

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojírenství
Studijní zaměření: Dopravní a manipulační technika

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh aerodynamických prvků pro vůz Formula Student UWB04

Autor: **Bc. Michal Dufek**
Vedoucí práce: **Doc. Ing. Ladislav Němec, CSc.**

Akademický rok 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal DUFEK**

Osobní číslo: **S15N0031P**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**

Název tématu: **Návrh aerodynamických prvků pro vůz Formula Student
UWB04**

Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Rešerše aerodynamických prvků pro vozy Formula Student. CFD analýza vozidla UWB03 a validace CFD výpočtů stávajících aerodynamických prvků. Konstrukční návrh aerodynamických prvků pro vůz UWB04 na sezonu 2017 dle platných pravidel FSAE. CFD analýza nových aerodynamických prvků pro vůz UWB04.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Rešerše aerodynamických prvků vozu UWB03
2. CFD analýza vozu UWB 03
3. Validace CFD metodiky
4. Návrh aerodynamických prvků pro vůz UWB04
5. Závěr práce

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **50-70 stran A4**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

VLK, F. Stavba motorových vozidel. Brno: nakl. Vlk, 2003

MILLIKEN, W. F., MILLIKEN, D. L. Race Car Vehicle Dynamics. Warrendale: SAE International, 1995


Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Ladislav Němec, CSc.**
Katedra konstruování strojů
Konzultant diplomové práce: **Ing. Michal Šefrhans**
MECAS ESI, s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **19. září 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **2. června 2017**


Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. září 2016

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval konzultantovi mé bakalářské práce, panu Ing. Michalovi Šefrhansovi, za poskytnutí mnoha cenných rad, za jeho čas a zejména za jeho ochotu a přístup během zpracování diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu Doc. Ing. Ladislavu Němcovi, CSc., za důsledné vedení a důležité připomínky během zpracování diplomové práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Dufek	Jméno Michal		
STUDIJNÍ OBOR	N 2301 „Dopravní a manipulační technika“			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Němec, CSc.	Jméno Ladislav		
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKS			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Návrh aerodynamických prvků pro vůz Formula Student UWB04			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	90	TEXTOVÁ ČÁST	88	GRAFICKÁ ČÁST	2
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce obsahuje teoretickou část, ve které jsou popsány důležité fyzikální jevy. Dále práce obsahuje ověření CFD analýzy pomocí reálných jízdních zkoušek. Závěrečná část se zabývá návrhem, který zahrnuje výběr profilu, 2D simulace a 3D simulace.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	CFD analýza, aerodynamika, validace, aeropaket

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Dufek	Name Michal	
FIELD OF STUDY	N 2301 "Transport and handling machinery"		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Němec, CSc.	Name Ladislav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design of aerodynamic elements for car of Formula Student UWB04		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2015
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	90	TEXT PART	88	GRAPHICAL PART	2
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma work contains teoretical part, in this part is described important physical phenomena. The next part is Vertification of CFD analysis by real road test. The last part is about design, which contains of profile choice, 2D simulation and 3D simulation.
KEY WORDS	CFD analysis, aerodynamics, validation, aeropaket

Obsah

Obsah.....	7
Přehled důležitých konstant a použitých veličin	9
Úvod.....	10
1. Teoretická část.....	11
1.1 Aerodynamika	11
1.2 Vzduch.....	11
1.3 Hustota.....	12
1.4 Viskozita.....	12
1.5 Reynoldsovo číslo	12
1.6 Typy proudění	13
1.7 Mezní vrstva.....	13
1.8 Obtékání tělesa	14
1.8.1 Obtékání kol	14
1.8.2 Coandův jev.....	14
1.8.3 Venturiho efekt.....	16
1.8.4 Letecký profil	17
1.8.5 Bezrozměrné součinitele	18
1.8.6 Polární křivka profilu	19
1.8.7 Vztlaková křivka	19
1.8.8 Momentová křivka.....	20
1.9 Pneumatiky.....	21
1.10 Aerodynamické síly a momenty.....	22
1.11 Princip jednotlivých komponent.....	24
1.11.1 Přední křídlo	24
1.11.2 Zadní křídlo	25
1.11.3 Podlaha (underbody)	28
1.11.4 Bočnice (sidepod).....	29
1.12 Pravidla Formula Student 2017.....	30
1.13 Dynamické disciplíny Formula Student	32
2. Vůz UWB 03	33
2.1 Popis aerodynamických komponent.....	33
2.1.1 Přední křídlo	34
2.1.2 Zadní křídlo	35
2.1.3 Podlaha.....	36

Katedra konstruování strojů

Michal Dufek

2.2	Post-processing CFD analýzy.....	37
2.2.1	Odpor vzduchu	37
2.2.2	Přítlak	37
2.2.3	Kumulační graf koeficientů.....	38
2.2.4	Aerodynamické body.....	38
2.3	CFD analýza	39
2.3.1	UWB 03 – běžný režim	39
2.3.2	UWB 03 – DRS režim.....	40
2.3.3	Varianta – bez křidel	42
2.4	Nedostatky UWB 03	44
3.	Validace.....	45
3.1	Dojezdová zkouška.....	45
	Průběh zkoušky	46
3.2	Vizualizace	48
3.2.1	Bavlnky	49
3.2.1	Kouř.....	51
4.	Návrh.....	53
4.1	Podmínky pro návrh	53
4.2	Výběr profilu	54
4.2.1	Hodnocení profilů.....	54
4.3	2D simulace.....	57
4.3.1	Oblast předního křídla před kolem (červená).....	58
4.3.2	Oblast předního křídla mezi kolem a kapotou (zelená).....	59
4.3.3	Oblast zadního křídla (modrá).....	60
4.4	3D simulace.....	61
4.4.1	Podlaha	64
4.4.2	Přední křídlo	67
4.4.3	Zadní křídlo	71
	Závěr.....	82
	Použité zdroje.....	83
	Seznam obrázků	84
	Seznam tabulek.....	87
	Seznam příloh.....	88

Přehled důležitých konstant a použitých veličin

Důležité konstanty

g	9,81	[m/s ²]	tíhové zrychlení
ρ	1,225	[kg/m ³]	hustota vzduchu
μ	$1,79 \cdot 10^{-5}$	[m ²]	dynamická viskozita

Použité veličiny

V	rychlost jízdy
F_A	síla působící ve směru osy x (aerodynamický odpor)
Z	síla působící ve směru osy z (vztlak/přítlak)
Q	boční síla
M	klopivý moment
N	zatáčivý moment
L	klonivý moment
C_D	součinitel aerodynamického odporu
C_L	součinitel vztlaku/přítlaku
C_Q	součinitel boční síly
C_M	součinitel klopivého momentu
C_N	součinitel zatáčivého momentu
C_L	součinitel klonivého momentu
A_{ref}	čelní (referenční) plocha
b	hloubka profilu, délka tětivy
l	rozvor nápravy
F_O	odporová síla působící na vozidlo
F_V	valivý odpor
ξ	rameno valivého odporu
m	hmotnost vozidla (včetně řidiče)
R	poloměr kola

Úvod

Diplomová práce se zabývá návrhem aerodynamických prvků pro vůz Formula Student UWB 04. Práce slouží jako hlavní nástroj pro návrh nejkvalitnějšího aerodynamického řešení pro nový vůz závodního týmu UWB Racing Team Pilsen. Tato práce byla po celou dobu konzultována s odborníky firmy Mecas esi.

Práce je rozdělena na čtyři základní části. První část je teoretická, která obsahuje popis základních fyzikálních jevů, z nichž aerodynamika vozů vychází. V teoretické části jsou také popsány jednotlivé komponenty, které se objevují na závodních vozidlech. V závěru této části jsou popsána pravidla, která musí návrh splňovat. Druhá část se zabývá popisem vozu UWB 03, u kterého je provedena CFD analýza a jsou zde také popsány nedostatky loňského vozu. Třetí část je zaměřena na validování CFD analýzy pomocí reálných jízdních zkoušek. K validaci jsou v práci použity metody: dojezdová zkouška, vizualizací pomocí bavlnek a vizualizací pomocí kouře. Poslední část obsahuje návrh. Ten začíná výběrem nejvhodnějšího typu profilu. Sestavení profilů pro jednotlivé oblasti je optimalizováno 2D simulací. Z výsledků této optimalizace jsou navrženy konkrétní komponenty, které jsou podrobeny 3D simulaci proudění. Po provedení simulací jsou výsledky porovnány a je doporučeno nejvhodnější řešení, práce je doplněna výkresem sestavy, ve kterém jsou možné vidět oblasti pro jednotlivé aerodynamické komponenty.

„...give a driver 10% extra power and he still complains the car is not fast enough. Give him 10% extra downforce and he drives like a hero.“

(citováno z Motorsportu)

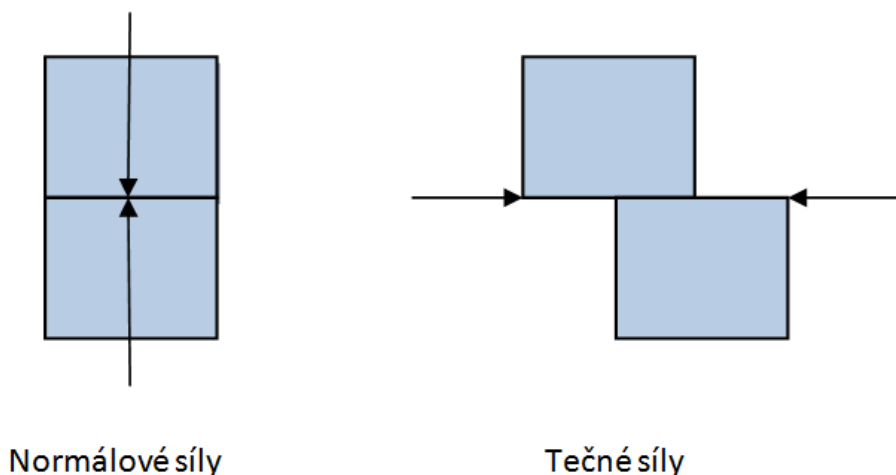
1. Teoretická část

1.1 Aerodynamika

Aerodynamika u vozidel značně ovlivňuje jízdní vlastnosti a ekonomiku provozu vozidla. Již od počátku vývoje automobilů byla snaha o snižování čelního odporu, a to zejména proto, aby se dosáhlo co největší maximální rychlosti. V dnešní době se řeší význam aerodynamiky u vozidel z důvodu snížení spotřeby paliva. Nyní se však zvyšuje význam aerodynamiky s ohledem na zlepšení stability jízdních vlastností, komfort jízdy a usměrnění proudu vzduchu do míst, kde je potřeba. U speciálních závodních vozidel převažuje význam jízdní stability nad snižováním čelního odporu, neznámá to však, že se konstruktéři závodních vozidel nezabývají snížením čelního odporu. Naopak tito konstruktéři mají před sebou těžký úkol, jenž spočívá v nalezení správného vyvážení aerodynamických sil pro konkrétní vozidlo a typ závodu. Je důležité, aby pilot mohl využít maximální potenciál svého vozu, a proto potřebuje použít aerodynamiku ve svůj prospěch. Nesmíme však zapomenout na to, že význam aerodynamických sil neroste lineárně, ale se zvyšující rychlostí se mění kvadraticky.

1.2 Vzduch

Vzduch je směs několika plynů (78% dusíku, 21% kyslíku a 1% dalších plynů), jejichž částice mezi sebou kolidují. Dvě částice mezi sebou mohou kolidovat bez klouzání a tím produkovat normálové (tlakové) síly, nebo po sobě mohou klouzat a tím produkovat tečné (smykové) síly. Tyto vzájemné interakce je možné vidět níže na obrázcích.



Obrázek 1 Důsledky kolidování dvou částic

Ve skutečnosti k oběma typům interakcí dochází současně, ale relativní velikost obou typů sil se velmi liší. Ve většině případech proudění vzduchu kolem tělesa jsou tečné síly (které jsou závislé na vnitřním tření vzduchu) ve srovnání s normálovými silami velmi malé. Tečné síly je třeba uvažovat u rozměrnějších úloh, jako jsou například dlouhé vlakové soupravy, kde tyto síly mají podstatně větší význam. Pro rozměry vozu Formula Student, je možné s těmito silami nepočítat.

1.3 Hustota

Hustota je fyzikální veličina, která představuje hmotnost objemové jednotky látky. Značí se „ ρ “ a její základní jednotkou je $[\text{kg}/\text{m}^3]$. Hodnota hustoty vzduchu je v běžných atmosférických podmínkách a nulové nadmořské výšce dle MSA uváděna jako $1,225 \text{ kg}/\text{m}^3$. Hustota se při změně nadmořské výšky a teploty mění (při výšce 3000 m dosahuje hustota vzduchu 75% hodnoty, při nulové nadmořské výšce). Protože aerodynamické účinky jsou přímo závislé na hustotě vzduchu, mohou mít změny hodnoty hustoty vzduchu vliv na výkonnostní charakteristiky vozidla. Při výpočtech jsme uvažovali hodnotu hustoty vzduchu pro naše podmínky $1,225 \text{ kg}/\text{m}^3$.

1.4 Viskozita

Viskozita, nebo také vazkost, je fyzikální veličina, která udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti. Viskozita popisuje látku tím jaké má vnitřní tření, které závisí hlavně na přitažlivých silách mezi částicemi. Někdy to může být vysvětleno jako lepivost tekutin (například med má větší viskozitu než voda). Viskozita může být dynamická „ η “ a její základní jednotkou je $[\text{Ns}/\text{m}^2]$. Nebo může být kinematická „ μ “ a její základní jednotkou je $[\text{m}^2/\text{s}]$ (jedná se o podíl dynamické viskozity s hustotou kapaliny). Za běžných atmosférických podmínek a teplotě $0 \text{ }^\circ\text{C}$ je hodnota kinematické viskozity pro vzduch uváděna $1,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Viskózní síly jsou přenášeny mezi tekutinou a na všechna tělesa se přenáší přes tenkou mezní vrstvu, která je na povrchu těles. Čím více je tekutina viskózní, tím větší síly se přenášejí na těleso. Toto platí i opačně. Budeme-li chtít přesunout těleso v tekutině, která je více viskózní, bude to mnohem náročnější. Viskozita je jedna ze složek, která ovlivňuje hodnotu Reynoldsova čísla. Pro návrh jsme uvažovali hodnotu kinematické viskozity pro naše podmínky na $1,79 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

1.5 Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo je jedno z podobnostních čísel a tudíž je bezrozměrnou veličinou, která porovnává setrvačné síly a viskozitu (neboli odpor prostředí závislý na vnitřním tření). Pomocí hodnoty tohoto podobnostního čísla lze stanovit, zda bude proudění laminární nebo turbulentní. Při našem návrhu využijeme toto podobnostní číslo pro určení polárních křivek při výběru profilu křídla. Reynoldsovo číslo se vypočte dle vztahu:

$$R = \frac{\rho \cdot l \cdot U}{\mu}$$

kde: ρ - hustota vzduchu

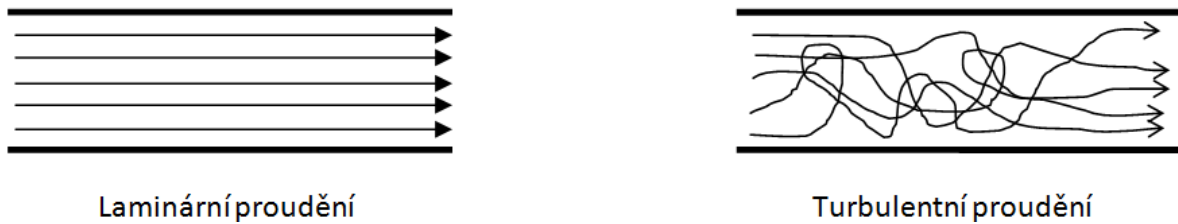
l – charakteristický rozměr (tětivy)

U – rychlost vzduchu

μ – dynamická viskozita

1.6 Typy proudění

Proudění můžeme rozdělit na dva typy, laminární a turbulentní. Při laminárním proudění jsou jednotlivé proudnice, jimiž nazýváme trajektorii pohybující se částice proudícího vzduchu, navzájem rovnoběžné a nekříží se, lze hovořit také o ustáleném typu proudění. Při turbulentním nebo také vířivém proudění dochází k roztáčení částic a křížení proudnic mezi sebou. Částice se v různých místech pohybují různou rychlostí, tudíž zde můžeme hovořit o nestacionárním proudění. Nejčastěji proudění začíná jako laminární a postupně se změní na turbulentní, tato změna se nazývá přechodová oblast proudění. O tom, o jaký typ proudění se jedná, rozhoduje Reynoldsovo číslo a tvar (drsnost) povrchu tělesa.

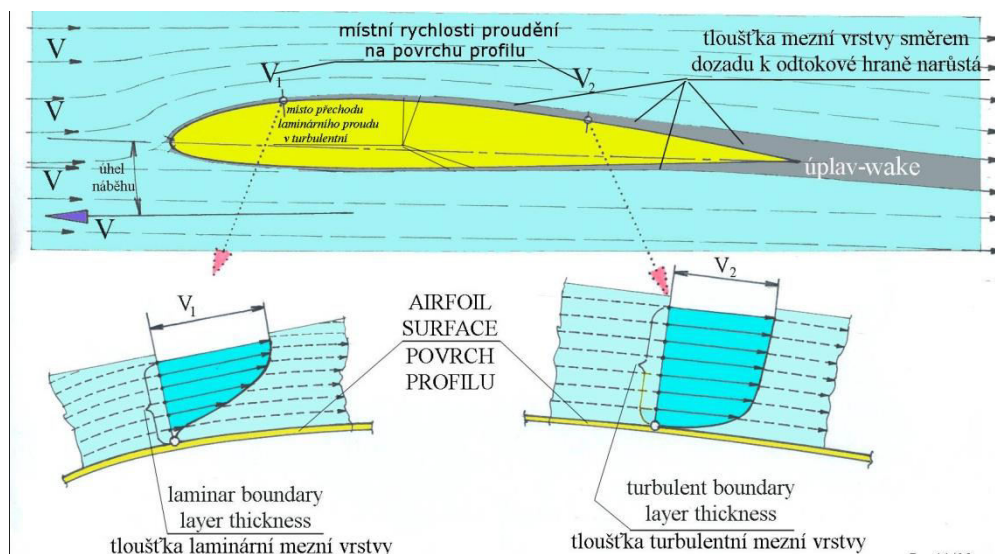


Obrázek 2 Typy proudění

1.7 Mezní vrstva

Pokud umístíme těleso do proudu tekutiny, vytvoří se na povrchu tělesa tenká vrstva tekutiny, která se nazývá mezní vrstva. Tloušťka této mezní vrstvy roste podél tělesa, a to od počátku kontaktu. Na povrchu tělesa je rychlost proudu tekutiny nulová a tato rychlost se parabolicky vyvíjí až do doby, kdy je stejná jako rychlost okolí. Celé této oblasti vývoje rychlosti se říká právě mezní vrstva. Jakmile tloušťka mezní vrstvy roste, roste i odporová síla z důvodu smykového napětí. Pokud se bude mezní vrstva stále zvětšovat, může dojít k odtržení mezní vrstvy od povrchu tělesa (dojde ke vzniku úplavu) a tím dojde k velkému nárůstu odporu a ztrátě přitlaku.

V mezní vrstvě může docházet k oběma typům proudění, laminárnímu i turbulentnímu, přičemž turbulentní mezní vrstva má větší tloušťku a také větší energii než mezní vrstva laminární.

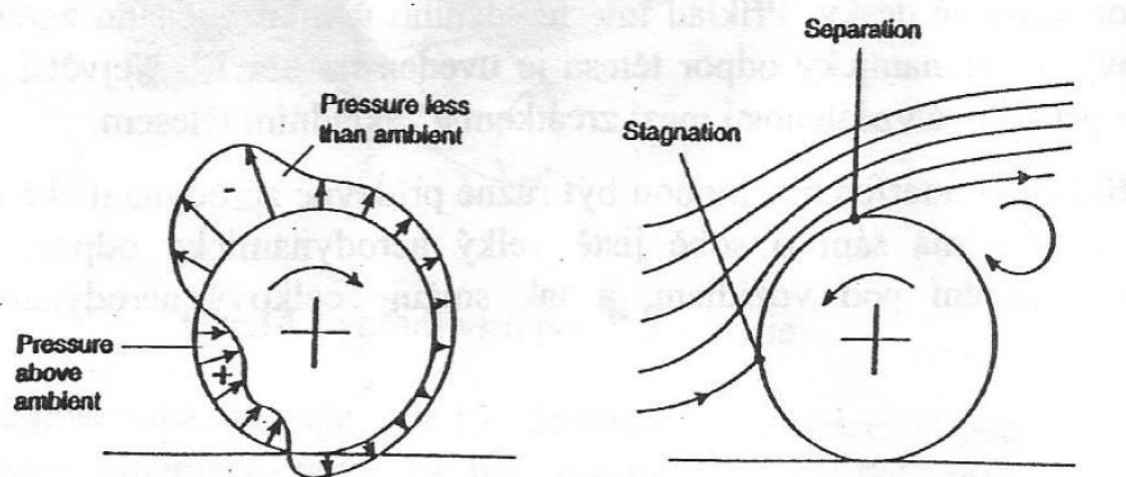


Obrázek 3 Vývoj mezní vrstvy

1.8 Obtékání tělesa

1.8.1 Obtékání kol

Na rotujících kolech se během jízdy generuje velký aerodynamický odpor, a to z důvodu vzniklých vírů a turbulentního úplavu. Kola mimo odporu generují také vztlak, což je špatné pro stabilitu vozu. Na obrázku je vidět rozložení statického tlaku na kolech během přímé jízdy. Důvodem vzniku významných vírů a úplavu je relativní rychlost vrchní části kola, která je oproti rychlosti vozidla dvojnásobná. Ke vzniku těchto nežádoucích účinků přispívá také boční obtékání kola, které je velmi komplikované. Z těchto důvodů se chceme působení vzduchu na kola vyvarovat a vzduch nasměrovat kolem kol, což bude popsáno dále.



Obrázek 4 Tlak působící na rotující kolo a tvar proudnic [4]

1.8.2 Coandův jev

Coandův jev označuje tendenci proudu tekutiny přilnout k povrchu, který obtéká. Tento jev je výsledkem strhávání okolní tekutiny v blízkosti proudu v důsledku tlakových poměrů vyvozených prouděním. Pokud by šlo o volný proud, došlo by k přisávání tekutiny z okolí, což však blízka stěna neumožňuje a proud pak má namísto toho tendenci se k ní přichýlit. Šíří-li se tedy izotermní proud vzduchu v blízkosti zakřiveného povrchu, může dojít k přilnutí proudu ke stěně vlivem tlakových sil, které převládají nad silami setrvačnými. Vznik Coandova jevu je nejvíce ovlivněn charakterem proudění (tj. intenzitou turbulence, rychlosti proudění, geometrií obtékaného povrchu, fyzikálními vlastnostmi tekutiny). Při konvexním zakřivení povrchu ve směru toku jsou tlakové síly mezi proudem tekutiny a povrchem vyšší, než u zakřivení nekonvexního.

Využití Coandova jevu

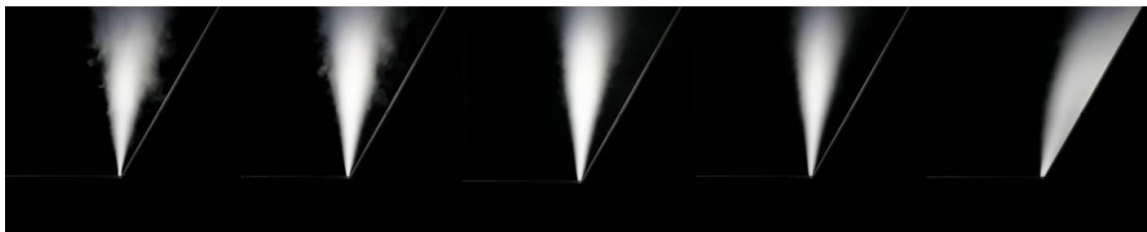
Tento jev se v dnešní technické praxi uplatňuje v mnoha oborech a to zejména v leteckém a automobilovém průmyslu. Nejvýznamnější uplatnění má Coandův jev při konstrukci zařízení pro zvýšení vztlaku u letadel. Vzduch pohybující se kolem křídla může být nasměrován dolů s použitím klapky a tenkého proudu vzduchu proudícího přes zakřivený povrch horní části křídla. Výsledkem je zvýšený aerodynamický vztlak na křídle. Důležité praktické využití má Coandův jev i ve vnější aerodynamice automobilů kvůli snížení součinitele odporu vzduchu. Další využití tohoto efektu je také pro nasměrování vzduchu do potřebných míst. Všechna tato využití jsou vhodná pro návrh vozu Formule Student jak ke zvýšení přítlaku (opačný jev vztlaku), tak ke snížení součinitele odporu vzduchu vozu.

Ovlivnění Coandova jevu

Výrazný vliv na chování proudu v blízkosti stěny má rychlost proudění. Obrázek ukazuje, jak se mění směr proudu vzduchu se změnou rychlosti proudění na výstupu ze štěrbinu při pevném nastavení šikmé přilehlé stěny. Je zřejmé, že při rostoucí rychlosti se proud nejprve stává mírně nesouměrný, a při překročení určité hodnoty rychlosti ke stěně poměrně náhle přilne.

Pokud bychom měnili úhel sklonu šikmé desky, měnila by se i rychlost při které dojde k přilehnutí. Toto však platí jen do určité hodnoty úhlu sklonění, poté už ke Coandovu jevu nedojde. Zpravidla čím menší úhel sklonu šikmé desky tím nám stačí k přilehnutí proudu vzduchu nižší rychlost. Jinou změnou geometrie obtékaných povrchů je tvar hrany štěrbinu. Díky zaoblení hrany štěrbinu dojde k posunu úhlu odklonu proudu i pro malé úhly nastavení šikmé desky.

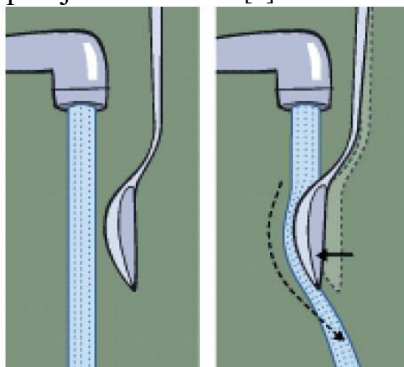
Na směr proudu má určitý vliv také charakter proudění, zejména intenzita turbulence. Zvýšená intenzita turbulence vede k přilnutí při nižší rychlosti proudění. Podobně vyšší drsnost povrchu stěny, která ovlivňuje chování proudu v mezní vrstvě, způsobí snazší přilnutí proudu ke stěně.



Obrázek 5 Ukázka vizualizace a odklonu proudu pro úhel desky 60° a rychlosti 2, 4, 6, 8 a 10 m/s [6]

Demonstrace Coandova jevu

Velmi snadno můžeme Coandův jev demonstrovat na polévkové lžici (zakřivený povrch) a proudu vody. Z vodovodního kohoutku pustíme vodu, lžici podržíme volně mezi prsty a přiblížíme ji k proudu. Proud lžici přitáhne a ta přilne k jejímu povrchu. U tohoto experimentu si musíme uvědomit, že zde nepůsobí pouze Coandův jev, ale i povrchové napětí mezi kapalinou a povrchem lžice. To že Coandův jev je dominantní silou si ověříme tak, že změníme rychlost proudu vody. Přitažlivá Coandova síla roste s rychlostí proudění, zatímco síla od povrchového napětí je konstantní. [6]



Obrázek 6 Přilnutí proudu vody k zaoblené ploše lžice [6]

1.8.3 Venturiho efekt

Nejprve je důležité vysvětlit rovnici kontinuity. Jedná-li se o ustálené proudění ideální kapaliny v uzavřené trubici proměnného průřezu je objemový průtok (Q_v) ve všech řezech trubice konstantní. Jedná se tedy o nepřímou úměrnost mezi rychlostí proudění (v) a obsahem průřezu trubice (S). Z čehož plyne, že proudí-li kapalina menším průřezem, musí proudit rychleji.

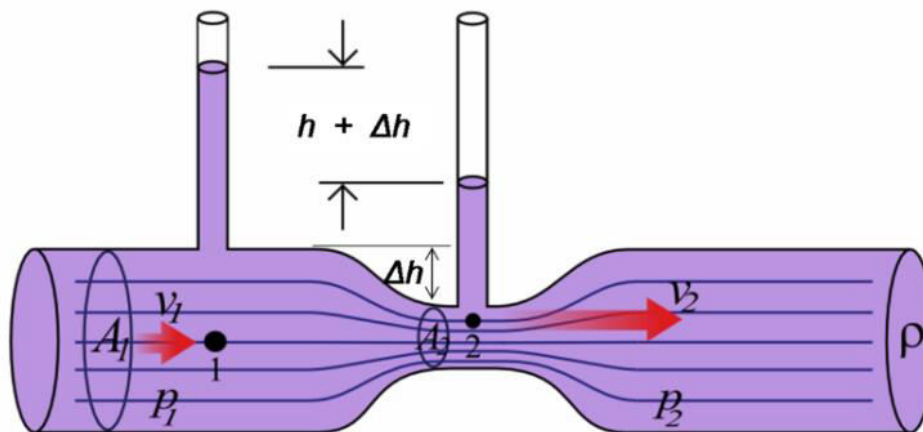
$$Q_v = S \cdot v = konst.$$

Dále musíme využít Bernulliho teorii, že získaná kinetická energie musí být kompenzována snížením tlaku. Tato teorie vyjadřuje zákon o zachování mechanické energie, a zároveň hovoří o tom, že v místě s větším průřezem má proudící kapalina vyšší tlak, ale nižší rychlost. Kdežto v místě s menším průřezem má proudící kapalina nižší tlak, ale vyšší rychlost.

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + p + \rho \cdot g \cdot h = konst.$$

Bernulliho teorie je popsána také rovnicí, kde první člen představuje dynamický tlak, který popisuje objemovou hustotu kinetické energie, druhý člen představuje tlakovou potenciální energii a třetí člen zastupuje potenciální energii (rozdíl výšek průřezů).

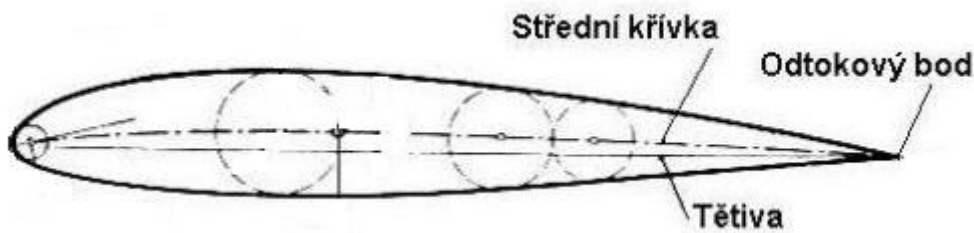
Nyní můžeme hovořit o Venturiho efektu, který se skládá z nepřímé úměry mezi tlakem a rychlostí (rovnice kontinuity), a ze vztahu pro pokles tlaku (Bernulliho rovnice). Venturiho efektu se v aerodynamice využívá velmi často, a to z důvodu vzniku vztlaku u letadel nebo přítlaku u vozidel. Pokud dokážeme vzduch kolem geometrie z jedné strany zrychlit (získáme podtlak) a z druhé strany zpomalit (získáme přetlak), tak nám tlak kolem geometrie bude generovat svislou sílu.



Obrázek 7 Demonstrace Venturiho efektu

1.8.4 Letecký profil

Pokud chceme dosáhnout při obtékání tělesa malého odporu a nebo velkého vztlaku, musí mít těleso aerodynamicky vhodný tvar. U křídel je to tvar profilu (kolmý řez na osu křídla). Pro nízký odpor je možné využít symetrického tvaru profilu, ale pokud chceme, aby nám těleso generovalo svislé síly, musí být tvar nesymetrický. Oba typy musí být zakončeny odtokovou hranou (zakončení hrotem). Mezi základní rozměry profilu patří tětiva, což je spojnice krajních bodů střední křivky profilu. Střední křivku profilu si můžeme představit jako spojnici středů kružnic vepsaných do geometrie profilu. Délka tětivy nám ukazuje hloubku profilu, a pokud mluvíme o úhlu náběhu, tak se bavíme o úhlu mezi proudem tekutiny a tětivou.



Obrázek 8 Popis leteckého profilu [7]

Využitím teorií zmíněných výše, je možné díky nesymetrické geometrii na leteckém profilu generovat svislé síly a to je možné vysvětlit třemi způsoby:

1. *Pomocí cirkulace. Na horní straně se rychlost ideálního obtékání zvyšuje a rychlost proudění na dolní straně se naopak zmenšuje. Podle Bernullioho rovnice je pak na horní straně, kde je větší rychlost, menší tlak, tedy podtlak, a na dolní straně, kde je menší rychlost, přetlak. Součet obou tlaků dává vztlak.*
2. *Pomocí obrazu skutečného obtékání. Částice proudící po horní straně profilu musí proběhnout za stejný čas delší dráhu než částice proudící po dolní straně, proudí tedy rychleji. Z rozdílu rychlostí na horní a dolní straně plyne vztlak.*
3. *Pomocí hustoty proudnic v obrazu skutečného obtékání. Podle rovnice kontinuity se rychlost zvyšuje, když se průtočný průřez zmenšuje a naopak. Tedy v místech, kde jsou proudnice nahuštěny blízko sebe (malý průtočný průřez), bude rychlost vyšší (podtlak), a v místech, kde jsou proudnice daleko od sebe, bude rychlost nižší (přetlak). [7]*

To, jak velké síly budou na těleso působit, závisí při konstantních podmínkách na geometrii profilu a na úhlu náběhu. Pro každý úhel náběhu jsou výsledné síly stejného profilu různé. Můžeme se zde pohybovat v oblasti nejnižšího odporu, nejvyššího vztlaku nebo největší efektivity profilu (vztlak/odpor). U letadel požadujeme svislou sílu jako vztlak, naopak u vozidel chceme mít svislou sílu jako přítlak. Pokud tedy chceme, aby nám profil místo vztlaku generoval přítlak, musíme tento profil otočit tak, aby svislá síla směřovala k vozovce. O tom, jaký úhel náběhu je pro konkrétní profil vhodný, nám nejvíce řeknou charakteristické křivky profilu (polára profilu, vztlaková křivka profilu a momentová křivka profilu). Tyto křivky je možné najít ve veřejné databázi leteckých profilů.

1.8.5 Bezrozměrné součinitele

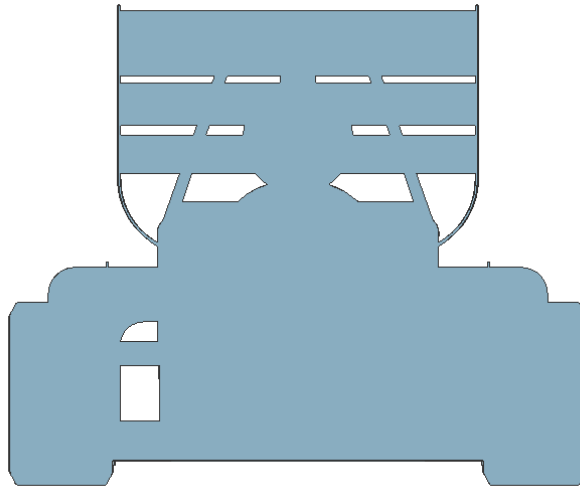
Pro to, abychom mohli hodnotit jak moc je daná geometrie aerodynamicky kvalitní, se používají bezrozměrné součinitele, které nejsou závislé na rychlosti, ale jen na dané geometrii.

$$\text{součinitel odporu} \dots C_D = \frac{F_A}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{ref}}$$

$$\text{součinitel vztlaku} \dots C_L = \frac{Z}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{ref}}$$

$$\text{součinitel klopivého momentu} \dots C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{ref} \cdot b}$$

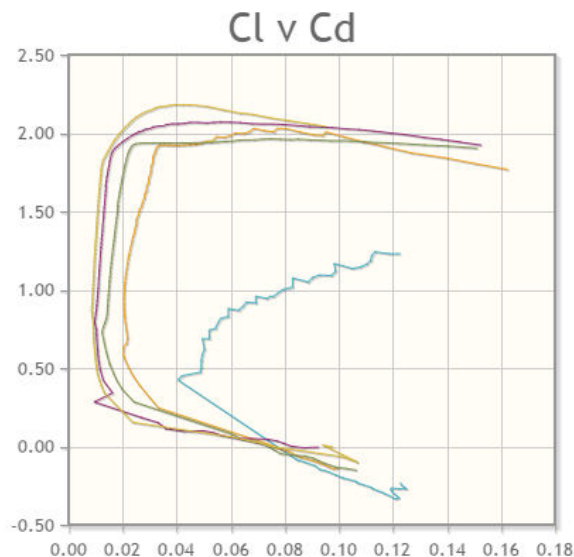
Kde A_{ref} je čelní (referenční) plocha, kterou lze v automobilovém průmyslu získat promítnutím vozidla na stěnu stojící za ním. Na obrázku níže je možné vidět, jak zhruba vypadá referenční plocha modelu Formula Student.



Obrázek 9 Referenční plocha konkrétní varianty

1.8.6 Polární křivka profilu

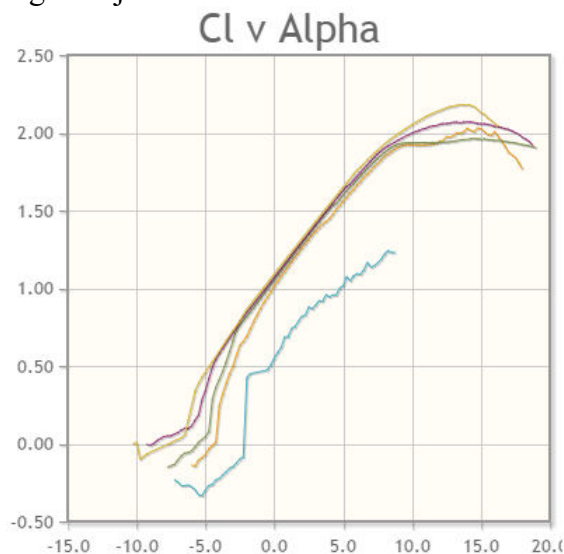
Při výběru profilu křídla požadujeme velký vztlak při minimálním odporu. To, jaký odpor musíme překonat k tomu, abychom získali požadovaný vztlak, nám ukazuje polára profilu. V této závislosti nejsou vyneseny přímo hodnoty vztlakové a odporové síly, ale pouze hodnoty koeficientů těchto sil, které jsou závislé pouze na geometrii profilu a úhlu náběhu. Polární křivku lze získat experimentálním měřením, nebo sestavit pomocí speciálních metod.



Obrázek 10 Polární křivka pro pět různých Reynoldsových čísel

1.8.7 Vztlaková křivka

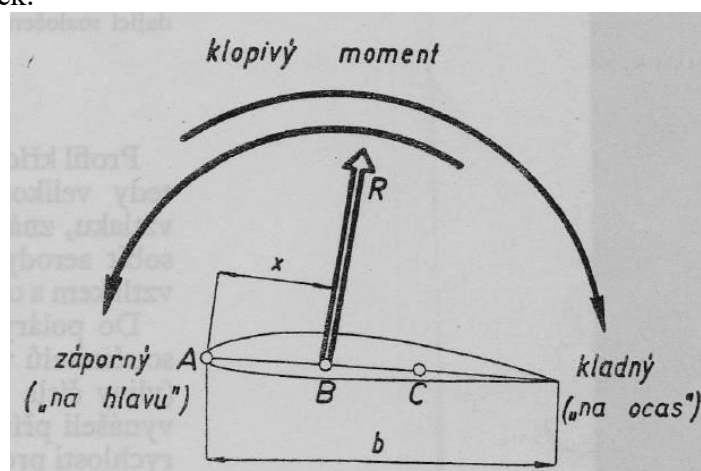
Dá se říct, že u většiny běžných profilů vztlak s úhlem náběhu roste téměř konstantně a to až do doby, kdy vlivem úhlu náběhu začne docházet k místnímu odtržení proudu. Vztlak už dále neroste a po úplném odtržení proudu od profilu vztlak výrazně klesne, a tento pokles je doplněn velkým nárůstem odporu. Z této charakteristiky je tedy možné určit úhel náběhu, při kterém nám profil ještě generuje vztlak.



Obrázek 11 Vztlaková křivka pro pět různých Reynoldsových čísel

1.8.8 Momentová křivka

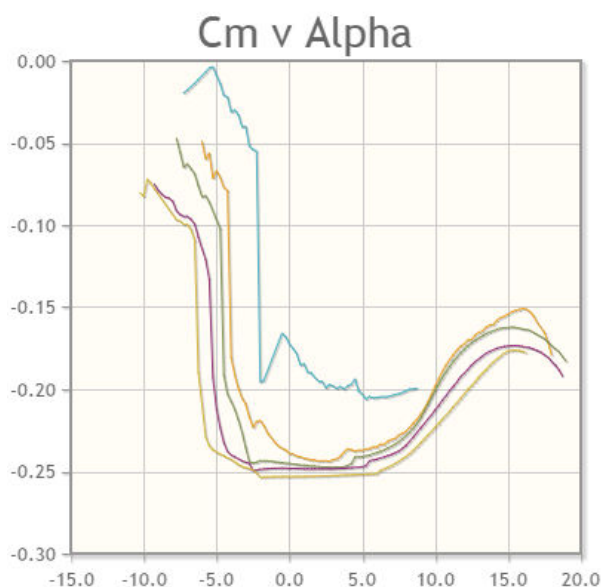
Nejdříve je nutné vysvětlit kladný smysl klopivých momentů a bod, k němuž se momenty budou vztahovat. Kladný a záporný smysl klopivých momentů je možno vidět na obrázku. Pokud se budeme bavit o úhlech náběhu, kdy je profil plynule obtékán, je možné brát polohu (vzdálenost x) jako konstantní hodnotu 0,25 b . Toto tvrzení je podloženo podrobným teoretickým i experimentálním zkoumáním. Jakmile však dojde k odtrhávání proudu od profilu, nelze toto místo brát jako konstantu a musí se vycházet z naměřených momentových křivek.



Obrázek 12 Popis klopivého momentu [7]

Bod, který se nachází v jedné čtvrtině hloubky profilu, se nazývá aerodynamický střed profilu, ten je definován tak, že při změně úhlu náběhu je moment od aerodynamické síly k tomuto bodu neměnný. Z rovnice uvedené níže je možné vidět, že se moment profilu skládá z konstantní složky (nezávislé na úhlu náběhu ani na vztlaku) momentu při nulovém vztlaku (M_{z0}) a ze složky, která je součinem vztlaku (Y) a čtvrtině hloubky profilu. [7]

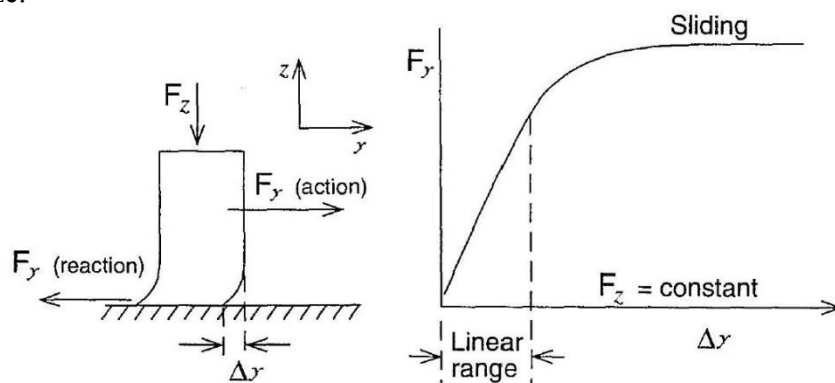
$$M_z = M_{z0} - Y \cdot 0,25 \cdot b$$



Obrázek 13 Momentová křivka pro pět různých Reynoldsových čísel

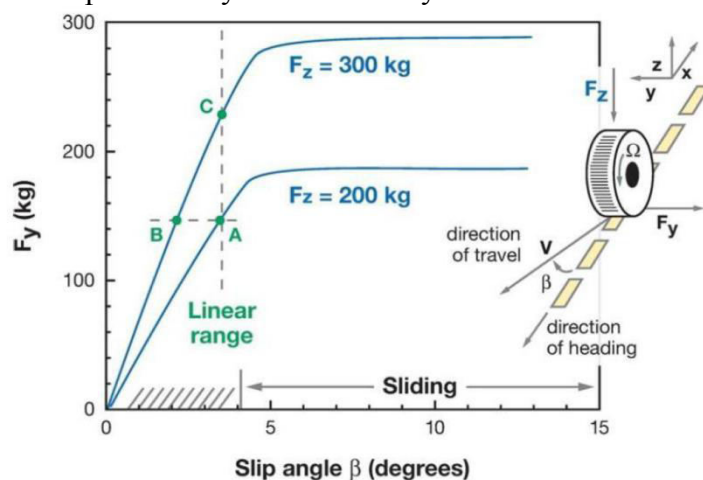
1.9 Pneumatiky

Jelikož jsou pneumatiky jediným prvkem, který je ve spojení s vozovkou, jsou nejdůležitějším prvkem vozidla pro přenos všech sil na vozovku. Pneumatika je schopna přenést boční sílu (F_y) pouze do určité meze, poté dojde ke skluzu pneumatiky. Tuto mez je možné znázornit tak, že při působení konstantní svislé síly (F_z) budeme zvyšovat boční sílu. Boční síla bude nejdříve lineárně závislá na velikosti boční deformace (Δy), poté postupně přejde do skluzu. Hodnota boční síly za lineární oblastí, kde dochází k malému prokluzu, ale boční síla stále roste, je ta oblast, ve které chceme pneumatiku použít. Místo, ve kterém jsme schopni přenést největší boční sílu s malým prokluzem, se někdy nazývá jako mez adheze.



Obrázek 14 Demonstrace působení boční síly na pneumatiku [5]

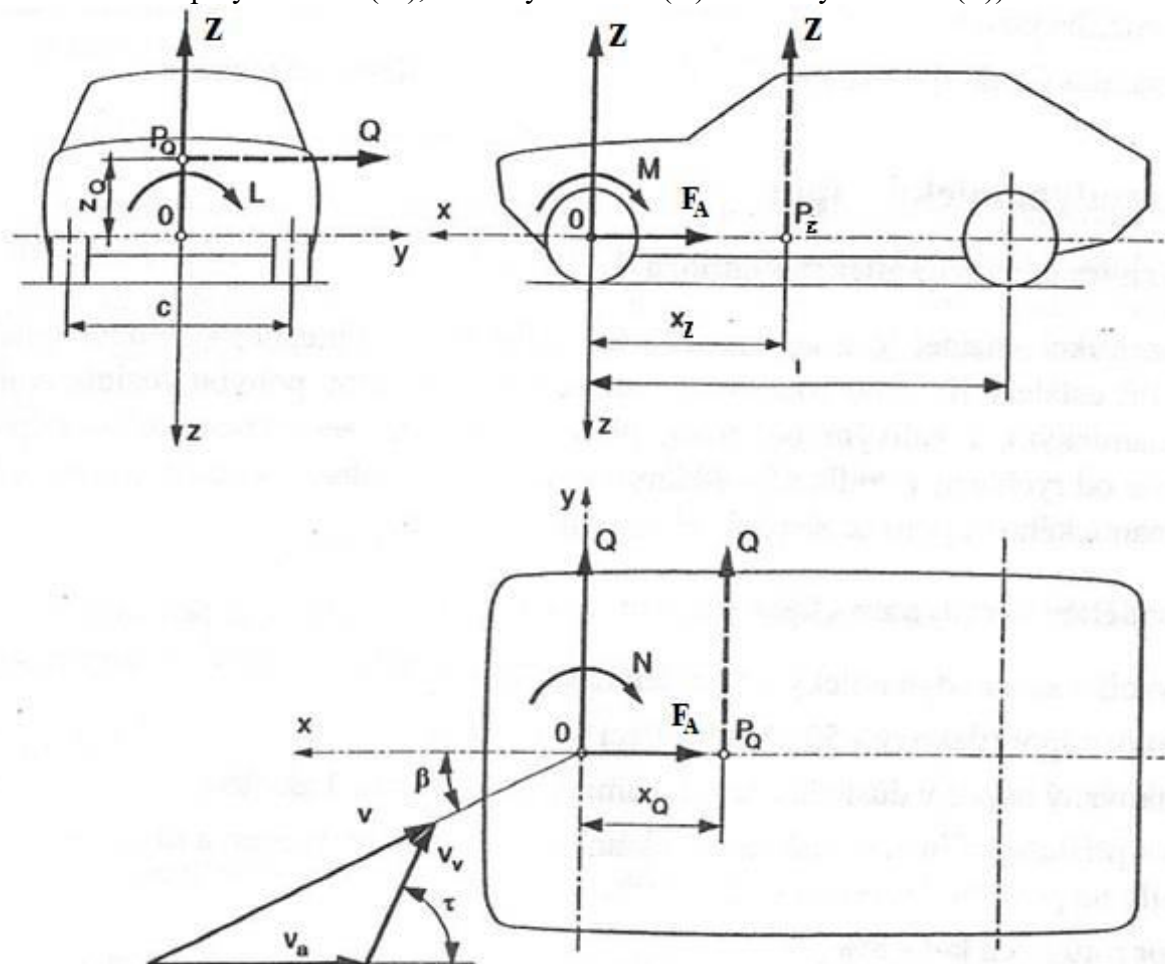
Boční síla je závislá na svislé síle, která se dá brát za konstantní jen tehdy, když vychází pouze ze síly generované tíhou vozidla. Pokud však vytvoříme na vozidle přítlak, můžeme tuto svislou sílu s rostoucí rychlostí zvyšovat. To znamená, že čím rychleji pojedeme, tím můžeme na pneumatiku působit větší boční silou. Tento jev je známý např. u vozů Formule 1, které nejsou schopny projet zatáčkou nižší rychlostí. Zvýšení svislé síly je vhodné také pro zvýšení doby životnosti pneumatiky. Z obrázku je mimo jiné vidět, že při zvýšení svislé síly se při stejné boční síle (F_y) pneumatika pohybuje s menším prokluzem, což pneumatiku méně opotřebovává. Je důležité si uvědomit, že to, co ovlivňuje chování pneumatiky, není jen svislá síla. Velký vliv má také geometrie zavěšení, tlak v pneumatice, konstrukce pneumatiky a stav vozovky.



Obrázek 15 Přenos boční síly při různých F_z [5]

1.10 Aerodynamické síly a momenty

Při jízdě působí na povrch vozidla vlivem proudícího vzduchu a bočního větru aerodynamické síly a momenty. Ty je možné nahradit obecnou soustavou šesti rovnic, z nichž tři jsou silové: aerodynamický odpor (F_A), vztlak (Z) a boční síla (Q), a tři z nich jsou momentové: klopivý moment (M), zatáčivý moment (N) a klonivý moment (L).



Obrázek 16 Aerodynamické síly a momenty působící na vozidlo [4]

Velikost aerodynamické síly je obecně úměrná druhé mocnině rychlosti relativního proudu vzduchu, ploše vystavené proudu vzduchu a bezrozměrnému součiniteli závislému na tvaru karoserie.

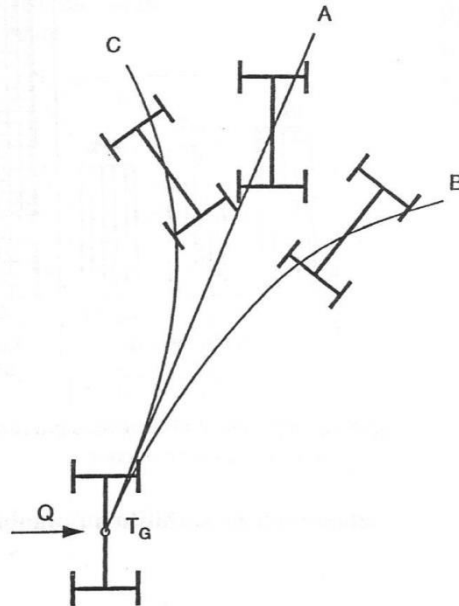
Aerodynamické síly:	aerodynamický odpor	$F_A = C_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{ref}$
	aerodynamický vztlak	$Z = C_A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{ref}$
	aerodynamická boční síla	$Q = C_Q \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{ref}$
Aerodynamické momenty:	klopivý moment	$M = C_M \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{ref} \cdot l$
	zatáčivý moment	$N = C_N \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{ref} \cdot l$
	klonivý moment	$L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{ref} \cdot l$

[4]

To, jak se vozidlo bude po působení bočního větru chovat, nám udává aerodynamická stabilita vozu. Při působení bočního větru jsou tři možnosti stability:

- A. Aerodynamicky neutrální vozidlo je tehdy, pokud směrová úchylka předních a zadních kol je shodná a vozidlo se při působení bočního větru pouze posouvá.
- B. Aerodynamicky nestabilní vozidlo je tehdy, kdy směrová úchylka předních kol je větší než zadních kol a vozidlo se působením bočního větru stáčí ve směru větru.
- C. Aerodynamicky stabilní vozidlo je tehdy, pokud směrová úchylka předních kol je menší než zadních kol a vozidlo se působením bočního větru stáčí proti směru větru.

Aerodynamicky stabilního vozidla se dá dosáhnout tak, že se pokusíme přesunout polohu působení boční aerodynamické síly za polohu těžiště vozidla. To, v jaké vzdálenosti tyto dvě polohy budou, vypovídá o tom, jak moc bude vozidlo manévrovatelné. Například pro rychlou změnu směru (průjezd slalomem) je vhodné, aby se tato vzdálenost blížila nule. Zatímco pokud budeme chtít mít auto více směrově stabilní, budeme se snažit tuto vzdálenost udělat co největší. Tohoto se využívá například u návrhu bočnice zadního křídla, kterou se poloha působení boční aerodynamické síly dá hodně ovlivnit.

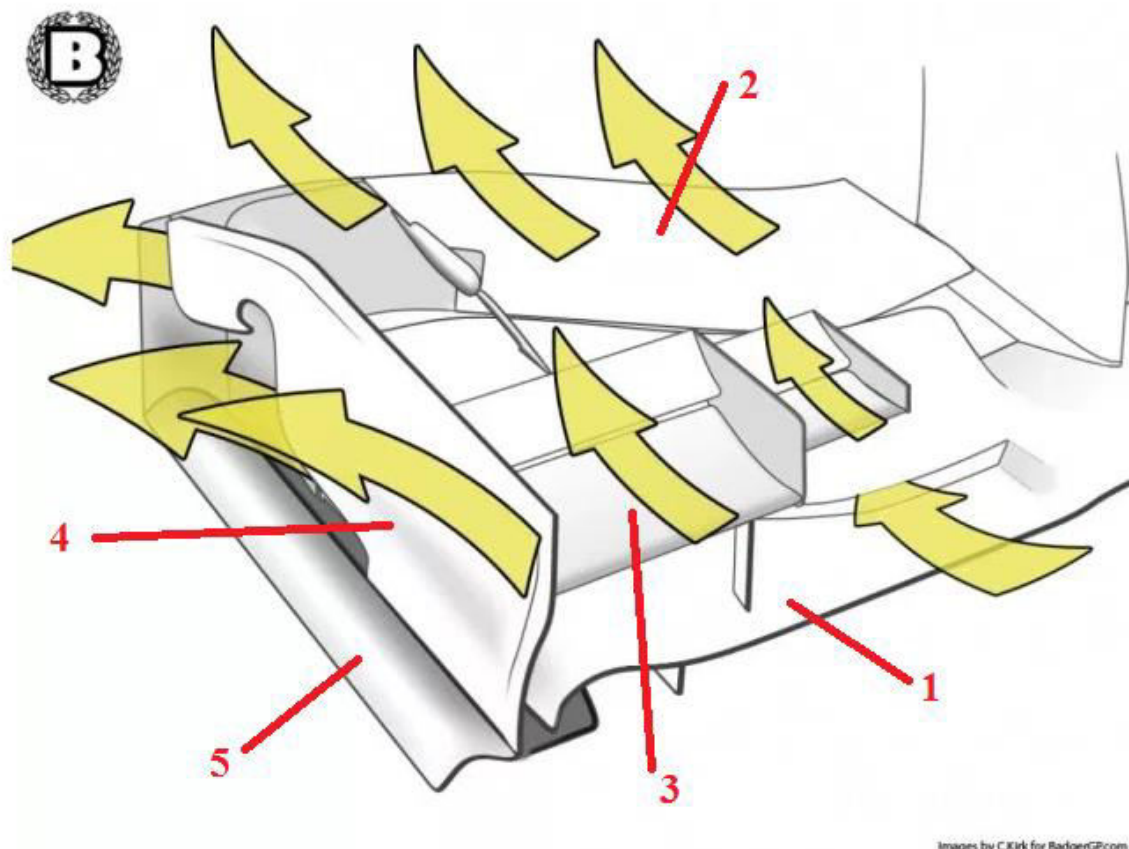


Obrázek 17 Aerodynamická stabilita vozu, při působení bočního větru [4]

1.11 Princip jednotlivých komponent

1.11.1 Přední křídlo

Přední křídlo je velmi významnou částí a to hlavně z důvodu, že se jedná o první část vozu, se kterou přijde vzduch do kontaktu. A proto přední křídlo nejvíce ovlivní to, kam bude vzduch nasměrován a zda bude využit maximální potenciál ostatních (aerodynamických) komponent na voze. Přední křídlo má na voze dva úkoly. První z nich je nasměrování vzduchu na ostatní komponenty a odklonění vzduchu od kol, která svým vířením vzduchu výrazně přispívají k nárůstu odporu vzduchu, jak bylo uvedeno výše. Druhým úkolem je generování přitlaku. To je vhodné na předním křídle z důvodu jeho polohy. Lze zde totiž využít přítomnosti vozovky a také, že se jedná o jedinou možnost vytvoření přitlaku v přední polovině vozu. Jelikož je přední křídlo ve velké vzdálenosti od těžiště, působí přitlačné síly na velkém rameni, čímž se dá dobře odladit aerodynamické působení na vozidlo. Generování přitlaku na přední části také umožňuje přenášet větší boční síly na předních pneumatikách.



Obrázek 18 Jednotlivé části předního křídla

Hlavní profil (main profile - 1) zpravidla drží celé přední křídlo pohromadě, takže jsou přes něj přenášeny všechny generované síly na předním křídle do vozu. Jedná se o část předního křídla, která nejvíce využívá ke generování přitlaku přítomnost vozovky, čímž níže se s hlavním profilem dostaneme, tím bude mít vyšší efektivnost.

Klapky (flaps-2) tvoří společně s hlavním profilem víceprvkové křídlo (zvýšení efektivnosti) a to jak moc budou skloněné (o úhel náběhu) a v jaké budou vzdálenosti, ovlivní odklonění vzduchu od předních kol. Je důležité si dát pozor na to, aby nebyly moc široké a neodkláněly vzduch od otvorů v kapsách a ostatních aerodynamických komponent.

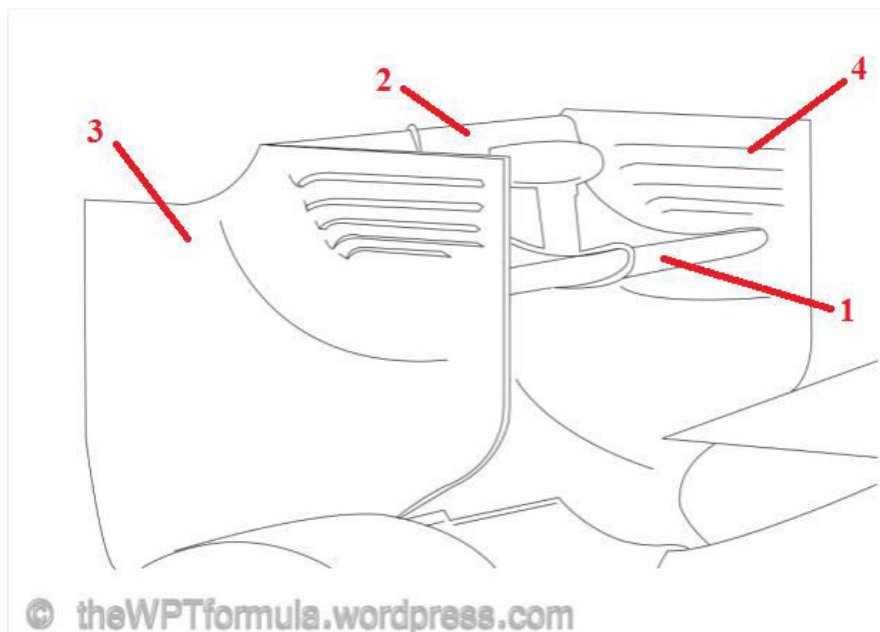
Winglety (winglets – 3) přispívají k odklonění vzduchu od předních kol. Jsou vhodné hlavně z toho důvodu, že většina pravidel neumožní zakrýt celá kola pomocí klapek, protože je omezena maximální výška komponent předního křídla před koly.

Bočnice (endplate – 4) předního křídla jsou velmi důležitou částí, při jejich návrhu se konstruktéři snaží odklonit vzduch od předních kol, ale zároveň co nejvíc vzduchu dostat bokem do kapes a pod vůz. Dále jsou bočnice vhodné na koncích profilu z důvodu vytvoření tzv. nekonečného profilu, což bude vysvětleno dále.

Generátor víru (vortex generátor – 5) je doplněk na vozidle, který je využíván k tvorbě vírů: vír je spirální proudění, které obsahuje velké množství energie v kruhovém pohybu. Tohoto jevu se dá využít tam, kde se nedá zamezit proudění nějakou konstrukční překážkou a díky víru se může využít tzv. vzduchová clona. Vzduchové clony se využívá k utěsnění oblastí s nízkým tlakem, který je třeba pod vozidlem (nahrazení tzv. sukni, které byly v minulosti zakázány). Mimo jiné mohou být víry užitečné při tvorbě přítlaku tím, že se oddálí místo odtržení mezní vrstvy a obtékání křídla bude efektivnější.

1.11.2 Zadní křídlo

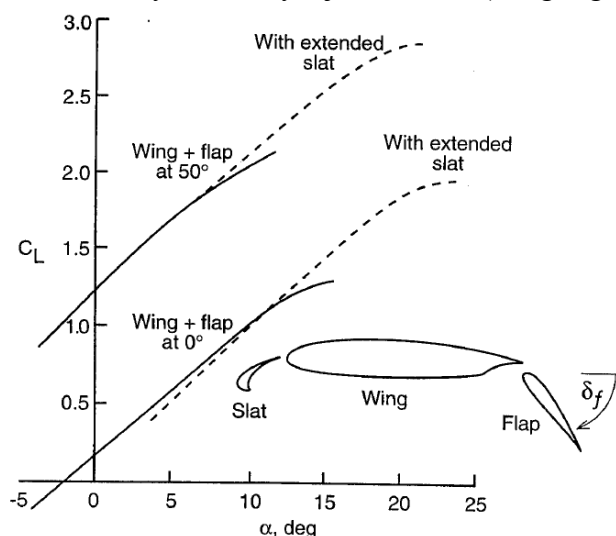
Jedná se o aerodynamickou komponentu, která díky svým rozměrům a poloze velmi ovlivňuje přítlak vozu, náchylnost a stabilitu při bočním větru a odpor vzduchu, který je možné (například na rovinkách) i regulovat. Ke generování přítlaku je na zadním křídle možné využít víceprvkové sestavení profilů, které je možné vidět u křídla letadel. Rozměrem, tvarem a polohou bočnic lze ovlivnit polohu působící boční síly. Zadní křídlo ovlivňuje to, co se bude dít za vozidlem, jak velký se bude za vozidlem tvořit úplav. Je také možné předem určit místo odtržení mezní vrstvy, čímž se ovlivní odpor vzduchu.



Obrázek 19 Jednotlivé části zadního křídla

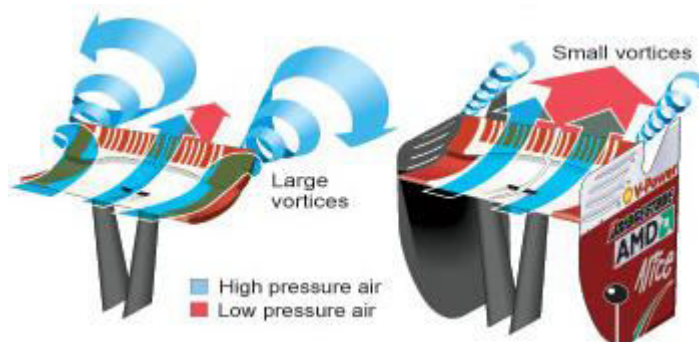
Hlavní profil (main profile – 1) a klapky (flaps – 2) jsou hlavní částí zadního křídla pro generování přítlaku. U návrhu této části se využívá seskládání jednotlivých profilů, podobně jako jsou navrhována křídla u letadel. Jednotlivé profily nemusí být poskládány jen za sebou, ale je možné vložit profily i pod sebe, čímž je možné využít větší potenciál prostoru pro zadní

křídlo. Nastavováním polohy klapek je možné regulovat odpor a přítlak vozu, čehož se využívá k navýšení rychlosti k předjíždění na místech, kde není potřeba tolik přítlaku (na rovinkách). K tomuto slouží systém nazývaný se DRS (Drag regulation system).



Obrázek 20 Přínos slatu a natočení klapky [5]

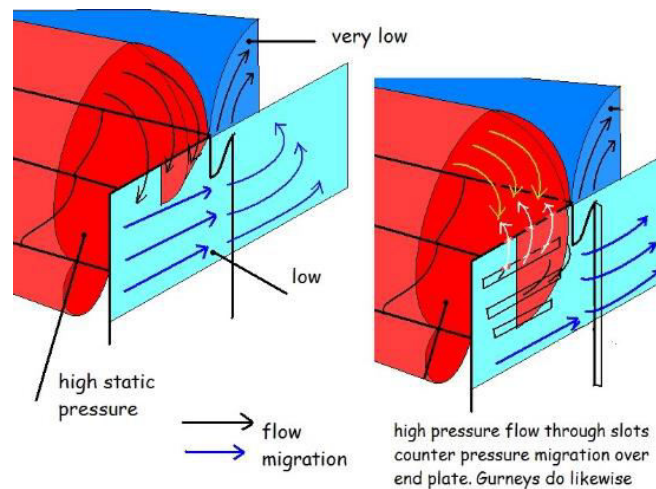
Bočnice (endplates -3) jsou důležité z důvodu využití maximálního potenciálu profilů mezi nimi. Na jedné straně profilu je proud vzduchu s nižším tlakem a na druhé straně profilu je proud vzduchu s vyšším tlakem, pokud by bylo křídlo bez bočnic, bude snaha těchto proudů přecházet mezi sebe, tím tvořit velké víry a snižovat využitelnost profilů. Čím větší víry by se vytvářely, tím větší by byl odpor a nižší přítlak. K tvaru bočnic je možné obecně říct, že čím větší budou, tím to bude lepší z důvodu zvýšení efektivní štíhlosti profilů. Jejich tvarem a rozměrem je možné odladit polohu působíště sil od bočního větru. V případě, kdy bočnice zadního křídla sahají až k rámu (nebo podlaze) vozu, je možné celé zadní křídlo uchytit právě za bočnice.



Obrázek 21 Demonstrace významu bočnic (na zadním křídle)

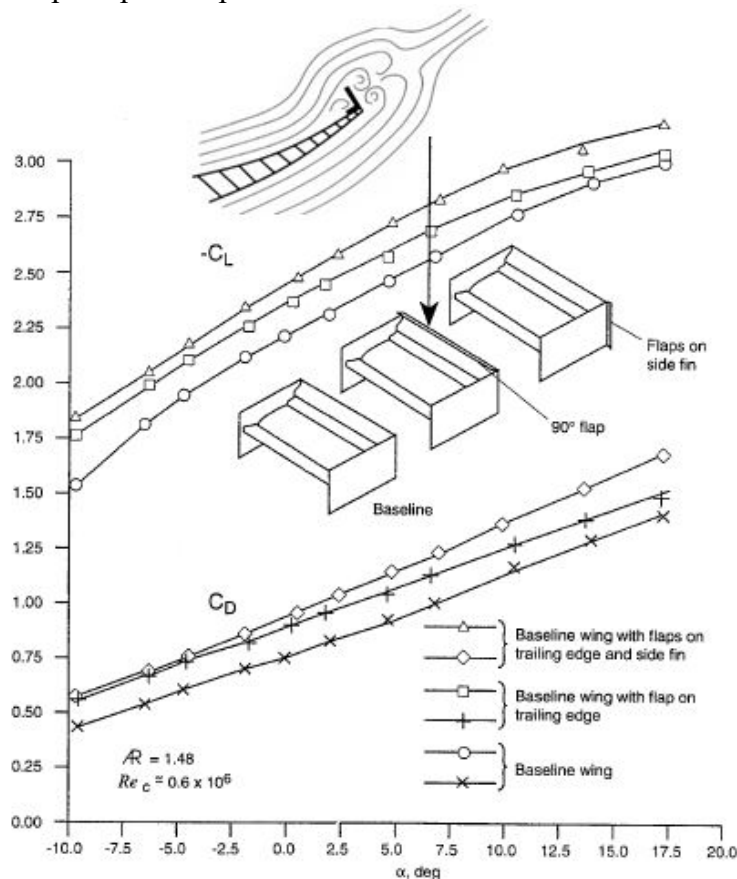
Sloty (slots -4), neboli štěrby, které se nacházejí v bočnicích zadních křidel nad profily, mají význam z toho důvodu, že nad profily křídla se nachází oblast vysokého tlaku. Zatímco pod (za) křídlem se nachází oblast s velmi nízkým tlakem, a z vnější strany bočnice se nachází oblast s nižším tlakem než je nad profily. Díky těmto slotům je možné vysoký tlak přenést i na vnější stranu bočnice a tím snížit vznik indukovaného odporu. Pokud v bočnici tyto sloty nejsou, dochází za hranou bočnice k vytváření větších vírů, což přináší nárůst odporu, ale zároveň použitím těchto otvorů se trochu sníží hodnota generovaného přítlaku.

Odtoková hrana slouží k tomu, aby se odsunul proud vzduchu z vnějšku bočnice (vyšší tlak) a nevířil se s nízkým tlakem za křídlem, což ovlivní velikost úplavu za vozem.



Obrázek 22 Konstrukční řešení k oddělení vzduchu s rozdílným tlakem

Břit (gurney flaps) - jedná se o klapku, která je umístěna na horní části odtokové hrany posledního profilu. Po přidání tohoto prvku na profil dojde díky dvěma protisměrným vírům k odtržení proudu vzduchu až za profilem, nikoli na odtokové hraně, čímž se zvýší efektivnost křídla (zvýší se přítlak). Experimentálně bylo zjištěno, že nejlepší účinek má břit, který je natočen o 90° proti proudu proudění a má velikost 5-15 mm.



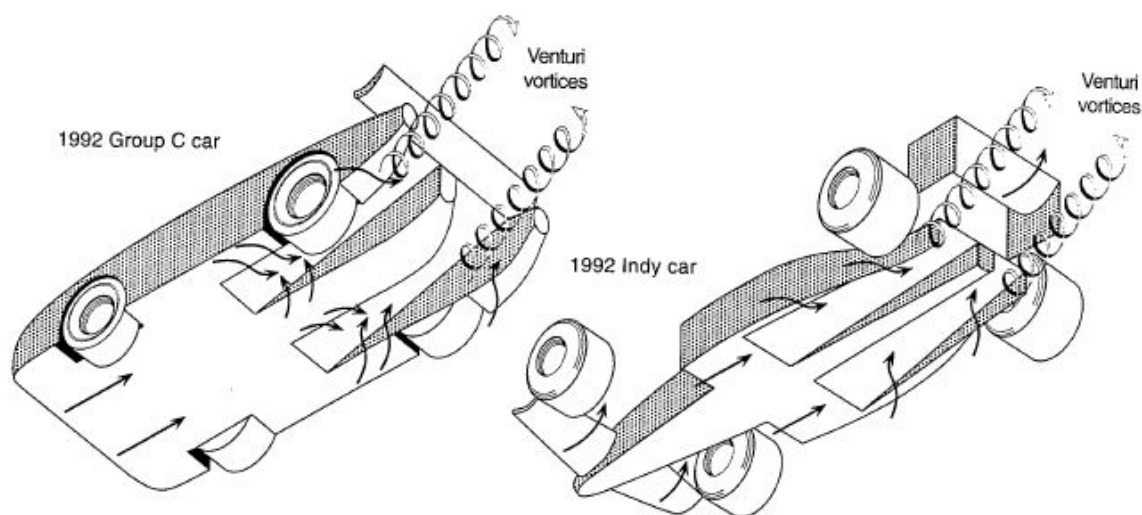
Obrázek 23 Význam břitu a odtokové hrany

1.11.3 Podlaha (underbody)

Jedná se o prvek, u kterého lze získat mnoho přitlaku (až 40% celkového) při malém nárůstu odporu. Pro generování přitlaku podlahy pomáhá vozovka (uzavření kanálu ze dvou stran), toto využití je však ve většině pravidel v motorsportu omezeno minimální světloú výškou vozu. Podlaha funguje ve velmi úzkém spojení s předním křídlem, to rozhoduje o množství vzduchu přivedeného pod vůz. Zadní část podlahy je tvořena difuzorem, který vykonává funkci odsávání vzduchu zpod vozu. Cílem všech konstruktérů pro maximální využití podlahy je dostat co nejvíce vzduchu pod vůz a tam ho co nejvíce zrychlit, což vytvoří přitlačnou sílu.

Difuzor (Diffuser) se skládá z postupně se zvedající zadní části a z několika žeber. Zvednutím zadní části se zlepší odsávání vzduchu zpod auta, tím je možné proud vzduchu pod autem co nejvíce zrychlit. Základním úkolem žeber na difuzoru je udržení od sebe mnoho různých typů proudů vzduchu, které se nacházejí za všemi překážkami na voze (např. turbulence za koly) a mají různé energetické hladiny a rychlosti (neoddělením těchto proudů se zvýší odpor vzduchu).

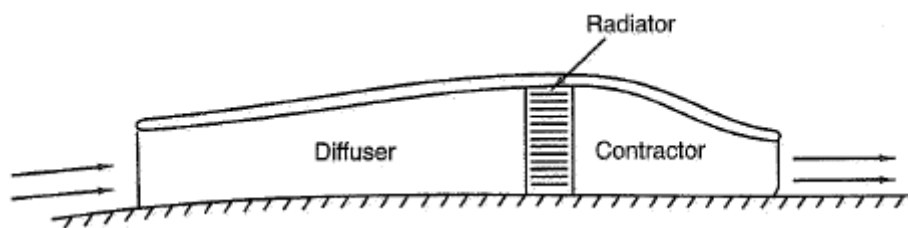
Konstruktéři se neustále snaží zvýšit efektivnost této komponenty. V historii motorsportu je proto možné vidět několik použitých řešení, jako jsou sukně, nebo zařízení k urychlení proudu vzduchu. Jedním řešením byly sukně (skirts), které byly připevněny k bočnicím a dotýkaly se až vozovky, tím prostor pod vozem uzavřely (vznikl uzavřený kanál ze čtyř stran). Toto vylepšení pomáhalo udržet vzduch pod vozem, a to až k difuzoru. Sukně však byly pravidly zakázány a dnes se o podobný jev snaží víry podél vozu, které jsou vytvářeny vírovými generátory na předním křídle. Některé týmy využívaly strhávání proudu vzduchu pod vozem pomocí výfukových plynů (Coandův jev). Což je efektivní, ale bohužel je to závislé na rychlosti těchto plynů. To vedlo k tomu, že po ubrání plynu vůz ztrácel přitlak a tím i ovladatelnost. Tento důvod vedl k zakázání tohoto vylepšení. U některých vozů bylo také možné vidět připevněné ventilátory na difuzor, těmito ventilátory byl odsáván vzduch z difuzoru a tím zvýšena efektivnost podlahy. Nyní je ve většině motorsportu zakázáno používat jakékoliv zařízení k sání nebo odsávání vzduchu zpod vozu.



Obrázek 24 Tvary podlahy závodních vozidel [5]

1.11.4 Bočnice (sidepod)

Bočnice, nazýváme také jako kapsy, jsou části kapotáže, ve kterých se nacházejí zařízení, která potřebují chladit, jako jsou chladiče nebo výfukový systém. Jsou navrhovány tak, aby z vnějšku tvořily aerodynamický (kapkovitý) tvar, na kterém se nebude generovat příliš velký odpor vzduchu. Ke snížení odporu vzduchu zadních kol je vhodné nasměrovat vzduch pomocí tvaru kapes mimo kola. Vnitřní část bočnic je navrhována tak, aby nasměrovala vzduch na chladič (nebo výfukový systém), a mohlo tak docházet k co nejlepšímu přenosu tepla mezi chladičem a okolím. Toho docílíme tím, že přivedený vzduch do otvoru kapsy co nejvíce zpomalíme tak, aby chladičem prošel co nejpomaleji, a za chladičem proud ohřátého vzduchu co nejvíce urychlíme. Tohoto urychleného horkého proudu vzduchu je možné využít u zadního křídla.



Obrázek 25 Tvar kapsy sloužící ke správnému nasměrování vzduchu na chladič [2]

1.12 Pravidla Formula Student 2017

Aerodynamické prvky jsou v pravidlech omezeny prostorem, do kterého nesmí žádná část křidel a podlahy zasahovat. Také je v nich několik omezení z důvodu bezpečnosti pilota a lidí v okolí vozu.

Přední část – žádná část aerodynamických prvků nesmí být:

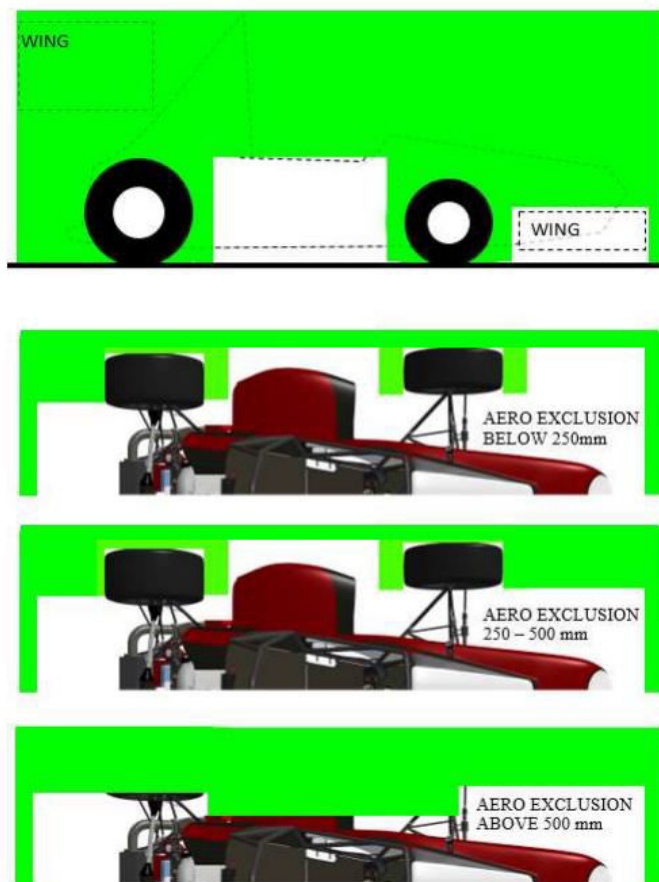
- dále než 700 mm před předními pneumatikami
- širší než vnější strana předních pneumatik (měřeno v ose náboje)

Při pohledu zepředu nesmí být v části před pneumatikami žádná část vyšší než 250 mm od země (měřeno v okamžiku, kdy jsou kola rovně).

Zadní část – žádná část aerodynamických prvků nesmí být:

- dále než 250 mm za zadními koly
- dále dopředu než je opěrka hlavy
- širší než vnitřní strana zadních pneumatik (měřeno v ose náboje)

V bočním pohledu nesmí žádná část zadního křídla nebo aerodynamického zařízení (včetně bočnic) být vyšší než 1,2 m nad zemí (měřeno bez řidiče).



Obrázek 26 Znárodnění oblastí pro návrh aerodynamických komponent povolených pravidly [3]

Minimální rádius na hranách aerodynamických komponent

Všechny horizontální hrany směřující dopředu, u kterých je možný kontakt s osobami v okolí musejí mít minimální rádius 5 mm a všechny vertikální hrany směřující dopředu, musejí mít minimální rádius 3 mm. Tento poloměr musí být dosažen buď tvarem, nebo trvale připevněným prvkem.

Zařízení pro přízemní efekt

Žádné poháněné zařízení nesmí být použito pro sání nebo odsávání vzduchu zpod vozu, kromě ventilátoru, jehož hlavním úkolem je chlazení. Zařízení pro přízemní efekt jsou zakázána.

Stabilita a pevnost aerodynamických komponent

Všechny aerodynamické komponenty musí být navrženy tak, aby upevňovací systém poskytoval dostatečnou tuhost (ve statickém stavu) a během jízdy nesmí komponenty výrazně kmitat a pohybovat se. Techničtí komisaři toto kontrolují tím, že tlačí na aerodynamické komponenty v libovolném směru a v libovolném místě.

Techničtí komisaři mohou testovat aerodynamické komponenty také následovně:

1. Mohou působit silou 200N v kterémkoliv místě a výsledný průhyb nesmí být větší než 25 mm a žádná trvalá deformace větší než 5 mm.
2. Pokud uvidí během jízdy velké nekontrolované pohyby aerodynamických komponent, mohou vystavit vozu černou vlajku a vůz poslat na kontrolu. Ten může být vyloučen, než se problém vyřeší.

Vozidlo musí být s otevřenými koly a otevřeným kokpitem (formulový vůz).

Definice „otevřená kola“:

- a) horních 180°kol musí být bez překážek při pohledu shora,
- b) kola musí být bez překážek při pohledu z boku,
- c) žádné zařízení nesmí být 75 mm před pneumatikami a 75 mm za pneumatikami. [3]

1.13 Dynamické disciplíny Formula Student

Akcelerace

Jedná se o sprint na vzdálenosti 75 m s pevným startem. Z pohledu aerodynamiky je zde důležité co nejvíce snížit odpor vzduchu a mít dostatečnou boční stabilitu.

Skid-pad

Někdy nazývána také jako jízda v osmičce. Tato disciplína prověřuje vozidlo při jízdě v zatáčce. Nejdříve se jedou dvě kola na jednu stranu (po směru hodinových ručiček), poté se přejede do druhé části, kde se směr zatáčení změní (proti směru hodinových ručiček). Zatáčky jsou přesně definované: o vnitřním průměru 15,25 m a šířka trati je 3m. Z pohledu aerodynamiky je zde důležité přenést co největší boční sílu přes pneumatiky a tím zvýšit průjezdovou rychlost.

Autocross

Autocross je technická disciplína spojující akceleraci a zatáčení. Tento technický okruh se skládá z rovinek dlouhých maximálně 60 m, zatáček o různých poloměrech a slalomů. Autocross je jak samotnou disciplínou, tak také kvalifikačí pro závěrečný závod. Z pohledu aerodynamiky je zde kombinace akcelerační a Skid-padu, což znamená, že nejvhodnější je na rovinkách snížit odpor a v zatáčkách maximalizovat přítlak.

Endurance

Jedná se o závěrečný závod na 22 km, který vychází z tratě pro autocross a u kterého dochází k výměně pilotů (každý jede 11 km). Kromě nejlepšího času se zde hodnotí také celková spotřeba vozu.

2. Vůz UWB 03

2.1 Popis aerodynamických komponent

Pro sezonu 2016 se skládal aeropaket vozu UWB 03 z předního křídla, zadního křídla a podlahy vozu. Pro přední a zadní křídlo byl zvolen jednotný typ profilu CH 10 o dvou velikostech a to délce tětivy 150 mm a 400 mm. Vybrání pouze těchto dvou profilů bylo z důvodu náročnosti ručně vyráběných forem.



Obrázek 27 Pohled na vůz UWB 03

Hmotnost	21 kg
Síly (80km/h; $\rho=1,162\text{kg/m}^3$)	
Přítlak	506,73 N
Přítlak přední/zadní	30/70 %
Odpor	350,13 N
C_L	-1,51267 [-]
C_D	1,04519 [-]
Referenční plocha	1,13001 m ²

Tabulka 1 Přehled vlastností aeropaketu vozu UWB 03

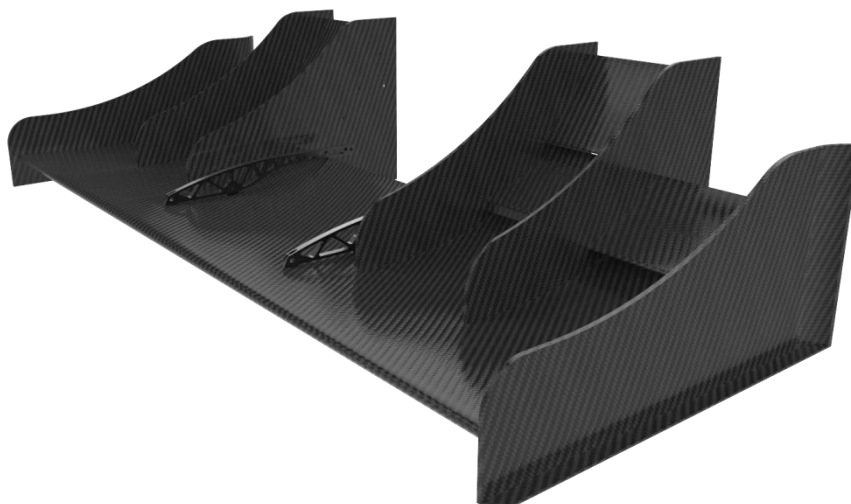
2.1.1 Přední křídlo

Přední křídlo bylo rozděleno do tří základních částí: pro nasměrování vzduchu kolem kol, pro zvýšení přítlaku v přední části a části pro uchycení křídla k rámu.

První část se nachází v prostoru před kolem a skládá se z jednoho velkého profilu a jednoho malého profilu (klapky), ten je v maximální možné poloze, kterou povolují pravidla. Úhel náběhu tohoto profilu byl optimalizován 2D simulací. Tato část je zakončena bočnicí, která se stará o odklon vzduchu mimo kolo.

Prostřední část pro zvýšení přítlaku v přední části vozu se skládá z velkého profilu a dvou malých profilů (klapek), jejichž nastavení bylo také optimalizováno 2D simulací. Tyto klapky mají dvě polohy nastavení, které lze manuálně měnit. Pro nastavení na sprint je cílem co nejvíce snížit odpor klapek, což se provede změnou úhlu náběhu klapek. Klapky jsou k sestavě křídla připevněny pomocí dvou bočních desek, které slouží také k usměrnění proudu vzduchu a vytvoření nekonečného profilu klapek.

Třetí část předního křídla, která slouží k uchycení celého křídla k vozu, se skládá z velkého profilu a dvou držáků, které jsou připevněny k rámu vozu.



Obrázek 28 Pohled na sestavu předního křídla vozu UWB 03

Hmotnost	7,5 kg
Rozměr velkého profilu	400 mm
Rozměr malého profilu	150 mm
Úhel náběhu - velký profil	5°
-malý profil před kolem	30°
-malý profil prostřední (běžný/sprint)	25°/3°
-malý profil horní (běžný/sprint)	35°/3°

Tabulka 2 Přehled vlastností předního křídla vozu UWB 03

2.1.2 Zadní křídlo

Zadní křídlo se skládá z jednoho velkého profilu, dvou malých profilů (klopek) a dvou bočnic. Celé křídlo má možnost nastavení tří poloh natočení ($0^\circ/4^\circ/8^\circ$), které se nastavuje v uchycení držáku zadního křídla. Klapky mají opět možnost nastavení polohy pro dva režimy: a to pro běžný provoz (max C_L) a pro sprint (min C_D). Tvar bočnic vychází z rozložení jednotlivých profilů tak, aby docházelo k usměrnění proudu vzduchu a vytvoření nekonečných profilů.



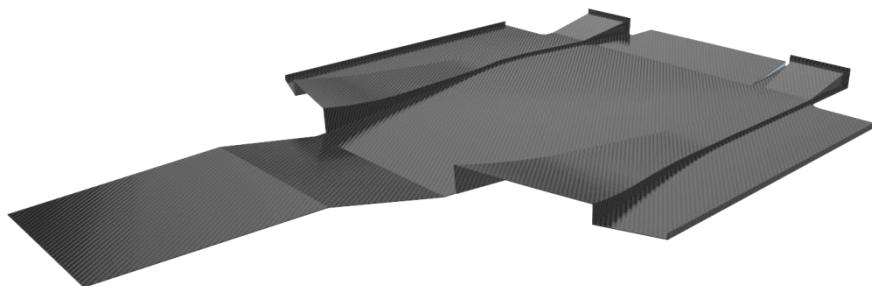
Obrázek 29 Pohled na sestavu zadního křídla vozu UWB 03

Hmotnost	6,5 kg
Rozměr velkého profilu	400 mm
Rozměr malého profilu	150 mm
Úhel náběhu – velký profil	8°
-malý profil prostřední (běžný/sprint)	$35^\circ/3^\circ$
-malý profil horní (běžný/sprint)	$55^\circ/3^\circ$

Tabulka 3 Přehled vlastností zadního křídla vozu UWB 03

2.1.3 Podlaha

Podlaha vozu UWB 03 je vyrobena z jednoho kusu a tvořena třemi oblastmi. Přední část kopíruje spodní část rámu. Prostřední část v místě pod pilotem vychází ze spodní části rámu, na stranách kopírují tvar rámu kanály. Ty jsou tvarované tak, aby nabraly co nejvíce vzduchu a ten poté urychlily. Tato část je za kanály zakončena rovnou plochou ve výšce, jako je plocha pod pilotem. Na bocích prostřední části je podlaha zakončena lemem, který zvyšuje tuhost celého dílu. Kanály z prostřední části přecházejí i do zadní části, kde se zvedají a tím tvoří difuzor. Prostor mezi těmito kanály se také zvedá, toto zvednutí bylo omezeno polohou motoru.



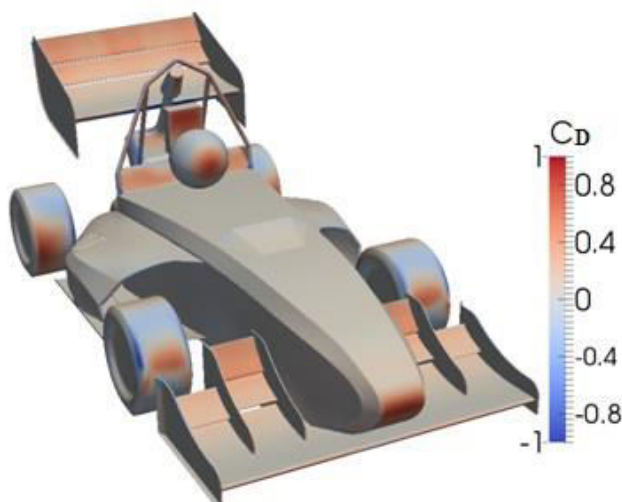
Obrázek 30 Pohled na podlahu vozu UWB 03

2.2 Post-processing CFD analýzy

Před tím, než se budeme věnovat validování výsledků CFD analýzy je důležité vysvětlit, jaké výsledky budeme porovnávat.

2.2.1 Odpor vzduchu

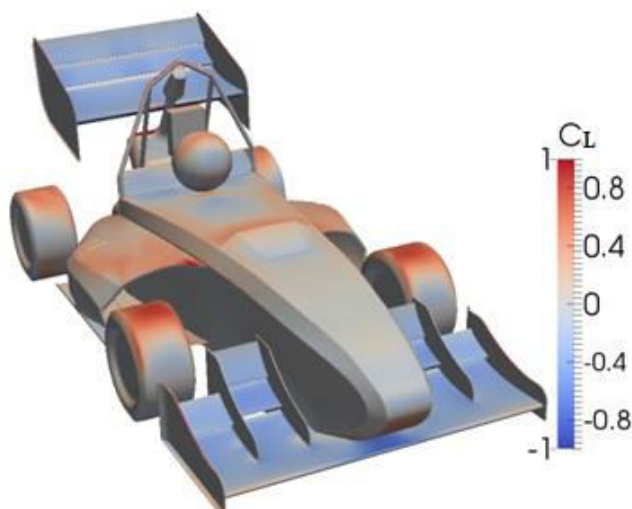
Aby bylo možné zjistit, zda má tlak působící na plochu podíl na nárůstu odporu vzduchu vozidla, musí být brána zřetel na orientaci síly působící na plochu. Při hodnocení varianty z pohledu odporu vzduchu se nechá vykreslit odporová složka síly. Poté, je možné na obrázcích vidět, jaké části vozidla jsou hlavním zdrojem odporu vzduchu (označeny červenou barvou) a s těmito výsledky se dá dále pracovat při návrhu nových komponent.



Obrázek 31 Zvýraznění komponent generující odpor

2.2.2 Přítlak

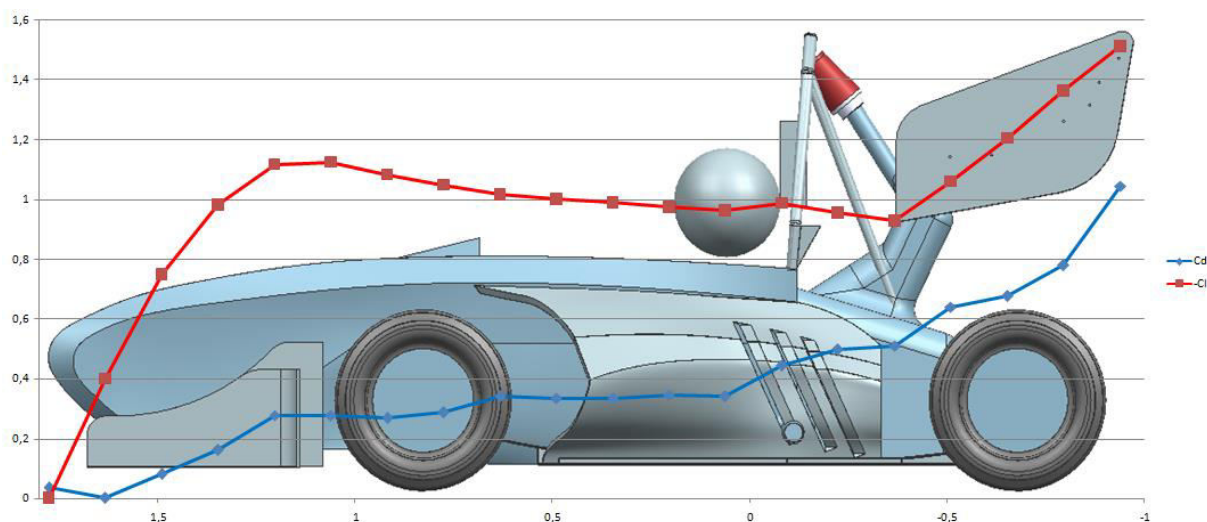
Stejná analýza výsledků může být použita pro přítlak (negativní vztlak) s tím, že se vykreslí vztlaková složka síly. Na obrázcích je poté možné vidět modrou barvou plochy, na kterých je generován přítlak, a červenou barvou plochy, na kterých je generován vztlak.



Obrázek 32 Zvýraznění komponent generující přítlak

2.2.3 Kumulační graf koeficientů

Další možností vyhodnocení výsledků je kumulační graf koeficientů přítlaku a odporu. Model je rozdělen do dvaceti řezů, přičemž v každém řezu jsou vyhodnocovány hodnoty těchto koeficientů. Z těchto výsledků je možné vidět vývoj koeficientů po celém voze. Tento výstup je vhodný při porovnání dvou variant, překrytím kumulačních grafů dvou variant je možné říct jaký vliv a v jakém rozsahu má daná změna na koeficienty odporu a přítlaku.



Obrázek 33 Kumulační graf koeficientů C_L a C_D

2.2.4 Aerodynamické body

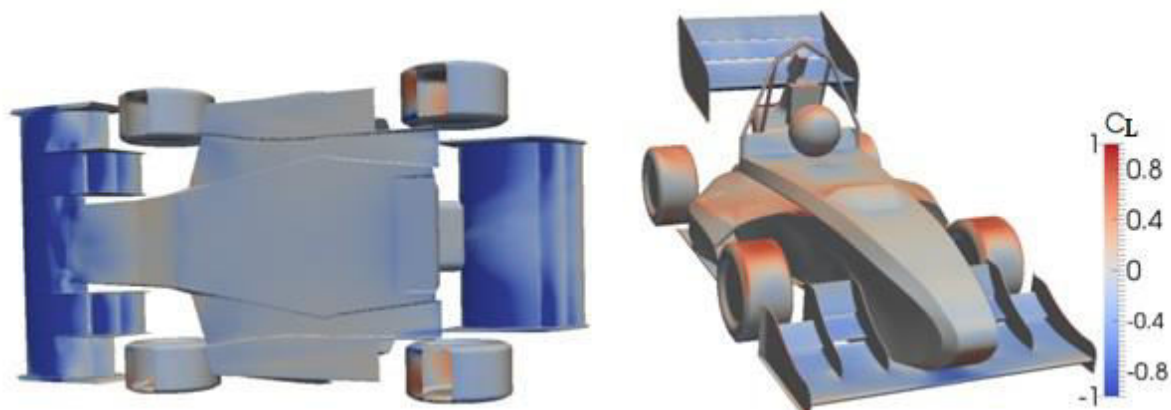
Protože v průběhu práce budou porovnávána různá vylepšení jednotlivých komponent, není možné přepočítat všechny navržené komponenty mezi sebou. Bude k porovnání funkčnosti jednotlivých komponent použita terminologie převzatá z Formule 1, která vychází z bezrozměrných koeficientů (nezávislých na rychlosti) a udává počet bodů přítlaku a počet odporových bodů. (C_x 1,1 = 110 bodů odporu a C_z -1,4 = 140 bodů přítlaku). Pro představu ve Formuli 1 dělá nárůst 10 bodů přítlaku zrychlení vozu 0,3 s na kolo.

2.3 CFD analýza

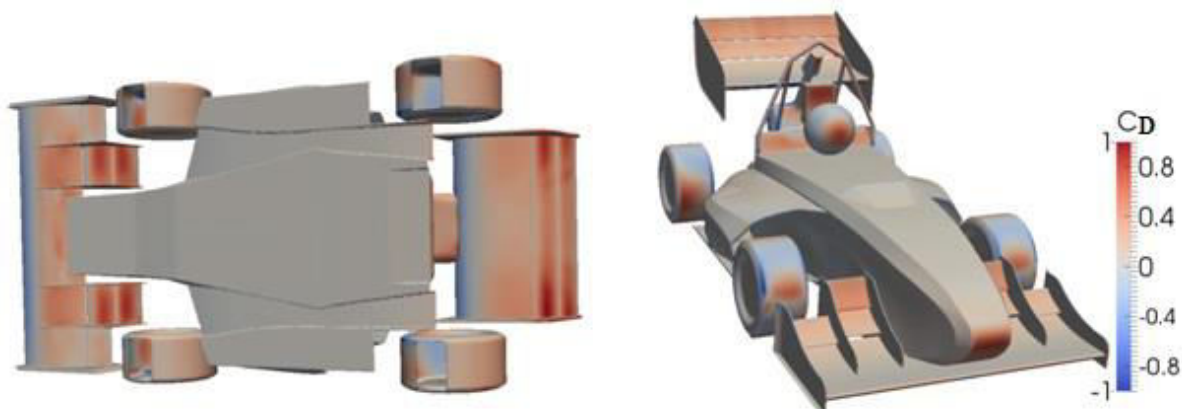
U vozu UWB 03 bylo provedeno šest CFD analýz pro tři různá nastavení (běžný režim, DRS režim a režim bez křidel) a pro dvě rychlosti (15 m/s a 22 m/s). Touto analýzou byly zjištěny hodnoty aerodynamických koeficientů a následně dopočteny síly působící na vozidlo. Z výsledků je možné vidět, že přitlačná křídla měla pozitivní vliv na zvýšení přitlačné síly a to o 228 N při 15 m/s a o 489 N při 22 m/s. Ale zároveň měla negativní vliv na nárůst odporové síly a to o 76 N při 15 m/s a o 176 N při 22 m/s. Jedná-li se o nastavení pro sprint, tak to snížilo odporovou sílu o 47 N při 15 m/s a o 112 N při 22 m/s.

2.3.1 UWB 03 – běžný režim

Jedná se o základní variantu, se kterou vůz absolvoval většinu disciplín během závodů a testování. Tato varianta slouží k maximalizování přitlačné síly. Při této variantě se uvažovalo s čelní plochou 1,13001 m² (změřeno v CAD).



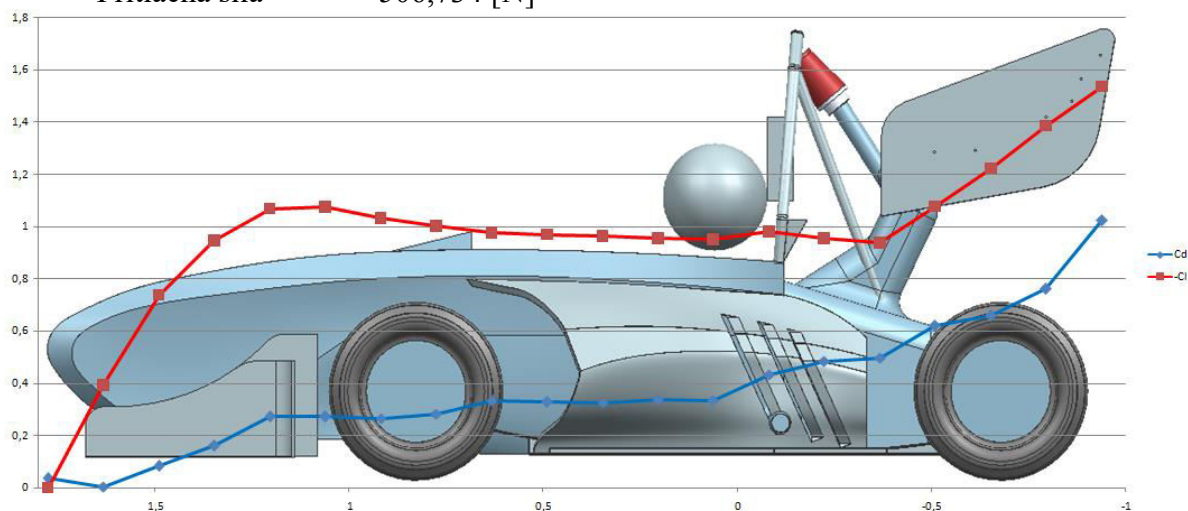
Obrázek 34 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (běžný režim) - C_L



Obrázek 35 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (běžný režim) - C_D

Hodnoty získané CFD analýzou:

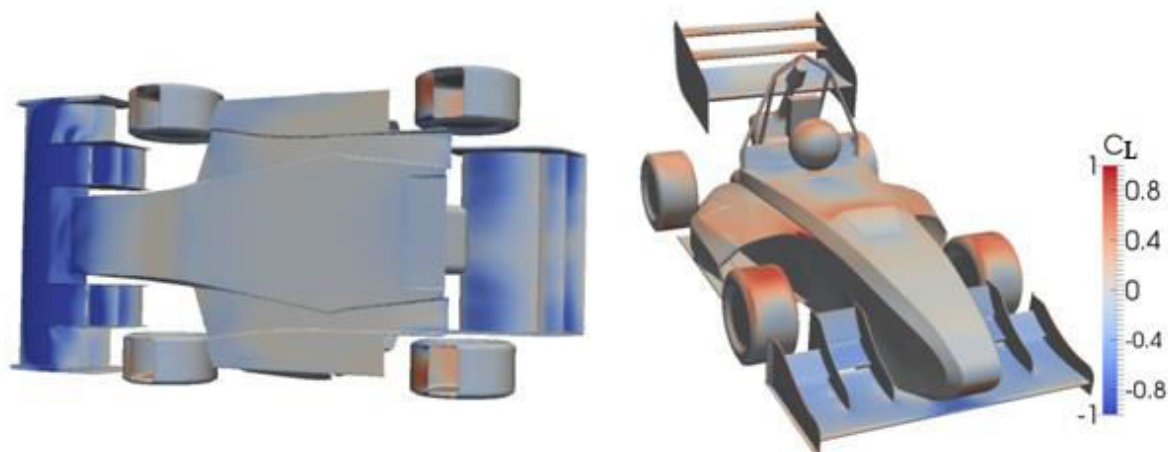
- C_D při 15 m/s 1,02372 [-]
- Odporová síla 159,424 [N]
- C_L při 15 m/s -1,53689 [-]
- Přítlačná síla 239,34 [N]
- C_D při 22 m/s 1,04519 [-]
- Odporová síla 350,131 [N]
- C_L při 22 m/s -1,51267 [-]
- Přítlačná síla 506,734 [N]

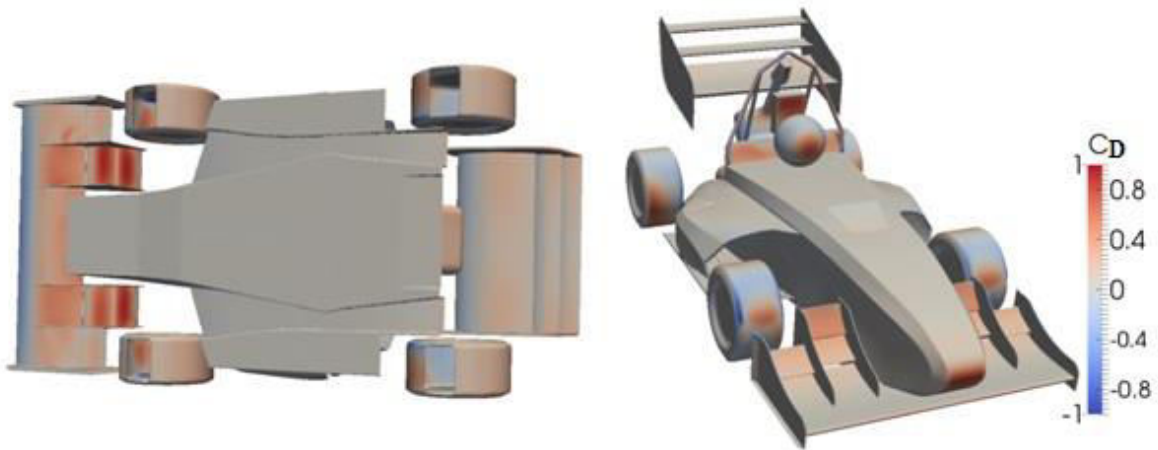


Obrázek 36 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (běžný režim) - kumulační graf

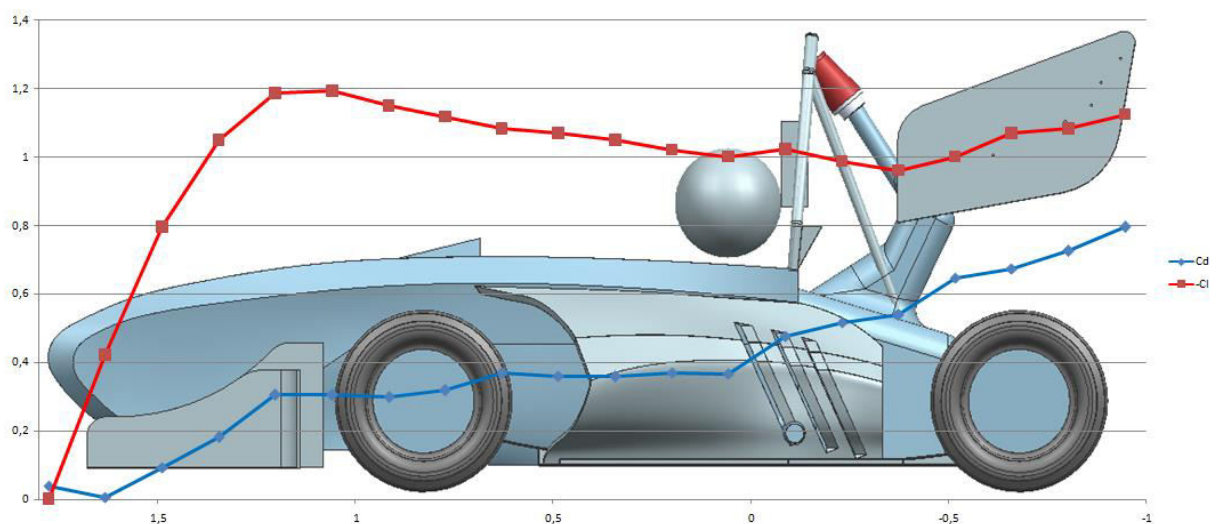
2.3.2 UWB 03 – DRS režim

Jedná se o variantu nastavení pro disciplínu sprint. Tato varianta slouží ke snížení odporu vzduchu, které je možné pouze změnou nastavení úhlu náběhu profilů. V tomto případě se jedná o změnu úhlu náběhu dvou klapek zadního křídla. A bylo zde uvažováno s čelní plochou 1,02218 m².

Obrázek 37 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (DRS režim) - C_L

Obrázek 38 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (DRS režim) - C_D **Hodnoty získané CFD analýzou:**

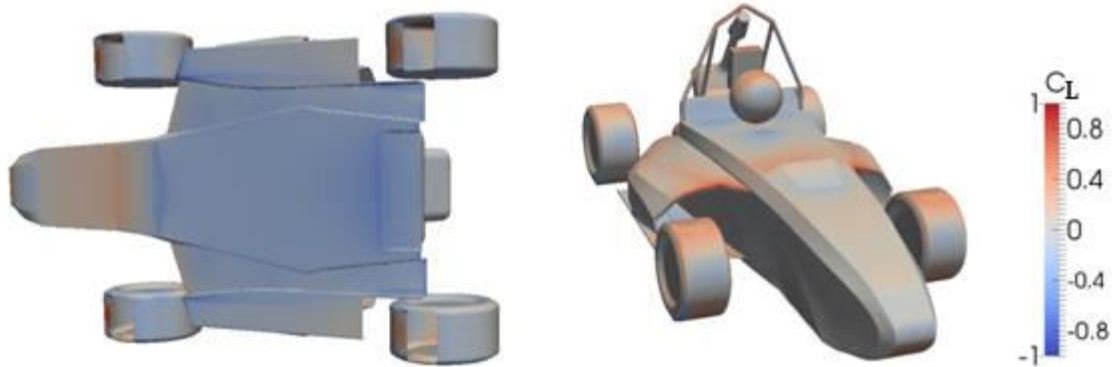
- C_D při 15 m/s 0,79572 [-]
- Odporová síla 112,092 [N]
- C_L při 15 m/s -1,12571 [-]
- Přítlačná síla 158,578 [N]
- C_D při 22 m/s 0,78622 [-]
- Odporová síla 238,24 [N]
- C_L při 22 m/s -1,09889 [-]
- Přítlačná síla 332,992 [N]



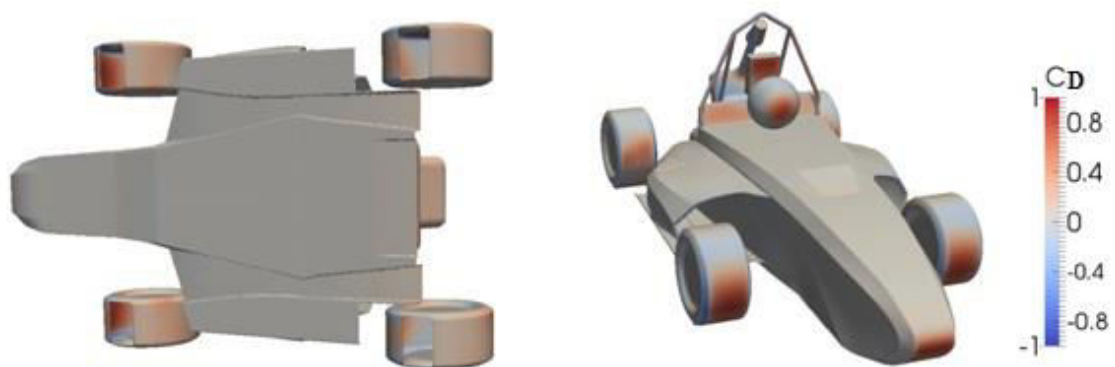
Obrázek 39 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (DRS režim) - kumulační graf

2.3.3 Varianta – bez křídél

Jedná se o variantu, která sloužila jen pro validování CFD výpočtu při testování. U této varianty byla z vozidla odstraněna přítláčná křídla. Bylo zde uvažováno s čelní plochou $0,87648 \text{ m}^2$.



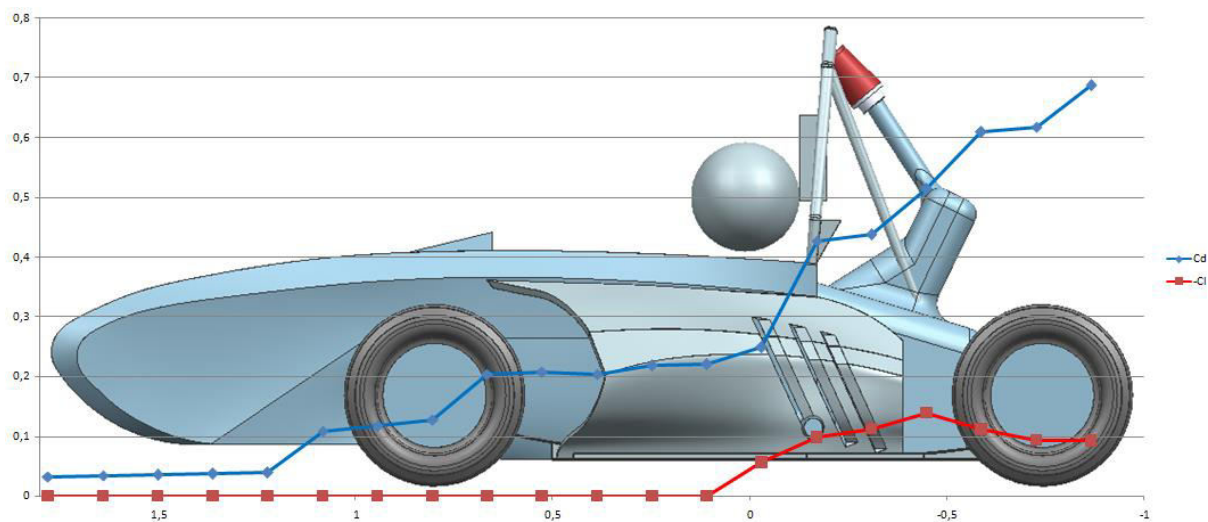
Obrázek 40 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (režim bez křídél) - C_L



Obrázek 41 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (režim bez křídél) - C_D

Hodnoty získané CFD analýzou:

- C_D při 15 m/s 0,68746 [-]
- Odporová síla 83,038 [N]
- C_L při 15 m/s -0,09223 [-]
- Přítláčná síla 11,141 [N]
- C_D při 22 m/s 0,67182 [-]
- Odporová síla 174,561 [N]
- C_L při 22 m/s -0,06652 [-]
- Přítláčná síla 17,2838 [N]



Obrázek 42 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (režim bez křidel) - kumulační graf

2.4 Nedostatky UWB 03

Jako nejvýraznější problém vozu UWB 03 bylo nevyvážení vozidla, k čemuž přispívalo jak špatné nastavení podvozku, tak špatné rozložení aerodynamických sil působících na vozidlo. Velikost sil působících na přední nápravu byla 30% a na zadní nápravu 70% z celkové hodnoty přitlaku. Z důvodu nevyvážení vozu docházelo například při disciplíně SKID-PAD k nedotáčivosti vozu (vůz byl při zatáčení vytahován ven ze zatáčky). Změnou rozložení sil mezi jednotlivými nápravami by bylo možné projíždět zatáčky stabilněji a tudíž vyšší rychlostí.

Druhým problémem bylo odklonění proudu vzduchu od otvoru kapes. Tento problém vznikal na předním křídle, kde klapky odkláněly proud vzduchu až nad kapsu a tím se nemohl dostat vzduch do míst, kde byl na jedné straně chladič a na druhé straně výfukový systém. Nasměrováním vzduchu do kapes by bylo umožněno větší účinnosti chlazení těchto komponent.

Konfigurací předního křídla a rámu bylo způsobeno to, že se nedostávalo takové množství vzduchu pod vůz, kde v podlaze byly navrženy kanály pro distribuci více vzduchu pod vůz a tím zvýšení generovaného přitlaku. Z důvodu malého množství vzduchu nebyl využit potenciál těchto kanálů a jejich složité tvary byly v podlaze zbytečné.

U předního křídla, v oblasti před kolem nebylo využito celého prostoru, který povolují pravidla, a proto nedocházelo k takovému odklonu vzduchu od kol. To by bylo možné zlepšit jiným seskládáním profilů a změnou tvaru bočnice.

Jak již bylo zmíněno v pravidlech, všechny svislé hrany, u kterých by byl možný kontakt s osobami v okolí, musejí mít rádius 3mm. Toto pravidlo bylo splněno nasazením ochranné bužírky, což není vhodné řešení z důvodu udržení mezní vrstvy na ploše bočnice.

U vozu UWB 03 nebylo vůbec řešeno odklonění proudu vzduchu od zadních kol, což způsobovalo generování podstatného množství odporu vzduchu.

U zadního křídla vozu UWB 03 také nebyl využit maximální potenciál, který pro tuto komponentu povolují pravidla. Protože se při závodech Formula Student pohybujeme v malých rychlostech (15-22 m/s), je jediným možným způsobem, jak zvýšit Reynoldsovo číslo, zvětšit rozměr, který bude obtékán. Mezi jednotlivými disciplínami bylo možné přenastavit úhel náběhu klapek (pro snížení odporu vzduchu), ale nebylo možné tuto změnu provádět například během závěrečného závodu (na rovinkách). Při návrhu bočnic zadního křídla se vycházelo pouze z rozložení jednotlivých profilů a ne z využití bočnic na aerodynamickou stabilitu při působení bočního větru a k oddělení zvířeného vzduchu za motorem od vzduchu z okolí.

Umístěním motoru a tvarem rámu nebyl u vozu UWB 03 dostatečný prostor pro větší rozšíření (zvednutí) difuzorového kanálu v zadní části podlahy, což snižovalo efektivnost této komponenty.

Posledním aerodynamickým nedostatkem byl tvar kapes a to především tvar vstupního otvoru kapsy, který tvořila ostrá hrana. A vnitřní prostor kapsy nebyl nijak přizpůsoben nasměrování proudu vzduchu do prostoru chladiče.

3. Validace

Pro zjištění chování vozidla pohybujícího se ve vzduchu je několik způsobů. Tím nejpřesnějším je měření aerodynamických veličin v aerodynamickém tunelu. Toto měření je však náročné (finančně i časově) a pro nás tedy nevyužitelné. Další metodou jsou různá měření (dojezdová zkouška, měření sil v tlumičích) a vizualizace (bavlnky, kouř, barva) v reálných podmínkách na testovací dráze. Toto je vhodné pro ověření funkčnosti jednotlivých komponent, ale pro návrh je to náročné z toho důvodu, že komponenty se musejí vyrábět. Pro návrh je tedy nejvhodnější virtuální modelování proudění neboli - CFD analýza. Proto, aby bylo možné provádět návrh pomocí CFD analýzy, je důležité ověřit si výsledky, které nám z analýzy vychází. A to tak, že se tyto výsledky porovnají s výsledky některého z měření. Pro validování CFD analýzy jsme použili tři rozdílná nastavení vozidla (běžný režim, DRS režim a režim bez křídel).

3.1 Dojezdová zkouška

Jedná se o zkoušku prováděnou pro zjištění odporových sil, které působí na vozidlo. Zkouška je provedena tak, že se vozidlo rozjede na určitou rychlost (v našem případě na 110 km/h), vyřadí rychlostní stupeň a sleduje se zpomalení vozidla jízdními odpory (odpor vzduchu a valivý odpor), popřípadě i ujetá vzdálenost. Poté je možné vyhodnotit požadované parametry jako je například součinitel aerodynamického odporu nebo rameno valivého odporu. Pokud dojezdovou zkoušku provádíme na rovné silnici (v našem případě letiště v Kadově) bez stoupání a za bezvětří, lze odporovou sílu působící na vozidlo popsat (zjednodušeným modelem) jako součet valivého odporu a aerodynamického odporu:

$$F_O = F_V + F_A$$

$$F_O = \xi \cdot \frac{m \cdot g}{R} + \frac{1}{2} \cdot c_D \cdot A_{ref} \cdot \rho \cdot V^2$$

Pro vyhodnocení dojezdové zkoušky je potřeba odvodit závislost, kdy zpomalení vozu bude funkcí rychlosti. Pokud budeme uvažovat hmotnost vozu během jízdy, za konstantní platí:

$$F_O = -m \cdot a \text{ (mínus, protože síla působí proti směru jízdy, jde o zpomalení)}$$

$$F_O = \xi \cdot \frac{m \cdot g}{R} + \frac{1}{2} \cdot c_D \cdot A_{ref} \cdot \rho \cdot V^2$$

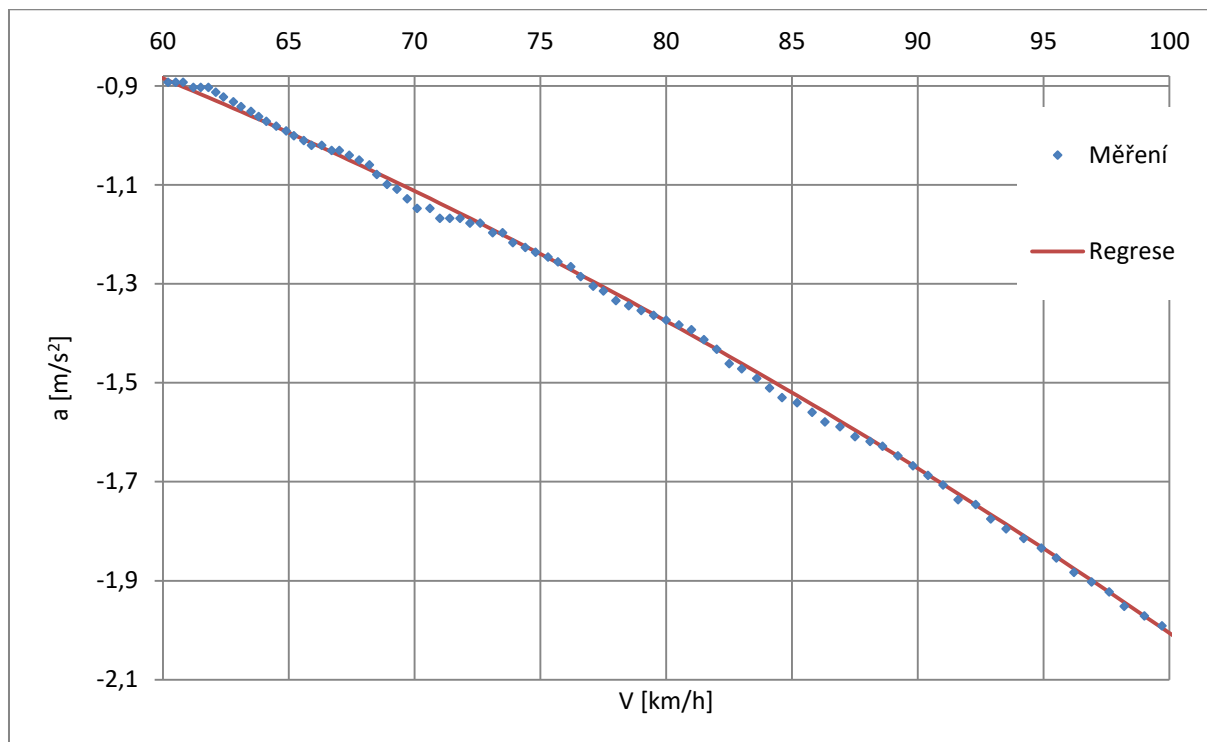
$$-m \cdot a = \xi \cdot \frac{m \cdot g}{R} + \frac{1}{2} \cdot c_D \cdot A_{ref} \cdot \rho \cdot V^2$$

$$a = -\xi \cdot \frac{g}{R} - \frac{1}{2 \cdot m} \cdot c_D \cdot A_{ref} \cdot \rho \cdot V^2$$

$$a = k_0 + k_2 \cdot V^2$$

$$\text{kde } k_0 = -\xi \cdot \frac{g}{R} \quad k_2 = -\frac{c_D \cdot A_{ref} \cdot \rho}{2 \cdot m}$$

Z naměřených telemetrických dat je možné získat hodnoty zpomalení a rychlosti. Poté je možné vykreslit body závislosti zpomalení na rychlosti. Tato množina bodů $[a_i, v_i]$ se pomocí regrese proloží polynomem druhého stupně, ze kterého lze získat hodnoty koeficientů k_0 a k_2 . Z těchto koeficientů je možné dopočítat rameno valivého odporu a součinitel aerodynamického odporu.



Obrázek 43 Vyhodnocení dojezdové zkoušky - regrese naměřených hodnot

$$k_0 = -\xi \cdot \frac{g}{R} \Rightarrow \xi = -\frac{k_0 \cdot R}{g}$$

$$k_2 = -\frac{c_D \cdot A_{ref} \cdot \rho}{2 \cdot m} \Rightarrow c_D = -\frac{2 \cdot k_2 \cdot m}{A_{ref} \cdot \rho}$$

Průběh zkoušky

Měření dojezdové zkoušky bylo prováděno na bývalém letišti v Kadově. Jedná se o plochu o délce kolem 1,2 km a jen s nepatrným sklonem. Z důvodu odstranění chyby, která by mohla vzniknout nepatrným sklonem, byla zkouška měřena v obou směrech a tato hodnota poté zprůměrována. Během měření byly téměř ideální podmínky, bezvětří a teplota lehce pod 20°C. Vozidlo se rozjíždělo na rychlost 110 km/h a poté byla vymáčknuta spojka, vyhodnocení zkoušky bylo pro rychlost od 100 km/h do 60 km/h. Zkouška nebyla prováděna až do zastavení z důvodu snižujícího se vlivu aerodynamického odporu při nižších rychlostech a tím zvýšení chybovosti měření. Dojezd vozidla byl měřen pro tři různá nastavení (běžný režim, režim DRS a režim bez křidel). Hmotnost vozidla včetně řidiče byla stanovena na 340 kg, poloměr kol 232,41 mm čelní plocha: běžný režim (Mode 1) 1,13001 m², režim DRS (Mode 2) 1,02218 m² a režim bez křidel (Mode 3) 0,87648 m², hustota vzduchu byla uvažována 1,225 kg/m³, výsledky poté byly přepočítány pro tři různé rychlosti: Speed 1 - 100 km/h, Speed 2 - 79,2 km/h a Speed 3 - 54 km/h.

			Speed 1 – 100 km/h			Speed 2 – 79,2 km/h			Speed 3 – 54 km/h		
Mode	C_D [-]	ξ [mm]	F_A [N]	F_V [N]	F_O [N]	F_A [N]	F_V [N]	F_O [N]	F_A [N]	F_V [N]	F_O [N]
1.1	1.115	6.018	595.66	86.34	682.00	373.64	86.34	459.97	173.69	86.34	260.03
1.2	1.097	5.395	585.64	77.40	663.04	367.35	77.40	444.75	170.77	77.40	248.17
AVG1	1.106	5.706	590.65	81.87	672.52	370.49	81.87	452.36	172.23	81.87	254.10
2.1	0.913	7.581	440.93	108.76	549.69	276.58	108.76	385.34	128.58	108.76	237.33
2.2	0.942	4.234	455.25	60.74	515.99	285.56	60.74	346.30	132.75	60.74	193.49
AVG2	0.928	5.907	448.09	84.75	532.84	281.07	84.75	365.82	130.66	84.75	215.41
3.1	0.806	5.363	333.95	76.93	410.88	209.47	76.93	286.41	97.38	76.93	174.31
3.2	0.817	4.776	338.26	68.52	406.78	212.18	68.52	280.70	68.64	68.52	167.16
AVG3	0.811	5.069	336.10	72.73	408.83	210.82	72.73	283.55	98.01	72.73	170.74

Tabulka 4 Přehled výsledků z dojezdové zkoušky

V tabulce je přehled výsledků z vyhodnocení dojezdové zkoušky. Je zde součinitel odporu vzduchu, rameno valivého odporu, odpor vzduchu, odpor valení a celková odporová síla působící na vozidlo, při třech různých rychlostech. Tučně jsou zvýrazněné zprůměrované hodnoty jednotlivých režimů, s těmito hodnotami se dále pracuje při srovnání s hodnotami získanými CFD analýzou. Toto srovnání je v následující tabulce, ve které jsou tři různé režimy (301,302,303 a 304,305,306) pro dvě rychlosti (54 km/h a 79,2 km/h). V tabulce je přehled získaných hodnot k jednotlivým variantám, jako je odpor vzduchu z dojezdové zkoušky (F_{AZK}), odpor vzduchu z CFD analýzy (F_{ACFD}), rozdíl těchto dvou hodnot, součinitel odporu vzduchu získaného z dojezdové zkoušky (C_{DZK}), součinitel odporu vzduchu získaného z CFD analýzy (C_{DCFD}), opět rozdíl těchto dvou hodnot a na závěr porovnání odlišnosti měření a CFD analýzy v procentech.

Varianta	F_{AZK} [N]	F_{ACFD} [N]	$\Delta ZK-CFD$ [N]	C_{DZK} [-]	C_{DCFD} [-]	$\Delta ZK-CFD$ [-]	$\Delta ZK-CFD$ [%]
301	172.23	159.42	12.81	1.106	1.024	0.082	7.44
302	130.66	112.09	18.57	0.928	0.796	0.132	14.21
303	98.01	83.04	14.97	0.811	0.687	0.124	15.27
304	370.49	350.13	20.36	1.106	1.045	0.061	5.50
305	281.07	238.24	42.83	0.928	0.786	0.141	15.24
306	210.82	174.56	36.26	0.811	0.672	0.140	17.20

Tabulka 5 Porovnání výsledků reálného měření (dojezdové zkoušky) s virtuálním výpočtem (CFD analýza)

Varianta 301 = Mode 1 při Speed 3, varianta 302 = Mode 2 při Speed 3, varianta 303 = Mode 3 při Speed 3, varianta 304 = Mode 1 při Speed 2, varianta 305 = Mode 2 při Speed 2, varianta 306 = Mode 3 při Speed 2.

Z tohoto porovnání virtuálního výpočtu a experimentálního měření je vidět, že se tyto dva přístupy trendově rovnají. Pokud se na voze změní nastavení, tak se výsledky obou přístupů pohybují stejným směrem, tudíž je možné s takto nastavenou CFD analýzou řešit tento typ úlohy. Ze závěrečného procentuálního zhodnocení je vidět, že jsme se nejvíce přiblížili u varianty 304 (5,5 %) a nejvíce jsme se oddálili u varianty 306 (17,2 %). Tyto odchylky je možno přisoudit tomu, že se nejednalo o laboratorní prostřední, ale dojezdová

zkouška se prováděla za reálných podmínek. Model do CFD analýzy vstupoval částečně zjednodušený a k odchýlení mohlo dojít i zjednodušenou formou vyhodnocování dojezdové zkoušky.

Další měřenou zkouškou pro validování výsledků CFD analýzy je měření síly v tlumičích. O tuto zkoušku jsme se také pokoušeli. Bohužel kvůli špatně zvolené měřicí technice se tato zkouška nepovedla vyhodnotit a její průběh zde není uveden. U této zkoušky se na rozdíl od dojezdové zkoušky zjišťuje hodnota svisle působící síly (přítlaku) na vozidlo. Jelikož nemáme hodnoty přítlaku validované, vycházíme z hodnot, které vycházejí z CFD analýzy, u které byly validované alespoň hodnoty odporu vzduchu.

3.2 Vizualizace

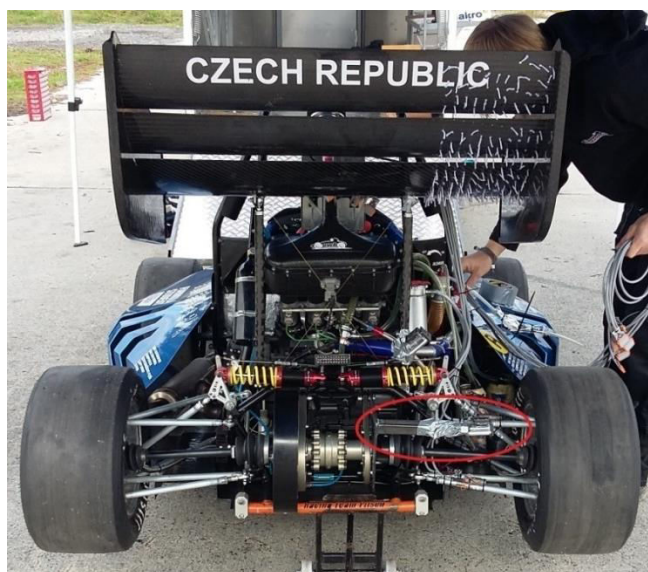
Dalším způsobem validace je pomocí vizualizace. U tohoto způsobu se nedají změřit konkrétní hodnoty sil působících na objekt, ale díky vizualizaci je možné se dozvědět, jak se chová vzduch v okolí sledovaného objektu. Díky tomuto přístupu je možné získat nejvíce informací o tom, kde se začne mezní vrstva odtrhávat od povrchu a jak velký je úplav. K tomu lze použít techniku na základě bavlnek, kouře nebo barvy. Tyto metody se většinou monitorují nějakým záznamovým zařízením a lze je poté porovnat s výsledky CFD analýzy. Na voze UWB 03 jsme použili techniku bavlnek a kouře. Vizualizaci pomocí barvy jsme nepoužili z obavy agrese této látky na nalakovaný povrch vozu. Ve Formuli 1 je tato metoda vidět v podobě zelené barvy, která je nanesená například na povrch profilu křídla, barva během pohybu vozidla na povrchu zaschne, nebo se z povrchu odstraní. To začíná tam, kde dochází k odtržení mezní vrstvy. Toto místo je poté možné porovnávat s výsledky CFD analýzy. Tuto zelenou barvu lze nahradit například rozdrčenou křídou rozpuštěnou v kerosinu, který se rychle odpaří a dojde k zaschnutí barvy na povrchu.



Obrázek 44 Vizualizační metoda pomocí barvy

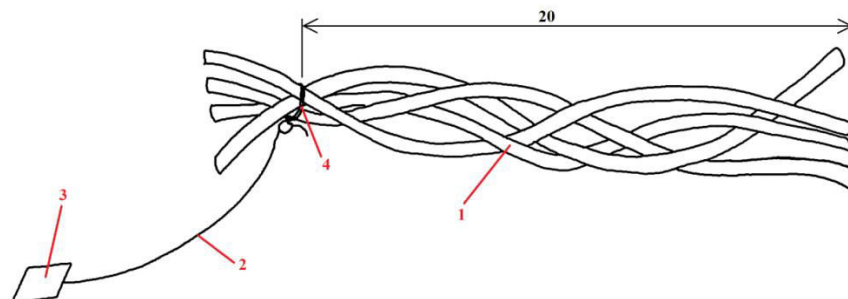
3.2.1 Bavlnky

Jedná se o vizualizační metodu, při které jsou na sledovaný povrch připevněny bavlnky, které proud vzduchu kolem obtékaného objektu unášejí a tím je možné chování tohoto proudu znázornit. Tato metoda nám ukazuje, jak se chová vzduch v blízkosti mezní vrstvy, v jakých místech dochází k odtržení mezní vrstvy a také lze z pohybu bavlnek poznat začátek víru. V našem případě byly bavlnky připevněny na část zadního křídla a během jízdy byly monitorovány kamerou (označenou na fotce). Poté se ze zaznamenaného materiálu nastříhaly jednotlivé obrázky, ze kterých je vidět pohyb bavlnek. Tato zkouška byla prováděna za konstantní rychlosti 80 km/h.



Obrázek 45 Pohled na vůz UWB 03 před provedením vizualizace pomocí bavlnek

Pro správnou funkci bavlnek nelze pouze nastříhané bavlnky nalepit na sledovaný povrch. Je důležité, aby se mohly bavlnky (1) pohybovat všemi směry. To je umožněno tím, že se bavlnka (cca 22 mm) na jednom konci uváže reznou nití (2), tento spoj je pojištěn sekundovým lepidlem (4), celý kus je poté pomocí hliníkové lepicí pásky (3) připevněn k povrchu sledovaného objektu. Bavlnky nejsou na povrchu křídla nahodile, ale jsou umístěny pravidelně 20 mm vedle sebe 30 mm za sebou a sousedící bavlnky jsou odstupňované o 3 mm, čímž je možné určit přesnou polohu jednotlivých bavlnek. Na povrch křídla bylo nalepeno kolem 250 ks bavlnek. Materiál hlavní části musí být dostatečně velký a lehký, aby byl snadno unášen vzduchem, ale zároveň nesmí proud kolem objektu ovlivňovat. Délka rezné nitě je co nejkratší, aby bylo možno znázornit chování vzduchu co nejbližší u povrchu, ale zároveň musí umožnit pohyb ve všech směrech.

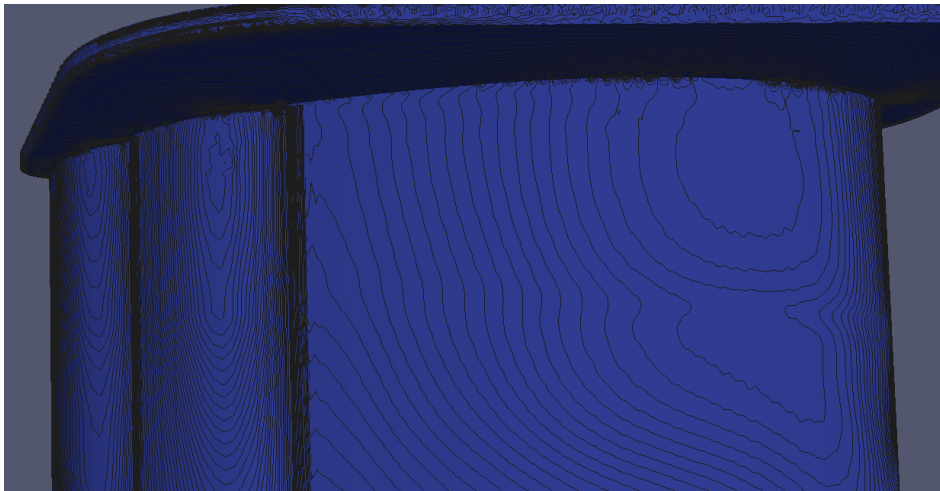


Obrázek 46 Nákres jednoho kusu bavlnky

Výsledné obrázky chování proudu vzduchu v blízkosti povrchu zadního křídla je možné porovnat a zjistit, zda se CFD analýza chová stejně jako experimentální měření. Z obrázků je vidět, že v našem případě se CFD analýzou k reálnému měření přibližujeme a tudíž můžeme pomocí této analýzy počítat tento typ úlohy.



Obrázek 47 Snímek z měření - vizualizace pomocí bavlnek (při rychlosti 80 km/h)



Obrázek 48 Snímek z CFD analýzy

Vizualizace pomocí bavlnek probíhala bez problémů, zaznamenané výsledky lze dobře použít k validaci. Uvedený způsob výroby jednotlivých kusů bavlnek, byl spolehlivý a při jízdě nedocházelo ke ztrátě bavlnek. S touto metodou vizualizace se bude pokračovat i na nové verzi vozu.

3.2.1 Kouř

Kouř se používá pro vizualizaci proudění, které na rozdíl od metody s bavlnkami, je daleko od povrchu objektu. Kouř slouží k detekci vírů a oblasti oddělení proudu. Jako zdroj kouře byl použit generátor kouře, který musel být umístěn v souběžně jedoucím automobilu a pomocí silikonové hadice dopraven před sledovanou část vozu. Zkouška probíhala při konstantní rychlosti 80 km/h. Výsledky byly zaznamenávány na kameru připevněnou k rámu vozu (podobně jako u bavlnek), na kameru stojící na ploše letiště a na kameru v souběžně jedoucím automobilu.

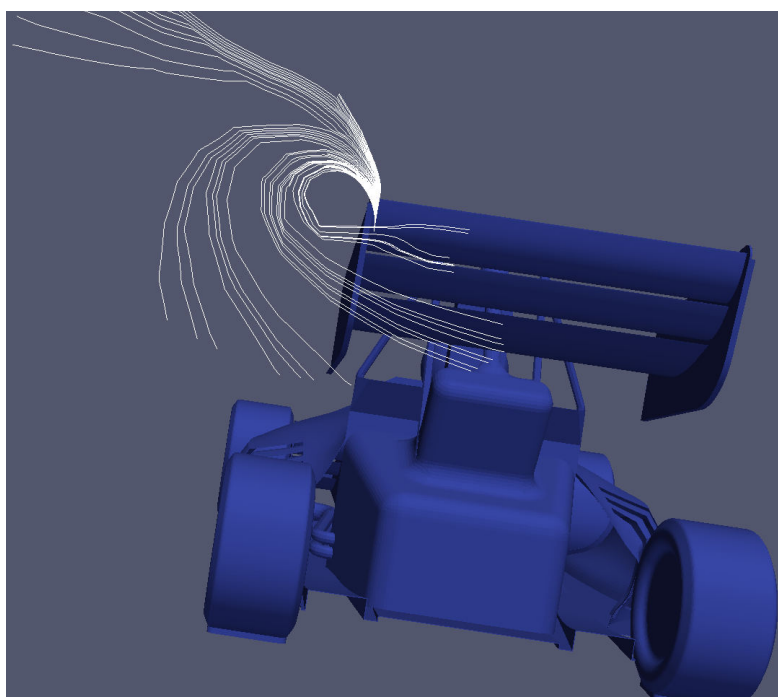


Obrázek 49 Pohled na průběh testování - vizualizace pomocí kouře

Tento experiment byl velmi náročný na provedení, hlavně z toho důvodu, že generátor kouře musí být napájen ze zdroje 230 V, k čemuž nám sloužila elektrická centrála umístěná v souběžně jedoucím automobilu. Výsledky zaznamenané na kamery byly téměř nepoužitelné, protože bílý kouř splýval s oblohou a s povrchem letiště. Tento experiment se hodí spíše do laboratorních podmínek (aerodynamického tunelu) a pro jeho další použití při venkovním testování bude potřeba upravit několik věcí (například barva kouře a lepší pozice kamer). Co je možné z tohoto experimentu použít, je tvorba víru na vnitřní straně bočnice. Z experimentu a z CFD analýzy je vidět podobnost tohoto jevu, což je opět vhodné k posouzení správnosti nastavení CFD analýzy.



Obrázek 50 Snímek z měření - vizualizace pomocí kouře (při rychlosti 80 km/h)



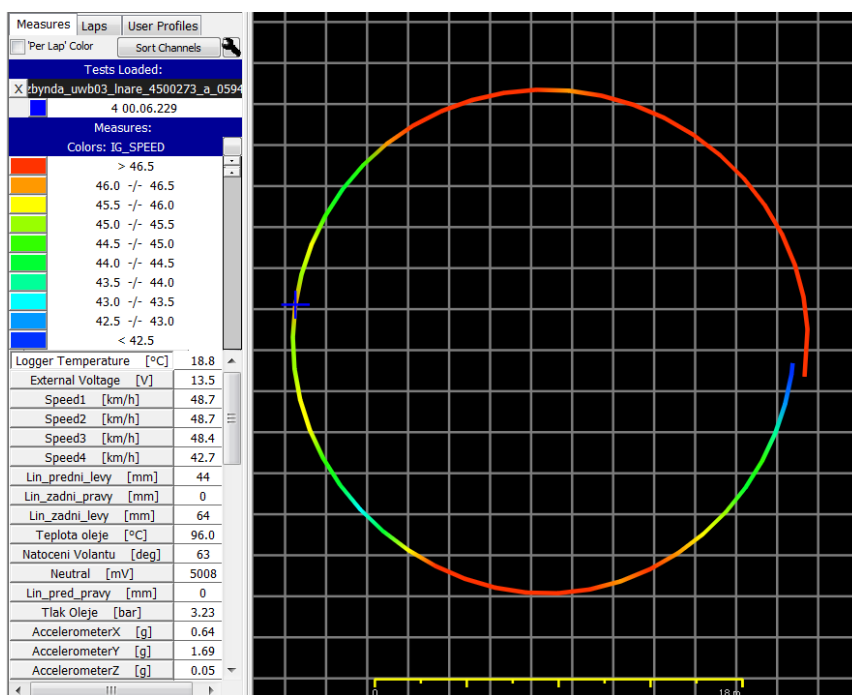
Obrázek 51 Snímek z CFD analýzy

4. Návrh

Při návrhu aerodynamických prvků pro vůz UWB 04 budeme vycházet z modelu UWB 03 a z jeho nedostatků, které se pokusíme vyřešit. Budeme se zabývat geometrií přitlačných křídel, podlahy a bočnic vozu. Na začátku návrhu se budeme zabývat výběrem tvaru profilu, poté bude následovat 2D simulace konfigurace vzájemné polohy profilů vůči sobě a na závěr pomocí CFD analýzy budeme hodnotit přínos jednotlivých komponent na celý model vozu.

4.1 Podmínky pro návrh

Stanovení podmínek pro návrh vychází z telemetrických dat naměřených při testování vozu UWB 03. Pro návrh aerodynamických komponent byla vybrána rychlost, kterou vůz dosahoval při simulaci disciplíny Skid-pad (49 km/h), ke které byla připočtena hodnota 10%. Tato hodnota vzešla z požadovaného cíle zlepšení na které bychom se s novým vozem chtěli dostat. Průměrné rychlost 49 km/h dosahoval vůz UWB 03 také při závěrečné disciplíně Endurance. Aerodynamické prvky pro sezonu 2017 jsou tedy navrhovány na rychlost 54 km/h (15 m/s).



Obrázek 52 Data naměřená při průjezdu jednoho kola disciplíny Skid-pad

4.2 Výběr profilu

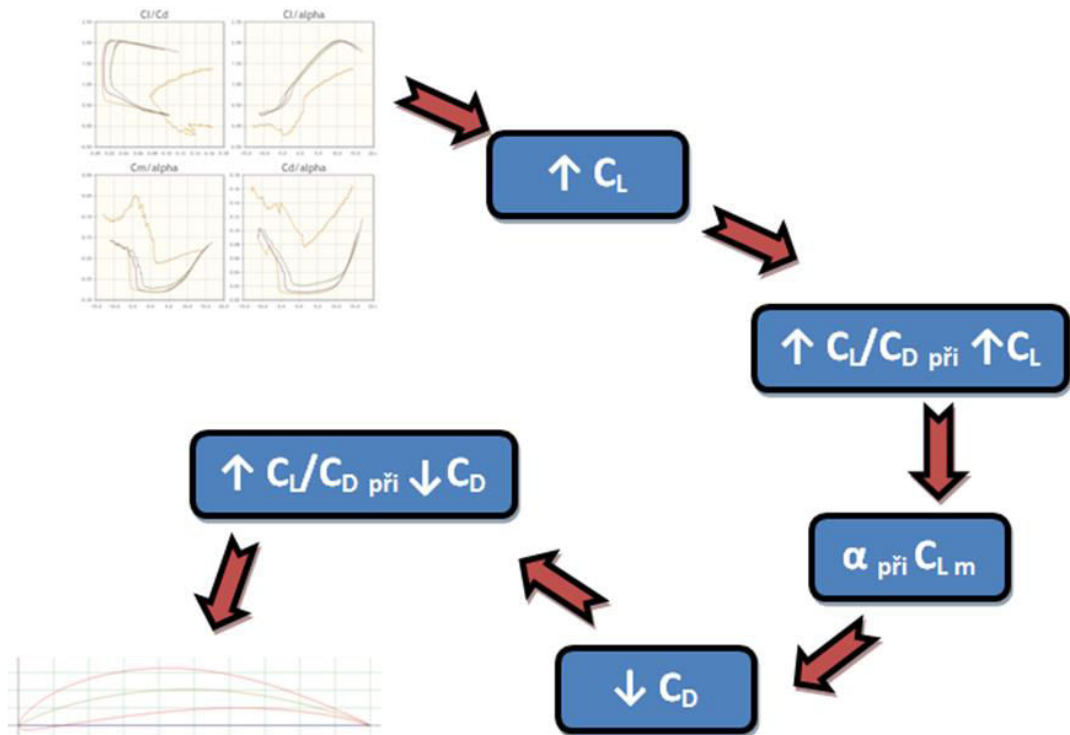
Na začátku návrhu aerodynamických komponent je důležité určit tvar, ze kterého se jednotlivé komponenty budou skládat. Profil byl vybírán z kategorie profilů „Heavy-Lift Cargo Planes“. Tato kategorie získává na popularitě v soutěžích modelů SAE Aero-Design Competition a také u bezpilotních dopravních prostředků (UAV), u kterých je často potřeba nosit s sebou relativně těžký náklad. Jejich let často probíhá ve výšce do 100 ft nad hladinou moře a to při rychlosti 14 -22 m/s. Právě profily vhodné pro tyto potřeby jsou vhodné také pro zajištění přtlaku při nízkých rychlostech, kterých dosahují monoposty Fomula Student při disciplíně Endurance (závod na 22 km). [8]

Profily vhodné pro tyto podmínky:

- CH 10-48-13
- FX 63-137
- FX 74-CL5-140 MOD
- M06-13-128
- S1210
- S1223
- E423

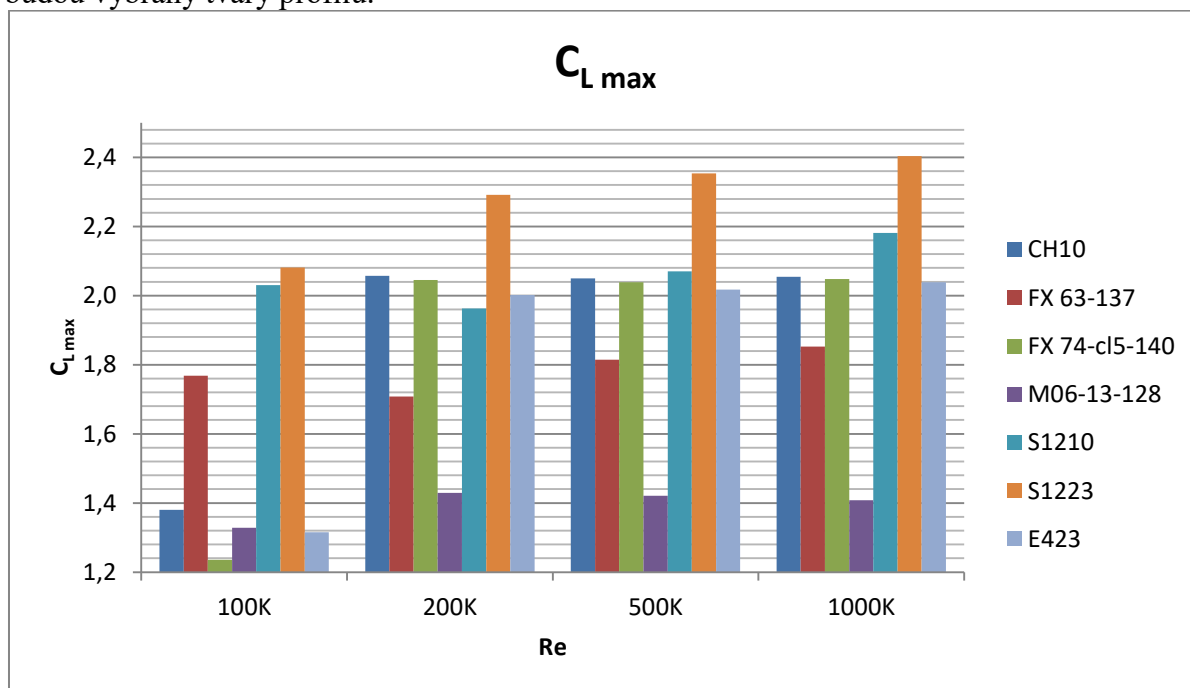
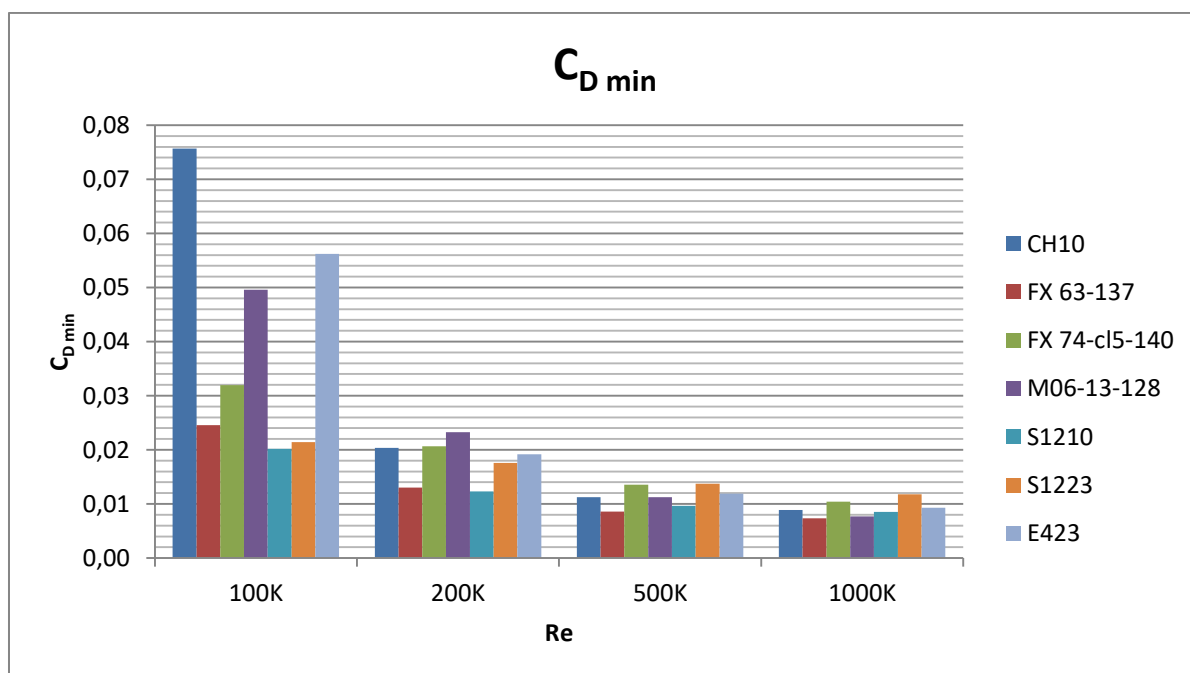
$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{1,23 \cdot 15 \cdot 0,1}{1,79 \cdot 10^{-5}} = 103\,072 \text{ (pro } L = 0,5 \text{ m } \Rightarrow Re = 515\,363)$$

4.2.1 Hodnocení profilů



Obrázek 53 Kritéria výběru nejvhodnějšího typu profilu

K výběru nejvhodnějšího profilu byla využita online databáze leteckých profilů (airfoiltools.com), ze které jsme získali informace o jednotlivých profilech. Nejdříve je nutné spočítat Reynoldsovo číslo, abychom věděli, jaké křivky u jednotlivých profilů pro výběr zvolit. Naším hlavním cílem je z geometrie profilu získat co největší přítláčné síly, následuje aerodynamická efektivnost (C_L/C_D) při maximálním součiniteli přítlaku. Poté o výběru rozhoduje vyrovnanost úhlu náběhu pro různá Reynoldsova čísla (při různých rychlostech). Předposledním kritériem je co nejnižší součinitel odporu pro nastavení na sprint a na závěr aerodynamická efektivnost, při minimálním součiniteli odporu. Na základě tohoto hodnocení budou vybrány tvary profilu.

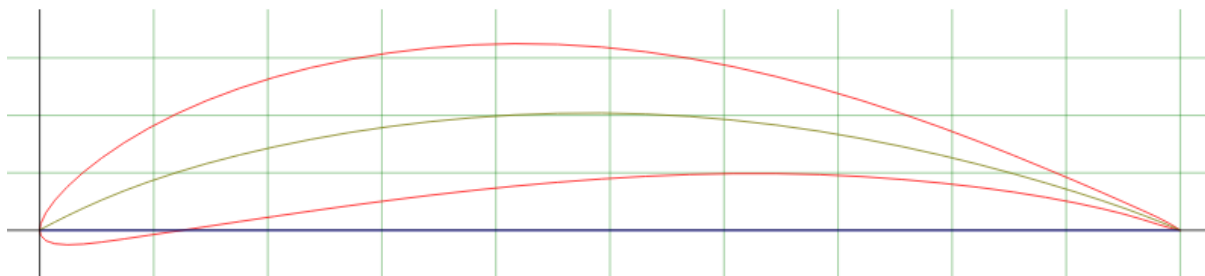
Obrázek 54 Porovnání jednotlivých typů profilů - $C_{L \max}$ Obrázek 55 Porovnání jednotlivých typů profilů - $C_{D \min}$

Na základě výše uvedeného postupu hodnocení vhodnosti profilu byly vybrány dva typy profilů. Jedná se o profil CH 10, který byl použit již na voze UWB 03 a profil S 1223, na němž je možné generovat největší přítláčné síly ze všech uvedených profilů. Jelikož v letošním roce nebudeme formy vyrábět ručně, ale budou se obrábět pomocí robota, je možné vybrat řešení s více typy profilů a s různými délkami tětív profilů.

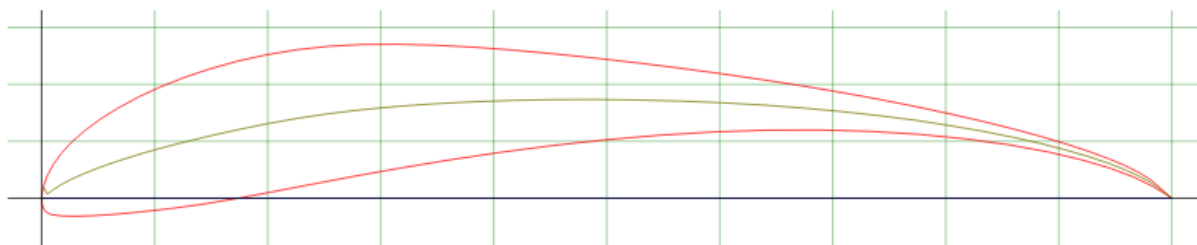
Profil CH 10	Re	100K	200K	500K	1000K	Profil S1223	Re	100K	200K	500K	1000K
	$C_{L\max}$ [-]	1,38	2,058	2,05	2,054		$C_{L\max}$ [-]	2,081	2,292	2,353	2,403
	$\alpha - C_{L\max}$ [°]	14,5	10,75	11	10,5		$\alpha - C_{L\max}$ [°]	9,75	13	14	14
	$C_D - C_{L\max}$ [-]	0,164	0,033	0,028	0,024		$C_D - C_{L\max}$ [-]	0,056	0,043	0,041	0,037
	$C_L / C_D - C_{L\max}$ [-]	8,433	63,1	73,99	86,76		$C_L / C_D - C_{L\max}$ [-]	37,09	53,2	57,3	64,28
	$C_{D\min}$ [-]	0,076	0,02	0,011	0,009		$C_{D\min}$ [-]	0,021	0,018	0,014	0,012
	$\alpha - C_{D\min}$ [°]	1,5	1	0,75	3		$\alpha - C_{D\min}$ [°]	-0,75	-0,25	0	-1
	$C_L - C_{D\min}$ [-]	0,749	1,281	1,315	1,551		$C_L - C_{D\min}$ [-]	1,071	1,155	1,185	1,077
	$C_L / C_D - C_{D\min}$ [-]	9,9	63	117	175		$C_L / C_D - C_{D\min}$ [-]	49,9	65,7	86,25	91,59

Tabulka 6 Přehled vlastností nejvhodnějších profilů

Geometrie těchto dvou profilů byla použita pro zjištění optimálních délek tětív a vzájemné polohy profilů pro jednotlivé oblasti přítláčných křídel. Tvar jednotlivých profilů byl vygenerován z programu Profili 2 (jedná se o databázi profilů) ve formátu DXF a přenesen do programu Siemens NX.



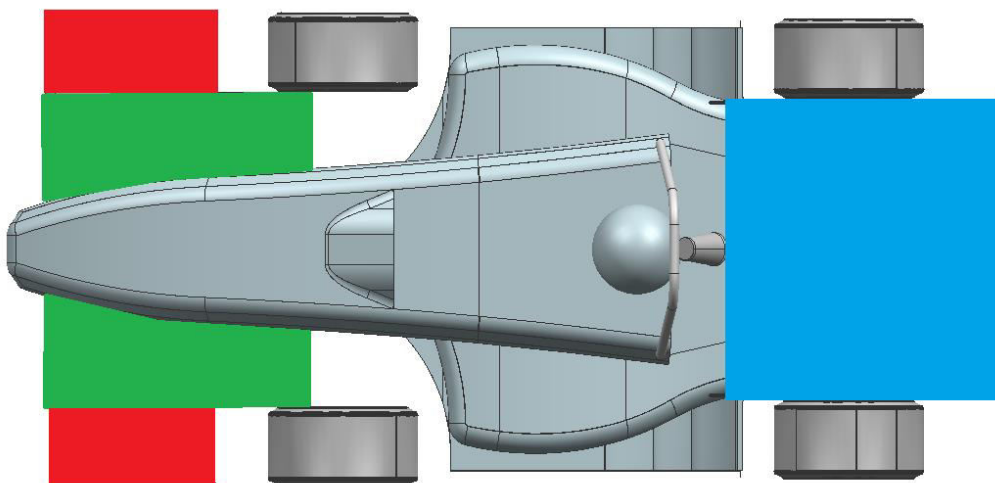
Obrázek 56 Geometrie profilu CH 10



Obrázek 57 Geometrie profilu S 1223

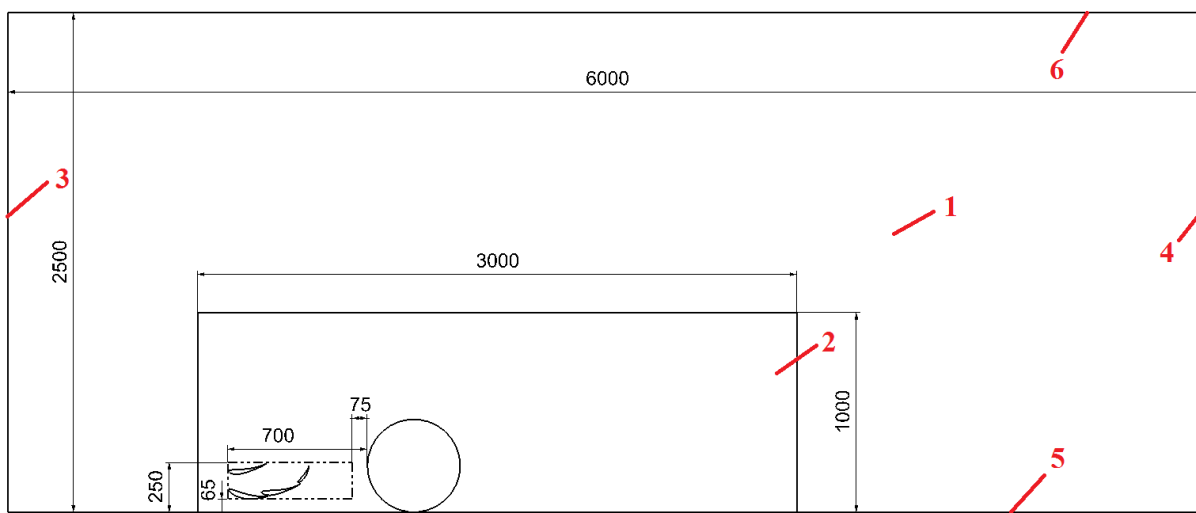
4.3.2D simulace

Úkolem této simulace je nakonfigurovat vybrané typy profilů, určit jejich vzájemnou polohu a optimální velikosti pro danou oblast. Na základě výsledků této simulace se budou volit nastavení křídel pro 3D simulaci. Model pro 2D simulace byl rozdělen na tři oblasti, první oblastí byla část předního křídla před kolem (červená). Druhou oblastí byla část předního křídla mezi kolem a kapotou (zelená). Poslední třetí oblastí byla oblast zadního křídla (modrá). K řešení tohoto typu úlohy budeme používat turbulentní řešič K-Omega.



Obrázek 58 Rozdělení jednotlivých oblastí vozu pro 2D simulace

Tato simulace byla řešena v programu Siemens NX, jelikož v tomto programu byla vstupní geometrie modelována, bylo snazší provádět následnou optimalizaci. Model pro tuto simulaci byl rozdělen na dvě části vnitřní (2) a vnější (1) a to z důvodu menší velikosti elementů v blízkosti řešené oblasti než v okolí. V modelu jsou další důležité oblasti, na kterých bude v simulaci zadána některá z okrajových podmínek. Tyto oblasti jsou vstup (3), výstup (4), vozovka (5) a horní stěna (6). U simulací proudění je důležité mít v modelu i podstatnou část okolí sledovaného objektu, což je vidět na obrázku.



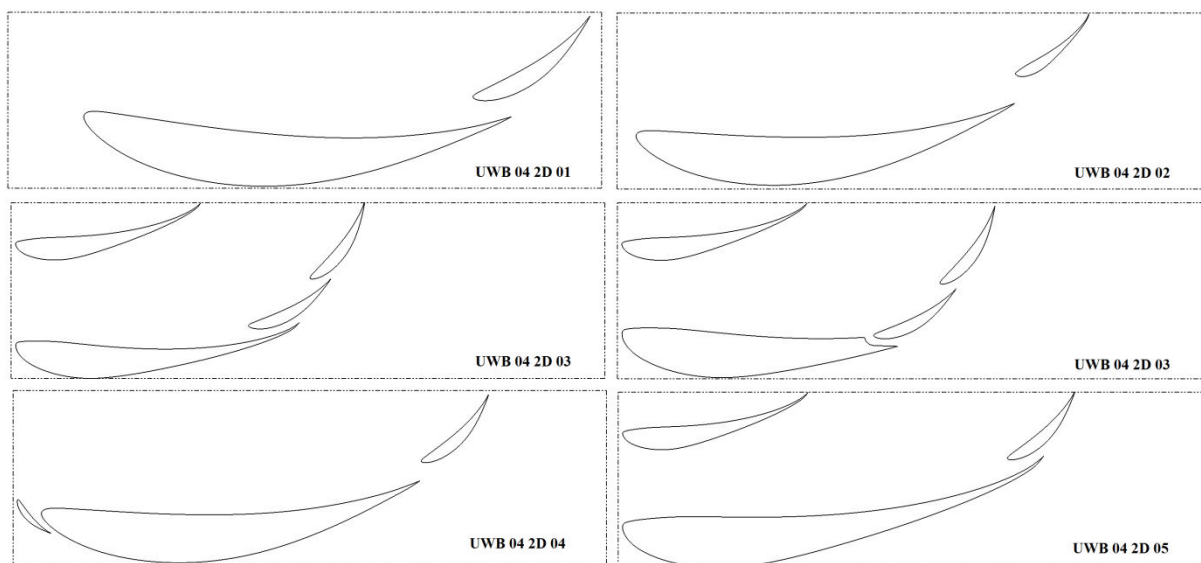
Obrázek 59 Popis jednotlivých oblastí při řešení 2D simulací

4.3.1 Oblast předního křídla před kolem (červená)

Jedná se o první řešenou oblast na předním křídle. Tato část vychází z funkce předního křídla nasměrovat co nejvíce vzduchu mimo přední kola a zároveň generování přítláčné síly. Při řešení této oblasti bylo optimalizováno pět různých nastavení.

Nastavení okrajových podmínek pro jednotlivé části:

1. velikost elementu 100 mm, materiál – vzduch
2. velikost elementu 15 mm, materiál – vzduch
3. typ – inlet, vstupní rychlost 15 m/s
4. typ – opening
5. posuv rychlostí 15 m/s, použití funkce stěny
6. použití funkce stěny
 - boční stěny – podmínka symetrie
 - povrch profilů – mezní vrstva o tloušťce 2 mm, počet vrstev 5, tloušťka první vrstvy 0,2 mm a velikost elementu mezní vrstvy 10 mm
 - povrch náběžné hrany profilů – mezní vrstva o tloušťce 2 mm, počet vrstev 5, tloušťka první vrstvy 0,2 mm a velikost elementu 1 mm
 - povrch kola – použití funkce stěny, rotace kolem osy y rychlostí 10,3 ot/s



Obrázek 60 Řešené varianty oblasti předního křídla před kolem

U této oblasti předního křídla bylo provedeno celkem 78 různých nastavení profilů. Ze simulací byla vyhodnocována vztahová (v ose z) a odporová (v ose x) síla, v jednotkách N/cm. Tyto jednotky vypovídají o tom, jak velká síla bude generována na povrchu předního křídla (včetně kola) daným průřezem. V tabulce je pro představu možné vidět přehled nejlepších výsledků (generování největšího přítlaku) jednotlivých variant. Tyto výsledky nám však neřeknou, jaký přínos má takové nastavení v přítomnosti celého vozidla, ale je z nich možné vybrat nejvhodnější vzájemné polohy a typy jednotlivých profilů.

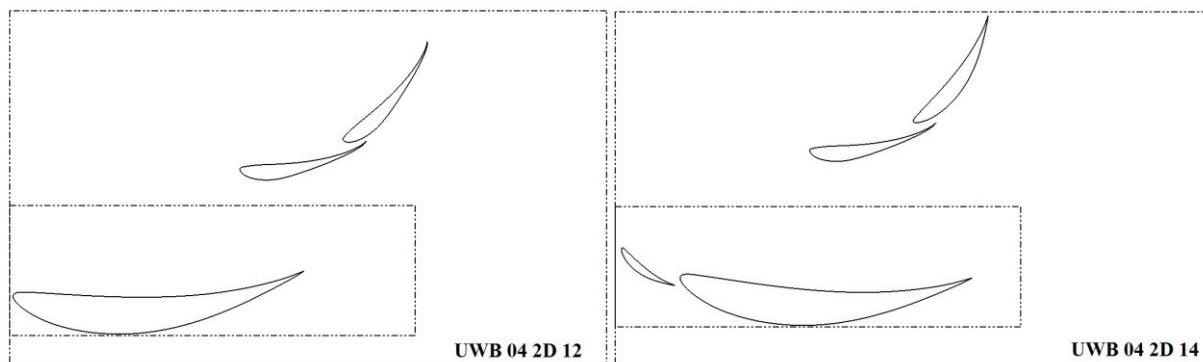
Varianta	Vztlak [N/cm]	Odpor [N/cm]
Samotné kolo	1,043	0,568
UWB 04 2D 01 09	0,424	0,711
UWB 04 2D 02 08	0,404	0,723
UWB 04 2D 03 03	-0,774	0,878
UWB 04 2D 04 07	0,443	0,733
UWB 04 2D 05 33	-0,414	0,826

Tabulka 7 Přehled aerodynamicky nejkvalitnějších zástupců jednotlivých variant včetně hodnot

4.3.2 Oblast předního křídla mezi kolem a kapotou (zelená)

Jedná se o druhou řešenou oblast na předním křídle. Tato část vychází jak z (funkce) generování přítláčné síly, tak z funkce předního křídla, jež spočívá v nasměrování co největšího množství vzduchu do kapes. Při řešení této oblasti byla optimalizována dvě různá nastavení.

Nastavení okrajových podmínek pro jednotlivé části je shodné s předchozí variantou až na to, že zde není řešena přítomnost kola.



Obrázek 61 Řešené varianty oblasti předního křídla mezi kolem a kapotou

U této oblasti předního křídla bylo provedeno celkem 9 různých nastavení profilů a to z důvodu možnosti využití výsledků vzájemných poloh profilů z oblasti před kolem a oblasti zadního křídla.

Varianta	Vztlak [N/cm]	Odpor [N/cm]
UWB 04 2D 12 07	-4,652	0,946
UWB 04 2D 14 01	-3,035	0,701

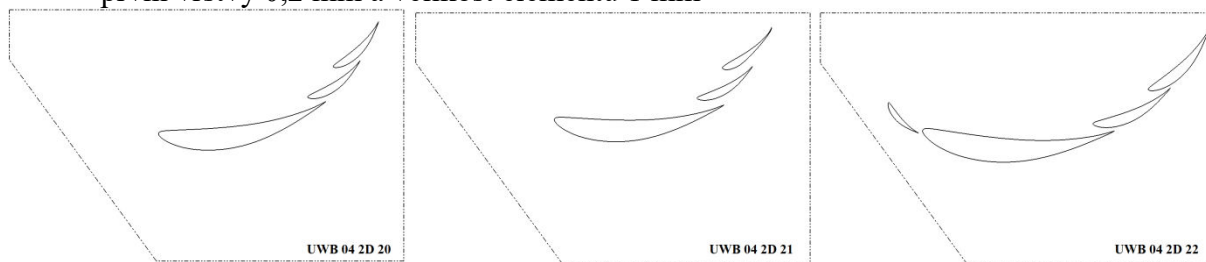
Tabulka 8 Přehled aerodynamicky nejkvalitnějších zástupců jednotlivých variant včetně hodnot

4.3.3 Oblast zadního křídla (modrá)

Jedná se o oblast průřezu celého zadního křídla, u této části se snažíme získat co největší hodnotu přitlačné síly. Při řešení této oblasti byla optimalizována tři různá nastavení.

Nastavení okrajových podmínek pro jednotlivé části:

1. velikost elementu 100 mm, materiál – vzduch
 2. velikost elementu 10 mm, materiál – vzduch
 3. typ – inlet, vstupní rychlost 15 m/s
 4. typ – opening
 5. použití funkce stěny
 6. použití funkce stěny
- boční stěny – podmínka symetrie
 - povrch profilů – mezní vrstva o tloušťce 2 mm, počet vrstev 5, tloušťka první vrstvy 0,2 mm a velikost elementu mezní vrstvy 10 mm
 - povrch náběžné hrany profilů – mezní vrstva o tloušťce 2 mm, počet vrstev 5, tloušťka první vrstvy 0,2 mm a velikost elementu 1 mm



Obrázek 62 Řešené varianty zadního křídla

U této oblasti zabývající se zadním křídlem bylo celkem provedeno 91 různých nastavení profilů.

Varianta	Vztlak [N/cm]	Odpor [N/cm]
UWB 04 2D 20 23	-2,850	0,472
UWB 04 2D 21 33	-3,048	0,547
UWB 04 2D 22 24	-3,507	0,705

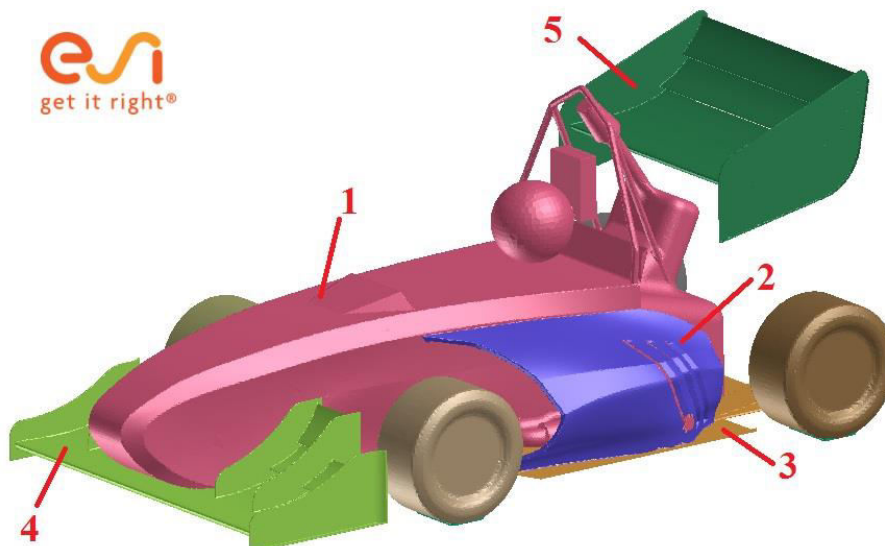
Tabulka 9 Přehled aerodynamicky nejkvalitnějších zástupců jednotlivých variant včetně hodnot

4.4 3D simulace

3D simulace byla provedena pomocí opensource CFD nástroje OpenFoam v3.0+ s využitím programu Siemens NX pro přípravu geometrie, dále byl využit program Visual Environment Visual Mesh pro přípravu výpočetní úlohy a pro vyhodnocení úlohy byly použity programy Visual Viewer a Paraview.

Nastavení modelu

Vstupní geometrie byla vytvořena v programu Siemens NX a vyexportována ve formátu IGES. S touto geometrií se dále pracovalo v programu VisualMesh, ve kterém se kontrolovalo, zda nejsou v geometrii nějaké chyby, například více ploch přes sebe. Pokud byla geometrie v pořádku, převedly se plochy na elementy, které odpovídaly nastavení síťování dané části, a poté byla geometrie vyexportována ve formátu STL. Celé vozidlo bylo rozděleno na jednotlivé části, aby se při úpravě měnila jen daná komponenta. Tyto části byly: FORMULE_BODY (1), FORMULE_KAPSY (2), FORMULE_PODLAHA (3), KOLO_BL, KOLO_BR, KOLO_FL, KOLO_FR, KRIDLO_PREDNI (4), KRIDLO_ZADNI (5), PRILOŽKY.



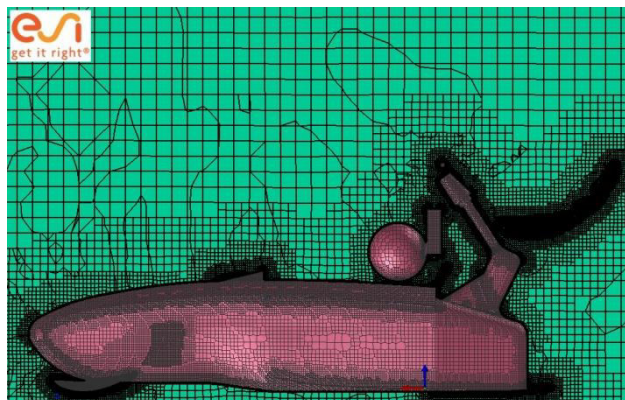
Obrázek 63 Popis jednotlivých geometrií vstupujících do výpočtu

Model vozu byl pro výpočet umístěn do oblasti (krabice) o rozměrech 30x8.2x7.8m. Tato oblast byla dále rozdělena na menší elementy, což bude popsáno dále. V tomto kroku byly definovány stěny této krabice, jako je výstup (outlet-1), vstup (inlet-2), vozovka (lowerWall-3), horní stěna (upperWall-4) a boční stěny (frontAndBack).



Obrázek 64 Popis jednotlivých oblastí při řešení 3D simulací včetně ukázky diskretizace sítě

Každá komponenta má nastavenou úroveň zjemnění (LEVEL). Pokud byla velikost elementu na okraji 1m, tak velikost elementu s LEVEL 2 byla 0,5m a s LEVEL 3 byla 0,25m. Princip síťování je možné vidět na předchozím obrázku a na obrázku níže.



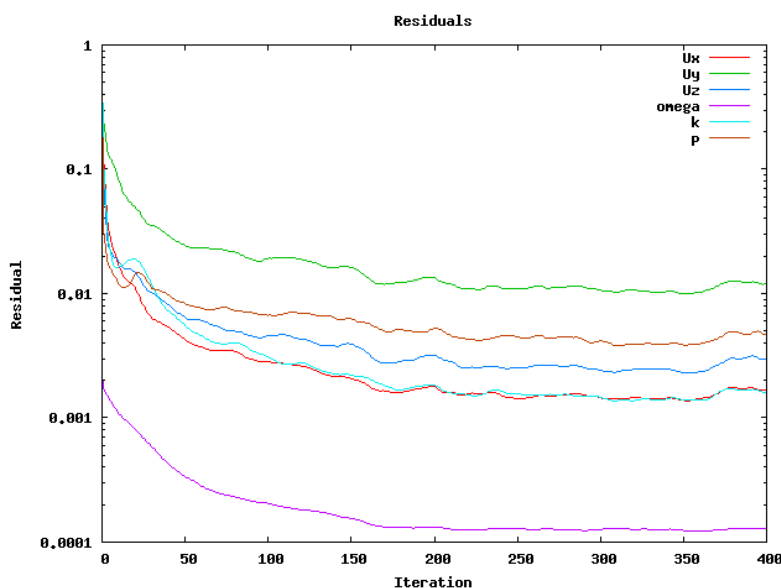
Obrázek 65 Ukázka diskretizace sítě kolem jednotlivých komponent řešené úlohy

- LEVEL 6 byl použit pro: KOLO_BL, KOLO_BR, KOLO_FL, KOLO_FR
- LEVEL 7 byl použit pro: FORMULE_BODY, FORMULE_KAPSY, FORMULE_PODLAHA, PRILOZKY
- LEVEL 8 byl použit pro: KRIDLO_PREDNI, KRIDLO_ZADNI

V tomto kroku byly také definované zjemňovací boxy, což jsou oblasti kolem některých komponent, které je třeba zjemnit, například kolem výfuku. Dále zde byly na povrchu komponent nadefinované prizmatické vrstvy.

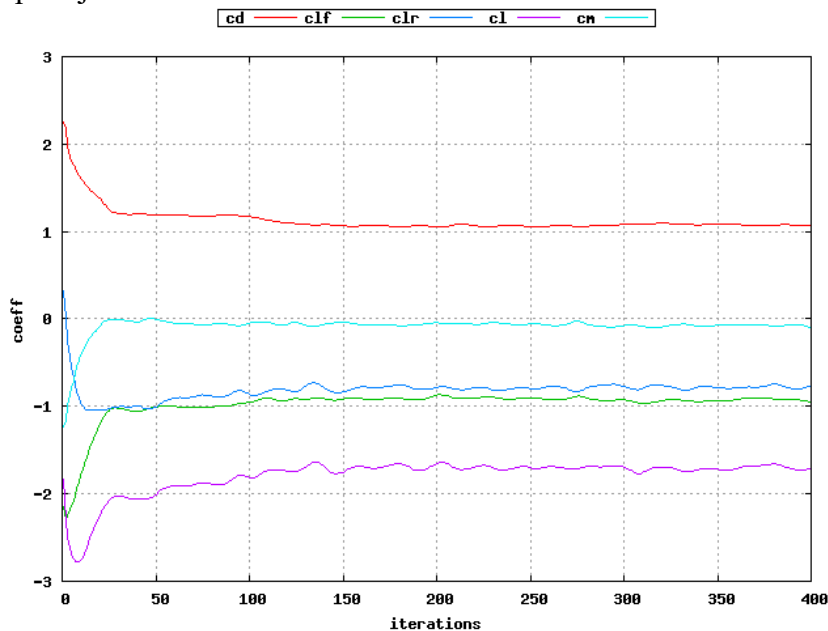
Takto nadefinovaná síť, dosahovala velikosti kolem 17 000 000 buněk.

Pro nastavení boundary (hranic) byla u všech geometrií použita funkce wall. Rychlost na povrchu všech geometrií byla nastavena na 0, kromě geometrie kol. Na kolech byla nastavena rotace, pro jejíž nastavení je nutné zadat střed otáčení, osu, kolem které kolo rotuje a rychlost.



Obrázek 66 Pohled na ustálení dat analýzy - rezidua

Vyhodnocení jednotlivých koeficientů bylo ve směru vztlak (0 0 1) a odpor (-1 0 0). Jako působiště aerodynamických sil bylo zvoleno místo, které se nachází uprostřed rozvoru náprav (0,1475 0 -0.08). Jelikož nemá hodnota přítláčné síly v tomto bodě žádnou vypovídající hodnotu (vozidlo přenáší síly na vozovku v místě předních a zadních kol) o tom, jakými silami působíme na vozovku, je nutné tuto sílu přepočíst na přední C_{lf} a na zadní C_{lr} kola. Rozvor náprav je 1.565 m.



Obrázek 67 Pohled na ustálení dat analýzy - jednotlivé koeficienty

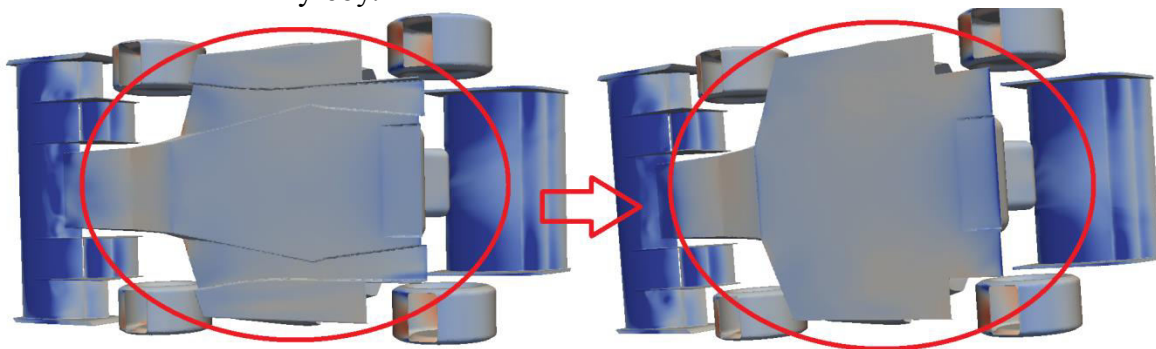
Vyhodnocení

V této části bylo napočítáno 37 různých variant. Při vyhodnocení jsou vždy porovnány dvě varianty vůči sobě. Jako základní varianta byla zvolena geometrie vozu UWB 03 z loňského roku, u dalších variant poté dochází ke změnám geometrie jednotlivých komponent. U každé varianty je uveden popis změn (geometrie) vůči předchozí variantě včetně grafického znázornění dané změny. Výsledky porovnání jsou uváděny v aerodynamických bodech, kde „+“ značí nárůst hodnoty a „-“ pokles dané hodnoty. Pro přehlednost zda je nárůst či pokles dané hodnoty pozitivním či negativním přínosem jsou změny hodnot barevně zvýrazněny. Kde zelená barva značí pozitivní přínos a červená barva negativní přínos.

4.4.1 Podlaha

Varianta 316

Tato varianta vychází z varianty 302, což je varianta vozu UWB 03 se základním nastavením a při rychlosti 15 m/s. Ke změně zde došlo v oblasti podlahy, kdy bylo zjišťováno, jaký vliv mají kanály po stranách podlahy a zda je výhodné tyto kanály použít na novém voze s ohledem na složitost výroby.



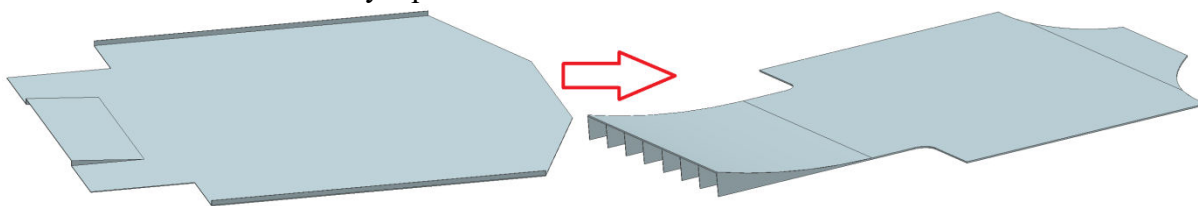
Obrázek 68 Změna geometrie z varianty 302 na variantu 316

Výsledky porovnání:

- Body odporu +1,9
- Body celkového přítlaku -6,3
- Body přítlaku předek -4,7
- Body přítlaku zadek -1,7
- Přítlak předek -1,8 %

Varianta 330

U této varianty došlo ke změně v zadní části podlahy, konkrétně zvětšení difuzoru (rozšíření, prodloužení a zvýšení). V oblasti difuzoru byly navrženy přepážky k usměrnění vířícího vzduchu. Varianta byla porovnáována s variantou 316.



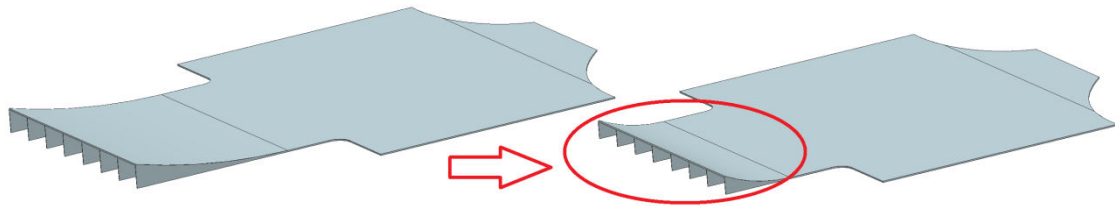
Obrázek 69 Změna geometrie z varianty 316 na variantu 330

Výsledky porovnání:

- Body odporu -1,9
- Body celkového přítlaku -10,1
- Body přítlaku předek -3,3
- Body přítlaku zadek -6,9
- Přítlak předek +1,3 %

Varianta 331

Varianta 331 se liší oproti předchozí zkrácením difuzoru. Varianta byla porovnáována s variantou 330.



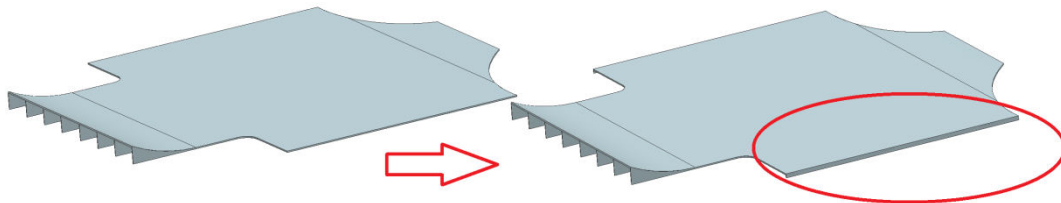
Obrázek 70 Změna geometrie z varianty 330 na variantu 331

Výsledky porovnání:

- Body odporu +2,4
- Body celkového přítlaku +13,4
- Body přítlaku předek +6,5
- Body přítlaku zadek +6,8
- Přítlak předek -0,1 %

Varianta 332

Tato varianta byla doplněna hranou, která byla vysunuta 15 mm směrem k vozovce a byla umístěna na bocích podlahy. Toto řešení vychází z teorie tzv. „sukní“ a nemělo by docházet k úniku nízkého tlaku, který je pod vozem. Varianta byla porovnáována s variantou 331.



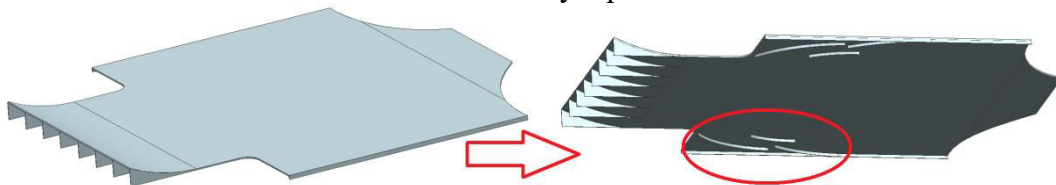
Obrázek 71 Změna geometrie z varianty 331 na variantu 332

Výsledky porovnání:

- Body odporu -3,6
- Body celkového přítlaku -3,7
- Body přítlaku předek -3,4
- Body přítlaku zadek -0,3
- Přítlak předek -1,1 %

Varianta 333

U této varianty byly navíc vysunuty hrany na spodní části podlahy, které by měly nasměrovat více vzduchu do difuzoru. Varianta byla porovnáována s variantou 332



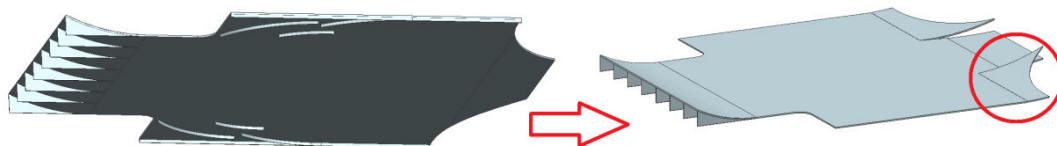
Obrázek 72 Změna geometrie z varianty 332 na variantu 333

Výsledky porovnání:

- Body odporu +2,5
- Body celkového přitlaku -5,0
- Body přitlaku předek -3,0
- Body přitlaku zadek -2,0
- Přítlak předek -0,4 %

Varianta 339

Tato varianta vycházela z varianty použité minulý rok (varianta s kanály) a díky zvednuté přední části by se mělo pod podlahu dostat větší množství vzduchu. Varianta byla porovnáována s variantou 333.



Obrázek 73 Změna geometrie z varianty 333 na variantu 339

Výsledky porovnání:

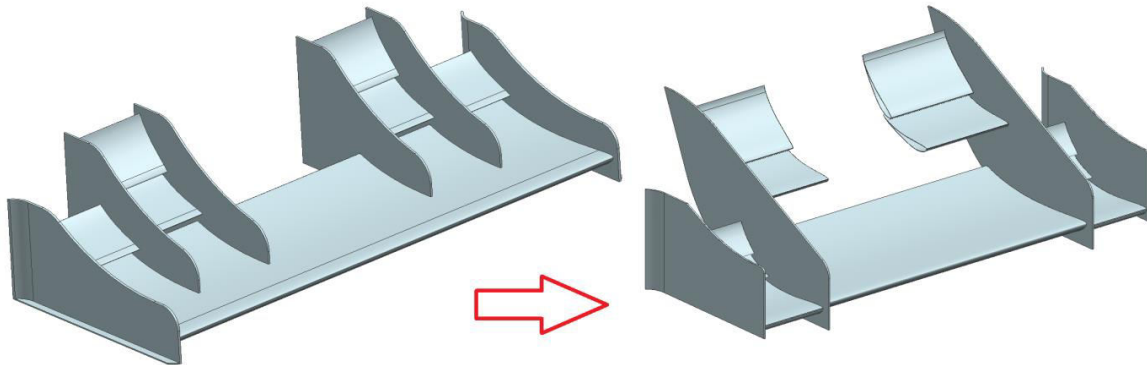
- Body odporu +2,2
- Body celkového přitlaku -10,7
- Body přitlaku předek -7,8
- Body přitlaku zadek -2,8
- Přítlak předek -1,2 %

Z výsledků CFD analýzy je možné vidět, že podlaha vozu UWB 03 využívající boční kanály fungovala dobře. Varianta 331 generuje téměř stejné hodnoty přitlaku a rozložení mezi nápravami. Z pohledu výroby se u varianty 331 jedná o jednodušší komponentu. Do budoucna by bylo vhodné vycházet z těchto dvou variant a vybavit variantu 331 bočními kanály, což by mohlo zvýšit generovaný přítlak.

4.4.2 Přední křídlo

Varianta 319

U této varianty se vycházelo z předešlých 2D simulací a byly zde použity nejlepší varianty pro dané oblasti. Tato varianta byla porovnávána s variantou vozu UWB 03.



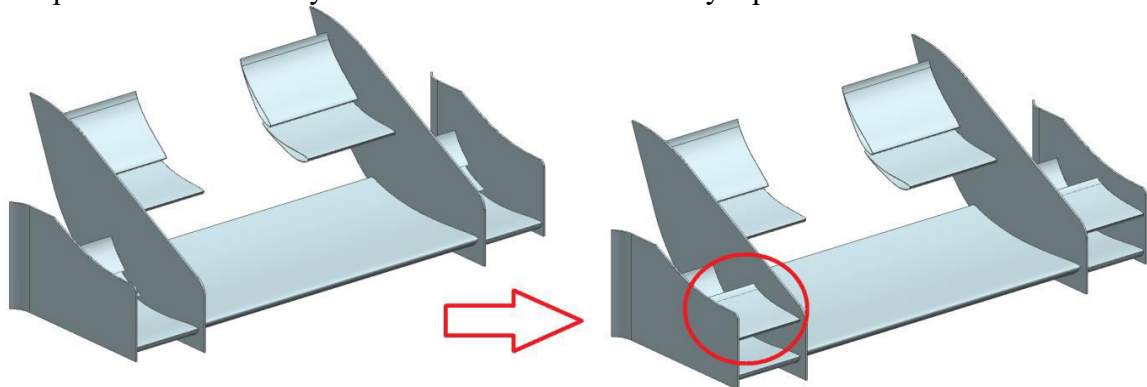
Obrázek 74 Změna geometrie z varianty 302 na variantu 319

Výsledky porovnání:

- Body odporu +2,0
- Body celkového přítlaku +14,0
- Body přítlaku předek -18,8
- Body přítlaku zadek +32,8
- Přítlak předek -14,4 %

Varianta 318

U této varianty se objevil navíc na každé straně předního křídla v oblasti před kolem jeden profil. Toto řešení vychází z 2 simulací. Varianta byla porovnávána s variantou 319.



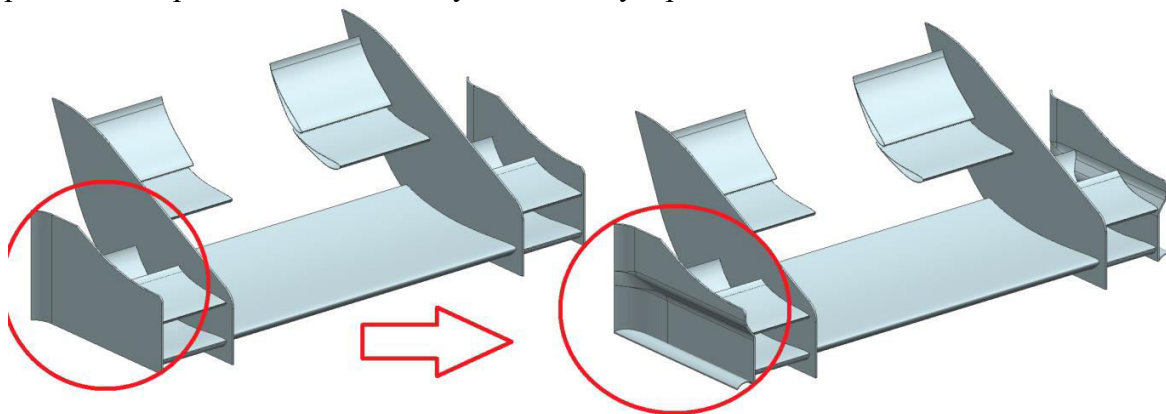
Obrázek 75 Změna geometrie z varianty 319 na variantu 318

Výsledky porovnání:

- Body odporu +0,9
- Body celkového přítlaku -14,8
- Body přítlaku předek +1,2
- Body přítlaku zadek -16,0
- Přítlak předek +2,5 %

Varianta 320

U varianty 320 byl změněn tvar koncové desky. Tento tvar vycházel z pravidel minulých let a bylo zjišťováno jaký vliv má nasměrování většího množství vzduchu kolem předních kol pomocí koncové desky. Varianta byla porovnáována s variantou 318.



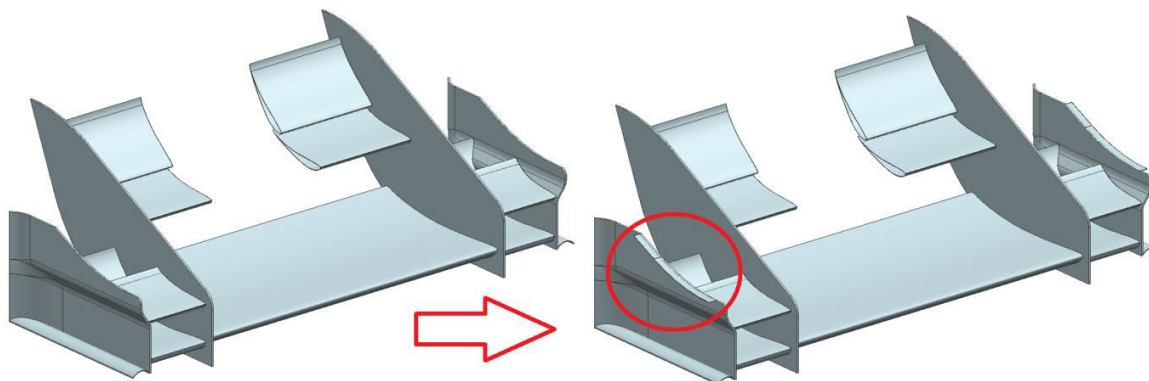
Obrázek 76 Změna geometrie z varianty 318 na variantu 320

Výsledky porovnání:

- Body odporu +0,3
- Body celkového přítlaku +6,0
- Body přítlaku předek -16,5
- Body přítlaku zadek +22,4
- Přítlak předek -11,5 %

Varianta 317

U této varianty byla koncová deska doplněna vírovým generátorem. Varianta byla porovnáována s variantou 320.



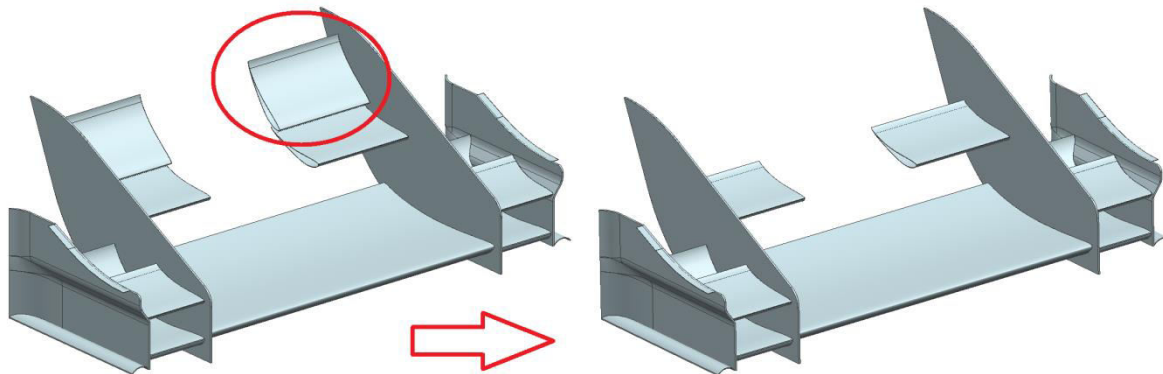
Obrázek 77 Změna geometrie z varianty 320 na variantu 317

Výsledky porovnání:

- Body odporu -0,3
- Body celkového přítlaku +6,2
- Body přítlaku předek +14,4
- Body přítlaku zadek -8,2
- Přítlak předek +8,8 %

Varianta 328

U této varianty došlo k odstranění horní klapky prostřední oblasti předního křídla. Přešlé řešení vycházelo z 2D optimalizace jednotlivých oblastí, ale tato oblast kromě generování přitlačné síly slouží k nasměrování vzduchu na chladič. Přešlé řešení odklánělo vzduch mimo otvor kapsy. Varianta byla porovnáována s variantou 327.



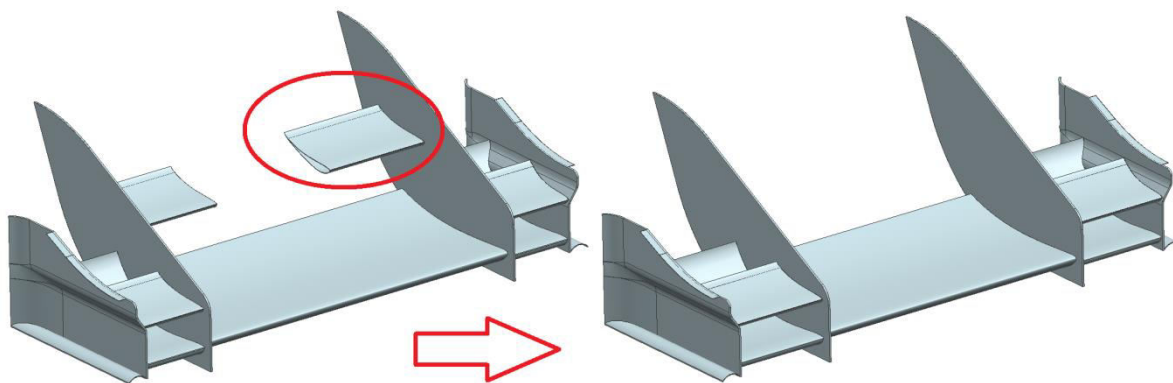
Obrázek 78 Změna geometrie z varianty 327 na variantu 328

Výsledky porovnání:

- Body odporu +1,9
- Body celkového přitlaku -13,3
- Body přitlaku předek +36,7
- Body přitlaku zadek -50,0
- Přítlak předek +28,0 %

Varianta 337

U varianty 337 pokračovala úprava prostřední oblasti předního křídla, jako u předchozí varianty. Varianta byla porovnáována s variantou 328.



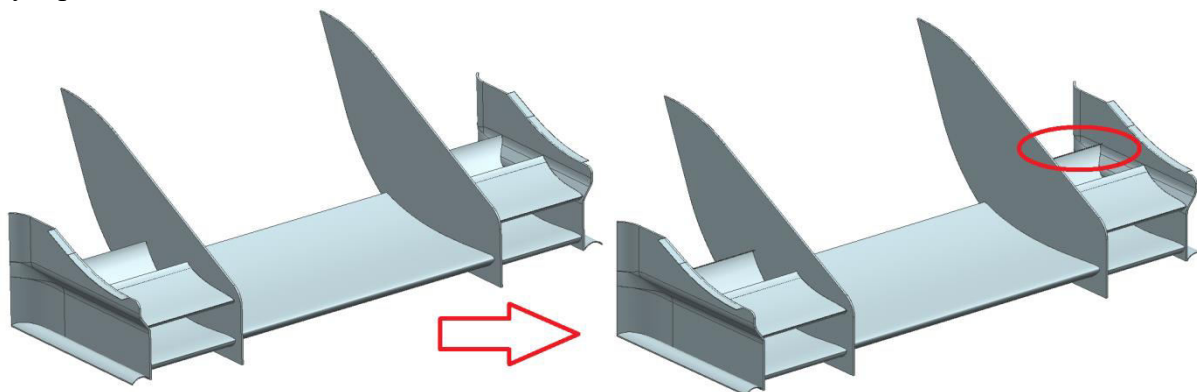
Obrázek 79 Změna geometrie z varianty 328 na variantu 337

Výsledky porovnání:

- Body odporu +1,2
- Body celkového přitlaku +7,0
- Body přitlaku předek +8,0
- Body přitlaku zadek -1,0
- Přítlak předek +2,5 %

Varianta 342

Tato varianta je oproti předchozí vybavena břitem na konci poslední klapky. Varianta byla porovnávána s variantou 337.



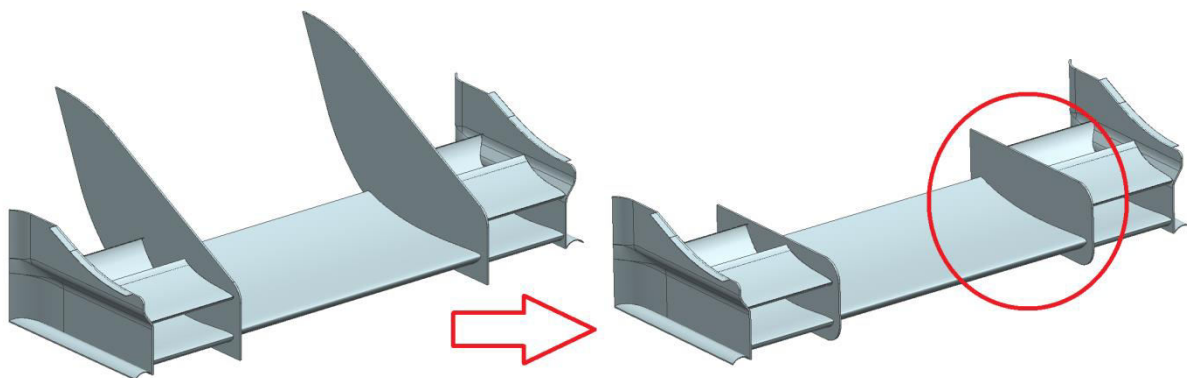
Obrázek 80 Změna geometrie z varianty 337 na variantu 342

Výsledky porovnání:

- Body odporu -0,3
- Body celkového přitlaku -0,6
- Body přitlaku předek -7,6
- Body přitlaku zadek +7,0
- Přítlak předek -4,3 %

Varianta 347

U této varianty byl změněn tvar bočnice, jelikož z důvodu odstranění klapek v prostřední oblasti tato bočnice neměla na předním křídle význam. Varianta byla porovnávána s variantou 342.



Obrázek 81 Změna geometrie z varianty 342 na variantu 347

Výsledky porovnání:

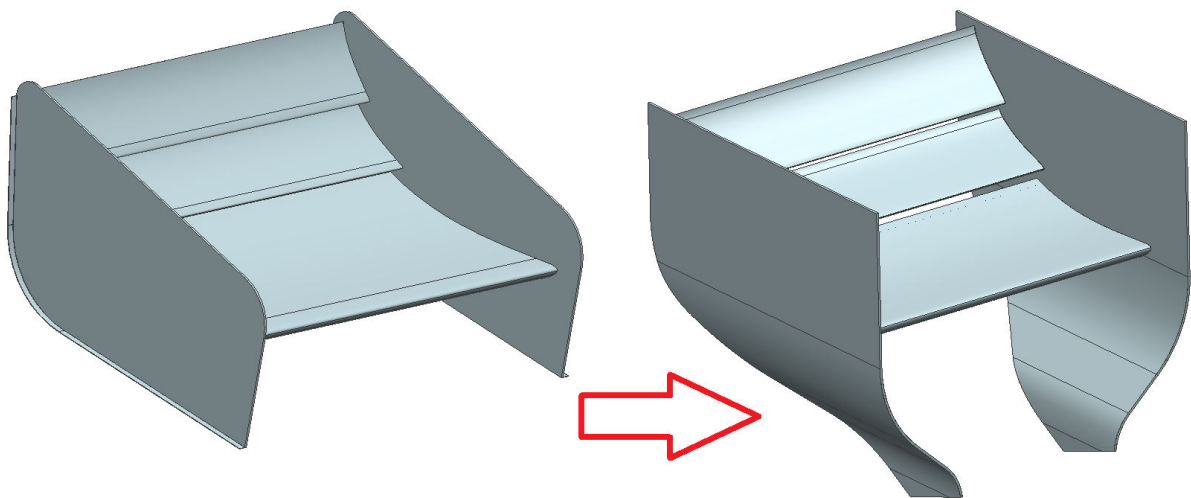
- Body odporu +3,9
- Body celkového přitlaku +6,1
- Body přitlaku předek +4,8
- Body přitlaku zadek +1,3
- Přítlak předek +1,0%

Porovnáním výsledků CFD analýzy je možné rozhodnout, zda mají jednotlivé úpravy požadovaný vliv na naše vozidlo. Z výsledků je možné vidět, že například klapky v prostřední oblasti předního křídla nemají oproti 2D simulaci přínos jak v generování přitlačné síly na předek vozidla, tak v nasměrování vzduchu na chladič. Dalším poznatkem je to, že změnou tvaru koncové desky se zvýší generování přitlaku v zadní části vozu. Naopak použitím vírového generátoru je možné přidat přitlačné síly na předek vozu. To samé, ale v menším měřítku, jako u změny tvaru koncové desky, je možné vidět i po přidání bříty na konci poslední klapky. Na závěr byla spočtena varianta, u které byla upravena bočnice, která byla pozůstatkem z předchozích variant.

4.4.3 Zadní křídlo

Varianta 321

U této varianty se objevily nové geometrie profilů, které vyšly z 2D simulací. Navíc byla varianta vybavena novým tvarem bočnic, na kterých bude možno vyzkoušet několik vylepšení, která vycházejí z teorie. Varianta je porovnávána s variantou vozu UWB 03.



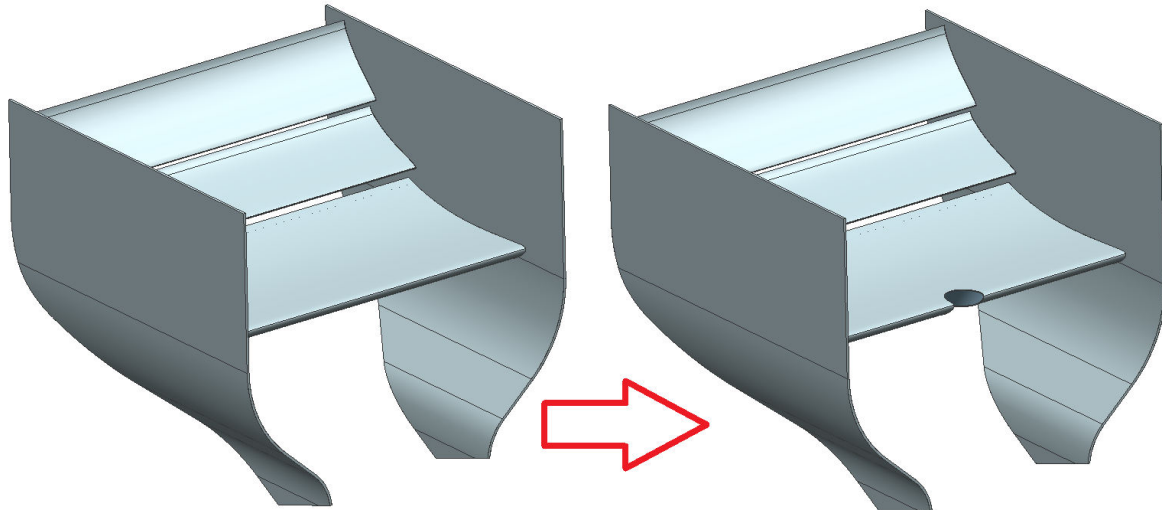
Obrázek 82 Změna geometrie z varianty 302 na variantu 321

Výsledky porovnání:

- Body odporu -2,5
- Body celkového přitlaku -4,3
- Body přitlaku předek -0,9
- Body přitlaku zadek -3,4
- Přitlak předek -0,1 %

Varianta 322

U této varianty bylo sledováno, jaký vliv bude mít posunutí zadního křídla více k vozu. Při posunutí však nastala kolize geometrie křídla s airboxem, a proto musel být hlavní profil křídla upraven. Varianta byla porovnáвана s variantou 321.



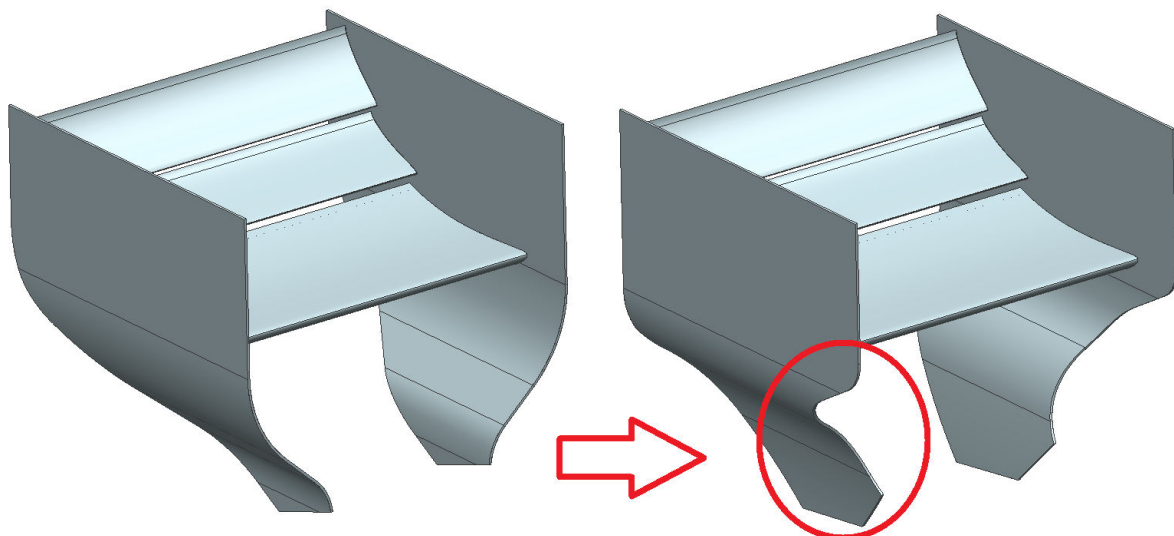
Obrázek 83 Změna geometrie z varianty 321 na variantu 322

Výsledky porovnání:

- Body odporu -0,3
- Body celkového přítlaku -6,5
- Body přítlaku předek -1,9
- Body přítlaku zadek -4,6
- Přítlak předek -0,6 %

Varianta 323

U této varianty bylo sledováno, jaký význam bude mít změna tvaru bočnic zadního křídla. Varianta byla porovnáвана s variantou 321.



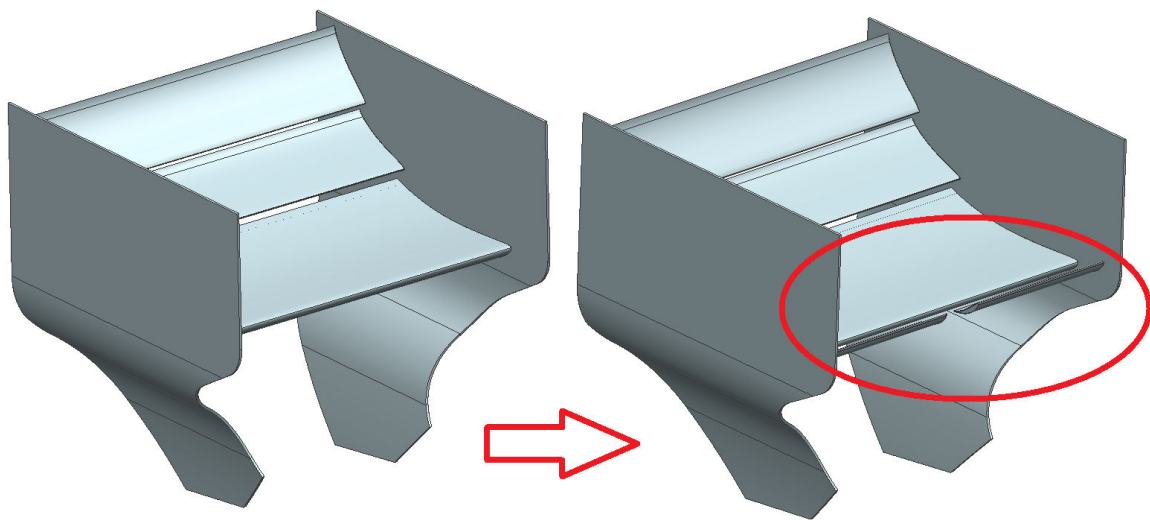
Obrázek 84 Změna geometrie z varianty 321 na variantu 323

Výsledky porovnání:

- Body odporu +0,8
- Body celkového přítlaku -6,7
- Body přítlaku předek -2,5
- Body přítlaku zadek -4,2
- Přítlak předek -0,9 %

Varianta 324

Jedná se o variantu, která je oproti předchozí doplněna jedním profilem (slat), tento profil musí být ze zástavbových důvodů rozdělen na dvě části. Varianta byla porovnávána s variantou 323.



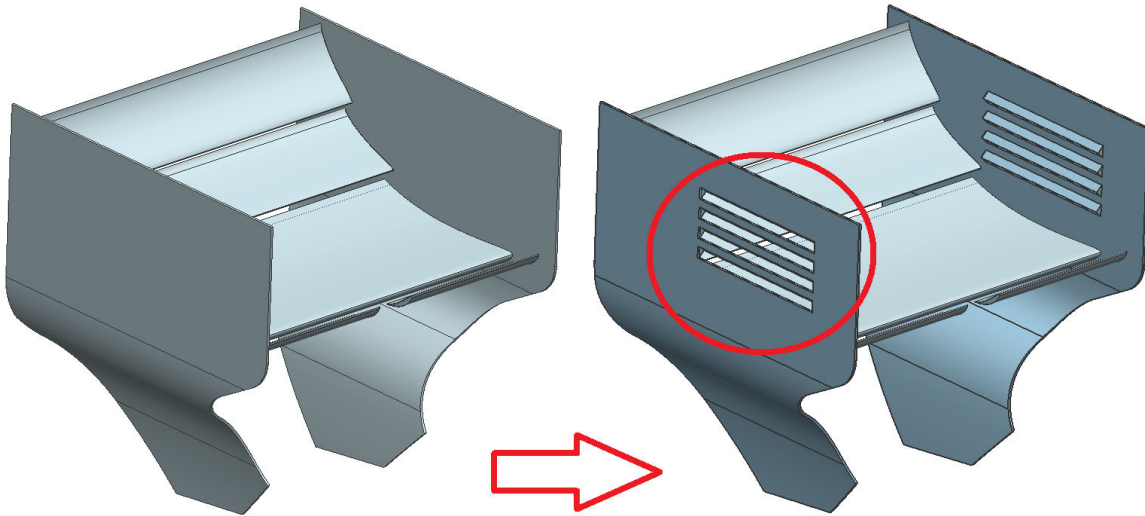
Obrázek 85 Změna geometrie z varianty 323 na variantu 324

Výsledky porovnání:

- Body odporu +3,2
- Body celkového přítlaku +10,9
- Body přítlaku předek +4,9
- Body přítlaku zadek +1,9
- Přítlak předek +1,9 %

Varianta 325

U této varianty bylo sledováno, jaký přínos mají štěrby v bočnicích a zda se je vyplatí vyrábět s ohledem na složitost formy. Varianta byla porovnávána s variantou 324.



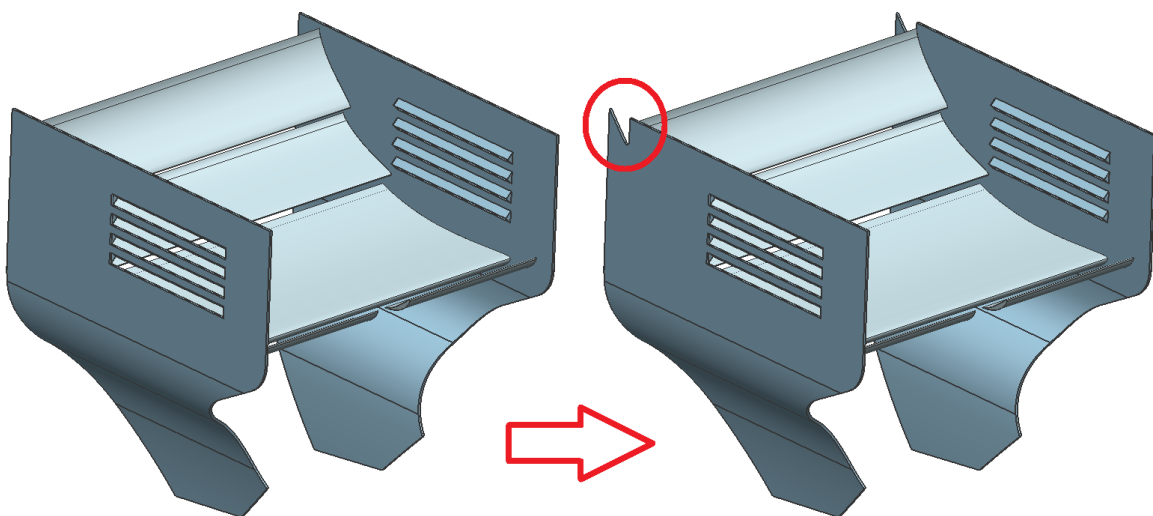
Obrázek 86 Změna geometrie z varianty 324 na variantu 325

Výsledky porovnání:

- Body odporu -3,1
- Body celkového přitlaku -7,0
- Body přitlaku předek -7,5
- Body přitlaku zadek +0,5
- Přitlak předek -4,0 %

Varianta 326

Změna u této varianty je provedením výřezu za poslední klapkou na bočnicích zadního křídla. Varianta byla porovnávána s variantou 325.



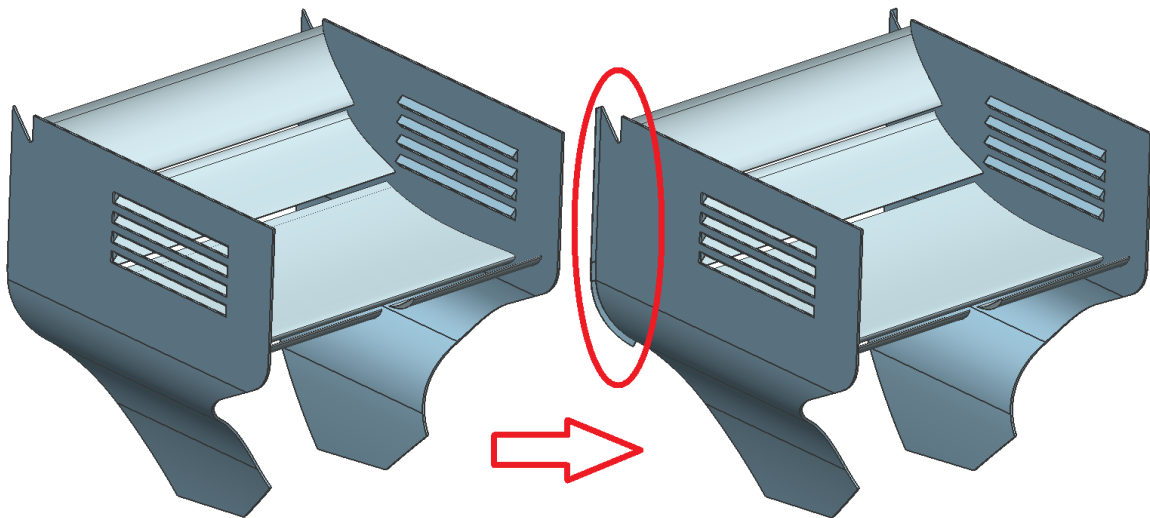
Obrázek 87 Změna geometrie z varianty 325 na variantu 326

Výsledky porovnání:

- Body odporu +2,6
- Body celkového přítlaku +3,8
- Body přítlaku předek +5,6
- Body přítlaku zadek -1,8
- Přítlak předek +3,2 %

Varianta 327

U této varianty bylo zadní křídlo doplněno lištou na odtokové hraně. Varianta byla porovnáвана s variantou 326.



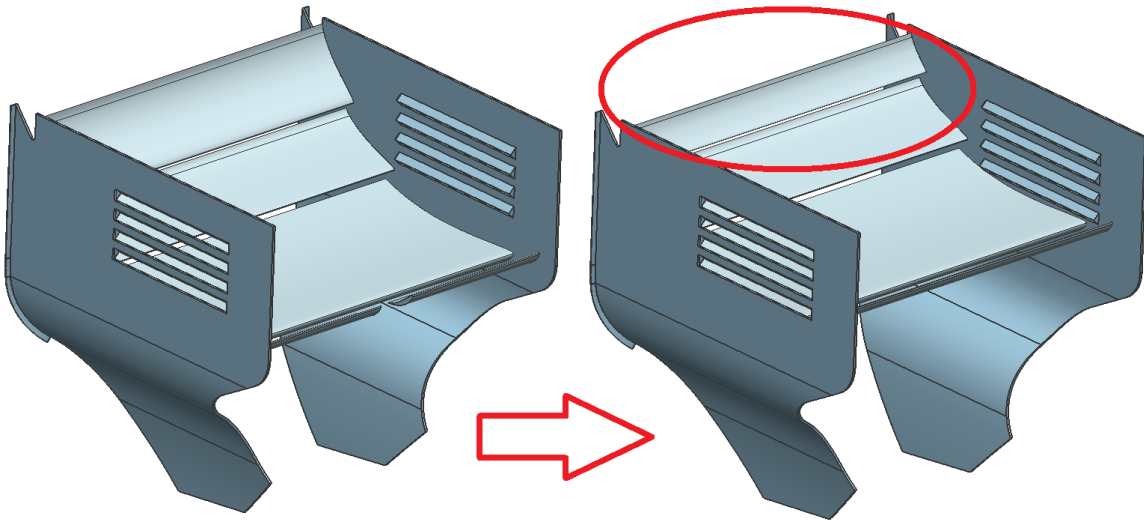
Obrázek 88 Změna geometrie z varianty 326 na variantu 327

Výsledky porovnání:

- Body odporu -0,2
- Body celkového přítlaku -1,2
- Body přítlaku předek +2,1
- Body přítlaku zadek -3,3
- Přítlak předek +1,5 %

Varianta 338

U této varianty byl pokus o zvednutí polohy profilů zadního křídla, což vedlo k tomu, že musela být poslední klapka zmenšena na polovinu. Varianta byla porovnávána s variantou 337.



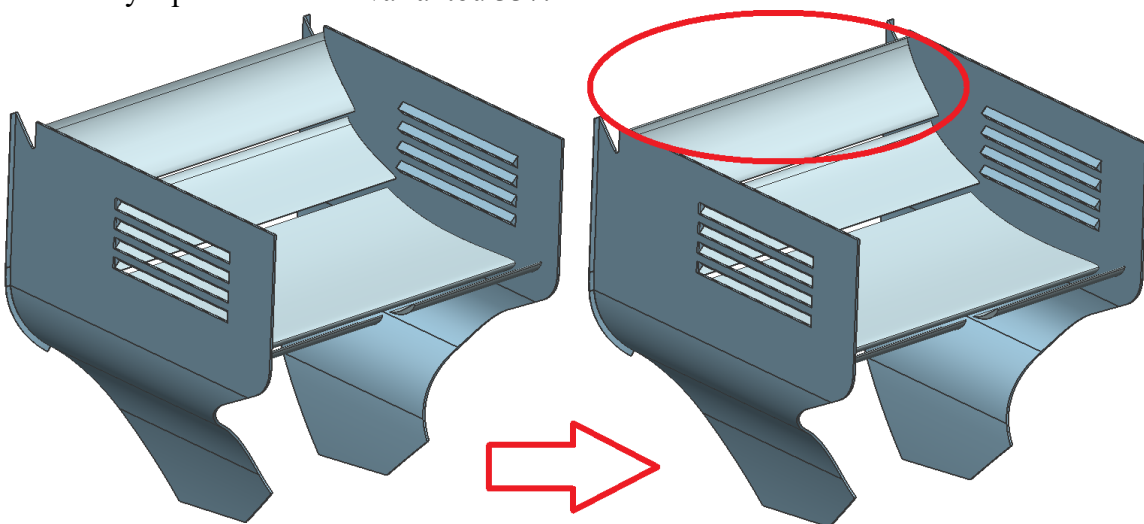
Obrázek 89 Změna geometrie z varianty 337 na variantu 338

Výsledky porovnání:

- Body odporu -5,5
- Body celkového přitlaku +0,1
- Body přitlaku předek +4,5
- Body přitlaku zadek -4,4
- Přitlak předek +2,6 %

Varianta 341

U této varianty se zjišťoval přínos při použití břitu (gurney flap) na poslední klapce. Varianta byla porovnávána s variantou 337.



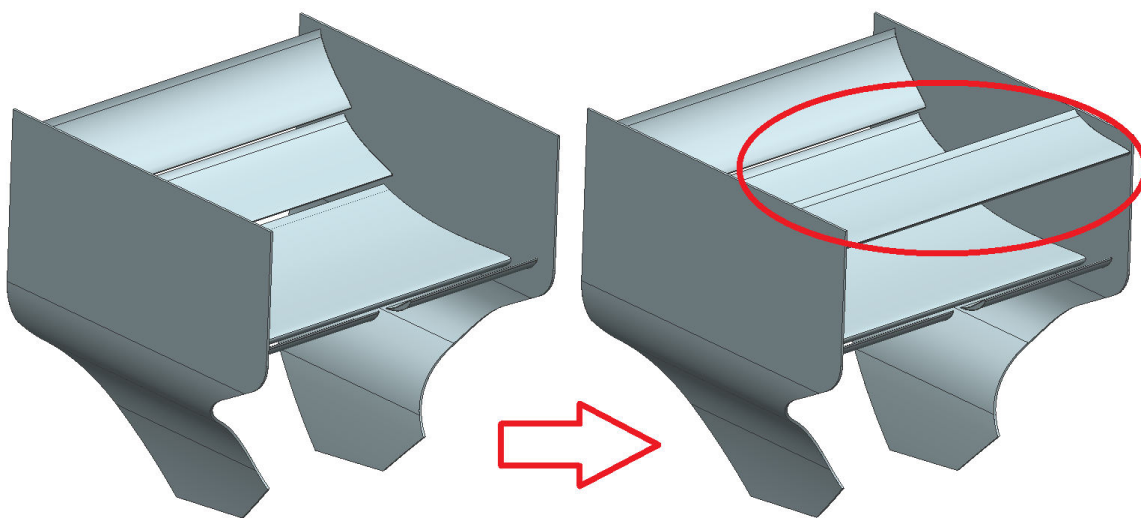
Obrázek 90 Změna geometrie z varianty 337 na variantu 341

Výsledky porovnání:

- Body odporu +6,1
- Body celkového přitlaku +0,5
- Body přitlaku předek +3,6
- Body přitlaku zadek -3,2
- Přítlak předek +2,0 %

Varianta 343

U této varianty byl pokus o zvýšení přitlačné síly pomocí přidání jednoho profilu v horní části zadního křídla. Varianta byla porovnáвана s variantou 324.



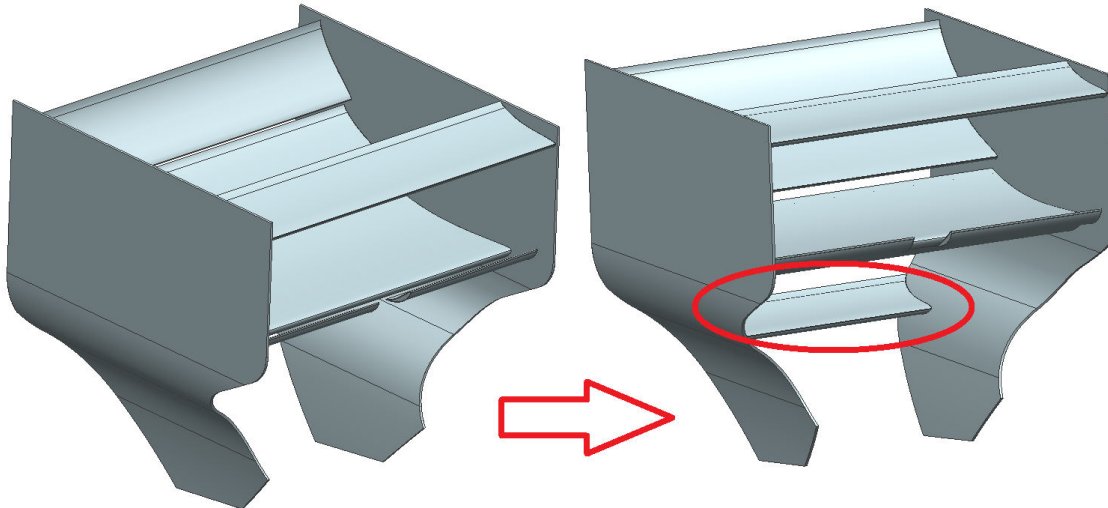
Obrázek 91 Změna geometrie z varianty 324 na variantu 343

Výsledky porovnání:

- Body odporu -4,2
- Body celkového přitlaku -9,2
- Body přitlaku předek -11,6
- Body přitlaku zadek +2,4
- Přítlak předek -6,5 %

Varianta 344

U této varianty byl pokus o zvýšení přitlačné síly pomocí přidání jednoho profilu v dolní části zadního křídla. Varianta byla porovnáвана s variantou 343.



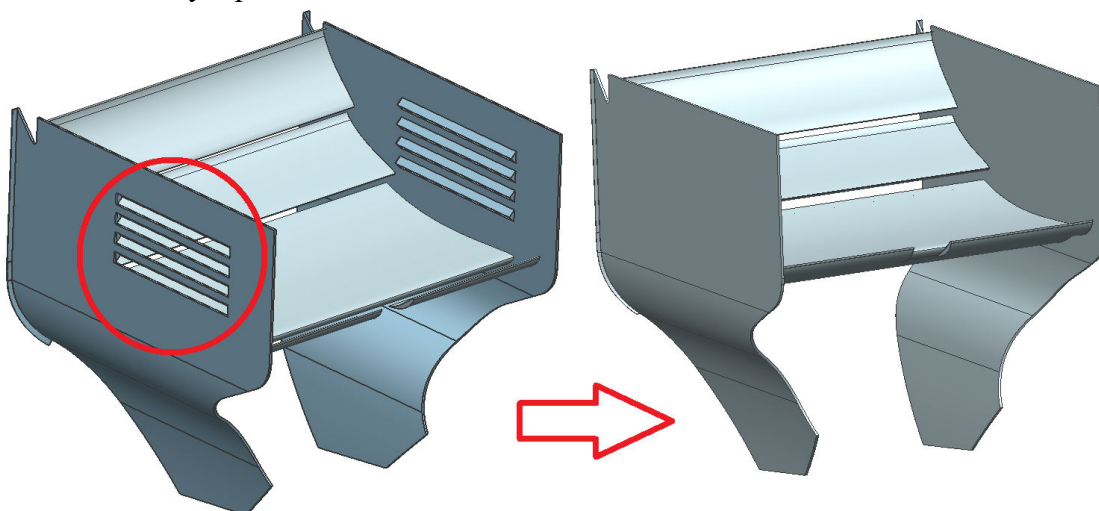
Obrázek 92 Změna geometrie z varianty 343 na variantu 344

Výsledky porovnání:

- Body odporu +2,2
- Body celkového přitlaku +6,4
- Body přitlaku předek +3,2
- Body přitlaku zadek +3,2
- Přítlak předek +1,5 %

Varianta 345

U této varianty byly odstraněny šterbiny a bylo zjišťováno, jaký význam mají pro dané řešení. Varianta byla porovnáвана s variantou 341.



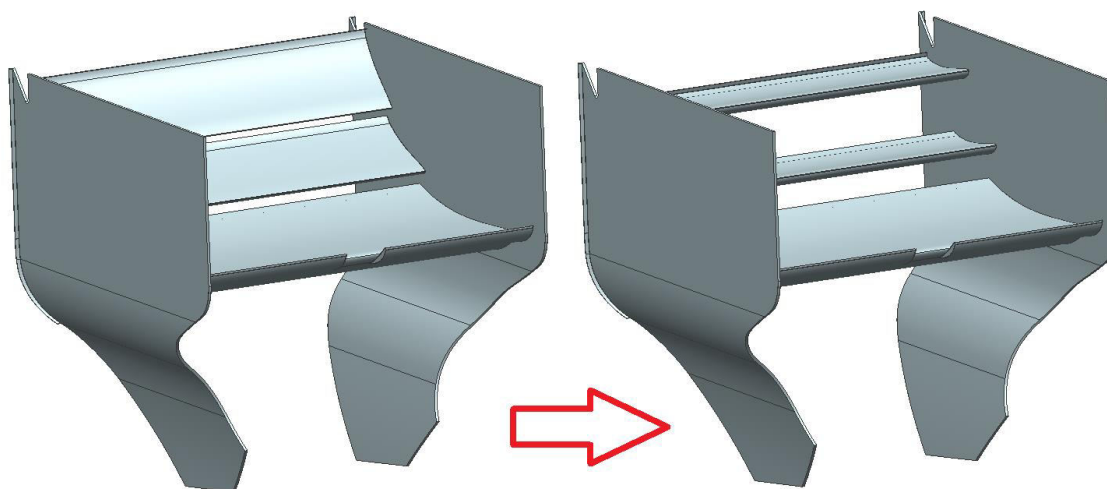
Obrázek 93 Změna geometrie z varianty 341 na variantu 345

Výsledky porovnání:

- Body odporu -5,5
- Body celkového přítlaku -9,2
- Body přítlaku předek -11,7
- Body přítlaku zadek +2,3
- Přítlak předek -3,9 %

Varianta 346

Jedná se o porovnání dvou nastavení zadního křídla a zároveň zjištění, jak se bude vozidlo jevit při zapnutém systému DRS. Varianta byla porovnáována s variantou 345.



Obrázek 94 Změna geometrie z varianty 345 na variantu 346

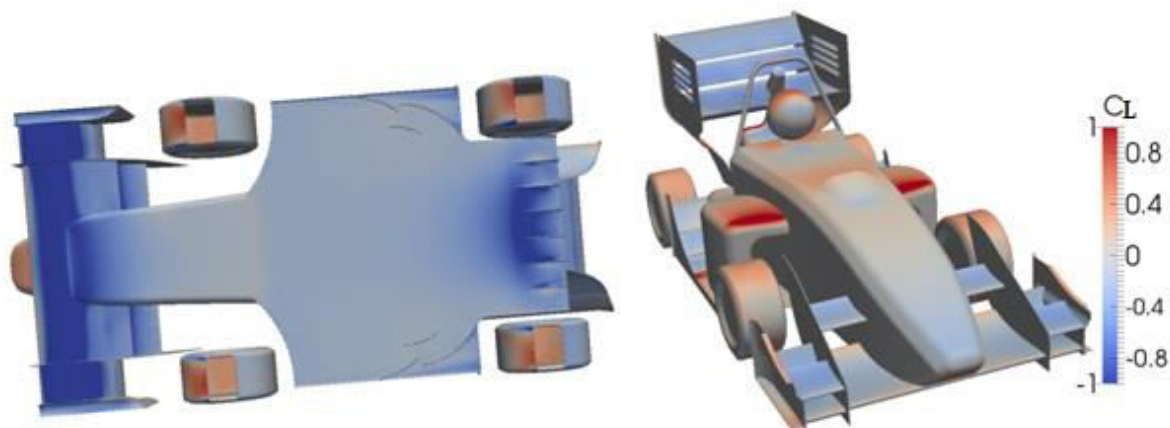
Výsledky porovnání:

- Body odporu -30,6
- Body celkového přítlaku -33,8
- Body přítlaku předek -68,0
- Body přítlaku zadek +34,3
- Přítlak předek -38,8 %

Z výsledků je možné vidět, že velký přínos má přidání profilu (slat) před hlavní profil. Zvýšení přítlaku přináší také přidání profilu pod profily zadního křídla, naopak přidáním profilu na profily zadního křídla má spíše negativní vliv, protože ovlivňuje tlak, který je tvořen nad profily zadního křídla. Tato skutečnost byla vidět už i v průběhu 2D simulací. Štěrbiny v bočnicích zadního křídla mají jen nepatrný přínos, jelikož by jejich výroba byla mnohem komplikovanější, nejsou pro naše využití vhodné. Varianty zabývající se tvarem bočnic (odtoková hrana a výřez), přinesly vozu také mírné zlepšení. Určitě by však bylo vhodné se do budoucna tvarem zadních bočnic zabývat detailněji. Z výsledků je také možné vidět, že zvednutím polohy profilů došlo k mírnému zlepšení. Tohoto zlepšení, kromě snížení odporu, bylo však dosaženo i přidáním bříty na původní variantu. Posunutí zadního křídla blíže k vozu mělo negativní vliv, a proto by bylo vhodné umístit křídlo co nejvíce dozadu.

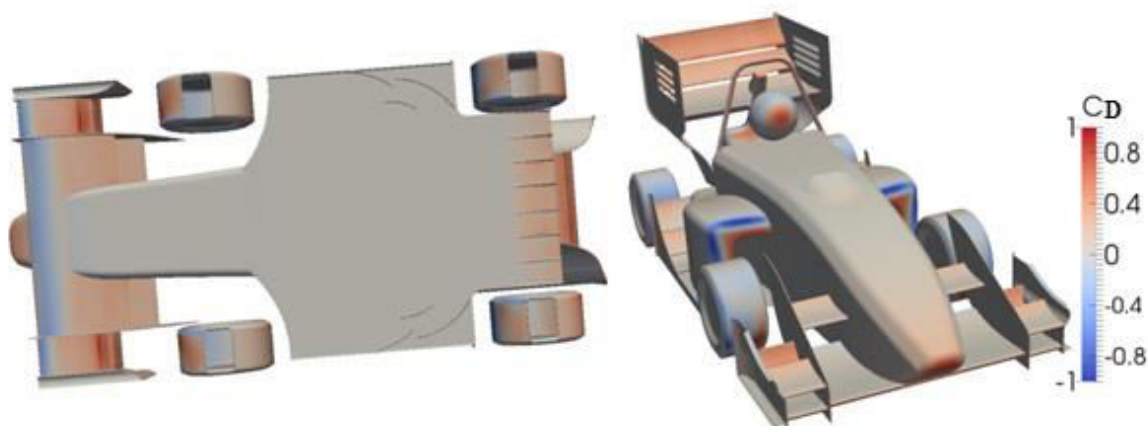
Varianta 335

Jedná se o variantu, u které byl proveden výpočet návrhu nové kapoty a nových bočnic. Tvar kapoty vychází již z nového rámu. Tvar kapes je přizpůsoben novému umístění chladiče a kapsy jsou doplněny profily pro odklonění vzduchu od zadních kol. Varianta byla porovnávána s variantou 328

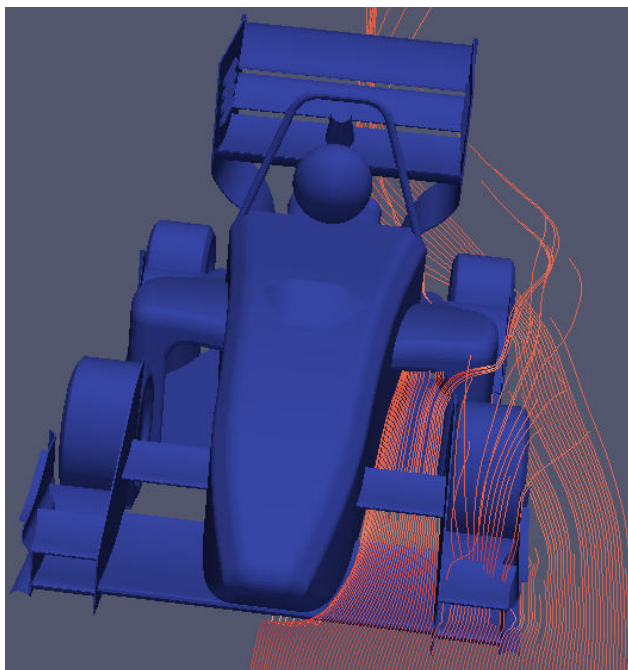
Obrázek 95 Výsledky CFD analýzy (varianta 335) – C_L

Výsledky porovnání:

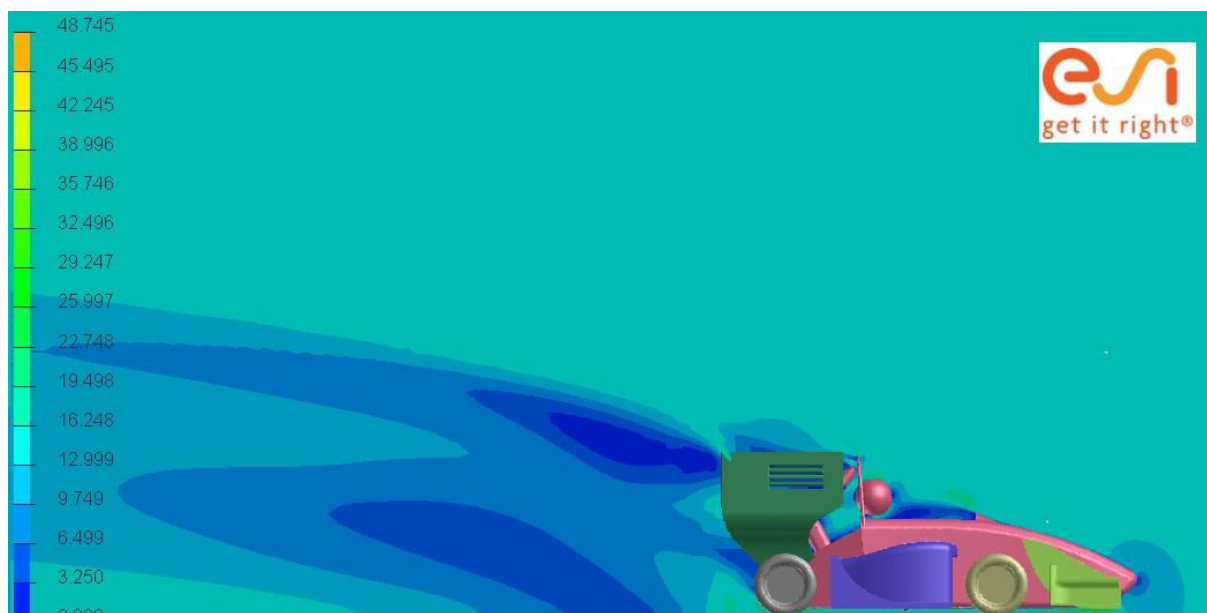
- Body odporu -4,4
- Body celkového přítlaku +23,0
- Body přítlaku předek +18,6
- Body přítlaku zadek +4,3
- Přítlak předek +4,6 %

Obrázek Výsledky CFD analýzy (Varianta 335) - C_D

Z výsledků je možné vidět, že profily které jsou u kapes, splňují svůj účel a odkláníjí vzduch od zadních kol. Tvar kapes je sladěn s předním křídlem tak, aby se dostávalo dostatečné množství vzduchu k chladiči, což je možné vidět na obrázku níže.



Obrázek 96 Grafické znázornění proudnic nasměrovaných předním křídlem



Obrázek 97 Jeden z možných výstupů 3D simulace - promítnutí rychlosti na rovině xz

Závěr

Cílem práce bylo popsat princip a význam aerodynamických komponent obecně na vozech Formula Student a také popsat aerodynamické komponenty našeho vozu UWB 03 z minulé sezony. Dále na tomto vozidle provést jízdní zkoušky, které budou sloužit k validaci CFD analýzy. Poté bude možné, takto nastavenou CFD analýzu použít k návrhu vozu na novou sezonu. Na základě této práce jsou navrženy a vyráběny jednotlivé komponenty pro vůz UWB 04. Každá taková práce by měla vycházet z nějaké fyzikální podstaty, v této práci uvádím konkrétně Coandův jev a Venturiho efekt. Na základě těchto fyzikálních jevů funguje většina aerodynamických komponent. V teoretické části je popsán princip a význam jednotlivých komponent a také jsou zde uvedena pravidla aerodynamických částí vozů Formula Student. Druhou částí práce je popis aerodynamických částí vozu UWB 03 včetně CFD analýzy jednotlivých nastavení komponent a jsou zde uvedené také nedostatky tohoto modelu. Další částí je validace, ve které jsou popsány metody reálných jízdních zkoušek, které slouží k porovnání se CFD analýzou. Jako první metodou je virtuální výpočet porovnáván s dojezdovou zkouškou, která probíhala bez problémů a z naměřených výsledků je možné vidět, že hodnoty získané CFD analýzou se s dojezdovou zkouškou liší o 5-17%, důležité je také to, že při různých jízdních režimech se hodnoty naměřené a vypočítané mění trendově stejně. Dalším validačním měřením mělo být měření sil v tlumičích, bohužel z důvodu špatně zvolené měřicí techniky nebylo možné toto měření správně vyhodnotit. V této části jsou uvedeny také vizualizační metody, u kterých jsou porovnávány snímky zachycené při měření se snímky vycházející z virtuálního výpočtu. První z nich, je metoda pomocí bavlnek, jejíž průběh byl bez problémů a výsledky je možné snadno porovnat s výpočtem. Druhá metoda je pomocí kouře, provedení této metody bylo velmi obtížné a vyhodnocení této zkoušky nebylo snadné. Při měření nového vozu bych doporučil provést dojezdovou zkoušku, měření sil v tlumičích, vizualizaci pomocí bavlnek a vizualizaci pomocí barvy. Na základě validace, lze považovat nastavení CFD analýzy za vhodné a pokračovat s ním při návrhu nových komponent. Je však důležité si uvědomit že vstupní model do této analýzy je značně zjednodušený a proto musíme brát výsledné hodnoty jednotlivých koeficientů s rezervou. Práce je zakončena návrhem komponent pro vůz UWB 04. Na začátku návrhu je důležité vybrat vhodný typ profilu, k čemuž slouží online databáze leteckých profilů. Na základě vyhodnocení vhodnosti typu profilu byly vybrány profily typu: CH 10 a S1223. Dalším krokem návrhu bylo optimalizování sestav těchto profilů pro jednotlivé oblasti vozu a to pomocí 2D simulací. Z těchto 2D simulací byly dále vytvořeny konkrétní komponenty a ty byly podrobeny 3D CFD analýze. Výsledky ze 3D CFD analýzy slouží k rozhodnutí, které varianty se pro vůz UWB 04 budou vyrábět. Moje práce na Aerodynamických prvcích dále pokračuje návrhem forem a samotnou výrobou komponent, což už není předmětem této diplomové práce.

Použité zdroje

- [1] Vlk , F. Stavba motorových vozidel. Brno: nakl. Vlk, 2003
- [2] MILLIKEN, William, F. a MILLIKEN, Douglas L. Race Car Vehicle Dynamics. Warrendale, 1995. SAE International.
- [3] SAE. 2017 Formula SAE® Rules [online]. [cit 8. 10. 2016]. Dostupné z: http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2017-18_fsae_rules.pdf.
- [4] KOVANDA, Bohuslav a Jan KOVANDA. *Aerodynamika vozidel*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01942-x.
- [5] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 0-8376-0142-8.
- [6] Coandův jev, [online] Dostupné z:
http://ottp.fme.vutbr.cz/vyzkum/coanda/podklady/Coanda_studijni_podklady.pdf
- [7] DANĚK, Milan. *Aerodynamika a mechanika letu pro piloty a techniky*. Praha: Naše vojsko, 1958. Knižnice letectví.
- [8] SELIG, Michael S. *Summary of low speed airfoil data*. Virginia Beach, Va.: SoarTech Publications, 1995. ISBN 0-9646747-1-8.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Důsledky kolidování dvou částic	11
Obrázek 2 Typy proudění	13
Obrázek 3 Vývoj mezní vrstvy	13
Obrázek 4 Tlak působící na rotující kolo a tvar proudnic [4].....	14
Obrázek 5 Ukázka vizualizace a odklonu proudu pro úhel desky 60° a rychlosti 2, 4, 6, 8 a 10 m/s [6]	15
Obrázek 6 Přilnutí proudu vody k zaoblené ploše lžice [6]	15
Obrázek 7 Demonstrace Venturiho efektu	16
Obrázek 8 Popis leteckého profilu [7]	17
Obrázek 9 Referenční plocha konkrétní varianty	18
Obrázek 10 Polární křivka pro pět různých Reynoldsových čísel	19
Obrázek 11 Vztlková křivka pro pět různých Reynoldsových čísel	19
Obrázek 12 Popis klopivého momentu [7].....	20
Obrázek 13 Momentová křivka pro pět různých Reynoldsových čísel.....	20
Obrázek 14 Demonstrace působení boční síly na pneumatiku [5].....	21
Obrázek 15 Přenos boční síly při různých F_z [5].....	21
Obrázek 16 Aerodynamické síly a momenty působící na vozidlo [4].....	22
Obrázek 17 Aerodynamická stabilita vozu, při působení bočního větru [4]	23
Obrázek 18 Jednotlivé části předního křídla	24
Obrázek 19 Jednotlivé části zadního křídla	25
Obrázek 20 Přínos slatu a natočení klapky [5]	26
Obrázek 21 Demonstrace významu bočnic (na zadním křídle)	26
Obrázek 22 Konstrukční řešení k oddělení vzduchu s rozdílným tlakem	27
Obrázek 23 Význam břitu a odtokové hrany.....	27
Obrázek 24 Tvary podlahy závodních vozidel [5]	28
Obrázek 25 Tvar kapsy sloužící ke správnému nasměrování vzduchu na chladič [2]	29
Obrázek 26 Znázornění oblastí pro návrh aerodynamických komponent povolených pravidly.....	30
Obrázek 27 Pohled na vůz UWB 03	33
Obrázek 28 Pohled na sestavu předního křídla vozu UWB 03	34
Obrázek 29 Pohled na sestavu zadního křídla vozu UWB 03	35
Obrázek 30 Pohled na podlahu vozu UWB 03.....	36
Obrázek 31 Zvýraznění komponent generující odpor	37
Obrázek 32 Zvýraznění komponent generující přítlak	37
Obrázek 33 Kumulační graf koeficientů C_L a C_D	38
Obrázek 34 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (běžný režim) - C_L	39
Obrázek 35 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (běžný režim) - C_D	39
Obrázek 36 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (běžný režim) - kumulační graf.....	40
Obrázek 37 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (DRS režim) - C_L	40
Obrázek 38 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (DRS režim) - C_D	41
Obrázek 39 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (DRS režim) - kumulační graf.....	41
Obrázek 40 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (režim bez křidel) - C_L	42
Obrázek 41 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (režim bez křidel) - C_D	42
Obrázek 42 Výsledky CFD analýzy vozu UWB 03 (režim bez křidel) - kumulační graf.....	43
Obrázek 43 Vyhodnocení dojezdové zkoušky - regrese naměřených hodnot	46

Obrázek 44 Vizualizační metoda pomocí barvy	48
Obrázek 45 Pohled na vůz UWB 03 před provedením vizualizace pomocí bavlnek	49
Obrázek 46 Nákres jednoho kusu bavlnky	49
Obrázek 47 Snímek z měření - vizualizace pomocí bavlnek (při rychlosti 80 km/h)	50
Obrázek 48 Snímek z CFD analýzy	50
Obrázek 49 Pohled na průběh testování - vizualizace pomocí kouře	51
Obrázek 50 Snímek z měření - vizualizace pomocí kouře (při rychlosti 80 km/h)	52
Obrázek 51 Snímek z CFD analýzy	52
Obrázek 52 Data naměřená při průjezdu jednoho kola disciplíny Skid-pad	53
Obrázek 53 Kritéria výběru nejvhodnějšího typu profilu	54
Obrázek 54 Porovnání jednotlivých typů profilů - $C_{L \max}$	55
Obrázek 55 Porovnání jednotlivých typů profilů - $C_{D \min}$	55
Obrázek 56 Geometrie profilu CH 10	56
Obrázek 57 Geometrie profilu S 1223	56
Obrázek 58 Rozdělení jednotlivých oblastí vozu pro 2D simulace	57
Obrázek 59 Popis jednotlivých oblastí při řešení 2D simulací	57
Obrázek 60 Řešené varianty oblasti předního křídla před kolem	58
Obrázek 61 Řešené varianty oblasti předního křídla mezi kolem a kapotou	59
Obrázek 62 Řešené varianty zadního křídla	60
Obrázek 63 Popis jednotlivých geometrií vstupujících do výpočtu	61
Obrázek 64 Popis jednotlivých oblastí při řešení 3D simulací včetně ukázky diskretizace sítě	61
Obrázek 65 Ukázka diskretizace sítě kolem jednotlivých komponent řešené úlohy	62
Obrázek 66 Pohled na ustálení dat analýzy - rezidua	62
Obrázek 67 Pohled na ustálení dat analýzy - jednotlivé koeficienty	63
Obrázek 68 Změna geometrie z varianty 302 na variantu 316	64
Obrázek 69 Změna geometrie z varianty 316 na variantu 330	64
Obrázek 70 Změna geometrie z varianty 330 na variantu 331	65
Obrázek 71 Změna geometrie z varianty 331 na variantu 332	65
Obrázek 72 Změna geometrie z varianty 332 na variantu 333	66
Obrázek 73 Změna geometrie z varianty 333 na variantu 339	66
Obrázek 74 Změna geometrie z varianty 302 na variantu 319	67
Obrázek 75 Změna geometrie z varianty 319 na variantu 318	67
Obrázek 76 Změna geometrie z varianty 318 na variantu 320	68
Obrázek 77 Změna geometrie z varianty 320 na variantu 317	68
Obrázek 78 Změna geometrie z varianty 327 na variantu 328	69
Obrázek 79 Změna geometrie z varianty 328 na variantu 337	69
Obrázek 80 Změna geometrie z varianty 337 na variantu 342	70
Obrázek 81 Změna geometrie z varianty 342 na variantu 347	70
Obrázek 82 Změna geometrie z varianty 302 na variantu 321	71
Obrázek 83 Změna geometrie z varianty 321 na variantu 322	72
Obrázek 84 Změna geometrie z varianty 321 na variantu 323	72
Obrázek 85 Změna geometrie z varianty 323 na variantu 324	73
Obrázek 86 Změna geometrie z varianty 324 na variantu 325	74
Obrázek 87 Změna geometrie z varianty 325 na variantu 326	74

Katedra konstruování strojů

Michal Dufek

Obrázek 88 Změna geometrie z varianty 326 na variantu 327	75
Obrázek 89 Změna geometrie z varianty 337 na variantu 338	76
Obrázek 90 Změna geometrie z varianty 337 na variantu 341	76
Obrázek 91 Změna geometrie z varianty 324 na variantu 343	77
Obrázek 92 Změna geometrie z varianty 343 na variantu 344	78
Obrázek 93 Změna geometrie z varianty 341 na variantu 345	78
Obrázek 94 Změna geometrie z varianty 345 na variantu 346	79
Obrázek 95 Výsledky CFD analýzy (varianta 335) – C_L	80
Obrázek 96 Grafické znázornění proudnic nasměřovaných předním křídlem.....	81
Obrázek 97 Jeden z možných výstupů 3D simulace - promítnutí rychlosti na rovině xz.....	81

Seznam tabulek

Tabulka 1 Přehled vlastností aeropaketu vozu UWB 03	33
Tabulka 2 Přehled vlastností předního křídla vozu UWB 03	34
Tabulka 3 Přehled vlastností zadního křídla vozu UWB 03	35
Tabulka 4 Přehled výsledků z dojezdové zkoušky	47
Tabulka 5 Porovnání výsledků reálného měření (dojezdové zkoušky) s virtuálním výpočtem (CFD analýza).....	47
Tabulka 6 Přehled vlastností nejvhodnějších profilů.....	56
Tabulka 7 Přehled aerodynamicky nejkvalitnějších zástupců jednotlivých variant včetně hodnot.....	59
Tabulka 8 Přehled aerodynamicky nejkvalitnějších zástupců jednotlivých variant včetně hodnot.....	59
Tabulka 9 Přehled aerodynamicky nejkvalitnějších zástupců jednotlivých variant včetně hodnot.....	60

Seznam příloh

Dle pokynů vedoucího práce doplňují práci tyto přílohy:

Příloha č.1 – Výkres sestavy vozu

Příloha č. 2 – CD s bakalářskou prací a výpočty v EXCELU