

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270013

Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizovaný návrh podlahy závodního vozu kategorie FSAE z hlediska
aerodynamiky

Autor: **Bc. Matěj Linhart**

Vedoucí práce: **Prof. Ing. Václav Uruba, Csc.**

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Matěj LINHART
Osobní číslo:	S19N0188P
Studijní program:	N0715A270013 Stavba energetických strojů a zařízení
Studijní obor:	Stavba energetických strojů a zařízení
Téma práce:	Optimalizovaný návrh podlahy závodního vozu kategorie FSAE z hlediska aerodynamiky
Zadávací katedra:	Katedra energetických strojů a zařízení

Zásady pro vypracování

1. Zpracovat rešerši z dostupné (nejen doporučené) literatury, zaměřit se na aerodynamiku podlahy vozů.
2. Provést proměření aerodynamických charakteristik podlahy stávajícího vozu UWB06.
3. Provést matematické modelování proudění pod podlahou vozu UWB06 s pomocí softwaru ANSYS Fluent.
4. Validovat CFD pomocí experimentálně získaných hodnot.
5. Navrhnout modifikované geometrie podlahy vozu.
6. Provést matematické modelování proudění pod modifikovanou podlahou vozu pomocí validovaného matematického modelu.
7. Provést srovnání původního řešení a nového návrhu geometrie podlahy.

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **výkres sestavy konstrukčního řešení podlahy vozu**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Tropea, C, Yarin, A. L., Foss, J. F., Springer handbook of experimental fluid mechanics. Berlin: Springer, 2007
- Katz J., Race Car Aerodynamics : Designing for Speed, Bentley (Robert) Inc.,US, 1996
- White F., Fluid Mechanics, McGraw-Hill Education, 2016
- ANSYS Fluent Theory Guide, August, 2019

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Václav Uruba, CSc.**
Katedra energetických strojů a zařízení
Konzultant diplomové práce: **RNDr. Daniel Duda, Ph.D.**
Katedra energetických strojů a zařízení
Datum zadání diplomové práce: **31. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

L.S.

Dr. Ing. Jaroslav Synáč
vedoucí katedry

L.S.
V Plzni dne 31. října 2020

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Václavu Urubovi, CSc., za ochotu a podporu při vypracovávání mé práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a trpělivost po celou dobu mého studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Linhart	Jméno Matěj
STUDIJNÍ OBOR	N0715A270013	
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Ing. Uruba, CSc.	Jméno Václav
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKE	
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Optimalizovaný návrh podlahy závodního vozu kategorie FSAE z hlediska aerodynamiky	

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	82	TEXTOVÁ ČÁST	50	GRAFICKÁ ČÁST	32
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce je zaměřena na problematiku vlivu tvaru podlahy na aerodynamiku závodního vozu. Mezi hlavní témata patří rešerše používaných systémů, experimentální měření a návrh nové podlahy. Přínosem této práce je zlepšení aerodynamiky závodního vozu UWB07.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	FSAE, aerodynamika, difusor, měření tlaku, CFD

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Linhart	Name Matěj
FIELD OF STUDY	N0715A270013	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Ing. Uruba, CSc.	Name Václav
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Optimized design of FSAE racing car undertray in terms of aerodynamics	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power systems engineering	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	82	TEXT PART	50	GRAPHICAL PART	32
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma sheet is focused on problem of influence of shape of the geometry of the undertray on aerodynamic characteristics of the car. Main topics are research of the systems, experimental measurement and design of the new undertray. Benefit of this diploma thesis is improvement in aerodynamic characteristics of UWB07 racing car.
KEY WORDS	FSAE, aerodynamics, diffuser, pressure measurement, CFD

Použité symboly

Symbol	Jednotka	Význam
c_d	[-]	Koeficient aerodynamického odporu tělesa (vozidla)
c_l	[-]	Koeficient aerodynamického zdvihu tělesa (vozidla)
ρ	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Hustota vzduchu
S	$[m^2]$	Obsah průřezu vozidla v čelním pohledu
v	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Rychlost
F_d	[N]	Odporová síla
F_l	[N]	Přítlačná síla
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
C_p	[-]	Tlakový koeficient
C_g	[-]	Koeficient hloubky průniku turbulence

Obsah

Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	14
Seznam grafů.....	15
Seznam příloh.....	16
Úvod	17
1 Formula SAE.....	18
2 Aerodynamika vozidla	19
2.1 Aerodynamické síly působící na vozidlo.....	19
2.1.1 Aerodynamický odpor	19
2.1.2 Aerodynamický přítlak.....	20
2.2 Způsoby dosažení aerodynamického přítlaku.....	24
2.2.1 Bernoulliho rovnice.....	24
2.2.2 Letecké profily	25
2.2.3 Podlaha vozu.....	26
2.2.4 Používané podlahy vozů.....	27
2.2.4.1 Lotus 1978 F1	27
2.2.4.2 Formule 1 v roce 2021.....	28
3 Měření	30
3.1 Příprava měření	30
3.2 Měření.....	35
3.3 Zpracování dat.....	35
3.4 Výsledky	38
4 Návrh podlahy vozu UWB07	41
4.1 Pravidla pro návrh aerodynamických prvků.....	41
4.2 Cíle pro návrh podlahy vozu UWB07	42
4.3 Důležité pojmy pro návrh vozu.....	43
4.3.1.1 CFD	43
4.3.1.2 Reynoldsovo číslo	43
4.3.1.3 Laminární a turbulentní proudění	43
4.3.1.4 ANSYS	44
4.3.1.5 ANSYS Fluent	44

4.3.1.6	ICON CFD.....	44
4.3.1.7	Rezidua	44
4.3.1.8	Konvergence	44
4.3.1.9	Síť	45
4.3.1.10	Mezní vrstvy	45
4.4	Výpočet aerodynamiky vozu UWB06.....	45
4.4.1	Tvorba CAD modelu pro výpočet.....	45
4.4.2	Výpočet UWB06 pomocí ANSYS Fluent.....	48
4.4.2.1	Příprava výpočtu	48
4.4.2.2	Výpočet.....	49
4.4.2.3	Výsledky.....	49
4.4.3	Validace CFD výpočtu pomocí měření	54
4.4.4	Výpočet UWB06 pomocí ICON CFD.....	55
4.4.4.1	Průběh výpočtu	55
4.4.4.2	Výsledky:.....	56
4.5	Návrh modifikovaných podlah pro vůz UWB07	63
4.5.1	Varianta 1-5	64
4.5.2	Varianty 5-7	65
4.5.3	Varianty 8-10	66
4.6	Výsledky výpočtů modifikovaných podlah	67
4.7	Výpočet vybrané varianty podlahy pomocí validovaného matematického modelu ..	72
5	Zhodnocení návrhu UWB07	75
	Závěr.....	77
	Použitá literatura	78
	PŘÍLOHA č. 1.....	81
	Výkres podlahy vozu UWB06	81
	PŘÍLOHA č. 2.....	82
	Výkres podlahy pro vůz UWB07	82

Seznam obrázků

Obrázek 1 Rozložení tlaku na povrchu formule 1 [3].....	19
Obrázek 2 Znázornění aerodynamických sil působících na vozidlo.....	20
Obrázek 3 Znázornění maximální přenášené síly pneumatikami vzhledem k aerodynamickému přítlaku [7].....	22
Obrázek 4 Srovnání nastavení zadního křídla vozu F1 pro různé okruhy [9].....	23
Obrázek 5 Aeropaket vozu UWB06.....	24
Obrázek 6 Znázornění Bernoulliho principu	25
Obrázek 7 Znázornění obtékání leteckého profilu	25
Obrázek 8 Podíly jednotlivých komponent monopostu F1 na celkových aerodynamických koeficientech [11].....	26
Obrázek 9 CFD simulace proudění pod podlahou vozu kategorie FSAE [12].....	27
Obrázek 10 Tvarování podlahy vozů lotus 78 a 79 [13]	28
Obrázek 11 Znázornění oblastí podlahy vozu F1 pro sezónu 2021 [14].....	29
Obrázek 12 Monopost F1 Red Bull Racing Honda pro sezónu 2021 [15].....	29
Obrázek 13 Výkres zhotovení odběrového místa	30
Obrázek 14 Odběrové místo	31
Obrázek 15 Umístění měřicího zařízení na rámu formule.....	31
Obrázek 16 Měřicí zařízení a odběrové pozice.....	32
Obrázek 17 Umístění počítače a baterií na křídle vozu.....	33
Obrázek 18 Umístění vyhodnocovací jednotky na rámu formule	33
Obrázek 19 Schéma měření	34
Obrázek 20 Umístění odběrových pozic tlaku.....	34
Obrázek 21 Testovací plocha ve Lhotě [16].....	35
Obrázek 22 Odběrové pozice v první části levého kanálu.....	40
Obrázek 23 Zóny limitující osazení aerodynamických prvků [1].....	41
Obrázek 24 Keep-out zóny [1].....	42
Obrázek 25 Laminární a turbulentní proudění [20].....	43
Obrázek 26 Znázornění síťování mezní vrstvy [25].....	45
Obrázek 27 CAD model vozu UWB06	46
Obrázek 28 CAD model zjednodušený pro CFD výpočet.....	46
Obrázek 29 CAD model vozu UWB06	47

Obrázek 30 CAD model zjednodušený pro CFD výpočet.....	47
Obrázek 31 Výpočetní síť.....	48
Obrázek 32 Rozložení tlaku při rychlosti 50 km/h	50
Obrázek 33 Rozložení tlaku při rychlosti 70 km/h	50
Obrázek 34 Rozložení tlaku při rychlosti 90 km/h	50
Obrázek 35 Tlakové pole ve vertikálním řezu v úrovni prostředního kanálu.....	51
Obrázek 36 Tlakové pole ve vertikálním řezu v úrovni bočního kanálu.....	51
Obrázek 37 Rychlostní pole ve vertikálním řezu v úrovni prostředního kanálu	52
Obrázek 38 Rychlostní pole ve vertikálním řezu v úrovni bočního kanálu	52
Obrázek 39 Rychlostní pole ve vertikálním řezu v úrovni kol.....	52
Obrázek 40 Rychlostní pole obtékajícího proudu vzduchu	53
Obrázek 41 Proudnice vzduchu obtékajícího formuli	53
Obrázek 42 Průběh výpočtu.....	56
Obrázek 43 Rozložení tlaku na povrchu formule (spodní pohled)	57
Obrázek 44 Rozložení tlaku na povrchu formule (axonometrický pohled)	57
Obrázek 45 Rozložení tlakového pole ve vertikálním řezu.....	58
Obrázek 46 Rozložení tlakového pole ve vertikálním řezu.....	58
Obrázek 47 Zobrazení pole koeficientu hloubky průniku turbulence C_g ve vertikálním řezu.....	59
Obrázek 48 Zobrazení pole koeficientu hloubky průniku turbulence C_g ve vertikálním řezu.....	59
Obrázek 49 Zobrazení pole koeficientu hloubky průniku turbulence C_g ve vertikálním řezu.....	60
Obrázek 50 Zobrazení pole rychlosti proudění ve vertikálním řezu.....	60
Obrázek 51 Zobrazení pole rychlosti proudění ve vertikálním řezu.....	61
Obrázek 52 Zobrazení pole rychlosti proudění ve vertikálním řezu.....	61
Obrázek 53 Zobrazení pole rychlosti proudění v horizontálním řezu.....	62
Obrázek 54 Proudnice obtékající formuli (axonometrický pohled).....	62
Obrázek 55 Proudnice obtékající formuli (axonometrický pohled).....	63
Obrázek 56 Proudnice obtékající formuli (spodní pohled).....	63
Obrázek 57 Varianta podlahy č. 1	64
Obrázek 58 Varianta podlahy č. 3.....	65
Obrázek 59 Varianta podlahy č. 6.....	65
Obrázek 60 Umístění trubky pro zdvih na voze UWB05.....	66
Obrázek 61 Varianta podlahy č. 10.....	67
Obrázek 62 Rozložení tlaku na formuli s modifikovanou podlahou (spodní pohled)	68

Obrázek 63 Rozložení tlakového pole ve vertikálním řezu.....	69
Obrázek 64 Rozložení tlakového pole ve vertikálním řezu.....	69
Obrázek 65 Rozložení rychlostního pole ve vertikálním řezu.....	70
Obrázek 66 Rozložení rychlostního pole ve vertikálním řezu.....	70
Obrázek 67 Rozložení rychlostního pole v horizontálním řezu.....	71
Obrázek 68 Proudnice obtékajícího vzduchu pod modifikovanou podlahou.....	71
Obrázek 69 Rozložení tlaku na podlaze formule.....	72
Obrázek 70 Rozložení tlaku ve vertikální rovině v místě prostředního kanálu.....	72
Obrázek 71 Rozložení tlaku ve vertikální rovině v místě bočního kanálu.....	73
Obrázek 72 Rychlostní pole v řezu prostředním kanálem.....	73
Obrázek 73 Rychlostní pole v řezu bočním kanálem.....	73
Obrázek 74 Proudnice vzduchu obtékajícího formuli.....	74

Seznam tabulek

Tabulka 1 Naměřené hodnoty	36
Tabulka 2 Směrodatné odchylky pro jednotlivá měření.....	37
Tabulka 3 Srovnání výsledků měření s výsledky výpočtu CFD.....	54
Tabulka 4 Srovnání modifikací podlah pro vůz UWB07	67
Tabulka 5 Srovnání výsledných koeficientů UWB06 a UWB07.....	75

Seznam grafů

Graf 1 Vývoj součinitelů odporu a vztlaku v podélné délce vozidla	21
Graf 2 Historický vývoj dosažitelného odstředivého zrychlení v čase ^[8]	23
Graf 3 Vývoj tlaku v jednotlivých bodech v závislosti na rychlosti	38
Graf 4 Vývoj tlaku v podélné délce levého kanálu při různých rychlostech.....	39
Graf 5 Vývoj koeficientů C_1 a C_d podél osy vozidla UWB07.....	68
Graf 6 Srovnání koeficientů C_1 a C_d v podélné ose vozů UWB06 a UWB07 s modifikovanou podlahou.....	75
Graf 7 Srovnání velikosti přítláčné síly monopostů UWB06 a UWB07.....	76

Seznam příloh

Příloha 1 – výkres podlahy vozu UWB06

Příloha 2 – výkres podlahy pro vůz UWB07

Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na aerodynamiku studentské formule týmu UWB Racing team Pilsen. Diplomová práce obsahuje popis funkce podlahy jako aerodynamického prvku vozu, popis a zpracování dat z měření provedeného na voze UWB06.

Cílem této diplomové práce je návrh nové podlahy pro závodní monopost UWB07, se kterým měl tým Západočeské univerzity v Plzni soutěžit v roce 2020. Bohužel z důvodu propuknutí pandemie nemoci Covid-19 byla závodní sezóna celosvětově zrušena, a proto byla v roce 2020 pozastavena i stavba monopostu UWB07. Nově navržená podlaha vychází z parametrů podlahy vozu UWB06.

Diplomová práce je rozdělena do pěti kapitol. V první kapitole je popsána celosvětová studentská soutěž FSAE a její jednotlivé disciplíny. Následuje kapitola zaměřená na aerodynamiku vozu, blíže jsou popsány aerodynamické síly působící na vozidlo a způsoby dosažení aerodynamického přítlaku. Třetí kapitola je věnována měření, které bylo provedeno na letištní ploše ve Lhotě za účelem zjištění aerodynamických charakteristik podlahy vozu. Následuje kapitola věnována návrhu podlahy vozu UWB07, v kapitole jsou definovány důležité pojmy pro návrh vozu, pravidla návrhu aerodynamických prvků a cíle návrhu. Tato kapitola také obsahuje výpočet aerodynamiky vozu UWB06. Jsou zpracovány návrhy jednotlivých variant podlahy pro vůz UWB07. Jednotlivé varianty jsou porovnány na základě CFD výpočtů. V závěrečné kapitole je návrh nové podlahy zhodnocen.

Očekávaným přínosem této diplomové práce je zvýšení aerodynamické efektivity podlahy vozu. Toto zvýšení efektivity spočívá ve zvýšení přítlaku vozu.

1 Formula SAE

Formula SAE je celosvětová studentská soutěž pořádaná asociací SAE International. Tato soutěž je určena pro týmy složené studenty technických univerzit. V současnosti je do této soutěže registrováno 622 týmů. V kategorii FSAE je cílem vyvinout monopost formulového typu dle pravidel pro danou soutěžní sezónu a na závodech porovnat svůj monopost s monoposty ostatních univerzit ve statických a dynamických disciplínách. Podstatou statických disciplín jsou prezentace, během kterých studenti obhajují svůj inženýrský návrh. V dynamické části jsou poté skutečně prověřeny jízdní vlastnosti vozu v disciplínách:

- Akcelarace: závod ve zrychlení na 75 m se startem z klidu
- Skid-pad: závod po dvou kružnicích v obou směrech
- AutoX: závod na 1 kolo po okruhu sloužící zároveň jako kvalifikace do hlavního závodu
- Endurance: vytrvalostní závod na 22 km na okruhu s výměnou řidičů po 11 km

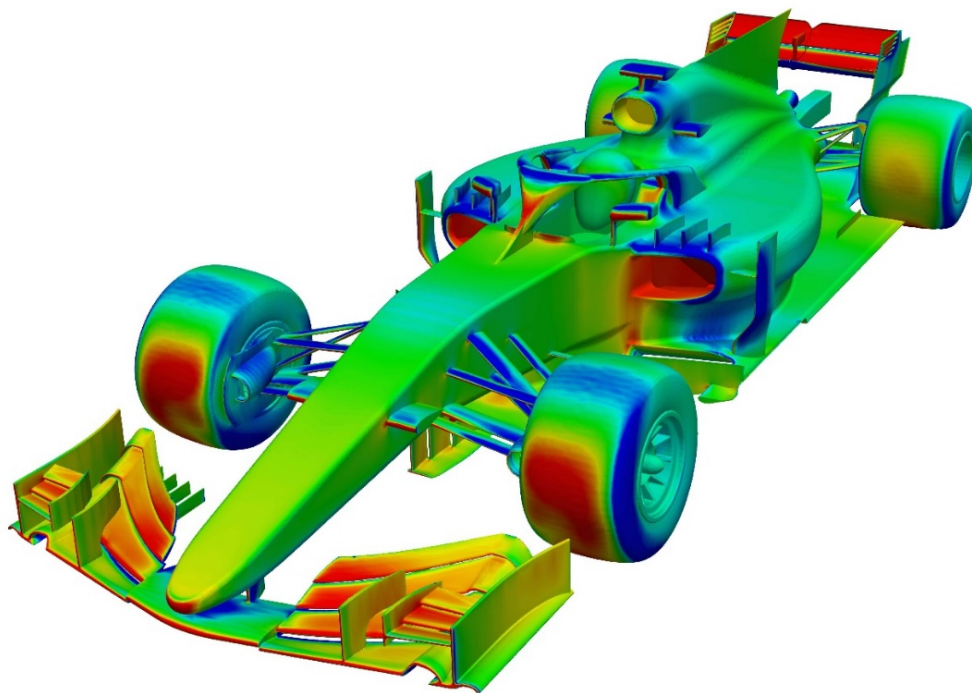
Na Západočeské univerzitě v Plzni působí tým UWB Racing team Pilsen. Nově obnovený tým působící od roku 2015 stojí za vývojem vozů UWB03 až UWB06 pro závodní sezóny 2016-2019. Pro závodní sezónu 2020 byl zahájen vývoj monopostu UWB07, bohužel kvůli pandemii Covid-19 byla závodní sezóna 2020 celosvětově zrušena. ^[1]

2 Aerodynamika vozidla

Aerodynamika je vědní obor fyziky zabývající se prouděním tekutiny a silovým působením proudu tekutiny na obtékané těleso. Velké uplatnění tohoto oboru se nachází v oblastech letectví a automobilového průmyslu. [2]

2.1 Aerodynamické síly působící na vozidlo

Během jízdy působí na těleso vlivem obtékání proudem vzduchu aerodynamické síly. Tyto síly vznikají rozdílným rozložením celkového tlaku po povrchu vozidla. Celkový tlak je součtem tlaku statického a dynamického. Statický tlak je tlak okolního vzduchu. Dynamický tlak je tlak vyvolaný proudem vzduchu a je úměrný druhé mocnině rychlosti proudícího vzduchu. Rozložení tlaku působící na povrch vozidla lze zobrazit pomocí barevného gradientu vykresleného na povrchu daného vozidla, kde barvy charakterizují hodnotu celkového tlaku působícího na vozidlo (obrázek 1).



Obrázek 1 Rozložení tlaku na povrchu formule 1 [3]

2.1.1 Aerodynamický odpor

V oblasti silničních vozidel je nejvýznamnějším parametrem aerodynamického působení síly odpor vzduchu. Odpor vzduchu je síla působící proti pohybu vozidla a má vliv na spotřebu

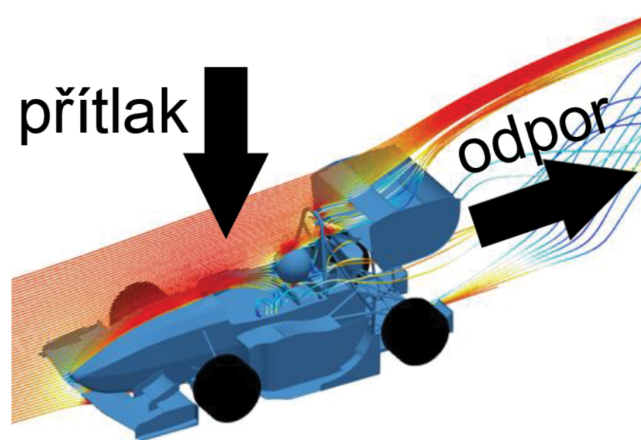
paliva a maximální dosažitelnou rychlost. Velikost aerodynamického odporu je charakterizována pomocí součinitele odporu c_d . Ten charakterizuje pouze tvar vozidla nebo objektu. Výsledná velikost síly aerodynamického odporu je dále závislá na relativní rychlosti, obsahu průřezu, hustotě vzduchu a je dána rovnicí (1)

$$F_d = \frac{1}{2} c_d \rho S v^2 [N] \quad (1)$$

Běžná velikost součinitele odporu u dnešních vozidel se pohybuje kolem hodnoty 0,3. Snižování této hodnoty je zejména v poslední době u silničních vozidel velmi žádané. Důvodem je snižování spotřeby a s tím spojené snižování emisí. Pro představu o tomto trendu, minimální hodnota c_d vozidla Škoda Octavia třetí generace činila 0,291 [-]. U téhož modelu se s příchodem čtvrté generace minimální hodnota c_d snížila na 2,4 [-].^{[4][5][6]}

2.1.2 Aerodynamický přítlak

Aerodynamický přítlak je síla působící na vozidlo ve směru kolmém ke směru rychlosti vozidla ve vertikálním směru. Aerodynamický přítlak je obdobou pojmu aerodynamický zdvih používaném v letectví, nositelky obou těchto sil jsou shodné. Aerodynamický přítlak je udáván směrem k vozovce, aerodynamický zdvih je udáván směrem vzhůru. Tento rozdíl je dán praktičností používaných pojmů v daných oborech a zároveň žádaným kladným směrem výsledné síly.

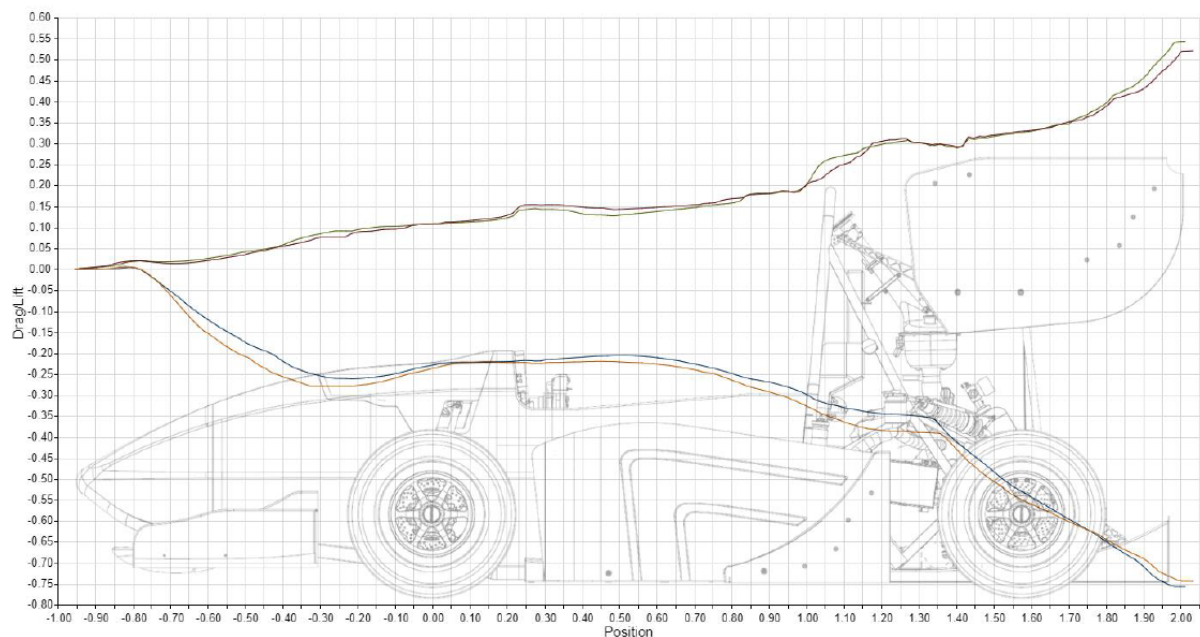


Obrázek 2 Znáznornění aerodynamických sil působících na vozidlo

Velikost aerodynamického přítlaku je charakterizována pomocí součinitele přítlaku c_l . Tento součinitel charakterizuje pouze tvar vozidla nebo objektu. Výsledná velikost síly aerodynamického přítlaku je dále závislá na relativní rychlosti, obsahu průřezu, hustotě vzduchu a je dána obdobnou rovnicí jako pro výpočet přítláčné síly (2)

$$F_l = \frac{1}{2} c_l \rho S v^2 [N] \quad (2)$$

Na následujícím grafu je vyobrazen vývoj těchto dvou součinitelů v podélné vzdálenosti u vozů UWB05 a UWB06. Na vodorovné ose je zobrazena vzdálenost od prvního bodu formule, na svislé ose je zobrazena hodnota součinitelů odporu a vztlaku (přítlak je zde zobrazen jako záporná hodnota vztlaku). Hodnoty obou součinitelů jsou zde zobrazeny jako součtové, z tohoto důvodu začínají na nulové hodnotě a končí na celkové hodnotě součinitelů vozidel. Za povšimnutí stojí zejména prudký nárůst přítlaku v oblasti předního křídla a poté nárůst přítlaku v zadní části vozu vlivem zadního křídla a podlahy vozu.

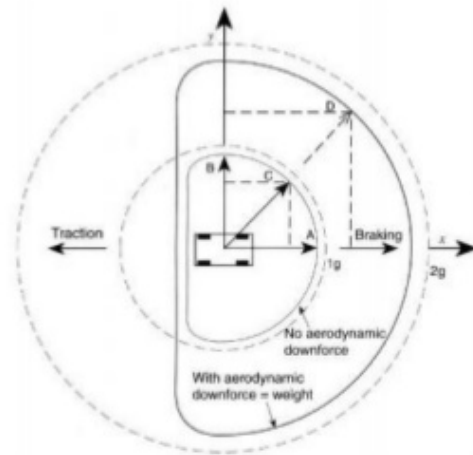
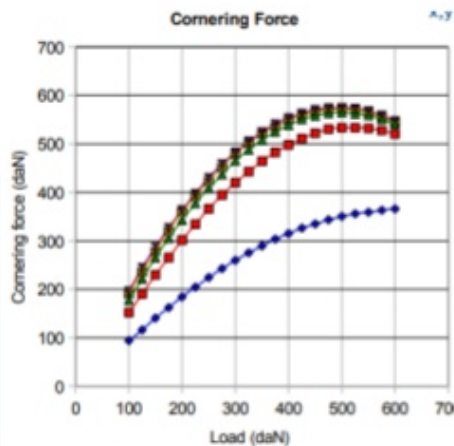


Graf 1 Vývoj součinitelů odporu a vztlaku v podélné délce vozidla

Maximální rychlost vozidla při průjezdu zatáčkou je limitována třecí silou mezi povrchem vozovky a pneumatikou. Tečným směrem v tomto případě působí odstředivá síla daná hmotností vozidla, rychlostí a poloměrem otáčení. Kolmým směrem je pneumatika přitlačována k vozovce součtem gravitační síly a aerodynamického přítlaku. Jelikož zvýšením přítlaku dojde ke zvýšení odstředivé síly, kterou je pneumatika schopna přenést, je poté

vozidlu umožněno projíždět zatáčkou vyšší rychlostí. Z tohoto důvodu je aerodynamický přítlak žádaný zejména u sportovních a závodních vozidel.

Downforce and Grip

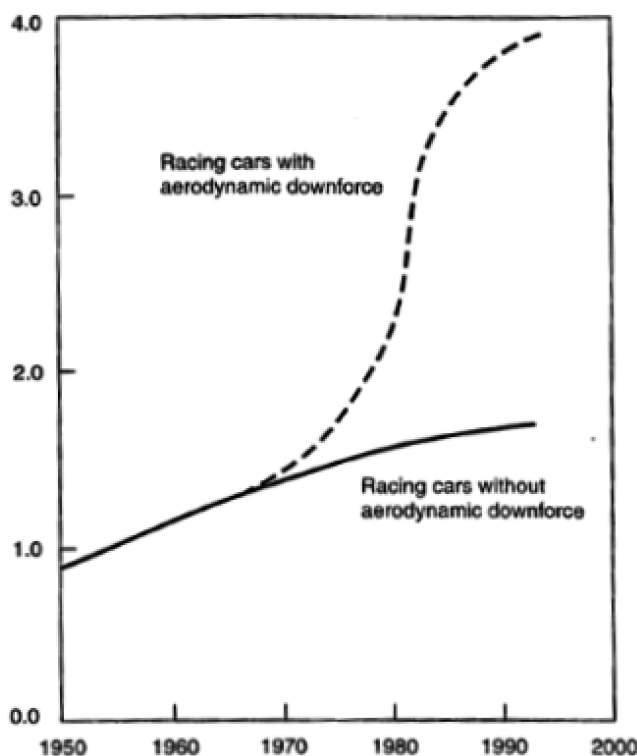


- The tyre can transfer a force through its contact that is a function of vertical load (linear).

Department of Mechanical Engineering, NCERC

Obrázek 3 Znárodnění maximální přenášené síly pneumatikami vzhledem k aerodynamickému přítlaku [7]

Přilnavost vozidla je závislá na dalších parametrech, kterými jsou například rozložení hmotnosti, volba pneumatik, podvozku a jeho nastavení. Pro tyto vlastnosti je zaveden termín mechanická přilnavost, zkoumání těchto veličin však není předmětem této diplomové práce. Na následujícím grafu je zobrazen trend vývoje maximálního dosažitelného odstředivého zrychlení (svislá osa) při průjezdu zatáčkou v čase (vodorovná osa). Souvislou čarou jsou zobrazeny závodní vozidla bez aerodynamického přítlaku, přerušovanou čarou jsou zobrazeny závodní vozidla s aerodynamickým přítlakem. [7]



Graf 2 Historický vývoj dosažitelného odstředivého zrychlení v čase^[8]

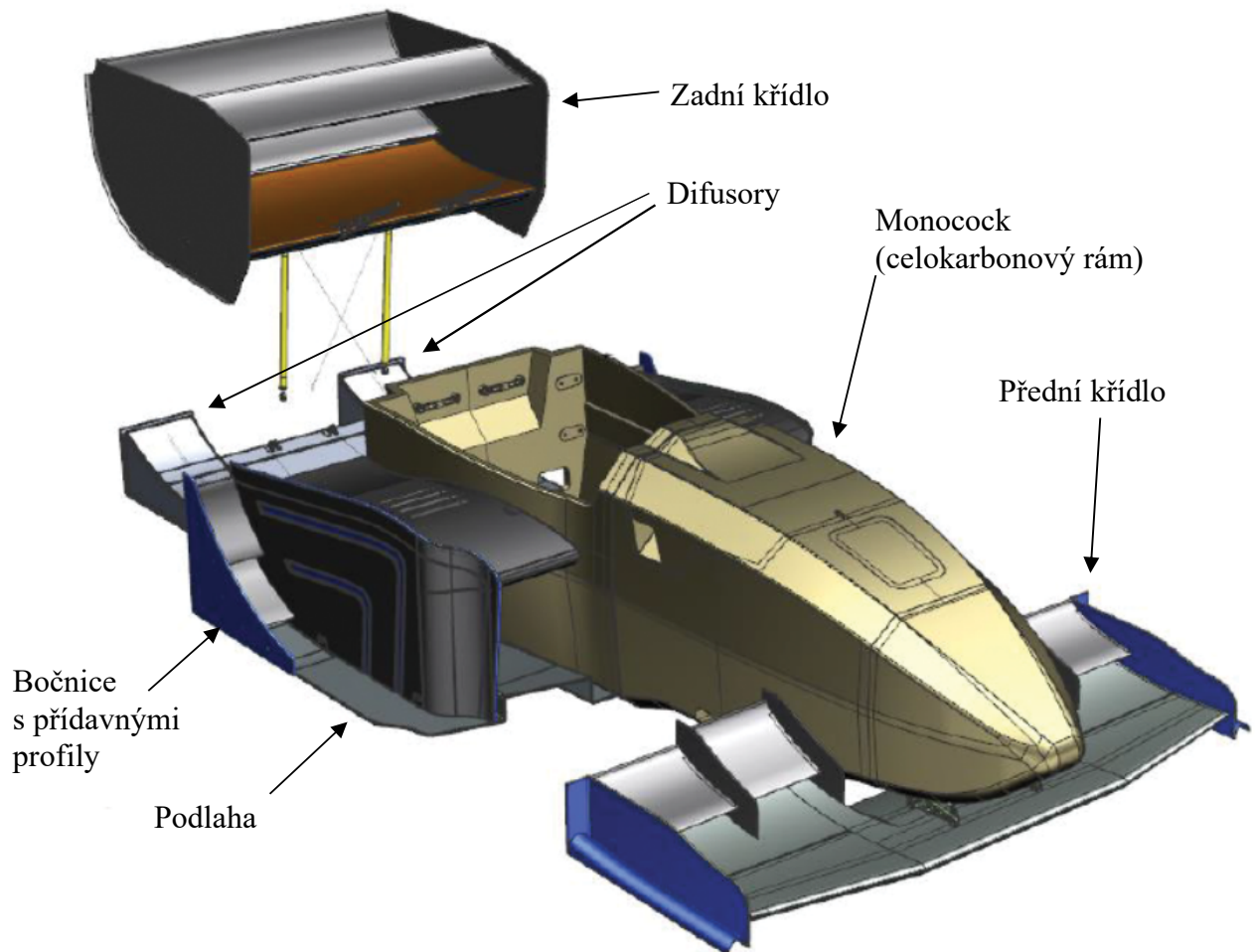
Aerodynamický přítlak a odpor jsou veličiny, které na sobě nejsou přímo závislé. Zvyšování přítlaku zejména v případě přídavných křídel však není možné, aniž by s přítlakem nebyl zvyšován i odpor. Proto je důležité najít ideální řešení pro daný vůz, typ závodu, nebo dokonce ideální nastavení pro daný okruh. Na obrázku 4 je k vidění rozdíl v nastavení zadního křídla stejného vozu formule 1 pro různé závodní okruhy. Monaco je městský okruh s množstvím zatáček, kde je důležitý vysoký přítlak. Monza je naopak nejrychlejším okruhem série formule 1, kde je velké množství dlouhých rovných úseků. Proto je ideálním nastavením pro okruh v Monze nižší odpor za cenu nižšího přítlaku pro dosažení vysokých rychlostí na rovných úsecích. ^[8] ^[9]



Obrázek 4 Srovnání nastavení zadního křídla vozu F1 pro různé okruhy ^[9]

2.2 Způsoby dosažení aerodynamického přitlaku

K dosažení aerodynamického přitlaku vozidla slouží soustava prvků zvaná aeropaket. Aeropaket se skládá z prvků využívajících principu Bernoulliho rovnice tlaku.



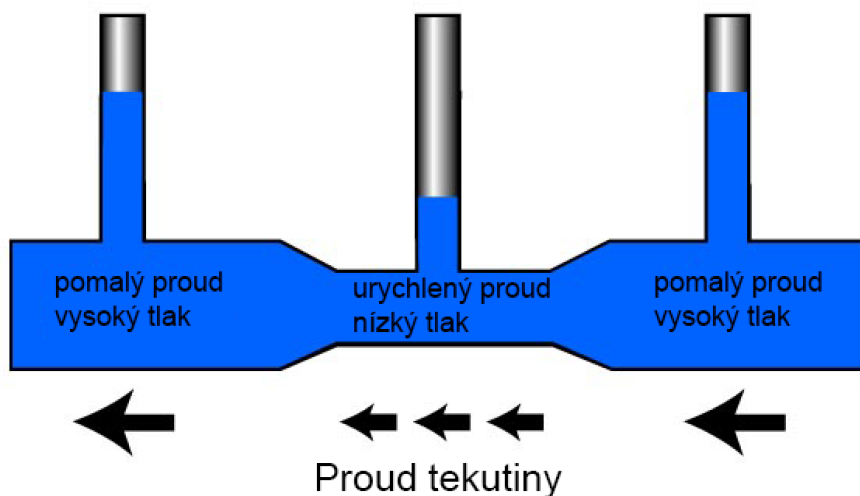
Obrázek 5 Aeropaket vozu UWB06

2.2.1 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice je vztah v mechanice tekutin vycházející ze zákona zachování energie. Ve zjednodušené formě:

$$\rho \frac{v^2}{2} + p = konst. \quad (3)$$

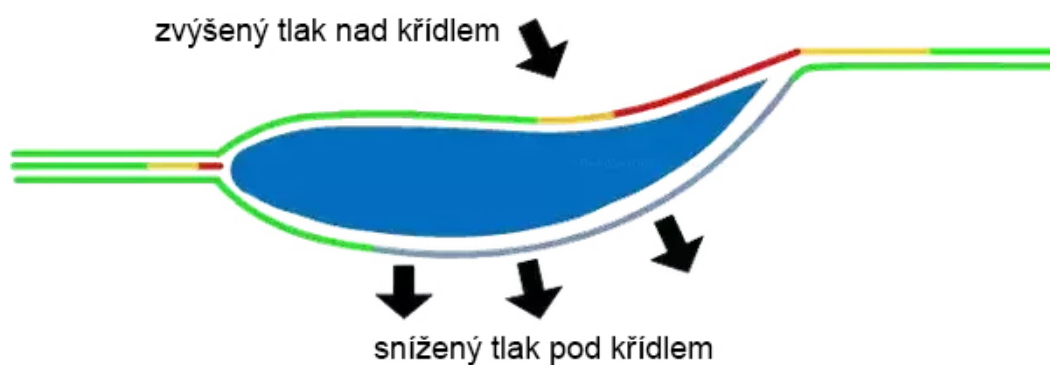
Z této rovnice vyplývá, že v urychleném proudu tekutiny dochází ke snížení tlaku. Prvky aeropaketu využívající tohoto principu jsou tvarovány tak, že rozdílnými rychlostmi obtékání těchto prvků vzniká tlaková diference působící na plochy. Rozdílem těchto tlaků je dána výsledná aerodynamická síla. ^[10]



Obrázek 6 Znárodnění Bernoulliho principu

2.2.2 Letecké profily

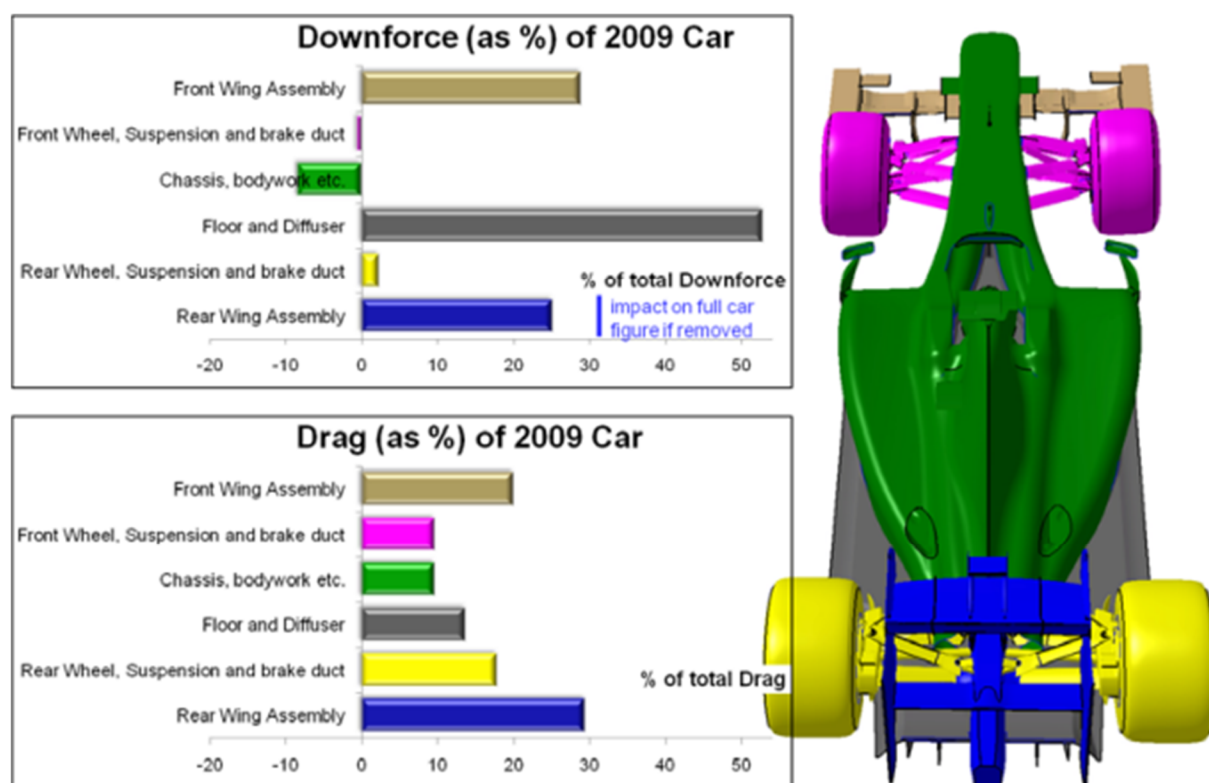
K zajištění přitlaku se u závodních vozů často používají přitlačná křídla. Tato křídla jsou tvořena jedním nebo více obrácenými leteckými profily. Tyto profily využívají výše zmíněný Bernoulliho princip. Urychlením proudu vzduchu na jedné straně profilu vzniká rozdíl tlaků. Rozdílem tlaků na vrchní a spodní straně profilu vzniká síla působící na tento profil. Použití více profilů slouží ke zvýšení plochy, na kterou působí tlaková diference. Toho by se dalo dosáhnout použitím profilu s delší tětivou. Tyto velké profily jsou ale náchylné na odtrhávání proudu. Kaskáda profilů je oproti tomu stabilnější.



Obrázek 7 Znárodnění obtékání leteckého profilu

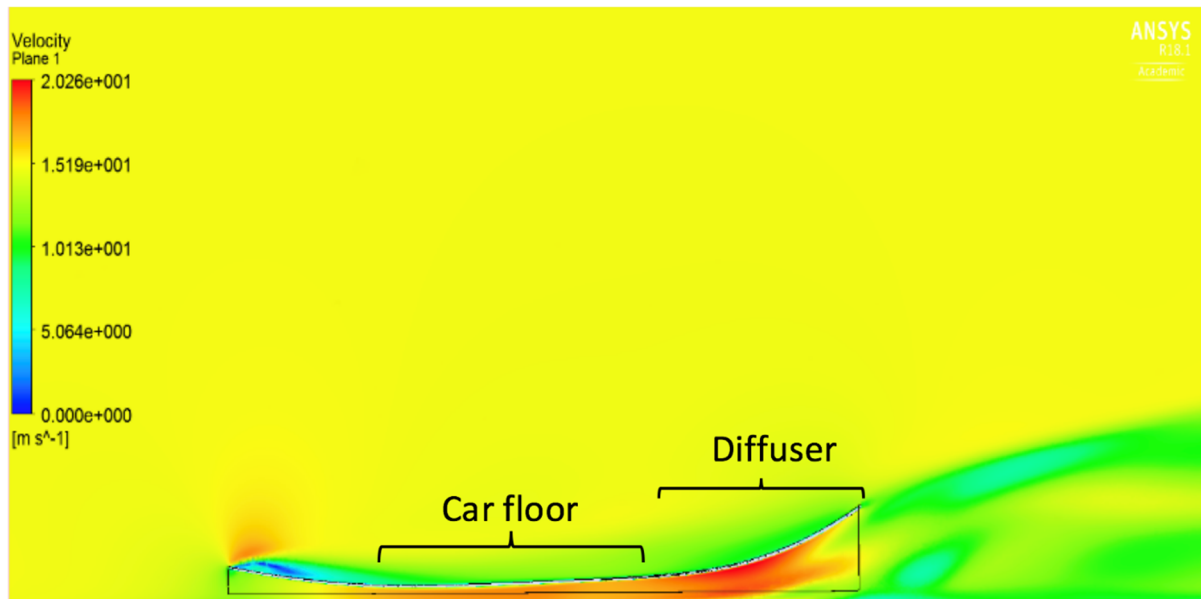
2.2.3 Podlaha vozu

Dále lze účinně dosáhnout aerodynamického přítlaku tvarem profilu podlahy. Princip tohoto způsobu spočívá ve vytvoření takového tvaru podlahy, že dochází urychlení proudu vzduchu mezi vozidlem a vozovkou. Vlivem tohoto urychlení proudu vzduchu dochází ke snížení tlaku působícího na spodní část vozu, čímž je generována přítláčná síla. Správný tvar podlahy je pro aerodynamické vlastnosti vozu velmi důležitý, jelikož dochází k velkému zvýšení aerodynamického přítlaku na úkor jen velmi malého zvýšení odporu. Na obrázku níže je zobrazeno srovnání podílu jednotlivých komponent monopostu F1 z roku 2009. Za povšimnutí stojí více než 50% podíl podlahy a difusoru na celkovém generovaném přítlaku monopostu, přičemž podíl stejné komponenty na celkovém odporu je pouze 14 %.^[11]



Obrázek 8 Podíly jednotlivých komponent monopostu F1 na celkových aerodynamických koeficientech ^[11]

V přední části se podlaha vozu snižuje směrem k vozovce, čímž dochází ke zmenšení průtočného průřezu a urychlení proudu vzduchu. V zadní části podlahy se nachází difusor, ve kterém je proud vzduchu opět zpomalen a ustálen.

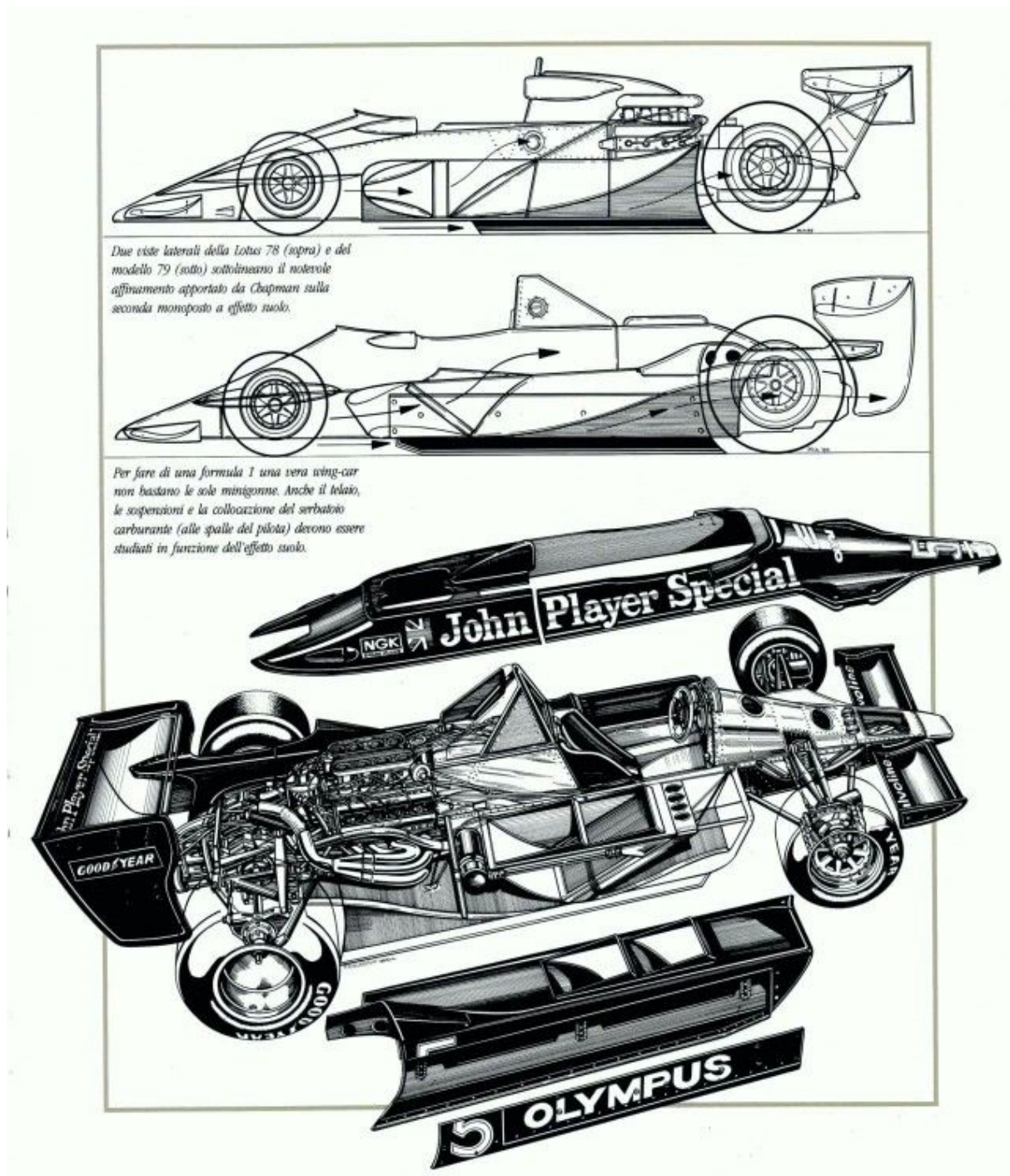


Obrázek 9 CFD simulace proudění pod podlahou vozu kategorie FSAE [12]

2.2.4 Používané podlahy vozů

2.2.4.1 Lotus 1978 F1

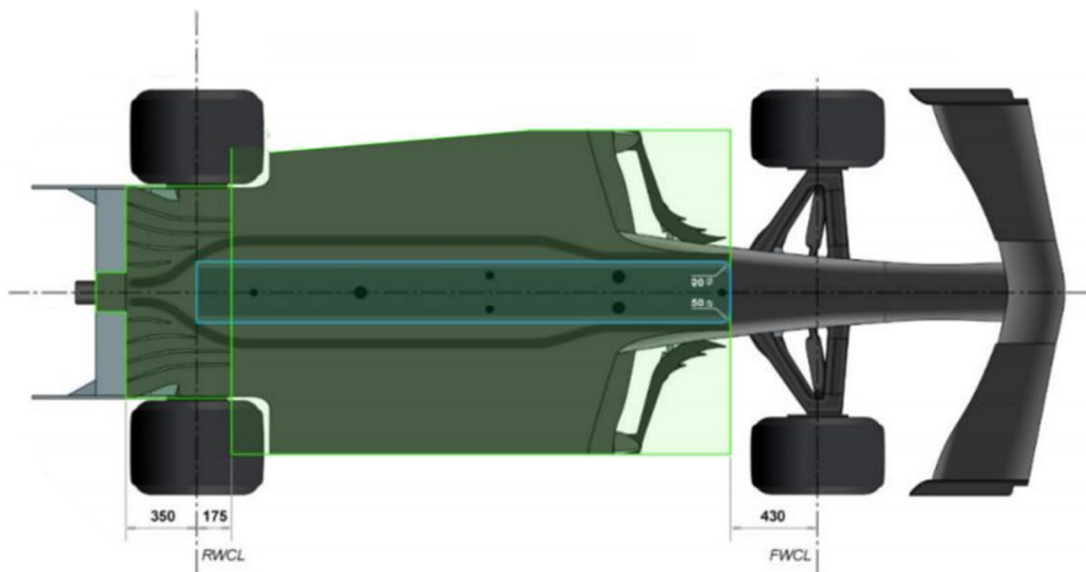
Milníkem v používání podlahy vozu jako aerodynamického prvku vozidla je vůz F1 týmu Lotus z roku 1978. Toto vozidlo bylo první, které začalo využívat efektu generování přtlaku pomocí tvarování podlahy vozu, což v roce 1978 přineslo týmu Lotus titul mistra světa. K přitlačnému efektu tohoto vozu sloužily dva kanály po obou stranách kokpitu začínající za předními koly v nízké úrovni pod chladičem s rychle se zvedajícími difusory končícími v úrovni před zadními koly. Prostřední část podlahy není pro přitlak využívána.



Obrázek 10 Tvarování podlahy vozů lotus 78 a 79 [13]

2.2.4.2 Formule 1 v roce 2021

V dnešní době ve vrcholném motorsportu existují striktní pravidla, které aeropaket musí splňovat. Vozy se díky těmto pravidlům od sebe koncepčně příliš neliší. V sezóně 2021 musí podlaha vozů být v rozmezí vertikálních rovin 430 mm za osou přední nápravy a 175 mm před zadní nápravou ploché a rovné, bez změny výškové úrovně viz obrázek níže. Za touto oblastí se poté nachází difusor.



Obrázek 11 Znáznornění oblastí podlahy vozu F1 pro sezónu 2021 [14]

Tým Red Bull Racing Honda pro zvýšení proudu vzduchu pod podlahou v této sezóně osadil na vůz malé kanály kolem nosu formule směřující pod podlahu. Tento tým je znám tím, že jejich aeropaket bývá jedním z nejpropracovanějších na startovním roštu formule 1.



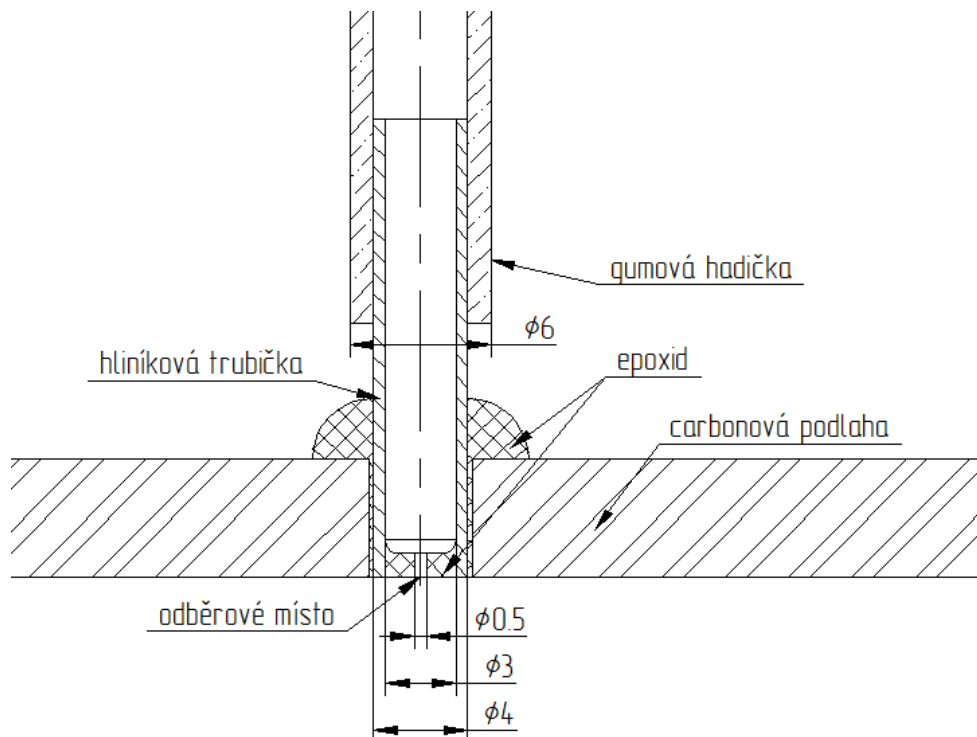
Obrázek 12 Monopost F1 Red Bull Racing Honda pro sezónu 2021 [15]

3 Měření

Pro validaci výpočtového modelu CFD bylo provedeno experimentální měření za jízdního stavu na voze UWB06. Experiment byl proveden na letištní ploše Lhota u Plzně. Pro měření byl vybrán bezvětrný den pro dosažení lepších výsledků. Experiment byl proveden měřicím přístrojem fungujícím na principu měření difference tlaku na měřeném a referenčním místě.

3.1 Příprava měření

Pro experiment bylo vybráno 16 odběrových míst na podlaze vozu. Referenční pozice byla kvůli přesnosti měření umístěna do kokpitu, kde je minimální proudění vzduchu. Pro odběr tlaku tímto přístrojem je odběrovým místem díra v povrchu obtékaného tělesa o průměru 0,5 až 1 mm, která je k měřicímu přístroji připojena hadičkou 6x4mm. V našem případě byl tlak odebrán dírou 0,5 mm. Ve vybraných místech v podlaze byla vyvrtána díra, do které byla vlepena hliníková trubička. Pro lepení bylo použito dvousložkové epoxidové lepidlo. Protože pro správnou funkci snímání tlaku by vnitřní průměr trubičky byl příliš velký, byly trubičky do podlahy vlepeny tak, že spodní část odběrového místa byla vyplněna a odběrové místo bylo epoxidem ucpáno. Ze spodní strany bylo místo vlepení trubičky zbrušeno tak, aby byl povrch hladký a aby byl zachován původní tvar podlahy. Do epoxidové ucpávky byla poté vyvrtána díra v požadovaném průměru 0,5mm.

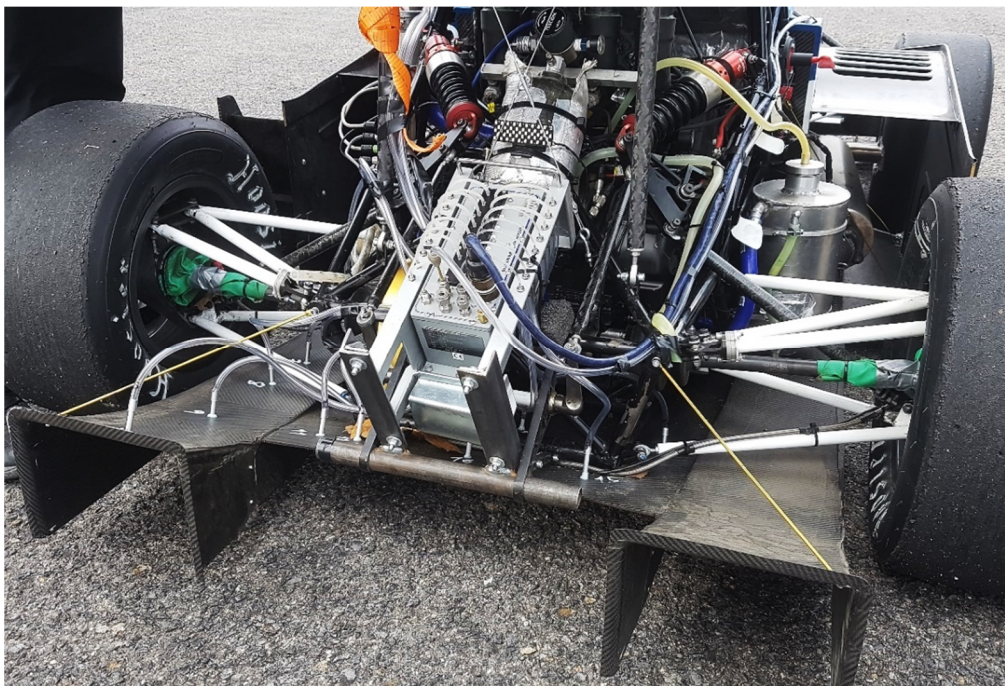


Obrázek 13 Výkres zhotovení odběrového místa

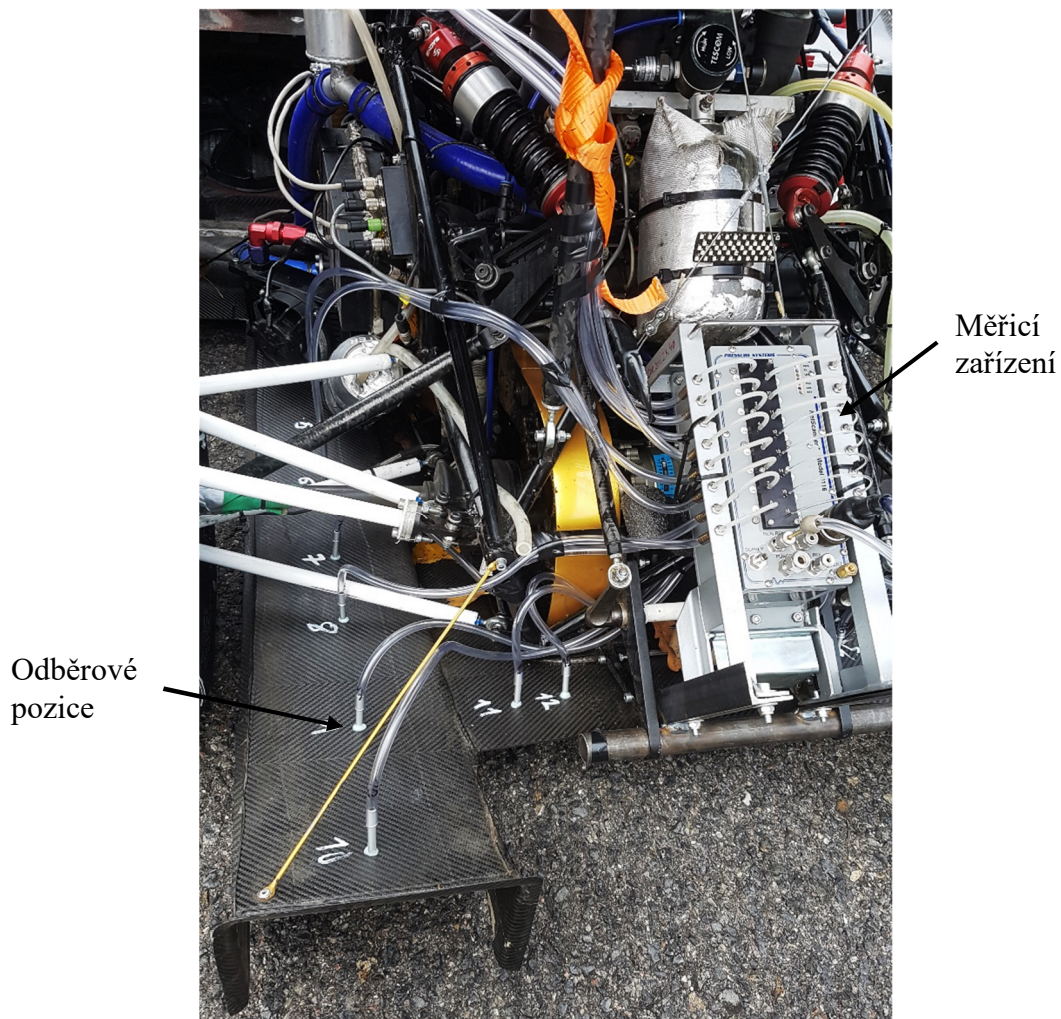


Obrázek 14 Odběrové místo

Pro měření bylo nutné připevnit měřicí zařízení k formuli. K tomuto byl vytvořen přípravek nahrazující část zdvihací konstrukce v zadní části vozu. Pomocí tohoto přípravku bylo měřicí zařízení přišroubováno k rámu formule. Na každou z 16 hliníkových trubiček byla nasazena gumová hadička 6x4 mm, která byla na svém druhém konci připojena k měřicímu zařízení.



Obrázek 15 Umístění měřicího zařízení na rámu formule



Obrázek 16 Měřicí zařízení a odběrové pozice

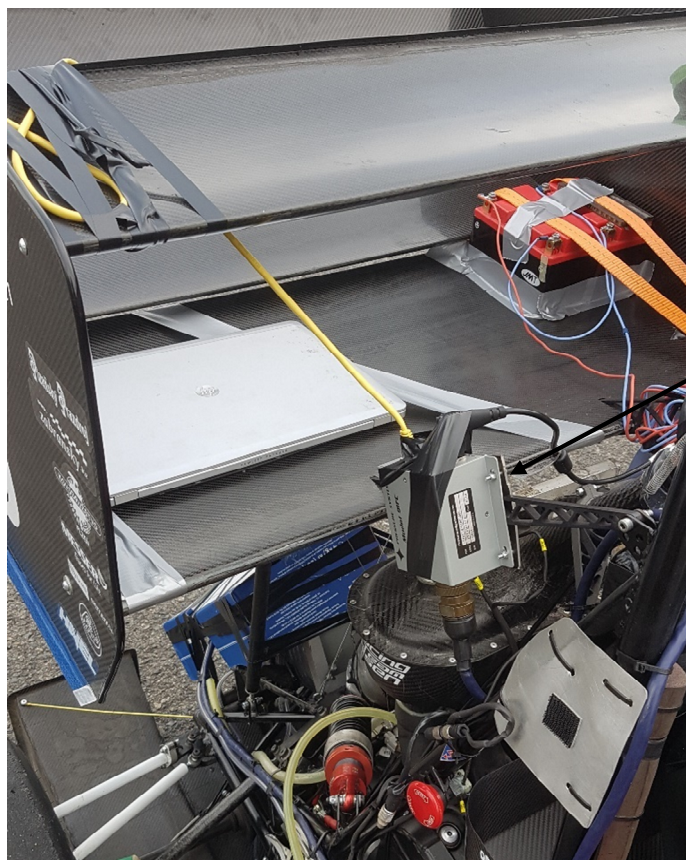
Pro napájení měřicího zařízení slouží standardně zdroj stejnosměrného proudu v rozsahu napětí 18-36 V. V našem případě bylo zvoleno sériové zapojení dvou 12 V baterií, běžně používaných jako autobaterie pro formuli. Výsledné napětí při tomto zapojení je 24 V, což splňuje rozsah potřebný pro napájení měřicího zařízení. Baterie byly připevněny na zadní křídlo. Pro sběr dat je u tohoto zařízení nutné připojení vyhodnocovací jednotky a počítače v reálném čase po dobu měření pomocí 100MiB UTP kabelu. Vyhodnocovací jednotka byla připevněna k rámu formule a notebook byl připevněn k zadnímu křídlu.



Notebook pro sběr dat

Baterie
2x12V

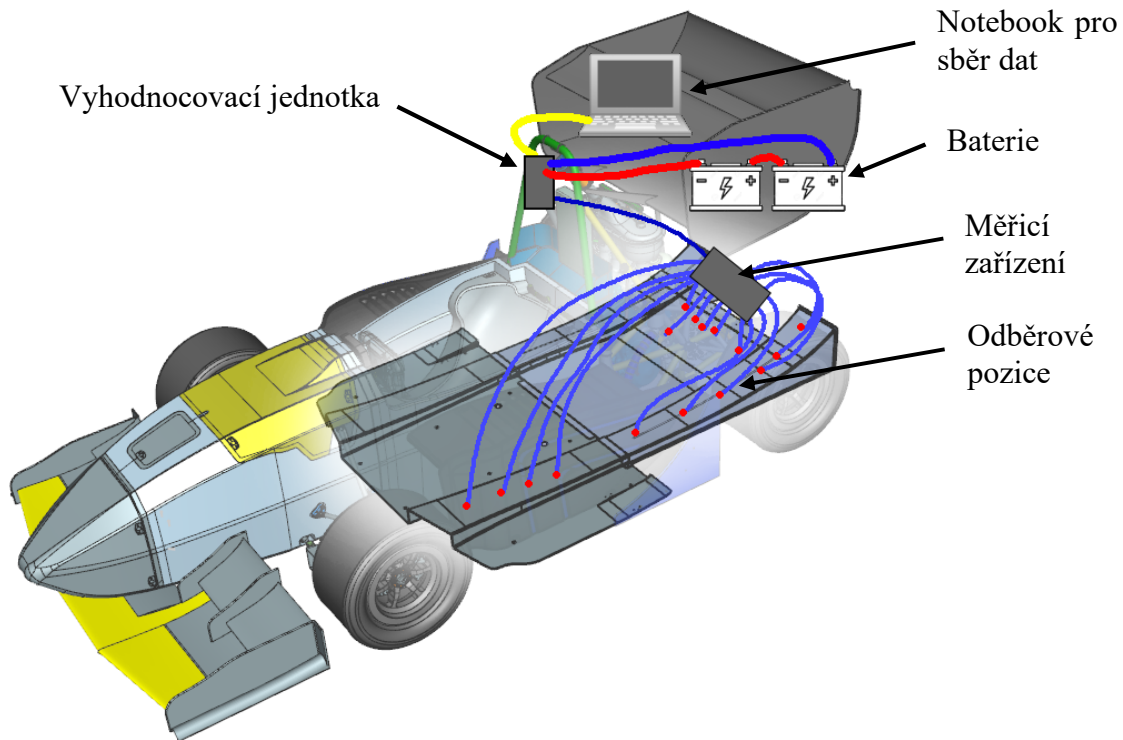
Obrázek 17 Umístění počítače a baterií na křídle vozu



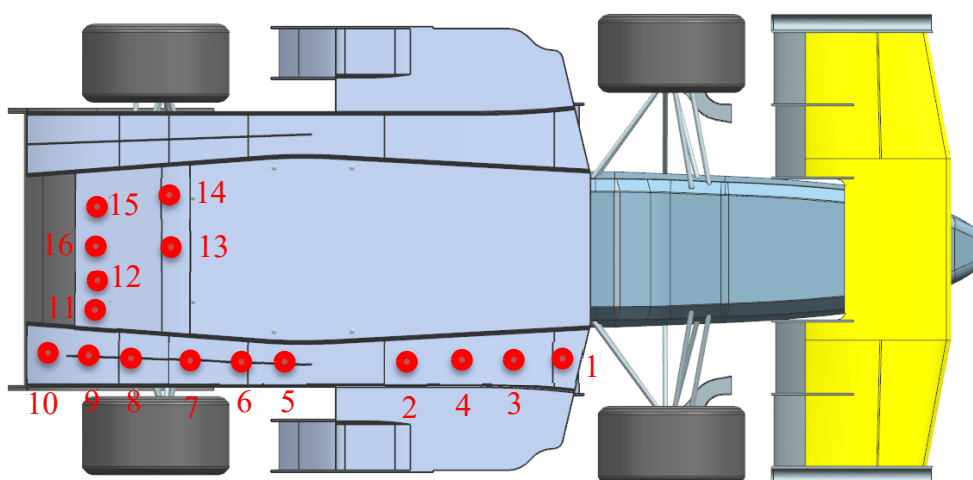
Vyhodnocovací jednotka

Obrázek 18 Umístění vyhodnocovací jednotky na rámu formule

Níže na obrázku 19 je znázorněno schéma zapojení pro provedené měření. Měřicí zařízení pomocí hadiček měří tlakovou diferenci mezi odběrovým místem a referenčním místem. Vyhodnocování těchto dat provádí vyhodnocovací jednotka, která tato data pomocí UTP kabelu posílá do počítače. Počítač pomocí programu Net Scanner zpracovává přijímaná data a v časovém intervalu $1/20[s]$ ukládá hodnotu diferenčního tlaku pro každou z 16 odběrových pozic ve formě .txt souboru.



Obrázek 19 Schéma měření



Obrázek 20 Umístění odběrových pozic tlaku

3.2 Měření

Pro měření byla vybrána plocha rozletové dráhy letiště Lhota u Plzně. Byl vybrán den, kdy v daném místě panovalo bezvětří. Celkem bylo provedeno měření při 9 úrovních rychlosti (20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100 [km/h]). Při každé rychlosti byla provedena 4 měření, vždy 2 v každém směru. Měření bylo provedeno tak, že v řídicí jednotce formule byl pro každé měření nastaven omezovač rychlosti, díky kterému formule konstantně udržovala potřebnou rychlost. Měření bylo provedeno tak, že řidič při každé jízdě udržoval tuto rychlost v rovném úseku po dobu minimálně 15 sekund, z kterých bylo vždy použito 10 sekund naměřených hodnot. Délka měřeného úseku při nejvyšší měřené rychlosti činila 417 m. Měření vždy započalo z klidu a probíhalo po dobu 4 jízd v dané rychlosti, poté bylo opět ukončeno při zastavení formule.



Obrázek 21 Testovací plocha ve Lhotě ^[16]

3.3 Zpracování dat

Vzhledem k průběhu měření bylo před samotným zpracováním dat nutné vybrat správná data. Porovnáním údajů z řídicí jednotky formule a naměřených hodnot byla vyloučena nepotřebná data. Dále pak z řídicí jednotky formule byly získány přesné rychlosti, měřené pomocí GPS modulu formule. Tyto hodnoty jsou mírně odlišné od zvolených rychlostí, jelikož nastavené rychlosti v řídicí jednotce jsou závislé na tlaku a stavu pneumatik. Zvoleným postupem měření bylo získáno pro každé odběrové místo při každé rychlosti 800 hodnot tlakové difference mezi měřeným místem a atmosférickým tlakem. Z těchto dat byla vždy vypočtena hodnota aritmetickým průměrem, do kterého nebylo započteno vždy 5 minimálních

a 5 maximálních hodnot kvůli chybě měření. Tabulka výsledných hodnot je níže. Uvedené hodnoty tlaků jsou v jednotkách [Pa]. Aritmetická hodnota byla spočtena dle vzorce:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4)$$

Tabulka 1 Naměřené hodnoty

rychlost	odběr1	odběr2	odběr3	odběr4	odběr5	odběr6	odběr7	odběr8
24 km/h	-20,46	-25,44	-20,40	-20,31	-27,87	-29,14	-30,49	-27,69
32 km/h	-20,44	-30,28	-22,90	-25,04	-36,82	-43,16	-41,70	-40,03
42 km/h	-20,57	-40,17	-28,02	-33,16	-49,48	-60,63	-58,57	-55,93
52 km/h	-17,95	-54,20	-33,33	-43,52	-67,66	-86,68	-81,62	-80,30
63 km/h	-18,40	-62,92	-35,43	-55,01	-88,95	-110,56	-104,08	-99,14
72 km/h	-19,60	-85,12	-44,40	-67,49	-112,69	-143,69	-132,43	-133,25
83 km/h	-23,37	-104,55	-54,81	-82,81	-155,18	-193,65	-171,57	-168,55
93 km/h	-33,57	-125,34	-68,14	-101,84	-171,47	-221,26	-197,66	-197,88
100 km/h	-29,21	-159,89	-79,59	-130,94	-237,44	-311,02	-259,08	-246,05
rychlost	odběr9	odběr10	odběr11	odběr12	odběr13	odběr14	odběr15	odběr16
24 km/h	-31,91	-24,78	-22,76	-22,08	-29,13	-28,93	-24,40	-23,30
32 km/h	-41,47	-31,92	-31,56	-30,23	-40,31	-40,49	-32,27	-31,49
42 km/h	-55,13	-41,90	-44,97	-43,10	-55,32	-55,66	-41,21	-39,19
52 km/h	-72,44	-53,76	-55,58	-52,13	-82,51	-81,86	-62,25	-54,54
63 km/h	-90,42	-69,67	-65,21	-63,29	-103,73	-102,94	-77,73	-66,80
72 km/h	-117,57	-84,88	-91,77	-89,79	-144,38	-148,56	-103,95	-89,40
83 km/h	-147,48	-107,54	-110,48	-106,57	-186,46	-178,71	-134,55	-115,30
93 km/h	-170,87	-118,89	-143,78	-140,97	-207,04	-220,41	-157,78	-133,57
100 km/h	-204,03	-142,22	-188,59	-181,54	-265,53	-299,64	-208,30	-169,74

Po zpracování dat byly spočteny směrodatné odchylky pro jednotlivá měření dle vzorce:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

Tabulka spočtených směrodatných odchylek níže:

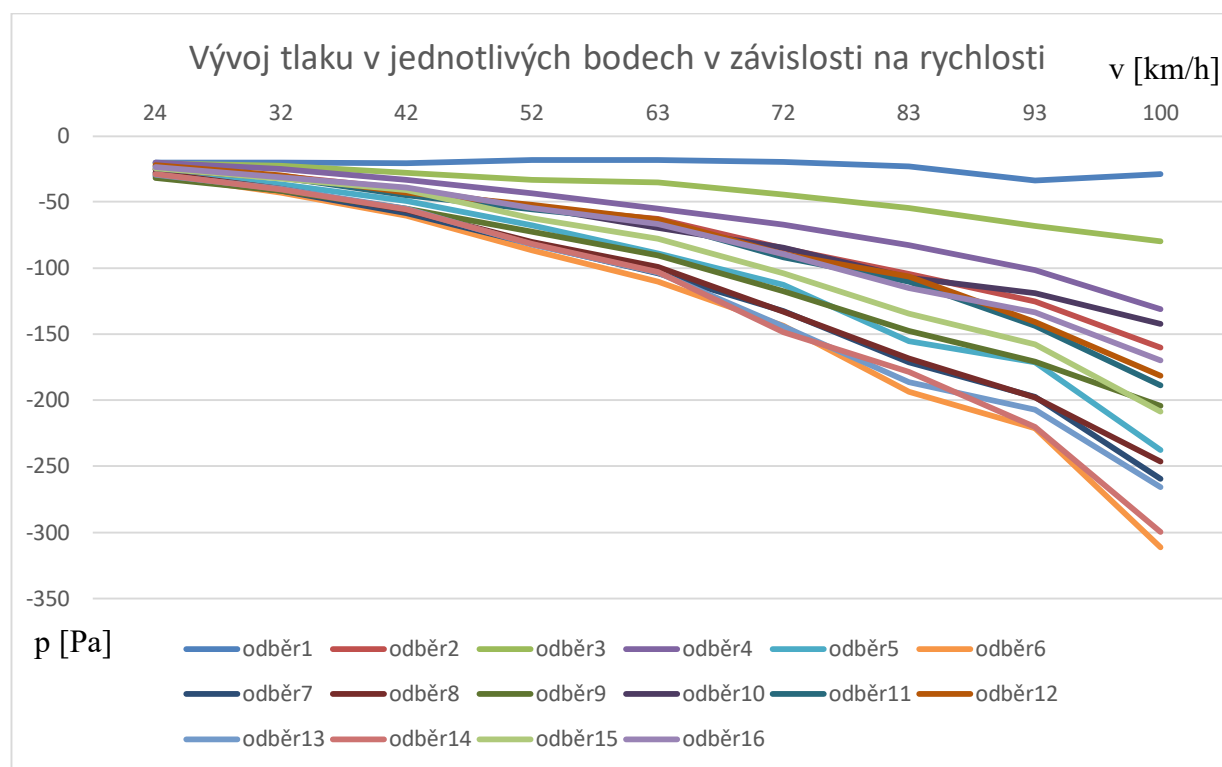
Tabulka 2 Směrodatné odchylky pro jednotlivá měření

rychlost	odběr1	odběr2	odběr3	odběr4	odběr5	odběr6	odběr7	odběr8
24 km/h	5,22	7,23	8,02	8,87	3,34	4,38	4,11	5,70
32 km/h	7,27	11,21	11,74	13,43	13,57	14,94	12,26	15,46
42 km/h	10,44	8,02	10,52	8,59	8,29	9,12	5,36	6,37
52 km/h	10,14	18,83	15,83	19,93	9,32	13,07	5,12	7,06
63 km/h	12,95	28,05	22,10	26,43	15,95	23,08	8,83	12,06
72 km/h	21,55	24,18	24,26	23,95	29,19	20,45	5,78	13,42
83 km/h	24,80	31,92	25,75	33,47	24,80	22,32	11,30	11,33
93 km/h	18,59	41,77	22,93	35,32	16,03	17,67	11,04	17,93
100 km/h	43,35	42,39	48,25	42,59	36,70	21,53	12,39	17,61
rychlost	odběr9	odběr10	odběr11	odběr12	odběr13	odběr14	odběr15	odběr16
24 km/h	3,89	2,80	3,59	3,03	12,64	13,01	6,18	5,58
32 km/h	10,80	10,01	10,05	10,97	22,68	20,27	17,34	17,42
42 km/h	14,60	9,54	10,00	9,60	17,13	12,33	11,56	12,84
52 km/h	16,05	6,73	5,28	9,56	17,54	13,38	10,37	14,49
63 km/h	20,18	11,84	15,76	16,47	24,33	20,83	14,15	22,98
72 km/h	20,35	13,81	16,65	17,01	37,65	32,81	18,77	14,84
83 km/h	28,98	15,62	17,10	13,00	39,96	41,18	21,02	17,37
93 km/h	23,67	18,98	19,67	14,11	27,80	26,17	19,64	22,82
100 km/h	46,33	21,32	42,36	36,04	61,59	56,76	33,82	25,43

3.4 Výsledky

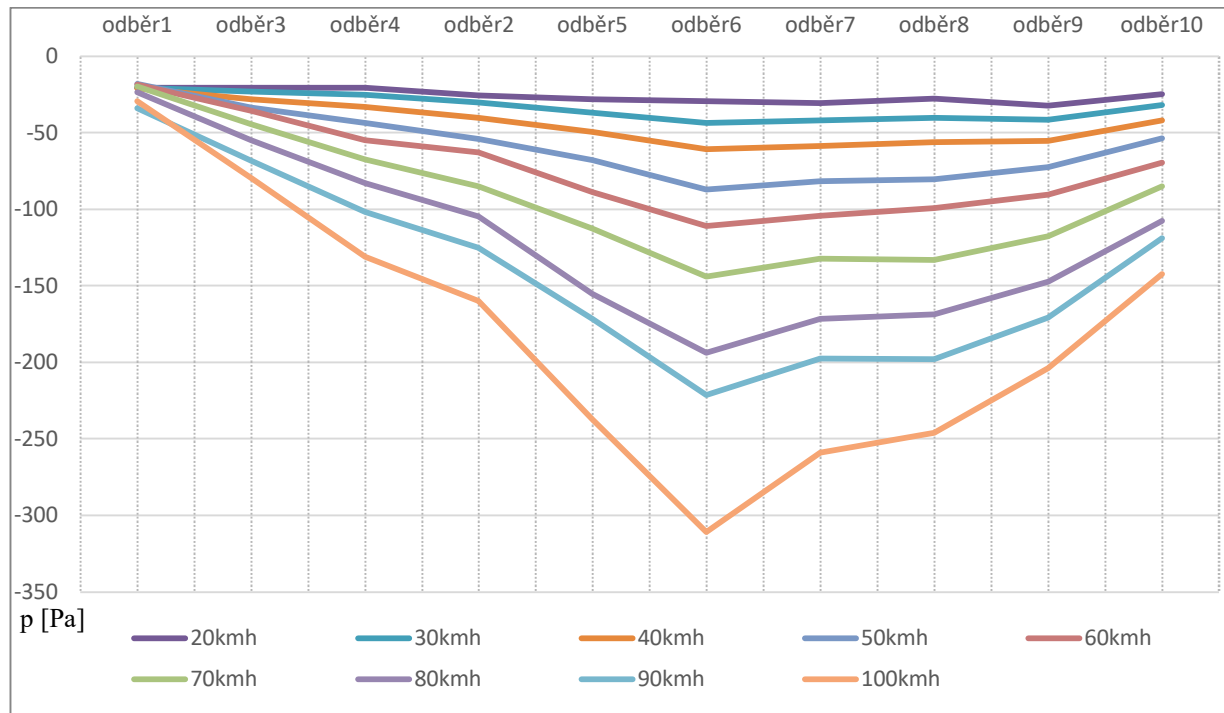
Tabulka naměřených hodnot nacházející se v podkapitole 3.3 je na první pohled nic neříkající. Z těchto hodnot byly vytvořeny následující grafy. V prvním grafu je znázorněn vývoj tlaku v jednotlivých odběrových místech v závislosti na rychlosti.

Z grafu je patrné, že s rostoucí rychlostí tlak klesá parabolicky čili s druhou mocninou rychlosti. Tato klesající tendence byla očekávaná a je naznačena v rovnici (2). Dále je patrná rozdílnost poklesu tlaku v závislosti na tom, kde se dané odběrové místo nachází.



Graf 3 Vývoj tlaku v jednotlivých bodech v závislosti na rychlosti

Na následujícím grafu je zobrazen vývoj tlaku v odběrových místech umístěných v levém kanálu podlahy formule. V tomto grafu jsou jednotlivá odběrová místa seřazena tak, jak byla fyzicky umístěna na formuli zřepředu dozadu. Z grafu je patrné, že na vstupu do kanálu dochází jen k velmi malému snížení tlaku. Tlak poté směrem k zadní části klesá až do oblasti odběru č. 6, kde je průřez kanálu nejmenší. K poklesu dochází právě díky tomu, že v nejmenším průřezu kanálu dosahuje proud vzduchu nejvyšší rychlosti, čímž dochází k největšímu snížení tlaku. Dále je směrem dozadu proud vzduchu opět zpomalován, čímž dochází ke snižování způsobeného podtlaku. Stejně jako na předchozím grafu je patrné, že podtlak způsobený prouděním vzduchu se zvyšuje s druhou mocninou rychlosti.



Graf 4 Vývoj tlaku v podélné délce levého kanálu při různých rychlostech

Číslování odběrových míst 2, 3, 4 je v tomto případě matoucí. K této záměně došlo tím, že při protahování hadiček ze zadní části formule byly hadičky prohozeny a tím nebylo dodrženo jejich pořadí v kanálu podlahy. Na to se přišlo při kontrole a číslování odběrových míst před měřeními. Na následující fotografii je tato záměna viditelná.



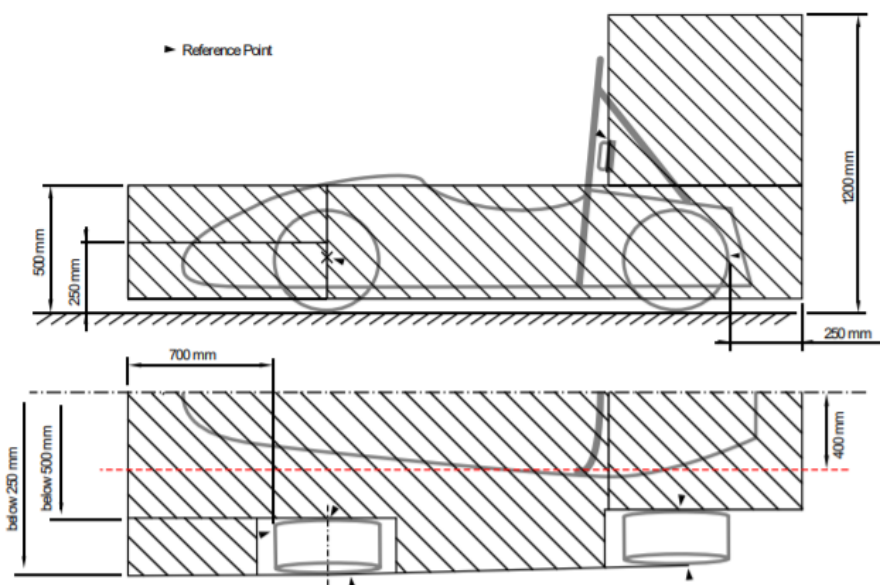
Obrázek 22 Odběrové pozice v první části levého kanálu

Ze získaných dat vyplývá, že podlaha vozu UWB06 je aerodynamicky funkční a generuje přítlak tím, že pod vozem vytváří podtlak urychlením proudu vzduchu. Data získaná měřením se pohybují v očekávaných hodnotách a tendence vzrůstajícího podtlaku s druhou mocninou rychlosti je v souladu s rovnicí (1). Získaná data budou použita pro návrh podlahy vozu UWB07. ^[17]

4 Návrh podlahy vozu UWB07

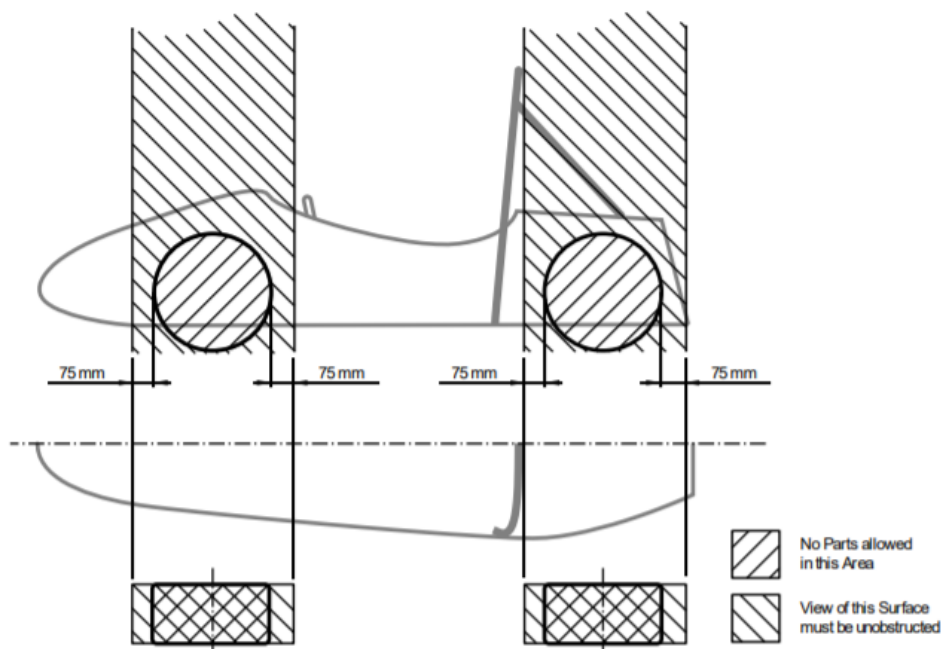
4.1 Pravidla pro návrh aerodynamických prvků

Aeropaket vozu UWB07 musí být v souladu s pravidly pro danou závodní sezónu. Tyto pravidla vydává každý rok sdružení SAE International. Obsahem těchto pravidel jsou zásady pro návrh jakýchkoliv částí vozů, mimo jiné i aerodynamických. Podlaha vozu UWB07 musí splňovat následující pravidla. Světlá výška vozu činí 40 mm a je měřena s řidičem. Toto omezení světlé výšky se netýká jen pevných prvků, ale jakýchkoliv jiných částí formule kromě kol. To zamezuje použití například kartáčů, nebo zástěrek svěšených až k zemi pro úpravu proudění pod podlahou. Další z pravidel týkajících se podlahy vozu je vymezení prostor, ve kterých se smějí nacházet aerodynamické prvky vozu. Tyto prostory jsou vymezeny pomocí následujícího výkresu.



Obrázek 23 Zóny limitující osazení aerodynamických prvků [1]

Důležitý poznatek z tohoto pravidla je takový, že podlaha ve střední části vozu nesmí do strany přesahovat spojnicí vnějších ploch předních a zadních kol. Další důležité omezení je, že podlaha v zadní části vozu nesmí být širší, než vzdálenost vnitřních ploch zadních kol. Dále pak podlaha vozu nesmí být delší než 250 mm za vnějším povrchem zadních kol. Dalším pravidlem omezujícím podlahu jako aerodynamický prvek vozu je pravidlo definující formuli jako takzvaný open wheel vůz. Open wheel definuje vozidlo jako vůz s otevřeným prostorem kol. K této definici se v pravidlech nachází tento výkres.



Obrázek 24 Keep-out zóny [1]

Dle tohoto výkresu se nesmí nacházet žádná část vozu 75 mm před ani za kolem. Jakýkoliv prvek nad kolem je také zakázaný. Dalším pravidlem, které by se mohlo týkat podlahy vozu je bezpečnostní povahy. Veškeré dopředné hrany vozu, které by mohly přijít do kontaktu s chodcem při srážce, musí mít minimální rádius 5 mm na horizontálních hranách a 3 mm na vertikálních hranách. Na toto pravidlo nebude při návrhu brán zřetel a bude vyřešeno při výrobě. Po dokončení návrhu bude zhodnoceno, zda se toto pravidlo vztahuje i na navrženou podlahu, či nikoliv.

4.2 Cíle pro návrh podlahy vozu UWB07

Před započítáním návrhu podlahy bylo nutné stanovit cíle, které jsou očekávány od návrhu.

Byly stanoveny tyto cíle:

- Dosažení nižšího C_1 pro zvýšení přítlaku vozu (myšleno vyššího v absolutní hodnotě)
- Zkrácení bočních kanálů podlahy tak, aby končily před zavěšením zadní nápravy
Tento cíl byl stanoven kvůli odstranění kolizí bočních kanálů s rameny zavěšení zadních kol
- V přední části prostředního kanálu nebudou prováděny změny z důvodu zachování monokoku formule.

4.3 Důležité pojmy pro návrh vozu

4.3.1.1 CFD

CFD neboli computational fluid dynamics je odvětví mechaniky tekutin, které používá numerické metody k analýze a řešení problémů zahrnující proudění tekutin. CFD využívá počítačových výpočtů k simulaci proudu vzduchu a jeho interakce s objekty definovanými pomocí okrajových podmínek.

4.3.1.2 Reynoldsovo číslo

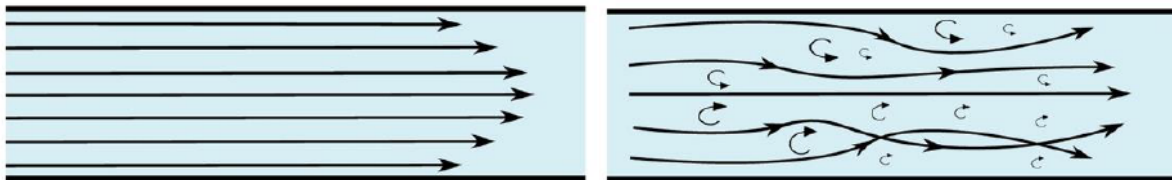
Reynoldsovo číslo je bezrozměrné podobnostní číslo závislé na poměru setrvačných sil a viskozity. Jedná se o nejnámější z podobnostních čísel. Na základě tohoto podobnostního čísla je možné určit, zda je proudění laminární nebo turbulentní. Reynoldsovo číslo je možné spočítat pomocí následujícího vzorce. ^[19]

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad (6)$$

4.3.1.3 Laminární a turbulentní proudění

Laminární proudění se vyskytuje při nízkých Reynoldsových číslech. Je charakterizováno klidným a konzistentním proudem tekutiny. Významným ukazatelem laminárního proudění je, že proudnice jsou rovnoběžné.

Turbulentní proudění se vyskytuje při vysokých Reynoldsových číslech. Jeho charakteristikou je neuspořádaný a chaotický proud, který velmi často obsahuje víry. ^[20]



Obrázek 25 Laminární a turbulentní proudění ^[20]

4.3.1.4 ANSYS

ANSYS je inženýrsko-vývojářský výpočetní program vyvíjený firmou Ansys, Inc. ANSYS slouží pro mnoho druhů výpočtů v oblastech konstrukce, mechaniky tekutin, elektrotechniky, elektromagnetismu, multifyziky, akustiky, bezpečnosti a mnoha dalších. Pro jednotlivé úkony jako příprava výpočtu, řešení a vyhodnocování výsledků jsou poté používány moduly určené pro danou aplikaci a vyvíjené tak, aby bylo možné je kombinovat. ^[21]

4.3.1.5 ANSYS Fluent

ANSYS Fluent je modul programu ANSYS určený pro výpočty proudění metodou konečných objemů. ^[22]

4.3.1.6 ICON CFD

ICON CFD je společnost vyvíjející výpočetní program pro řešení CFD úloh. Přístup k výpočtům pomocí ICON byl týmu UWB umožněn společností Škoda Auto v rámci sponzorské spolupráce včetně předdefinovaného prostředí. Ve společnosti Škoda Auto se programem ICON přezdívá „virtuální větrný model“. V nastavení, ke kterému nám byl umožněn přístup, jsou parametry pro výpočet přednastaveny a výpočet je optimalizován pro silniční vozidla s validovanou přesností do 5 % vůči měření ve větrném tunelu. ^[23]

4.3.1.7 Rezidua

Rezidua jsou sledované veličiny pro určení konvergence. Součty změn počítaných veličin ve všech buňkách počítané oblasti, relativně vztažených k hodnotám těchto veličin, představují poměrný reziduál. Tato hodnota je pro jednotlivé veličiny zobrazována po jednotlivých iteracích, aby bylo možno sledovat průběh výpočtu.

4.3.1.8 Konvergence

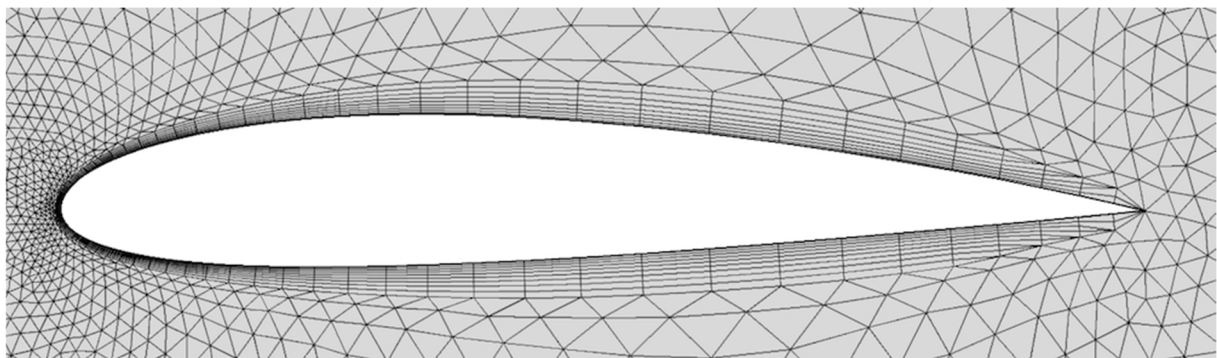
Konvergence je kritérium pro úspěšné dokončení výpočtu. Ke konvergenci dochází, pokud hodnota reziduí klesne pod žádanou mez. V případě těchto úloh byla mez pro konvergenci stanovena na 10^{-6} pro zákon zachování energie a 10^{-4} pro rezidua všech ostatních veličin.

4.3.1.9 Sít'

Výpočetní sít' vzniká diskretizací výpočetního objemu a rozděluje geometrii počítané oblasti na jednotlivé buňky s konečným objemem. V těchto jednotlivých objemech je následně prováděn výpočet. [24]

4.3.1.10 Mezní vrstvy

V blízkosti stěn je proudění vysoce ovlivněno chováním proudu tekutiny u stěny. V blízkém okolí stěny se tekutina chová jako viskózní, dochází zde k velkým gradientům rychlostí a ostrým přechodům mezi laminárním a turbulentním prouděním. Je proto nutné v blízkosti stěn použít stěnovou funkci při vytváření sítě.



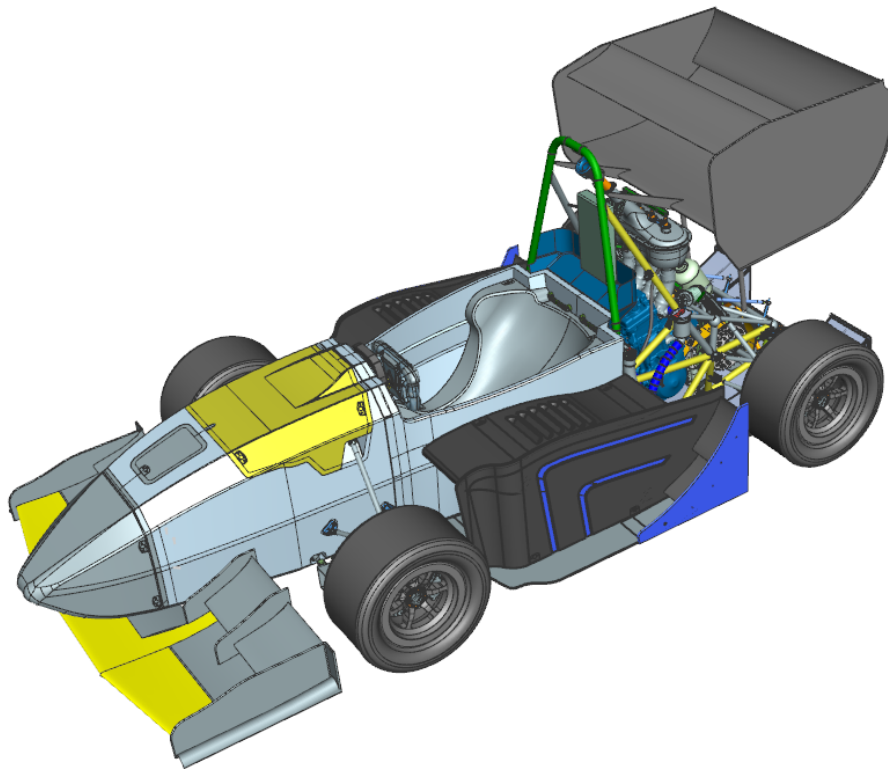
Obrázek 26 Znárodnění síťování mezní vrstvy [25]

4.4 Výpočet aerodynamiky vozu UWB06

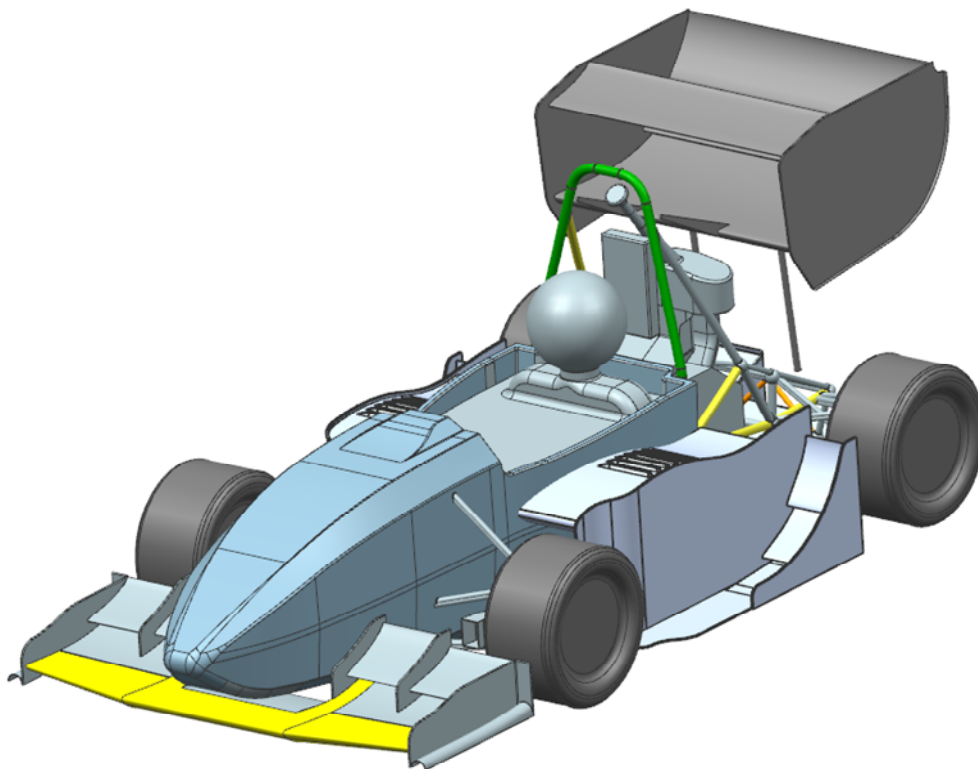
Pro návrh podlahy vozu UWB07 bude nejdříve vytvořen výpočetní model v programu ANSYS Fluent. Tento výpočetní model bude porovnán s naměřenými hodnotami v kapitole 3. Toto srovnání bude sloužit jako validace výpočetního modelu.

4.4.1 Tvorba CAD modelu pro výpočet

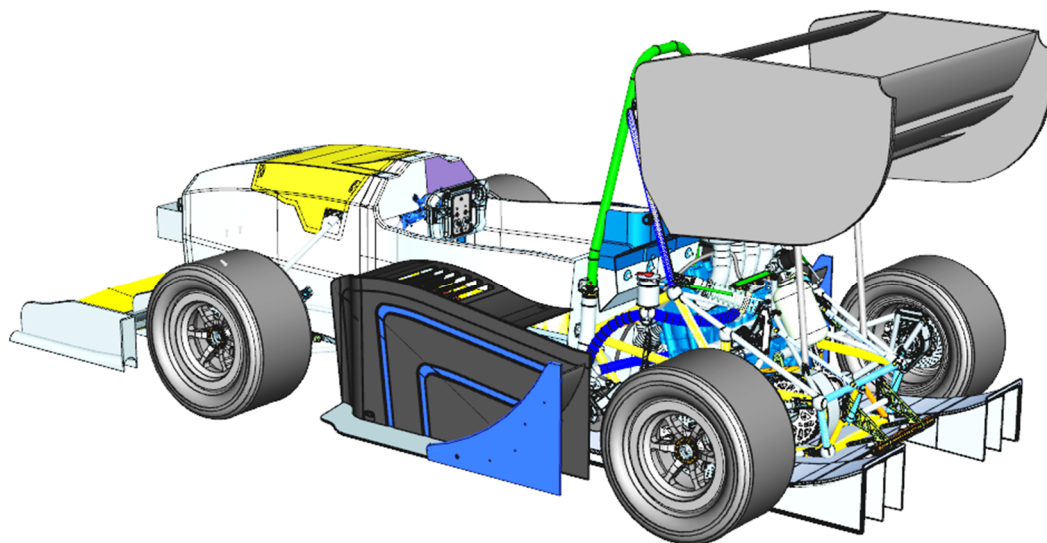
Pro výpočet musel být vytvořen CAD model. Tento model byl vytvořen z CAD modelu sloužícího pro výrobu vozu UWB06 jeho zjednodušením a úpravou pro vhodnější použití v CFD simulaci. Tyto úpravy zahrnovaly zejména zjednodušení složitých ploch, které nemají vliv na výpočet jako například motor a jeho části. Dále pak vyplnění dutin narušujících výpočet, opravu míst s tečným stykem ploch, doplnění těla a hlavy řidiče. Tyto změny jsou patrné z obrázků níže.



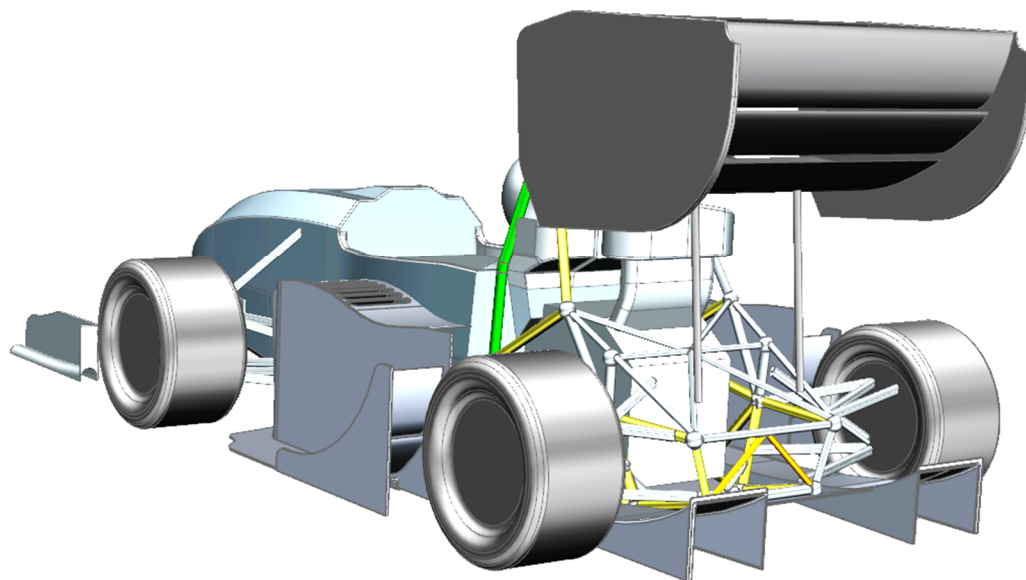
Obrázek 27 CAD model vozu UWB06



Obrázek 28 CAD model zjednodušený pro CFD výpočet



Obrázek 29 CAD model vozu UWB06



Obrázek 30 CAD model zjednodušený pro CFD výpočet

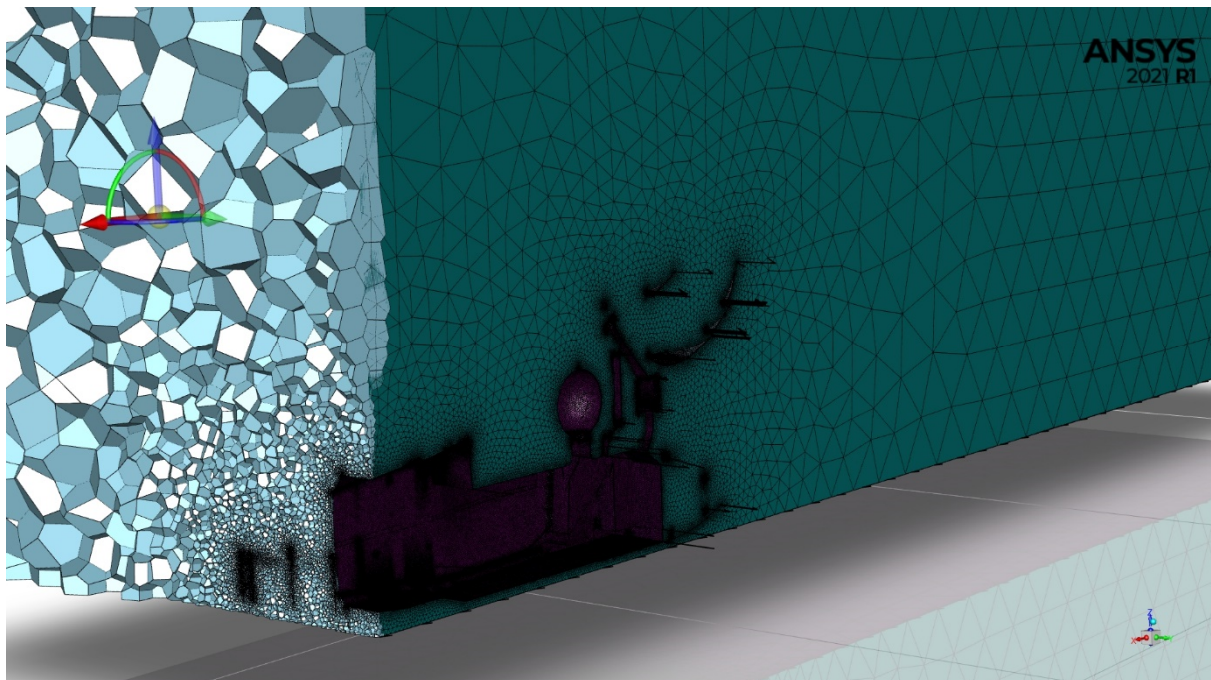
4.4.2 Výpočet UWB06 pomocí ANSYS Fluent

Jako první byl proveden výpočet aerodynamiky vozu UWB06 pomocí programu ANSYS. Pro výpočet byl použit výše popsáný zjednodušený CAD model.

4.4.2.1 Příprava výpočtu

Pro import modelu byl zvolen CAD modul space claim. Do tohoto modulu byl CAD model naimportován ve formátu *.step (objem ohraničený plochami). Následně byl kolem vozidla vytvořen kvádr jako pomyslný větrný tunel, ve kterém bude probíhat výpočet. Jedna stěna tohoto kvádru leží na ose vozidla a bude tvořit rovinu symetrie. Od tohoto kvádru byl model formule odečten a vznikl objem vzduchu okolo vozidla. Pro tuto operaci byla použita funkce enclosure, která je optimalizována tak, aby po odečtení nevznikala chybná geometrie. Všechny vzniklé plochy byly pojmenovány podle toho, jaká jim bude následně přiřazena okrajová podmínka.

Síť byla vytvořena pomocí modulu fluent meshing. Nejprve byly vytvořeny sítě mezních vrstev na plochách ohraničujících formuli. Tyto mezní vrstvy byly nastaveny s počáteční tloušťkou 0,2 mm a každou další tloušťkou vrstvy 1,2krát větší. Dále pak bylo nastaveno postupné zahuštění sítě v okolí formule pomocí funkce scope mesh. Tato funkce vytvoří zahuštěnou síť v okolí ploch formule. Výsledná síť byla tvořena 4,6 miliony elementů.



Obrázek 31 Výpočetní síť

Okrajové podmínky byly nastaveny v prostředí modulu Fluent. K nastavení těchto okrajových podmínek byly využity názvy ploch z modelu:

- Symmetry – pro rovinu symetrie, jelikož bude proveden výpočet pouze na jedné polovině vozidla
- Velocity inlet – rovina vstupujícího proudu vzduchu s nastavenou rychlostí proudění 13,8; 19,44 a 25 [m/s] to jsou rychlosti odpovídající 50; 70 a 90 [km/h]
- Pressure outlet – rovina za vozidlem kde vystupuje proudící vzduch
- Wall – všechny plochy ohraničující formuli kromě kol
- Moving wall – kola s nastavenou rotací plochy
- Free slip wall – plocha nevytvářející odpor proudění

Dále pak byly nastaveny podmínky prostředí:

- Statický tlak tekutiny na vstupu byl nastaven jako atmosférický tlak
- Tekutina byla nastavena jako vzduch
- Turbulentní model byl zvolen SST k-omega

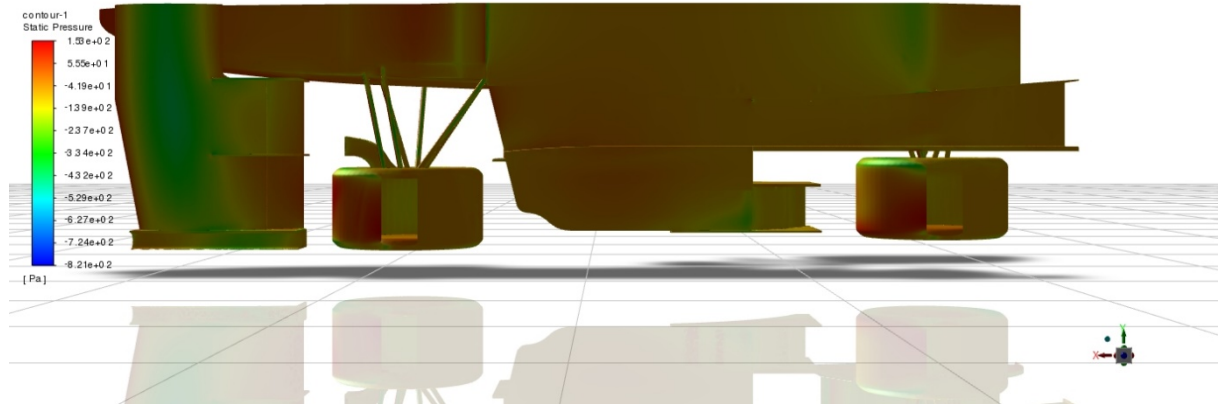
4.4.2.2 Výpočet

Při spouštění výpočtu v ANSYS Fluent se nejprve provede inicializace výpočtu, což znamená spuštění výpočtu pro prvních 10 iterací. Tato inicializace se provádí za účelem zjištění, zda je na nastaveném výpočetním modelu možné provést výpočet. Následně pokud je možné výpočet provést dojde k jeho zahájení. V průběhu výpočtu byly sledovány zbytková rezidua v průběhu iterací.

4.4.2.3 Výsledky

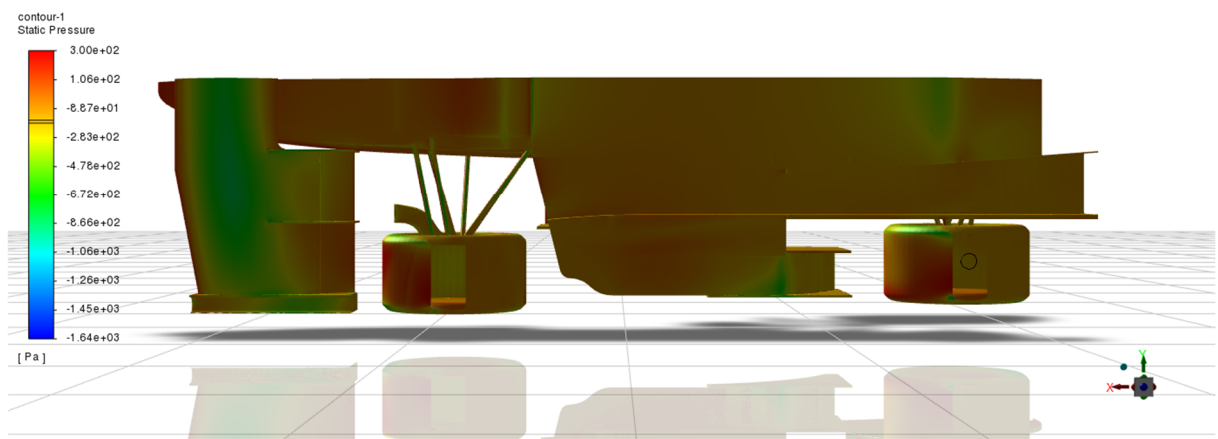
Celkem byly provedeny 3 výpočty pro různé rychlosti jízdy. Pro všechny 3 výpočty je na následujících třech obrázcích znázorněno rozložení tlaku pod podlahou vozu.

ANSYS
2021 R1



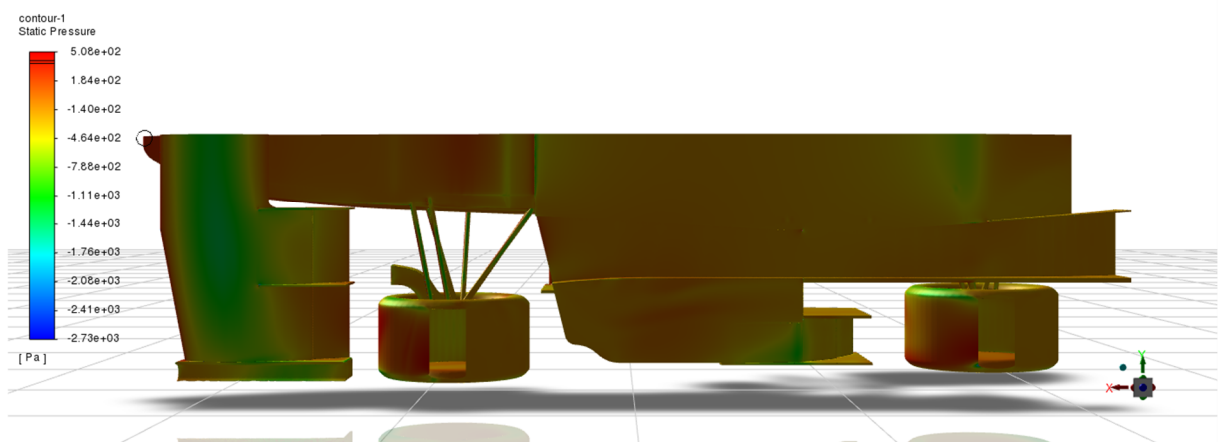
Obrázek 32 Rozložení tlaku při rychlosti 50 km/h

ANSYS
2021 R1



Obrázek 33 Rozložení tlaku při rychlosti 70 km/h

ANSYS
2021 R1

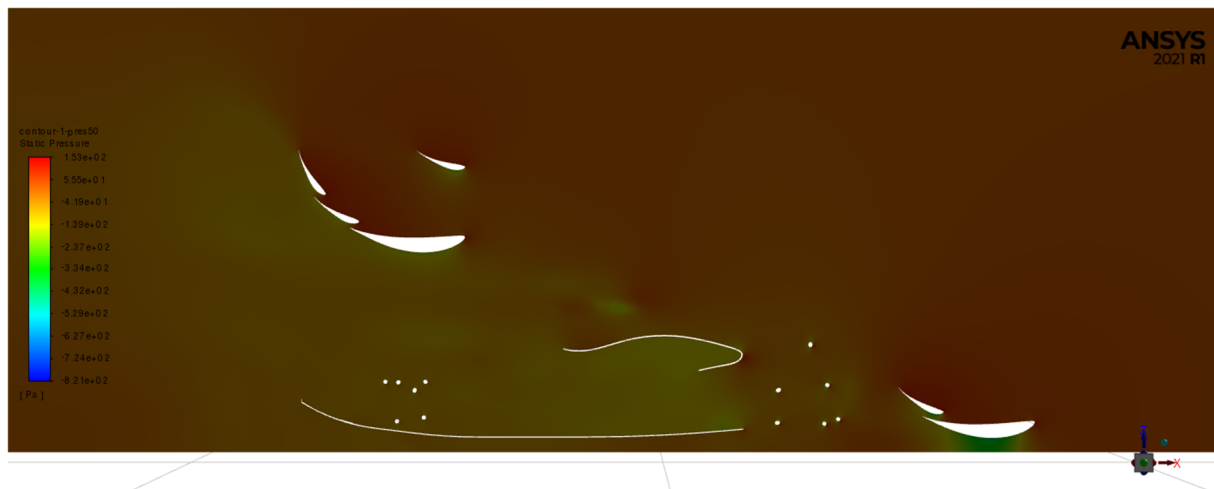


Obrázek 34 Rozložení tlaku při rychlosti 90 km/h

Pro výpočet při rychlosti 50 km/h je na obrázcích níže znázorněno tlakové pole ve vertikálních rovinách procházejících prostředním a bočním kanálem podlahy. Z obrázků je patrný pokles tlaku ve sníženém úseku pod podlahou vozu.

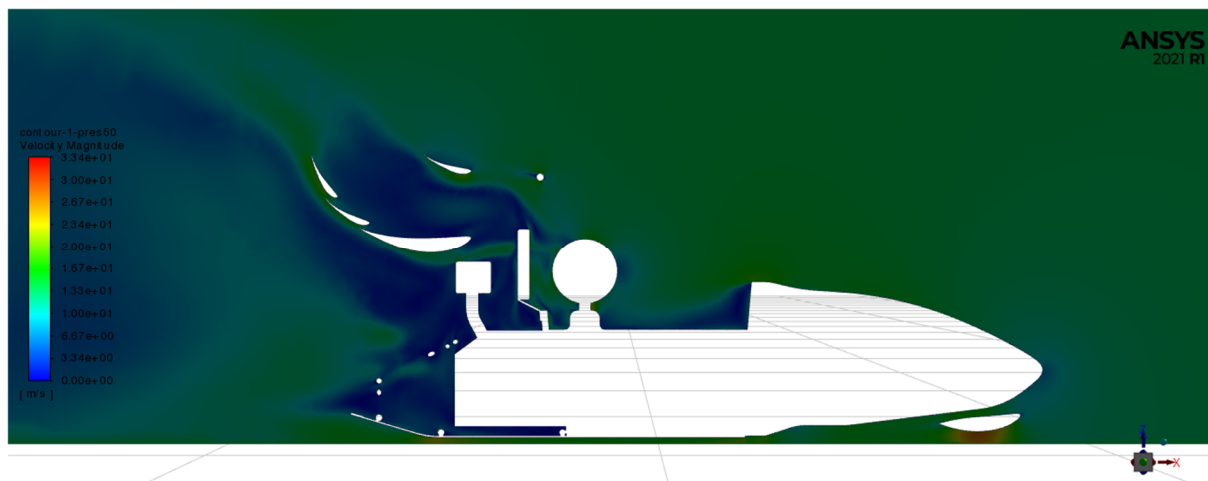


Obrázek 35 Tlakové pole ve vertikálním řezu v úrovni prostředního kanálu

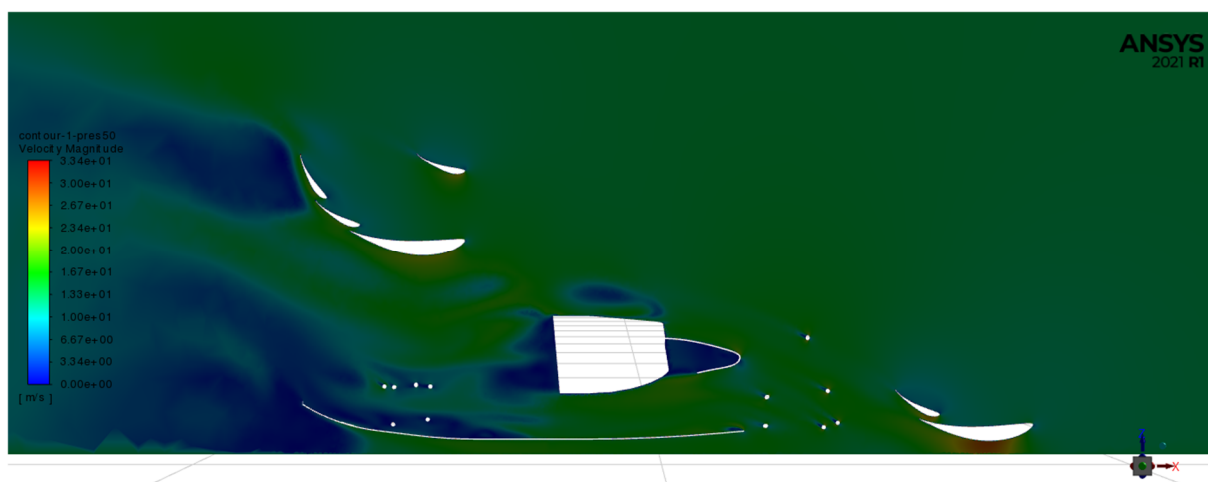


Obrázek 36 Tlakové pole ve vertikálním řezu v úrovni bočního kanálu

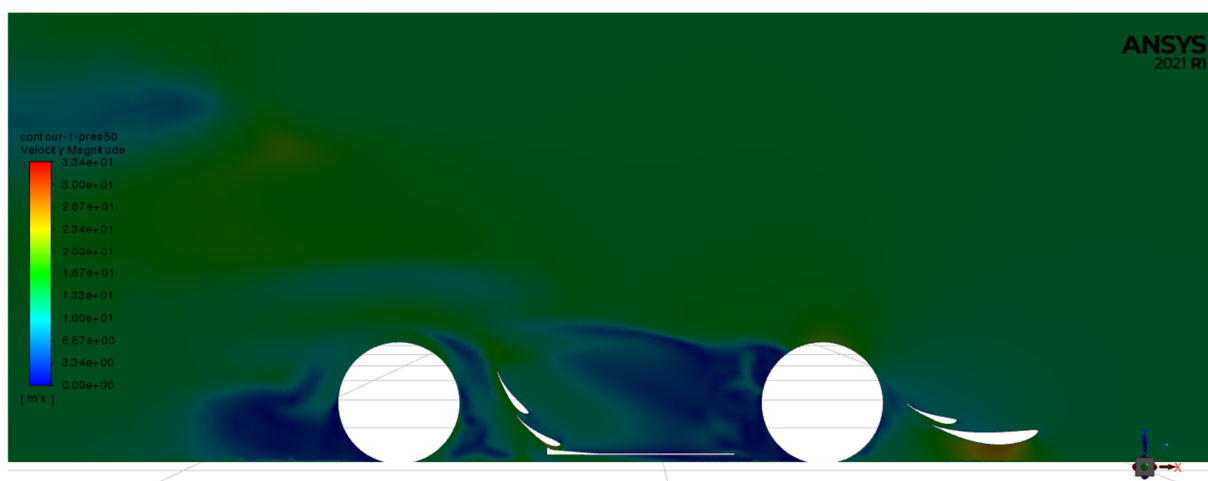
Na následujících obrázcích je znázorněno rychlostní pole obtékajícího proudu vzduchu ve vertikálních řezech formule. Z obrázků je patrné urychlení proudu vzduchu pod podlahou vozu. Dále jsou zřejmé úplavy zpomaleného proudu vzduchu zejména za koly vozidla.



Obrázek 37 Rychlostní pole ve vertikálním řezu v úrovni prostředního kanálu

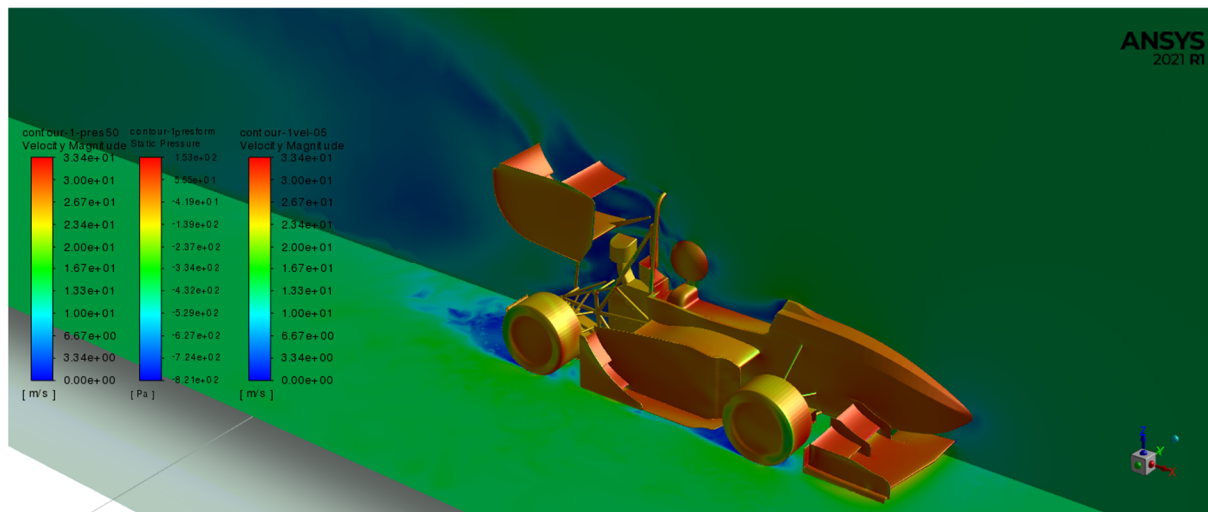


Obrázek 38 Rychlostní pole ve vertikálním řezu v úrovni bočního kanálu



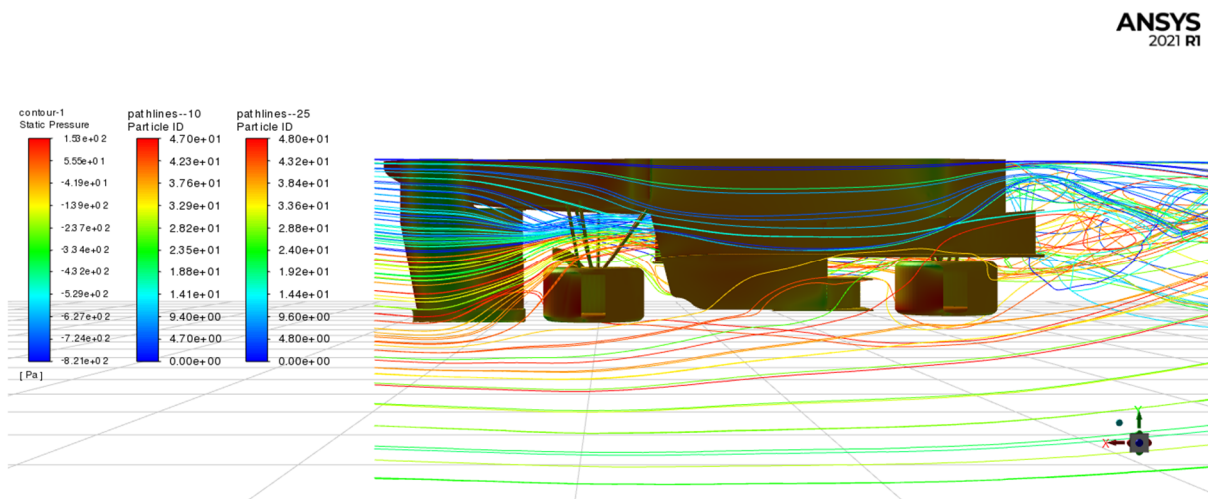
Obrázek 39 Rychlostní pole ve vertikálním řezu v úrovni kol

Na následujícím obrázku jsou znázorněny rychlostní pole ve dvou kolmých rovinách a zároveň rozložení tlaku na povrchu formule. Zřejmé jsou též výše zmíněné úplavy od rotujících kol vozu.



Obrázek 40 Rychlostní pole obtékajícího proudu vzduchu

Na následujícím obrázku jsou zobrazeny proudnice vzduchu a jejich trajektorie pod podlahou formule. Na povrchu formule je opět promítnuta distribuce tlaku úzce související s proudícím vzduchem. Barvy proudnic symbolizují rychlost v daném bodě.



Obrázek 41 Proudnice vzduchu obtékajícího formuli

4.4.3 Validace CFD výpočtu pomocí měření

Z provedených CFD výpočtů byly extrahovány hodnoty tlaků ve stejných pozicích, ve kterých bylo provedeno měření. Srovnáním těchto hodnot byla provedena validace CFD výpočtu. Tyto hodnoty se nacházejí v tabulce níže. (pozn. měřená pozice č. 15 se v průběhu měření nacházela zrcadlově k pozici 12. Vzhledem k tomu, že výpočet byl prováděn pouze na jedné polovině vozu, byla tato pozice ze srovnání vyloučena.)

Tabulka 3 Srovnání výsledků měření s výsledky výpočtu CFD

Pozice	naměřené hodnoty [Pa]			Hodnoty z výpočtu CFD [Pa]			odchylka [%]
	50 [km/h]	70 [km/h]	90 [km/h]	50 [km/h]	70 [km/h]	90 [km/h]	
odběr1	-18	-20	-34	-15	-28	-49	35
odběr2	-54	-85	-125	-41	-76	-148	18
odběr3	-33	-44	-68	-31	-58	-86	21
odběr4	-44	-67	-102	-32	-71	-108	13
odběr5	-68	-113	-171	-61	-126	-196	12
odběr6	-87	-144	-221	-73	-134	-184	13
odběr7	-82	-132	-198	-77	-119	-178	9
odběr8	-80	-133	-198	-75	-128	-172	8
odběr9	-72	-118	-171	-72	-122	-139	8
odběr10	-54	-85	-119	-50	-96	-127	9
odběr11	-56	-92	-144	-55	-129	-186	24
odběr12	-52	-90	-141	-57	-115	-175	21
odběr13	-83	-144	-207	-87	-163	-243	12
odběr14	-82	-149	-220	-74	-175	-259	15
odběr16	-55	-89	-134	-35	-69	-98	28
průměrná odchylka [%]							16

Z tabulky je patrné, že průměrná odchylka CFD výpočtu od naměřených hodnot je celkově 16 %. K největším odchylkám došlo v odběrových pozicích 1; 16; 11 a 12. Odběrová pozice 1 se nacházela na vstupu do bočního kanálu a odběrové pozice 16 a 11 se nacházely na výstupu z prostředního kanálu. Odchylka v těchto bodech je procentuálně vyšší, jelikož jde o pozice

s velmi malým relativním podtlakem, kde i malá odchylka tlaku se projeví jako procentuálně velká chyba.

Matematický model použitý pro tyto výpočty byl pomocí validace shledán dostatečně přesným pro další výpočty.

4.4.4 Výpočet UWB06 pomocí ICON CFD

Po provedení výpočtu v programu ANSYS byl následně stejný model spočten pomocí programu ICON CFD. Do tohoto programu je model nahrán ve formátu *.stl (mračno bodů). Pro výpočet byl použit stejný CAD model jako pro výpočet pomocí ANSYS.

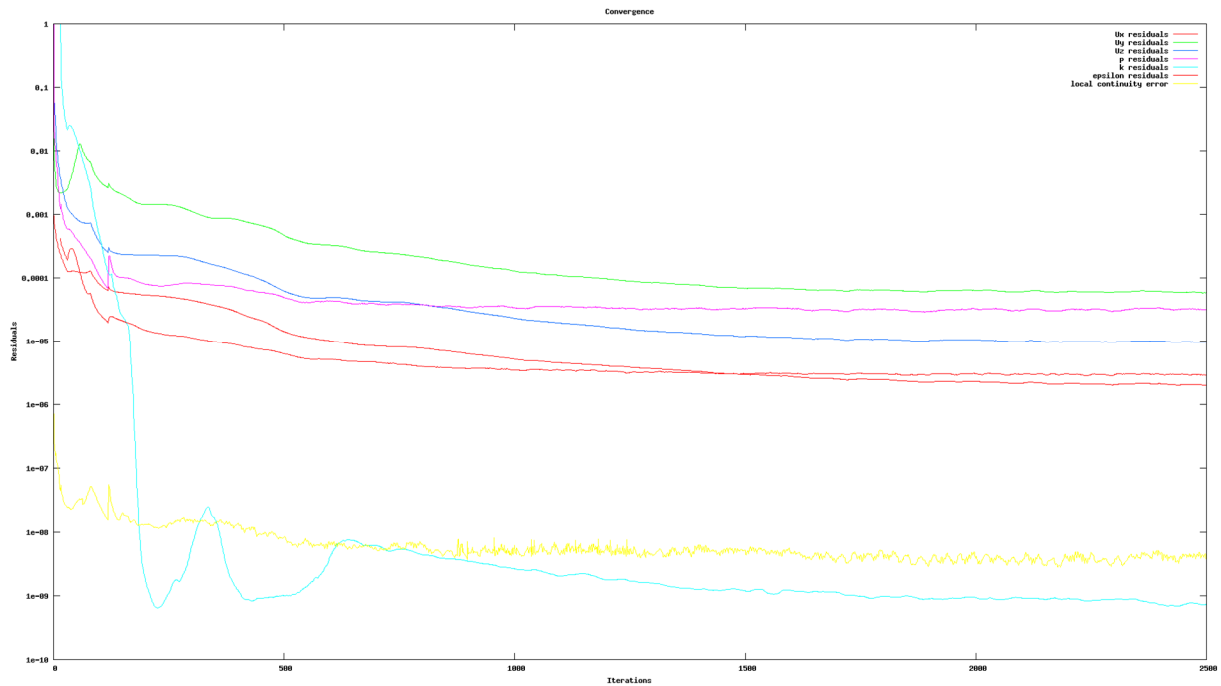
4.4.4.1 Průběh výpočtu

Nejprve jsou definovány okrajové podmínky:

- Statické povrchy – v případě tohoto výpočtu veškerý povrchu formule s výjimkou kol
- Dynamické povrchy – pro kola byl nastaven parametr úhlové rychlosti otáčení vypočtený pro požadovanou rychlost
- Inlet – vstupní plocha tekutiny – obdélníková plocha před vozem, ze které vstupuje vzduch do počítané oblasti
- Outlet – výstupní plocha tekutiny – obdélníková plocha za vozem, kterou vzduch opouští výpočetní oblast
- Pohybující se povrch – povrch pod formulí (povrch vozovky), který se pohybuje relativní nulovou rychlostí vůči vstupujícímu vzduchu
- Rychlost vstupu tekutiny – pro výpočet byla zvolena rychlost 13.8 m/s, tedy 50 km/h
- Hustota, tlak a intenzita turbulencí jsou přednastaveny prostředím pro výpočet silničních vozidel

Síť je v programu ICON CFD generována automaticky s dostatečnou kvalitou pro validovanou chybu do 5 % oproti měření ve větrném tunelu.

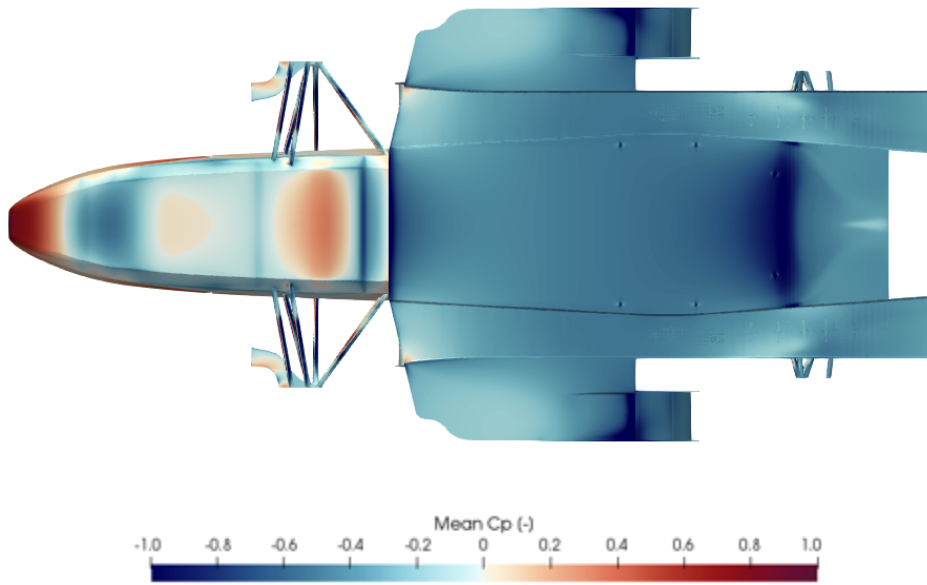
Po spuštění výpočtu řešič provádí výpočet v elementech sítě po jednotlivých iteracích, dokud nedosáhne konvergence. V případě tohoto výpočtu byl nastaven minimální počet iterací, který bude proveden, na 2500. Bylo tedy provedeno 2500 iterací, přestože ke konvergenci došlo již přibližně po 1200 iteracích.



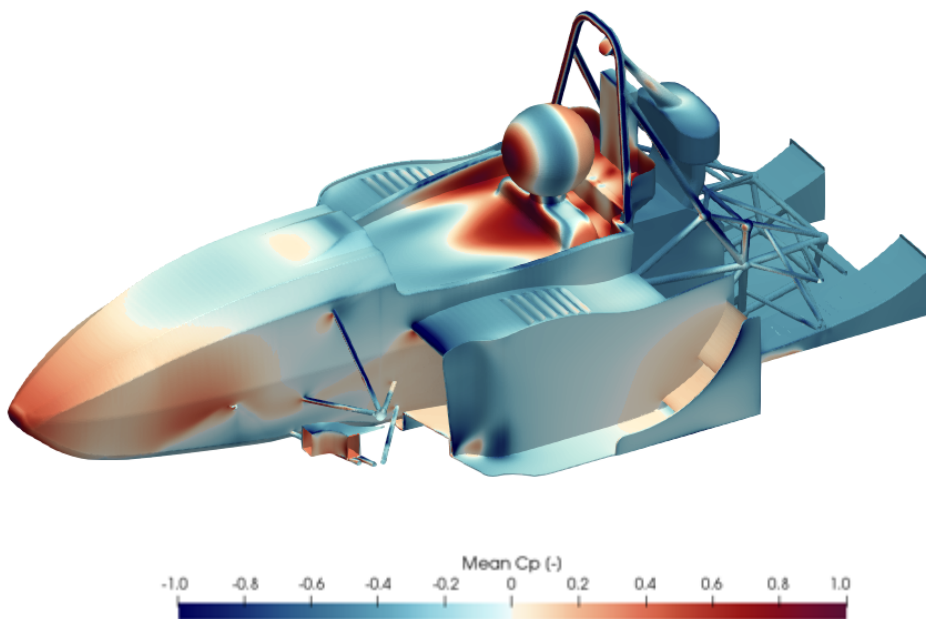
Obrázek 42 Průběh výpočtu

4.4.4.2 Výsledky:

Výstupem zadaného výpočtu jsou hodnoty C_d , C_l , zobrazení vývoje těchto koeficientů v závislosti na pozici v ose vozu a dále pak grafická zobrazení distribuce tlakového koeficientu, rychlostního pole, koeficientu hloubky průniku turbulencí a trojrozměrných proudnic vzduchu obtékajícího formuli. Číselné výsledky tohoto výpočtu se budou nacházet v kapitole zhodnocení a porovnání výsledků.



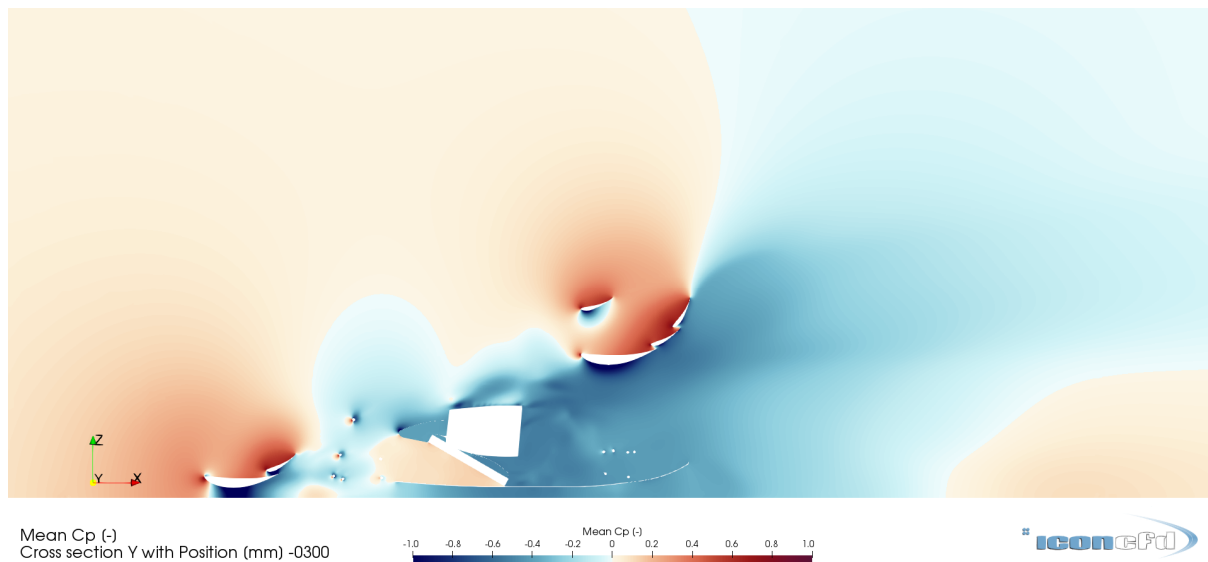
Obrázek 43 Rozložení tlaku na povrchu formule (spodní pohled)



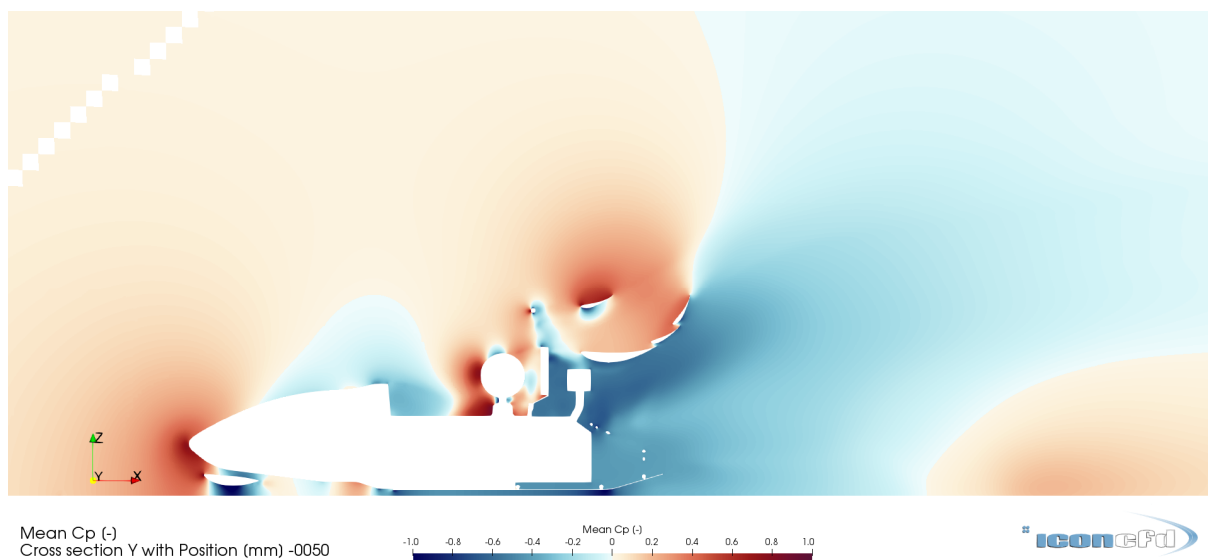
Obrázek 44 Rozložení tlaku na povrchu formule (axonometrický pohled)

Na obrázcích výše je znázorněno tlakové pole pomocí tlakového koeficientu C_p . Je patrné, že pod celou zadní částí podlahy je tvořen podtlak, který generuje přítlačnou sílu. Při generování těchto dvou obrázků byly skryty kola a křídla formule. Barevná škála symbolizuje rozložení

tlaku (modrá – nižší tlak než tlak obtékajícího vzduchu, červená – tlak vyšší, než je tlak obtékajícího vzduchu, bílá – tlak shodný s okolním tlakem).

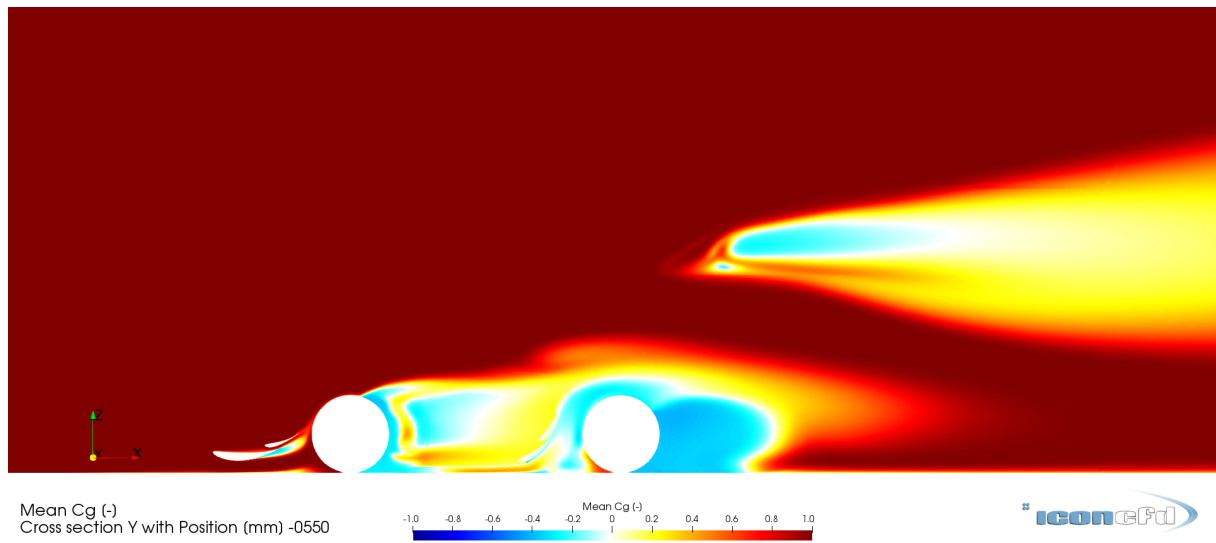


Obrázek 45 Rozložení tlakového pole ve vertikálním řezu

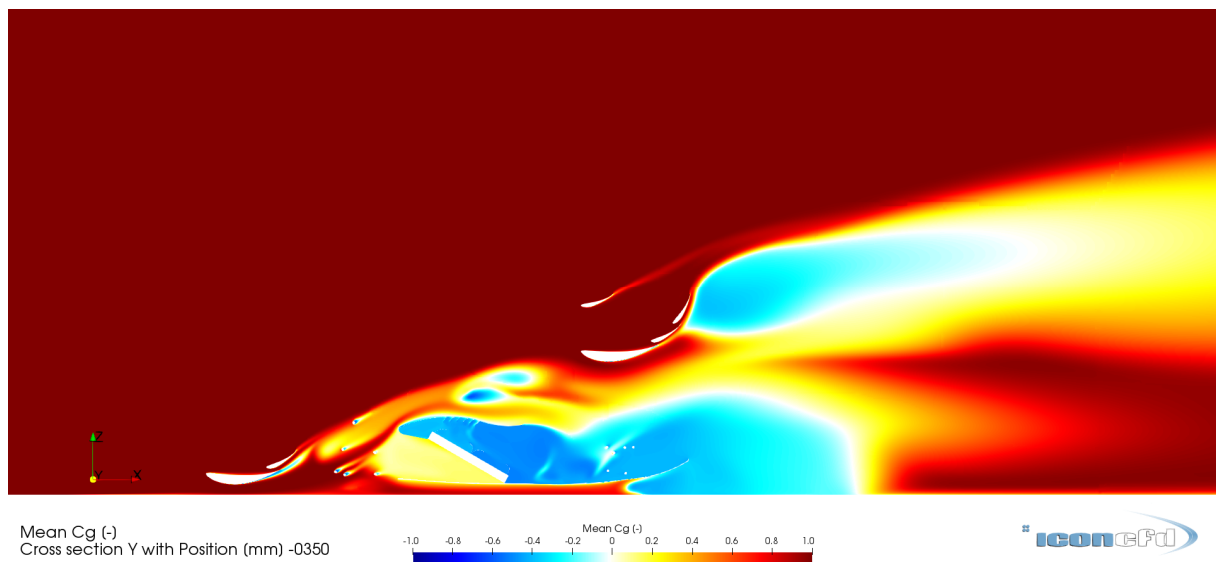


Obrázek 46 Rozložení tlakového pole ve vertikálním řezu

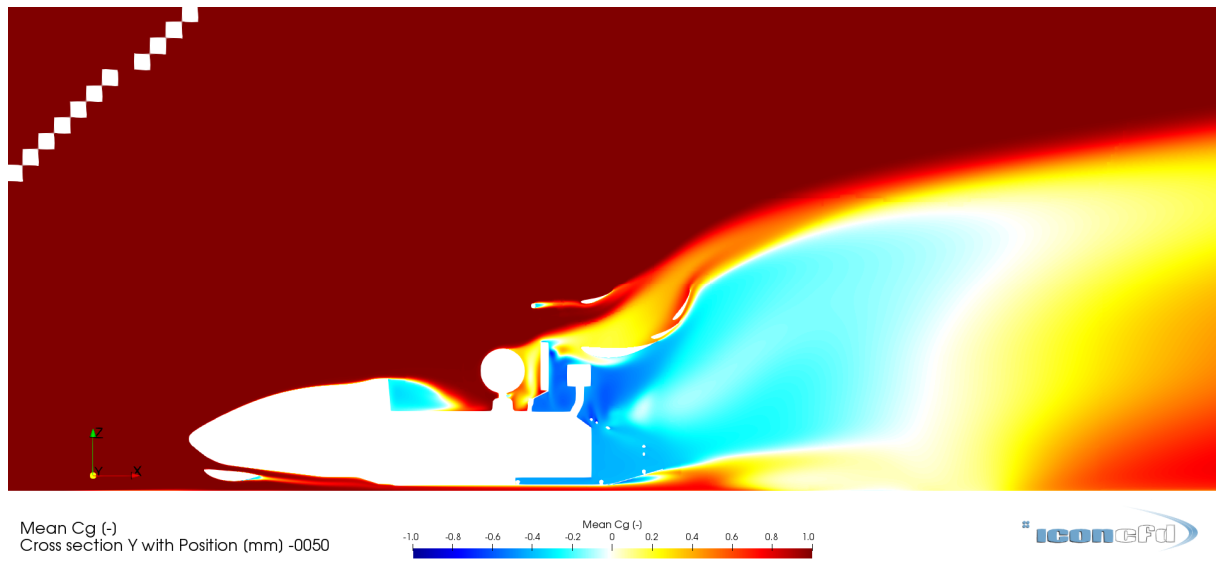
Na obrázcích výše se nachází znázornění stejného tlakového pole v podélných řezech volného proudu. Obrázek 46 zobrazuje řez v místě bočního kanálu, obr 45 zobrazuje řez v místě střední části podlahy.



Obrázek 47 Zobrazení pole koeficientu hloubky průniku turbulence C_g ve vertikálním řezu

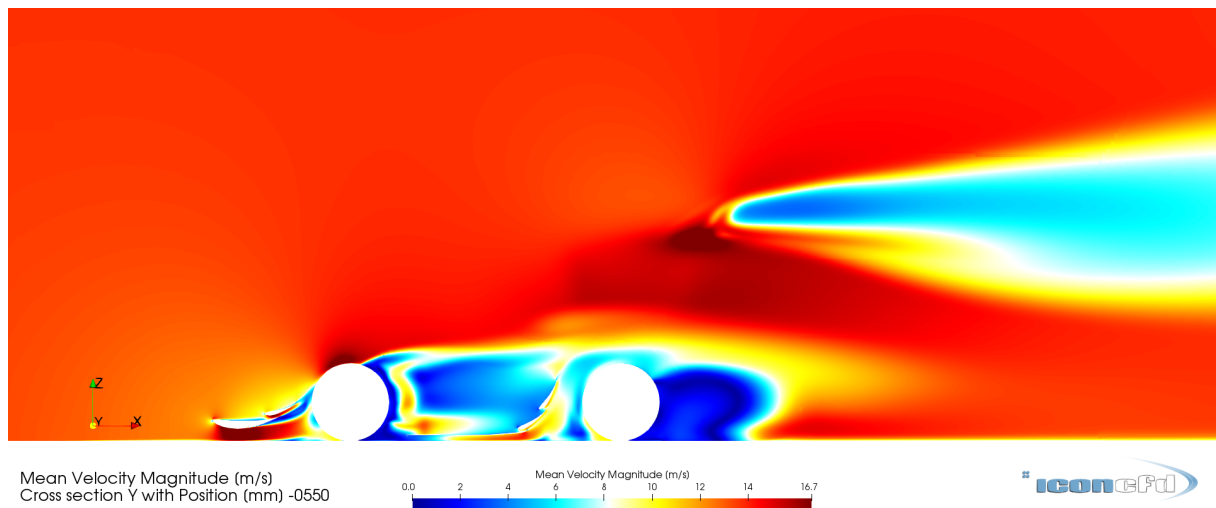


Obrázek 48 Zobrazení pole koeficientu hloubky průniku turbulence C_g ve vertikálním řezu

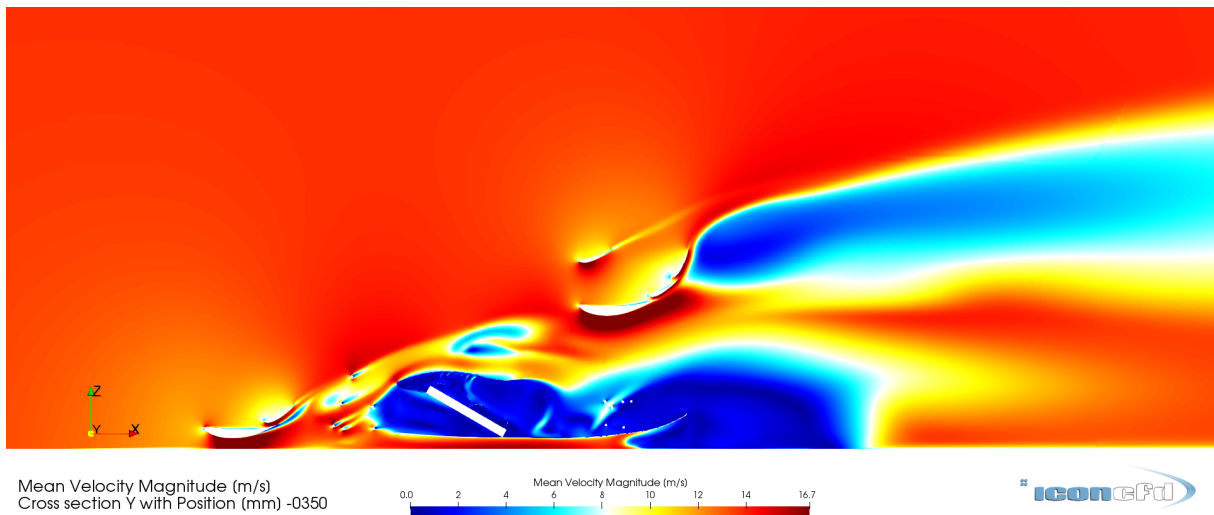


Obrázek 49 Zobrazení pole koeficientu hloubky průniku turbulence C_g ve vertikálním řezu

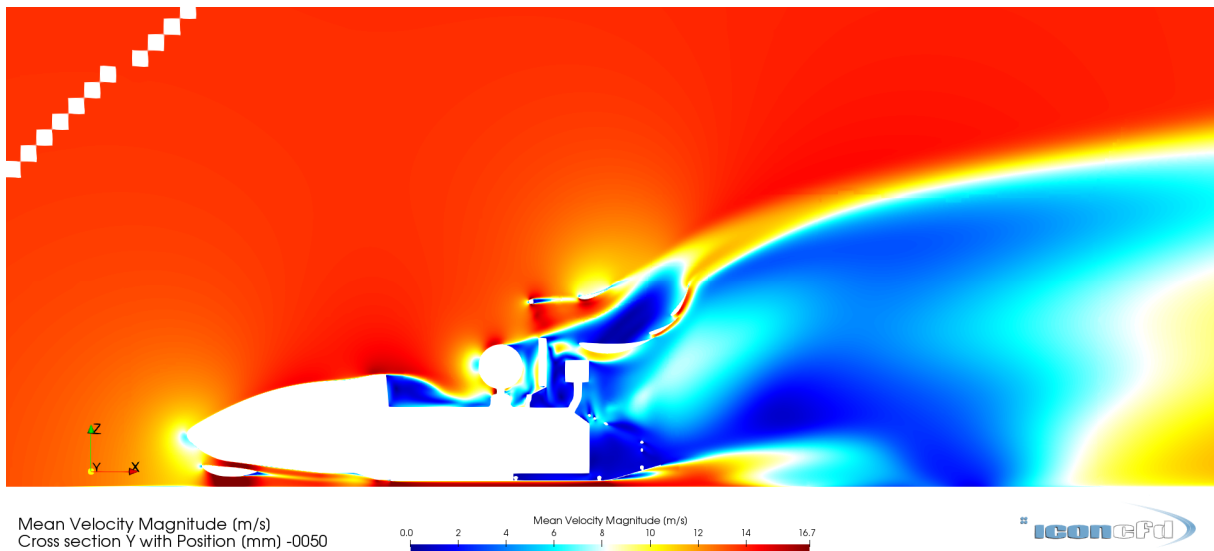
Na předchozích obrázcích je v horizontálních řezech znázorněno pole koeficientu hloubky průniku turbulence pomocí barevné škály (laminární proudění červeně, turbulentní proudění modře). Z obrázků je patrné, jak mohutné úplavy vlivem odporu kol ovlivňují proudění v okolí vozidla. Toto je patrné na obrázku 48, kde proniká úplav od rotujících zadních kol pod zadní část podlahy vozu.



Obrázek 50 Zobrazení pole rychlosti proudění ve vertikálním řezu

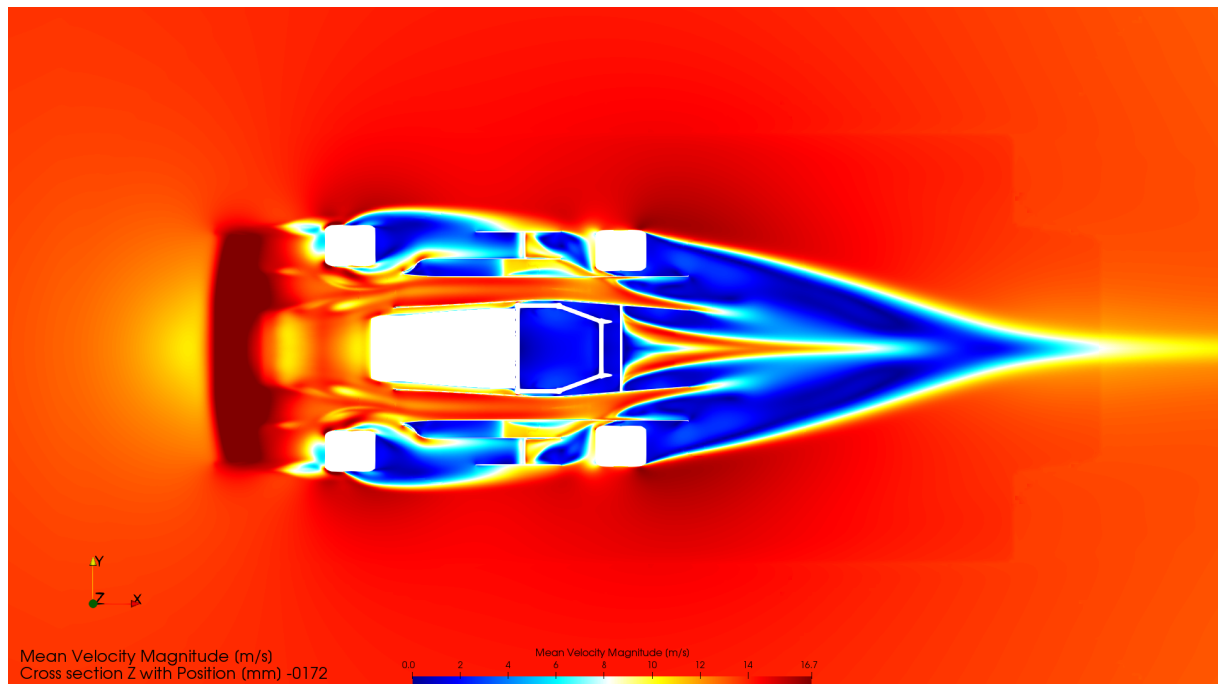


Obrázek 51 Zobrazení pole rychlosti proudění ve vertikálním řezu



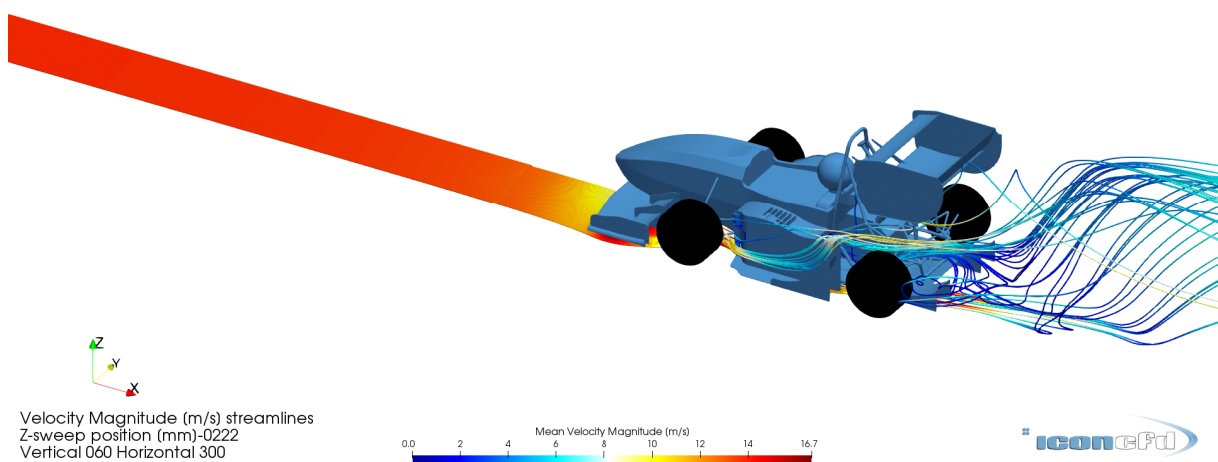
Obrázek 52 Zobrazení pole rychlosti proudění ve vertikálním řezu

V předchozích obrázcích jsou zobrazeny řezy rychlostního pole stejnými rovinami. Opět jsou zřetelně viditelné úplavy od kol ovlivňující proudění. Tyto úplavy jsou taktéž patrné z horizontálních řezů níže. Rychlost je zde symbolizována barvou dle škály v dolní části obrázku (od modré po červenou – od nulové rychlosti po maximální).

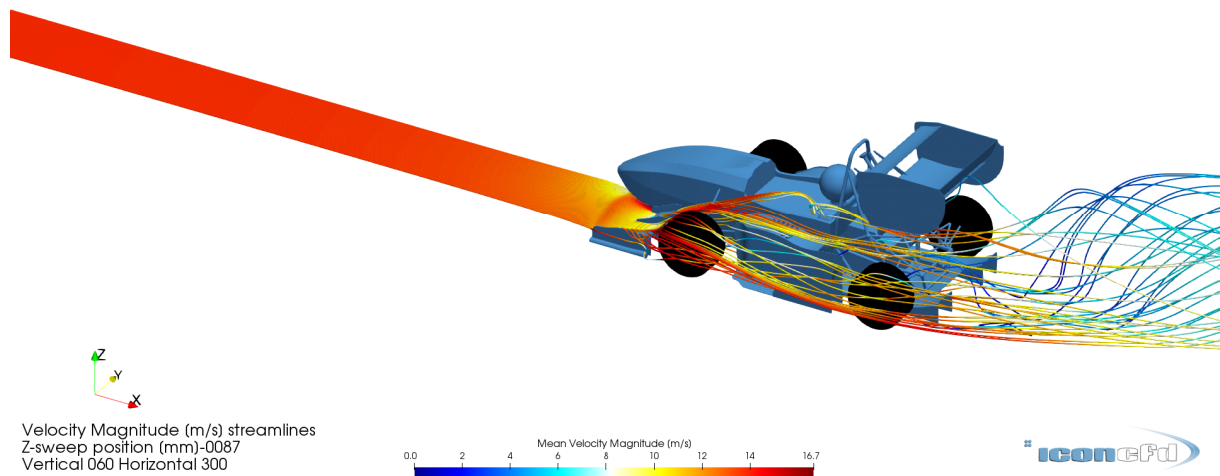


Obrázek 53 Zobrazení pole rychlosti proudění v horizontálním řezu

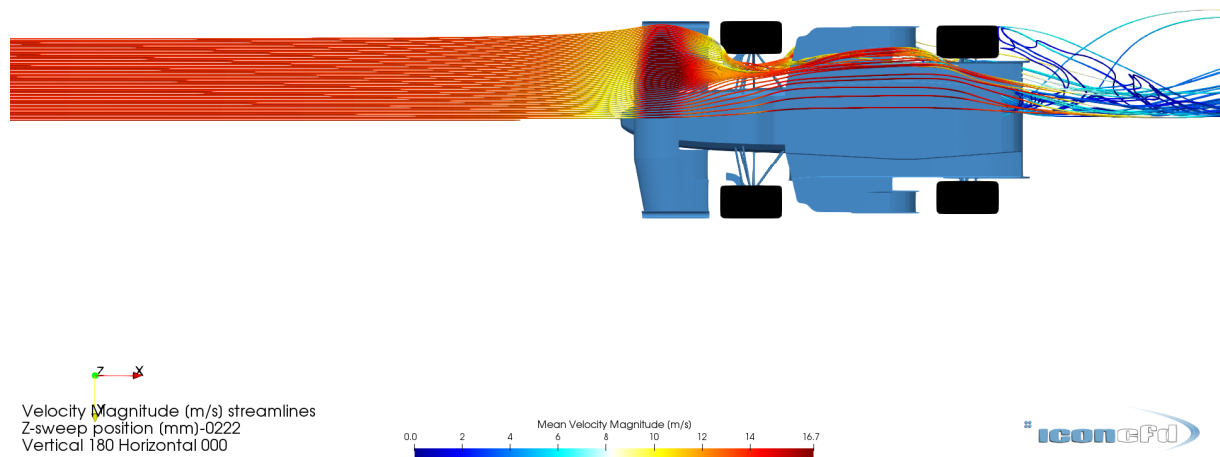
Z posledního obrázku je zřejmý úplav zadního kola strhávaný pod boční kanál podlahy. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny 3D proudnice vzduchu obtékající formuli. Tyto proudnice symbolizují trajektorie částic vzduchu obtékající formuli. Jejich barva symbolizuje rychlost této částice v daném místě se stejnou barevnou škálou jako na řezech rychlostního pole.



Obrázek 54 Proudnice obtékající formuli (axonometrický pohled)



Obrázek 55 Proudnice obtékající formuli (axonometrický pohled)



Obrázek 56 Proudnice obtékající formuli (spodní pohled)

Na těchto obrázcích jsou vyobrazeny proudnice v axonometrickém pohledu a ve spodním pohledu na podlahu vozidla. Z obrázků je patrné ono žádané urychlení proudu vzduchu pod podlahou vozidla. Dále pak ovlivnění proudu vzduchu úplavem rotujících kol a zpomalení proudu vzduchu v zavířeném úplavu za formuli.

4.5 Návrh modifikovaných podlah pro vůz UWB07

Pro vůz UWB07 bylo celkem navrženo 10 variant nové podlahy s různou geometrií. Při tvorbě těchto modifikací byly brány na zřetel cíle a zásady popsány v kapitole 4.2. Na

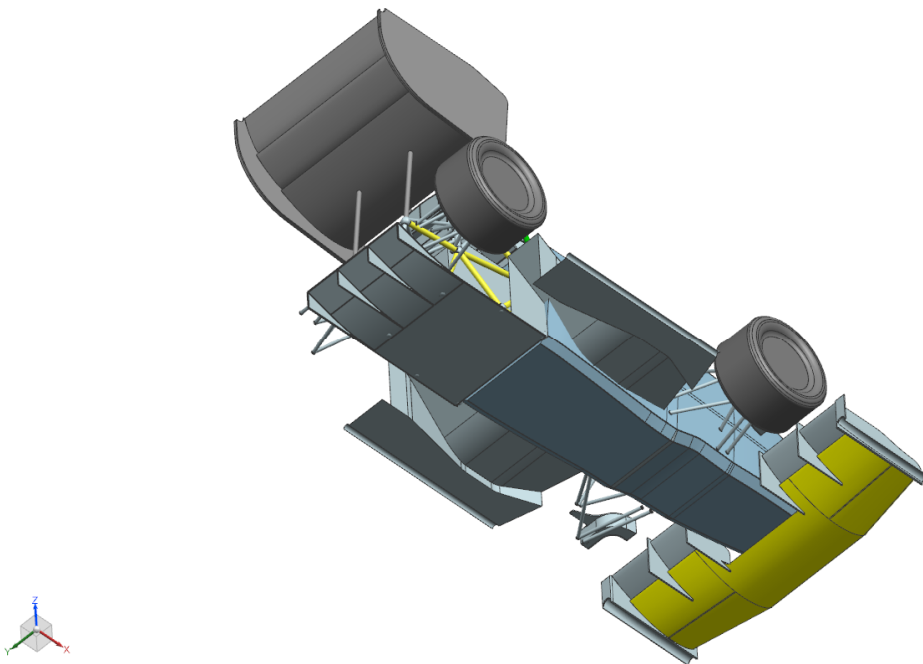
těchto variantách byl proveden výpočet v programu ICON CFD, kdy pro výpočet byl vždy použit stejný model formule a měněny byly pouze podlahy. Tyto varianty jsou popsány níže.

4.5.1 Varianta 1-5

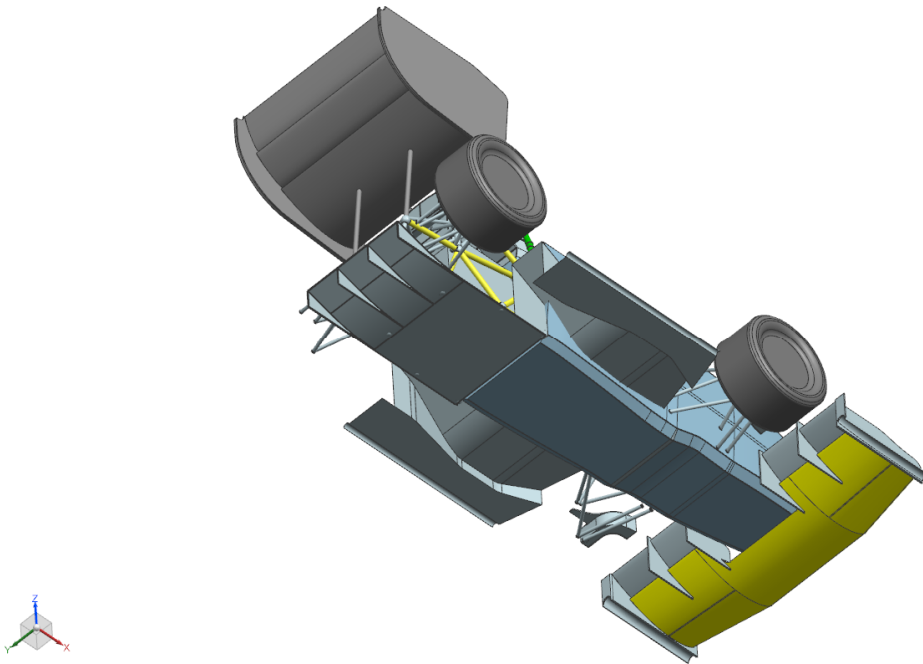
První modifikací (na obrázku níže) byla úprava bočních kanálů tak, aby končily před zavěšením zadní nápravy z důvodů popsaných v kapitole 4.2. Boční kanály jsou navrženy tak, že jejich vstup se nachází za přední nápravou a z čelního pohledu mezi předním kolem a monokokem formule. Dále ve směru proudění vzduchu dochází s výškovému snížení kanálu způsobujícímu urychlení proudu vzduchu. Zároveň se ale kanál rozšiřuje do strany, aby podtlak mohl působit na větší ploše. Za tímto úsekem přechází boční kanál do difusoru, což znamená rozšíření jeho průtočného průřezu zvětšením jeho výšky. Společně s tímto zvýšením se ale kanál opět zužuje tak, aby jeho ústí směřovalo do mezery mezi kolem a zadním rámem formule.

Přední část prostředního kanálu zůstává nezměněná z výše zmíněných důvodů. Zadní část prostředního kanálu přechází v oblasti pod motorem v difusor.

Varianty 1-5 jsou principiálně stejné, dochází jen ke změnám geometrie ve snaze dosažení co nejlepších výsledků.



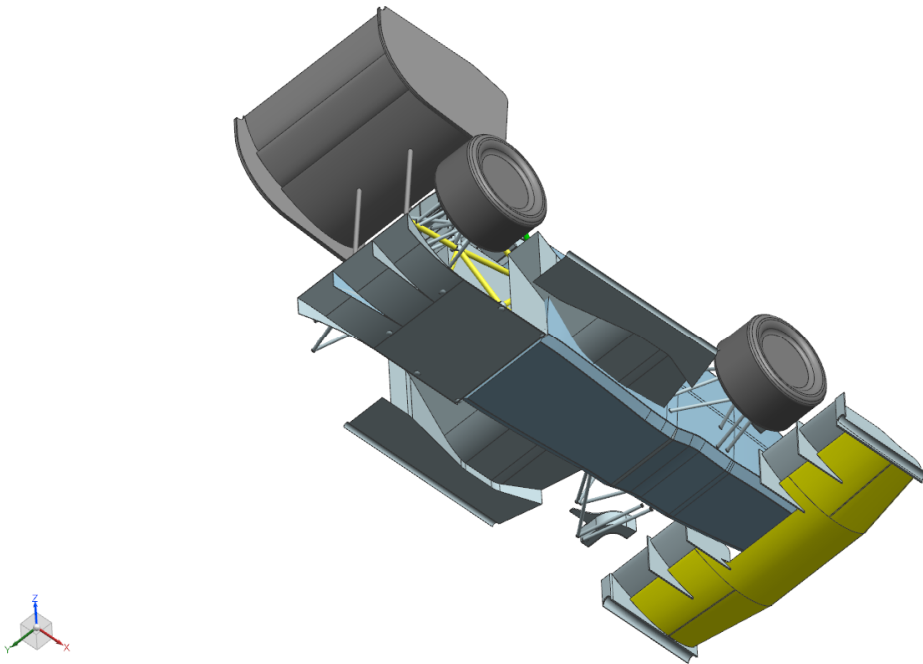
Obrázek 57 Varianta podlahy č. 1



Obrázek 58 Varianta podlahy č. 3

4.5.2 Varianty 5-7

U těchto variant došlo ke změně koncepce difusoru středového kanálu. Nově se difusor rozšiřuje nejen směrem nahoru, ale i do stran. To má za účel opět zvětšení plochy, na kterou působí tlaková diference.



Obrázek 59 Varianta podlahy č. 6

4.5.3 Varianty 8-10

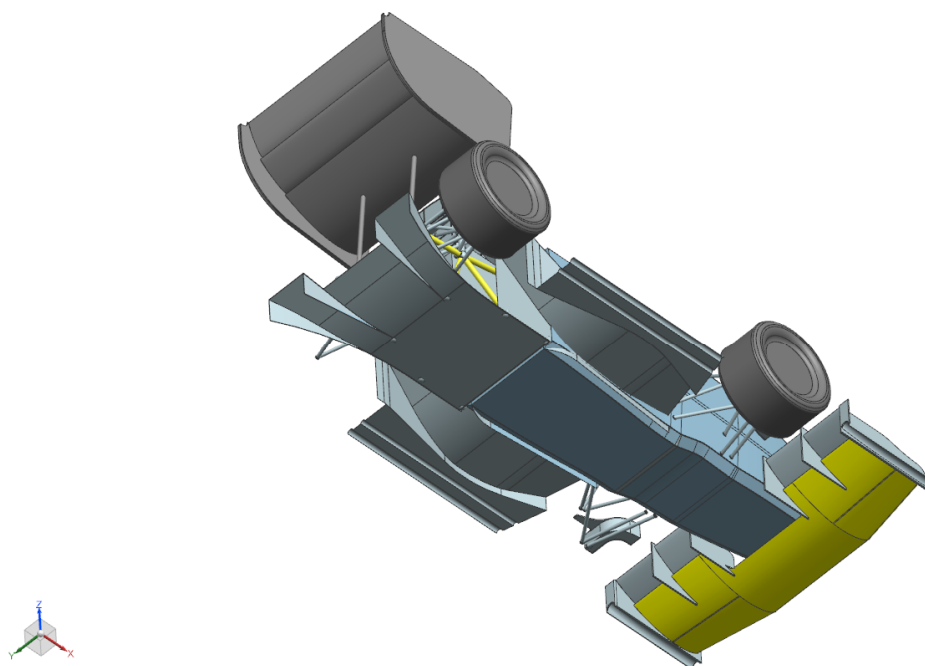
Při tvorbě těchto variant vyvstal v týmu formule dodatečný požadavek k úpravě difusoru středového kanálu. Dle pravidel totiž součástí vozu musí být takzvaný quickjack, zdvihací zařízení, které vyzdvihne hnanou nápravu formule do výšky 10 cm nad vozovku. Tento quickjack zdvihá formuli za pomoci vodorovné trubky umístěné v zadní části vozidla. Předchozí návrhy počítaly s tím, že tato vodorovná trubka bude posunuta dozadu za nový difusor (delší než na voze UWB06). Nakonec ale musel být difusor v této oblasti zkrácen, jelikož bylo rozhodnuto, že toto posunutí by bylo nevýhodné. Takto vznikly poslední 3 varianty podlahy, přičemž jejich geometrie vycházela z předchozích variant.



Trubka pro
zdvihání

Obrázek 60 Umístění trubky pro zdvih na voze UWB05

Na následujícím obrázku je CAD model pro výpočet varianty č. 10. Tato varianta zahrnuje použití bočních kanálů z předchozích variant, doplněné o dva půlkruhové kanálky na boční straně podlahy. V zadní části středového kanálu se nachází difuzor rozdělený do třech kanálů. Na stranách tohoto difusoru jsou dva kanály rozšiřující se do stran a zároveň do výšky. Oba kanály jsou tak dlouhé, jak dovolují pravidla. Mezi těmito dvěma kanály se nachází středový kanál, rozšiřující se opět do stran i do výšky, zakončený v místě trubky pro zdvihání vozu.



Obrázek 61 Varianta podlahy č. 10

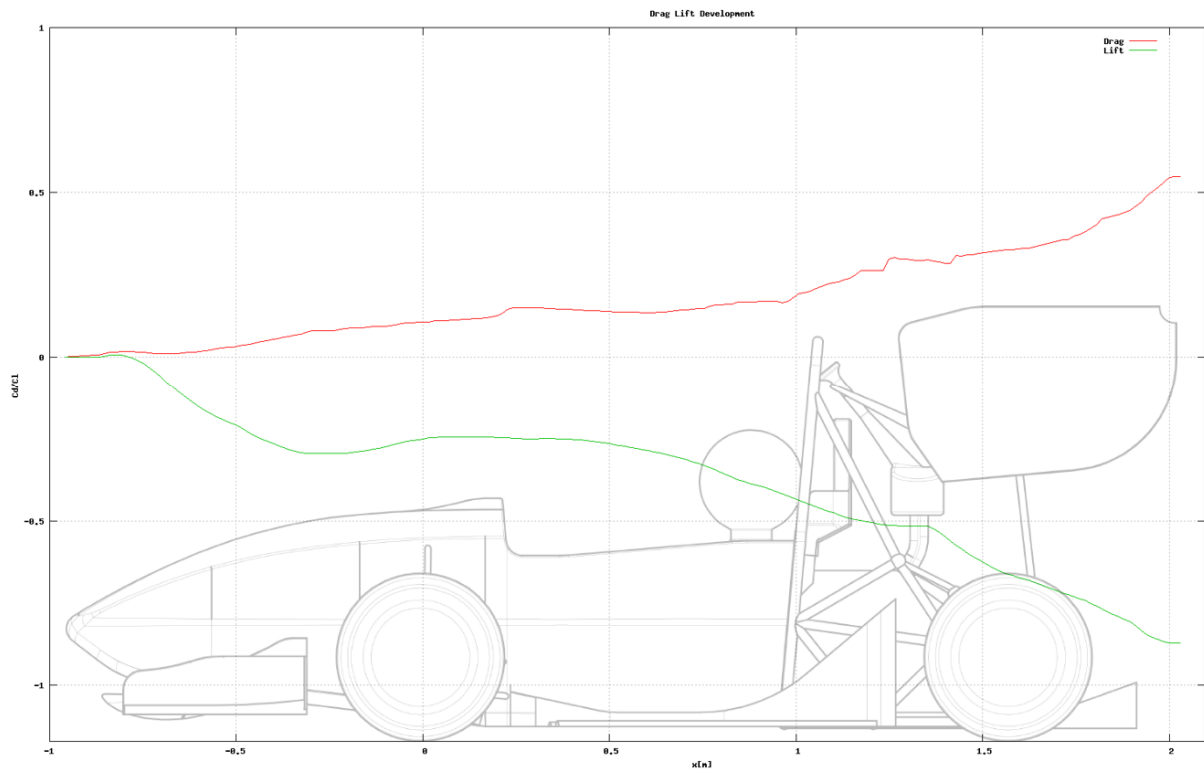
4.6 Výsledky výpočtů modifikovaných podlah

Pro každou z těchto navržených variant byla provedena CFD simulace proudění při stejných parametrech nastavení. Výsledky těchto simulací jsou zaznamenány v tabulce níže. Dle výpočtů dosáhla nejlepších parametrů geometrie podlahy č.10.

Tabulka 4 Srovnání modifikací podlah pro vůz UWB07

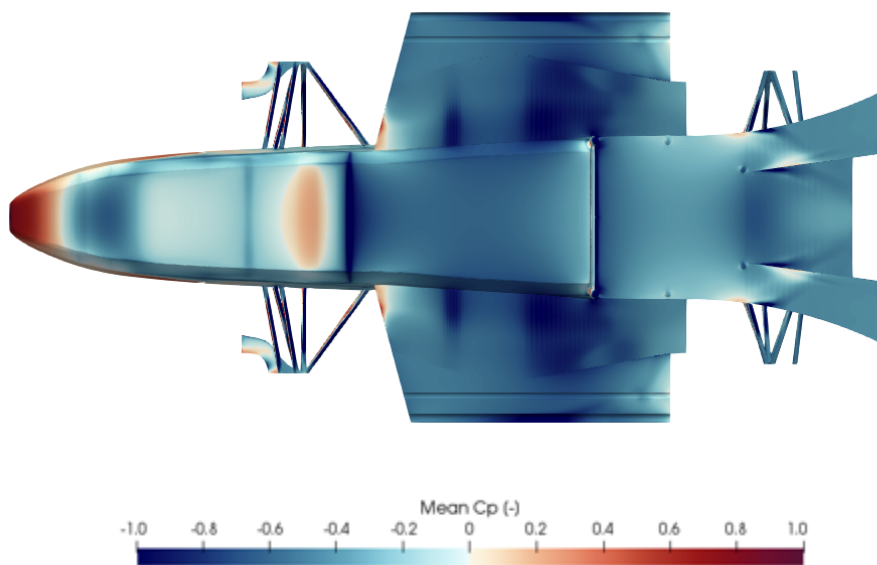
modifikace podlahy	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_d [-]	0,58	0,57	0,58	0,61	0,59	0,57	0,58	0,57	0,56	0,55
C_l [-]	-0,90	-0,86	-0,85	-0,85	-0,85	-0,86	-0,87	-0,85	-0,91	-0,94

Z následujícího grafu vyplývá vývoj koeficientů C_l a C_d podél osy vozidla. Pro lepší představu je do grafu vložena skica formule. Z pohledu této studie je zajímavá oblast grafu mezi přední a zadní nápravou, kde je obzvláště patrný vliv geometrie podlahy na oba aerodynamické koeficienty. Koeficient vztaku C_l v této oblasti klesá z hodnoty -0,25 na hodnotu -0,52 a to takřka za nulového zvyšování odporu v těchto místech.



Graf 5 Vývoj koeficientů C_1 a C_d podél osy vozidla UWB07

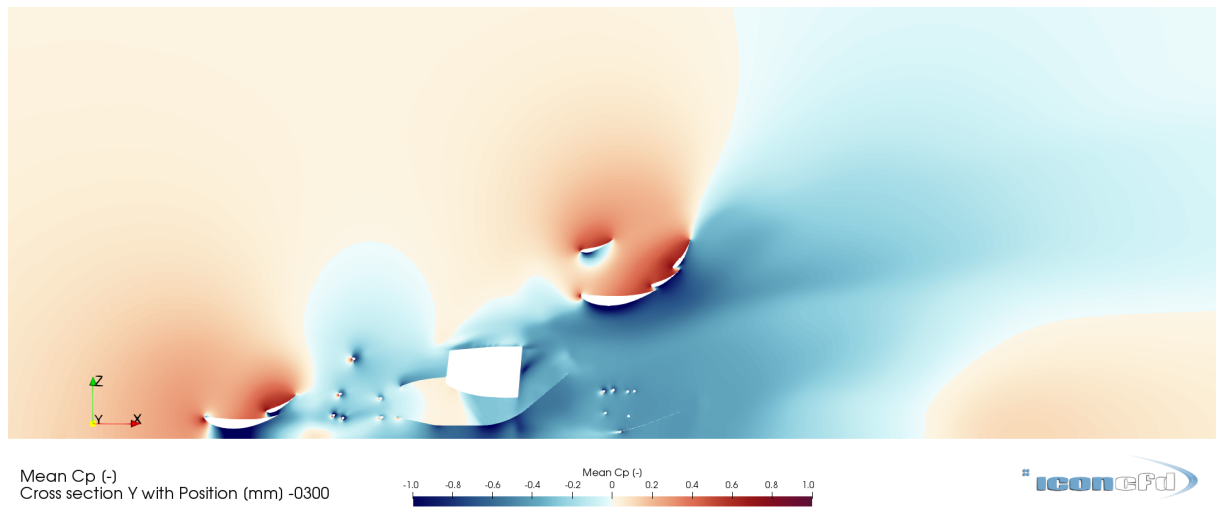
Na obrázku níže je znázorněno rozložení tlaku na povrchu formule při pohledu zdola. Je patrné, že nejnižšího tlaku je dosahováno v oblasti bočních kanálů.



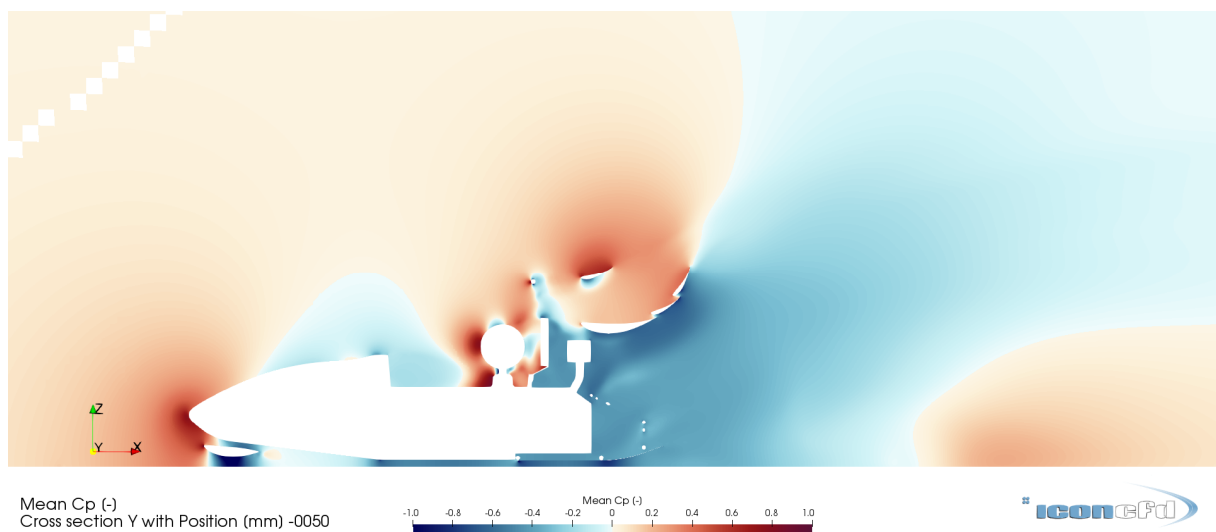
Obrázek 62 Rozložení tlaku na formuli s modifikovanou podlahou (spodní pohled)

Na následujících obrázcích je znázorněno tlakové pole ve svislých řezech rovnoběžných s osou vozidla. Na prvním z těchto dvou obrázků je řez v místě bočního kanálu. Na druhém je

vyobrazen řez ve střední části vozu. Tyto řezy korespondují s tlakovým polem na povrchu formule zobrazeným výše.

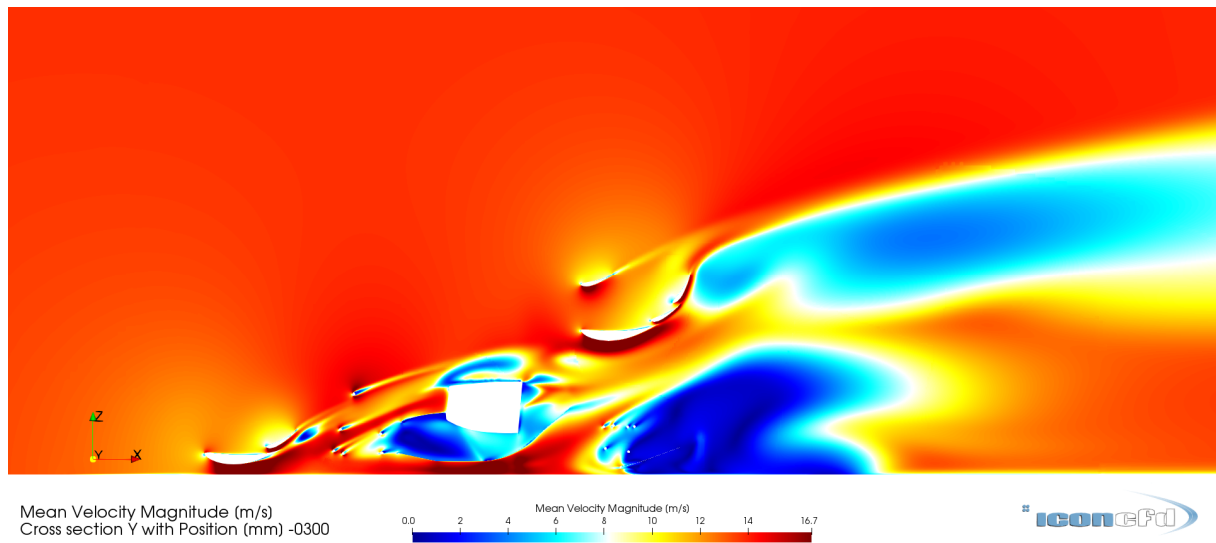


Obrázek 63 Rozložení tlakového pole ve vertikálním řezu

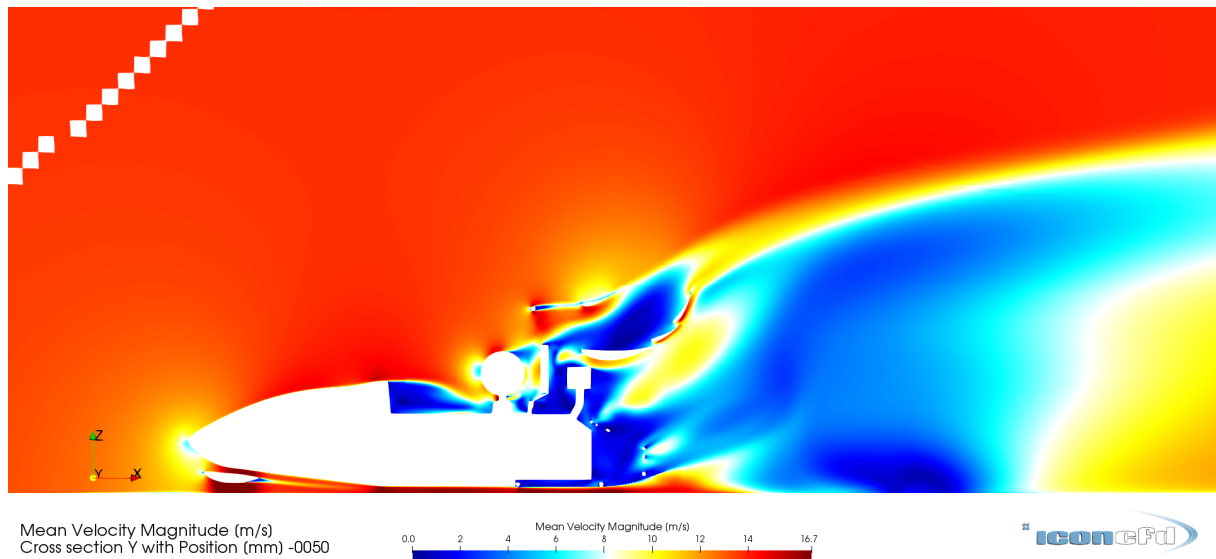


Obrázek 64 Rozložení tlakového pole ve vertikálním řezu

Níže jsou zobrazeny řezy rychlostním polem ve stejných pozicích jako řezy tlakovým polem výše. Výrazně viditelné je zde urychlení proudu vzduchu (tmavě červená) protékajícího bočním kanálem na prvním z obrázků.

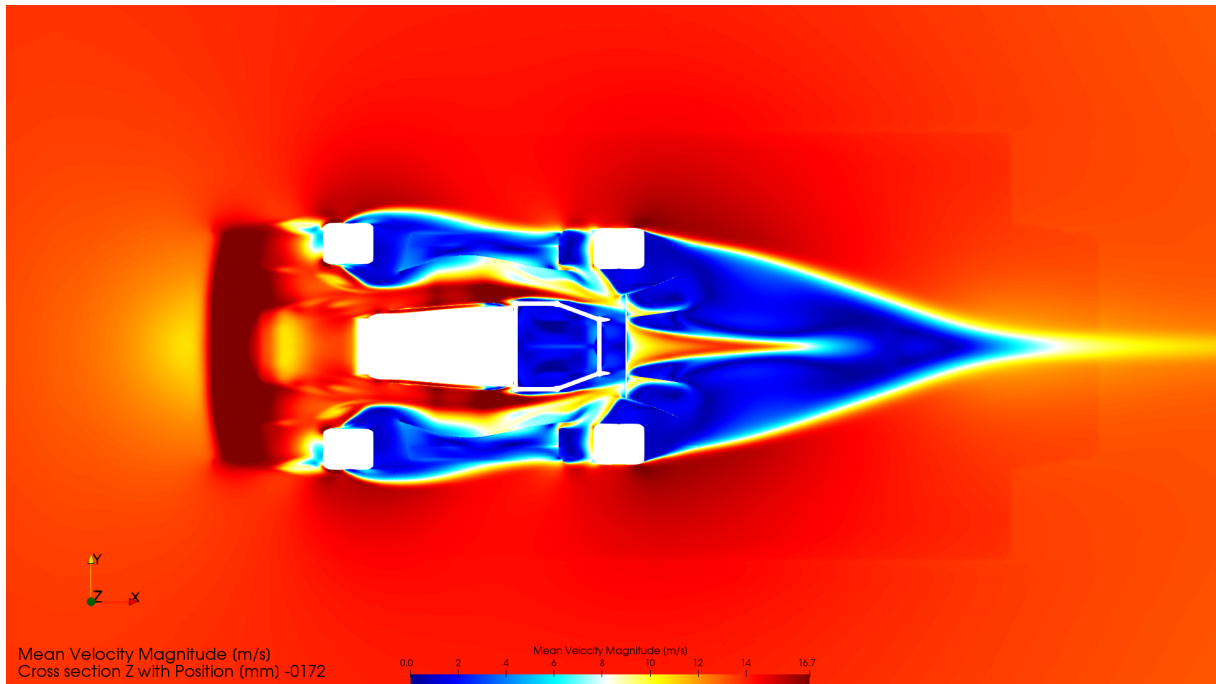


Obrázek 65 Rozložení rychlostního pole ve vertikálním řezu



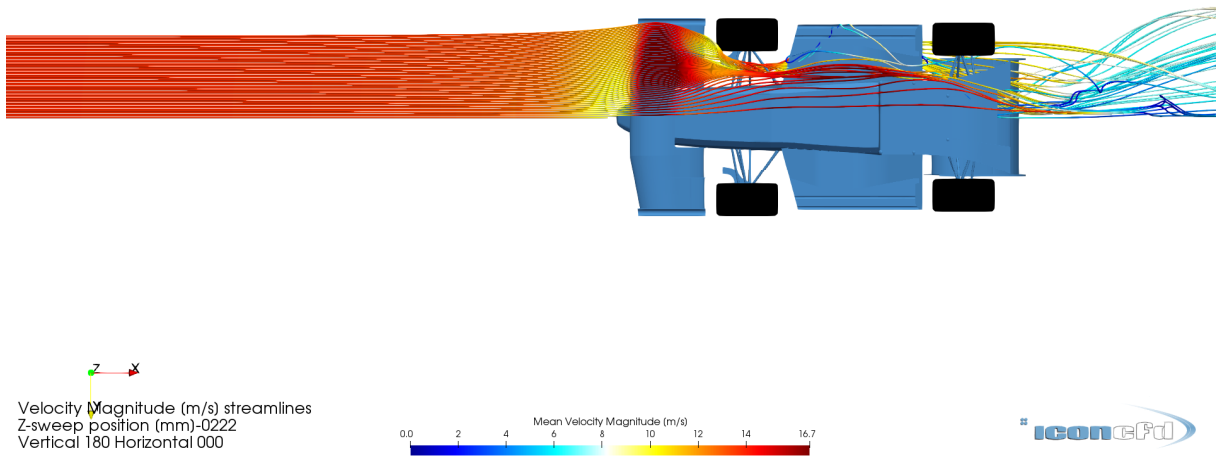
Obrázek 66 Rozložení rychlostního pole ve vertikálním řezu

Na obrázku níže se nachází vodorovný řez stejným rychlostním polem. V tomto řezu je zřejmé, jak proud vzduchu obtéká tělo formule bočními kanály a nejvyšší rychlosti dosahuje v polovině kanálu. Taktéž je zde patrné, jak je proudění v těchto bočních kanálech narušeno úplavem vytvářeným předními koly. Tento úplav proniká do části kanálu vzdálenější od těla formule, kde poté není dosaženo takové rychlosti.



Obrázek 67 Rozložení rychlostního pole v horizontálním řezu

To je patrné i z následujícího obrázku, kde jsou zobrazeny proudnice obtékajícího vzduchu.



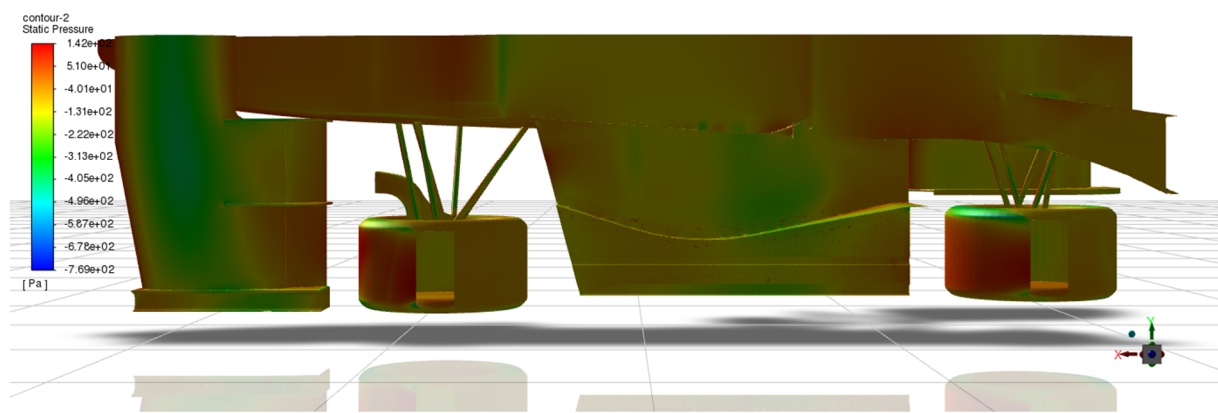
Obrázek 68 Proudnice obtékajícího vzduchu pod modifikovanou podlahou

4.7 Výpočet vybrané varianty podlahy pomocí validovaného matematického modelu

Na Variantě podlahy č. 10 byl proveden CFD výpočet validovaným matematickým modelem. Veškeré parametry nastavení výpočtu byly použity shodně jako v kapitole 4.4.2, jelikož se jedná o stejný matematický model.

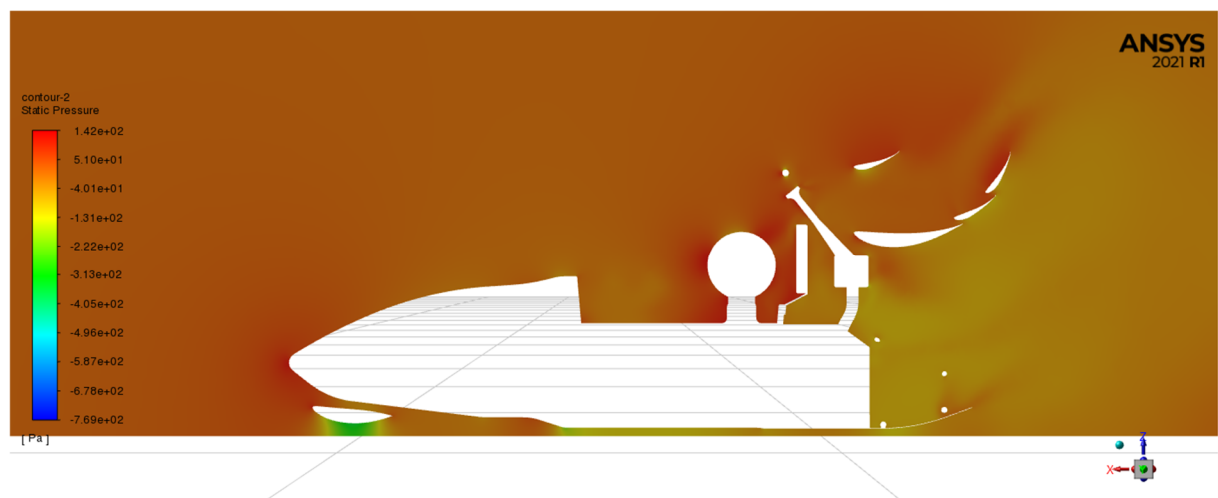
Na obrázku níže je znázorněno rozložení tlaku na podlaze formule. Z obrázku je patrné, že dosahovaný podtlak vytvářený v kanálech podlahy je vyšší než u vozu UWB06.

ANSYS
2021 R1

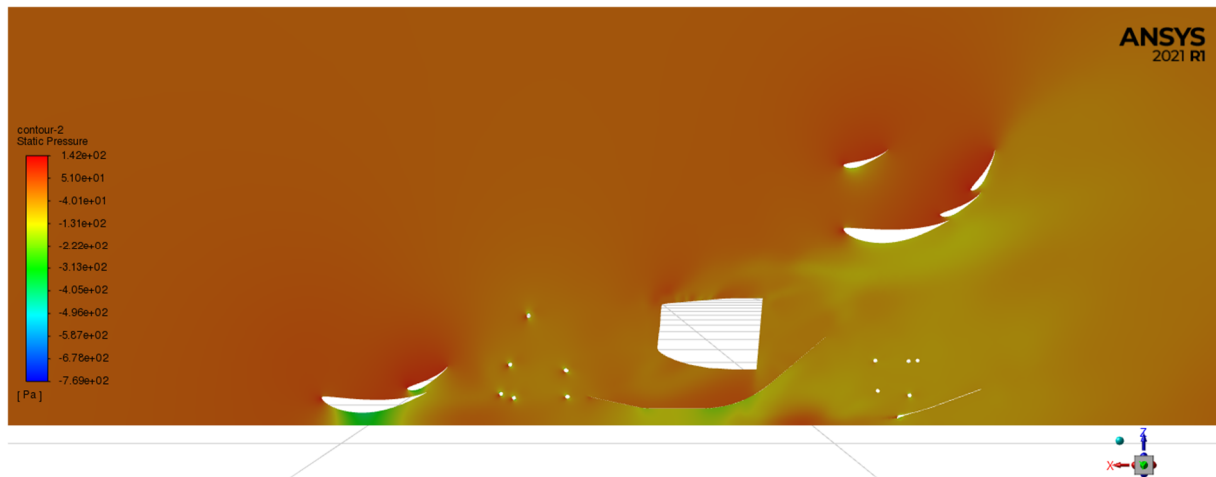


Obrázek 69 Rozložení tlaku na podlaze formule

Na následujících obrázcích jsou znázorněny tlaková pole ve vertikálních řezech rovnoběžných s osou formule.

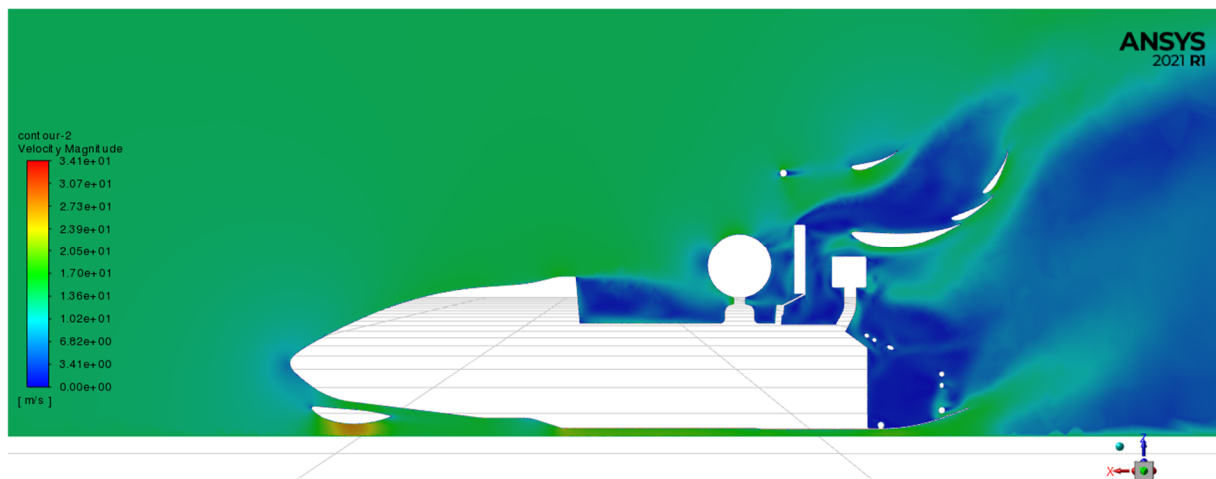


Obrázek 70 Rozložení tlaku ve vertikální rovině v místě prostředního kanálu



Obrázek 71 Rozložení tlaku ve vertikální rovině v místě bočního kanálu

Na následujících obrázcích je zobrazeno rychlostní pole proudu obtékající tekutiny ve vertikálních řezech.

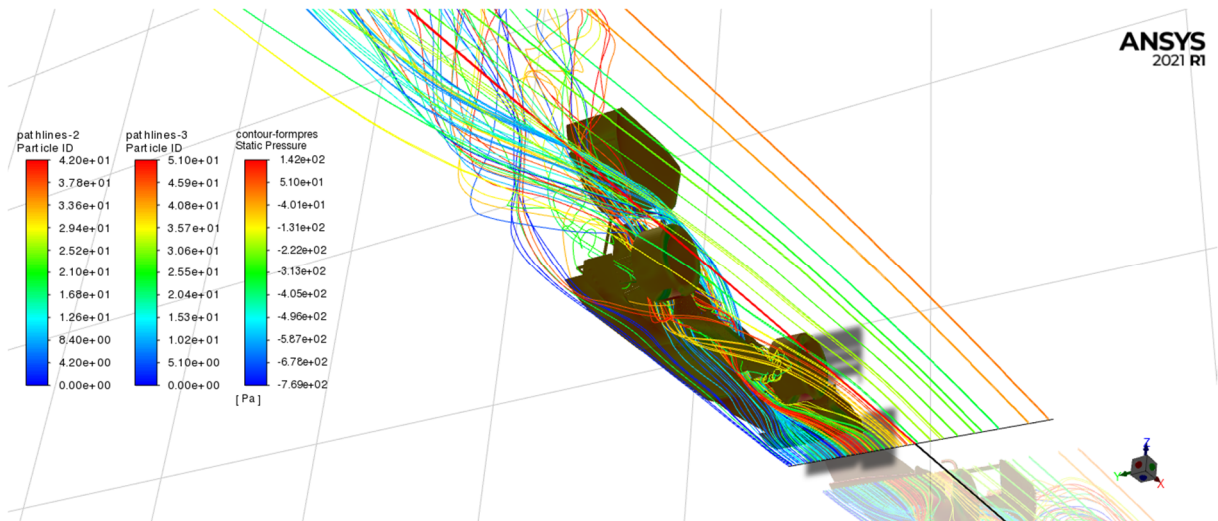


Obrázek 72 Rychlostní pole v řezu prostředním kanálem



Obrázek 73 Rychlostní pole v řezu bočním kanálem

V následujícím obrázku jsou zobrazeny proudnice tekutiny obtékající formuli v oblasti pod podlahou vozu. Z obrázku je patrné urychlení proudu vzduchu v kanálech podlahy. Dále je patrné, že vlivem vytvářeného podtlaku dochází k nasávání vzduchu obtékajícího formuli bokem pod podlahu vozu v oblasti mezi koly formule.



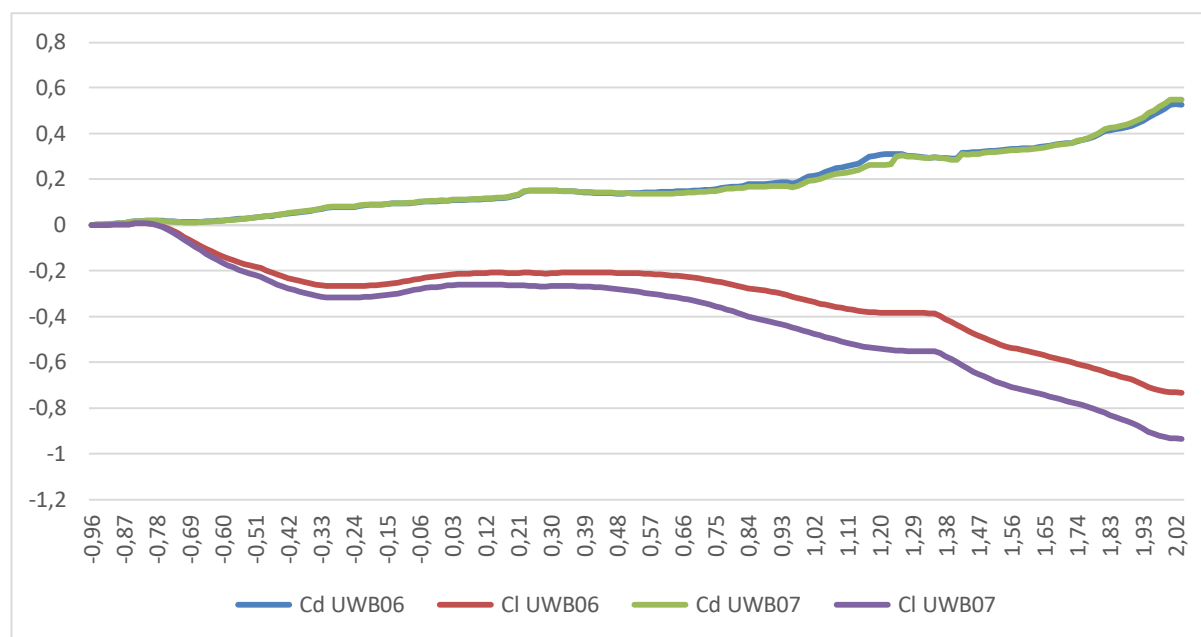
Obrázek 74 Proudnice vzduchu obtékajícího formuli

5 Zhodnocení návrhu UWB07

Při návrhu podlahy pro vůz UWB07 byl brán zřetel na pravidla a cíle zmíněné v kapitole 4. Veškerá pravidla soutěže byla tímto návrhem splněna. Hlavním cílem pro návrh nové podlahy bylo zvýšení generovaného přítlaku. Toho bylo návrhem nové podlahy dosaženo. Srovnání výsledných hodnot je zobrazeno v tabulce a grafu níže. V oblasti přítlaku došlo ke zlepšení o 29 % při zachování stejného odporu vozidla.

Tabulka 5 Srovnání výsledných koeficientů UWB06 a UWB07

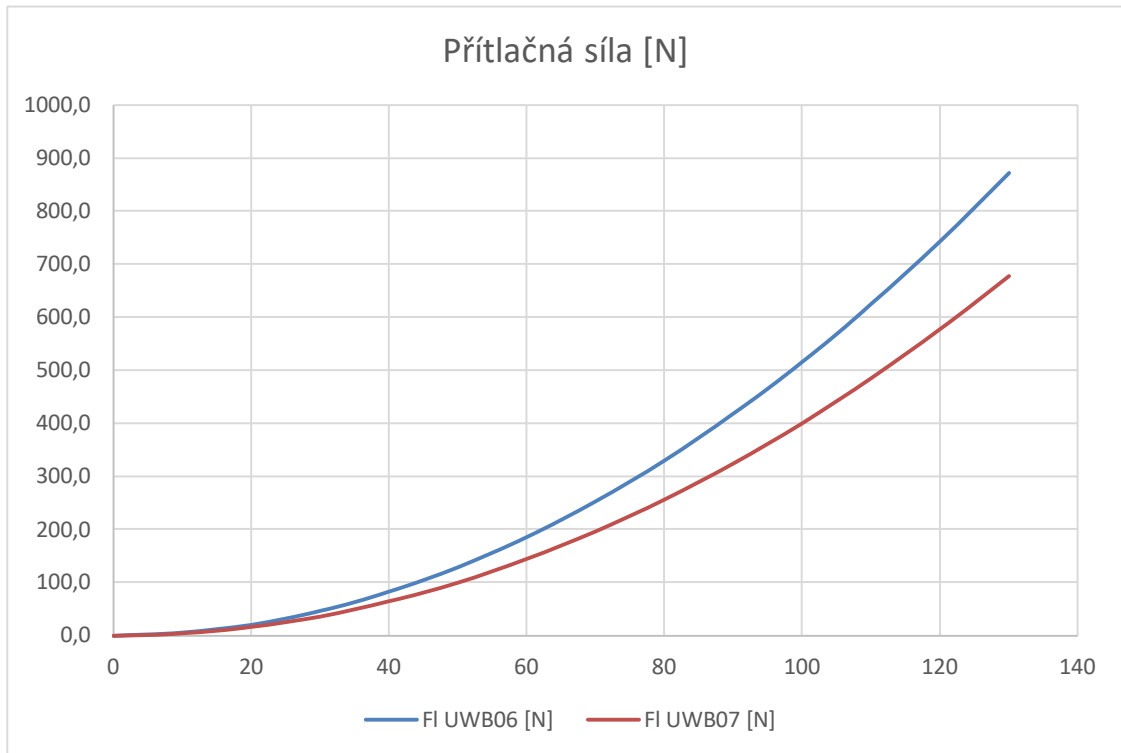
monopost	UWB06	UWB07	srovnání [%]
C_d [-]	0,55	0,55	100,00
C_l [-]	-0,73	-0,94	128,77



Graf 6 Srovnání koeficientů C_l a C_d v podélné ose vozů UWB06 a UWB07 s modifikovanou podlahou

Největšího nárůstu přítlaku (myšleno jako poklesu vztlaku) je dosahováno mezi souřadnicemi 0,48 m a 1,29 m. Této změny je dosaženo bočními kanály modifikované podlahy. Dalším z cílů pro návrh bylo zabránění kolize bočních kanálů se zavěšením zadní nápravy monopostu. Tohoto bylo dosaženo zkrácením obou bočních kanálů tak, že ústí jejich difusorů se nachází před zavěšením zadní nápravy.

Po přepočtu pomocí rovnice (2) na sílu aerodynamického přítlaku [N] získáme následující graf pro vozy UWB06 a UWB07.



Graf 7 Srovnání velikosti přítlačné síly monopostů UWB06 a UWB07

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout podlahu jako aerodynamický prvek formule kategorie FSAE. V úvodu řešené problematiky je popsán princip funkce podlahy z hlediska aerodynamiky.

Obsahem druhé kapitoly je rešerše používaných systémů. V této kapitole jsou představena provedení systémů chlazení používaná ostatními týmy.

Ve třetí kapitole je popis provedeného měření tlakových charakteristik podlahy vozu UWB06. Součástí kapitoly je popis přípravy měření, jeho průběhu i zpracování výsledků.

V úvodu čtvrté kapitoly jsou popsány pravidla a cíle pro návrh nové podlahy. Dále je popsáno provedení CFD simulace monopostu UWB06 pomocí ANSYS Fluent. Matematický model vzniklý touto simulací je porovnán s výsledky měření ve třetí kapitole. Dále je stejná simulace provedena pomocí programu ICON CFD. Pokračováním kapitoly je návrh 10 modifikovaných podlah pro vůz UWB07 a simulace jejich aerodynamických charakteristik. Na vybrané variantě podlahy byla provedena numerická simulace pomocí validovaného matematického modelu.

V poslední kapitole je zhodnocen návrh modifikované podlahy a srovnání s podlahou UWB06.

Přínosem této diplomové práce je aerodynamický návrh podlahy pro vůz UWB07, který bude použit při vývoji tohoto monopostu. Návrhem nové podlahy došlo ke zvýšení přítláčné síly o 29 %. Součástí jsou CFD výpočty společně se zpracovaným měřením a validací numerického výpočetního modelu. Tyto přínosy budou zhodnoceny budoucím týmem UWB Racing team Pilsen v příštích sezónách nejen při vývoji vozu, ale i při statické disciplíně Design report.

Použitá literatura

- [1] [online]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/cdswweb/gen/DocumentResources.aspx>
- [2] Aerodynamika – autolexicon.net. [online]. Copyright © 2021 [cit. 27.04.2021]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/aerodynamika/>
- [3] SimScale Webinar | Optimising racecars with CFD - Racecar Engineering. Racecar Engineering » Motorsport | Racing | Technology [online]. Copyright © 2021 Chelsea Magazine Company [cit. 28.04.2021]. Dostupné z: <https://www.racecar-engineering.com/articles/simscale-webinar-optimising-racecars-with-cfd/>
- [4] Jak velký skok udělala nová Škoda Octavia? Detailně jsme ji porovnali s předchůdcem - Aktuálně.cz. Zprávy - Aktuálně.cz [online]. Copyright © [cit. 28.04.2021]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/auto/skoda-octavia/r~2aaedbc405f911eaa24cac1f6b220ee8/v~sl:731bca52c6ef9f0f6209177955eb4b6a/>
- [5] Perfektně aerodynamická ŠKODA OCTAVIA - ŠKODA Storyboard. [online]. Copyright © ŠKODA AUTO a.s. 2021 [cit. 28.04.2021]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/inovace-a-technologie/perfektne-aerodynamicka-skoda-octavia/>
- [6] The Drag Coefficient. NASA Glenn Research Center [online]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragco.html>
- [7] Aerodynamic optimization techniques in design of formula One car. Share and Discover Knowledge on SlideShare [online]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/RamachandranSeethara1/aerodynamic-optimization-techniques-in-design-of-formula-one-car>
- [8] KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: design for speed. Revised 2nd edition. [Cambridge]: Bentley Publishers.com, [2006]. ISBN 0-8376-0142-8.

[9] In theory: Blown rear wing (Active-DRD) - SomersF1 - The technical side of Formula One. SomersF1 - The technical side of Formula One [online]. Dostupné z: <http://www.somersf1.co.uk/2015/10/in-theory-blown-rear-wing-active-drd.html>

[10] Bernoulli's Equation. Princeton University [online]. Dostupné z: https://www.princeton.edu/~asmits/Bicycle_web/Bernoulli.html

[11] Downforce. Formula 1 Dictionary [online]. Dostupné z: <http://www.formula1-dictionary.net/downforce.html>

[12] Tech Explained: Formula Student Aerodynamics. Racecar Engineering » Motorsport | Racing | Technology [online]. Copyright © 2021 Chelsea Magazine Company [cit. 15.04.2021]. Dostupné z: <https://www.racecar-engineering.com/articles/tech-explained-formula-student-aerodynamics/6/>

[13] Ground Effects Lotus 78/79 | Autos und motorräder, Formel 1, Autos. Pinterest - France [online]. Dostupné z: <https://www.pinterest.fr/amp/pin/429671620676551990/>

[14] TECH TUESDAY: What does the 2021 aero rules change mean for the cars – and which teams will it hurt most? | Formula 1®. F1 - The Official Home of Formula 1® Racing [online]. Copyright © 2003 [cit. 15.05.2021]. Dostupné z: <https://www.formula1.com/en/latest/article.what-does-the-2021-aero-rules-change-mean-for-the-cars-and-which-teams-will.4UDFqT5FCn6Ix49mcn0wDt.html>

[15] F1 monopost Red Bull Racing pro rok 2021: RB16B. [online]. Copyright © Red [cit. 15.05.2021]. Dostupné z: <https://www.redbull.com/cz-cs/redbullracing/rb16b-motorsport-f1-verstappen-perez-2021-model>

[16] Mapy.cz. Mapy.cz [online]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=13.3087945&y=49.6930348&z=15&base=ophoto>

[17] Springer handbook of experimental fluid mechanics. Editor Cameron TROPEA, editor Alexander L. YARIN, editor John F. FOSS. Berlin:Springer, c2007. ISBN978-3-540-25141-5

- [18] M., F., 2015. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill Education. ISBN 978-0-07-339827-3.
- [19] Reynolds' Number - an overview | ScienceDirect Topics. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. [online]. Copyright © [cit. 15.05.2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/reynolds-number>
- [20] CFD Support: CFD analysis [online]. Copyright © CFD support, s.r.o., Sokolovská 270 [cit. 17.05.2021]. Dostupné z: <https://www.cfdsupport.com/OpenFOAM-Training-by-CFD-Support/node334.html>
- [21] Ansys | Engineering Simulation Software. Ansys | Engineering Simulation Software [online]. Copyright © 2021 Copyright ANSYS, Inc [cit. 17.05.2021]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/>
- [22] Ansys Fluent | Fluid Simulation Software. Ansys | Engineering Simulation Software [online]. Copyright © 2021 Copyright ANSYS, Inc [cit. 17.05.2021]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- [23] ICON - Home. [online]. Copyright © ICON 2021 [cit. 17.05.2021]. Dostupné z: <https://iconcfd.com/en/>
- [24] All there is to know about different mesh types in CFD!. Manchester CFD Research & CFD Consultancy | Dr Amir Keshmiri [online]. Dostupné z: <https://www.manchestercfd.co.uk/post/all-there-is-to-know-about-different-mesh-types-in-cfd>
- [25] Your Guide to Meshing Techniques for Efficient CFD Modeling | COMSOL Blog. COMSOL - Software for Multiphysics Simulation [online]. Copyright © 2021 by COMSOL Inc. All rights reserved [cit. 17.05.2021]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/your-guide-to-meshing-techniques-for-efficient-cfd-modeling/>

PŘÍLOHA č. 1

Výkres podlahy vozu UWB06

PŘÍLOHA č. 2

Výkres podlahy pro vůz UWB07