



**FAKULTA  
ŠROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav letadlové techniky**

**Návrh předního přitlačného křídla vozu  
Formula Student**

**Front wing design for the Formula  
Student vehicle**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2020**

**Ondřej ŠTOGL**

**Studijní program:** B2342 Teoretický základ strojního inženýrství

**Studijní obor:** 2301R000 Studijní program je bezoborový

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Klesa, Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štogl** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **473551**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh předního přitlačného křídla vozu Formula Student**

Název bakalářské práce anglicky:

**Front wing design for the Formula Student vehicle**

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Pravidla soutěže Formula Student
- 2) Předchozí vývoj
- 3) Základy aerodynamiky
- 4) Vývoj nové varianty přitlačného křídla
- 5) Vyhodnocení výsledků

Seznam doporučené literatury:

Literatura a podklady dle pokynů vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Klesa, Ph.D., ústav letadlové techniky FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce:



Ing. Jan Klesa, 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

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

29.4.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Návrh předního přítláčného křídla vozu Formula Student“ vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Jana Klesy, Ph.D., s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitulu této práce.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

Ondřej Štogl .....

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval zejména týmu eForce FEE Prague Formula, bez kterého by tato práce neměla šanci vůbec vzniknout. V návrhu mi poskytl veškerou svobodu a všechny patřičné prostředky a software potřebný pro vývoj. Velký dík patří také mým předchůdcům, Kateřině Burešové, za ochotu předat své zkušenosti a rady. Dále bych rád poděkoval svému vedoucímu práce, panu Ing. Janu Klesovi, Ph.D., za profesionální vedení, ucelené rady, trpělivost a víru, že tato práce může být ještě lepší. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, která mě při studiu bezmezně podporuje.

## Anotační list

Jméno autora:	Ondřej ŠTOGL
Název BP:	Návrh předního přitlačného křídla vozu Formula Student
Anglický název:	Front wing design for the Formula Student vehicle
Rok:	2020
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav:	Ústav letadlové techniky
Vedoucí BP:	Ing. Jan Klesa, Ph.D
Bibliografické údaje:	počet stran 46
	počet obrázků 30
	počet tabulek 14
	počet příloh 0
Klíčová slova:	Aerodynamika, Přední křídlo, Formula Student, Přítlak, Simulace
Keywords:	Aerodynamics, Front wing, Formula Student, Downforce, Simulation

### Anotace:

Tato práce řeší postup při návrhu předního přitlačného křídla studentské formule týmu eForce FEE Prague Formula. Popisná část se zabývá historickými předpoklady ovlivňujícími současný stav a pravidly pro návrh stanovenými vedením soutěže Formula Student. V analytické části jsou pak za tímto účelem popsány základní teoretické poznatky popisující okolnosti a vznik aerodynamických sil.

### Abstract:

The thesis deals with a Formula Student car front wing design for a team eForce FEE Prague Formula. The descriptive part brings the historical impact on current situation and the rules set by the Formula Student competition officials. In the analytical part the basics of the aerodynamical force theory are described.

## Obsah

Čestné prohlášení.....	III
Poděkování.....	IV
Anotační list .....	V
Seznam použitých veličin a značek .....	1
<b>1. Úvod.....</b>	<b>2</b>
<b>2. Historie aerodynamiky .....</b>	<b>3</b>
<b>3. Historie soutěže Formula Student:.....</b>	<b>6</b>
<b>4. Pravidla pro návrh aerodynamických prvků .....</b>	<b>7</b>
4.1 Umístění prvků .....	7
4.2 Specifikace hran .....	8
4.3 Stabilita a pevnost.....	9
<b>5. Tým eForce FEE Prague Formula.....</b>	<b>10</b>
5.1 Historie .....	10
5.2 Předchozí vývoj.....	10
5.2.1 Simulace.....	11
5.3 FSE.08.....	12
<b>6. Teoretická část .....</b>	<b>13</b>
6.1 Proudění.....	13
6.2 Vzduch a jeho vlastnosti .....	13
6.2.1 Tlak.....	14
6.2.2 Hustota .....	15
6.2.3 Viskozita.....	15
6.3 Mezní vrstva.....	16
6.3.1 Odtržení mezní vrstvy.....	16
6.4 Geometrie aerodynamického profilu .....	18
6.5 Aerodynamické síly a momenty .....	19
6.6 Podobnostní čísla.....	20
6.6.1 Reynoldsovo číslo .....	21

6.6.2	Machovo číslo .....	21
6.6.3	Součinitel vztlaku .....	22
6.6.4	Součinitel odporu.....	22
6.6.5	Součinitel klopného momentu .....	22
<b>7.</b>	<b>Návrh.....</b>	<b>23</b>
7.1	Terminologie částí předního křídla.....	23
7.2	Určení cílů.....	24
7.2.1	Výchozí situace .....	25
<b>8.</b>	<b>Vlastní vývoj.....</b>	<b>28</b>
8.1	Generátory vírů.....	28
8.2	Přidání ploutviček.....	30
8.3	Optimalizace .....	32
8.4	Pozicování.....	35
8.4.1	Šířka hlavního elementu.....	35
8.4.2	Pozice hlavního elementu .....	36
8.4.3	Pozice klapky.....	36
<b>9.</b>	<b>Diskuze .....</b>	<b>38</b>
<b>10.</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>40</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>41</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>42</b>
	<b>Citovaná literatura.....</b>	<b>43</b>

## Seznam použitých veličin a značek

Značka	Rozměr	Význam
$c$	[m/s]	Lokální rychlost zvuku
$C_D$	[-]	Součinitel odporu
$C_L$	[-]	Součinitel vztlaku
$C_m$	[-]	Součinitel klopného momentu
$D$	[m]	Charakteristický rozměr
$D, F_x$	[N]	Odporová síla
$F$	[N]	Síla
$H$	[m]	Výška
$l$	[m]	Referenční délka
$L, F_z$	[N]	Vztlaková síla
$M$	[-]	Machovo číslo
$M_y$	[Nm]	Klopný moment
$p$	[Pa]	Tlak
$p_d$	[Pa]	Dynamický tlak
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Referenční plocha
$U$	[m/s]	Rychlost volného proudu
$v, u$	[m/s]	Rychlost
$x$	[m]	Tečná vzdálenost
$y$	[m]	Kolmá vzdálenost
$\alpha$	[°]	Úhel náběhu
$\mu$	[N.s/m <sup>2</sup> ]	Dynamická viskozita
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	Kinematická viskozita
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Hustota
$Re$	[-]	Reynoldsovo číslo



## 1. Úvod

Aerodynamika je obor fyziky, konkrétně dynamiky plynů, zabývající se studiem proudění vzduchu a jeho interakcí s pevnými tělesy. Práce si klade za cíl podat historický a teoretický základ tohoto oboru, a to vše dávat do souvislostí a vztahu s automobily. Hlavním cílem je pak v praktické části, v návaznosti na těchto znalostech, chronologicky popsat návrh nové varianty předního přitlačného křídla. Práce obsahuje stanovení cílů až po vyhodnocení výsledků v diskuzi, které budou pro tým eForce FEE Prague Formula co největším přínosem z pohledu jak výsledné jízdní dynamiky, tak dlouhodobého vývoje.

V minulosti byla aerodynamika u automobilů zejména cestou k dosažení co nejvyšší rychlosti. V dnešní době je kladen čím dál větší důraz na snižování spotřeby paliva, a tedy i emisí. Obojího lze dosáhnout například zmenšením součinitele odporu pomocí optimalizace tvaru. S vývojem aerodynamiky rostlo také její využití. Správným návrhem lze docílit lepších jízdních vlastností, stability, jízdního komfortu či snížení úrovně hluku. U závodních speciálů se pak do hry dostává také snaha o co nejlepší možné projetí zatáčkou. To může být tím rychlejší, čím větší přitlačnou silou auto na vozovku působí. Enzo Ferrari kdysi prohlásil, že aerodynamika je pro lidi, kteří neumí postavit motor. Dnes už víme, jak moc se mýlil.

## 2. Historie aerodynamiky

Ačkoliv například povědomí o odporu vzduchu bylo zaznamenáno již za dob Aristotela, za jednoho z prvních aerodynamiků lze považovat až Sira Isaaca Newtona, který v roce 1726 tuto teorii rozvinul. V roce 1738 formuloval Daniel Bernoulli ve své knize Hydrodynamika slavnou rovnici vyjadřující zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění kapalin, dnes známou jako Bernoulliho rovnice. Sir George Cayley pak kapaliny jako první popsal a rozdělil základní síly působící na letící těleso – vztlak, odpor, tah a jeho tíhu. Dva zásadní problémy pro let těles těžších vzduchu z konce 19. století, tedy jak letadlu dodat potřebný tah a vytvoření křídel s profilem zajišťujícím uspokojivý poměr vztlaku a odporu, se povedlo v roce 1903 vyřešit bratrům Wrightovým. Vývoji aerodynamiky pomohl také výrazný rozmach aerodynamických tunelů. První vznikl již v roce 1871 (ukázka podobného typu na Obr. 1). Dnes mohou dosahovat i obrovských rozměrů a jsou jedním z klíčových vývojových zařízení v motorsportu (Obr. 2). [1] [2] [3]



Obr. 1.: Aerodynamický tunel bratří Wrightových [2]



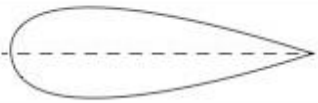


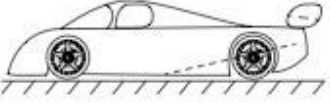
*Obr. 2.: Aerodynamický tunel v Maranello [4]*

U automobilů docházelo k aplikaci aerodynamických poznatků pomaleji, vzhledem k jejich rychlosti nebyl zásadní důvod. Za prvního výraznějšího průkopníka lze v tomto odvětví považovat rakouského inženýra Edmunda Rumplera a jeho Tropfenwagen (překl. vůz ve tvaru kapky) na Obr. 3 v roce 1921.[2] V Tab. 1 jsou řádově uvedeny příklady vztlakových a odporových koeficientů některých základních těles.



*Obr. 3.: Vůz Tropfenwagen [5]*

Tab. 1.: Vztlkové a odporové koeficienty [6]

			$C_L$	$C_D$
1	Low drag body of revolution		0	0.04
2	Low drag vehicle near the ground		0.18	0.15
3	Generic automobile		0.28	0.35
4	Prototype race car		-3.00	0.75

Prvním vozem, kde aerodynamika již neslouží pouze ke snížení odporu, ale do hry přichází také přítlak, je Lotus 49 z roku 1968 (Obr. 4). [7]



Obr. 4.: Vůz Lotus 49 [8]

Od této doby se jedná o jednu s nejvíce diskutovaných, progresivních oblastí vývoje závodních automobilů.

### 3. Historie soutěže Formula Student:

Formula Student vznikla v roce 1981 ve Spojených státech jako Formula SAE (Society of Automotive Engineers). [9] Dlouhou dobu se jednalo pouze o formule se spalovacími motory. Premiéra elektrických formulí proběhla až v roce 2010 v Německu a od té doby se jí účastní více než 170 týmů (k 9.12.2018). [10]

První auta s přitlačnými křídly se objevila 10 let po vzniku soutěže, v roce 1991. Jednalo se o týmy z Michiganu a Missouri (Obr. 5). Křídlo bylo umístěné nad hlavou pilota a vzhledem k proporcím vozu bylo velice rozměrné. Nesetkalo se však s pochopením, a i přes dobré výsledky obou týmů vstoupila v platnost výrazná změna pravidel výrazně omezující polohu a rozměry prvků aerodynamického paketu.



Obr. 5.: První křídlo týmu z Missouri 1991 [11]



Obr. 6.: Monopost TUfast Mníchov 2019 [12]

Až počátkem 21. století dochází díky týmu Monash Motorsport k jejich postupnému návratu, a to zejména díky možnosti vše otestovat v aerodynamickém tunelu v měřítku 1:1. V roce 2014 nastala díky rapidnímu rozšíření změna pravidel zmenšující přední i zadní přitlačné křídlo o 25 %, respektive o 1/3. Vrcholem byl v roce 2019 monopost týmu TUfast Mníchov (Obr. 6).

## 4. Pravidla pro návrh aerodynamických prvků

V návrhu aerodynamického paketu na sezónu 2020 jsme se nesnažili jen vylepšit paket předchozí, nýbrž jsme se museli řídit také opět lehce specifikovanými pravidly. Aerodynamický prvek je dle pravidel „speciálně vyvinutý díl za účelem usměrňování vzdušného proudu kolem vozu za účelem zvýšení přítláčné síly působící na vozidlo anebo snižující jeho odpor“. Veškerým specifikacím a požadavkům na polohu, velikost či vlastnosti vyrobeného aerodynamického prvku se věnuje oddíl T8 oficiálních pravidel soutěže FSG, jejíž důležité výňatky následují. [11]

### 4.1 Umístění prvků

Kapitola věnující se pozici aerodynamických prvků je rozdělena do tří částí – výšková, šířková a délková omezení. Dále je uvedeno její zkrácené znění zaměřené na informace z pozice konstruktérské, pro návrh nejzásadnější.

Všechny podmínky musí auto splňovat s koly směřujícími vpřed, s jakýmkoliv nastavením odpružení, s pilotem usazeným ve voze i bez něj. Pro všechny části auta s výjimkou kol také platí, že se musí nacházet minimálně 30 mm nad vozovkou s pilotem usazeným ve voze.

#### **Výšková omezení:**

- Všechna aerodynamická zařízení směrem vpřed od hlavové opěrky řidiče musí být níže než ve výšce 500 mm od země.
- Všechna aerodynamická zařízení směrem vpřed od přední nápravy nesmí být výše než 250 mm od země.
- Všechna aerodynamická zařízení směrem vzad od hlavové opěrky řidiče musí být nejvýše 1,2 m od země.

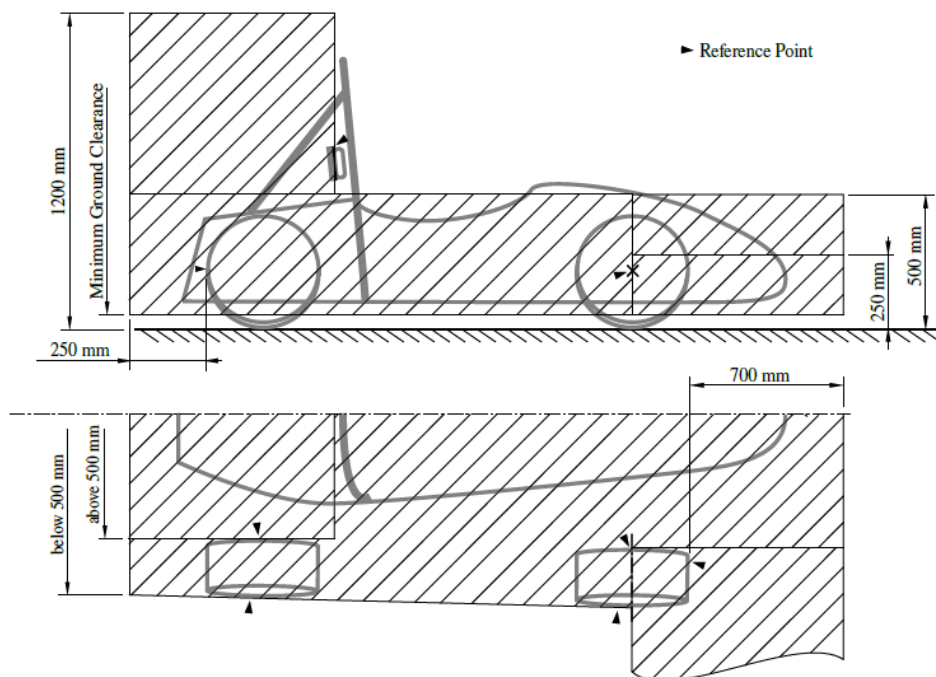
#### **Šířková omezení:**

- Všechna aerodynamická zařízení níže než 500 mm od země a směrem vzad od přední nápravy nesmí být širší než vertikální rovina spojující vnější rozměry předního a zadního kola.
- Všechna aerodynamická zařízení výše než 500 mm od země nesmí být širší než vnější rozměr zadního kola.

## Délková omezení

- Žádná aerodynamická zařízení nesmějí být směrem vzad více než 250 mm od zadních kol.
- Žádná aerodynamická zařízení nesmějí být směrem vpřed více než 700 mm od předních kol.

Pro lepší představu je popis doplněn také názorným obrázkem (Obr. 7).



Obr. 7.: Zónová omezení [13]

## 4.2 Specifikace hran

I přes nejvyšší snahy vždy předejít kontaktu jedoucího vozu s chodcem, teoreticky taková situace nastat může. Z bezpečnostních důvodů pravidla specifikují také zaoblení klíčových prvků.

- Všechny vpřed směřující hrany aerodynamických zařízení, které mohou přijít do kontaktu s chodcem, musí být zaobleny. Minimální rádius u horizontálních hran je 5 mm, u vertikálních 3 mm.

### 4.3 Stabilita a pevnost

Mimo ochranu potenciálních chodců při kontaktu s vozem pravidla pamatují také na samotné bezpečí na trati. Z tohoto důvodu je důležité, aby byly veškeré komponenty auta pevně uchyceny a měly potřebnou pevnost. Aby bylo auto připuštěno k samotnému závodu, musí nejdříve projít scrutineeringem (přejímkami). Právě zde se kontroluje, zda formule splňuje nejen veškeré technické požadavky a omezení, které by jí mohly přinést konkurenční výhodu, ale také bezpečnost. Aerodynamický paket musí být schopný splnit obě následující náležitosti.

- Jakékoliv aerodynamické zařízení musí být schopno odolat síle 200 N rozložené na minimální povrch 225 cm<sup>2</sup> a nesmí se vychýlit o více než 10 mm ve směru působící síly.
- Jakékoliv aerodynamické zařízení musí být schopno odolat síle 50 N působící v jakémkoliv směru v jakémkoliv bodě a nesmí se vychýlit o více než 25 mm.



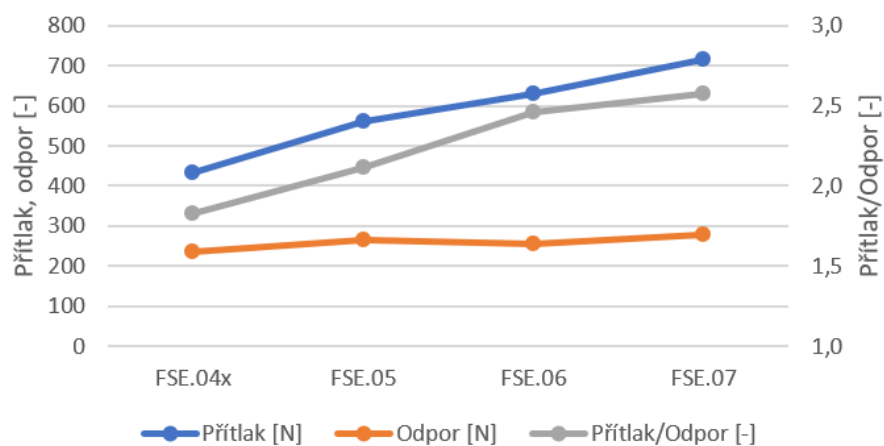
## 5. Tým eForce FEE Prague Formula

### 5.1 Historie

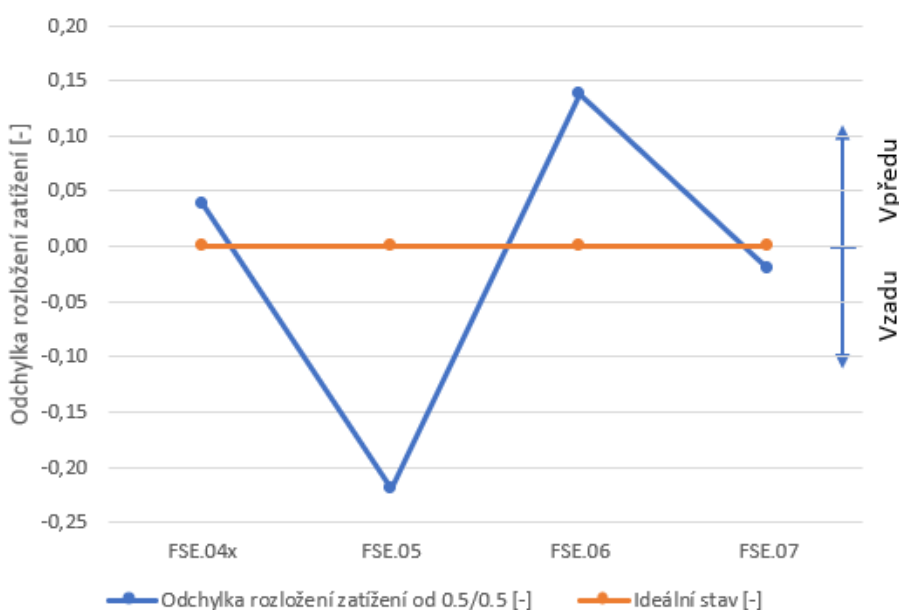
Tým eForce byl založen již v roce 2010 a dodnes zůstává jediným týmem v České republice stavějícím studentskou formuli s elektrickým pohonem. První monopost byl představen v roce 2012 jako FSE.01. První aerodynamické prvky byly přidány v roce 2014, jednalo se o třetí vůz. Čtvrtý monopost (2015) byl prvním, který disponoval pohonem všech čtyř kol. U pátého (2016) došlo k nahrazení trubkového nosného rámu monokokem sandwichové konstrukce z uhlíkového kompozitu. V minulém roce 2019 tým již osmou generaci vybavil pokročilým řídicím systémem.

### 5.2 Předchozí vývoj

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, první monopost týmu eForce, navržený také s ohledem na aerodynamiku, byl třetí vůz FSE.03. Z důvodu následné výrazné úpravy pravidel ale nemá velký smysl se mu více věnovat. Při návrhu designu aerodynamiky se v zásadě konstruktér snaží o dvě věci – snížit odporovou sílu působící proti pohybu vozu a zároveň maximalizovat sílu přitlačnou. O efektivitě návrhu tak nejvíce vypovídá poměr těchto dvou veličin. V letech 2015-2018 (předcházejícímu modelu FSE.08 se budu věnovat později) se dařilo držet příznivý trend, jak dokládá přiložený graf (Obr. 8). Dalším neméně důležitým parametrem je aerodynamické rozvážení. V případě velkého přitlaku zádi auta bude docházet k větší nedotáčivosti a naopak. Dlouhodobým cílem předchozích verzí bylo dosažení rovnoměrného zatížení. Jejich vzájemné srovnání je vidět na druhém grafu níže (Obr. 9).



Obr. 8.: Vývoj přítlaku a odporu



Obr. 9.: Vývoj aerodynamického rozvážení

### 5.2.1 Simulace

Srovnání jednotlivých verzí je nicméně velmi obtížné. V každém roce se zlepšoval nejen samotný design, ale také způsob, jakým je jednotlivých číselných výsledků dosaženo. Výrazné rozdíly jsou zejména ve způsobu meshování, neboli síťování. Síťování je proces, při kterém dochází k rozdělení složitějších geometrií na menší a jednodušší prvky. Ty jsou používány pro diskrétní lokální aproximaci oné větší domény. [14] Síť ovlivňuje rychlost simulace, konvergenci, ale především její přesnost a správnost. Ta se v průběhu let neustále měnila a zpřesňovala, aby výsledné hodnoty co nejvíce odpovídaly realitě. Nominálně horší výsledek tedy nemusí nutně znamenat horší návrh geometrie, ale třeba jen přesnější síťový model a způsob výpočtu.

### 5.3 FSE.08

V předchozím roce došlo s vozem FSE.08 (Obr. 10) k největším změnám za posledních několik let. Z mechanického hlediska byl kompletně přepracován box akumulátoru za účelem jeho lepšího chlazení, změněn systém odpružení ze systému využívajícího tažnou tyč (pull rod) na tlačnou tyč (push rod) a přidán nový aerodynamický prvek – difuzor. Předěláno bylo také chlazení, které využívalo speciálního bočního křídla. Tyto změny si vyžádaly úplně nový monokok.

V aerodynamické skupině došlo také k výraznému zlepšení modelu pro CFD simulace, který výpočty nejen zpřesnil, ale díky vytvořené funkci „journal“ také znatelně zrychlil. Tým z tohoto kroku těžil nejen v letošním roce, ale bude zajisté těžit také v letech následujících.

Přední křídlo oproti předchozímu modelu nedoznalo výraznějších změn. Vykazovalo uspokojivé výsledky a bylo tedy spíše upraveno pro zachování funkčnosti aerodynamického paketu. Práce proběhla na koncových deskách, upravena byla pozice jak hlavního elementu, tak klapky. Vzhledem k novému monokoku bylo zvoleno také odpovídající uchycení.



Obr. 10.: Monopost FSE.08

## 6. Teoretická část

Aerodynamika je disciplínou nesmírně zajímavou, ale také komplikovanou. Stanovit při návrhu správné cíle nebývá jednoduché, docílit jich je ale bez patřičných znalostí a v dnešní době také výkonných výpočetních serverů či aerodynamického tunelu prakticky nemožné.

Tato kapitola bude zaměřena na popis základních zákonitostí, vztahů a teorie, které se na pozadí aerodynamiky nachází.

### 6.1 Proudění

Trajektorii pohybující se částice proudění nazýváme proudnicí. Proudnice je také tečnou k lokálnímu vektoru rychlosti v daném místě. Na základě charakteristiky proudnic můžeme proudění rozdělit několika způsoby. Tím prvním je rozdělení na stacionární a nestacionární. O stacionární neboli ustálené proudění se jedná, je-li rychlost procházejících částic libovolně zvoleným místem v čase neměnná. V opačném případě se jedná o proudění nestacionární. Druhé rozdělení se zabývá zejména tvarem proudnic (ukázka na Obr. 11). Při laminárním proudění se částice pohybují v navzájem rovnoběžných vrstvách, aniž by mezi jednotlivými vrstvami přecházely. Při proudění turbulentním dochází k přechodům mezi jednotlivými vrstvami kapaliny a ty se tak míchají. Pravděpodobnost vzniku turbulentního proudění lze vyjádřit pomocí velikosti Reynoldsova čísla (bude popsáno později).



Obr. 11.: Typy proudění [15]

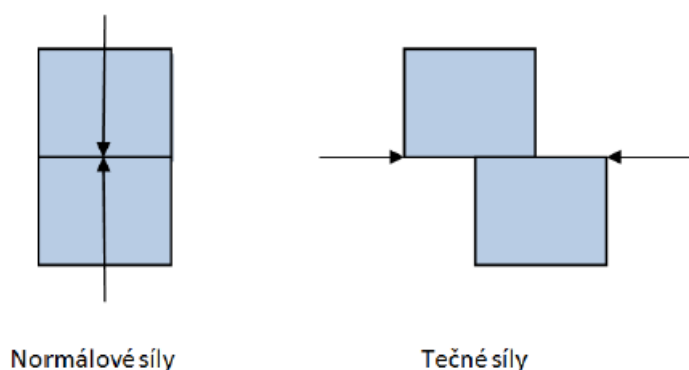
### 6.2 Vzduch a jeho vlastnosti

Médiem obtékajícím námi zkoumaná pevná tělesa, je v aerodynamice vzduch. Jeho vlastnosti a chování je tedy potřeba brát v potaz při jakémkoliv návrhu. Za účelem sjednocení základních parametrů byl vytvořen model Mezinárodní standardní atmosféry (MSA), podle kterého jsou v celé práci

vlastnosti uvažovány. Vzduch se skládá ze zhruba 78 % dusíku, 21 % kyslíku a 1 % dalších plynů (zejména vzácné plyny a oxid uhličitý). Jeho teplota v nulové nadmořské výšce je 15 °C a až do výšky 11 km (přechod troposféry do tropopauzy) klesá o 6,5 °C na 1 000 výškových metrů. [16]

### 6.2.1 Tlak

Částice vzduchu se mezi sebou neustále neuspořádaně pohybují. I přes velké vzdálenosti spolu tyto částice kolidují a působí na sebe silami. Ty mohou být normálové, pokud spolu částice interagují bez klouzání, nebo tečné (smykové), pokud po sobě kloužou (Obr. 12).



Obr. 12.: Normálové a tečné síly [15]

V reálné situaci nastávají obě situace současně, avšak relativní velikost obou typů sil je rozdílná. Smykové síly jsou v našem případě ve srovnání s normálovými velmi malé a významnějšími se ve většině případů stávají až u rozměrnějších objektů, jakými jsou například vlakové soupravy.

Při obtékání těles vzduchem dochází na jeho povrchu k vytvoření nerovnoměrného tlakového pole, způsobujícího nerovnoměrné silové pole. Při měření rozlišujeme tři typy tlaků: [17]

1. Statický tlak – atmosférický tlak okolního vzduchu, pokud je jeho relativní rychlost nulová.
2. Dynamický tlak – lze změřit za pohybu jako pokles statického tlaku, je přímo úměrný druhé mocnině rychlosti pohybujícího se vzduchu. Je definován vztahem

$$p_d = \frac{1}{2} \rho v^2. \quad (1)$$

3. Celkový tlak – je součet statického a dynamického tlaku.

V nulové nadmořské výšce je dle modelu MSA tlak 1013,25 hPa a s rostoucí výškou  $H$  klesá podle vztahu [16]

$$p = 1\,013,25 \left(1 - \frac{H}{44\,308}\right)^{5,2553}. \quad (2)$$

### 6.2.2 Hustota

Hustota je fyzikální veličina vyjadřující hmotnost látky v závislosti na jeho objemu. Značí se „ $\rho$ “ a její základní jednotkou je [kg/m<sup>3</sup>]. Její hodnota zásadně ovlivňuje také velikost aerodynamických koeficientů a sil. Panuje zde lineární přímá úměra (čím nižší hustota vzduchu, tím menší je aerodynamická síla). Referenční hustota v nulové nadmořské výšce má dle MSA hodnotu 1,225 kg/m<sup>3</sup> a s vyšší výškou  $H$  klesá podle vztahu

$$\rho = 1,225 \left(1 - \frac{H}{44\,308}\right)^{4,2553}. \quad (3)$$

Při návrhu závodních vozidel je tedy potřeba na ni brát zřetel zejména u tratí ve vyšších nadmořských výškách, kdy kromě nižšího přitlaku má za následek také zhoršené chlazení. Příkladem může být trať v Mexico City ve výšce 2250 m n. m., kde je hustota vzduchu nižší až o 1/5. [16]

### 6.2.3 Viskozita

Viskozita, někdy také nazývána vazkost, je fyzikální veličina udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti. Čím vyšší je hodnota viskozity, tím vyšší je vnitřní tření mezi částicemi uvnitř tekutiny. Pro názornost si lze představit tekutinu složenou z jednotlivých vrstev částic. Částice v jedné vrstvě se všechny pohybují stejnou rychlostí, avšak jednotlivé vrstvy mají rychlost rozdílnou. Pomalejší vrstva tak vlivem působení sil rychlejší vrstvu „brzdí“. Rozlišujeme dva druhy viskozity: [18]

- Dynamická viskozita „ $\eta$ “ se základní jednotkou [Ns/m<sup>2</sup>] udává odpor, který kladou dvě po sobě klouzající vrstvy.
- Kinematická viskozita „ $\nu$ “ se základní jednotkou [m<sup>2</sup>/s] udává poměr mezi dynamickou viskozitou a hustotou tekutiny

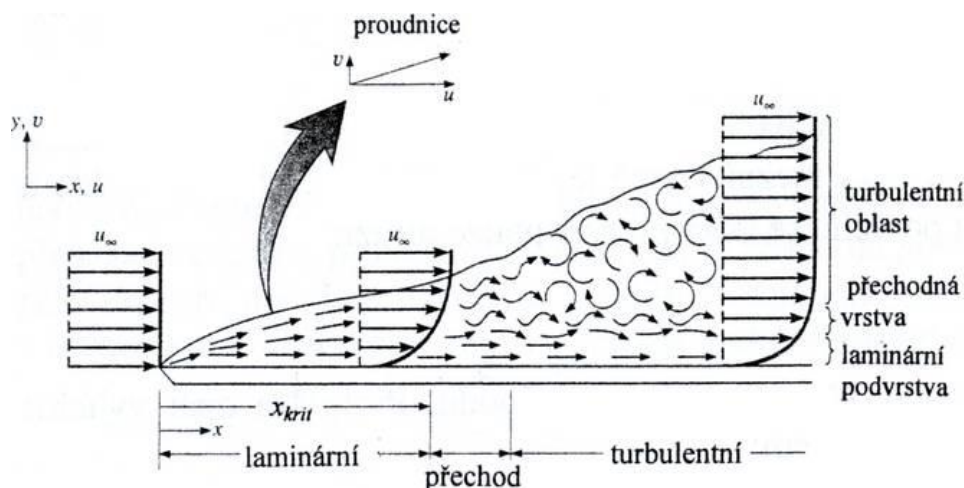
$$\rho = \frac{\eta}{\nu}. \quad (4)$$

### 6.3 Mezní vrstva

V aerodynamické praxi se viskozita projevuje například tím, že rychlost proudění přímo na povrchu obtékaného profilu je nulová. Tyto částice vlivem tření zpomalují částice v sousedních vrstvách. Dochází k vytvoření proměnného rychlostního profilu s gradientem rychlosti

$$\frac{\partial u}{\partial y} \neq 0. \quad (5)$$

Tato oblast, která se na tělese vytvoří vždy, pokud je obtékáno proudem tekutiny, se nazývá mezní vrstvou (Obr. 13). Tloušťka mezní vrstvy  $\delta$  je smluvně definována jako vzdálenost od povrchu obtékaného tělesa do místa, kdy velikost rychlosti dosáhne hodnoty  $0,99U$ , tedy rychlosti nenarušeného volného proudění. Pokud v tom proudění není nijak zabráněno, začíná při obtékání tělesa jako laminární. S rostoucí vzdáleností se však proudění stává turbulentním a tloušťka mezní vrstvy se výrazně zvětšuje. Místo, kde k této změně dochází, se nazývá přechodnou oblastí. S rostoucí tloušťkou mezní vrstvy se zvětšuje také smykové napětí, které je z velké části zodpovědné za vznik odporové síly. [19]

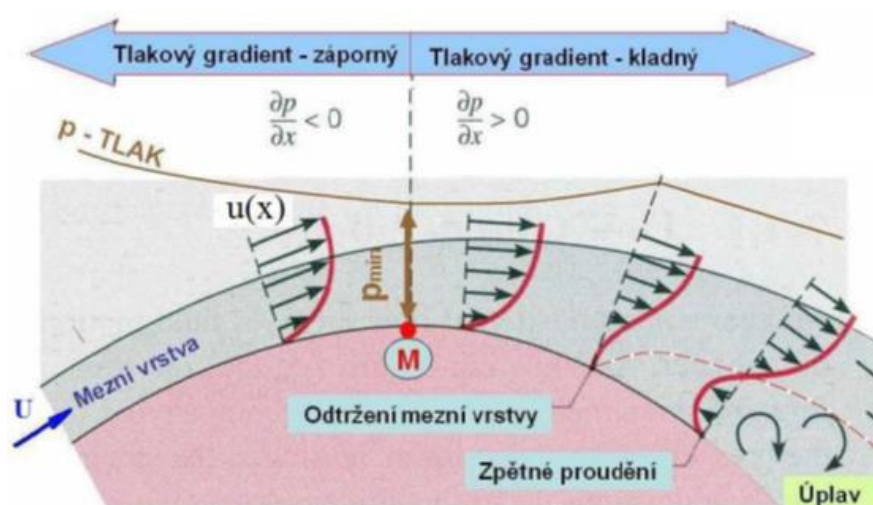


Obr. 13.: Proudění v mezní vrstvě [20]

#### 6.3.1 Održení mezní vrstvy

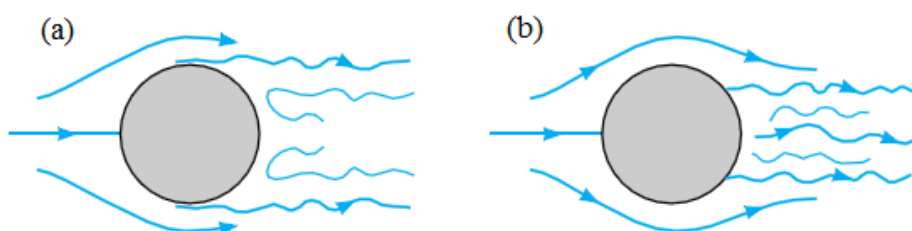
Při obtékání ploché tenké desky, kdy je směr nenarušeného proudění s deskou rovnoběžný, je tlak podél povrchu konstantní. Tlakový gradient je tedy nulový. V případě, kdy se jedná o profil zakřivený, mění se podél povrchu rychlost. Se změnou rychlosti dochází také ke změně tlaku. Do místa M (viz Obr. 14) se tlak snižuje – záporný tlakový gradient. Od tohoto místa je tlakový spád

nepříznivý, statický tlak se zvyšuje ve směru proudění. Proudění tedy dále proudí jen vlivem setrvačnosti a zpomaluje. Zpomaluje také vlivem vazkých sil, zodpovědných za samotnou existenci mezní vrstvy. V takzvaném inflexním bodě dojde k takovému zpomalení, že rychlostní profil svírá se stěnou pravý úhel. Vlivem stále působícího kladného tlakového gradientu se některé částice začnou pohybovat směrem vůči proudění opačným. Tento jev nazýváme odtržením mezní vrstvy. Vzhledem k tomu, že rychlost částic je nejpomalejší u stěny, dojde k odtržení právě tam. Tento jev je spojen s vytvořením úplavu a velkým skokovým nárůstem odporu. [21]



Obr. 14.: Odtržení mezní vrstvy [21]

U turbulentního proudění vlivem mísení částic a intenzivnější výměny hybnosti dochází k pomalejším ztrátám kinetické energie u povrchu. Vzhledem ke své povaze je tedy vůči odtržení odolnější než laminární, jak ukazuje porovnání velikosti úplavu při obtékání válce na Obr. 15.



Obr. 15.: Obtékání koule laminárním (a) a turbulentním (b) prouděním [21]

Laminární proudění vytváří tenčí mezní vrstvu a disponuje nižším odporem než turbulentní, avšak je výrazně citlivější na drsnost povrchu obtékaných ploch a jejich nerovnosti, snadněji dojde k odtržení. Při navrhování



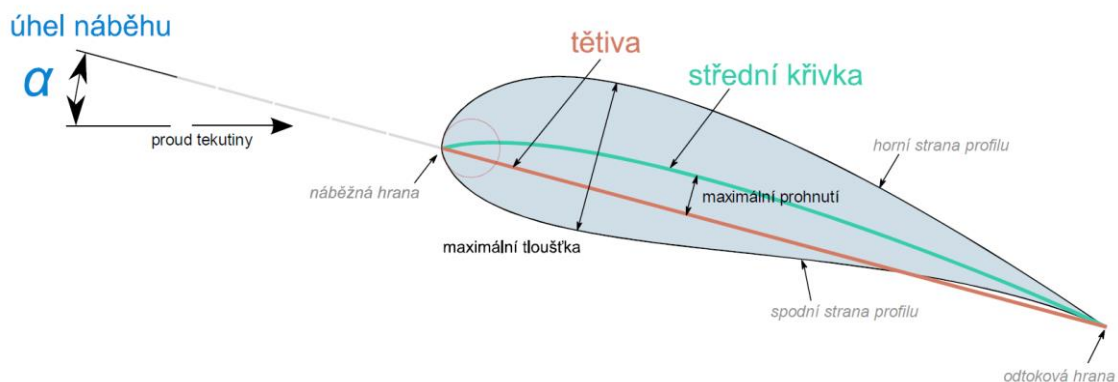
aerodynamických profilů je tedy snaha o udržení co nejdelšího laminárního proudu, který před kritickým místem (inflexním bodem) kontrolovaně přejde v proud mnohem stálejší, turbulentní. Nástrojem pro tuto kontrolovanou změnu jsou například turbulátory.

#### 6.4 Geometrie aerodynamického profilu

Pokud chceme využít efektů obtékání tělesa tekutinou, je nutné optimalizovat jeho aerodynamický tvar. U křídel se jedná o tvar profilu (kolmý řez osou křídla). Křídlo začíná náběžnou hranou a končí hranou odtokovou. Tvar profilu obecně charakterizuje několik základních veličin popsanych na Obr. 16:

- Tětiva – Spojnice náběžné a odtokové hrany profilu
- Střední křivka profilu – Křivka tvořená středy vepsaných kružnic do profilu
- Maximální tloušťka profilu – Průměr největší kružnice do profilu vepsané
- Maximální prohnutí profilu – Největší vzdálenost střednice od tětivy

Polohu profilu v prostoru popisuje úhel náběhu  $\alpha$ , který svírá tětiva profilu se směrem proudící tekutiny. Při dosažení kritického úhlu náběhu dochází k odtržení proudění viz výše.



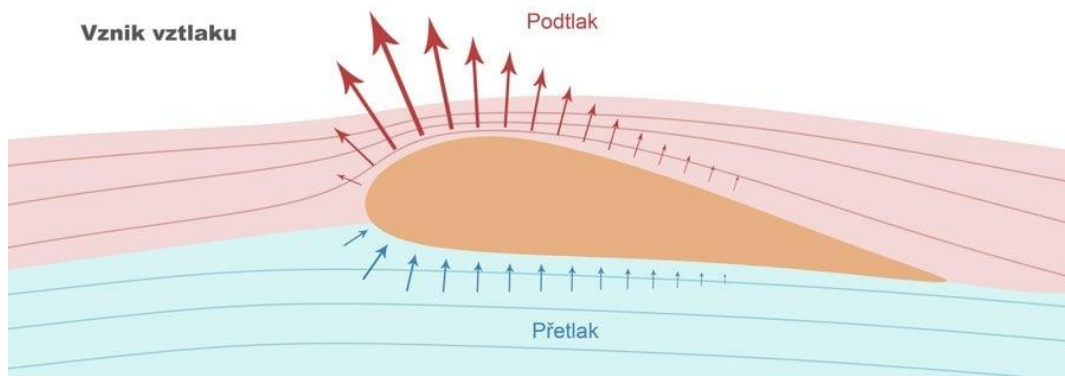
Obr. 16.: Geometrie profilu křídla [22]

Jednotlivých typů aerodynamických profilů jsou tisíce, všechny lze ale rozdělit do dvou základních kategorií. Na profily symetrické a nesymetrické, tedy prohnuté. U profilů symetrických je střední křivka totožná s tětivou, u nesymetrických nikoliv – dochází zde k prohnutí. U leteckých profilů, kdy je primárním účelem vztlak, či u automobilů, kde je žádoucí přítlačná síla, se využívá profilů prohnutých.

## 6.5 Aerodynamické síly a momenty

Teorii tvorby vztlaku či přítlaku na samotném křídle (Obr. 17) lze vysvětlit několika způsoby, z nichž nejčastěji jsou zmiňovány dva následující. [23]

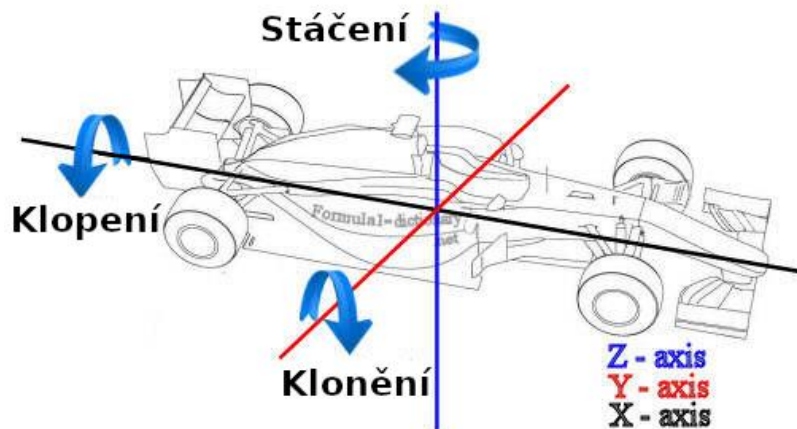
1. Teorie cirkulace – Částice proudící po vypouklé straně profilu (u letadel horní strana) musí za stejný čas urazit větší vzdálenost než částice po straně dolní. Musí se tedy pohybovat vyšší rychlostí. Z Bernoulliho rovnice vyplývá, že na této straně je nižší dynamický tlak, na straně spodní naopak vyšší. Součet obou tlaků dává vztlak.
2. Teorie hustoty proudnic – Tato teorie využívá rovnice kontinuity. Ta nám říká, že se rychlost proudění se zmenšujícím se průřezem zvětšuje a naopak. Na straně vypouklého profilu dochází ke zhuštění proudnic, tedy zvýšení rychlosti průtoku a snížení tlaku. V kombinaci s přesně opačně fungující spodní stranou dostáváme opět vztlak.



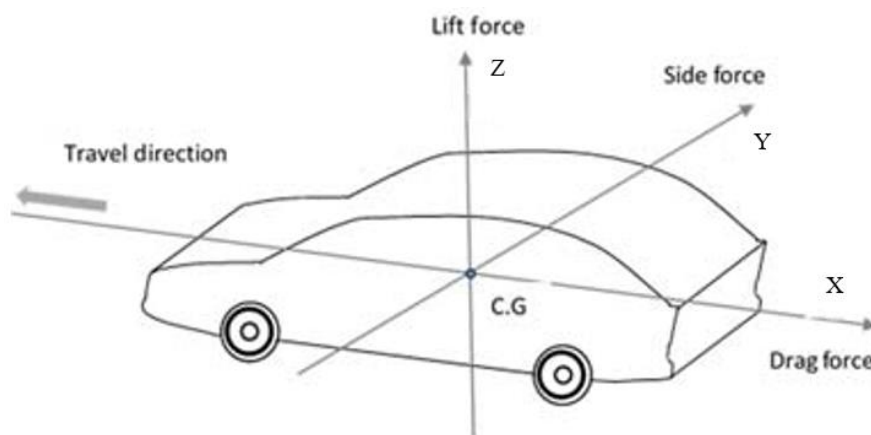
Obr. 17.: Vznik vztlaku [24]

Na profil tedy působí tlak a smykové napětí. Celkovou sílu a moment je možné vypočítat integrací těchto veličin po povrchu tělesa.

V různých vědních disciplínách, zemích či pracovištích je využívána rozdílná osová konvence působících sil a momentů. Ve své práci i s celým týmem eForce vycházíme z uspořádání dle Obr. 18 a Obr. 19.



Obr. 18.: Momenty sil kolem os [25]



Obr. 19.: Směry os a působících sil [26]

Přítlačná síla působí v záporném směru osy  $z$ , jedná se tedy o záporný vztlak (anglicky „Lift force“). Působení momentu kolem této osy se nazývá stáčení. Odporová síla (anglicky „Drag force“) působí v kladném směru osy  $x$ . Moment působící kolem této osy se nazývá klopení. Boční síla (anglicky „Side force“) působí v ose  $y$ . Moment kolem této osy se nazývá klonění.

## 6.6 Podobnostní čísla

Charakterizovat podmínky proudění lze mnoha způsoby. Zejména v mechanice tekutin, a disciplín z ní odvozených, se velice často využívají podobnostní čísla. Ta udávají poměr určitých fyzikálních veličin, přičemž výsledek je bezrozměrný – čísla jsou často nazývána jako bezrozměrné součinitele. Jejich uplatnění vychází z teorie, že dva systémy jsou si v určitých jevech podobné, pouze pokud mají stejnou hodnotu jejich podobnostní čísla. Ta nejvíce využívaná zde představím.

### 6.6.1 Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo  $Re$  udává poměr mezi setrvačnými a vazkými silami (viskozitou) v tekutině

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu}. \quad (6)$$

$\rho$  – hustota vzduchu

$d$  – charakteristický rozměr

$v$  – rychlost proudění

$\mu$  – dynamická viskozita kapaliny

Má zásadní význam v posouzení charakteru proudění a při výpočtech proudění tekutin. K přechodu mezi laminárním a turbulentním prouděním dochází, pokud Reynoldsovo číslo dosáhne kritické hodnoty  $Re_{kr}$ . Tato hodnota je v praxi často obtížně měřitelná. Vhodnější je proto popis přechodnou oblastí a rozsahem  $Re$ , kdy se proudění začíná stávat turbulentním až do úplné turbulence.

V letectví a aerodynamice obecně má Reynoldsovo číslo obrovské praktické využití při měření a validaci. Ne vždy je možné či ekonomicky výhodné měřit např. v aerodynamickém tunelu model v reálné velikosti 1:1. Při zachování Reynoldsova čísla však lze se stejnými výsledky simulovat také menší modely (při zanedbání odchylky z důvodu tvarové složitosti).

### 6.6.2 Machovo číslo

Machovo číslo  $M$  udává poměr mezi rychlostí pohybu tělesa prostředím a rychlostí zvuku v témže prostředí. V letectví se využívá jako ukazatel rychlosti letu. Jelikož je rychlost zvuku závislá na tlaku, teplotě i vlhkosti, tyto veličiny mění také Machovo číslo

$$M = \frac{v}{c}. \quad (7)$$

$v$  – rychlost tělesa

$c$  – lokální rychlost zvuku

### 6.6.3 Součinitel vztlaku

Součinitel vztlaku  $C_L$  vypovídá o schopnosti geometrie generovat vztlakovou sílu  $L$  působící ve směru osy  $z$ , tedy kolmo na směr pohybu. Vztlaková síla  $L$  je tím větší, čím větší je součinitel vztlaku  $C_L$ , hustota prostředí  $\rho$ , referenční plocha tělesa  $S$  a zejména kvadrát rychlosti obtékané tekutiny  $v^2$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S}. \quad (8)$$

### 6.6.4 Součinitel odporu

Součinitel odporu  $C_D$  vypovídá o schopnosti geometrie generovat odporovou sílu  $D$  působící rovnoběžně s osou  $x$  proti směru pohybu. Odporová síla  $D$  je tím větší, čím větší je součinitel odporu  $C_D$ , hustota prostředí  $\rho$ , referenční plocha tělesa  $S$  a zejména kvadrát rychlosti obtékané tekutiny  $v^2$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S}. \quad (9)$$

### 6.6.5 Součinitel klopného momentu

Součinitel klopného momentu  $C_m$  vypovídá o schopnosti geometrie generovat klopný moment  $M_y$  působící kolem osy  $y$ . Klopný moment  $M_y$  je tím větší, čím větší je součinitel klopného momentu  $C_m$ , hustota prostředí  $\rho$ , referenční plocha tělesa  $S$ , referenční délka  $l$  a také kvadrát rychlosti obtékané tekutiny  $v^2$

$$C_m = \frac{M_y}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot l}. \quad (10)$$

## 7. Návrh

Přední aerodynamické křídlo plní na závodním voze několik funkcí. Jako první komponenta přichází do kontaktu s čistým vzduchem před autem. Má tedy zásadní vliv na jeho další směřování a využití potenciálu ostatních aerodynamických prvků. Zároveň jakožto komponenta nejvíce vpředu od těžiště má velký vliv na celkové aerodynamické rozvážení. Zároveň jakožto komponenta nejvíce vpředu od těžiště má velký vliv na celkové aerodynamické rozvážení. V případě, že nebude poskytovat dostatek přítlaku na přední nápravě, bude vůz z hlediska jízdní dynamiky nedotáčivý. Pokud ve srovnání se zadní nápravou naopak moc, bude vůz přetáčivý. Nezanedbatelný vliv má také jeho pozice a hmotnost, které ovlivňují polohu těžiště monopostu. Zde panuje z důvodu negativního ovlivnění koeficientu tření situace opačná. Pokud bude přední náprava výrazně více zatížena než náprava zadní, hrozí nedotáčivost.

Tab. 2.: Vlivy na jízdní dynamiku

	Více vpředu	Více vzadu
<b>Přítlak</b>	<i>Přetáčivost</i>	<i>Nedotáčivost</i>
<b>Hmotnost</b>	<i>Nedotáčivost</i>	<i>Přetáčivost</i>
<b>Brzdný účinek</b>	<i>Nedotáčivost</i>	<i>Přetáčivost</i>

### 7.1 Terminologie částí předního křídla

Přední křídlo se standardně může skládat z několika částí, z nichž každá má svou funkci (Obr. 20).

#### 1. Hlavní element

Jedná se o hlavní nosnou část křídla, přes kterou jsou zpravidla přenášeny veškeré síly. Díky své pozici nejbližší k vozovce se často také největší mírou podílí na tvorbě přítlaku. Čím níže, tím je tzv. přízemní efekt a přítlak silnější.

#### 2. Klapky

Jejich přidáním se křídlo stává víceprvkovým. Správně zvoleným úhlem náběhu dokáží zvýšit přítlak urychlením proudění vzduchu pod hlavním elementem. Také ale výrazně zvyšují odpor a je potřeba si dát pozor, aby neubíraly vzduch bočnicím (sidepodům).

### 3. Koncová deska

Výrazně zlepšuje efektivitu jak hlavního profilu, tak klapek tím, že zabraňuje mísení tlaků nad a pod křídlem. Hraje významnou roli v odklonu vzduchu od předního kola.

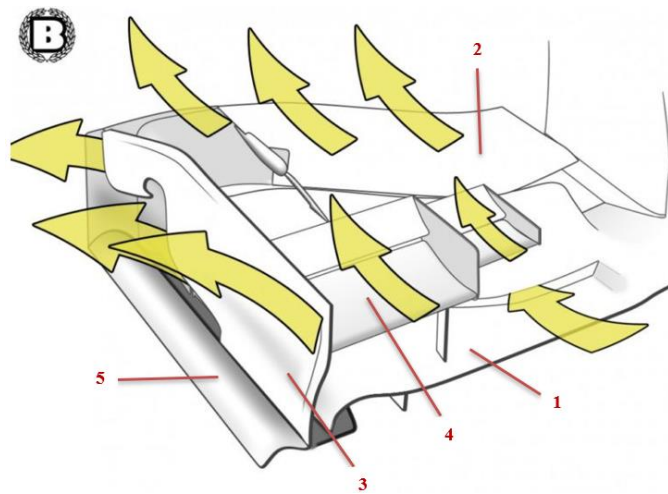
### 4. Winglet

Velmi účinný nástroj zejména k odklonu vzduchu kolem kol

### 5. Generátor vírů

Může mít mnoho podob, ale jeho principem je tvorba vírů s velkou energií. Tím vytvoří v určitém místě tzv. vzduchovou clonu využitelnou k utěsnění podtlakového proudění pod křídlem. Taktéž může pomoci oddálit místo odtržení proudění od profilů.

Ne všechna křídla využívají všech nástrojů. Jejich použití je rozmanité a konstruktér se vždy snaží najít takové řešení, které je pro něj ideálním kompromisem.



Obr. 20.: Proudění kolem předního křídla a jeho části [27]

## 7.2 Určení cílů

Před samotným návrhem vozu je potřeba si stanovit základní cíle a směr vývoje. Jak již bylo popsáno v kapitole 5.3, vůz FSE.08 byl v mnoha věcech revoluční a udály se na něm velké změny. S těmi ale také přišly větší i menší problémy. Mechanická skupina proto nikterak velké inovace nechystala, ale cílila na dílčí vylepšení drobných problémů a naplnění potenciálu vozu. Z aerodynamického hlediska bylo tím největším nedostatkem téměř nefunkční chlazení zabudované v bočnicích. Místo urychlení proudění vzduchu docházelo

na vstupu spíše k ucpání a vzduch neproudil ideálně. Tato komponenta tedy byla odebrána a chladiče přesunuty na difuzor. Vzhledem k horší přesnosti výroby ve studijních podmínkách bylo také u některých komponent problematické se rozměrově vejít do vymezených keep-out zón. Návrh předního křídla se opírá o několik faktů:

- Zachování ložského monokoku a podvozku
- Rozhodnutí nepředělávat koncept splitteru
- Zachování bočních křídel obsahujících Venturiho kanál

Vzhledem k aerodynamické téměř identičnosti zbytku vozu nepřipadala z finančního a časového hlediska v úvahu žádná výrazná koncepční změna. Jako cíle návrhu bylo stanoveno:

- Zlepšení funkce aerodynamického balení jako celku
- Zvětšení rozměrové rezervy pro případné chyby při výrobě
- Odlehčení a zjednodušení konstrukce

Na základě výše popsané situace bylo rozhodnuto ponechat stejný profil hlavního elementu i klapky. Vývoj byl tedy zaměřen zejména na koncové desky, celkové zlepšení pozice křídla a optimalizace jeho struktury a uchycení.

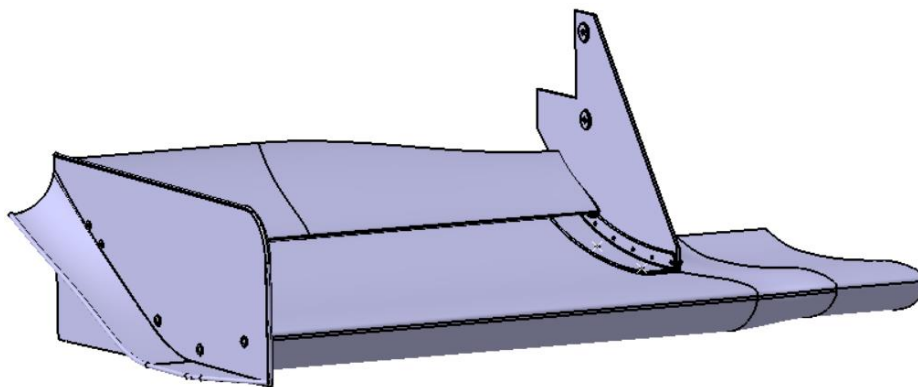
Typická trať Formula Student, na které bude monopost závodit, je asi kilometr dlouhá a její nejdelší rovinky měří jen do 80 m. Důraz je tedy kladen zejména na průjezd zatáčkou, manévrovatelnost a zrychlení. Dle provedených lap time simulací je přínos 1 N přitlaku zhruba 3krát větší než snížení odporu o 1 N. Důraz při návrhu byl tedy kladen zejména na přitlak. Průměrná rychlost, kterou se vůz bude po trati pohybovat je dle zkušeností a měření na minulých monopostech 60 km/h. Veškeré aerodynamické výpočty jsou tedy prováděny pro tuto rychlost proudění vzduchu.

### **7.2.1 Výchozí situace**

Koncová deska na monopostu FSE.08 (Obr. 21) byla řešena pomocí přidaného límce za účelem odklonu vzduchu od předních kol a tvorby lehkého víru. Spodní část desky je zkosená, aby nedocházelo ke kontaktu se zemí při brždění a naklopení auta vpřed.



Uchytení bylo řešeno pomocí hliníkových jáklů s kolmo navařeným plechem. Tento díl byl zalaminován uvnitř hlavního elementu a pomocí nýtovací matice spojen s uhlíkovou úchytnou deskou a monokokem. Toto řešení se ukázalo jako velmi náročné na přesnou výrobu a také nepřiměřeně těžké.



Obr. 21.: Model křídla na FSE.08

Veškeré hodnoty výsledků sil jsou uváděny v Newtonech dle znaménkové konvence popsané v kapitole 6.5. Z důvodu zkrácení výpočtového času CFD simulace se jedná o hodnoty pro jednu polovinu vozu rozděleného rovinou symetrie. Příklad generovaný celým vozem je tedy roven dvojnásobku celkového, níže uvedeného. Finální konfigurace FSE.08 s tímto křídlem dosahovala hodnot níže.

Tab. 3.: Výsledky na voze FSE.08

Díl	FSE.08	
	Fx	Fz
Přední křídlo	11,29	-101,86
Zadní křídlo	55,72	-114,16
Splitter	1,14	-13,66
Boční křídlo	9,81	-39,34
Přední ramena	8,28	1,69
Zadní ramena	3	1,32
Řidič	1,23	3,81
Hlavní oblouk	3,01	0,21
Monokok	17,38	-39,45
Přední kolo	4,62	2,91
Zadní kolo	5,83	3,77
Celkem	121,31	-294,76

O celkové aerodynamické účinnosti vypovídá poměr  $F_z/F_x$ .

Tab. 4.: Aerodynamická účinnost FSE.08

Poměr $F_z/F_x$	-2,43
-----------------	-------

Neméně důležité jsou hodnoty aerodynamického rozvážení. Při práci s tímto parametrem je důležitá zpětná vazba pilotů pro určení správného poměru, na který cílit. Dále pak také spolupráce celého týmu při koordinaci pozice těžiště, které zásadně ovlivňuje dynamiku průjezdu zatáčkou.

Tab. 5.: Rozvážení na přední a zadní nápravu FSE.08

Rozvážení F/R	52/48
---------------	-------

Z tabulky výše vidíme, že 52 % přitlaku působilo na přední nápravu (F – Front). Situace s rozložením hmotnosti byla přesně opačná, kdy 48 % připadalo na nápravu zadní (R – Rear). Dle dat z INS (inerciálního navigačního systému) a zpětné vazby pilotů se vůz na trati choval příliš přetáčivě, což koresponduje se základní teorií.

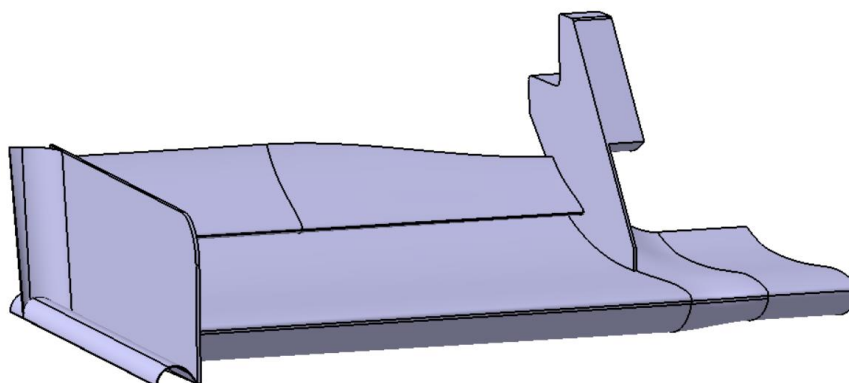
Cíl zlepšit aerodynamické vlastnosti jako celku tedy mohl být specifikován. Není nezbytně nutné upravovat přední křídlo pro jeho vlastní přitlak. Díky své poloze by činilo vůz ještě více přetáčivý. Prioritou se stal zejména odklon vzduchu od předních kol a lepší směřování vzduchu k ostatním komponentám na voze za účelem naplnění jejich potenciálu. Vyšším přitlakem na zadní nápravě by tak mělo dojít ke snížení přetáčivosti. Předběžný cíl rozvážení F/R byl stanoven na 45/55.

## 8. Vlastní vývoj

V motorsportu obecně a v aerodynamice zvláště platí, že co funguje na jednom autě, nemusí mít vůbec úspěch na druhém. Přesto byly při návrhu alespoň základní inspirací elementy koncových desek z funkčních aerodynamických balíčků úspěšných vozidel (Formule 1, vítězové Formula Student závodů).

### 8.1 Generátory vírů

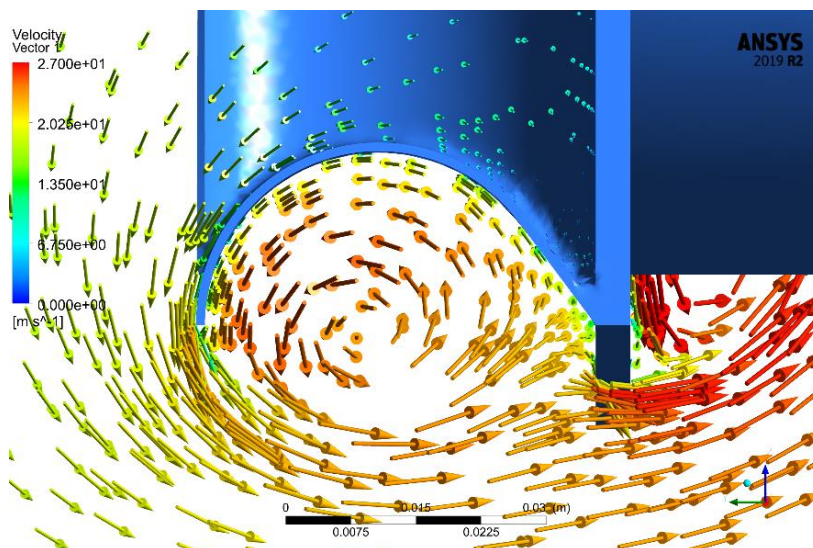
Prvními částmi, které byly na koncovou desku přidány, byly koncový lem a horizontální generátor vírů viz Obr. 22.



*Obr. 22.: První vlastní návrh podoby koncové desky na FSE.09*

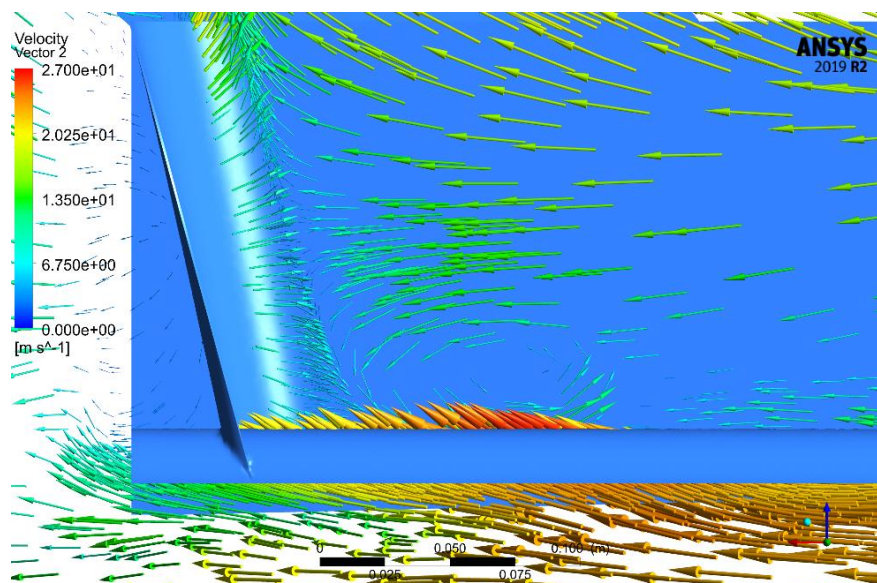
Zkoušeno bylo několik verzí tvarů profilu generátorů, avšak nejlepších výsledků dosahovala kombinace přímky a části kružnicového oblouku.

Z vygenerovaných vykreslení lokálních vektorů rychlostí pomocí programu ANSYS Fluent je na Obr. 23 vidět, že proudění pod generátorem má vysokou energii i rychlost (červená barva vektorů) a tvoří vír.



Obr. 23.: Vír v pravém generátoru vírů (pohled v ose x)

Koncová část lemu, mající za cíl odklon vzduchu kolem a nad kolo, naopak nepracuje úplně správně. Na hraně spojení s generátorem vírů dochází k vytvoření vzduchové kapsy a zpětnému proudění (Obr. 24). Vzduch zde tedy, ač úspěšně směřován nad kolo, ztrácí spoustu své energie.



Obr. 24.: Vzduchová kapsa na rozhraní generátoru a lemu (pohled v ose y)

Kromě grafického rozboru proudění jsou pro učinění dalších rozhodnutí a změn neméně důležité také číselné výsledky. Ty jsou vždy srovnány s nejaktuálnější dostupnou spočítanou verzí auta zahrnující změny celé aero skupiny. V tomto případě se jedná o předchozí monopost FSE.08. V případě, že je rozdílové číslo záporné, jedná se o nežádoucí změnu k horšímu (větší odpor nebo menší přítlak). Pokud je rozdíl kladný, byla změna prospěšná (menší

odpor nebo větší přítlak). Rozdíl poměru vyjadřuje vždy poměr *Stará verze/Nová verze*.

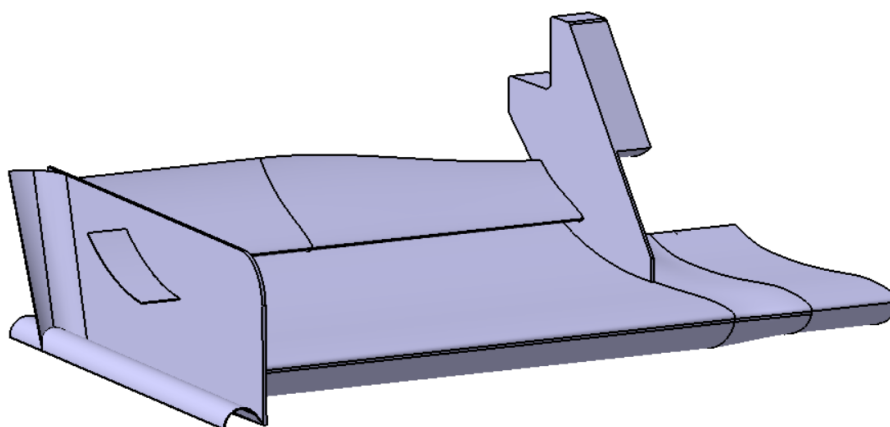
Tab. 6.: Hodnoty a srovnání verze 1 s FSE.08

Díl	FSE.09 v1		Delta FSE.08	
	Fx	Fz	delta Fx	delta Fz
Přední křídlo	12,43	-104,71	-1,14	2,85
Zadní křídlo	54,3	-111,99	1,42	-2,17
Splitter	1,05	-12,81	0,09	-0,85
Boční křídlo	7,97	-31,24	1,84	-8,10
Přední ramena	8,31	1,43	-0,03	0,26
Zadní ramena	2,62	1,02	0,38	0,30
Řidič	1,17	3,83	0,06	-0,02
Hlavní oblouk	2,99	0,22	0,02	-0,01
Monokok	16,95	-36,24	0,43	-3,21
Přední kolo	4,28	2,94	0,34	-0,03
Zadní kolo	6,70	3,87	-0,87	-0,10
Celkem	118,76	-283,67	2,55	-11,09
Poměr Fz/Fx	-2,39		0,98	

Z výsledků je patrné, že tato dílčí změna přinesla spíše zhoršení přítlaku, avšak byly detekovány oblasti v okolí lemu, kde může dojít ke zlepšení.

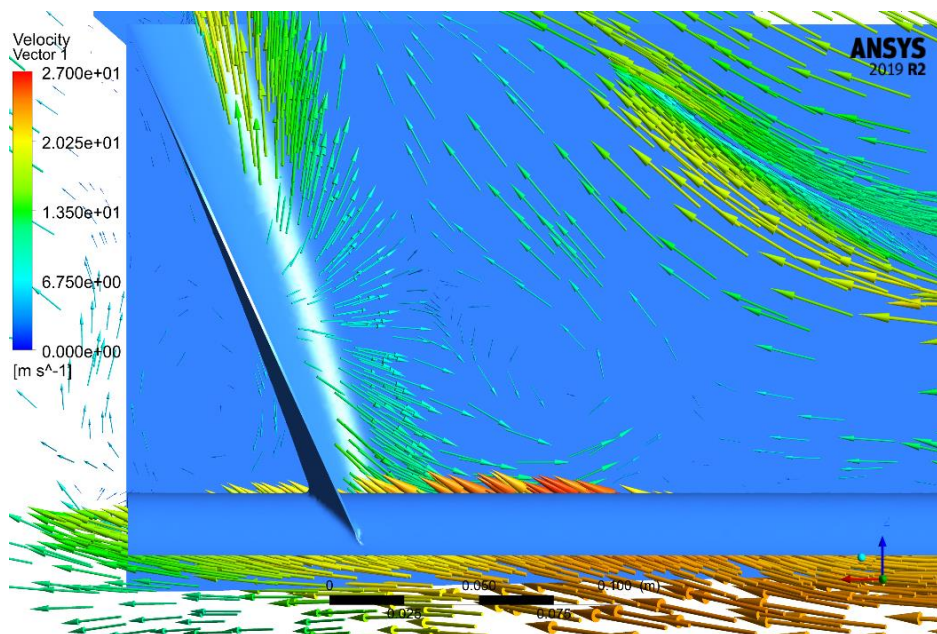
## 8.2 Přidání ploutviček

Na základě zhodnocení výsledků verze s lemem a generátorem vírů jsem se rozhodl nedostatky zlepšit přidáním ploutvičky (Obr. 25). Jejím cílem bylo zesílit odklon vzduchu nad kolo a ideálně také vyřešit problém neproudícího vzduchu na přechodu lemu a generátoru vírů.



Obr. 25.: Přidání jedné ploutvičky na FSE.09

Jak je vidět na Obr. 26 níže, vzduchová kapsa se stále tvoří. Odklon proudění vzhůru však nastává ještě výrazně dříve a ve větší míře. Tomuto výraznějšímu chování pravděpodobně nahrává také lehká změna geometrie lemu, který má větší radius a není tak ostře vertikální.



Obr. 26.: Obtékání jedné ploutvičky (pohled v ose y)

Efektivita návrhu se tak celkově zvýšila. V minulé verzi špatně fungující boční křídlo je již nyní přínosnější než v původním návrhu.

Tab. 7.: Hodnoty a srovnání verze 2 s FSE.08

Díl	FSE.09 v2		Delta FSE.08	
	Fx	Fz	delta Fx	delta Fz
Přední křídlo	12,31	-104,97	-1,02	3,11
Zadní křídlo	55,99	-114,48	-0,27	0,32
Splitter	1,11	-14,05	0,03	0,39
Boční křídlo	10,29	-40,66	-0,48	1,32
Přední ramena	8,19	1,61	0,09	0,08
Zadní ramena	3,00	1,31	0,00	0,01
Řidič	1,37	3,80	-0,14	0,01
Hlavní oblouk	3,05	0,23	-0,04	-0,02
Monokok	17,50	-40,12	-0,12	0,67
Přední kolo	5,21	3,37	-0,59	-0,46
Zadní kolo	5,50	3,69	0,33	0,08
Celkem	123,52	-300,28	-2,21	5,52
Poměr Fz/Fx	-2,43		1,00	

V tento moment vývoje již bylo změněno vícero komponent na celém voze a bylo potřeba aktualizovat základní výpočetní model. Ten je v tabulce níže porovnán s původní verzí ještě na FSE.08 a dále bude brán jako referenční místo něj.

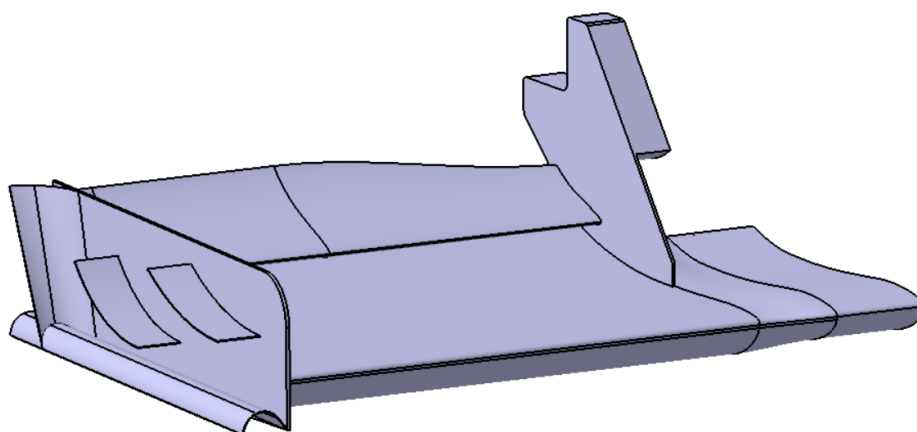
Tab. 8.: Hodnoty a srovnání FSE.09.01 s FSE.08

Díl	FSE.09.01		Delta FSE.08	
	Fx	Fz	delta Fx	delta Fz
Přední křídlo	12,33	-104,99	-1,04	3,13
Zadní křídlo	54,75	-106,90	0,97	-7,26
Splitter	1,18	-14,57	-0,04	0,91
Boční křídlo	14,44	-51,88	-4,63	12,54
Přední ramena	8,18	1,69	0,10	0,00
Zadní ramena	2,93	1,28	0,07	0,04
Řidič	1,32	3,11	-0,09	0,70
Hlavní oblouk	2,88	0,24	0,13	-0,03
Monokok	16,17	-44,24	1,21	4,79
Přední kolo	5,06	3,14	-0,44	-0,23
Zadní kolo	5,33	3,75	0,50	0,02
Celkem	124,56	-309,37	-3,25	14,61
Poměr Fz/Fx	-2,48		1,02	
Rozvážení F/R	47/53		-	

Již v první srovnávací verzi došlo k zásadnímu zlepšení téměř ve všech oblastech. Zejména se podařilo zlepšit funkci bočního křídla odstraněním bočnic, optimalizací tvaru a přidáním prvků na koncovou desku předního křídla. I rozvážení se zejména vlivem zlepšení přítlaku od bočního křídla posunulo k zamýšleným hodnotám

### 8.3 Optimalizace

Jelikož se dosavadní filozofie návrhu ukázala jako slibná, bylo rozhodnuto ji ještě zesílit přidáním druhé ploutvičky (Obr. 27). Pomocí 12 simulací byl tvar a pozice všech čtyř prvků přidaných na koncovou desku optimalizován. Zároveň však byla z důvodu snazšího splnění pravidel a snížení opotřebení zespodu oříznuta koncová deska a s ní související zvýšení pozice hlavního elementu předního křídla.



Obr. 27.: Druhá ploutvička a optimalizace

Před poslední simulací došlo znovu ke zpřesnění aktualizováním modelu celého aerodynamického balení. Od poslední verze došlo ke spoustě změn a pravidlovým ústupkům, zejména kvůli chlazení.

Tab. 9.: Druhá výrazná aktualizace celého modelu

Díl	FSE.09.02		FSE.09.01	
	Fx	Fz	delta Fx	delta Fz
Přední křídlo	11,21	-101,28	1,12	-3,71
Zadní křídlo	59,54	-109,70	-4,79	2,80
Splitter	1,22	-13,75	-0,03	-0,82
Boční křídlo	12,18	-43,73	2,26	-8,15
Přední ramena	8,42	1,56	-0,24	0,14
Zadní ramena	2,93	1,10	0,00	0,19
Řidič	1,20	3,26	0,12	-0,15
Hlavní oblouk	3,18	0,19	-0,29	0,05
Monokok	16,40	-40,52	-0,23	-3,72
Přední kolo	6,37	4,24	-1,31	-1,10
Zadní kolo	5,08	3,24	0,25	0,50
Celkem	127,71	-295,40	-3,15	-13,97
Poměr Fz/Fx	-2,31		0,93	
Rozvážení F/R	42/58		-	

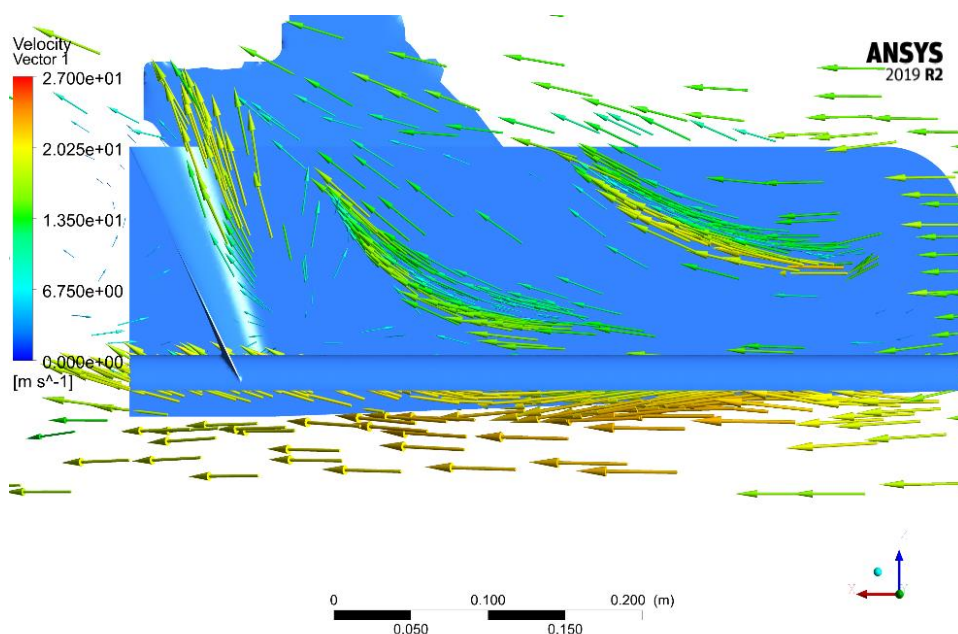
Oproti výše prezentované FSE.09 v2 je z čísel níže patrné výrazné zhoršení. Je však potřeba ho správně chápat. Nemá význam, pokud bude mít postavená formule vysoký přítlak, avšak neprojde přejímkovou kontrolou rozměrů. Ořez a z něj plynoucí zhoršení výsledků mají zajistit větší závodní klid a šanci se dostat až na závodní trať.



Tab. 10.: Hodnoty a srovnání verze 3 s FSE.09.01

Díl	FSE.09 v3		FSE.09.01		FSE.09.02	
	Fx	Fz	delta Fx	delta Fz	delta Fx	delta Fz
Přední křídlo	11,15	-101,05	1,18	-3,94	0,06	-0,23
Zadní křídlo	59,14	-109,00	-4,39	2,10	0,40	-0,70
Splitter	1,21	-14,03	-0,03	-0,54	0,01	0,28
Boční křídlo	12,24	-44,36	2,21	-7,52	-0,06	0,63
Přední ramena	8,45	1,54	-0,27	0,16	-0,03	0,02
Zadní ramena	2,97	1,05	-0,05	0,24	-0,05	0,05
Řidič	1,27	3,18	0,05	-0,08	-0,07	0,07
Hlavní oblouk	3,15	0,20	-0,27	0,04	0,02	-0,01
Monokok	16,23	-41,25	-0,06	-2,99	0,17	0,73
Přední kolo	6,50	4,30	-1,44	-1,16	-0,13	-0,06
Zadní kolo	4,92	3,33	0,40	0,42	0,15	-0,08
Celkem	127,23	-296,09	-2,67	-13,28	0,47	0,68
Poměr Fz/Fx	-2,33		0,94		1,01	

Ořez koncové desky a změny s tím spojené si vyžádali ztrátu zhruba 20 N. Optimalizací tvarů a přidáním druhé ploutvičky se ztráta povedla alespoň částečně smazat. Z obrázku vektorového pole na Obr. 28 níže je například patrné, že ploutvičky dokáží vzduch výrazně lépe nasměrovat a zamezit tak stagnaci vzduchu ve spodní části lemu.



Obr. 28.: Vektorové pole finální podoby koncové desky

## 8.4 Pozicování

Přidáním druhé ploutvičky a celkovou optimalizací byla práce na koncové desce ukončena. Další posun a zlepšení bylo tedy potřeba hledat jinde.

V dosavadním průběhu došlo také na ořez koncové desky kvůli snadnějšímu splnění pravidel. Tomu musela být uzpůsobena pozice hlavního elementu.

Spolu se simulací různých pozic hlavního elementu bylo rozhodnuto také upravit pozici klapky, a pokud to bude výhodné, šířku celého předního křídla.

### 8.4.1 Šířka hlavního elementu

Širší hlavní element znamená větší plochu, a tedy vyšší generovaný přítlak. Užší hlavní element zase může přinést výhodu pro pilota díky snazší manévrovatelnosti. Typickým příkladem je výjezd ze zatáčky, kdy si v případě užšího křídla může dovolit využít větší šířku vozovky, a přitom nesrazit kužel. Při každé šířce křídla bude také jiná pozice prvků koncové desky a odkloněný vzduch nemusí směřovat na správná místa.

Bylo provedeno 8 dalších simulací s různými šířkami. Jako referenční bod 0 je brán výchozí stav šířky hlavního profilu a klapky 740 mm.

Tab. 11.: Srovnání simulací rozdílných šířek křídla

Šířka	Relativní změna	Fx	Fz	Poměr Fz/Fx
740	0	127,23	-296,09	-2,327
755	+15	125,15	-292,41	-2,336
730	-10	127,56	-299,28	-2,346
720	-20	129,23	-303,88	-2,351
710	-30	128,37	-307,08	-2,392
707	-37	129,13	-308,22	-2,387
705	-33	127,64	-306,27	-2,399
704	-36	128,25	-308,32	-2,404
703	-35	128,73	-307,33	-2,387

Z tabulky výše je patrné, že nejlepších číselných hodnot dosahuje šířka 704 mm (zelené políčko nejlepší hodnota, červené nejhorší). Velkou přidanou hodnotou je také ušetření hmotnosti související s menší spotřebou materiálu a

již zmíněná výhoda pro pilota. Její ověření v praxi je plánováno v rámci testování.

#### 8.4.2 Pozice hlavního elementu

Hlavní element je zodpovědný za největší část přítlaku generovanou předním křídlem. Čím blíže se nachází nad zemí, tím je přízemní efekt, a tedy přítlak, větší. Brát v úvahu se ale musí minimální světlá výška vozu a také naklopení auta při brzdění.

Jako referenční bod celého vozu v prostoru se dle interní dohody týmu bere střed přední nápravy. K tomuto bodu se také všechny podsestavy a díly vazbí.

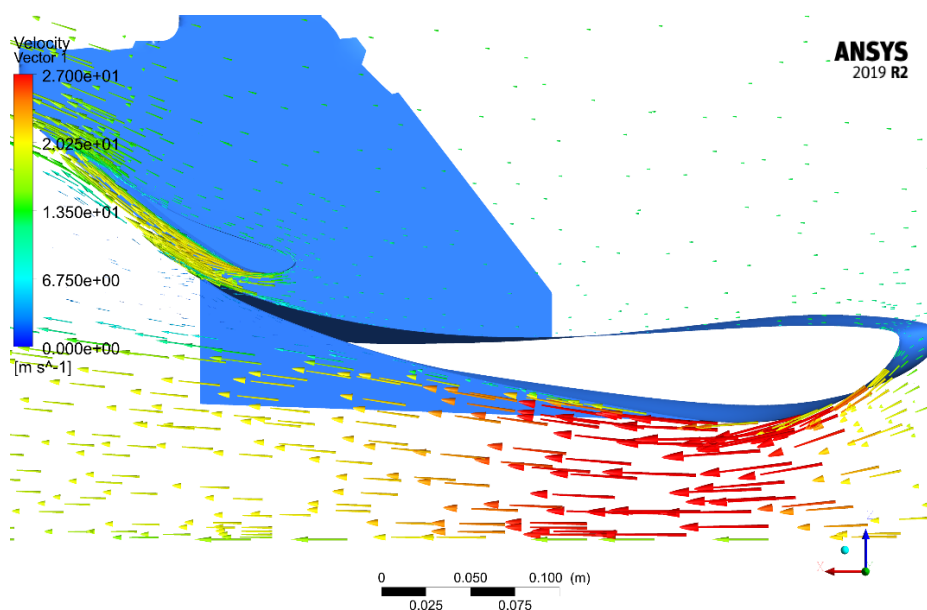
Tab. 12.: Pozicování hlavního elementu

Posun x	Posun z	Fx	Fz	Fz/Fx	Rozvážení
-915	-85	128,25	-308,32	-2,404	41,6/58,4
-915	-83	128,45	-307,04	-2,39	41,3/58,7
-915	-87	129,22	-306,48	-2,372	40,7/59,3
-920	-85	128,82	-307,87	-2,39	41,3/58,7
-910	-86	129,31	-307,67	-2,379	40,8/59,2
-920	-87	129,45	-307,39	-2,375	40,9/59,1

Nejlépe vyšel již výchozí stav posunu. Nebylo tedy zapotřebí pozici hlavního elementu vůči autu nijak upravovat.

#### 8.4.3 Pozice klapky

Poslední jednotkou, u které bylo potřeba vylepšit pozici, je klapka. Dle výsledků a obrázků z předešlých simulací viz Obr. 29 dochází na několika místech hlavního elementu k nepatrnému odtržení proudění, a z toho plynoucí ztrátě přítlaku. Výrazně urychlené proudění pod klapkou sekundárně urychluje také zcela zásadní proudění pod autem a hlavním elementem. Úpravou její pozice by tedy mohlo dojít v tomto ohledu ke zlepšení.



Obr. 29.: Održení proudění před odtokovou hranou hlavního elementu

Vazby klapky nejsou vázány na střed souřadného systému, ale již rovnou na samotný hlavní element. Jeho uvažovaný střed a bod „0“ se nachází ve středu náběžné hrany.

Tab. 13.: Pozicování klapky

Posun x	Posun z	Úhel náběhu	Fx	Fz	Fz/Fx	Rozvážení F/R
360	40	29	128,25	-308,32	-2,404	41,6/58,4
365	40	27	127,25	-298,80	-2,348	39,7/60,3
365	38	30	126,97	-303,38	-2,389	41,1/58,9
360	40	27	126,55	-297,57	-2,351	39,8/60,2
355	38	28	127,15	-299,35	-2,357	41,5/58,5

Z pěti simulovaných variant bylo rozhodnuto aplikovat první a původní pozici. Změna oproti předpokladům zlepšení nepřinesla.

## 9. Diskuze

Na počátku byl stanoven cíl zlepšit funkci aerodynamického paketu jako celku. Porovnání obou generací je vidět v Tab. 14 níže.

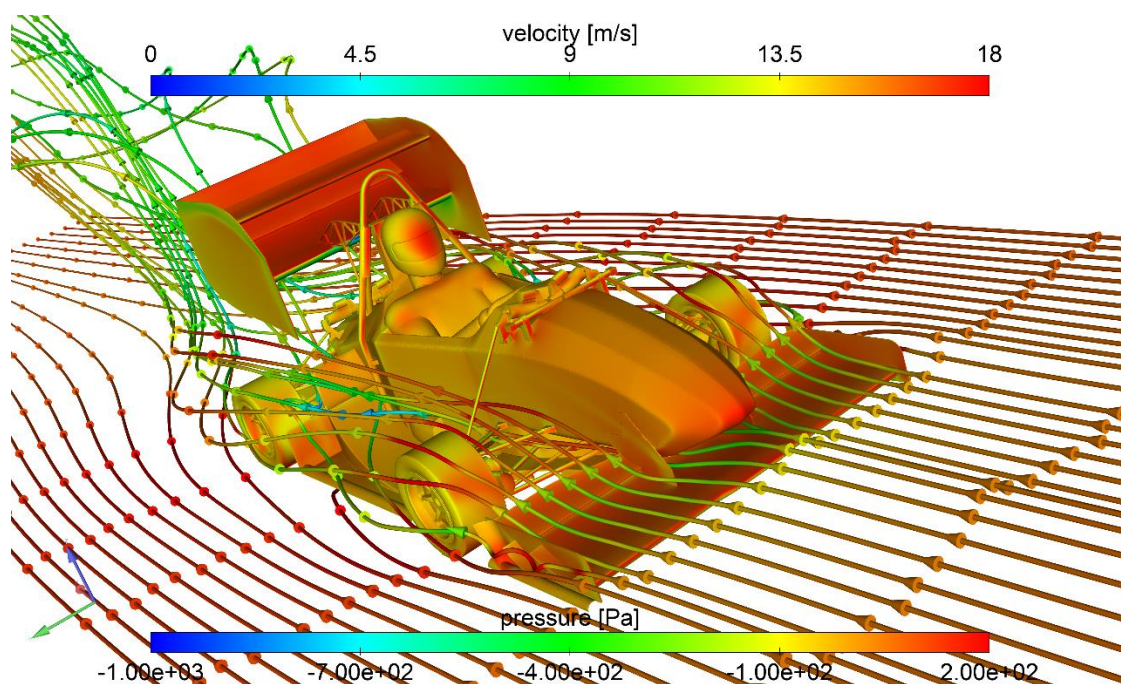
Tab. 14.: Mezigenerační srovnání FSE.09 a FSE.08

Díl	FSE.09		FSE.08	
	Fx	Fz	delta Fx	delta Fz
Přední křídlo	10,74	-96,90	0,55	-4,96
Zadní křídlo	60,91	-115,42	-5,19	1,26
Splitter	1,24	-14,01	-0,10	0,35
Boční křídlo	12,06	-48,54	-2,25	9,20
Přední ramena	8,48	1,26	-0,20	0,43
Zadní ramena	3,20	1,16	-0,20	0,16
Řidič	1,49	3,33	-0,26	0,48
Hlavní oblouk	3,22	0,29	-0,21	-0,08
Monokok	16,23	-40,77	1,15	1,32
Přední kolo	4,54	2,97	0,08	-0,06
Zadní kolo	4,48	3,32	1,35	0,45
Celkem	126,59	-303,30	-5,28	8,54
Poměr Fz/Fx	-2,40		0,986	
Rozvážení F/R	42/58		-	

Ačkoliv celková účinnost se meziročně nepatrně zhoršila, z pohledu výkonu na trati důležitější přítlak se na celém autě povedlo zvýšit o 17 N. To vše s velkým posunem z pohledu splňování regulí a snížením náročnosti na přesnost výroby zvýšením rezervy.

Cílem aerodynamického rozvážení bylo dosáhnout výrazného posunu směrem na zadní nápravu. Výsledný poměr 42 % vepředu a 58 % vzadu by tedy měl pomoci pilotům v lepší manévrovatelnosti s autem a snížení přetáčivosti.

Výsledná podoba celého vozu FSE.09 je vidět na Obr. 30 níže. Obrázek barevně znázorňuje jak rozložení tlaků, tak proudnice částic vypuštěných z vodorovné přímky před křídlem. Čím červenější má povrch barvu, tím větší přítlak v daném místě působí. Na proudnicích v blízkosti přední koncové desky lze vidět její schopnost odklonu vzduchu kolem předních kol. Žádná z proudnic navíc nezasahuje do oblasti zadního křídla, které se tak nachází v méně ovlivněném proudění a lépe funguje.



Obr. 30.: Tlaky a proudnice kolem FSE.09

Vzájemná komunikace členů uvnitř nejen aerodynamické skupiny, ale celého týmu je pro úspěch naprosto klíčová. V případě lepší interní komunikace by bylo možné dosáhnout ještě lepších výsledků. Do příštích let bude důležité se také více zaměřit na častější aktualizaci celkového aerodynamického modelu, za účelem udržení si vyššího přehledu o stavu návrhu. I malá změna jedné komponenty může mít velký vliv na jinou.

## 10. Závěr

Cílem práce bylo navrhnout novou variantu předního přitlačného křídla vozu Formula Student splňující co nejlépe požadavky týmu eForce FEE Prague Formula. Za tímto účelem byla nejprve stručně uvedena historie a pravidla soutěže, kterými se konstruktér musí bezmezně řídit. Následně byla představena rešerše teoretických zákonitostí, na nichž chronologicky psaná praktická část staví, a kterým je třeba pro správné chápání návrhu rozumět. Ten se zaměřil zejména na design koncových desek a optimalizaci předního křídla za účelem zvýšení celkové výkonnosti aerodynamického balení a zlepšení jízdních vlastností celého vozu.

Strůjcem zlepšení je zvýšení přitlaku monopostu o 17 N a vyřešení přetáčivosti vozu přesunutím působíště aerodynamické síly více dozadu. Rozvážení v poměru 42 % na přední a 58 % na zadní nápravu by mělo přispět ke zlepšení celkové ovladatelnosti. Současně došlo k ořezu koncové desky za účelem zvětšení rozměrové rezervy pro případné nepřesnosti při výrobě. Veškeré stanovené cíle práce byly s uspokojivým výsledkem na základě simulací v programu ANSYS Fluent splněny a budou otestovány v praxi.

V aerodynamice není téměř nikdy možné dosáhnout dokonalého návrhu. Ani tento design není dokonalý a cesta k němu bezchybná. Tým eForce FEE Prague Formula však ve vývoji posunul zase o krok kupředu. Zlepšení přitlaku a rozměrové rezervy pro výrobu patří mezi jeho nejsilnější stránky.

Vzhledem ke komplexnosti problémů a úzké provázanosti všech podskupin formule je práce do budoucna velmi dobře rozšířitelná několika směry. Příkladem může být vyhodnocení přínosu pro již zmíněné chlazení pohonného ústrojí a akumulátoru.

Práce na předním křídle bude nyní pokračovat dimenzováním skladby materiálů, vnitřního uspořádání žeber a nosníků a optimalizací uchycení křídla. Tím lze dosáhnout požadované tuhosti a co nejnižší hmotnosti. Konečnou fází celého procesu bude validace výsledného vyrobeného křídla, a to jak samostatně v aerodynamickém tunelu, tak na voze při testování.

## Seznam obrázků

Obr. 1.: Aerodynamický tunel bratří Wrightových [2].....	3
Obr. 2.: Aerodynamický tunel v Maranellu [4].....	4
Obr. 3.: Vůz Tropfenwagen [5] .....	4
Obr. 4.: Vůz Lotus 49 [8].....	5
Obr. 5.: První křídlo týmu z Missouri 1991 [11].....	6
Obr. 6.: Monopost TUfast Mnichov 2019 [12].....	6
Obr. 7.: Zónová omezení [13].....	8
Obr. 8.: Vývoj přítlaku a odporu .....	11
Obr. 9.: Vývoj aerodynamického rozvážení .....	11
Obr. 10.: Monopost FSE.08.....	12
Obr. 11.: Typy proudění [15].....	13
Obr. 12.: Normálové a tečné síly [15] .....	14
Obr. 13.: Proudění v mezní vrstvě [20].....	16
Obr. 14.: Odtržení mezní vrstvy [21] .....	17
Obr. 15.: Obtékání koule laminárním (a) a turbulentním (b) prouděním [21]..	17
Obr. 16.: Geometrie profilu křídla [22].....	18
Obr. 17.: Vznik vztlaku [24].....	19
Obr. 18.: Momenty sil kolem os [25] .....	20
Obr. 19.: Směry os a působících sil [26].....	20
Obr. 20.: Proudění kolem předního křídla a jeho části [27] .....	24
Obr. 21.: Model křídla na FSE.08.....	26
Obr. 22.: První vlastní návrh podoby koncové desky na FSE.09.....	28
Obr. 23.: Vír v pravém generátoru vírů (pohled v ose x).....	29
Obr. 24.: Vzduchová kapsa na rozhraní generátoru a lemu (pohled v ose y)...	29
Obr. 25.: Přidání jedné ploutvičky na FSE.09 .....	30
Obr. 26.: Obtékání jedné ploutvičky (pohled v ose y).....	31
Obr. 27.: Druhá ploutvička a optimalizace .....	33
Obr. 28.: Vektorové pole finální podoby koncové desky .....	34
Obr. 29.: Odtržení proudění před odtokovou hranou hlavního elementu.....	37
Obr. 30.: Tlaky a proudnice kolem FSE.09.....	39



## Seznam tabulek

Tab. 1.: Vztlakové a odporové koeficienty [6] .....	5
Tab. 2.: Vlivy na jízdní dynamiku.....	23
Tab. 3.: Výsledky na voze FSE.08.....	26
Tab. 4.: Aerodynamická účinnost FSE.08 .....	27
Tab. 5.: Rozvážení na přední a zadní nápravu FSE.08.....	27
Tab. 6.: Hodnoty a srovnání verze 1 s FSE.08 .....	30
Tab. 7.: Hodnoty a srovnání verze 2 s FSE.08 .....	31
Tab. 8.: Hodnoty a srovnání FSE.09.01 s FSE.08.....	32
Tab. 9.: Druhá výrazná aktualizace celého modelu .....	33
Tab. 10.: Hodnoty a srovnání verze 3 s FSE.09.01 .....	34
Tab. 11.: Srovnání simulací rozdílných šířek křídla .....	35
Tab. 12.: Pozicování hlavního elementu .....	36
Tab. 13.: Pozicování klapky .....	37
Tab. 14.: Mezigenerační srovnání FSE.09 a FSE.08 .....	38

## Citovaná literatura

- [1] CHANDLER, Nathan. How Wind Tunnels Work. *How stuff works* [online]. 2020 [cit. 2020-01-13]. Dostupné z: <https://science.howstuffworks.com/wind-tunnel2.htm>
- [2] Aerodynamics. *New world encyclopedia* [online]. [cit. 2020-01-13]. Dostupné z: <https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Aerodynamics>
- [3] BENSON, Tom, ed. Whirling Arms and the First Wind Tunnels. *NASA* [online]. [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/WindTunnel/history.html>
- [4] HORRELL, Paul. The Ferrari wind tunnel. *Ferrari* [online]. [cit. 2020-01-13]. Dostupné z: [https://magazine.ferrari.com/en/living/2017/10/19/news/the\\_ferrari\\_wind\\_tunnel\\_at\\_maranello-33717/](https://magazine.ferrari.com/en/living/2017/10/19/news/the_ferrari_wind_tunnel_at_maranello-33717/)
- [5] VIEHMANN, Sebastian. Dieses skurrile Auto ist die Mutter der Aerodynamik. In: *Focus online* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: [https://www.focus.de/auto/gebrauchtwagen/oldtimer/tid-31887/der-legendaere-rumpler-tropfen-wagen-dieses-skurrile-auto-ist-die-mutter-der-aerodynamik\\_\\_aid\\_\\_1012965.html](https://www.focus.de/auto/gebrauchtwagen/oldtimer/tid-31887/der-legendaere-rumpler-tropfen-wagen-dieses-skurrile-auto-ist-die-mutter-der-aerodynamik__aid__1012965.html)
- [6] KATZ, Joseph. An introduction to automobile aerodynamics: Figure 2. *Mechanix Illustrated* [online]. 2016 [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: <https://mechanixillustrated.technicacuriosa.com/2017/03/04/an-introduction-to-automobile-aerodynamics/>
- [7] DIMITRIADIS, G. Vehicle Aerodynamics. *Aeroelasticity and Experimental Aerodynamics* [online]. c2004-2020 [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: <http://www.ltas-aea.ulg.ac.be/cms/uploads/VehicleAerodynamics02.pdf>

- [8] BISSET, Mark. 'Wings Clipped': Lotus 49: Monaco Grand Prix 1969... *Primotipo* [online]. 2015 [cit. 2020-01-14]. Dostupné z: <https://primotipo.com/2015/07/12/wings-clipped-lotus-49-monaco-grand-prix-1969/>
- [9] KASTENS, Mathias. History. *FS total* [online]. [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <http://www.fstotal.com/history-2/>
- [10] Formula Student Electric - World Ranking List. *FS World* [online]. [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://fs-world.org/E/>
- [11] OCAMPO, Luis. *Formula SAE at Missouri S&T* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: [https://formulasae.mst.edu/wp-content/uploads/sites/4/2015/09/14436767414\\_5e402a3e93\\_o.jpg](https://formulasae.mst.edu/wp-content/uploads/sites/4/2015/09/14436767414_5e402a3e93_o.jpg)
- [12] *Tufast Racing Team* [online]. [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/Tufast.Racing.Team/photos/a.2117183351686183/2900858233318687/?type=3&theater>
- [13] Formula Student Rules 2020. *Formula Student Germany* [online]. [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2020/rules/FS-Rules\\_\\_2020\\_\\_V1.0.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules__2020__V1.0.pdf)
- [14] Ansys Meshing Solutions. *Ansys* [online]. 2020 [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/platform/ansys-meshing>
- [15] DUFEK, Michal. *Návrh aerodynamických prvků pro vůz Formula Student UWB04* [online]. Diplomová práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/28907>
- [16] Standardní atmosféra. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2020 [cit. 2020-04-

- 04]. Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Standardn%C3%AD\\_atmosf%C3%A9ra](https://cs.wikipedia.org/wiki/Standardn%C3%AD_atmosf%C3%A9ra)
- [17] Aerodynamika. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2020 [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Aerodynamika>
- [18] Viskozita. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2020 [cit. 2020-02-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Viskozita>
- [19] LNĚNIČKA, Jaroslav. Profily nosných a ocasních ploch. *E-magazín Akademie letectví* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <http://www.airspace.cz/akademie/rocnik/2009/01/profilu.php>
- [20] KOVERDYNSKÝ, Vít. Technické izolace detailně (III) – návrh technických izolací a využití výpočtových programů. *TZB-info* [online]. 2001-2020 [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/izolace/13879-technicke-izolace-detailne-iii-navrh-technicky-ch-izolaci-a-vyuziti-vypoctovych-programu>
- [21] KREJČIŘÍK, Stanislav. *Možnosti snižování odporu pohybujících se těles v kapalinách inspirované přírodou* [online]. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_\\_base/zav\\_\\_prace\\_\\_soubor\\_\\_verejne.php?file\\_\\_id=86367](https://www.vutbr.cz/www__base/zav__prace__soubor__verejne.php?file__id=86367)
- [22] BUREŠOVÁ, Kateřina. *Simulace obtékání zadního křídla studentské formule* [online]. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/65593>
- [23] DANĚK, Milan. *Aerodynamika a mechanika letu pro piloty a techniky*. 1. vydání. Praha: Naše vojsko, 1958.

- [24] STANÍK, Honza. Princip letu. *El Speedo* [online]. 2017 [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://elspeedo.cz/3-1-princip-letu/>
- [25] Seznam závodních pojmů. *BBB Stream* [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://bbbstream.cz/2019/08/29/seznam-zavodnich-pojmu/>
- [26] SIVARAJ, G., K. PARAMMASIVAM a G. SUGANYA. Reduction of Aerodynamic Drag Force for Reducing Fuel Consumption in Road Vehicle using Basebleed. *Journal of Applied Fluid Mechanics* [online]. 2018, 11(6), 1489-1495 [cit. 2020-05-14]. DOI: 10.29252/jafm.11.06.29115. ISSN 17353572.
- [27] End plate design. *Medium* [online]. 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://medium.com/@SimScale/front-wing-of-f1-car-how-to-optimize-its-design-3939ca1ff113>