



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FLUIDNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

VLIV ZMĚNY TYPU PRVKŮ NA TLAKOVOU ZTRÁTU V PŘÍMÉ TRUBCE PŘI MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ V CFD

THE INFLUENCE OF TYPE OF 3D ELEMENTS ON THE PRESSURE DROP IN A STRIGHT PIPE IN
CASE CFD FLUID FLOW MODELLING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. ONDŘEJ GRYM

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. JAROSLAV ŠTIGLER, PH.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Ondřej Grym

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Fluidní inženýrství (2301T036)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv změny typu prvků na tlakovou ztrátu v přímé trubce při modelování proudění pomocí CFD.

v anglickém jazyce:

The Influence of Type of 3D Elements on the Pressure Drop in a Straight Pipe in Case CFD Fluid Flow Modelling.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při numerickém modelování proudění má značný vliv na řešení typ a velikost a elementů, kterými je tvořena výpočetní síť. Je proto dobré znát, zda vůbec a případně jak ovlivní změna typu prvků tlakový spád v přímé trubce.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je modelování proudění v přímé trubce, ve které bude výpočetní síť vytvořena tak, aby tam byl přechod mezi různými typy elementů. Přechody budou mezi následujícími typy prvků šestistěny, čtyřstěny a elementy typu polyhedral. Vliv přechodu bude zkoumán, jak pro laminární, tak pro turbulentní proudění. Cílem bude zkoumat vliv přechodu na tlakový spád, případně na rychlostní profil.

Seznam odborné literatury:

Manuály Fluentu.

Podklady vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá porovnáním výsledků výpočtů v CFD při změně elementů ve výpočetní síti. Cílem je zjistit zda bude mít přechod na jiný typ prvků tvořících síť vliv na konečný výsledek řešení. A jak moc řešení bude ovlivněno.

KLÍČOVÁ SLOVA

Změna elementů v CFD
Diference výsledků
Mapovaná síť

ABSTRACT

Diplom`s thesis is oriented on a comparison of results of fluid flow numerical modeling for case of a element type change in case CFD fluid flow modeling when elements changed in computational mesh. We want to know whether the change of the mesh elements type will have any effect on results of calculation. We want to know a size of mistakes.

KEYWORDS

Change elements in CFD
Diference of results
Mapped mesh

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GRYM, O. *Vliv změny typu prvků na tlakovou ztrátu v přímé trubce při modelování proudění pomocí CFD.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 58 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana Doc. Ing. Jaroslava Štiglera, Ph.D. a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne

Ondřej Grym

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Doc. Ing. Jaroslavovi Štiglerovi Ph.D. za odborné vedení mé práce, podmětné připomínky a cenné rady, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce.

1	ÚVOD	8
---	------------	---

2	ZÁKLADNÍMI POJMY	9
2.1	LAMINÁRNÍ A TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ.....	10
2.1.1	Laminární proudění	10
2.1.2	Turbulentní proudění.....	10
2.1.3	REYNOLDSOVO ČÍSLO	11
2.1.4	Hydraulický průměr	11
2.1.5	TLAKOVÉ ZTRÁTY V POTRUBÍ	11
2.1.6	CORIOLISOVO ČÍSLO [3].....	12
3	VÝPOČETNÍ SOFTWARE.....	12
4	MAPOVANÁ SÍŤ	13
4.1	DRUHY MAPOVANÉ SÍTĚ.....	13
4.1.1	Optimalizovaná mapovaná síť s pravoúhlým vnitřním čtvercem	13
4.1.2	Optimalizovaná mapovaná síť se zaobleným vnitřním čtvercem	14
4.2	KONSTRUKCE MAPOVANÉ SÍTĚ	14
5	RYCHLOSTNÍ PROFIL.....	16
5.1	LAMINÁRNÍ PROUDĚNÍ.....	16
5.1.1	Výpočetní model a okrajové podmínky	16
5.1.2	Výsledky a volba profilu	17
5.2	TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ.....	21
5.2.1	Volba profilu rychlosti pro vstupní rychlost 1m/s:	20
5.2.2	Volba profilu rychlosti pro vstupní rychlost 2 m/s:	21
5.2.3	Volba profilu rychlosti pro vstupní rychlost 3 m/s:	22
6	TYPY POROVNÁVANÝCH A POUŽITÝCH SÍTÍ.....	25
6.1	Základní typy sítí.....	25
6.1.1	Polyhedralní síť	25
6.1.2	Prizmatická síť	24
6.1.3	TetHyb síť	25
6.1.4	Hexagonální síť	25
6.2	Variety změny typu prvků.....	26
7	VYHODNOCENÍ	29
7.1	LAMINÁRNÍ PROUDĚNÍ.....	30
7.1.1	Sítě bez přechodů	30
7.1.2	Přechod Hex - Prizma	33
7.1.3	Přechod Hex-Polyhedral	34
7.1.4	Přechod Hex-Tet-Hyb	35
7.2	TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ.....	38
7.2.1	Sítě bez přechodů	39

7.2.2	Přechod Hex - Prizma	42
7.2.3	Přechod Hex-Polyhedral	46
7.2.4	Přechod Hex-Tet-Hyb	50
8	ZÁVĚR.....	54
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	55
10	SEZNAM OBRÁZKŮ	56
11	SEZNAM TABULEK.....	57
12	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	58

1 ÚVOD

Výpočty proudění kapalin byly ještě před mnoha lety problémem, který se řešil na základě mnohaletých zkušeností složitými a zdoluhavými pochody. V dnešní době již můžeme použít výpočetní techniku v podobě počítačů, výpočetních serverů a speciálního softwaru pro numerické řešení diferenciálních rovnic, popisujících proudění kapalin. Pro chod těchto programů je nutno vytvořit výpočetní síť, která je tvořena mnoha malými 2D nebo 3D elementy. Pomocí těchto geometrických útvarů se vyplní počítaná oblast. Tvar a typ elementů má vliv na přesnost výpočtu. Aby byl co nejpřesnější výpočet a počet elementů byl co nejmenší, používá se kombinace těchto prvků.

Práce zkoumá vliv přechodu mezi dvěma rozdílnými typy elementů na přesnost výpočtu. Zabývá se tím, zda je tento vliv pro výpočet zanedbatelný nebo ho výrazným způsobem ovlivňuje.

2 ZÁKLADNÍMI POJMY

2.1 LAMINÁRNÍ A TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ

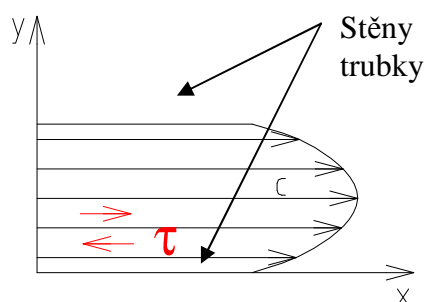
V zadání je uvedeno, že vliv změny typu prvků má být řešen pro laminární a turbulentní proudění. Vysvětlíme si význam těchto pojmů.

2.1.1 Laminární proudění

Název laminární proudění je odvozen od slova laminum = vrstva a charakterizuje hlavní vlastnost pohybu média. Jedná se o pohyb částic kapaliny po vrstvách. Tyto částice nepřecházejí z jedné vrstvy do druhé. Proudnice jsou rovnoběžné. Proudnicí je čára, ke které jsou rychlosti tečné. Laminární proudění se vyskytuje při malých rychlostech toku kapaliny – řádově setiny m/s. Vlivem vnitřního tření kapaliny, které je popsáno Newtonovým zákonem viskozity, ulpívají částičky kapaliny na stěnách trubky a mají nulovou rychlost. Proto má rychlostní profil tvar paraboly obr. 2-1.

- rychlostní profil laminárního proudění

Newtonův zákon viskozity



$$\tau \approx \frac{\partial c}{\partial x}$$

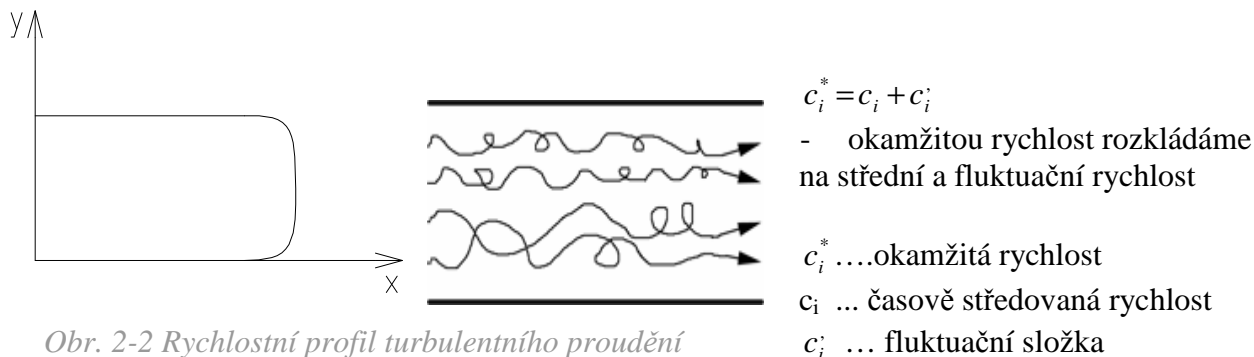
$$\tau = \eta \frac{\partial c}{\partial x}$$

Obr. 2-1 Rychlostní profil laminárního proudění

2.1.2 Turbulentní proudění

Na rozdíl od laminárního proudění se částice nepohybují po vrstvách. Částičky kapaliny konají posuvný pohyb o rychlosti c_i a pohyb napříč vrstvami kapaliny o rychlosti c'_i , která se nazývá flukтуаční a charakterizuje pohyb částičky napříč vrstvami. Celková rychlost se tedy skládá ze složky rychlosti okamžité (posuvné) a flukтуаční. Tvar rychlostního profilu již není parabolický obr. 2-2, rychlost je po průřezu stejná s výjimkou tenké vrstvy blízko stěny např. trubky.

Mezní vrstva je oblast v blízkosti obtékaného tělesa, kde je proudění vířivé, proudění vně této oblasti můžeme považovat za potenciální.



Obr. 2-2 Rychlostní profil turbulentního proudění

2.1.3 REYNOLDSOVO ČÍSLO

Podle hodnoty tohoto čísla můžeme rozlišit, jestli se jedná o laminární nebo turbulentní proudění.

Reynoldsovo číslo [1] vyjadřuje vliv vnitřního tření v důsledku viskozity dané kapaliny při proudění, přičemž vychází jako podobnostní číslo z poměru síly setrvačné – konvektivní a síly vnitřního tření, takže je definováno vztahem:

$$\text{Re} = \frac{c_s \times l}{\nu} = \frac{v_s \times D_h}{\nu}$$

kde: c_s ... je střední charakteristická rychlost (ms^{-1}),

$l \cong D_h$... je charakteristický rozměr průtočného profilu, definovaný jako hydraulický průměr v (m), který umožňuje určení tohoto rozměru i pro obecný kruhový profil,

ν ... kinematická viskozita (m^2s^{-1})

Hodnoty Reynoldsova čísla pro proudění v trubce:

$\text{Re} < 2320$ - laminární proudění

$2320 < \text{Re} < 4000$ – přechodná oblast

$\text{Re} > 4000$ – turbulentní proudění

2.1.4 Hydraulický průměr

Je definován poměrem čtyřnásobku vnitřního průřezu daného profilu potrubí S a jeho omočeného obvodu O , což umožňuje stanovení charakteristického rozměru obecných nekruhových profilů:

$$D_h = \frac{4 \times S}{O}$$

- pro kruhový profil: $D_h = D$

2.1.5 TLAKOVÉ ZTRÁTY V POTRUBÍ

Celková tlaková ztráta v potrubí je dána součtem několika druhů ztrát. Ztráty dělíme na délkové a místní. Délková ztráta závisí na hydraulické drsnosti potrubí a délce potrubí. Místní ztráta je dána použitím tvarového prvku (koleno, tvarovky apod.). Určuje se experimentálně.

Ztráta třením po délce

Je dána vztahem:

$$Y_{zL} = \lambda \frac{l}{d} \frac{c^2}{2}$$

kde: λ ... koeficient tření - závisí na druhu proudění a drsnosti potrubí:

- laminární proudění a kruhový průřez $\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$

- turbulentní proudění – vztah určen podle toho, jestli je potrubí hydraulicky drsné nebo hladké

2.1.6 CORIOLISOVO ČÍSLO [3]

Udává podíl skutečné kinetické energie v průřezu (stanovené integrací bodových energií určených z bodových rychlostí v) k průřezové kinetické energii vyjádřené pomocí průřezové rychlosti v_s .

$$\alpha = \frac{\int v^2 dQ}{v_s^2 Q} = \frac{\int v^2 x v_n dS}{v_s^3 x S} [-]$$

Coriolisovo číslo je definováno vztahem

$\alpha = 1,02 - 1,05$ – turbulentní proudění

$\alpha = 2$ – laminární proudění

3 VÝPOČETNÍ SOFTWARE

Výpočty pomocí programového softwaru se skládají ze tří částí – *Pre*, *Solver*, *Post*.

V části *Pre* se vygeneruje v zadané geometrii výpočetní síť. K vybudování sítě se v této práci používá program Gambit 2 .3. 16. Umožňuje vytvořit geometrii krok za krokem zadáváním bodů, přímků ploch a objemů nebo je možnost načíst již vymodelovanou součást např. v 3D modeláři. Hranám této geometrie se přiřadí určitý počet bodů. Počtem bodů je regulována hustota sítě a tím i přesnost výpočtu. Je možné také použít nahuštění bodů k částem geometrie, která nás nejvíc zajímá např. oblast mezní vrstvy.

Spojením bodů vznikne plošná síť. Dalšími operacemi z plošné sítě je možno udělat síť objemovou. Posledním krokem je nadefinování okrajových podmínek pro výpočet v části *Solver*.

Softwarem pro realizování kroků *Solver* a *Post* je Fluent 6. 3. 26. V něm se odehrává vlastní výpočet úlohy a vyhodnocení výsledků. Výpočet ve Fluentu je prováděn na základě numerického řešení diferenciálních rovnic. Vhodný numerický model vybereme např. podle vlastností proudění kapaliny a požadavků na přesnost a rychlost výpočtu.

Vyhodnocení lze provést vykreslením a vypočtením potřebných hodnot. Dále lze zobrazit kontury, vektory rychlostí, tlaků apod.

4 MAPOVANÁ SÍŤ

4.1 DRUHY MAPOVANÉ SÍŤE

Práce se zabývá modelováním proudění v přímé trubce. Proto si zde popíšeme, jaký je princip a druhy stavby sítě na kruhu. Základní myšlenka mapované sítě je mít stejný počet bodů na dvou protilehlých hranách plochy, která bude pokryta sítí. Cílem je vytvořit síť blízkou tvaru krychle v případě 3D sítě, či čtvercům v případě 2Dsítě. Pokud budě buňka sítě výrazně zdeformovaná, výpočet se začne chovat nestabilně a začne špatně konvergovat.

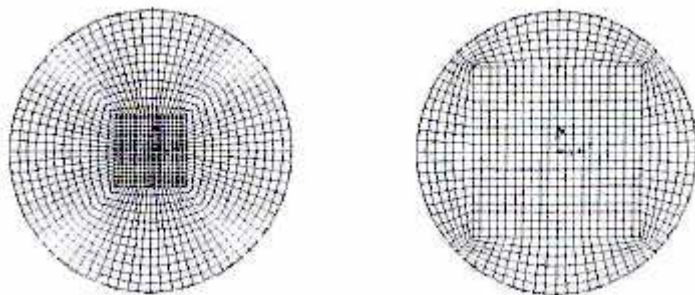
Je snaha vytvořit mapovanou síť na kruhu tak, aby tvar buněk byl co nejpravidelnější a buňky byly rovnoměrně rozmístěny po průřezu.

Máme dva základní druhy konstrukce mapované sítě na kruhu:

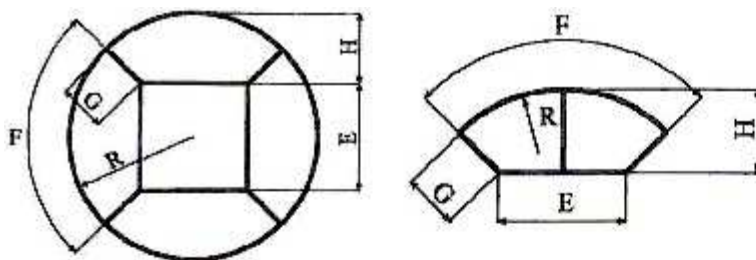
- Optimalizovaná mapovaná síť s pravoúhlým vnitřním čtvercem
- Optimalizovaná síť se zaobleným vnitřním čtvercem.

4.1.1 Optimalizovaná mapovaná síť s pravoúhlým vnitřním čtvercem

Na obr. 4-1 [2] je vidět mapovaná síť s pravoúhlým vnitřním čtvercem. Jak je vidět, je kruh rozdělen na 5 částí s různými rozměry vnitřního čtverce. Použití menšího čtverce způsobí náhlý přechod z jemného síťování uprostřed na hrubé z vnějšku. Navíc s výrazně deformovanými a malými buňkami v rozích čtverce. Ve druhém případě je naopak prostřední čtverec většího rozměru, což má za následek deformaci sítě v rozích čtverce.



Obr. 4-1 Mapovaná síť s pravoúhlým vnitřním čtvercem

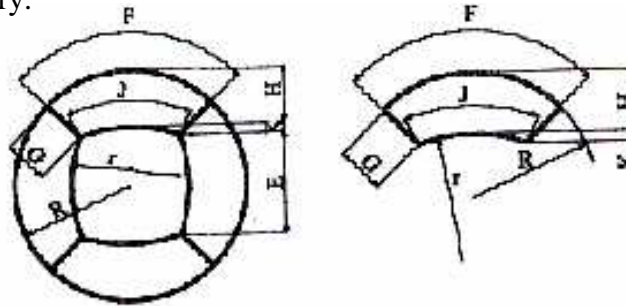


Obr. 4-2 Popis mapované sítě s pravoúhlým vnitřním čtvercem

Touto sítí se v dalším již nebudeme dále zabývat, protože jako lepší druh konstrukce se jevila možnost se zaobleným vnitřním čtvercem, kterou si nyní popíšeme podrobněji.

4.1.2 Optimalizovaná mapovaná síť se zaobleným vnitřním čtvercem

Rozdíl oproti předchozímu případu je v tom, že čtverec uvnitř kruhu má hrany zaoblené v určitém poloměru obr. 4-3 [2]. Buňky sítě budou tak pravidelněji rozmístěny se shodnějšími rozměry.



Obr. 4-3 Popis mapované sítě se zaobleným vnitřním čtvercem

4.2 KONSTRUKCE MAPOVANÉ SÍTĚ

Za finální princip vytvoření sítě byla vybrána síť se zaobleným vnitřním čtvercem. Popíšeme si postup konstrukce a zadané hodnoty.

Základním rozměrem je průměr trubky, který je roven 50 mm. Důležité je při stavbě sítě uvažovat s tloušťkou mezní vrstvy, jíž je nutné odečíst od průměru trubky. Mezní vrstva je uvažována v tloušťce 5 mm. Pro konstrukci mapované sítě je potřeba znát koeficienty a, b, β , které mi byly doporučeny vedoucím práce.

Zadané hodnoty koeficientů:
 $a = 1,02165685$
 $b = 0,0658262488$
 $\beta = 0,268602448$

Koeficienty a, b slouží k určení rozměrů E a K . Kdy součinitel a je definován jako

$$a = \frac{E}{R} \Rightarrow E = R \times a = 20 \times 1,02165685 = 20,433137 \text{ mm [2]}$$

Rozměr E dosadíme do vztahu pro b :

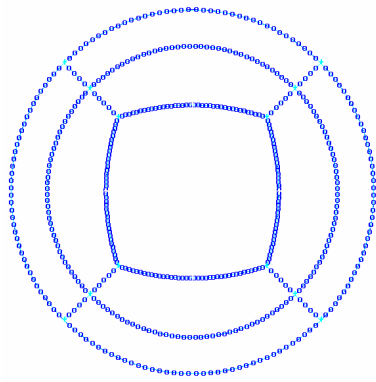
$$b = \frac{K}{E} \Rightarrow K = b \times E = 0,0658262488 \times 20,433137 = 1,343075 \text{ mm [2]}$$

Dalším bodem je určení počtu prvků na úsečkách G a F označených jako n_G a n_F . Počet prvků n_F se zvolí a je uvažován z hodnot 25, 30, 35. Jako nejlepší varianta vyšla ta s počtem $n_F = 25$.

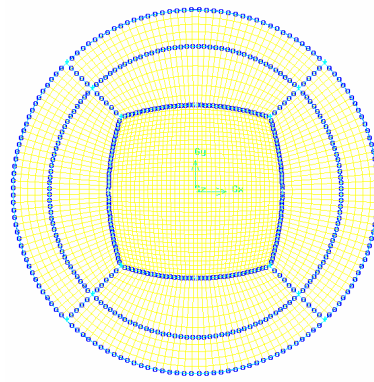
Množství prvků n_G na úsečce G se dopočítá ze vztahu:

$$n_G = \beta \times n_F = 0,268602448 \times 25 = 6,715 \Rightarrow \text{volba nejbližšího vyššího počtu 7 prvků [2]}$$

Zadané a vypočtené hodnoty nám definují celou plošnou mapovanou síť přes trubku. Na její vykreslení se použije program Gambit v němž se následně vytažením změní v objemovou. Obr. 4-4 ukazuje geometrii kruhové trubky s prvky připravenými na vytvoření sítě. Vyhotovená síť je na obr. 4-5.

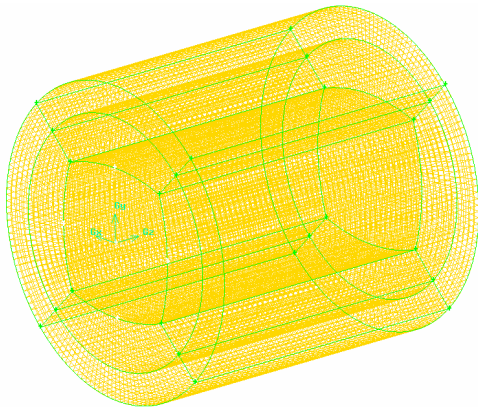


Obr. 4-4 Geometrie s naprvkováním

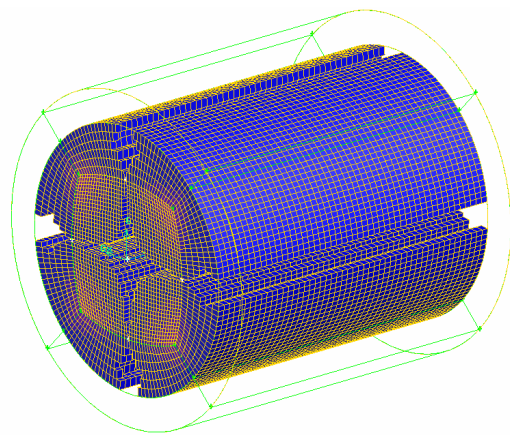


Obr. 4-5 Plošná síť

Tato varianta sítě není konečná. V dalším se bude ještě upravovat, protože stávající koncepce nebude vyhovovat pro všechny případy síťování.



Obr. 4-6 Objemová síť



Obr. 4-7 Kvalita sítě

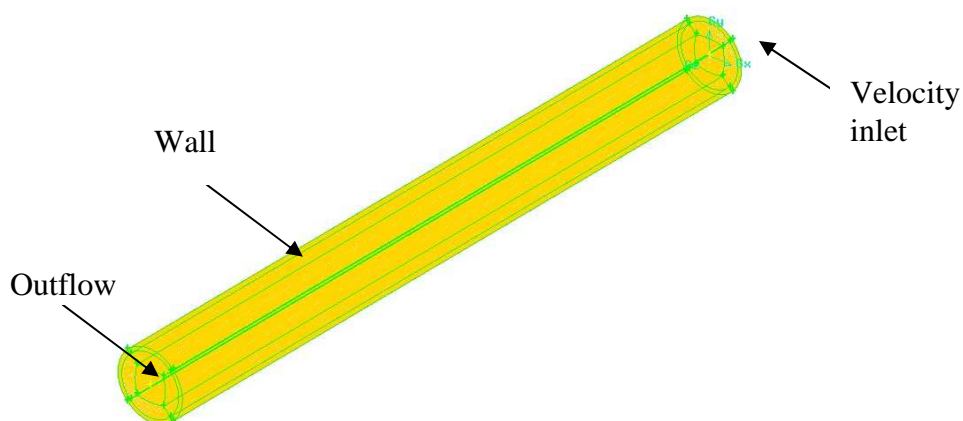
Částečná podoba sítě je zobrazena na obr. 4-6. Obrázek 4-7 vypovídá o tvaru a kvalitě vyplňujících buněk. Čím víc je barva do červena, tím horší je výpočtová buňka. Na tomto obrázku je kvalita sítě velmi dobrá, proto nejsou zřetelně poznat deformované články síťování. Podle čeho se určuje kvalita sítě bude popsáno dále.

5 RYCHLOSTNÍ PROFIL

Pro počítání laminárního a turbulentního proudění je v našem případě důležité, aby se vyvinul potřebný rychlostní profil. K tomu je vhodná dostatečně dlouhá trubka. Abychom si zjednodušili a zkrátili výpočty, využijeme možnosti odečíst rychlostní profil z průřezu, kde je již laminární nebo turbulentní proudění vyvinuto. Následně toto zvolené rychlostní pole bude vloženo jako rychlostní profil jedné z variant změn sítě. Místo vyvinutí profilu určíme podle různých kritérií (Coriolisovo číslo, tlaková diference, rozdíl rychlosti na ose potrubí).

5.1 LAMINÁRNÍ PROUDĚNÍ

5.1.1 Výpočetní model a okrajové podmínky



Obr. 5-1 Schéma okrajových podmínek

Velocity inlet - na plochu vstupu (*velocity inlet*) přiřadí rovnoměrně po celé ploše zadanou rychlost

Wall – podmínka ulpívání na stěně – zohledňuje tření kapaliny na stěně trubky

Outflow – podmínka nulového tlaku na výstupu z trubky

Součást		Trubka 3500 x 50
Geometrie	Mezní vrstva	Hexahedron
	Trubka	Hexahedron
Počet buněk		1 900 000
Nastavení výpočtu		Laminární proudění
Okrajové podmínky		Velocity inlet: $c = 0.0206$ m/s
Reynoldsovo číslo		0,001023847

Tab. 5-1 Přehled parametrů výpočtu laminárního proudění

5.1.2 Výsledky a volba profilu

V trubce dlouhé 3,5 m o průměru 50 mm proudila tekutina se vstupní rychlostí 0,0206 m/s. Aby se rozpoznalo, kde se vyvine laminární profil, byla trubka nadělena příčnými řezy ve vzdálenosti násobku D. Tedy, každých 50 mm byl v trubce jeden plošný řez.

V těchto řezech se zkoumala kritéria stabilizování profilu:

- rychlost kapaliny v ose (v_{ax}) - sledování rychlosti v bodě na ose potrubí dokud její hodnota nebude konstantní nebo její rozdíl mezi předcházejícím a následujícím bodem je v řádu 0,03 %.
- Coriolisovo číslo (α) - pro laminární proudění platí $\alpha = 2$.

Na zjednodušení výpočtu Coriolisova čísla si upravíme jeho vztah.

$$\alpha = \frac{\int v^2 dQ}{v_s^2 Q} = \frac{\int v^2 x v_n dS}{v_s^3 x S} [-]$$

Číselník Coriolisova čísla (dále jen *Cor-cit*) bude dán hodnotou plošného integrálu (*Area weighted average*) přes každý nadefinovaný průřez ze vztahu přednastaveného pomocí *Custom field function* v podobě:

$$\text{cor-cit} = (\text{velocity magnitude})^2 \times \text{axial velocity}$$

Jmenovatel se počítá z hmotnostního průtoku Q_m poděleného hustotou média ρ a příslušným průřezem S . Tím získáme střední rychlost na průřezu \bar{v} :

$$\bar{v} = \frac{Q_m}{\rho S}$$

- Střední hodnota statického tlaku v průřezu (p_{stat}) - obdobně jako u rychlosti kapaliny v ose budeme sledovat, jak se mění střední hodnota tlaku na průřezu po délce trubky.

Výsledky výpočtu byly zaneseny do tab. 5-2. Pro lepší názornost je zobrazen pouze výřez tabulky z potřebnými hodnotami. Barvou je znázorněn průřez, ze kterého byl vzat rychlostní profil pro další výpočty podle výběrových kritérií.

Násobek D [-]	v_{ax} [m/s]	Δv_{ax} [m/s]	Δv_{ax} %	α [-]	$\Delta \alpha$ [-]	$\Delta \alpha$ %	P_{stat} [Pa]	Δp_{stat} [Pa]	Δp_{stat} %
66	0,040829	-1,7E-05	-0,04141	1,980132	-0,0007	-0,0354	-0,63207	0,01338154	-2,16289
67	0,040844	-1,6E-05	-0,0387	1,980791	-0,00066	-0,03327	-0,64544	0,01337231	-2,11564
68	0,040859	-1,5E-05	-0,03648	1,98141	-0,00062	-0,03123	-0,6588	0,01336389	-2,07051
69	0,040873	-1,4E-05	-0,03402	1,98199	-0,00058	-0,02931	-0,67216	0,01335586	-2,02729

Tab. 5-2 Výřez z výsledků řešení laminárního proudění

Výpočet hodnot:

v_{ax} [m/s], p_{stat} [Pa] - hodnoty odečtené z Fluentu

α [-] – spočítáno na základě odečtených hodnot *cor-cit* [-], hmotnostního průtoku Q_m [kg/s], plochy průřezu S [m²] a hustoty ρ [kg/m³]; postup výpočtu uveden výše

Δv_{ax} – je to rozdíl předcházející a následující hodnoty axiální rychlosti v daném průřezu

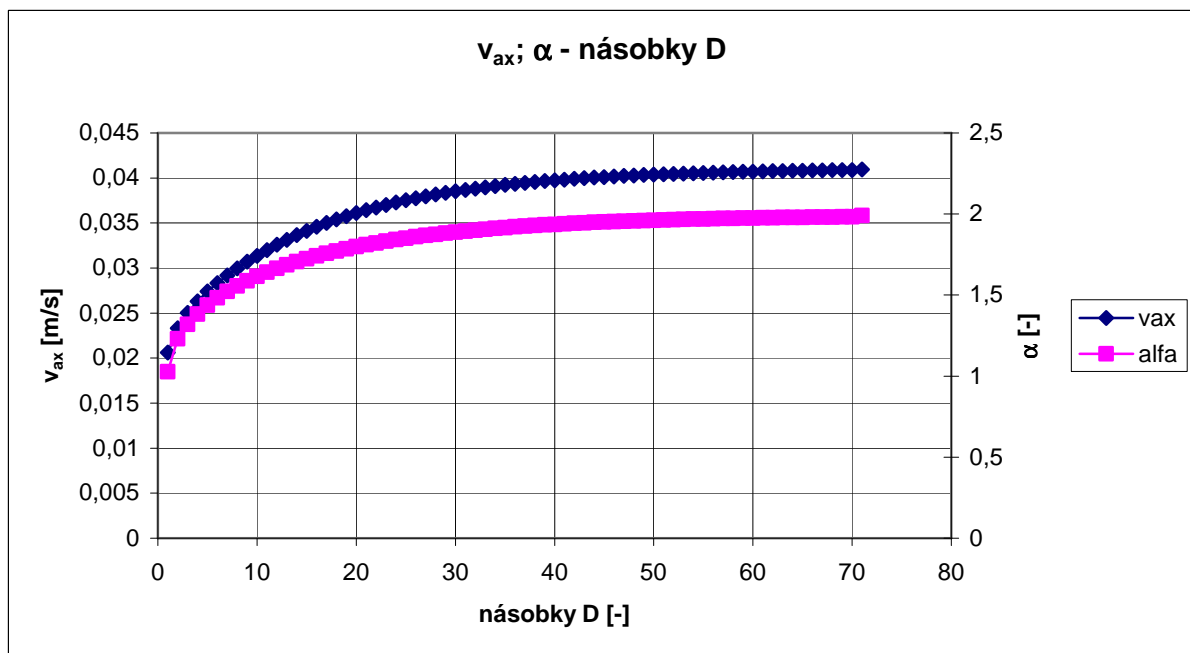
$$\Delta v_{ax} = v_{ax}(66D) - v_{ax}(67D)$$

$v_{ax}(66D)$; $v_{ax}(67D)$ - hodnoty axiální rychlosti v násobcích průměru D

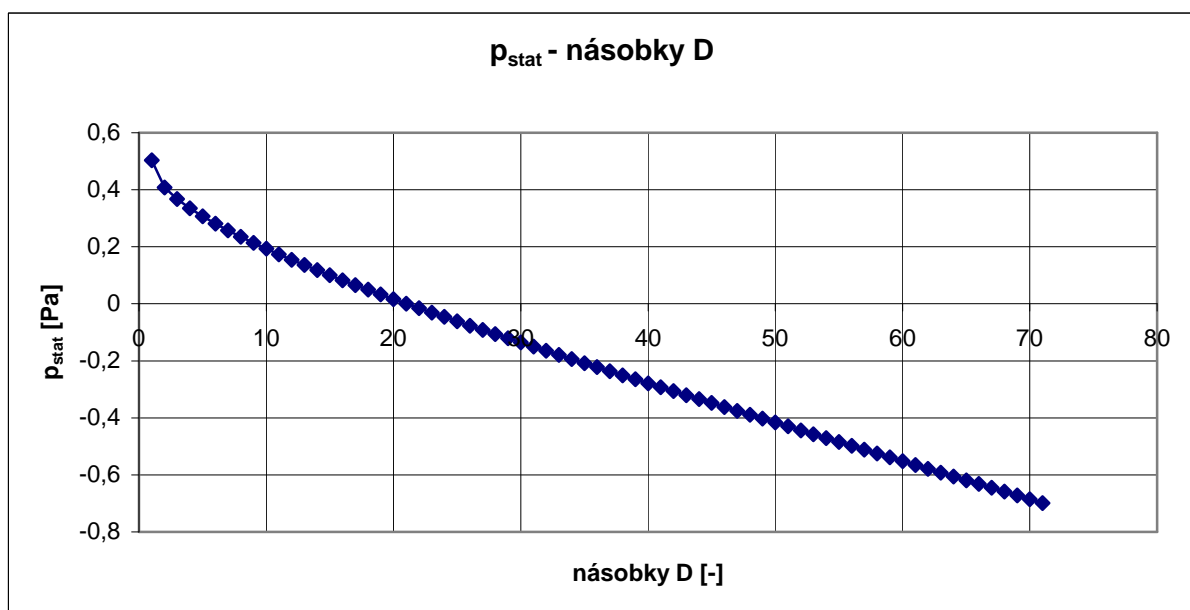
odchylka $\Delta v_{ax} \%$ - ukazuje o kolik procent se liší dvě vzájemně po sobě jdoucí axiální rychlosti

$$\Delta v_{ax} \% = \frac{v_{ax}(66D) - v_{ax}(67D)}{(v_{ax}(66D)/100)}$$

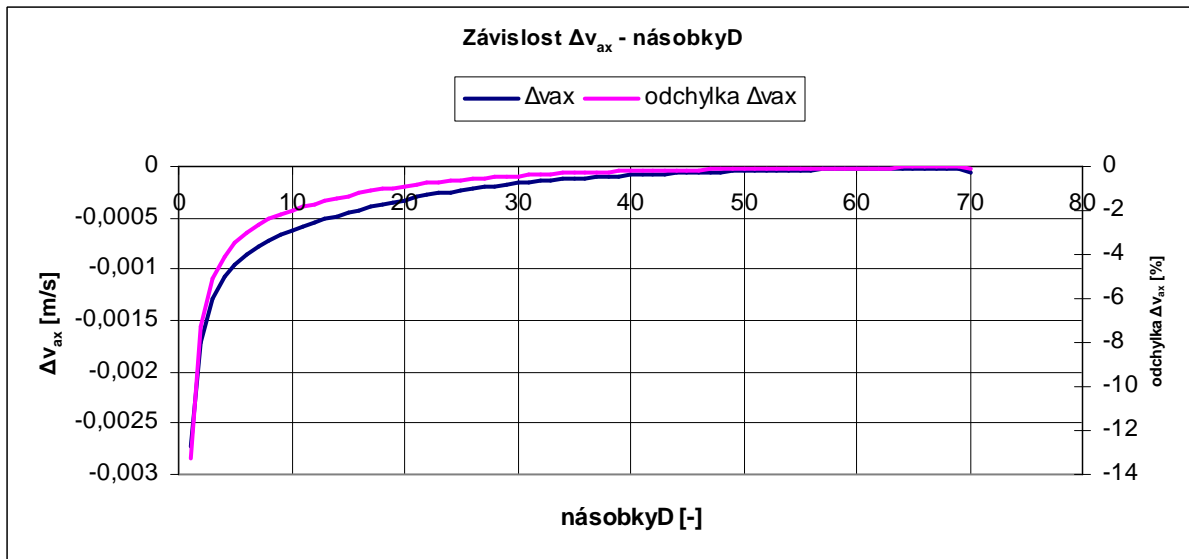
Stejný princip řešení je aplikován i u počítání $\Delta\alpha$, $\Delta\alpha\%$, Δp_{stat} , $\Delta p_{stat}\%$.



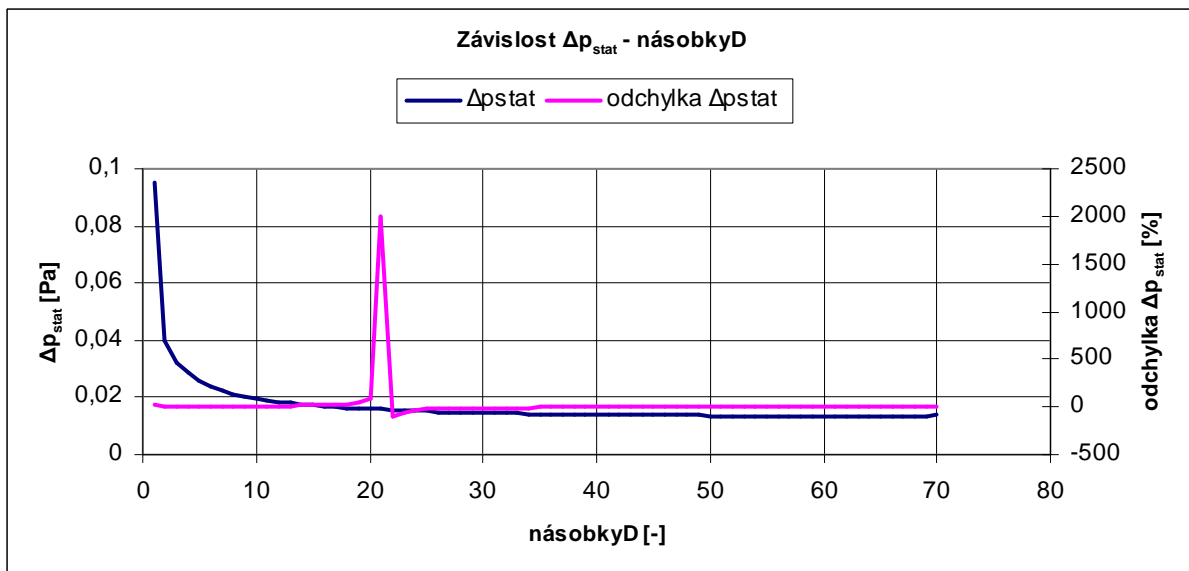
Graf 5-1 Volba profilu rychlosti pro laminární proudění, vyhodnocení v_{ax} , Cor. Čísła



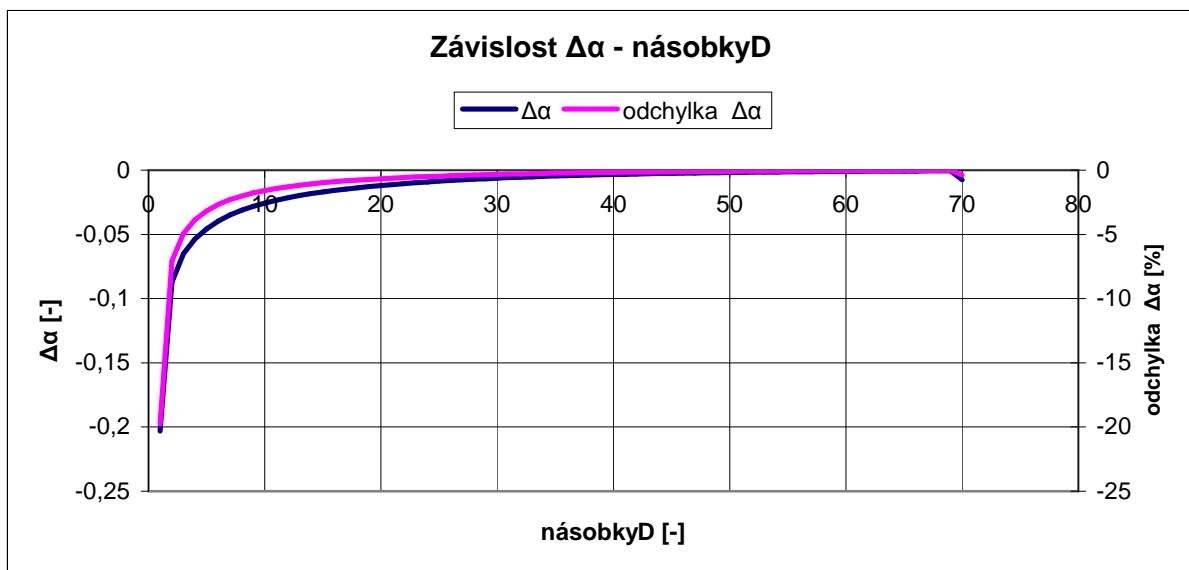
Graf 5-2 Volba profilu rychlosti pro laminární proudění, vyhodnocení p_{stat}



Graf 5-3 Volba profilu rychlosti pro laminární proudění, vyhodnocení v_{ax}



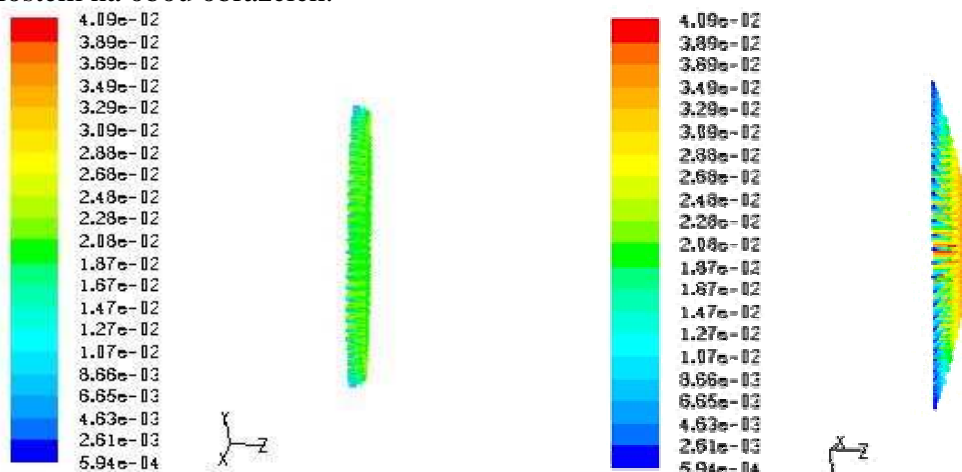
Graf 5-4 Volba profilu rychlosti pro laminární proudění, vyhodnocení p_{stat}



Graf 5-5 Volba profilu rychlosti pro laminární proudění, vyhodnocení Coriolisova čísla

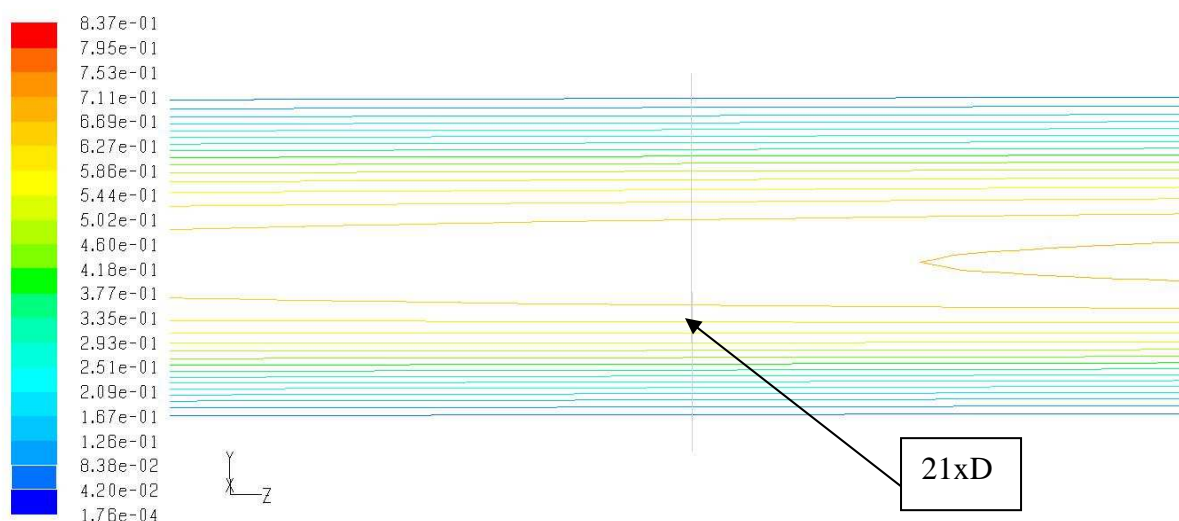
Na základě zobrazených grafů bylo konečným profilem zvoleno rychlostní pole v průřezu ve vzdálenosti 68 násobku průměru D od začátku trubky. Tento profil bude použit jako vstupní rychlost pro proudění v trubce. Průběh statického tlaku a Coriolisova čísla je již zde konstantní a odchylka je v potřebném rozmezí 0,03%. Plošný průřez $68xD$ je ve vzdálenosti 150 mm od konce trubky, tudíž by neměl být ovlivněn okrajovou podmínkou.

Na obr. 5-2 je vidět porovnání vektorů axiální rychlosti, kde levý obrázek odpovídá podmínkám vstupu kapaliny do trubky a pravý obrázek ukazuje zvolený průřez – $68xD$. Je již vidět charakteristická parabola laminárního proudění. Uprostřed trubky rychlosti velké, značené červenou barvou. Po obvodě trubky rychlosti malé, značené modrou barvou. V této oblasti je proudění ovlivněno třením na stěně trubky. Barvy v legendě odpovídají stejným rychlostem na obou obrázcích.



Obr. 5-2 Vektory rychlosti laminárního proudění

Průběh statického tlaku vykazuje v místě $21xD$ prudkou odchylku. Čím je způsobena není známo. Kvalita sítě v trubce je vysoká, nedochází zde k žádné změně síťování, nevzniká víření, nemění se ani okrajové podmínky. Jediná zajímavost tohoto místa tkví v tom, že při modelování v Gambitu zde byl nulový bod a trubka zde přecházela ze záporné hodnoty na ose z v kladnou. Tento výkmit se vyskytl ještě v několika případech. Pro lepší ukázkou situace je více zobrazeno na obr. 5-3. Jsou vyobrazeny kontury tlaku. Výchylku by mohla způsobit špatně vytvořená plocha, ale i po novém vytvoření průřezu vyšel stejný výsledek.



Obr. 5-3 Kontury tlaku laminárního proudění v místě 21 násobku D

5.2 TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ

Volba profilu pro turbulentní proudění bude probíhat obdobně jako pro laminární. Budou se sledovat hodnoty axiálních rychlostí, Coriolisovo číslo a statický tlak. Až se ustálí jejich vzájemné odchylky, tam se zvolí turbulentní profil, který bude použit ve výpočtech.

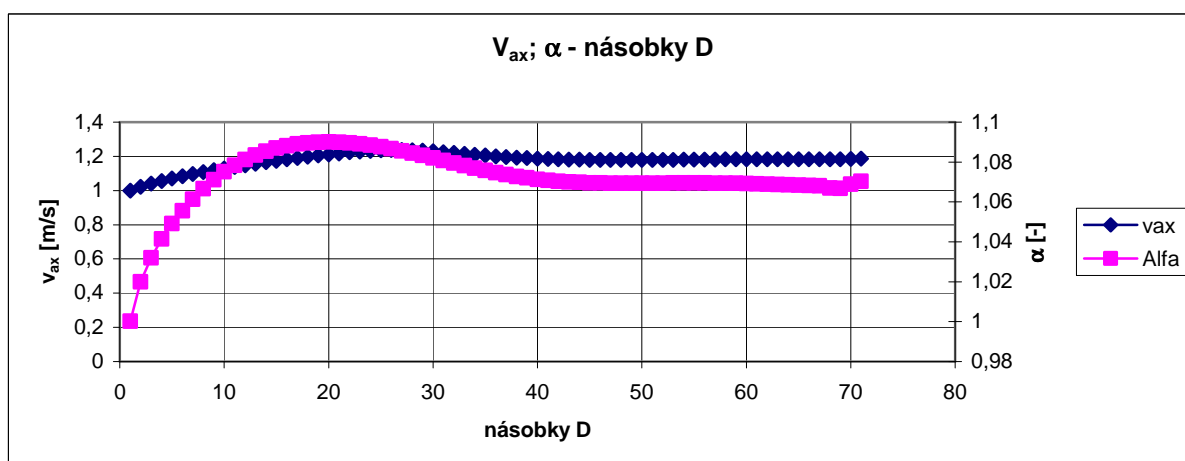
Oproti laminárnímu proudění bude spočívat rozdíl pouze v tom, že rychlostní pole bude voleno pro tři různé hodnoty vstupní rychlosti – 1,2,3 m/s. V tab. XXX jsou zapsána jednotlivá Reynoldsova čísla.

Reynoldsovo číslo spočítáno pro: $D = 50\text{mm}$
 $v = 1,2,3\text{ m/s}$
 $\nu = 1,003 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$

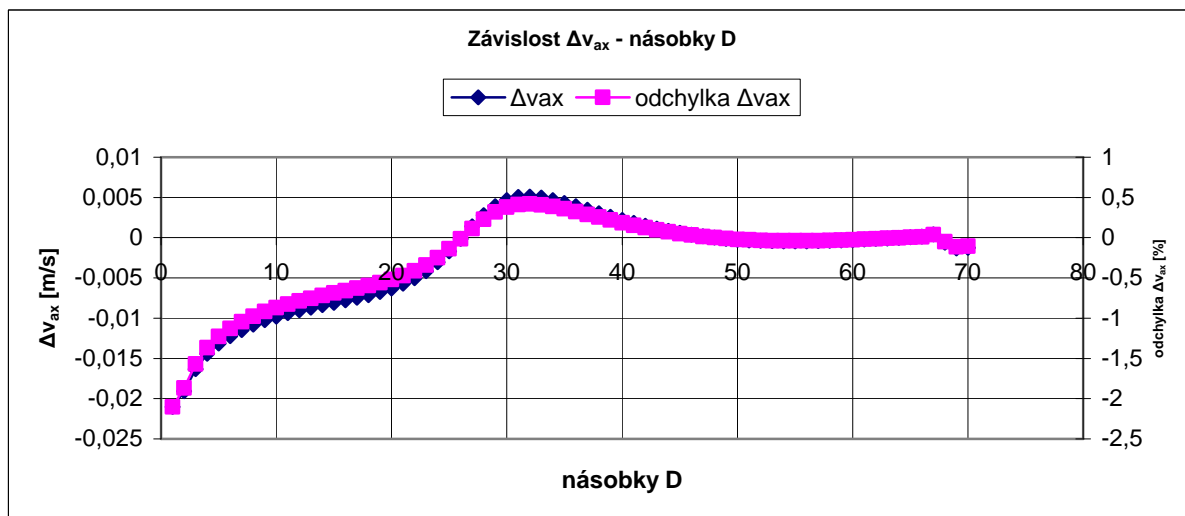
v [m/s]	Re [-]
1	49 850
2	99 700
3	149 551

Tab. 5-3 Reynoldsova čísla pro rychlosti turbulentního proudění

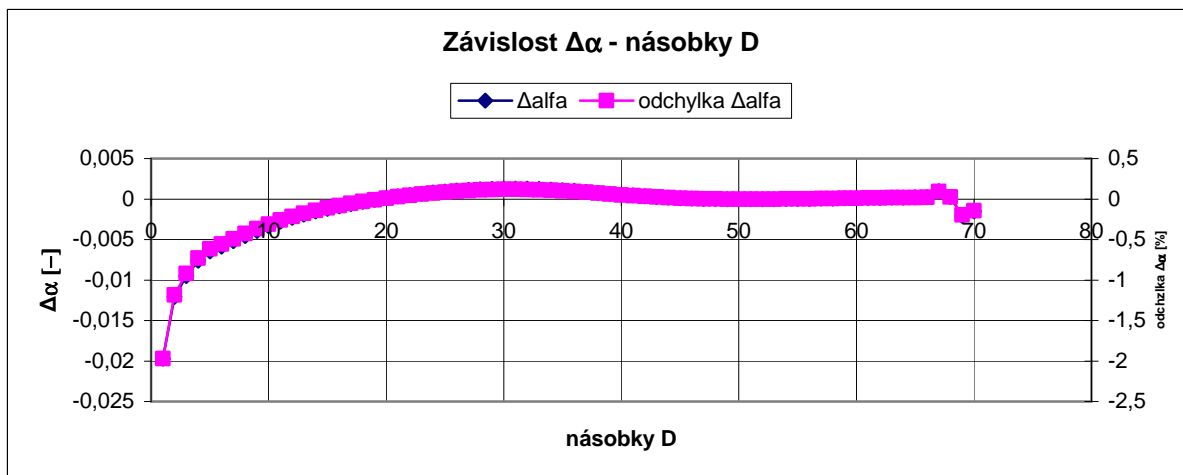
5.2.1 Volba profilu rychlosti pro vstupní rychlost 1m/s:



Graf 5-6 Volba profilu rychlosti pro vstupní rychlost 1m/s, vyhodnocení v_{ax} , Cor. čísla



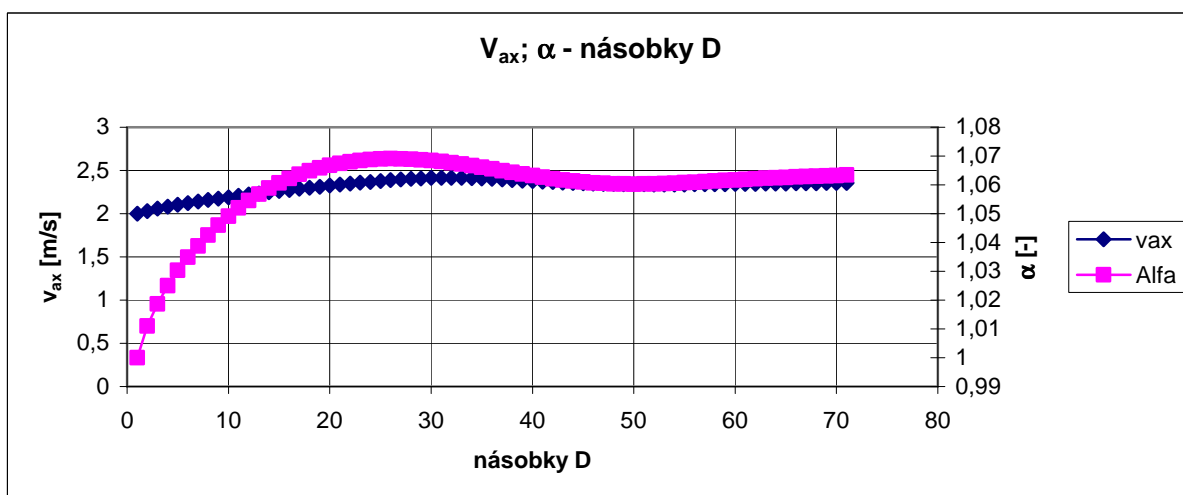
Graf 5-7 Volba profilu rychlosti pro vstupní rychlost 1m/s, vyhodnocení v_{ax}



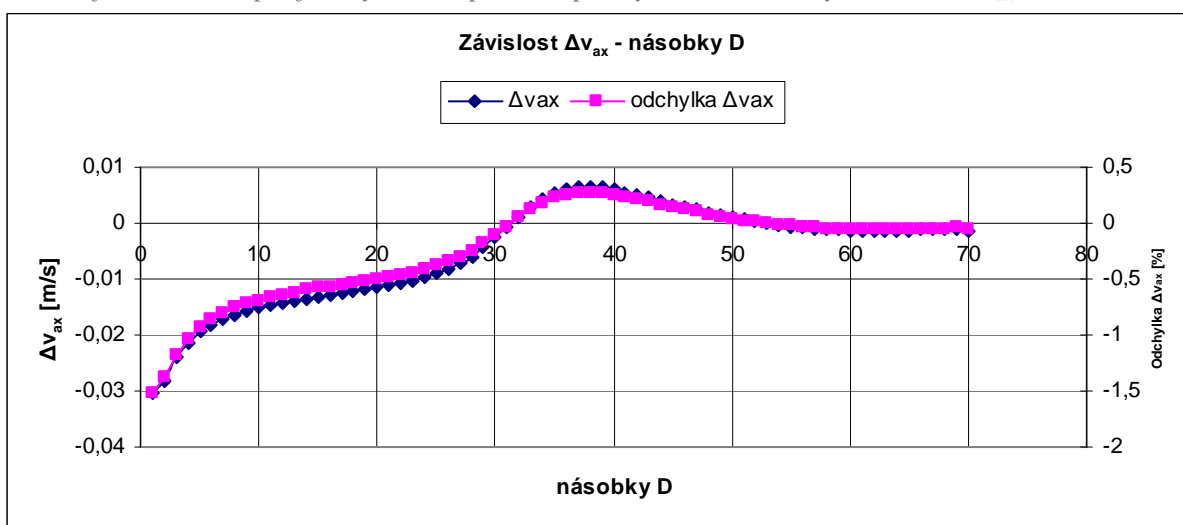
Graf 5-8 Volba profilu rychlosti pro vstupní rychlost 1m/s, vyhodnocení Coriolisova čísla

Pro zvolení rychlostního profilu se nejlépe jevila vzdálenost 55násobku průměru od počátku trubky. Axiální rychlost a Coriolisovo číslo zde vykazují nejkonstantnější průběh. Pro rychlost 1 m/s je zvolen profil rychlosti z místa 55násobku průměru trubky.

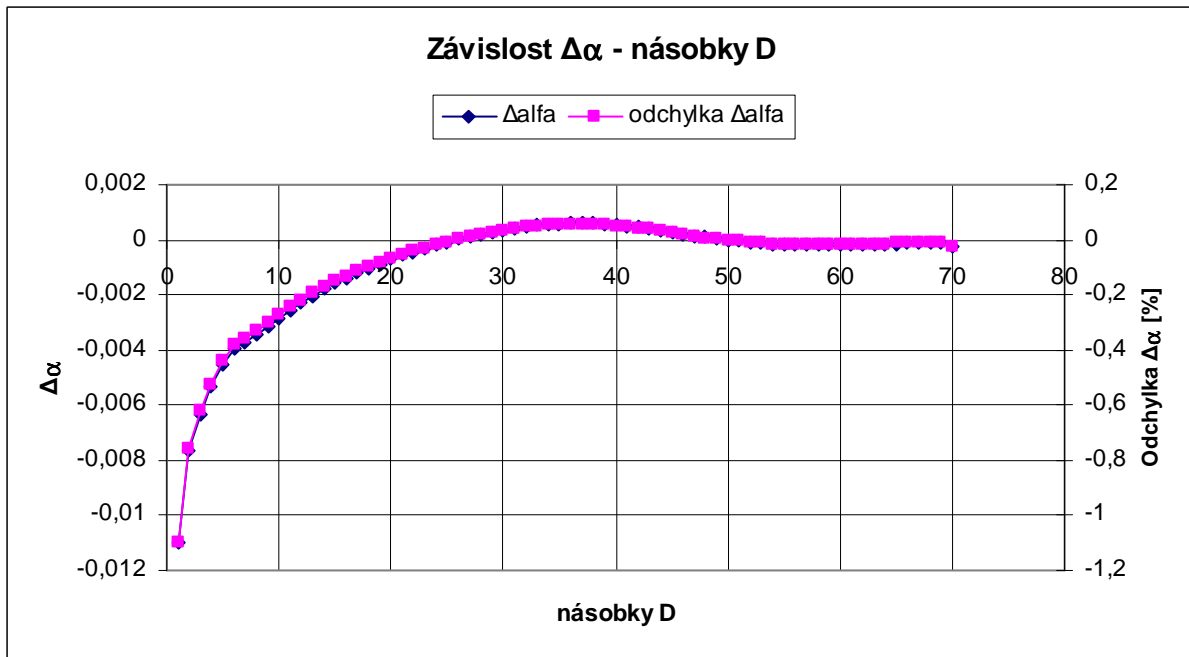
5.2.2 Volba profilu rychlosti pro vstupní rychlost 2 m/s:



Graf 5-9 Volba profilu rychlosti pro vstupní rychlost 2m/s, vyhodnocení v_{ax} , Cor. čísla



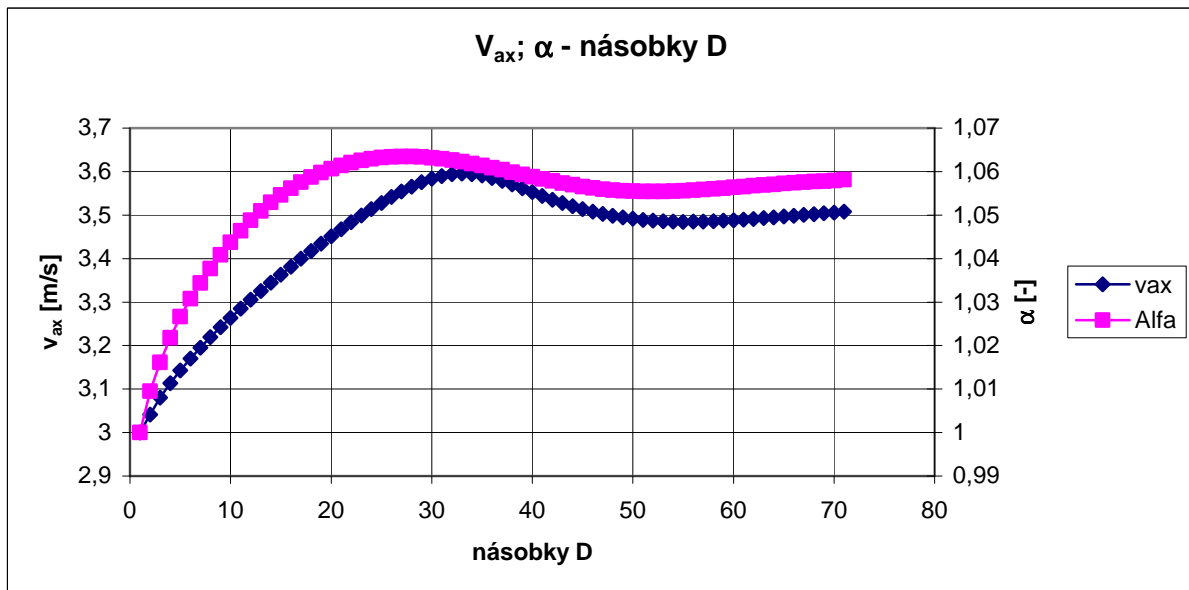
Graf 5-10 Volba profilu rychlosti pro vstupní rychlost 2m/s, vyhodnocení v_{ax}



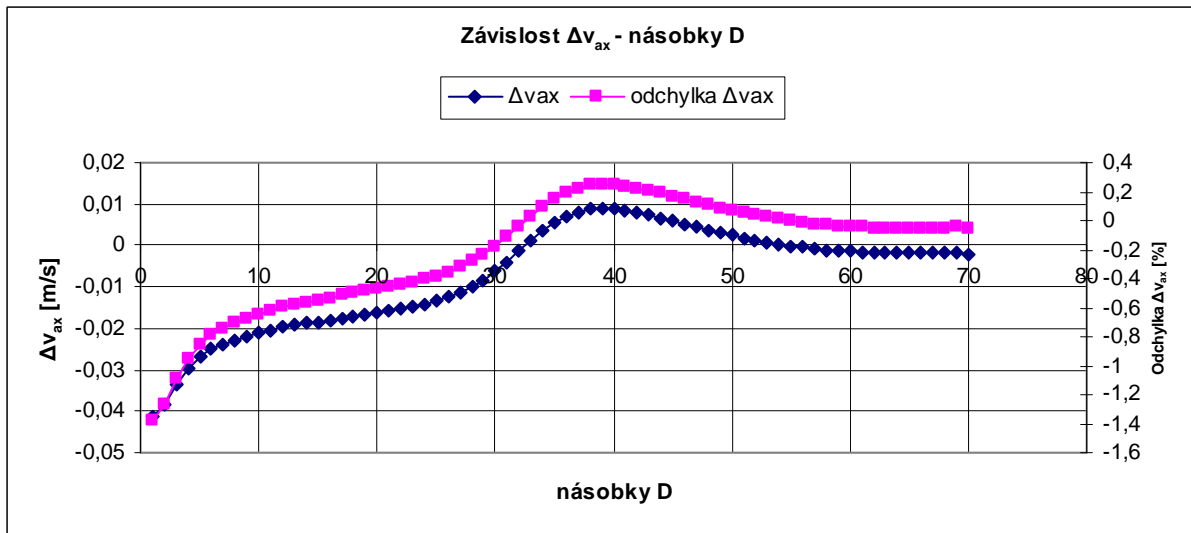
Graf 5-11 Volba profilu rychlosti pro vstupní rychlost 2m/s, vyhodnocení Coriolisova čísla

Pro vstupní rychlost 2 m/s byl zvolen profil rychlosti z místa 65násobku průměru trubky

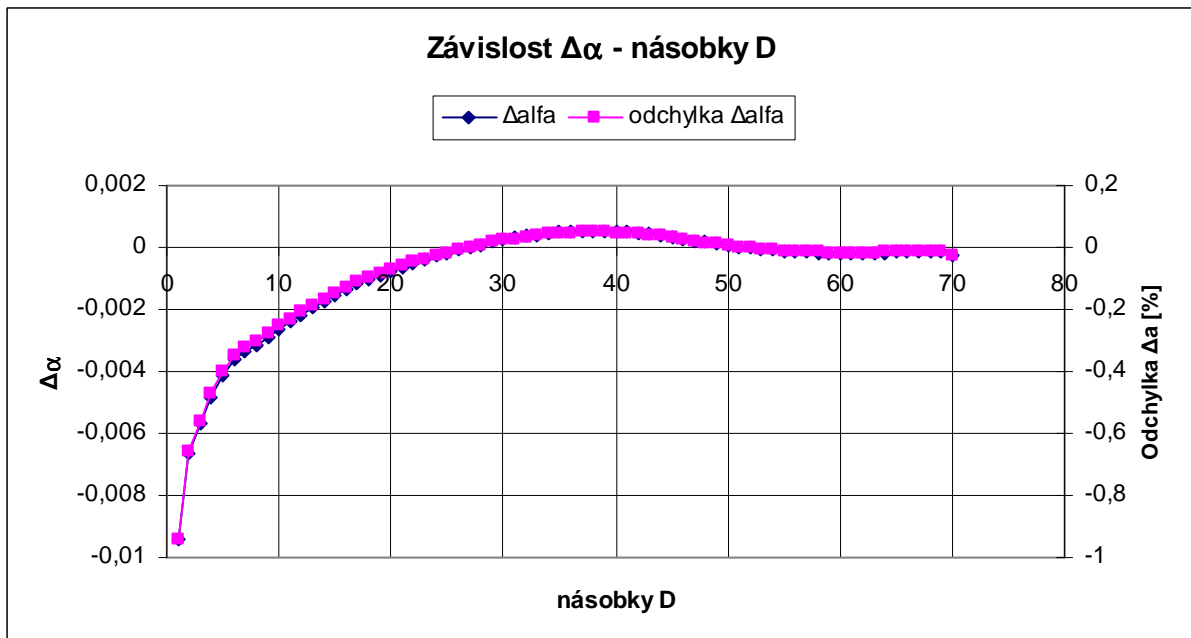
5.2.3 Volba profilu rychlosti pro vstupní rychlost 3 m/s:



Graf 5-12 Volba profilu rychlosti pro vstupní rychlost 3m/s, vyhodnocení v_{ax} , Cor. čísla



Graf 5-13 Volba profilu rychlosti pro vstupní rychlost 3m/s, vyhodnocení v_{ax}



Graf 5-14 Volba profilu rychlosti pro vstupní rychlost 3m/s, vyhodnocení Coriolisova čísla

Jako vhodný profil pro vstupní rychlost 3 m/s ze zobrazených grafů vyplývá profil ve vzdálenosti 63násobku průměru trubky.

6 TYPY POROVNÁVANÝCH A POUŽITÝCH SÍTÍ

6.1 Základní typy sítí

Při výpočtech směřovaných k volbě profilu rychlosti byla použita výpočetní síť vytvořená z šestistěnných prvků (hexahedron). Tyto prvky vykazují nejlepší vlastnosti řešení úlohy. Jejich použitím docílíme výbornou kvalitu sítě a tím rychlou konvergenci výpočtu.

Prostor trubky vyplněný šestistěny byl použit jako základní síť pro přechod na jiný typ výplňových prvků. Dalšími možnostmi pro kombinaci různých druhů buněk jsou sítě typu polyhedral, prizma, TetHyb.

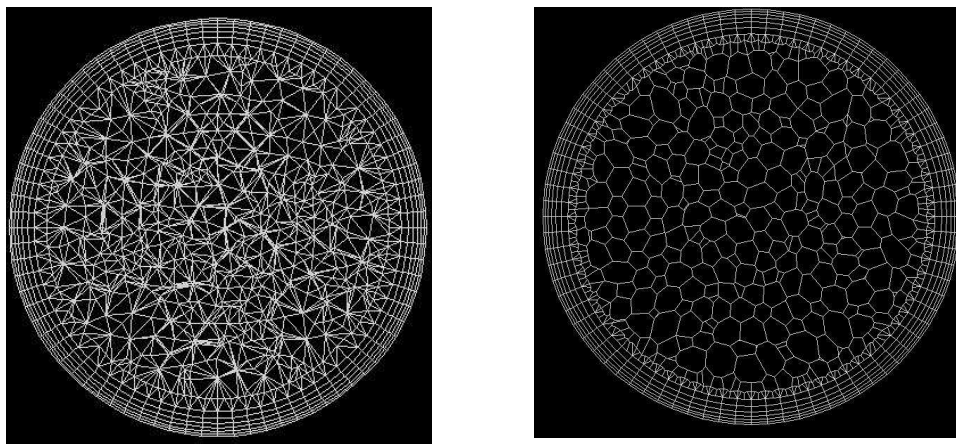
6.1.1 Polyhedrální síť

Je složena z prostorového šestistěnu. Jeho tvar si můžeme představit jako včelí plástev nebo čedičový kámen. Jako základ pro vybudování polyhedrální sítě slouží hybridní prvky (TetHyb), které se ve Fluentu převedou na prvky polyhedrální. Tato procedura klade nároky na hardwarovou vybavenost počítače.

Na obr. 6-1 jsou vidět dva příčné řezy trubkou před a po převodu na polyhedrální síť. Levý obrázek ukazuje zdrojovou TetHybridní síť s mezní vrstvou vytvořenou šestistěnnými prvky. Pravý obrázek ukazuje vyplněný objem trubky po zkonvergování na polyhedrální síť. Je vidět značný úbytek buněk a zjednodušení struktury sítě, což má za následek zrychlení výpočtu.

- Výhody:**
- kvalitní síť
 - rychlý výpočet
 - malý paměťový prostor (na harddisku počítače)

- Nevýhody:**
- časová a hardwarová náročnost konverze



Obr. 6-1 Řez TetHybridní a polyhedrální sítí

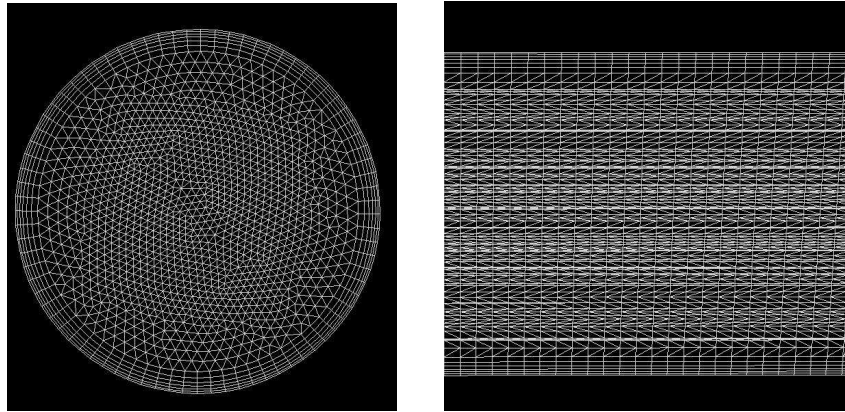
6.1.2 Prizmatická síť

Výpočet je rychlý a stabilní. Prizmatické prvky mají tvar malých objemových těles trojúhelníkového průřezu. Jejich stavba vychází z plochy vyplněné TetHyb prvky. Jelikož v našem případě vycházíme ze sítě šestistěnné, je nutné dodržet přechodovou oblast vyplněnou třístěnnými prvky, která umožní vygenerování prizmatické sítě.

Na obr. 6-2 je vidět podélný a příčný řez přes trubku. Můžeme pozorovat pravidelnou stavbu podobně jako u polyhedrálních prvků.

Výhody: - kvalitní síť
- rychlý a stabilní výpočet

Nevýhody: - omezení použití v závislosti na geometrii



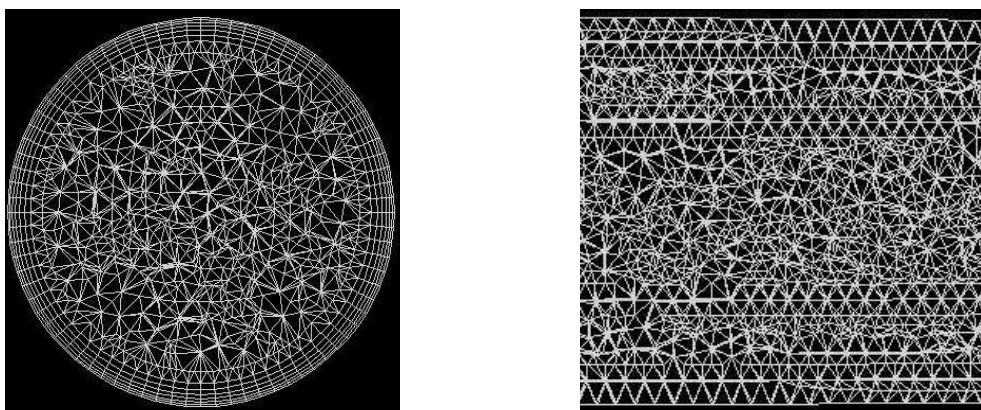
Obr. 6-2 Řezy prizmatickou sítí

6.1.3 TetHyb síť

Z uvedených vykazuje nejhorší kvalitu, ale umožňuje snadnější vyplnění složitých tvarů, kde předchozí dvě varianty sítí nelze zkonstruovat. Výpočet je časově náročný. Vykazuje větší počet prvků na stejnou jednotku objemu. Na obrázku 6-3 je znázorněna chaotická struktura této sítě.

Výhody: - možnost vyplnit sítí složitější tvary

Nevýhody: - horší kvalita
- větší počty prvků
- horší konvergence výpočtu
- časová náročnost



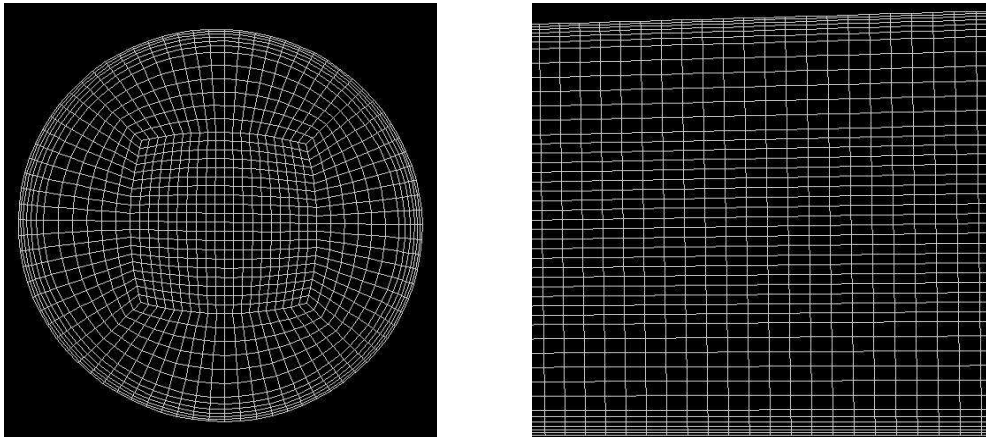
Obr. 6-3 Řezy TetHybridní sítí

6.1.4 Hexagonální síť

Skládá se ze šestibokých těles (krychlý, kvádrů). Lze použít i na složitější tělesa. Dosahuje se relativně dobré kvality buněk. Je nutné vhodně zvolit způsob vytvoření sítě. Z obr. 6-4 je vidět pravidelná struktura objemových prvků. Z uvedených ukázek je tato síť nejlepší.

Výhody: - dobrá kvalita sítě
- rychlý výpočet

Nevýhody: - náročnost stavby



Obr. 6-4 Řezy hexagonální sítě

6.2 Varianty změny typu prvků

Změny se budou odehrávat na trubce o průměru 50mm a délce 500mm. Trubka je rozdělena na dvě části s výjimkou změny hexagonální sítě na prizmatickou, kdy ještě musí být vložena přechodová část. První část dlouhá 200 mm je vyplněna hexagonální sítí na kterou se následně připojí odlišné varianty sítí. Druhá část trubky má délku 300 mm. Základní princip konstrukce se odvíjí od mapované sítě na kruhu se zaobleným vnitřním čtvercem jak je uvedeno dříve.

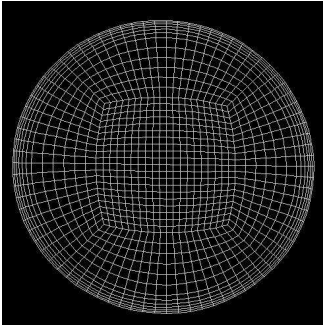
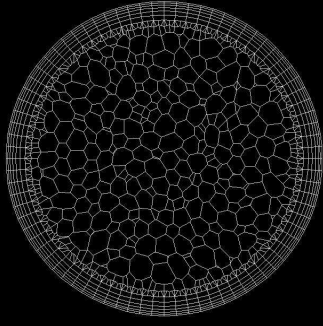
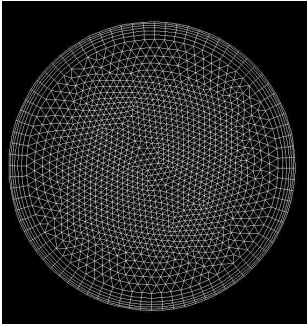
V následujícím přehledu je uvedeno použité vysítování pro výpočty. Největší problémy s kvalitou byly u TetHybridní sítě. Pro zhodnocení vlastnosti sítování bylo použito kritérium EquisizeSkew programu Gambit, kde číslo 1 je přiřazeno síti z nejhoršími vlastnostmi a číslo 0 síti z nejlepšími vlastnostmi. Hodnota kritéria se tedy pohybuje mezi 0 a 1 a platí, že čím menší hodnota, tím lepší síť a naopak.

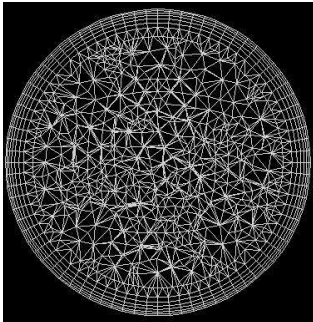
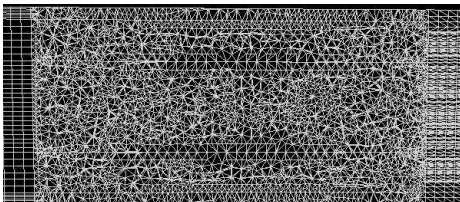
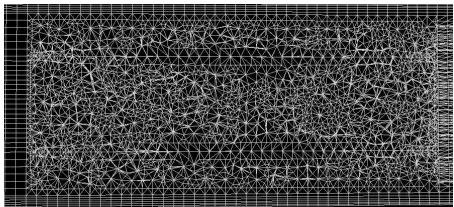
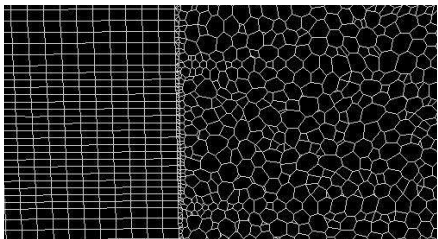
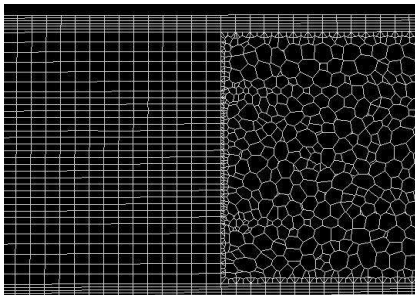
Při návrhu sítě byl brán ohled na počet buněk vyplňujících trubku. Ideální hodnota na jeden procesor se udává 250 až 350 tisíc prvků. Průměrná hodnota u uvedených variant je 500 tisíc buněk.

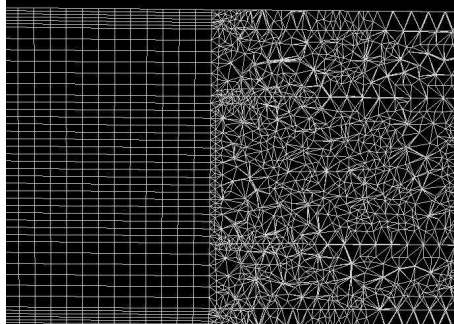
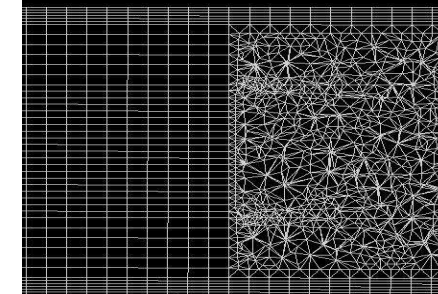
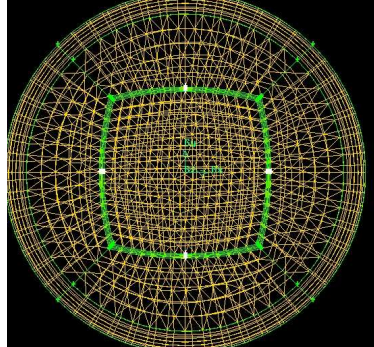
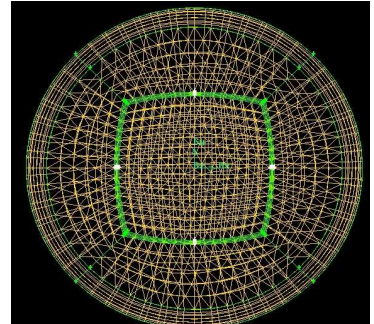
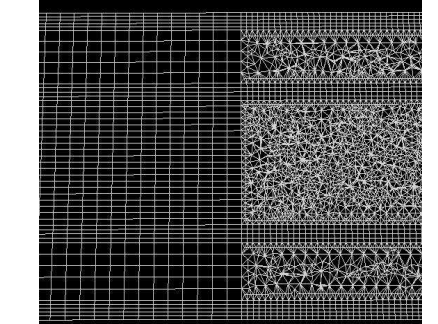
Přehled variant změn sítí:

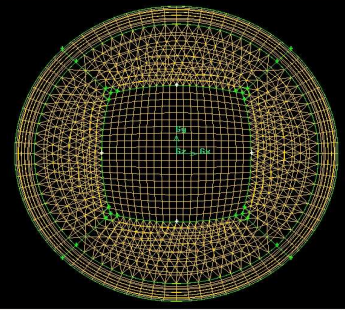
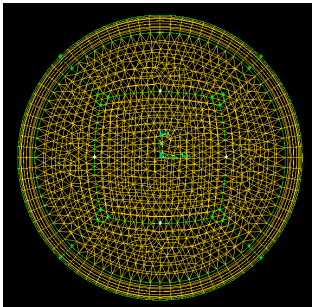
- * Hex
- * Polyhedral
- * Prizma
- * TetHyb

- * Hex-Prizma
 - 1PR) Hex-Prizma
 - 2PR) Hex-PrizmaBLHex
- * Hex-Polyhedral
 - 1PO) Hex-Polyhedral
 - 2PO) Hex-PolyhedralBLHex
- * Hex-TetHyb
 - 1TH) Hex-TetHyb
 - 2TH) Hex-TetHybBLHex
 - 3TH) Hex-TetHybBLHexBLnaCtverci
 - 4TH) Hex-TetHybBLHexBLnaCtverciSirsiZmenaPovrchSite
 - 5TH) Hex-TetHybBLHexZmenaPovrchoveSite
 - 6TH) Hex-TetHybDilciObjemy – Pul trubka
 - 7TH) Hex-TetHybDilciObjemy - Trubka

Název	Počet buněk	Kvalita	Popis	Obrázek
Hex	272 000	0,34	Trubka vyplněna pouze hexagonální sítí s mezní vrstvou	
Polyhedral	316 000	0,79 před převodem	Trubka vyplněna pouze polyhedrální sítí s hexagonální mezní mezní vrstvou	
Prizma	272 000	0,34	Trubka vyplněna prizmatickou sítí s hexagonální mezní vrstvou	

TetHyb	491 000	0,34	Trubka vyplněna tethybrydní sítí s hexagonální mezní vrstvou	
1PR)	536 000	0,99	Trubka rozdělena na 3 úseky. Prvních 200 mm hexagonální síť, dalších 100mm TetHybridní a posledních 200mm prizmatická. Prvky mezní vrstvy odpovídají dané síti.	
2PR)	542 000	0,86	Rozdělení trubky stejné jako v předchozím případě. Pouze mezní vrstva vyplněna hexagonální sítí.	
1PO)	408 000	0,98 Před převodem	Změna z hexagonální sítě na polyhedrální. Mezní vrstva tvořena příslušnými sítěmi.	
2PO)	413 000	0,96 Před převodem	Změna z hexagonální sítě na polyhedrální. Mezní vrstva tvořena hexagonálními prvky.	

1TH)	408 000	0,98	Změna z hexagonální sítě na tet-hybridní. Prvky mezní vrstvy dány použitými typy buněk.	
2TH)	441 000	0,88	Změna z hexagonální sítě na tet-hybridní. Prvky mezní vrstvy tvořeny hexagonální sítí.	
3TH)	430 000	0,94	Změna z hexagonální sítě na tet-hybridní s hexagonální mezní vrstvou a hexagonální sítí v místě zaobleného vnitřního čtverce.	
4TH)	508 000	0,84	Změna z hexagonální sítě na tet-hybridní s hexagonální mezní vrstvou a širší hexagonální sítí v místě zaobleného vnitřního čtverce.	
5TH)	431 000	0,86	Změna z hexagonální sítě na tet-hybridní s hexagonální mezní vrstvou. Sít' je zahuštěna po délce trubky k místu přechodu	

6TH)	454 000	0,86	Změna z hexagonální sítě na tet-hybridní s hexagonální mezní vrstvou. Rohy vnitřního čtverce nahrazeny podélně rozpůleným válcem	
7H)	910 000	0,9	Změna z hexagonální sítě na tet-hybridní s hexagonální mezní vrstvou. Rohy vnitřního čtverce nahrazeny podélně válcem.	

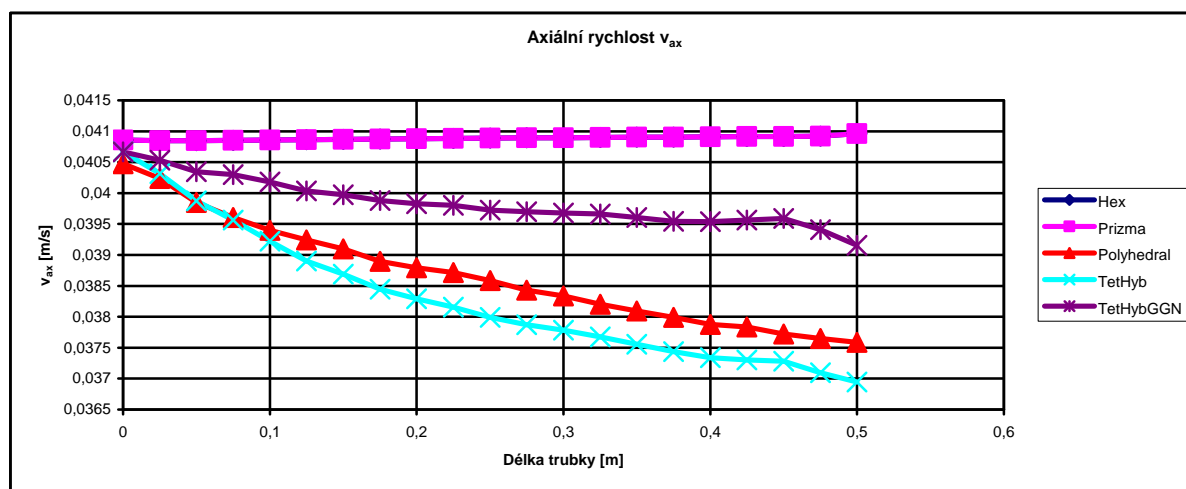
Tab. 6-1 Přehled řešených sítí

7 VYHODNOCENÍ

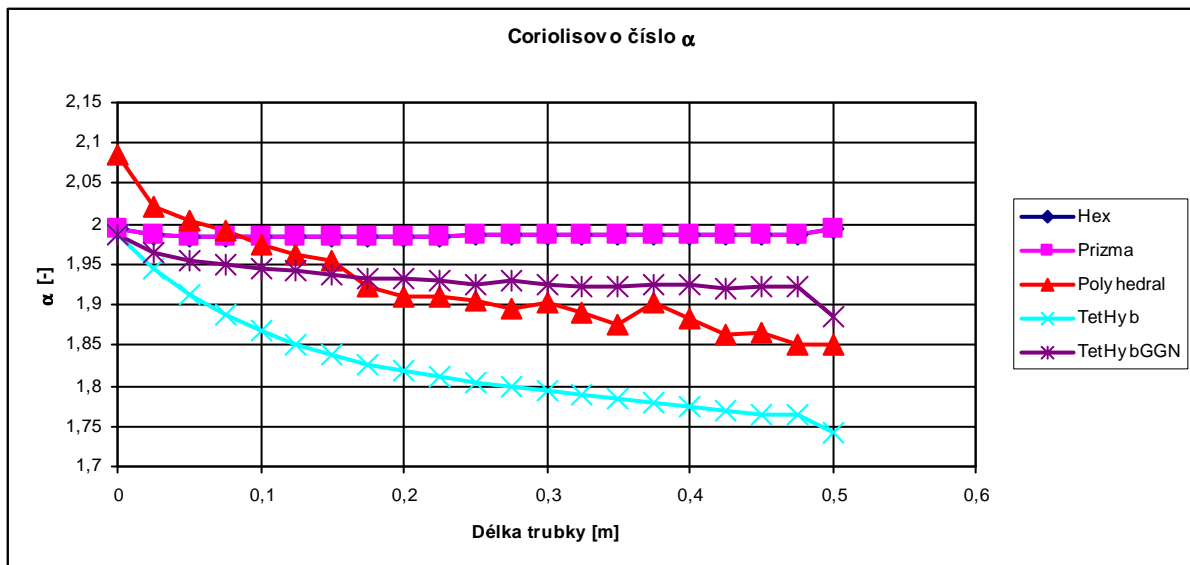
7.1 LAMINÁRNÍ PROUDĚNÍ

Vstupní profil pro výpočet laminárního proudění byl zvolen jako 68-násobek průměru D . V tomto profilu je axiální rychlost rovna 0,0408 m/s. Jednotlivé varianty byly počítány jako laminární proudění s využitím modelu řešení Green-Gaus Cell Based. Pro výpočet byla zvolena metoda SIMPLE (Semi-implicitní metoda pro řešení rovnic svázaných tlakem) a řešení pomocí First order upwind. Po zkonvergování výpočtu byl způsob řešení změněn na Second order upwind. Tet-hybridní sítě byly navíc počítány modelem Green-Gaus node based, který vykazoval lepší výsledky. Takto počítané varianty jsou označovány písmeny GGN. Sítě bez přechodů. Procentuální odchylky jsou vždy počítány k příkladu sítě bez změny elementů. Vyjadřují nárůst nebo pokles sledované hodnoty oproti výsledkům získaných z celistvé sítě.

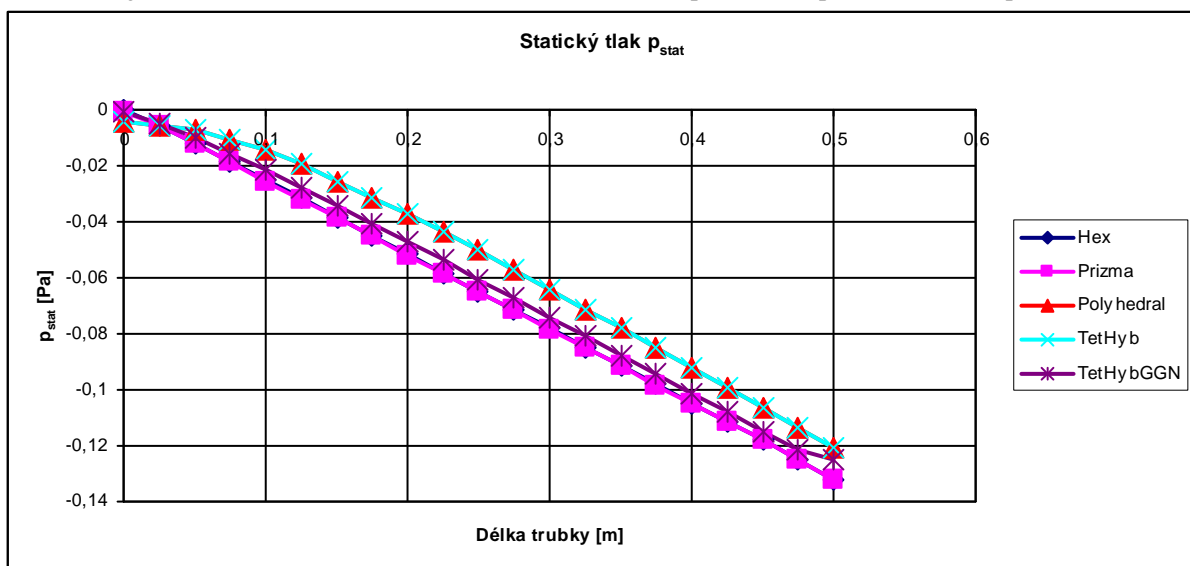
7.1.1 Sítě bez přechodů



Graf 7-1 Porovnání v_{ax} u sítí bez přechodů pro laminární proudění



Graf 7-2 Porovnání Coriolisova čísla u sítí bez přechodů pro laminární proudění

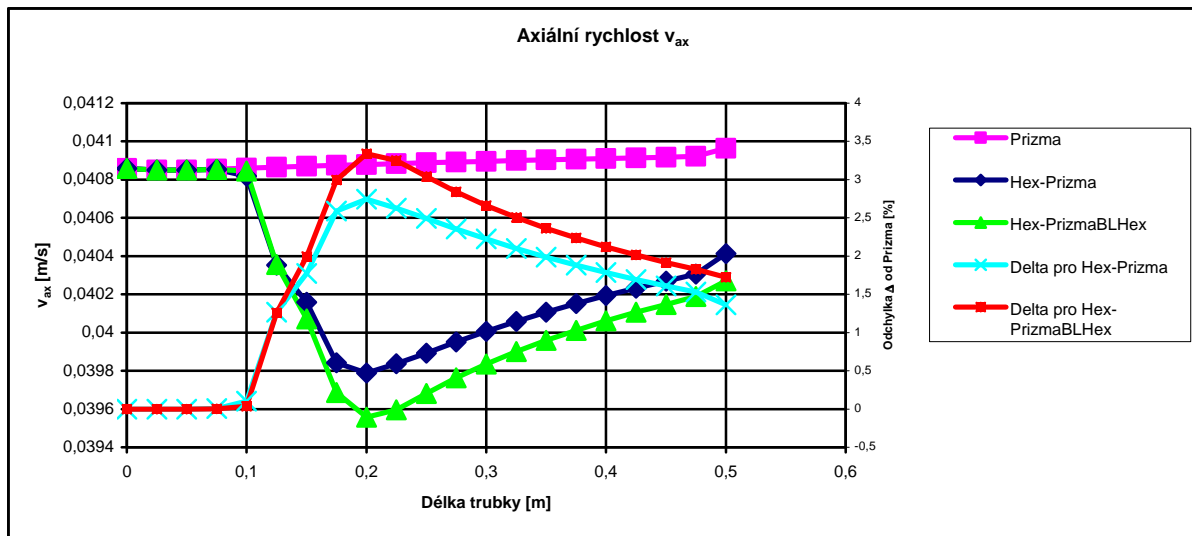


Graf 7-3 Porovnání p_{stat} u sítí bez přechodů pro laminární proudění

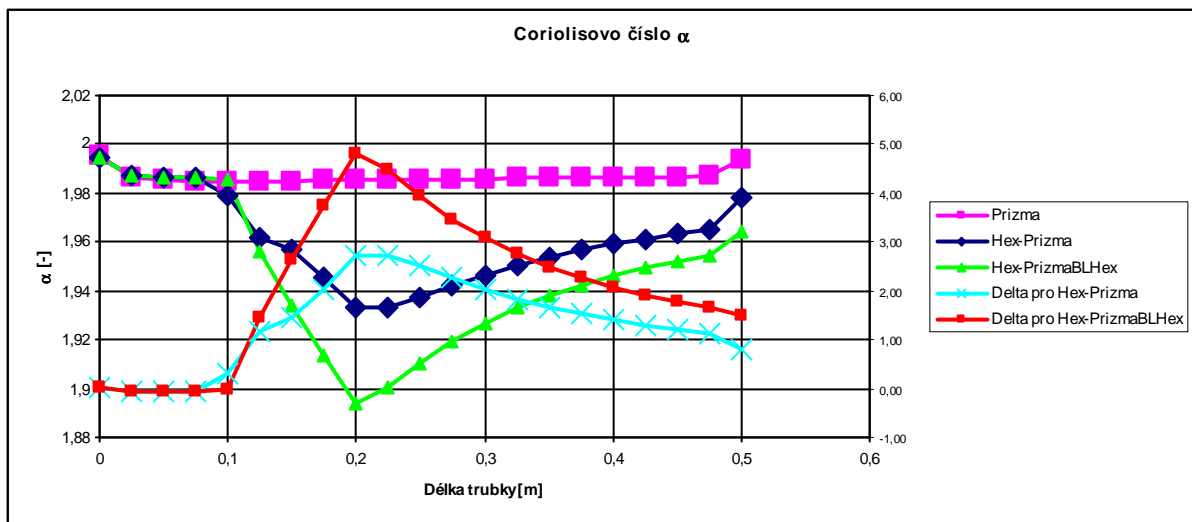
Hodnoty u hexagonální a prizmatické sítě se shodují. Tet-hybridní a polyhedrální síť vykazuje značné odchylky. Pokud vezmeme v úvahu rychlost, od které se odvíjí hodnoty tlaku a Coriolisova čísla, odchylka od jmenovité rychlosti zvoleného profilu 0,0408 m/s je v případě Tet-hybridní sítě je 8,6%. V případě hexagonální sítě a prizma se rychlost mírně zvyšuje, odchylka je 0,28%. Zvyšování může být dáno tím, že rychlostní profil nebyl ještě plně vyvinut pro konkrétní síť. Při použití výpočetního modelu GGN se průběh křivky rychlosti u Tet-hybridní značně zlepšil. Odchylka od hexagonální sítě, která vykazuje nejlepší výsledky a kvalitu je 3,03%.

V předchozích grafech bylo uvedeno, jaké je chování prvkování beze změny prvků za stejných podmínek. Nyní bude ukázáno porovnání absolutních hodnot rychlostí, tlaků a Coriolisova čísla pro různé typy přechodů. Graf bude obsahovat křivky vždy pro jeden typ přechodu v porovnání se sítí bez přechodu se stejným typem prvků.

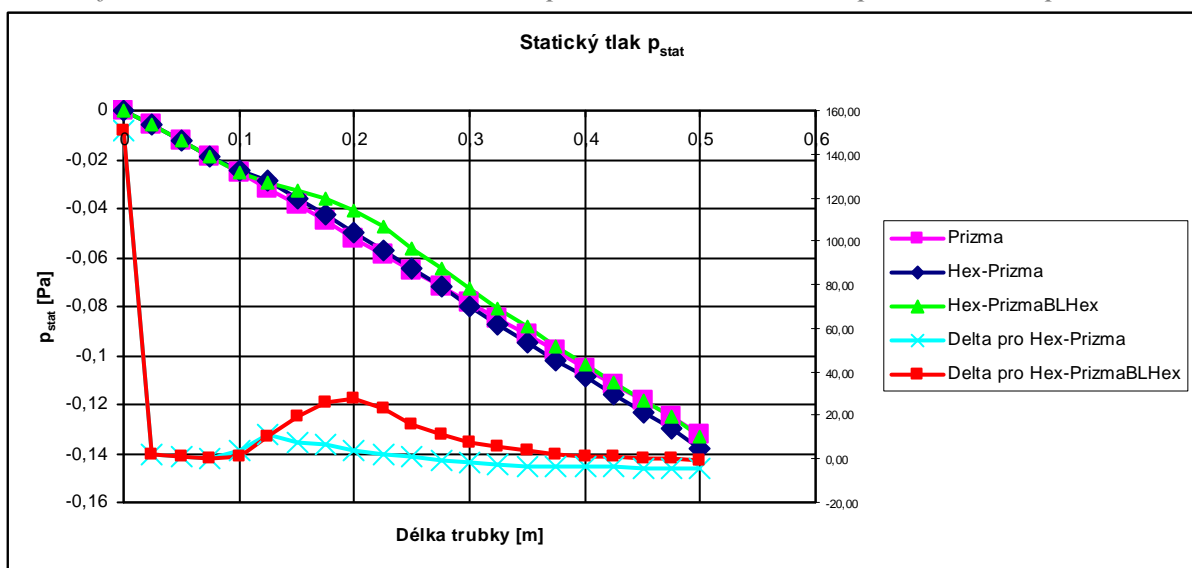
7.1.2 Přechod Hex - Prizma



Graf 7-4 Porovnání v_{ax} při změně Hex - Prizma pro laminární proudění



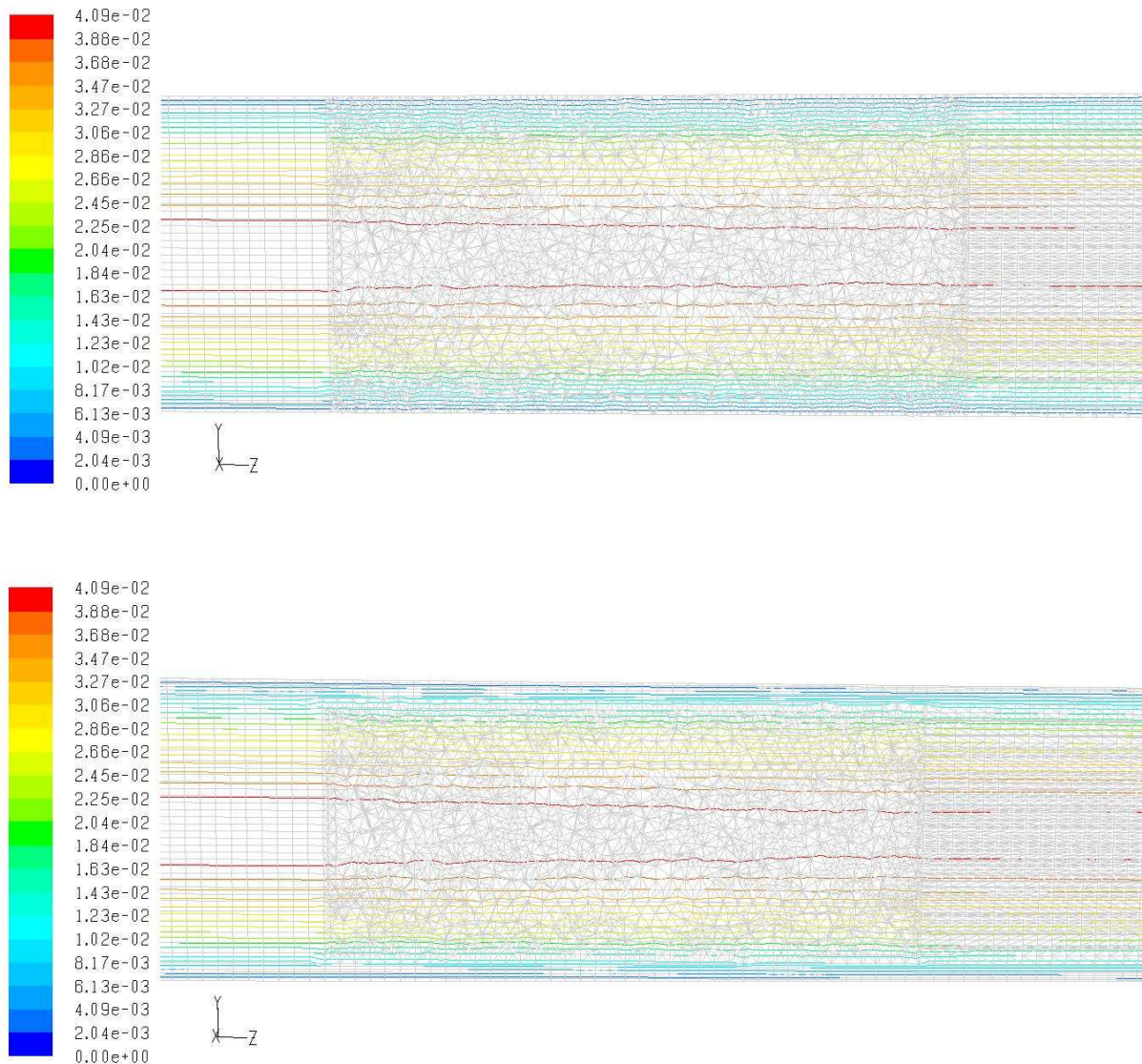
Graf 7-5 Porovnání Coriolisova čísla při změně Hex - Prizma pro laminární proudění



Graf 7-6 Porovnání p_{stat} při změně Hex - Prizma pro laminární proudění

Místo přechodu je na kótě 0,2m od počátku trubky. Začíná zde Tet-hybridní a na ní po 0,1m navazuje prizmatická síť. Z grafů můžeme pozorovat, že oblast ovlivněná přechodem začíná už v místě 0,075m. Poté se začíná odchylna od předpočítané celistvé sítě zvětšovat až do místa přechodu (0,2m), kde nabývá své maximum. Poté se odchylna zmenšuje a snaží se dosáhnout původních hodnot. Nejvýraznější je odchylna u tlaku, kde maximálně dosahuje až 150%. V místě přechodu se pak pohybuje mezi 20 až 30%. Nejvyšší hodnotou rozdílu u Coriolisova čísla je hodnota 4,3 %, u axiální rychlosti je to pak 3,3%. Při použití mezní vrstvy z šestistěnných prvků se difference pohybuje pod 3%, což se dá zanedbat.

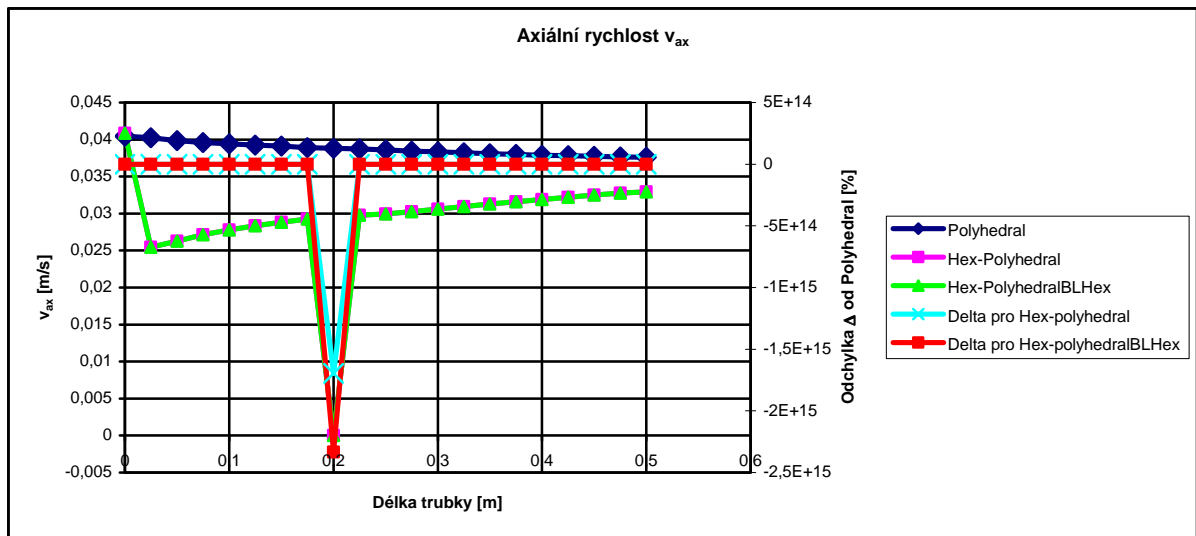
Na obr. 7-1 je ukázáno, jak se chová rychlostní pole v místě přechodu.



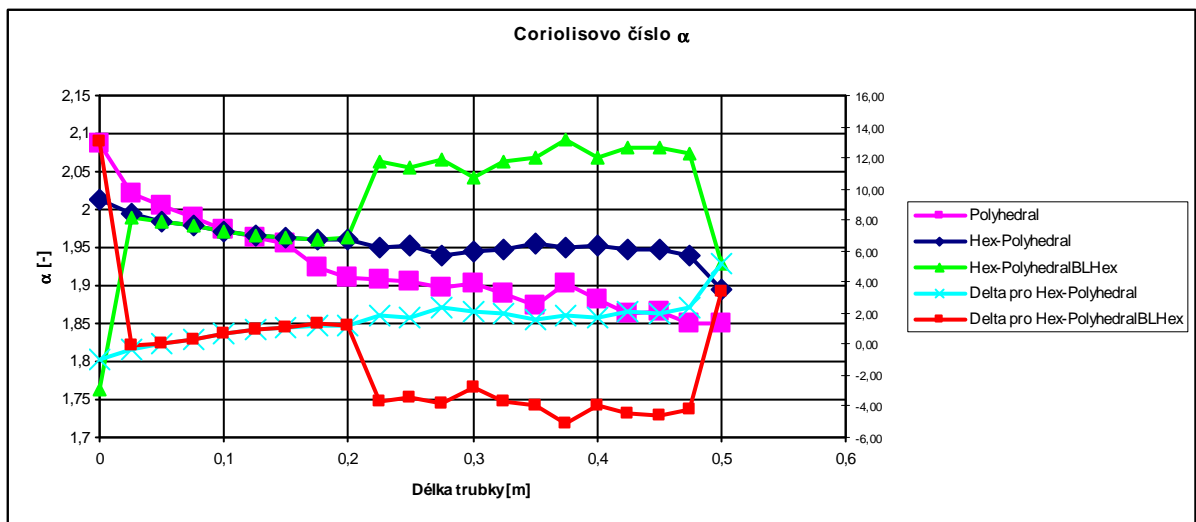
Obr. 7-1 Kontury rychlosti změny Hex – Prizma pro laminární proudění

Z obr. 7-1 je vidět stavba sítě v místě přechodu. Nejdříve hexagonální síť, pak Tet-hybridní a nakonec prizmatická. Barevně jsou naznačeny kontury rychlosti. Barvy v legendě obrázků jsou totožné. Rychlost v oblasti střední sítě nemá ucelenou strukturu.

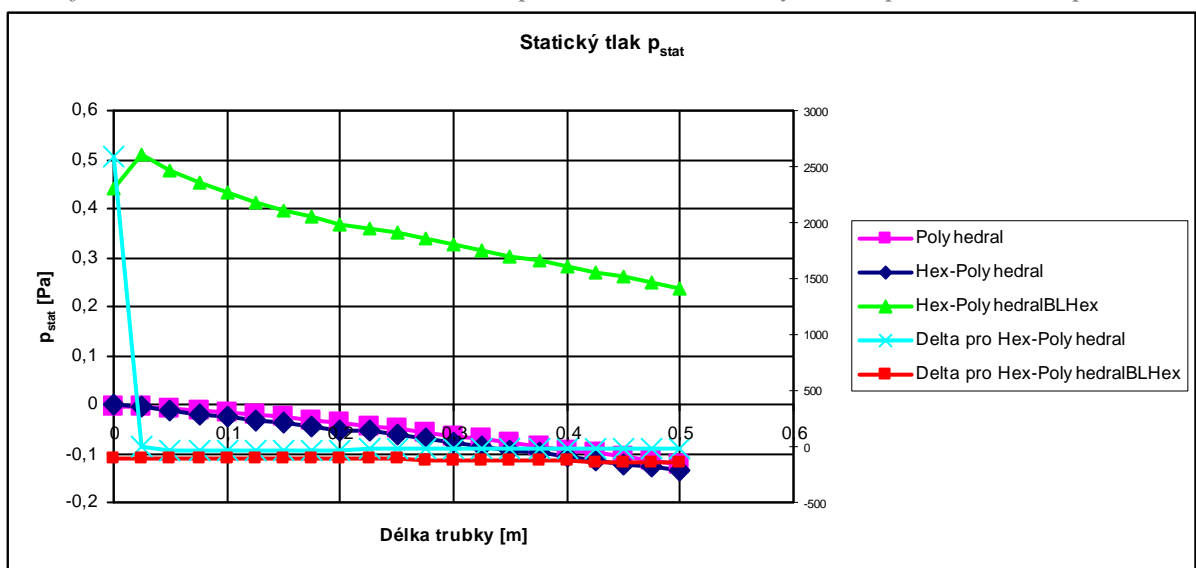
7.1.3 Přechod Hex-Polyhedral



Graf 7-7 Porovnání v_{ax} při změně Hex – Polyhedral pro laminární proudění



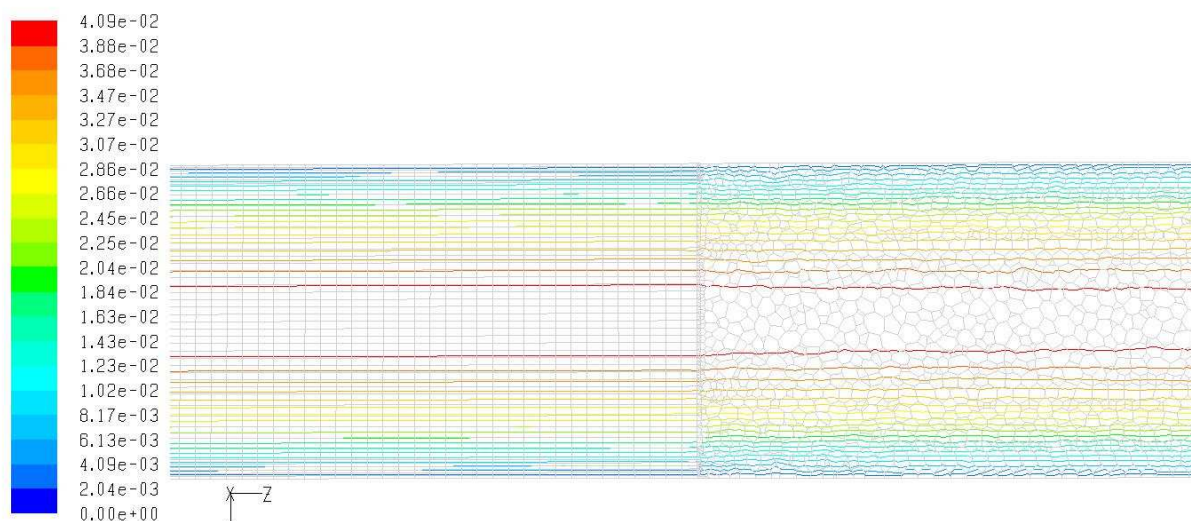
Graf 7-8 Porovnání Coriolisova čísla při změně Hex – Polyhedral pro laminární proudění



Graf 7-9 Porovnání p_{stat} při změně Hex – Polyhedral pro laminární proudění

Pokud zvážíme prvkování mezní vrstvy, tak dostáváme horší výsledky u varianty s hexagonální mezní vrstvou, než u varianty bez mezní vrstvy. Při generování polyhedrální sítě se u mezní vrstvy vytvořily malé prvky, které snížili kvalitu výpočtu. Vypočtenými hodnotami se k čistě polyhedrální trubce nejvíce blíží varianta přechodu bez mezní vrstvy. V grafu závislosti axiální rychlosti na délce trubky si můžeme přesně v místě změny sítě všimnout ustřelení hodnoty axiální rychlosti. Graf, až na tuto hodnotu má tvar přímky, takže lze předpokládat, jakou hodnotu doplnit. Takový výkyv hodnoty může být způsobem právě změnou síťování. Podobný jev se vyskytl při sledování rozvoje laminární proudění v dlouhé trubce. Rozdíl byl v tom, že tato nesourodá hodnota byla u tlaku.

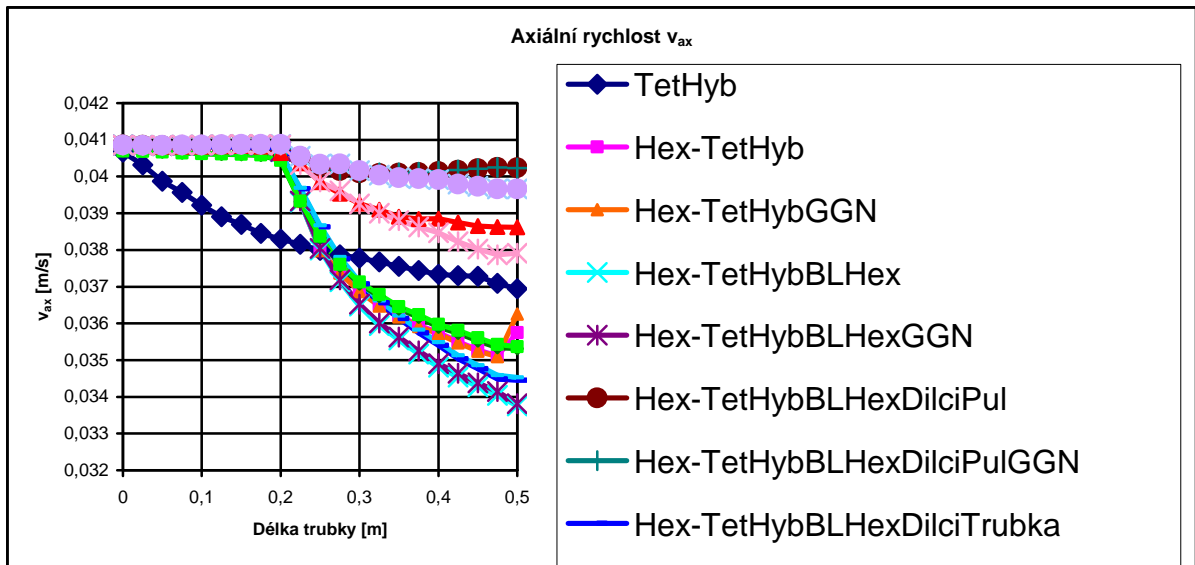
Odchytky v hodnotách axiální rychlosti u varianty bez mezní vrstvy se pohybují kolem 4%. Odchytky Coriolisova čísla jsou do 3%. Velkou diferencí opět mají hodnoty tlaku, kde je rozdíl až 40%. Varianta zahrnující vybudovanou mezní vrstvu má přesnost celkově horší. Rychlost se liší až 50%, Coriolis 5% a tlak až 140%.



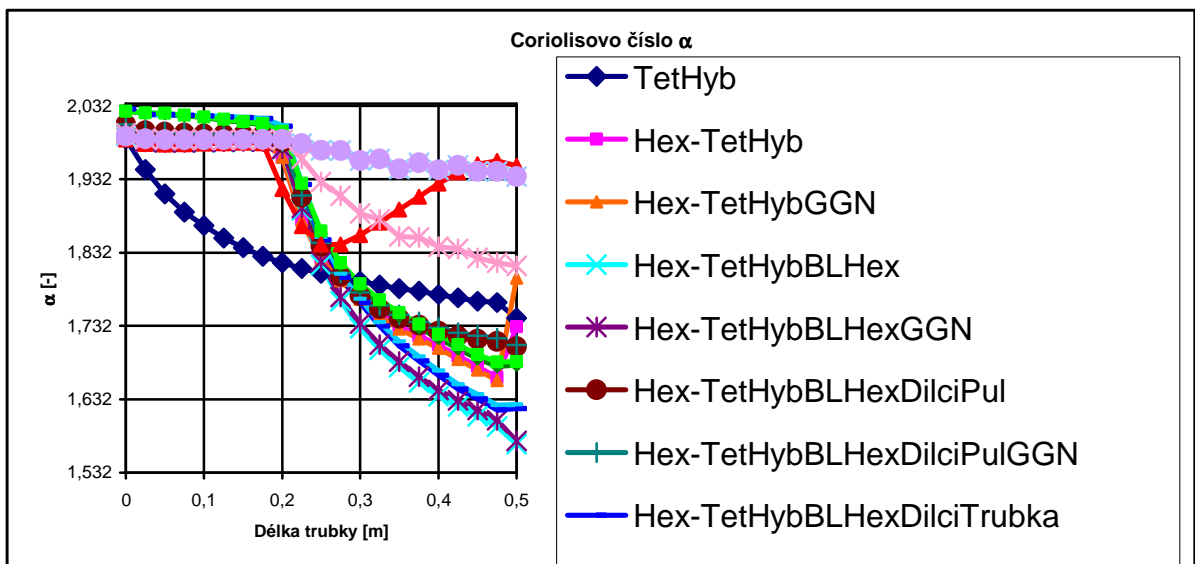
Obr. 7-2 Kontury rychlosti změny Hex – Polyhedral pro laminární proudění

7.1.4 Přechod Hex-Tet-Hyb

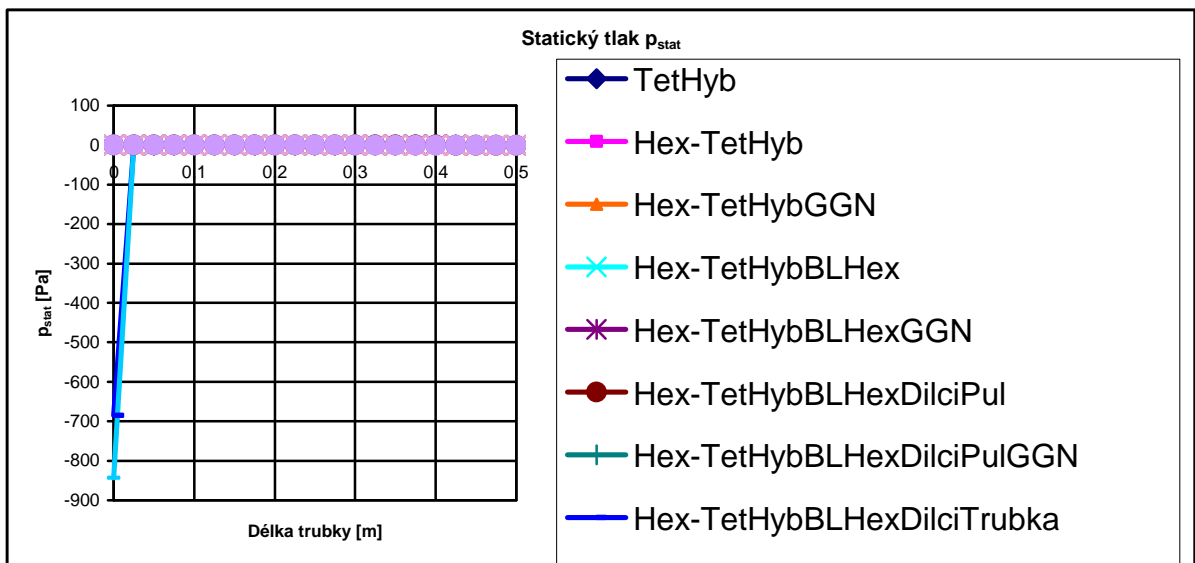
Změna hexagonální sítě na tet-hybridní obsahuje nejvíce konstrukčních variant, protože při její stavbě docházelo k největším problémům s kvalitou prvků. Mimo dvou základních verzí sítě obsahující nebo neobsahující mezní vrstvu z šestistěnných prvků byly vyzkoušeny možnosti zhuštění sítě po délce a zjemnění v oblasti vnitřního zaobleného čtverce. Kvalita se pomocí těchto změn zlepšila. V grafech si ukážeme výsledky sledovaných veličin. Jelikož variant řešení je hodně, tak odchytky základního řešení – trubky beze změny prvkování, budou uvedeny zvlášť.



Graf 7-10 Porovnání v_{ax} při změně Hex – TetHybrid pro laminární proudění



Graf 7-11 Porovnání Coriolisova čísla při změně Hex – TetHybrid pro laminární proudění



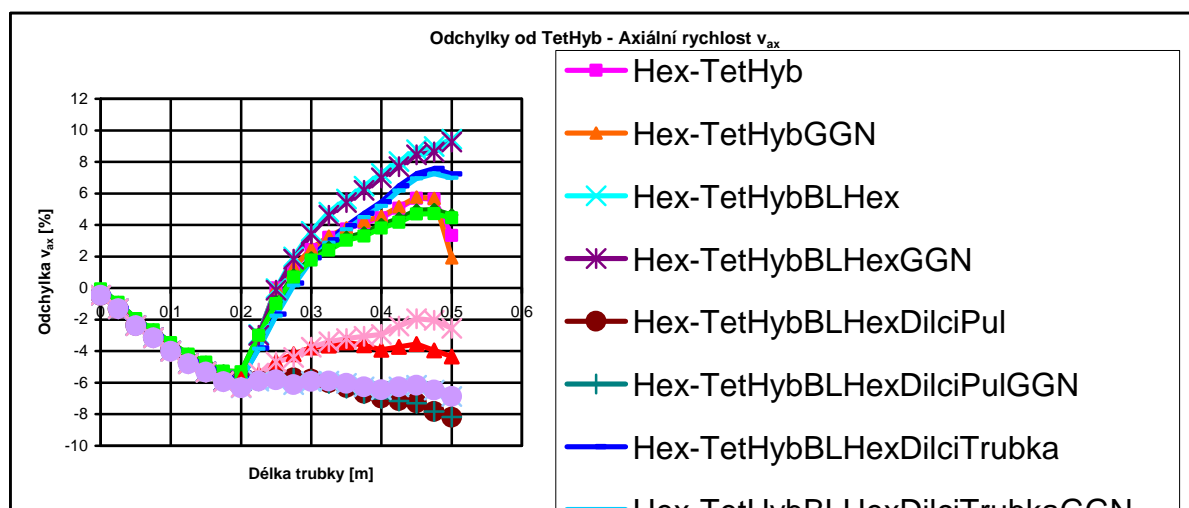
Graf 7-12 Porovnání p_{stat} při změně Hex – TetHybrid pro laminární proudění

Předchozí grafy ukazují pozorované veličiny v závislosti na délce trubky. V každém grafu je jako vzor trubka bez změny prvků. V tomto případě je vzor označen jako TetHyb – modrá křivka. Tvar této křivky by měl znázorňovat konstantní hodnotu rychlosti i Coriolisova čísla. Zde tomu ale tak není. Hodnoty klesají již od počátku sledované oblasti. Ve všech třech předchozích grafech je očekávaný průběh křivek pouze do délky 0,2m od počátku trubky (vyplněno hexagonální sítí), kde začíná přechod v TetHybridní síť. Od tohoto místa je prudký pád velikosti rychlosti i Coriolisova čísla. Průběh křivek tlaku je zkruslen vysokou odchylkou statického tlaku v případě varianty dílčího objemu s poloviční trubkou místo rohu v zaobleném vnitřním čtverci.

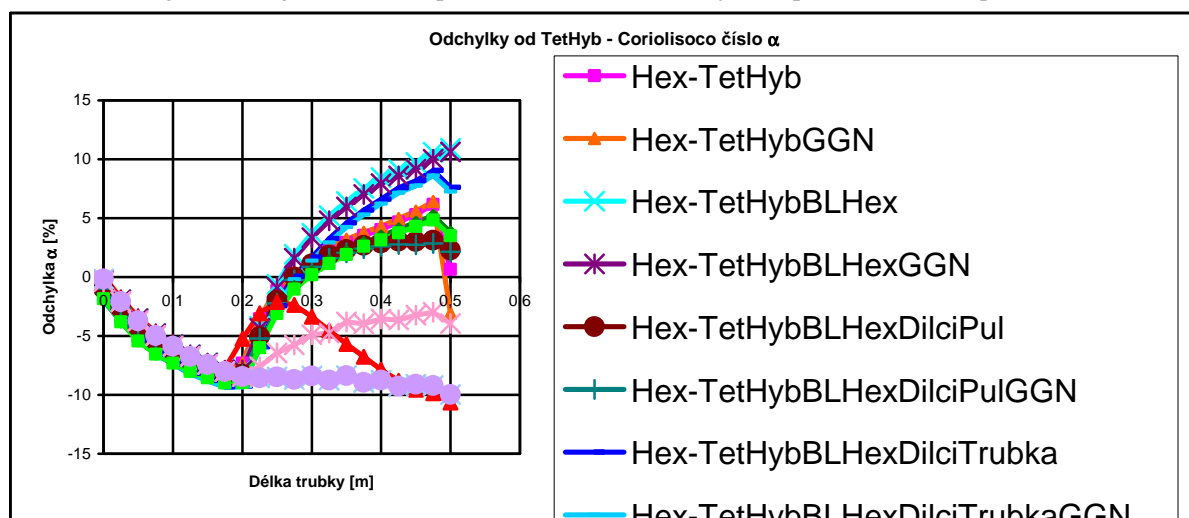
Jako nejlepší možnost nasíťování trubky vyšla varianta se změnou hustoty sítě po délce trubky. Má nejblíže k očekávanému konstantnímu průběhu rychlosti i Coriolisova čísla. Na druhou stranu má zase jednu z nejvyšších odchylek od předpočítané varianty s TetHybridní sítí.

Vliv změny výpočetního modelu z Green-Gaus Cell Based na Green-Gaus Node Based není tak výrazný jako u předchozích variant. Část takto spočítaných řešení se blíží vzoru a část se blíží předpokládaným hodnotám konstantní rychlosti a tlaku. Pomocí tohoto způsobu výpočtu byla vyřešena nejlepší varianta.

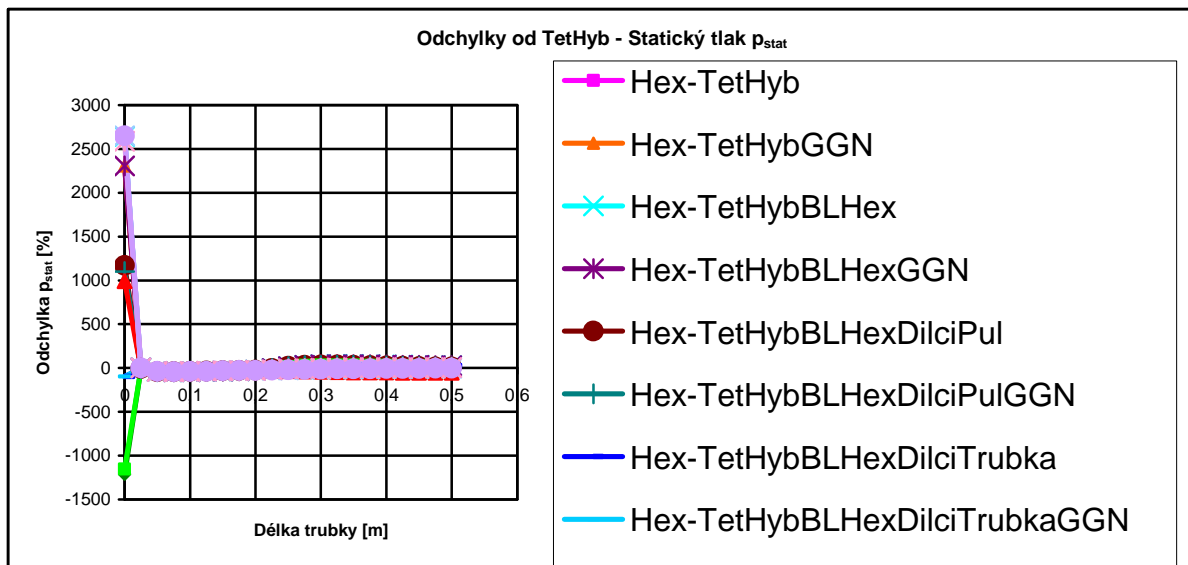
Dál budou následovat grafy s procentuálním vyjádřením odchylek.



Graf 7-13 Diference v_{ax} při změně Hex – TetHybrid pro laminární proudění



Graf 7-14 Diference Coriolisova čísla při změně Hex – TetHybrid pro laminární proudění



Graf 7-15 Diference p_{stat} při změně Hex – TetHybrid pro laminární proudění

Procentuální hodnoty odchylek od vzoru se pohybují v rozmezí $\pm 10\%$. Nejmenší hodnotu odchylky osové rychlosti a statického tlaku má varianta se změnou hustoty sítě po délce spočítaná metodou Green-Gaus Cell Based. Naopak varianta změny hustoty sítě blíží se nejvíce realitě je spočítána metodou Green-Gaus Node Based a má odchylku $6 \pm 8\%$ od vzoru. Největší chyby je dosaženo opět u statického tlaku, kde jsou vykresleny hodnoty mimo předpokládaný průběh.

Na posledních 50mm délky trubky je vidět vliv okrajové výstupní podmínky. Křivky hodnot sledovaných veličin vždy změni svoji směrnici.

7.2 TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ

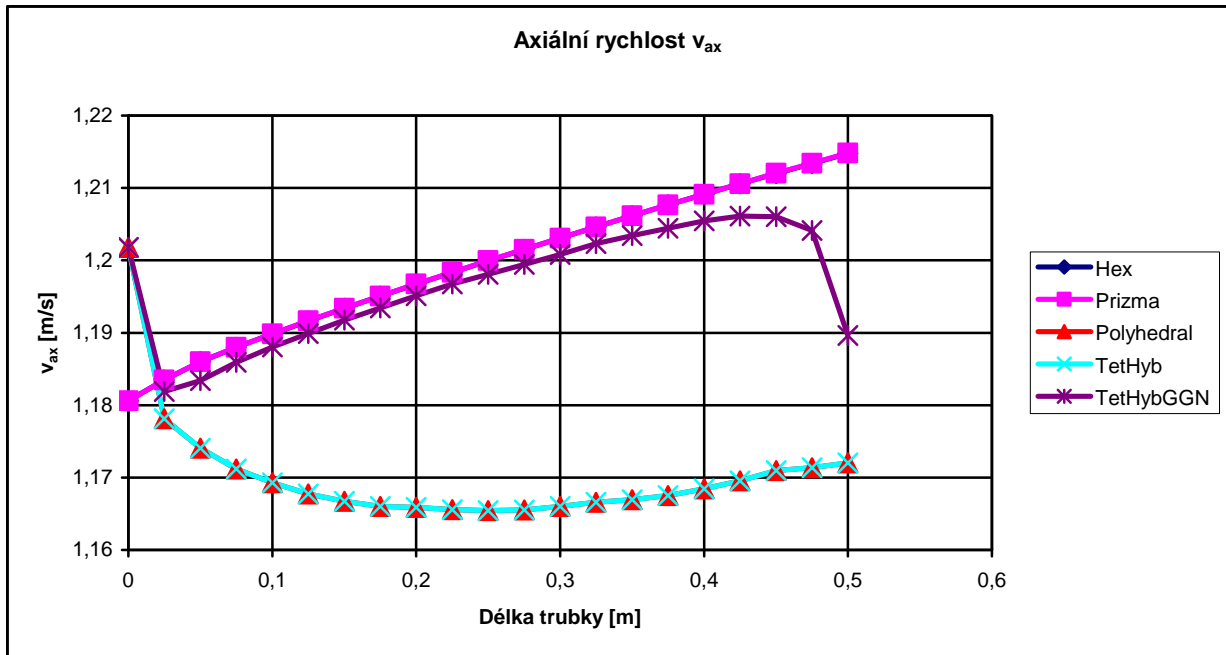
Vyhodnocení turbulentního proudění bude probíhat obdobně jako u laminárního. U každé varianty změny prvků a pro každou vstupní rychlost (1,2,3 m/s) budou ukázány grafy axiální rychlosti, Coriolisova čísla, statického tlaku. Grafy budou také obsahovat odchylku sledované veličiny od přepočítaného vzoru bez přechodu.

Postup výpočtu je obdobný s laminárním prouděním. Nejprve se příklad spočítal schématem First Order Upwind. Po zkonvergování bylo zadáno početní schéma Second Order Upwind. Realizovala se také kombinace výpočetních modelů Green-Gaus Cell Based a Green-Gaus Node Based.

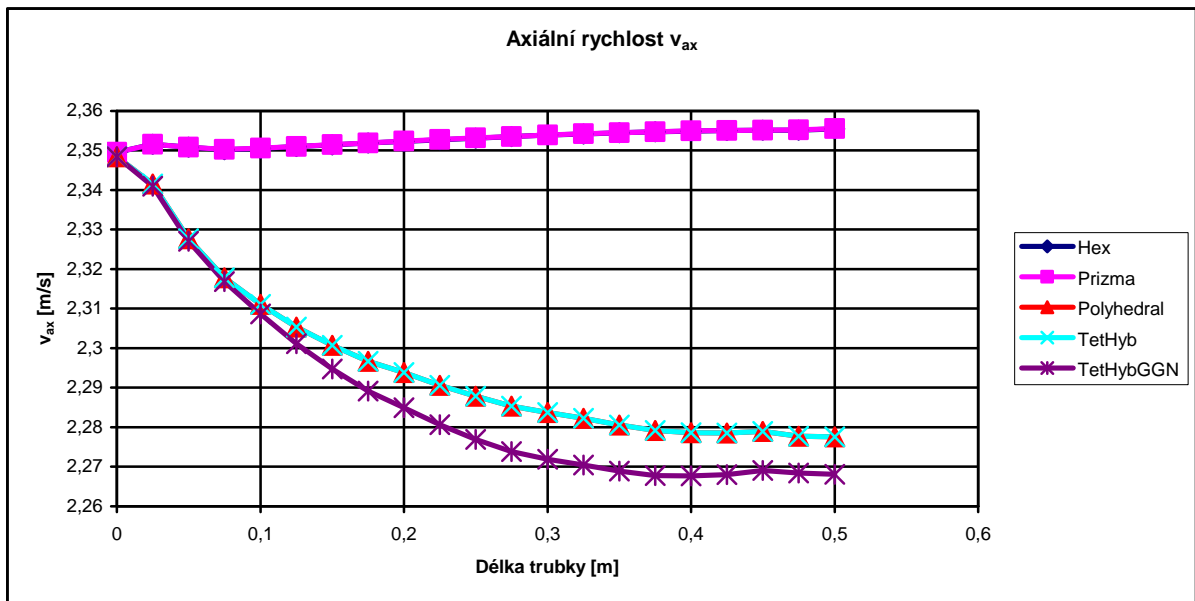
Sítě použité při výpočtech s turbulentním prouděním jsou shodné jako při řešení s laminárním prouděním.

Na začátku si ukážeme, jak se budou shodovat či lišit hodnoty sledovaných veličin pro trubku beze změny typu sítě. Tyto výsledky budou použity jako vzorové pro porovnávání, když se prvkování změní. Vždy bude pod sebou uvedena stejná sledovaná veličina (rychlost, tlak a Coriolisovo číslo) pro různé rychlosti.

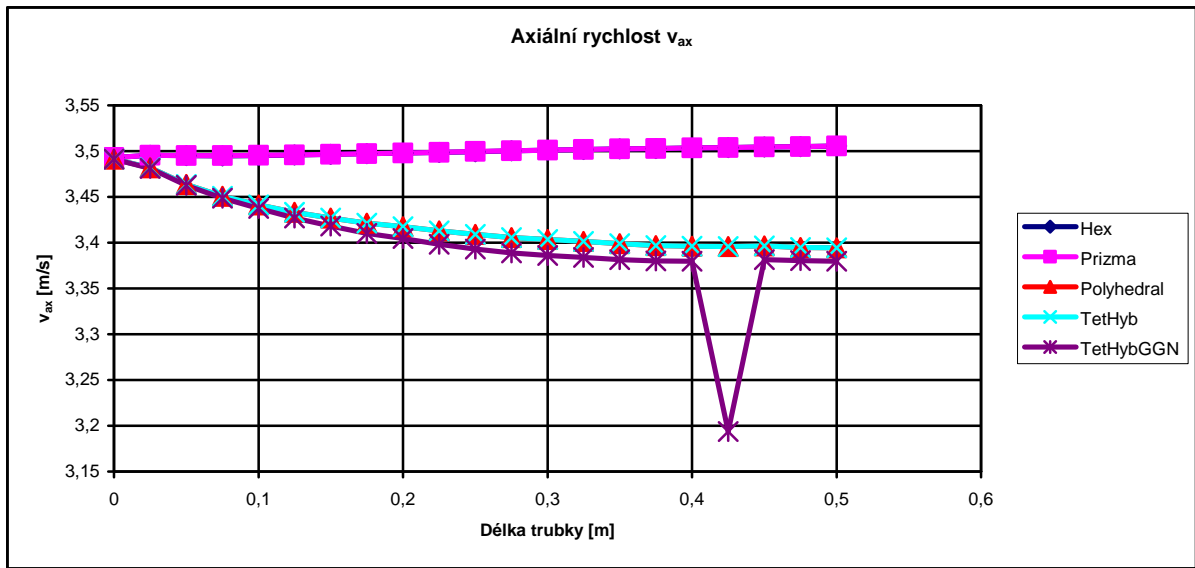
7.2.1 Sítě bez přechodů



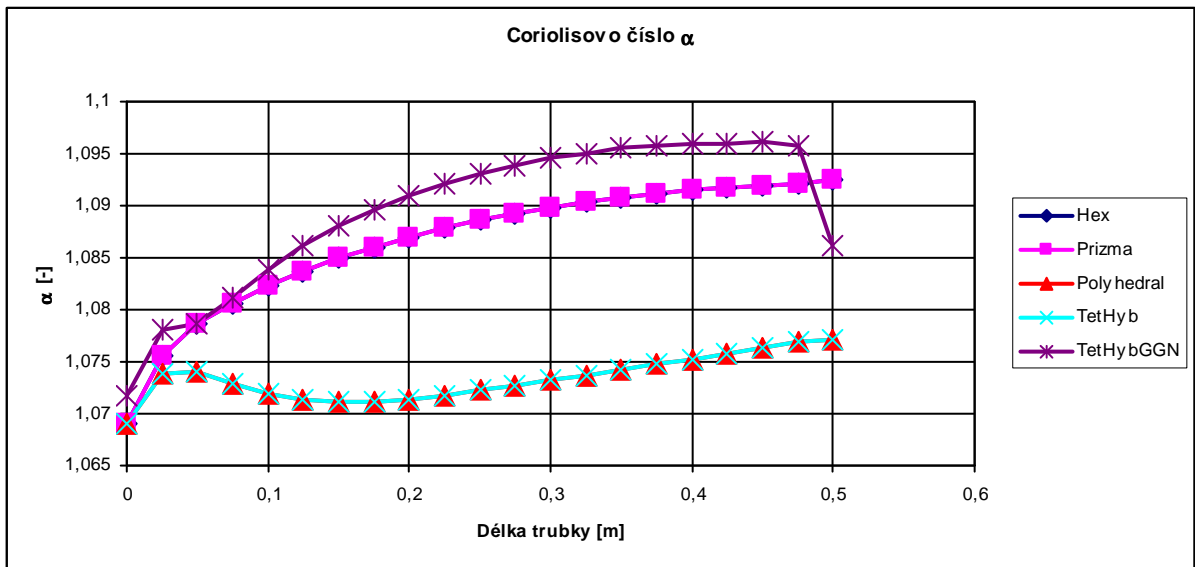
Graf 7-16 Porovnání v_{ax} u sítě bez přechodů pro turbulentní proudění a 1 m/s



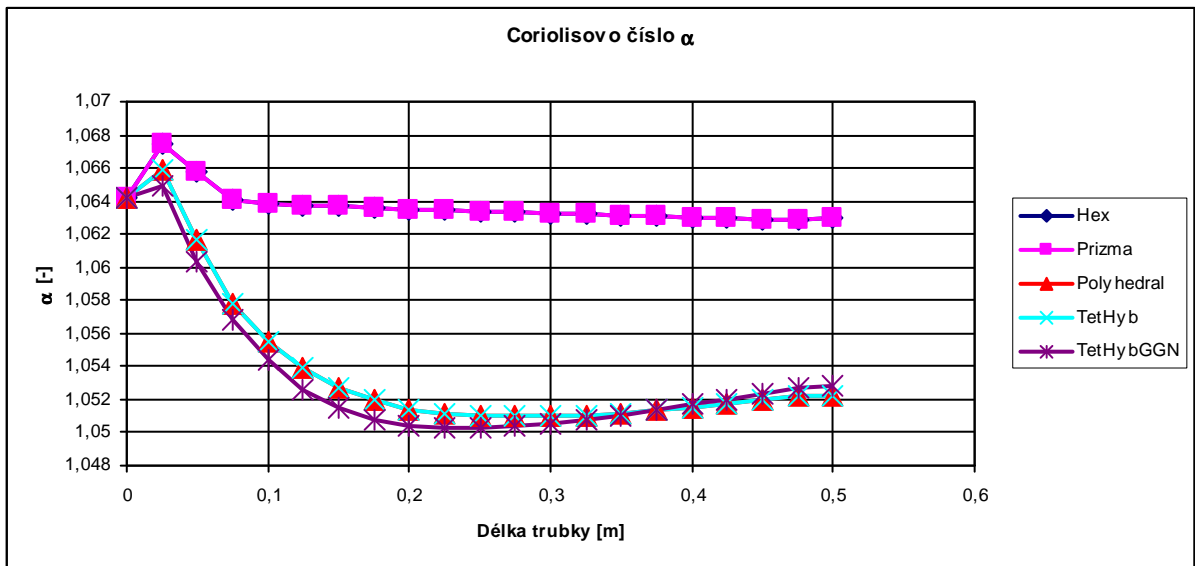
Graf 7-17 Porovnání v_{ax} u sítě bez přechodů pro turbulentní proudění a 2 m/s



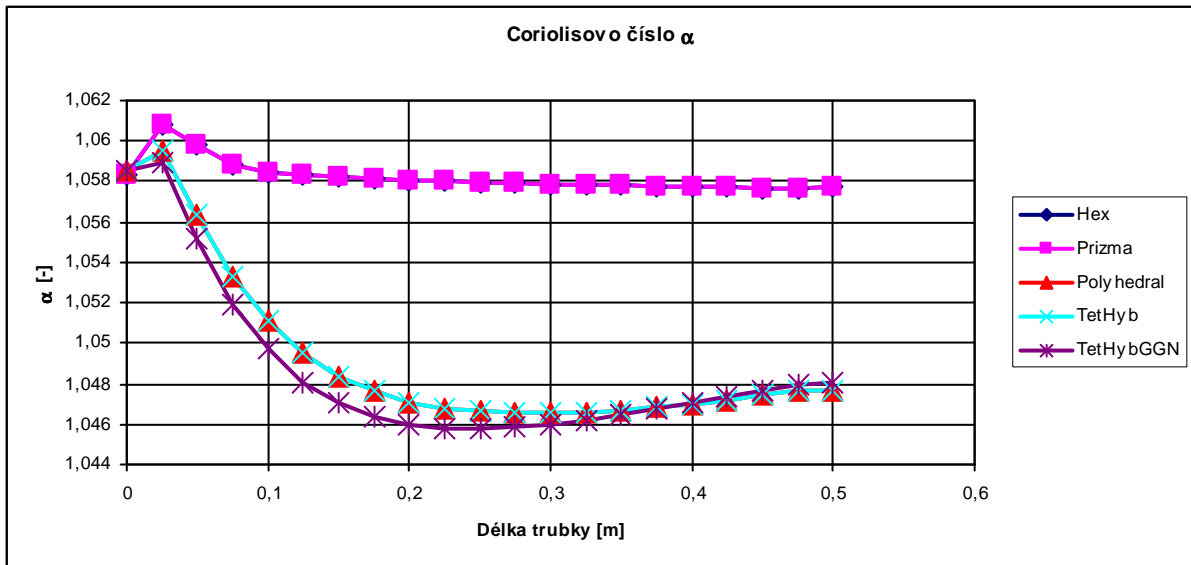
Graf 7-18 Porovnání v_{ax} u sítí bez přechodů pro turbulentní proudění a 3 m/s



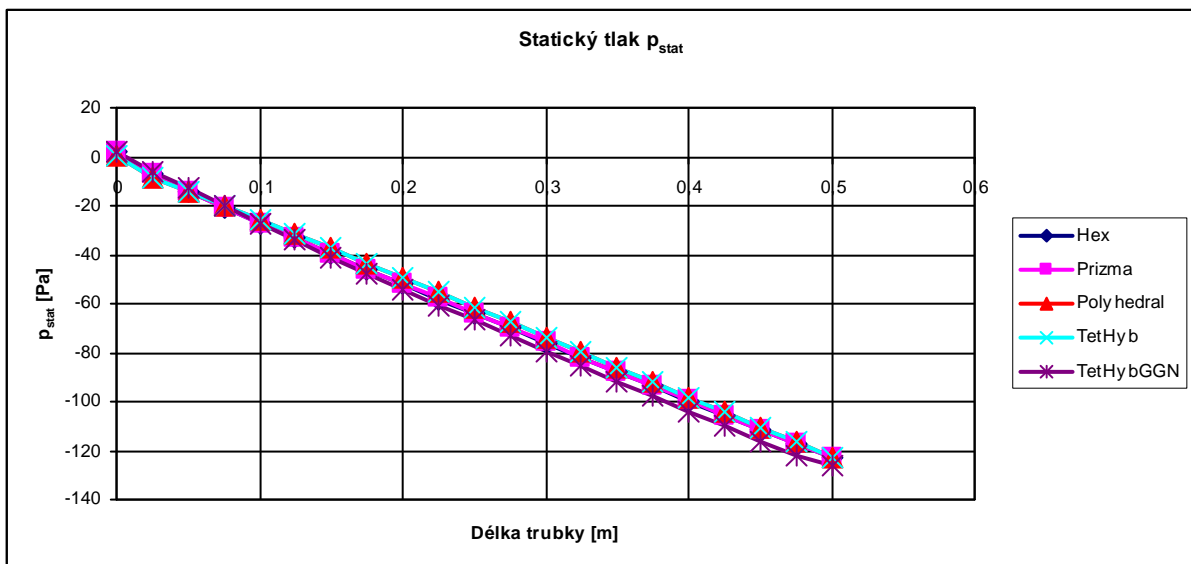
Graf 7-19 Porovnání Coriolisova čísla u sítí bez přechodů pro turbulentní proudění a 1 m/s



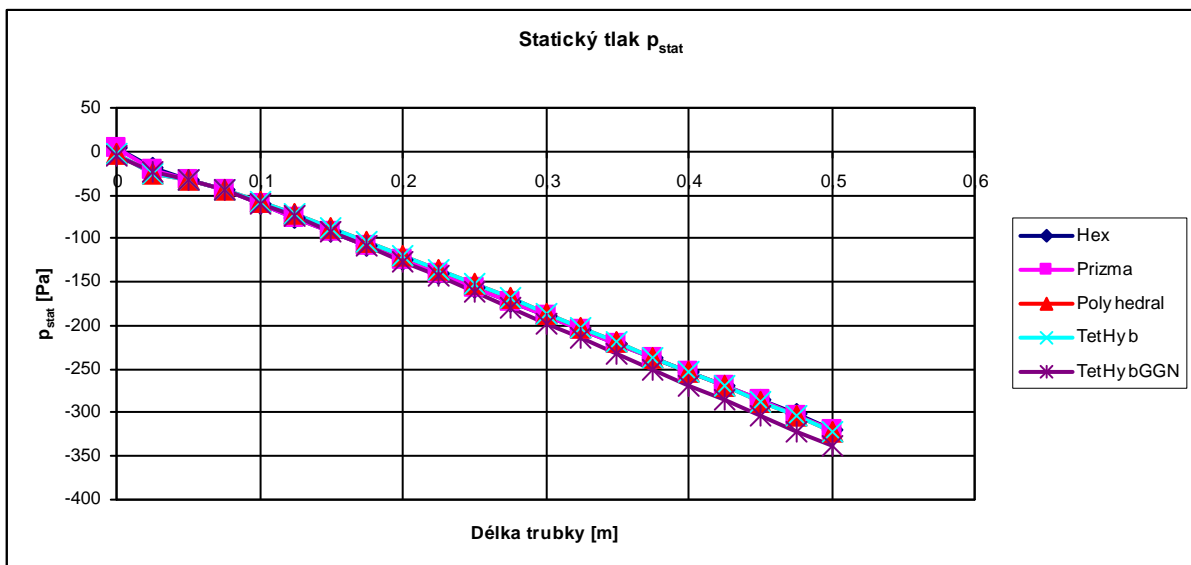
Graf 7-19 Porovnání Coriolisova čísla u sítí bez přechodů pro turbulentní proudění a 2 m/s



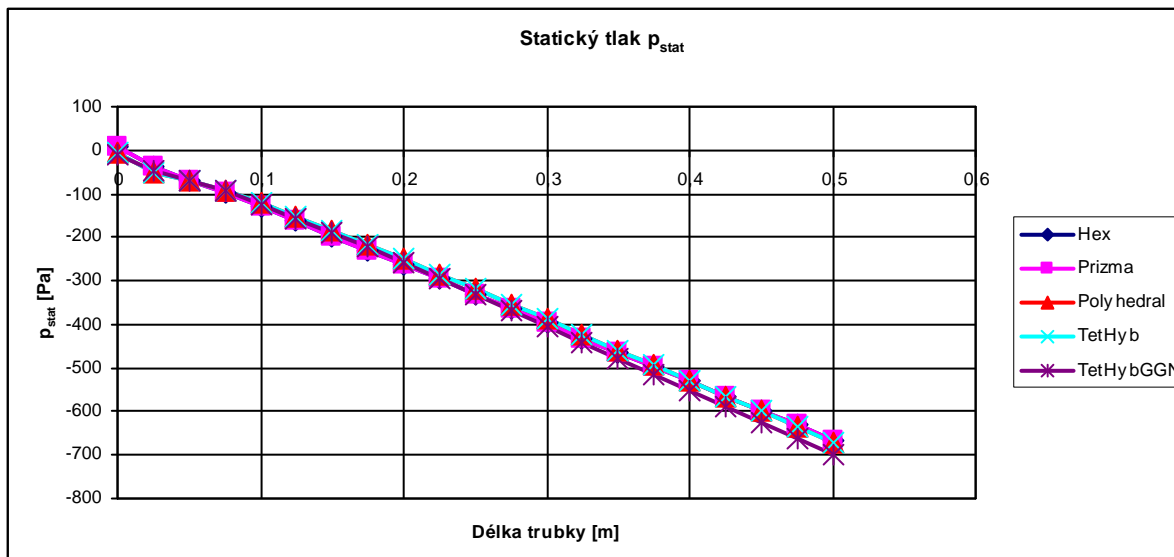
Graf 7-20 Porovnání Coriolisova čísla α u sítí bez přechodů pro turbulentní proudění a 3 m/s



Graf 7-21 Porovnání p_{stat} u sítí bez přechodů pro turbulentní proudění a 1 m/s



Graf 7-22 Porovnání p_{stat} u sítí bez přechodů pro turbulentní proudění a 2 m/s

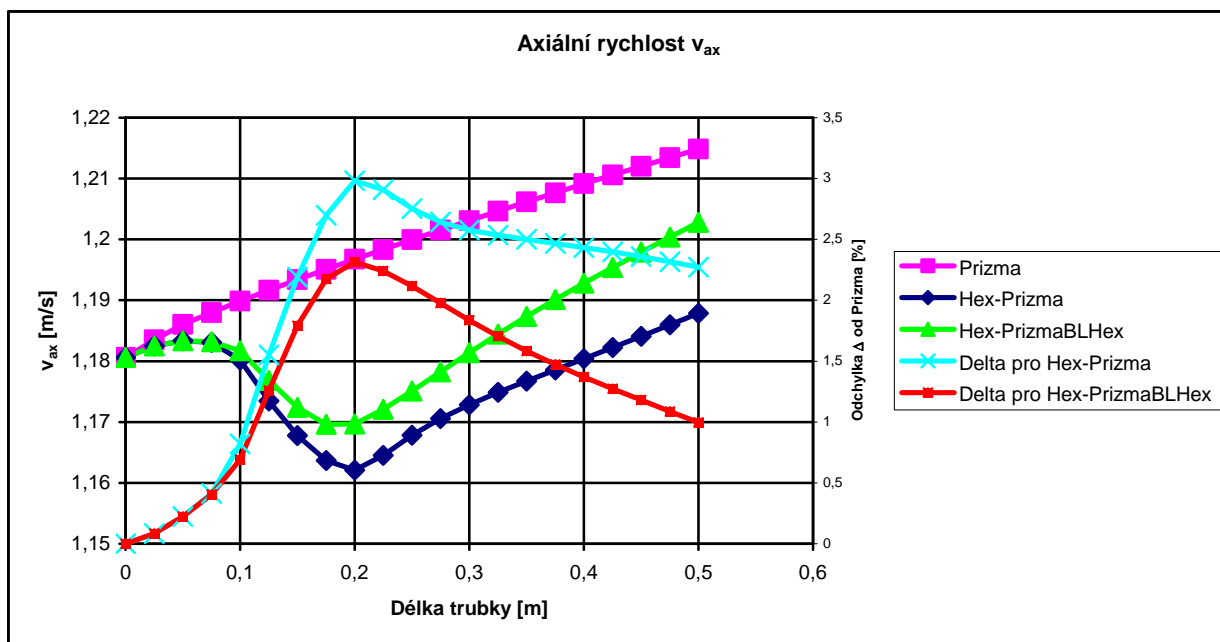


Graf 7-23 Porovnání p_{stat} u sítí bez přechodů pro turbulentní proudění a 3 m/s

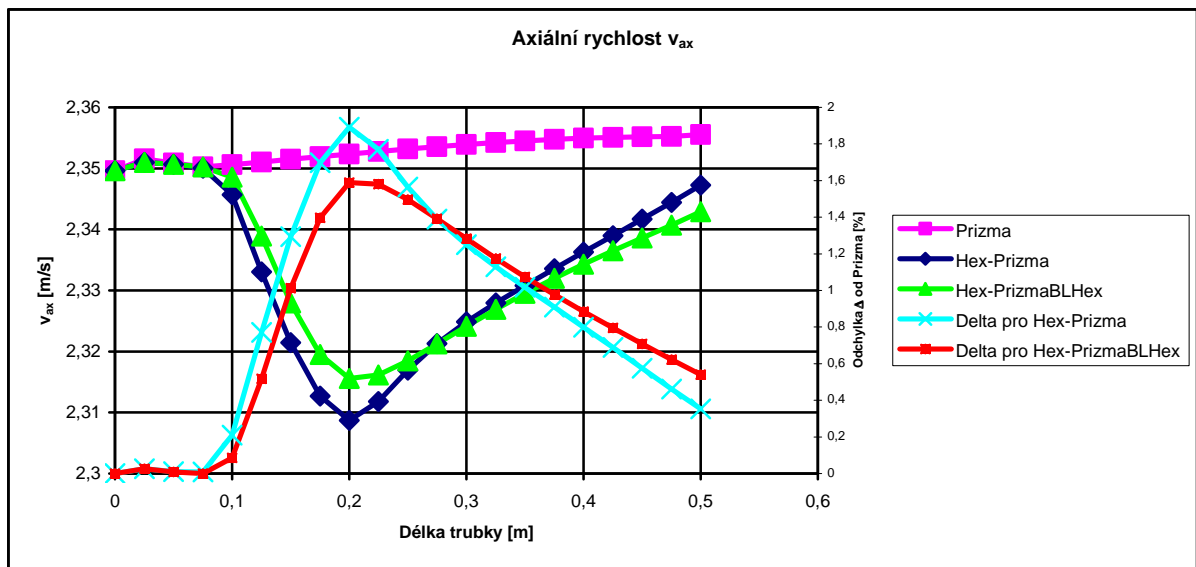
Vyjma rychlosti 1 m/s dostáváme předpokládaný výsledek hodnot v grafu. Rychlosti 2 a 3 m/s mají stejný průběh, pouze se liší absolutní hodnoty vykreslených veličin. Na dalších možnostech se zjistí, zda bude docházet ke stejnému rozdílu mezi rychlostí 1m/s a rychlostmi 2 a 3 m/s. Nejlepšími výsledky podobně jako v předešlém laminárním proudění disponuje hexagonální a prizmatická síť. Tvar křivek odpovídá přímce. Varianty s TetHybridní sítí mají podobné výsledky. Výsledková odchylka těchto sítí od hexagonální a prizmatické je u axiální rychlosti do 3%, u Coriolisova čísla do 2 %. Hodnoty statického tlaku jsou u všech sítí prakticky totožné.

Opět se objevila na přímé trubce nesourodá hodnota axiální rychlosti pro vstupní rychlostní profil 3m/s. Vyskytla se u TetHybridní sítě spočítané metodou Green-Gaus Node Based, přičemž u stejné varianty spočítané přes Green-Gaus Cell Based není.

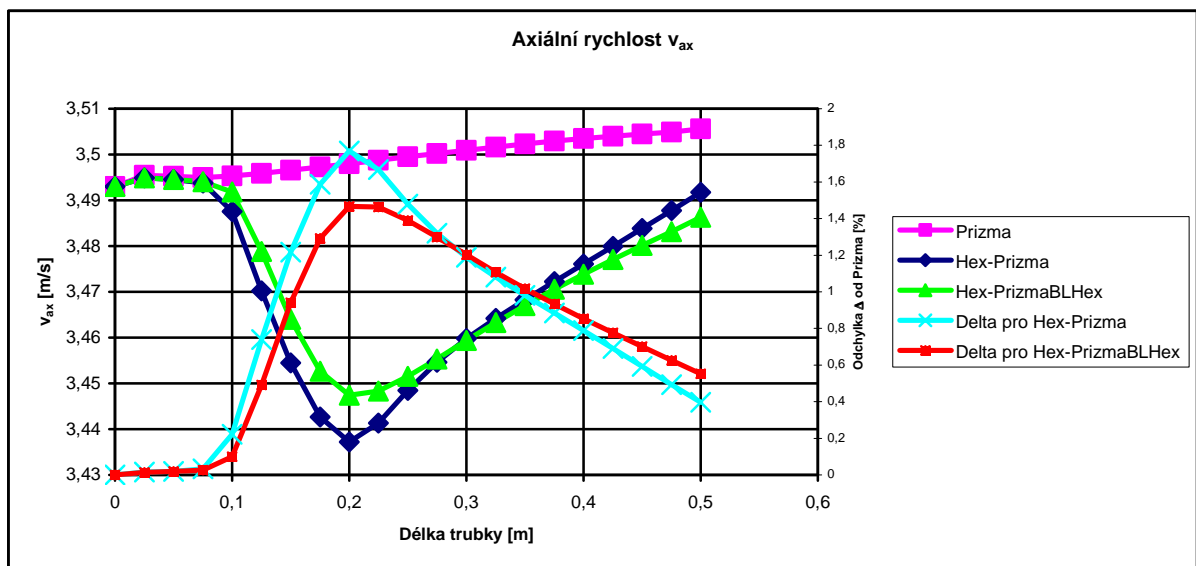
7.2.2 Přechod Hex - Prizma



Graf 7-24 Porovnání v_{ax} při změně Hex-Prizma pro turbulentní proudění a 1 m/s

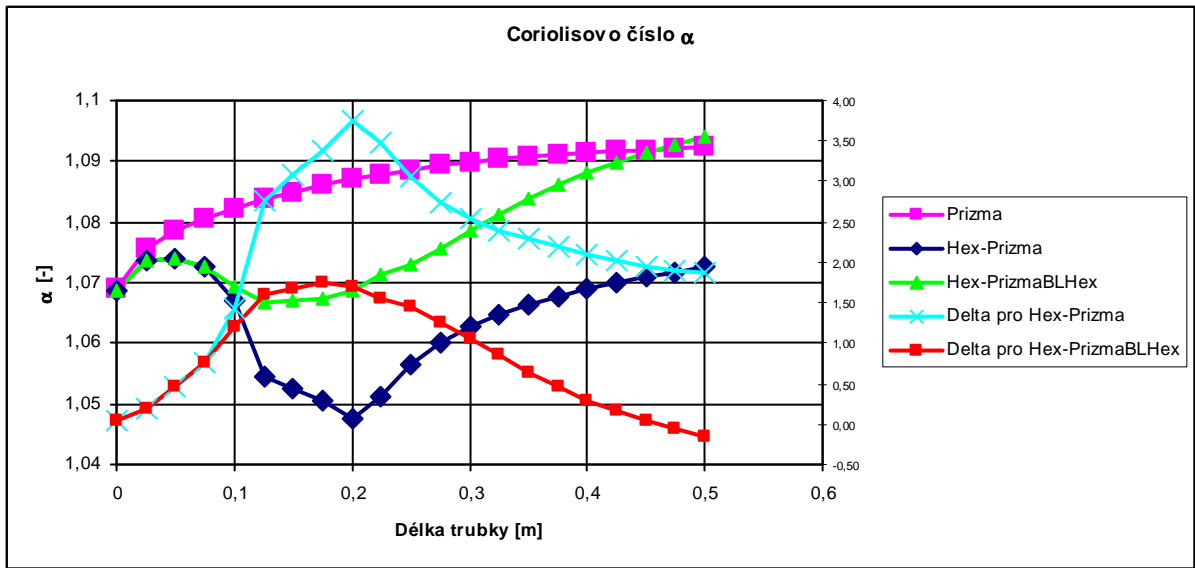


Graf 7-25 Porovnání v_{ax} při změně Hex-Prizma pro turbulentní proudění a 2 m/s

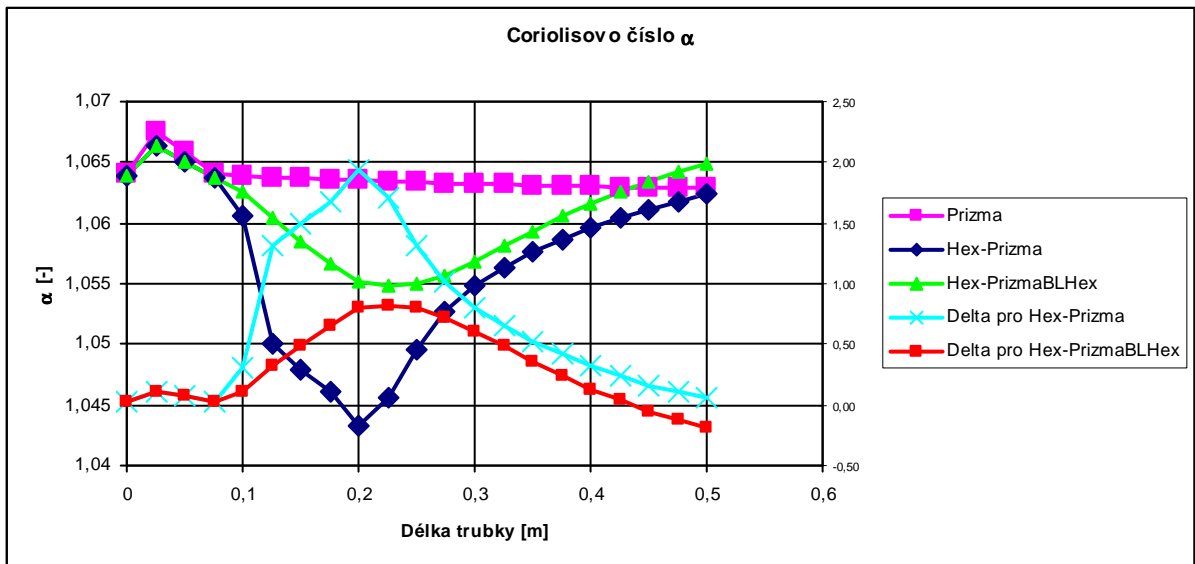


Graf 7-26 Porovnání v_{ax} při změně Hex-Prizma pro turbulentní proudění a 3 m/s

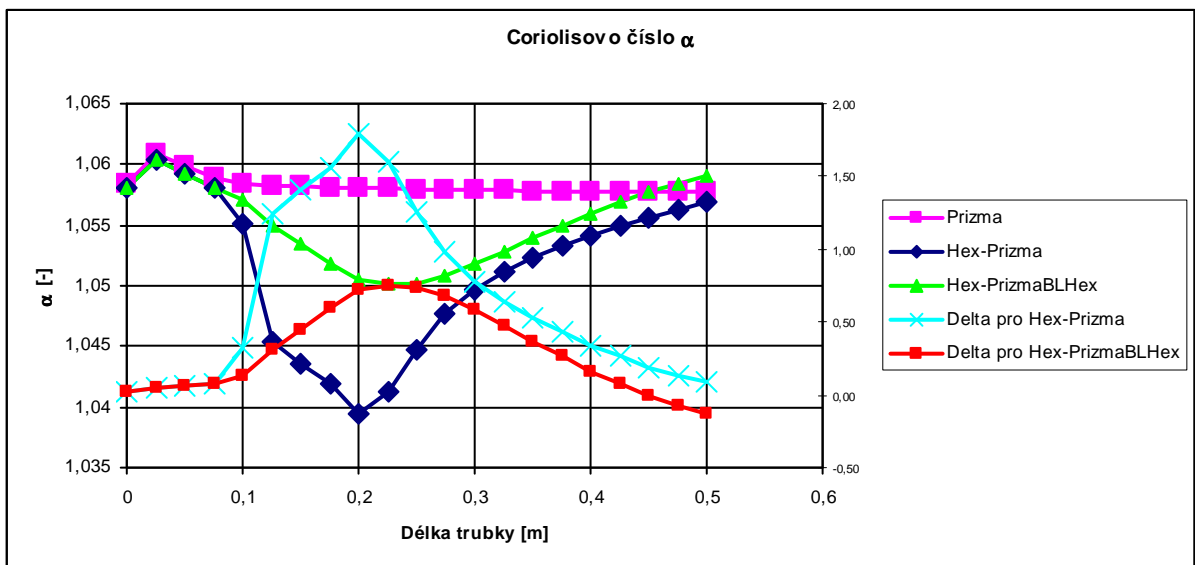
Průběhy axiálních rychlostí jsou totožné. Liší se pouze absolutní hodnotou vstupní rychlosti. V místě změny sítě je propad hodnoty rychlosti přibližně 1,5%. Vliv přechodu je znát již 100 mm pře změnou sítě, kdy rychlost postupně klesá až k délce 0,2 m od počátku, kde dosáhne svého minima. Postupuje-li se dál po délce trubky, rychlost se přibližuje k předpočítanému vzoru.



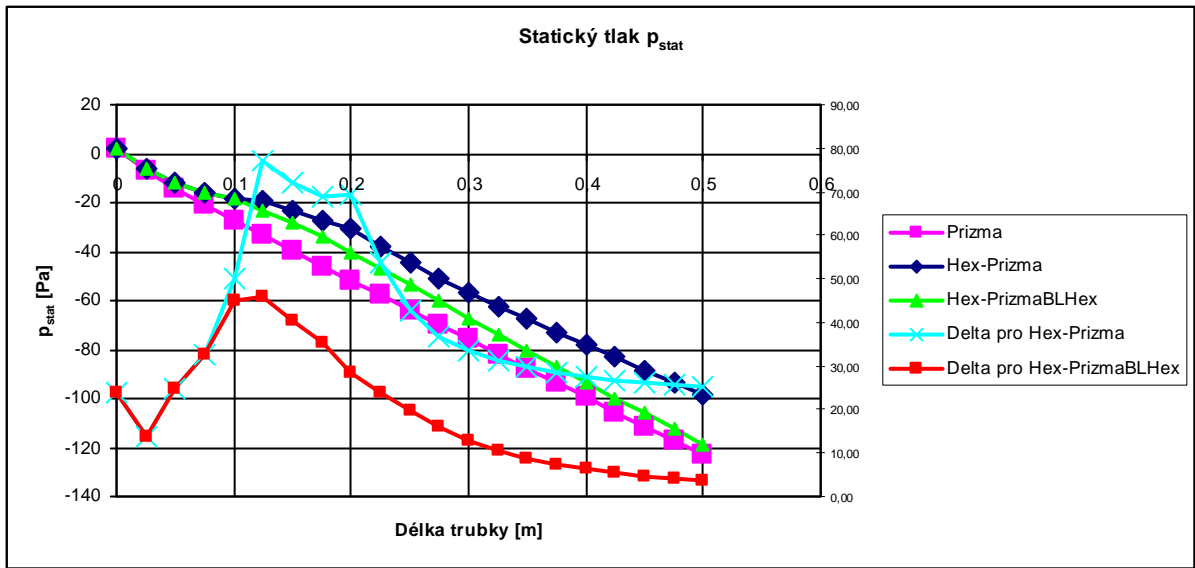
Graf 7-27 Porovnání Cor. čísla při změně Hex-Prizma pro turbulentní proudění a 1 m/s



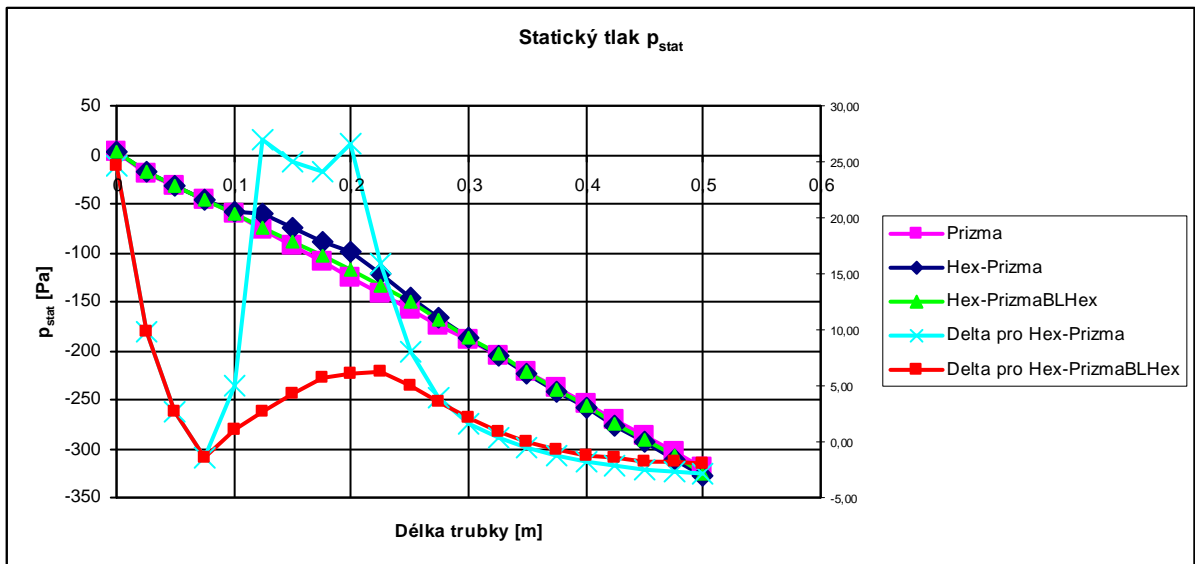
Graf 7-28 Porovnání Cor. čísla při změně Hex-Prizma pro turbulentní proudění a 2 m/s



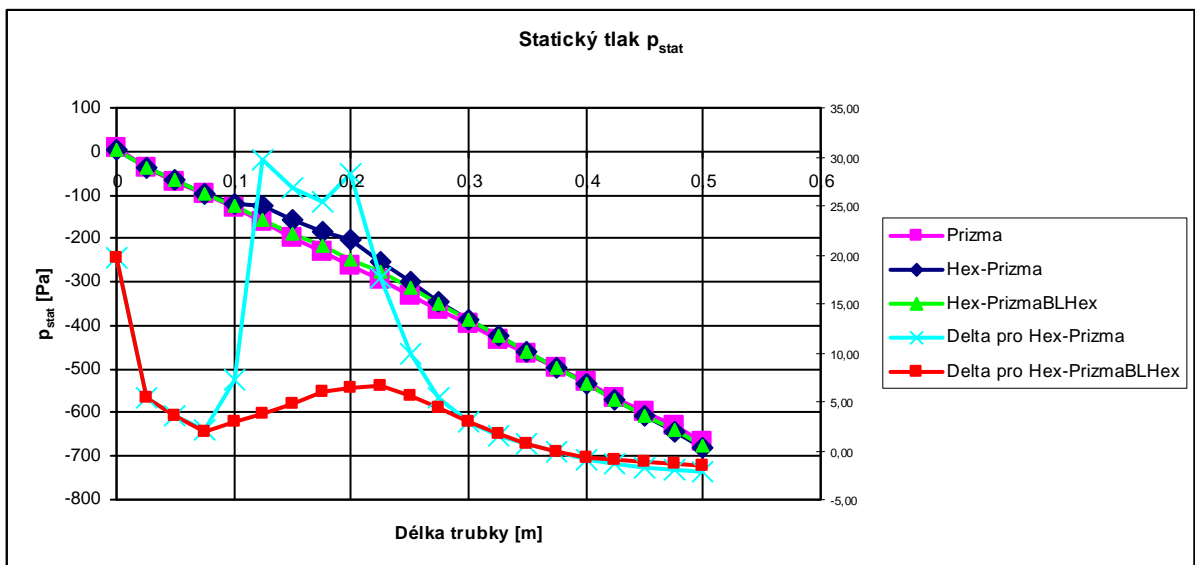
Graf 7-29 Porovnání Cor. čísla při změně Hex-Prizma pro turbulentní proudění a 3 m/s



Graf 7-30 Porovnání p_{stat} při změně Hex-Prizma pro turbulentní proudění a 1 m/s



Graf 7-31 Porovnání p_{stat} při změně Hex-Prizma pro turbulentní proudění a 2 m/s

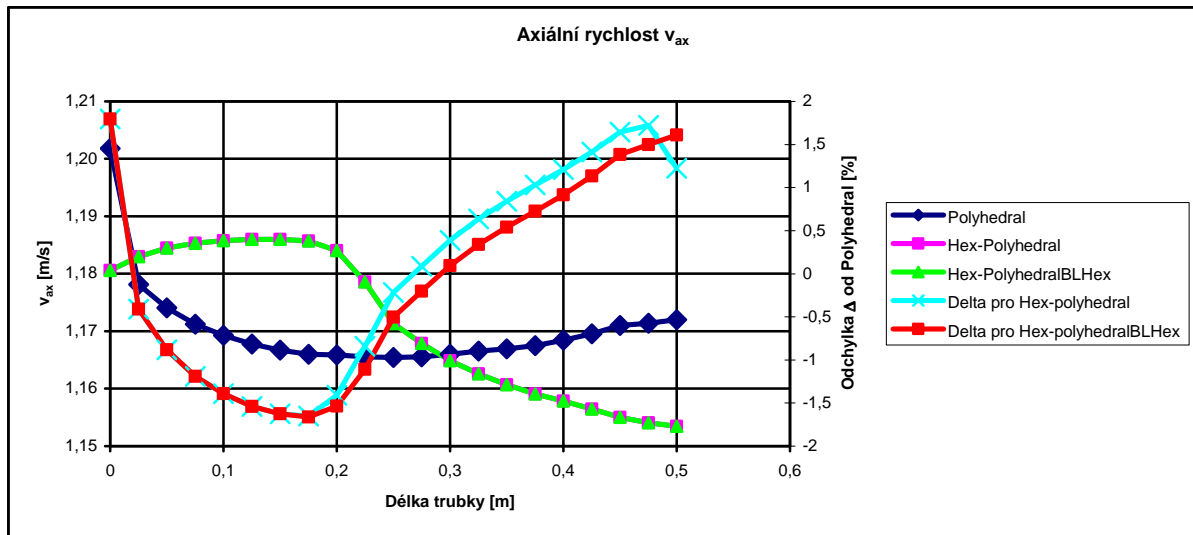


Graf 7-32 Porovnání p_{stat} při změně Hex-Prizma pro turbulentní proudění a 3 m/s

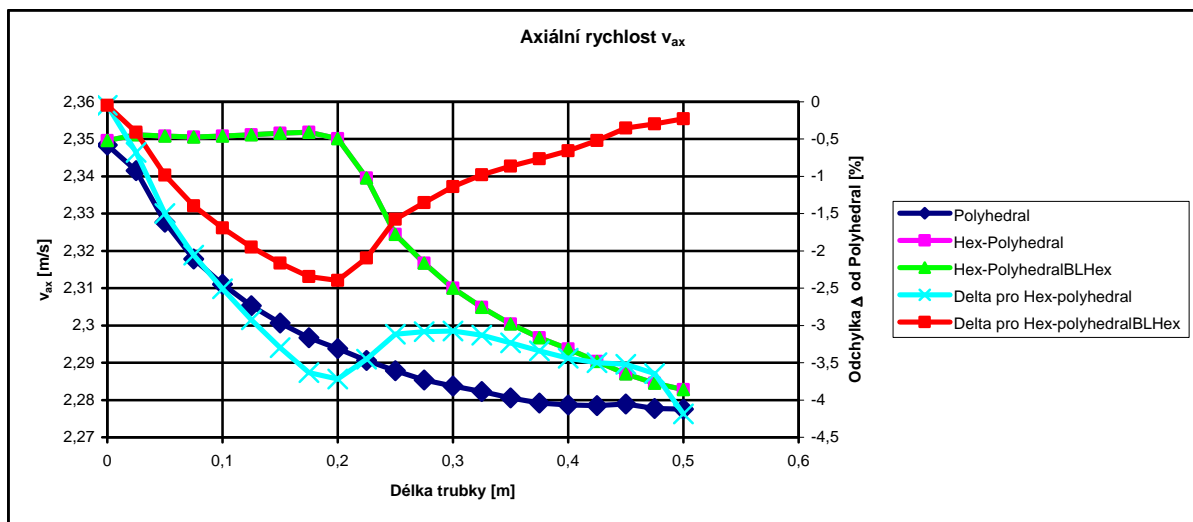
Grafy ukazující průběh Coriolisova čísla a statického tlaku mají obdobné vzezření pro každou zadanou rychlost. Protože Coriolisovo číslo je svázané s rychlostí, tvar křivek je obdobný jako u axiální rychlosti. Odchytky od vzorové sítě jsou malé, pohybují se do 2 %. Pouze pro rychlostní profil 1 m/s je odchylka 3,75%

Nejhoršího výsledku dosáhl po spočtení opět statický tlak. Křivky jsou pro každou variantu téměř totožné, ale jejich odchylky od vzoru dosahují velkých hodnot. Až 30%.

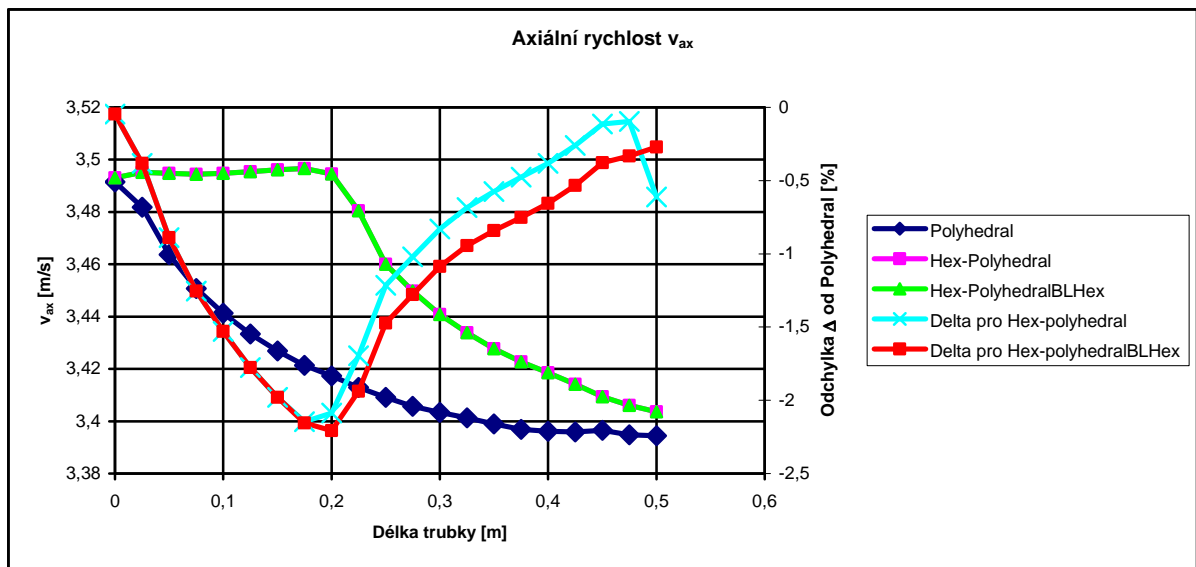
7.2.3 Přechod Hex-Polyhedral



Graf 7-33 Porovnání v_{ax} při změně Hex-Polyhedral pro turbulentní proudění a 1 m/s



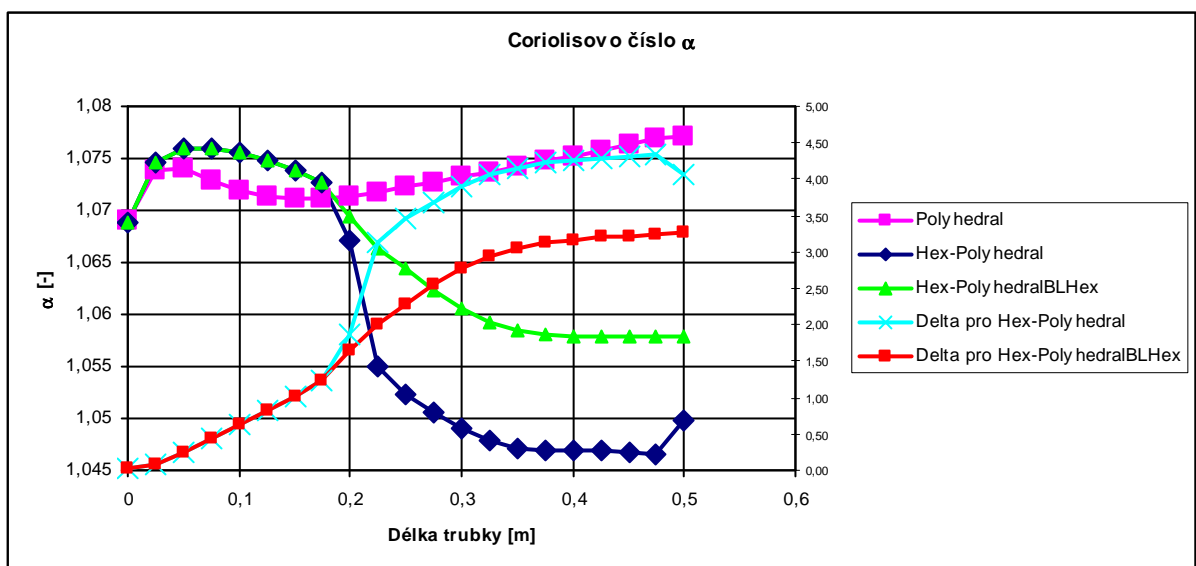
Graf 7-34 Porovnání v_{ax} při změně Hex-Polyhedral pro turbulentní proudění a 2 m/s



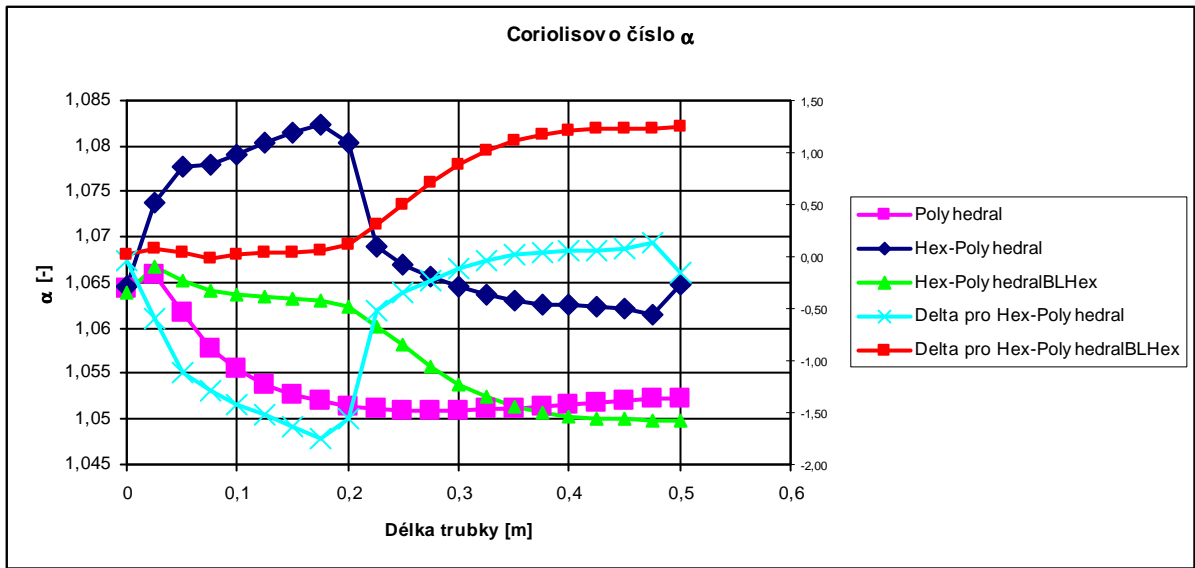
Graf 7-35 Porovnání v_{ax} při změně Hex-Polyhedral pro turbulentní proudění a 3 m/s

Axiální rychlost má v hexagonální části průběh konstantní. Výjimku tvoří graf vycházející z rychlosti 1 m/s, kde je křivka zaoblená. Oproti předchozímu případu je zde tedy rozdíl při výpočtech pro rychlost 1m/s jako v úvodu kapitoly s trubkou beze změny sítě. Zbylé dva grafy jsou si podobné. Tvar vzorové křivky se neshoduje s křivkami získanými výpočtem pro změnu sítě. V hexagonální části trubky se drží průběh rychlosti na konstantní hodnotě. Těsně před hranicí změny se křivka změní směrnici a začne klesat. Opět se promítá vliv přechodu, než k němu dojde. Axiální rychlost pak nadále klesá a blíží se předpočítanému vzoru.

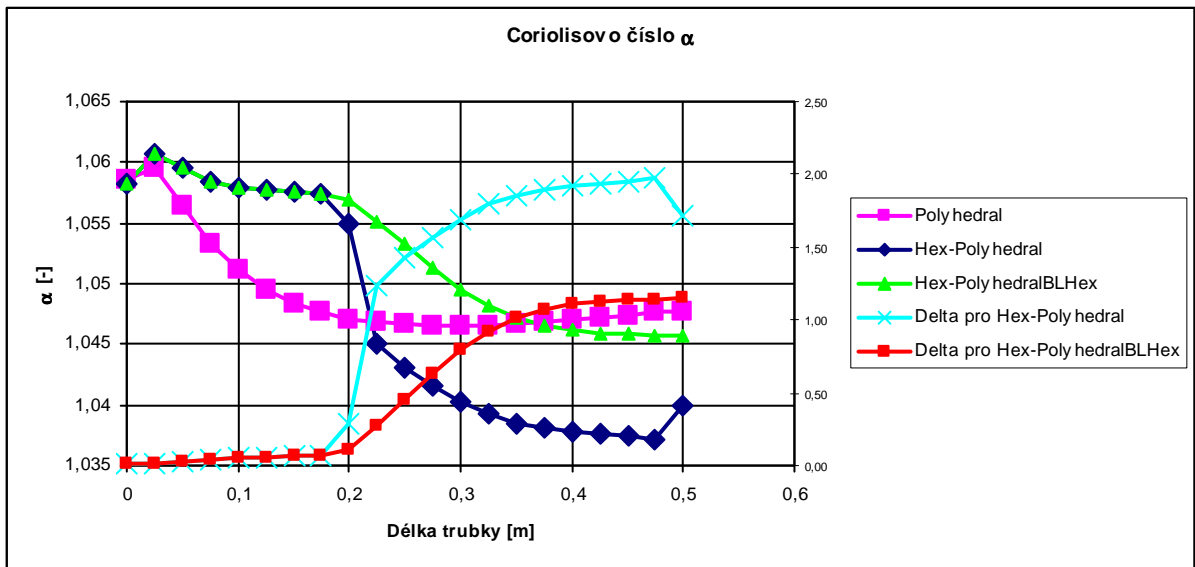
Největší chybou je zatížena varianta s vstupní rychlostí 2m/s, která dosahuje 3,5%. Zbylé dvě rychlosti se pohybují na hranici 2%.



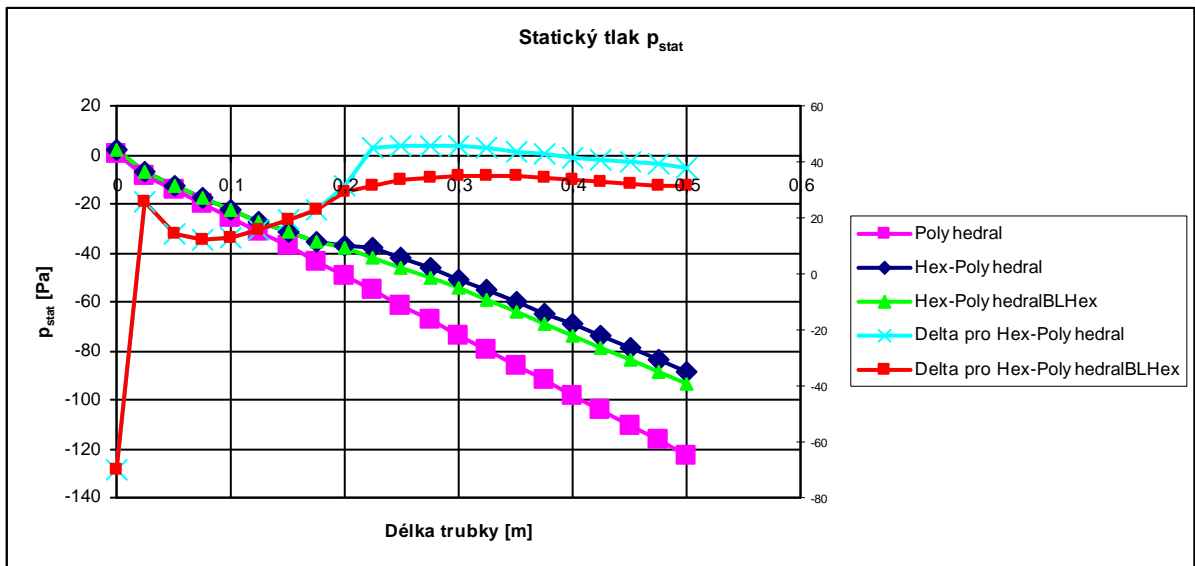
Graf 7-36 Porovnání Cor. čísla při změně Hex-Polyhedral pro turbulentní proudění a 1 m/s



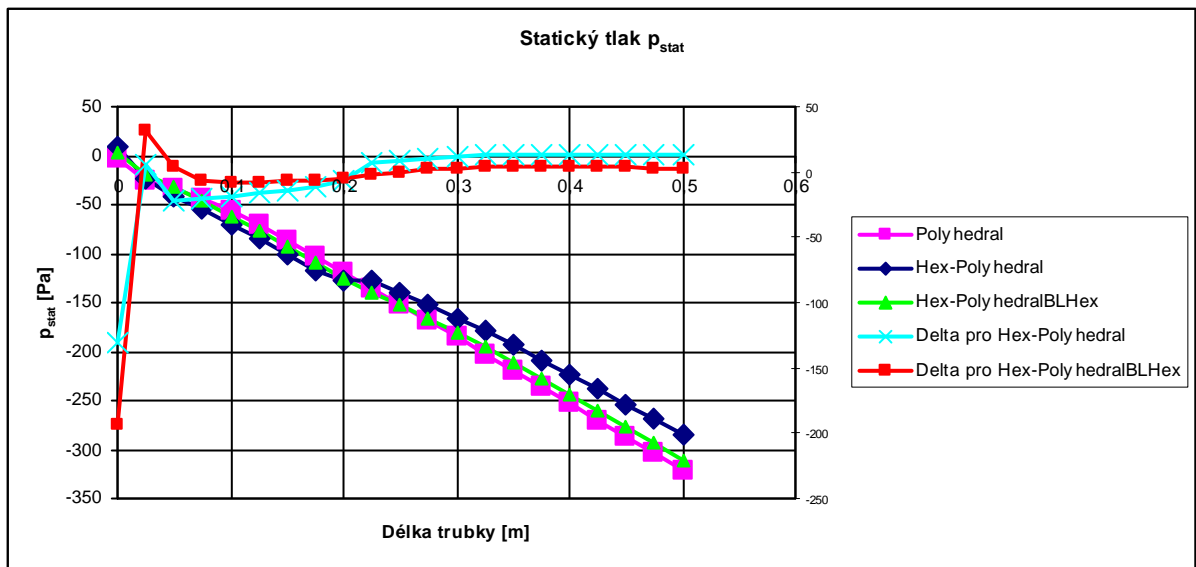
Graf 7-37 Porovnání Cor. čísla při změně Hex-Polyhedral pro turbulentní proudění a 2 m/s



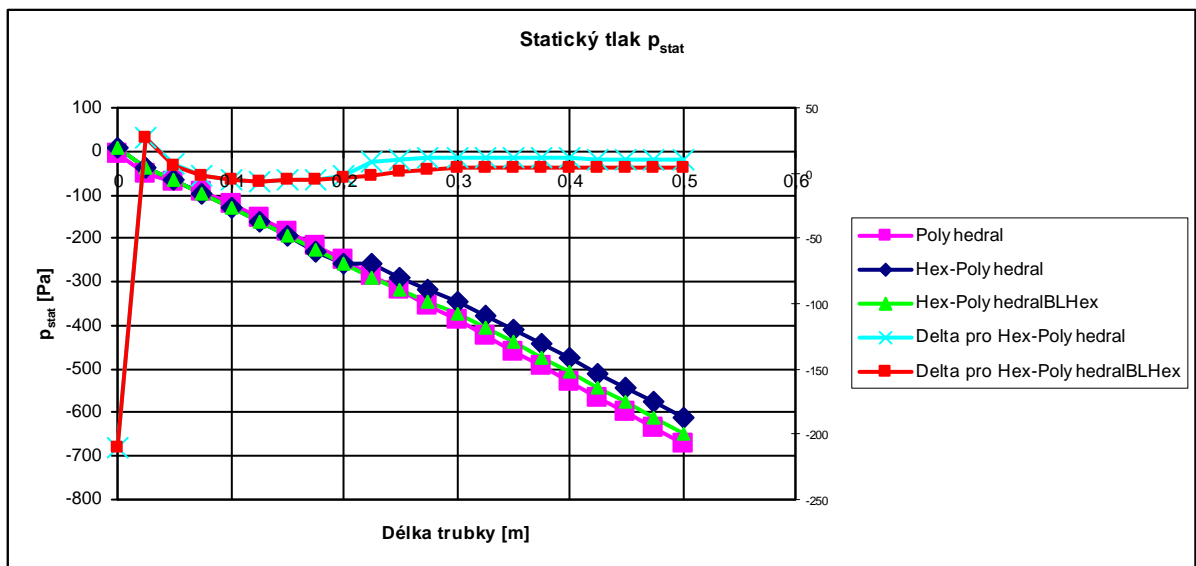
Graf 7-38 Porovnání Cor. čísla při změně Hex-Polyhedral pro turbulentní proudění a 3 m/s



Graf 7-39 Porovnání p_{stat} při změně Hex-Polyhedral pro turbulentní proudění a 1 m/s



Graf 7-40 Porovnání p_{stat} při změně Hex-Polyhedral pro turbulentní proudění a 2 m/s

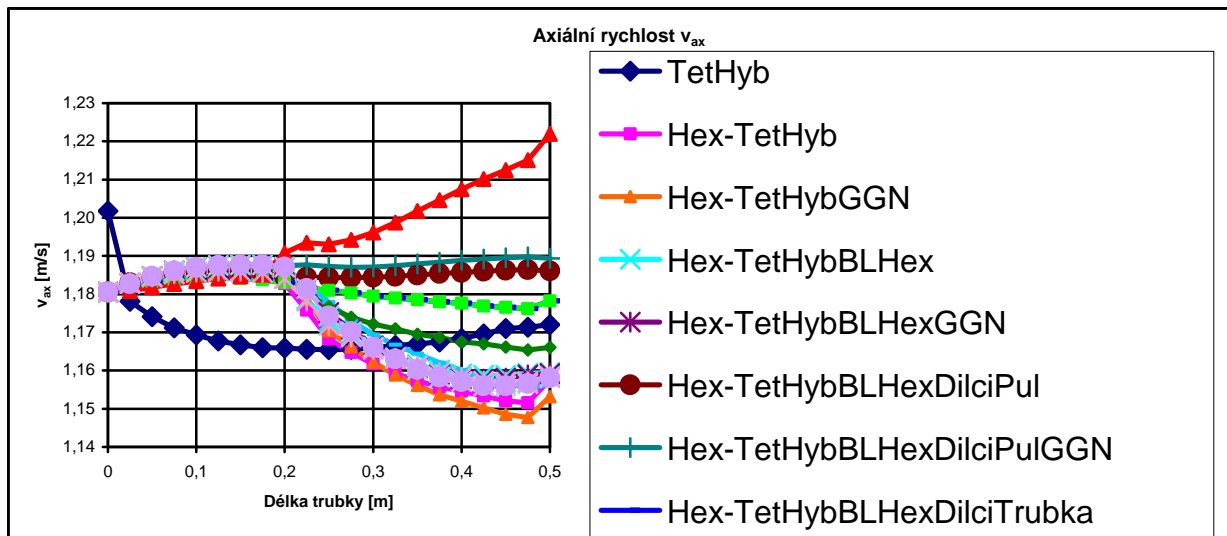


Graf 7-41 Porovnání p_{stat} při změně Hex-Polyhedral pro turbulentní proudění a 3 m/s

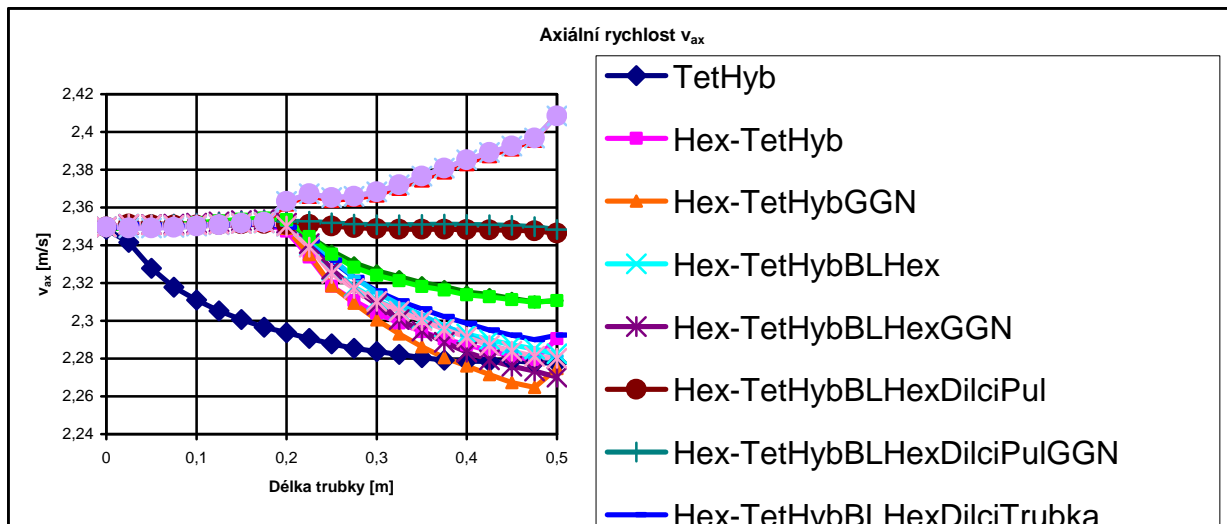
Největší odchylky u Coriolisova čísla je dosaženo při rychlosti 1 m/s, jejíž hodnota je 4,5%. U zbylých dvou rychlostí je diference přibližně 2,5%. Průběhy křivek už nejsou docela shodné. Nejlépe se ke vzorovému příkladu blíží varianta přechodu s hexagonální mezní vrstvou.

Výsledky statického tlaku vyšly nejhůře. Vyskytly se zde nesourodé hodnoty, které způsobují odchylku až 200%. Běžně se diference pohybuje kolem 10 až 50 %.

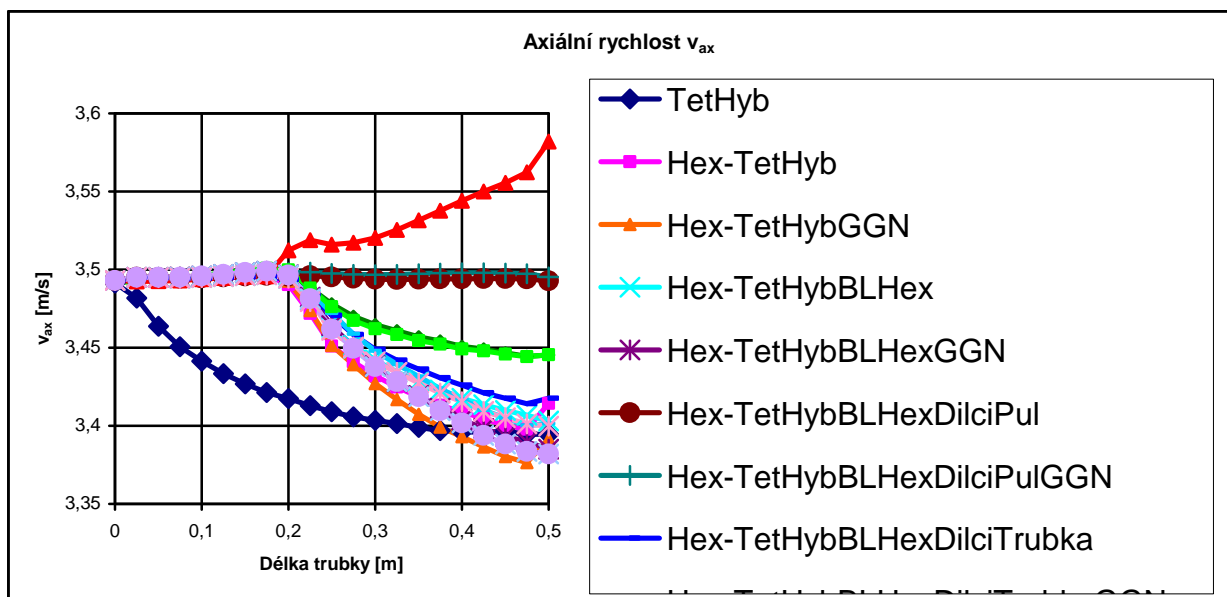
7.2.4 Přechod Hex-Tet-Hyb



Graf 7-42 Porovnání v_{ax} při změně Hex-TetHyb pro turbulentní proudění a 1 m/s

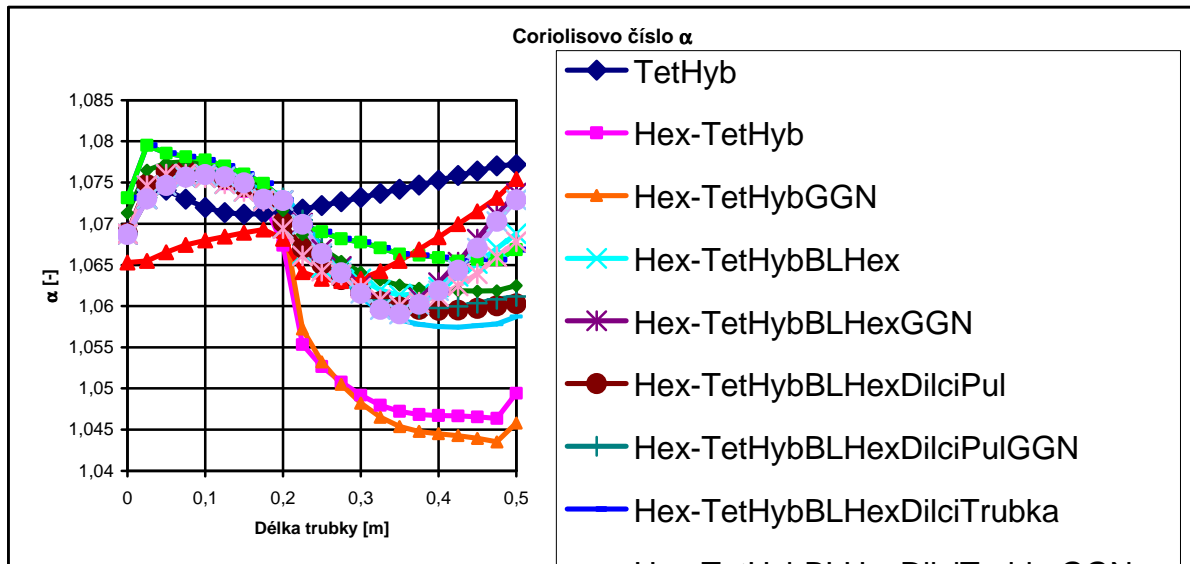


Graf 7-43 Porovnání v_{ax} při změně Hex-TetHyb pro turbulentní proudění a 2 m/s

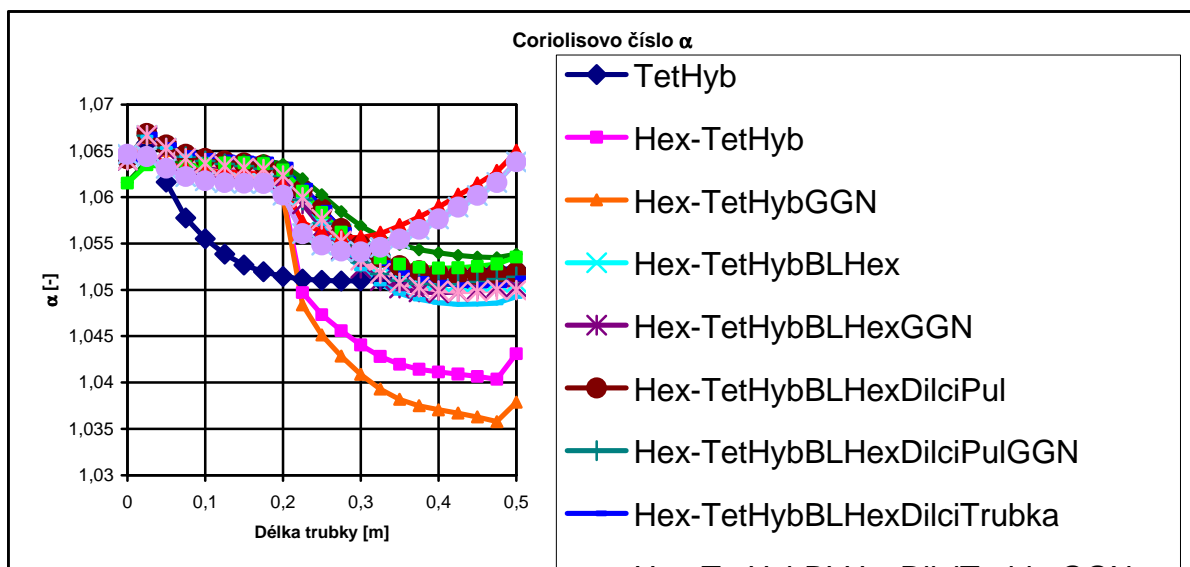


Graf 7-44 Porovnání v_{ax} při změně Hex-TetHyb pro turbulentní proudění a 3 m/s

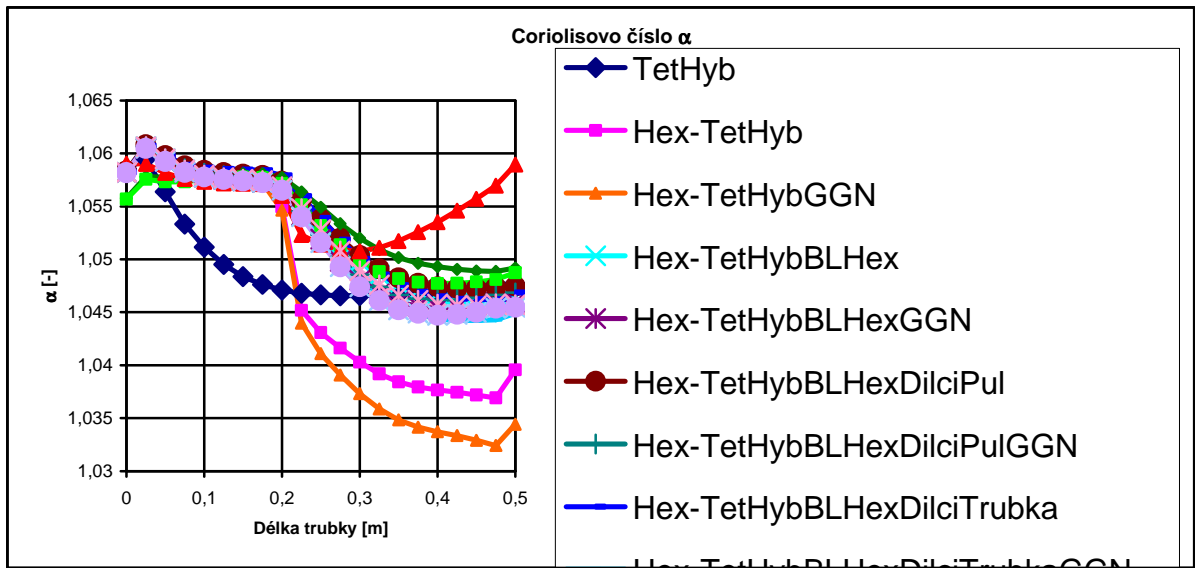
Jako nejlepší varianta vysítování trubky obdobně jako v případě laminárního proudění se ukázala TetHybridní síť, kde roh vnitřního zaobleného čtverce byl nahrazen objemem tvaru poloviční trubky. Díky této variantě byl dosažený přibližně stejný výsledek, jako kdyby to byla čistě trubka vyplněná šestistěnou. Axiální rychlost u většiny variant po změně sítě klesá a blíží se vzorovému tvaru křivky axiální rychlosti. Diference vůči vzorovému průběhu je u všech variant do 2%.



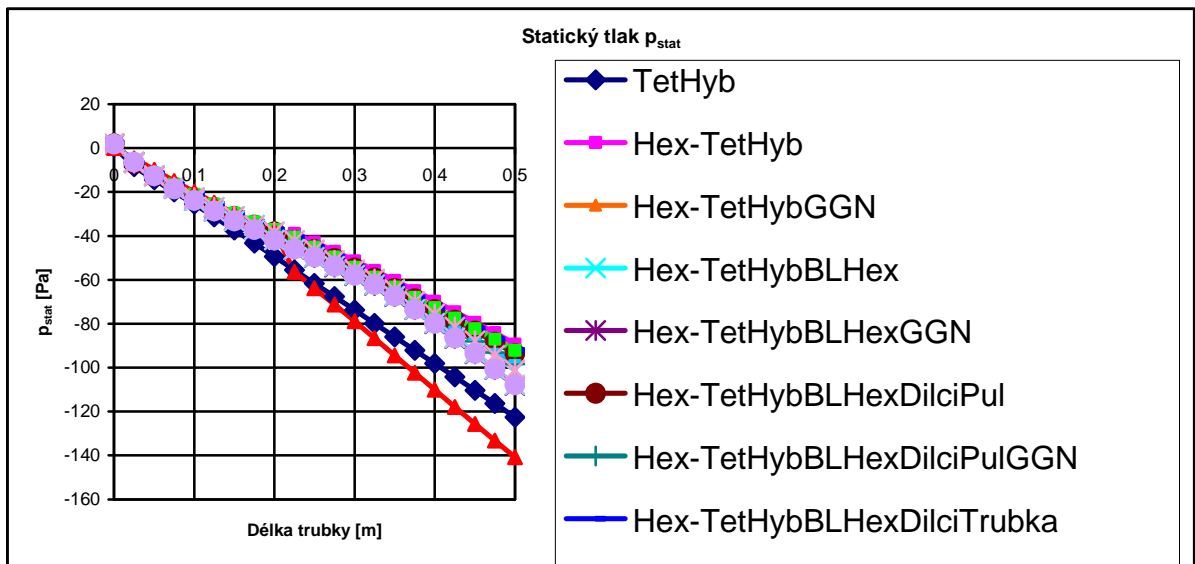
Graf 7-45 Porovnání Cor. čísla při změně Hex-TetHyb pro turbulentní proudění a 1 m/s



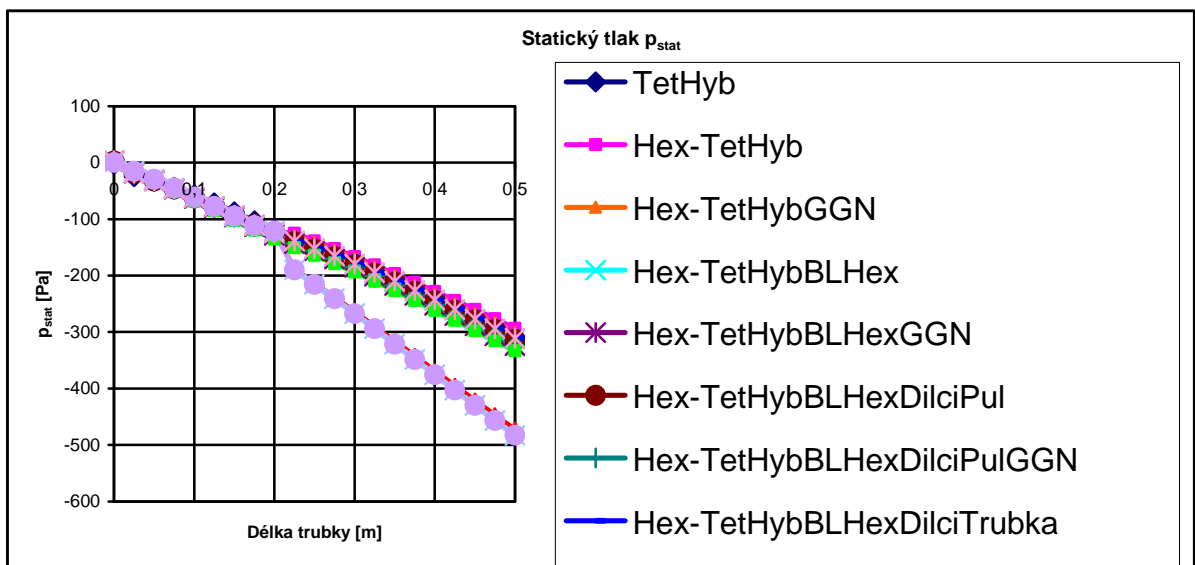
Graf 7-46 Porovnání Cor. čísla při změně Hex-TetHyb pro turbulentní proudění a 2 m/s



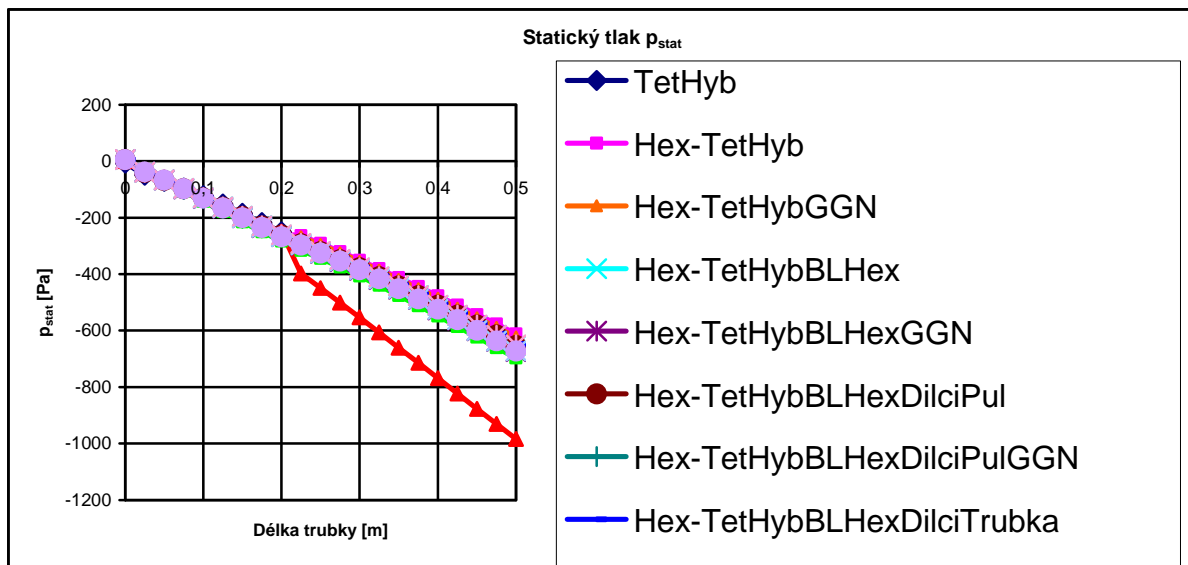
Graf 7-47 Porovnání Cor. čísla při změně Hex-TetHyb pro turbulentní proudění a 3 m/s



Graf 7-48 Porovnání p_{stat} při změně Hex-TetHyb pro turbulentní proudění a 1 m/s



Graf 7-49 Porovnání p_{stat} při změně Hex-TetHyb pro turbulentní proudění a 2 m/s



Graf 7-50 Porovnání p_{stat} při změně Hex-TetHyb pro turbulentní proudění a 3 m/s

Grafické znázornění výsledných hodnot Coriolisova čísla ukazuje, že pro rychlosti 2 a 3 m/s mají křivky přibližně stejný tvar. Průběh od začátku trubky je odlišný, ale k jejímu konci se výsledky přibližují vzoru. Rozdíl vůči vzorku je do 3%

Odchylka statického tlaku je průměrně 40%.

8 ZÁVĚR

Práce se zabývala tím, jaký vliv má změna prvků na výsledky výpočtů v CFD. Změna elementů se vždy do řešení promítne, ať už menším či větším způsobem. Jako předloha pro porovnání výsledků sloužila trubka s jedním typem sítě, u které se spočítaly hodnoty axiální rychlosti na ose trubky, statického tlaku a Coriolisova čísla v pravidelně vzdálených průřezech trubky po délce. Tyto hodnoty se porovnaly s výsledky pro trubku se změnou elementů a určila se odchylka. Odchylka u axiální rychlosti a s Coriolisova čísla se pohybovala ve většině případů do 3%. Někdy těsně nad. Velká diference se ukázala u statického tlaku, kde se konečné parametry lišily v průměru 40%. Nejlepší shody výsledků se dostalo u hexagonálních a prizmatických sítí. Jako nejhorší se jevíly sítě s prvky prizmatickými a TetHybridními.

U výpočtů v CFD je důležité správně vymodelovat výpočetní síť, aby se získaly co nejlepší výsledky. Zde se také osvědčil výběr výpočetního modulu pro TetHybridní síť, kdy místo Green-Gaus Cell Based bylo použito Green-Gaus Node Based. Důkazem je vykreslení kontur rychlosti při laminárním proudění.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] ŠOB, František. *Hydromechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 238 s. ISBN 80-214-2037-5

[2] ŠTIGLER Jaroslav. *Optimal Mapped Mesh on the Circle*. In Sborník konference ANSYS 2009 23.-25. září 2009. TechSoft Engineering, s.r.o. Vydání první. Plzeň: ARCADEA 2009. s. 245-252, ISBN 978-80-254-5437-4.

[3] CVUT. Silový účinek vodního paprsku [online]. Dostupné z http://hydraulika.fsv.cvut.cz/users/matousek/downloads/web_HY3V_11_Silovy_ucinek_vodniho_paprsku.pdf

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CFD.....	computational fluid dynamic	
cor-cit.....	označení čitatele zlomku ve vztahu pro Coriolisovo číslo	
c_s	střední charakteristická rychlost.....	[m/s]
c_i	časově středovaná rychlost.....	[m/s]
c'_i	flukuační složka.....	[m/s]
c_i^*	okamžitá rychlost.....	[m/s]
D_h	hydraulický průměr.....	[m]
E	délka úsečky sítě.....	[mm]
F	délka úsečky sítě.....	[mm]
G	délka úsečky sítě.....	[mm]
K	délka úsečky sítě.....	[mm]
n_F	počet prvků na úsečce F.....	[-]
n_G	počet prvků na úsečce G.....	[-]
p_{stat}	střední hodnota tlaku po průřezu.....	[Pa]
Re	Reynoldsovo číslo.....	[-]
S	plocha průřezu trubky.....	[m ²]
v_{ax}	rychlost na ose potrubí.....	[m/s]
Y_{zl}	délková ztráta.....	[J/kg]
Δv_{ax}	rozdíl axiálních rychlostí dvou sousedních průřezů...[m/s]	
$\Delta v_{ax}\%$	procentuální vyjádření rozdílu axiální rychlosti.....	[%]
α	Coriolisovo číslo.....	[-]
β	koeficient pro výpočet rozměrů sítě.....	[-]
η	dynamická viskozita.....	[Pas]
λ	koeficient tření.....	[Re]
ν	kinematická viskozita.....	[m ² /s]

11 SEZNAM PŘÍLOH

2xDVD: DVD1 Laminární proudění, Nové sítě, Turbulentní proudění 1
DVD2 Turbulentní proudění