

Diplomová práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F2**

Fakulta strojní  
Ústav letadlové techniky

## CFD výpočet vysouvání vztlakové mechanizace s využitím dynamické sítě

**Bc. Ladislav Vobora**

Vedoucí: Ing. Tomáš Čenský, Ph.D.  
Obor: Letadlová a kosmická technika  
Studijní program: Letectví a kosmonautika  
Leden 2022

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vobora** Jméno: **Ladislav** Osobní číslo: **456922**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**  
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**  
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**CFD výpočet vysouvání vztlakové mechanizace s využitím dynamické sítě**

Název diplomové práce anglicky:

**CFD calculation of flap extension with the use of dynamic mesh**

Pokyny pro vypracování:

- Vytvořte CAD a CFD model Krugerovy klapky na zadané geometrii křídla.
- Pro zadané rychlosti a trajektorie vysouvání proveďte stacionární CFD výpočet proudění.
- Namodelujte pro stejné případy proudění CFD výpočet s použitím dynamické sítě a proveďte nestacionární výpočet.
- Proveďte analýzu dynamických efektů a srovnání se stacionárním výpočtem.

Seznam doporučené literatury:

-

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

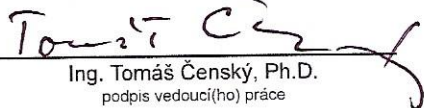
**Ing. Tomáš Čenský, Ph.D., ústav letadlové techniky FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.10.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce:

  
Ing. Tomáš Čenský, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce


  
Ing. Robert Theiner, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

2.12.2021  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a pouze s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Praze, 7. ledna 2022

.....



## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Tomáši Čenskému, Ph. D, za jeho pomoc, věnovaný čas a ochotu, které mi při vypracovávání této práce poskytl. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu, které se mi dostávalo jak při psaní této práce, tak hlavně během celého předchozího studia.

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá tvorbou CFD modelu vysouvání Krügerovy klapky s využitím dynamické sítě. Byl navržen schématický CAD model profilu s Krügerovou klapkou. Dále se práce zabývá tvorbou a postupem tvorby CFD modelu s využitím dynamické sítě. Primárním cílem bylo vytvoření funkčního modelu a aby model dokázal zaznamenat změny aerodynamických parametrů během vysouvání klapky. Velkou část práce tvoří rozebrání problematiky dynamické sítě a její vliv na kvalitu výpočtu. Byla provedena optimalizace daného řešení a nestacionární výpočty. V práci jsou zaznamenány výsledky vybraných případů. Dále byly provedeny stacionární výpočty, se kterými byly výsledky získané s využitím dynamické sítě porovnány.

**Klíčová slova:** CFD, Krügerova klapka, aerodynamika, letectví, dynamická síť, Remeshing, Fluent, nestacionární model, profil

## Abstract

The diploma thesis deals with the creation of a CFD model of the Krüger flap extension using a dynamic mesh. A schematic CAD model of the profile with a Krüger flap was designed. Furthermore, the work deals with the creation and process of creating a CFD model using a dynamic network. The primary goal was to create a functional model that will be able to record changes in aerodynamic parameters during the extension of the flap. A large part of the work is an analysis of the dynamic mesh and its impact on the quality of the calculation. The solution was optimized and transient calculations were performed. The work shows the results of selected cases. Furthermore, stationary calculations were performed, with which the results obtained using a dynamic mesh were compared.

**Keywords:** CFD, Krueger flap, nose flap, aerodynamics, aviation, dynamic mesh, remeshing, Fluent, transient model, airfoil

**Title translation:** CFD calculation of flap extension with the use of dynamic mesh

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Teoretická část</b>	<b>3</b>
1.1 Krügerova klapka	3
1.1.1 Jednoduchá Krügerova klapka	4
1.1.2 Krügerova klapka se zaoblenou hranou	5
1.1.3 Krügerova klapka s proměnlivou křivostí	6
1.2 Rešerše publikací	6
1.2.1 Nestacionární CFD modely Krügerovy klapky	6
1.2.2 Srovnání CFD modelů a experimentálního měření	8
1.2.3 Využití dynamické sítě v aerodynamických výpočtech	10
1.3 Dynamická síť v CFD modelování	11
1.3.1 Vyhlazování (Smoothing)	12
1.3.2 Metoda pružiny (Spring-based)	13
1.3.3 Vrstvení (Layering)	13
1.3.4 Remeshing	14
1.3.5 User defined function (UDF)	15
<b>2 Praktická část</b>	<b>17</b>
2.1 Návrh geometrie a tvorba sítě	18
2.1.1 Tvar a velikost oblasti proudění	18
2.1.2 Návrh geometrie profilu a klapky	18
2.1.3 Tvorba sítě	20
2.1.4 Studie nezávislosti na síti (Mesh Independence Study)	23
2.2 Srovnání geometrického návrhu s čistým profilem	24
2.3 Návrh pohybu a vytvoření UDF	29
2.3.1 Návrh pohybu	29
2.4 Vytvoření modelu s využitím dynamické sítě	31
2.4.1 Nastavení okrajových podmínek	31
2.4.2 Kompilace UDF	31
2.4.3 Oddělení buněk mezní vrstvy	31
2.4.4 Nastavení dynamické sítě	33
2.5 Problematika negativních objemů	34
2.5.1 Časový krok 0,1 s	35
2.5.2 Časový krok 0,05 s	35
2.6 Výběr schématu řešiče	37

2.7	Turbulentní model .....	41
2.8	Problematika špatné kvality přetvořené sítě .....	42
2.8.1	Ověření konzistence sítě při stejném nastavení dynamické sítě.....	42
2.8.2	Zhoršení kvality sítě v oblasti pohybu klapky .....	43
2.8.3	Vliv časového kroku na kvalitu sítě .....	45
2.8.4	Vliv parametrů funkce remeshing na kvalitu sítě .....	46
2.8.5	Provedené pokusy o zlepšení kvality sítě .....	48
2.9	Problematika nestacionárního modelu a konvergence výsledků .....	54
2.9.1	Nestacionární model a vliv velikosti časového kroku na konvergenci výsledků	54
2.9.2	Vliv přetváření sítě na konvergenci výsledků .....	54
2.9.3	Konvergence výsledku při použití modelu Transition SST .....	55
2.10	Výsledky výpočtů pro vybrané případy .....	56
2.10.1	Časový krok = 0,05-0,1 s; Spalart-Allmaras; $\alpha = 0^\circ$ .....	56
2.10.2	Časový krok = 0,05 s; Spalart-Allmaras; $\alpha = 0^\circ$ .....	56
2.10.3	Časový krok = 0,025 s; Spalart-Allmaras; $\alpha = 10^\circ$ .....	60
2.10.4	Časový krok = 0,025 s; Transition SST; $\alpha = 10^\circ$ .....	62
2.11	Porovnání výsledků se statickým výpočtem .....	65
2.11.1	Tvorba statických modelů .....	65
2.11.2	Porovnání součinitelů $c_d$ a $c_l$ .....	65
2.12	Dynamické změny .....	69
<b>3</b>	<b>Závěr</b> .....	<b>73</b>
	<b>Literatura</b> .....	<b>75</b>

## Obrázky

1.1 Porovnání $c_l$ čistého profilu, Krügerovy klapky a slotu [6] .....	4
1.2 Jednoduchá Krügerova klapka ve vysunuté a zasunuté pozici [8] .....	5
1.3 Klapka se zaoblenou hranou [8] .....	5
1.4 Krügerova klapka s proměnlivou křivostí [8] .....	6
1.5 Použitá geometrie pro [12] .....	7
1.6 Oscilace $c_l$ pro $\alpha = -6^\circ$ (vlevo) a pro $\alpha = -10^\circ$ (vpravo) [12] .....	7
1.7 Srovnání vypočtených a experimentálních hodnot pro různé velikosti mezery [13] .....	8
1.8 Kontury rychlosti CFD (vlevo) a porovnání $c_p$ (vpravo) pro 2 konfigurace klapky [14] .....	9
1.9 Kontury rychlosti CFD (vlevo) a porovnání $c_p$ (vpravo) pro $\alpha = 5^\circ$ (nahore) a $\alpha = 10^\circ$ (dole) [14] .....	9
1.10 Porovnání vypočtených a experimentálních hodnot [15] .....	10
1.11 Porovnání vypočtených hodnot $c_d$ (nahore) a $c_l$ (dole) s experimentálními daty [16] .....	11
1.12 Porovnání deformace sítě pro různé metody funkce vyhlazování .....	13
1.13 Možnosti nastavení funkce remeshing .....	14
2.1 Geometrie a rozměry prostoru proudění pro zkušební model .....	18
2.2 Geometrické schéma A .....	19
2.3 Geometrické schéma B .....	19
2.4 Geometrické schéma C .....	19
2.5 Sít zkušebního modelu .....	21
2.6 Detail hrubé sítě mezní vrstvy .....	22
2.7 Detail jemné sítě mezní vrstvy .....	22
2.8 Příklad studie nezávislosti na síti [23] .....	23
2.9 Data z tunelových měření pro profil NACA 4415 [20] .....	24
2.10 Porovnání $c_p$ čistého profilu a návrhu geometrie, Spalart-Allmaras .....	26
2.11 Porovnání $c_p$ čistého profilu a návrhu geometrie, Transition SST .....	27
2.12 Turbulence v oblasti mezery na spodní straně profilu .....	27
2.13 Porovnání rychlosti proudění v okolí čistého profilu a v okolí profilu s klapkou .....	28
2.14 Konečná poloha Krügerovy klapky a profilu po vysunutí .....	29
2.15 Textový kód UDF definující pohyb klapky .....	30
2.16 Integrovaný kompilátor Fluentu .....	31
2.17 Oddělená oblast v okolí klapky .....	32
2.18 Oddělená oblast v okolí profilu .....	32

2.19	Oblasti sítě vytvořené separací buněk mezních vrstev . . . . .	33
2.20	Definování dynamické sítě . . . . .	33
2.21	Příklad negativních objemů . . . . .	34
2.22	Doporučené nastavení funkce Smoothing . . . . .	36
2.23	Použité parametry funkce ILayering . . . . .	36
2.24	Použité parametry funkce emeshing . . . . .	37
2.25	Průběh residuí při použití schématu PISO . . . . .	38
2.26	Průběh $c_d$ při použití schématu PISO . . . . .	38
2.27	Průběh residuí při použití schématu SIMPLE . . . . .	39
2.28	Průběh $c_d$ při použití schématu SIMPLE . . . . .	39
2.29	Průběh residuí při použití schématu Coupled . . . . .	40
2.30	Průběh $c_d$ při použití schématu Coupled . . . . .	40
2.31	Výsledná síť po vysunutí klapky . . . . .	42
2.32	Porovnání sítí pro stejné parametry dynamické sítě . . . . .	42
2.33	Výsledná korelace obrazu (rozdíly jsou zobrazeny fialově) . . . . .	43
2.34	Zhoršení ortogonální kvality sítě v průběhu vysouvání klapky . . . . .	44
2.35	Porovnání ortogonální kvality dynamicky přetvořené sítě a statické sítě . . . . .	44
2.36	Porovnání ortogonální kvality sítě pro různé časové kroky . . . . .	45
2.37	Porovnání objemu buněk pro různé časové kroky . . . . .	46
2.38	Vliv maximální délky buněk na ortogonální kvalitu sítě . . . . .	47
2.39	Vliv maximální délky buněk na velikost (objem) buněk sítě . . . . .	47
2.40	Deformace sítě při použití funkce Unified Remeshing . . . . .	48
2.41	Funkce Zlepšení kvality sítě . . . . .	49
2.42	Definované makro pro funkci Zlepšení kvality sítě . . . . .	49
2.43	Deformace sítě při vylepšení 5 % buněk sítě . . . . .	50
2.44	Deformace sítě při vylepšení 0,5 % buněk sítě . . . . .	50
2.45	Ortogonální kvalita sítě při vylepšení 0,5 % buněk sítě . . . . .	51
2.46	Objem (velikost) buněk sítě při vylepšení 0,5 % buněk sítě . . . . .	51
2.47	Chybné přetváření buněk v oblasti s jemnější sítí . . . . .	52
2.48	Přetváření sítě v celém rozsahu . . . . .	52
2.49	Přetvořená síť při použití jemnější oblasti v okolí klapky . . . . .	53
2.50	Kvalita sítě při použití jemnější oblasti v okolí klapky . . . . .	53
2.51	Oscilace hodnot v průběhu vysouvání klapky . . . . .	55
2.52	Analýza chyby vnesené do výpočtu nestacionárním výpočtem hodnot v čase $t = 0$ s . . . . .	57
2.53	Kontury rychlosti a $c_p$ po hloubce profilu; časový krok = 0,05 s; $\alpha = 0^\circ$ . . . . .	57

2.54 Vířivost; $\alpha = 0^\circ$ ; konečná poloha	58
2.55 Vektory rychlosti proudění; $\alpha = 0^\circ$ ; konečná poloha	58
2.56 Průběh $c_l$ a $c_d$ ; $\alpha = 0^\circ$	59
2.57 Průběhu hodnot $c_d$ dle iterací; $\alpha = 0^\circ$	59
2.58 Přetvoření sítě pro časový krok 0,025 s	60
2.59 Kontury rychlosti a vířivosti; Spalart-Allmaras; $\alpha = 10^\circ$	61
2.60 Vektory rychlosti proudění; $t=2,5$ s; Spalart-Allmaras; $\alpha = 10^\circ$	61
2.61 Vektory rychlosti proudění; konečná poloha; Spalart-Allmaras; $\alpha = 10^\circ$	61
2.62 Kontury rychlosti a vířivosti; Transition SST; $\alpha = 10^\circ$	62
2.63 Hodnoty $y^+$ klapky a profilu; jemnější síť mezní vrstvy, $\alpha = 0^\circ$	63
2.64 Vířivost; konečná poloha; Transition SST; $\alpha = 10^\circ$	63
2.65 Průběh $c_l$ a $c_d$ ; $\alpha = 10^\circ$	64
2.66 Průběh hodnot $c_d$ dle iterací; $\alpha = 10^\circ$	64
2.67 Grafické porovnání průběhu $c_l$ se statickými výpočty; $\alpha = 0^\circ$	67
2.68 Grafické porovnání průběhu $c_d$ se statickými výpočty; $\alpha = 0^\circ$	67
2.69 Grafické porovnání průběhu $c_l$ se statickými výpočty; $\alpha = 10^\circ$	68
2.70 Grafické porovnání průběhu $c_d$ se statickými výpočty; $\alpha = 10^\circ$	68
2.71 Viditelné oscilace na průběhu $c_l$ a $c_d$	70
2.72 Porovnání kontur rychlosti pro čas $t = 5$ s a pro ustálené proudění	70
2.73 Porovnání $c_p$ pro čas $t = 5$ s a pro ustálené proudění	71

## Tabulky

1.1 Definovaná makra pro dynamickou síť a jejich využití [18]	15
2.1 Data z tunelových měření odečtená z [20]	25
2.2 Vypočtené hodnoty $c_l$ a $c_d$ pro navrženou geometrii a čistý profil	25
2.3 Odchylky $c_l$ a $c_d$ navržené geometrie od hodnot čistého profilu	26
2.4 Porovnání $c_l$ a $c_d$ pro $\alpha = 0^\circ$ a $t = 2,5$ s	65
2.5 Porovnání $c_l$ a $c_d$ pro $\alpha = 0^\circ$ a plné vysunutí	66
2.6 Porovnání $c_l$ a $c_d$ pro $\alpha = 10^\circ$ a $t = 2,5$ s	66
2.7 Porovnání $c_l$ a $c_d$ pro $\alpha = 10^\circ$ a plné vysunutí	66



## Úvod

V teoretické části byla provedena rešerše dané problematiky a krátké shrnutí informací o Krügerově klapce. Dále byly vysvětleny způsoby přeměny dynamické sítě a popsány parametry, které tuto přeměnu řídí.

V praktické části byl navržen schématický model vysouvání Krügerovy klapky. Jelikož dynamická síť je poměrně zřídka využívána v aerodynamických výpočtech, bylo i cílem nalezení optimálního nastavení dynamické sítě a optimálního postupu tvorby takového modelu. Důraz byl kladen na nalezení funkčního řešení a byly sníženy nároky na přesnost modelu.

Výsledky tohoto CFD modelu mohou určit chování proudění při vysouvání Krügerovy klapky. Na výsledných animacích a z průběhu aerodynamických veličin v čase lze následně pozorovat i dynamické změny v proudění. V neposlední řadě kontrolou výsledků s výsledky získanými stacionárními modely lze i ověřit přesnost této metody a zda ji lze aplikovat na podobné problémy.

Primárními zdroji, hlavně pro určení parametrů modelu, byly oficiální manuály Ansys Fluent, z nichž hlavně Users Guide Manuál [1] byl použit pro kontrolu většiny nastavení. Pro základní principy tvorby CFD simulací a tvorby dynamické sítě byly využity oficiální tutoriály Ansys Fluent a dále [2]. Pro pochopení základních principů CFD bylo čerpáno z [3].





# Kapitola 1

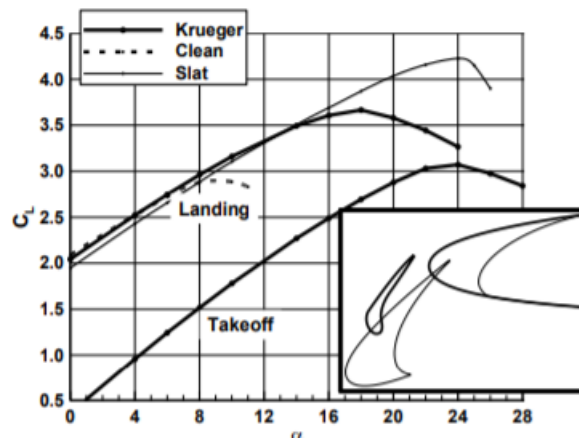
## Teoretická část

### 1.1 Krügerova klapka

Krügerova klapka se řadí mezi vztlakovou mechanizaci nacházející se na náběžné hraně křídla. Encyklopedie aerodynamiky Krügerovu klapku definuje takto: „Krügerova klapka je zařízení na náběžné hraně křídla, které se nachází u kořene křídla proudového dopravního letadla Boeing. Tato klapka posune stagnační bod náběžné hrany, což nasměruje více vzduchu přes horní stranu křídla, a tím dojde ke zvýšení energie mezní vrstvy.“ [4]

Krügerovu klapku vynalezl německý letecký inženýr Werner Krüger a klapka byla následně testována ve větrném tunelu viz. [5].

Zjednodušeně řečeno se jedná o klapku, která se vyklopí ze spodní strany náběžné hrany křídla. Vyklopením klapky dojde k zvětšení křivosti profilu. Díky této změně a díky větší energii mezní vrstvy dojde ke zvýšení kritického úhlu náběhu a součinitele vztlaku  $c_l$ . Krügerova klapka tedy plní podobnou funkci jako sloty, má ale jednodušší konstrukci a generuje vyšší  $c_d$ . Klapka také chrání náběžnou hranu před znečištěním a hmyzem. Na následujícím obrázku je porovnání vztlaku čistého profilu, Krügerovy klapky a slotu při vzletu a přistání.



Obrázek 1.1: Porovnání  $c_l$  čistého profilu, Krügerovy klapky a slotu [6]

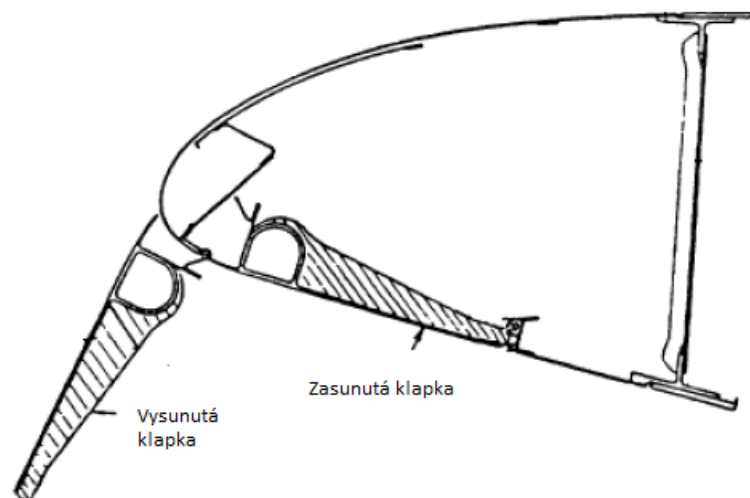
Krügerovy klapky se nejčastěji používají u velkých dopravních letounů v kombinaci s dalšími vztlakovými mechanizmy. Například u letounů Boeing 727 a 737 jsou Krügerovy klapky umístěny na křídle v blízkosti trupu a doplňují je sloty umístěné dále po rozpětí křídla. U Boeingu 747 jsou použity Krügerovy klapky s proměnlivou křivostí. [7] Jednodušší verze se dají ale například použít i pro vojenské UAV.

Z hlediska konstrukce lze dle [8] Krügerovu klapku rozdělit následovně:

- Jednoduchá Krügerova klapka
- Krügerova klapka se zaoblenou hranou
- Krügerova klapka s proměnlivou křivostí

### ■ 1.1.1 Jednoduchá Krügerova klapka

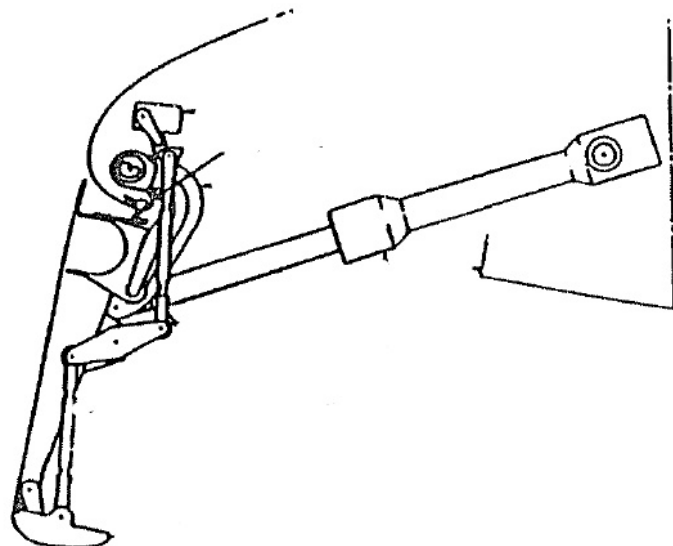
Jednoduchou Krügerovu klapku tvoří panel na spodní straně náběžné hrany. Závěs na předním konci panelu umožňuje jeho rotaci nejprve směrem dolů a poté dopředu až do polohy, kdy hrana panelu utěsňuje mezeru mezi náběžnou hranou křídla a panelem viz. Obrázek 1.2. Takovéto klapky jsou konstrukčně jednoduché a jsou použity například na vnitřní části křídla Boeingu 707. Nevýhodou těchto klapek je neschopnost zvládat různé úhly náběhu. [8]



**Obrázek 1.2:** Jednoduchá Krügerova klapka ve vysunuté a zasunuté pozici [8]

### ■ 1.1.2 Krügerova klapka se zaoblenou hranou

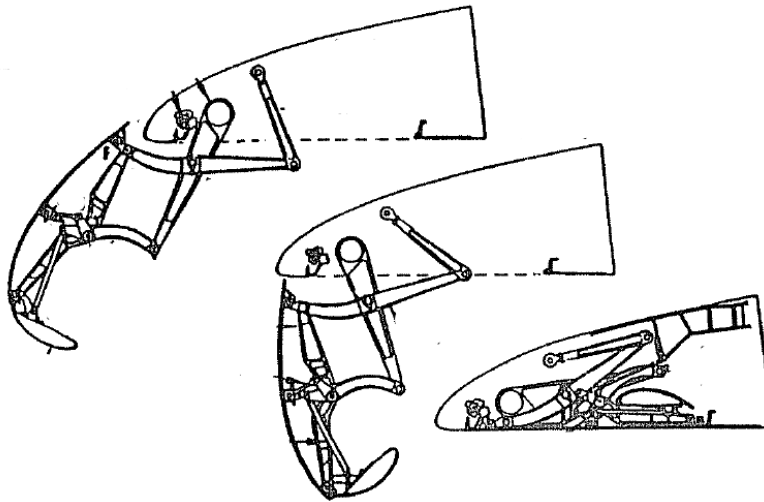
Jedná se o jednoduchou Krügerovu klapku se skládací náběžnou hranou. Panel na náběžné hraně se během vysouvání samotné klapky rovněž vyklápí a výsledný tvar je vidět na Obrázku 1.3. Výsledná klapka zvládá větší rozptyl úhlu náběhu. Tento typ se nejčastěji používá u kořene křídla. Je možné konfigurovat polohu pro vzlet i přistání.



**Obrázek 1.3:** Klapka se zaoblenou hranou [8]

### 1.1.3 Krügerova klapka s proměnlivou křivostí

Pro oba dva výše popsané typy klapky je její tvar dán tvarem náběžné hrany na spodní straně profilu. Pro klapku s proměnlivou křivostí je hlavní panel flexibilní. To značně vylepšuje aerodynamické vlastnosti klapky. Nevýhodou tohoto flexibilního panelu je jeho malá tuhost, a to v tom smyslu, že jeho velikost po rozpětí křídla může být jen poloviční oproti jednoduché Krügerově klapce nebo slotu. Tento druh klapky má také poměrně složitou konstrukci. Je použit na Boeingu 747 po celém rozpětí křídla. [8]



Obrázek 1.4: Krügerova klapka s proměnlivou křivostí [8]

## 1.2 Rešerše publikací

Byla provedena důkladná rešerše a nebyly nalezeny žádné publikace zabývající se vysouváním Krügerovy klapky a dynamickou sítí. Proto byly zvláště vyhledány publikace zabývající se Krügerovou klapkou a zvláště vyhledány publikace, u kterých byla využita dynamická síť a které se týkaly aerodynamiky.

### 1.2.1 Nestacionární CFD modely Krügerovy klapky

Bylo nalezeno poměrně velké množství publikací, které využívaly CFD modelu k optimalizaci tvaru Krügerovy klapky ([9] a [10]), nebo se zabývaly přímo návrhem konkrétní klapky a jejím srovnáním se sloty ([11], [6]). V žádné z nich ale nebyla cílem nestacionární simulace vysouvání samotné klapky. Publikace zabývající se nestacionární simulací proudění okolo Krügerovy klapky byla nalezena jediná: [12]. Nezkoumá sice vysouvání klapky, ale i přesto poskytuje důležité informace.

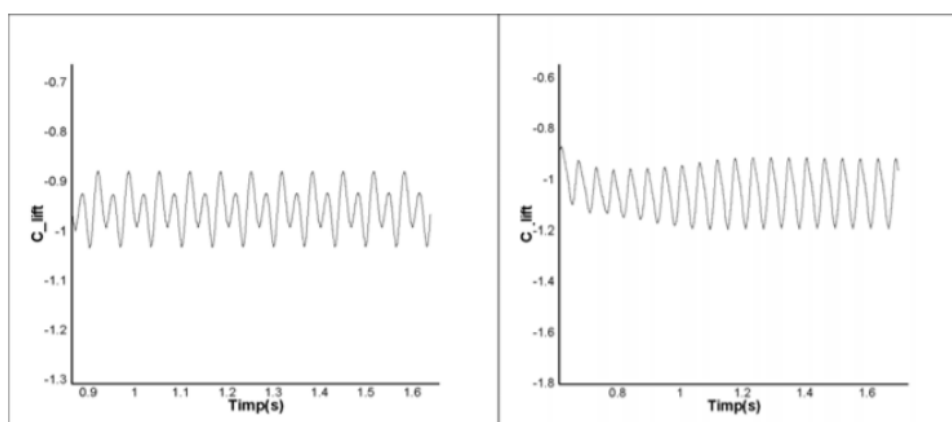
■ M. G. Cojocar, M. L. Niculescu, a C. Vadean (2012) [12]

Tato publikace pojednává o nestacionárním modelu profilu s Krügerovou klapkou a klasickou klapkou pro 3 konfigurace Krügerovy klapky viz. Obrázek 1.10. Výpočty byly provedeny pro délku profilu 0.23 m, rychlost proudění 70 m/s a časový krok  $1 \cdot 10^{-4}$  s. Využit byl řešič na základě hustoty (density-based). Výpočty byly provedeny pro úhly náběhu  $\alpha$  v rozmezí od  $-10^\circ$  do  $+20^\circ$ .



Obrázek 1.5: Použitá geometrie pro [12]

Výsledkem těchto výpočtů je zjištění, že  $c_l$  a  $c_d$  při použití Krügerovy klapky má výrazně oscilační charakter. Frekvence a amplituda těchto oscilací se poměrně výrazně mění dle  $\alpha$ .



Obrázek 1.6: Oscilace  $c_l$  pro  $\alpha = -6^\circ$  (vlevo) a pro  $\alpha = -10^\circ$  (vpravo) [12]

Obsahem studie jsou také poměrně rozsáhlé charakteristiky vypočtených oscilací, tedy frekvence a amplitudy. Jelikož tyto charakteristiky jsou poměrně různorodé a jde o velké množství dat, tak zde nejsou uvedeny. Publikace také obsahuje rozložení  $c_p$  na Krügerově klapce.

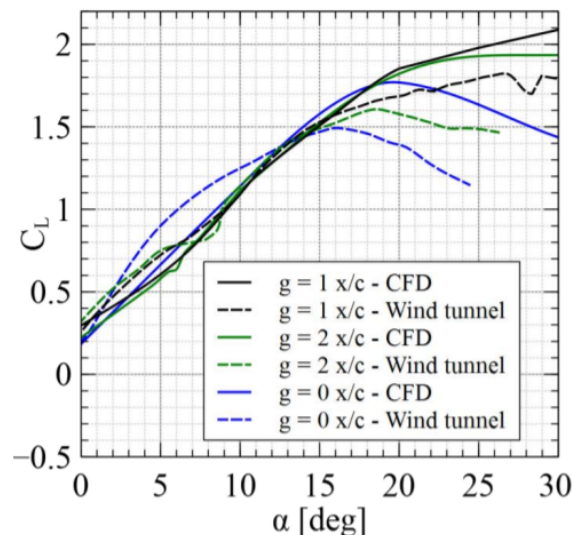
Na základě výše popsané studie se dá předpokládat, že hodnoty  $c_l$  a  $c_d$  mohou mít oscilační charakter i při vysouvání klapky. Konkrétní hodnoty se ale budou lišit.

### 1.2.2 Srovnání CFD modelů a experimentálního měření

R. Kulhánek, Z. Pátek, P. Vrchota, N. Žižkovský a J. Čečrdle (2018) [13]; R. Kulhánek, P. Vrchota, P. Procházka a V. Uruba (2020) [14]

Dvojice studií provedených ve VZLÚ se zabývá CFD výpočty a tunelovými měřeními různých konfigurací Krügerovy klapky.

[13] se zabývá vlivem mezery mezi klapkou a profilem na aerodynamické charakteristiky. Bylo zjištěno, že i miniaturní mezera má poměrně velký vliv na hodnoty  $c_l$  a  $c_d$ . Pro velké úhly náběhu je patrný poměrně velký rozdíl mezi daty z CFD modelu a daty z experimentálního měření.



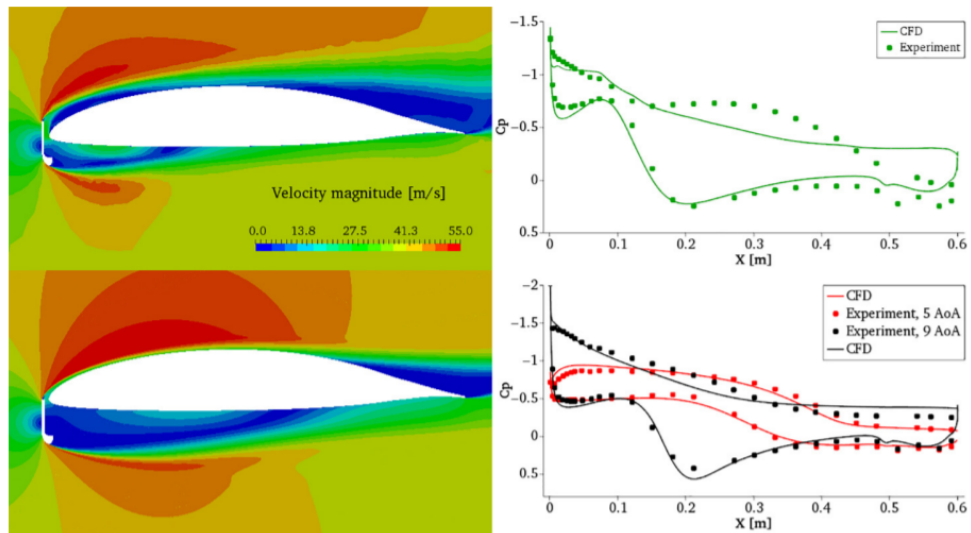
**Obrázek 1.7:** Srovnání vypočtených a experimentálních hodnot pro různé velikosti mezery [13]

[14] se zaměřuje na polohy Krügerovy klapky během jejího vysouvání, a to primárně na polohy kolmé na tětívu profilu. K tomuto účelu byly vytvořeny stacionární modely a byla provedena měření v aerodynamickém tunelu. Dále byl zkoumán vliv posunu klapky v ose Y nad tětívu profilu. Výpočty i měření byly provedeny pro  $Re = 1,5 \cdot 10^6$ .

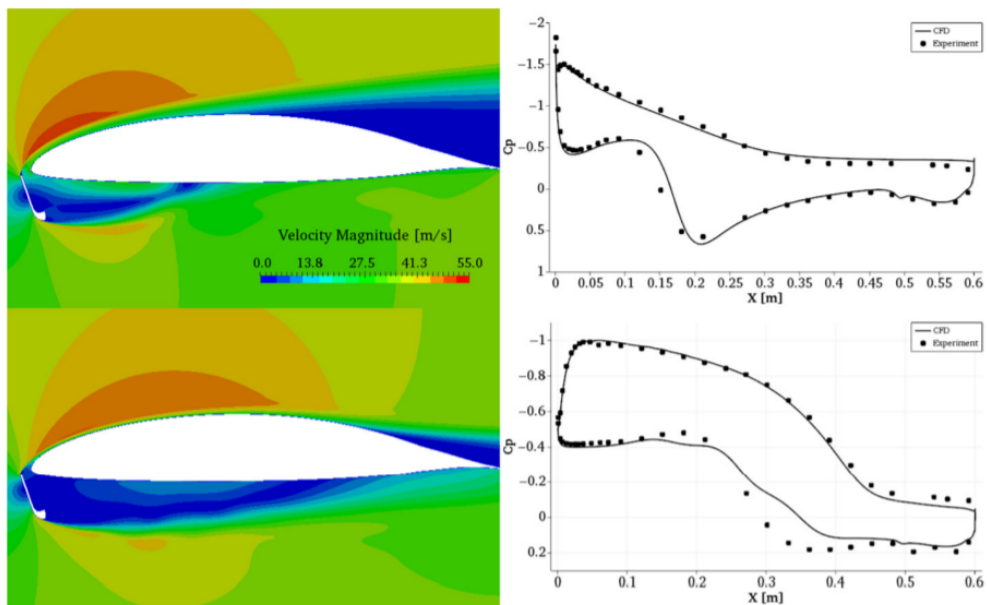
Výsledkem výpočtů a měření bylo zjištění, že nejnepříznivější není pozice klapky kolmá na tětívu profilu, ale pozice, kdy je klapka nakloněna více k profilu. Dále bylo zjištěno, že vertikální poloha klapky má poměrně velký vliv na vztlak. Klapka umístěná výše nad tětívu má na  $c_l$  negativní vliv.

Experimentální a CFD výsledky spolu poměrně dobře korelují pro níže položenou klapku a úhel náběhu  $\alpha = 5^\circ$ . Pro stejnou polohu klapky a  $\alpha = 10^\circ$  jsou již rozdíly trochu vyšší.

Poměrně velké rozdíly mezi experimentálními a numerickými daty pro vyšší polohu klapky jsou způsobeny „nepřesným zachycením oddělení a opětovného připojení proudění CFD řešičem.“ [14].



**Obrázek 1.8:** Kontury rychlosti CFD (vlevo) a porovnání  $c_p$  (vpravo) pro 2 konfigurace klapky [14]



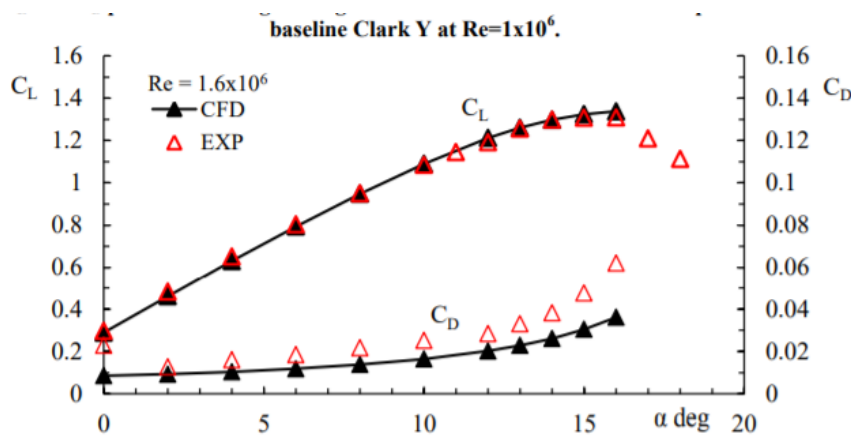
**Obrázek 1.9:** Kontury rychlosti CFD (vlevo) a porovnání  $c_p$  (vpravo) pro  $\alpha = 5^\circ$  (nahore) a  $\alpha = 10^\circ$  (dole) [14]



### ■ V. M. Moraris, N. J. Lawson, a K. P. Garry (2012) [15]

V této studii byl proveden CFD výpočet profily Clark Y s pasivní Krügerovou klapkou. Výsledky pak byly porovnány s tunelovým měřením. Byla použita hybridní síť a provedena studie nezávislosti výsledku na síti. Síť v oblasti mezní vrstvy byla vytvořena tak, aby  $y^+ \leq 1$ . Použit byl turbulentní model  $k - \omega$  SST a výpočetní algoritmus SIMPLE.

Odchylka vypočtených hodnot od dat experimentálních je do 5% pro  $c_l$ . Vypočtené hodnoty  $c_d$  dobře korespondují s experimentálními hodnotami pro nízké úhly náběhu. Pro vyšší  $\alpha$  už je rozdíl znatelný.



Obrázek 1.10: Porovnání vypočtených a experimentálních hodnot [15]

### ■ 1.2.3 Využití dynamické sítě v aerodynamických výpočtech

#### ■ E. Q. Hussein, H. N. Azziz, a F. L. Rashid, (2021) [16]

V této studii je zkoumán vliv velikosti jednoštěrbínové klapky a její vzdálenosti od profilu na aerodynamické charakteristiky. Dynamická síť je tu využita k simulování různého vychýlení klapky. Vlastnosti dynamické sítě a ani nestacionárního modelu v této studii nejsou popsány. Výpočet probíhal pro  $Re = 3,1 \cdot 10^6$ , použit byl turbulentní model  $k - \omega$  SST a byla provedena studie nezávislosti výsledku na síti.

Výsledky dále byly porovnány s daty z tunelových měření z jiné publikace. Toto porovnání naznačuje, že by využití dynamické sítě mohlo být poměrně přesné. Chybějící informace ohledně dynamické sítě ale znemožňují ozkoušení podobných parametrů.

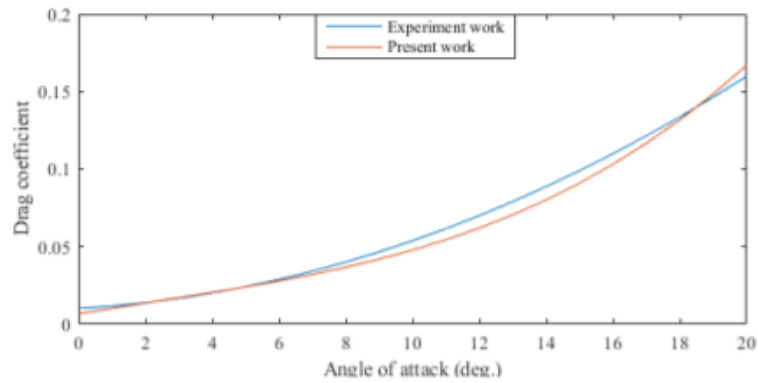


Figure 15. Drag coefficient variation with angle of attack for different technique

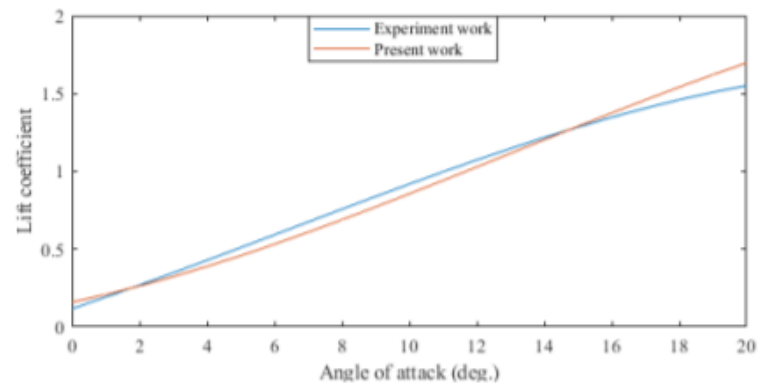


Figure 16. Lift coefficient variation with attack angle for different technique

Obrázek 1.11: Porovnání vypočtených hodnot  $c_d$  (nahore) a  $c_l$  (dole) s experimentálními daty [16]

### 1.3 Dynamická síť v CFD modelování

„Dynamická síť je síť, která dokáže modelovat proudění, ve kterém se síť mění s časem v důsledku pohybu hranic.“ [17]. Obecně platí, že dynamické sítě se využije u modelů, které vyžadují pohyblivou oblast sítě. Síť se během těchto pohybů mění v čase. Dynamická síť může být definována pomocí UDF (User defined function), nebo pomocí 6DOF. Funkce 6DOF neboli 6 stupňů volnosti (6 degrees of freedom) umožňuje spočítat aerodynamické či hydrodynamické síly působící na dané hranice a také umožňuje určit pohyb, který tyto síly vyvolají. Dynamická síť se pak přetváří i tímto vyvolaným pohybem. To může být zajímavé řešení například v aeroelasticitě. Při vysouvání Krügerovy klapky se tato funkce ale nevyžije.

Jelikož modely v praktické části jsou vytvořeny v programu ANSYS Fluent, tak se následující informace vztahují hlavně k metodám dynamické sítě použitým v tomto softwaru.

V jiných řešičích se vlastnosti sítě a výpočetní algoritmy mohou lišit.

Základním stavebním blokem pro dynamické sítě v rámci ANSYS FLUENT je kombinace 3 dynamických metod: smoothing (vyhlazování), layering (vrstvení) a remeshing. [17]

### ■ 1.3.1 Vyhlazování (Smoothing)

Metoda vyhlazování (smoothing) upravuje síť v oblasti, kde se vyskytuje posouvající se nebo deformující se hranice. Vnitřní uzly (nodes) se pohybují, ale nemění se jejich počet ani jejich konektivita. Takto vnitřní uzly absorbují pohyb hranic. [1]. Pro problematiku vysouvání klapky lze využít 2 základní typy metody smoothing:

- Metoda difuze (diffusion)
- Metoda pružiny (spring-based)

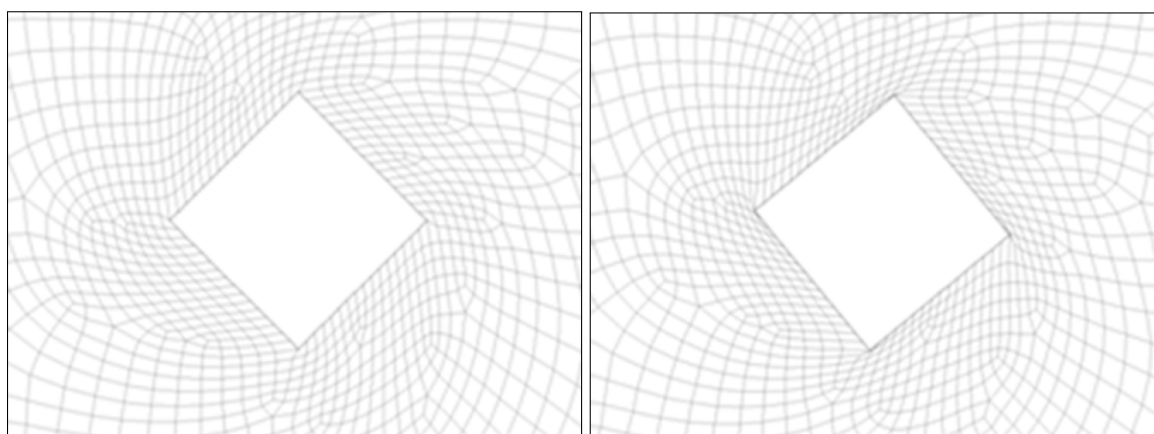
#### ■ Vyhlazování na základě difuze

Při této metodě je pohyb sítě řízen rovnicí difuze,

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla \vec{u}) = 0 \quad (1.1)$$

kde  $\vec{u}$  je rychlost posuvu sítě. Okrajové podmínky jsou předepsány uživatelem, nebo pomocí 6DOF. Pokud dochází k deformaci hranice, pak Rovnice 1.1 popisuje, jak předepsaný pohyb difunduje dovnitř sítě. Rovnice 1.1 je dále ve Fluentu vyřešena buď pomocí diskretizace metodou konečných prvků a rychlosti posuvu, nebo pomocí metody konečných objemů. Koeficient difuze  $\gamma$  v rovnici lze použít k řízení toho, jak bude pohyb ovlivňovat vnitřek sítě. Difuzní koeficient může být funkcí buď vzdálenosti od hranice, nebo objemu buňky. Při použití funkce vzdálenosti od hranice lze lépe korigovat, jak se síť bude měnit v závislosti na vzdálenosti od hranice. Toto umožňuje lépe zachovat tvar buněk v blízkosti pohybující se hranice a pohyb je pak pohlčen buňkami, které jsou dále. [1]

Nevýhodou této metody oproti metodě pružiny je větší výpočetní náročnost, ale měla by vyústit v kvalitnější síť, zejména pro deformace sítě a pro rotační pohyb. Na následujícím obrázku je srovnání metody difuze a metody pružiny pro síť deformovanou rotujícím čtyřúhelníkem.



(a) : Metoda difuze; síť po rotaci o 45°

(b) : Metoda pružiny; síť po rotaci o 40°

**Obrazek 1.12:** Porovnání deformace sítě pro různé metody funkce vyhlazování

### 1.3.2 Metoda pružiny (Spring-based)

„Pro tuto metodu jsou hrany mezi uzly sítě idealizovány jako síť pružin, kde počáteční tvar představuje rovnovážný stav sítě. Posun v daném hraničním uzlu generuje sílu úměrnou posunutí všech pružin propojených s daným uzlem“ [1]

Využitím Hookova zákona může být síla působící na uzel sítě zapsána jako

$$\vec{F}_i = \sum_j^{n_i} k_{ij} (\Delta \vec{x}_j - \Delta \vec{x}_i), \quad (1.2)$$

kde  $\vec{x}_i$  je posun daného uzlu a  $\vec{x}_j$  je posun jeho souseda.  $n_i$  je počet sousedících uzlů a  $k_{ij}$  je tuhost pružiny mezi uzlem a jeho sousedem. Protože pro hranice je posun známý, je rovnice 1.2 pro všechny vnitřní uzle vyřešena pomocí Jacobiho metody. [1]

Vlastnosti deformace sítě a tuhost pružin lze kontrolovat pomocí nastavení faktoru tuhosti pružiny, který má hodnotu mezi 0 a 1. Hodnota 0 znamená nulové tlumení pružin. Řešení rovnice 1.2 lze dále kontrolovat pomocí maximálního počtu iterací a pomocí hodnoty tolerance konvergence. [1]

Metoda pružiny je vhodná převážně pro posuvné pohyby v jednom směru, a to ideálně ve směru normály hranice.

Obě dvě výše popsané metody mohou při velkém rotačním pohybu hranice vést k ne úplně optimálnímu přetvoření sítě.

### 1.3.3 Vrstvení (Layering)

„Metoda dynamického vrstvení (layering) je používána pro přidání vrstvy buněk, nebo pro

její odebrání od vrstvy buněk sousedící s pohybující se hranicí. Toto může záviset na výšce buněk sousedících s pohybující se hranicí. Tato hraniční vrstva buněk je buď rozdělena, nebo je spojena se sousední vrstvou buněk. “ [17]

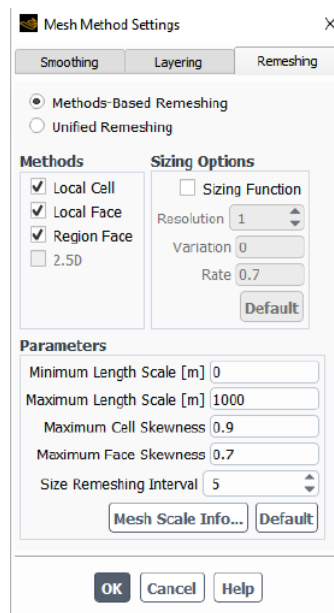
Z Users Fluent manuálu [1] není zcela patrné, jestli se tato metoda vztahuje pouze na čtyřúhelníkové buňky, nebo i buňky trojúhelníkové.

### 1.3.4 Remeshing

Když je posun hranice velký oproti místní velikosti buněk, tak se kvalita buněk může zhoršit, nebo mohou buňky degenerovat, pokud se použije pouze metoda vyhlazování sítě. Toto může vést k vzniku neplatné sítě, která může způsobit vznik negativních objemů, či způsobit problémy s konvergencí výsledků. [1]

Proto Fluent buňky, které nesplňují zadané podmínky šikmosti a velikosti, lokálně přetvoří. Pokud výsledné nové buňky splňují kritéria šikmosti a velikosti, je síť aktualizována. Pokud nové buňky tato kritéria nesplňují, je ponechána původní síť. [17]

Parametry remeshingu viz. Obrázek 1.13 lze ovlivnit zadáním hodnot pro maximální šikmost, minimální délku buňky a maximální délku buňky. Přesítování buněk dle kritéria šikmosti je prováděno každý časový krok. Oproti tomu interval přesítování dle kritéria velikosti je definován uživatelem. Pro 2D modely je z uvedených možností vhodná pouze metoda Local Cell. Fluent dále umožňuje i kontrolu velikosti dle velikostní funkce (Sizing Function), která ale vyžaduje důkladnější nastavení. [1]



Obrázek 1.13: Možnosti nastavení funkce remeshing

Jednotný remeshing (Unified Remeshing) je metoda remeshingu doporučená manuálem Fluent pro většinu případů využití dynamické sítě. Tato funkce zlepšuje kvalitu sítě pomocí algoritmu, který kombinuje aspekty různých metod remeshingu a primárně se snaží o zachování rozložení velikosti buněk z původní sítě. Tato funkce by měla být snadněji použitelná a měla by poskytovat větší robustnost modelu. [1]

### 1.3.5 User defined function (UDF)

Pohyb hranice dynamické sítě je definován pomocí uživatelem definované funkce UDF. UDF se ale neuplatňuje jen v dynamických sítích. Má poměrně široké využití, a v rámci Ansys Fluent má dokonce vlastní manuál viz. [18].

UDF lze definovat takto: „UDF je funkce v C nebo C++, kterou lze dynamicky načíst pomocí Ansys Fluent pro vylepšení jeho standardních funkcí.“ [18] Mezi mnohá využití patří např. přizpůsobení okrajové podmínky, definice materiálových vlastností, povrchové a objemové reakční rychlosti, zdrojové termíny v transportních rovnicích Ansys Fluent, zdrojové termíny v uživatelsky definovaném skalárním (UDS) transportu rovnice, funkce difuzivity atd. Typicky se pomocí UDF dá nastavit rychlostní profil proudění na vstupu trubky. [18]

Každá UDF musí být definována pomocí příkazu DEFINE a makra. Ta jsou předdefinována a vypsána v [18]. Každé takové makro pak obsahuje parametry, které je nutné definovat. Následující tabulka uvádí makra, která se dají využít pro kontrolu dynamické sítě, a také uvádí to, co jednotlivá makra dělají.

Funkce	DEFINE Macro
Pohyb těžiště	DEFINE_CG_MOTION
Střed víření (válcové funkce)	DEFINE_DYNAMIC_ZONE_PROPERTY
Mění se výška buněk při vrstvení	DEFINE_DYNAMIC_ZONE_PROPERTY
Pohyb sítě	DEFINE_GRID_MOTION
Periodický posuv	DEFINE_PERDISP_MOTION
Deformace geometrie	DEFINE_GEOM
Vlastnosti funkce 6DOF	DEFINE_SDOF_PROPERTIES
Detekce kontaktu	DEFINE_CONTACT

**Tabulka 1.1:** Definovaná makra pro dynamickou síť a jejich využití [18]





## Kapitola 2

### Praktická část

Praktickou část diplomové práce tvoří jednoduchý návrh 2D modelu profilu s Krügerovou klapkou a výpočet aerodynamických charakteristik při vysouvání této klapky s aplikováním dynamické sítě (dynamic mesh). Jelikož použití dynamické sítě v aerodynamických výpočtech je velmi řídké, šlo jen částečně postupovat dle osvědčených postupů.

Cílem tohoto zkušebního modelu bylo zjistit, zda je možné dynamickou síť na tento případ vůbec aplikovat, dále pak nalezení celkového postupu tvorby modelu pro tento typ problému. V neposlední řadě je i snaha o získání hodnot parametrů modelu, při kterých by byl model funkční a během výpočtu by docházelo k relativně dobré konvergenci sledovaných hodnot (pokud možno).

Velkou část práce tedy tvoří testování mnoha modelů s rozdílnými parametry nejen dynamické sítě. Největší důraz byl kladen na samotnou funkčnost dynamické sítě, jelikož když dojde k chybě při přetváření sítě, tak dojde k přerušení celého výpočtu, a výsledky jde jen obtížně analyzovat. Důležitost dosažených vlastností modelu by bylo možné brát tedy v pořadí funkčnost, konvergence výsledků, přesnost/strojový čas.

Byla brána v úvahu i výpočetní, tedy i časová, náročnost modelu. Časové údaje provedených výpočtů lze ale určit jen rámcově, protože většina výpočtů byla provedena na výpočetním serveru FS ČVUT, a nelze tedy vyloučit krátkodobý či dlouhodobý pokles výkonu, ke kterému může dojít při zabrání strojového času jinými uživateli.

Všechny výpočty byly provedeny v softwaru ANSYS Fluent 2021 R2. Analýza výsledků byla dále prováděna přímo ve Fluentu, nebo v Matlabu.



## 2.1 Návrh geometrie a tvorba sítě

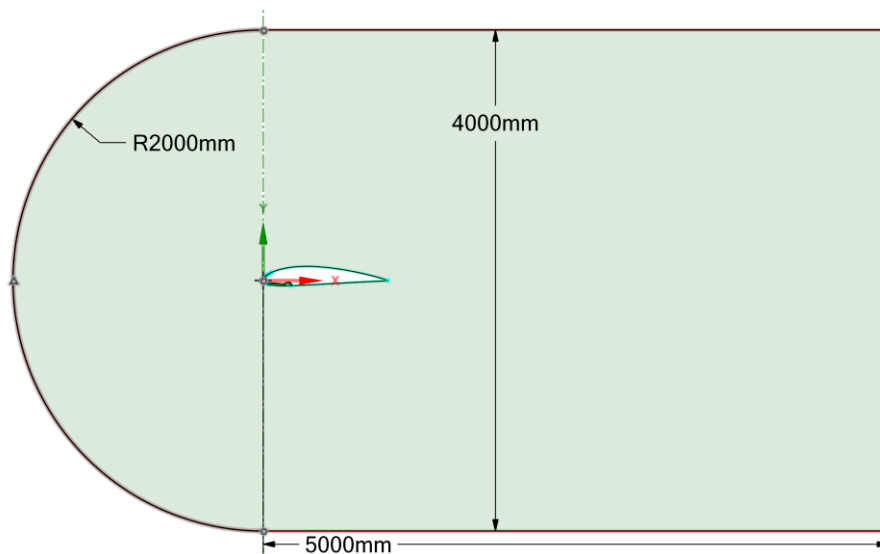
### 2.1.1 Tvar a velikost oblasti proudění

Zvolený tvar oblasti proudění až na drobné odchylky odpovídá tvaru v literatuře označovaném jako C-typ. Oblast proudění byla pro tento primárně zkušební model navržena značně menší, než je nutné pro přesný model, jelikož vytvořený model je zaměřen primárně na hledání funkčního řešení. Se zvětšením oblasti by se násobně zvýšil počet buněk při zachování jejich přibližně stejné velikosti, čímž by se i znatelně prodloužil výpočetní čas. Jelikož během optimalizace bylo provedeno mnoho výpočtů s různými parametry, bylo vhodné, aby byl výpočetní čas co nejkratší, ale aby byly přibližně respektovány požadavky modelu.

Pro výpočty s větším důrazem na přesnost by měla být vzdálenost vstupu proudění od profilu, tedy i rádius oblasti C-typu, dle provedené studie [19] alespoň 10 - 15  $c$ , kde  $c$  je hloubka profilu.

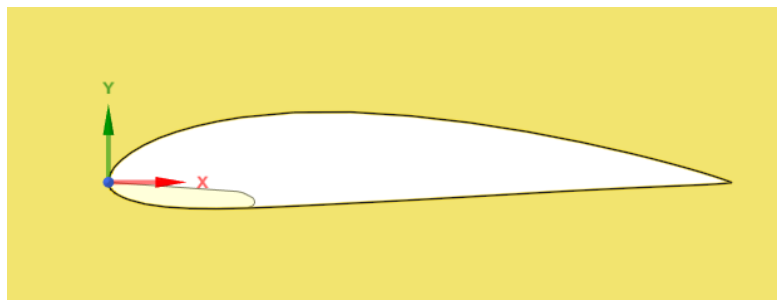
### 2.1.2 Návrh geometrie profilu a klapky

Profil pro zkušební model byl zvolen NACA 4415, a to převážně z důvodu dostupných aerodynamických podkladů z tunelových měření uvedených v NACA Reportu [20]. Pro zjednodušení byl použit profil o celkové hloubce 1 m. Geometrie profilu je určena souřadnicemi bodů v rovině XY a byla získána z [21], kde jsou tyto souřadnice volně dostupné. Celková geometrie oblasti proudění i s profilem a klapkou je znázorněna na Obrázku 2.1.

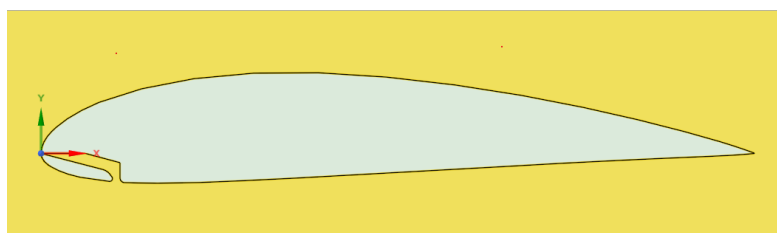


**Obrázek 2.1:** Geometrie a rozměry prostoru proudění pro zkušební model

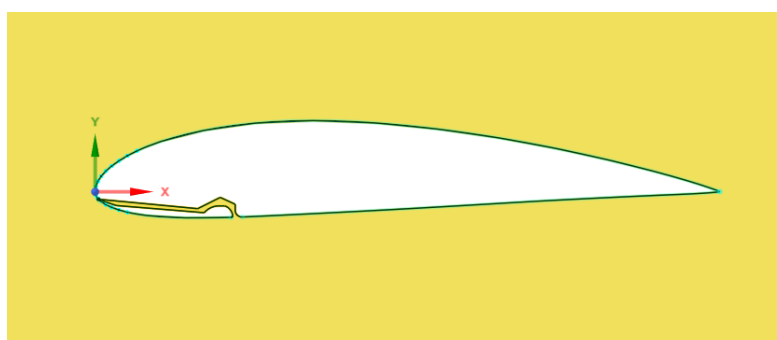
Samotný tvar Krügerovy klapky byl jen zjednodušeně vytvořen z geometrie profilu. Vytvořená klapka je Krügerova jednoduchá klapka. Při tvorbě geometrie klapky bylo dále částečně vycházeno z tvarů klapky uvedených v [8], [13], [10] a [6]. Při návrhu geometrie pro tento zkušební model byly brány v potaz 3 možné schématické návrhy, které byly označeny jako A, B, C (viz. následující obrázky).



**Obrázek 2.2:** Geometrické schéma A



**Obrázek 2.3:** Geometrické schéma B



**Obrázek 2.4:** Geometrické schéma C

Možnost A byla zavržena hned v počátku, jelikož by nebylo možné namodelovat síť pro mezní vrstvu v oblasti klapky. Možnost B byla po otestování zavržena z důvodů problematiky

tvorby sítě a samotného dynamického meshe v bodě dotyku klapky a zbytku profilu. Z navržených možností nakonec byla vybrána možnost C. Zaprvé, kvůli bezproblémovému návržení sítě v oblastech mezní vrstvy, a to jak klapky, tak samotného profilu. Zadruhé, kvůli dobré funkčnosti modelu vysunutí klapky a dynamické sítě. Zároveň tím lze zaručit bezproblémový pohyb klapky a také správný pohyb části sítě v jejím okolí, která zachycuje její mezní vrstvu.

Problémem tohoto návrhu C, dále už jen návrhu, mohou být mezery mezi klapkou a zbytkem profilu na náběžné hraně a na spodní straně profilu. Proto byla snaha, aby mezery byly co nejmenší. Volbou tohoto modelu se však do výpočtu zavedou nepřesnosti. Z toho důvodu byly provedeny statické výpočty pro tento návrh geometrie a pro čistý profil, které spolu byly následně porovnány. Těmito výpočty se více zabývá následující kapitola. Z tohoto porovnání lze dále odhadnout přibližnou počáteční nepřesnost, kterou se použitím tohoto návrhu dopustíme. Po provedení několika prvních pokusů použití dynamické sítě byla oproti původnímu návrhu geometrie mírně upravena přední část klapky (u náběžné hrany). Změna je patrná jen při velkém detailu a je více rozebrána v kapitole o problematice negativních objemů. Geometrie byla vytvořena v softwaru SpaceClaim, který je součástí ANSYSu.

### 2.1.3 Tvorba sítě

Sít byla vytvořena přímo v softwaru Ansys v podprogramu s názvem Mesh. Pro zasítování byla použita hybridní síť z čtyřúhelníkových a trojúhelníkových buněk. Okolí klapky a profilu je tvořeno vrstvou čtyřúhelníkových buněk zachycujících mezní vrstvu. Zbytek sítě tvoří trojúhelníkové buňky.

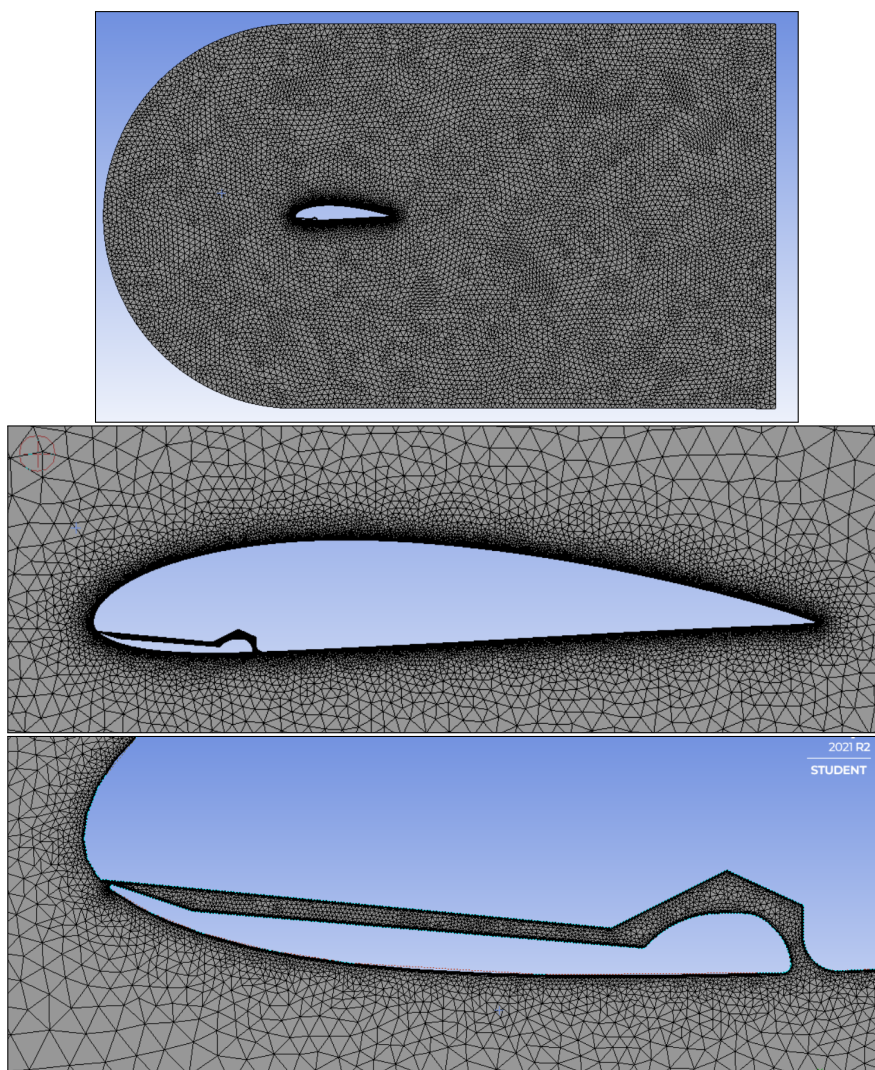
Všeobecně by měla sice být strukturovaná síť z čtyřúhelníkových buněk přesnější, ale pro komplikovanější geometrii v okolí klapky se nehodí. Trojúhelníkové buňky také lépe zvládají deformaci způsobenou dynamickou sítí. Dle manuálu pro Fluent [1] je doporučeno pro komplikovanější pohyby použití trojúhelníkových buněk, jelikož při velkých změnách může u čtyřúhelníkových buněk dojít k jejich tvarové degradaci a k velkému zhoršení kvality sítě.

Pohyb vysouvání Krügerovy klapky je poměrně komplikovaný, jedná se o rotaci v kombinaci s posuvem, navíc dochází mezi klapkou a profilem k poměrně rozsáhlým změnám sítě a k nelineární tvorbě nových buněk. Dá se předpokládat, že by vznikaly buňky o neúměrně velké šikmosti (skewness).

Nevýhodou nestrukturované sítě však je, že na ní provedené výpočty všeobecně hůře konvergují. V některých případech může dojít ke zhoršení přesnosti. Dle Aftomsise [22] jsou dokonce nestrukturované trojúhelníkové sítě až 50krát náročnější na výpočetní paměť a čas při zachování stejné přesnosti. Použití strukturovaného meshe má tedy velké výhody, ale pro tento model se kvůli výše zmíněné problematice složité geometrie a přetváření sítě nehodí.

Dílčím cílem bylo vytvořit síť, která by měla okolo 100 000 buněk, a to vzhledem k časové náročnosti výpočtu i vzhledem k vykreslování meshe.

Velikost buněk byla definována jako 0.05 m. Na klapku a profil byla použita funkce Edge Sizing a byla definována velikost 0,001 m. Hodnota rychlosti růstu buněk Grow Rate byla z původní hodnoty 1,2 změněna na hodnotu 1,1.

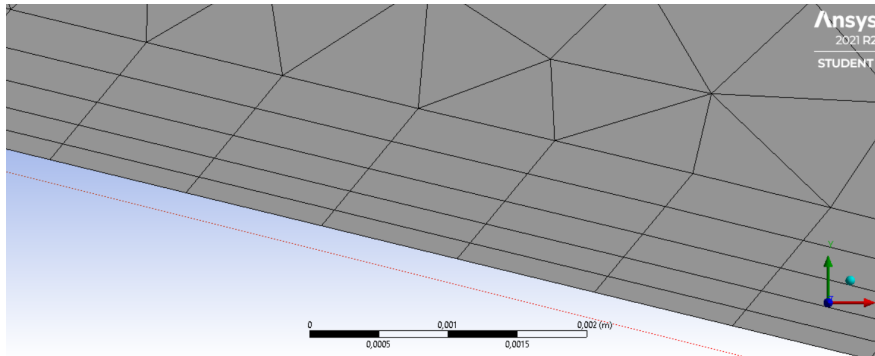


**Obrázek 2.5:** Síť zkušebního modelu

Pro tvorbu strukturované čtyřúhelníkové oblasti v okolí klapky a profilu byla použita funkce Inflation.

Ve výpočtech byly použity 2 různé sítě, které se lišily právě v oblasti mezní vrstvy.

- Prvotní hrubší síť brala jen částečně v potaz hodnotu  $y^+$  klapky a profilu. Zde byla inflační vrstva o tloušťce 5 buněk a o výchozích hodnotách. Tato síť bylo použita pro většinu pokusů při snaze o nalezení optimálních parametrů modelu. Pro zachování možnosti lepšího porovnání byla použita i u dalších výpočtů i přesto, že oproti druhé variantě nejspíše hůře zachycovala mezní vrstvu klapky a profilu.

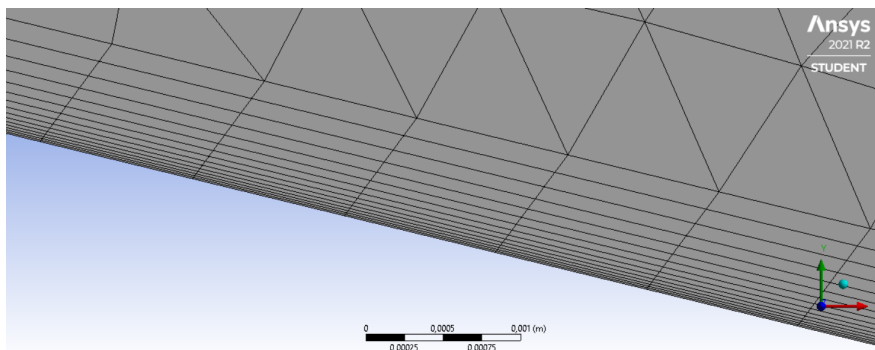


**Obrázek 2.6:** Detail hrubé sítě mezní vrstvy

- Druhotná jemnější síť byla použita hlavně pro statické výpočty a pro vybrané případy modelu vysouvání klapky. Oproti předchozí síti byla 1. vrstva sítě optimalizována pro hodnotu  $y^+ = 1$ . Pro odhadnutí tloušťky 1. vrstvy byl použit vztah:

$$\Delta y = L \cdot y^+ \cdot \sqrt{74} \cdot Re_L^{-13/14} \quad (2.1)$$

Pro vstupní hodnoty proudění vyjde po dosazení do výše zmíněného vztahu  $\Delta y = 8 \cdot 10^{-6} m$ . Tato hodnota byla zaokrouhlena a tloušťka 1. vrstvy sítě v okolí klapky a profilu byla definována jako  $1 \cdot 10^{-5} m$ . Bylo zvoleno 15 vrstev. To převážně z důvodu, aby nedocházelo k vzájemnému překrývání nebo k jiné tvarové degradaci vrstev klapky a profilu v mezeře mezi nimi na náběžné hraně.



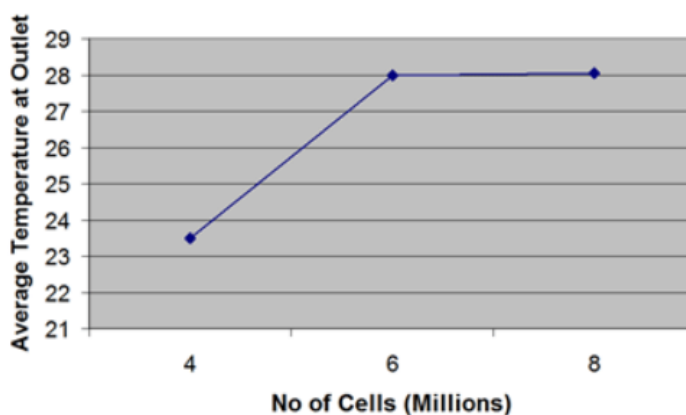
**Obrázek 2.7:** Detail jemné sítě mezní vrstvy

### 2.1.4 Studie nezávislosti na síti (Mesh Independence Study)

Pro ověření přesnosti by správně měla být provedena mesh Independence Study, neboli studie nezávislosti na síti.

Tato studie zaručuje nezávislost řešení na samotné síti, tedy to, že hustota sítě neovlivní výsledek výpočtu. Tato kontrola může být ale velmi časově náročná.

Nejlepší způsob, jak při kontrole postupovat, je sledování závislosti počtu buněk a sledovaných výsledků po jejich konvergenci. Uváděné dostatečně nízké hodnoty jsou  $1 \cdot 10^{-4}$  pro residua a 1% pro nerovnováhu. Nejdříve je proveden výpočet v původní síti a zaznamenán výsledek. Dalším krokem je vytvoření sítě s přibližně 1,5x větším počtem buněk oproti původní síti a provedení výpočtu. Následně jsou výsledky porovnány. Pokud se do námi určené míry neliší, lze prohlásit, že výsledek je nezávislý na síti. Pokud se výsledky liší více, než je přípustné, je opět navýšen počet buněk sítě. Toto se opakuje, dokud nedojde k zajištění nezávislosti výsledku na síti. Závislost řešení na počtu buněk sítě lze i graficky znázornit (viz. následující obrázek). [23]



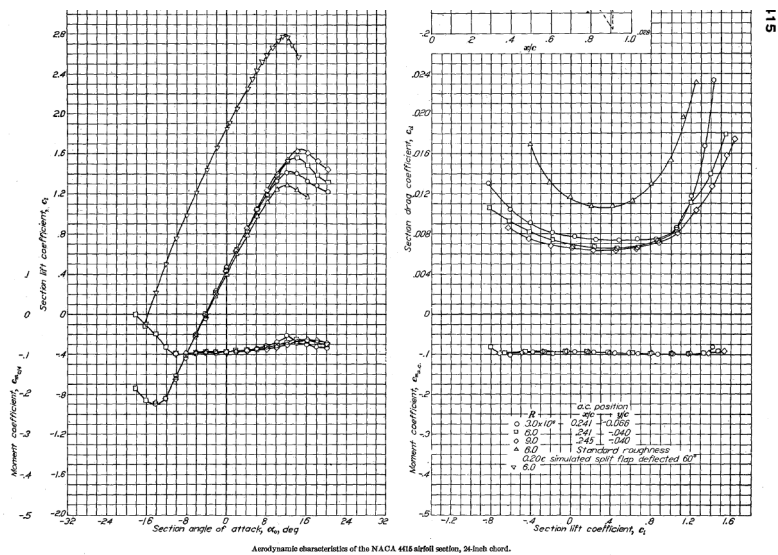
**Obrázek 2.8:** Příklad studie nezávislosti na síti [23]

Vlivem dynamické sítě ale dochází v průběhu času v meshi k poměrně velkým změnám, a tak by nešlo zaručit platnost této studie pro všechny časové kroky. Pro výpočty s vyšší přesností by tuto studii ale nejspíš dávalo smysl provést, jelikož by určila nezávislost alespoň v počátečním kroku, ze které by dále šlo částečně vycházet. Mesh independence study byla provedena v [16], kde slouží ke kontrole sítě v čase  $t = 0$ . Autor v této práci provádí výpočet pomocí dynamické sítě.

Hlavně kvůli výše zmíněnému faktoru a také kvůli časové náročnosti nebyla tato studie provedena.

## 2.2 Srovnání geometrického návrhu s čistým profilem

Jak je z obrázků patrné, jsou v navržené geometrii oproti reálnému případu zasunutá klapky mezery, kterými může proudit vzduch. Proto byly provedeny další srovnávací výpočty. Cílem těchto výpočtů bylo zjistit, jaký vliv bude mít mezera na náběžné hraně profilu na jeho aerodynamické vlastnosti, a to zejména na součinitel vztlaku  $c_l$ , součinitel odporu  $c_d$  a součinitel tlaku  $c_p$  po hloubce profilu. Tyto výpočty byly dále porovnány se známými hodnotami  $c_l$  a  $c_p$  z tunelových měření uvedených v Reportu NACA [20]. Pro co nejpřesnější odečtení dat z grafů na Obrázku 2.9 byl použit program WebPlotDigitizer dostupný na <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>.



**Obrázek 2.9:** Data z tunelových měření pro profil NACA 4415 [20]

Úhel náběhu profilu  $\alpha$  byl pro tyto výpočty určen jako  $0^\circ$ . Dá se předpokládat, že při tomto úhlu bude vliv mezer největší, a to zejména vliv na koeficient odporu  $c_d$ . Pro možnost porovnání s daty z NACA Reportu byla vypočtena rychlost proudění vzduchu pro Reynoldsovo číslo 3 000 000 dle vztahu (2.2), kde  $d$  je hloubka křídla 1 m.

Odpovídající rychlost proudění je  $v = 42,5 \text{ m/s}$ .

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (2.2)$$

Pro výpočet byly použity 2 geometrické modely a jejich sítě:

- Profil se zasunutou Krügerovou klapkou
- Čistý profil NACA 4415



Jako model s klapkou byl použit model navržený v předchozí kapitole viz. Obrázek 2.5 s jemnější sítí mezní vrstvy. Výpočty pro oba modely byly provedeny pro stejné podmínky proudění odpovídající standardní atmosféře ve výšce 0 m a pro rychlost proudění 42,5 m/s. Výpočet byl proveden pomocí turbulentních modelů Spalart-Allmaras a Transient SST. Tyto 2 modely byly vybrány, protože jsou používány i pro nestacionární výpočty. Dle výsledků lze také přibližně odhadnout přesnost turbulentního modelu pro daný problém. Jedná se ale jen o určení přesnosti před změnami geometrie v průběhu vysouvání klapky. Jako výpočetní algoritmus byl zvolen Coupled.

Výpočty pomocí Spalart-Allmaras byly provedeny do dosažení hodnoty residua kontinuity  $1 \cdot 10^{-6}$ , nebo do dosažení neměnných hodnot  $c_l$  na 6. desetinném místě v posledních 10 iteracích.

Dosažení dobrého stupně konvergence při použití modelu Transition SST je komplikovanější. Pro model čistého profilu byla brána neměnná hodnota  $c_l$  na 6. desetinném místě v posledních 10 iteracích. Pro model s klapkou ale dochází i po ustálení hodnot k jejich mírné oscilaci. Jako výsledná hodnota byla tedy brána střední hodnota této oscilace a iterace, při které došlo k ustálení do tohoto stavu.

Výpočty slouží i k předběžnému určení počtu potřebných iterací pro konvergenci, proto byly tyto počty zaznamenány. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty  $c_l$  a  $c_d$  z tunelových měření profilu NACA 4415 uvedené v NACA Reportu pro  $Re = 3 \cdot 10^6$ .

	$c_l$ [1]	$c_d$ [1]
Tunelové měření	0,455	0.0075

**Tabulka 2.1:** Data z tunelových měření odečtená z [20]

V další tabulce jsou uvedeny vypočtené hodnoty  $c_l$ ,  $c_d$  pro čistý profil a pro profil s klapkou, a to pro oba použité turbulentní modely.

	Turbulentní model	$c_l$ [1]	$c_d$ [1]	iterace
Čistý profil	Spalart-Allmaras	0,389040	0,011318	185
Čistý profil	Transition STT	0,455711	0,007550	637
Profil s klapkou	Spalart-Allmaras	0,423494	0,013195	212
Profil s klapkou	Transition SST	0,469275	0,009409	340

**Tabulka 2.2:** Vypočtené hodnoty  $c_l$  a  $c_d$  pro navrženou geometrii a čistý profil

Z vypočtených hodnot pro čistý profil je patrné, že při použití turbulentního modelu Transition SST dochází k dosažení prakticky stejných hodnot jako při tunelovém měření.



Takováto přesnost je pro CFD výpočty poměrně neobvyklá. Naopak výsledky dosažené pomocí modelu Spalart-Allmaras se oproti tunelovým měřením liší poměrně značně. Hodnota koeficientu  $c_l$  se liší přibližně o 13 % a hodnota  $c_d$  až o 60 %. Tato velká chyba může být způsobena použitým modelem Spalart-Allmaras, který není úplně nejlepší pro výpočty mezních vrstev s výraznými gradienty.

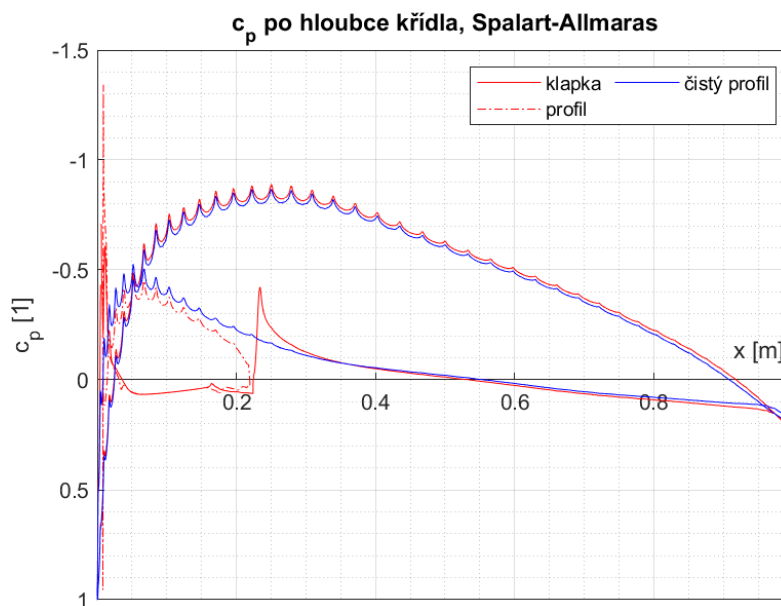
Dále byla vypočtena odchylka sledovaných veličin, způsobená navrženou geometrií klapky s profilem oproti vypočteným výsledkům čistého profilu.

Turbulentní model	odchylka $c_l$ [%]	odchylka $c_d$ [%]
Spalart-Allmaras	8,2	14,2
Transition SST	2,9	19,8

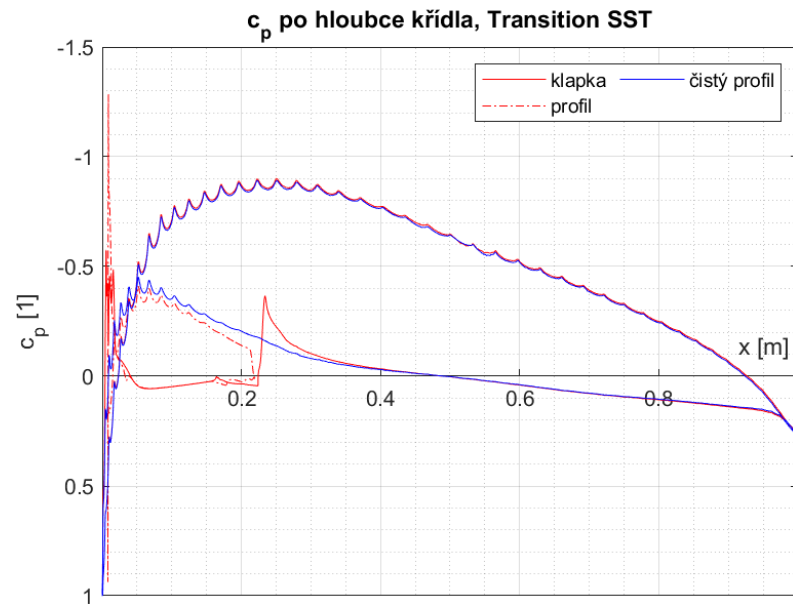
**Tabulka 2.3:** Odchylky  $c_l$  a  $c_d$  navržené geometrie od hodnot čistého profilu

Z uvedené tabulky je patrné, že u přesnějšího modelu Transient SST je odchylka  $c_l$  prakticky zanedbatelná. Změna  $c_d$  už je znatelná a dalo se očekávat, že hlavně zadní stěna mezery mezi klapkou a profilem bude mít na tuto hodnotu velký vliv. I přes tyto odchylky se výsledné hodnoty neliší nijak zásadně, jen pro  $c_d$  je třeba brát v úvahu, že úvodní hodnoty mohou být vyšší než pro ideální model (zasunutá klapky bez mezery).

Dále byly porovnány i součinitele vztlaku  $c_p$  po hloubce profilu.

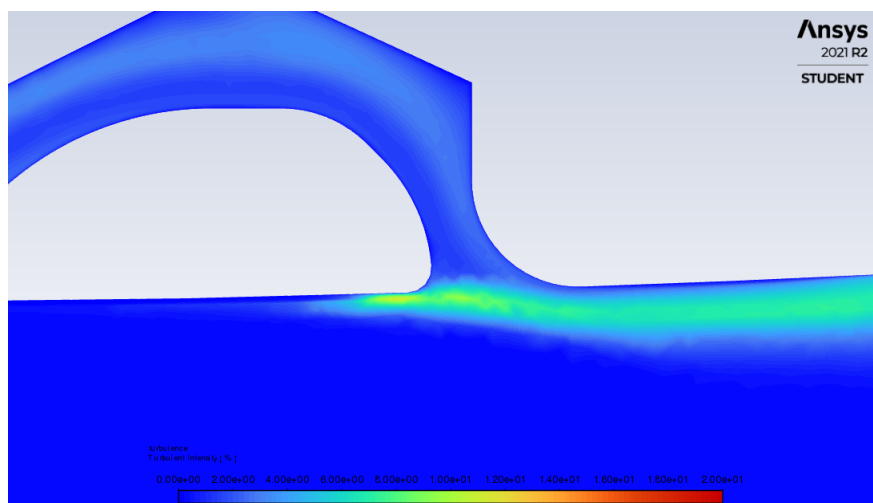


**Obrázek 2.10:** Porovnání  $c_p$  čistého profilu a návrhu geometrie, Spalart-Allmaras

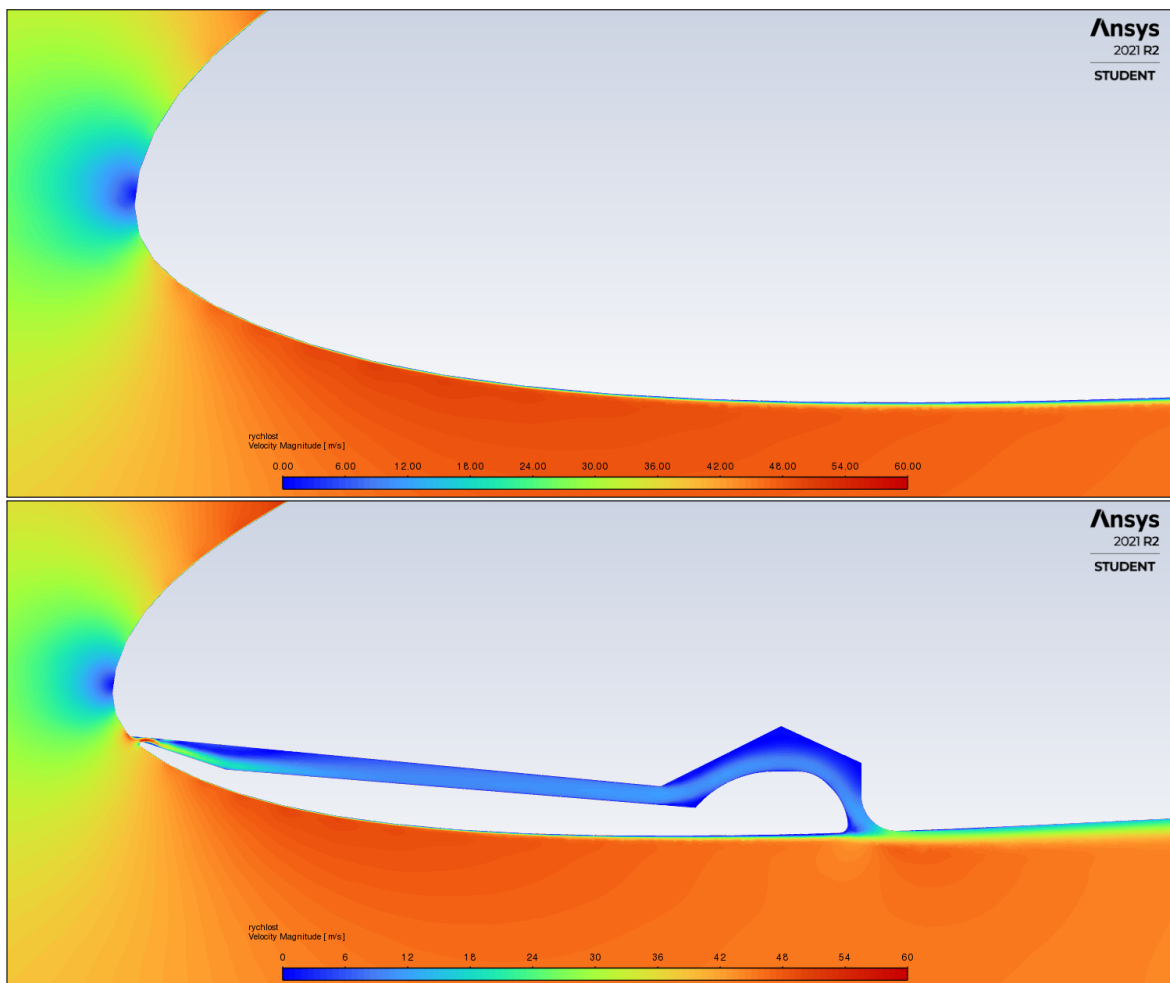


**Obrázek 2.11:** Porovnání  $c_p$  čistého profilu a návrhu geometrie, Transition SST

Při porovnání kontur rychlosti jsou patrné velké změny při vstupu proudění do mezery mezi profilem a klapkou. Dále od náběžné hrany se ale proudění ustálí. Poměrně zajímavá je oblast druhé mezery na spodní straně profilu. Vlivem změny geometrie a „profuku“ vzduchu mezerou dojde k menšímu ovlivnění mezní vrstvy na spodní straně profilu. Vrstva zmohtní a a mírně se zvětší její intenzita turbulence. Změna v proudění okolo profilu a zvětšení mezní vrstvy za mezerou na dolní straně profilu jsou patrné na Obrázku 2.13. Vznik turbulence v oblasti stejné mezery je patrný na Obrázku 2.12.



**Obrázek 2.12:** Turbulence v oblasti mezery na spodní straně profilu



**Obrázek 2.13:** Porovnání rychlosti proudění v okolí čistého profilu a v okolí profilu s klapkou

Výše zjištěné poznatky lze shrnout do několika bodů.

- Model Transition SST se zdá být pro tento případ přesný, ale jeho problémem může být těžší dosažení dostatečného stupně konvergence pro jednoznačný výsledek.
- Model Spalart-Allmaras je méně přesný, ale rychle a dobře konverguje.
- Vlivem navržené geometrie dojde k malému ovlivnění mezní vrstvy na spodní straně profilu. Dojde k velmi malému zvýšení  $c_l$  a ke zvýšení  $c_d$ .

Celkově aerodynamické změny způsobené geometrií návrhu nejsou zásadní, a i s přihlédnutím k tomu, že geometrie a aerodynamika se budou během výpočtu poměrně výrazně měnit, lze říci, že tento návrh na daný problém lze s dostatečnou přesností použít.

## 2.3 Návrh pohybu a vytvoření UDF

### 2.3.1 Návrh pohybu

Bohužel nebyly nalezeny žádné podklady, které by definovaly pohyb, kterým se Krügerova klapka vyklápí. Čas celkového vysunutí byl odhadnut dle dostupných video zdrojů. Dá se předpokládat, že se pohyb klapky bude skládat z rotace a posunu.

Čas kompletního vysunutí byl odhadnut jako 5 s. Rotační pohyb je konán během celé této doby. Konečný úhel naklonění klapky, někdy označovaný jako  $\theta$ , byl stanoven jako  $130^\circ$ . Například v [9] jsou výpočty provedeny pro rozsah úhlu klapky  $115 - 155^\circ$ .

Posun v osách X a Y byl primárně navržen tak, aby nedocházelo ke konfliktu profilu a klapky, a ani jejich mezních vrstev. Doba posunu v obou dvou směrech byla stanovena na 2 s. K posunu v ose Y dochází se sekundovým zpožděním, aby nedošlo ke kontaktu obou geometrií. Všechny rychlosti byly stanoveny jako konstantní. Vzájemná poloha klapky a profilu po vysunutí je zobrazena na Obrázku 2.14.



**Obrázek 2.14:** Konečná poloha Krügerovy klapky a profilu po vysunutí

### UDF

UDF (User Defined Function) pro zkušební model byla napsána v jazyce C. Pro její funkčnost musely být dodrženy všechny požadavky dané manuálem Fluentu pro UDF [18]. Pomocí této UDF je definován pohyb klapky vůči zbytku geometrie. Protože je kód vytvořené UDF poměrně krátký, je zde přiložen jako Obrázek 2.15.

```

1  #include "udf.h"
2  /*definování parametrů vyklápění*/
3  static real uhel = -130.0; /*úhel o který se otočí klapka*/
4  static real doba = 5.0; /*čas trvání otočení [s]*/
5
6  static real vx_prev = -0.01; /*doba posunu klapky v ose X je 2s... celková vzdálenost 0.02[m]*/
7  static real vy_prev = 0.015; /*doba posunu klapky v ose Y je 2s...celková vzdálenost 0.03[m]*/
8
9  DEFINE_CG_MOTION(cube, dt, vel, omega, time, dtime)
10 {
11     NV_S(vel, =, 0.0);
12     NV_S(omega, =, 0.0);
13
14
15     if ( time > 0 && time < 2)
16     {
17         vel[0] = vx_prev;
18     }
19
20     if (time > 1 && time < 3)
21     {
22         vel[1] = vy_prev;
23     }
24
25     if (time > 0 && time < 5)
26     {
27         omega[2] = uhel / 180.0 / doba * M_PI; /*výpočet úhlové rychlosti otáčení*/
28     }
29 }
30

```

Obrázek 2.15: Textový kód UDF definující pohyb klapky

K definování pohybu bylo použito makro `DEFINE_CG_MOTION`, které spadá pod UDF makra, která určují chování dynamické sítě. Toto konkrétně definuje pohyb těžiště. [18]

Samotný kód není příliš složitý. Před použitím makra jsou nejdříve stanoveny statické veličiny, v tomto případě rychlosti posunu v osách X a Y a konečný úhel vyklápění klapky. Po definování makra jsou stanoveny nulové počáteční rychlosti posuvu (pro všechny 3 osy) a rotace (pro všechny 3 roviny). Dále jsou definovány posuvné pohyby a čas, během kterého budou konány. Posledním krokem je výpočet úhlové rychlosti otáčení klapky ze známého času a konečného úhlu. Zároveň je definován čas, během kterého bude tento rotační pohyb konán. Pro Ludolfovo číslo  $\pi$  bylo použito makro `M_PI`.

## 2.4 Vytvoření modelu s využitím dynamické sítě

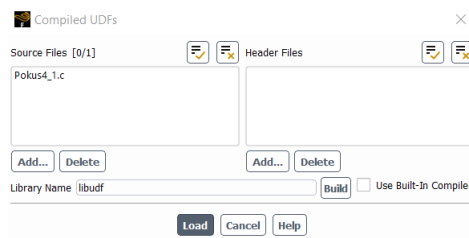
Pro zkušební model byl použit výpočetní software Fluent, do kterého byla vložena vytvořená síť (viz. kapitola 2.1.3). Byl použit nestacionární (transient) model. Vlastnosti vzduchu odpovídají standardní atmosféře ve výšce 0 m. Většina výpočtů proběhla pomocí turbulentního modelu Spalart-Allmaras a pro vybraný případ byl použit model Transition SST. Výběrem turbulentního modelu se více zabývá kapitola 2.7.

### 2.4.1 Nastavení okrajových podmínek

Dále byly nastaveny okrajové podmínky. Důležité je, aby profil a klapka měly okrajovou podmínku stěny *No Slip*. Vstupní rychlost proudění a Reynoldsovo číslo byly zvoleny totožné jako při výpočtech porovnání geometrie, tedy 42,5 m/s, respektive 3 000 000. To může i přibližně odpovídat přistávací rychlosti malého letounu nebo modelu křídla v aerodynamickém tunelu. Vlastnosti turbulence na vstupu byly ponechány ve výchozím nastavení, neboť nejsou známy bližší parametry proudění. Většina zkušebních výpočtů byla provedena pro úhel náběhu 0°. Některé výpočty byly provedeny pro úhel náběhu 10°. Pro ty byly dopočteny složky rychlosti ve směru X a Y pomocí  $\sin \alpha$ , respektive  $\cos \alpha$ .

### 2.4.2 Kompilace UDF

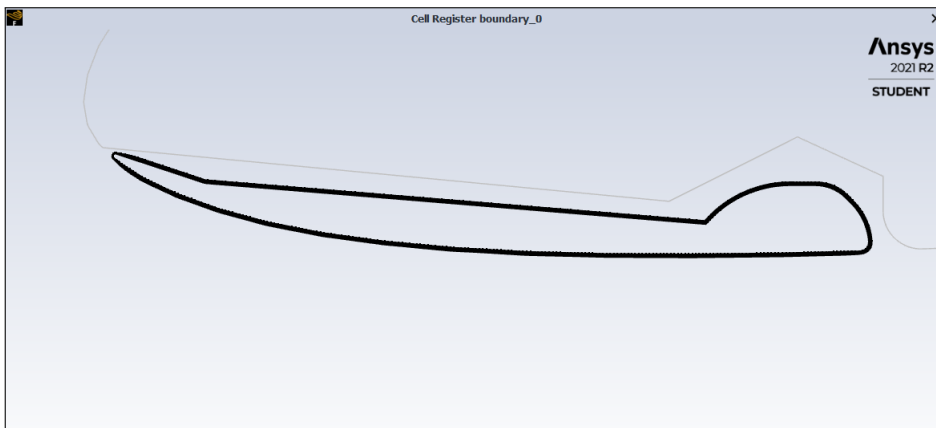
Textový soubor UDF pro definici pohybu klapky byl kompilován pomocí integrovaného kompilátoru přímo v rozhraní Fluentu. Vzniklá knihovna byla dále načtena do modelu.



Obrázek 2.16: Integrovaný kompilátor Fluentu

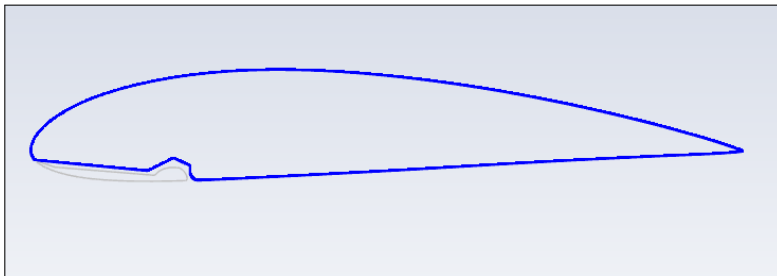
### 2.4.3 Oddělení buněk mezní vrstvy

Pro správný pohyb buněk mezní vrstvy Krügerovy klapky musely být nejdříve tyto buňky označeny a odděleny od zbytku sítě. Když se tato oddělená oblast (Obrázek 2.17) zahrne do dynamické sítě, nebude se deformovat a bude se pohybovat spolu se samotnou klapkou. Buňky mezní vrstvy si tedy v průběhu času zachovají tvar a velikost.



**Obrázek 2.17:** Oddělená oblast v okolí klapky

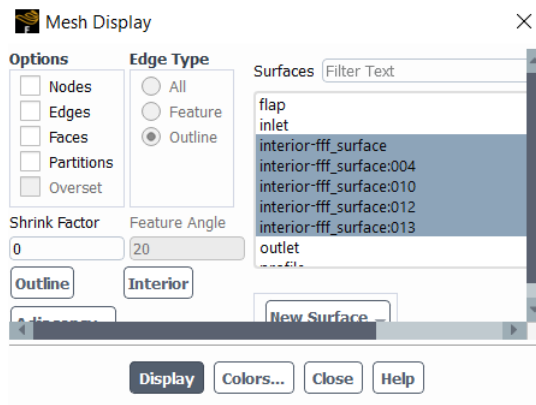
Po otestování tohoto řešení ale docházelo i k deformaci buněk mezní vrstvy profilu. Této deformaci bylo zabráněno oddělením těchto buněk od zbytku sítě. Tyto buňky viz. Obrázek 2.18 nejsou dále ovlivňovány změnou dynamické sítě. Zachovávají si tvar, velikost a polohu.



**Obrázek 2.18:** Oddělená oblast v okolí profilu

Fluent každým tímto oddělením vytvoří 2 nové oblasti (zóny) sítě. Výsledná síť se tedy celkově skládá z 5 oblastí.

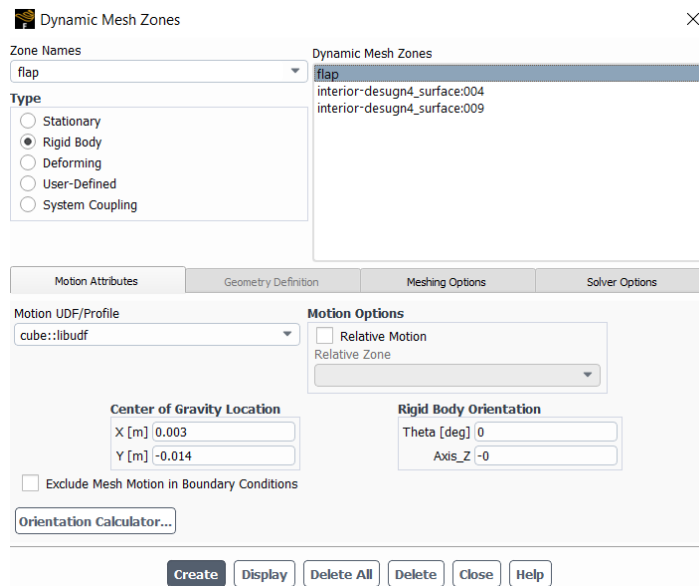
Problémem tohoto oddělení buněk může být to, že během přenášení modelu mohou nastat komplikace při přenosu informací o jednotlivých zónách sítě. Je to ale jen malý problém, který se dá vyřešit opětovným oddělením buněk. Jen je nutné provést po načtení modelu kontrolu počtu oblastí sítě, než se pokročí k dalšímu nastavování modelu.



Obrázek 2.19: Oblasti sítě vytvořené separací buněk mezních vrstev

## 2.4.4 Nastavení dynamické sítě

Samotné definování dynamické sítě už je poměrně jednoduché, jen je nejdříve nutné určit střed rotace klapky. K tomuto bodu se bude vztahovat posuvný a rotační pohyb. Jako tento bod byl určen střed rádiusu špičky klapky u náběžné hrany. Souřadnice tohoto bodu a další nastavení jsou vidět na Obrázku 2.20. Do dynamické sítě je potřeba zahrnout geometrii klapky a 2 oblasti buněk tvořící její mezní vrstvu.

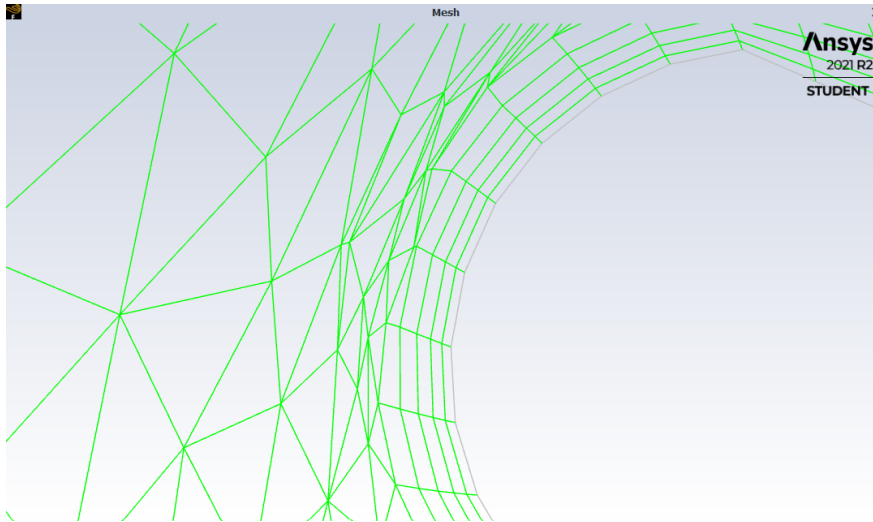


Obrázek 2.20: Definování dynamické sítě



## 2.5 Problematika negativních objemů

Parametry a typy přetváření dynamické sítě byly v první řadě voleny tak, aby během výpočtu nedocházelo ke vzniku buněk s negativním objemem. Tato, zdá se velmi častá chyba, způsobí kompletní ukončení výpočtu. Navíc tuto chybu v daném časovém kroku nejde prakticky opravit. Na Obrázku 2.21 je vidět příklad buněk s negativním objemem.



**Obrázek 2.21:** Příklad negativních objemů

Tato chyba spolu s horší kvalitou přetvářené sítě je asi největším problémem při používání dynamických sítí. Při tvorbě modelu byl kladen velký důraz na to, aby ke vzniku negativních objemů nedocházelo, a bylo vyzkoušeno několik variant modelu. Bylo provedeno mnoho pokusů s různými kombinacemi parametrů. Tyto pokusy byly prováděny pomocí funkce Preview Mesh Motion, která umožňuje přetváření pomocí dynamické sítě v průběhu času bez výpočtů proudění.

Dle pozorování vznikaly negativní objemy z těchto důvodů:

1. Přímá kolize klapky s profilem. Kolize mezních vrstev klapky a profilu, které mají stálý tvar a nepřetvářejí se. Těmto kolizím lze předejít upravením dráhy pohybu již v UDF.
2. Neschopnost dynamické sítě se dostatečně přetvořit. To je způsobeno pohybem geometrie, na který zbytek sítě nedokáže dostatečně reagovat. Buněky se buď přesíťují přes sebe, nebo zasahují do geometrie či buněk mezních vrstev. Toto je způsobeno nejčastěji příliš vysokou rychlostí pohybu nebo špatným tvarem pohybující se geometrie. Jev je vidět na Obrázku 2.21. Lze ho redukovat snížením časového kroku, upravením parametrů dynamické sítě a upravením tvaru. Nejvíce dynamické síti vadí ostré hrany či špičky.

Pomůže tedy zaoblení či zvětšení rádiusu. Toto vedlo i k úpravě špičky klapky, která byla více zaoblena.

3. Kombinace obou dvou výše zmíněných příčin. Jde typologicky spíše o 2. příčinu, ale je způsobena malým prostorem mezi danými geometriemi (mezními vrstvami). Buňky nelze dále tlačit do definovaných neměnných buněk, a když je rychlost pohybu moc vysoká, nestačí se dynamická síť přizpůsobit a dojde k jejich natlačení do buněk mezní vrstvy. Toto lze redukovat snížením rychlosti pohybu nebo upravením jeho trajektorie.

### 2.5.1 Časový krok 0,1 s

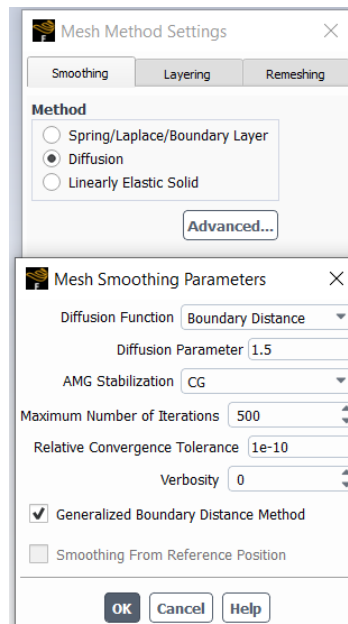
Prvotní časový krok byl stanoven na 0,1 s. Při tomto časovém kroku a při původním nastavení dynamické sítě docházelo ke vzniku negativních objemů už při prvních několika krocích. Zdá se, že nejvíce tuto tvorbu ovlivní změna parametrů vrstvení (layering) a smoothingu. Funkce remeshingu má při tomto časovém kroku také určitý vliv. Ani doporučené nastavení dle manuálu [1] nepřineslo zlepšení. Dosažení funkčního řešení bylo podmíněno využitím metody pružnosti (spring-based) místo metody difuze pro funkci smoothing. To ale má negativní vliv na kvalitu sítě, jelikož tato metoda hůře zvládá rotační pohyby. Parametry určující layering byly sníženy na polovinu oproti původnímu nastavení. Při využití remeshingu vznikaly negativní objemy při zadání velmi malé ( $1 \cdot 10^{-4} m$ ) maximální délky buňky.

Jak se postupně ukázalo, největší vliv na tvorbu negativních objemů má velikost časového kroku. Jeho snížení má pozitivní vliv a při změně časového kroku na 0,05 s došlo k výraznému omezení výskytu negativních objemů.

### 2.5.2 Časový krok 0,05 s

Při použití časového kroku 0,05, lze aplikovat nastavení funkce smoothing doporučené manuálem [1], které by mělo omezit vznik negativních objemů viz. Obrázek 2.22. Zároveň je použita metoda obecné hraniční vzdálenosti (Generalized Boundary Distance Method), která by měla zlepšit zachování velikosti buněk v okolí hranic (klapka, profil).

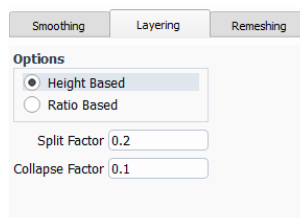
V některých případech docházelo ke tvorbě negativních objemů při zachování původního nastavení funkce layering, proto byly opět použity poloviční hodnoty. Pro tento časový krok neměla funkce remeshing na tvorbu negativních objemů žádný vliv, byly ale testovány jen hodnoty větší než  $1 \cdot 10^{-5} m$  pro maximální délku buňky.



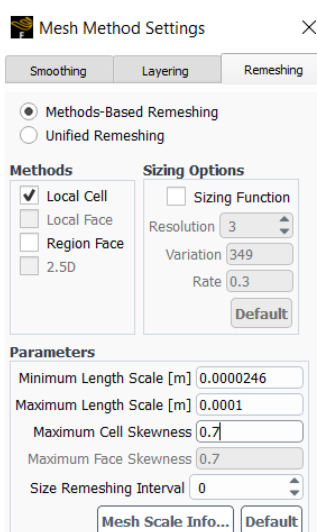
**Obrázek 2.22:** Doporučené nastavení funkce Smoothing

Následující parametry nastavení dynamické sítě zajišťovaly funkčnost modelu. Dá se předpokládat, že pro dostatečně malý časový krok budou platit pro schématicky podobné modely (Smoothing viz. Obrázek 2.22). Výjimku tvoří hodnoty minimální a maximální délky buňky v rámci funkce remeshing, které vycházejí z konkrétní sítě.

U parametrů remeshingu je vhodné nastavit interval remeshingu jako 0, jinak dojde k přetvoření celé sítě dle zadaných parametrů. Ve výsledku se tím pak stane výpočet nepoužitelný, jelikož se postupně znásobuje počet buněk a zároveň i čas potřebný k přesítování.



**Obrázek 2.23:** Použité parametry funkce lLayering



Obrázek 2.24: Použité parametry funkcer emeshing

Na základě provedených pokusů lze doporučit, aby před zahájením samotného výpočtu byla provedena simulace přetvoření sítě pomocí funkce Preview Mesh Motion. Tím se ověří, že v průběhu celého výpočtu nedojde k tvorbě negativních objemů a k následnému přerušení výpočtu. V některých případech došlo k této chybě až po 60 časových krocích a touto kontrolou se dá předejít opakování výpočtů.

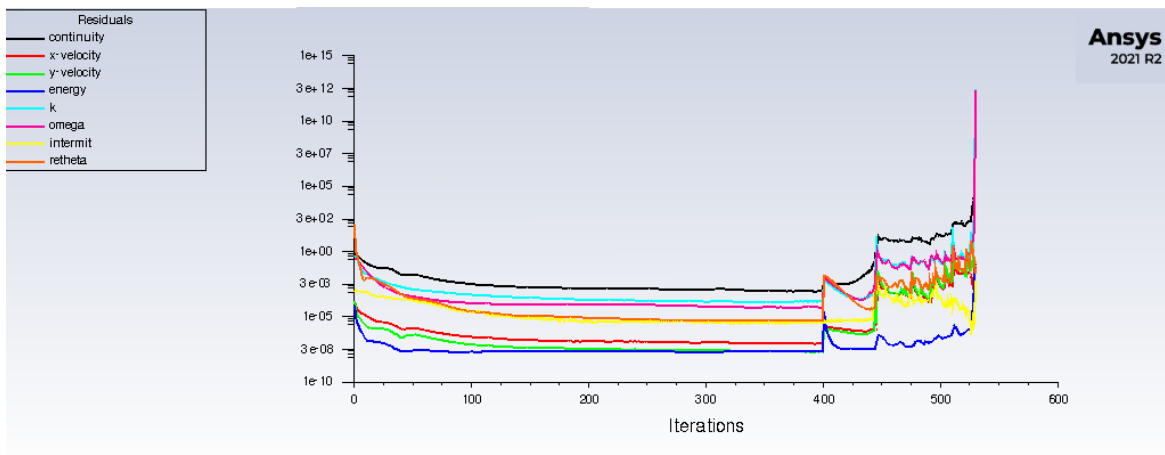
## 2.6 Výběr schématu řešiče

Při výběru algoritmu řešiče nebylo dle dostupných manuálů jasné, jaké výpočetní schéma je pro tento případ vhodné.

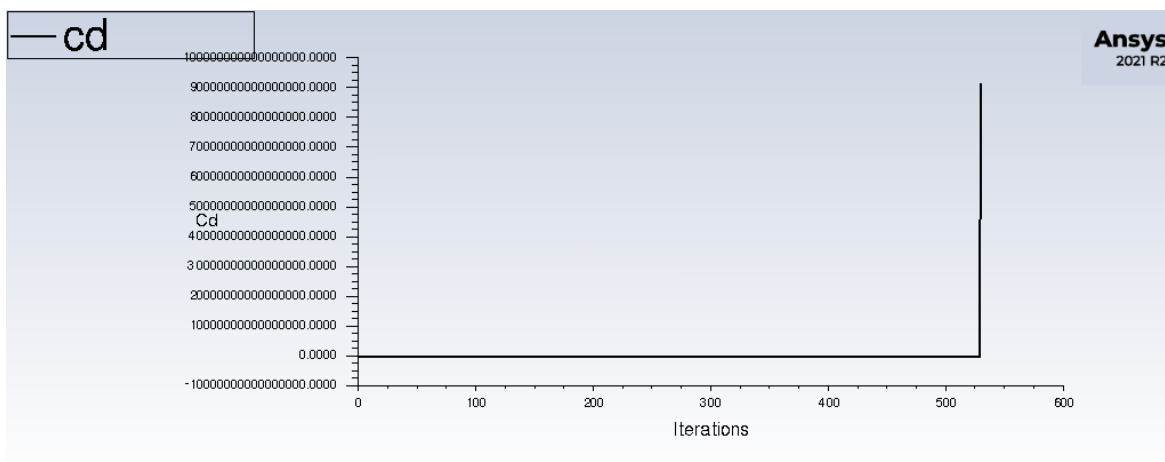
Users Guide manuál uvádí: „PISO algoritmus s korekcí sousedních buněk se důrazně doporučuje pro všechny nestacionární výpočty proudění, obzvláště pokud chcete použít velký časový krok.“ [1]

Zatímco Theory Guide manuál uvádí: „Pro nestacionární proudění je nutné použití algoritmu Coupled, v případě, kdy je horší kvalita sítě, nebo je použit velký časový krok.“ [24]

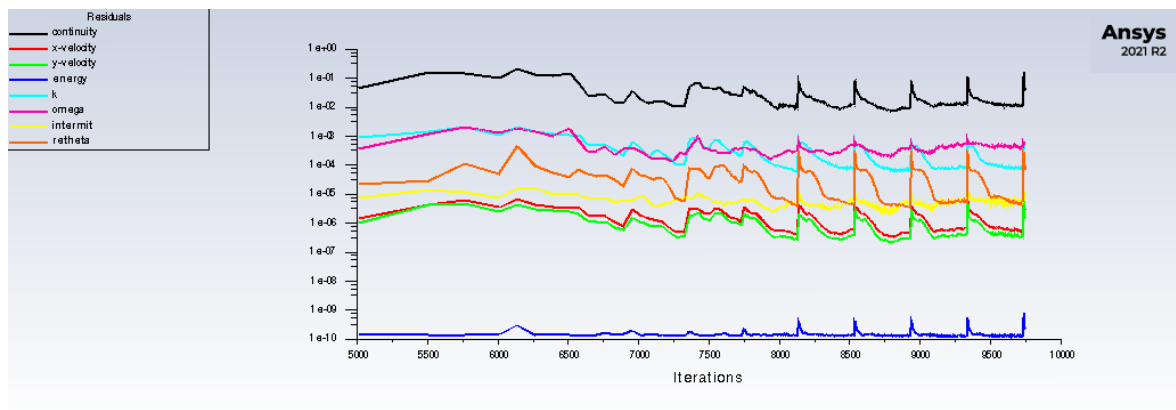
Pro ověření byly provedeny výpočty pro schémata Coupled, PISO a SIMPLE. Výpočty byly provedeny pro úhel náběhu  $0^\circ$ , časový krok  $0,05\text{ s}$  a turbulentní model Spalart-Allmaras. Sledovány byly průběhy residuí, hlavně residua kontinuity, a průběhy koeficientů  $c_l$  a  $c_p$ . Ty jak v průběhu času, tak během iterací. U schémat, která v průběhu výpočtu dávala špatné výsledky, byl výpočet proveden jen pro kratší časový úsek.



Obrázek 2.25: Průběh residuí při použití schématu PISO

Obrázek 2.26: Průběh  $c_d$  při použití schématu PISO

Z uvedených grafů je patrné, že schéma PISO lze hned zavrhnout, jelikož řešení při jeho použití diverguje a výpočet se přeruší.



Obrázek 2.27: Průběh residuí při použití schématu SIMPLE

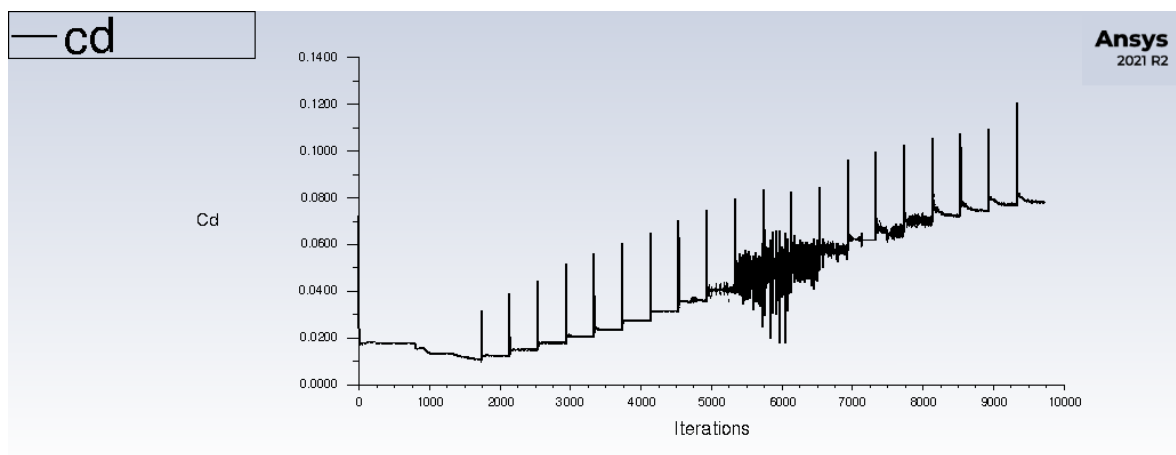
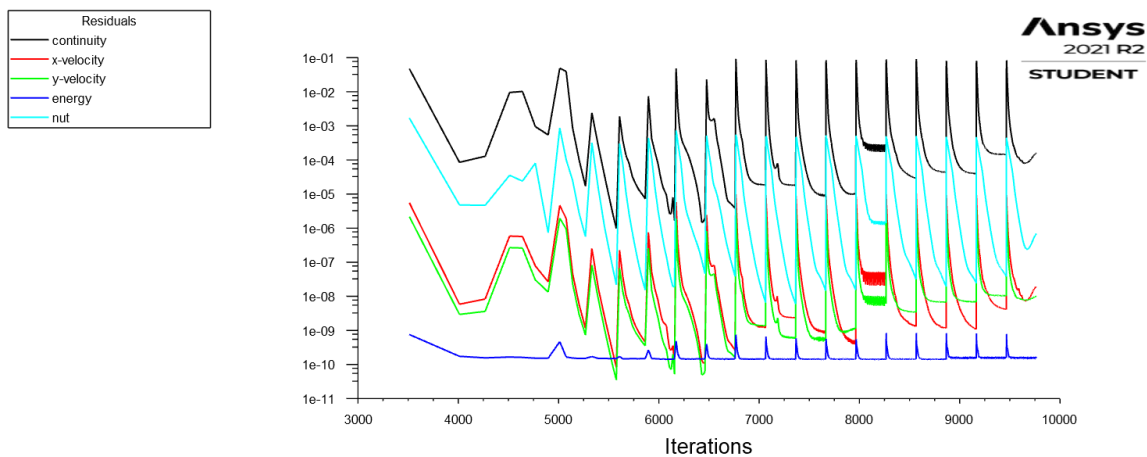
Obrázek 2.28: Průběh  $c_d$  při použití schématu SIMPLE

Schéma SIMPLE vychází o něco lépe, ale hodnota residuí je velmi vysoká. U kontinuity dosahuje jen hodnot okolo  $1 \cdot 10^{-2}$ . Bohužel zaznamenávání residuí je v nejnovější verzi Fluentu problematické, a tak z obrázku není patrná oblast okolo 6 000 iterací, kde se dle průběhu  $c_d$  dá očekávat hodnota residuí kontinuity i o řád vyšší. Celkově se toto schéma nezdá příliš vhodné pro daný problém.



Obrázek 2.29: Průběh residuí při použití schématu Coupled

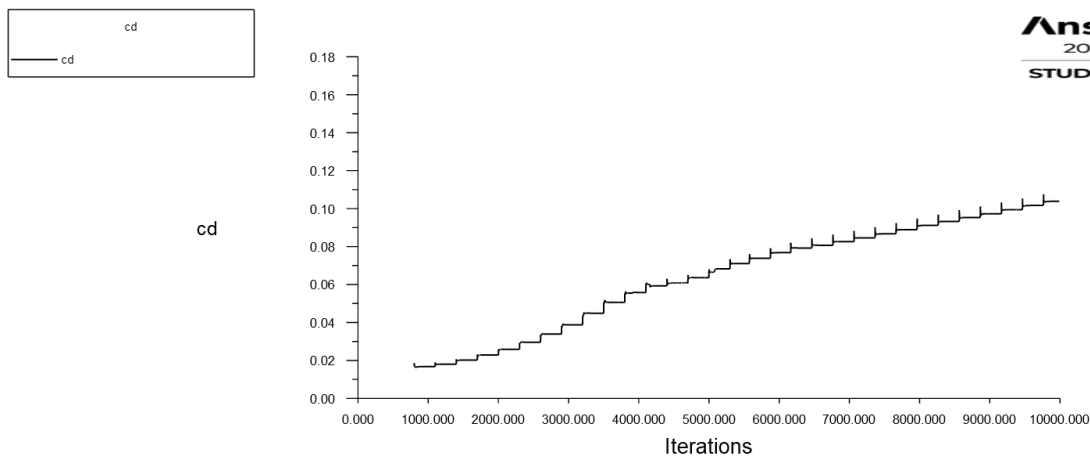
Obrázek 2.30: Průběh  $c_d$  při použití schématu Coupled

Schéma Coupled vykazuje poměrně dobré hodnoty residuí a při pohledu na  $c_d$  v průběhu iterací je patrné, že se hodnoty v jednotlivých krocích ustálily. V některých případech jsou splněny i poměrně vysoké požadavky na konvergenci, tedy dosažení residua kontinuity  $1 \cdot 10^{-6}$ , nebo neměnná hodnota  $c_l$  na 6. desetinném místě v posledních 10 iteracích.

Na základě těchto výpočtů bylo dále postupováno dle doporučení [24] a bylo použito schéma Coupled.

## 2.7 Turbulentní model

Při výběru turbulentního modelu byla brána v úvahu nejen přesnost zachycení daného proudění, ale i schopnost tohoto modelu poradit si s horší kvalitou sítě, protože síť v průběhu simulace ztrácí svoji kvalitu. S tím souvisí i schopnost modelu dobře konvergovat. Byly brány v úvahu modely typu RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes).

Po zvážení možností byly nakonec vybrány 2 turbulentní modely:

- Spalart-Allmaras
- Transition SST

Model Spalart-Allmaras byl vybrán pro jeho jednoduchost (1 rovnice) a poměrně hojně použití v letecké aerodynamice. Jelikož tvorba modelu vyžadovala ozkoušení poměrně velkého počtu možností, bylo žádoucí, aby byl výpočetní čas co nejkratší. Tento model také poměrně dobře zvládá síť s horší kvalitou. Díky jeho jednoduchosti také poměrně dobře konverguje, což se ukázalo jako velká výhoda. Navíc v případech, kdy má model Spalart-Allmaras problémy s konvergencí výsledku, se dá předpokládat, že stejný problém budou mít i modely složitější. Spalart-Allmaras ale nepatří mezi nejpřesnější modely a má problémy správně zachytit odtrhávání mezní vrstvy a s ním související jevy.

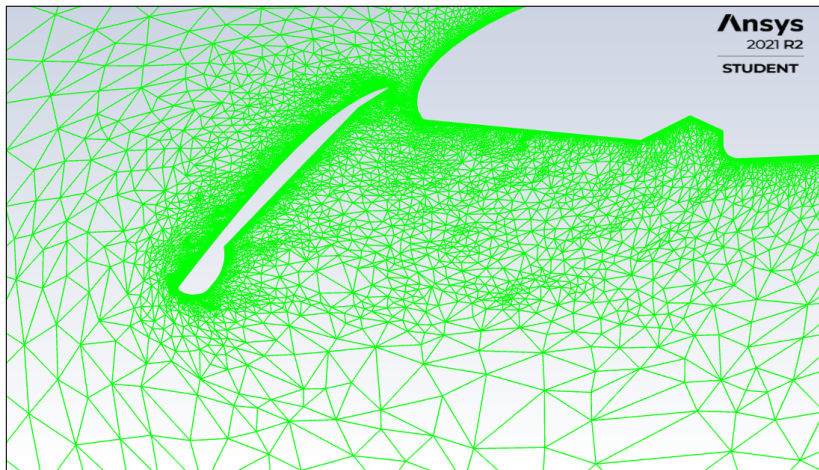
Pro přesnější výpočty byl zvolen model Transition SST. Tento model je poměrně složitý (4 rovnice) a citlivý na kvalitu sítě a dá se tedy u něho očekávat komplikovanější konvergence výsledků. Tento model by měl být schopen zachytit přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním a poměrně dobře by měl zachytit jevy mezní vrstvy. I tento model je poměrně hojně používán v letecké aerodynamice. Kvůli jeho výpočetní náročnosti byl využit jen pro případ  $\alpha = 10^\circ$ , který může odpovídat úhlu náběhu při přistání nebo vzletu.

Stacionární výpočty byly provedeny pro oba tyto modely, aby se při srovnání předešlo nepřesnostem vneseným rozdílným turbulentním modelem.



## 2.8 Problematika špatné kvality přetvořené sítě

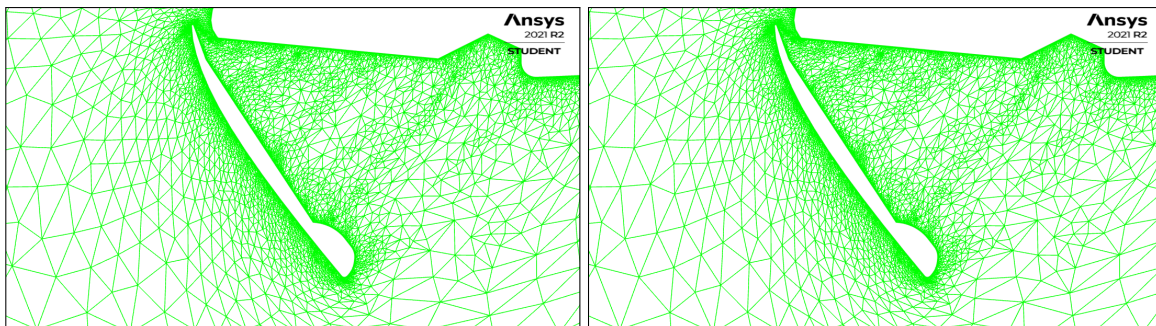
Na Obrázku 2.31 je zobrazena výsledná síť v okolí klapky s parametry dle kapitoly 2.5.2 pro časový krok 0,05s. Z Obrázku 2.31 je pouhým okem patrné, že kvalita přetvořené sítě není nejlepší. Síť je v oblasti viditelně nekonzistentní a jsou viditelná místa, kde jsou shluky jasně větších nebo menších buněk, než jsou buňky v jejich okolí. Proto bylo dalším krokem diplomové práce docílit toho, aby síť v této oblasti byla kvalitnější a konzistentnější.



Obrázek 2.31: Výsledná síť po vysunutí klapky

### 2.8.1 Ověření konzistence sítě při stejném nastavení dynamické sítě

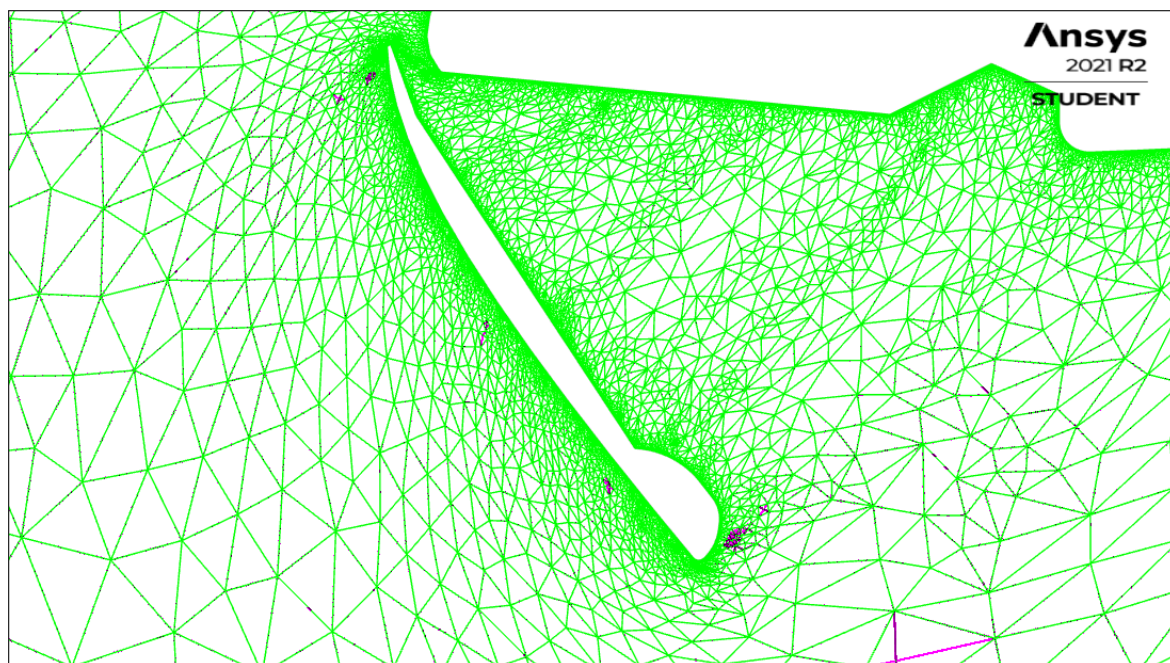
Před samotnou optimalizací byla ještě provedena kontrola toho, zda se síť pro totožné nastavení a totožný časový krok přetvoří identicky. Pro tuto kontrolu byly provedeny 2 simulace s výše zmíněným nastavením dynamické sítě a časovým krokem 0,05 s. Bylo provedeno 20 časových kroků, výsledný čas je tedy 2 s. Výsledné sítě pak byly porovnány viz. Obrázek 2.32.



Obrázek 2.32: Porovnání sítí pro stejné parametry dynamické sítě

Prvotní kontrolou pouhým okem se zdá, že sítě jsou totožné. Pro důkladnější ověření pomocí obrazové korelace byl použit volně dostupný internetový software na zpracování obrazu dostupný z [25]. Ten by měl zajistit přesnost na pixel.

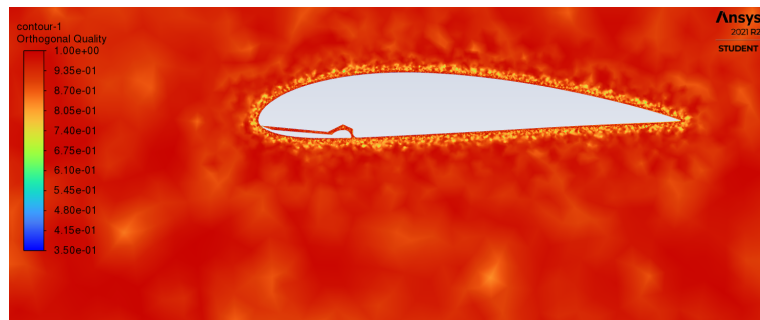
Na vytvořené obrazové korelaci (Obrázek 2.33) jsou změny sítě znázorněny fialovou barvou. Je patrné, že síť identická není. Změny jsou sice minimální, ale dalo by se čekat, že při použití stejného nastavení žádné nebudou. Rozdíly sítě mohou být způsobeny numerickými nepřesnostmi při přepočítávání dynamické sítě. Rozdíly jsou ale tak malé, že by na výsledky výpočtu neměly mít vliv.



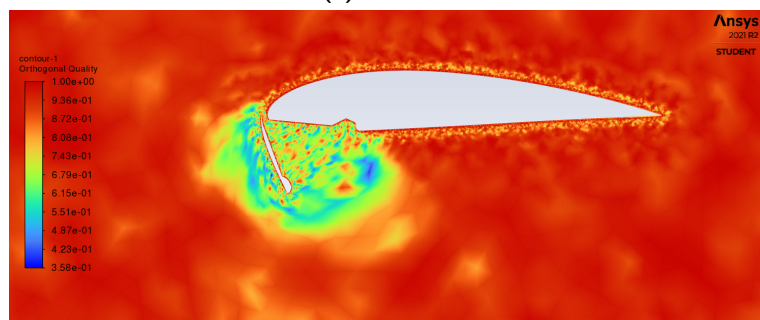
**Obrázek 2.33:** Výsledná korelace obrazu (rozdíly jsou zobrazeny fialově)

## 2.8.2 Zhoršení kvality sítě v oblasti pohybu klapky

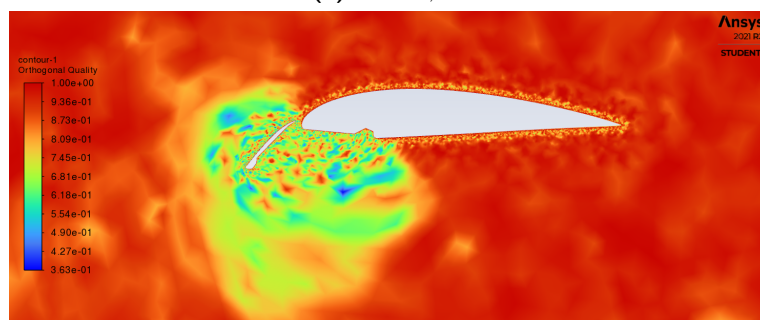
Když se kvalita sítě graficky znázorní pomocí kontur ortogonální kvality, je vidět, že tento ukazatel se v průběhu vysouvání klapky drasticky snižuje. Z původní přibližné hodnoty v okolí klapky 0,75-0,9 klesne místy až pod hodnotu 0,4. Nikde ale nedochází k poklesu pod hodnotu 0,1. Tato hodnota přibližně určuje přípustnou hranici kvality sítě a samotný Fluent upozorní, pokud dojde k poklesu ortogonální kvality pod tuto hodnotu. Takto ovlivněná oblast je navíc poměrně velká a zvětšuje se s konaným pohybem klapky.



(a) :  $t = 0$  s



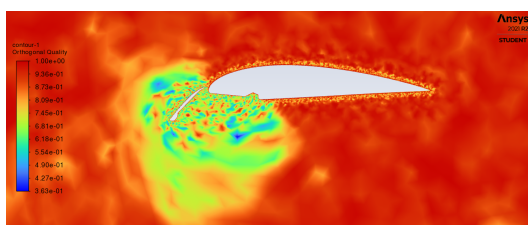
(b) :  $t = 2,5$  s



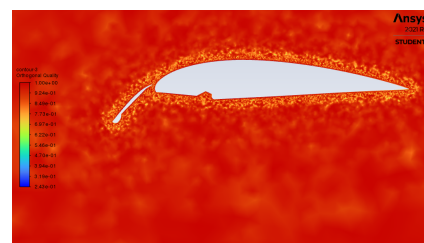
(c) :  $t = 5$  s

**Obrázek 2.34:** Zhoršení ortogonální kvality sítě v průběhu vysouvání klapky

Ještě větší kontrast je vidět při porovnání kvality přetvořené sítě po plném vysunutí s kvalitou sítě vytvořené přímo pro tuto polohu klapky.



(a) : Dynamicky přetvořená síť

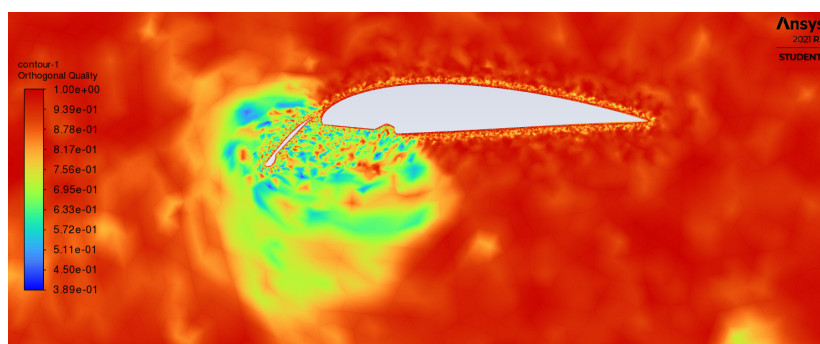


(b) : Statická síť

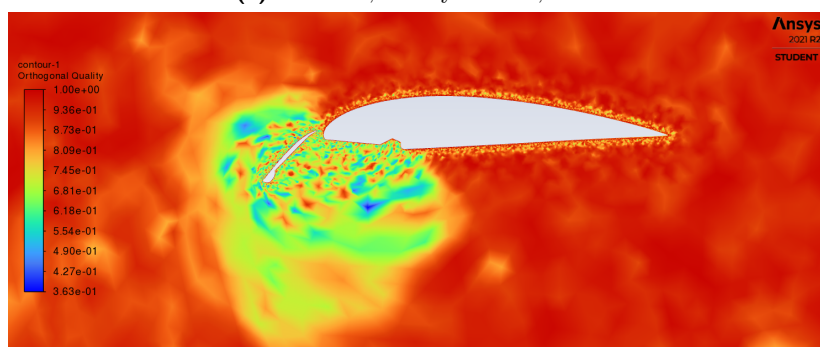
**Obrázek 2.35:** Porovnání ortogonální kvality dynamicky přetvořené sítě a statické sítě

### 2.8.3 Vliv časového kroku na kvalitu sítě

Dále bylo testováno, jaký vliv má velikost časového kroku na výslednou kvalitu sítě. Dá se předpokládat, že s menším časovým krokem bude k přesíťování docházet častěji a kvalita sítě se zvětší. Jako parametry kvality sítě byly sledovány ortogonální kvalita a objem buněk (pro všechny dále uvedené kontury objemu buněk je použito logaritmické měřítko). Sledování bylo provedeno pro časové kroky 0,05 s a 0,025 s. Parametry byly porovnány v čase  $t = 5$  s.



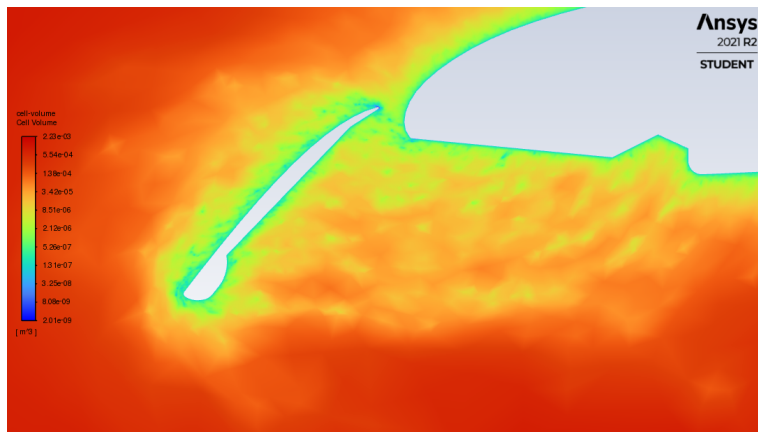
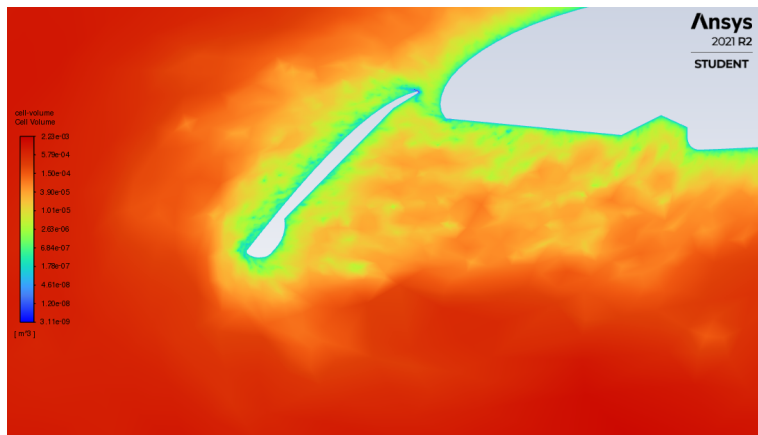
(a) :  $t = 5$  s; časový krok: 0,025 s



(b) :  $t = 5$  s; časový krok: 0,05 s

**Obrázek 2.36:** Porovnání ortogonální kvality sítě pro různé časové kroky



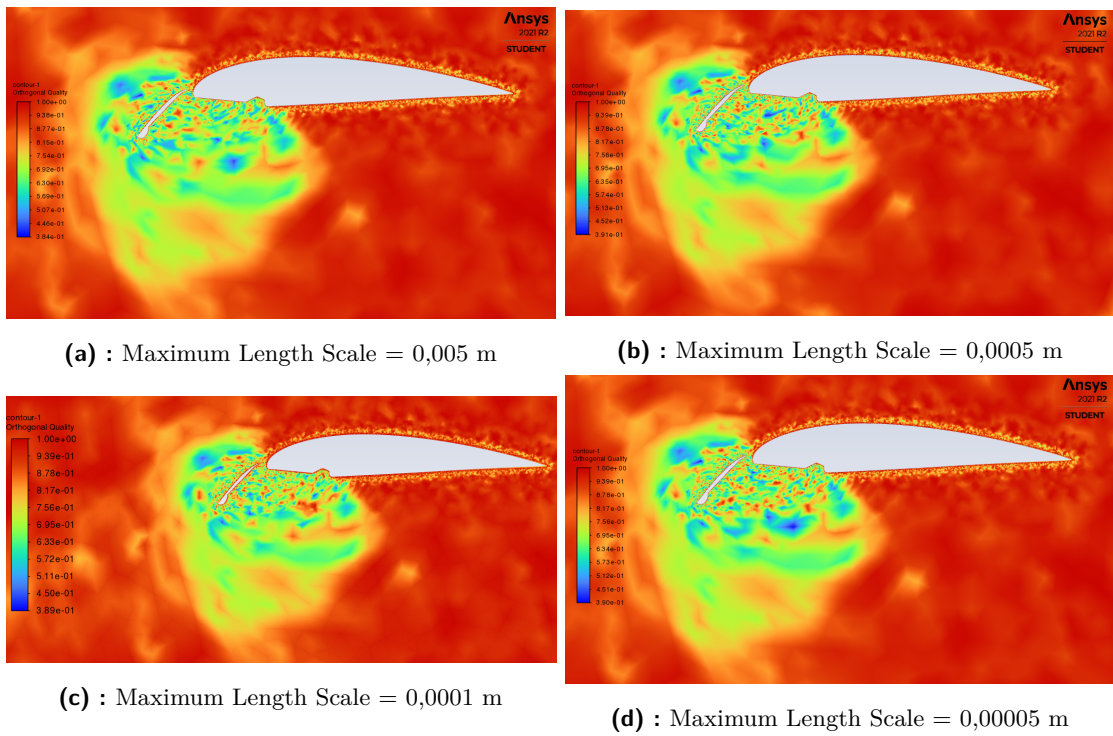
(a) :  $t = 5$  s; časový krok: 0,025 s(b) :  $t = 5$  s; časový krok: 0,05 s**Obrázek 2.37:** Porovnání objemu buněk pro různé časové kroky

Z uvedených grafů je patrné, že ortogonální kvalita sítě pro menší časový krok je o něco lepší, ale rozdíly jsou poměrně malé, např. minimální hodnota ortogonální kvality je přibližně o 0,03 menší. Znatelné zlepšení (jemnější síť) lze pozorovat u velikosti buněk sítě.

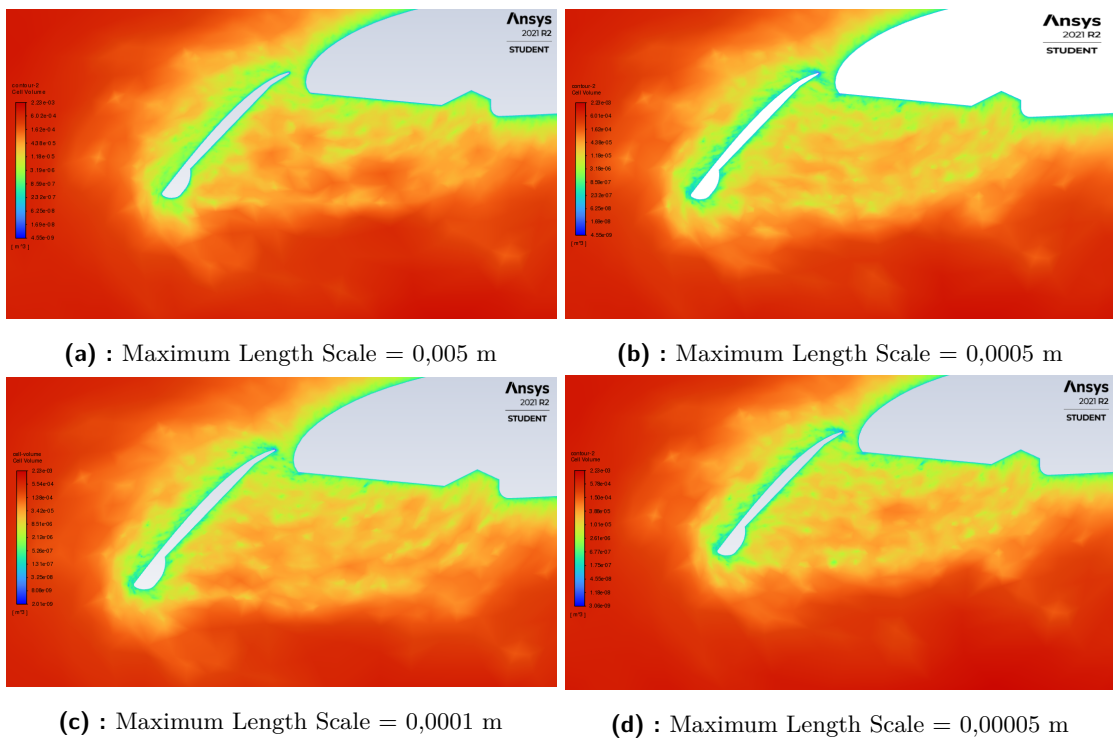
Dá se tedy říci, že ortogonální kvalita sítě závisí na velikosti časového kroku jen málo, nicméně s větším časovým krokem roste velikost buněk, a to zejména buněk ve větší vzdálenosti od klapky a profilu.

#### 2.8.4 Vliv parametrů funkce remeshing na kvalitu sítě

Dále bylo testováno, jak přetvořenou síť ovlivní parametry funkce remeshing, a to konkrétně maximální délka buňky (Maximum Length Scale).



**Obrázek 2.38:** Vliv maximální délky buněk na ortogonální kvalitu sítě



**Obrázek 2.39:** Vliv maximální délky buněk na velikost (objem) buněk sítě

Na Obrázku 2.38 lze vidět, že ortogonální kvalita sítě je tímto parametrem ovlivněna jen mírně. Na Obrázku 2.39 je naopak viditelné, že velikost buněk ve zkoumané oblasti se s nižší hodnotou maximální délky buňky snižuje. Zvětšuje se také oblast s jemnější sítí buněk. Pro zadanou maximální délku buňky 0,005 je patrné, že buňky v přímé blízkosti klapky jsou výrazně větší a že síť v místě za klapkou je i výrazně hrubší (viz. Obrázek 2.58b).

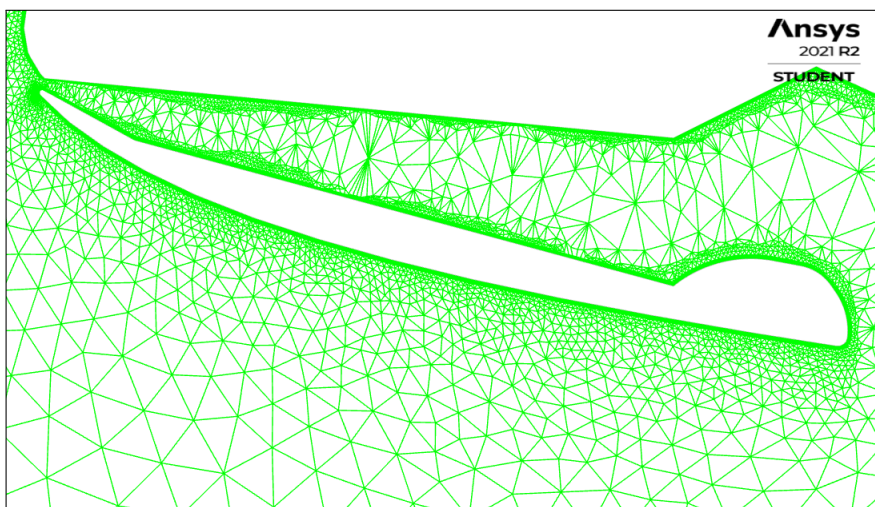
### ■ 2.8.5 Provedené pokusy o zlepšení kvality sítě

Před zahájením samotného výpočtu byly ozkoušeny změny, které měly za cíl vylepšit kvalitu sítě v této problematické oblasti. Některé byly otestovány jen pomocí Preview Mesh Motion (bez aerodynamických výpočtů), pro jiné byly provedeny i výpočty s použitím turbulentního modelu Spalart-Allmaras.

#### ■ Využití metody Unified Remeshing

Metoda Unified Remeshing v nastavení remeshingu by měla zajistit rovnoměrnější rozložení počáteční velikosti buněk sítě i během jejího pohybu. Users manuál [1] tuto možnost dokonce doporučuje, protože dokáže poskytnout větší robustnost modelu.

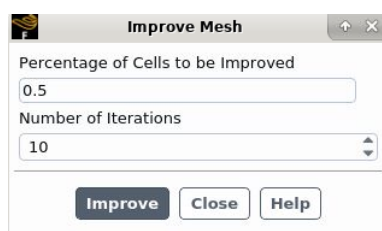
Při použití metody Unified Remeshing nicméně nebylo dosaženo očekávaných přínosů. Vzniklé buňky mezi klapkou a profilem jsou neúměrně velké a chovají se velice zvláštně. Často navíc dochází k chybě „floating point exception“, kvůli které se výpočet či simulace přeruší, a nelze v nich dále pokračovat. Toto nastavení tedy sice dobře přenáší velikost buněk v blízkém okolí klapky, ale právě kvůli časté chybovosti a nepředvídatelné tvorbě buněk bylo víceméně zavrženo.



Obrázek 2.40: Deformace sítě při použití funkce Unified Remeshing

## ■ Využití funkce Zlepšení kvality sítě

Rozhraní Fluent nabízí možnost zlepšení kvality sítě (Improve Mesh Quality). Tato funkce detekuje určité procento buněk s nejmenší ortogonální kvalitou. Tyto buňky následně pomocí iteračních výpočtů upraví a zvýší jejich ortogonální kvalitu. Lze nastavovat počet iterací a procento buněk z jejich celkového počtu, které se takto upraví.



**Obrázek 2.41:** Funkce Zlepšení kvality sítě

Jelikož je žádoucí, aby k této úpravě docházelo na začátku každého časového kroku, muselo být definováno makro, které by to umožňovalo. Toto makro pak následně pomocí nástroje Vykonání příkazu (Execute Command) bylo zavedeno do výpočtu.

```

Saving input to macro macro-1.

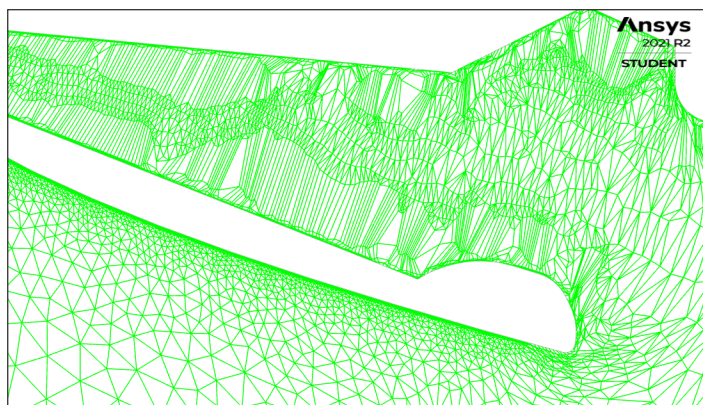
Improving poor quality cells.
Considering worst 0.500000% of cells.
Identified 310 cell(s) (out of 60030), 0.516408%, with orthogonal quality below 0.678711.
.|
.
Done.
Macro macro-1 defined.

```

**Obrázek 2.42:** Definované makro pro funkci Zlepšení kvality sítě

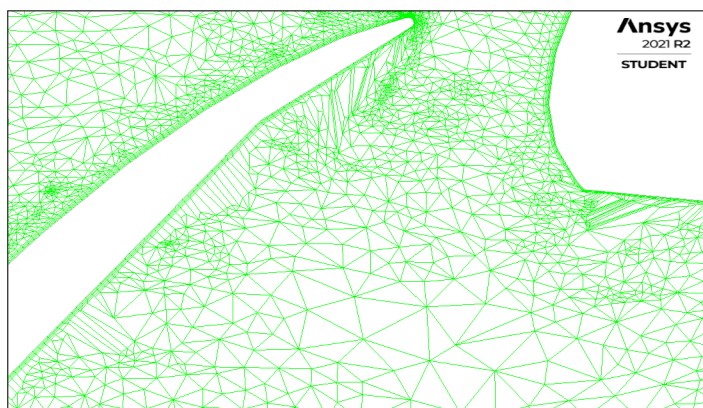
Dle původního nastavení (0,1%; 4 iterace) k žádným viditelným změnám nedošlo. Proto byla následně otestována varianta s 5% buněk a 10 iteracemi. Pro tuto variantu došlo i k úpravě buněk mezní vrstvy, a to prakticky v celém jejím rozsahu. Tato varianta byla tedy zavržena.





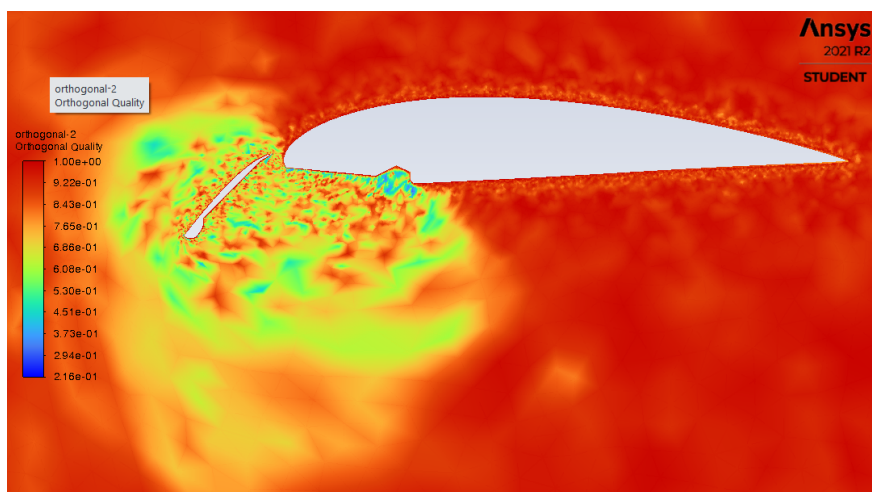
**Obrázek 2.43:** Deformace sítě při vylepšení 5 % buněk sítě

Následně byly vyzkoušeny parametry: 0,5 % buněk a 10 iterací. Pro tuto variantu už nedochází k tak extrémním změnám, přesto i tak dojde ke znatelnému ovlivnění buněk mezní vrstvy.

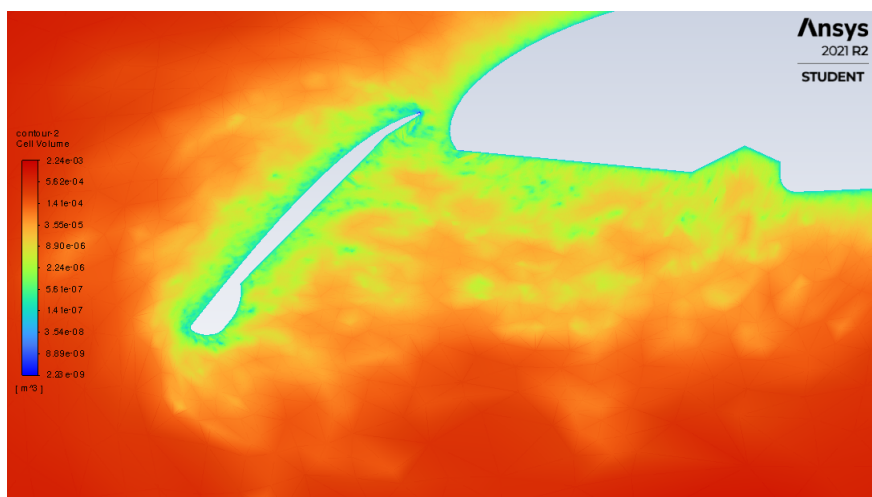


**Obrázek 2.44:** Deformace sítě při vylepšení 0,5 % buněk sítě

Tuto variantu nicméně není dobré zcela zatratit, jelikož s její pomocí dojde k výraznému zlepšení ortogonální kvality sítě viz. Obrázek 2.45. Ideálním řešením by bylo, kdyby šlo tuto funkci aplikovat jen na určité oblasti sítě, avšak tato možnost nebyla nalezena. Je třeba v úvahu brát i mírné zlepšení jemnosti sítě viz. Obrázek 2.46. Velikost buněk za klapkou se zdá být mírně konzistentnější.



**Obrázek 2.45:** Ortogonální kvalita sítě při vylepšení 0,5 % buněk sítě

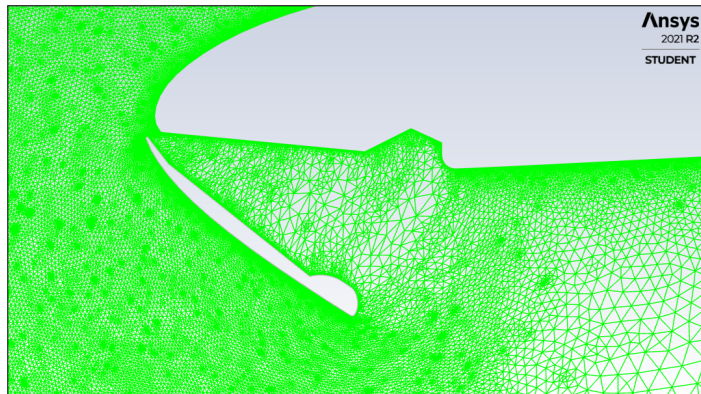


**Obrázek 2.46:** Objem (velikost) buněk sítě při vylepšení 0,5 % buněk sítě

### ■ Vytvoření oblasti s jemnější sítí

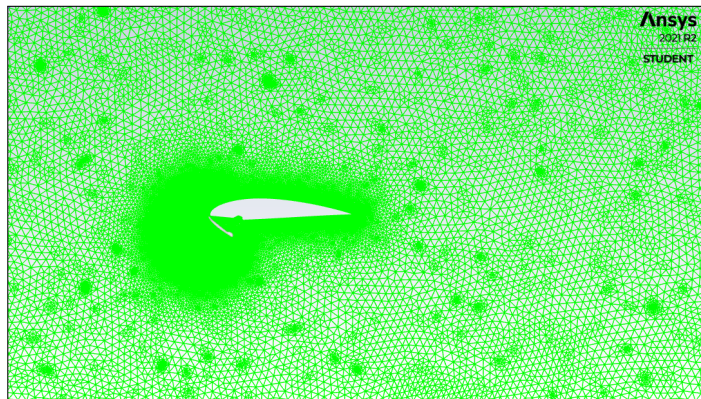
Dále byla vyzkoušena úprava sítě v okolí klapky. Již v samotném modelu byla definována oblast obdélníkového nebo oválného tvaru, ve které byla vytvořena jemnější síť. Velikost buněk v této oblasti byla v řádu  $10^{-3} m$ . Původní idea byla, že jemnější vstupní síť způsobí to, že bude jemnější i síť přetvořená pohybem klapky. Takováto síť má i výhodu v tom, že lépe zachycuje proudění vzniklé za klapkou dále od spodní strany profilu.

Při zachování parametrů dynamické sítě (kapitola 2.5.2) jsou ale přetvořené buňky větší, než je definovaná velikost buněk v jejich okolí viz Obrázek 2.47.



**Obrázek 2.47:** Chybné přetváření buněk v oblasti s jemnější sítí

Při použití hodnoty intervalu remeshingu 1 naopak bude docházet k přetváření sítě v celém jejím rozsahu.



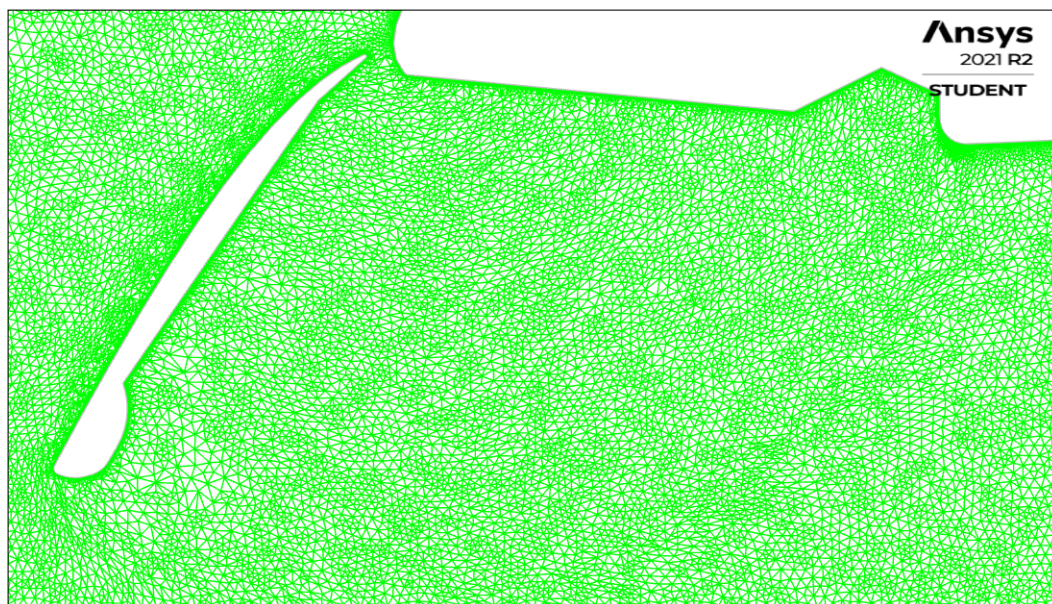
**Obrázek 2.48:** Přetváření sítě v celém rozsahu

Tento problém byl částečně odstraněn vymezením regionu sítě v okolí pohybu klapky. Tato oblast byla dále oddělena od zbytku sítě podobně jako buňky mezní vrstvy. Celý proces dynamické sítě se pak bude odehrávat v této oblasti a zbytek sítě zůstane neovlivněn. Přetváření celé sítě se tedy omezí jen na tuto oblast. Tento problém lze dále omezit nastavením maximální délky buňky (Maximum Length Scale) na hodnotu, která přibližně odpovídá velikosti buněk v oddělené oblasti. Sít se i tak v celé této oblasti přetváří, ale výrazně méně, a má to mnohem menší vliv na výpočetní náročnost. Nově vytvořené buňky mají velikost, která odpovídá velikosti buněk v jejich okolí.

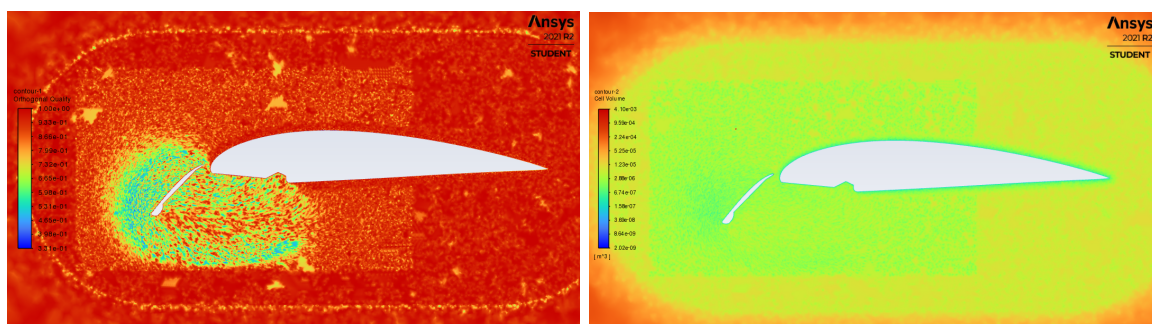
Sít přetvořená tímto způsobem vykazuje mnohem lepší parametry kvality sítě. Buňky, které mají špatnou kvalitu či jsou příliš velké, se navíc v následujícím časovém kroku přetvoří. Ortogonální kvalita přetvořené sítě je lepší oproti původnímu nastavení. Nejdůležitější vlastnost tohoto modelu je to, že zachovává jemnou sít v oblasti za klapkou. Velkou nevýhodou



je špatná konvergence výsledků, a to již při použití turbulentního modelu Spalart-Allmaras. Například pro obdélníkovou oblast s jemnější sítí neklesly hodnoty residua kontinuity pod hodnotu  $10^{-2}$ .



**Obrázek 2.49:** Přetvořená síť při použití jemnější oblasti v okolí klapky



**(a) :** Ortogonální kvalita

**(b) :** Velikost buněk

**Obrázek 2.50:** Kvalita sítě při použití jemnější oblasti v okolí klapky

Po zanalyzování všech použitých metod a postupů byly nakonec zvoleny již dříve vybrané parametry viz. kapitola 2.5.2 a původní síť. Pro tuto kombinaci sice výsledná síť byla horší kvality, ale model byl spolehlivý a výsledky poměrně dobře konvergovaly. Ale poslední zmiňovaná metoda s vytvořením jemnější oblasti určitě stojí za další prozkoumání. Vytvoření takové sítě, aby byl model funkční a výsledky spolehlivě konvergovaly, může být ale komplikovanější a vyžaduje rozsáhlejší optimalizaci.

## 2.9 Problematika nestacionárního modelu a konvergence výsledků

### 2.9.1 Nestacionární model a vliv velikosti časového kroku na konvergenci výsledků

Před nastavením nestacionární simulace byla ještě provedena úvaha nad volbou parametrů, které simulaci určují. Jelikož Machovo číslo vstupujícího proudění je přibližně 0,14, lze předpokládat, že proudění je jen mírně stlačitelné. Pro takové proudění se běžně používá, a mělo by mít dobré výsledky, řešení na základě tlaku (pressure-based). Řešení na základě hustoty by se případně použilo pro vyšší Machova čísla.

Byla brána v potaz podmínka CFL, která podmiňuje konvergenci výsledků. Kdyby se pro splnění této podmínky brala jako relevantní velikost buňky 0,001 m, byl by pro rychlost 42,5 m/s zapotřebí časový krok okolo  $2 \cdot 10^{-5}$  s. To je velký rozdíl oproti plánované hodnotě 0,05 s. Proto byla provedena dodatečná rešerše této problematiky viz. [26] a [27], ze které plyne, že pro implicitní schéma výpočtu není CFL podmínka nutná. Jelikož řešení na základě tlaku je ve Fluentu pouze implicitní, není nutné CFL podmínku dodržet. Lze tedy použít i větší časové kroky. Výpočty byly provedeny pro časové kroky 0,05 s a 0,025 s.

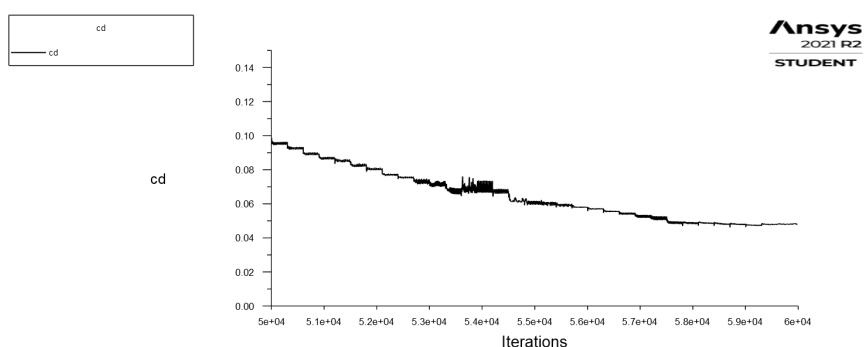
Maximální počet iterací byl určen jako 300 na základě provedených statických výpočtů. Byly použity stejné podmínky pro dosažení konvergence, tedy hodnoty residua kontinuity pod  $10^{-6}$  nebo neměnnost  $c_l$  na 6. desetinném místě v posledních 10 iteracích.

### 2.9.2 Vliv přetváření sítě na konvergenci výsledků

Na provedených výpočtech lze často pozorovat, že se dosažené hodnoty residuí a konvergence sledovaných veličin  $c_d$  a  $c_l$  v průběhu času mění. Na průběhu  $c_d$  a  $c_l$  se to projeví kolísáním hodnot. Na hodnotách residuí se to může projevit kolísáním hodnot nebo jejich i řádovým zvýšením. Dá se to vysvětlit tím, že konvergence výsledků se velmi odvíjí od použité sítě a její kvality.

Přeměnou sítě tedy může dojít ke zhoršení konvergence výsledků a k jejich zneřádnění. Je tedy dobré provést analýzu průběhu jak residuí, tak hodnot  $c_d$  a  $c_l$ . Jelikož k tomuto problému může dojít až hluboko v průběhu simulace, je už vstupní síť hodně přetvořená a její změny by měly jen malý vliv na konvergenci.

Je tedy třeba brát v úvahu, jak velká chyba může vzniknout a v jak velké časové oblasti model hůře konverguje.



**Obrázek 2.51:** Oscilace hodnot v průběhu vysouvání klapky

### 2.9.3 Konvergence výsledku při použití modelu Transition SST

Jedním z problémů použití turbulentního modelu Transition SST je jeho mohutnost. Skládá se ze 4 rovnic, tudíž je dosažení konvergence mnohem těžší než pro jednorovnicový model Spalart-Allmaras, obzvláště pro sítě s horší kvalitou. Proto je patrně dobrým postupem nejdříve provést výpočet pomocí tohoto modelu a následně vyhodnotit konvergenci, než se pokročí k použití modelu Transition SST. Model Transition SST se také zdá být poměrně citlivý na změny sítě v průběhu času.

Při špatné konvergenci výsledků se dají provést změny v prostorové diskretizaci výpočtu. Použitím 1. řádu diskretizace místo 2. by mělo dojít k zlepšení konvergence výpočtu, avšak také k zneřádnění výsledků. V praxi se dá použít metoda, kdy začátek výpočtu je proveden v 1. řádu a po dosažení určitých hodnot je přepnuto na 2. řád diskretizace. Tuto metodu ve Fluentu nahrazuje funkce High Order Term Relaxation. Tato funkce byla použita pro všechny výpočty s modelem Transition SST.

## 2.10 Výsledky výpočtů pro vybrané případy

Dalším krokem diplomové práce bylo provedení výpočtů proudění s použitím dynamické sítě. Kompletní výpočty byly provedeny pro 4 modely s těmito parametry:

- Časový krok = 0,05-0,1 s; Spalart-Allmaras;  $\alpha = 0^\circ$
- Časový krok = 0,05 s; Spalart-Allmaras;  $\alpha = 0^\circ$
- Časový krok = 0,025 s; Spalart-Allmaras;  $\alpha = 10^\circ$
- Časový krok = 0,025 s; Transition SST;  $\alpha = 10^\circ$

Pro případy s úhlem náběhu  $0^\circ$  byl použit model s hrubší sítí mezní vrstvy. Pro případy s úhlem náběhu  $10^\circ$  byl použit model s jemnější sítí mezní vrstvy. Během výpočtu byly primárně sledovány hodnoty  $c_l$  a  $c_d$  a rychlostní profil proudění. V některých případech byly sledovány i vektory rychlosti, vířivost (pro kontury vířivosti bylo použito logaritmické měřítko), hodnoty  $y_+$ , nebo rozložení  $c_p$  po hloubce klapky a profilu. Příložené obrázky jsou pro čas  $t = 2,5$  s a plně vysunutou klapku a ustálené proudění. Dále byly analyzovány průběžné změny těchto parametrů. Ty byly analyzovány z vytvořených animací, které budou poskytnuty v příloze. Jelikož záznam residuí je problematický, byla pořízena i animace průběhu residuí, ze které jsou patrné přibližné hodnoty.

### 2.10.1 Časový krok = 0,05-0,1 s; Spalart-Allmaras; $\alpha = 0^\circ$

Pro tento případ byla pro prvních 30 časových kroků použita hodnota 0,05 s, aby se předešlo tvorbě negativních objemů. Poté byl použit časový krok 0,1 s. Tento model byl použit primárně pro sledování vlivu velikosti časového kroku na výsledky. Jak je patrné z Obrázku 2.56, hodnoty  $c_l$  a  $c_d$  jsou ve sledovaných časech (2,5 a 5 s) prakticky stejné. I sledované kontury rychlosti a vířivosti byly prakticky totožné, a proto tu nejsou uvedeny. Obrázky z dalšího případu se tedy dají vztáhnout i na případ tento.

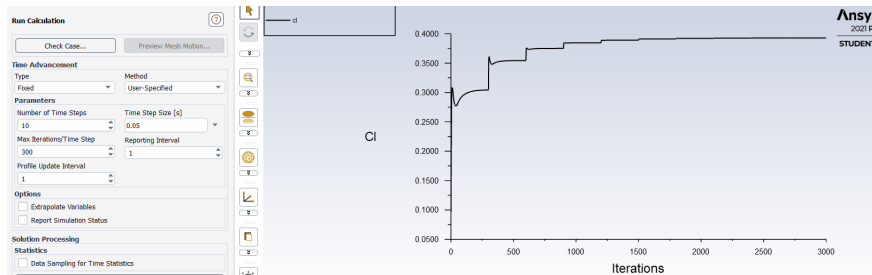
Průběhy  $c_l$  a  $c_d$  jsou znázorněny až později při porovnání s časovým krokem 0,05 s.

### 2.10.2 Časový krok = 0,05 s; Spalart-Allmaras; $\alpha = 0^\circ$

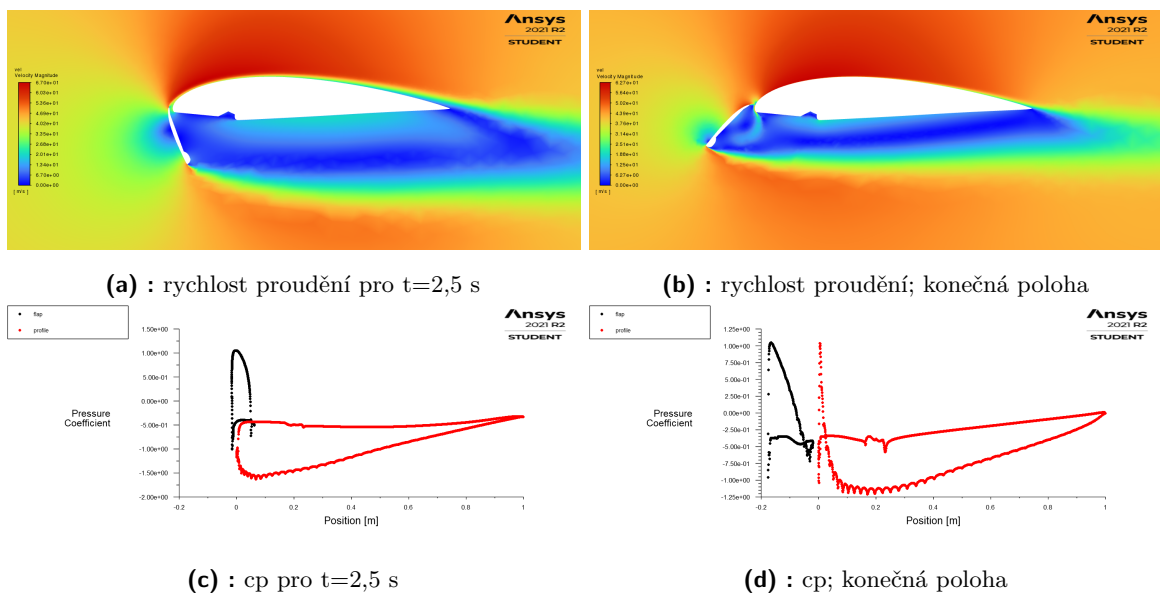
Zmenšení časového kroku by mělo zajistit bezproblémový průběh přetvoření sítě a lépe zaznamenat náhlé změny.

Pro všechny případy kromě tohoto byly hodnoty v čase 0 získány pomocí stacionárního výpočtu. Zde byly úvodní hodnoty stanoveny pomocí nestacionární simulace s 0 kroky. Po shlédnutí výsledků bylo zjištěno, že tato metoda úvodní hodnotu vypočte, ale s poměrně

velkou chybou. Aby se předešlo opakování výpočtu, byla provedena analýza této chyby, kterou bylo zjištěno, že po několika (5-10) časových krocích tato chyba zmizí. Zajímavé je, že velikost této chyby přímo závisela na velikosti „nulového“ časového kroku. V grafech je tato chyba patrná přibližně do času 0,25 s.

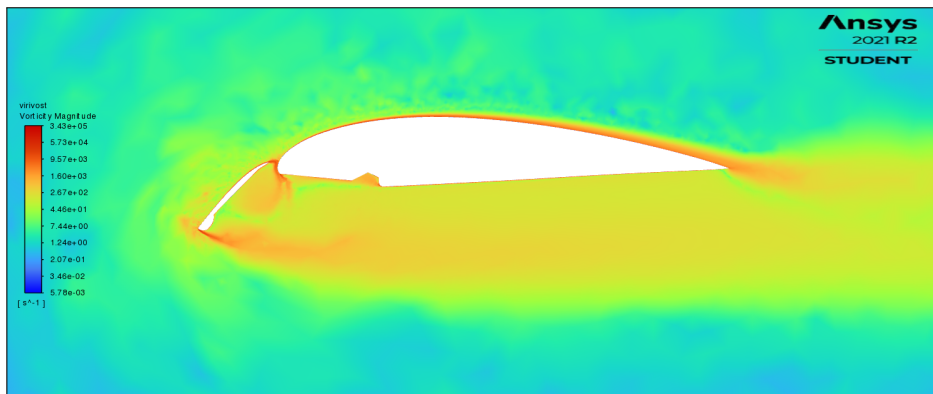


Obrázek 2.52: Analýza chyby vnesené do výpočtu nestacionárním výpočtem hodnot v čase  $t=0$  s

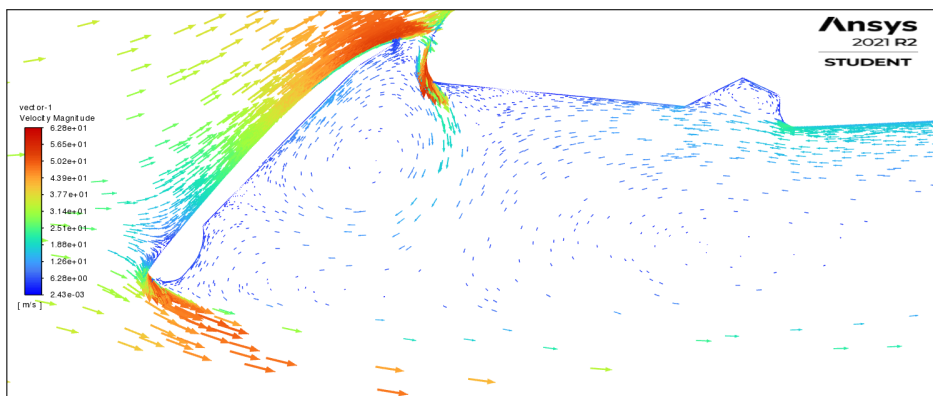


Obrázek 2.53: Kontury rychlosti a  $c_p$  po hloubce profilu; časový krok = 0,05 s;  $\alpha = 0^\circ$





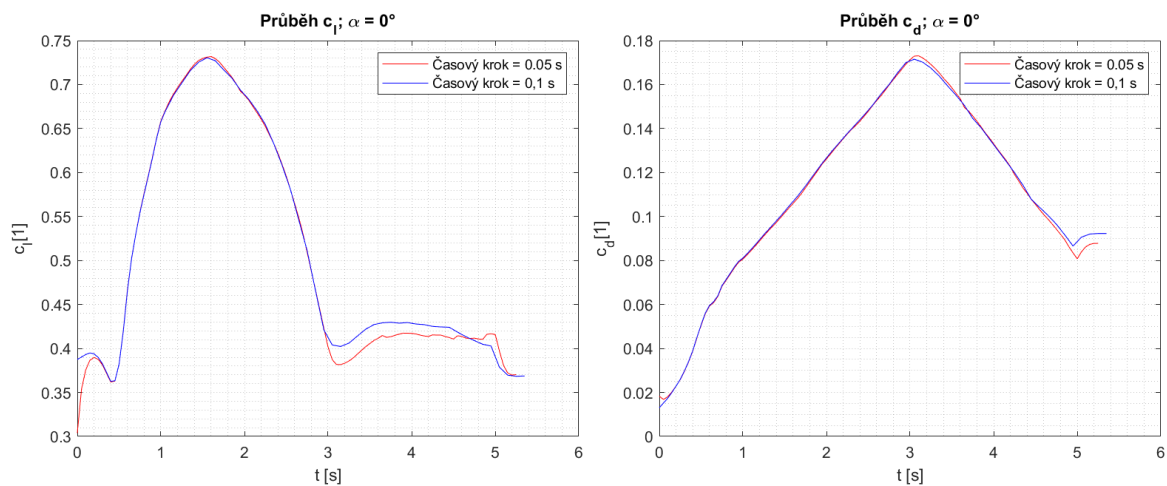
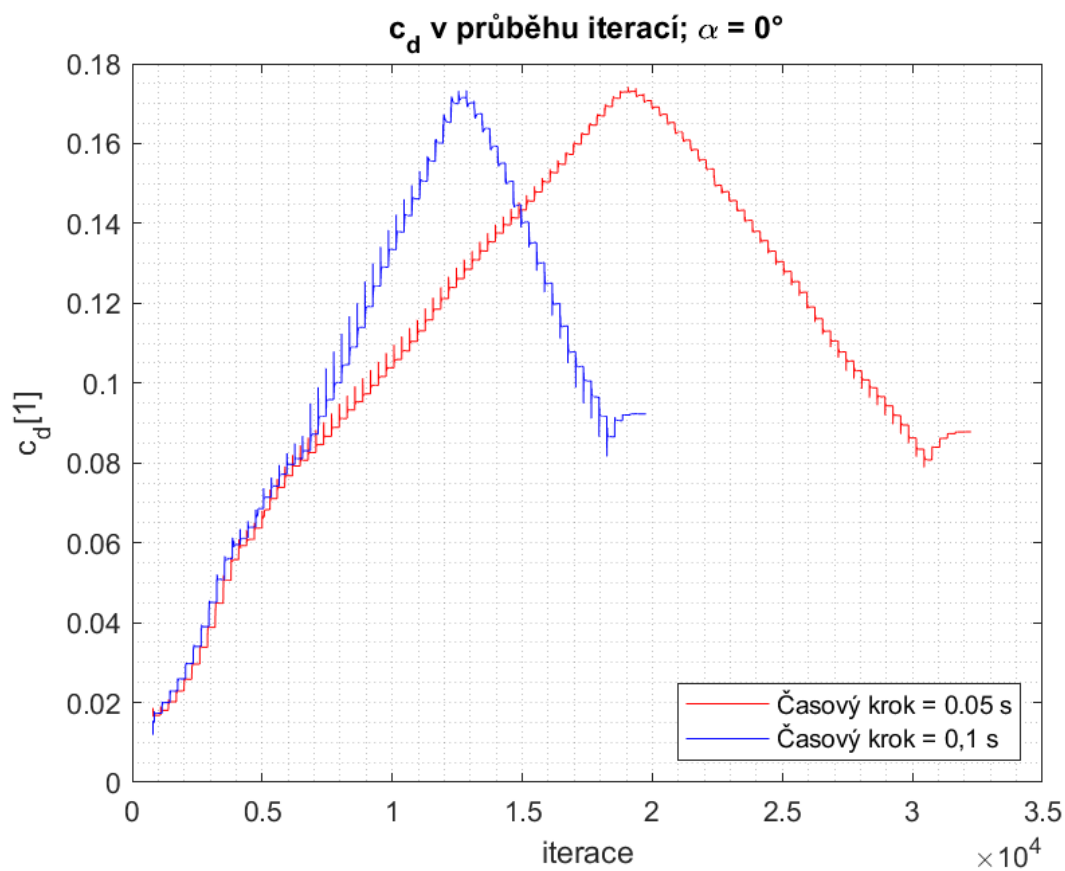
Obrázek 2.54: Vířivost;  $\alpha = 0^\circ$ ; konečná poloha



Obrázek 2.55: Vektory rychlosti proudění;  $\alpha = 0^\circ$ ; konečná poloha

Poměrně zajímavá je oblast za vysunutou klapkou. Dochází zde k vzniku vířivého proudění závislého na poloze klapky. Jak je patrné z obrázků, vzduch proniká mezerou mezi klapkou a profilem a tím způsobuje víření, které má opačný směr oproti víření způsobenému klapkou.

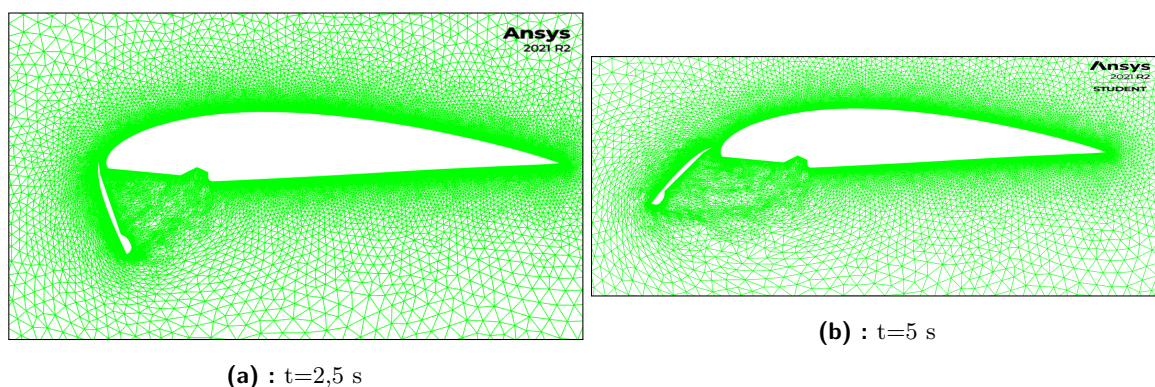
### Analýza výsledků pro $\alpha = 0^\circ$

Obrázek 2.56: Průběh  $c_l$  a  $c_d$ ;  $\alpha = 0^\circ$ Obrázek 2.57: Průběh hodnot  $c_d$  dle iterací;  $\alpha = 0^\circ$

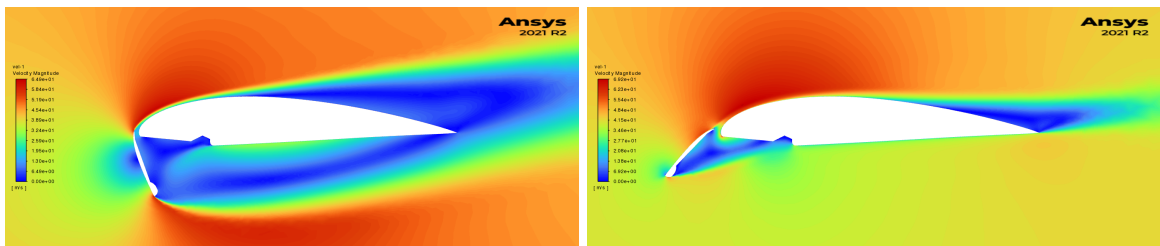
**2.10.3 Časový krok = 0,025 s; Spalart-Allmaras;  $\alpha = 10^\circ$** 

Tento případ byl původně proveden pro časový krok 0,05 s a pro hrubší síť mezní vrstvy. Docházelo zde ale k zajímavému jevu, kdy se hodnoty  $c_l$  i  $c_d$  pravidelně rozkmitají, toto lze vidět i na kmitání mezní vrstvy. Toto kmitání se během asi 2 s postupně utlumilo. Analýzou výsledků bylo zjištěno, že se nejedná o chybu nedostatečné konvergence řešení a kmitání bylo zachováno i při použití časového kroku 0,01 s. Pro kontrolu tedy byl proveden výpočet i pro jemnější mezní vrstvu s časovým krokem 0,025 s. V tomto modelu se toto kmitání s velkou amplitudou nevyskytuje a nevyskytuje se ani při výpočtu s modelem Transition SST. Dá se tedy předpokládat, že toto kmitání byla chyba příliš hrubé sítě v oblasti mezní vrstvy. Pro lepší výsledek byl proto použit model s jemnější mezní vrstvou a s časovým krokem 0,025 s.

Protože přetvořená síť pro časový krok 0,025 s nebyla v předchozích částech vyobrazena, je tato síť zahrnuta do výsledků.

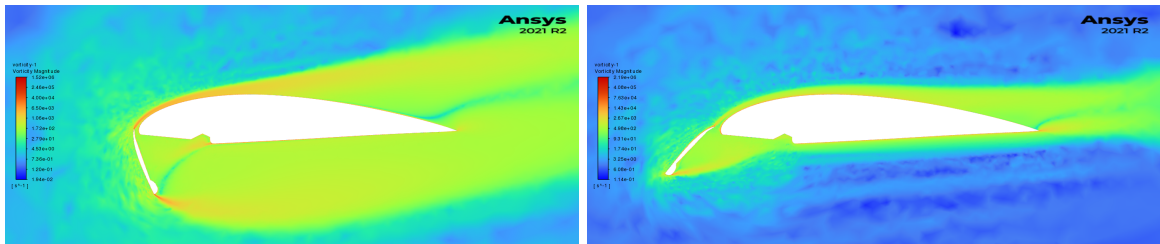


**Obrázek 2.58:** Přetvoření sítě pro časový krok 0,025 s



(a) : rychlost proudění pro  $t=2,5$  s

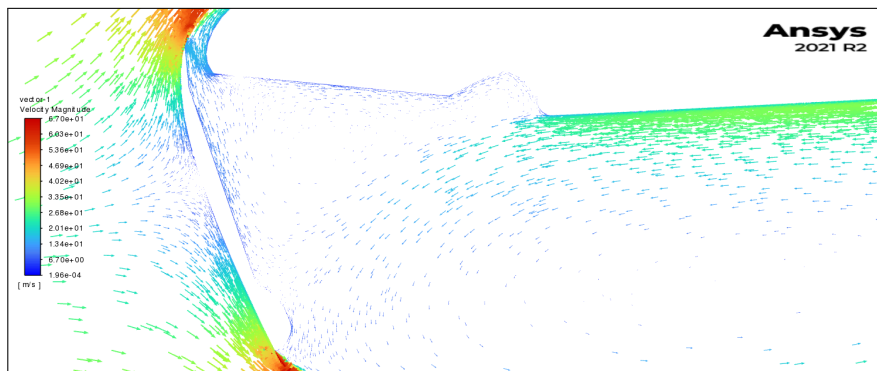
(b) : rychlost proudění; konečná poloha



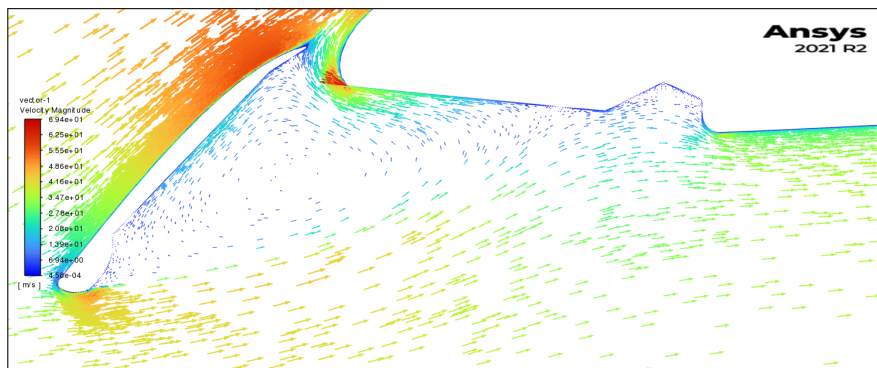
(c) : vířivost pro  $t=2,5$  s

(d) : vířivost; konečná poloha

**Obrázek 2.59:** Kontury rychlosti a vířivosti; Spalart-Allmaras;  $\alpha = 10^\circ$



**Obrázek 2.60:** Vektory rychlosti proudění;  $t=2,5$  s; Spalart-Allmaras;  $\alpha = 10^\circ$



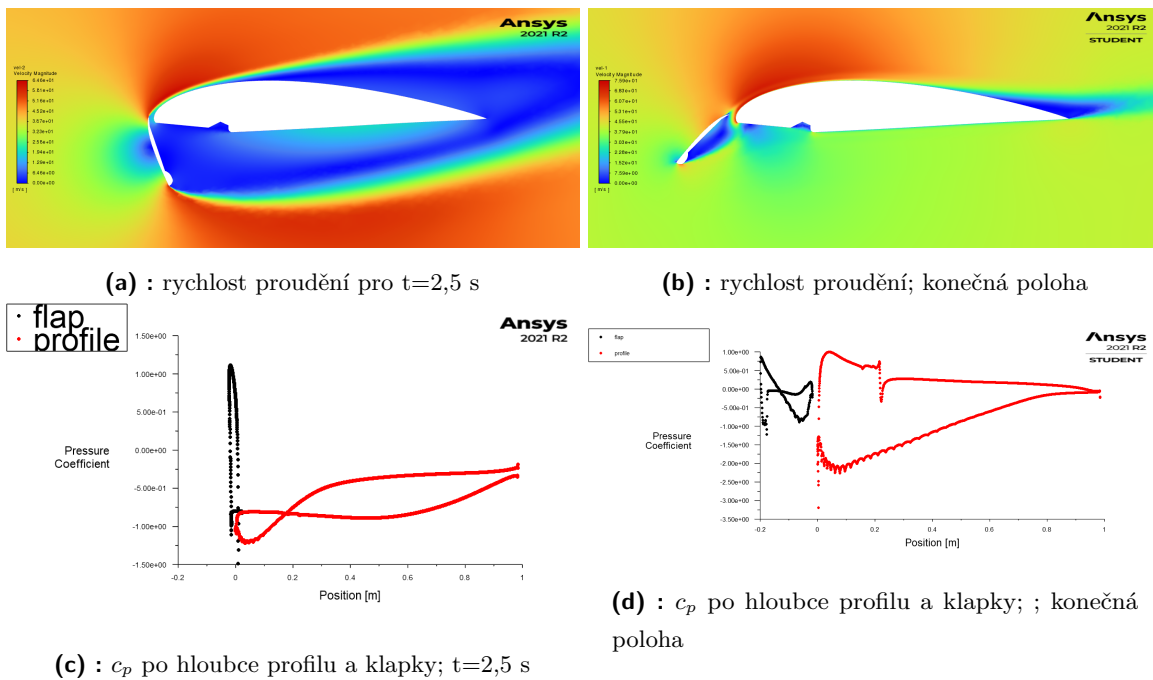
**Obrázek 2.61:** Vektory rychlosti proudění; konečná poloha; Spalart-Allmaras;  $\alpha = 10^\circ$

Na vektorovém poli rychlostí, které je znázorněno na Obrázcích 2.60 a 2.61, je patrný poměrně velký rozdíl oproti Obrázku 2.55. Vzduch v tomto případě neproudí mezerou do vířivého pole za klapkou, ale naopak proudí z něho. Výsledkem je, že nevzniká vír v opačném směru a celé vířivé pole je kompaktnější.

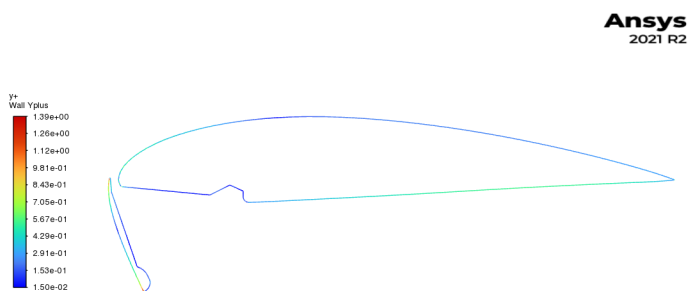
### 2.10.4 Časový krok = 0,025 s; Transition SST; $\alpha = 10^\circ$

Pro tento případ lze při kontrole průběhu  $c_d$  a  $c_l$  (Obrázek 2.65) vidět, že proudění se po ukončení pohybu klapky poměrně dlouho stabilizuje. Navíc hodnoty v čase 5 s, kdy skončí pohyb, a hodnoty po ustálení se poměrně výrazně liší. Tímto jevem se práce důkladněji zabývá později. Jako níže uvedené výsledky jsou zobrazeny hodnoty při konečné poloze klapky a ustálení proudění.

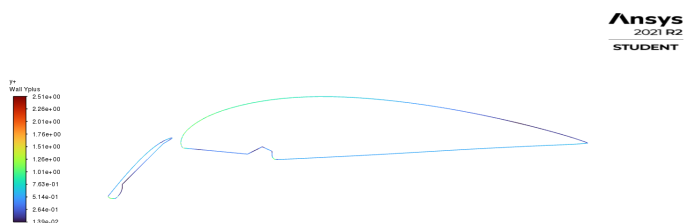
Pro tento výpočet se bohužel nepodařilo zaznamenat vířivost v průběhu vysouvání klapky, ale byly zaznamenány průběhy  $c_p$  a  $y^+$ .



Obrázek 2.62: Kontury rychlosti a vířivosti; Transition SST;  $\alpha = 10^\circ$

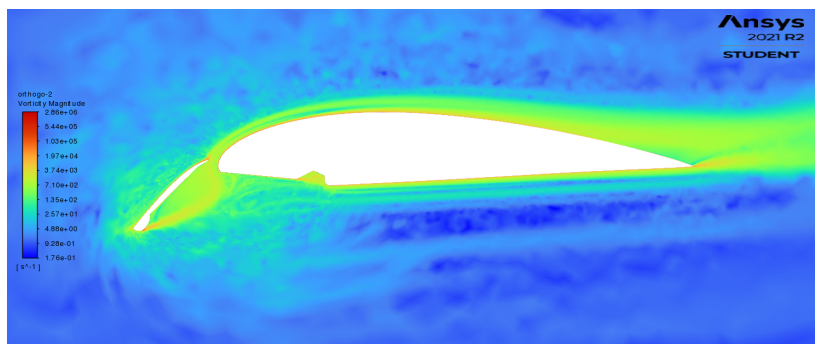


(a) :  $t = 2,5$  s



(b) :  $t = 5$  s

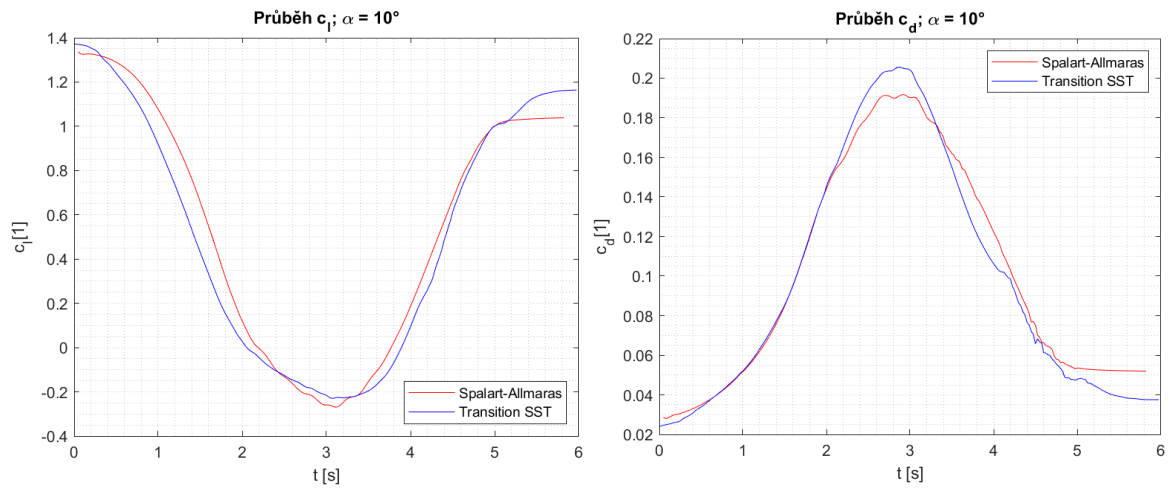
Obrázek 2.63: Hodnoty  $y^+$  klapky a profilu; jemnější síť mezní vrstvy,  $\alpha = 0^\circ$



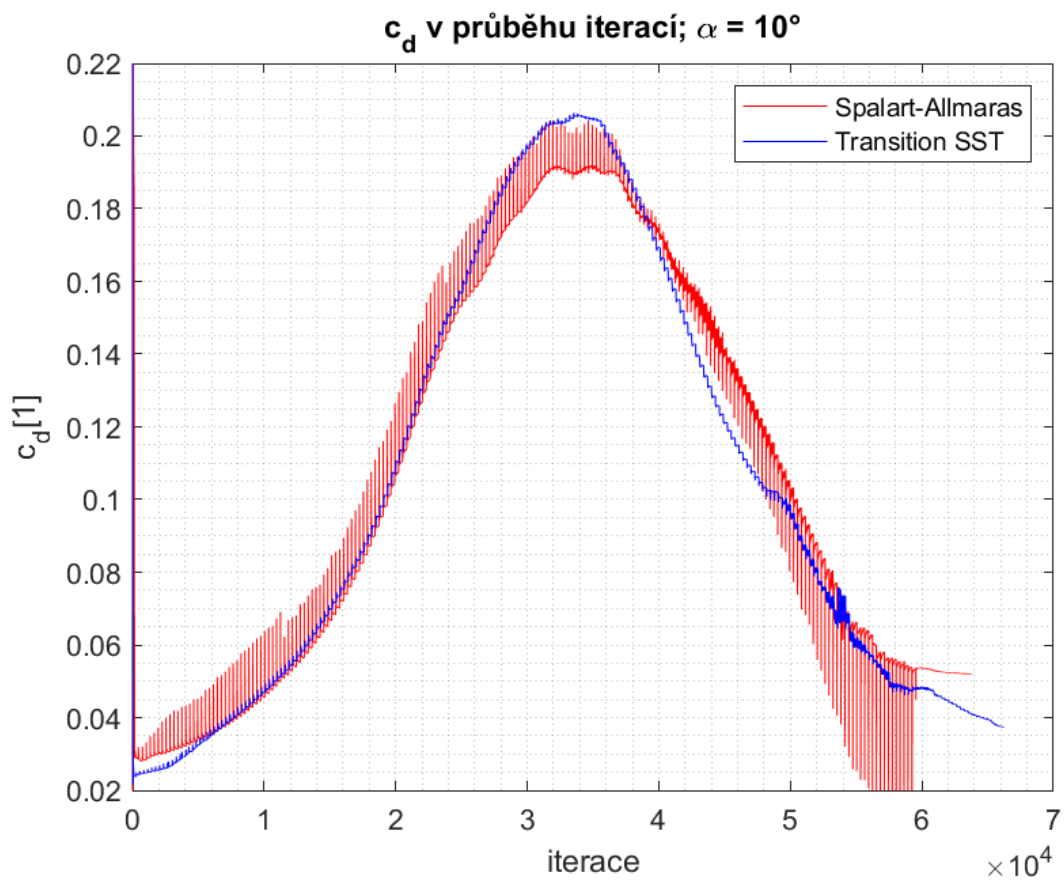
Obrázek 2.64: Vířivost; konečná poloha; Transition SST;  $\alpha = 10^\circ$

Maximální hodnota  $y^+$  dle Obrázku 2.63 je sice přes 2, ale z detailů je patrné, že takto vysoké hodnoty se objeví jen v několika málo buňkách na hraně klapky.

## Analýza výsledků pro $\alpha = 10^\circ$



Obrázek 2.65: Průběh  $c_l$  a  $c_d$ ;  $\alpha = 10^\circ$



Obrázek 2.66: Průběh hodnot  $c_d$  dle iterací;  $\alpha = 10^\circ$



Z uvedených grafů je patrné, že pro tento úhel náběhu výpočty zdatelně hůře konvergovaly, a to pro oba dva turbulentní modely. Může to být jinou orientací buněk vůči směru proudění. Při detailnějším pohledu na průběh  $c_d$  při jednotlivých krocích lze dokonce vidět, že model Spalart-Allmaras konverguje ve většině výpočtu zdatelně hůře. V některých časových krocích dokonce nedochází k dostatečnému ustálení výsledku  $c_d$ . Stanovení maximálního počtu iterací jako 300 pro jeden časový krok bylo tedy pro tento turbulentní model a úhel náběhu nedostačující.

## 2.11 Porovnání výsledků se statickým výpočtem

### 2.11.1 Tvorba statických modelů

Pro stacionární výpočty byly vytvořeny 2 modely profilu s klapkou, a to v časech  $t = 5 s$  a  $t = 2,5 s$ . Síť byla vytvořena tak, aby kopírovala kvalitu vstupní sítě použité pro nestacionární výpočet. Byla použita jemnější síť buněk pro mezní vrstvu optimalizovaná pro hodnotu  $y^+ = 1$ . Celková velikost buněk byla stanovena na 0,05 m a velikost buněk v místě profilu a klapky byla stanovena jako 0,001 m.

Dále byly provedeny stacionární výpočty s využitím jak modelu Spalart-Allmaras, tak Transition SST. Vlastnosti vzduchu odpovídaly standardní atmosféře ve výšce 0 m. Vstupní rychlost proudění byla opět stanovena na 42,5 m/s. Výpočet byl proveden pro úhly náběhu  $0^\circ$  a  $10^\circ$ .

Při použití modelu Transition SST docházelo opět k problémům s konvergencí a oscilací hodnot. V těchto případech byla brána střední hodnota oscilace. U plně vysunutých klapky s úhlem náběhu  $10^\circ$  se nepodařilo dosáhnout dobré úrovně konvergence pro model Transition SST, tudíž tyto vypočtené hodnoty musí být brány s rezervou.

### 2.11.2 Porovnání součinitelů $c_d$ a $c_l$

Následující tabulky ukazují hodnoty  $c_d$  a  $c_l$  vypočtené s využitím dynamické sítě a hodnoty vypočtené stacionárním modelem. U výsledků z dynamické sítě je brána hodnota až po ustálení proudění, tedy ne přímo v čase  $t = 5 s$ .

	Turbulentní model	$c_l$ [1]	$c_d$ [1]
Dynamická síť	Spalart-Allmaras; 0,05-0,1 s	0,59462	0,14836
Dynamická síť	Spalart-Allmaras; 0,05 s	0,59591	0,14785
Stacionární výpočet	Spalart-Allmaras	0,59863	0,14525

**Tabulka 2.4:** Porovnání  $c_l$  a  $c_d$  pro  $\alpha = 0^\circ$  a  $t = 2,5 s$



	Turbulentní model	$c_l$ [1]	$c_d$ [1]
Dynamická síť	Spalart-Allmaras; 0,05-0,1 s	0,36873	0,09228
Dynamická síť	Spalart-Allmaras; 0,05 s	0,37022	0,08781
Stacionární výpočet	Spalart-Allmaras	0,35556	0,08594

**Tabulka 2.5:** Porovnání  $c_l$  a  $c_d$  pro  $\alpha = 0^\circ$  a plné vysunutí

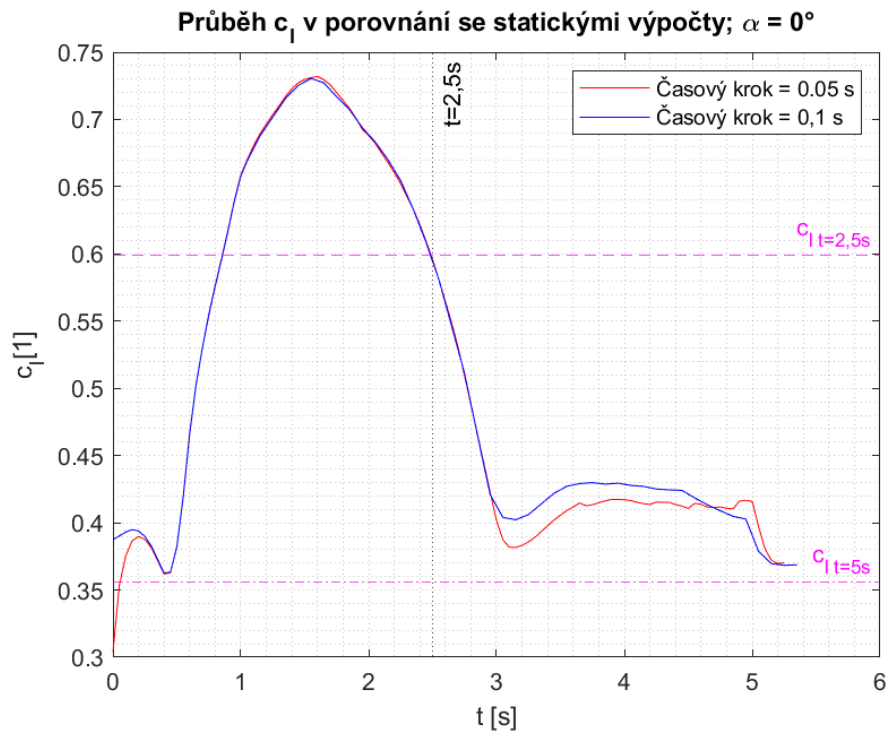
	Turbulentní model	$c_l$ [1]	$c_d$ [1]
Dynamická síť	Spalart-Allmaras; 0,025 s	-0,13867	0,18238
Dynamická síť	Transition SST; 0,025 s	-0,12017	0,19175
Stacionární výpočet	Spalart-Allmaras	-0,24410	0,18825
Stacionární výpočet	Transition SST	-0,13370	0,17825

**Tabulka 2.6:** Porovnání  $c_l$  a  $c_d$  pro  $\alpha = 10^\circ$  a  $t = 2,5 s$

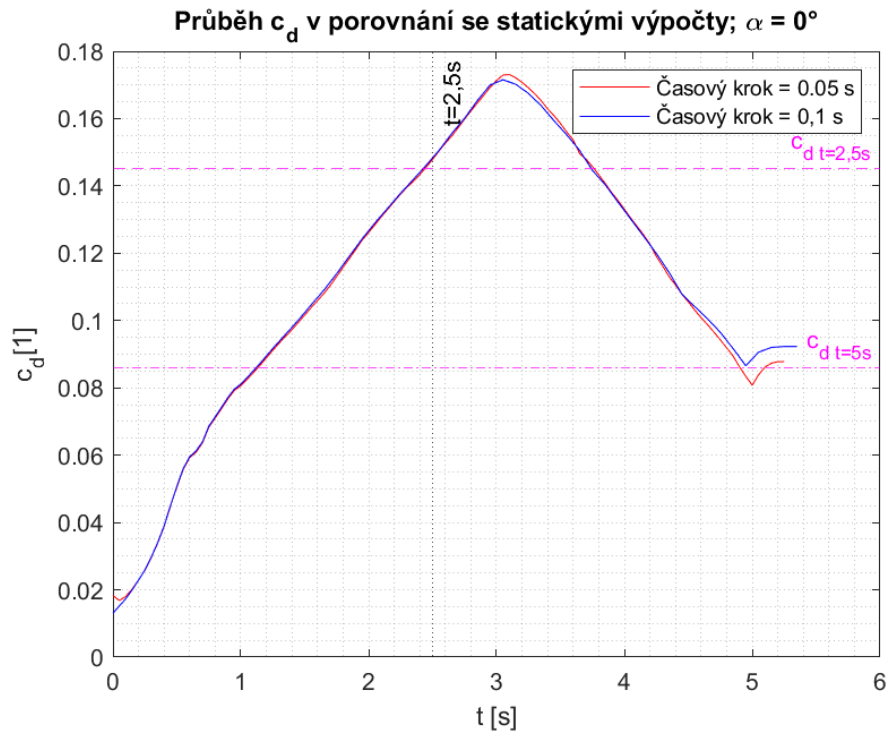
	Turbulentní model	$c_l$ [1]	$c_d$ [1]
Dynamická síť	Spalart-Allmaras; 0,025 s	1,03850	0,05202
Dynamická síť	Transition STT; 0,025 s	1,16390	0,03758
Stacionární výpočet	Spalart-Allmaras	1,02717	0,04743
Stacionární výpočet	Transition SST	1,01081	0,04469

**Tabulka 2.7:** Porovnání  $c_l$  a  $c_d$  pro  $\alpha = 10^\circ$  a plné vysunutí

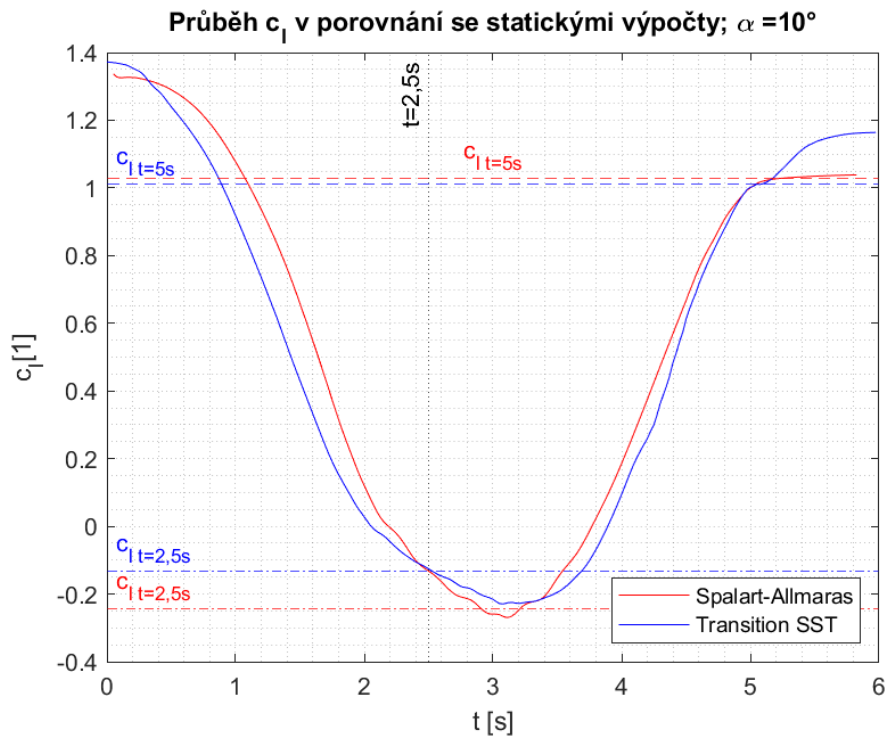
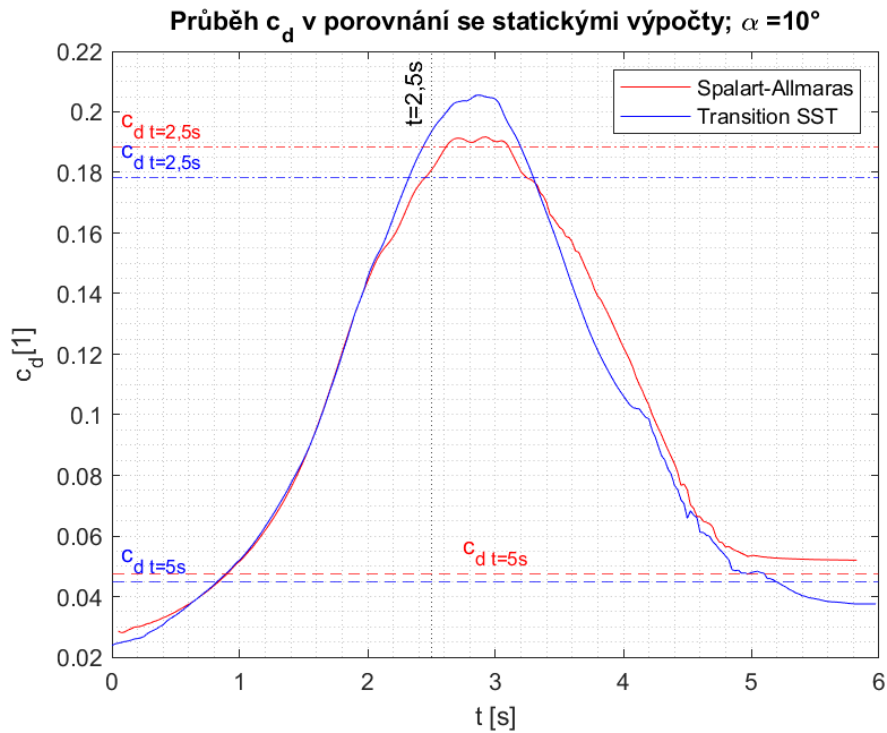
Toto porovnání bylo dále zpracováno i graficky s vyznačenými hodnotami statického výpočtu.



**Obrázek 2.67:** Grafické porovnání průběhu  $c_l$  se statickými výpočty;  $\alpha = 0^\circ$



**Obrázek 2.68:** Grafické porovnání průběhu  $c_d$  se statickými výpočty;  $\alpha = 0^\circ$

Obrázek 2.69: Grafické porovnání průběhu  $c_l$  se statickými výpočty;  $\alpha = 10^\circ$ Obrázek 2.70: Grafické porovnání průběhu  $c_d$  se statickými výpočty;  $\alpha = 10^\circ$

Z uvedených grafů a tabulek je patrné, že při  $\alpha = 0^\circ$  hodnoty vypočtené pomocí dynamické sítě poměrně dobře odpovídají hodnotám vypočteným statickým výpočtem, obzvláště v čase  $t = 2, 5$  s.

Pro úhel  $\alpha = 10^\circ$  jsou rozdíly  $c_l$  malé a rozdíly  $c_d$  větší pro dané časy. Hodnoty  $c_l$  vypočtené pomocí dynamické sítě pro oba dva turbulentní modely a  $t = 2, 5$  s poměrně přesně odpovídají statickému výpočtu s využitím modelu Transition SST. Po plném vysunutí se hodnoty vypočtené pomocí dynamické sítě a modelu Transition SST postupně vlivem ustálení proudění vzdalují od hodnot, které byly získány statickými výpočty, a to hodnoty  $c_d$  i  $c_l$ . V čase  $t = 5$  s jsou hodnoty  $c_d$  vypočtené pomocí dynamické sítě a modelu Transition SST překvapivě vysoké a liší se o více než 0,013 oproti stacionárním výpočtům s využitím stejného modelu. Naopak  $c_d$  vypočtené pomocí modelu Spalart-Allmaras se od stacionárních hodnot liší jen velmi málo.

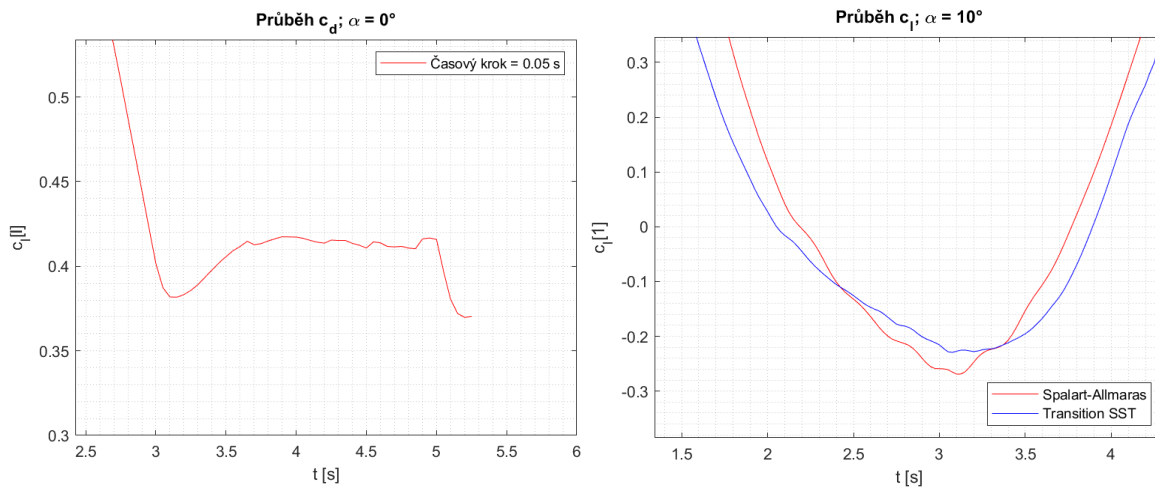
Ze sledování daných veličin vyplývá, že na přesnost výsledku má velký vliv úhel náběhu proudění, kdy pro  $\alpha = 10^\circ$  docházelo k výrazně větším nepřesnostem oproti statickým výpočtům. V čase  $t=2,5$  s jsou také rozdíly menší než po ustálení proudění. To může být způsobeno i menší deformací sítě.

## 2.12 Dynamické změny

Dynamické změny lze nejlépe pozorovat na animacích přiložených v příloze nebo pomocí grafů průběhu  $c_l$  a  $c_d$ . Průběh  $c_d$  se mění dle toho, jak moc je klapka vysunutá. Maxima  $c_d$  je dosaženo v čase, kdy je přední hrana klapky kolmá k rychlosti proudění.

Pro neočekávané a náhlé změny je potřeba ověřit residua a průběhy hodnot dle iterací, jelikož se může jednat o chyby způsobené nepřesnostmi výpočtu. Menší výkyvy ve výsledcích ve druhé půlce simulace pro  $\alpha = 10^\circ$  jsou způsobeny horší konvergencí výsledku. Je to patrné na průběhu  $c_l$  a  $c_d$  dle iterací a na průběhu residuí.

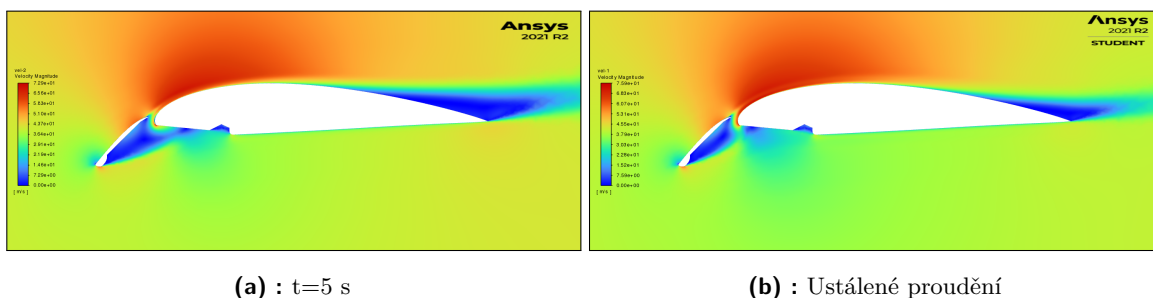
Při  $\alpha = 0^\circ$  lze na průběhu  $c_l$  a  $c_d$  vidět místy menší výkyvy oscilačního charakteru s malou amplitudou. Ty mohou být způsobeny vířivou charakteristikou proudění za klapkou pod spodní hranou profilu. Dle [12] mají hodnoty  $c_l$  a  $c_d$  při použití Krügerovy klapky oscilační charakter, jehož amplituda se zvyšuje a frekvence naopak snižuje s menším úhlem náběhu. Při důkladném pozorování animací kontur rychlosti lze i pozorovat velmi malé kmity mezní vrstvy. Toto tvrzení vysvětluje i to, proč podobné oscilace nejsou patrné pro časový krok 0,1 s. Takto velký časový krok nedokáže frekvenci kmitání zaznamenat. Pro úhel náběhu  $10^\circ$  jsou menší oscilace patrné v rozmezí 2 a 4 s. Další oscilace není patrná, protože může být amplituda této oscilace velmi malá, nebo její frekvence moc vysoká pro zachycení použitým časovým krokem.



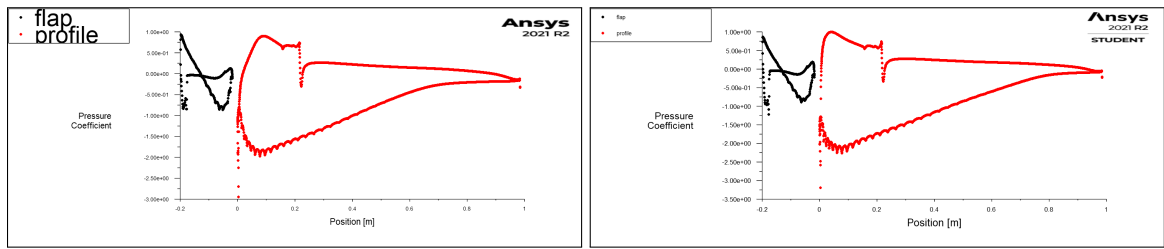
Obrázek 2.71: Viditelné oscilace na průběhu  $c_l$  a  $c_d$

Na obou dvou případech při  $\alpha = 0^\circ$  jsou patrné až skokové změny  $c_l$  a  $c_d$  vlivem ustálení proudění. Oblast za klapkou, kde převládá vířivé proudění, se ustálením proudění zmenšuje. Tato oblast vířivého proudění má pozitivní vliv, zvyšuje  $c_l$  a snižuje  $c_d$ , a proto jejím zmenšením dojde i ke změnám těchto hodnot.

Pro  $\alpha = 10^\circ$  toto ustálení trvá výrazně déle a pro model Spalart-Allmaras má jen minimální vliv na koeficienty. Naopak při použití modelu Transient SST je tento vliv velký. Těžko říci, který model tento jev zachycuje věrohodněji, protože model Transient SST během provedených výpočtů vykazoval přesnější výsledky, ale jím vypočtené koeficienty se značně liší od koeficientů, které byly získány statickým výpočtem. Hodnoty  $c_l$  a  $c_d$  po ustálení proudění vypočtené pomocí Spalart-Allmaras jsou naopak statickým výpočtům velmi blízko. Rozdíly pro model Transition SST jsou patrné na rychlostním profilu proudění viz. Obrázek 2.72 a rozložení  $c_p$  viz. Obrázek 2.73. Po ustálení proudění lze i pozorovat pozdější odtržení mezní vrstvy, které může způsobovat poměrně velký růst  $c_l$  mezi časem 5 s a mezi ustáleným prouděním.



Obrázek 2.72: Porovnání kontur rychlosti pro čas  $t = 5$  s a pro ustálené proudění

(a) :  $t=5$  s

(b) : Ustálené proudění

**Obrázek 2.73:** Porovnání  $c_p$  pro čas  $t = 5$  s a pro ustálené proudění

Bohužel, jak bylo zmíněno, se pro tento model nepodařilo zachytit vířivost v průběhu simulace, ale dá se předpokládat, že rozdíl mezi časem 5 s a ustáleným prouděním bude podobný jako pro kontury rychlosti.



## Kapitola 3

### Závěr

Výsledek práce lze hodnotit pozitivně. Podařilo se navrhnout a sestrojít funkční model využívající dynamické sítě. Takto získané výsledky se zásadně neliší od výsledků získaných použitím stacionárního modelu. Poměrně důkladně byla rozebrána problematika dynamické sítě a vyzkoušeny její různé varianty, ať už s lepšími, nebo horšími výsledky. Jelikož byla geometrie klapky určena jen velmi přibližně, konečné hodnoty vztlaku neodpovídají reálné Krügerově klapce.

Nevýhodou použitého postupu a modelu je, že nelze nasimulovat velmi malou nebo nulovou mezeru mezi klapkou a profilem. Velikost této mezery má velký vliv na aerodynamické vlastnosti celého modelu.

Dle provedených pokusů a dle provedené optimalizace by ale funkční model, který by simuloval malou nebo žádnou mezeru, možný byl. Postup by mohl být pro většinu modelu stejný, ale musely by se do modelu vložit příkazy, které by síť upravily před přiblížením klapky k profilu. Buňky mezních vrstev v blízkosti kontaktu/přiblížení, které by po většinu času byly nezávislé na přeměně sítě, by se před provedením výpočtu oddělily do vlastních zón. Několik časových kroků před kontaktem/přiblížením, by se pak tyto zóny zahrnuly do sítě celkové a staly by se deformovatelnými. Funkce detekce kontaktu by teoreticky měla zabránit tvorbě negativních objemů. Nebo by šlo jednoduše udělat mezeru, která by byla o trochu větší než součet tloušťky mezních vrstev, a vytvořit trajektorii bez kontaktu. Výsledný model bude pak ale poměrně složitý a jeho optimalizace bude náročná.

Na výsledky této práce se dá navázat například důkladnějším prověřením varianty s oblastí jemnější sítě okolo klapky. Další cesta může být vyzkoušení dynamické sítě na Krügerově klapce, která se po vysunutí dostane do kontaktu s horní náběžnou hranou profilu, nebo mezi nimi vznikne jen minimální mezera. Dále by se tento přístup dal otestovat na modelu a na CFD výpočtech reálné Krügerovy klapky, s čím je spojena i případná validace výsledků měřením v aerodynamickém tunelu.



Výhodou použití dynamické sítě je možnost sledování daných parametrů v celém průběhu vysouvání klapky. To může sloužit ke sledování chování proudění v průběhu vysouvání klapky s poměrně dobrou přesností, která ale kolísá.

Nevýhodou této metody je problematické přetváření sítě a nekonzistentní přesnost výsledků pro různé případy a modely. Z toho vychází větší náročnost při hledání optimálního, či alespoň přijatelného řešení. Dále není zaručeno, že přesnost výsledků nebude kvůli postupné deformaci sítě klesat. Nevýhodou je i časová náročnost nestacionární simulace.

Dle provedené práce lze tedy metodu dynamické sítě aplikovat na tento konkrétní druh problému. Výsledkem je dobrá vizualizace chování proudění v průběhu času, je ale třeba počítat se složitější optimalizací modelu a i z toho pramenící horší přesností výsledků.



## Literatura

- [1] *ANSYS FLUENT User's Guide*, vol. 15317. ANSYS, Inc., 2021.
- [2] “ANSYS CFD Free Tutorials - Ansys Fluent, Ansys CFX.” <https://cfd.ninja/>.
- [3] W. Versteeg, H. K., & Malalasekera, “An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method.” 2007.
- [4] F. E. . HITCHENS, *THE ENCYCLOPEDIA OF AERODYNAMICS*. Andrews UK Limited [www .andrewsuk .com](http://www.andrewsuk.com), 2015.
- [5] W. Krueger, “Systematic wind-tunnel measurements on a laminar wing with nose flap,” tech. rep., University of North Texas Libraries, 1947.
- [6] A. Shmilovich and E. Dickey, “Leading edge devices for enhanced high-lift and reduced noise,” *AIAA Scitech 2020 Forum*, vol. 1 PartF, no. February, pp. 1–15, 2020.
- [7] C. van Dam, “The aerodynamic design of multi-element high-lift systems for transport airplanes,” *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 38, no. 2, pp. 101–144, 2002.
- [8] P. K. C. Rudolph, “High-Lift Systems on Commercial Subsonic Airlines,” *NASA Contractor Report 4746*, no. September, pp. 1–154, 1996.
- [9] H. D. Akaydin, J. A. Housman, C. C. Kirisy, C. J. Bahr, and F. V. Hutcheson, “Computational design of a krueger flap targeting conventional slat aerodynamics,” *22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2016*, pp. 1–12, 2016.
- [10] P. Iannelli, J. Wild, M. Minervino, F. Moens, a. Vervliet, V. Maiorise, F. Technology, and A. O. Gmbh, “Design of a High-Lift System for a Laminar Wing,” *5th European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS)*, no. July, pp. 1–11, 2013.

- [11] P. Iannelli, J. Wild, M. Minervino, F. Moens, and M. Raets, “Analysis and application of suitable CFD-based optimization strategies for high-lift system design,” *ECCOMAS 2012 - European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, e-Book Full Papers*, no. Eccomas, pp. 7618–7637, 2012.
- [12] M. G. Cojocaru, M. L. Niculescu, and C. Vadean, “Unsteady numerical estimation of the aerodynamic loads of the Krueger flap,” no. March, 2012.
- [13] R. Kulhánek, Z. Pátek, P. Vrchota, N. Žižkovský, and J. Čečrdle, “Experimental and CFD study of Krueger flaps,” *31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2018*, no. September 2018, 2018.
- [14] R. Kulhánek, P. Vrchota, P. Procházka, and V. Uruba, “Experimental and CFD study of slotted Krueger flaps aerodynamics in critical locations,” no. 17, 2020.
- [15] V. M. Moraris, N. J. Lawson, and K. P. Garry, “Aerodynamic and performance characteristics of a passive leading edge Krueger flap at low Reynolds numbers,” *Aeronautical Journal*, vol. 116, no. 1181, pp. 759–769, 2012.
- [16] E. Q. Hussein, H. N. Azziz, and F. L. Rashid, “Aerodynamic Study of Slotted Flap for Naca 24012 Airfoil by Dynamic Mesh Techniques and Visualization Flow,” *Journal of Thermal Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 230–239, 2021.
- [17] “Dynamic Mesh - MR CFD - CFD Analysis, Consultation, Training, Simulation.” [.com/services/fluvent-modules/dynamic-mesh/](http://www.mrcfd.com/services/fluvent-modules/dynamic-mesh/).
- [18] *Ansys Fluent Customization Manual*, vol. 15317. ANSYS, Inc., 2021.
- [19] M. Athadkar and S. S. Desai, “Importance of The Extent of Far-Field Boundaries And of The Grid Topology In The CFD Simulation of External Flows,” *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, no. 2, pp. 2320–2092, 2014.
- [20] H. Abbott, A. E. VonDoenhoff, and L. S. Stivers, “Report No 824: Summary of Airfoil Data,” *National Advisory Committee for Aeronautics*, 1943.
- [21] “Airfoil Tools.” <http://airfoiltools.com/>, oct.
- [22] M. J. Aftosmis, “The Behavior of Linear Reconstruction Techniques on Unstructured Meshes,” no. May, 2014.
- [23] “Tips & Tricks: Convergence and Mesh Independence Study | Computational Fluid Dynamics (CFD) Blog – LEAP Australia & New Zealand.”

<https://www.computationalfluidynamics.com.au/convergence-and-mesh-independent-study/>.

[24] *Ansys Fluent Theory Guide*, vol. 15317. ANSYS, Inc., 2021.

[25] “Resemble.js : Image analysis.” <https://rsml.github.io/Resemble.js/>.

[26] “Courant in implicit unsteady – CFD Online Discussion Forums.” <https://www.cfd-online.com/Forums/star-ccm/165940-courant-implicit-unsteady.html>.

[27] “CFL Condition – CFD Online Discussion Forums.” <https://www.cfd-online.com/Forums/main/2989-cfl-condition.html>.