru Strouhalových čísel pro $D/d = 2,5$ v pododstavci 4.2.1, může dojít k situaci, kdy vlivem lokálních poruch rozrušujících celý úplav se zde objevují hned několik podobně silných frekvencí. Pro tuto konfiguraci válců v Pozici 2, ale i v Pozici 3 a 4, lze nalézt v první desítce POD módů celou škálu frekvencí, což bude více rozebráno v následující kapitole 5. Co se týče Pozice 3 (obr. 36c)), je její charakter dominantních frekvencí jako u Pozice 2, ale s tím rozdílem, že frekvence módu 4 se blíží frekvenci samostatného válce. U Pozice 4 (obr. 36d)) z vizuálního hlediska dochází k silnější interakci úplavů obou válců, nicméně na výslednou dominantní frekvenci to nemá patrný vliv. Větší vliv lze vysledovat z dalších frekvencí objevujících se v



Obr. 36 Závislost $Sh - Re$ z analýzy POD pro $D/d = 5$, a) Pozice 1, b) Pozice 2, c) Pozice 3, d) Pozice 4, e) Pozice 5, f) Pozice 6, g) Pozice 7

následujících módech; na obr. 36 je opět ukázán mód 4. Zde je zajímavé, že pro $Re = 1200$ je frekvence ve 4. módu nižší než u prvního. Z toho lze opět usuzovat, že dominantní struktura, jak

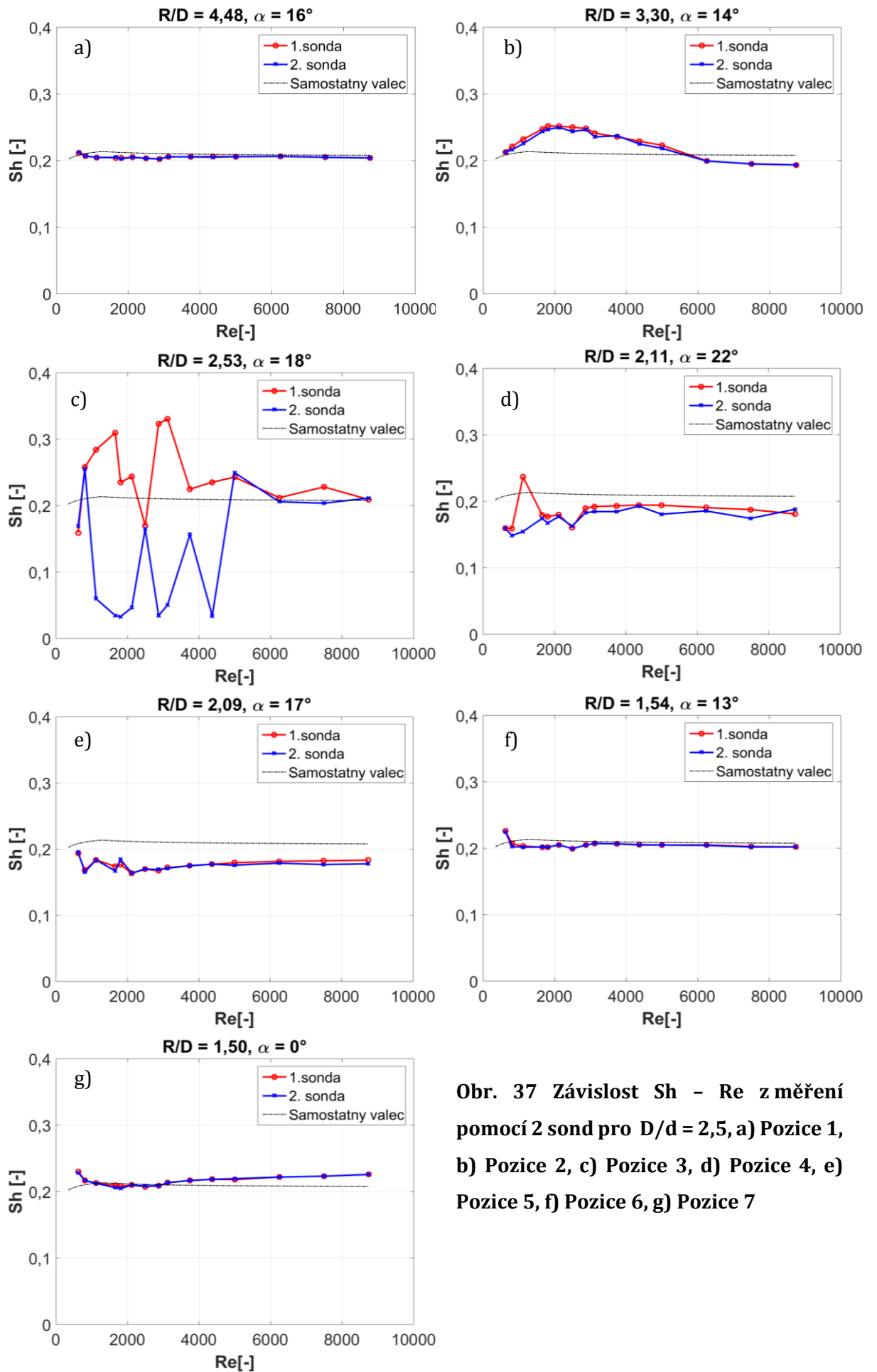
to bylo ostatně i vidět u $D/d = 2,5$, není ta s nejnižší frekvencí v úplavu. U Pozice 5 (obr. 36e)) lze pozorovat v blízkém úplavu prvního válce obdobný jev, jako u $D/d = 2,5$, kdy část vnitřní smykové vrstvy velkého válce cirkuluje v jeho blízkém úplavu a tak se i tedy celé formování vírové stezky posouvá až za úroveň menšího válce. Tento jev vede patrně ke snížení velikosti dominantních frekvencí, což je vidět z grafu na obr. 36e), kde je patrné, že přítomnost menšího válce v této poloze i při vyšším Reynoldsově čísle stále oslabuje dominantní frekvence. U Pozic 6 (obr. 36f)) a 7 (obr. 36g)) je patrný obdobný průběh, kdy při $Re = 1200$ menší válec oslabuje dominantní struktury v proudění a má vliv i na snížení hodnot Strouhalových čísel oproti samostatnému válci. Při $Re = 2500$ už jeho význam podstatně klesá, a hodnoty Strouhalova čísla nabývají obdobných hodnot jako pro samotný válec.

4.2.5 Vliv válců na pohyb struktur v prostoru

Pro poměr válců $D/d = 2,5$ a rozmezí Reynoldsových čísel od 600 do 8700 bylo provedeno měření CTA se dvěma sondami umístěným za válci ve stejné vzdálenosti od válců s rozestupem 52 mm sbírající data ve stejný časový okamžik. Cílem bylo zjistit jak výrazný je prostorový charakter úplavu. Na obr. 37 jsou ukázány výsledné grafy průběhů Strouhalových čísel z obou sond v závislosti na Reynoldsově čísle.

Na obr. 37a) je vidět porovnání sond v Pozici 1. Z průběhu Strouhalových čísel je jasně patrné, že k výraznějším změnám v rovině rovnoběžné s válci nedochází. V Pozici 2 (obr. 37b)) jsou už patrné jisté odchylky v rozmezí Re zhruba $\langle 500, 5800 \rangle$, což může vysvětlovat vyšší výskyt „silných“ frekvencí, jak bylo uvedeno v pododstavci 4.2.1. V Pozici 3 (obr. 37c)) nabývají rozdíly Strouhalových čísel maximálních hodnot. To zcela koresponduje i s tím, co bylo pozorováno u vizualizací (viz podkap. 4.1). V této poloze evidentně dochází k nezanedbatelnému pohybu struktur ve směru osy z . Odchylky ve Strouhalových číslech, i když ne již tak výrazné, lze spatřit i u Pozice 4 (obr. 37d)). Vysvětlení opět lze nalézt v analýze vizualizací, ze kterých vyplývá, že formující se vírová stezka zadního válce narušuje vírovou stezku válce předního a evidentně toto narušení má prostorový charakter. U Pozice 5 (obr. 37e)) jsou rozdíly dominantních frekvencí velmi malé. U Pozic 6 (obr. 37f)) a 7 (obr. 37g)) nejsou zřetelné výraznější odchylky z měřených hodnot obou sond.

Tato měření ukázala to, co naznačily vizualizace, že poruchy vyvolané především válcem umístěným v Pozici 3, ale částečně i 4 a velmi mírně i 2 a 5, vedou k narušení formování struktur v blízké oblasti válců, zejména okolo horizontální osy předního válce.



Obr. 37 Závislost $Sh - Re$ z měření pomocí 2 sond pro $D/d = 2,5$, a) Pozice 1, b) Pozice 2, c) Pozice 3, d) Pozice 4, e) Pozice 5, f) Pozice 6, g) Pozice 7

5 Rozbor

5.1 Identifikace dominantních struktur z analýzy POD

5.1.1 Struktury v proudění

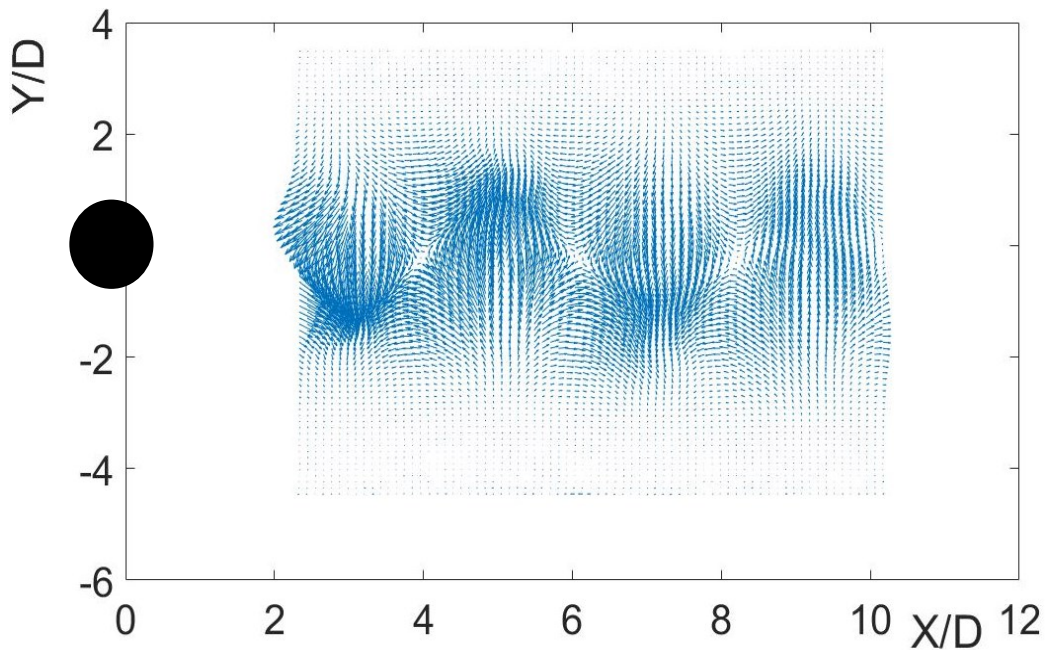
Videosnímky vizualizací, kromě identifikace a popisu viditelných jevů v úplavu, byly zpracovány dále metodou analýzy vlastní ortogonální dekompozice (POD) [RV6], jejíž základní principy jsou popsány v podkapitole 3.2. Metoda analýzy POD byla taktéž použita na data získaná z měření PIV: rychlostní pole a pole vířivosti [RV6].

Jak již bylo řečeno v podkapitole 3. 2, to hlavní, co určuje charakter proudu, je obsaženo v několika prvních POD módech, což vyplývá z hodnoty poměrné energie, resp. mohutnosti daného jevu. Obvykle vlastní tvary POD koeficientů mají párový charakter, což znamená, že vykreslené tvary mají podobnou hodnotu poměrné energie, resp. mohutnosti a velmi podobnou strukturu, jež se liší pouze fázovým posunem, tedy tvar prvního a druhého módu bude téměř totožný³, stejně tak třetího a čtvrtého atd. Nicméně z analýzy velkého množství dat lze vyzorovat, že existují případy, kdy v některém z prvních módů nejsou obsaženy jasné struktury úplavu, ale spíše tvar proudu a to i když je odečtena střední hodnota snímků (viz poznámka pod čarou). Čím by tento jev mohl být způsoben, bude rozebráno v podkapitole 5.2. Nejčastěji se toto vyskytuje u třetího módu, proto tedy byly v podkapitole 4.2 uváděny hodnoty Strouhalova čísla módu jedna a čtyři. Z výše uvedených důvodů budou pro přehlednost v tomto oddílu představeny vždy tvary prvního módu a případně třetího nebo čtvrtého módu pro pochopení charakteru a významu dějů v úplavu.

Pro porovnání změn v jednotlivých módech byla provedena nejdříve POD analýza pro data z měření samostatného válce pro průměry 10 a 20 mm. Z dat získaných z PIV měření bylo analyzováno rychlostní pole pouze pro $D = 10$ mm a Reynoldsovo číslo 450 Na obr. 38 je ukázán první mód POD z rychlostního pole (rychlostní pole – obr. č. 10)⁴. Tang et al. ve svém článku [23] prezentují obdobné výsledky (vstupní data taktéž získaná pomocí PIV), jak je ukázáno na obr. 39. Zde jsou vidět první módy z rychlostních polí (obr. 39 a)) a z polí vířivosti (obr. 39b)). Z dat získaných vizualizací byly zpracovány pomocí POD oba dva průměry válců pro tři, resp. dvě Reynoldsova čísla. Na obr. 40 jsou ukázány první a třetí mód z těchto měření pro $D = 10$ mm (u válce o $D = 20$ se jsou patrné obdobné struktury jako u $D = 10$ mm).

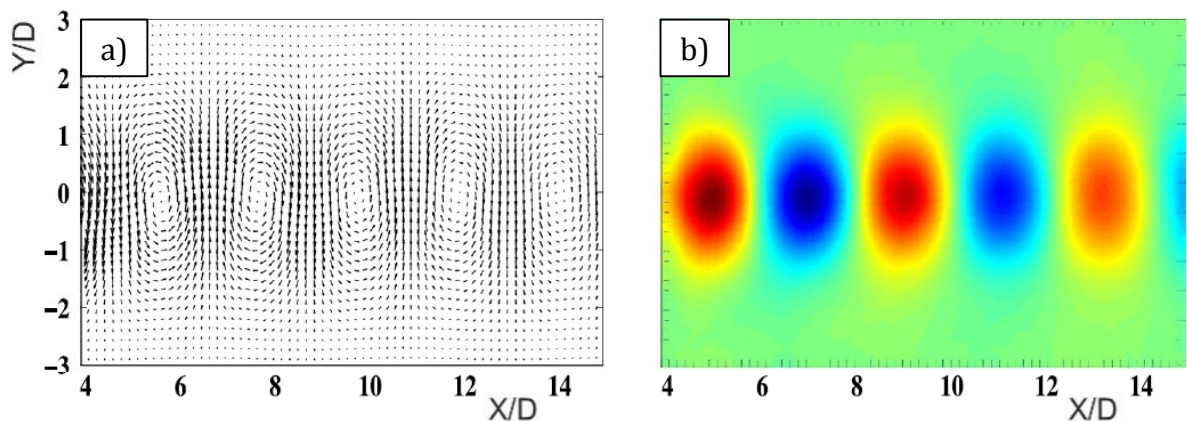
³ To platí v případě, kdy je odečtena z dat střední hodnota ze všech snímků. V případě, kdy odečtena není, je v prvním módu obsažena energie, resp. mohutnost samotného proudu.

⁴ POD z polí vířivosti zde není uváděno z důvodů absence původních dat z provedeního měření v době, kdy byla aplikována tato metoda na analýzy.



Obr. 38 První POD mód z PIV pro $D = 10$ mm a $Re = 450$

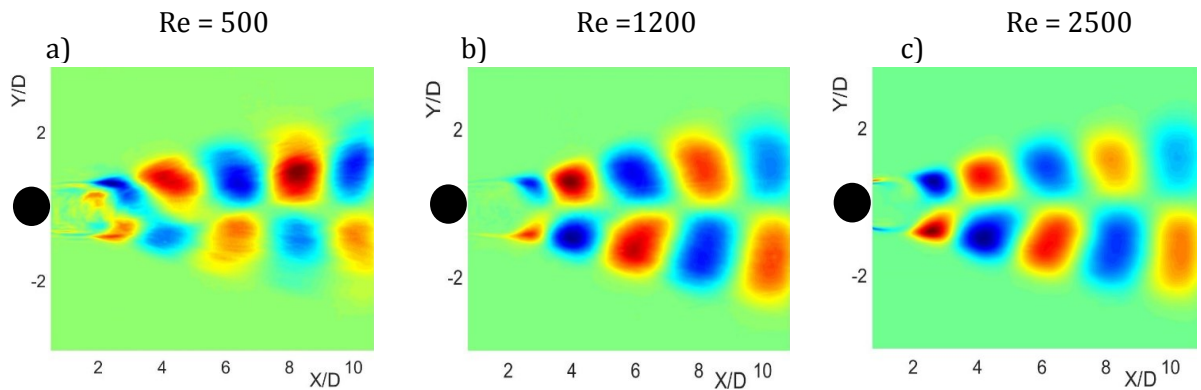
U POD módů získaných jak z dat PIV z rychlostního pole a pole vířivosti tak z dat z vizualizací, jsou vidět na první pohled tvarově odlišné struktury. Volba vstupních dat má vliv na výsledné tvary módů, protože POD analýza zpracovává a zvýrazňuje, jak se daná vstupní veličina podílí na celkovém charakteru proudu [22]. Z tohoto důvodu jsou patrné odlišnosti, i když ne nějak zásadní, jak ve vlastních tvarech POD módů, tak v poměrných energiích, resp. mohutnostech módů. Pokud je cílem získat informace o tvarech koherentních struktur z hlediska jak jejich definice, tak jak ji uvádí například Hussain [30], tak z hlediska fyzikálního přístupu, pro popis koherentních struktur se jeví jako nejvhodnější vstupní veličina vířivost, protože vířivost je z hlediska klasického principu relativity invariantní [22]. Pro zjištění vazby kinetické energie k jednotlivým dějům a tvarům proudění jsou výhodnější zase jako vstupní data rychlostní pole. Vzhledem k tomu, že změna intenzity odstínu šedé nemá žádný fyzikální význam, v jednotlivých módech jde spíše o zvýraznění struktur proudu a analogii s ostatními fyzikálními veličinami. Proto pro pochopení významu vlastních tvarů proudění je nutné získané módy zkoumat detailněji. Jedině tak lze nalézt paralelu mezi těmito tvary, které de facto popisují totožné děje v proudění, jenom každý trochu z jiného úhlu pohledu.



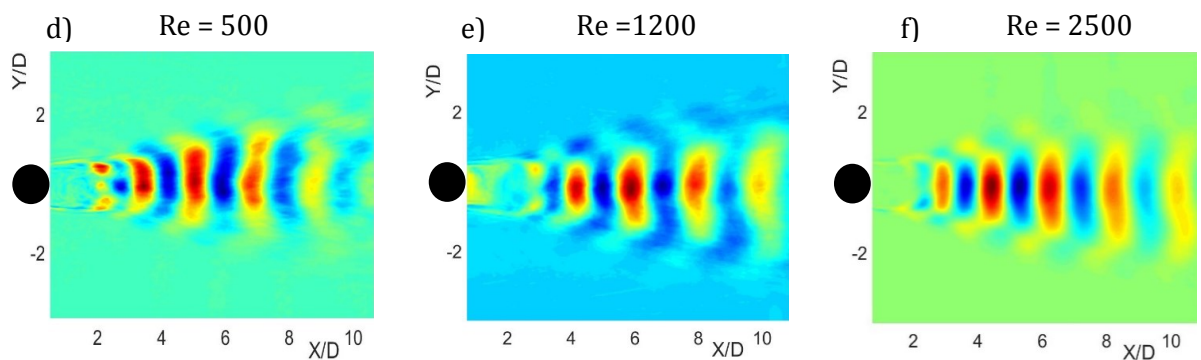
Obr. 39 První POD mód pro samostatný válec o $D = 10\text{mm}$ a $Re = 5800$ pro pole a) rychlostí, b) vířivosti, převzato z [23]

Na obr. 38-41 je tedy vykreslena tatáž Karmánova vírová stezka, liší se pouze Reynoldsova čísla. Z dekompozice rychlostních polí je patrný průběh a směr rychlostí charakteristický pro dominantní strukturu (obr. 38 a 39a)), první mód POD z pole vířivosti (obr. 39b)) zase ukazuje tvar dominantních koherentních struktur. Obr. 40 představuje Karmánovy vírové stezky za jedním válcem pro tři Reynoldsova čísla POD módů z vizualizace. V prvním módu je u všech režimů vidět shodná struktura (stejně je to i u 2. módu, který zde není zobrazen), jež je antisymetrická vůči ose x , a která představuje translační pohyb struktur v proudění [24]. Tyto struktury, které v čase reprezentuje POD koeficient a , mají dominantní frekvenci, resp. Strouhalovo číslo, jež odpovídá Strouhalovu číslu získanému z měření CTA. Módy 3 a 4 (není zde ukázán, ale jeho charakter odpovídá módu 3) odpovídají příčnému pohybu struktur [24]. Struktury jsou v tomto případě symetrické vzhledem k ose x a jejich frekvence odpovídá druhé nejsilnější frekvenci z CTA. Tomuto tvrzení odpovídají i tvary módů pro jednotlivé komponenty z POD rychlostního pole, jak je ukázáno na obr. 41. Vlastní tvary prvního módu ve směru proudění mají tentýž antisymetrický charakter jako je tomu u prvního módu POD z vizualizace. Tvary POD ve směru příčném jsou ve všech případech symetrické k ose x , spíše se ale navzájem podobají tvary z rychlostní polí a z polí z vířivosti (obr. 39b)). Právě sloučením informací z těchto výsledků lze dospět k porozumění, co reprezentují v tomto případě vlastní tvary POD módů z vizualizací.

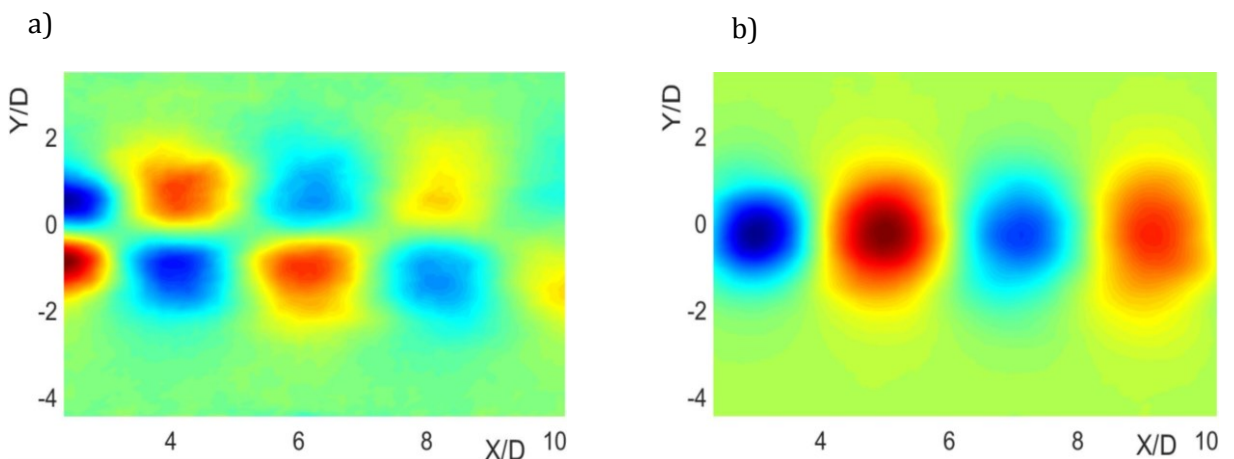
Mód 1 D = 10 mm



Mód 3



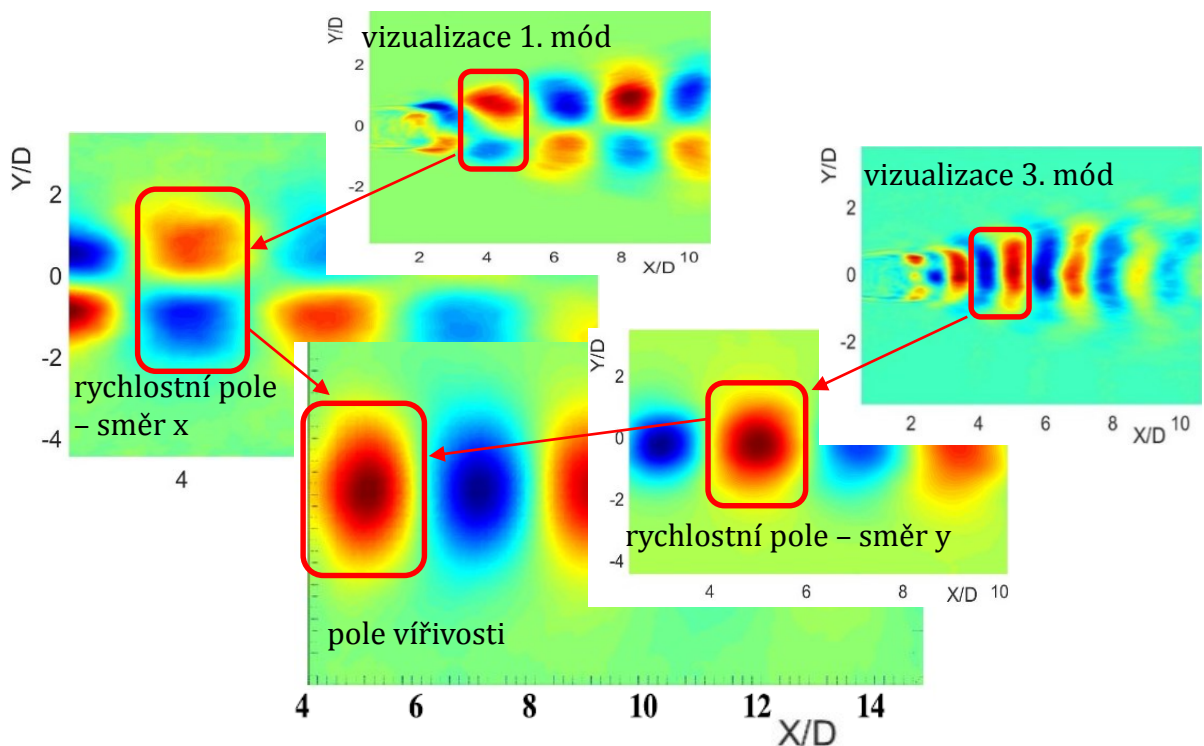
Obr. 40 První a třetí mód POD z vizualizací pro samostatný válec $D = 10$ mm, a) Mód 1, $Re = 500$, b) Mód 1, $Re = 1200$, c) Mód 1, $Re = 2500$, d) Mód 3, $Re = 500$, e) Mód 3, $Re = 1200$, f) Mód 3, $Re = 2500$



Obr. 41 První POD mód z rychlostního pole, a) pro směr x, b) pro směr y

Na obr. 42 je ukázána souvislost mezi strukturami ze všech typů vstupních dat. V červeném rámečku je identifikovaná totožná struktura, ale pokaždé je představena z jiného úhlu pohledu, resp. z pohledu vstupní veličiny. Jak již bylo řečeno, první POD mód z vizualizace odpovídá prvnímu módu z rychlostního pole ve směru x a to jak tvarově, tak i co se týče Strouhalova čísla.

Oba při tom ukazují pohyb struktur ve směru proudění. Třetí POD mód z vizualizace a první mód z rychlostního pole ve směru y zobrazují dominantní pohyb ve směru příčném, ale oproti předchozímu případu jsou zde trochu odlišné vlastní tvary a stejně tak i Strouhalova čísla. V případě prvního módu z rychlostního pole jak ve směru x tak ve směru y jsou dominantní frekvence, resp. Strouhalova čísla shodná. V případě prvního a třetího módu z vizualizace tomu tak není. Třetí mód má jako dominantní frekvenci dvojnásobek dominantní frekvence prvního módu. Zároveň jsou – li porovnány vlastní tvary, jeden tvar struktury u prvního módu z rychlostního pole odpovídá dvěma tvarům třetího módu z vizualizace, tak jak je to naznačeno na obrázku. To vysvětluje, proč je dominantní frekvence (Strouhalovo číslo) třetího módu dvojnásobná, oproti všem prvním módům. Na to, že dvě struktury tohoto módu jsou obdobou téhož u prvního módu rychlostního pole do směru y , ukazují především vzdálenost od válce a také rozměry útvaru.



Obr. 42 Identifikace struktur úplavu za jedním válcem z různých dat POD (pole vířivosti [23])

Nejvíce se asi uvedené analýzy POD liší v hodnotě poměrné energie, resp. mohutnosti. Pokud jde o analýzu z dat z rychlostních polí, tak u provedených měření první dva módy v sobě nesou 48% kinetické energie, Tang et al. [23] ($Re = 5800$) uvádí přibližně 69% a Zhang et al. [31] ($Re = 8000$) dospěl k hodnotě 56,6%. Rozdíl zde může patrně vznikat důsledkem odlišných Reynoldsových čísel a změnou struktury proudění. Současně autoři Tang et al. [23] uvádějí, hodnotu energie, resp. entropie z polí vířivosti pro první dva módy přibližně 68%, tedy téměř totožnou s kinetickou energií. Podobná hodnota energií ukazuje na to, že v tomto případě

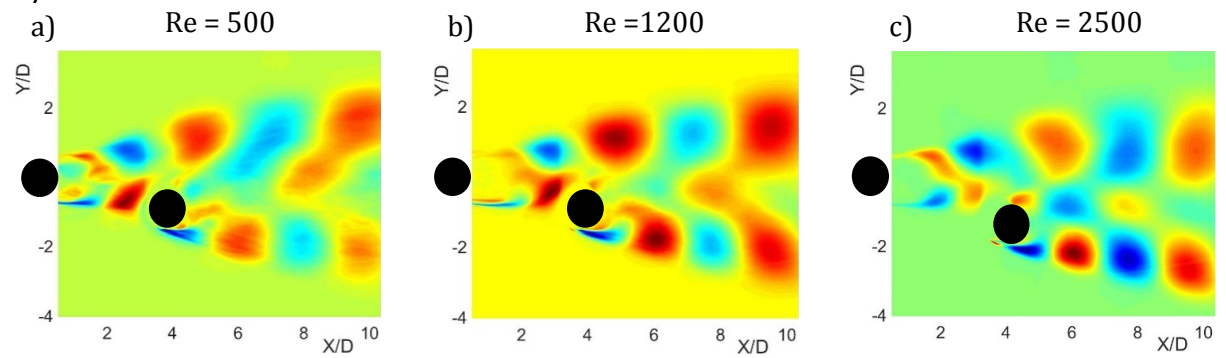
v proudění se většina energie soustřeďuje v koherentních strukturách. Poměrná mohutnost struktur z analýzy POD z vizualizací se pro první dva módy při $Re = 500$ pohybuje okolo 27%, pro $Re = 1200$ to je 37% a pro $Re = 2500$ má poměrná mohutnost prvních dvou módů hodnotu 41%. Z toho je zřejmé, že mohutnost prvních módů v tomto případě pro daný rozsah Reynoldsových čísel má tendenci se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem narůstat. To ostatně potvrzuje i práce autorů Brevisse a Garcii-Villalby [24] ($Re = 16200$), kteří uvádějí hodnotu poměrné mohutnosti prvních dvou módů 53%, vstupní data byla taktéž z vizualizace. Nicméně jak ukazuje uvedený výsledek autorů Zhang et al. [31], při určitém Reynoldsově čísle může poměrná energie, resp. mohutnost v prvních módech začít klesat, alespoň tedy v případě dat z rychlostních polí. Zde ale vyvstává otázka, zda to platí právě pro POD z libovolných vstupních dat, či se to váže k jednomu typu dat. Tuto otázku mohou vysvětlit další výzkumy.

Pozice 1

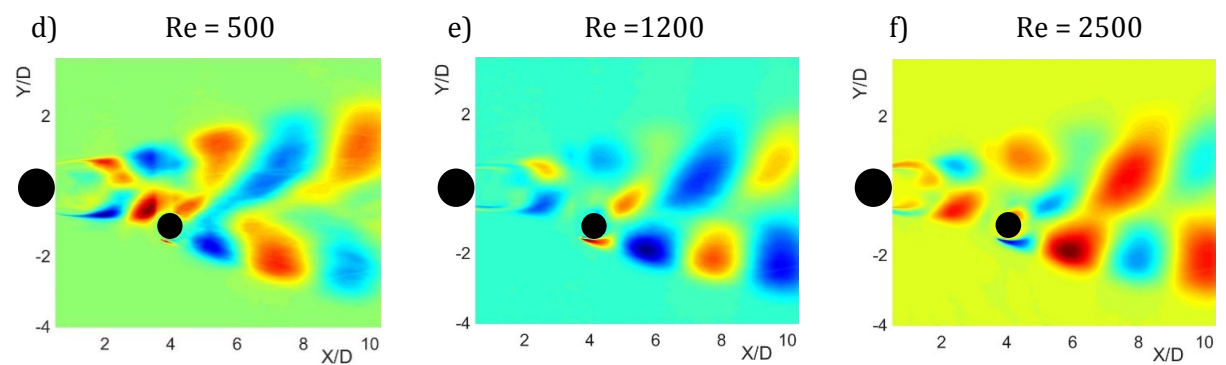
Jak již bylo uvedeno v předchozích podkapitolách, Pozice 1 druhého válce je pozicí, která nemá ani v jedné konfiguraci tak výrazný vliv na kompletní úplav. Obr. 43 ukazuje první POD módy pro různá Reynoldsova čísla a různé D/d z analýzy dat z vizualizací a obr. 44 některé významné další módy z totožných dat. Na obr. 45a), b) jsou pak zobrazeny první módy pro jednotlivé složky rychlostí a na obr. 45c), d) jsou pak první a třetí mód z polí vířivosti (vše při $Re = 500$, $D/d = 2,5$). Vektorové pole prvního módu z dat PIV se pak nalézá v Příloze 2 na obr. P2a). U všech měření je patrný rozdíl v dominantních strukturách proudění oproti samostatnému válci, ale zároveň je zde také vidět i výraznější rozdíl mezi výsledky pro stejná Reynoldsova čísla a stejná D/d ale odlišná vstupní data.

Jak již bylo víceméně řečeno v pasáži věnující se vizualizacím, k nejvýraznějšímu ovlivnění v Pozici 1 dochází při poměru válců $D/d = 1$, kdy už vyvinutá vírová stezka válce prvního naráží do povrchu válce druhého. Z prvního módu je zřetelně vidět (obr. 43a)-c)), že u nejnižšího Reynoldsova čísla se stihá zformovat jedna struktura (odpovídá jednomu víru) ještě před impaktem na povrch druhého válce. S narůstající rychlostí dochází ale pouze k částečnému zformování stezky. U nejvyššího Reynoldsova čísla je pak zřetelně vidět výraznou vlastní vírovou stezku druhého válce od vnější i vnitřní smykové vrstvy, z čehož je patrné, že u tohoto válce narostl význam jeho struktur v celkovém úplavu. Podobný trend lze spatřit i u vyšších poměrů D/d , ačkoliv čím vyšší D/d , tím význam vírové stezky druhého válce je menší. Z dalších POD módů (některé jsou uvedeny na obr. 44) jsou v některých případech patrné jasné struktury odpovídající vírům (např. obr. 44c), d), e), f)), tak jak to bylo ukázáno u samostatného válce.

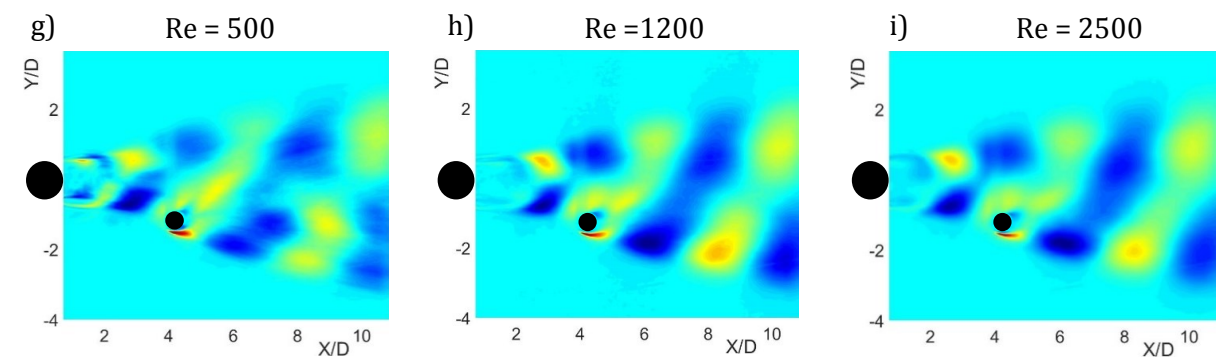
D/d = 1



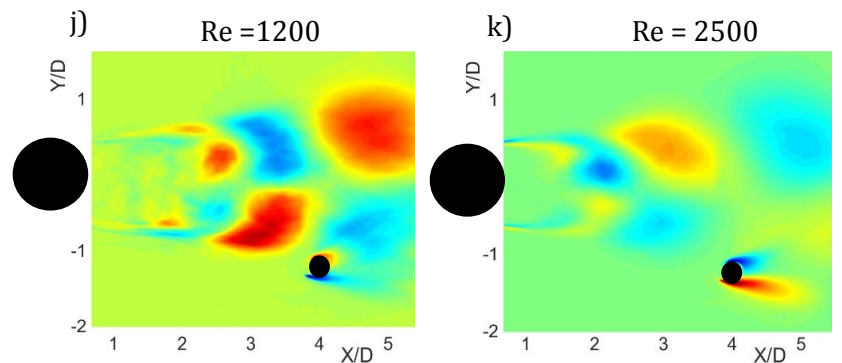
D/d = 1,67



D/d = 2,5



D/d = 5

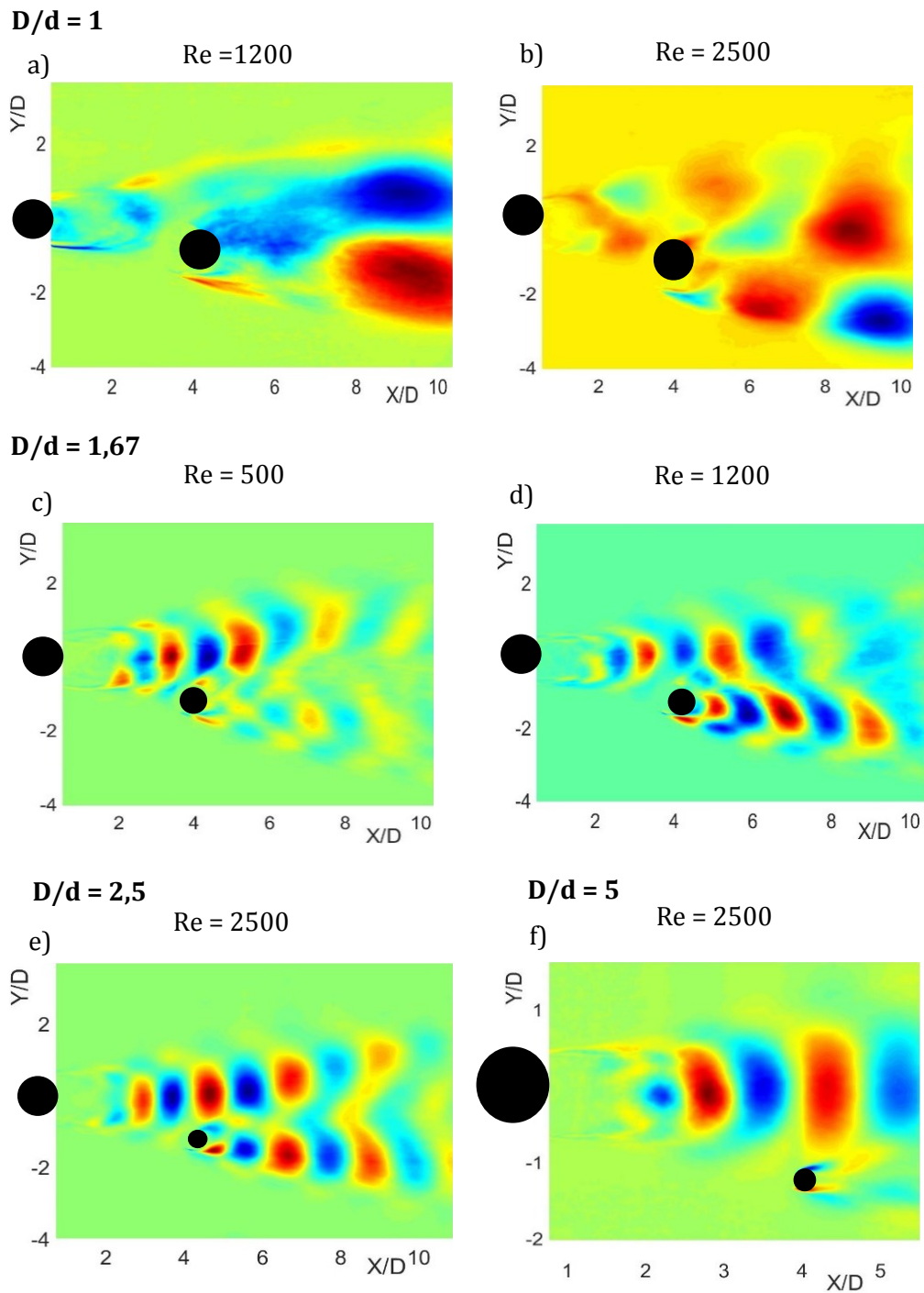


Obr. 43 První mód POD z vizualizací pro Pozici 1, a) D/d = 1, Re = 500, b) D/d = 1, Re = 1200, c) D/d = 1, Re = 2500, d) D/d = 1,67, Re = 500, e) D/d = 1,67, Re = 1200, f) D/d = 1,67, Re = 2500, g) D/d = 2,5, Re = 500, h) D/d = 2,5, Re = 1200, i) D/d = 2,5, Re = 2500, j) D/d = 5, Re = 1200, k) D/d = 5, Re = 2500

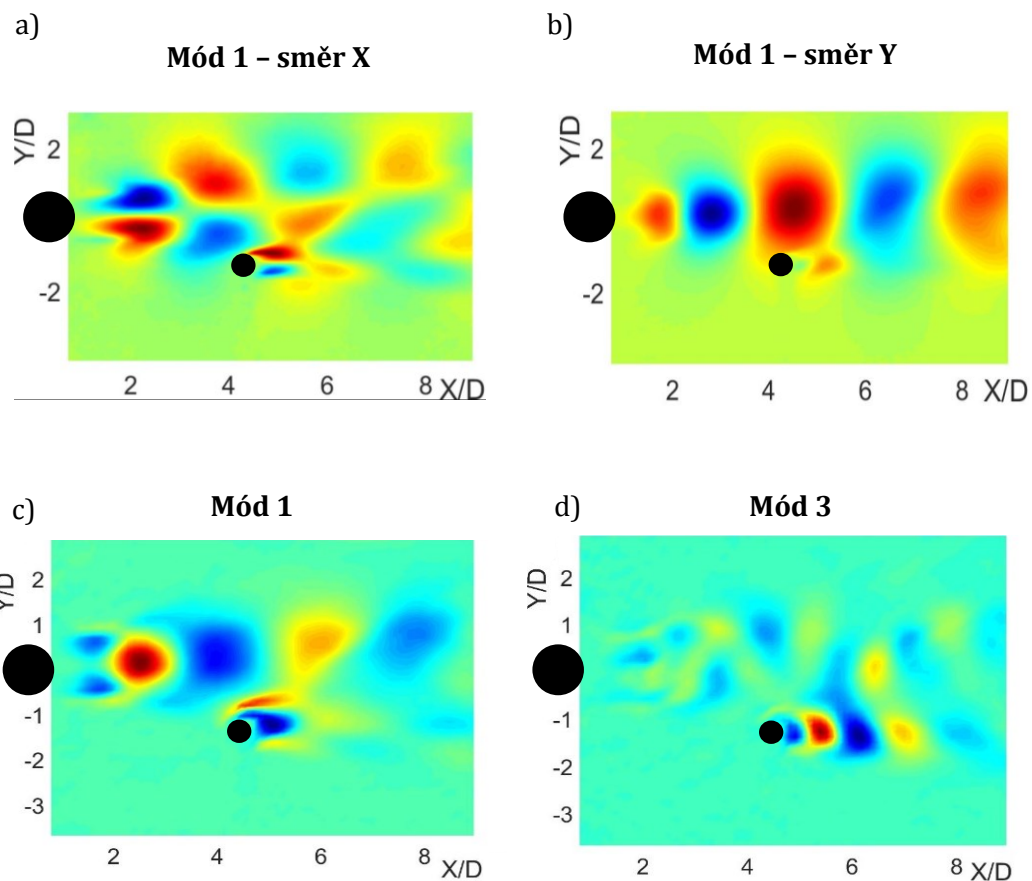
U poměrů $D/d = 1,67$ a $D/d = 2,5$ jsou koherentní struktury jasně patrné pro $Re = 1200$ a 2500 až ve čtvrtých módech (obr. 44 d), e)) a ukazují, že co se týče významu, jsou vírové stezky od obou válců stejně dominantní. V případě poměru $D/d = 1$ nastává pro vyšší Reynoldsova čísla odlišná situace. Při Reynoldsových číslech 1200 a 2500 jsou patrné jednak tvary nekoherentního proudění (obr. 44a)) anebo translační pohyb koherentních struktur (obr. 44b)). Struktury odpovídající příčnému pohybu se začínají vyskytovat až v sedmém módu, z čehož plyne, že význam pohybu ve směru y (tedy rotace) má podstatně menší význam v proudění než pohyb ve směru x . Pro $D/d = 5$ vzhledem k pozorované oblasti nepodávají obr. ky informace o vývoji úplavu za malým válcem, nicméně alespoň ukazují situaci v blízkém úplavu druhého válce. U $Re = 2500$ je zde asi ze všech pozic nejmarkantněji vidět, že významnou strukturou v proudu jsou obě smykové vrstvy menšího válce. A ve třetím módu (obr. 44f)) jsou opět vidět obdobné struktury, jaké se vyskytují i u menších poměrů válců.

U POD módů získaných z dat PIV (obr. 45), z rychlostního pole a pole vířivosti, jsou vidět na první pohled tvarově odlišné struktury vůči strukturám POD módů z vizualizace stejně, jako tomu bylo v případě samostatného válce. Na obrázku prvního módu z vířivosti (obr. 45c)) se mezi prvním a druhým válcem vyskytují 4 útvary. Vzhledem k tomu, co bylo uvedeno v předchozích odstavcích o vlastních tvarech POD módů z vířivosti, lze konstatovat, že tyto útvary jsou koherentními strukturami. Dva modré⁵ útvary značí dva víry v blízkém úplavu, tak jak je znázorňuje obrázek proudnic (obr. P1a)). Dvě následující struktury jsou víry v Karmánově stezce. Totéž lze rozpoznat i z prvního módu z rychlostních polí pro směr X i Y . Obdobu těchto struktur lze nalézt i v POD módech z vizualizací, jak je naznačeno na obr. 46, kde je identifikována struktura (vír) v oblasti mezi válci pro $D/d = 2,5$, $Re = 500$, jak v prvním tak ve třetím módu. V červeném obdélníku jsou vyznačeny totožné víry, v obrázku a) je mód 1, na obrázku b) mód 3 a na obrázku c) odpovídající struktura z POD vířivosti.

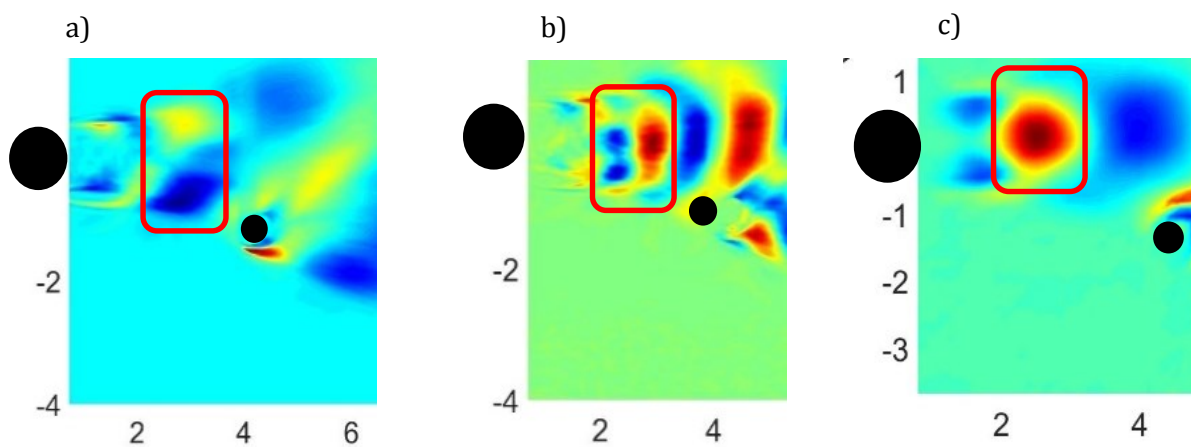
⁵ Škála modré barvy u POD módů značí záporné hodnoty a červená škála kladné hodnoty vlastní funkce. Stupnice barevné škály zde není uváděna z důvodu absence jejího fyzikálního významu (v případě POD z vizualizace). Barevná škála je zde významná pouze z hlediska porovnání struktur a jejich tvarů pro jednotlivé módy.



Obr. 44 Třetí mód POD vizualizace, a) $D/d = 1$, $Re = 1200$, b) $D/d = 1$, $Re = 2500$, c) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, e) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, f) $D/d = 5$, $Re = 2500$



Obr. 45 Pozice 1, $D/d = 2,5$, $Re = 500$, a) první mód rychlostní pole ve směru X, b) první mód rychlostní pole ve směru Y, c) první mód vířivost, d) třetí mód vířivost

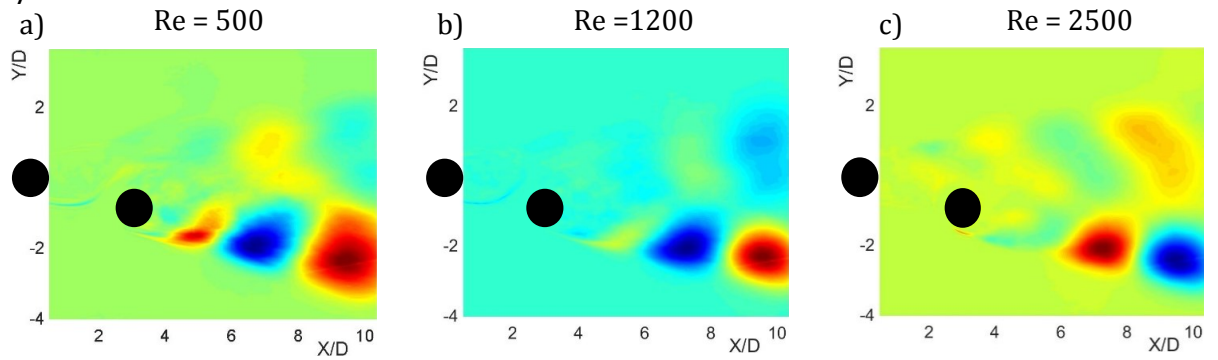


Obr. 46 Identifikace struktury za prvním válcem pro $D/d = 2,5$, $Re = 500$, a) první mód vizualizace, b) třetí mód vizualizace, c) první mód vířivost

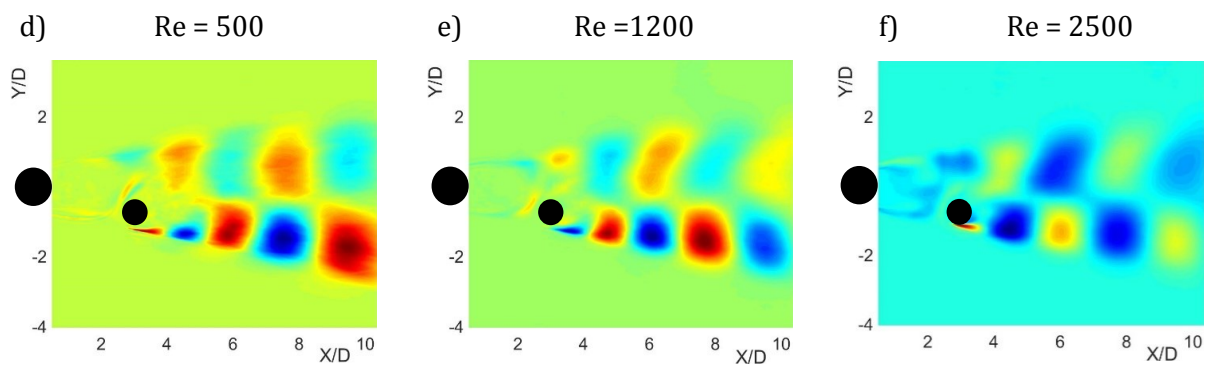
Pozice 2

Pro $D/d = 1$ je patrné, že nejmohutnější struktury jsou vytvářeny vnější smykovou vrstvou druhého válce (obr. 47 a) – c)). Jak již bylo popsáno u vizualizací, nedochází zde již ke zformování vírové stezky ještě před zadním válcem, ale smykové vrstvy prvního válce se napojují na smykové vrstvy druhého válce. Právě toto napojování a nejednoznačně vyvinutá stezka zapříčiňuje oslabení formování vírů ze smykových vrstev prvního válce a vnitřní smykové vrstvy druhého válce. Tento jev se projeví i snížením dominantní frekvence celkového úplavu, viz obr. 26, což je způsobeno právě umístěním druhého válce v proudovém poli. S narůstajícím Reynoldsovým číslem dochází zřetelně i k oslabení struktur za zadním válcem. U zvyšujícího se poměru válců D/d a i Reynoldsova čísla je zřetelně patrné, že význam smykových vrstev prvního válce narůstá (u $D/d = 1,67$, $Re = 500$ a 1200 stále dominují struktury druhého válce) a nejsou tak zeslabovány připojením vnitřní smykové vrstvy druhého válce, což je zřetelně patrné na obr. 47d) – i). Pro konfiguraci $D/d = 5$ (obr. 47j), k)) není možné bohužel kvůli velikosti měřené oblasti jednoznačně popsat jevy odehrávající se v úplavu obou válců. Nicméně alespoň za povšimnutí zde stojí chování obou smykových vrstev menšího válce. Jak už to částečně vyplynulo i z vizualizačních měření, úplav menšího válce je zcela pohlcen rozvíjející se Karmánovou stezkou velkého válce. Z prvního módu je také jasně vidět, že vnější smyková vrstva druhého válce je ohýbána směrem ke středové ose prvního válce. Co se týče dominantních frekvencí, s narůstajícím poměrem D/d dochází ke zvyšování dominantní frekvence oproti případu $D/d = 1$. To potvrzuje výše uvedené, že dominantní struktury celkového úplavu jsou výrazně určovány prvním válcem. Toto vše se ale týká dominantní struktur, jež i podle charakteru, převážně reprezentují translační pohyb. Co se týče příčného pohybu, který by měl být patrný ve vyšších módech, je situace komplikovanější. U poměru $D/d = 1$ ve vyšších módech vystupují spíše struktury odpovídající jednotlivým smykovým vrstvám a je zde patrný spíše jejich pohyb translační. Jako příklad je uveden na obr. 48a) třetí mód pro $Re = 2500$. U poměru $D/d = 1,67$ pro $Re = 500$ a 1200 je vidět obdobná situace, v případě $Re = 2500$ ve vyšších módech jsou struktury nejednoznačné. Stejně nejednoznačné vlastní tvary se vyskytují i v případě $D/d = 2,5$ a 5 , ale tentokrát pro všechna Reynoldsova čísla (příklad obr. 48b)). Tato situace je patrná právě i v druhých dominantních frekvencích (Strouhalových číslech), jak je zřejmé obzvláště v případě $D/d = 2,5$, kde bylo získáno nejvíce dat, viz obr. 21.

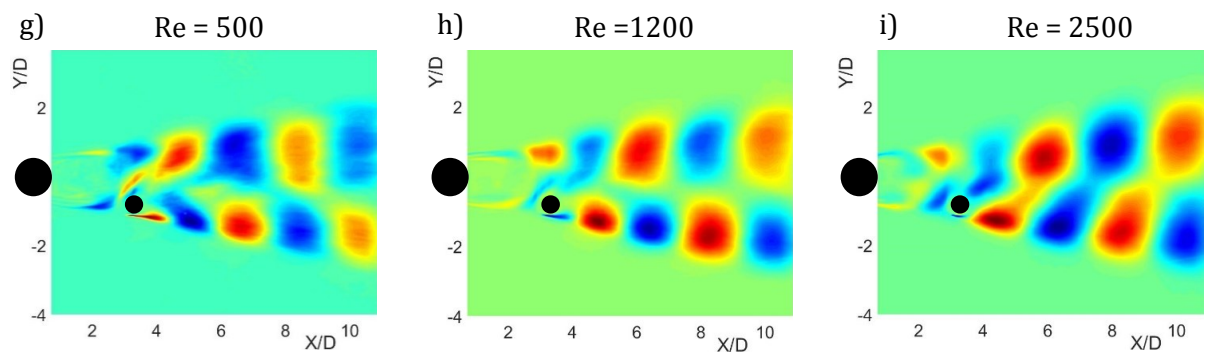
D/d = 1



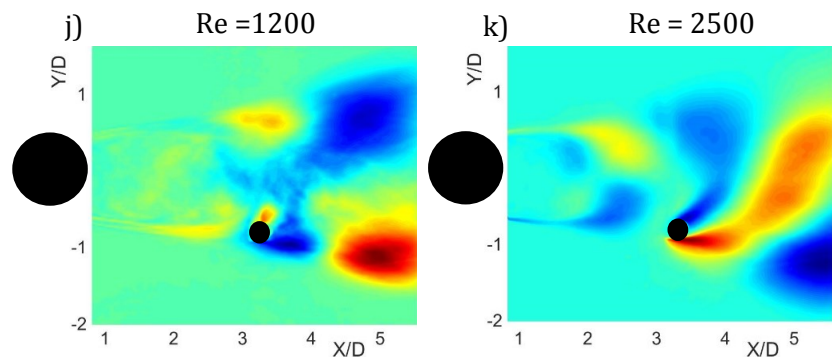
D/d = 1,67



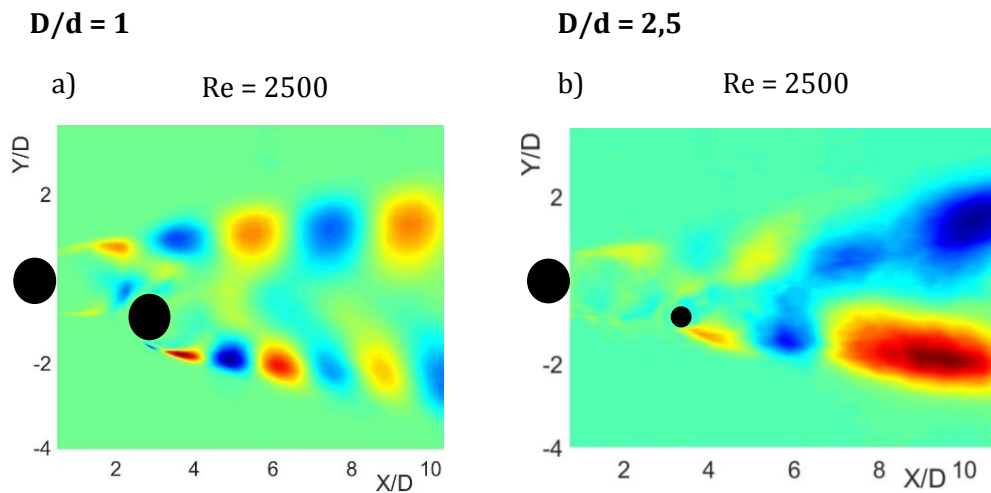
D/d = 2,5



D/d = 5

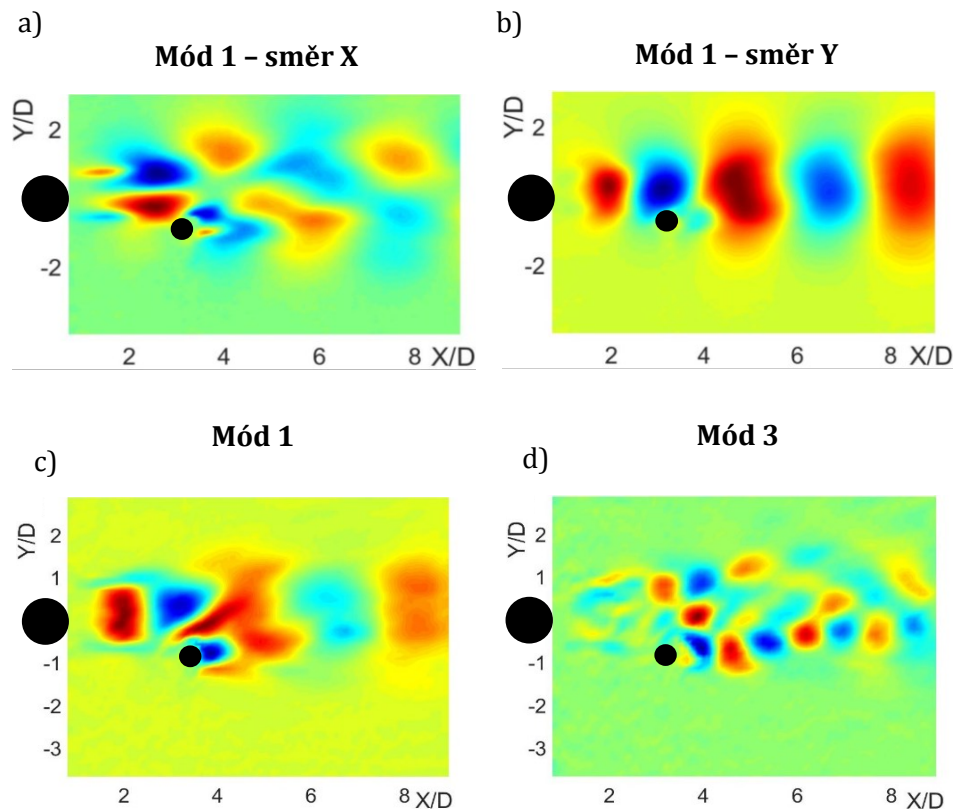


Obr. 47 První mód POD z vizualizací pro Pozici 2, a) D/d = 1, Re = 500, b) D/d = 1, Re = 1200, c) D/d = 1, Re = 2500, d) D/d = 1,67, Re = 500, e) D/d = 1,67, Re = 1200, f) D/d = 1,67, Re = 2500, g) D/d = 2,5, Re = 500, h) D/d = 2,5, Re = 1200, i) D/d = 2,5, Re = 2500, j) D/d = 5, Re = 1200, k) D/d = 5, Re = 2500



Obr. 48 a) Třetí mód $D/d = 1$, $Re = 2500$, b) čtvrtý mód $D/d = 2,5$, $Re = 2500$

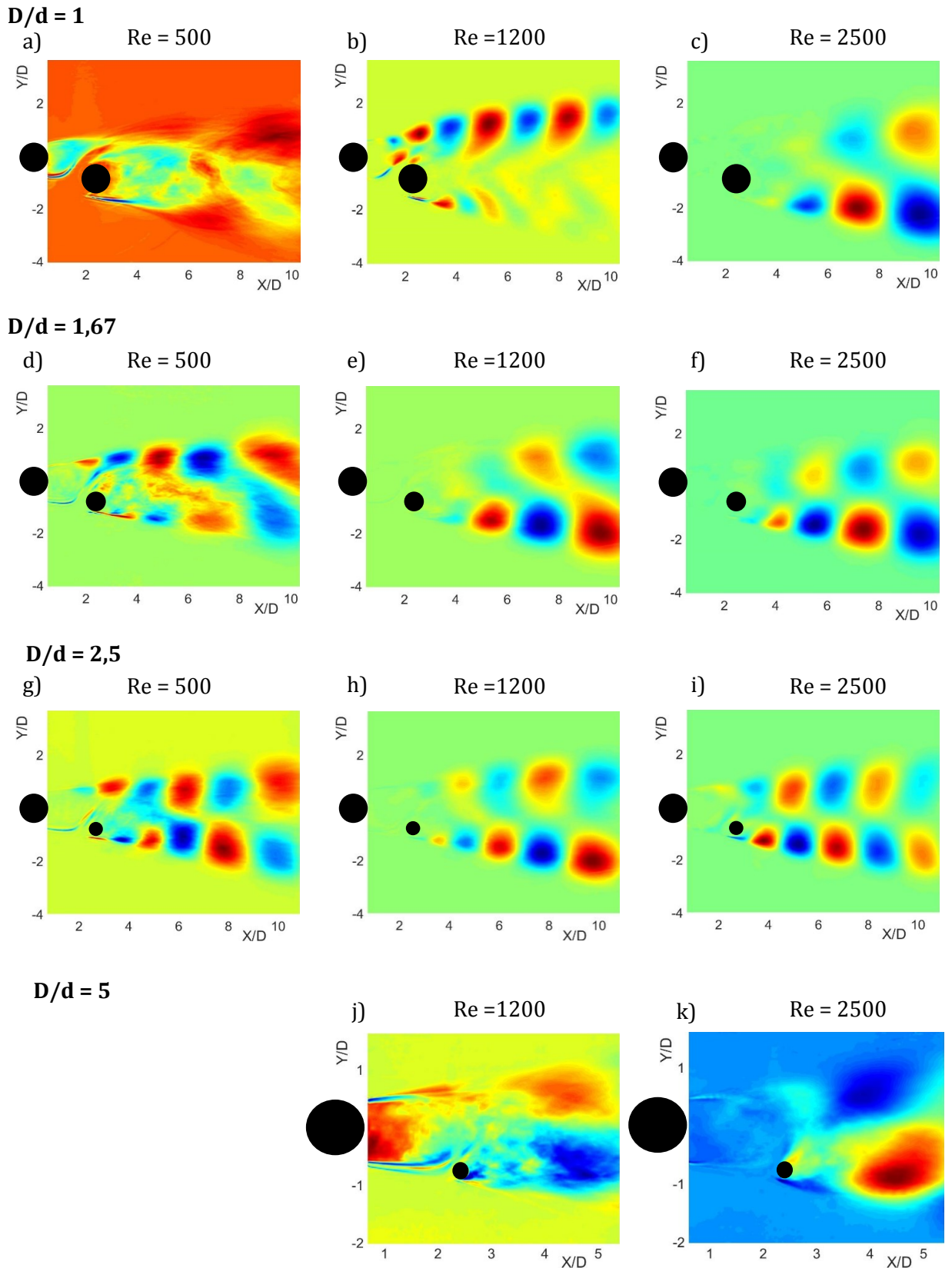
Na výsledcích analýzy POD z rychlostních polí a z polí vířivosti (obr. 49) pro $D/d = 2,5$ a $Re = 500$ je vidět podobná situace, jako v případě POD módů z vizualizace. Obzvláště obr. 49d) ukazuje na neperiodický výskyt vírů oblasti za prvním válcem a za první polovinou druhého válce, náznak vírové stezky je pouze za dolní polovinou druhého válce od jeho vnější smykové vrstvy. Co se týče identifikace struktur, opět je možné rozpoznat tvary, které odpovídají stejným strukturám v proudovém poli, tak jako to bylo ukázáno u samostatného válce a Pozice 1.



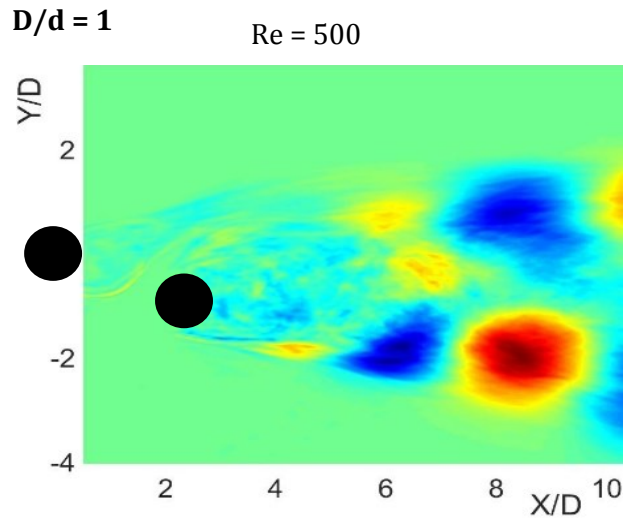
Obr. 49 Pozice 2, $D/d = 2,5$, $Re = 500$, a) první mód rychlostní pole ve směru X, b) první mód rychlostní pole ve směru Y, c) první mód vířivost, d) třetí mód vířivost

Pozice 3

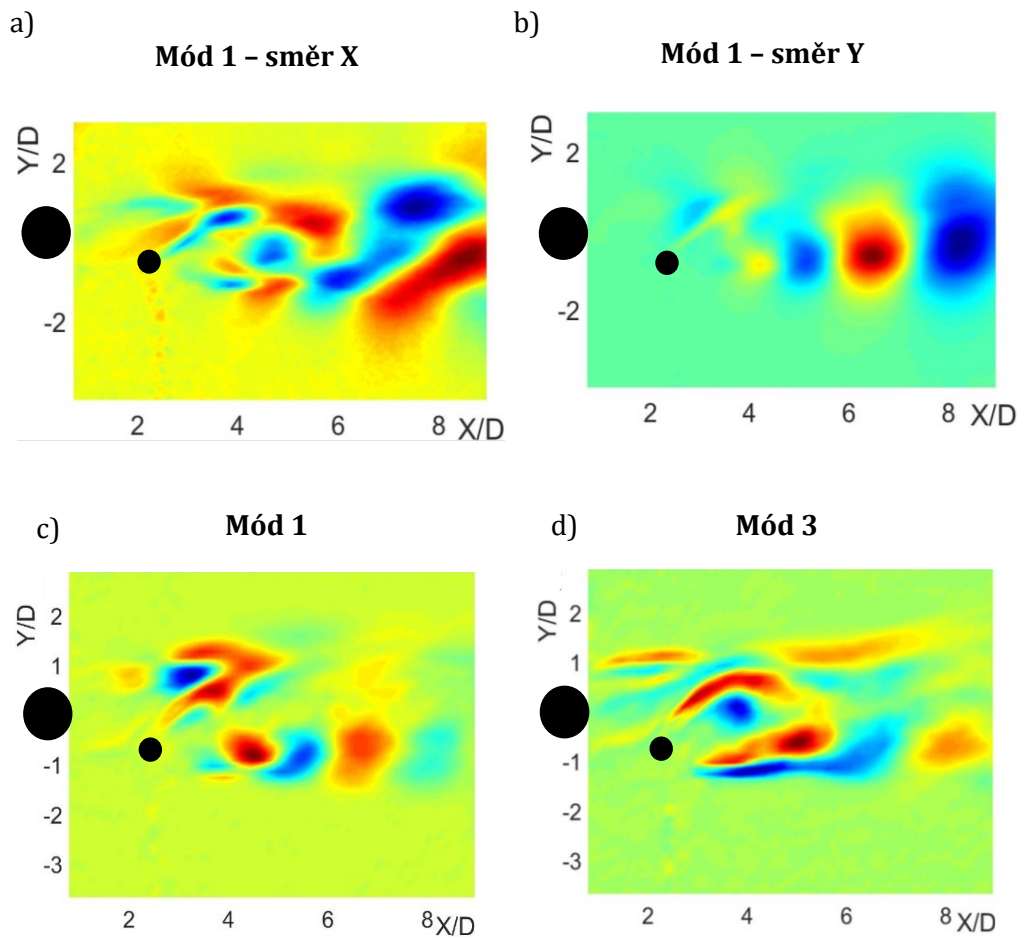
Z vizualizací vyplynulo, že pro $D/d = 1$ dochází k nesynchronizovanému formování vírů ze smykových vrstev, což se evidentně projevuje na prvním POD módu tohoto poměru. U $Re = 500$ (obr. 50a)) není rozpoznatelný ani náznak koherentní struktury, spíše viditelný útvar prezentuje proud. Struktury, které v sobě nesou víry, jsou zřetelné až u vyšších módů (obr. 51). U vyšších Reynoldsových čísel se již v prvním módu vyskytují projevy smykových vrstev a jejich rozvoje ve vírovou stezku. Nicméně pro $Re = 1200$ to jsou spojené smykové vrstvy a vírová stezka prvního válce, avšak pro $Re = 2500$ je nejsilnější strukturou vírová stezka druhého válce od vnější smykové vrstvy. U nižších Reynoldsových čísel evidentně dochází k oslabení celkové vírové stezky, protože hodnota Strouhalova čísla klesá až zhruba do $Re = 800$. Poté mírně roste, ale nedosáhne hodnoty samostatného válce (viz obr. 30). S narůstajícím poměrem D/d se zřetelně zvyšuje význam druhého válce a jeho vírové stezky (viz obr. 50e) – k)), což není úplně totožné tvrzení, jaké bylo učiněno u popisu struktur čistě z vizualizací. To může být dáno tím, že v úplavu dochází k jevům, jež nelze okem postřehnout, resp. postřehnout jejich význam. Jak bude uvedeno v následujícím pododstavci věnujícímu se mohutnosti módů, u Pozice 3 pro vyšší D/d ve většině případů je v prvních dvou módech obsažena nejmenší nebo druhá nejmenší poměrná mohutnost struktur a následující dva módy mají hodnotu jen o něco menší. Z toho plyne, že v této Pozici dochází k narušování formování jasných struktur a patrně zde dochází ke střídání formací struktur (režimů). To ostatně se odráží i ve výsledcích z měření CTA, kde, jak bylo ukázáno v předchozí kapitole, není snadné (obzvláště u $D/d = 2,5$) určit jednu výraznou dominantní frekvenci. A stejnou nejednoznačnost lze spatřit i ve výsledcích z PIV měření. Na obr. 52 jsou opět ukázány výsledky z prvních módů z rychlostních polí ve směru X a Y a z polí vířivosti pro $D/d = 2,5$, $Re = 500$. V obou prvních módech jsou patrné výrazné struktury formující se za druhým válcem, stejně jako tomu bylo u prvních POD módů z vizualizací. Ve třetím módu u vířivosti je možné vidět, že zde dochází k interakci různých koherentních struktur. A stejně jako u POD z vizualizací, i poměrná mohutnost, resp. kinetická energie, resp. enstrofie jsou v této poloze jedny z nejnižších v prvních dvou módech a není výrazný rozdíl v jejich velikost u dalších dvou módů (viz následující pododstavec 4. 3. 2).



Obr. 50 První mód POD z vizualizací pro Pozici 3, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$



Obr. 51 Třetí mód, $D/d = 1$, $Re = 500$

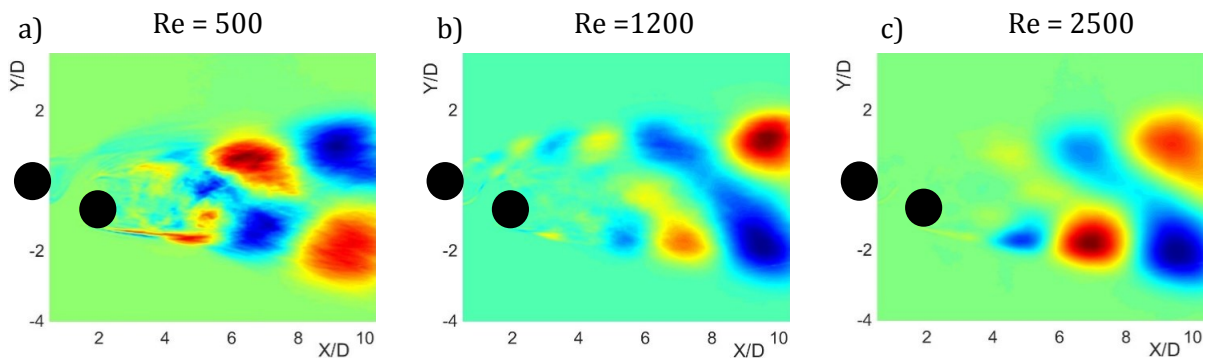


Obr. 52 Pozice 3, $D/d = 2,5$, $Re = 500m$, a) první mód rychlostní pole ve směru X, b) první mód rychlostní pole ve směru Y, c) první mód vířivost, d) třetí mód vířivost

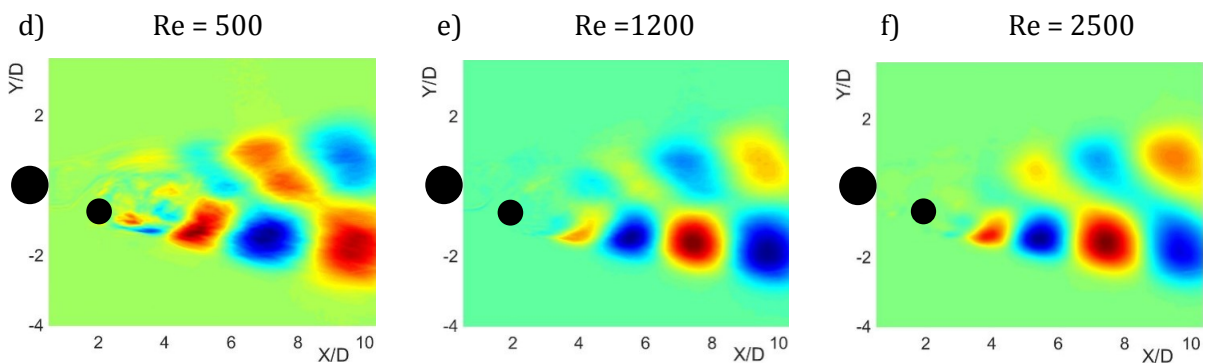
Pozice 4

Pro poměr válců $D/d = 1$ je úplav předního válce výrazně stlačen a smykové vrstvy prvního válce společně s vnitřní smykovou vrstvou druhého válce vytváří víry a synchronizují se tak s vírovou stezkou od vnější smykové vrstvy druhého válce, jak je vidět na obr. 53a). S narůstajícím Reynoldsovým číslem nicméně dochází k většímu výskytu poruch v místech interakce smykových vrstev předního válce s vnitřní smykovou vrstvou druhého, jak to bylo pozorováno i u vizualizačních měření. Toto je dobře patrné také z POD módů na obr. 53b) a c), kde většího významu nabývá vírová stezka od zadního válce a jeho vnější smykové vrstvy. Se zvětšujícím se poměrem D/d tento trend pokračuje a jak je zřejmé i z prvních módů poměrů $D/d = 1,67$ a $2,5$, druhý válec má značný vliv na velikost struktur (vírů), které se ve vírové stezce vytvářejí, což je velmi dobře vidět na obr. 53d) – i). Silné ovlivnění úplavu druhým válcem, u kterého je nabíhající rychlost snížena vlivem předního válce (viz obr. 12d)), může mít velký podíl na snížení velikosti dominantní frekvence, resp. Strouhalova čísla pro tuto konfiguraci pro rozmezí Reynoldsových čísel cca od 500 do 4000 s výjimkou poměru $D/d = 5$. Zde lze usuzovat, že se s narůstajícím poměrem D/d zřejmý efekt druhého válce na vírovou stezku snižuje. Co se týče identifikace výrazných koherentních struktur v úplavech pomocí vyšších módů POD, dochází zde k obdobné situaci jako v případě Pozice 3. Úplav je narušován dalšími poruchami, takže v následujících vyšších módech nelze rozeznat struktury s příčným pohybem. Ty se začínají objevovat až od 7. módu výše. Tyto závěry opět potvrzují výsledky z analýzy dat z PIV. Zejména POD z vířivosti názorně potvrzuje jednak výrazný vliv zadního válce (obr. 54 c)) a ve třetím módu (obr. 54d)) ukazuje v oblasti za prvním válcem výskyt neperiodických koherentních struktur.

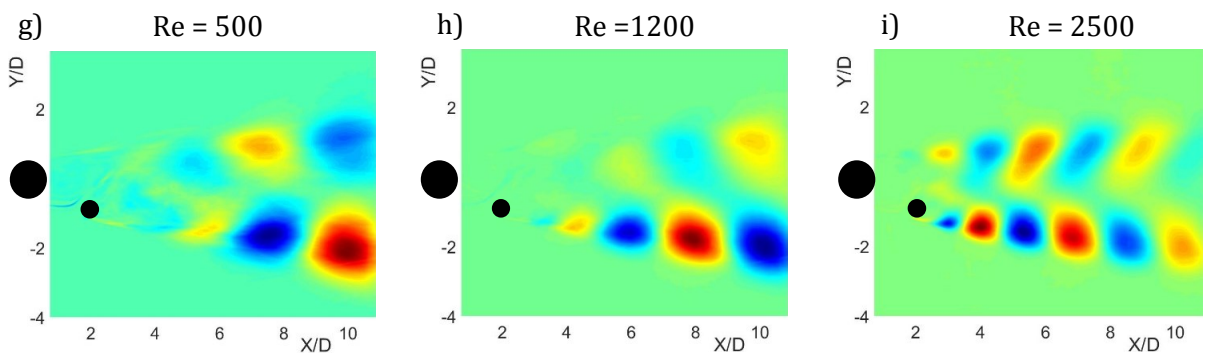
D/d = 1



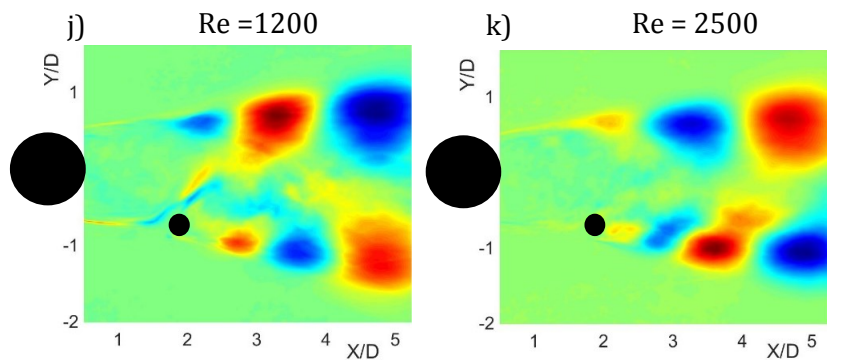
D/d = 1,67



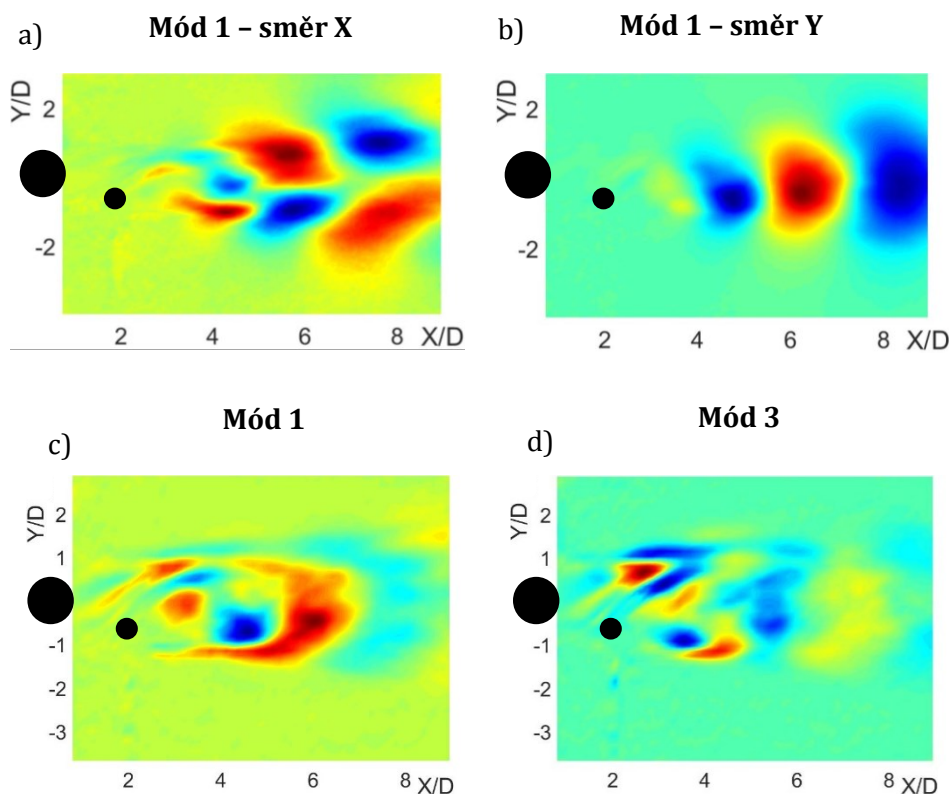
D/d = 2,5



D/d = 5



Obr. 53 První mód POD z vizualizací pro Pozici 4, a) D/d = 1, Re = 500, b) D/d = 1, Re = 1200, c) D/d = 1, Re = 2500, d) D/d = 1,67, Re = 500, e) D/d = 1,67, Re = 1200, f) D/d = 1,67, Re = 2500, g) D/d = 2,5, Re = 500, h) D/d = 2,5, Re = 1200, i) D/d = 2,5, Re = 2500, j) D/d = 5, Re = 1200, k) D/d = 5, Re = 2500



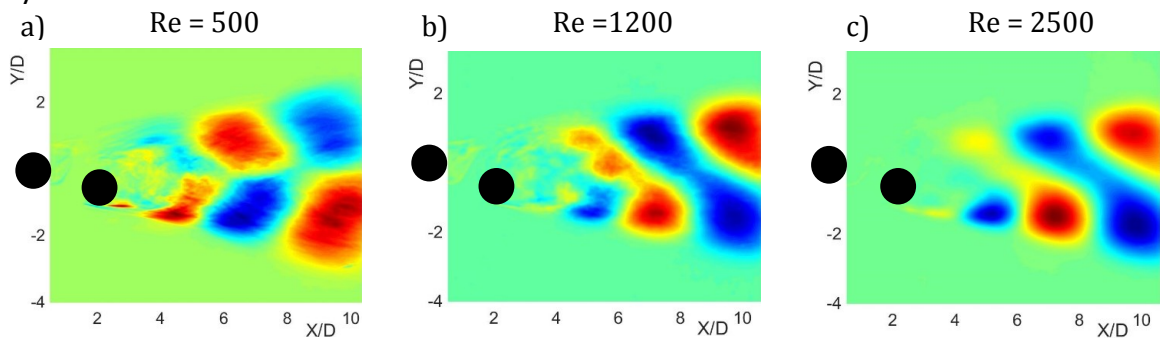
Obr. 54 Pozice 4, $D/d = 2,5$, $Re = 500m$, a) první mód rychlostní pole ve směru X, b) první mód rychlostní pole ve směru Y, c) první mód vířivost, d) třetí mód vířivost

Pozice 5

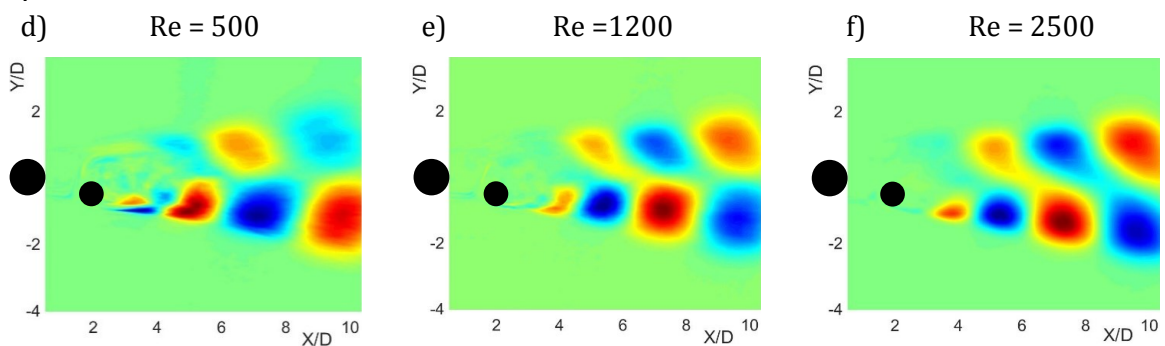
Pozice 5 dle členění v [16] patří do stejné oblasti jako Pozice 3, ale jak již bylo uvedeno v popisu vizualizací v podkapitole 4.1, jsou zde znatelné rozdíly. V případě $D/d = 1$ je blízký úplav předního válce ještě více stlačen oproti předchozím pozicím. Opět zde spolu nejvíce interagují obě smykové vrstvy předního válce s vnitřní smykovou vrstvou druhého válce a opět vlivem interakcí dochází v této oblasti ke většímu výskytu poruch vůči oblasti nejvíce ovlivněné vnější smykovou vrstvou druhého válce, což lze opět pozorovat na vlastních tvarech proudění v prvním módu na obr. 55. Nicméně co se týče zformovaných struktur, v této Pozici nedochází k tak výraznému narušování struktur, jako v Pozicích předchozích. To dokládají i vlastní tvary proudění v třetím módu při $Re = 500$ ve všech třech poměrech D/d , jak je ukázáno na obr. 56. Stejně jako u samostatného válce lze zde rozeznat a přesně identifikovat koherentní strukturu (vír), jaký lze nalézt i na obrázku prvního módu z vířivosti (obr.57c)) a prvního módu z rychlostního pole ve směru Y a jeho paralelu ve třetím módu z POD vizualizace (obr. 56c)). U vyšších Reynoldsových čísel se ve třetím a čtvrtém módu objevuje opět více poruch, případně je zde výrazný tvar samotného proudu. Zajímavým jevem u této konfigurace válců je posunutí oblasti, kde se formují víry ve směru proudění zhruba do vzdálenosti $3D$ u $D/d = 5$ až do $4D$ u $D/d = 1$, což je zřetelně patrné u vlastních tvarů POD módů z PIV (obr. 57). Celkově se dá říci, že u této Pozice již není patrná vlastní vírová stezka druhého z válců, přesto ale druhý válec výrazně ovlivňuje celkový

úplav, jeho Pozice má podíl na výrazném snížení Strouhalova čísla dominantní frekvence oproti případu samostatného válce a to ve všech poměrech D/d (obr. 25, 32,35e), 36e)).

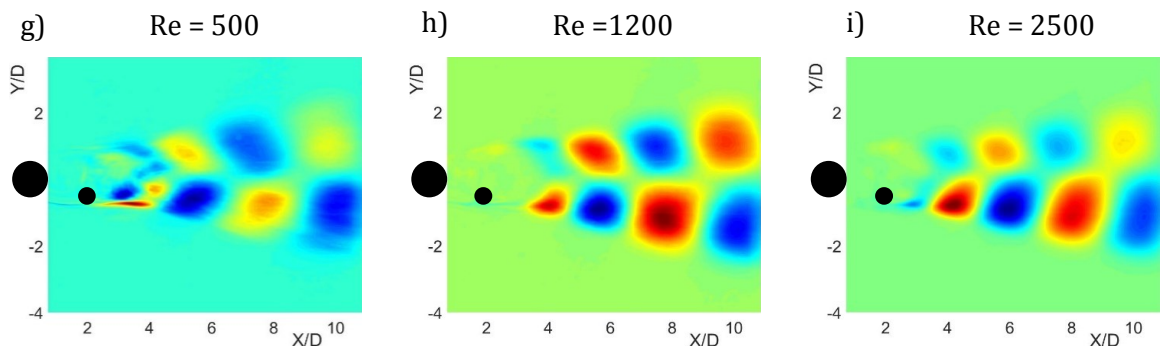
$D/d = 1$



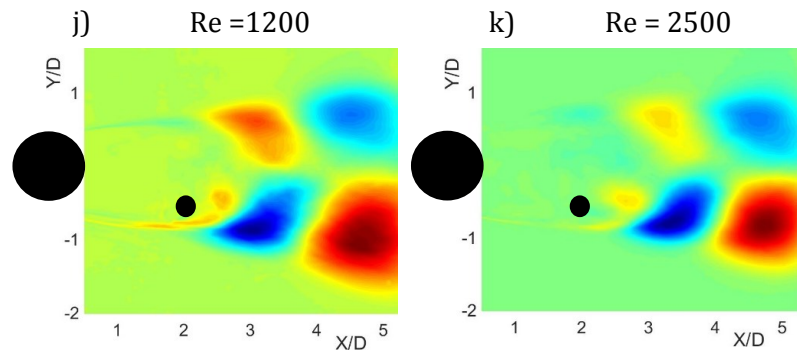
$D/d = 1,67$



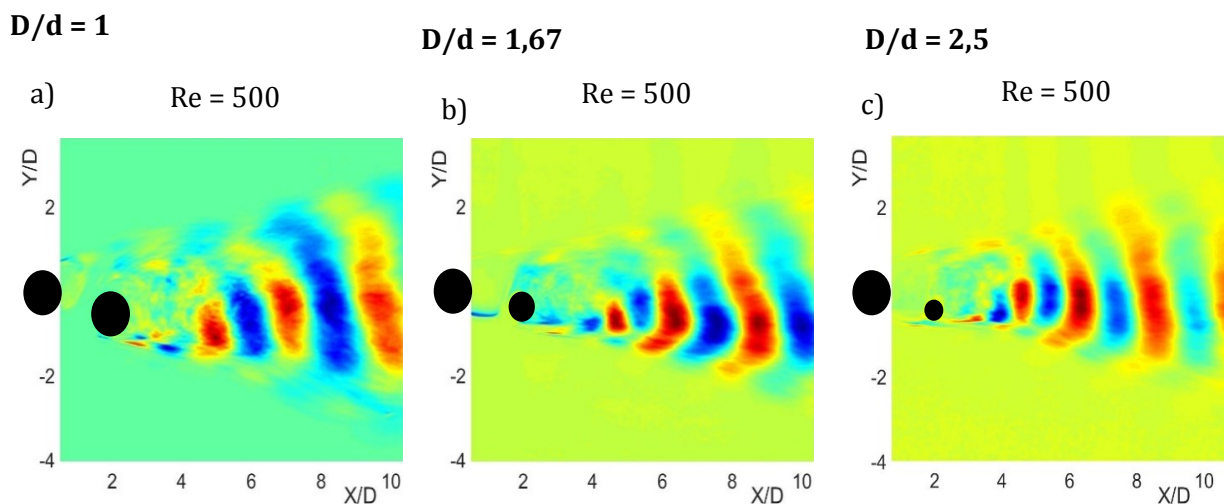
$D/d = 2,5$



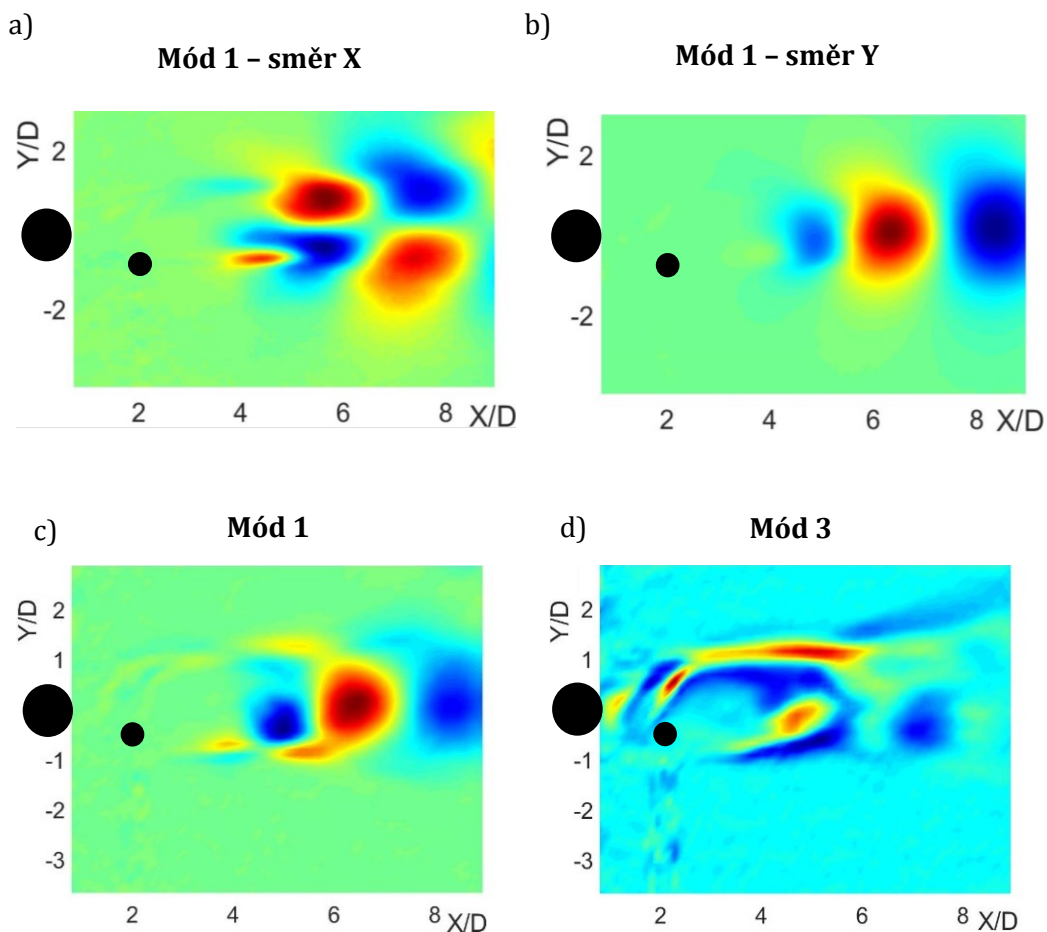
$D/d = 5$



Obr. 55 První mód POD z vizualizací pro Pozici 5, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$



Obr. 56 Třetí POD módy Pozice 5, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, c) $D/d = 2,5$, $Re = 500$



Obr. 57 Pozice 5, $D/d = 2,5$, $Re = 500m$, a) první mód rychlostní pole ve směru X, b) první mód rychlostní pole ve směru Y, d) třetí mód vířivost

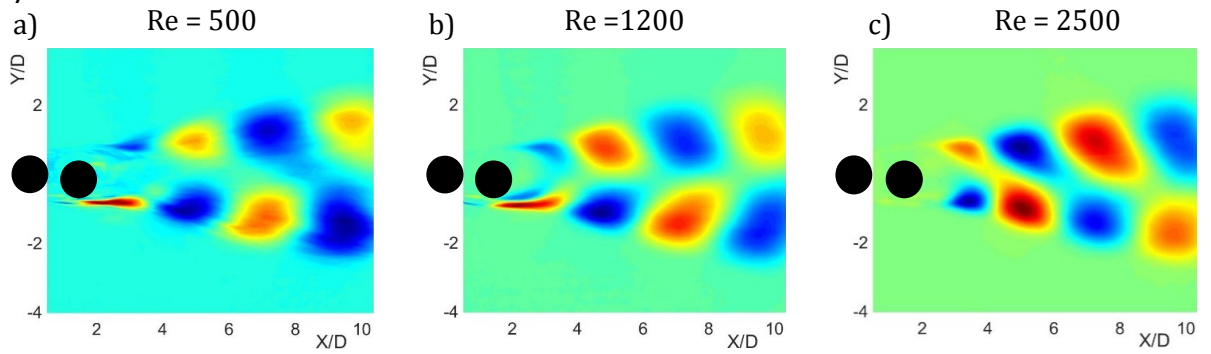
Pozice 6

Tato Pozice se blíží tandemové konfiguraci, ale lehké vyosení druhého válce vnáší do systému větší možnost výskytu poruch, jak to bylo pozorováno u vizualizací. Z POD módů je zřetelněji vidět, co může být zdrojem těchto poruch. V podstatě téměř u všech konfigurací a Reynoldsových čísel vystupuje v prvním módu výrazná vnější smyková vrstva od druhého válce, což ukazuje obr. 58. S narůstajícím poměrem D/d a lehce i se vzrůstajícím Reynoldsovým číslem její význam trochu slábne, pouze u $D/d = 5$ není v podstatě patrný. V následujících módech (na obr. 59 ukázka pro $D/d = 2,5$, $Re = 500$) je možné pozorovat opět charakteristické struktury náležející příčnému pohybu a lze je jednoznačně dát do souvislosti s výskytem vírů z POD vířivosti (obr. 60c)). Na všech výsledcích z měření PIV je taktéž jednoznačně vidět formování struktur a lze dobře nalézt víry stejně jako v předchozích Pozicích ve třetím módu z POD vizualizace (obr. 59). Na obr. 60d), kde je ukázán třetí mód z vířivosti, je dobré si povšimnout významu struktur tvořících se vlivem druhého válce. Zde je evidentní, že spojení spodních smykových vrstev válců dochází k zesílení významu z nich vznikajících vírů, což může mít vliv na výslednou dominantní frekvenci v úplavu.

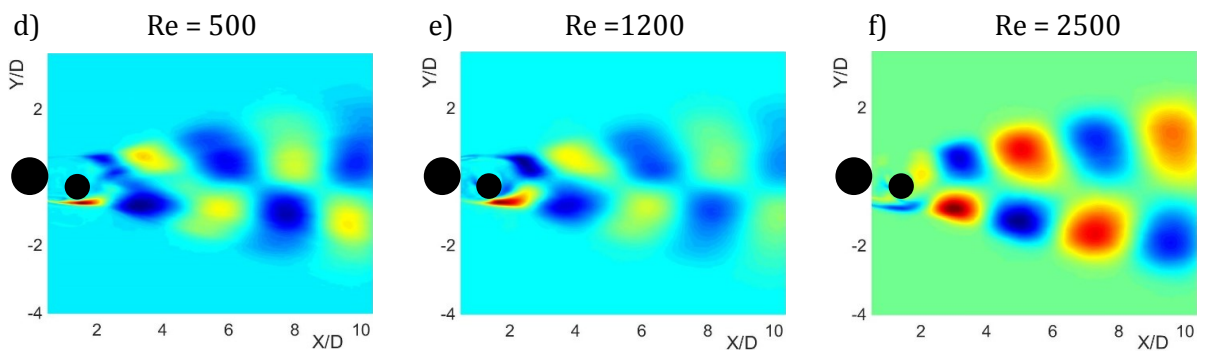
Pozice 7

V této Pozici jde už o tandemovou konfiguraci, kdy se smykové vrstvy druhého válce napojují na smykové vrstvy válce prvního. Vlastní tvary úplavů všech konfigurací jak v prvním tak i v třetím módu jsou velmi podobné vlastním tvarům POD u samostatného válce (obr. 61). Rozdíly lze pozorovat pouze v místě začátku formování dominantních struktur. S narůstajícím poměrem D/d dochází k posunu místa jejich vzniku ve směru proti proudu. U $D/d = 1$ je rozdíl oproti samostatnému válci v počtu struktur (vírů) tvořících se ve sledované oblasti, kdy je zřetelně patrné, že v případě dvou válců je počet menší než v případě samostatného válce. Z analýz frekvenčních spekter jak z CTA měření tak z POD koeficientů vyplývá, že pro tento poměr válců v této Pozici dochází ke snížení dominantní frekvence, resp. Strouhalova čísla (obr. 34). Lze tedy říci, že druhý válec v této konfiguraci tlumí vírovou stezku válce prvního. Jak už ale bylo zmíněno výše, toto neplatí pro vyšší poměry, kdy právě z frekvenčních analýz je zcela zřejmé, že se zvyšujícím se poměrem narůstá i velikost dominantní frekvence, resp. Strouhalova čísla, jehož průběhy v závislosti na Reynoldsově čísle jsou ukázány na obr. 27, 35g) a 36g). Co se týče poruch zaznamenaných ve vyšších POD módech, lze říci, že se objevují v menší míře než v předchozích případech a obvykle ve třetím anebo čtvrtém módu (příklad na obr. 62) jsou jednoznačně vidět struktury příslušející příčnému pohybu a odkazujícími na výskyt vírů, které jsou zřetelně patrné v prvním i třetím módu POD z vířivosti (obr. 63c, d)) a jejich translační pohyb z POD rychlosti ve směru X (obr. 63a). Stejně jako v předchozích případech zde lze dobře rozeznat koherentní struktury v POD z rychlosti ve směru Y (obr. 61b)) a POD z vířivosti (obr. 61c)) a nalézt jejich ekvivalent ve třetím módu z POD vizualizace (obr. 62).

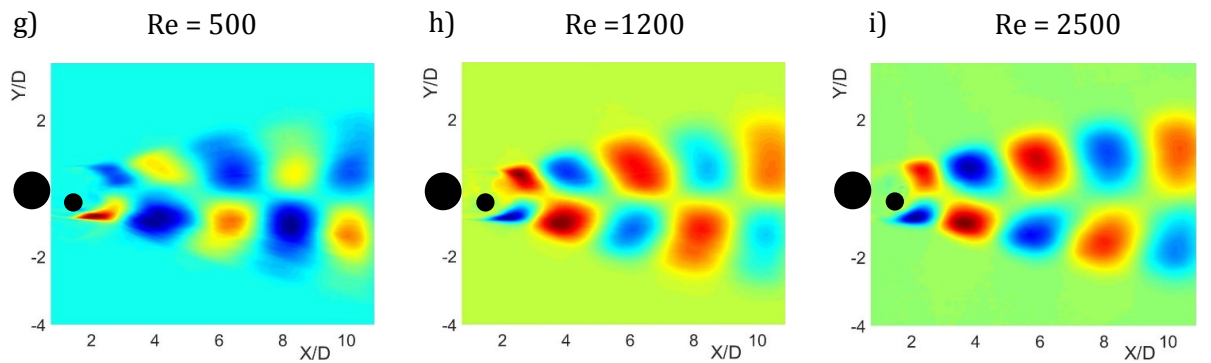
D/d = 1



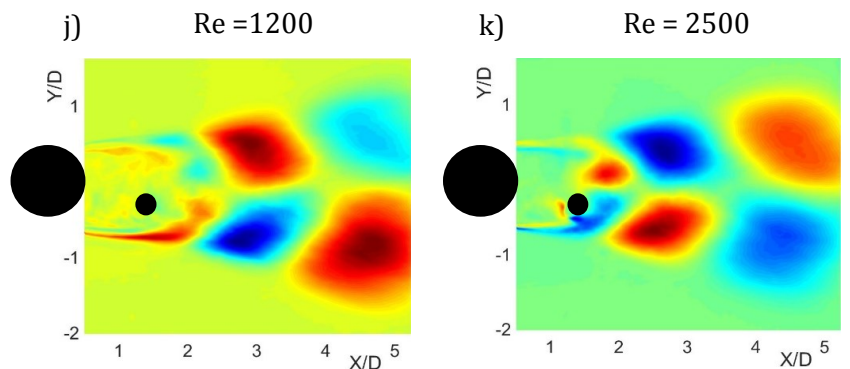
D/d = 1,67



D/d = 2,5



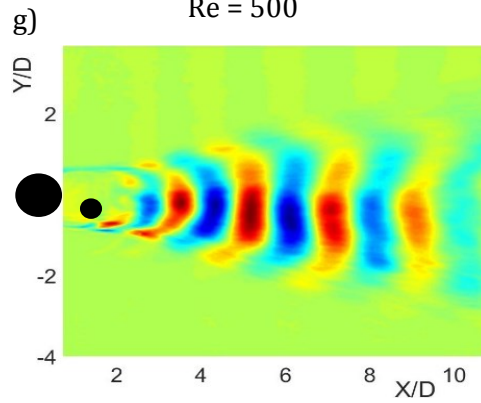
D/d = 5



Obr. 58 První mód POD z vizualizací pro Pozici 6, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$

$D/d = 2,5$

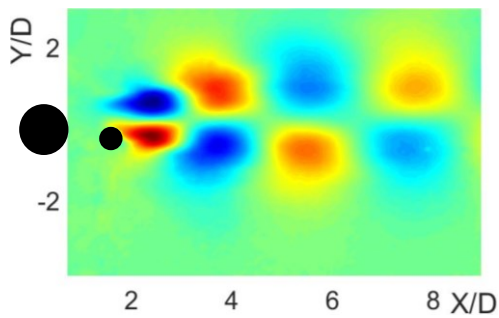
$Re = 500$



Obr. 59 Třetí POD mód Pozice 6, $D/d = 2.5$, $Re = 500$

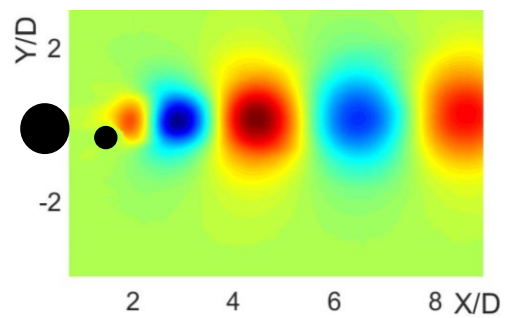
a)

Mód 1 - směr X



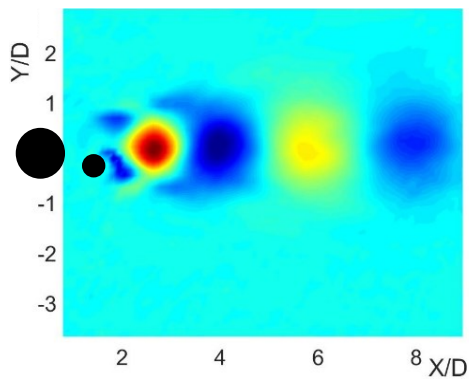
b)

Mód 1 - směr Y



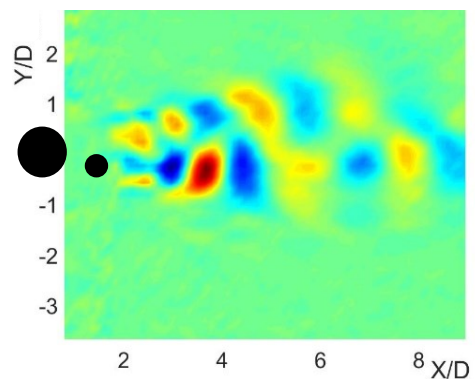
Mód 1

c)



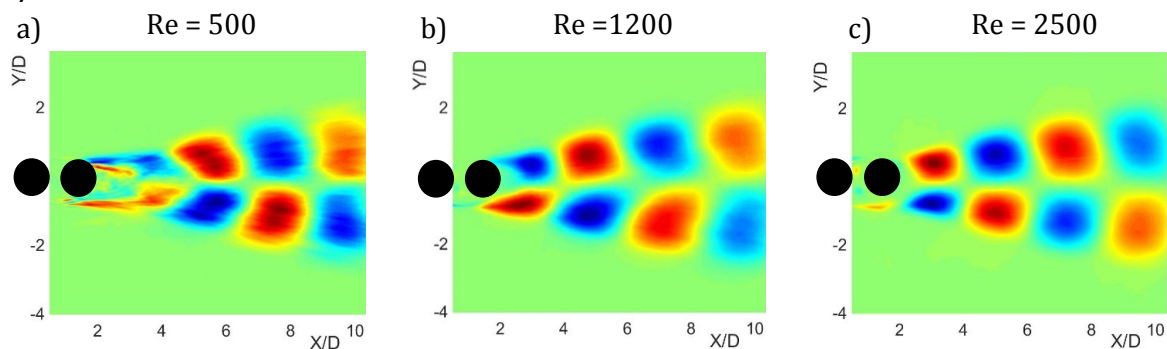
Mód 3

d)

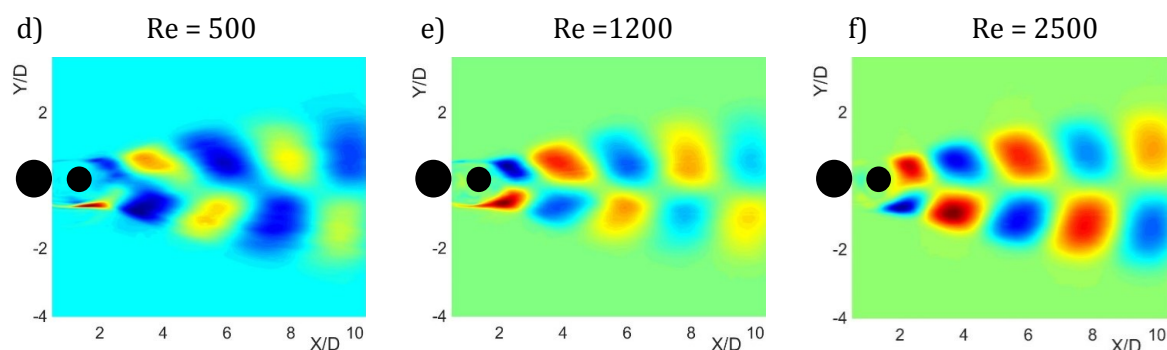


Obr. 60 Pozice 6, $D/d = 2,5$, $Re = 500$, a) první mód rychlostní pole ve směru X, b) první mód rychlostní pole ve směru Y, d) třetí mód vířivost

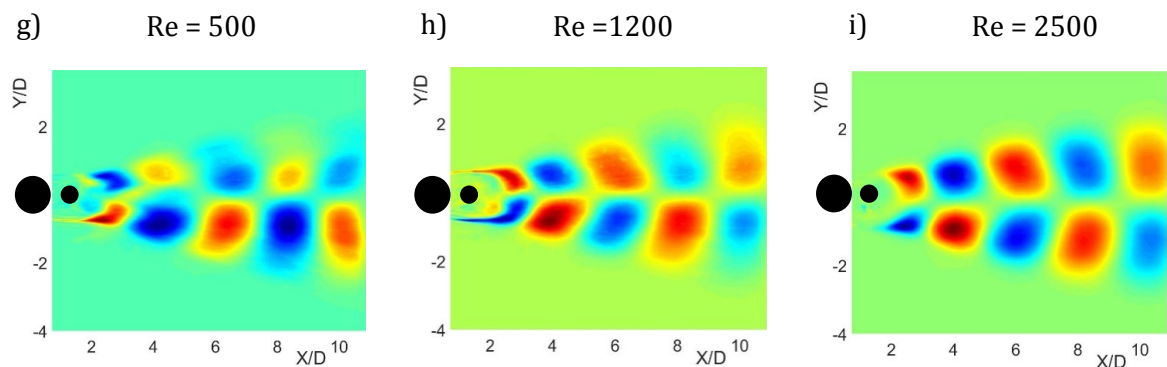
D/d = 1



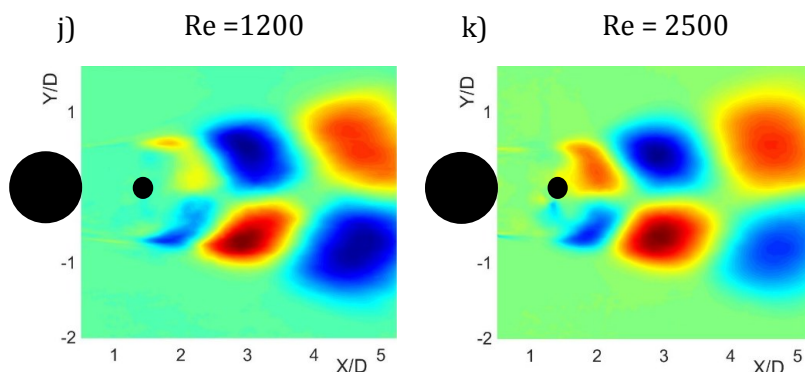
D/d = 1,67



D/d = 2,5

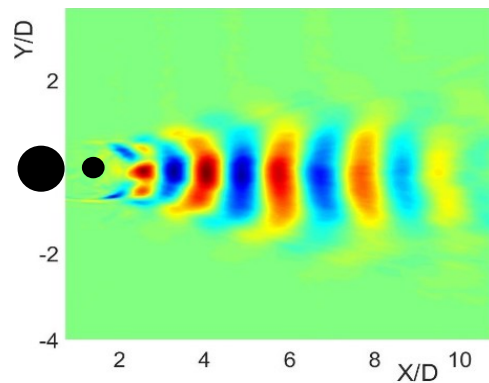


D/d = 5

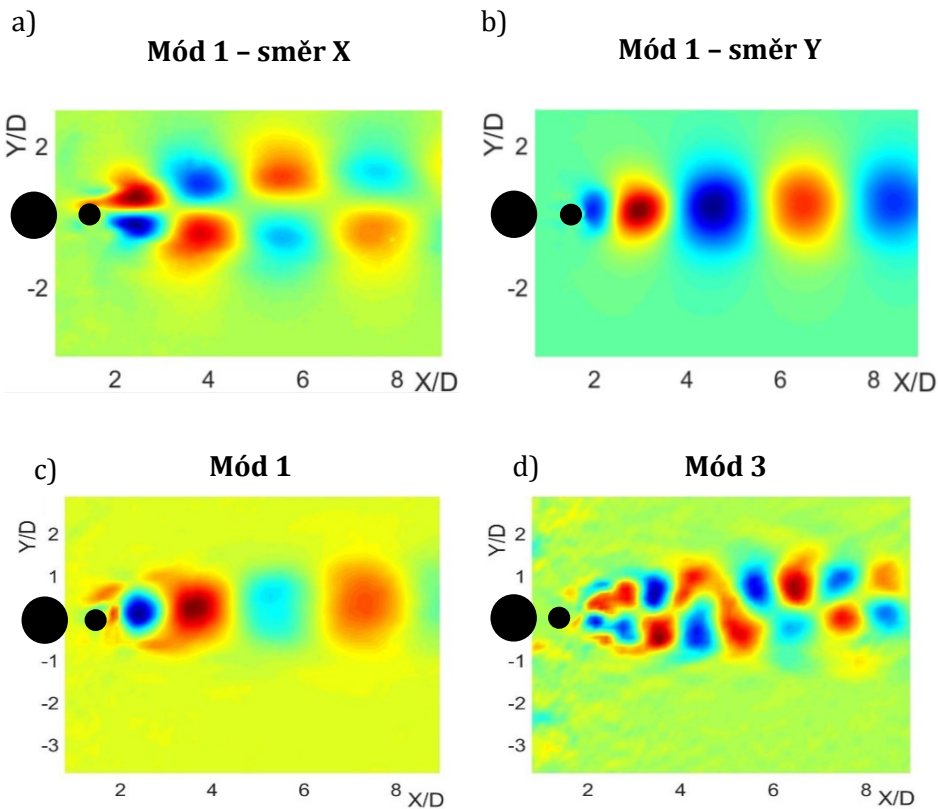


Obr. 61 První mód POD z vizualizací pro Pozici 7, a) D/d = 1, Re = 500, b) D/d = 1, Re = 1200, c) D/d = 1, Re = 2500, d) D/d = 1,67, Re = 500, e) D/d = 1,67, Re = 1200, f) D/d = 1,67, Re = 2500, g) D/d = 2,5, Re = 500, h) D/d = 2,5, Re = 1200, i) D/d = 2,5, Re = 2500, j) D/d = 5, Re = 1200, k) D/d = 5, Re = 2500

$D/d = 2.5$ $Re = 500$



Obr. 62 Třetí POD mód Pozice 7, $D/d = 2.5$, $Re = 500$



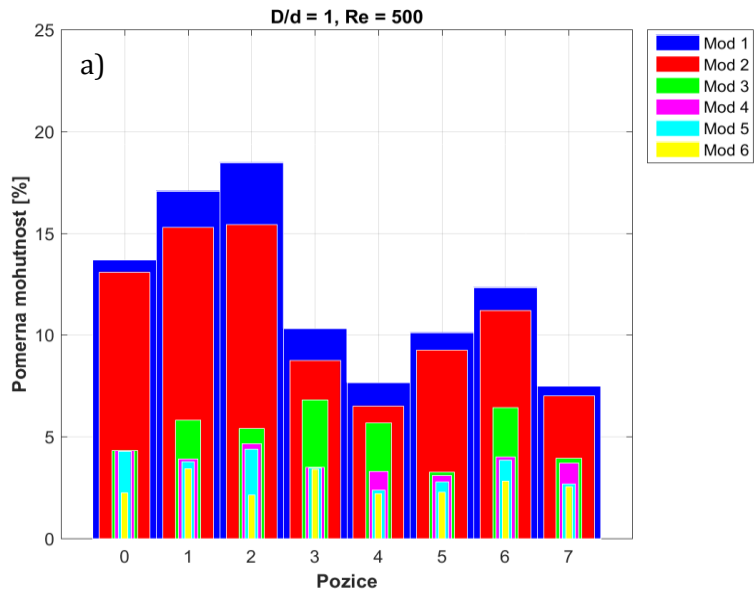
Obr. 63 Pozice 7, $D/d = 2,5$, $Re = 500$, a) první mód rychlostní pole ve směru X, b) první mód rychlostní pole ve směru Y, c) první mód vířivost, d) třetí mód vířivost

5.1.2 Energie a mohutnosti v módech POD

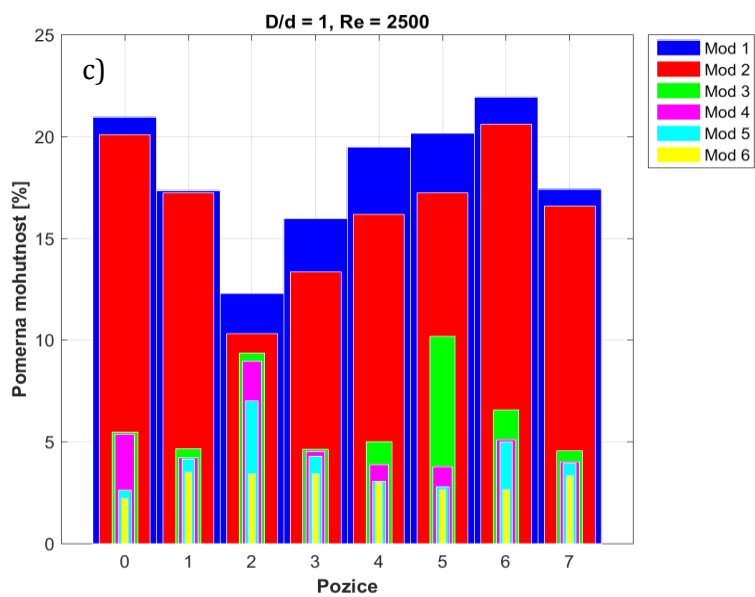
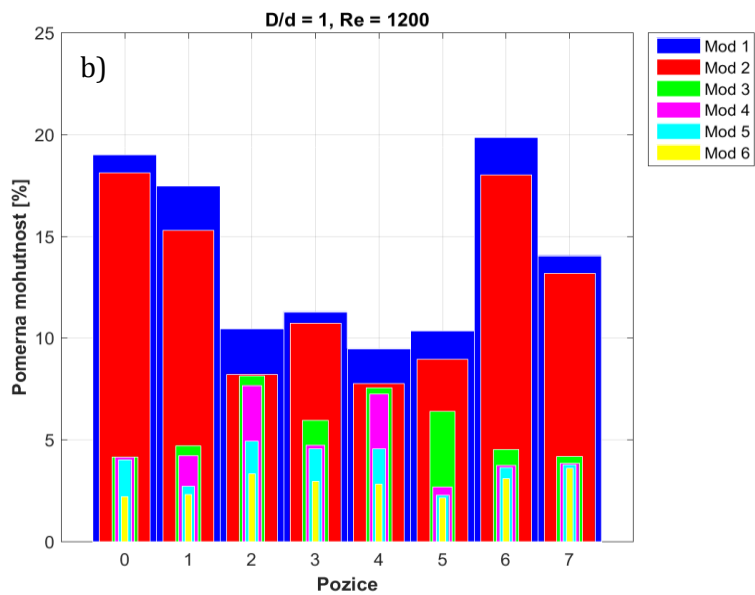
Jak již bylo několikrát řečeno v souvislosti s popisem vlastní ortogonální dekompozice (POD), důležité jevy a děje jsou obsaženy v jejích prvních módech, o čemž svědčí hodnoty poměrných energií, resp. mohutností. Z provedených analýz vyplývá, že čím méně se v systému vyskytuje poruch (autoři [24] o tom mluví jako o vysoce koherentním proudění), tím vyšší procento z celkové energie, resp. mohutnosti je obsaženo v prvních dvou módech.

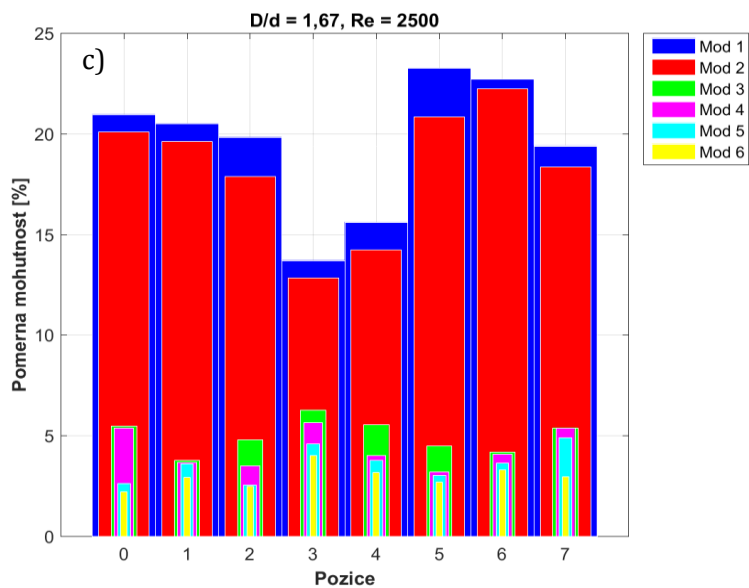
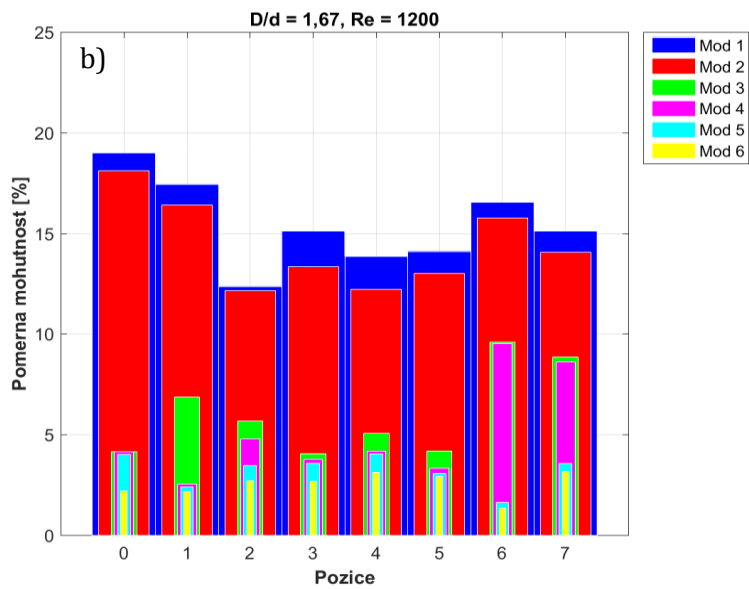
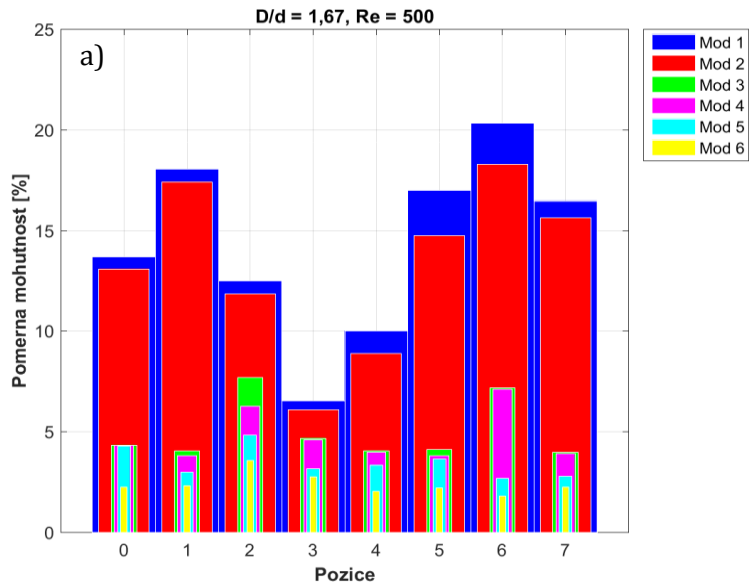
Na obr. 64 – 68 jsou uvedeny velikosti poměrných mohutností a energií pro samostatný válec (označen jako Pozice 0) a jednotlivé Pozice pro 6 módů POD z vizualizací pro $D/d = 1, 1,67, 2,5, 5$ a $Re = 500, 1200$ a 2500 a pro $D/d = 2,5$ a $Re = 500$ z dat získaných PIV. Poměrné mohutnosti jsou zobrazeny ve sloupcovém grafu, kde každá barva značí odlišný POD mód. Zde je nejdříve nutno poznamenat, že pro $Re = 1200$ a Pozici 7 ($R/D = 1,5$) pro $D/d = 1,67$ a $2,5$ nebyla k dispozici data v dostatečné kvalitě tak, aby bylo možné s jistotou věřit hodnotě poměrné mohutnosti dané konfigurace při tomto Reynoldsově čísle. Na výsledek vlastních tvarů tak výrazný vliv nebyl zaznamenán. Co se týče ostatních poloh, zjistit, co přesně všechno má vliv na velikost poměrné mohutnosti, není snadné.

Jedním z předpokladů bylo, že čím vyšší koherenci (a méně poruch) úplav vykazuje, tím vyšší bude rozdíl mezi hodnotou poměrné mohutnosti prvních dvou módů a vyššími módy. Z výsledků POD vizualizace uvedených na obr. 64 – 67 to ale tak jednoznačně ze všech případů nevyplývá. Pozice 1 druhého válce výrazně úplav neovlivňuje, obzvláště u vyšších D/d , čemuž i odpovídají hodnoty mohutností prvních dvou módů ve všech konfiguracích a pro všechna Reynoldsova čísla. U Pozice 2 je znát výrazněji výskyt poruch ve sledované oblasti. U poměru $D/d = 1$ s vyšším Reynoldsovým číslem dochází k oslabení dominantních struktur, jak bylo vidět na obr. 47b), c), což se právě projeví i poklesem hodnot poměrné mohutnosti vůči Pozici 1 (obr. 64 b), c)) a nárůstem velikostí mohutnosti u módů vyšších. S narůstajícím D/d není vírová stezka prvního válce tak výrazně oslabována prvním válcem a mohutnost v této Pozici se přibližuje hodnotě Pozice 1. Stejný vliv má i vzrůstající Reynoldsovo číslo, takže například u $D/d = 2,5$, $Re = 2500$ je relativní mohutnost na Pozici 2 vyšší než na Pozici 1. (obr. 66c)). Výskyt poruch v úplavu v Pozici 3 se projevuje nízkými poměrnými mohutnostmi téměř ve všech případech a zejména malými rozdíly hodnot mezi prvním a třetím až čtvrtým POD módem. Je zajímavé, že pro $D/d = 1$ tato charakteristika odpovídá spíše poloze 2. Zároveň je zřejmé, že s narůstajícím Reynoldsovým číslem se úplav mírně stabilizuje, resp. vznikající poruchy jsou potlačovány a rozdíly mezi prvním a třetím módem se zvětšují. Obdobná situace jako v Pozici 3 se objevuje i v Pozici 4. V Pozici 5 je znát, že se proudění více stabilizuje, poměrná mohutnost ve většině případů narůstá vůči Pozici 4, obzvláště výrazně pro vyšší poměry D/d a vyšší Reynoldsova čísla. Ač v Pozici 6 se vyskytují poruchy způsobené malým vyosením druhého válce, na dominanci struktur to nemá příliš velký vliv a tak se v této Pozici téměř ve všech případech objevují nejvyšší hodnoty poměrné mohutnosti v prvních dvou módech. Právě trochu překvapivou skutečností je, že tyto hodnoty jsou vyšší, či stejné s hodnotami poměrné mohutnosti v Pozici 7 (výjimku lze nalézt u poměru $D/d = 5$). Co se týče ostatních pozorování, jeví se Pozice 7 jako nejstabilnější. Důvod lze hledat ve více příčinách. Jednou z nich je výše uvedená skutečnost, že ve dvou měřeních této Pozice nebyly získány data v požadované kvalitě. Další možné příčiny budou rozebrány v podkapitole 5.3.

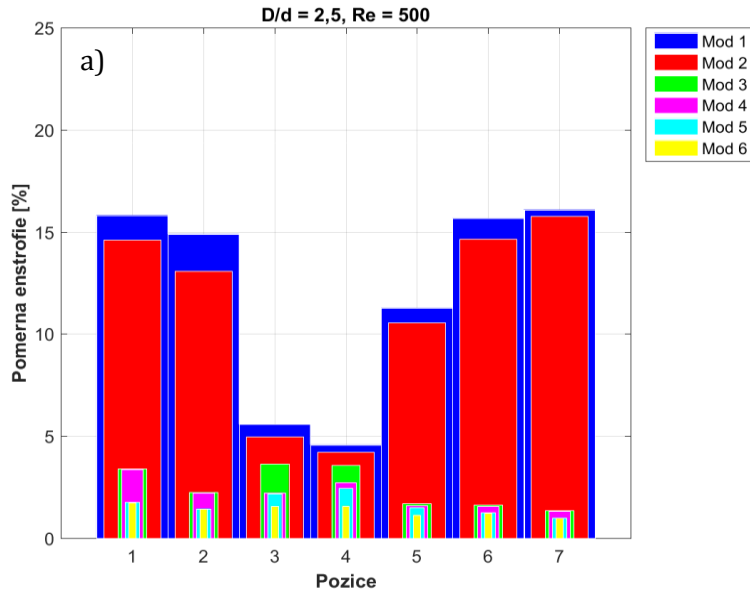


Obr. 64 Průběh poměrné mohutnosti pro prvních 6 módů POD pro $D/d = 1$, a) $Re = 500$, b) $Re = 1200$, c) $Re = 2500$

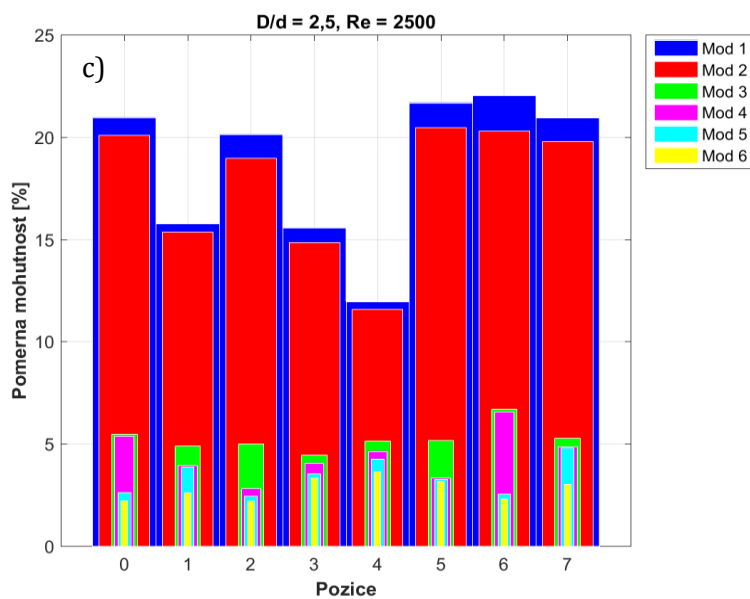
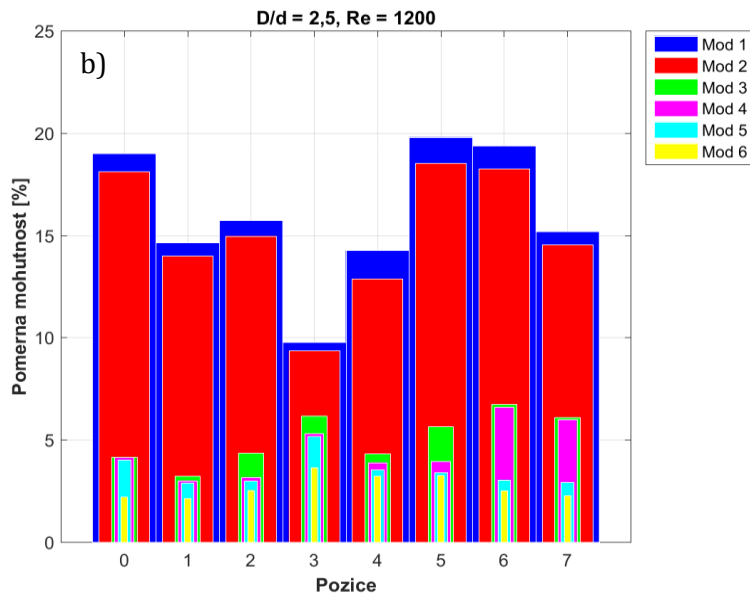


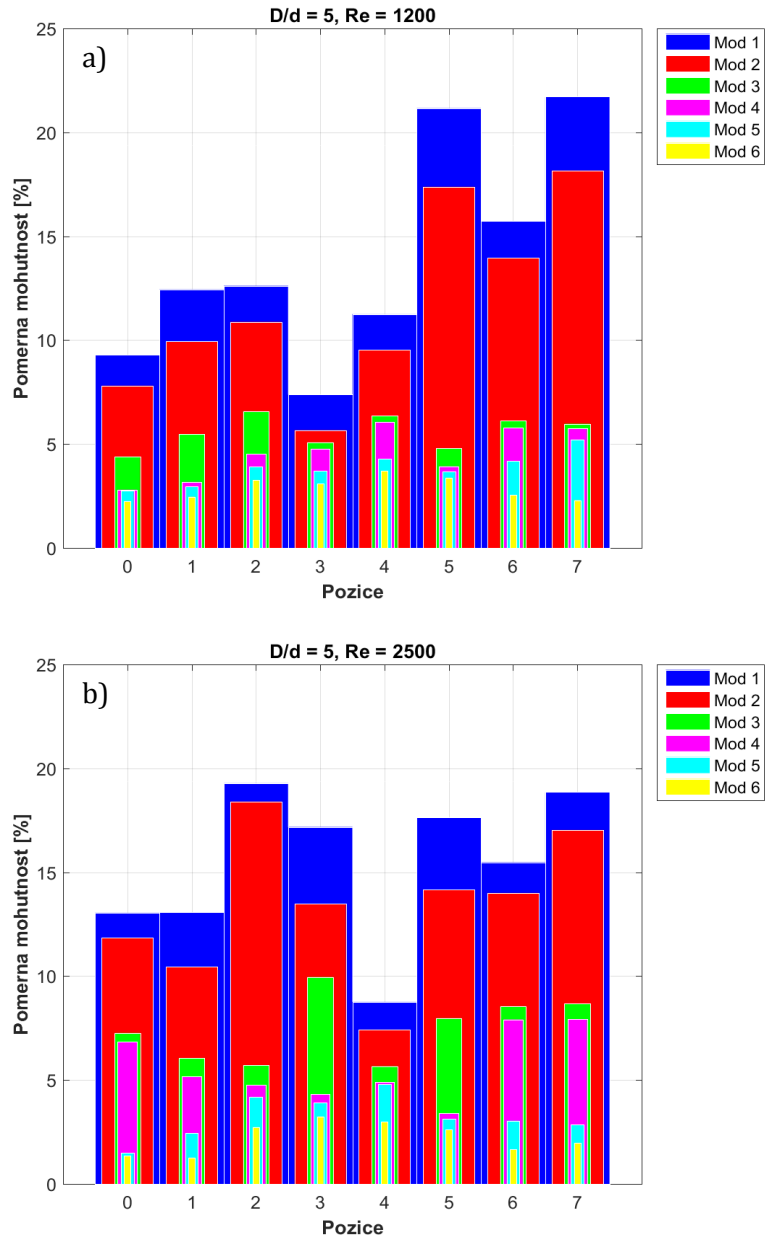


Obr. 65 Průběh poměrné mohutnosti pro prvních 6 módů POD pro D/d = 1,67, a) Re = 500, b) Re = 1200, c) Re = 2500



Obr. 66 Průběh poměrné mohutnosti pro prvních 6 módů POD pro $D/d = 2,5$, a) $Re = 500$, b) $Re = 1200$, c) $Re = 2500$



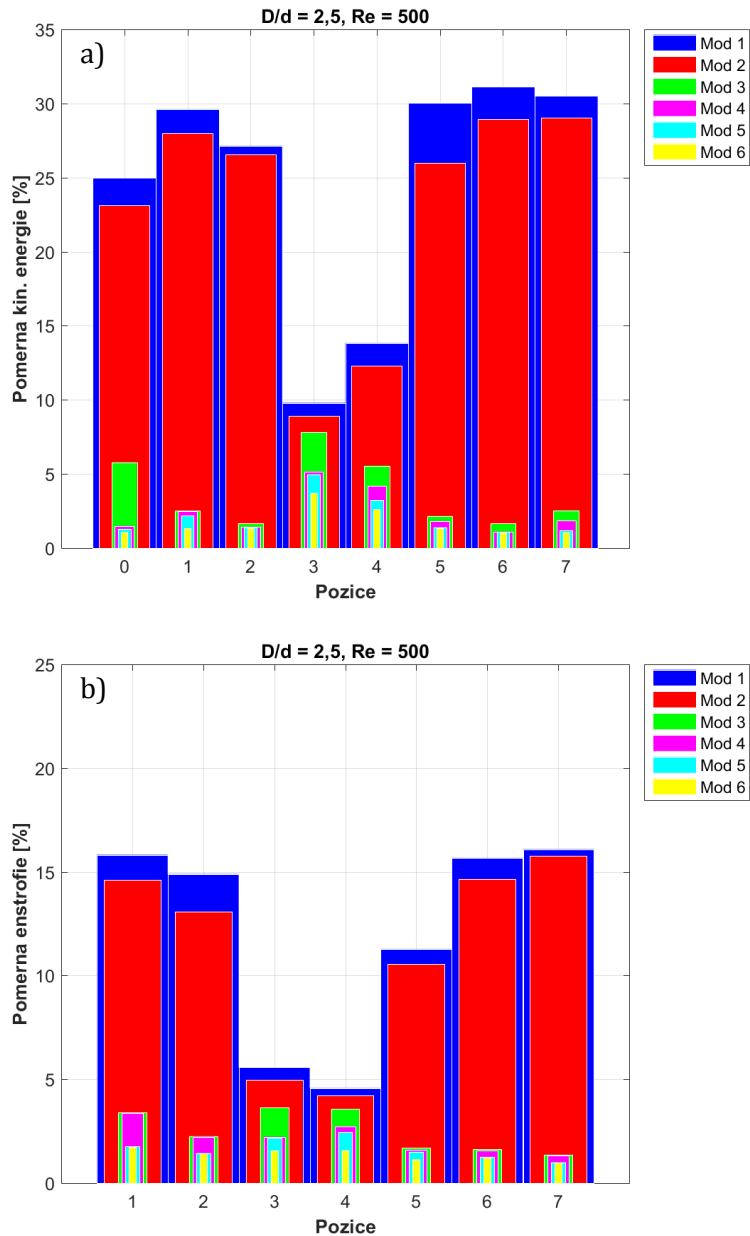


Obr. 67 Průběh poměrné mohutnosti pro prvních 6 módů POD pro D/d = 5, a) Re = 500, b) Re = 1200, c) Re = 2500

Na obr. 68 jsou ukázány výsledky energií získaných z měření PIV. Z rychlostních polí metodou POD byly zjištěny hodnoty kinetické energie (obr. 68a)) a z polí vířivosti pak hodnoty enstrofie (obr. 65b)). Enstrofie je v podstatě energie vířivosti a je možné ji vyjádřit jako

$$\varepsilon(\omega) = \int_S \omega^2 dS . \quad (12)$$

Celkový průběh energií obou analýz je podobný. Liší se pouze v Pozicích 4 a 5, kde u enstrofie mají menší poměrnou hodnotu, než je tomu u energie kinetické. Další odlišností jsou samotné hodnoty poměrných energií. POD rychlostních polí mají vyšší hodnoty než z POD z polí vířivosti.



Obr. 68 Průběh poměrné mohutnosti pro prvních 6 módů POD pro $D/d = 2,5$, $Re = 500$, a) z rychlostních polí, b) z polí vířivosti

Jak již bylo naznačeno v předchozím pododstavci, procenta poměrné energie ukazují na to, jak významné jsou struktury z hlediska zkoumaného celku. Vyšší procenta kinetické energie může představovat silnější vliv translačního pohybu a menší procenta enstrofie poukazují zase na větší přítomnost poruch v úplavu. To je velmi dobře patrné právě z hodnoty enstrofie u pozic, u kterých bylo zaznamenáno nejvíce poruch v daném nastavení ($D/d = 2,5$, $Re = 500$), tedy u Pozic 3 a 4. Na

obr. 68a) u Pozice 3 má první mód hodnotu poměrné kinetické energie 9,8 %, druhý 8,92 %, třetí 7,83 % a čtvrtý 5,17 %. To jsou velmi nízké hodnoty pro první dva módy a naopak pro 3. a 4. módu jsou hodnoty velmi vysoké⁶. Podobně je tomu i u Pozice 4 Na to, proč tomu tak je, mohou částečně odpovědět výsledky měření ze dvou sond (pododstavec 4.2.5). Na obr. 34c) a d) je zřetelně patrné, že Strouhalova čísla se nezanedbatelně liší v závislosti na sondě a k největším rozdílům dochází právě při nižších Reynoldsových číslech. Z toho lze usuzovat, že zde dochází i k nezanedbatelnému pohybu struktur ve směru osy z, kolmé na sledovanou rovinu. Z hodnot poměrných energií v Pozicích 1, 6 a 7 je patrné, že v proudění se nevyskytuje příliš mnoho poruch a je tedy i více koherentní. U Pozice 5 nižší hodnota poměrné enstrofie vypovídá o výskytu nějakých malých poruch, podobně, ale slaběji, je tomu i u Pozice 2.

5.2 Určení závislosti Strouhalova čísla na čísle Reynoldsově

Z měření CTA pro poměry válců $D/d = 1$ a $2,5$ mohly být určeny vztahy závislosti Strouhalova čísla na Reynoldsově čísle pro každou polohu. Williamson ve své práci [4] uvádí, že velmi dobrých výsledků pro hledání závislosti $Sh - Re$ lze dosáhnout pomocí tříprvkové mocninné řady s $\left(1/\sqrt{Re}\right)$, kdy se Strouhalovo číslo může vyjádřit jako:

$$Sh = \left(A + \frac{B}{\sqrt{Re}} + \frac{C}{Re} \right), \quad 13$$

kde koeficienty A, B a C jsou nalezeny z proložení dané funkce naměřenými daty. Na obr. 69 a 70 jsou na grafech závislosti $Sh - Re$ ukázány průběhy proložení a porovnání s daty získanými z měření. Data, ze kterých byly určeny koeficienty, byly pouze z měření CTA. Ta byla zvolena kvůli množství naměřených hodnot oproti třem hodnotám získaných z POD. Dopočítané koeficienty se nacházejí v tabulce tab. P1 a tab. P2 v Příloze 3.

Z grafů vyplývá velmi dobrá shoda mezi hodnotou Strouhalova čísla z funkční závislosti s hodnotou Strouhalova čísla z měření pro většinu pozic druhého válce⁷. Nicméně v několika Pozicích se získaná funkční závislost liší ve větší míře od naměřených dat. U poměru válců $D/d = 1$ jsou to Pozice 3 (obr. 69c)) a 7 (obr. 69g)), pro $D/d = 2,5$ to jsou Pozice 2 (obr. 70b)) a 3 (obr. 70c)). V Pozici 7 u $D/d = 1$ je problematická oblast kolem $Re = 2500$. Zde dochází k náhlému nárůstu Strouhalových čísel a je otázka, jak by vypadal vývoj jejich velikostí pro Reynoldsova čísla vyšší než 2800. Tato náhlá změna v jejich velikosti a neznalost Strouhalových čísel pro vyšší rychlosti vede k tomu, že koeficienty nelze určit zcela přesně tak, aby zachycovaly celý vývoj, včetně změny kolem $Re = 2500$. Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, Pozice 3 je

⁶ Pro srovnání v Pozici 7 je hodnota poměrné kinetické energie v prvním módu 30,51 %, v druhém 29,02 %, ve třetím 2,55 % a ve čtvrtém 1,85 %.

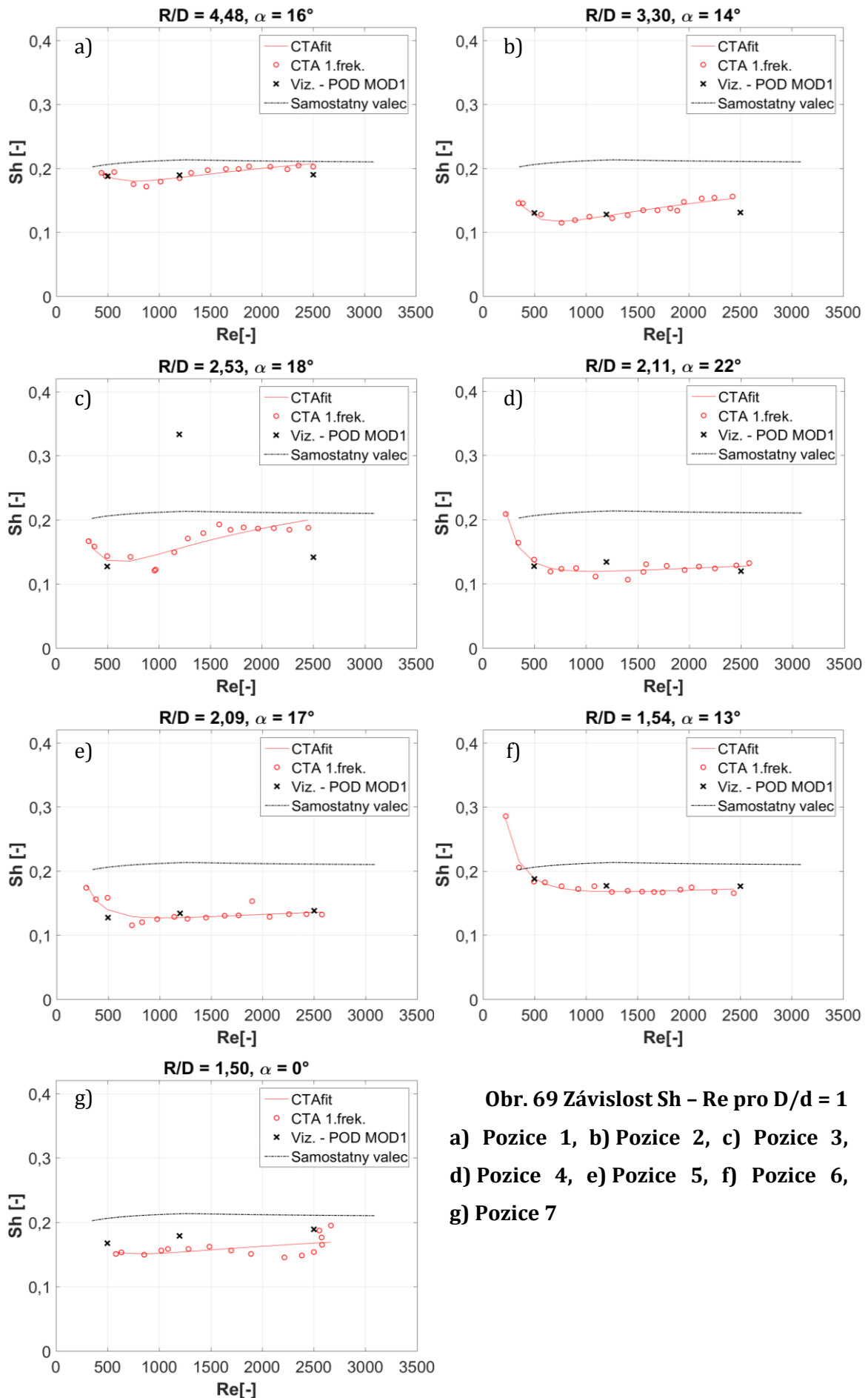
⁷ V některých bodech výrazná odchylka ale spíše svědčí o nesprávném určení dominantní frekvence.

charakteristická větším počtem dějů a poruch, a tak určení jedné dominantní frekvence z měření žhavenou sondou není snadné. Příčinou je nejspíše ten fakt, že v proměřované oblasti nelze určit pomocí bodového měření dominantní frekvenci úplavu jako celku. O příčině, proč tomu tak je, trochu napovídají hodnoty Strouhalových čísel získaných z POD. Vztah mezi frekvencemi z CTA a z POD byl popsán v podkapitole 4.2, kde je i vysvětleno, proč se mohou hodnoty Strouhalových čísel získané různými způsoby lišit – CTA reflektuje stav v okolí jednoho bodu, POD ukazuje na frekvenci nějakého děje, který je reprezentován módem. Z tohoto důvodu i vyjádření funkční závislosti $Sh - Re$ patrně nemá význam. U Pozice 2 pro $D/d = 2,5$ nenastává taková situace jako u Pozice 3, ale znatelné odchylky mezi funkční závislostí a naměřenými hodnotami zde jsou. Důvod je patrně stejný, jako tomu bylo v Pozici 3. Ve většině případů prezentovaných na obr. 69 a 70 ale hodnoty POD s teoretickou závislostí $Sh - Re$ víceméně souhlasí, pouze nejmarkantnější rozdíl (pomine-li se Pozice 3) nastává u Pozice 2 pro $D/d = 2,5$. Evidentně silná frekvence v úplavu naměřená bodově neodpovídá dominantní struktuře.

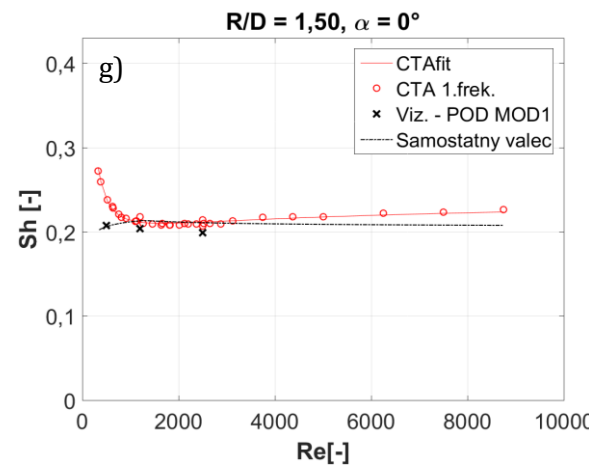
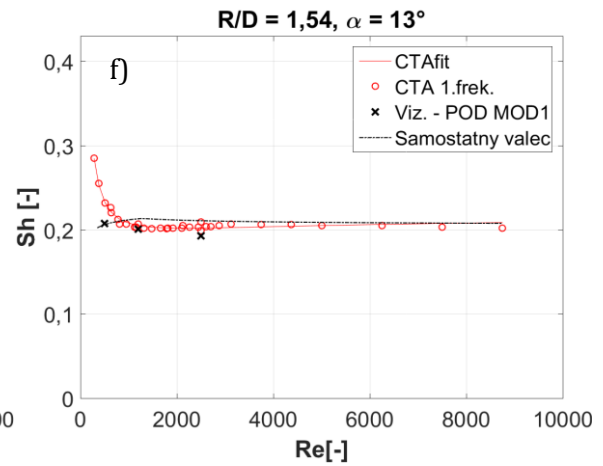
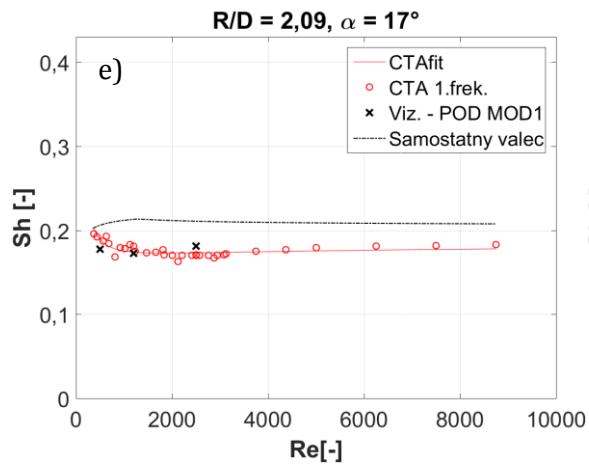
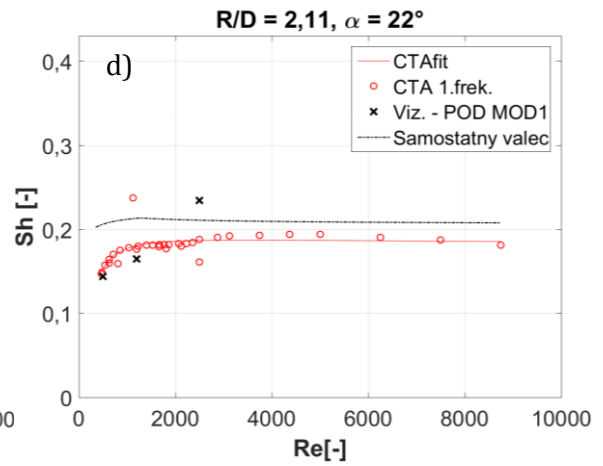
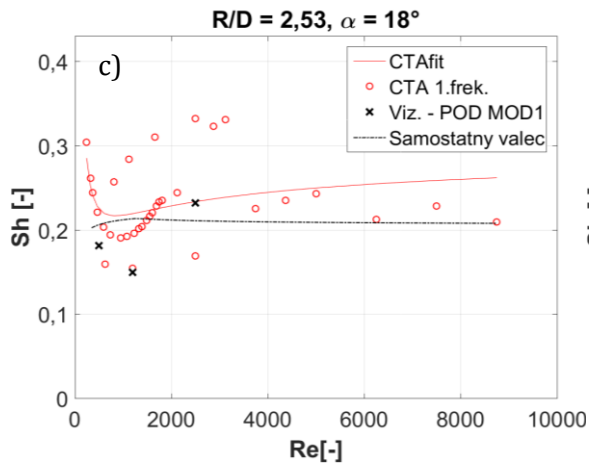
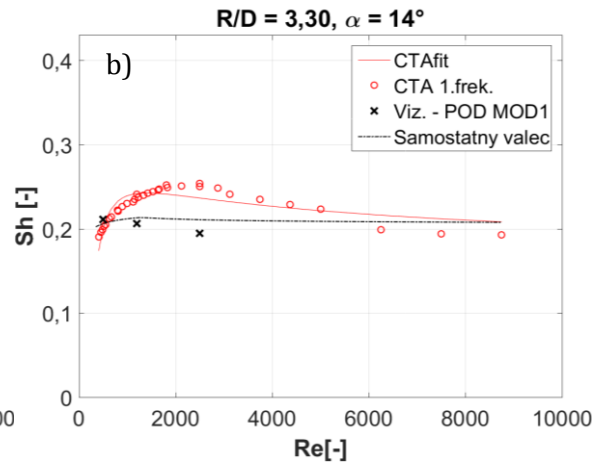
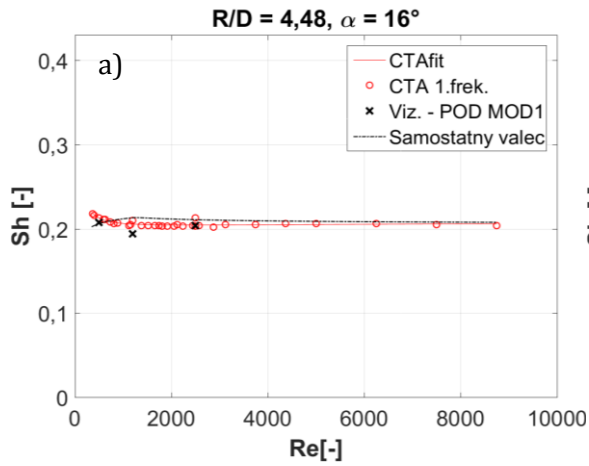
Z hlediska vlivu poměru D/d na vývoj Strouhalova čísla bylo zajímavé porovnat křivky jejich závislostí $Sh - Re$, jak je to ukázáno v grafech na obr. 71.

Z grafů uvedených na obr. 71 vyplývá, že existují polohy, které jsou si podobné trendem vývoje Strouhalova čísla. Pro poměr $D/d = 1$ bylo proměřeno méně režimů Reynoldsových čísel, takže nelze porovnat křivky v oblasti Reynoldsových čísel vyšších než 2800, přesto ale lze říci, že v Pozicích 5 (obr. 71e)), 6 (obr. 71f)) a 7 (obr. 71g)) je patrný podobný trend⁸ vývoje pro oba poměry D/d . Z toho je možné usuzovat, že tyto Pozice jsou méně citlivé na změnu D/d , resp. pro oba poměry se v úplavu odehrávají děje vedoucí k podobnému výsledku, což se nedá říct o poloze 1 (obr. 71a)), 2 (obr. 71b)) a 4 (obr. 71d)).

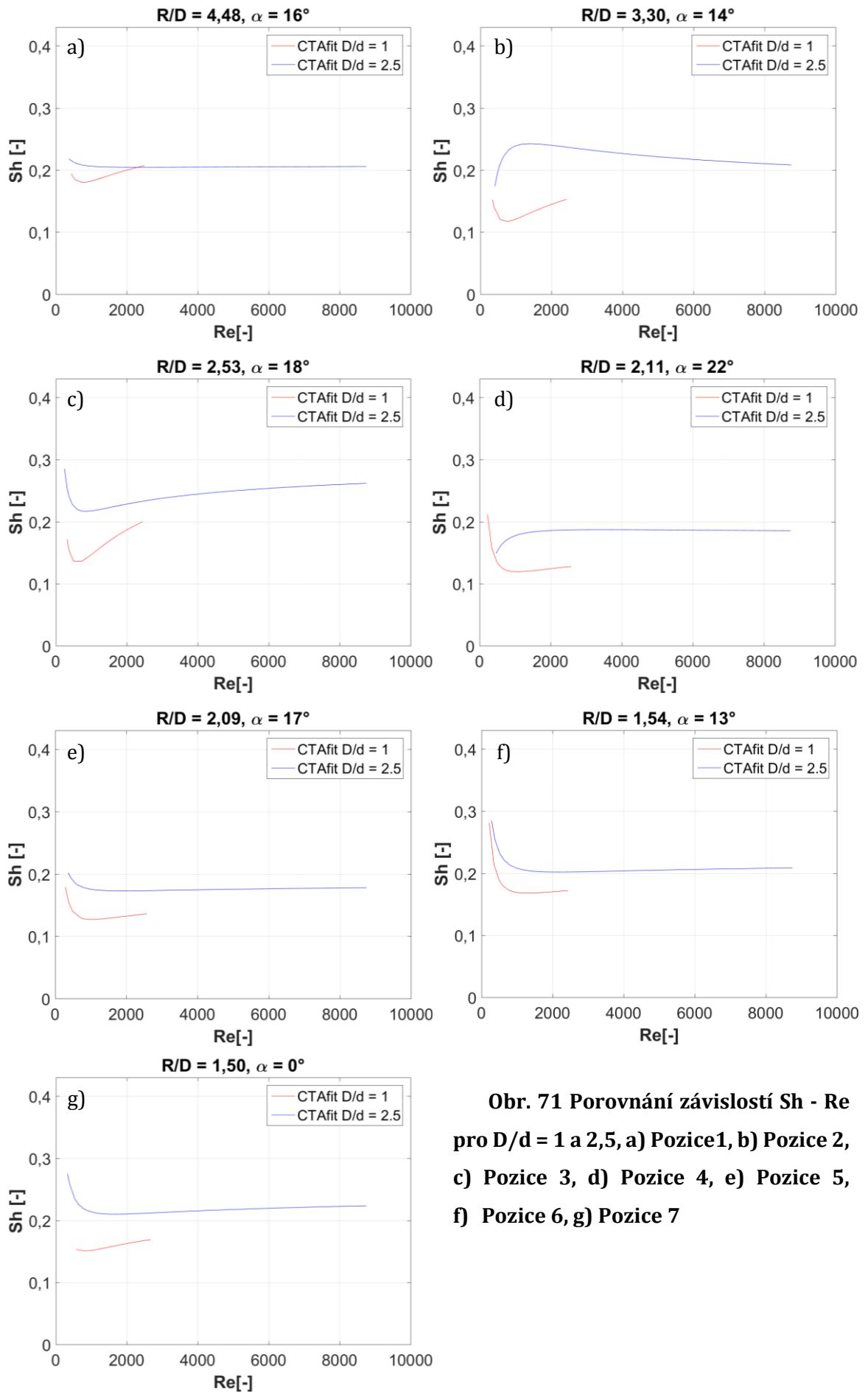
⁸ I u Pozice 3 (obr. 71c)) je patrný podobný trend, jak ale bylo řečeno v předchozích odstavcích, je otázka, jak moc tato křivka odpovídá skutečnosti.



Obr. 69 Závislost $Sh - Re$ pro $D/d = 1$
 a) Pozice 1, b) Pozice 2, c) Pozice 3,
 d) Pozice 4, e) Pozice 5, f) Pozice 6,
 g) Pozice 7



**Obr. 70 Závislost $Sh - Re$ pro $D/d = 2.5$
a) Pozice 1, b) Pozice 2, c) Pozice 3,
d) Pozice 4, e) Pozice 5, f) Pozice 6,
g) Pozice 7**

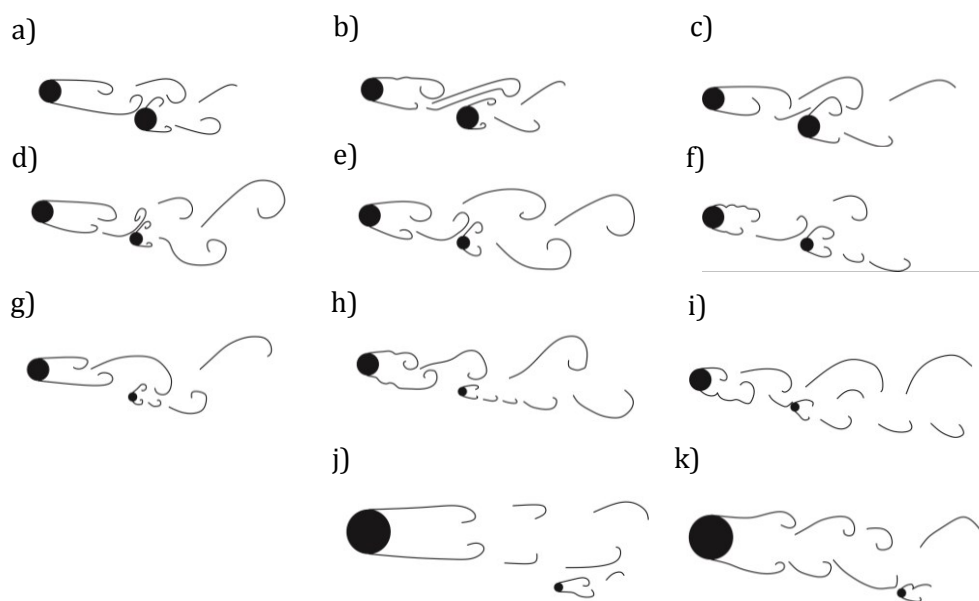


Obr. 71 Porovnání závislostí Sh - Re pro D/d = 1 a 2,5, a) Pozice 1, b) Pozice 2, c) Pozice 3, d) Pozice 4, e) Pozice 5, f) Pozice 6, g) Pozice 7

5.3 Zhodnocení poloh

Pozice 1

Pozice 1 ($R/D = 4,48$, $\alpha = 16^\circ$) druhého válce v úplavu, jak již bylo řečeno na předešlých stranách, je pozicí, která by neměla mít nějak zásadní vliv na úplav samostatného válce [14], [15]. Z provedených analýz a měření se potvrdilo, že u vyšších D/d a nižších Reynoldsových číslech je vliv druhého válce opravdu velmi malý. Strouhalova čísla se pohybují přibližně okolo hodnot samostatného válce, v úplavu nedochází k příliš velkým poruchám, která by mohla narušit stabilitu proudu, jak se potvrdilo z analýzy POD. U struktur nedochází výrazně k fluktuacím ve směru kolmém na pozorovanou roviny, což vyplývá z měření CTA se dvěma sondami (pododstavec 4.2.5). Na základě podrobného studia vizualizací bylo možné charakterizovat tvary proudění a sestavit schémata typových struktur pro každou Pozici a pro každé pozorované Reynoldsovo číslo, jak je ukázáno na obr. 72. Schematické obrysy struktur v dané konfiguraci jsou zaměřeny převážně na vyzorovanou interakci smykových vrstev prvního válce s vnitřní smykovou vrstvou druhého válce. Jak už bylo řečeno výše, slabý vliv druhého válce se projevuje zejména u $D/d = 2,5$ a $D/d = 5$ (obr. 72g)-k)), kde lze názorně pozorovat tvorbu Karmánovy vírové stezky za menším válcem. U nižších poměrů D/d význam druhého válce narůstá. Jeho vliv je patrný na vývoj struktur a zejména na mechanismy jejich interakcí. To se odráží i ve vývoji velikostí Strouhalových čísel, jak je vidět z porovnání funkcí závislosti $Sh - Re$ (obr. 71a)). Z obr. 72 a i z popisu samotných vizualizací (podkapitola 4.1) je zřejmé že u $D/d = 1$ a i u $D/d = 1,67$ u všech Reynoldsových čísel přímo interaguje úplav, resp. vírová stezka s povrchem druhého válce. Toto je u vyšších poměrů D/d pozorováno pouze u $Re = 2500$. U nižších D/d poté nastává přímo interakce vnitřní smykové vrstvy zadního válce s úplavem prvního a dále se vyvíjejí synchronizovaně, pokud jsou ve fázi. U vyšších D/d je pozorovatelný vývoj vlastní vírové stezky za prvním válcem z obou smykových vrstev.



Obr. 72 Schéma typových struktur polohy 1, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$

V následující tabulce č. 3 je uvedeno shrnutí této Pozice z několika úhlů pohledu a posouzení jak výrazně se změní charakter proudění v závislosti na D/d . Vliv velikosti D/d pro každou Pozici klasifikuje, jak výrazně se liší struktury, jejich mechanismy interakcí a průběhy jejich Strouhalových čísel v závislosti na velikosti poměru průměrů D/d . Vliv Reynoldsova čísla ve stupnici hodnocení je především brán z pohledu změny struktur a mechanismů při interakci proudových polí dvou válců ve srovnání se samostatným válcem. Tím je myšleno, že se neuvažuje vliv Reynoldsova čísla na hladký průběh velikostí čísla Strouhalova. Výskyt poruch a nestabilit (vzniklých vlivem konfigurace) je hodnocen na základě jednak průběhu Strouhalových čísel a jednak na analýze POD – vlastních tvarů a velikosti poměrné mohutnosti. Sh konfigurace versus Sh samostatného válce posuzuje, zda a jak výrazně se liší hodnota Strouhalova čísla zjištěná u dané konfigurace od hodnoty samostatného válce. Zde je uvažováno jako nejlepší varianta Strouhalovo číslo co nejmenší. Kromě posouzení velikosti Strouhalova čísla vychází hodnocení všech kritérií z celého souboru poznatků předložených v této práci⁹, proto nejsou explicitně definovány jejich intervaly. Z tohoto důvodu zde uvedené hodnocení slouží převážně pro vzájemné porovnání konfigurací.

Níže poté je uvedena v tabulce 4 stupnice hodnocení, která bude využita i v případě hodnocení ostatních pozic dále.

⁹ Jedná se o výsledky z analýzy POD, z měření CTA, PIV, vizualizace a jejich zpracování.

Tabulka 3 Charakteristika Pozice 1 pro $D/d = 1, 1,67, 2,5$ a 5

Pozice 1	Vliv velikosti D/d		
D/d	Vliv Re	Výskyt poruch a nestabilit	Sh konfigurace vs. Sh samostatného válce
1	zanedbatelný	lehký	menší
1,67	zanedbatelný	lehký	podobné
2,5	menší	minimální	podobné
5	menší	minimální	menší - podobné ¹⁰

Tabulka 4 Stupnice hodnocení kritérií pro 4 poměry D/d

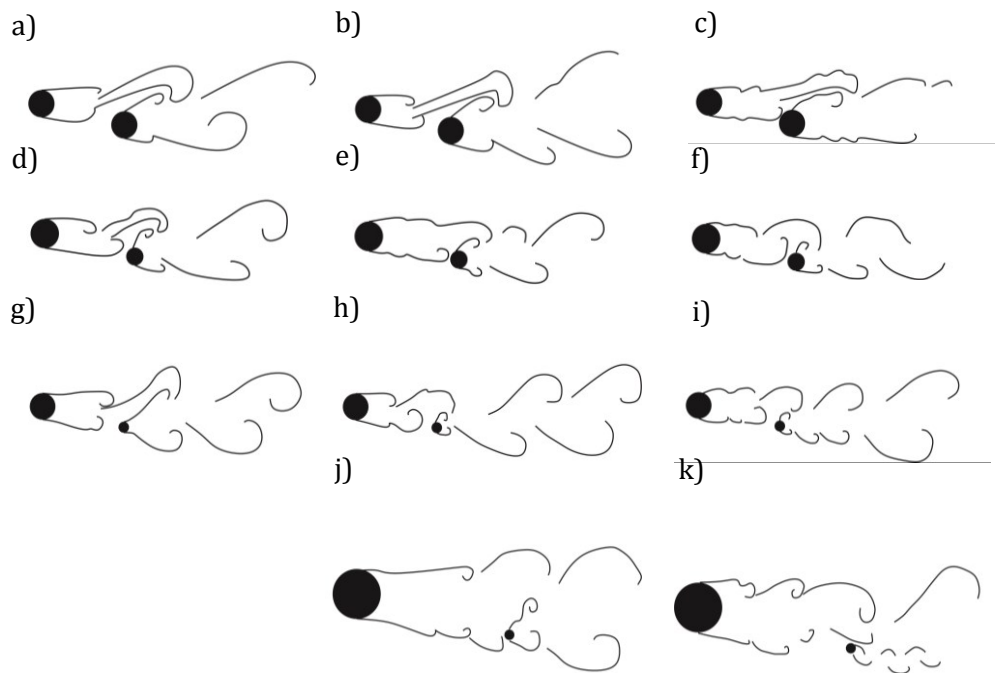
Pořadí	Vliv velikosti D/d	Vliv Re	Výskyt poruch a nestabilit	Sh konfigurace vs. Sh sólo válce
1	žádný	zanedbatelný	minimální	výrazně menší
2	mírný	menší	lehký	menší
3	znatelný	střední	znatelný	podobné
4	značný	vysoký	značný	větší

Pozice 2

Druhý válec v Pozici 2 ($R/D = 3,3$, $\alpha = 14^\circ$) se už dle [14], [15] nachází v oblasti, jež by měla vést k větší stabilitě úplavu, nicméně dle Sumnera et al. [16] se jedná typově o stejnou Pozici, jako byla Pozice 1 – interakce rozvíjející se Karmánovy stezky s povrchem druhého válce. Z pozorování je ale patrné, že výše uvedený jev lze pozorovat pouze u vyšších Reynoldsových čísel, jak ukazují schémata struktur na obr. 73. Obecně zde velmi významnou roli hraje smyková vrstva prvního válce (obr. 73a-e), jež by za předpokladu absence druhého válce se zabalovala a tvořila vír. Ta ale při interakci z vnitřní smykovou vrstvou druhého válce nejspíše způsobuje narušení formování vírové stezky, což je zejména vidět u poměrů D/d větších jak 1. V důsledku toho dochází k výskytu více dominantních frekvencí v oblasti za válci (pododstavec. 4.2.1), což vede k problému určení Strouhalových čísel charakterizujících tuto Pozici. K narušení periodicity také může přispívat občasné obtečení vnější smykové vrstvy prvního válce vnější povrch druhého válce (viz

¹⁰ Zde je volena hodnota mezi 1 a 2, protože zjištěna byla pouze 2 Strouhalova čísla a každé z nich spadá do jiné kategorie. Obdobně to platí i pro ostatní Pozice.

podkapitola 4.1), což vede k oslabení formování struktur v oblasti nad druhým válcem. Celkové zhodnocení polohy shrnuje tabulka č. 5.



Obr. 73 Schéma typových struktur polohy 2, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$

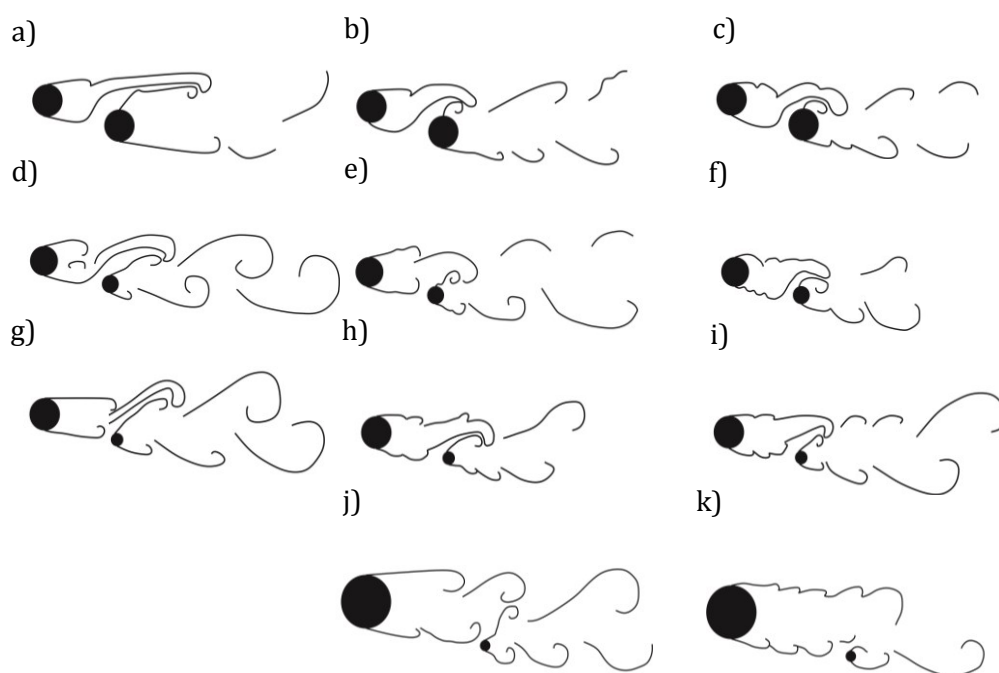
Tabulka 5 Charakteristika Pozice 2 pro $D/d = 1, 1,67, 2,5$ a 5

Pozice 2	Vliv velikosti D/d		značný	
	D/d	Vliv Re		Výskyt poruch a nestabilit
1	1	střední	lehký	výrazně menší
1,67	1,67	střední	znatelný	podobné
2,5	2,5	vysoký	znatelný	CTA - větší, POD - podobné
5	5	střední	lehký	menší - podobné

Pozice 3

Druhý válec v Pozici 3 ($R/D = 2,53$, $\alpha = 18^\circ$) spadá podle [14], [15] do stejné oblasti jako Pozice 2, Sumner et al. [16] definují toto oblast jako oblast indukované separace vnitřní smykové vrstvy druhého válce smykovými vrstvami prvního válce. Tento jev už byl patrný i v Pozici 2 a v Pozici 3 se vyskytuje u všech konfigurací kromě poměru $D/d = 5$, $Re = 2500$, jak je vidět z obr. 74. Blízký

úplav prvního válce je stlačen prouděním mezerou mezi válci. Z provedených pozorování by se až dalo říci, že pokud by byl druhý válec lehce posunut ve směru proudění (zvětšila by se mezera mezi válci), už by se v oblasti blízkého úplavu začaly formovat víry. Náznaky toho procesu jsou patrné u vyšších D/d (obr. 74d) – g)) a u $D/d = 5$ (obr. 74j), k)) už k formaci vírů v oblasti před malým válcem dochází. Tedy energie úplavu prvního válce namísto formování koherentních struktur oslabuje protaženou smykovou vrstvou. Tento fakt může hrát důležitou roli právě ve velikosti poměrné mohutnosti z POD jednotlivých konfigurací v této Pozici. Nejvíce zřetelné to je u $Re = 500$ (obr. 74a), d), g)), kdy nedochází ještě k rozpadu smykové vrstvy (jak to lze pozorovat u vyšších Re) a poměrná mohutnost v této Pozici je jedna z nejmenších (obr. 64a), 65a), 66a), 68a), b)). I z tohoto důvodu je formování vírové stezky za oběma válci narušeno a mohou se zde tak více projevit jevy a děje, které narušují tvorbu silných koherentních struktur. Toto neplatí pro $D/d = 5$, protože zde je mechanismus interakce odlišný právě kvůli již zmiňovanému formování vírů velkého válce ještě v oblasti před malým válcem. Další rozrušující jev byl popsán v podkapitole 4.1, kdy obzvláště v případě $D/d = 2,5$ dochází k nepravidelnému obtékání vnějšího povrchu druhého válce smykovou vrstvou válce prvního. Stejně, jako to bylo popsáno u Pozice 2, může to mít vliv na nepravidelné oslabení vírové stezky tvořící za horní polovinou druhého válce. Celkové zhodnocení polohy shrnuje tabulka č. 6.



Obr. 74 Schéma typových struktur polohy 3, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$

Tabulka 6 Charakteristika Pozice 3 pro $D/d = 1, 1,67, 2,5$ a 5

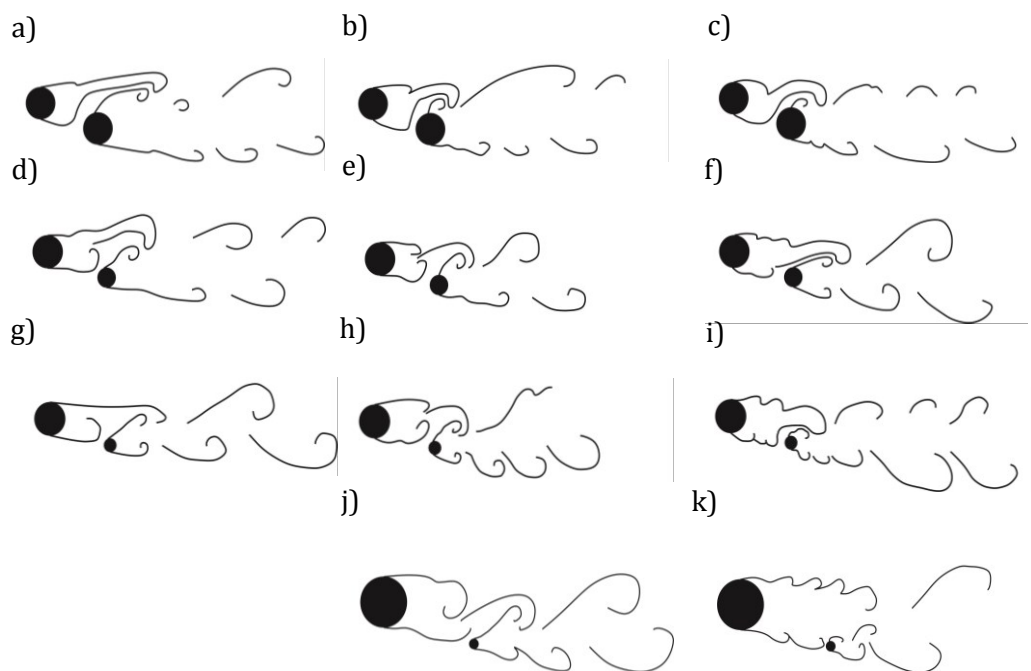
Pozice 3	Vliv velikosti D/d		značný
D/d	Vliv Re	Výskyt poruch a nestabilit	Sh konfigurace vs. Sh samostatného válce
1	vysoký	znatelný	menší
1,67	vysoký	značný	výrazně menší
2,5	vysoký	značný	CTA - větší, POD - výrazně menší
5	střední	znatelný	menší - podobné

Pozice 4

Druhý válec v Pozici 4 ($R/D = 2,11$, $\alpha = 22^\circ$) opět patří do oblasti popisované [14], [15], která může vést k potlačení nestabilit v úplavu. Sumner et al. [16] zařazují tuto oblast do regionu s párováním vírů a jejich zabalováním se do sebe. Tento mechanismus interakce smykové vrstvy prvního válce s vnitřní smykovou vrstvou druhého válce je v této Pozici pozorován velmi výrazně (tohoto jevu si bylo možné povšimnout i u některých předchozích Pozicích), což je vidět na schématech struktur na obr. 75. Blízký úplav je zde ještě více stlačen než v Pozici 3, ale i z tohoto důvodu smyková vrstva prvního válce není tak výrazně natažena. To se projevuje i ve zmenšení výskytu poruch v oblasti blízkého úplavu druhého válce, nicméně stále zde dochází k výraznému oslabování dominantních struktur, jak je to i patrné opět z poměrné mohutnosti POD módů. Proto většího významu nabývají víry tvořící se za druhým válcem, což je patrné jednak z vlastních tvarů POD módů (obr. 53) a také z uvedených schémat na obr. 75. Tyto mechanismy mají právě podíl na snížení dominantní frekvence v úplavu. Opět zde poměr $D/d = 5$ vybočuje, protože interakce smykových vrstev mají odlišný charakter, jako například v případě $Re = 1200$ (obr. 75j)), kdy spolu interagují vnější smyková vrstva prvního válce s vnitřní smykovou vrstvou druhého válce. Celkové zhodnocení polohy shrnuje tabulka č. 7.

Tabulka 7 Charakteristika Pozice 4 pro $D/d = 1, 1,67, 2,5$ a 5

Pozice 4	Vliv velikosti D/d		znatelný
D/d	Vliv Re	Výskyt poruch a nestabilit	Sh konfigurace vs. Sh samostatného válce
1	střední	znatelný	výrazně menší
1,67	střední	znatelný	menší
2,5	střední	znatelný	menší
5	střední	lehký	podobné

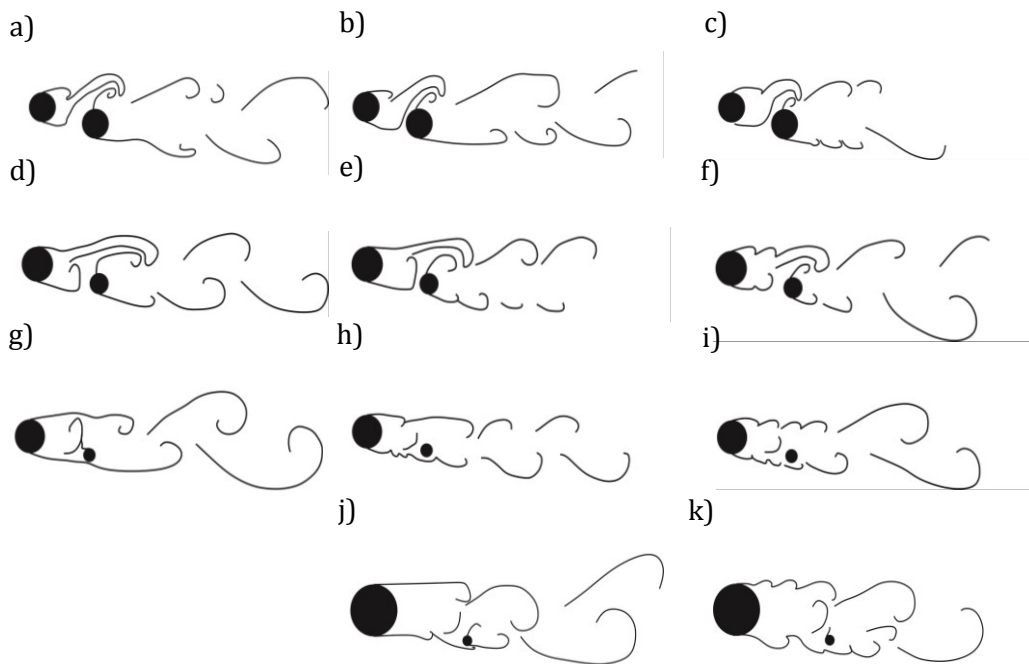


Obr. 75 Schéma typových struktur polohy 4, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$

Pozice 5

Druhý válec v Pozici 5 ($R/D = 2,09$, $\alpha = 17^\circ$) se nachází v oblasti potlačující nestability pouze určené v [15]. Dle Sumner et al. [16] spadá tato poloha do oblasti stejné jako v případě Pozice 3 – indukované separace. Blízký úplav je zde výrazně stlačen, smykové vrstvy prvního válce indukují oddělení vnitřní smykové vrstvy druhého válce (obr. 76). Oproti Pozici 4 je Pozice 5 posunuta v podstatě jen ve vertikálním směru k horizontální ose válce. I proto je protažení smykové vrstvy prvního válce zkráceno oproti předešlé poloze, což se projeví opět menší ztrátou jeho energie úplavu. Více energie tedy zbyde na formování dominantních struktur. To lze pozorovat z velikosti poměrných mohutností POD módů, které jsou vyšší než v předchozích dvou Pozicích. V případě $D/d = 2,5$ a 5 (obr. 76g) – k)) již ale není patrné proudění mezi válci, protože vnitřní smyková vrstva prvního válce se těsně před druhým válcem rozděljuje na dvě vlákna. Jedno směřuje do blízkého úplavu velkého válce, strhává část vnitřní smykové vrstvy druhého válce a recirkuluje zde, druhé vlákno obtéká z vnější strany druhý válec a pohlcuje jeho vnější smykovou vrstvu. Vymizí zde úplně formace samostatných vírů od druhého válce, která je u nižších D/d ještě pozorovatelná (obr. 76a) – i)). Nicméně ač mechanismy tvorby struktur se zde liší, výsledně lze ve všech poměrech pozorovat méně poruch a celkově úplav vykazuje větší stabilitu, vyšší

koherentnost (to vyplývá z tvarů POD módů – obr. 55 a 58) a snížení dominantní frekvence napříč celým úplavem oproti samostatnému válci. Celkové zhodnocení polohy shrnuje tabulka č. 8.



Obr. 76 Schéma typových struktur polohy 5, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$

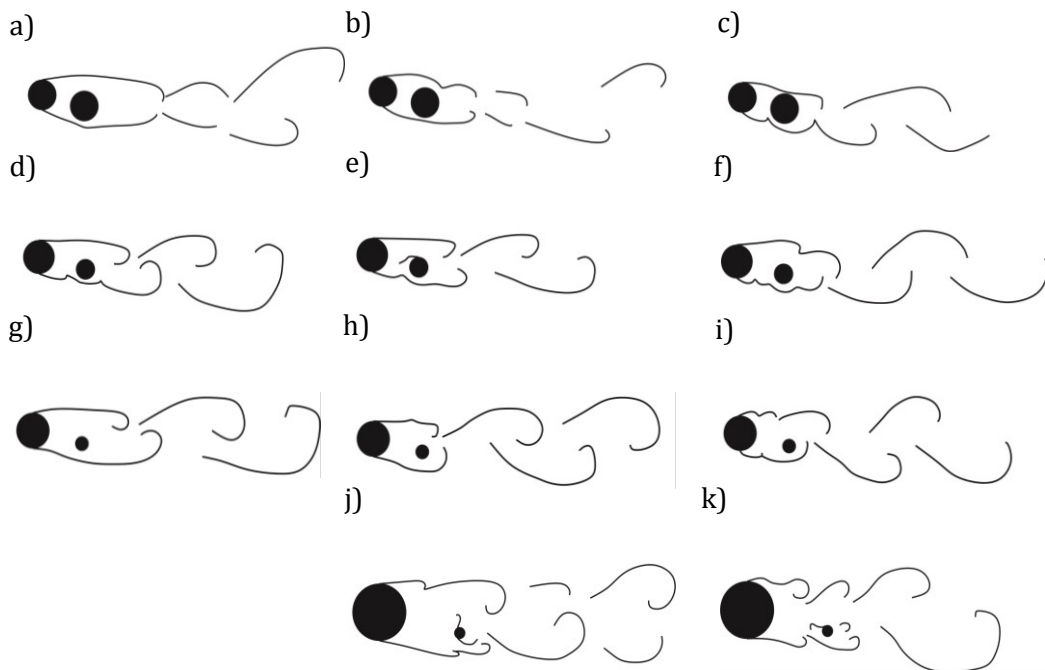
Tabulka 8 Charakteristika Pozice 5 pro $D/d = 1, 1,67, 2,5$ a 5

Pozice 5	Vliv velikosti D/d		
	Vliv Re	Výskyt poruch a nestabilit	znatelný
Sh konfigurace vs. Sh samostatného válce			
1	menší	lehký	výrazně menší
1,67	menší	lehký	výrazně menší
2,5	menší	lehký	menší
5	menší	lehký	menší

Pozice 6

Druhý válec v Pozici 6 ($R/D = 1,54$, $\alpha = 13^\circ$) má střed v oblasti, kterou [14], [15] určili jako region nemající vliv na potlačení stability. Sumner et al. [16] tuto oblast charakterizují jako oblast se znovu připojením smykových vrstev. Na obr. 77 je vidět schematické zobrazení struktur v této Pozici pro jednotlivé poměry D/d a je z nich zcela zřejmě patrné, že smykové vrstvy zadního válce samostatně zanikají (sloučí se s přiléhající smykovou vrstvou předního válce), případně jsou

odvedeny do blízkého úplavu prvního válce a zde cirkulují. Celkově se dá o této Pozici říci, že smykové vrstvy od obou válců společně formují úplav se silnými strukturami, jak je to patrné z vlastních tvarů POD a změna Reynoldsova čísla a i poměru D/d charakter výsledných struktur v úplavu nezmění oproti předchozím pozicím. Tím, že zde nedochází příliš k oslabení smykových vrstev prvního válce, Strouhalovo číslo se obvykle blíží hodnotě samostatného válce. K oslabení dochází lehce pouze u $D/d = 1$ a u vyšších Reynoldsových čísel pro $D/d = 1,67$, protože vnitřní smyková vrstva předního válce částečně naráží do vnějšího povrchu zadního válce. Celkové zhodnocení polohy shrnuje tabulka č. 9.



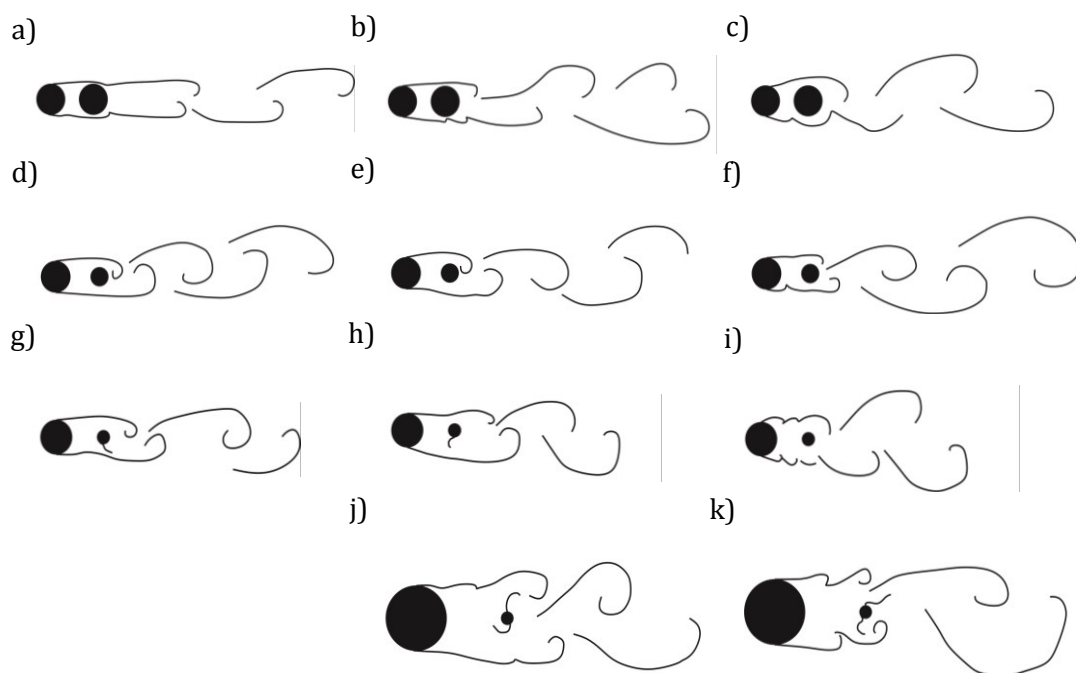
Obr. 77 Schéma typových struktur polohy 6, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$

Tabulka 9 Charakteristika Pozice 6 pro $D/d = 1, 1,67, 2,5$ a 5

Pozice 6	Vliv velikosti D/d		mírný
D/d	Vliv Re	Výskyt poruch a nestabilit	Sh konfigurace vs. Sh samostatného válce
1	zanedbatelný	lehký	menší
1,67	zanedbatelný	lehký	podobné
2,5	zanedbatelný	lehký	podobné
5	zanedbatelný	lehký	menší - podobné

Pozice 7

Druhý válec v Pozici 7 ($R/D = 1,5$, $\alpha = 0^\circ$) se nalézá v opět v oblasti definované [14], [15] jako oblast, která má vliv na potlačení nestabilit v úplavu. Podle Sumner et al. [16] je tato Pozice ve stejném regionu jako Pozice 6, tedy v oblasti, kde smykové vrstvy prvního válce přiléhají k druhému válci. Svým charakterem je tato Pozice (obr. 78) velmi podobná Pozici předchozí, přesto zde je ještě o něco zmenšen výskyt poruch (není tu vyosení druhého válce). Zeslabení smykových vrstev prvního válce je patrné pouze u $D/d = 1$, protože opět zde, ale tentokrát z obou stran, naráží tyto vrstvy na povrch druhého válce, což je i patrné ze schematického znázornění struktur na obr. 78a) – c). To může být příčinou zeslabení smykové vrstvy, což vede ke snížení dominantní frekvence v porovnání se samostatným válcem, tak jak to bylo ukázáno v pododstavci 4.2.2. Dalším důsledkem může být i oslabení silných struktur v proudění, jež se projeví poklesem hodnoty poměrné mohutnosti prvních dvou módů (pododstavec 5.1.2). Celkové zhodnocení polohy shrnuje tabulka č. 10.



Obr. 78 Schéma typových struktur polohy 7, a) $D/d = 1$, $Re = 500$, b) $D/d = 1$, $Re = 1200$, c) $D/d = 1$, $Re = 2500$, d) $D/d = 1,67$, $Re = 500$, e) $D/d = 1,67$, $Re = 1200$, f) $D/d = 1,67$, $Re = 2500$, g) $D/d = 2,5$, $Re = 500$, h) $D/d = 2,5$, $Re = 1200$, i) $D/d = 2,5$, $Re = 2500$, j) $D/d = 5$, $Re = 1200$, k) $D/d = 5$, $Re = 2500$

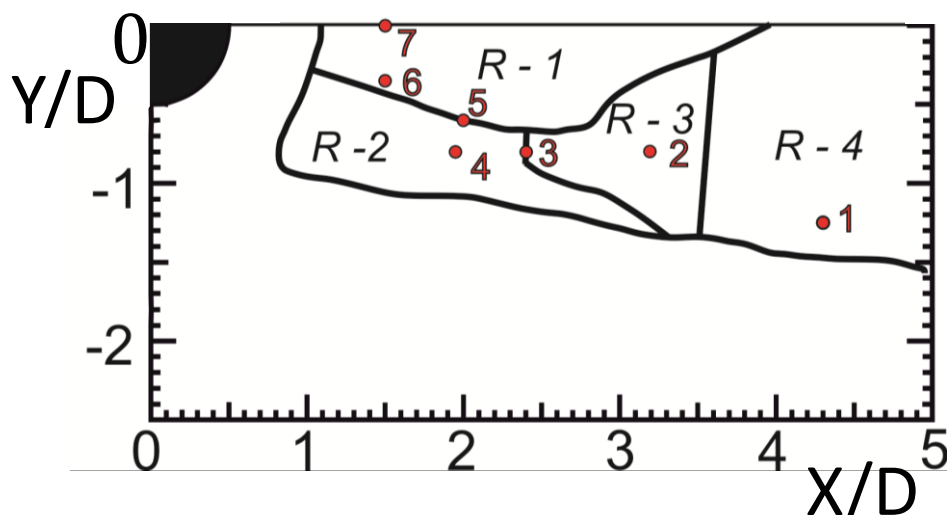
Tabulka 10 Charakteristika Pozice 7 pro $D/d = 1, 1,67, 2,5$ a 5

Pozice 7	Vliv velikosti D/d		mírný
D/d	Vliv Re	Výskyt poruch a nestabilit	Sh konfigurace vs. Sh samostatného válce
1	zanedbatelný	minimální	menší
1,67	zanedbatelný	minimální	podobné
2,5	zanedbatelný	minimální	podobné
5	zanedbatelný	minimální	menší - podobné

5.4 Shrnutí a zhodnocení výsledků a poznatků

Pokud by byly posuzovány polohy z hlediska snížení nestabilit v úplavu a jako hlavní kritérium by bylo bráno Strouhalovo číslo, nejvýhodnější pozicí by byla Pozice č. 5. Zde dochází k výraznému snížení hodnot dominantních frekvencí, resp. Strouhalových čísel a zároveň už se zde nevyskytuje tolik poruch, jako v Pozicích 2, 3 a 4. K zajímavým jevům dochází v Pozici 3. Její hodnota souřadnice ve směru y je totožná jako pro Pozice 2 a 4, na x -ové souřadnici se nachází mezi nimi, přesto zde ale dochází k většímu výskytu poruch. To ukazuje na rozhraní mechanismů formování struktur, protože u Pozice 2 se již má tendenci tvořit vírová řada a u Pozice 4 zase smyková vrstva prvního válce není tak oslabena protažením jako u Pozice 3. Pozice 4 a 5 se nachází téměř ve stejné x -ové vzdálenosti od středu prvního válce, přesto ale posun o $0,2D$ znatelně ovlivní formování úplavu, jak bylo ukázáno v podkapitole 5.3. Důvodem, proč tomu tak je, může ukázat porovnání schémat struktur na obr. 75 a 76. Tím, že je druhý válec posunut k horizontální středové ose prvního válce, začíná se toto uskupení chovat jako jedno těleso. Není to totožný případ jako v Pozici 6, která je ve vertikálním směru vzdálena o $0,25D$, ale patrně se zde opět nachází oblast přechodu mezi dvěma typy formování úplavů. Co se týče Pozice 7, tak ta vede k zmenšení Strouhalova čísla pouze u $D/d = 1$, u vyšších poměrů nebyly zaznamenány vyšší odchylky od případu samostatného válce. Totéž lze říci i o Pozici 1.

Z poznatků a výsledků uvedených v této práci a částečně i z poznatků získaných ostatními autory uvedenými v úvodu ([14], [15], [16], [17], [18]) bylo možné sestavit upravenou mapu oblastí pozic druhého válce s odlišným vlivem na chování a vlastnosti úplavu. Toto rozložení oblastí je zobrazeno na obr. 79.



Obr. 79 Mapa oblastí vlivu druhého válce a jednotlivé Pozice válců

Oblast R - 1 je charakteristická spojením smykových vrstev obou válců. Smykové vrstvy prvního válce buď přiléhají k samotnému povrchu druhého válce (především u $D/d = 1$) nebo kolem něj obtékají a strhávají jeho smykové vrstvy (u poměrů $D/d > 1$). V obou případech se tvoří jedna vírová stezka a tedy chování úplavu za válci se blíží chování úplavu za samostatným tělesem. Tato oblast pro $D/d = 1$ mírně snižuje dominantní frekvence úplavu, resp. Strouhalova čísla vůči samostatnému válci, pro $D/d > 1$ jsou dominantní frekvence podobné ve srovnání se samostatným válcem. Pokud se jedná o druhé nejsilnější frekvence v úplavu, jejich hodnota se pohybuje okolo dvojnásobku dominantní frekvence a nedochází zde k výraznějším odchylkám. Pouze u $D/d = 2,5$ u vyšších Reynoldsových čísel byla nalezena pouze jedna frekvence v úplavu.

Oblast R - 2 je charakteristická výrazným stlačením blízkého úplavu prvního válce a protažením jeho spojených smykových vrstev až do oblasti za válelem druhým. Vlivem těchto mechanismů na formování úplavu je zde vyšší pravděpodobnost výskytu poruch. Tato oblast je taktéž citlivější na změnu poměru D/d . Pro $D/d = 1$ zde dochází k výraznému snížení dominantních frekvencí, s nárůstem poměru D/d se rozdíl oproti Strouhalovým číslům samostatného válce snižuje. Pro $D/d = 2,5$ jsou hodnoty výrazně nižší zhruba do $Re = 3000$ a pak se přibližují samostatnému válci a pro $D/d = 5$ už jsou téměř totožné. U druhých výrazných frekvencí v úplavu dochází k mírným odchylkám v jejich trendu závislosti na čísle Reynoldsově. Pro $D/d = 1$ jsou hodnoty těchto frekvencí téměř trojnásobné, se zvyšujícím se D/d se blíží dvojnásobku.

Rozhraní mezi oblastí R - 1 a R - 2, kde se nalézá pozice 5, kombinuje vlastnosti obou oblastí. Pro všechny poměry D/d dochází ke snížení dominantní frekvence oproti samostatnému válci, u $D/d = 1$ a $1,67$ je toto snížení dokonce výrazné. Zároveň se v úplavech nevyskytuje tolik poruch, jako v regionu R - 2. Druhé silné frekvence v úplavech jsou zhruba dvojnásobné kromě

$D/d = 1$, kde zhruba od $Re = 500$ dochází k jejich výraznému nárůstu až zhruba na 3,5 násobek dominantních frekvencí.

Oblast R – 3 lze charakterizovat jako oblast se značným rozdílem v chování v závislosti na velikost D/d . V případě $D/d = 1$ se v oblasti nevyskytuje mnoho poruch a dominantní frekvence je výrazně snížena oproti samostatnému válci. Pro vyšší poměry D/d nastává jiná situace. V úplavu se vyskytuje více poruch a narůstá hodnota dominantní frekvence. Vlivem citelného oslabení úplavu prvního válce výrazným natažením jeho vnější smykové vrstvy získává úplav válce druhého silnější vliv. To vede právě již k zmiňovaným poruchám a výskytu více silných frekvencí v úplavech.

Na rozhraní oblastí R – 2 a R – 3, kde se nalézá Pozice 3, dochází opět ke kombinaci jevů vyskytujících se v sousedních regionech. Rozdíl oproti rozhraní R – 1 a R – 2 je, že zde dochází k výraznému nárůstu poruch šířících se všemi směry. V úplavech je obtížné najít jednu dominantní frekvenci z měření žhavenou sondou, protože velmi záleží na její poloze v úplavu. To ukazuje na výskyt několika silných struktur a jejich interakce v pozorovaném úplavu válců.

Druhý válec umístěný v oblast R – 4 výrazněji neovlivňuje úplav prvního válce, pouze silnější vliv má v případě, kdy $D/d = 1$. V tomto případě dochází ke snížení dominantní frekvence oproti samostatnému válci. Co se týče výskytu poruch, tak nebyly zde výrazněji zaznamenány.

Porovnávací kritéria hodnocení poloh uvedených v předchozí podkapitole byla převážně vztažena k samostatnému válci a vývoji struktur v jeho úplavu. Z tohoto hlediska byly i hodnoceny výskyty poruch a nestabilit v proudění. Nicméně při analýze POD samostatného válce se vyskytly mezi prvními 7 módy vlastní tvary proudění, jak už i bylo zmíněno v kapitole 5.1, ve kterých se nevyskytují struktury alespoň přibližně odpovídající vírům. Spíše v těchto módech byl rozpoznatelný tvar samotného proudu. A to i přesto, jak to již bylo uvedeno v kapitole 3.4, že od snímků či polí vířivosti a rychlosti před analýzou POD byla odečtena střední hodnota proudu. Tyto módy s tvary proudění se vyskytují u všech tří typů zpracovávaných dat. Tento jev zaznamenali i někteří jiní autoři, například Zhang et. al ve své práci [31]. Důvod nebyl při zpracování této práce plně objasněn, nicméně videa z vizualizací napověděla, kde by mohl mít tento jev příčinu. V podstatě téměř u každého nastavení konfigurace a i u samostatných válců byly pozorovány časově velmi krátké ztráty stability, při kterých vymizela v úplavu vírová stezka. Vzhledem k délce některých záznamů a četnosti výskytu děje (v řádech desítek sekund) nebyla dosud zjištěna frekvence výskytu tohoto děje pro jednotlivá nastavení a Reynoldsova čísla. Z analýzy POD taktéž vyplynulo, že záleží, kolik snímků se k vyhodnocení použije a jestli právě ta vybraná sada obsahuje tuto výraznou ztrátu stability. Při zpracování dat z vizualizace metodou POD je také důležité rozpoznat, kdy změna v průběhu koeficientů POD může být způsobena vlivem kvality snímku a

kdy vlivem rozpadu vírové stezky. Proto nelze bez znalosti vizuálního záznamu určit v časovém průběhu POD koeficientu a , kdy k anomálii dochází.

6 Závěr

Tato disertační práce se zaměřila na studium proudového pole dvou válců ve stupňovité konfiguraci, na interakce jejich struktur a jejich vliv na celkovou stabilitu úplavu. V úvodní kapitole byly na základě rešerše dané problematiky formulovány čtyři hlavní cíle, které pomohou blíže porozumět dané problematice.

1. Stanovit vliv geometrického uspořádání válců a Reynoldsova čísla na stabilitu v úplavu, jeho topologii a dominantní frekvence.

Na základě rozsáhlé sady měření a následných analýz byl určen vliv pozice druhého válce v úplavu válce prvního pro sedm konfigurací vzájemných poloh. Jednotlivé Pozice druhého válce byly zvoleny na základě předchozích výzkumů několika autorů [14], [15], kteří definovali oblasti v úplavu válce, které mohou vést k potlačení nestabilit, ale pouze pro nízká Reynoldsova čísla a vyšší poměry D/d . Další řada autorů se zabývala interakcí dvou válců o stejném průměru, např. [16], [17], [29]. Vznikly tedy zde otázky, k jakému ovlivnění dojde, pokud se budou průměry válců mírně lišit a jak se to projeví v závislosti na velikosti Reynoldsova čísla a jaké pozice válců mohou účinně vést k celkové stabilitě v úplavu snížením velikosti dominantních frekvencí. Z výsledků předložených na předešlých stranách a z hodnotících kritérií vyplývá pro daný rozsah poměrů průměrů válců:

a) Existují takové polohy v úplavu, kde přítomnost druhého válce nějak zásadním způsobem neovlivní celkový úplav, obzvláště pokud je $D/d > 1$. Jedná se o Pozici 1 ($R/D = 4,48$, $\alpha = 16^\circ$), ostatními autory je tato oblast definována jako oblast bez vlivu na stabilitu. V případě $D/d = 1$ dochází k mírnému oslabení dominantní frekvence.

b) Ačkoliv je válec umístěn v oblasti, kde by mohl přispívat ke snížení nestabilit (dle již zmíněných autorů), může způsobit výrazný nárůst lokálních poruch, jež stěžují identifikaci jedné dominantní frekvence v oblasti do $10D$ a zároveň přispět k nezanedbatelnému pohybu struktur ve směru podélné osy válce. Tato situace byla ve větší či menší míře pozorována u tří Pozic válců: 2 ($R/D = 3,3$, $\alpha = 14^\circ$), 3 ($R/D = 5,3$, $\alpha = 18^\circ$) a 4 ($R/D = 2,11$, $\alpha = 22^\circ$). Zároveň okolí Pozice 3 pro všechny poměry D/d je pomyslnou hranicí mechanismů formování struktur.

c) Výsledky ukázaly, že ne v každé pozici má změna Reynoldsova čísla výrazný důsledek. V Pozicích 2, 3, 4, a mírněji v Pozici 5 ($R/D = 2,09$, $\alpha = 17^\circ$) vede nárůst nabíhající rychlosti k výraznějším změnám ve formování struktur a i průběhu Strouhalových čísel, kdežto v Pozicích 1, 6 ($R/D = 1,54$, $\alpha = 13^\circ$) a 7 ($R/D = 1,5$, $\alpha = 0^\circ$) k tak výrazným odlišnostem nedochází.

d) Z měření CTA i analýz POD vyplynulo, že umístění válce do úplavu válce jiného o stejném průměru vede ve všech zkoumaných případech ke snížení velikosti dominantní

frekvence. To ale neplatí pro poměry $D/d > 1$. V Pozici 3 a mírně i v Pozici 2 totiž nastává situace, jak bude i zmíněno v bodu 4, kdy dochází k problému s určením jedné dominantní frekvence. Zde se liší hodnoty dopočítaných Strouhalových čísel z analýzy POD a z měření žhavenou sondou. V Pozicích 1, 6 a 7 u $D/d > 1$ zůstává velikost dominantní frekvence vůči samostatnému válci v podstatě nezměněna.

e) Z měření metodou CTA bylo možné pro jednotlivé polohy získat funkční závislost Strouhalova čísla na čísla Reynoldsově pro $D/d = 1$ a $D/d = 2,5$. Získané závislosti predikují velikost Strouhalova čísla i pro režimy Reynoldsových čísel, jež nebyly změřeny a zároveň umožňují porovnat jednotlivé křivky závislostí a určit, jak která Pozice má vliv na charakter vývoje Strouhalových čísel. Z grafického porovnání vyplývá, že Pozice 5, 6 a 7 mají podobný trend vývoje a tudíž lze říci, že v těchto konfiguracích se pro oba poměry D/d odehrávají podobné děje, resp. děje vedou k podobným výsledkům.

Na základě výše uvedených poznatků a rešerše mohla být sestavena mapa s oblastmi pozic druhého válce s odlišným vlivem na chování a vlastnosti úplavu.

2. Identifikovat základní struktury v proudění vzniklých interakcí smykových vrstev formovaných oběma válci a jejich vliv na výsledné dominantní frekvence v úplavu.

Z podrobného rozboru vizualizací a jejich následné analýzy metodou POD byly identifikovány významné struktury, jež se podílejí na formování úplavu za dvěma válci a ovlivňují frekvence vírů v Karmánově vírové stezce. Detailní popis je uveden v jednotlivých kapitolách. Z provedených měření a rozborů lze ale obecně říci, že ve sledované oblasti od $1,5D$ do $3,2D$ ve směru osy x hraje významnou roli protažená smyková vrstva prvního válce. Ve vzdálenosti $1,5D$ při úhlu natočení 0° a 13° není příliš oslabena, pouze přiléhá k povrchu druhého válce a zde se spojuje s jeho smykovými vrstvami. Jak se druhý válec vzdaluje od prvního a více se zvětšuje úhel jeho natočení, smyková vrstva prvního válce se protahuje a zeslabuje. V blízkosti povrchu druhého válce tato vrstva indukuje oddělení jeho vnitřní smykové vrstvy a má tendenci s ní se zabalovat a tvořit víry. Nicméně vlivem oslabení a tendencí druhého válce tvořit menší víry s jinou frekvencí (to platí především Pro $D/d > 1$) dochází při jejich vzájemné interakci k poruchám, které jsou ale dále v úplavu utlumovány. Toto je zejména patrné v Pozicích 2 ($x/D = 3,2$, $R/D = 3,3$, $\alpha = 14^\circ$), 3 ($x/D = 2,4$, $R/D = 5,3$, $\alpha = 18^\circ$) a 4 ($x/D = 1,95$, $R/D = 2,11$, $\alpha = 22^\circ$). Pokud vnější smyková vrstva druhého válce přímo neinteraguje se smykovou vrstvou druhého válce, ale přesto válec svou polohou zasahuje přímo do úplavu válce prvního, dochází k nezanedbatelnému vlivu na celkové formování úplavu právě vlivem vnější smykové vrstvy druhého válce. Obzvláště způsob interakce a míra oslabení smykových vrstev prvního válce může napovědět, jak se budou lišit dominantní frekvence úplavu dané konfigurace válců od frekvencí válce samostatného.

3. Vyšetřit experimentálně ovlivnění dominantní struktury v úplavu změnou polohy druhého válce.

Na základě zhodnocení možností a vybavení laboratoří byly vybrány 3 experimentální metody: měření fluktuací rychlostí v úplavu žhavenou sondou – metoda CTA, měření rychlostních polí pomocí metody TR PIV a vizualizace proudění. Metodou CTA byly získány informace v nejširším intervalu Reynoldsových čísel od 240 do 8700. Tato měření by se dala rozdělit do tří skupin. První skupina byla zaměřena na získání informací o tom, jak se mění velikost dominantních a dalších silných frekvencí na základě umístění žhavené sondy v proudovém poli. Proto byla pro poměry průměrů válců $D/d = 1$ a $2,5$ změřena v úplavu síť 120 – 140 bodů pro 16 Reynoldsových čísel v rozmezí od 240 do 2700. Tato měření poskytla podstatné informace o lokálních dějích a jejich významu. Tyto výsledky následně mohly být využity pro stanovení menšího počtu významných bodů, do kterých může být žhavená sonda umístěna tak, aby byly získány stěžejní informace o dominantních frekvencích v úplavu. Druhá skupina měření vycházela z předchozího – žhavená sonda byla polohována pouze do sítě 10 významných bodů v úplavu. Proměřen byl větší rozsah Reynoldsových čísel od 625 do 8700 pro poměr válců $D/d = 2,5$. Poslední třetí skupinou měření bylo vyšetřování dominantních frekvencí pomocí dvou žhavených sond v jednom okamžiku ve dvou místech v úplavu za válci. Tato místa měla stejné x-ové a y-nové souřadnice, lišila se pouze z-ovou souřadnicí. Cílem bylo zjistit, jestli a jak významně se liší dominantní frekvence. Informace získané z tohoto měření pomohla pochopit intenzitu pohybu struktur ve směru kolmém k měřené rovině x, y. Ze získaných dominantních a dalších významných frekvencí byla dopočítána Strouhalova čísla a porovnána s hodnotami samostatného válce. Na základě toho mohlo být stanoveno, která Pozice a který poměr průměrů vede ke snížení dominantní frekvence úplavu a tedy i k vyšší stabilitě proudu. Metodou PIV byla získána sada dat pro Reynoldsovo číslo 500 a poměr válců $D/d = 2.5$. Z měření byla získána rychlostní pole, pole vířivosti a proudnice ve sledované oblasti. Výsledky a i následné zpracování poskytly informace o rozložení střední rychlosti pro jednotlivé konfigurace válců, z fluktuací rychlosti bylo možné určit dominantní frekvence v požadovaných místech a soubory dat z okamžitých rychlostních polí a polí vířivosti mohly být dále analyzovány metodou POD. Třetí metodou zkoumající úplav byla vizualizace proudění. Vizualizace jednotlivých konfigurací a režimů tří Reynoldsových čísel byly zaznamenávány na kameru do sekvencí o délce 1- 3 minuty. Tak bylo možné prozkoumat vývoj struktur kontinuálně v delším časovém úseku. Stejně jako v případě měření PIV data z vizualizací byla následně analyzována metodou POD.

4. Implementovat metodu analýzy proudění POD na identifikaci struktur proudění a zhodnotit použitelnost dosažitelných výsledků.

Analýza dat pomocí metody vlastní ortogonální dekompozice byla aplikována na data z měření PIV a na data získaná z vizualizací. Z PIV byly použity dva typy dat – rychlostní pole a pole vířivosti. Analýzou POD z nich byly získány vlastní tvary proudění vždy vztahované ke vstupní veličině a jejich poměrné energie, resp. mohutnosti. Metoda POD aplikovaná na pole rychlostí ve svých módech ukázala na nejsilnější pohybující se struktury a poměrná energie zde vyjadřovala energii kinetickou (v ploše). První POD módy z polí vířivosti zase prezentovaly nejsilnější koherentní struktury a jejich poměrnou energii – v tomto případě enstrofii. Pokud jde o vizualizační měření, zde nelze v případě vstupních dat hovořit o nějaké fyzikální veličině. POD módy vizualizací ukázaly na významné struktury a jejich poměrnou mohutnost na základě střídání intenzity šedé. Ve výsledcích byla následně hledána analogie k módům POD z rychlostí a vířivosti. K rozklíčování struktur a jejich významu právě přispěly i ostatní měření a rozborů. Proto bylo možné identifikovat jednotlivé struktury v proudu, určit jejich význam a získat tak celkový přehled o proudovém poli. Ze spočítaných koeficientů POD byly frekvenční analýzou zjištěny dominantní frekvence každého módu a z nich zjištěna Strouhalova čísla. Porovnání s daty z CTA se ukázalo, že Strouhalova čísla si ve většině případů odpovídají. V případech, kdy tomu tak nebylo, další rozborů ukázaly, že v konfiguracích, kde je větší výskyt poruch, dochází ke zdatelným změnám ve velikosti dominantní frekvence v závislosti na pozici žhavané sondy. Metoda POD neanalyzuje děje bodově ale plošně a první dva módy jsou obvykle reprezentanty nejsilnějších struktur, což je jedna z odlišností této metody od CTA. Dalším aspektem POD je, jak bylo ukázáno, že v některých případech nejsilnější struktury v prvních dvou módech se svou poměrnou hodnotou mohutnosti liší jen o málo od struktur v módech následujících. Proto pokud k tomu v některých konfiguracích došlo, poukazovalo to na to, že stanovení jedné dominantní frekvence charakterizující zkoumanou oblast úplavu v podstatě nelze, což i potvrdila data z CTA. Z rozboru vlastních tvarů POD z vizualizací bylo ukázáno v konfrontaci s POD z polí vířivosti a rychlosti a s analýzou samotné vizualizace, jak lze interpretovat struktury obsažené v prvních módech a identifikovat pravděpodobné koherentní struktury. Z předložených výsledků je jednoznačně patrné, že POD metoda může významně pomoci v identifikaci struktur v proudění a to nejen ze vstupních dat, jejichž podstatou je změna fyzikální veličiny, ale také z dat, kde se mění pouze vizuální charakter a jde tedy o analogii odpovídající právě fyzikálním dějům v proudovém poli.

6.1 Přínos oboru

Tato práce se zabývala základním výzkumem proudového pole kolem válců, a proto její smysl především spočívá ve využití zde uvedených poznatků pro další výzkum v dané oblasti anebo v aplikaci na konkrétní problémy řešené v konstrukci strojů, zařízení a jiných oborech, které se potkávají s prouděním. Největší nový přínos oboru mechanika tekutin spočívá v definování oblastí v úplavu válce z hlediska vlivu na lokální poruchy a celkovou nestabilitu úplavu. Byly nalezeny mechanismy, jež vedou ke snížení dominantní frekvence úplavu pomocí druhého válce umístěného v úplavu v souvislosti s jeho velikostí a velikostí Reynoldsova čísla. Byla vypracována schémata struktur objevujících se v úplavu pro dané konfigurace a tři Reynoldsova čísla. Ze všech poznatků mohla být dále vypracována upravená mapa oblastí pozic druhého válce s odlišným vlivem na chování a vlastnosti úplavu. Neméně významným a novým přínosem je taktéž nalezení funkční závislosti Strouhalova čísla na čísle Reynoldsově pro dva různé průměry a sadu pozic druhého válce v úplavu. Tato funkční závislost dobře dokumentuje vliv změny poměru průměrů válců na dominantní frekvence v úplavu. A na závěr další nový přínos, který má přesah daného oboru, spočívá ve využití analýzy vlastní ortogonální dekompozice (POD) na obrazová data. Byl vytvořen systém identifikace struktur z těchto dat pomocí analogie a nástin interpretace velikostí poměrných mohutnosti vlastních tvarů proudění obsažených v jednotlivých módech.

6.2 Možnosti dalšího výzkumu

Z následných výzkumů může být přínosem vyšetření vlivu zde uvedených konfigurací na vzdálený úplav a prozkoumání těchto úplavů v prostoru. Další rozsáhlou kapitolou výzkumu nabízí rozvoj a další aplikace metody POD, její možnosti v závislosti na typu a kvalitě vstupních dat. Z praktického hlediska využití dosažených nových poznatků o úplavech dvou válců lze uplatnit v celé škále strojních a technických aplikací, například při řešení obtékání součástek kapalinou anebo v případě výzkumu vnitřní aerodynamiky u automobilů, což byl i původní impuls pro vznik této disertační práce.

7 Literatura

- [1] Roshko, A. (1954): On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington DC
- [2] Williamson, C. H. K. (1996). Vortex Dynamics in the Cylinder Wake. *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 28, 477-539.
- [3] Zdravkovich, M. M. (1997) *Flow Around Circular Cylinders*. Oxford University Press.
- [4] Williamson, C.H.K., Brown, G.L. (1998): A Series In $1/\sqrt{Re}$ To Represent the Strouhal–Reynolds Number Relationship of the Cylinder Wake, vol. 12, Issue 8, 1073-1085
- [5] Vít, T., Ren, M., Trávníček, Z., Maršík, F., Rindt, C.C.M. (2007): The Influence of Temperature Gradient on the Strouhal–Reynolds Number Relationship for Water and Air, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 31, Issue 7, 751-760
- [6] Williamson, C. (1989): Oblique and Parallel Modes of Vortex Shedding in the Wake of a Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 206, 579-627
- [7] Fey, U., König, M., Eckelmann, H. (1998): A New Strouhal–Reynolds-Number Relationship for the Circular Cylinder in the Range $47 < Re < 2 \times 10^5$, *Physics of Fluids*, vol.10, Issue 7, 1547-1549
- [8] Roushan, P., Wu, X., L. (2005): Structure-Based Interpretation of the Strouhal-Reynolds Number Relationship, *Physical Review Letters*, vol. 94, 054504
- [9] Zdravkovich M. M. (1977): Review—Review of Flow Interference Between Two Circular Cylinders in Various Arrangements, *ASME. Journal of Fluids Engineering*, vol. 99(4), 618—633
- [10] Choi H., Lee I., Jeon W. P., Kim J. (2008): Control of Flow Over a Bluff Body, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol.40, 113—39
- [11] Sumner, D. (2010): Two Circular Cylinders in Cross-Flow: A Review, *Journal of Fluids and Structures*, Volume 26, Issue 6, August 2010, Pages 849 - 899.
- [12] Zhou, Y., Alam, M. M. (2016): Wake of Two Interacting Circular Cylinders: A Review, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 62, Part B, 510 - 537
- [13] Zdravkovich, M. M. (1987): The Effects of Interference Between Circular Cylinders in Cross Flow, *Journal of Fluids and Structures*, vol. 1, Issue 2, 239-261

- [14] Strykowski, P. J., Sreenivasan, K. R. (1990): On the Formation of Vortex 'Shedding' at Low Reynolds Numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 218, 71 - 107
- [15] Hwang, Y., Choi, H. (2006): Control Of Absolute Instability By Basic-Flow Modification In A Parallel Wake At Low Reynolds Number, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 560, 465-475.
- [16] Sumner, D., Price, S.J., Païdoussis, M.P. (2000): Flow-Pattern Identification for Two Staggered Circular Cylinders in Cross-Flow, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 411, 263 - 303
- [17] Hu, J. C., Zhou, Y. (2008): Flow Structure Behind Two Staggered Circular Cylinders. Part 1. Downstream Evolution And Classification, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 607, 51 - 80
- [18] Zhou, Y., Feng, S. X., Alam, M. M., Bai, H. L. (2009): Reynolds Number Effect on the Wake of Two Staggered Cylinders, *Physics of Fluids*, vol. 21, 125105
- [19] Wong, C.W., Zhou, Y., Alam, M. M., Zhou, (2014): Dependence of Flow Classification on the Reynolds Number for a Two-Cylinder Wake, *Journal of Fluids and Structures*, vol. 49, 485-497
- [20] Holmes, P., Lumley, J. L., Berkooz, G., (1996): *Turbulence, Coherent Structures, Dynamical Systems and Symmetry*, Cambridge Monographs on Mechanics, Cambridge University Press
- [21] Lumley, J. L. (1967): The Structure of Inhomogeneous Turbulence, In: Yaglom AM, Tatarski VI (eds) *Atmospheric Turbulence and Wave Propagation*. Nauka, Moscow, 166–178
- [22] Kostas, J., Soria, J., Chong, M. S. (2005): A Comparison between Snapshot POD Analysis of PIV Velocity and Vorticity Data, *Experiments in Fluids*, vol. 38,146–160
- [23] Tang, S. L, Djenidi, L., Antonia, R. A., Zhou, Y. (2015): Comparison Between Velocity- and Vorticity-Based POD Methods in a Turbulent Wake, *Experiments in Fluids*, 56 - 169
- [24] Brevis, W., García-Villalba, M. (2011): Shallow-Flow Visualization Analysis by Proper Orthogonal Decomposition, *Journal of Hydraulic Research*, vol. 49, issue 5, 586-594
- [25] Chatterjee, A. (2000): An Introduction to the Proper Orthogonal Decomposition, *Current Science*, vol. 78, issue 7, 808-817
- [26] Sirovich, L. (1987): Turbulence and the Dynamics of Coherent Structures Part I: Coherent Structures. *Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 45, issue 3, 561-571
- [27] Berkooz, G., Holmes, P., Lumley, J. L. (1993): The Proper Orthogonal Decomposition in the Analysis of Turbulent Flows, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 25, issue 1, 539-575

- [28] Dantec Dynamics A/S (2002): FlowManager Software and Introduction to PIV Instrumentation, Dantec Dynamics A/S, Skovlunde
- [29] Alam, M. M., Meyer, J. P. (2011): Two Interacting Cylinders in Cross Flow, Physical Review E 84, 056304
- [30] Hussain, A. (1986): Coherent Structures and Turbulence, Journal of Fluid Mechanics, vol. 173, 303-356
- [31] Zhang, Q., Liu, Y., Wang, S. (2014): The Identification of Coherent Structures Using Proper Orthogonal Decomposition and Dynamic Mode Decomposition, Journal of Fluids and Structures, vol. 49, 53-72

7.1 Literatura autorky uvedená v disertační práci

- [RV1] Vitkovičová, R., Skála, V., Čížek, J., Nožička, J. (2014): Experimental Investigation of the Flow Pattern Behind a Cylinder, Fluid mechanics and thermodynamics - Proceedings of Students' Work in the Year 2013/2014, Eds.: Ježek, J., Nožička, J., Adamec, J., Šafařík, P., ČVUT, Praha, 2014, pages 53-61, EAN 978-80-86786-36-0
- [RV2] Vitkovičová, R., Yokoi, Y. (2016): The Experimental and Numerical Investigation of a Wake behind Two Circular Cylinders in Staggered Arrangement, In: Book of Abstracts of 7th International Conference On Vortex Flows And Vortex Models, Edited by Kornev, N., Rostock, 20.09.2016 - 22.09.2016. Menzel - Verlag, Ostseebad Kuhlungsborn, pages 89 – 90, ISBN 978-3-946694-00-7
- [RV3] Vitkovičová, R., Nožička, J., Čížek, J., Skála, V. (2015): Experimental Investigation of the Interaction of Two Cylinders in the Flow Pattern, In: Proceedings of Experimental Fluid Mechanics 2014, Edited by Dančová, P., Vít, T., The European Physical Journal Web of Conferences, vol. 92, 02110, Number of pages: 6
- [RV4] Yokoi Y., Vitkovičová R. (2017): Experimental Investigation of the Mutual Interference Flow of two Circular Cylinders by Flow Visualization, In: Proceedings of Experimental Fluid Mechanics 2016, Edited by Dančová, P., The European Physical Journal Web of Conferences vol.143, 02146, Number of pages: 6
- [RV5] Vitkovičová, R., Skála, V. (2016): Dominant Frequencies in the Wake of the Two Cylinders, In: Proceedings of the 35th Meeting of Departments of Fluid Mechanics and Thermomechanics, Edited by Olšiak, R., Prikkel, K., The American Institute of Physics Conference Proceedings, vol.1768, 020024, Number of pages: 6

- [RV6] Vitkovičová, R. (2018): Analýza úplavu za dvěma válci metodou POD, In: Proceedings of 32th Symposium on Anemometry, Edited by Chara, Z., Litice, 29.05.2016 - 30.05.2018. Praha: Institute of Hydrodynamics ASCR, str. 86 - 93, ISBN 978-80-87117-17-0.
- [RV7] Vitkovičová, R., Skála, V., A Čížek, J. (2013): Experimentální vyšetřování nestacionárního proudění za válcem. In: Sborník příspěvků Mezinárodní Masarykovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2013. Hradec Králové: MAGNANIMITAS. 4. vyd. 2013. ISBN 978-80-87952-00-9, ETTN 042-13-13025-12, str. 4251-4259
- [RV8] Vitkovičová, R., Skála, V. (2016): Interaction of two Circular Cylinders in the Flow Field at Low Reynolds Numbers, In: Proceedings of Experimental Fluid Mechanics 2015, Edited by Dančová, P., Veselý, M., The European Physical Journal Web of Conferences, vol. 114, 02138, Number of pages: 4

7.2 Publikační činnost autorky nevztahující se k tématu disertační práce

- [RV9] Vitkovičová, R. (2013): Experimentální zařízení pro návrh a optimalizaci elementů pro zpětnou kondenzaci, In: Proceedings of XXXII. Stretnutie katedier mechaniky tekutín a termomechaniky 2013. Tatranská Lomnica, 25.06.2013 - 28.06.2013. Žilina: ŽU Žilina - EDIS. 2013, s. 295-298. První. ISBN 978-80-554-0715-9. Dostupné z: <http://fluids.fs.cvut.cz/www/>
- [RV10] Vitkovičová, R., Čížek, J. (2014): Měření charakteristik eliminátorů kapiček, In: Proceedings of 28th Symposium on Anemometry, Edited by Chara, Z., Litice, 03.06.2014 - 04.06.2014. Praha: AV ČR, Ústav pro hydrodynamiku. 2014, s. 104-107. ISBN 978-80-87117-11-8.
- [RV11] Vitkovičová, R., Čížek, J., A Stodůlka, J. (2014): Měření parametrů eliminátorů kapiček, In: Proceedings of 33. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky. Praha, 09.09.2014 - 11.09.2014. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 2014, s. 104-107. první. ISBN 978-80-01-05538-0.
- [RV12] Čížek, J., Dvořák, L., Filipický, J., Sumara, Z., Štorch, V., Vitkovič, P., Vitkovičová, R., Zimčík, L. (2014): Výzkumné aktivity pracovníků Ústavu 12112 v posledních letech, In: Proceedings of 28th Symposium on Anemometry, Edited by Chara, Z., Litice, 03.06.2014 - 04.06.2014. Praha: Ústav pro hydrodynamiku AVČR. 2014, s. 3-6. ISBN 978-80-87117-11-8.

- [RV13] Stodůlka, J., Vitkovičová, R. (2015): Design and CFD Simulation of the Drift Eliminators in Comparison with PIV Results, In: Proceedings of Experimental Fluid Mechanics 2014, Edited by Dančová, P., Vít, T., The European Physical Journal Web of Conferences, vol. 92, 02086
- [RV14] Vitkovičová, R., Vitkovič, P., Čížek, J. (2015): Měření IPI v laboratorních a provozních podmínkách, In: Proceedings of 29th Symposium on Anemometry, Edited by Chara, Z., Litice, 02.06.2015 - 03.06.2015. Praha: Institute of Hydrodynamics ASCR. 2015, s. 89-96. ISBN 978-80-87117-13-2.
- [RV15] Vitkovičová, R., Vitkovič, P., Čížek, J. (2015): Modifikace metody IPI pro určování velikosti úletu z chladicích věží, In: Proceedings of 34. Setkání kateder vyučujících Mechaniku tekutin a Termomechaniku. Litoměřice, 23.06.2015 - 25.06.2015. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně. 2015, s. 81-84. ISBN 978-80-7414-795-1.
- [RV16] Čížek, J., Dvořák, L., Filipický, J., Sumara, Z., Štorch, V., Vitkovič, P., Vitkovičová, R. (2015): Oblasti výzkumu aktuálně řešené na ÚMTaT, In: Proceedings of 29th Symposium on Anemometry, Edited by Chara, Z., Litice, 02.06.2015 - 03.06.2015. Praha: Institute of Hydrodynamics ASCR. 2015, s. 5-8. ISBN 978-80-87117-13-2.
- [RV17] Stodůlka, J., Vitkovičová, R. (2016): Estimation of the Drift Eliminator Efficiency Using Numerical and Experimental Methods, In: Proceedings of Experimental Fluid Mechanics 2015, Edited by Dančová, P., Veselý, M., The European Physical Journal Web of Conferences, vol. 114, 02111
- [RV18] Vitkovičová, R., Stodůlka, J. (2016): Eliminátory úletu s možností zpětné kondenzace, In: Proceedings of 30th Symposium on Anemometry, Edited by Chara, Z., Litice, 31.05.2016 - 01.06.2016. Praha: Institute of Hydrodynamics ASCR. 2016, s. 111-116. ISBN 978-80-87117-14-9.
- [RV19] Vitkovičová, R. (2017): Influence of Detergents on Water Drift in Cooling Towers, In: Proceedings of Experimental Fluid Mechanics 2016, Edited by Dančová, P., The European Physical Journal Web of Conferences vol. 143, 02143
- [RV20] Vitkovičová, R., Vitkovic, P. (2018): Control of Droplet Size in Rain-Zone in Wet Cooling Tower, In: Proceedings of Experimental Fluid Mechanics 2017, Edited by Dančová, P., Novosád, J., The European Physical Journal Web of Conferences vol. 180, 02119
- [RV21] Čížek, J., Vitkovičová, R., Sumara, Z., Filipický, J., Nožička, J. (2012): Komponenty motorového prostoru - experimentální část - 1-B, Výzkumná zpráva, Tř. Václava Klementa 869, Mladá Boleslav, SKODA AUTO, A.S.. 2012, SV-2012/1
- [RV22] Čížek, J., Sumara, Z., Vitkovičová, R., Filipický, J., Nožička, J. (2013): Komponenty motorového prostoru - experimentální část - 1-C, Výzkumná zpráva, Tř. Václava Klementa 869, Mladá Boleslav, Škoda Auto, a.s.. 2013, SV-2013/1.

- [RV23] Čížek, J., Stodůlka, J., Schmirler, M., Vitkovičová, R., Nožička, J. (2014): Spolupráce na citlivostních výpočtech hydrocyklonů, Výzkumná zpráva, Argentinská 320/34: Intecha, spol, s.r.o.. 2014, INT-2014-1.
- [RV24] Vitkovič, P., Čížek, J., Vitkovičová, R., Nožička, J. (2014): Měření rychlostního pole v okolí míchadla, Výzkumná zpráva, Na Vlčovce 13/4, Praha 6: ENVI-PUR, s.r.o.. 2014, ENV-2014-1.
- [RV25] Vitkovič, P., Vitkovičová, R., Stodůlka, J., Dvořák, L., Čížek, J. (2014): Experimentální stanoviště pro měření parametrů vestaveb chladicích věží, Výzkumná zpráva, Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky, Praha 6, CZ. 2014, Z-V02/14
- [RV26] Čížek, J., Filipický, J., Sumara, Z., Hudeček, V., Schmirler, M., Punčochář, J., Vitkovičová, R. (2015): Spolupráce v oblasti vnitřní a vnější aerodynamiky a exp. metod, Výzkumná zpráva, Tř. Václava Klementa 869, Mladá Boleslav, Škoda Auto, a.s.. 2015, ŠA - 2015 - 2
- [RV27] Vitkovič, P., Vitkovičová, R., Čížek, J. (2015): Drift Eliminators Testing, Výzkumná zpráva, Brentwood Industries Inc.. 2015, BRTW-2015-1
- [RV28] Čížek, J., Filipický, J., Sumara, Z., Punčochář, J., Schmirler, M., Vitkovičová, R., Nožička, J. (2016): Aerodynamika osobních automobilů, Výzkumná zpráva, tř. Václava Klementa 869, 293 01 Mladá Boleslav: Škoda Auto a.s.. 2016, SA-2016-01.

Průmyslový vzor

- [RV29] Vitkovič, P., Vitkovičová, R., A Nožička, J. (2018): Vestavba pro minimalizaci průměru kapek pro chladicí věže, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky, Praha 6, Dejvice, CZ.

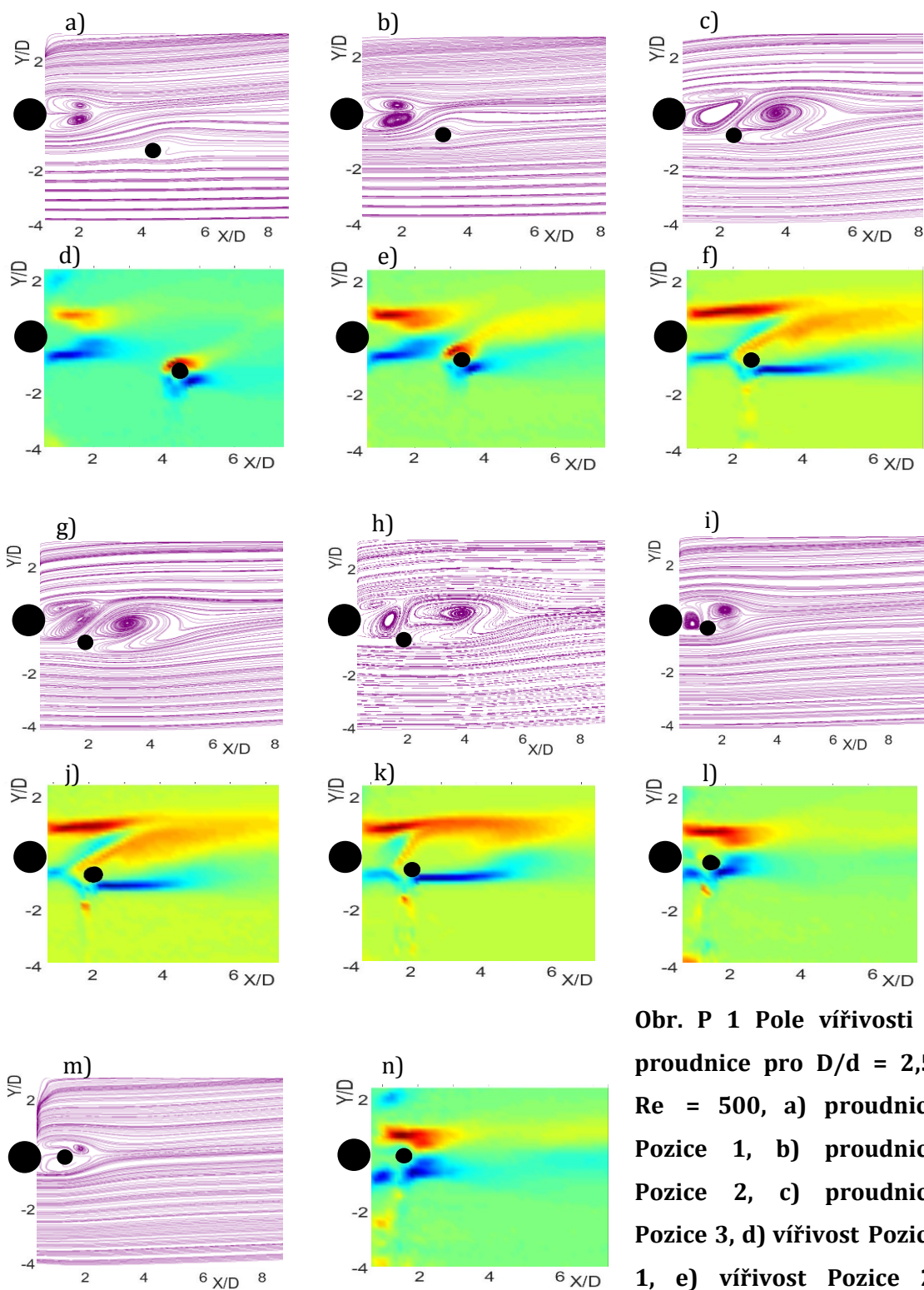
Funkční vzorky

- [RV30] Vogelová, R., Nožička, J., Schmirler, M., Vitkovič, P. (2011): Šestikomponentní aerodynamické váhy, Funkční vzorek
- [RV31] Schmirler, M., Filipický, J., Nožička, J., Vitkovič, P., Vogelová, R. (2011): Prandtlova sonda s digitálním výstupem, Funkční vzorek
- [RV32] Vitkovič, P., Filipický, J., Vogelová, R., Schmirler, M., Nožička, J. (2011): Optický otáčkoměr s digitálním výstupem, Funkční vzorek
- [RV33] Čížek, J., Filipický, J., Vitkovič, P., Vogelová, R., Nožička, J. (2011): Rámový průtokoměr, Funkční vzorek

- [RV34] Vogelová, R., Čížek, J., Vitkovič, P., Nožička, J. (2011): Polohovací systém na 3D PIV, Funkční vzorek
- [RV35] Nožička, J., Čížek, J., Vogelová, R., Vitkovič, P., Filipický, J. (2011): Měřicí prostor pro určování aerodynamických parametrů výměníků, Funkční vzorek
- [RV36] Vitkovič, P., Čížek, J., Vogelová, R., Kolínský, J., Nožička, J. (2011): Jednokomponentní aerodynamická váha pro určování ventilátorových charakteristik, Funkční vzorek
- [RV37] Vitkovičová, R., Vitkovič, P., Nožička, J. (2012): Experimentální zařízení pro návrh a optimalizaci elementů pro zpětnou kondenzaci, Funkční vzorek
- [RV38] Dvořák, L., Vitkovič, P., Vitkovičová, R. (2012): Sonda pro měření statického tlaku v dvoufázovém proudění, Funkční vzorek
- [RV39] Čížek, J., Vitkovičová, R., Nožička, J. (2013): Kalibrační trať pro metodu IPI, Funkční vzorek
- [RV40] Čížek, J., Vitkovičová, R., Nožička, J. (2013): Kalibrátor pro metodu IPI, Funkční vzorek
- [RV41] Dvořák, L., Vitkovičová, R., Čížek, J., Nožička, J., Vitkovič, P. (2013): Experimentální stanoviště pro měření parametrů vestaveb chladicích věží, Funkční vzorek
- [RV42] Vitkovičová, R., Čížek, J. (2014): Modifikace metody IPI pro určování velikost úletu z chladicích věží, Funkční vzorek

8 Přílohy

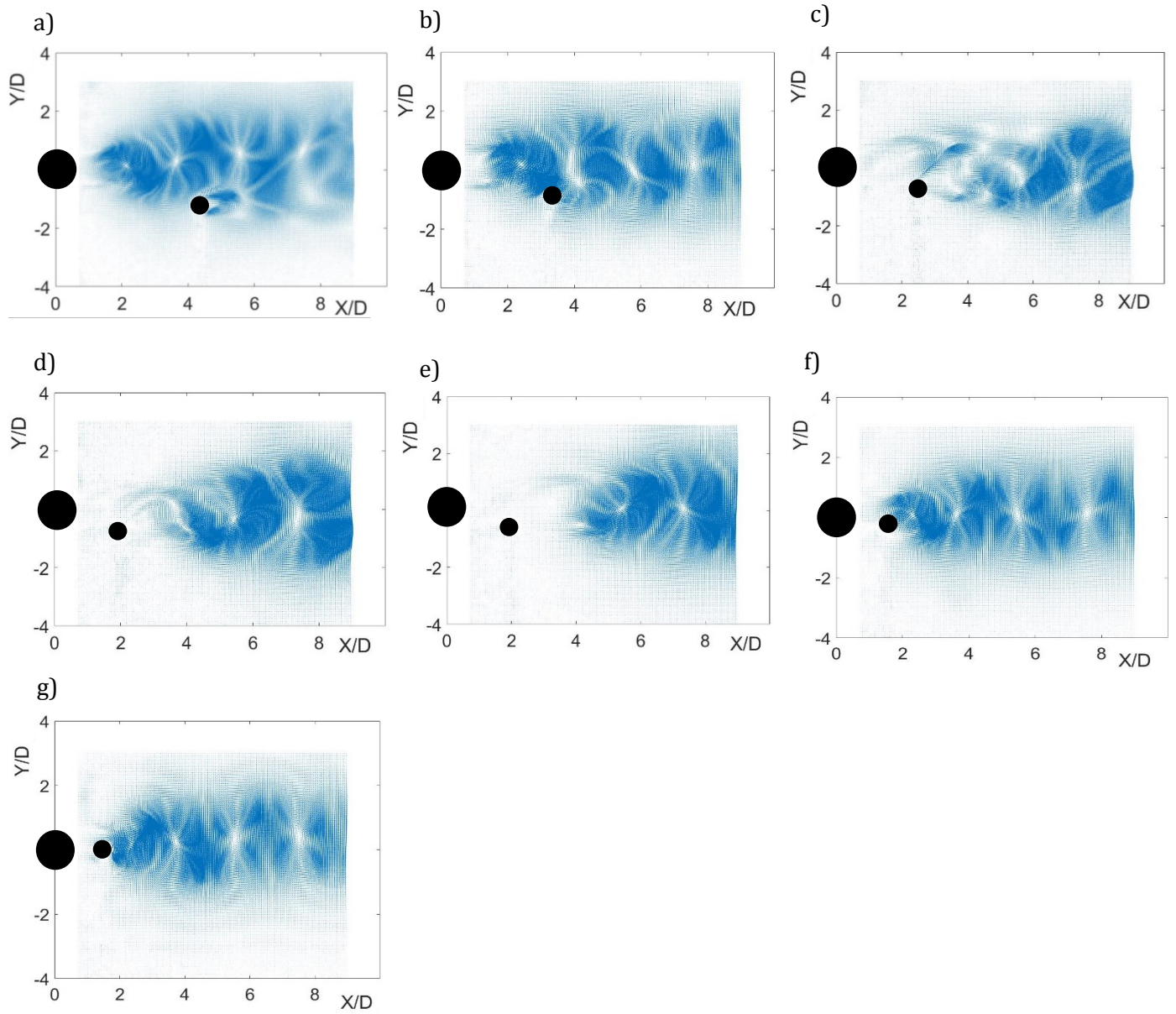
Příloha 1



Obr. P 1 Pole vířivosti a proudnice pro $D/d = 2,5$, $Re = 500$, a) proudnice Pozice 1, b) proudnice Pozice 2, c) proudnice Pozice 3, d) vířivost Pozice 1, e) vířivost Pozice 2, f) vířivost Pozice 3

g) proudnice Pozice 4, h) proudnice Pozice 5, i) proudnice Pozice 6, j) vířivost Pozice 4, k) vířivost Pozice 5, l) vířivost Pozice 6, m) proudnice Pozice 7, n) vířivost Pozice 7

Příloha 2



Obr. P 2 První POD módy z rychlostních polí pro $D/d = 2,5$ a $Re = 500$, a) Pozice 1, b) Pozice 2, c) Pozice 3, d) Pozice 4, e) Pozice 5, f) Pozice 6, g) Pozice 7

Příloha 3

Tab. P 1 Koeficienty pro funkční závislost $Sh - Re$ pro $D/d = 1$

D/d = 1			
Číslo Pozice	Koeficient A	Koeficient B	Koeficient C
1	0,3164	-7,513	103,8
2	0,2906	-9,331	125,4
3	0,3950	-12,86	158,3
4	0,1864	-4,379	71,36
5	0,1933	-4,241	67,78
6	0,2236	-4,003	71,79
7	0,2426	-5,26	75,19

Tab. P 2 Koeficienty pro funkční závislost $Sh - Re$ pro $D/d = 2,5$

D/d = 2,5			
Číslo Pozice	Koeficient A	Koeficient B	Koeficient C
1	0,2103	-0,5761	14,08
2	0,1471	7,145	-133,9
3	0,3114	-5,5	79,78
4	0,1744	1,498	-44,45
5	0,1905	-1,546	33,77
6	0,2285	-2,49	58,13
7	0,2525	-3,478	71,02