

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra vozidel a pozemní dopravy**



**Bakalářská práce**

**Návrh předního přítláčného křídla vozu Formula  
Student**

**Tomáš Zralý**

© 2022 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tomáš Zralý

Technika a technologie v dopravě a spojích  
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

**Návrh předního přítlačného křídla vozu Formula Student**

Název anglicky

**Design of the front wing for the Formula Student vehicle**

---

### Cíle práce

Cílem práce je popsat, jak probíhá návrh předního přítlačného křídla a uvést vlastní příklad návrhu.

### Metodika

Bakalářská práce bude rozdělena na část teoretickou a praktickou. V teoretické části práce budou přiblížena pravidla pro návrh předního křídla a následně popsána metodika pro návrh křídla opírající se o odbornou a vědeckou literaturu a další zdroje. V praktické části bude ukázán vlastní návrh, který se opírá o simulace v programech Solidworks Flow Simulation a Ansys Fluent.

Práce bude strukturovaná dle následující osnovy:

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Přehled řešené problematiky
4. Praktická část práce
5. Závěr
6. Seznam použitých zdrojů
7. Přílohy

**Doporučený rozsah práce**

30-40 stran A4

**Klíčová slova**

aerodynamika, spojler, simulace, formule

---

**Doporučené zdroje informací**

BROŽ, Václav. Aerodynamika nízkých rychlostí. Vyd. 5. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02347-8

BROŽ, Václav, Vladimír DANĚK a Karol FILAKOVSKÝ. Základy aerodynamiky: studijní modul 8. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. Učební texty dle předpisu JAR-66. ISBN 80-7204-316-1

DRAXLER, Karel. Aerodynamika, konstrukce a systémy letounů: studijní modul 11. Část 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. Učební texty dle předpisu JAR-66. ISBN 80-7204-367-6

HOUGHTON, E. L. Aerodynamics for engineering students. 6th ed. Waltham: Butterworth-Heinemann, c2013. ISBN 978-0-08-096632-8

---

**Předběžný termín obhajoby**

2021/2022 LS – TF

**Vedoucí práce**

Ing. Petr Jindra, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra vozidel a pozemní dopravy

---

Elektronicky schváleno dne 4. 2. 2021

**Ing. Martin Kotecký, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 14. 03. 2022

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci „Návrh předního přítlačného křídla vozu Formula Student“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 25.3.2022

---

### **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Petru Jindrovi, Ph.D., za cenné rady, připomínky a všestrannou pomoc a čas věnovaný vedení této bakalářské práce. Poděkování patří také kolegům z týmu CULS Prague Formula Racing.

# Návrh předního přitlačného křídla vozu Formula Student

## Abstrakt

Bakalářská práce řeší návrh předního přitlačného křídla vozu Formula Student. V teoretické části práce je nejprve uvedena historie vývoje aerodynamických prvků v soutěži Formula SAE, poté následuje představení týmu CULS Prague Formula Racing a pravidel, která musí závodní vozidlo splňovat. Dále je v této části práce popsána historie aerodynamiky, jsou vysvětleny důležité aerodynamické pojmy, význam jednotlivých prvků předního přitlačného křídla a aerodynamická rovnováha. V praktické části je proveden vlastní návrh předního přitlačného křídla pro vozidlo Formula Student, a to jak na základě teoretických znalostí získaných z teoretické části práce, tak vlastních provedených CFD simulací. Navržené přední přitlačné křídlo je následně porovnáno se stávajícím křídlem, které bylo využíváno na posledním vozidle FS.06, s nímž se tým CULS Prague Formula Racing zúčastnil závodů v sezoně 2020–2021.

**Klíčová slova:** aerodynamika, aero paket, Formula Student, přední přitlačné křídlo, simulace

# **Design of the front wing for the Formula Student vehicle**

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with the design of the front wing of the Formula Student vehicle. In the theoretical part of the thesis, the history of the development of aerodynamic elements in Formula SAE competition is first presented, followed by an introduction of the CULS Prague Formula Racing team and the rules that the race car must meet. Next, the history of aerodynamics is described in this part of the thesis, important aerodynamic concepts are explained, the importance of the different elements of the front wing and aerodynamic balance. In the practical part, the actual design of a front wing for a Formula Student vehicle is carried out, based on both the theoretical knowledge gained from the theoretical part of the thesis and the actual CFD simulations performed. The designed front wing is then compared with the existing wing used on the last FS.06 vehicle, with which the CULS Prague Formula Racing team participated in the 2020-2021 season.

**Keywords:** aerodynamics, aero paket, Formula Student, front wing, CFD simulation

# Obsah

<b>1. Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Cíl práce</b> .....	<b>2</b>
<b>3. Přehled řešené problematiky</b> .....	<b>3</b>
3.1 Soutěž Formula SAE.....	3
3.2 Tým CULS Prague Formula Racing .....	4
3.3 Pravidla pro návrh aerodynamických prvků .....	5
3.4 Historie aerodynamiky .....	7
3.5 Aerodynamické pojmy .....	8
3.5.1. Bernoulliho rovnice .....	8
3.5.2 Proudění .....	8
3.5.3 Vazkost .....	9
3.5.4 Mezní vrstva .....	10
3.5.5 Reynoldsovo číslo.....	10
3.5.6 Odtržení .....	11
3.6 Aerodynamické síly a momenty.....	12
3.6.1 Odpor .....	12
3.6.2 Vztlak.....	12
3.6.3 Klopivý moment .....	13
3.6.4 Aerodynamická účinnost .....	13
3.7 Charakteristika a geometrie profilu křídla .....	13
3.7.1 Výběr leteckého profilu .....	15
3.7.2 Rozložení tlaku na profilu.....	16
3.7.3 Momentová křivka profilu .....	17
3.8 Přední přitlačné křídlo.....	17
3.8.1 Hlavní profil.....	18
3.8.2 Klapky.....	18
3.8.3 Koncové desky.....	19
3.8.4 Gurneyho klapky.....	19
3.8.5 Generátory vírů .....	20
3.9 Aerodynamická rovnováha .....	20
<b>4. Praktická část</b> .....	<b>22</b>
4.1 Stanovení cílů pro samotný návrh.....	22
4.2 Výběr leteckého profilu.....	22
4.3 Hlavní profil .....	23
4.4 Klapky .....	25
4.4.1 Nastavení klapek – varianta 1 .....	26
4.4.2 Výsledky simulace celého vozu s nastavením klapek varianty 1 .....	28



4.4.3	Nastavení klapek – varianta 2 .....	29
4.4.4	Výsledky simulace celého vozu s nastavením klapek varianty 2 .....	31
4.5	Generátor víru .....	31
4.6	Koncové desky .....	33
4.7	Porovnání variant aero paketů.....	34
4.8	Rozbor finálního návrhu předního křídla .....	35
4.9	Srovnání s předním přitlačným křídlem vozu FS.06 .....	36
<b>5.</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>39</b>
<b>6.</b>	<b>Seznam použitých zdrojů .....</b>	<b>41</b>
	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>43</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>44</b>

# 1. Úvod

Aerodynamika, která se vyvinula z hydrodynamiky, je vědní disciplína, zabývající se prouděním vzduchu a jako taková je důležitým aspektem při návrhu nejen závodních vozidel, ale také všech sériově vyráběných silničních vozidel, a to jak osobních, tak také nákladních. U sériově vyráběných vozidel se aerodynamika využívá zejména z ekonomických důvodů, kdy je cílem návrháře co nejvíce snížit odporovou sílu vozidla, čímž dojde ke zlepšení proudění vzduchu okolo vozidla, což vede ke snížení spotřeby paliva. U závodních vozidel je aerodynamika využívána zejména z důvodu zlepšení jízdních vlastností v rychlých zatáčkách a snížení odporu vozidla. Cílem všech konstruktérů je vhodnou volbou a úpravou aerodynamických prvků docílit nejen vzhledu, který na první pohled zaujme, ale také dosáhnout co nejnižšího součinitele čelního odporu.

Cílem bakalářské práce je popsat, jak probíhá návrh předního přitlačného křídla a uvést vlastní příklad návrhu. Pro naplnění cíle práce bude v její teoretické části popsána historie aerodynamiky, aerodynamických prvků v soutěži Formula SAE, aerodynamických pojmů a jejich význam pro aerodynamiku vozu, aby bylo možné v praktické části na základě jak teoretických znalostí, tak vlastních autorových zkušeností z přechozího vývoje vozu Formula Student – SAE provést vlastní návrh předního přitlačného křídla. Tento návrh bude poté porovnán se stávajícím křídlem, využívaným na posledním vozidle FS.06, který sestavil tým CULS Prague Formula Racing a zúčastnil se s ním závodů v sezoně 2020–2021.

## 2. Cíl práce

Cílem bakalářské práce je popsat, jak probíhá návrh předního přítláčného křídla, a uvést vlastní příklad návrhu.

Úvodní část práce bude přibližovat historii vývoje aerodynamických prvků v soutěži Formula SAE. Poté bude představen tým CULS Prague Formula Racing a pravidla soutěže Formula SAE. V teoretické části práce bude následovat popis historie aerodynamiky, aerodynamických pojmů a jejich význam na aerodynamiku vozu. Dále se práce bude podrobně věnovat konstrukci předního křídla, jeho prvků a jejich vlivu na aerodynamickou rovnováhu.

Cílem praktické části bude vlastní návrh předního křídla pro vůz Formula SAE, a to za využití jak poznatků z teoretické části práce, tak vlastních autorových zkušeností z předchozího vývoje vozu Formula SAE. Při návrhu budou využity CFD (Computational Fluid Dynamics) simulace proudění.

### 3. Přehled řešené problematiky

#### 3.1 Soutěž Formula SAE

Soutěž Formula SAE vytvořil profesor Texaské univerzity Ron Matthews, v roce 1981 se soutěž konala poprvé a zúčastnily se jí čtyři univerzity. Postupně se soutěže začaly účastnit i další univerzity, soutěž také postupem času začala zpřísnovat svá pravidla.

V roce 1998 se konala ve Velké Británii nová soutěž s názvem Formula Student, která byla schválena původní soutěží Formula SAE. Další zásadní vývoj zaznamenala Formula SAE v roce 2010, kdy oficiálně uznala další soutěže, jako jsou Formula Student Germany, Formula Student Japan a Formula Student Austria do oficiální série.

V roce 1991 se začala objevovat v soutěži Formula SAE první přitlačná křídla. Týmy University of Michigan a University of Missouri-Rolla měly velká přitlačná křídla namontovaná nad řidičem. Oba týmy byly velmi rychlé, což vedlo následující rok k omezení umístění a velikosti přitlačných křídél.

Vozy s přitlačnými křídly se dále do historie zapsaly v roce 2003, kdy vůz University of Missouri-Columbia překonal rekord v disciplíně Autocross. [1]

Za celou dobu jejího konání soutěž ovlivnily známé osobnosti Formule 1 a automobilového průmyslu. [2]



Obrázek č. 1 – První formule SAE s přitlačným křídlem [3]

### 3.2 Tým CULS Prague Formula Racing

Tým CULS Prague Formula Racing je týmem České zemědělské univerzity v Praze, jenž vznikl v roce 2013 a skládá se převážně ze studentů Technické fakulty, ale i ostatních fakult. V současné době má přibližně 15 členů, kteří pracují na přípravě formule s označením FS.07, jedná se tedy o sedmou generaci vozu. První aerodynamický prvek byl použit na formuli FS.02 a jednalo se o zadní difuzor. Další formule FS.03 již měla přitlačná křídla, která byla v dané době pravidly méně omezena, a proto jsou již na první pohled masivnější než na ostatních formulích. [4]

Od doby vzniku vozu FS.04 byla v pravidlech výrazně omezena velikost aerodynamických prvků. V posledních letech jsou pravidla aerodynamických prvků takřka neměnná.



Obrázek č. 2 – Vůz FS.03 [4]

### 3.3 Pravidla pro návrh aerodynamických prvků

Podle pravidel soutěže je aerodynamickým prvkem každá speciálně navržená konstrukce namontovaná na vozidle, která usměrňuje proudění vzduchu kolem vozidla a tím zvyšuje přítlak působící na vozidlo, anebo snižuje aerodynamický odpor vozidla. Omezení těchto prvků je možné v pravidlech najít v kapitole T8. Tato kapitola obsahuje výškové, šířkové, délkové a konstrukční požadavky.

Všechna omezení musí být splněna s koly směřujícími rovně, s libovolným nastavením podvozku a s pilotem nebo bez pilota.

Výšková omezení:

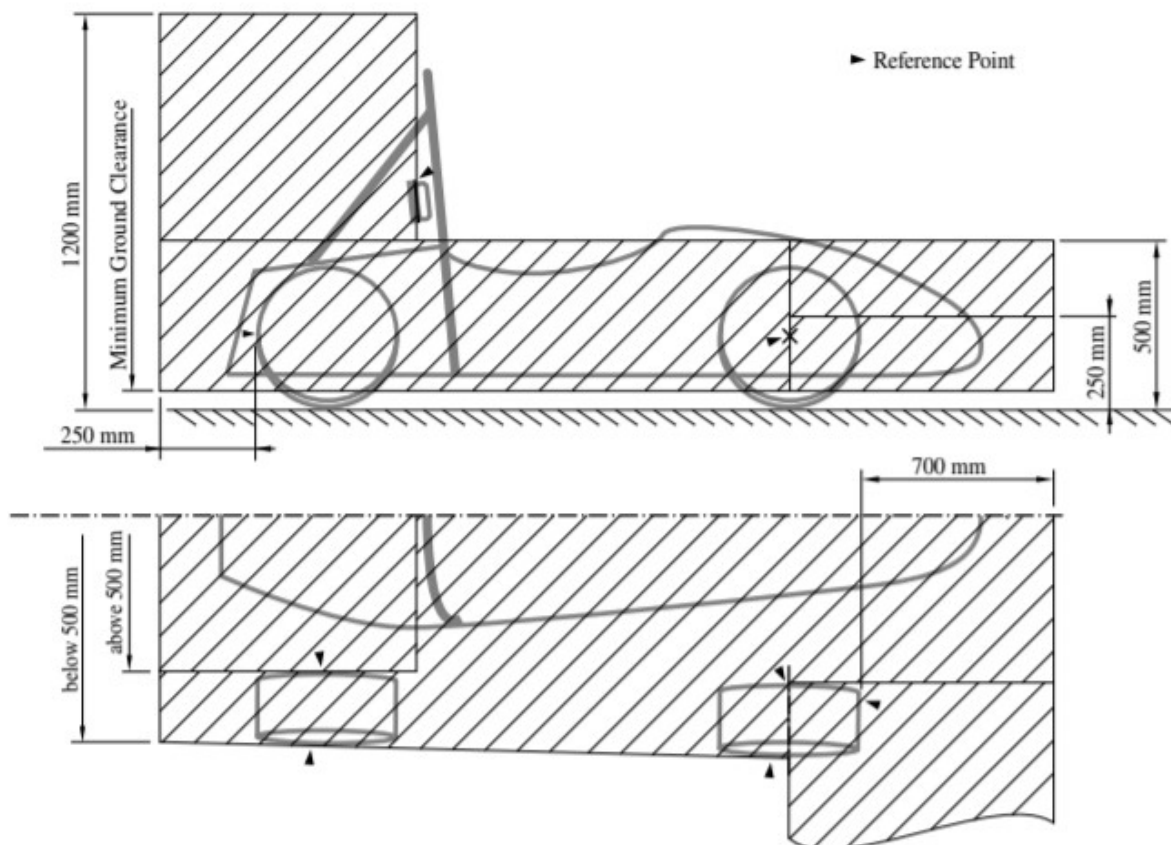
- všechny aerodynamické prvky před svislou rovinou, která prochází nejzadnější částí přední části opěrky hlavy řidiče, s výjimkou polstrování, musí být níže než 500 mm od země,
- všechny aerodynamické prvky před přední nápravou, které přesahují dále než nejvnitřnější bod přední pneumatiky, musí být umístěny níže než 250 mm od země,
- všechny aerodynamické prvky, které se nacházejí vzadu za svislou rovinou procházející nejzadnější částí přední plochy opěrky hlavy řidiče, s výjimkou polstrování, musí být níže než 1200 mm od země.

Šířková omezení:

- všechny aerodynamické prvky, které jsou níže než 500 mm od země a jsou směrem dozadu od přední nápravy, nesmí být širší než svislá rovina dotýkající se nejvzdálenějšího kola přední a zadní pneumatiky,
- všechny aerodynamické prvky, které jsou výše než 500 mm od země, nesmí přesahovat nejvnitřnější bod zadní pneumatiky.

Délková omezení:

- veškeré aerodynamické prvky nesmí směrem dozadu přesahovat více než 250 mm od zadní části zadních pneumatik,
- veškeré aerodynamické prvky nesmí směrem dopředu přesahovat více než 700 mm od přední části předních pneumatik.



Obrázek č. 3 – Formula Student Rules 2022 [5]

Konstrukční požadavky:

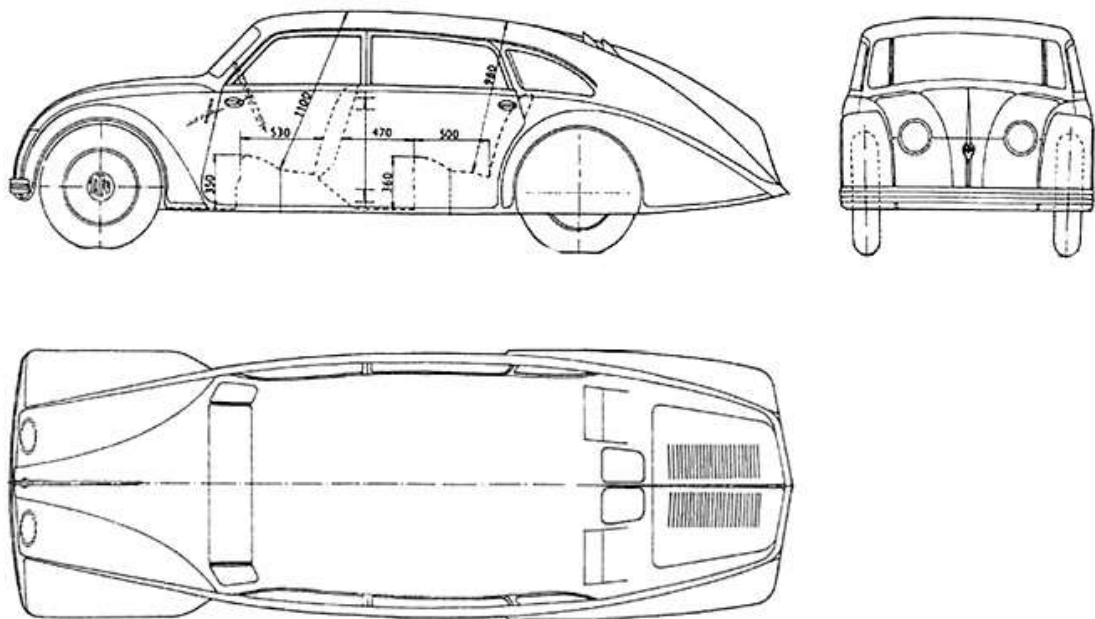
- pro všechny hrany, které jsou nasměrovány dopředu a mohly by přijít do kontaktu s jezdcem, musí být dodrženy minimální poloměry – 5 mm pro vodorovné hrany  
3 mm pro svislé hrany,
- jakýkoli aerodynamický prvek musí být schopen odolat síle 200 N rozložené na minimální plochu 225 cm<sup>2</sup> a nesmí se vychýlit o více než 10 mm ve směru působení nákladu,
- každý aerodynamický prvek musí být schopen odolat síle 50 N působící v libovolném směru nebo bodu a nesmí se vychýlit o více než 25 mm. [5]

### 3.4 Historie aerodynamiky

Na počátku aerodynamika vycházela z hydrodynamiky, tedy vědy zabývající se prouděním kapalin. Základní myšlenky aerodynamiky vytvořil v 18. století Leonhard Euler, jenž odvodil diferenciální rovnice pohybu ideálních kapalin. Dalším významným přínosem přispěl Daniel Bernoulli, který publikoval dílo *Hydrodynamica*, v němž se objevila rovnice hydrodynamiky stanovující vztah mezi tlakem a rychlostí při proudění nestlačitelné tekutiny. [6]

Na konci 19. století se objevují první patenty na profily křídel. Tento trend pokračoval až do roku 1939, kdy Eastman Jacobs vytvořil první laminární profil. [7]

V roce 1934 byl vyroben automobil Tatra 77. Tento automobil se považuje za první sériově vyráběný automobil s proudnicovou karosérií. Automobil byl výsledkem práce Ericha Übelackera, který opustil všechny tehdejší vzory a neobyčejným způsobem navrhl aerodynamický tvar vozidla. [8]



Obrázek č. 4 – Tatra 77 [9]



## 3.5 Aerodynamické pojmy

### 3.5.1. Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice vyjadřuje zákon zachování energie, přesněji řečeno vztah mezi tlakem a rychlostí v proudové trubici. [10], [11]

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2 \quad (1)$$

Kde:

$\rho$  – hustota ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )

$v$  – rychlost ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

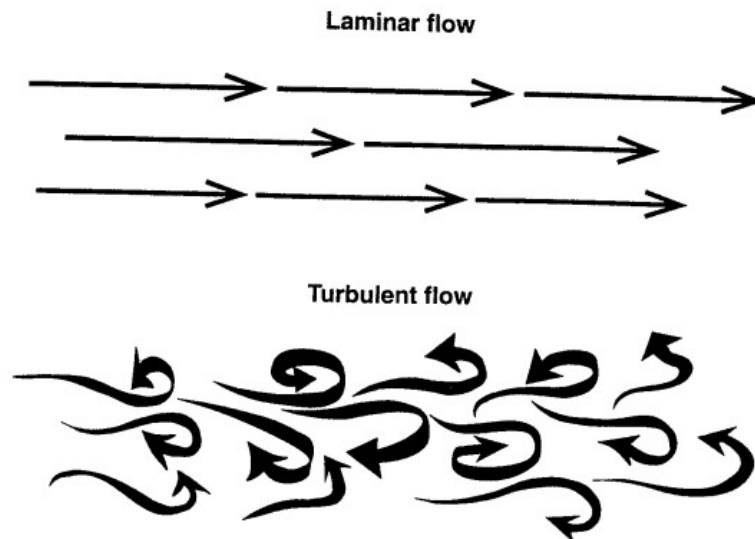
$p$  – tlak (Pa)

Pokud zúžíme průřez potrubí, dosáhneme zvýšení velikosti rychlosti proudící kapaliny a v místě zúžení její tlak klesne pod hodnotu atmosférického tlaku, což způsobí podtlak a bude docházet k nasávání vzduchu do trubice. Tento princip využívají například rozprašovače či karburátory spalovacích motorů. [10]

### 3.5.2 Proudění

Proudění je charakterizováno proudnicemi, což jsou spojnice částic vzduchu procházející jedním bodem v téže trajektorii za předpokladu konstantní rychlosti. Soubor proudnic ve stejné rovině tvoří obraz obtékání vozidla. [11]

Proudění můžeme rozdělit na dva základní typy. Na laminární a turbulentní proudění. O laminární proudění se jedná, jestliže jsou stopy částic v tekutině rovnoběžné a sledují směr průměrné rychlosti a pohyb tekutiny. Pokud se ale částice budou pohybovat při stejné průměrné rychlosti neuspořádaně a chvilkově se budou pohybovat v opačném směru, jedná se o proudění turbulentní. [12]



Obrázek č. 5 – Laminární a turbulentní proudění [12]

### 3.5.3 Vazkost

Vaznost neboli viskozita je vznik třecí a smykové síly při vzájemném posunu dvou přilehlých vrstev tekutiny. Smykové napětí mezi vrstvami tekutiny udává Newtonův zákon tření, kapaliny splňující tento zákon se nazývají tzv. newtonovské tekutiny.

Jelikož je viskozita plynů velmi malá, vyskytuje se především u případů, kde dochází k velkým rozdílům rychlostních gradientů, například u proudění v blízkosti stěny či na stěně. [13]

$$\tau = \mu \frac{dv}{dn} \quad (2)$$

Kde:

$\tau$  – smykové napětí (Pa)

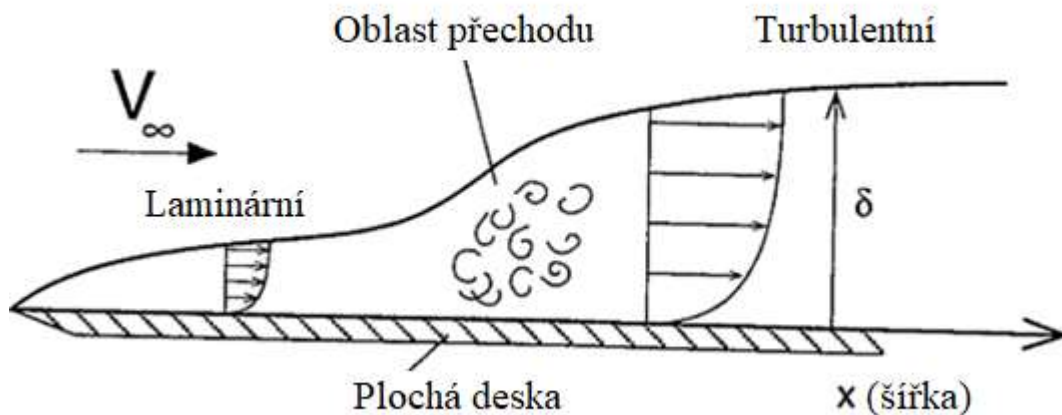
$\mu$  – dynamická viskozita ( $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$ )

$\frac{dv}{dn}$  – rychlostní gradient ( $\text{s}^{-1}$ )

### 3.5.4 Mezní vrstva

Mezní vrstva je velmi tenká vrstva v nejbližším okolí obtékaných profilů. Tato vrstva je hlavním zdrojem profilového odporu. [14]

V mezní vrstvě se nacházejí částice kapaliny, které se dotýkají tělesa, ulpívají na povrchu a nemají žádnou relativní rychlost. Ve větší vzdálenosti od pevného tělesa se rychlost zvyšuje, dokud se nevyrovná místní hodnotě volného proudu. Pro přiblížení velikosti mezní vrstvy je vybrán automobil pohybující se rychlostí 100 km za hodinu, jehož mezní vrstva je u přední části silná několik mm a u střechy několik cm. Mezní vrstva obvykle začíná jako laminární vrstva, která postupně přechází v turbulentní. Lze ji vysvětlit na příkladu ploché desky (obr. 6). Zpočátku při nerušeném proudění je mezní vrstva laminární, ale s rostoucí vzdáleností  $x$  se proudění stává turbulentním. Oblast, kde k této změně dochází, se nazývá oblast přechodu. Turbulentní mezní vrstva je silnější v důsledku kolísání turbulentních složek rychlosti. Ztráta hybnosti v této mezní vrstvě je proto větší, na základě čehož předpokládáme, že turbulentní plocha bude větší. [12]



Obrázek č. 6 – Mezní vrstva podél ploché desky [12]

### 3.5.5 Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo je bezrozměrná veličina pojmenovaná po Osbornu Reynoldsovi, který se věnoval dynamice tekutin. Číslo určuje poměr mezi silami setrvačnými a vazkými. Poměr těchto sil výrazně ovlivňuje obtékání profilů. Síly setrvačné nad silami vazkými převládají při vyšších rychlostech a větších rozměrech, tedy při vysokých hodnotách  $Re$ .

Při vysokých hodnotách  $Re$  jsou vazké síly soustředěny do mezní vrstvy, jejíž definice byla již zmíněna. [14]

V neposlední řadě se  $Re$  také využívá pro dodržení podobnosti proudění mezi modelovým a plnorozměrovým vozidlem, kdy oba objekty musí mít stejné Reynoldsovo číslo. [15]

$$Re = \frac{vl}{\nu} \quad (3)$$

Kde:

$v$  – rychlost proudu vzduchu ( $m \cdot s^{-1}$ )

$l$  – délka tělivity profilu (m)

$\nu$  – kinematická viskozita vzduchu ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )

### 3.5.6 Odtržení

Odtržení vzniká v důsledku vazkosti prostředí a je doprovázeno snížením vztlaku a zvýšením odporu profilu křídla. Průběh odtržení se mění s aerodynamickými profily a s měnícími se rychlostmi. [16]

Z pohledu odtržení proudu vzduchu jsou u automobilů rozlišovány dvě oblasti, které jsou odděleny přibližně rovinou maximálního příčného řezu, přičemž v první polovině dochází k urychlování proudu vzduchu a v druhé polovině k jeho zpomalování. V části, kde dochází k urychlování proudu vzduchu, statický tlak klesá, což je pozitivní z hlediska odtržení proudu vzduchu. V druhé části se naopak tlak zvyšuje, to má za následek odtržení proudu vzduchu a dochází tak k úplavu za automobilem.

Místem, kde dochází k částečnému odtržení proudu vzduchu, je oblast přechodu mezi přední kapotou a čelním sklem, což opět souvisí s tlakovým rozložením. Velikost tzv. odtržené bubliny je závislá na velikosti úhlu, který svírá kapota a čelní sklo. V místě tohoto přechodu vzniká proudění sekundární, kdy víry v odtržené bublině proudí do stran automobilu a poté podél jeho bočních stran. [12]

## 3.6 Aerodynamické síly a momenty

### 3.6.1 Odpor

Při návrhu nejen závodních, ale i silničních vozů je aerodynamický odpor nejdůležitějším faktorem. Snižováním aerodynamického odporu lze snížit spotřebu paliva, ale i zvýšit maximální rychlost vozidla. [12]

Jedná se o sílu, která působí ve směru opačném, než je směr proudění vzduchu směru pohybu. Spotřebovává proto výkon motoru, a tedy brání zrychlení a snižuje maximální rychlost. Zdrojem odporu vzduchu je mezní vrstva. Odpor můžeme rozdělit na viskózní odpor a tvarový (tlakový) odpor, který bývá zpravidla výrazně vyšší. Tvarový odpor vyplývá z čelní plochy a tvaru vozidla. Při aerodynamických výpočtech se využívá bezrozměrný součinitel odporu vzduchu  $C_D$ . [17]

### 3.6.2 Vztlak

Aerodynamický vztlak působící na vozidlo je způsoben tlakovým rozdílem mezi spodní a vrchní částí obtékaného profilu. [18]

Vznik vztlaku je možné vysvětlit několika způsoby:

- Prvním způsobem je vysvětlení pomocí cirkulace. Rychlost obtékání na horní straně profilu se zvyšuje o rychlost proudění cirkulace, zatímco na spodní straně se o tuto rychlost snižuje. S využitím Bernoulliho rovnice je pak už snadné identifikovat, že na horní straně, kde je rychlost proudění vyšší, se nachází podtlak a na dolní straně, kde je rychlost proudění nižší, přetlak. Součet těchto tlaků udává vztlak.
- Dalším způsobem je vysvětlení pomocí obrazu skutečného obtékání, kdy proudění po horní části profilu musí překonat delší dráhu za stejný čas než proudění po spodní části profilu. Vztlak plyne z rozdílu rychlostí.
- Posledním způsobem je hustota proudnic v obrazu skutečného obtékání. Toto vysvětlení říká, že rychlost proudění bude vyšší (bude docházet k podtlaku) v místech, která mají malý průtočný řez, což jsou dle rovnice kontinuity místa, jež mají proudnice nahuštěny blízko sebe. Pokud jsou proudnice daleko od sebe, bude rychlost proudění nižší (bude docházet k přetlaku). [16]

Aerodynamický vztlak je přímo úměrný rychlosti cirkulace, která je funkcí rozdílu mezi zakřivením spodního a vrchního povrchu. [12]

### 3.6.3 Klopivý moment

Klopivý moment je výslednicí momentů aerodynamického odporu a aerodynamického vztlaku kolem těžiště vozidla. Může způsobit výrazný přenos zatížení z jedné nápravy na druhou, čímž by došlo k ovlivnění řízení a stability vozidla. [18]

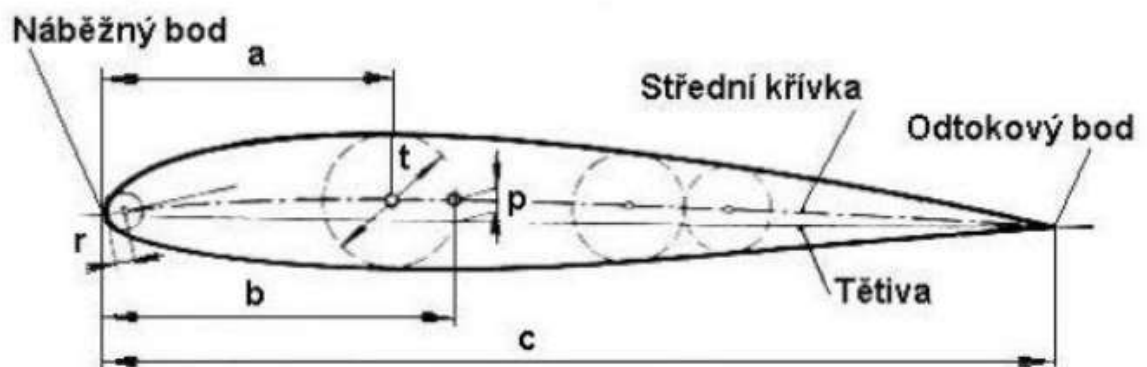
### 3.6.4 Aerodynamická účinnost

Aerodynamická účinnost vyjadřuje poměr mezi generovaným vztlakem a odporem. Jde o jeden z hlavních parametrů posuzující efektivnost návrhu aerodynamických prvků. [19]

## 3.7 Charakteristika a geometrie profilu křídla

Letecký profil je uzavřená křivka, kterou získáme rozříznutím křídla v rovině kolmé k ose křídla. Geometrie profilu má zásadní vliv nejen na rozložení aerodynamických sil, ale také na letové vlastnosti letounu. Jak bylo uvedeno v kapitole historie aerodynamiky, první letecké profily se začaly objevovat na konci 19. století, v průběhu rozvoje letectví byly podrobeny rozsáhlému výzkumu, jehož výsledkem je množství nejrůznějších profilů vhodných pro různé použití. Úlohou každého konstruktéra letounu je vybrat nejvhodnější letecký profil, který bude odpovídat požadavkům vyvíjeného letounu.

V geometrii leteckého profilu je několik základních pojmů, jako je náběžný bod (neboli náběžná hrana), tětíva, střední křivka, tloušťka profilu a odtokový bod (neboli odtoková hrana).



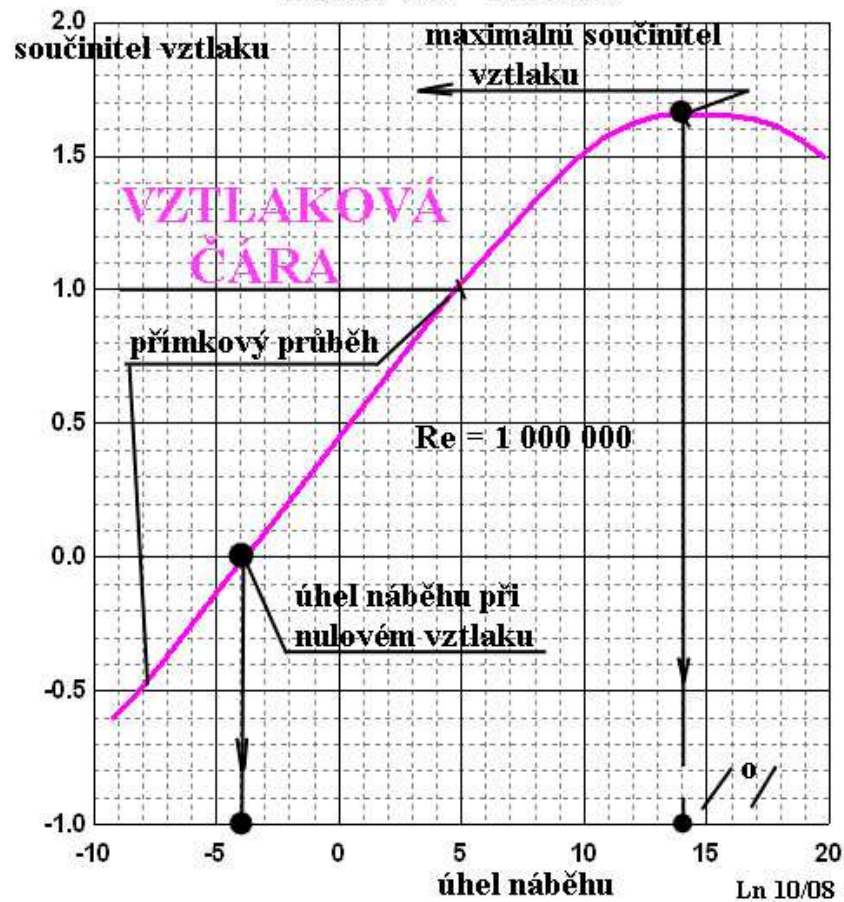
Obrázek č. 7 – Geometrie profilu [20]

Poloměr náběžné hrany  $r$  je poloměr kružnice vepsané v náběžné hraně. Střední křivka profilu je spojnicí středů všech vepsaných kružnic do profilu. Tětiva je definována jako spojnice náběžného bodu s odtokovým bodem. Její délka je označována jako hloubka profilu  $c$ . Tloušťka profilu  $t$  je úměrná největší vepsané kružnici. [20]

Tětiva profilu se považuje za základní rozměr, obvykle se k ní udávají rozměry v procentech délky tětivy. Například poloha maximální tloušťky profilu  $a$ , nebo poloha maximálního prohnutí  $b$ . Dále se k tětivě vztahuje úhel náběhu, který určuje úhel sevřený mezi tětivou a směrem proudění tekutiny. [16]

Vztlak roste téměř lineárně s rostoucím úhlem náběhu, což umožňuje velmi malý vliv viskozity na vztlak při malých úhlech náběhu. Tato skutečnost trvá až do chvíle, kdy je dosaženo kritického úhlu náběhu, který se vyskytuje hned za bodem maximálního vztlaku. Při dosažení kritického úhlu náběhu se totiž odtržení proudu vzduchu rozšiřuje prakticky na celou horní stranu profilu. V té chvíli se profil přestává chovat jako proudnicové těleso a dochází k prudké ztrátě vztlaku. [13]

## LHK 06 - 12.6/3.7



Obrázek č. 8 – Závislost úhlu náběhu na součiniteli vztlaku [22]

### 3.7.1 Výběr leteckého profilu

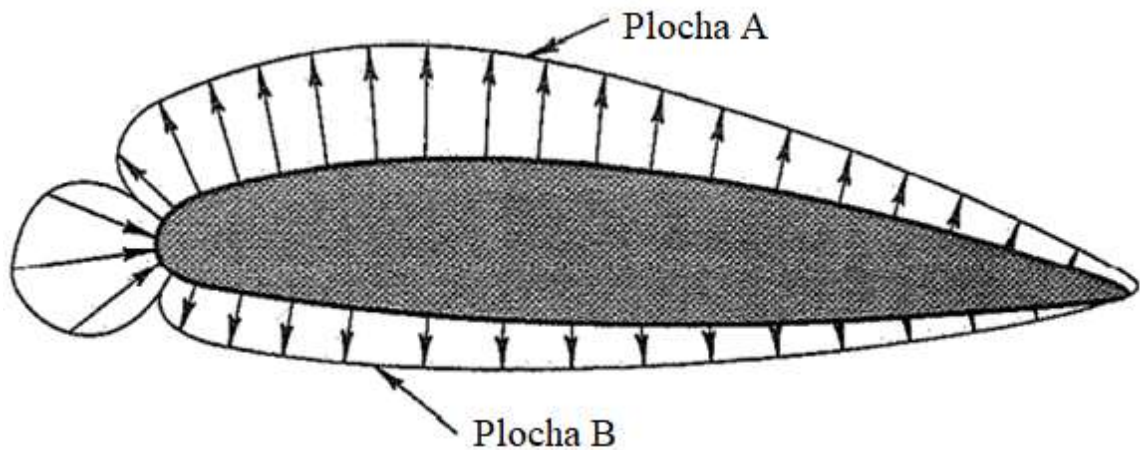
Letecké profily lze vybírat například na webu <http://airfoiltools.com/search/index>, kde se nachází přes 1600 profilů. Je možné je filtrovat pomocí kritérií, jako jsou maximální a minimální tloušťka, minimální prohnutí, ale také pomocí Reynoldsova čísla. [22]

Další způsob je definovat si vlastní profil na základě odhadu souřadnic z CFD simulace, nebo úpravou stávajícího leteckého profilu. [17]



### 3.7.2 Rozložení tlaku na profilu

Křídlo využívá změn dynamického a statického tlaku v proudu. V místech, kde se zvyšuje rychlost, jsou proudnice vzduchu tenčí. Platí zde obnovení tlaku, tudíž s rostoucí rychlostí se snižuje statický tlak a proudové trubice se zmenšují, naopak při přiblížení k odtokové hraně se vzduch zpomaluje a trubice se s rostoucím tlakem zvětšují.



Obrázek č. 9 – Rozložení tlaku na profilu křídla [15]

Plocha A na horní části profilu je větší než plocha B na spodní části profilu, a proto křídlo generuje vztlak. Šipky tlaku jsou na obr. 9 znázorněny kolmo k povrchu; jedná se o důsledek předpokladu, že v dokonalé tekutině neexistují žádné tečné síly. V ideálním případě, který znázorňuje obr. 9, dojde k úplnému obnovení tlaku. Pokud by se jednalo o křídlo v reálných podmínkách, dalo by se pomocí součtu všech vektorů z obrázku dosáhnout tlakového odporu. [15]

### 3.7.3 Momentová křivka profilu

U klopivých momentů rozlišujeme dva smysly – kladný a záporný. Momenty profilu se obvykle vztahují k náběžnému bodu, který se nachází na počátku tětivy profilu.

$$M_z = M_{z_0} - Y \cdot 0,25b \quad (4)$$

Kde:

$M_z$  – moment profilu k náběžnému bodu (Nm)

$M_{z_0}$  – moment při nulovém vztlaku (Nm)

$Y$  – vztlak (N)

$b$  – hloubka profilu (m)

Předpokladem tohoto vztahu je však konstantní rychlost a také hustota vzduchu. Tento vztah však platí pouze pro úhly náběhu, u nichž dochází k souvislému obtékání profilu, neboť v případech, kdy dojde k odtržení proudu, stávají se momentové charakteristiky zcela nepravidelnými.

Moment profilu k náběžnému bodu se skládá ze dvou složek:

- první složka, často nazývaná jako moment při nulovém vztlaku, je vlastně konstantní velikost, která není závislá na vztlaku či úhlu náběhu,
- druhá složka je na vztlaku závislá (úměrná) a jde o výsledek násobku činitelů, kterými jsou vztlak a čtvrtina hloubky.

Zakřivení střední křivky profilu zásadním způsobem ovlivňuje moment při nulovém vztlaku. Moment je nulový u souměrných profilů, u nichž je střední křivka přímkou. V případě profilů s prostě zakřivenou střední křivkou je tento moment záporný. Pokud se však jedná o profil, který má dvojitě zakřivenou střední křivku (vyskytují se velmi zřídka), může nastat skutečnost, že moment je kladný. [16]

## 3.8 Přední přitlačné křídlo

Přední křídla jsou jedním z hlavních prvků aerodynamiky vozu. Prošly celou řadou rozsáhlých studií, které postupně přinášely nové poznatky pro další návrhy. Využití technik CFD společně s dostupnými výpočetními zdroji výrazně přispělo ke stále se zlepšujícím

aerodynamickým výsledkům. Postupně se měnily i požadavky na křídla vozů, z původních požadavků na maximální rychlost se začaly stávat požadavky na dosažení maximálního zrychlení. Dalším trendem bylo také co největší snížení odporu při získání potřebné hodnoty přítlaku, což vedlo například k používání Gurneyho klapky. [23]

V motorsportu křídla fungují přesně obráceně než v letectví, a to tak, aby generovala přítlak, který je nezbytný k zajištění dostatečné přilnavosti a trakce závodního vozu. Speciálně přední křídlo je kromě tvorby přítlaku užitečné také k řízení celkového proudění vzduchu kolem vozu, neboť je to první část, s níž přichází vzduch do styku. [24]

V některých aerodynamických řešeních je navrhována střední část hlavního profilu předního křídla s negativním úhlem náběhu z důvodu vedení dostatečného množství vzduchu pod vůz. Přední křídlo může dále usměrňovat vzduch do bočnic vozu za účelem zlepšení chlazení motoru závodního vozu. Díky blízkosti k zemi je přední křídlo o více než 200 % účinnější než zadní křídlo, jelikož menší mezera mezi zemí a spodní stranou křídla zrychluje proudění a snižuje tlak, to má za následek vznik přítlaku bez výrazného zvýšení odporu vzduchu. [25]

### **3.8.1 Hlavní profil**

Konstrukce hlavního profilu předního křídla se liší od konstrukce křídla letounu, neboť přední křídlo pracuje v silném přízemním efektu neboli ground efektu. Ground efekt je náhlé zvýšení přítlaku v blízkosti země, nejvýraznější efekt nastává, pokud je výška od země menší než čtvrtina délky tělivity profilu. [26]

### **3.8.2 Klapky**

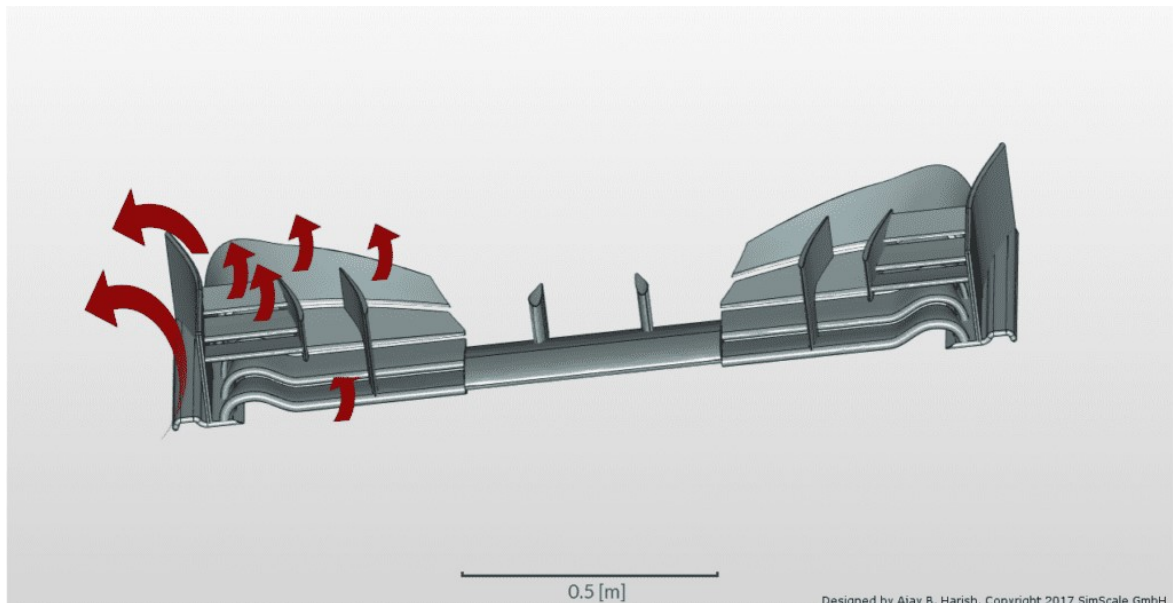
Klapky představují významný prostředek, jak efektivně zvýšit přítlak předního křídla, za cenu zvýšení odporu vzduchu. I přesto se přidání klapky k hlavnímu profilu ukázalo jako efektivnější při zvyšování přítlaku než zvyšování úhlu náběhu hlavního profilu. [27]

Pokud je mezi hlavním profilem a klapkou mezera přibližně velikosti 12 mm, umožňuje proudění z přetlakové oblasti v horní části hlavního profilu napájet podtlakovou oblast na spodní straně klapky. Poté lze zvýšit úhel náběhu bez rizika odtržení proudění a získat výrazné zvýšení přítlaku. [17]

### 3.8.3 Koncové desky

Koncové desky neboli endplaty výrazně snižují únik přitlačných tlaků a tím zvyšují účinnost předního křídla. [17]

Jsou navrženy pro řízení proudění kolem předních pneumatik vozu. Bývají zakřivené, aby před předními koly nevytvářely turbulence a co nejlépe odváděly proudění, čímž dochází k minimalizaci celkového odporu vozu. [24]

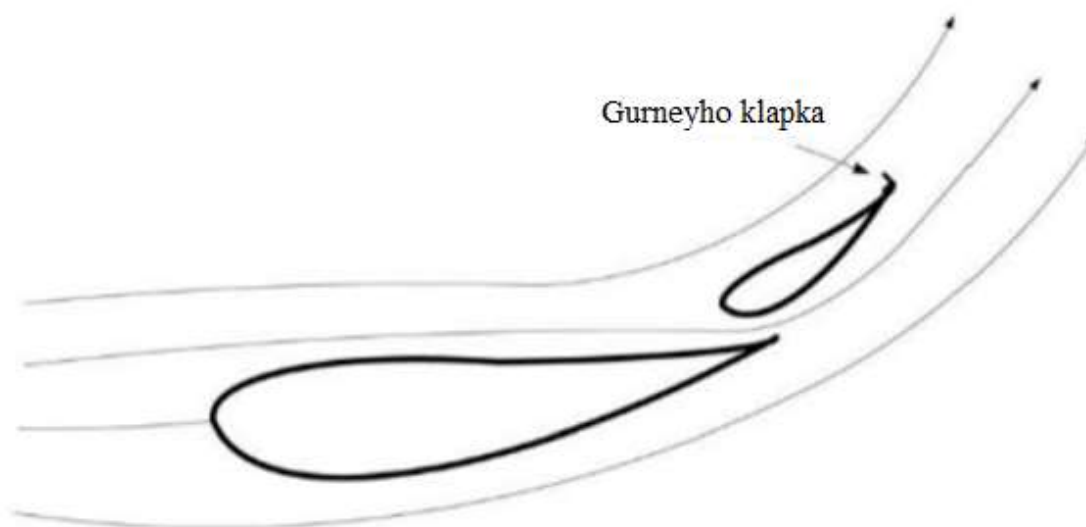


Obrázek č. 10 – Přední přitlačné křídlo vozu Formule 1 [24]

### 3.8.4 Gurneyho klapky

Jedná se o malou svislou výztuhu, která je přidána na odtokovou hranu po celé šířce leteckého profilu. Poprvé byla použita v 70. letech 20. století. Po přidání této výztuhy bylo překvapivě dosaženo nižšího odporu vzduchu, tento fakt potvrdila vyšší maximální rychlost. Ve vývoji Gurneyho klapky bylo dalším překvapením zvýšení přitlaku vozu. [26]

Použití Gurneyho klapky umožňuje zvýšit úhel náběhu bez toho, aby došlo k zásadnímu odtržení proudění vzduchu. [17]



Obrázek č. 11 – Gurneyho klapka [17]

### 3.8.5 Generátory vírů

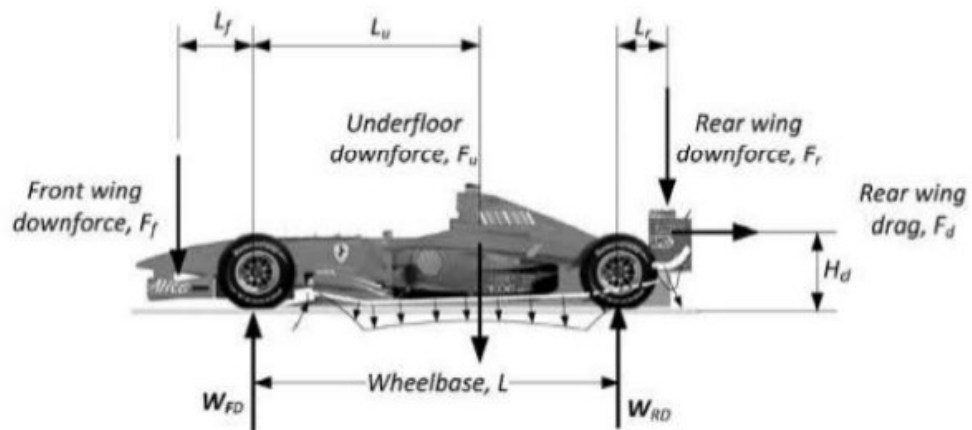
Generátory vírů mají obvykle podobu tvarované desky rovnoběžně se směrem proudění. Vytvářejí turbulentní proudění v podobě spirálových vírů. Tyto víry jsou přínosné z důvodu oddělení nízkotlakého prostředí pod předním křídlem a okolním vzduchem. Dále je můžeme nalézt například podél bočních okrajů podlah. U letadel slouží jako malá zařízení na nízkotlakém vzduchu, která podporují mezní vrstvu a oddalují odtržení vzduchu. [17]

## 3.9 Aerodynamická rovnováha

Cílem návrhu závodního vozu je dosáhnout relativní rovnováhy mezi nedotáčivostí a přetáčivostí za jakékoli rychlosti. Tohoto cíle ale nemusí být zcela dosaženo, protože aerodynamická rovnováha se může měnit v závislosti na rychlosti. Přízemní efekt způsobující vyšší účinnost předního křídla přináší ale i negativa. Negativum nastává při brždění vozu, kdy přenos zatížení na přední nápravu způsobuje snížení světlé výšky přední části vozu, což ještě zvýší přítlak a přední křídlo je přisáváno dolů. V extrémních případech se stává, že se koncové desky dotknou země, anebo je proudění zablokováno a dochází k náhlé změně přítlaku v přední části. Za těchto podmínek je závodní vůz značně aerodynamicky nevyvážený. Obvykle se zabránění podobným problémům docílí namontováním předního křídla výše, aby se snížil nepříznivý přízemní efekt. V nízkých rychlostech má zásadní vliv na aerodynamickou

rovnováhu mechanické vyvážení vozu, ve vyšších rychlostech postupně vliv aerodynamiky roste. Aerodynamické rozvážení by tedy mělo být co nejbližší rozvážení mechanickému, aby se vůz na závodní trati choval co nejlineárněji. Konečné aerodynamické rozvážení lze upravovat na trati změnou úhlu náběhu či přidáním Gurneyho klapky.

Na obr. 12 jsou znázorněny hlavní aerodynamické síly působící na vůz. [17]



Obrázek č. 12 – Aerodynamická rovnováha [17]

Překlad obrázku:

Front wing downforce,  $F_f$  – Přítlačná síla na předním křídle,  $F_f$

Underfloor downforce,  $F_u$  – Přítlačná síla na podlaze vozu,  $F_u$

Rear wing downforce,  $F_r$  – Přítlačná síla na zadním křídle,  $F_r$

Rear wing drag,  $F_d$  – Odporová síla na zadním křídle,  $F_d$

Wheelbase,  $L$  – Rozvor náprav,  $L$

## 4. Praktická část

### 4.1 Stanovení cílů pro samotný návrh

Před samotným návrhem předního přitlačného křídla je vždy potřebné si stanovit určité cíle aerodynamického návrhu. Při stanovení cílů pro nový monopost FS.07 se vycházelo z dat a zkušeností z předchozích monopostů, výhradně z FS.06, neboť nový vůz si zachová stejnou pohonnou jednotku, jako měla předchozí generace vozu FS.06, a to Triumph Speed Tripple 675. Jedním z nejvýznamnějších požadavků při návrhu nového vozu bylo zlepšit jízdní vlastnosti. Předchozí monopost FS.06 měl více přitlačné síly na přední nápravě než na zadní, což se v kombinaci s měkkým podvozkem ukázalo jako velice neefektivní řešení, a to zejména při prudkém brždění do zatáčky, kdy se přední část i celé křídlo ještě více přiblížilo k vozovce. A to natolik, že se zvýšil přízemní efekt na předním křídle a vůz se stal aerodynamicky nevyvážený. V krajních případech docházelo i k dotyku koncových desek předního křídla se závodní tratí. Metodikou pro dosažení tohoto požadavku bylo vylepšit podvozek a aero paket vozu. Z hlediska aero paketu byly určeny cíle:

- zvýšit celkovou přitlačnou sílu vozu,
- dosáhnout aerodynamické rovnováhy (50 % přední náprava a 50 % zadní náprava),
- docílit lepší aerodynamické účinnosti (poměru přitlak/odpor).

Důležité je také si před samotným návrhem definovat rychlost, pro kterou se bude aerodynamika vozu navrhovat. Z průměrných rychlostí z posledních závodů byla navržena rychlost  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , pro kterou by měla být aerodynamika nejpřínosnější, a to zejména při průjezdu rychlejších zatáček v hlavním závodě Endurance.

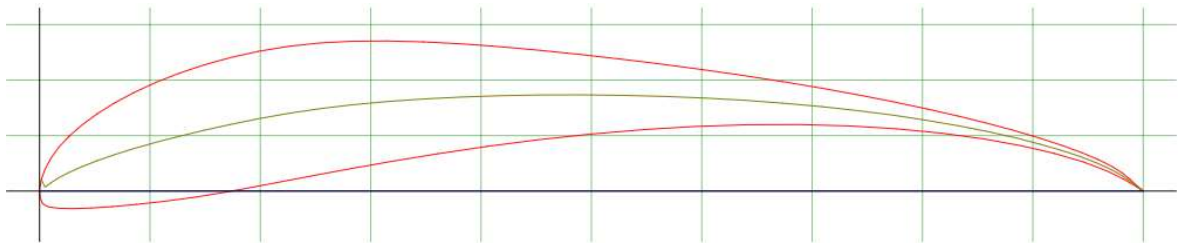
### 4.2 Výběr leteckého profilu

Aby bylo dosaženo cíle získat co nejvyšší přitlak, byl letecký profil vybírán podle nejvyššího koeficientu  $C_L$ , dále podle poměru  $C_L/C_D$  při Reynoldsově čísle 500 000. K tomuto Reynoldsovu číslu se dospělo na základě výpočtu, který byl uveden v teoretické části práce. Pro výpočet byla použita rychlost  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kinematická viskozita vzduchu  $1,5111\cdot 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ , hloubka profilu 0,4 m a celkový výsledek bylo Reynoldovo číslo 423 533. Těmto požadavkům odpovídají zejména profily:

- CH10,
- FX 76-MP-140,
- FX 63-137,
- S1223,
- E 423.

Nejvyšší hodnotu  $C_L$  z vybraných profilů má profil S1223, a proto byl tento profil vybrán.

Bylo vybíráno z databáze profilů na webu <http://airfoiltools.com/search/index>. Profil S1223 se v týmu CULS Prague Formula Racing využívá již několik roků a ukázal se jako efektivní, díky generování přitlaku i při nízkých rychlostech.



Obrázek č. 13 – Profil S1223 [27]

### 4.3 Hlavní profil



Obrázek č. 14 – Kontakt předního křídla se závodní tratí [CULS Prague Formula Racing]

Z důvodu použití stejného profilu, jako byl na předchozím přitlačném křídle, ale hlavně na základě nepříjemných zkušeností ze závodu, kdy v extrémních případech došlo ke kontaktu předního křídla s vozovkou (obr. 14), a to i přes maximální možnou výšku předního křídla dle



pravidel, bylo rozhodnuto, že hlavní profil předního přitlačného křídla zůstane stejný jako na předchozím monopostu, neboť má zvýšené krajní části oproti střední části, která je kapkovitého tvaru tak, aby křídlo mohlo být výše nad vozovkou. Na obr. 15 jsou na polovině křídla znázorněny využité profily.



Obrázek č. 15 – Profily předního křídla [autor práce]

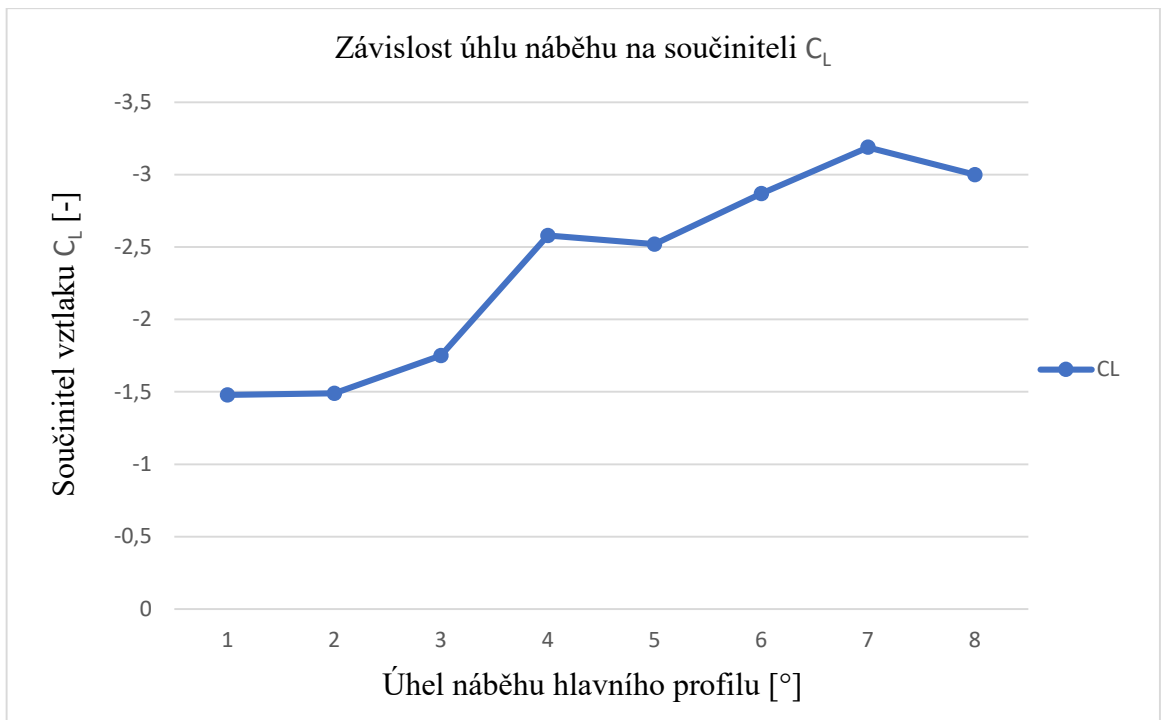
Nejednalo se však pouze o konstrukční důvody, nýbrž další důležitou roli v tomto rozhodnutí sehrály ušetřené finanční a časové prostředky, které by se jinak musely vynaložit na výrobu nové formy.



Obrázek č. 16 – Hlavní profil předního křídla [autor práce]

Na obr. 16 se nachází finální hlavní profil křídla po spojení obou leteckých profilů.

Dále bylo potřeba také definovat úhel náběhu hlavního profilu křídla. Byla provedena 2D analýza pomocí Solidworks Flow Simulation zaměřená na závislost úhlu náběhu (v rozmezí 1–8 °) na součiniteli  $C_L$ . Získané součinitele byly vypočteny pro krajní část předního křídla, která je široká 450 mm s délkou tětiny 400 mm. Byl vybrán úhel náběhu 7 °, neboť dosahoval vysokých hodnot součinitele  $C_L$  a lze ho doplnit klapkou, aby nebyly překročeny povolené rozměry křídla před přední pneumatikou; povolené rozměry byly zmíněny v kapitole 5. Pro vyšší úhly náběhu už by se musela razantně snížit klapka, proto v analýze již vyšší úhly nebyly zahrnuty.



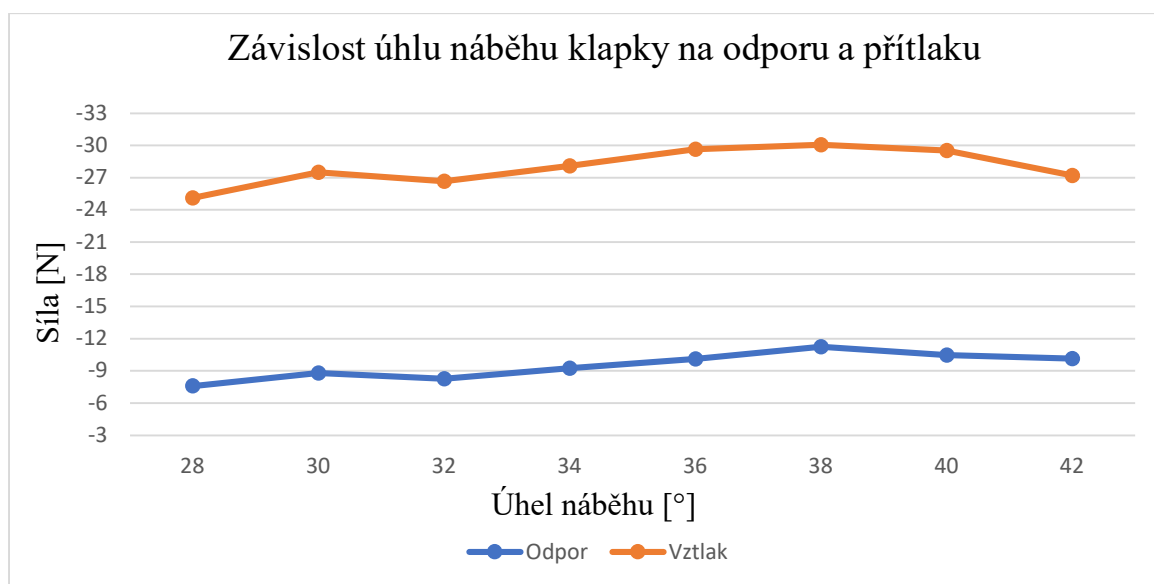
Obrázek č. 17 – Závislost úhlu náběhu na součiniteli vztlaku [autor práce]

#### 4.4 Klapky

Nejprve bylo důležité definovat úhel náběhu klapky. Předmětem další 2D analýzy tedy bylo určení správného úhlu náběhu spolu s hlavním profilem, který byl pod zvoleným úhlem náběhu 7 °. Zkoumány byly úhly náběhu od 28 ° do 42 °. Vzhledem k tomu, že při úhlu náběhu 42 ° již docházelo k úplnému odtržení proudění, nebyly již vyšší úhly dále zkoumány. Odtržení u úhlu 42 ° je patrné i z výsledků generovaných vztlaků, kdy dochází ke snižování vztlaku (doprovázeno stále rostoucím odporem vzduchu).

	28 °	30 °	32 °	34 °	36 °	38 °	40 °	42 °
Odpor [N]	-7,59	-8,81	-8,27	-9,23	-10,1	-11,25	-10,48	-10,13
Vztlak [N]	-25,12	-27,49	-26,67	-28,09	-29,64	-30,06	-29,53	-27,19

Tabulka č. 1 – Srovnání úhlů náběhu klapky v závislosti na vztlaku a odporu [autor práce]



Obrázek č. 18 – Závislost úhlu náběhu klapky na vztlaku [autor práce]

#### 4.4.1 Nastavení klapek – varianta 1

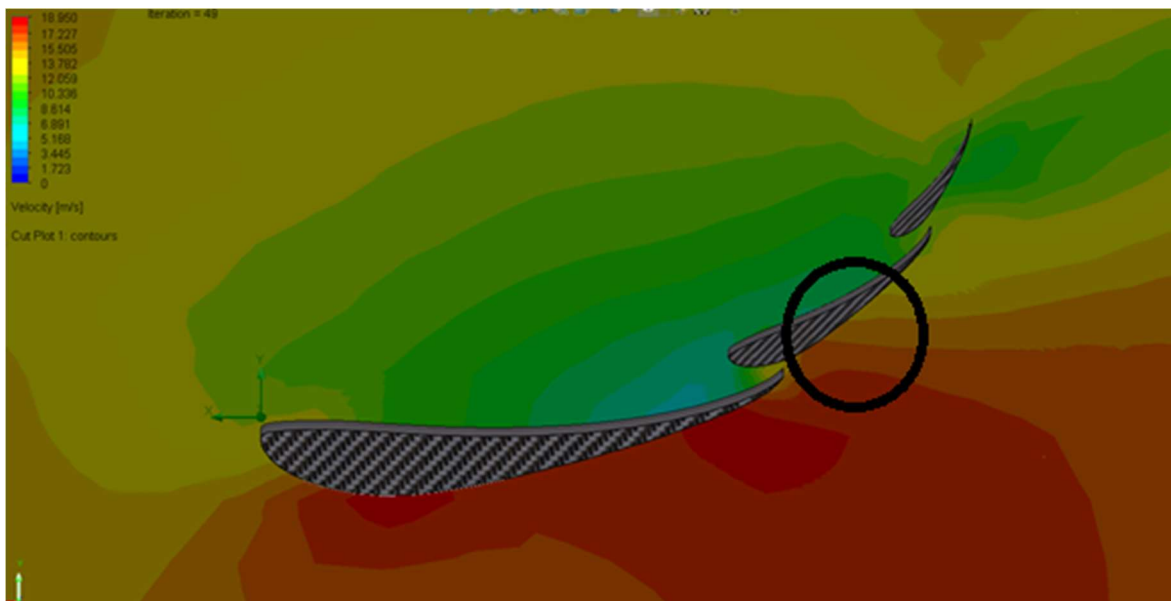
Návrh první varianty nastavení klapek byl zaměřen na co nejvyšší zisk přítlačné síly. Klapka byla rozdělena na oblast před kolem a oblast mimo kolo. Dalším krokem tedy bylo navrhnout klapku v oblasti před kolem tak, aby byla splněna maximální výška v této oblasti a požadavky na tuto oblast. Hlavním požadavkem bylo snížit odpor předního kola usměrněním vzduchu nad nebo mimo něj. Pro splnění byl využit úhel náběhu 38 °, který dosahoval vysokého přítlaku a měl schopnost lépe odvádět vzduch směrem nad přední kolo.

Velikost [mm]	100	120	140
Odpor [N]	2.37	3.01	3.08
Přítlak [N]	10.67	12.53	12.74

Tabulka č. 2 – Srovnání velikostí klapek v závislosti na odporu a přítlaku [autor práce]

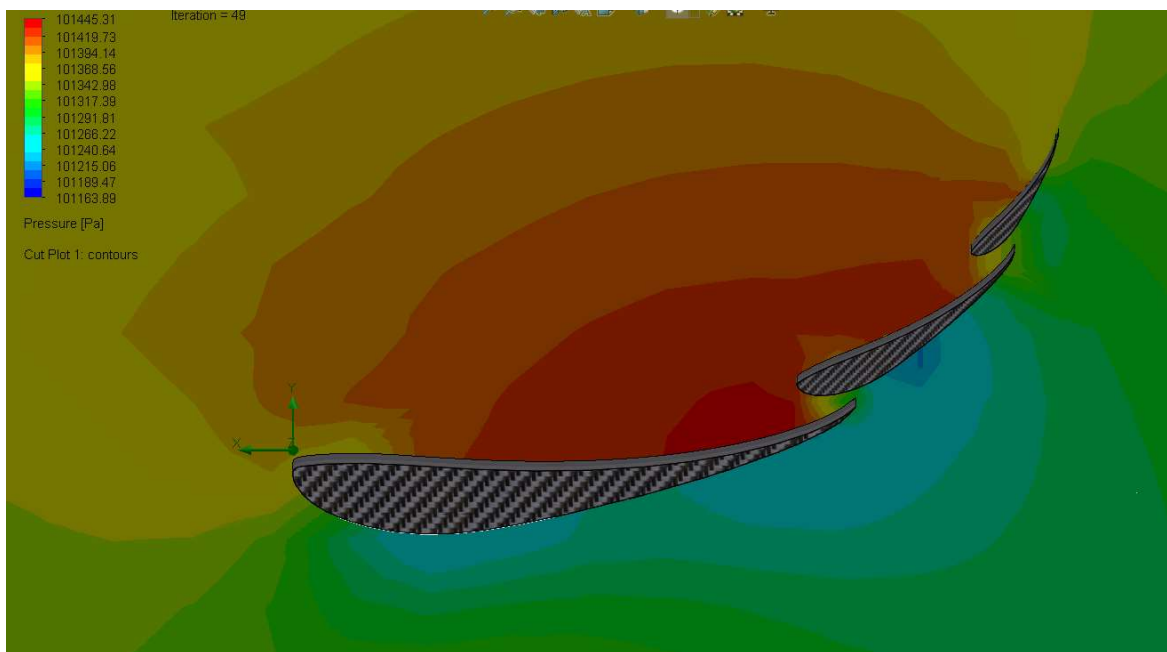
Porovnání ukazuje, že klapka o délce těţiv 140 mm generuje nejen vyšší přítlak, ale také odpor. Při použití této klapky se křídlo dostává na hranici výškových pravidel, což by mohlo omezit nastavitelnost výšky hlavního profilu křídla. Z toho důvodu byla zvolena klapka o délce těţiv 120 mm.

Pro oblast mimo kolo byl zvolen úhel náběhu klapky 36 °. Tato oblast není velikostně omezena tak jako oblast před předními koly, a tak zde lze využít dvojici klapek. Byla zvolena první klapka o délce těţiv 180 mm v kombinaci s druhou klapkou a o délce těţiv 100 mm a úhlu náběhu 54 °, takto vysokého úhlu náběhu lze bez nežádoucího odtržení proudění dosáhnout pouze u druhé klapky.



Obrázek č. 19 – Znáznornění rychlosti proudění z 2D simulace [autor práce]

Na obr. 19 je možno vidět částečné odtržení vzduchu, které je patrné v kruhové výseči. Odtržení je ale stále v toleranci, neboť nedochází ke snižování přítláčné síly jako v případě úplného odtržení. Červená oblast na obrázku značí nejvyšší rychlost proudění. Čím více se barva přibližuje k modré, tím více se snižuje rychlost proudění.



Obrázek č. 20 – Znáznornění hodnoty tlaku v oblasti okolo profilů z 2D simulace [autor práce]

Na obr. 20 lze vidět, že hlavní profil křídla a první klapka vytvářejí na spodní části nízký tlak (podtlak) a na horní části vysoký tlak (přetlak), čímž generují přítlak. Druhá klapka v horní části vytváří zvýšený tlak oproti atmosférickému, ale na spodní části se již podtlak nevytváří, nachází se zde spíše atmosférický tlak. To by mohlo vést k otázce, zda je tato klapka potřebná a zda nevytváří pouze odpor. Pro vyvrácení tohoto tvrzení byly porovnány hodnoty přítlaku a odporu křídla, které je znázorněno na obr. 15 s jednou a s dvěma klapkami.

	Jedna klapka	Dvě klapky
Přítlak [N]	12,05	16,45
Odpor [N]	3,47	5,71

Tabulka č. 3 – Srovnání varianty s jednou a dvěma klapkami [autor práce]

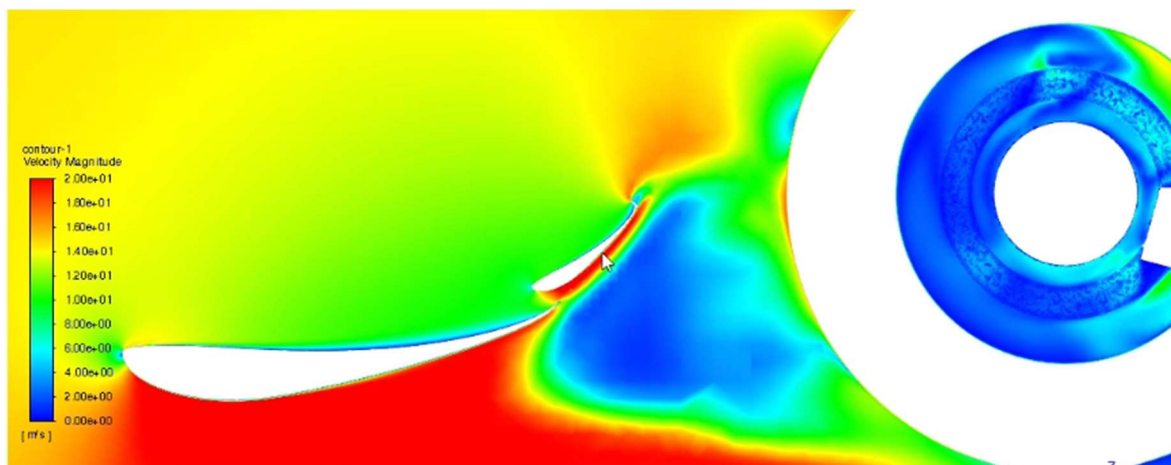
V tabulce 3 je patrný jak rozdíl v úbytku přítlaku, tak také ve zvýšení odporu vzduchu. Pro návrh aerodynamiky studentské formule je ale rozhodujícím parametrem přítlak vozu, a proto byly zvoleny dvě klapky. Srovnání tedy potvrzuje, že dvouklapkové křídlo vždy generuje více přítlaku než jednoklapkové křídlo.

#### 4.4.2 Výsledky simulace celého vozu s nastavením klapek varianty 1

Přední křídlo je sice prvním komponentem aero balení vozu, a tak by se mohlo zdát, že jej stačí navrhovat bez ostatních částí vozu. To by ale vedlo k aerodynamicky nevyrovnanému návrhu, a proto byly jednotlivé verze návrhu předního křídla simulovány spolu s celou formulí v programu Ansys Fluent. Model pro simulace byl značně zjednodušen z důvodu zjednodušení sítě a snížení požadavků na výpočetní výkon tak, aby obsahoval jen prvky, které jsou součástí aero balení a které proudění značně ovlivňují.

Odpor [N]	Přítlak [N]	Aerodynamická účinnost [-]
44,17	220,97	5

Tabulka č. 4 – Výsledky simulace nastavení klapek první varianty [autor práce]



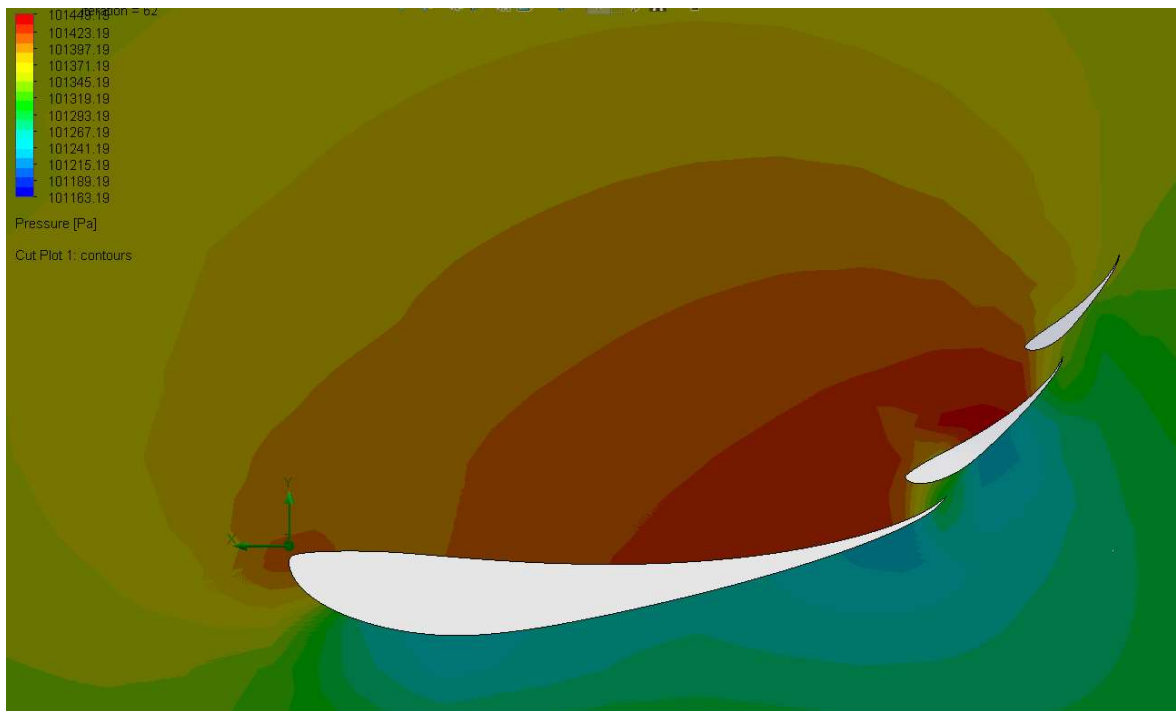
Obrázek č. 21 – Rychlost proudění okolo předního křídla v oblasti před kolem [autor práce]

Na obr. 21 je rozložení rychlostí proudění, na kterém je pod hlavním profilem křídla patrný jev nazvaný jako přízemní efekt. Tento jev byl vysvětlen v teoretické části práce.

#### 4.4.3 Nastavení klapek – varianta 2

Požadavky na nastavení klapek druhé varianty stanovila předešlá simulace celé formule. Posuzována byla hlavně aerodynamická rovnováha. Bohužel bylo dosaženo rozložení přítlaku 61 % na přední a 29 % na zadní nápravu. Toto rozložení nekoresponduje s původním cílem celého návrhu, a tak musel být návrh předělán. Jednalo se o předělání nejen předního, ale i zadního křídla, neboť přední křídlo generovalo mnohem větší přítlak než křídlo zadní. U zadního křídla bylo tedy nutné co nejvíce zvýšit přítlak, aby se nemusel razantně snižovat přítlak na předním křídle.

Oproti první variantě byla druhá varianta značně výrobně zjednodušena, neboť nerozděluje klapku na oblast před kolem a oblast mimo kolo. Byl zachován úhel náběhu  $38^\circ$  a délka tětiny 120 mm tak, aby proudění na přední kolo bylo značně odstíněno. Pro oblast mimo kolo byla využita také ještě jedna klapka, stejně jako u první varianty viz obr. 22.



Obrázek č. 22 – Znáznornění rozložení tlaku okolo druhé varianty klapky [autor práce]



Obrázek č. 23 – Polovina křídla s druhou verzí klapky [autor práce]

Podobu křídla s druhou variantou klapky je možné vidět na obr. 23. Lze si všimnout, že klapky nejsou po celé šířce hlavního profilu. K tomu kroku se přistoupilo pro snížení přitlaku, ale hlavně pro vyčištění oblasti okolo čumáku vozidla tak, aby zde bylo místo, kterým může vzduch bez překážek proudit přímo k chladiči vozu.

Odpor [N]	Přítlak [N]
4,56	14,35

Tabulka č. 5 – Odpor a přítlak druhé verze klapek [autor práce]

Druhá klapka byla nastavena na úhel náběhu 45 °. Úhel by se dal ještě zvýšit, ale v této fázi návrhu byla účelně nastavena na nižší úhel náběhu, který by později mohl, buď při testování vozu, či při konečném vývoji přítláčného křídla, být změněn.

#### 4.4.4 Výsledky simulace celého vozu s nastavením klapek varianty 2

Jak již bylo výše uvedeno, došlo k úpravě jak předního přítláčného křídla, tak zadního křídla, aby bylo docíleno lepší aerodynamické rovnováhy. Přední přítláčné křídlo s nastavením klapek druhé varianty mělo ještě změnu oproti předchozí variantě ke snížení úhlu náběhu hlavního profilu na 6 ° oproti původním 7 °.

Odpor [N]	Přítlak [N]	Aerodynamická účinnost [-]
34,4	205,2	5,97

Tabulka č. 6 – Výsledky simulace nastavení klapek druhé varianty [autor práce]

Z výsledků simulací uvedených v tabulce 6 je patrné navýšení aerodynamické účinnosti oproti předchozí variantě. Bylo toho dosaženo zejména díky snížení odporu vzduchu z původních 44,17 N na 34,40 N, přítlak byl sice trochu snížen, ale to bylo spíše žádoucí, neboť to napomohlo k redukci zvýšené přítláčné síly na přední nápravu. Výsledné rozložení bylo 55 % na přední a 45 % a zadní nápravu.

## 4.5 Generátor víru

Postupně byly navrženy dvě varianty generátorů víru, kdy první varianta neměla tak vysokou účinnost v podobě vytvoření víru, který by separoval tlakovou oblast pod předním křídlem a okolním tlakem mimo křídlo. Z tohoto důvodu byla navržena zdokonalená verze, jež byla oproti původní zvětšená, aby docházelo k vytvoření většího víru.

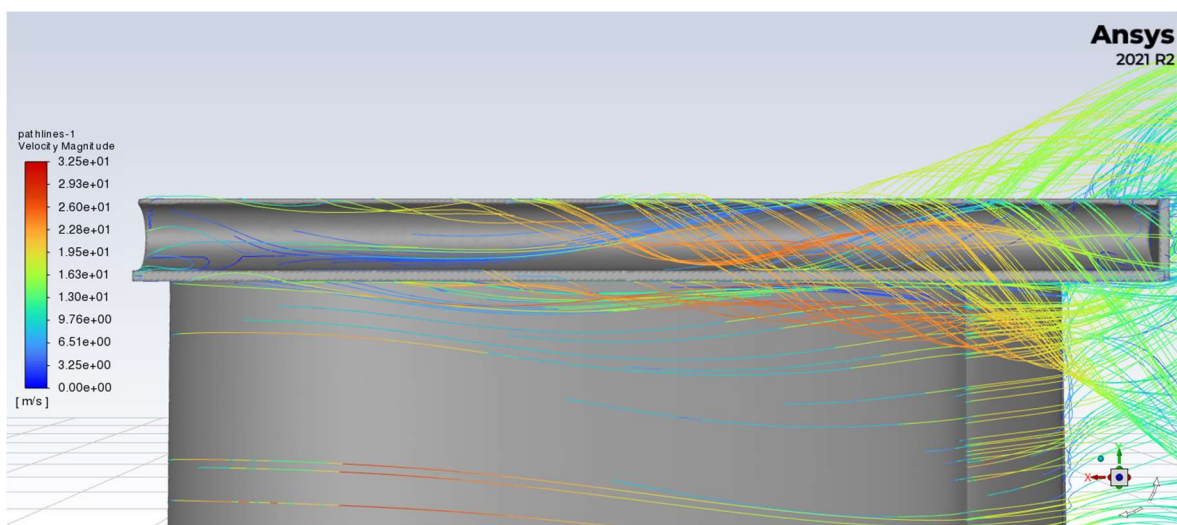


	Odpor [N]	Přítlak [N]
S generátory vírů (druhá varianta)	30,8	206,0
Bez generátorů	25,2	163,8

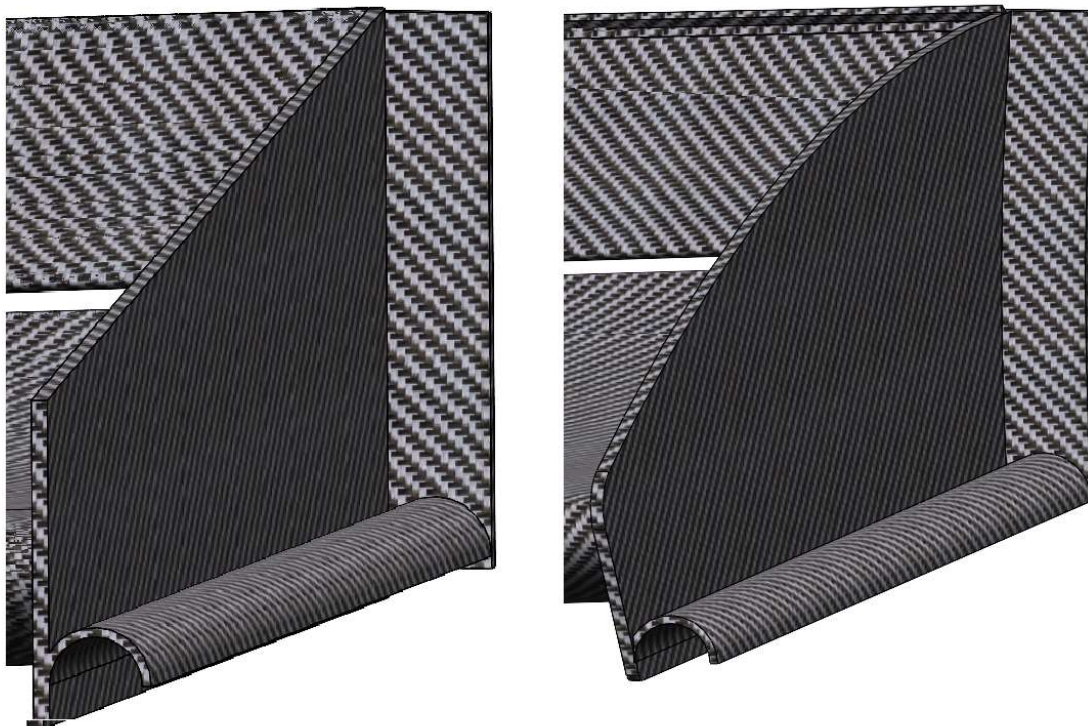
Tabulka č. 7 – Porovnání křídla s generátory vírů a bez generátorů vírů [autor práce]

Z výsledků uvedených v tabulce lze jednoznačně vidět vysoký význam generátorů vírů v závislosti na požadovaný vysoký přítlak předního křídla.

Vytvářený vír druhou verzí generátoru víru je patrný na obr. 24.



Obrázek č. 24 – Generátor víru [autor práce]



Obrázek č. 25 – Porovnání variant generátorů vírů [autor práce]

Dalším generátorem víru, který byl použit, by se dala nazvat rovná deska před předním kolem na každé straně (lze ji vidět na obr. 25), jež vytváří vír usměrňující vzduch mimo přední pneumatiku. Deska byla zvětšována v závislosti na velikosti spodního generátoru víru tak, aby přední křídlo nebylo tak široké a aby se jeho šířka zvětšená o spodní generátory víru stala ještě více efektivní.

#### 4.6 Koncové desky

Koncové desky jsou v zóně před předními koly. Tato zóna je pravidly výškově limitována. Pro tento návrh na ně nebyl brán až takový zřetel, spíše se návrh soustředil na co nejjednodušší výrobu, z tohoto důvodu také nejsou zahnuté, neboť to by zkomplikovalo výrobu. Svoji hlavní funkci snižovat únik přítláčných tlaků ještě podpořily generátory vírů, jejichž návrh byl výše zmíněn. Finální rozměry koncových desek byly upraveny s ohledem na designový koncept budoucího vozu a také s ohledem na vyrobiteľnosť generátorů vírů.

## 4.7 Porovnání variant aero paketů

Přestože dosud byly zmiňovány pouze výsledky předního přitlačného křídla, důležité je ale při návrhu také sledovat vliv provedených změn křídla na celkové výsledky aero paketu. Změnami předního křídla lze v některých případech výrazně ovlivnit čistotu proudění na zadní křídlo, což může přinést snížení generovaného přítlaku a tím změnit rozložení přítlaku na jednotlivé nápravy.

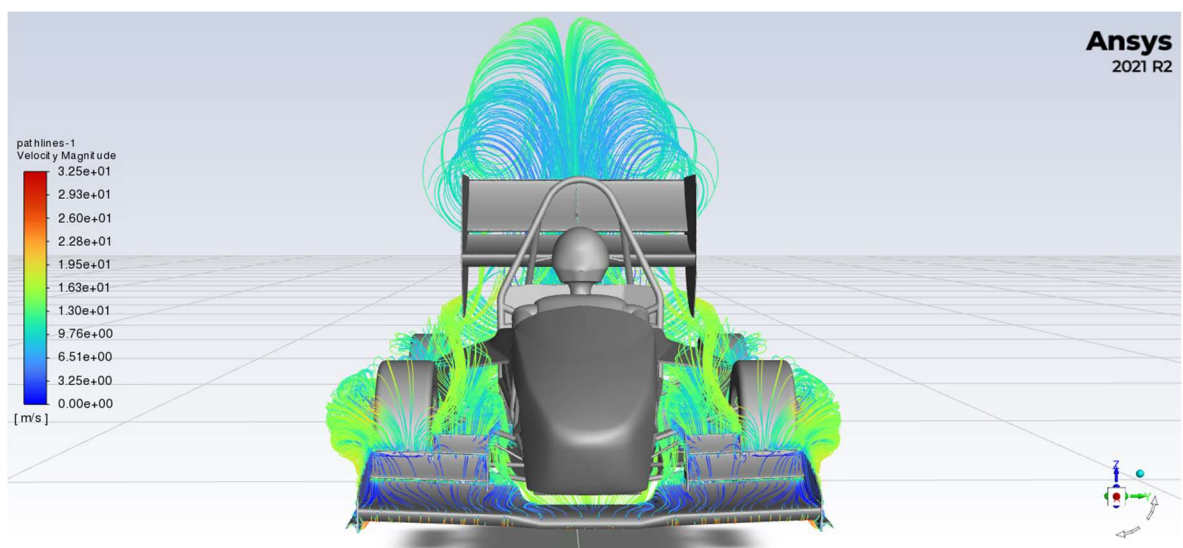
Číslo aero paketu	Odpor [N]	Přítlak [N]	Aerodynamická účinnost [-]
Aero paket 1	225	401,5	1,78
Aero paket 2	208	397,4	1,91
Aero paket 3	208	447,2	2,15
Aero paket 4	221	501,4	2,26

Tabulka č.8 – Výsledky aero paketu 1, 2, 3 a 4 [autor práce]

Vzhledem k tomu, že tato práce se dle svého zadání a stanoveného cíle zabývá pouze předním přitlačným křídlem, budou zde proto uvedeny pouze změny na předním křídle a aerodynamické hodnoty celkového aero paketu. Z tabulky 8 je prokazatelně patrné zvýšení aerodynamické účinnosti u druhého aero paketu za minimálního snížení přitlačné síly, k čemuž napomohla nejen změna první varianty nastavení klapky, ale také vylepšené zadní křídlo. I tak stále nebylo aerodynamické rozvážení ideální, neboť bylo více přítlaku na přední nápravu, jak již bylo zmíněno 55 % na přední a 45 % na zadní nápravu. Třetí verze aero paketu měla změnu na předním křídle pouze v úhlu náběhu, a to na 5 ° místo předchozích 6 °, což napomohlo ke snížení přítlaku v přední části. Výrazný přínos měla přepracovaná podlaha, která zvýšila přítlak za minimálního zvýšení odporu. Aerodynamická účinnost se dostala přes hranici čísla 2, což bylo jedním z cílů aerodynamického návrhu nového vozu. Čtvrtá verze obsahovala finální návrh předního přitlačného křídla, jehož výsledky budou dále uvedeny. Aby bylo dosaženo lepších výsledků předního křídla, muselo být přepracováno i zadní křídlo, díky čemuž došlo k navýšení přítlaku a splnění předem určeného cíle v dosažení aerodynamické rovnováhy.

## 4.8 Rozbor finálního návrhu předního křídla

Finální návrh předního přítláčného křídla vychází jak z postupného vývoje uvedeného výše, tak z vývoje celého aero paketu. Pro konečný návrh bylo zachováno druhé nastavení klapek, pouze byla snížena plocha druhé a třetí klapky. Díky tomuto kroku může vzduch proudit ještě více směrem k chladiči vozu, který může být zmenšen oproti původním plánům vývoje. Úhel náběhu hlavního profilu byl nastaven na  $7^\circ$  s předpokladem možného snížení na  $6^\circ$  nebo  $5^\circ$ , pokud by při testování auto jevílo známky přetáčivosti. Přetáčivost vozu je velmi často způsobována vyšší přítláčnou silou na přední nápravě.



Obrázek č. 26 – Proudnicе vycházející z předního křídla [autor práce]

Na obr. 26 jsou znázorněny proudnicе vycházející z předního křídla. Lze si všimnout, že proudění je částečně usměrněno do bočnice a částečně nad bočnici. Důležitý fakt, který je třeba zmínit, je, že proudění z předního křídla nesměruje na zadní křídlo. Pokud by k tomu docházelo, mohlo by to mít negativní vliv na funkci zadního křídla. Dále je z obr. 26 zřejmé, že krajní desky předního křídla odvádějí vzduch od předních kol vozu.

Odpor [N]	Přítlak [N]	Aerodynamická účinnost [-]
34,68	206,98	5,97

Tabulka č. 9 – Výsledky simulace finálního návrhu [autor práce]

Obvykle by finální návrh cílil na co nejvyšší zisk přitlačné síly, v tomto případě tomu tak ale úplně není. Finální návrh byl několikrát upravován tak, aby splňoval požadovaný zisk přitlaku, který by nezpůsobil nepříznivou aerodynamickou rovnováhu. Výsledkem bylo dosažení rozložení aerodynamických sil, jež se v případě posledního návrhu křídla blížilo k požadované hranici 50 % na přední a 50 % na zadní nápravu.

#### 4.9 Srovnání s předním přitlačným křídlem vozu FS.06

Závěrečným krokem vývoje předního křídla je srovnání s předchozím přitlačným křídlem vozu FS.06.

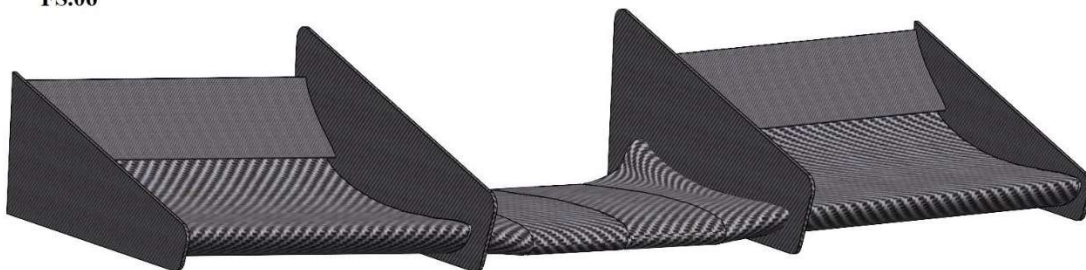
Vozidlo	Odpor [N]	Přítlak [N]	Aerodynamická účinnost [-]
FS.06	36,76	189,65	5,16
FS.07	34,68	206,98	5,97

*Tabulka č. 10 – Srovnání návrhů předních křídel na vozu FS.06 a FS.07 [autor práce]*

Přítlak generovaný předním přitlačným křídlem vozu FS.07 se oproti předchozí generaci vozu FS.06 zvýšil přibližně o 17 N (viz tabulka 10). Hlavním cílem návrhu nového aero balení bylo dosáhnout aerodynamické rovnováhy (50 % přední náprava, 50 % zadní náprava), aby nedocházelo k negativním jevům, které se objevily u vozu FS.06 (přetáčivost vozu) v důsledku vyšší přitlačné síly na přední nápravu. K dosažení tohoto cíle musel být návrh předního křídla upravován tak, aby toho bylo dosaženo. Dalším důležitým parametrem u generačního srovnání je aerodynamická účinnost a odpor vzduchu. Oba tyto parametry má nově navržené přitlačné křídlo lepší.



FS.06

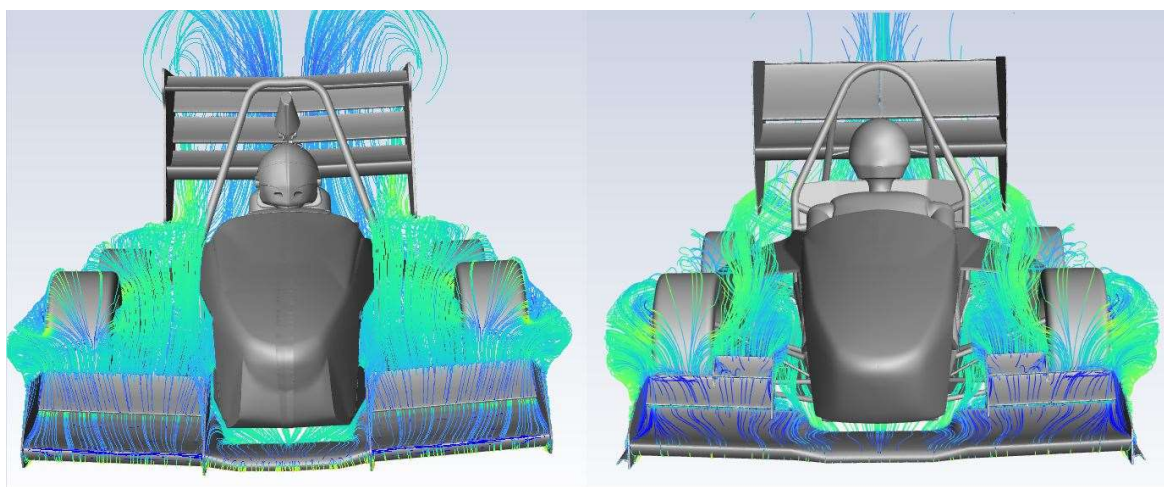


FS.07



Obrázek č. 27 – Generační porovnání předního přitlačného křídla [autor práce]

Na obr. 27 lze jasně rozpoznat mezigenerační vývoj předního přitlačného křídla, které bylo doplněno o prvky, jako jsou generátory vírů a Gurneyho klapky. Význam těchto prvků byl podrobně vysvětlen v teoretické části práce. Dalším významným posunem předního křídla je odstranění velkých vnitřních desek, za něž bylo na vozu FS.06 křídlo uchyceno. Tyto desky sice fungovaly jako dobré uchycení, ale negativně ovlivňovaly funkci hlavního profilu, který byl při bočním proudění vzduchu deskami značně zastiňován.



Obrázek č. 28 – Porovnání proudnic vycházejících z předního přitlačného křídla vozů FS.06 a FS.07 [autor práce]

Z výše uvedeného obr. 28, který porovná proudnice vycházející z předního křídla vozů FS.06 (vlevo) a FS.07 (vpravo), je jednoznačně zřejmé zlepšení v oblasti odklonění vzduchu před předními koly. Dále si lze všimnout, že přední křídlo vozu FS.07 směřuje proudění vzduchu částečně do bočnice (kde se nachází chladič vozu) a částečně nad bočnici, aniž by proudění jakkoli ovlivnilo zadní křídlo.

## 5. Závěr

Cílem bakalářské práce, která je rozdělena na část teoretickou a část praktickou, bylo popsat, jak probíhá návrh předního přitlačného křídla na vozidlo Formula Student a uvést vlastní příklad návrhu tohoto křídla.

V teoretické části práci byla nejprve uvedena historie vývoje aerodynamických prvků v soutěži Formula SAE, poté následovalo představení týmu CULS Prague Formula Racing a pravidel, která musí závodní vozidla splňovat. Následně byla popsána historie aerodynamiky a byly vysvětleny důležité aerodynamické pojmy, dále byl objasněn význam jednotlivých prvků předního přitlačného křídla a také aerodynamická rovnováha.

V praktické části práce byl proveden vlastní návrh předního přitlačného křídla. Před samotným zahájením navrhování byly předem stanoveny cíle z hlediska aero paketu, a to: zvýšit celkovou přitlačnou sílu vozu, dosáhnout aerodynamické rovnováhy 50 % přední náprava a 50 % zadní náprava, docílit lepší aerodynamické účinnosti. Současně byla pro návrh aerodynamických prvků stanovena rychlost  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , a to z důvodu, že v této rychlosti by měla být aerodynamika pro vozidlo nejpřínosnější.

V rámci navrhování předního přitlačného křídla byly využity jak znalosti získané z teoretické části práce, tak vlastní provedené CFD simulace, ke kterým byl využit nejprve program Solidworks Flow Simulation, v němž byly provedeny 2D analýzy jednotlivých profilů. V rámci této analýzy byla určena velikost a umístění jednotlivých leteckých profilů, ze kterých se přední přitlačné křídlo skládá. Následně byl využit program Ansys Fluent, jenž sloužil k 3D analýze postupně navržených variant a ověření jejich účinnosti. Informace získané z jednotlivých simulací byly následně využívány pro další úpravy návrhu předního přitlačného křídla. Výsledný návrh předního přitlačného křídla je výsledkem optimalizace původního návrhu, který byl v průběhu navrhování několikrát změněn, aby bylo dosaženo co nejvyššího zisku přitlačné síly při aerodynamické rovnováze (50 % přední náprava a 50 % zadní náprava).

Finální návrh předního přitlačného křídla vozidla FS.07 při rychlosti  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  dosahoval hodnoty přitlačné síly 206,98 N, odporu vzduchu 34,68 N, což přineslo aerodynamickou účinnost (poměr přitlaku k odporu) 5,97. Těchto hodnot bylo dosaženo při aerodynamické rovnováze, která byla stanovena před samotným návrhem. Takto navržené přední přitlačné křídlo bylo následně porovnáno s křídlem využívaným na vozidle FS.06, s nímž se tým CULS Prague Formula Racing zúčastnil závodů Formula Student v sezoně 2020–2021.

Výsledným porovnáním předního přitlačného křídla FS.06 a návrhu označeného jako FS.07 bylo zjištěno, že u navrženého křídla došlo ke zvýšení přitlačné síly o přibližně 17 N,



konkrétně se jednalo o hodnotu 17,33 N, ke snížení odporu vzduchu o 2,08 N, což mělo za následek lepší aerodynamickou účinnost.

Další budoucí úpravou návrhu by bylo možné dosáhnout vyššího zisku přítláčné síly, avšak vzhledem k tomu, že před zahájením prací na návrhu byly předem stanoveny cíle, kterých bylo nutné dosáhnout, nebylo možno navrhnout přední křídlo se ziskem vyšší přední přítláčné síly.

Vzhledem ke skutečnosti, že v teoretické části práce byla v souladu se zadáním uvedena historie vývoje aerodynamických prvků v soutěži Formula SAE, byl představen tým CULS Prague Formula Racing, byla popsána historie aerodynamiky a vysvětleny aerodynamické pojmy a v praktické části práce došlo k provedení vlastního návrhu předního přítláčného křídla vozidla Formula Student podle předem stanovených cílů, lze konstatovat, že cíl bakalářské práce byl splněn.

## 6. Seznam použitých zdrojů

- [1] FSAE History. *Formula SAE* [online]. [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://www.fsaonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>
- [2] History of Formula Student. *Institution of Mechanical Engineers* [online]. © 2022 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://www.imeche.org/events/formula-student/about-formula-student/history-of-formula-student>
- [3] Historie. *Rebels Racing* [online]. Copyright ©, 2012 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <http://www.rebelsracing.cz/cs/formule-student/historie>
- [4] O nás. *CULS Prague Formula Racing* [online]. Praha: © 2021 Česká zemědělská univerzita v Praze [cit. 2022-01-17]. Dostupné z: <https://culsracing.v2.czu.cz/cs/r-13909-o-nas>
- [5] Formula Student Rules 2022. Formula Student Germany [online]. [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2022/rules/FS-Rules\\_2022\\_v0.9.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v0.9.pdf)
- [6] KRASNOV, N.F. *Aerodynamics. 1.: Fundamentals of theory. Aerodynamics of an airfoil and a wing*. Moscow: Mir Publishers Moscow, 1985.
- [7] Aerodynamika. *Historie letectví* [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <http://historieletectvi.xf.cz/aerodynamika.htm#Historie>
- [8] ŠUMAN-HREBLAY, Marián. *Aerodynamické automobily*. Brno: CPRESS, 2013. ISBN 978-80-264-0166-7.
- [9] Český futuristický vůz Tatra 77. *Designmag* [online]. © DesignMag.cz, 2014 [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: <https://www.designmag.cz/technika/47639-cesky-futuristicky-vuz-tatra-77-slavi-vyroci-80-let.html#&gid=1&pid=9>
- [10] Bernoulliho rovnice. *Encyklopedie fyziky* [online]. Copyright © 2006–2022 [cit. 2021-12-01]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/125-bernoulliho-rovnice>
- [11] KOVANDA, Bohuslav a Jan KOVANDA. *Aerodynamika vozidel*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01942-x
- [12] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designig for speed*. Revised 2nd edition. [Cambridge]: Bentley Publishers.com, [2006]. ISBN 0-8376-0142-8.
- [13] BROŽ, Václav. *Aerodynamika nízkých rychlostí*. Třetí vydání. Praha 6: Ediční středisko ČVUT, 1990. ISBN 80-01-00198-9.
- [14] DVOŘÁK, Rudolf. *Jak létají*. Praha: Academia, 2015. Galileo. ISBN 978-80-200-2430-5.
- [15] MILLIKEN, William F. a Douglas L. MILLIKEN. *Race car vehicle dynamics*. Warrendale: SAE International, 1995. ISBN 1-56091-526-9.

- [16] DANĚK, Milan. *Aerodynamika a mechanika letu pro piloty a techniky*. Praha: Naše vojsko, 1958.
- [17] SEWARD, Derek. *Race car design*. London: Palgrave, 2014. ISBN 978-1-137-03014-6.
- [18] WONG, J.Y. *Theory of ground vehicles*. 3. vydání. New York: John Wiley, 2001. ISBN 0-471-35461-9.
- [19] Aerodynamic Efficiency. *Allied Academies* [online]. Copyright © Allied Academies 2022 [cit. 2022-01-30]. Dostupné z: <https://www.alliedacademies.org/scientific-journals/aerodynamic-efficiency-12917.html>
- [20] Profil křídla. *Dušan Slavětínský: O letadlech* [online]. Slavětínský [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: [http://www.slavetind.cz/stavba/konstrukce/kridlo/Profil\\_kridla.aspx](http://www.slavetind.cz/stavba/konstrukce/kridlo/Profil_kridla.aspx)
- [20] Profily nosných a ocasních ploch. *Akademie letectví: číslo 01/2009* [online]. © Lněnička, 2008 [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: [www.airspace.cz/akademie/rocnik/2009/01/profily.php](http://www.airspace.cz/akademie/rocnik/2009/01/profily.php)
- [21] Airfoil database search. *Airfoil tools* [online]. Copyright © 2022 All Rights Reserved [cit. 2022-01-17]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/search/index>
- [22] BASSO, Mattia, Carlo CRAVERO a Davide MARSANO. Aerodynamic Effect of the Gurney Flap on the Front Wing of a F1 Car and Flow Interactions with Car Components. *Energies* [online]. 2021, 14(8) [cit. 2022-01-21]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14082059
- [23] Front Wing of an F1 Car: How to Optimize Its Design. *SIMSCALE* [online]. 2021 [cit. 2022-01-21]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/blog/2016/10/front-wing-f1-car-optimize/>
- [24] CASTRO, Xabier a Zeeshan A. RANA. Aerodynamic and Structural Design of a 2022 Formula One Front Wing Assembly. *Fluids* [online]. 2020, 5(4) [cit. 2022-01-21]. ISSN 2311-5521. Dostupné z: doi:10.3390/fluids5040237
- [25] TECH EXPLAINED: FORMULA STUDENT AERODYNAMICS. *Racecar Engineering* [online]. [cit. 2022-01-21]. Dostupné z: <https://www.racecar-engineering.com/articles/tech-explained-formula-student-aerodynamics/5/>
- [26] KATZ, Joseph. AERODYNAMICS OF RACE CARS. *Annual Review of Fluid Mechanics* [online]. 2006, 38(1), 27-63 [cit. 2022-01-22]. ISSN 0066-4189. Dostupné z: doi:10.1146/annurev.fluid.38.050304.092016
- [27] S1223. *Airfoil tools* [online]. Copyright © 2022 All Rights Reserved [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=s1223-il>

Odkazovaný seznam příloh

## Seznam obrázků

Obrázek č. 1 – První formule SAE s přitlačným křídlem [3] .....	3
Obrázek č. 2 – Vůz FS.03 [4] .....	4
Obrázek č. 3 – Formula Student Rules 2022 [5].....	6
Obrázek č. 4 – Tatra 77 [9] .....	7
Obrázek č. 5 – Laminární a turbulentní proudění [12] .....	9
Obrázek č. 6 – Mezní vrstva podél ploché desky [12].....	10
Obrázek č. 7 – Geometrie profilu [20].....	13
Obrázek č. 8 – Závislost úhlu náběhu na součiniteli vztlaku [22].....	15
Obrázek č. 9 – Rozložení tlaku na profilu křídla [15] .....	16
Obrázek č. 10 – Přední přitlačné křídlo vozu Formule 1 [24] .....	19
Obrázek č. 11 – Gurneyho klapka [17].....	20
Obrázek č. 12 – Aerodynamická rovnováha [17] .....	21
Obrázek č. 13 – Profil S1223 [27] .....	23
Obrázek č. 14 – Kontakt předního křídla se závodní tratí [CULS Prague Formula Racing] ...	23
Obrázek č. 15 – Profily předního křídla [autor práce].....	24
Obrázek č. 16 – Hlavní profil předního křídla [autor práce] .....	24
Obrázek č. 17 – Závislost úhlu náběhu na součiniteli vztlaku [autor práce] .....	25
Obrázek č. 18 – Závislost úhlu náběhu klapky na vztlaku [autor práce].....	26
Obrázek č. 19 – Znárodnění rychlosti proudění z 2D simulace [autor práce] .....	27
Obrázek č. 20 – Znárodnění hodnoty tlaku v oblasti okolo profilů z 2D simulace [autor práce] .....	27
Obrázek č. 21 – Rychlost proudění okolo předního křídla v oblasti před kolem [autor práce]	29
Obrázek č. 22 – Znárodnění rozložení tlaku okolo druhé varianty klapky [autor práce] .....	30
Obrázek č. 23 – Polovina křídla s druhou verzí klapky [autor práce] .....	30
Obrázek č. 24 – Generátor víru [autor práce] .....	32
Obrázek č. 25 – Porovnání variant generátorů vírů [autor práce] .....	33
Obrázek č. 26 – Proudnice vycházející z předního křídla [autor práce].....	35
Obrázek č. 27 – Generační porovnání předního přitlačného křídla [autor práce] .....	37
Obrázek č. 28 – Porovnání proudnic vycházejících z předního přitlačného křídla vozů FS.06 a FS.07 [autor práce] .....	37

## Seznam tabulek

Tabulka č. 1 – Srovnání úhlů náběhu klapky v závislosti na vztlaku a odporu [autor práce] ..	25
Tabulka č. 2 – Srovnání velikostí klapek v závislosti na odporu a přítlaku [autor práce].....	26
Tabulka č. 3 – Srovnání varianty s jednou a dvěma klapkami [autor práce].....	28
Tabulka č. 4 – Výsledky simulace nastavení klapek první varianty [autor práce] .....	28
Tabulka č. 5 – Odpor a přítlak druhé verze klapek [autor práce] .....	31
Tabulka č. 6 – Výsledky simulace nastavení klapek druhé varianty [autor práce] .....	31
Tabulka č. 7 – Porovnání křídla s generátory vírů a bez generátorů vírů [autor práce] .....	32
Tabulka č. 8 – Výsledky aero paketu 1, 2, 3 a 4 [autor práce] .....	34
Tabulka č. 9 – Výsledky simulace finálního návrhu [autor práce].....	35
Tabulka č. 10 – Srovnání návrhů předních křídel na vozu FS.06 a FS.07 [autor práce].....	36