

# EMRP

European Metrology Research Programme

► Programme of EURAMET



## Vliv vířivého proudění na přesnost měření průtoku v komínech

J. Geršl, S. Knotek

Z. Belligoli, R. Dwight

M. Coleman, R. Robinson



Hradec Králové, 21.9. 2017

## O čem bude přednáška

- Referenční metoda měření průtoku v komínech pomocí Prandtlových trubic
- Citlivost Prandtlových trubic na úhel proudění (tj. i na vířivé proudění)
- Co o vířivém proudění říkají normy
- Počítačové modelování vířivého proudění v několika komínech
- Určení chyby referenční metody měření průtoku pro modelované případy

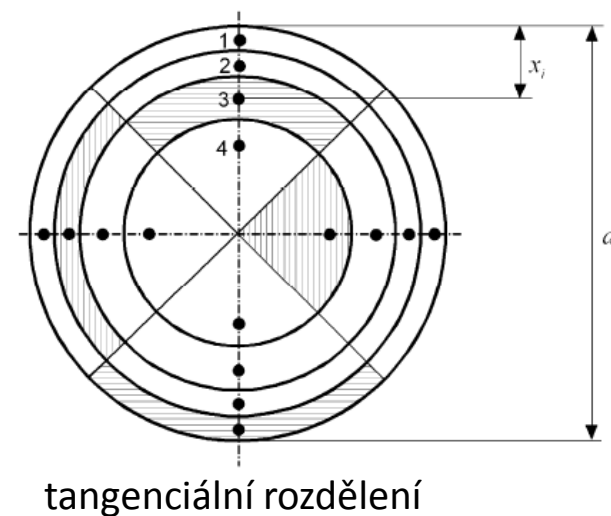
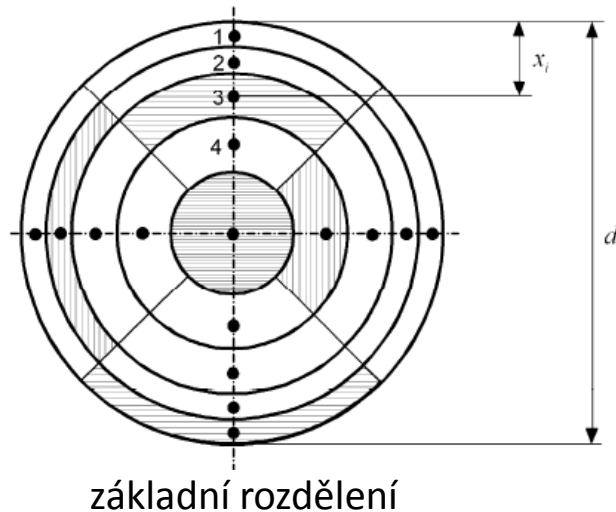
# Úvod a motivace

- Evropský systém emisního obchodování (EU ETS) zavádí přísné požadavky na nejistoty měření emisí, např. max. nejistota 2.5 % ročních emisí velkých zdrojů  
=> požadavek na nejistotu měření průtoku
- Aby se vyhovělo EU ETS byla zavedena norma EN 16911-1 – vylepšení staršího ISO 10780 – kde se popisuje referenční metoda měření průtoku v komínech založená na měření rychlosti pomocí Prandtlových trubic v síti bodů
- Tato metoda je citlivá na přítomnost příčných složek rychlosti (např. víření)
- Tato metoda byla ovšem experimentálně validována pouze na případech komínů bez výraznějšího víření
- Norma EN 16911-1 zavádí korekci vířivého proudění pro úhel víření nad 15°, neřeší však přítomnost radiálních složek rychlosti
- Asymetrický rychlostní profil se vlivem víru otáčí s výškou v komíně – modelování tohoto jevu může pomoci nalézt optimální výšku a orientaci měřicích portů



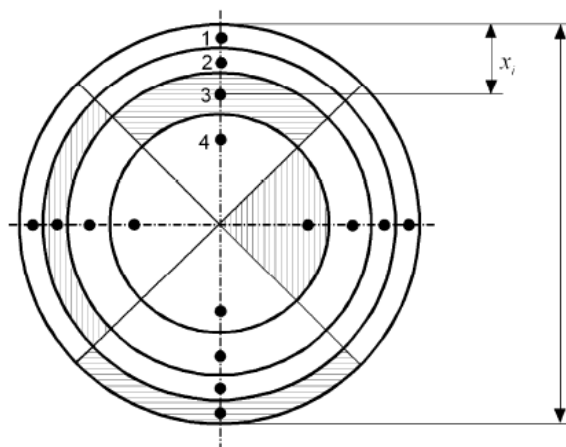
# Měření průtoku v komínech – definice sítě měřicích bodů

- ISO 10780 (část 7.1.4) definuje minimální počet měřicích přímek (2) a měřicích bodů pro daný průměr komína a definuje rozmístění měřicích bodů



- ISO 10780 (část 7.1.2) definuje minimální délku rovného úseku před (5D) a za (2D nebo 5D od vyústění) měřicí rovinou

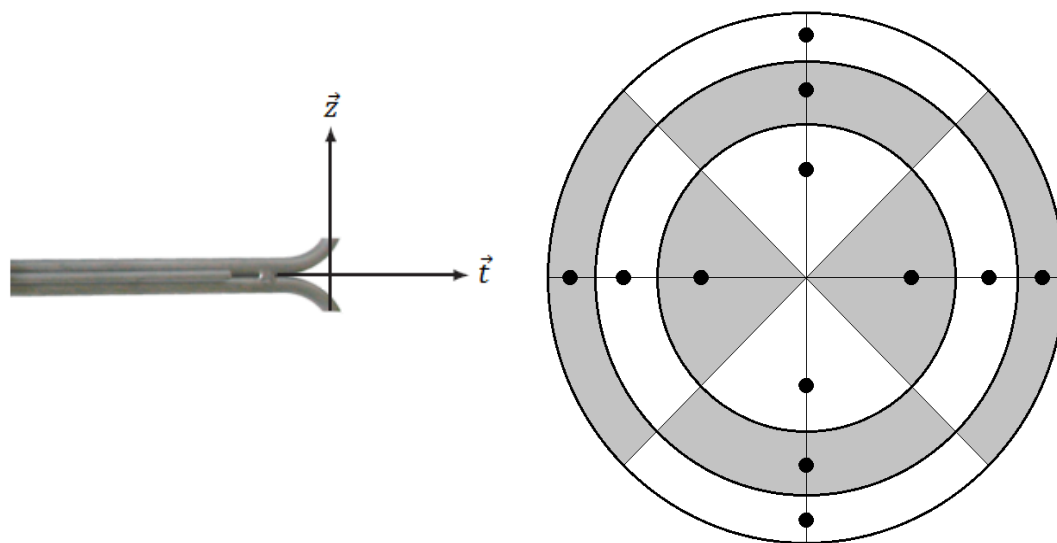
- EN 16911-1 se v části 9.2 odkazuje na EN 15259 a v části 9.3.1 ukládá volbu tangenciálního rozdělení bodů pro kruhové průřezy
- EN 15259 (část 8.2) definuje minimální počet měřicích přímek (rovněž 2) a měřicích bodů pro daný průměr komína – ten se může lišit od ISO 10780
- extrém pro 1,05 m:  
minimální počet bodů v rovině dle ISO 10780 je 12 a dle EN 16911-1 je 4
- EN 15259 (příloha D) definuje rozmístění měřicích bodů na stejném principu jako ISO 10780



$$x_i = \frac{d}{2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2i-1}{n}} \right]$$

- požadavek na rovné úseky před a za měřicí rovinou je stejný

# Měření průtoku v komínech – výpočet průtoku



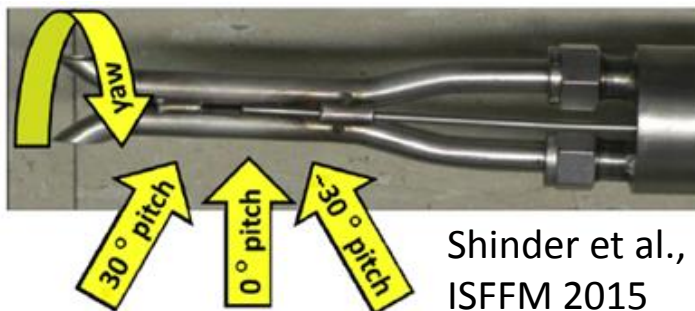
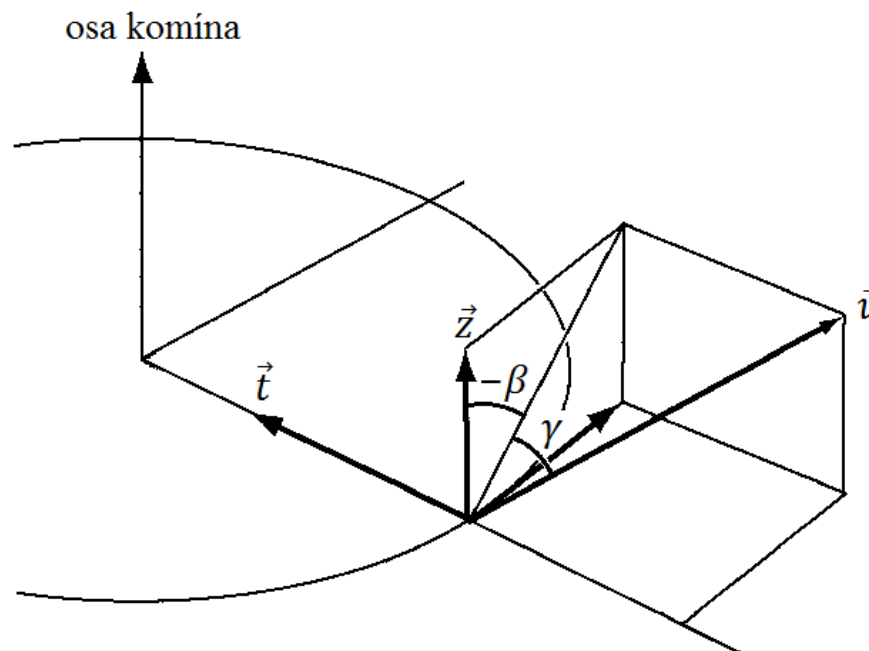
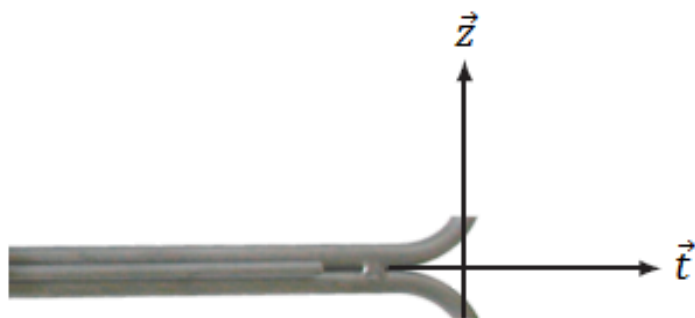
$$Q_M = \frac{A}{N} \sum_{\alpha=1}^N v_{z\alpha}$$

## ➤ Zdroje chyb měření průtoku:

- ❖ **nedostatečná hustota sítě měřicích bodů**
- ❖ chyba samotného měření podélné složky rychlosti v jednotlivých bodech

Jednou z příčin chyby měření rychlosti je vířivé proudění nebo obecně odklon vektoru rychlosti proudění od osy Prandtlovy trubice.

# Definice úhlů odklonu vektoru rychlosti

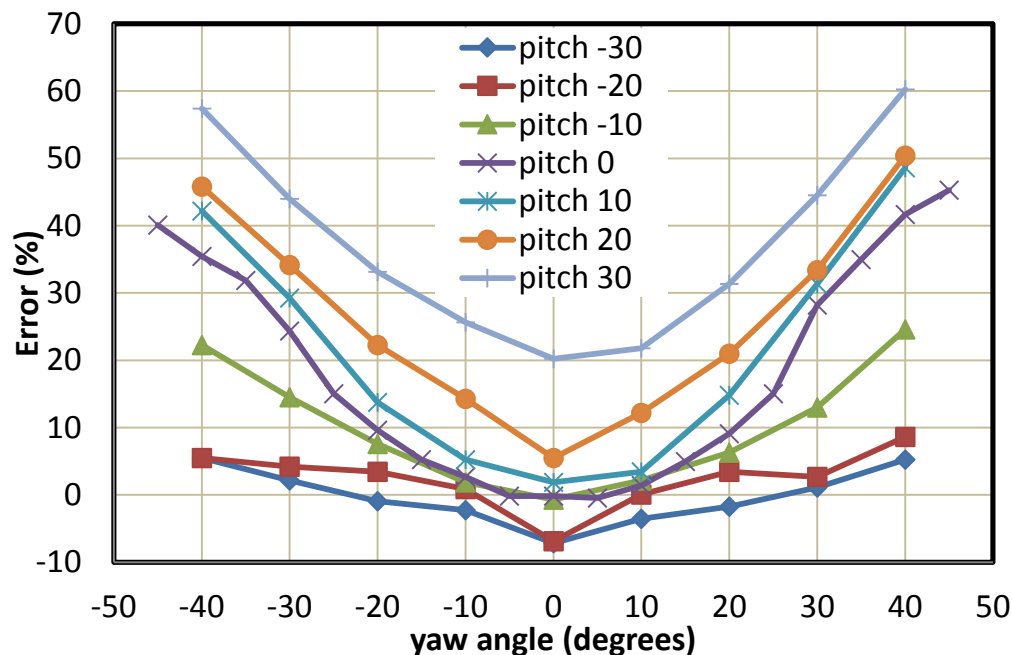


Shinder et al.,  
ISFFM 2015

$\beta$  ... úhel víření (yaw angle)  
 $\gamma$  ... radiální úhel (pitch angle)

# Chyba měření rychlosti proudění způsobená zanedbáním víru

Prandtlova trubice typu S - příklad



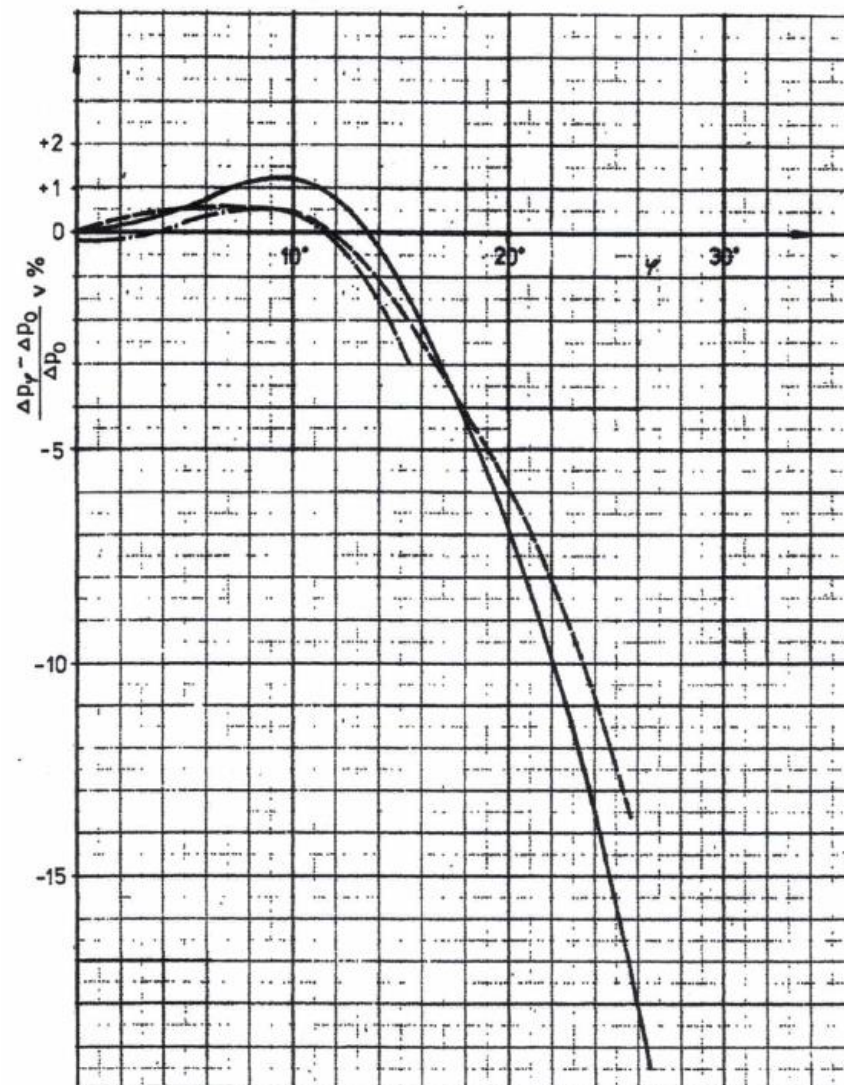
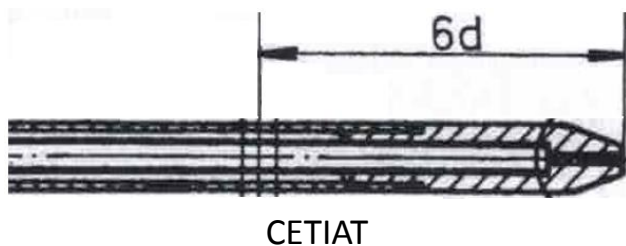
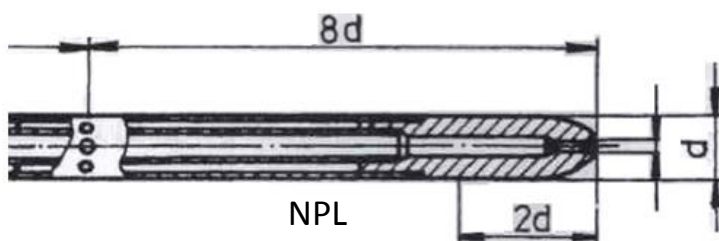
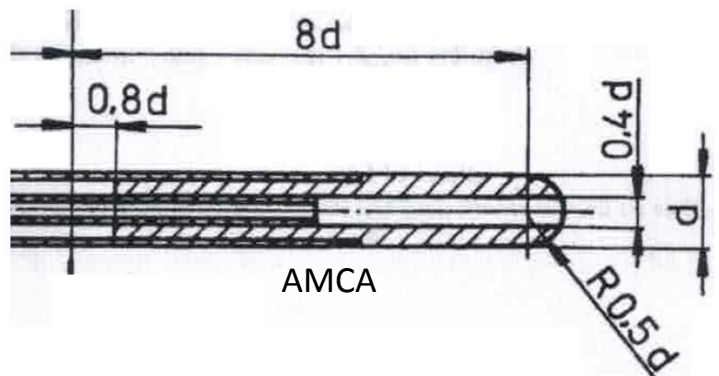
$$v = C(\beta, \gamma) \sqrt{\frac{2\Delta p(\beta, \gamma)}{\rho}}$$

$$E = \left( \frac{C(0,0)}{C(\beta, \gamma) \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma} - 1 \right) \cdot 100$$

EPRI TR-106698s, Report Summary:  
Flue Gas Flow Rate Measurement Errors



# Úhlová závislost Prandtlových trubic typu L - ČSN ISO 3966



- - - Typ Prandtlových trubic AMCA  
 — Typ Prandtlových trubic NPL,  $Re_s = 17\,000$   
 - · - Typ Prandtlových trubic CETIAT,  $Re_s = 8\,600$

# Měření a korekce vířivého proudění

ČSN ISO 10780 (část 6b, přílohy C a D):

- Úhel víření nesmí v žádném měřicím bodě překročit 15° (část 6b)
- Úhel víření lze určit pomocí Prandtlovy trubice typu L či S (příloha C)
- Pokud není splněna podmínka úhlu pod 15°, je třeba tok vyrovnat (příloha D)

US EPA Method 1 (část 11.4):

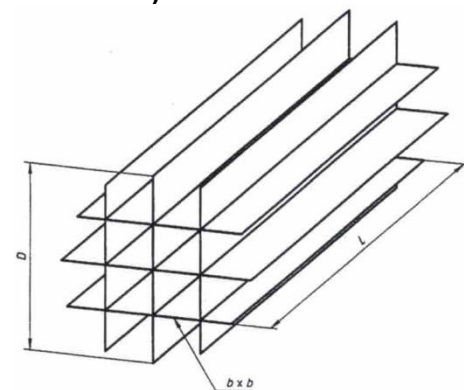
- Metoda měření úhlu víření pomocí Prandtlovy trubice typu S

ČSN EN 16911-1 (část 9.3.5):

- Ukládá detekci úhlu víření pomocí metod popsaných v ISO 10780
- Pokud v některém bodě úhel překročí 15° je třeba k měření v každém bodě použít měřidlo schopné detekce rychlosti i úhlu (např. 3D, 2D, S - Prandtlovy trubice)
- Pokud úhel v bodě překročí 15°, je třeba použít korigovanou hodnotu rychlosti v tomto bodě:

$$v_C = v_{meas} \cos \theta_{meas}$$

Takto lze měřit a korigovat pouze úhel víření, nikoli radiální úhel!

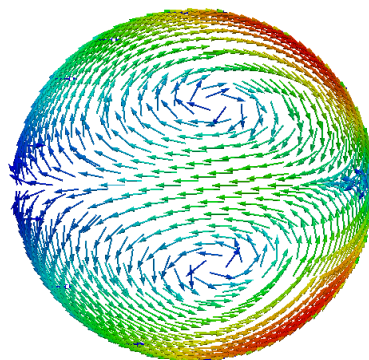
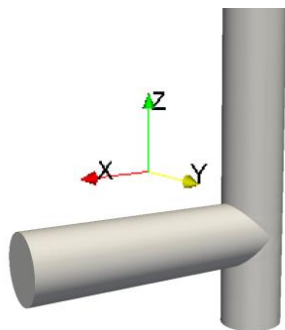


# Počítačové modelování vířivého proudění

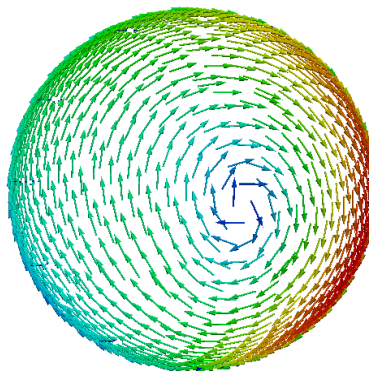
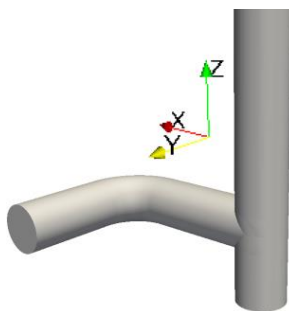
- Modelovat proudění v komínech s přívodním potrubím několika typických tvarů, které generují různé druhy vířivého proudění
- Pro takto modelované proudění určit chybu měření průtoku referenční metodou popsanou v EN 16911-1
- Demonstrovat možnost využití CFD pro nalezení optimálního umístění (výška, orientace) měřidla průtoku, popř. pro určení nejistoty měření průtoku



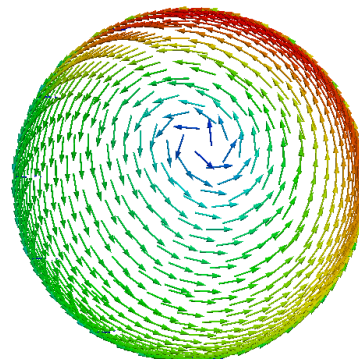
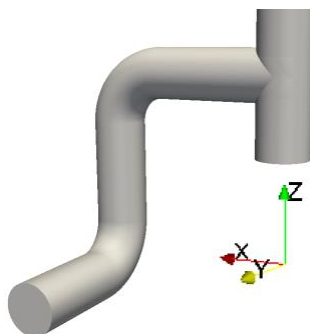
# Modelované situace



- Uvažujeme vertikální komín kruhového průřezu a tři tvary přívodního potrubí, které generují různé druhy vířivého proudění (viz obrázek)



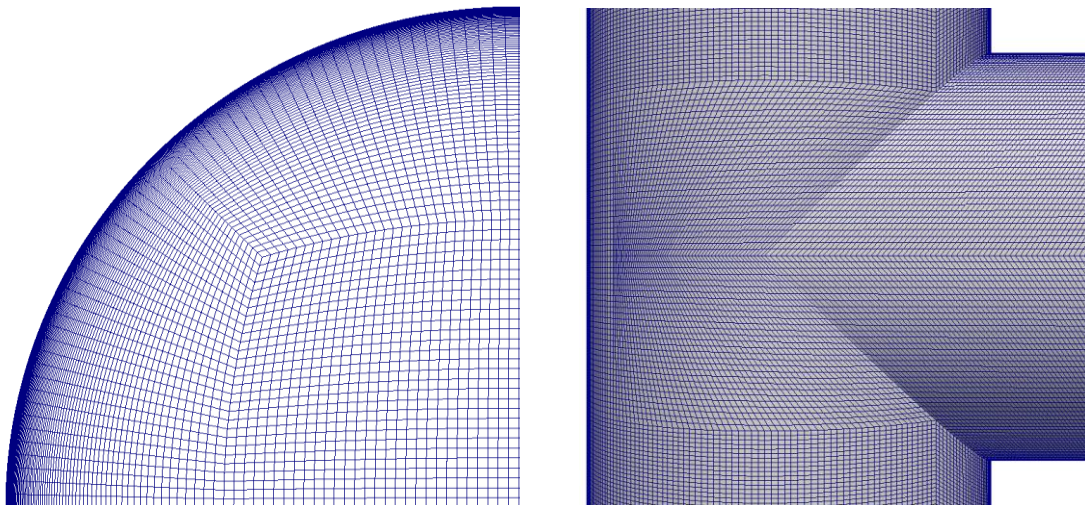
- průměr komína i přívodu = 1.5 m
- výška komína = 18 m
- rychlost na vstupu = (3, 10, 30) m/s
- uvažované médium = vzduch





# Počítačový (CFD) model proudění

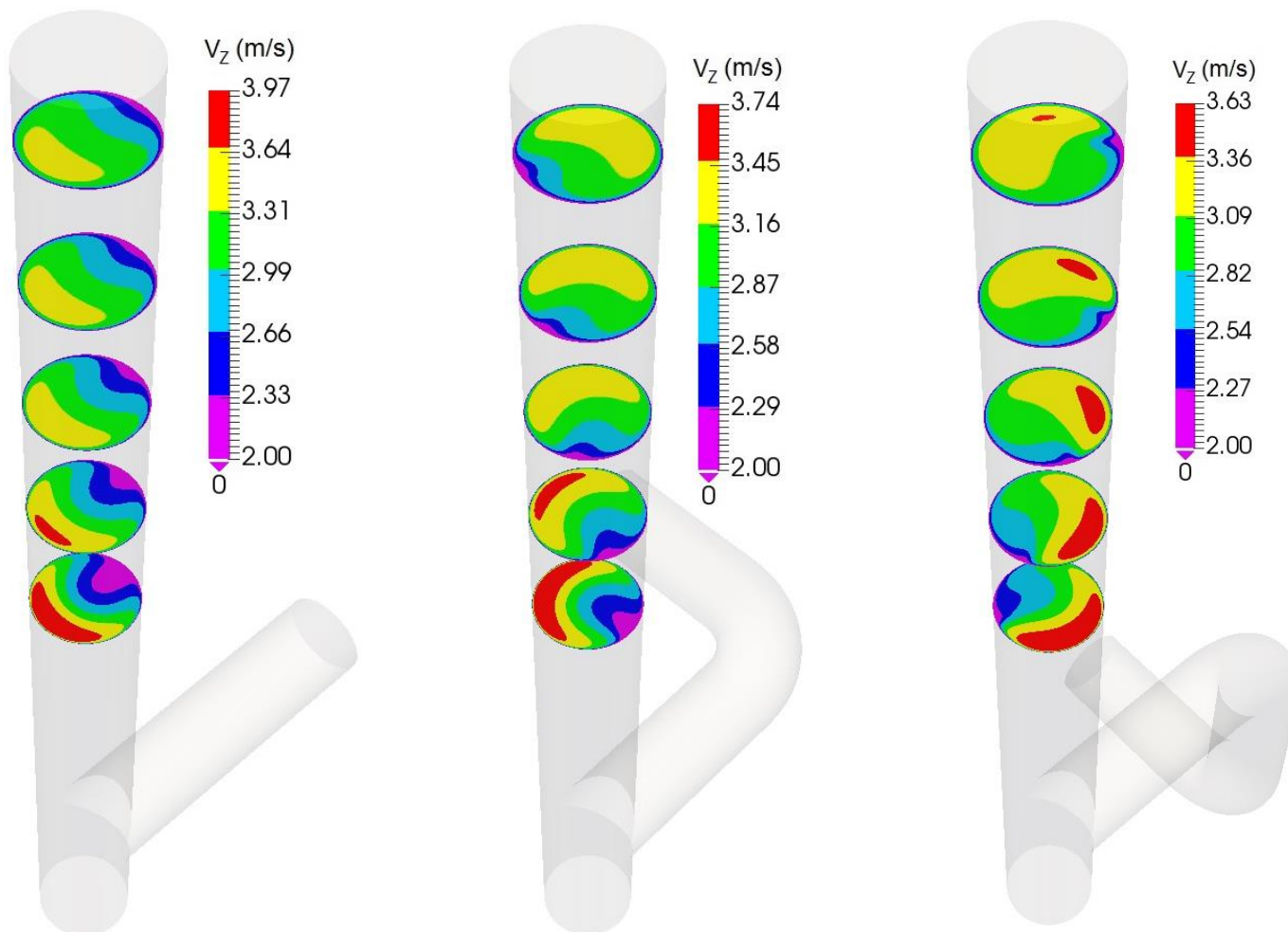
- SW: OpenFOAM
- HW: Cluster ČMI
- Geometrie a mřížka vytvořeny v blockMesh; různé mřížky pro test mřížkové konvergence
- Model byl validován experimentálními daty získanými z literatury; modely turbulence k-Epsilon a LRR nejlépe odpovídají experimentu, model k-Epsilon byl zvolen pro modelování
- Problém byl modelován jako stacionární, nestlačitelné, turbulentní, viskózní proudění za použití solveru simpleFoam
- Na vstupu do přívodního potrubí se uvažuje plochý rychlostní profil a intenzita turbulence 5 %



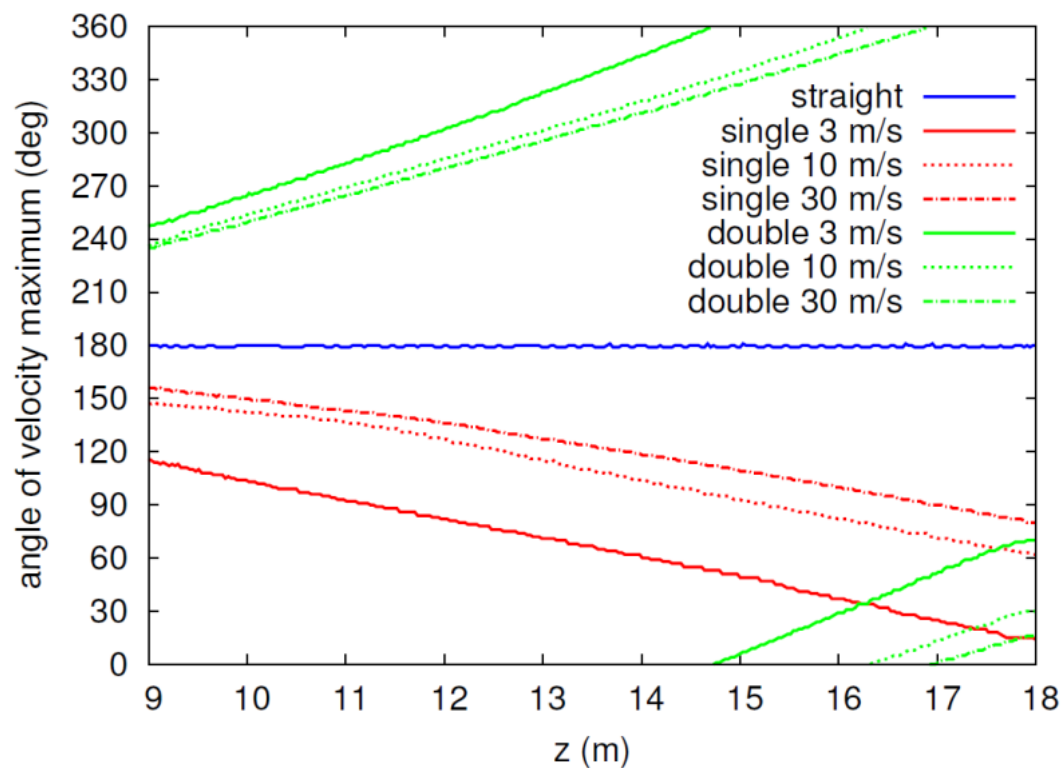
| Přívodní potrubí | Počet buněk | y+ pro 10 m/s | Tloušťka buňky u stěny | Velikost buňky ve středu |
|------------------|-------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| rovné            | 16M         | 20            | 0.6 mm                 | 1.8 cm                   |
| 1 ohyb           | 30M         | 20            | 0.6 mm                 | 1.5 cm                   |
| 2 ohyby          | 37M         | 20            | 0.6 mm                 | 1.5 cm                   |

# Příklad vizualizace proudění pro $v = 3 \text{ m/s}$

## Podélná složka rychlosti

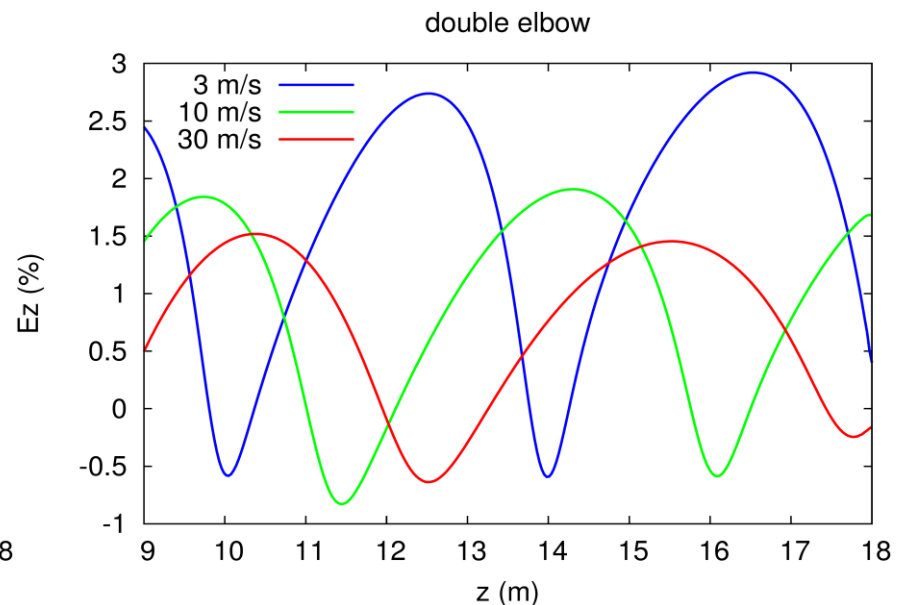
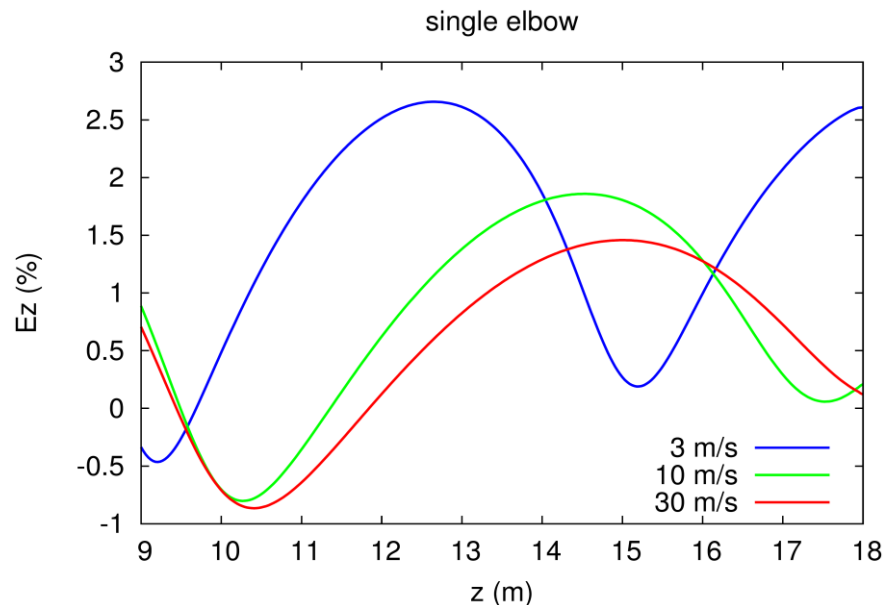
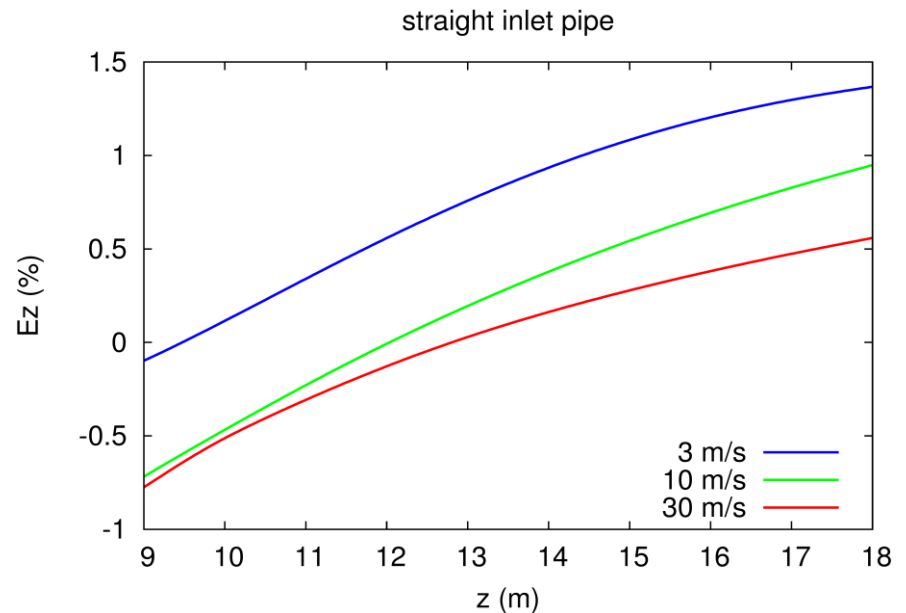


## Závislost úhlové polohy maxima rychlosti na výšce v komíně



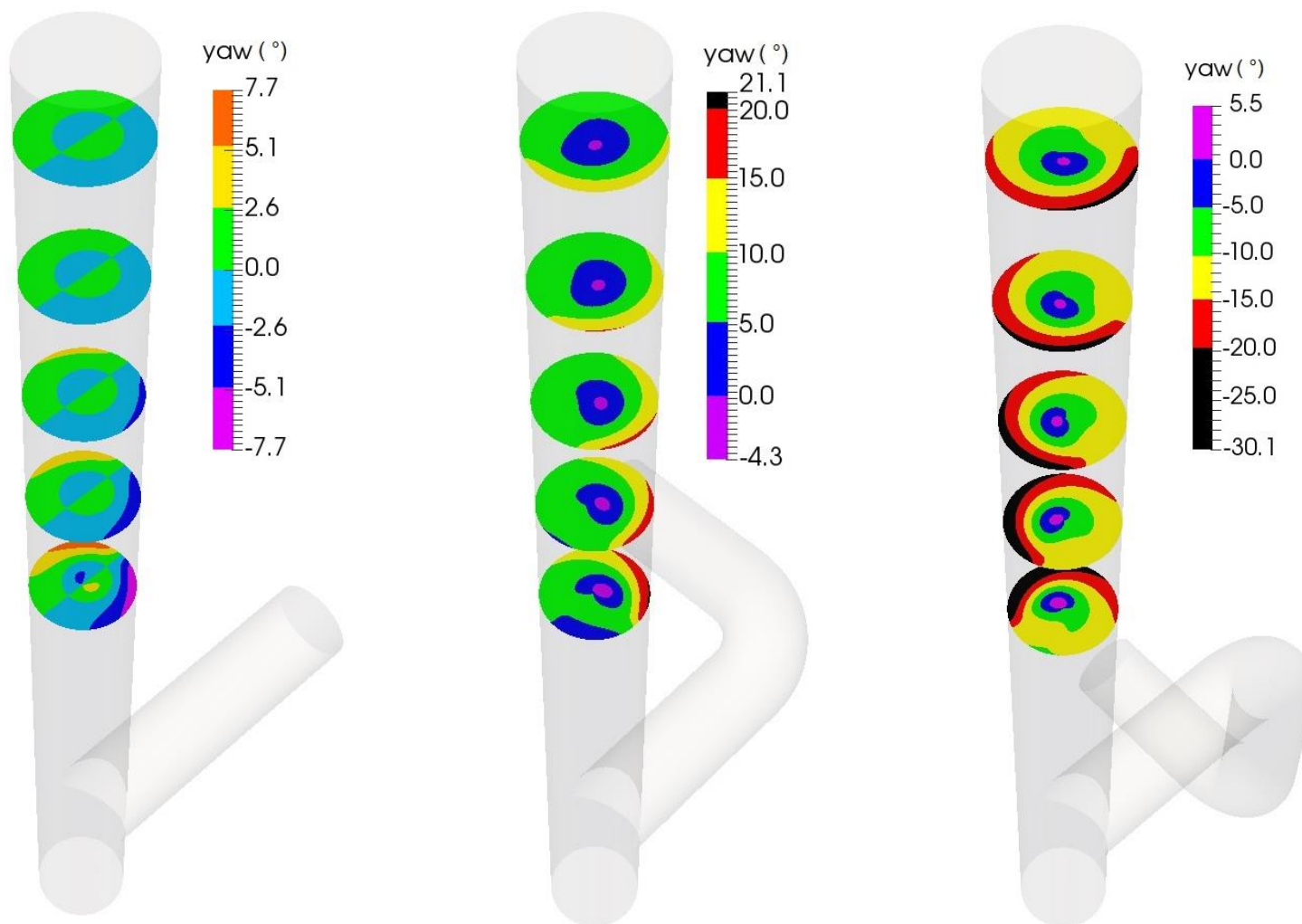
# Chyby měření průtoku vlivem nedostatečné hustoty sítě měřicích bodů

- Chyba měření průtoku v závislosti na výšce instalace měřicích vstupů v komíně
- Předpokládá se přesné měření podélné složky rychlosti v jednotlivých bodech

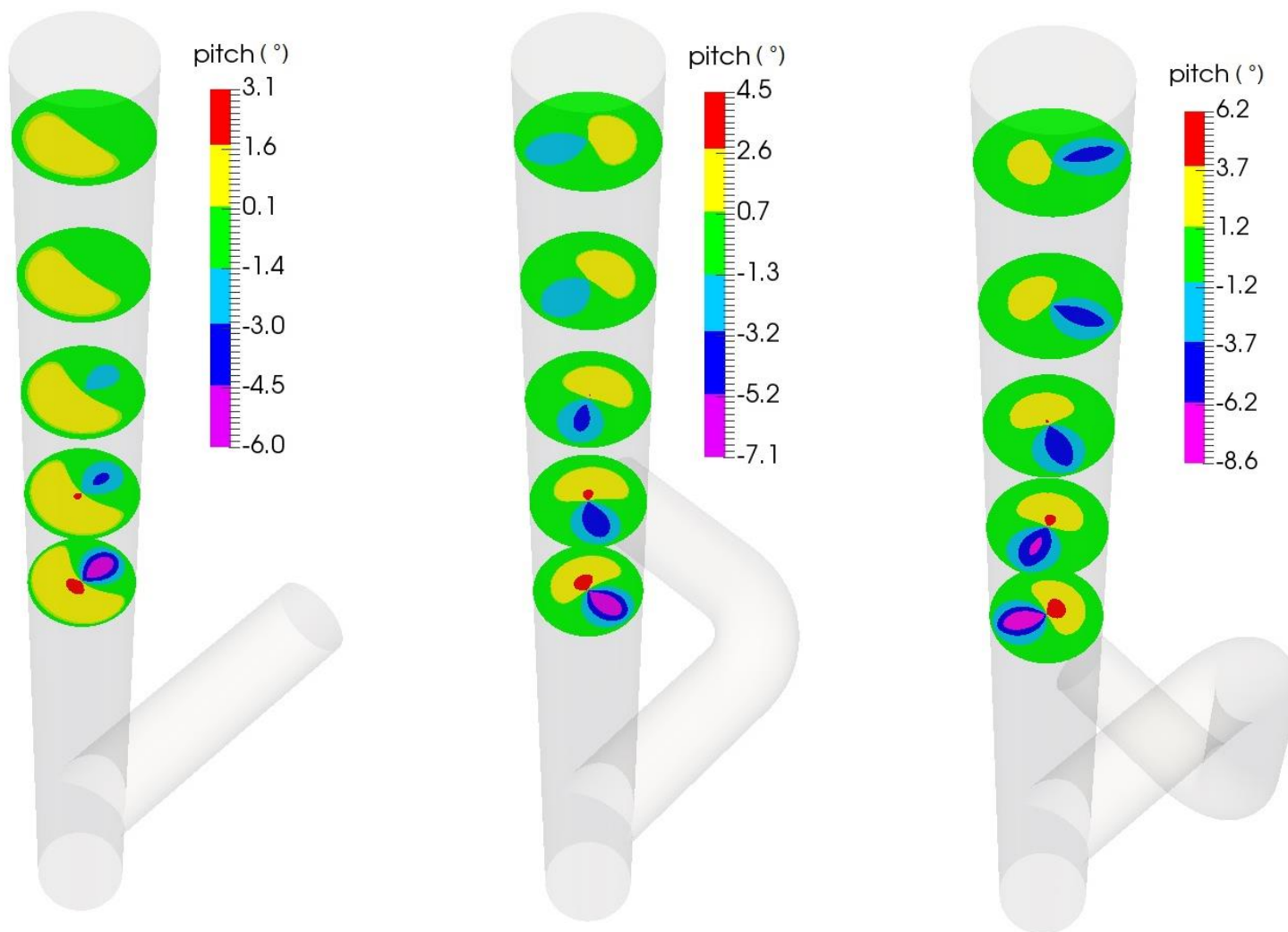




## Úhel víření $\beta$ (yaw angle) – CFD model pro 3 m/s



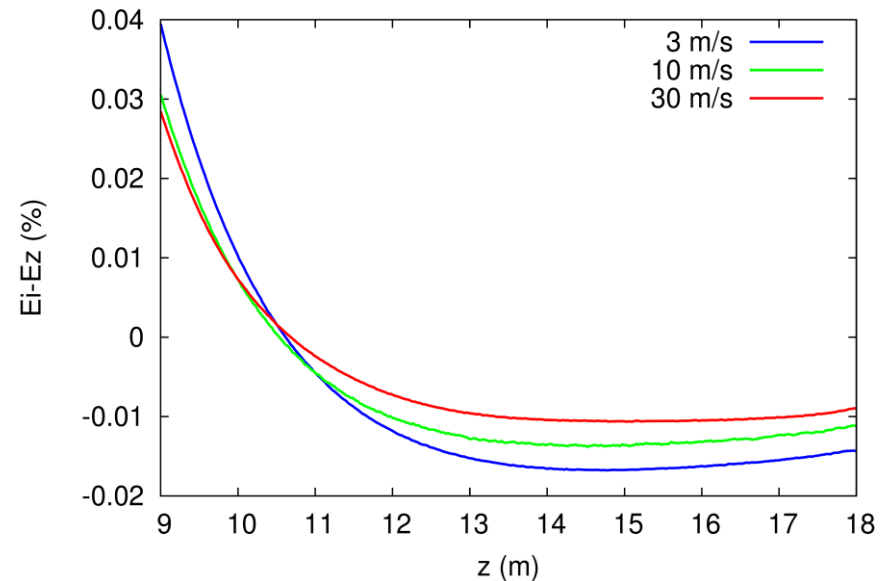
## Radiální úhel $\gamma$ (pitch angle) – CFD model pro 3 m/s



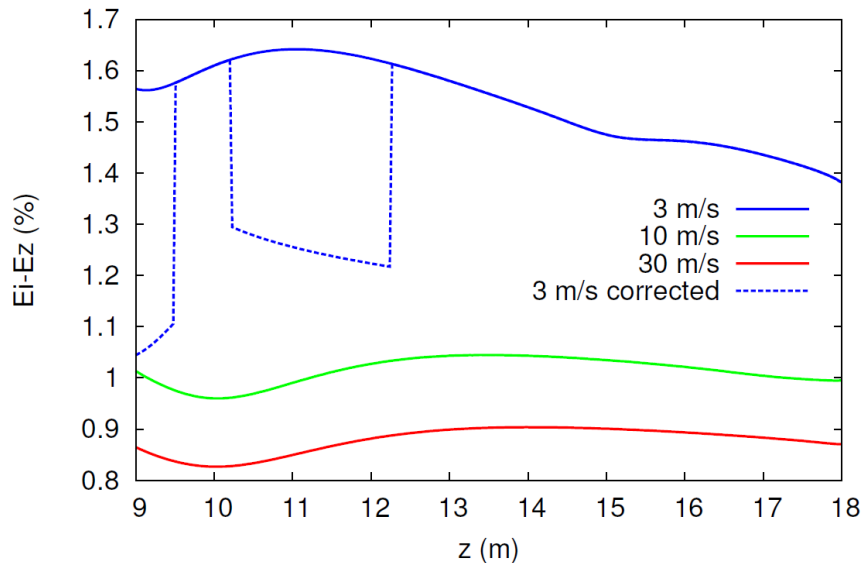
# Chyby měření průtoku způsobené zanedbáním víru

- Rozdíl chyby při zanedbání a nezanedbání víru v závislosti na výšce instalace měřicích vstupů v komíně
- Bez korekce a s korekcí dle EN 16911-1
- Dodatečná chyba způsobená nepřesným měřením rychlosti v jednotlivých bodech

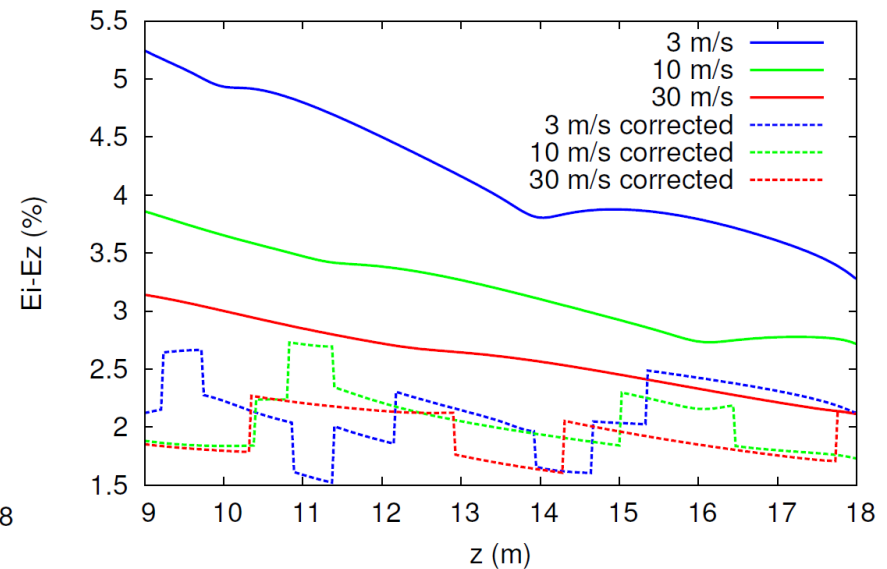
straight inlet pipe



single elbow



double elbow



# Shrnutí

- Kombinace asymetrického rychlostního profilu a víru vede k otáčení rychlostního profilu s výškou v komíně. Proto změna výšky či orientace měřicích portů může mít významný vliv na chybu měření průtoku.
- V námi zkoumaných modelech je rozdíl chyb v závislosti na výšce portů až 3 %.
- Přítomnost víru lze při měření rychlosti Prandtlovou trubicí zohlednit a korigovat dle EN 16911-1. V bodech, kde úhel víření nepřesahuje  $15^\circ$  se korekce provádět nemusí. Korekce nezahrnuje radiální složku proudění.
- V námi zkoumaných modelech dosahuje chyba měření průtoku po korekci na víření až 2,5 %.

❖ kontakt: [jgersl@cmi.cz](mailto:jgersl@cmi.cz)

Výzkum byl financován z programu EMRP (European Metrology Research Programme).  
EMRP je financován z rozpočtu účastnických zemí Euramet a z rozpočtu EU.