



Středoškolská technika 2024

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Vývoj karoserie cestovního vozu pro závody slotracingu

Adam Beran

První soukromé jazykové gymnázium Hradec Králové
Brandlova 875, Hradec Králové

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci „*Vývoj karoserie cestovního vozu pro závody slotracingu*“ v rámci projektu Středoškolské techniky samostatně vypracoval a použil pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů. Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce jsou shodné. Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Hradci Králové dne _____

Adam Beran

Poděkování

Děkuji vedoucím Ing. Vojtěchu Jakubcovi a RNDr. Michalu Hruškovi za konzultace a odborné vedení mé práce. Děkuji ostatním učitelům 1.SJG Hradec Králové za podněty a konzultace k mé práci. Za mnoho užitečných rad, poznatků a řadu konzultací děkuji Ing. Vojtěchu Jakubcovi z Vývojového centra ŠKODA AUTO a.s. Poděkování patří také Ing. Jakubovi Suchému ze Strojní fakulty ČVUT Praha za vedení při měření v aerodynamickém tunelu. Za pomoc při procesu výroby mého návrhu karoserie děkuji Radkovi Novákovi ze SCRC Pardubice, Ing. Janu Žemličkovi a Pavlu Flaisigovi z Attan Slot Racing Všejanya. Za konstrukční rady při stavbě modelu pak Ing. Romanu Kalhousovi z klubu SCRC Pardubice a Zdeňku Koubovi z AMC Nová Paka za zapůjčení dráhy pro testování. Děkuji také rodičům za trvalou podporu, trpělivost a pomoc.

Anotace

BERAN, A. Vývoj karoserie cestovního vozu pro závody slotracingu. Hradec Králové, 2024. Práce v rámci Středoškolské techniky na Prvním soukromém jazykovém gymnáziu v Hradci Králové. Vedoucí práce Ing. Vojtěch Jakubec, 123 s.

Má práce v rámci projektu Středoškolské techniky popisuje vývoj a výrobu karoserie modelu cestovního vozu pro závody ve slotracingu. Námětem mé práce je vytvořit návrh karoserie, který bude mít co nejvýhodnější aerodynamické a současně jízdní vlastnosti na dráze. Jako cíl jsem si dal vytvořit konkurenceschopnou karoserii pro závody slotracingu v kategorii cestovních vozů, kterých se pravidelně účastním. Chci si ověřit, jak se teoretické poznatky projevují při jízdě modelu v praxi.

Práce v teoretické části seznamuje s základními informacemi o slotracingu, dále pak teoretické informace o CFD simulacích, které jsem využil při vývoji karoserie. Následně popisuje aerodynamické tunely, jejich typy a význam při vývoji cestovních vozů.

Součástí mé práce je i ověření aerodynamických vlastností mnou navržené karoserie v aerodynamickém tunelu a porovnání s počítačovými CFD simulacemi.

Následně popisuji vlastní postup při výrobě karoserie. Tvorbu modelu, formy, kopyta a vlastní lisování karoserie z lexanu.

Poslední částí je měření na dráze s karoserií, kterou jsem vyvinul a vyrobil. Testovací jízdy a měření jsem prováděl na dvou odlišných drahách pro slotracing. Jednou je dráha klubu AMC Nová Paka a druhou pak moje domovská dráha klubu SCRC Pardubice. Naměřené hodnoty jsem porovnal s nyní dostupnými karoseriemi cestovních vozů pro slotracing. Měření u modelů s různými karoseriemi je prováděno za jednotných podmínek a jsou měřeny časy na jedno kolo. Výsledky pro jednotlivé karoserie jsem zaznamenal, následně porovnal a vyhodnotil.

V rámci mé práce jsem navázal spolupráci s několika odbornými pracovišti zabývajícími se aerodynamikou vozidel. Velmi přínosnou je spolupráce s Vývojovým centrem ŠKODA AUTO a.s. v Mladé Boleslavi s Ing. Vojtěchem Jakubcem. Měření v aerodynamickém tunelu jsem prováděl a spolupracoval se Strojní fakultou ČVUT v Praze s Ing. Jakubem Suchým. Ve výrobní části mého návrhu karoserie byla navázána spolupráce s kolegy z ostatních slotracingových klubů SCRC Pardubice a ATTAN Slot Racing Všejaný. Pro testovací jízdy a měření pak byly využity dráhy klubů AMC Nová Paka a SCRC Pardubice.

V rámci konzultace mých výsledků v oblasti aerodynamiky jsem oslovil odborníky zabývající se vývojem cestovních a závodních vozů a požádal je o vyjádření. Jsou jimi Oliver Littlewood, který pracuje na pozici CFD Aerodynamicist Industrial Placement v Mercedes-AMG Petronas Formula One Team a Miguel Jiménez, který nyní pracuje na pozici Simulation & Modeling Engineer v Red Bull Racing a někteří další.

Klíčová slova: slotracing, karoserie, CFD simulace, aerodynamika

Annotation

BERAN, A. Development of a touring car body for slotracing. Thesis within the Student's Professional Activities at the First Private Language Grammar School in Hradec Králové. Thesis supervisor Ing. Vojtěch Jakubec, 123 p.

My thesis within the Student's Professional Activities project describes the development and production of a touring car model body for slotracing competitions. The idea of my thesis is to create a body design that will have the most favorable aerodynamic and at the same time handling characteristics on the track. My goal was to create a competitive body for the slotracing races in the touring car category that I regularly participate in. I want to check how the theoretical knowledge is reflected in the practical driving of the model.

The theoretical part of the thesis introduces basic information about slotracing, followed by theoretical information about CFD simulations, which I used in the development of the body. It then describes wind tunnels, their types and their importance in the development of touring cars.

Part of my thesis is also the verification of the aerodynamic properties of my designed body in a wind tunnel and comparison with computer CFD simulations.

Subsequently, I describe the actual process of manufacturing the bodywork. The creation of the model, the mould, the hoof and the actual moulding of the body from lexan. The last part is the measurement on the track with the bodywork that I developed and produced. I did test runs and measurements on two different slotracing tracks. One is the AMC Nová Paka club track and the other is my home track SCRC Pardubice. I compared the measured values with the currently available touring car bodies for slotracing. Measurements for models with different bodies are made under uniform conditions and lap times are measured. The results for each body were recorded, then compared and evaluated.

As part of my work, I have established cooperation with several specialist departments dealing with vehicle aerodynamics. The cooperation with the Development Centre of ŠKODA AUTO a.s. in Mladá Boleslav with Ing. Vojtěch Jakubec. I carried out wind tunnel measurements and cooperated with the Faculty of Mechanical Engineering of the Czech Technical University in Prague with Ing. Jakub Suchý. In the production part of my body design, cooperation was established with colleagues from other slotracing clubs SCRC Pardubice and ATTAN Slot Racing Všejaný. The tracks of AMC Nová Paka and SCRC Pardubice were used for test runs and measurements.

As part of the consultation of my results in the field of aerodynamics, I contacted experts involved in the development of touring and racing cars and asked them for their opinion. They are Oliver Littlewood, who works as CFD Aerodynamicist Industrial Placement at Mercedes-AMG Petronas Formula One Team and Miguel Jiménez, who now works as a Simulation & Modeling Engineer at Red Bull Racing

and some others.

Keywords: slotracing, bodywork, CFD simulation, aerodynamics

Strukturovaná anotace

Klíčová slova: slotracing, karoserie, CFD-simulace, aerodynamika

Rozsah práce: 123 stran

Záměr a cíl práce: Záměrem a cílem mé práce je vytvořit vlastní návrh karoserie dle mezinárodních pravidel, ověřit aerodynamické a jízdní vlastnosti modelu při testovacích jízdách na dráze. Konečným cílem je účast se svým návrhem karoserie na některém ze seriálů závodů ve slotracingu. Chci ukázat, že lze vytvořit návrh karoserie modelu auta pro slotracing v počítači. Ověřit a upravit jeho aerodynamické vlastnosti na základě CFD simulací s kontrolou v aerodynamickém tunelu. Dále karoserii vyrobit a připravit pro závod ve slotracingu.

Použité metody a techniky: Moje práce využívá mé znalosti, zkušenosti a dovednosti při konstrukci modelů pro slotracing, kterému se věnuji již více než 10 let. Využívám zkušenosti kolegů z různých slotracingových klubů, se kterými se setkávám na společných závodech modelů autíček. Moje práce popisuje vytvoření návrhu karoserie od prvního kroku až po její výrobu a přípravu před testováním či závodem. Využil jsem počítačové modelace, ověření aerodynamických vlastností CFD-simulacemi a aerodynamickým tunelem. Karoserii upravil i z hlediska vyrobitelnosti pomocí vakuového lisování. Za pomoci kolegů jsem si vyzkoušel odlít formy pro výrobu kopyta pro následné vakuové lisování. Svoji karoserii jsem nastříkal barvou a otestoval na sestaveném modelu autíčka dle mezinárodních pravidel. Při testování jízdních vlastností jsem měřil časy, které model zajížděl na dráze na jedno kolo a porovnal s běžně dostupnými karoseriemi používanými při závodech slotracingu. Vše jsem zaznamenal a výsledky zpracoval do tabulek a grafů.

Popis výsledků: První část výsledků jsou data získaná z CFD simulací porovnaná s daty získanými z měření v aerodynamickém tunelu. Získané hodnoty jsem vzájemně porovnal a využil pro vytvoření aerodynamicky co nejlepšího a zároveň vyrobitelného návrhu karoserie. Výsledkem této části byl reálný vytištěný 3D návrh modelu karoserie, který postoupil do výroby. Druhá část výsledků je vlastní výroba a závěrečné vakuové lisování karoserie z lexanu. Výsledkem této části je průhledná lexanová karoserie připravená pro přípravu k testování jízdních vlastností na dráze na modelu autíčka. Poslední část výsledků jsou data z testování na dráze. Jízdní časy na jedno kolo jsem získal z automatického měření časů pomocí softwaru SPYTECH. Časy zapsal pro jednotlivé karoserie do tabulky a provedl výpočty a grafické zpracování.

Zhodnocení výsledků: Dokázal jsem vytvořit vlastní návrh karoserie, otestovat jej na aerodynamické vlastnosti CFD simulacemi a měřením v aerodynamickém tunelu. Návrh karoserie jsem vyrobil a připravil pro testování na dráze. Z testovacích jízd, naměřených časů a porovnáním s jinými běžně dostupnými karoseriemi je

moje karoserie více než konkurence schopná. Naměřené časy na jedno kolo ukazují, že lze vytvořit a aerodynamicky „vyladit“ návrh tak, aby jeho jízdní vlastnosti byly minimálně srovnatelné se stávající typy karoserií. To je i největší přínos mé práce. Poznatky z tvorby modelů cestovních i závodních vozů lze využít i pro vývoj nových osobních vozů. Potvrzením toho jsou i nové modely automobilky ŠKODA.

Další možnosti řešení a pokračování v práci: Vytvořil a vyrobil jsem karoserii dle vlastního návrhu. Spojil počítačové modelování, CFD simulace, měření v aerodynamickém tunelu a přenesl do reálné výroby karoserie dle mého počítačového 3D modelu. Určitě by, stálo v práci pokračovat a provést více testování mé karoserie na různých drahách a různých modelech autíček pro slotracing. Bylo by velmi zajímavé i porovnání nejen při testovacích jízdách, ale i při závodech.

Seznam použitých zkratek

CDF-simulace	Computational Fluid Dynamic, Výpočetní dynamika tekutin
JMS	Jiří Míček senior
Mercedes	Mercedes AMG C63 DTM
Peugeot	Peugeot 406 coupe BTC P406BTC 054
Honda	Honda cup 078
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
ČVUT	České vysoké učení technické
FS	Strojní fakulta
AT	Aerodynamický tunel
WRC	World Rally Championship
FIA	Mezinárodní automobilová federace
DTM	Deutsche Tourenwagen Masters
LMP1	Le Mans Prototype

Obsah

ÚVOD	13
TEORETICKÁ ČÁST	14
1 Slotracing	14
1.1 Základní rozdělení kategorií	15
1.1.1 Mezinárodní kategorie	15
1.1.2 Národní kategorie	17
2 Aerodynamika závodních vozů	21
2.1 Aerodynamické síly	23
2.1.1 Aerodynamické odporová síla	23
2.1.2 Aerodynamická přítláčná síla	26
2.1.3 Aerodynamické boční síla	26
2.2 Komponenty na závodním autě generující přítlak	27
2.2.1 Splitter	27
2.2.2 Difuzor a podlaha	27
2.2.3 Zadní křídlo	28
2.2.4 Přítláčná křídélka	28
3 Aerodynamický tunel	28
3.1 Rozdělení aerodynamických tunelů	30
3.1.1 Otevřený tunel	30
3.1.2 Uzavřený tunel	31
3.1.3 Další dělení	32
3.1.4 Subsonické aerodynamické tunely	32
3.1.5 Transsonické	32
3.1.6 Supersonické	32
3.1.7 Hypersonické	32
3.2 Aerodynamický tunel na Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky Fakulty strojní, ČVUT	33
3.3 Aerodynamický tunel FKFS	35
4 CFD	37
4.1 Turbulentní model k-epsilon	37
PRAKTICKÁ ČÁST	38
5 Průzkum trhu	38
5.1 Karoserie od Attan slot-racing	38
5.2 Karoserie od SLOT-BPA	38

5.3	Výběr předlohy skutečného vozu pro můj návrh karoserie	39
6	Pravidla pro karoserie	42
7	Vývoj návrhu mé karoserie	42
7.1	Nastavení CFD simulací	43
7.1.1	Nastavení řešení CFD simulací	45
7.2	Vývoj jednotlivých návrhů	46
7.2.1	Karoserie Beran gen 1	46
7.2.2	Karoserie Beran gen 2	47
7.2.3	Karoserie Beran gen 3	47
7.2.4	Karoserie Beran gen 4	48
7.2.5	Karoserie Beran gen 5	49
7.2.6	Karoserie Beran gen 6	49
7.2.7	Karoserie Beran gen 7	50
7.2.8	Karoserie Beran gen 8	51
7.2.9	Karoserie Beran gen 9	51
7.2.10	Karoserie Beran gen 10	52
7.2.11	Karoserie Beran gen 11	52
7.2.12	Karoserie Beran gen 12	53
7.2.13	Karoserie Beran gen 13	55
7.2.14	Karoserie Beran gen 14	55
7.2.15	Karoserie Beran gen 15	56
7.2.16	Karoserie Beran gen 16	57
7.2.17	Karoserie Beran gen 17	57
7.2.18	Karoserie Beran gen 18	58
7.2.19	Karoserie Beran gen 19	58
7.2.20	Karoserie Beran gen 20	59
7.3	Výsledky CFD-simulací finálního modelu Beraq	59
7.3.1	Grafické znázornění CFD-simulací	60
7.3.2	Číselné zpracování výsledků CFD-simulací	62
7.4	Testování v aerodynamickém tunelu ČVUT	69
7.4.1	Konečné výsledky z aerodynamického tunelu	71
7.4.2	Vizuální zhodnocení proudění vzduchu okolo karoserie	73
7.5	Porovnání výsledků z CFD simulací a aerodynamického tunelu konečného návrhu karoserie Beraq	75
7.6	Společné prvky návrhu mé karoserie a ostatních aut	79
8	Výroba samotné karoserie pro slotracing	80
8.1	Vytvoření formy s negativním obrazem	81
8.2	Výroba kopyta pro lisování	82
8.3	Lisování karoserie z lexanu	83

9	Testování mé karoserie na dráze	84
9.1	Metodika a parametry měření	84
9.1.1	Parametry měření	84
9.1.2	Metodika vlastního měření	84
9.1.3	Typy karoserií pro testování a vlastní měření	85
9.1.4	Parametry modelu autíčka	86
9.1.5	Zápis hodnot a výpočty	86
9.2	Měření na dráze AMC Nová Paka	88
9.2.1	Parametry dráhy AMC Nová Paka	88
9.2.2	Parametry prostředí	89
9.2.3	Parametry modelu autíčka pro měření na dráze	89
9.2.4	Parametry ovladače pro měření	90
9.3	Měření na dráze SCRC Pardubice	91
9.3.1	Parametry dráhy SCRC Pardubice	91
9.3.2	Parametry prostředí	91
9.3.3	Parametry modelu autíčka pro měření na dráze	92
9.3.4	Parametry ovladače pro měření	93
9.4	Přehled výsledků z měření na dráze AMC Nová Paka	93
9.4.1	Honda CUP	94
9.4.2	Peugeot 406 Coupe BTC	95
9.4.3	Mercedes AMG C63 DTM	96
9.4.4	Karoserie dle mého návrhu s označením Beraq	97
9.5	Přehled výsledků měření na dráze SCRC Pardubice	98
9.5.1	Honda CUP	98
9.5.2	Peugeot 406 Coupe BTC	99
9.5.3	Mercedes AMG C 63 DTM	100
9.5.4	Karoserie dle mého návrhu s označením Beraq	101
9.6	Souhrnné výsledky a porovnání	103
10	Názory odborníků	106
	DISKUZE	110
	ZÁVĚR	113
	LITERATURA	115
	SEZNAM OBRÁZKŮ	118
	SEZNAM TABULEK	122

ÚVOD

Aerodynamika jako obor zasahuje do mnoha oborů lidské činnosti. Jednou z oblastí, kde se uplatňuje její role je vývoj automobilů, a to jak cestovních, tak závodních. Při vývoji cestovních vozů pro osobní a každodenní použití je aerodynamika důležitým prvkem z hlediska ekonomiky provozu. Příkladem je správný tvar, ale i drobné aerodynamické úpravy na vozidle dokážou snížit spotřebu paliva či energie na provoz vozidla. Snižují se tím náklady na provoz vozidla. Při vývoji závodních vozů má aerodynamika vliv na dosažení co nejlepších závodních výsledků, jak při závodech na okruzích či závodech v terénu skutečných aut, tak i modelů sestavených pro závody slotracingu.

Moje současná práce je zaměřena na vývoj vlastního návrhu karoserie pro závody slotracingu, kterých jsem aktivním účastníkem. Vytvoření návrhu karoserie, jeho analýza pomocí CFD simulací, následné úpravy návrhu karoserie pro zlepšení aerodynamických vlastností a realizaci změn a promítnutí do další verze návrhu karoserie. Se svým záměrem jsem oslovil Vývojové středisko ŠKODA AUTO a.s. a navázal těsnou spolupráci s Ing. Vojtěchem Jakubcem. Také jsem využil možnosti Strojní fakulty ČVUT pro ověření výsledků v aerodynamickém tunelu.

V úvodu teoretické části popisují, co je to slotracing, aerodynamiku závodních vozů a působení aerodynamických sil na vozidlo. Následující část se zabývá popisem jednotlivých aerodynamických komponentů a jejich vlivem na závodní vůz. Součástí je také problematika aerodynamického tunelu a CFD simulací.

V praktické části ukazují postup při vývoji návrhu karoserie, jednotlivé kroky až ke konečné verzi návrhu karoserie. Následně byl vytištěn 3D model, na němž byla prováděna kontrolní aerodynamická měření CFD simulacemi a v aerodynamickém tunelu. Tento 3D model se stal základem pro vytvoření negativního otisku návrhu karoserie a následně tvorbu kopyta pro vlastní lisování návrhu karoserie z lexanu. Poslední část je zaměřena na ověření jízdních vlastností mého návrhu karoserie přímo při jízdě na dráze a porovnání s vybranými dostupnými karoseriemi pro slotracing. Měření jsem prováděl na dvou odlišných drahách pro slotracing.

Závěr mé práce věnuji postřehům odborníků na aerodynamiku závodních vozů, které jsem oslovil a požádal o názor.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Slotracing

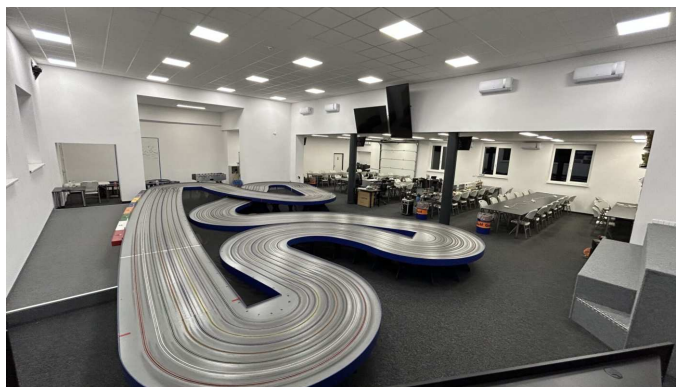
Slotracing (SRC – Slot Racing Car) nebo-li dráhové modelářství tedy modely automobilů konstruované na provoz na speciálních autodráhách. Modely jsou poháněné elektromotory na stejnosměrné napětí do 16 V.[1] Závody se zpravidla jezdí v rozmezí 12,8-14,2V.

Autodráha má většinou 4,6 nebo 8 drah, na kterých najednou závodí daný počet závodníků. Závodníci se v průběhu závodu střídají, tak aby každý jel na všech drahách. Na dráze jsou vytvořeny drážky, ve kterých modely jezdí. Každá drážka disponuje dvěma vodiči a to jeden na levé a druhý na pravé straně.



Obrázek 1: Autodráha SCRC Pardubice [2]

Cílem je při závodě najet co nejvyšší počet kol za dobu trvání závodu. Nejrychlejší kolo není důležité. Model na dráze může vypadnout ze své drážky a nasazovač, který je u dráhy po dobu závodu ho opět nasadí. Tímto však dochází ke ztrátě až o 1 kolo což má vliv na celkový počet najetých kol a následné umístění. Nejde tedy jen o samotnou rychlost, ale i o konstatní počet najetých kol a nevypadávání z drážek.



Obrázek 2: Autodráha Attanslot Všejaný[3]

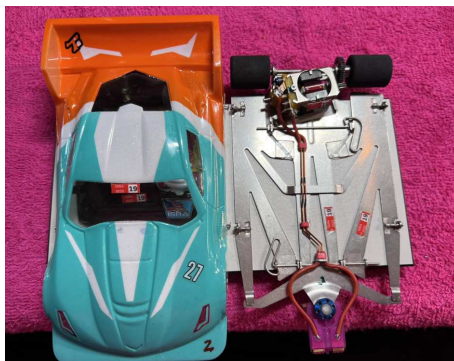
1.1 Základní rozdělení kategorií

Ve slotracingu se jezdí mnoho kategorií, které se mohou lišit karoseriemi, podvozkem či motorem. Nejjednodušší dělení je dle mezinárodních kategorií, které se jezdí v rámci ISRA (International slot racing association) a USRA (United Slot Racers Association). Z těchto kategorií vycházejí kategorie národní, které se jezdí v České republice buď podle pravidel ISRA nebo pravidel mírně upravených.

Všechny karoserie musí být vyrobeny z lexanu, většinou vakuovým listováním. U většiny kategorií je zakázáno přidávat jakékoliv aerodynamické prvky, nebo vystřihovat okna či jiné otvory do karoserie. I vývoj mé karoserie se řídil pravidly ISRA v rámci této práce.

1.1.1 Mezinárodní kategorie

1.1.1.1 Production 1/24 V této kategorii jsou polomakety cestovních vozů a GT vozů, které jsou ve měřítku 1:24.[1]



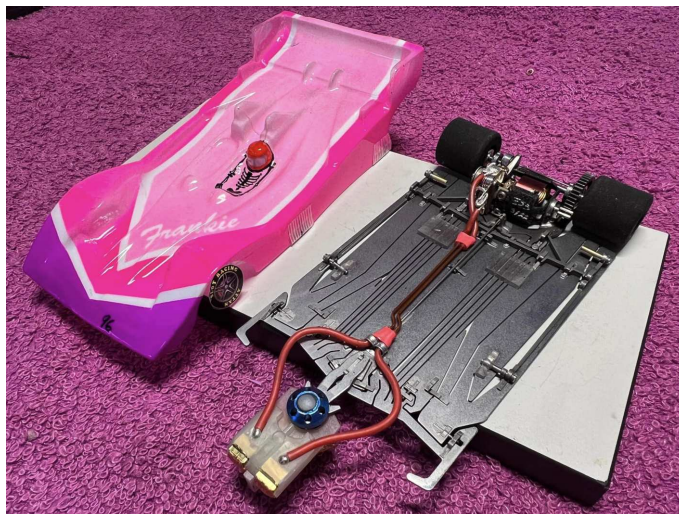
Obrázek 3: Production 1/24 od Františka Poledny - ISRA 2023 [4]

1.1.1.2 ES/24 Jde o kategorii polomaket sportovních a závodních aut se zakrytými koly v měřítku 1:24.[1]



Obrázek 4: ES/24 od Františka Poledny - ISRA 2023 [4]

1.1.1.3 ES/32 Kategorie polomaket sportovních a závodních aut se zakrytými koly v měřítku 1:32.[1]



Obrázek 5: ES/32 od Františka Poledny - ISRA 2023 [4]

1.1.1.4 F1/32 Kategorie polomaket vozů formule 1 v měřítku 1:32. [1]



Obrázek 6: F1/32 od Františka Poledny [4]

1.1.1.5 G27 Kategorie modelů volné konstrukce se zakrytými koly a přidavnými aerodynamickými prvky s předepsanou kotvou elektromotoru. [1]



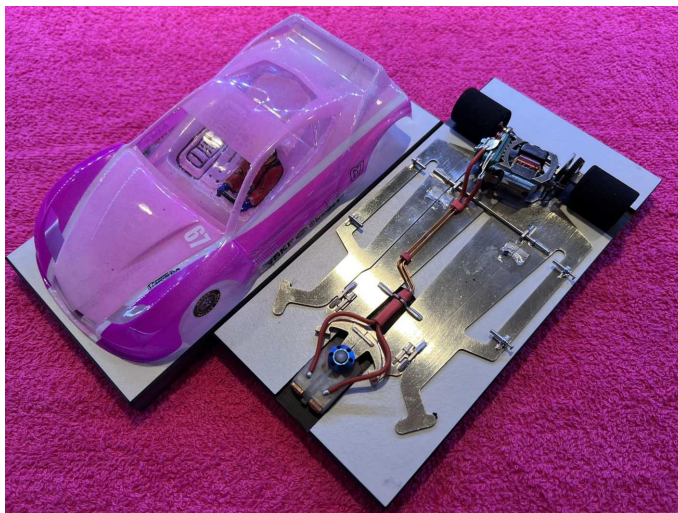
Obrázek 7: G27 by Koford [5]

1.1.1.6 G7 + OMO V této kategorii jsou modely volné konstrukce se zakrytými koly a přidavnými aerodynamickými prvky. [1]

1.1.1.7 G12 Kategorie modelů volné konstrukce se zakrytými koly a přidavnými aerodynamickými prvky, ale s předepsaným motorem. [1]

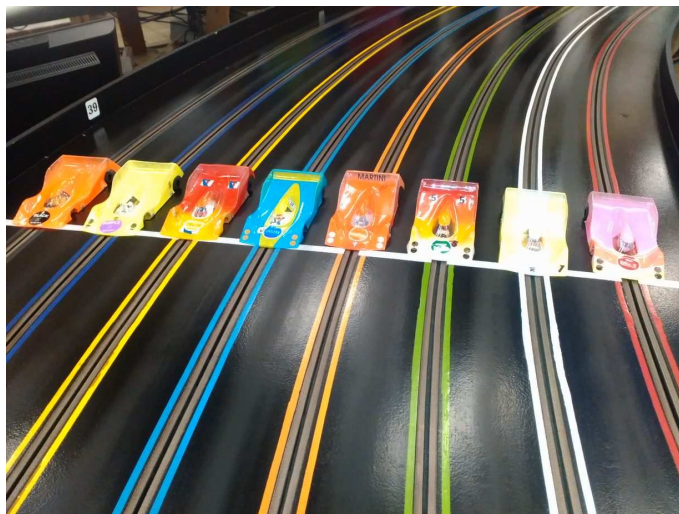
1.1.2 Národní kategorie

1.1.2.1 PR/24 Honda Jedná se o kategorii polomaket cestovních vozů s předepsaným jedním typem karoserie Honda Cup inspirovanou reálným vozem Honda HSV-010 GT v měřítku 1:24. [1]



Obrázek 8: PR/24 Honda od Františka Poledny [4]

1.1.2.2 G12 Morava Open Kategorie polomakety prototypů a sportovních vozů v měřítku 1:24. [6]



Obrázek 9: G12 Morava Open [7]

1.1.2.3 Škoda 130 RS Jde o kategorii maket cestovně závodních aut Škoda 130 RS v měřítku 1:24.[1]



Obrázek 10: Škoda 130 RS od Františka Poledny [4]

Česká republika se řadí k zemím, kde je slotracing na poměrně vysoké úrovni. Tomu odpovídá i umístění českých reprezentantů na mistrovství světa ISRA a v žebříčku ISRA Ranking. ISRA Ranking je sestavován jako žebříček z výsledků závodů na posledních třech mistrovstvích světa. Aktuálně je sestaven za roky 2019, 2022, 2023, v letech 2020-2021 se kvůli pandemii Covid-19 mistrovství světa nekonalo. V ISRA Ranking je ve dvaceti nejlepších hned sedm Čechů.

Tabulka 1: Nejlepších 20 z ISRA 2023 Ranking [8]

Pozice	Jméno	Národnost	ISRA 2019 - Velká Británie	ISRA 2022 - Litva	ISRA 2023 - USA	Celkový počet bodů
1	Dominykas Budrys	LIT	835,00	365,00	911,00	2111,00
2	Vladimír Horký	CZE	470,00	788,00	594,00	1852,00
3	Raivis Janson	LAT	594,00	665,00	377,00	1636,00
4	Jaroslav Reček	CZE	356,00	551,00	579,00	1486,00
5	James Cleave	GBR	328,00	657,00	284,00	1269,00
6	František Poledna	CZE	82,00	397,64	762,00	1241,64
7	Piero Castricone	ITA	511,00	322,00	345,00	1178,00
8	Martins Reinikovs	LAT	444,00	343,00	276,00	1063,00
9	Luca Sbrana	ITA	342,27	391,00	236,00	969,27
10	Anna Borg	FIN	307,67	208,00	357,00	872,67
11	Jiří Karlík	CZE	208,00	193,67	467,00	868,67
12	Janis Nabokins	LAT	319,00	358,00	158,05	835,05
13	Michael Landrud	SWE	197,00	376,00	207,70	780,70
14	Pavel Flaisig	CZE	294,00	224,00	256,00	774,00
15	Olli Kantamaa	FIN	372,00		324,00	696,00
16	Daniel Blomqvist	SWE	36,32	253,00	386,00	675,32
17	Edijs Zaks	LAT	162,41	251,00	257,00	670,41
18	Jiří Cihlár	CZE	131,00	261,94	246,00	638,94
19	Jan Žemlička	CZE	230,31	213,00	190,79	634,10
20	Luiz Bernardino	BRA	308,00	151,00	174,00	633,00

Legenda: ISRA - International slot racing association, zvýraznění jsou čeští reprezentanti

Tabulka ukazuje bodové ohodnocení jednotlivých účastníků na posledních mistrovstvích světa ve slotracingu. Každé umístění v závodě je samostatně ohodnoceno příslušným počtem bodů. Na každém mistrovství se udílí body ve čtyřech kategoriích a těmi jsou: Production 1/24, F1/32, ES/32 a ES/24. Součet bodů za jednotlivá umístění pak tvoří celkový výsledek závodníka na daném mistrovství světa. Závodník, který se daného mistrovství neúčastní nemá v tabulce vyplněn žádný údaj. Vynikajícího celkového výsledku docílil Vladimír Horký na ISRA 2022 v Litvě, kde získal nejvyšší počet bodů a v roce 2023 na ISRA v USA byl podle celkového počtu získaných bodů na 2. místě František Poledna.



Obrázek 11: Čeští reprezentanti na ISRA 2022 [9]

Na obrázku je český národní tým pro mistrovství světa z roku 2022, které se konalo v Rize v Litvě. Tým tvoří nejlepší závodníci ve slotracingu v České republice.

2 Aerodynamika závodních vozů

Aerodynamika je obor fyziky zabývající se zkoumáním sil působících na těleso, které je obtékáno kapalinou. Při obtékání vzniká 6 složek sil a momentů. Tři silové složky a tři momentové složky. U závodních vozů je kladen důraz především na aerodynamickou přítláčnou sílu a aerodynamickou odporovou sílu.

U prvních okruhových závodních vozů byl důraz především na snížení aerodynamické odporové síly. Toto řešení však při vysokých rychlostech vytvářelo vztlak, což mělo negativní vliv na chování vozu. Z daného plynul další vývoj aerodynamických komponent generující aerodynamický přítlak. Především se jednalo o zadní přítláčné křídlo. Nejvýraznější pokrok přišel roku 1966, kde vůz Chaparral 2E začal využívat přítláčné křídlo. To umožňovalo projíždět zatáčky vyšší rychlostí. Přítláčná síla zvyšuje normálové zatížení pneumatik a díky tomu se zvyšují síly v rovině vozovky. Přítláčné křídlo na tomto voze vypadalo jako otočený letecký profil o 180° .



Obrázek 12: Vůz Chaparral 2E [10]

V dnešní době najdeme na závodních autech velké množství komponent, které ovlivňují aerodynamiku. Může se jednat například o křídla, chladicí kanály, vírové generátory. Jedním z nejdůležitějších aspektů je společná souhra jednotlivých aerodynamických komponent na vozidle. Toto společné fungování můžeme v dnešní době nasimulovat pomocí CFD simulací nebo otestovat v aerodynamických tunelech. Dají se tak získat velmi přesné výsledky. U závodních aut je snaha docílit co nejlepšího času na kolo. To znamená potřebu jet co nejrychleji jak po rovinách, tak i v zatáčkách. Pro rychlý průjezd zatáčkou je výhodné mít co největší přítlak, ale na rovině tento přítlak auto zpomaluje díky většímu odporu. [11]

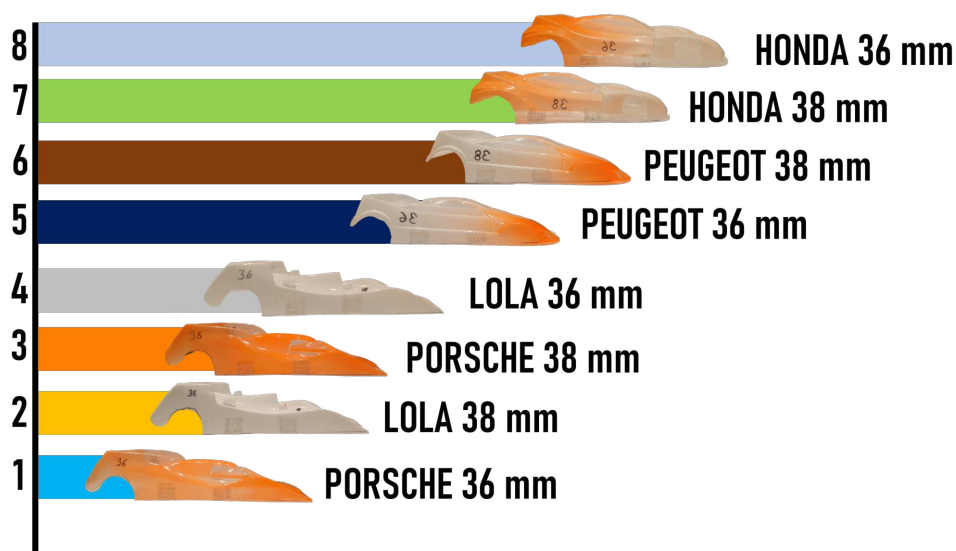
Tuto skutečnost jsem si ověřil ve své práci „*Vliv tvaru a výšky karoserie na rychlost modelu auta*“, kde u karoserie Porsche 38 mm je největší přítlak v porovnání s ostatními karoseriemi, které jsem testoval. Měřením bylo zjištěno, že auto s karoserií Porsche 38 mm zajíždí pomalejší časy na jedno kolo, což je způsobeno až příliš vysokým přítlakem na rovinách. [12]

Typ karoserie:	PORSCHE	PORSCHE	LOLA	LOLA	HONDA	HONDA	PEUGEOT	PEUGEOT
Výška karoserie:	36 mm	38 mm	36 mm	38 mm	36 mm	38 mm	36 mm	38 mm
n	$[t] = s$	$[t] = s$	$[t] = s$	$[t] = s$	$[t] = s$	$[t] = s$	$[t] = s$	$[t] = s$
1	4,719	4,736	4,806	4,892	5,119	5,057	4,900	5,072
2	4,693	4,739	4,859	4,783	5,087	5,107	4,885	4,982
3	4,639	4,729	4,745	4,629	5,090	5,052	4,911	4,949
4	4,586	4,765	4,678	4,741	5,109	5,027	5,074	4,967
5	4,632	4,665	4,636	4,740	5,167	5,030	5,025	4,996
6	4,717	4,646	4,667	4,656	5,125	5,177	4,992	4,984
7	4,598	4,633	4,820	4,678	5,105	5,115	4,974	5,076
8	4,660	4,765	4,766	4,673	5,090	5,040	4,942	5,097
9	4,676	4,768	4,756	4,677	5,037	5,060	4,888	5,014
10	4,601	4,767	4,675	4,635	4,995	5,028	4,934	4,984
11	4,696	4,709	4,779	4,554	5,035	5,001	4,879	4,899
12	4,661	4,702	4,779	4,771	5,045	4,990	4,943	4,909
$\bar{t}$ $\bar{s}_t$ = průměrný čas na kolo	4,657	4,719	4,747	4,702	5,084	5,057	4,946	4,994
$\bar{s}_t$ = směrodatná odchylka	0,014	0,014	0,020	0,027	0,014	0,017	0,018	0,018

Legenda k tabulce 15: n - číslo kola, $\bar{t}$ - průměrný čas,
 $[t] = s$ - naměřený čas na kolo, $\bar{s}_t$ - vypočtená směrodatná odchylka

Obrázek 13: Souhrn naměřených časů pro různé typy a výšky karoserií [12]

Ve výše uvedené tabulce jsem tučně označil nejrychlejší časy na kolo, které model zajel s příslušnou karoserií o dané výšce. Nejrychlejší čas ze všech byl naměřen u modelu s karoserií LOLA ve výšce 38 mm. Čas byl o více jak tři setiny sekundy rychlejší než druhý nejrychlejší, který zajel model s karoserií PORSCHE ve výšce 36 mm. Časy modelů s karoserií cestovních vozů HONDA se u obou výšek pohybovaly okolo hranice 5 sekund. Modely s karoserií PEUGEOT byly rychlejší a naměřené časy jsou více pod hranicí 5 sekund. Ukazují se tak lepší aerodynamické vlastnosti karoserie PEUGEOT.



Obrázek 14: Graficky znázorněné pořadí jednotlivých karosérií [12]

Na obrázku je graficky znázorněn rozdíl naměřených časů mezi jednotlivými typy a výškami karoserií.

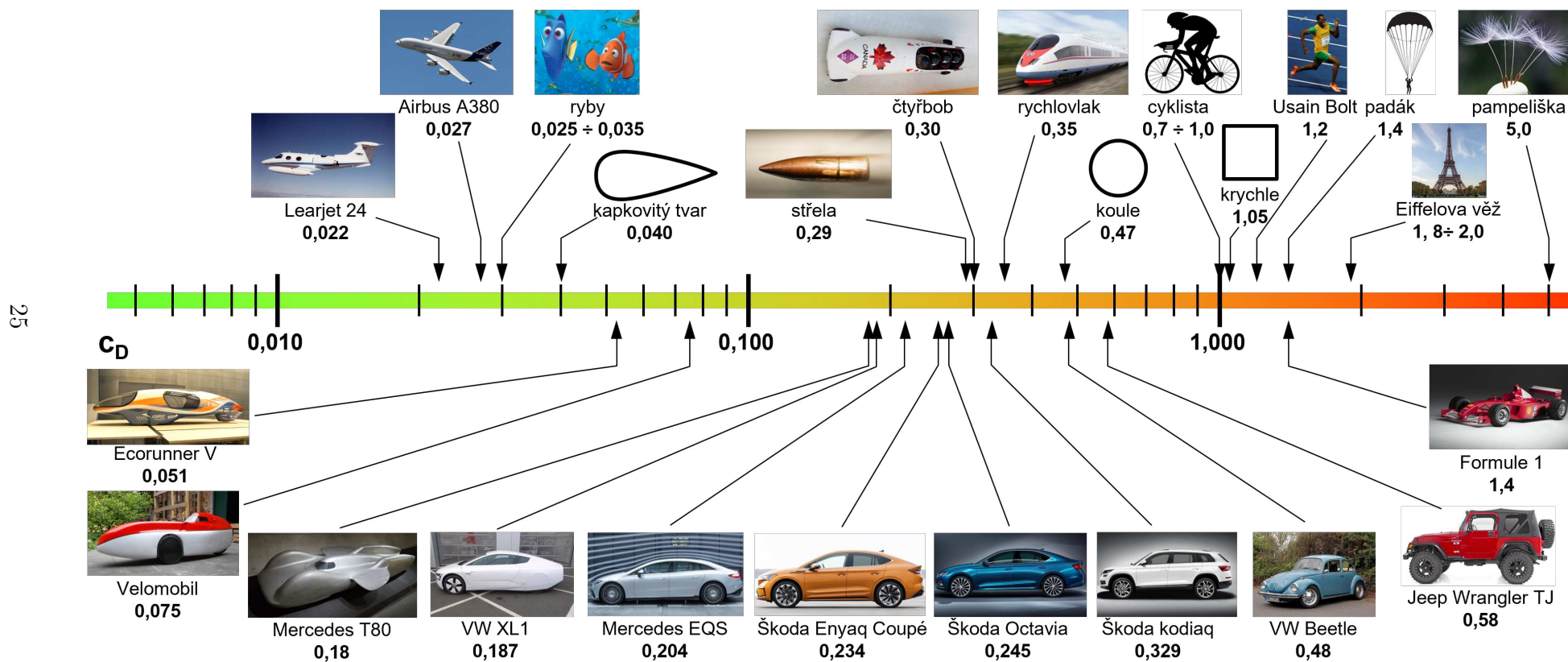
Ze vzorce můžeme vyčíst, že aerodynamická odporová síla závisí na druhé mocnině rychlosti, tím pádem platí, že čím vyšší rychlost auto dosahuje, tím má větší odporovou sílu.

Aerodynamická odporová síla tvoří odpor, který je způsoben tvarem karoserie, rotováním kol a prouděním vzduchu skrz chladiče.

U osobních aut je aerodynamický odpor důležitou složkou, na které závisí ekonomika a ekologie provozu.

Závodní auta mají vyšší aerodynamické odporové síly než mají běžná osobní auta. Je to způsobeno především větším množstvím aerodynamických komponent, které způsobují nárůst odporové síly. [11]

c_D - součinitel odporu různých těles



Obrázek 16: C_d - součinitel odporu různých těles [13]

2.1.2 Aerodynamická přítláčná síla

Pro výpočet aerodynamické přítláčné síly využijeme vzorec:

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_z \cdot v^2 \cdot A$$

Tabulka 4: Označení veličin [13]

F_z	Aerodynamická přítláčná síla
ρ	Hustota vzduchu
C_z	Součinitel přítláčné síly
v	Relativní rychlosti vzduchu vůči vozu
A	Čelní plocha vozu [m^2]

Aerodynamická přítláčná síla je jednou z hlavních složek sil závodních aut. Konstrukteři se aerodynamickou přítláčnou silou zabývají především pro zvýšení přítláčné síly, která drží lépe vozidlo na trati pomocí tření mezi pneumatikou a vozovkou. Můžeme říci, že čím je vyšší normálová síla na kolo, tím jsou generovány vyšší síly v rovině vozovky a tím vzniká lepší adheze mezi pneumatikou a vozovkou. Tato aerodynamická přítláčná síla dokáže zvýšit normálovou sílu na pneumatikách vozidla a to bez zvýšení jeho hmotnosti. Výsledkem je zvýšení přítláčné síly, tím je umožněn rychlejší průjezd zatáčkou a lepší akcelerace vozu. Aerodynamickou přítláčnou sílu můžeme vytvořit pomocí zadního přítláčného křídla, předním splitterem nebo tvarováním podvozku a difuzorem. [11]

2.1.3 Aerodynamické boční síla

Pro výpočet aerodynamické boční síly využijeme vzorec:

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_y \cdot v^2 \cdot A$$

Tabulka 5: Označení veličin [13]

F_y	Aerodynamická boční síla
ρ	Hustota vzduchu
C_y	Součinitel boční síly
v	Relativní rychlosti vzduchu vůči vozu
A	Čelní plocha vozu [m^2]

Tato síla je většinou způsobená větrem, který proudí na vozidlo pod určitým, úhlem, popřípadě pokud vozidlo projíždí zatáčkou. Při každém průjezdu zatáčkou je auto v nějakém úhlu oproti přímému obtékání vzduchu. Tento úhel způsobuje rozdílné obtékání a tím ovlivňuje přítláčnou a odporovou sílu. U každého průjezdu zatáčkou proudění pod úhlem způsobuje snížení účinnosti aerodynamických komponent. [11]

2.2 Komponenty na závodním autě generující přítlak

Na závodním autě můžeme najít velkou řadu prvků, které generují přítlak. Patří mezi ně například zadní křídlo, přítláčná křídélka, splitter, difuzor, boční prahy, průduchy na karoserii a mnoho dalších.

Důležitým faktorem u aerodynamických komponent je jejich vzájemná provázanost. Když nějaký aerodynamický prvek funguje na voze jednoho typu, není jistota, že jeho funkčnost bude stejná u jiného typu. Proto nelze nad jednotlivými prvky uvažovat samostatně, ale je nutno je brát jako celek společně s celým vozem. [11, 6]

2.2.1 Splitter

Umístění splitteru je v přední části vozu, většinou na úrovni podlahy. Splitter se dá charakterizovat jako deska, která přesahuje před vůz. Jeho využití je především k vytvoření přítláční síly na přední nápravu. Také se podílí na celkovém vyvážení aerodynamiky mezi přední a zadní nápravou.

Splitter vytváří přítláčnou sílu pomocí rozdílu tlaku pod a nad splitterem. Vzduch, který obtéká auto je zpomalován díky jeho tvaru, proto zde vznikají místa s vysokým tlakem. Přítlak pomocí splitteru můžeme ještě zvýšit správnou výškou umístění splitteru. Splitter nejlépe funguje co nejnižší u vozovky, ale s dostatečně velkou mezerou, aby nedošlo k aerodynamickému ucpání. Vzduchu, který proudí pod splitterem se zvýší rychlost. Vznikne oblast s nižším tlakem a rozdíl tlaků se ještě zvýší. [11]

2.2.2 Difuzor a podlaha

Difuzor se nachází v zadní části vozu, na místě, kde vzduch opouští podlahu vozu. Funguje na principu Venturiho efektu, který patří mezi takzvané aerodynamické paradoxy. To znamená, „že rychlost proudění kapaliny je nepřímo úměrná tlaku v proudící kapalině.“ [11] Tento efekt je vidět na Venturiho trubici. Trubice se postupně plynule zužuje a poté se opět rozšiřuje do původní velikosti. V zúžené části se vzduch zrychluje a snižuje se jeho tlak, po zpětném rozšíření vzduch opět zpomalý na stejnou rychlost jako před zúžením. [11]

2.2.3 Zadní křídlo

Zadní křídlo se zpravidla nachází v zadní části vozu a je důležitým aerodynamickým prvkem, jak pro vytváření přítlaku, tak pro samostatné usměrnění vzduchu za vozem. Podle teorie křídel z letectví je vztahová síla generována za pomoci rozdílu tlaku mezi spodní a horní částí křídla. Vzduch dopadající na křídlo je nejprve rozdělen na náběžné hraně na dva proudy. Jeden proud proudí na horní podtlakovou stranu křídla a druhý na spodní přetlakovou stranu křídla. Na vrchní straně je vzduch urychlen a tím vzniká nižší tlak. Na spodní straně je vzduch zpomalen a tím se tlak zvyšuje. Na závodních autech se zpravidla používají profily křídla, které jsou otočené o 180° a tím generují záporný vztah tudíž přítlak. [11]

2.2.4 Přítláčná křídélka

Jedná se o malá trojúhelníková křídélka umístěná zpravidla na okrajích vozu. Tato křídélka mohou generovat přítlak dvěma rozdílnými cestami.

Jedna cesta je takzvaně přímá, kde křídélko samo generuje přítlak, a to díky svému tvaru a umístění a voze. Přítlak vzniká díky vzduchu, který proudí okolo vozu. Díky tvaru křídélka se změni směr vzduchu vzhůru a tím je způsobena přítláčná síla. Tato cesta však kvůli malé velikosti křidélek a jejich umístění v blízkosti vozu, kde je proudící vzduch pomalejší, nevytváří mnoho přítlaku. [11, 6]

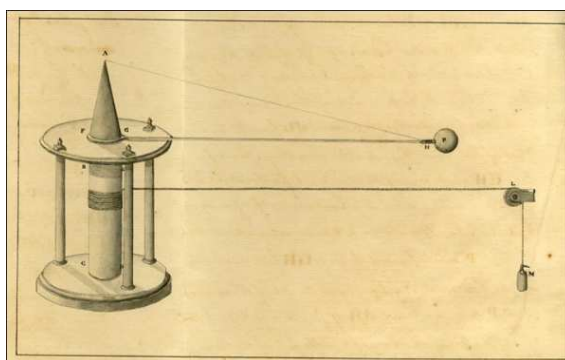
Další cesta se dá nazvat nepřímou. Zde samotná křídélka přímo negenerují přítlak, ale napomáhají usměrnit směr vzduchu na jiný aerodynamický prvek, který již přítlak vytváří. [11, 6]

3 Aerodynamický tunel

Jedná se o měřicí experimentální zařízení pro řešení různých aerodynamických problémů. Jeho využití nacházíme v automobilovém průmyslu, letectví, ale i ve stavebnictví. V dnešní době jsme již schopni vypočítat mnoho parametrů jak se daný předmět bude aerodynamicky chovat. Přesto skutečné experimenty s reálnými předměty v aerodynamickém tunelu mají své uplatnění. Ukazují reálné proudění vzduchu okolo předmětu, tím potvrzují či vyvracejí zjištěné počítačové výsledky. [14]

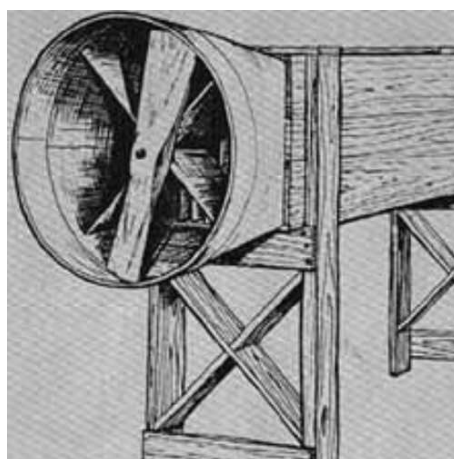
Návrh aerodynamických tunelů vypadajících jako dnes není stará. K prvním aerodynamickým experimentům sloužily přírodní podmínky. Například proudění vzduchu mezi skalami. Měření však kvůli nestabilním proudům bylo velmi nepřesné. Potřebu ustáleného proudění vzduchu si uvědomovaly osobnosti dřívějších dob jako Leonardo Da Vinci i Isaac Newton. [14]

Mezi první vyspělé metody řadíme rotující rameno anglického matematika Benjamina Robinse. Tento přístroj byl poháněn závažím. Zkoumané předměty se pohybovaly rychlostí do 3 m/s. Tímto zařízením autor formuluje první teorii vztahu odporu, tvaru, orientaci v prostoru a rychlosti pohybu předmětu. Dalším významným průkopníkem byl Sir George Cayley, který použil rotující rameno k měření tahu a vztlaku pro rozdílné profily křídel letadel. Jeho řešení dosahovalo rychlostí mezi 3-7 m/s. Během života udělal nespočet pokusů a jeho největším přínosem bylo rozdělení sil. To tak, že tah motoru a vztlak křídla umožňují, že člověk nemusí mávat křídly proto, aby létal.



Obrázek 17: Rotující rameno matematika Benjamina Robinse [15]

Tyto metody pomocí rotujících ramen byly velmi komplikované a nepřesně měřitelné. Rotující rameno proniká vzduchem, který samo sebou rozvířilo. I tak pomohly sestavit první experimentální létající stroje. S prvním návrhem a stavbou aerodynamického tunelu přišel Frank H. Wenham ve Velké Británii roku 1871. Jeho výtvar měl 3,5 m dlouhou měřicí část s čtvercovým průřezem 50 cm^2 . Proud vzduchu zajišťoval ventilátor, poháněný parním strojem. Wenham se svými kolegy provedl řadu pokusů a tím získávali zásadní informace pro letectví, jako například změny úhlů náběhové hrany křídla. Ty pak mají vliv na vztlak zkoumaného modelu. [14]



Obrázek 18: Aerodynamický tunel Frank H. Wenham [16]

Osborne Reynolds na University of Manchester díky experimentům dokázal, že rozdílné velikosti tělesa stejného tvaru jsou aerodynamicky stejné.[14]

Na přelomu 19. a 20. století začalo mnoho vědců stavět své větrné tunely. Francouz Hiram Maxim díky pokusům ve větrném tunelu sestrojil letadlo s tak vysokým vztlakem, že se při testovacím letu rozpadlo, ale i tak tento svůj pokus považoval za úspěch. Aerodynamický tunel bratrů Wrightových ze Spojených států amerických velmi pomohl k uskutečnění prvního motorového letu člověka. Tento dřevěný tunel měl průřez 400 mm x 400 mm. [14]

Jako první tunel s uzavřenou oblastí sestavil Gustave Eiffel u nohy Eiffelovy věže. Z věže tak využil napájení ventilátoru, který měl výkon 50 kW. V letech 1909-1912 zde proběhlo nad 4000. měření. Tento tunel pomohl Eiffelovi potvrdit teorii relativního pohybu, kterou stanovil už Leonardo Da Vinci a dále jej rozebíral Issac Newton. Znění této teorie je, že na těleso, které se pohybuje danou rychlostí v klidném vzduchu, působí stejné síly jako na stejné těleso obtékané vzduchem o dané rychlosti. [14]



Obrázek 19: Aerodynamický tunel Gustave Eiffel [17]

První uzavřený tunel s vnitřním oběhem vzduchu představil v Německu roku 1906 Ludwig Prandtl. Ventilátor umístil do potrubí kruhového výřezu o průměru 2 m, které navazovalo na potrubí čtvercového průřezu 2 x 2 m.

První tunel pro nadzvukové rychlosti, dosahující až rychlosti 2,5 Mach, pomohla urychlit první a druhá světová válka. Nadzvukový tunel byl postaven v Německu roku 1938 v Pennemünde. [14]

3.1 Rozdělení aerodynamických tunelů

3.1.1 Otevřený tunel

Otevřený větrný tunel, také nazýván jako Eiffelův. Svě jméno dostal podle francouzského inženýra. Je sestaven tak, že nasává vzduch z atmosféry a poté ho zase vypouští zpět. Výhodou jsou menší konstrukční náklady a je možnost u měření znázornění proudění například využitím kouře. V uzavřeném tunelu by vzduch s kouřem musel být filtrován. Mezi nevýhody se řadí vyšší provozní náklady, není

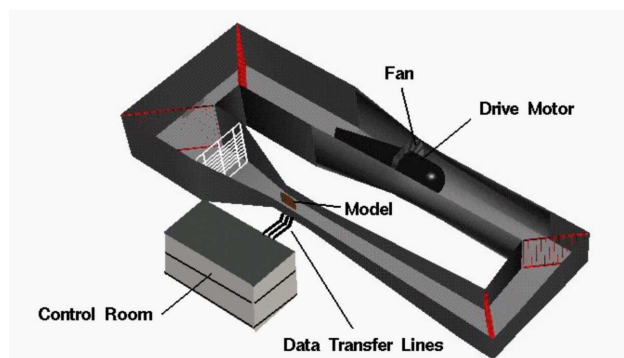
zde žádné zachování již vytvořené energie (proudu vzduchu), která by se dala opakovaně využít. Další nevýhodou je hluknost větráků vhánějící vzduch do měřicího prostoru. Tím že je vzduch nasáván přímo z atmosféry, musíme zohlednit i změny počasí, protože vzduch není vždy ustálený. [14]



Obrázek 20: Otevřený aerodynamický tunel [18]

3.1.2 Uzavřený tunel

Tento typ tunelu se také nazývá jako Prandtlův či Göttingenský tunel. Uzavřeným tunelem se myslí tunel, kde je určitá cirkulace vzduchu. Výhodou je ustálený proud vzduchu v měřicím prostoru a lepší kontrola jeho kvality. Výhodou je i cena provozu, je levnější, a to převážně z důvodu, že ventilátor kryje pouze ztráty, které vznikly v měřicím prostoru či kolenech (zatáčkách). I díky tomu vytváří méně hluku. Mezi nevýhody patří vyšší pořizovací náklady, způsobené většími rozměry (je potřeba udělat (kruh)). Nevýhodou je i omezené používání některých typů měření jako například koučem z důvodu nutnosti vzduch přefiltrovat či oteplování vzduchu proudícího v tunelu způsobené třením o stěny. Vzduch je tedy nutné ochlazovat na stálou teplotu. [14]



Obrázek 21: Uzavřený aerodynamický tunel [19]

Uzavřený tunel můžeme následně rozdělit podle měřicího prostoru na otevřený neboli, že kruh je uzavřen a pouze měřící prostor je spojen s okolím, či uzavřený, který je celý uzavřen. [14]

3.1.3 Další dělení

Aerodynamické tunely se dají dále dělit podle Machova čísla. A to na subsonické, transsonické, supersonické a hypersonické.

Tabulka 6: Dělení Aerodynamických tunelů podle Machova čísla [14]

Subsonické	Méně než 0,75 Mach
Transsonické	Více než 1 Mach
Supersonické	1,2-5 Mach
Hypersonické	Více než 5 Mach

3.1.4 Subsonické aerodynamické tunely

Za subsonický aerodynamický tunel považujeme tunel, který dosahuje rychlostí menších než 0,75 Machova čísla. Můžeme zde tedy zanedbat stlačitelnost vzduchu. Tento typ tunelu můžeme dále rozdělit na nízkorychlostní a vysokorychlostní. Nízkorychlostí dosahují maximálně 0,4 Machova čísla. Vysokorychlostí dosahují mezi 0,4 – 0,8 Machova čísla. Dále mohou být otevřené i uzavřené. Většina postavených aerodynamických tunelů se pohybuje v této subsonické oblasti. [14]

3.1.5 Transsonické

Toto označení mají tunely, u kterých je možné dosáhnout 0,8 – 1,2 Machova čísla. V oblasti okolo Machova čísla 1 je kombinují subsonické a supersonické proudové režimy neboli chování vzduchu v rychlosti zvuku a v nadzvukové rychlosti. Tím pádem bývá většina transsonických tunelů zároveň supersonických.[14]

3.1.6 Supersonické

Supersonické proudění se definuje jako proudění, kde je rychlost proudění vyšší, než je rychlost zvuku. Dosahuje se zde rychlostí 1,2 -5 Machova čísla. [14]

3.1.7 Hypersonické

Hypersonické tunely jsou vyvinuté tak, aby bylo možno dosáhnout hypersonických rychlostí, což jsou rychlosti vyšší než 5 Machova čísla. V těchto rychlostech se vlastnosti vzduchu začínají odlišovat od vlastností ideálního plynu, „*tudíž nemůžeme zanedbávat efekty vnitřní chemie plynu jako disociace a ionizace.*“ [14] Hypersonické větrné tunely jsou především důležité pro vesmírné technologie.[14]

3.2 Aerodynamický tunel na Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky Fakulty strojní, ČVUT

Aerodynamický tunel je recirkulační, jedná se tudíž o uzavřený aerodynamický tunel s otevřeným měřícím prostorem.[20]

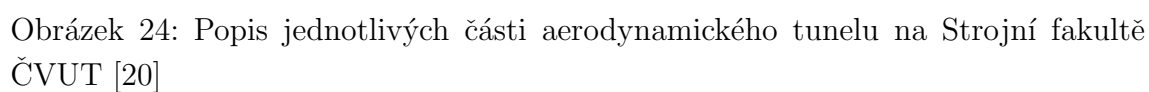
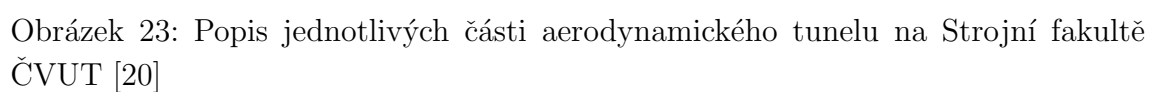


Obrázek 22: Aerodynamický tunel na Strojní fakultě ČVUT [2]

Tabulka 7: Parametry aerodynamického tunelu na Strojní fakultě ČVUT [20]

Maximální rychlost v měřícím prostoru	$60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Délka měřícího prostoru	1200 mm
Příčná plocha měřícího prostoru	$950 \times 450 \text{ mm}$

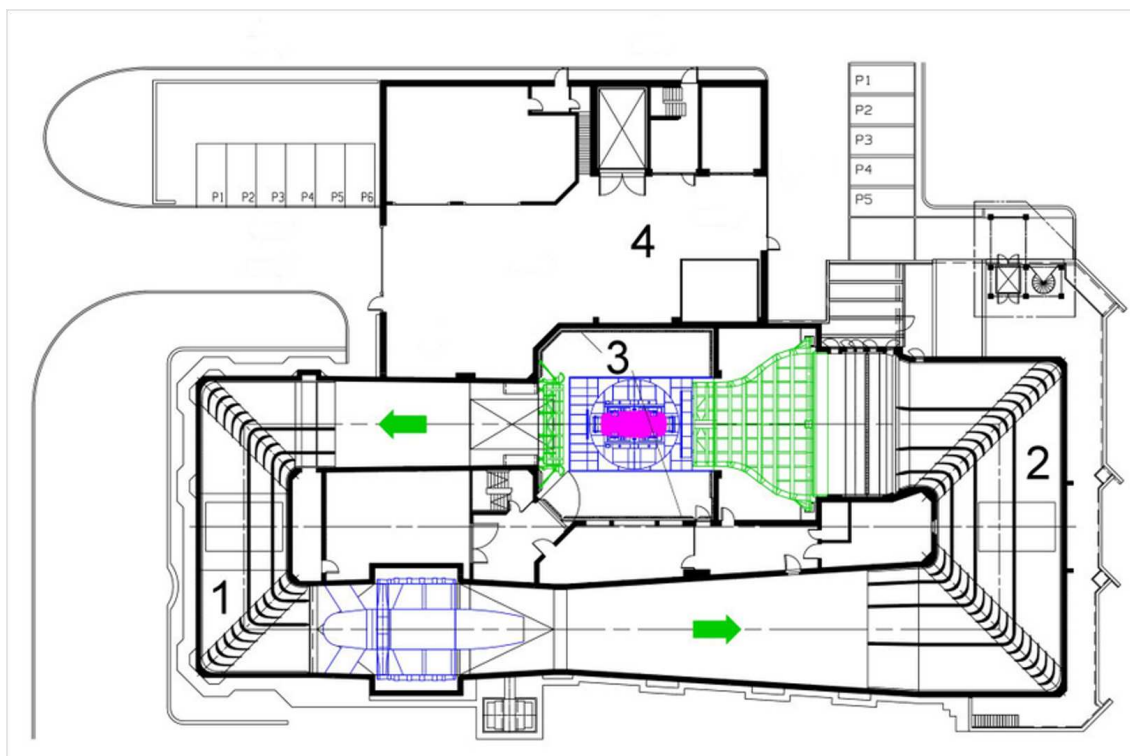
Tento aerodynamický tunel jsem osobně využil k měření mé karoserie.



Číslo části	Popis
1	Měřicí prostor
2	Difuzor (7,15)
3,4	Kolena s vodícími lopatkami s chlazením
5	Axiální ventilátor
6	Difuzor (2)
7,8	Kolena s vodícími lopatkami s chlazením
9	Uklidňovací komora (síta, voštiny)
10	Dýza

3.3 Aerodynamický tunel FKFS

Aerodynamický tunel FKFS je uzavřený s otevřeným měřícím prostorem. Tento tunel disponuje také pohyblivou podlahou, která znázorňuje silnici pro co nejpřesnější měření. Aerodynamický tunel na FKFS využívá pro svá aerodynamická měření například Škoda-Auto.



Obrázek 25: Aerodynamický tunel FKFS [13]

Tabulka 9: Parametry aerodynamického tunelu na FKFS [21]

Maximální rychlost v měřícím prostoru	260 <i>km/h</i>
Délka měřícího prostoru	9,95 <i>m</i>
Příčná plocha měřícího prostoru	5,84 x 3,87 <i>m</i>



Obrázek 26: Aerodynamický tunel FKFS s testováním aerodynamiky Škoda Enyaq [22]



Obrázek 27: Aerodynamický tunel FKFS s testováním aerodynamiky Škoda Enyaq [22]

4 CFD

CFD je zkratka pro Computational Fluid Dynamic v českém jazyce počítačová dynamika tekutin. Jedná se o moderní výpočetní metodu, která zkoumá proudění tekutin, přenos tepla a hmoty. Díky velkému rozvoji na poli výpočetní techniky a její dostupnosti se CFD stále více využívá. Tímto velkým rozšířením však vzniká řada simulací, které jsou fyzikálně nesprávné.

Pro použití výsledků ve skutečném světě se doporučuje provést měření i v reálném světě, u proudění vzduchu například v aerodynamickém tunelu.

V CFD simulacích se prostor rozděluje na určitý počet diskrétních bodů neboli síťové body. Toto rozdělení nám vytváří síť. Vlastnosti tekutiny jsou vždy počítány pouze v jednotlivých bodech sítě. [11, 23]

CFD simulace umožňují na výběr z řady turbulentních modelů jako například: k-epsilon, SST k-omega, SST k-omega SAS, RNG. Já si vybral turbulentní model k-epsilon.

4.1 Turbulentní model k-epsilon

Model k-epsilon pro turbulentní proudění se řadí mezi nejběžnější. Jedná se o model Eddyho viskozity. Eddyho model je jeden ze tří modelů, které se využívají k výpočtu Reynoldsových napětí. [11]

PRAKTICKÁ ČÁST

5 Průzkum trhu

Praktickou část mé práce jsem zahájil průzkumem dostupných karoserií pro slotracing. Snažil jsem se pochopit jednotlivé odlišnosti karoserií závodních vozů ve vztahu k aerodynamice tak, abych je mohl správně využít pro svůj návrh karoserie.

V České republice jsou dva hlavní výrobci karoserií pro slotracing. Jsou to SLOT-BPA a Attan slot-racing. Každý z obou výrobců zastává odlišný aerodynamický vzhled karoserií, které vyvíjejí a vyrábějí. Oba výrobci využívají k výrobě vakuové lisování z lexanu, jak je uvedeno v pravidlech ISRA a oba výrobci již minimálně jednou dodávali karoserie na Mistrovství světa ISRA pro kategorii PR/24.

5.1 Karoserie od Attan slot-racing

Mezi nejlepší karoserie od Attan Slot-racing patří BMW M4 DTM 1/24, Tesla Model S P100DL Electric GT 1/24 a Mercedes AMG C 63 DTM 1/24, který jsem osobně využil k porovnání s mojí karoserií. Tyto karoserie jsou charakteristické protáhlou přední částí se snahou využít přítlak vytvořený blatníky předních kol. V zadní části jsou tyto karoserie charakteristické výrazným hranatým zadním spoilerem.

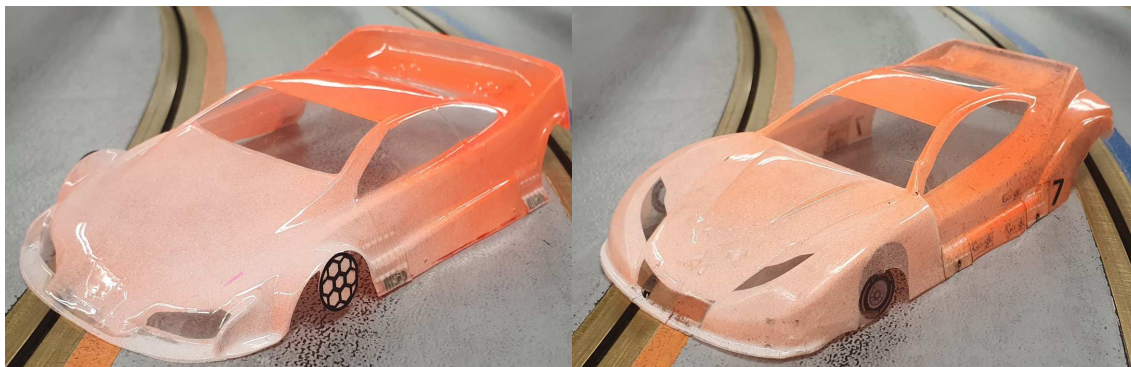


Obrázek 28: Karoserie Mercedes AMG C 63 DTM 1/24 od Attan slot-racing [24]

5.2 Karoserie od SLOT-BPA

Mezi nejlepší karoserie od SLOT-BPA patří Honda CUP a Peugeot 406 coupe BTC. Obě tyto karoserie jsem využil k porovnání s mnou vyvinutou karoserií. Karoserie tohoto výrobce jsou charakteristické tím, že nemají protáhlou přední část a tím nevyužívají tolik přítlaku vzduchu, který proudí přes blatníky předních kol. Tímto vzhledem se více podobají běžným silničním autům, kde je snaha o co nejmenší odpor v přední části vozu. Střední část karoserie, Peugeot 406 coupe BTC, má lepší

směrování vzduchu na zadní spoiler, a to díky náklonu této části směrem do středu vozu. Zadní část je na rozdíl od karoserií Attan slot-racing více zaoblená a na konci spoileru je využívána tzv. anti-hrana, jak tento prvek nazývá výrobce.



Obrázek 29: Karoserie od SLOT-BPA,
Vlevo: Peugeot 406 coupe BTC, Vpravo: Honda CUP

Podobný prvek mají i závodní auta například Škoda Fabia RS Rally 2. O tomto prvku jsem krátce diskutoval s odborníkem z Oddělení technického vývoje Škoda Auto, panem Ing. Lukášem Vojíkem, který se podílel na vývoji rally speciálu Škoda Fabia RS Rally 2.



Obrázek 30: Vlevo: Prvek na zadním spoileru karoserie Peugeot 406 coupe BTC,
Vpravo: Prvek na zadním křídle u Škoda Fabia RS Rally 2 [25]

5.3 Výběr předlohy skutečného vozu pro můj návrh karoserie

Mezi modely cestovních vozů jsem vybíral základ pro můj návrh karoserie pro slotracing. Mezi hlavní parametry patřil koeficient odporu C_d . Cílem bylo najít model, který má co nejmenší odpor, abych poté mohl tvar modelu upravit pro závody slotracingu. Jako základ jsem si vybral model Škoda Enyaq Coupé iV. Má

nejnižší součinitel odporu z aktuálně nabízených aut značky ŠKODA. Škoda Enyaq Coupé iV má koeficient odporu pouze $C_d = 0,234$.

Našel jsem mnoho dalších modelů ostatních značek, které disponují nízkými hodnotami koeficientu odporu C_d a snažil jsem se najít některé podobnosti v jejich tvaru. Uvedené obrázky ukazují aerodynamické podobnosti cestovních vozů různých značek s nízkým koeficientem odporu.



Obrázek 31: Vlevo: Škoda Enyaq Coupé iV [26], Vpravo: Tesla X [27]



Obrázek 32: Vlevo: Audi E-tron GT [28], Vpravo: Porsche Taycan [29]

Všechny tyto modely mají velmi podobný tvar střechy, který způsobuje plynulé proudění vzduchu. Tímto tvarem jsem se inspiroval i u své karoserie, je žádoucí mít vzduch, který proudí přes střechu co nejvíce ustálený, aby byl zadní přítlačný spoiler co nejvíce účinný.

THE NEW ŠKODA

ENYAQ COUPÉ iV

AERODYNAMICS



Aerodynamic drag from $C_d = 0.234^*$

Laid-back windscreen and streamlined roof line

Aerodynamically optimised wing mirrors

Sporty lines ensure excellent aerodynamics

Closed radiator grille

Active cooling roller blind

Air curtain in the front bumper

Streamlined body

Completely flat underbody

Aerodynamically optimised alloy wheels

Rear diffuser

* Value depends on model configuration

SOURCE: ŠKODA AUTO

Obrázek 33: ŠKODA ENYAQ COUPÉ iV [25]

6 Pravidla pro karoserie

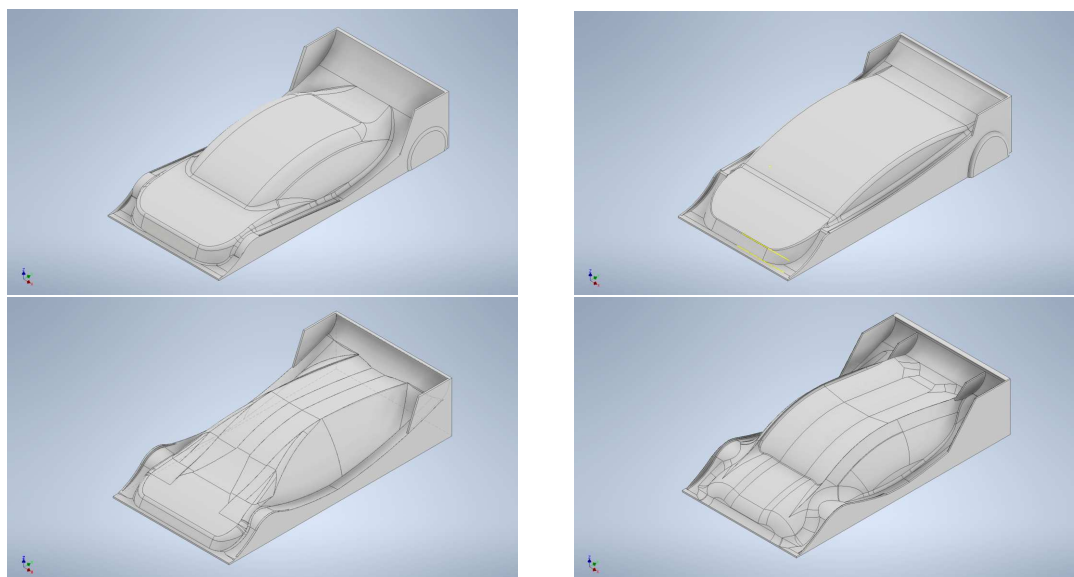
Svoji karoserii jsem navrhoval tak, aby odpovídala pravidlům ISRA a model se mohl účastnit závodů ve slotracingu.

Tabulka 10: ISRA pravidla pro karoserie Production PR/24[30]

Maximální výška modelu v oblasti zadního spoileru	35 mm
Maximální šířka modelu	83 mm
Minimální svislá přední hrana	1 mm
Minimální průměr nálepky předního kola	12,7 mm

7 Vývoj návrhu mé karoserie

Spojil jsem se s Vývojovým oddělením ŠKODA AUTO a.s. s Ing. Vojtěchem Jakubcem a společně konzultovali, jak probíhá vlastní návrh karoserie a jak se postupuje při jeho vývoji. Své návrhy karoserií jsem vytvářel pomocí počítačového programu Autodesk Inventor 2024, využíval jsem studentskou licenci. Na počátku jsem vytvořil 4 různé návrhy, u kterých jsem se snažil pochopit samotné proudění vzduchu okolo karoserie, a kde mohou být problematická místa. Tyto karoserie ještě nehleděly na problematiku vyrobitelnosti.



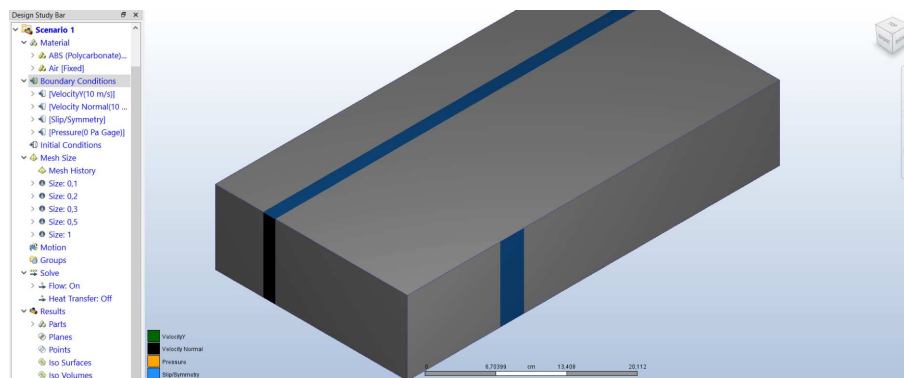
Obrázek 34: První čtyři počáteční návrhy mé karoserie

Jednotlivé návrhy jsem dále rozpracovával a jejich vlastnosti testoval v CFD simulacích. Vybral jsem nejlepší návrh a ten dále rozvíjel a aerodynamicky upravoval. Takto vzniklo více jak 60 návrhů, než vznikl poslední pro mě aerodynamicky nejlepší. Tento návrh bylo nutné ještě mírně upravit z důvodu vyrobitelnosti vlastní karoserie pro slotracing. Tento problém na reálných autech řeší i vývojáři

ve ŠKODA AUTO. Konzultoval jsem určité prvky výroby tak, aby nebyla zhoršena, popřípadě, aby vliv na aerodynamické vlastnosti byl co nejmenší.

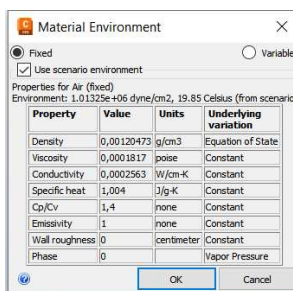
7.1 Nastavení CFD simulací

CFD simulace jsou celkově složitou oblastí. V této oblasti jsem získal orientaci a spolupracoval s panem Ing. Vojtěchem Jakubcem. Ten se problematice věnuje ve Škoda Auto. Na základě konzultací jsem dokázal správně nastavit simulace tak, aby odpovídaly reálnému proudění. Některé karoserie se přímo testovaly ve Škoda Auto, aby se potvrdila správnost nastavení mých simulací. K simulacím používám software AUTODESK CFD Ultimate 2024, se studentskou licencí. Program jsem zvolil z důvodu jednoduššího nastavení a ovládání než u obdobných programů jako ANSYS nebo SIEMENS STAR CCM+, na kterém byly prováděny simulace některých mých karoserií ve Škoda Auto. Z CFD simulací jsem získal celou řadu dat, které byly využity k posuzování jednotlivých návrhů karoserií. Proudění vzdu-

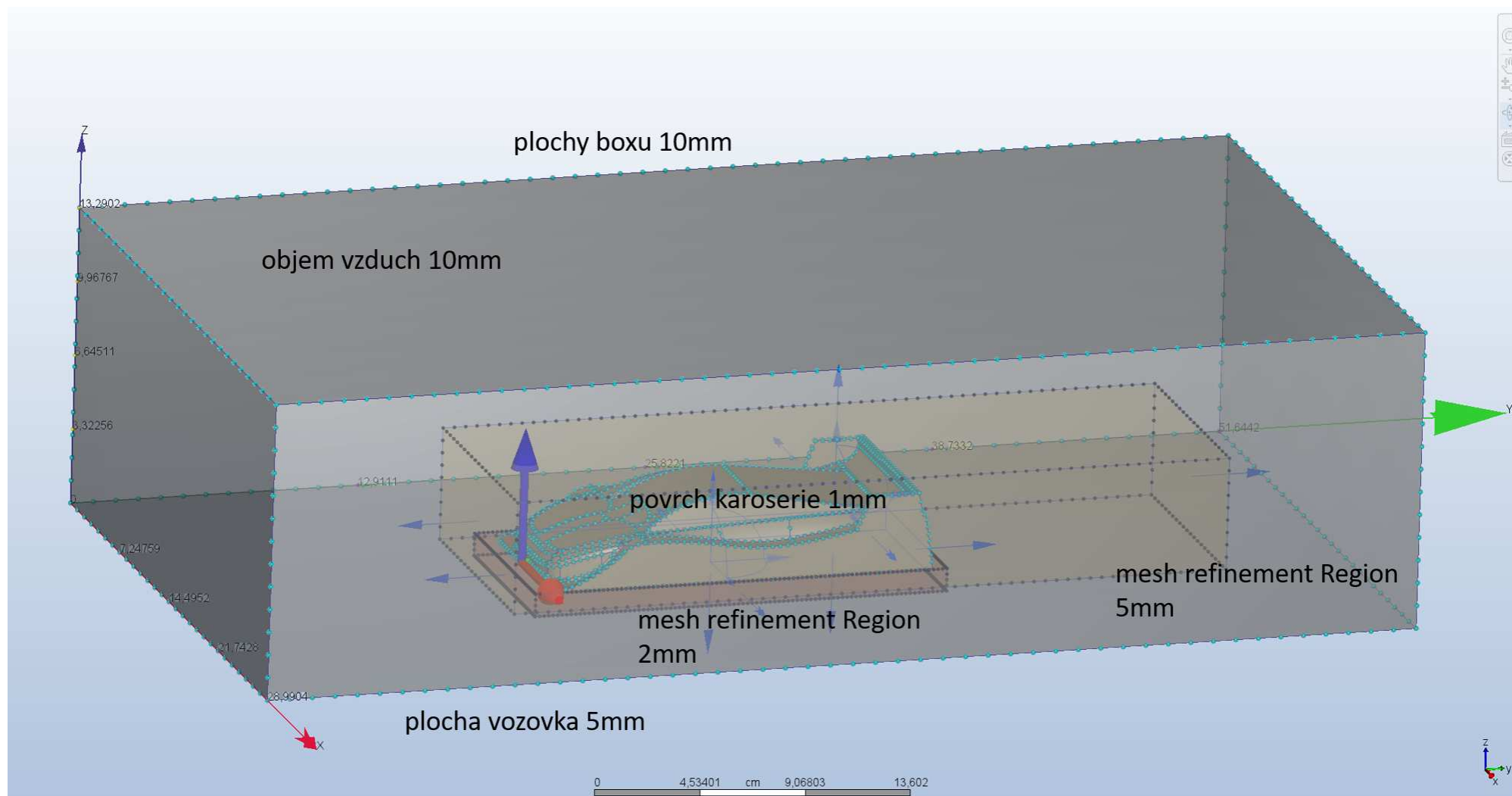


Obrázek 35: Vytváření měřicího prostoru, podle konzultací s Ing. Vojtěchem Jakubcem

chu jsem v CFD simulacích nastavil tak, aby vzduch byl foukán z přední stěny rychlostí 10 m/s . Dále jsem nastavil spodní stěnu jako silnici, která ubíhá také rychlostí 10 m/s . Na zadní stěně, kde vzduch opouští měřicí prostor byl nastaven nulový tlak. Ostatní stěny kolem modelu byly nastaveny jako Simp/Symmetry což znamená, že se od nich vzduch nijak neodráží. Pro konečné verze karoserií byly CFD simulace vytvořeny s rozmezím rychlostí $7 \text{ m/s} - 20 \text{ m/s}$.



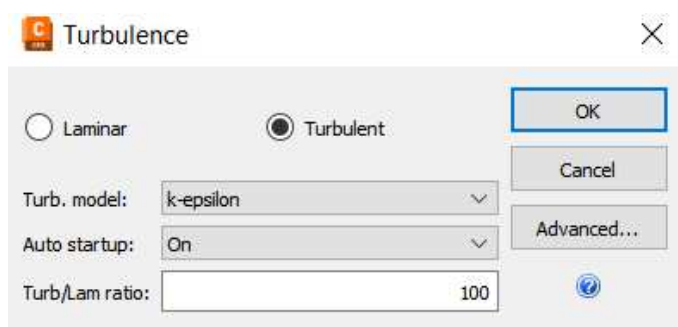
Obrázek 36: Fyzikální vlastnosti vzduchu v CFD simulaci



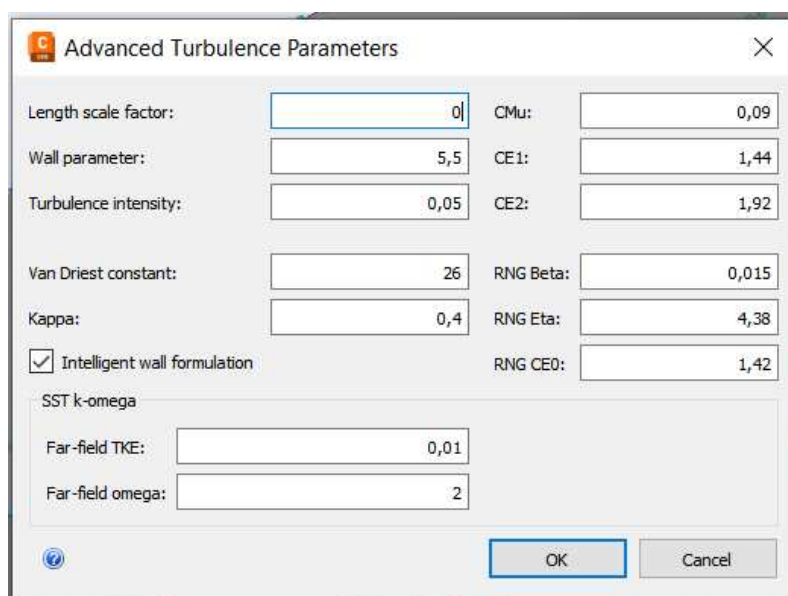
Obrázek 37: Nastavení sítě v CFD simulacích [31]

7.1.1 Nastavení řešení CFD simulací

Pro toto nastavení jsem si vybral turbulentní model k-epsilon, který je jedním z nejběžnějších modelů pro tento typ CFD simulací.



Obrázek 38: Turbulentní model k-epsilon



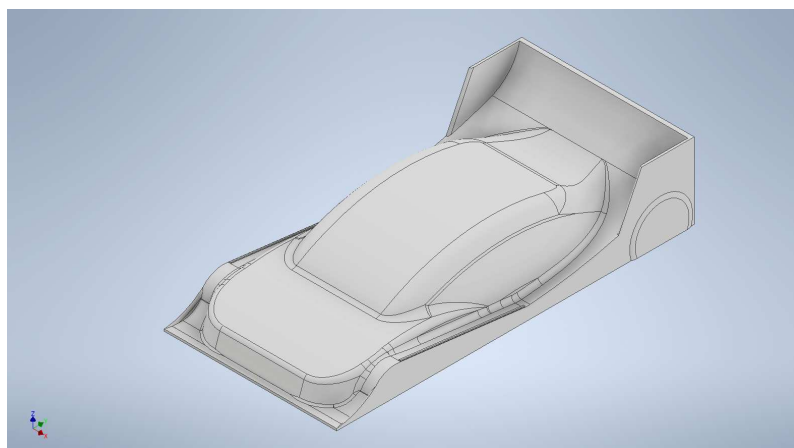
Obrázek 39: Podrobné nastavení turbulentního modelu

Obrázky ukazují nastavení CFD-simulací pro všechny testované karoserie v turbulentním modelu k-epsilon.

7.2 Vývoj jednotlivých návrhů

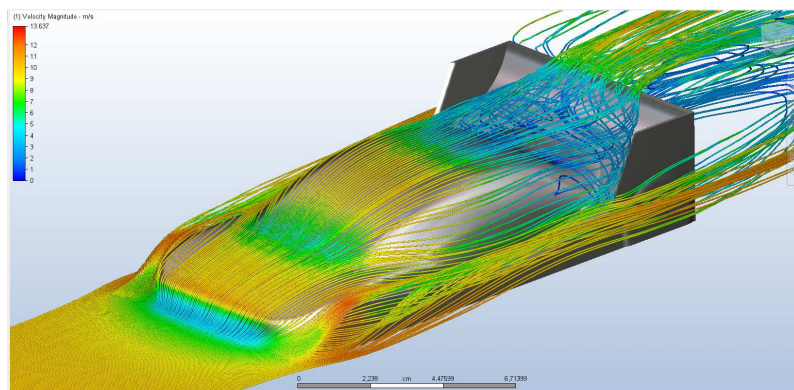
U všech svých návrhů jsem prováděl CFD simulace a analyzoval, zda provedené změny na karoserii byly či nebyly účinné. Do této práce jsem vybral obrázky jen CFD simulací, kde je vidět výrazně odlišné proudění oproti jiným.

7.2.1 Karoserie Beran gen 1



Obrázek 40: Beran gen 1

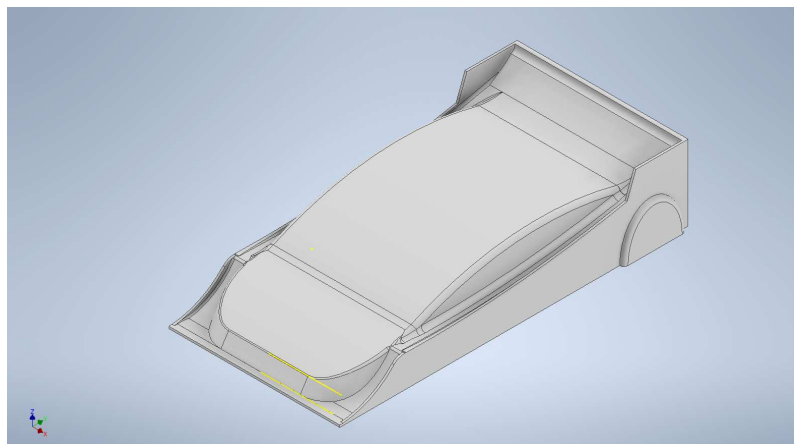
Tato karoserie patřila k jednomu z mých prvních pokusů o návrh karoserie pro slotracing. Při navrhování této karoserie bylo hlavním cílem zjistit, jaká jsou kritická místa proudění vzduchu a na co je třeba se zaměřit.



Obrázek 41: Beran gen 1 CFD

U této karoserie je hlavním problémem rotace vzduchu před zadním spoilerem. Rotace je způsobená zúžením a rychlým klesáním v zadní části kabiny před přítlačným spoilerem.

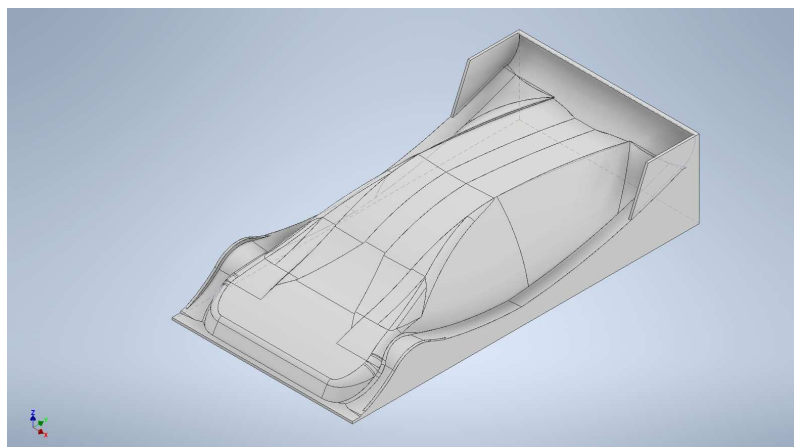
7.2.2 Karoserie Beran gen 2



Obrázek 42: Beran gen 2

U dané karoserie byla snaha lépe pochopit proudění vzduchu na konci kabiny a u předních blatníků tak, aby tento prvek mohl vytvářet přítlak.

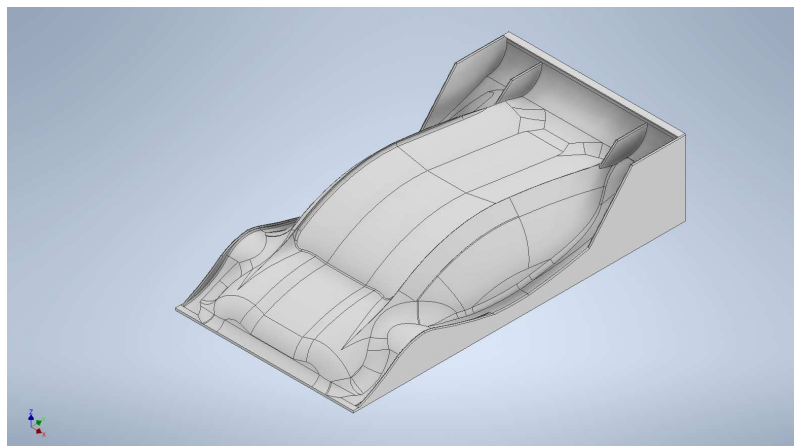
7.2.3 Karoserie Beran gen 3



Obrázek 43: Beran gen 3

Tato generace karoserie již získává tvar kabiny podobný modelu Škoda Enyaq Coupé iV, což znamená protažení zadní části kabiny, aby klesání v zadní části nebylo tak rychlé, což zmírňuje víření vzduchu před zadním spoilerem.

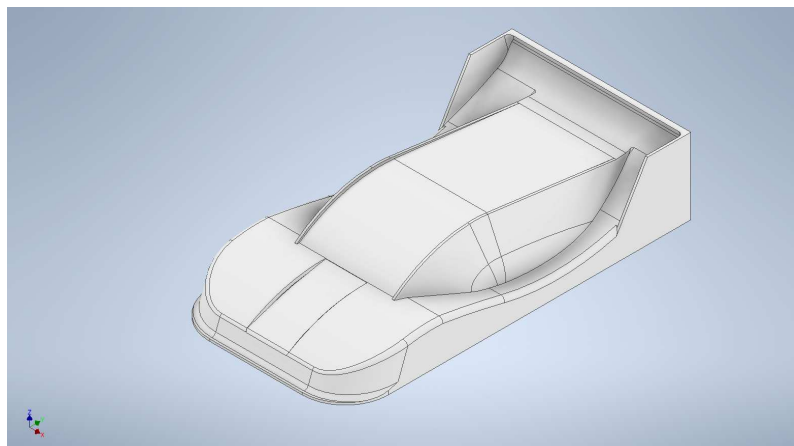
7.2.4 Karoserie Beran gen 4



Obrázek 44: Beran gen 4

Na této generaci jsem upravil zadní část modelu, přidal jsem rozdělení zadního spoileru a více jsem zaoblil hrany na modelu.

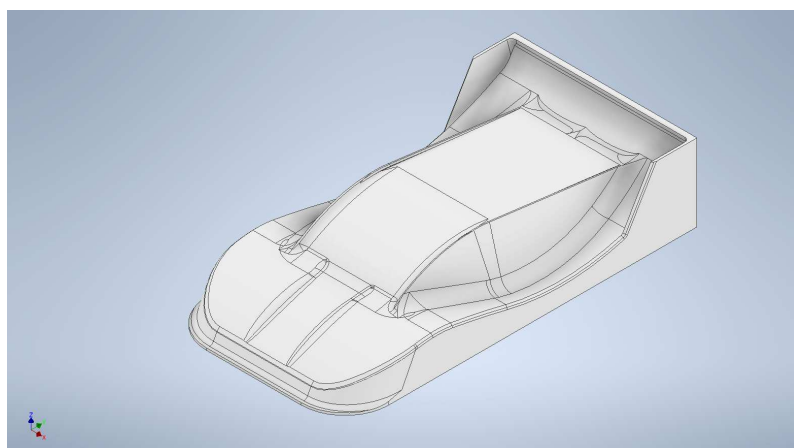
7.2.5 Karoserie Beran gen 5



Obrázek 45: Beran gen 5

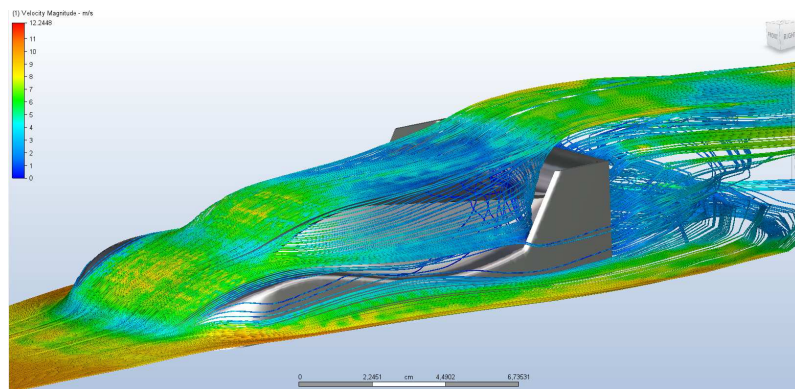
Generace číslo 5 již vznikala po konzultaci s panem Ing. Vojtěchem Jakubcem. Tvar této karoserie již více vychází z tvaru skutečného vozu Škoda Enyaq coupé iV, jako je například charakteristický prolis přední kapoty. U této generace jsem zkoušel jiný koncept přední části, který je více podobný skutečným osobním vozům a využívá ho výrobce SLOT-BPA u svých karosérií.

7.2.6 Karoserie Beran gen 6



Obrázek 46: Beran gen 6

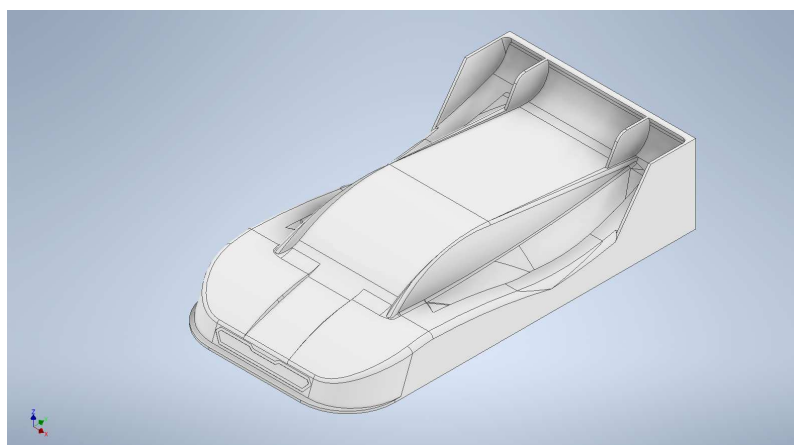
U šesté generace byla mírně přepracována boční část. Nejvýraznější změnou byly prohlubně na konci kabiny a začátku spoileru.



Obrázek 47: Beran gen 6 CFD

U těchto generací byl také přechod na jiný koncept přední částí. Přední část nikde aktivně netvoří víření. Po předchodu vzduchu za blatník se neudrží na povrchu karoserie, ale je odtržen. Odtržením však vzniká problém v zadní části před spoilerem, kde se vzduch odrazí a naruší tím proudění vzduchu přes střechu.

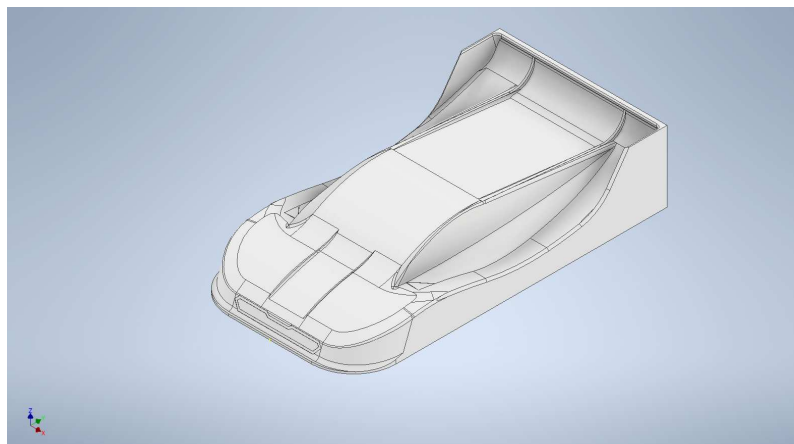
7.2.7 Karoserie Beran gen 7



Obrázek 48: Beran gen 7

Sedmá generace je evolucí šesté generace. Je zde přepracována střední část vozu. Zadní spoiler byl rozdělen do 3 sekcí, tak aby se co nejvíce podpořilo proudění vzduchu bez víření. Podobné rozdělení zadního spoileru využívá výrobce Attan Slot-racing u své karoserie Mercedes AMG C 63 DTM 1/24.

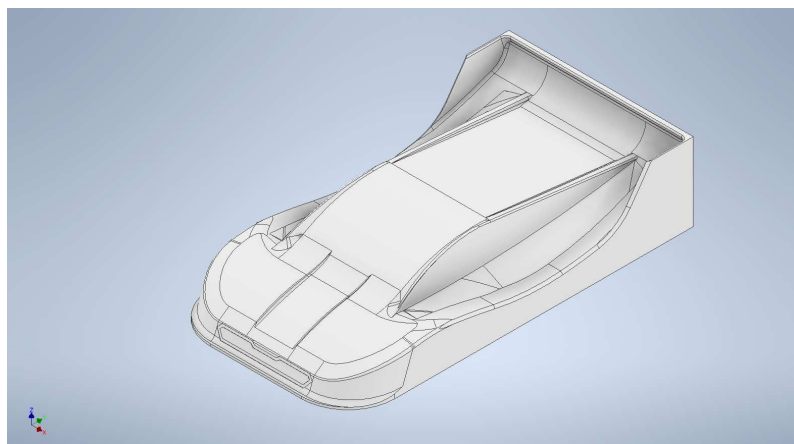
7.2.8 Karoserie Beran gen 8



Obrázek 49: Beran gen 8

Osmá generace ukazuje, zda by proudění vzduchu po zadním spoileru nepomohly jen malé rozdělovače? Tato teorie se nepotvrdila v CFD simulacích.

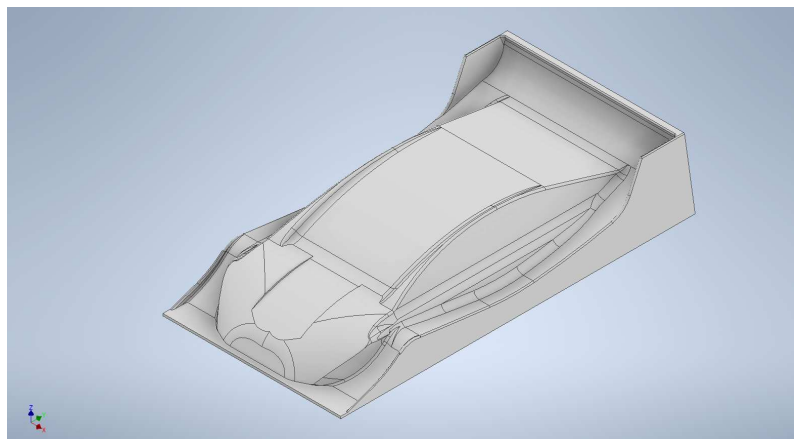
7.2.9 Karoserie Beran gen 9



Obrázek 50: Beran gen 9

Devátá generace vychází ze sedmé a osmé generace, kde jsou odstraněny rozdělovače zadního spoileru, které podle CFD simulací nevytvářely požadovaný efekt.

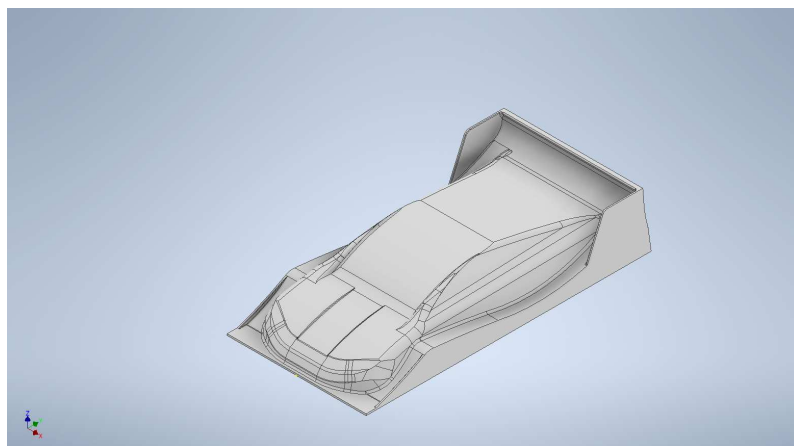
7.2.10 Karoserie Beran gen 10



Obrázek 51: Beran gen 10

U desáté generace je změněn koncept přední části a jsou přepracovány bočnice okolo kabiny.

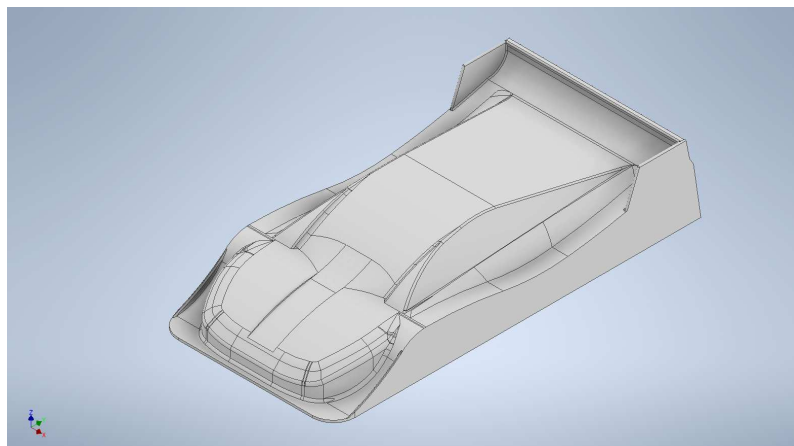
7.2.11 Karoserie Beran gen 11



Obrázek 52: Beran gen 11

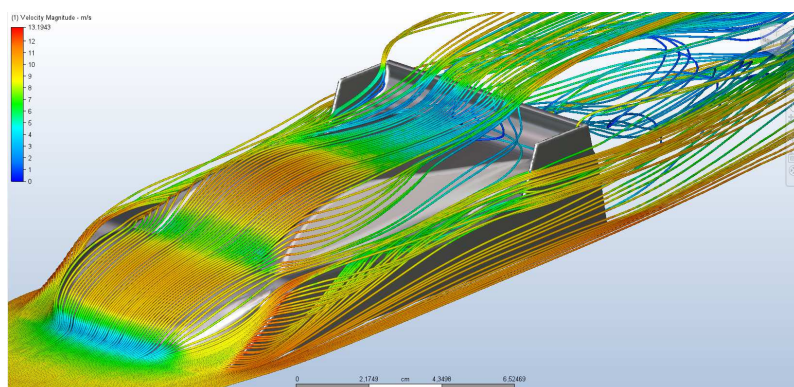
Jedenáctá generace je evolucí 10. generace. Je pozměněna přední část a mírně jinak tvarované bočnice okolo kabiny.

7.2.12 Karoserie Beran gen 12



Obrázek 53: Beran gen 12

Dvanáctá generace má mírnou evoluci přední části a zde jsem se vrátil zpět ke staršímu konceptu boční části okolo kabiny. Jsou zde také jinak zpracované boky předního okna.

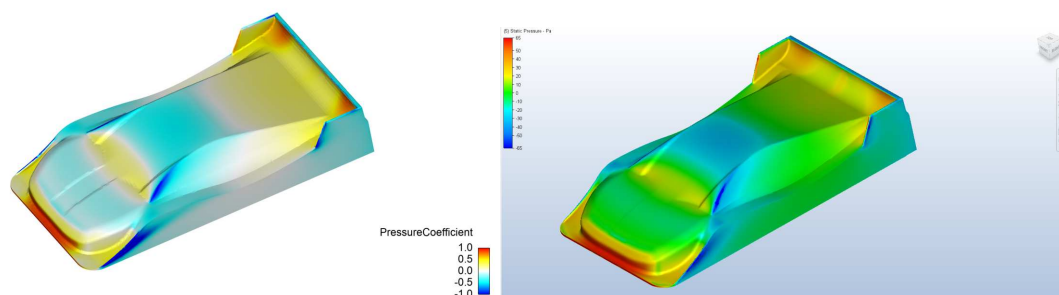


Obrázek 54: Beran gen 12 CFD

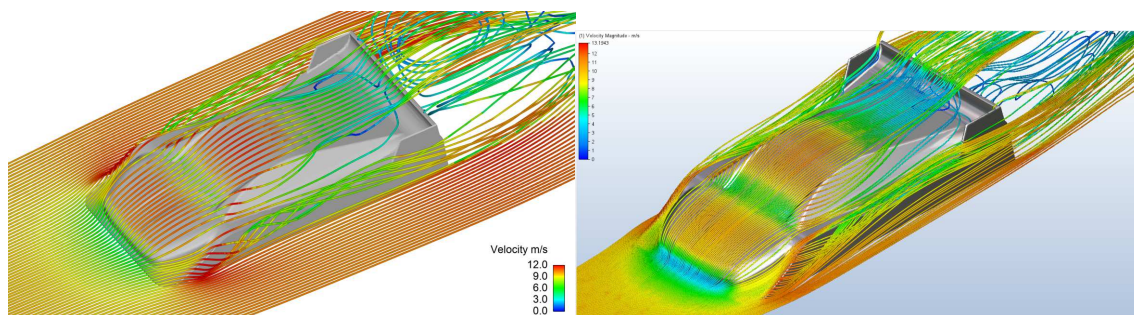
Na CFD simulaci této generace lze vidět zmírnění víření vzduchu před zadním spoilerem v porovnání s minulými generacemi. Nedostatkem této karoserie je víření, které je způsobeno malými křídélky na přídi vozu. Tyto křídélka měla za úkol nasměrovat vzduch tak, aby pokračoval přes přední blatník směrem na zadní spoiler. Tato funkčnost se bohužel neosvědčila a křídélka místo toho vytvářela vír, který rotuje po celém boku vozu a tím odebírá vzduch, který by měl možnost proudit na spoiler a vytvářet přítlak.

U této karoserie byly provedeny i simulace ve Škoda Auto, za účelem ověřit, zda jsou simulace podobné a dají se považovat za fyzikálně správné. Zároveň program Siemens STAR CCM+ vytváří proudnice lehce odlišné než Autodesk CFD takže jsem v těchto simulacích mohl vidět proudění z jiného úhlu pohledu.

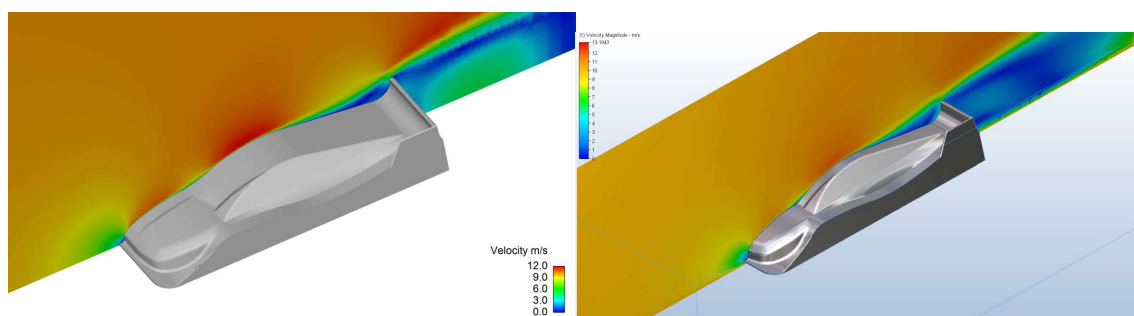
Obrázky ukazují porovnání CFD simulací zpracované pomocí softwaru Autodesk CFD Ultimate 2024 a softwaru Siemens STAR CCM+



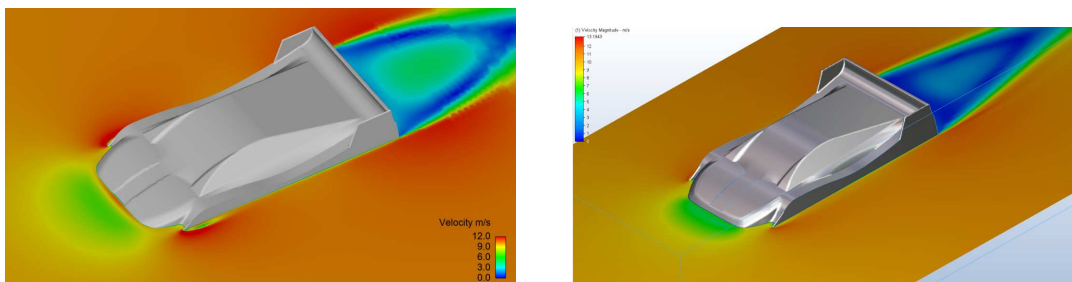
Obrázek 55: Zobrazení působícího tlaku na karoserii,
Vlevo: Siemens STAR CCM+, Vpravo: Autodesk CFD Ultimate 2024



Obrázek 56: Zobrazení proudnic vzduchu,
Vlevo: Siemens STAR CCM+, Vpravo: Autodesk CFD Ultimate 2024

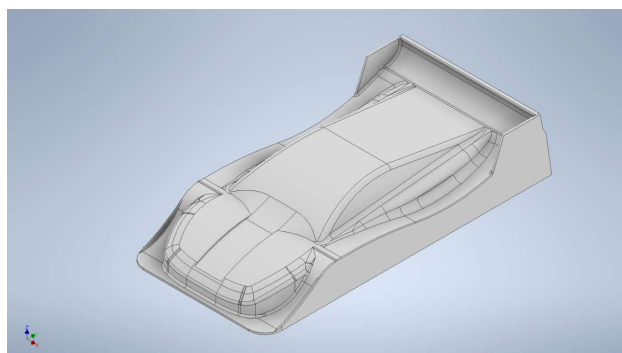


Obrázek 57: Zobrazení rychlosti vzduchu okolo modelu,
Vlevo: Siemens STAR CCM+, Vpravo: Autodesk CFD Ultimate 2024



Obrázek 58: Zobrazení rychlosti vzduchu okolo modelu,
Vlevo: Siemens STAR CCM+, Vpravo: Autodesk CFD Ultimate 2024

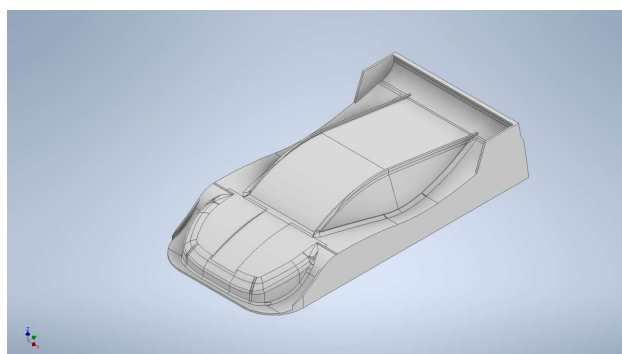
7.2.13 Karoserie Beran gen 13



Obrázek 59: Beran gen 13

U třinácté generace proběhly změny detailů kabiny. Kabina již nemá žádné okraje u čelního skla a byla mírně pozměněna boční část v okolí kabiny.

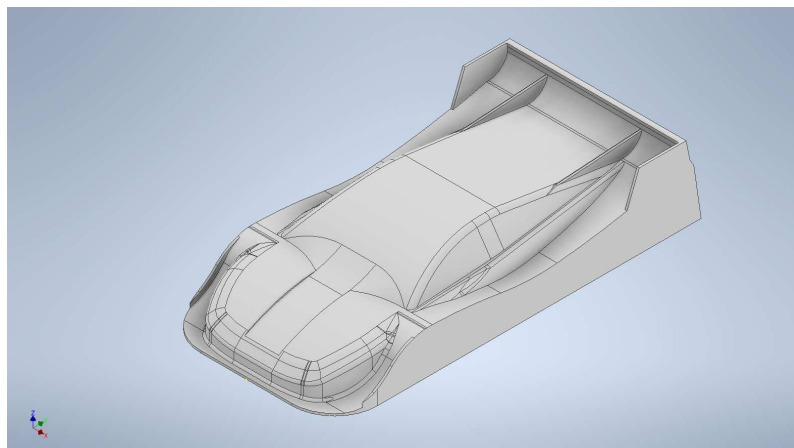
7.2.14 Karoserie Beran gen 14



Obrázek 60: Beran gen 14

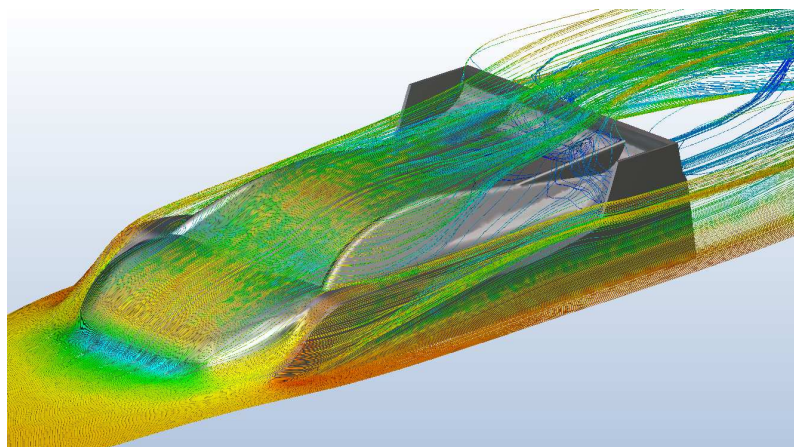
Čtrnáctá generace je opět pouze určitou evolucí kabiny a boční části třinácté generace. Přední část modelu se již od 12. generace neměnila.

7.2.15 Karoserie Beran gen 15



Obrázek 61: Beran gen 15

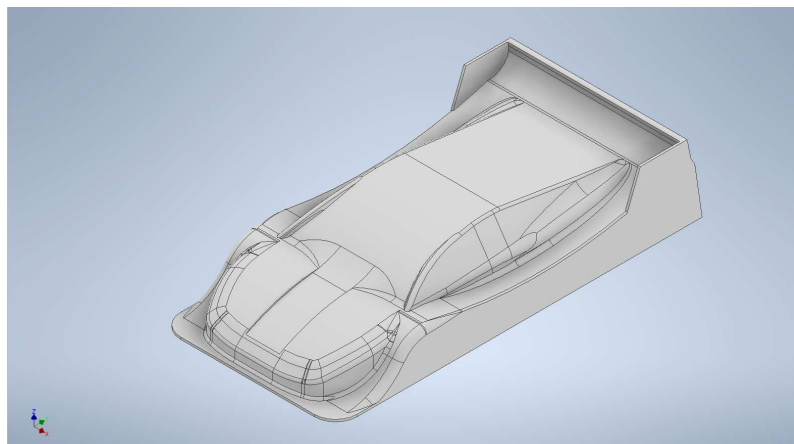
U patnácté generace se tvar kabiny vrátil zpět k 13. generaci, ale byly zde pozměněny boky okolo kabiny a také bylo přidáno rozdělení zadního spoileru.



Obrázek 62: Beran gen 15 CFD

CFD simulace této generace ukazuje na proudění vzduchu v zadní části. Ukázalo se, že rozdělení zadního spoileru vůbec nevedlo k lepšímu proudění v zadní části, spíše proudění zhoršilo. Vzduch proudil tak, že na krajích přelézal toto rozdělení a tím rozbíjel vzduch proudící přes kabinu. Tento aerodynamický prvek jsem již dále ve vývoji nepoužíval.

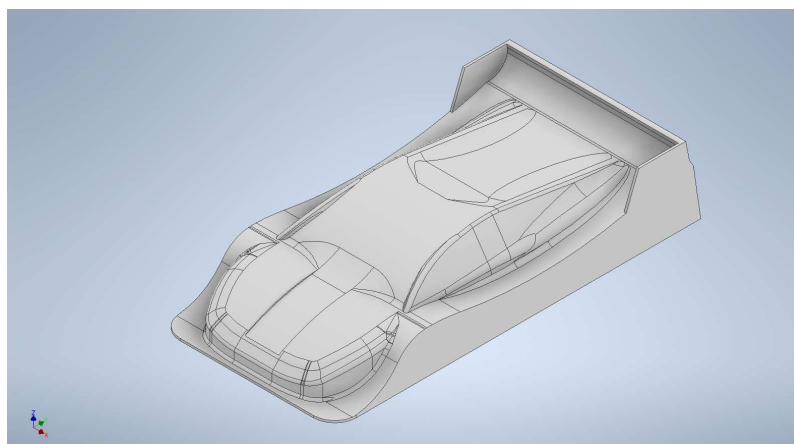
7.2.16 Karoserie Beran gen 16



Obrázek 63: Beran gen 16

Šestnáctá generace zůstala u stejného tvaru kabiny, jen byla předělána boční část, která vychází z 13. generace. Také bylo odstraněno rozdělení zadního spoileru.

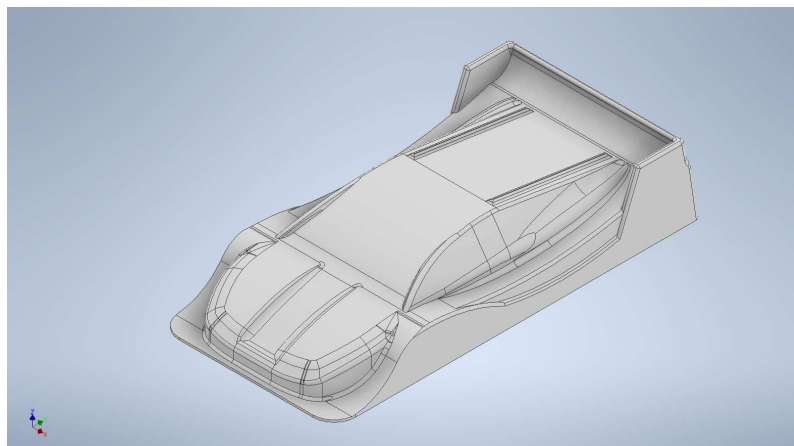
7.2.17 Karoserie Beran gen 17



Obrázek 64: Beran gen 17

Daný tvar u 17. generace jsem již považoval za téměř dokončený a měnil jsem již pouze detaily před zadním spoilerem. Tato karoserie je charakteristická propadlou střechou před zadním spoilerem.

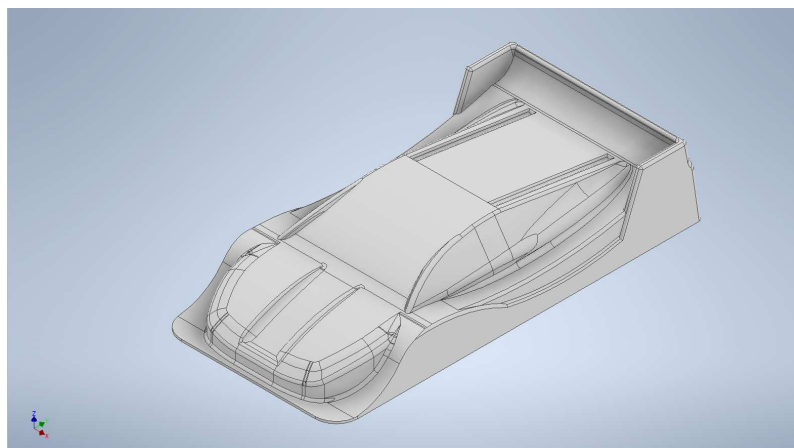
7.2.18 Karoserie Beran gen 18



Obrázek 65: Beran gen 18

U osmnácté generace jsem již začal výrazněji řešit výrobitelnost mé karoserie. Proto muselo proběhnout několik menších změn. Nevýraznější změnou jsou vyvýšené části na konci střechy. Tyto části zde bylo nutné přidat z důvodu možného propadávání a vibrování karoserie z lexanu při jízdě na dráze. Další změnou bylo přidání prolisu do boku karoserie. Prolis má sloužit ke stabilizaci středu karoserie. Zároveň bylo potřeba rozšířit bočnice zadního spoileru tak, aby bylo možno karoserii vyrobit.

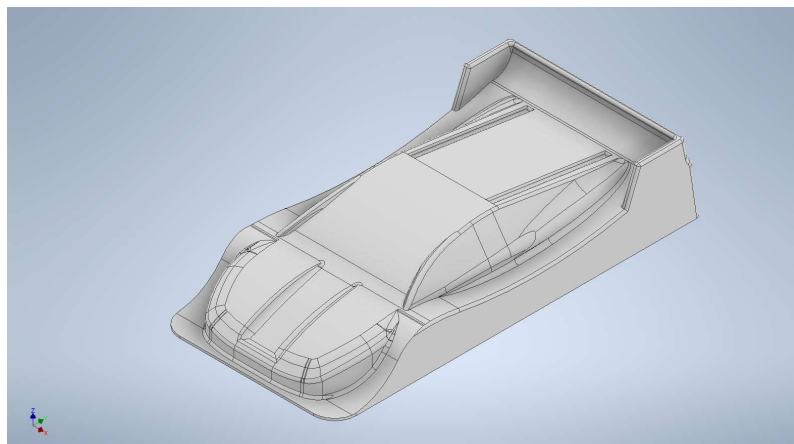
7.2.19 Karoserie Beran gen 19



Obrázek 66: Beran gen 19

U devatenácté generace proběhla pouze změna na konci střechy, kde již nejsou vyvýšeniny, ale jsou prolisy směrem dovnitř.

7.2.20 Karoserie Beran gen 20

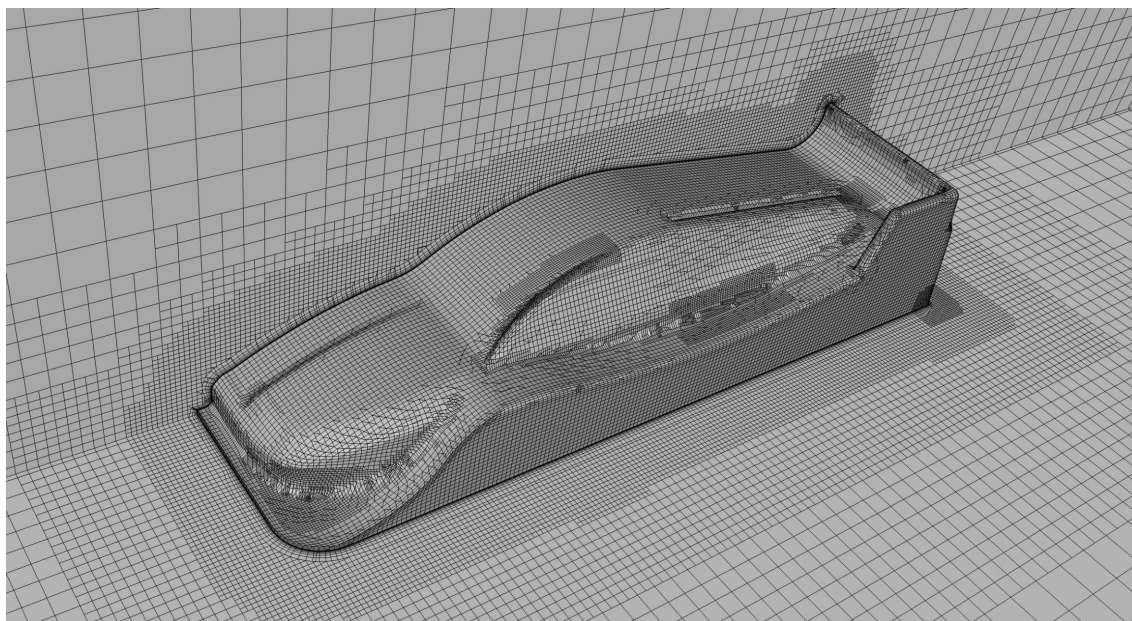


Obrázek 67: Beran gen 20

Dvacátá generace je konečnou generací, která je výrobitelná. Nakonec nebylo nutno přidání prolisů v boku karoserie a byla tím pádem možnost se vrátit k rovnému boku. Finální model jsem nazval Beraq.

7.3 Výsledky CFD-simulací finálního modelu Beraq

Pro ověření správnosti simulací jsem využil možnost nechat aerodynamicky testovat moji karoserii ve Škoda Auto a mít možnost porovnat tyto simulace s těmi, které jsem vytvářel já. Ve Škoda Auto využívají pro tvorbu CFD simulací software Siemens STAR CCM+. U obou simulací byla nastavena rychlost proudícího vzduchu na 10 m/s .

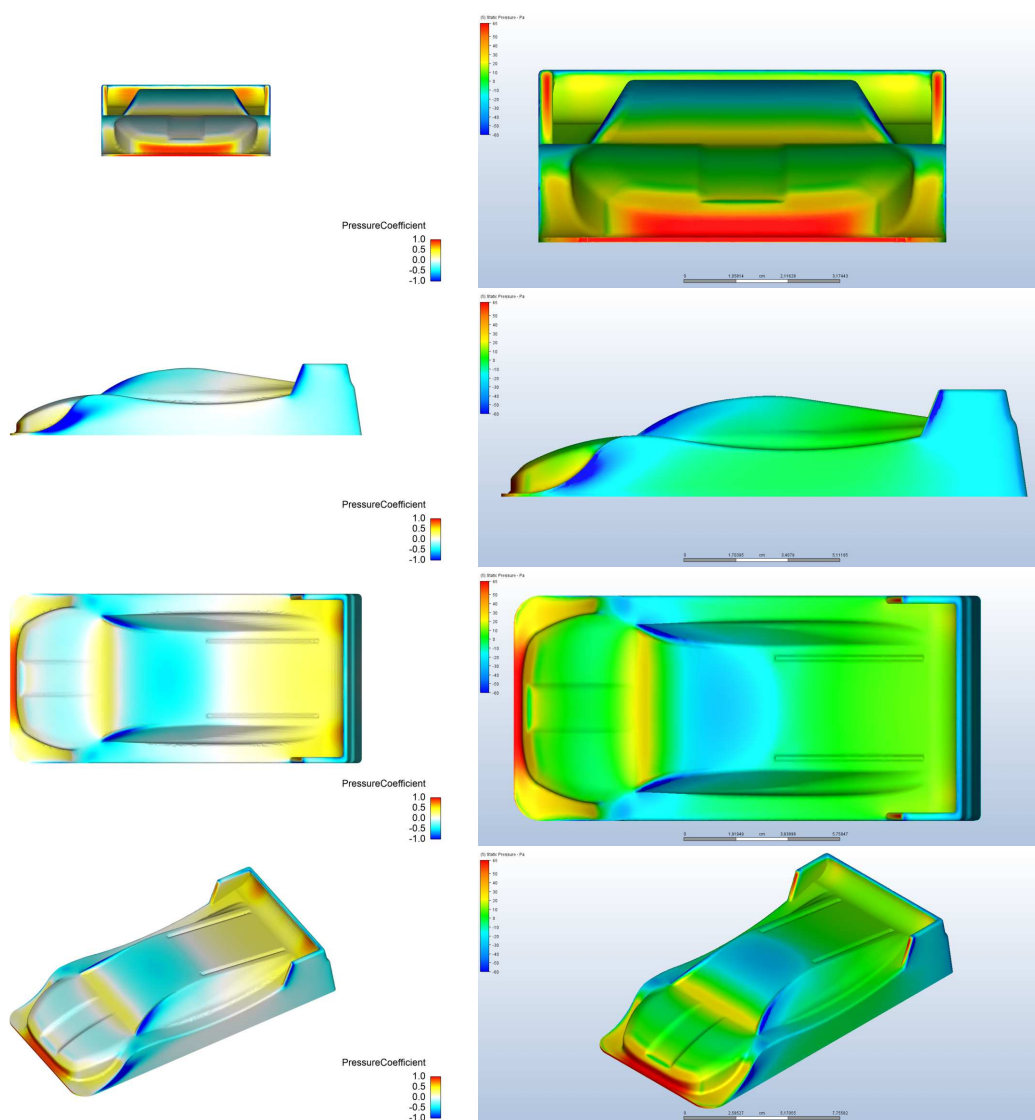


Obrázek 68: Síť v CFD simulacích Siemens STAR CCM+

7.3.1 Grafické znázornění CFD-simulací

Pro finální karoserii jsem graficky zpracoval CFD-simulace tlaku a proudnic. Data jsem porovnával ze dvou zdrojů Siemens STAR CCM+ a Autodesk CFD Ultimate 2024.

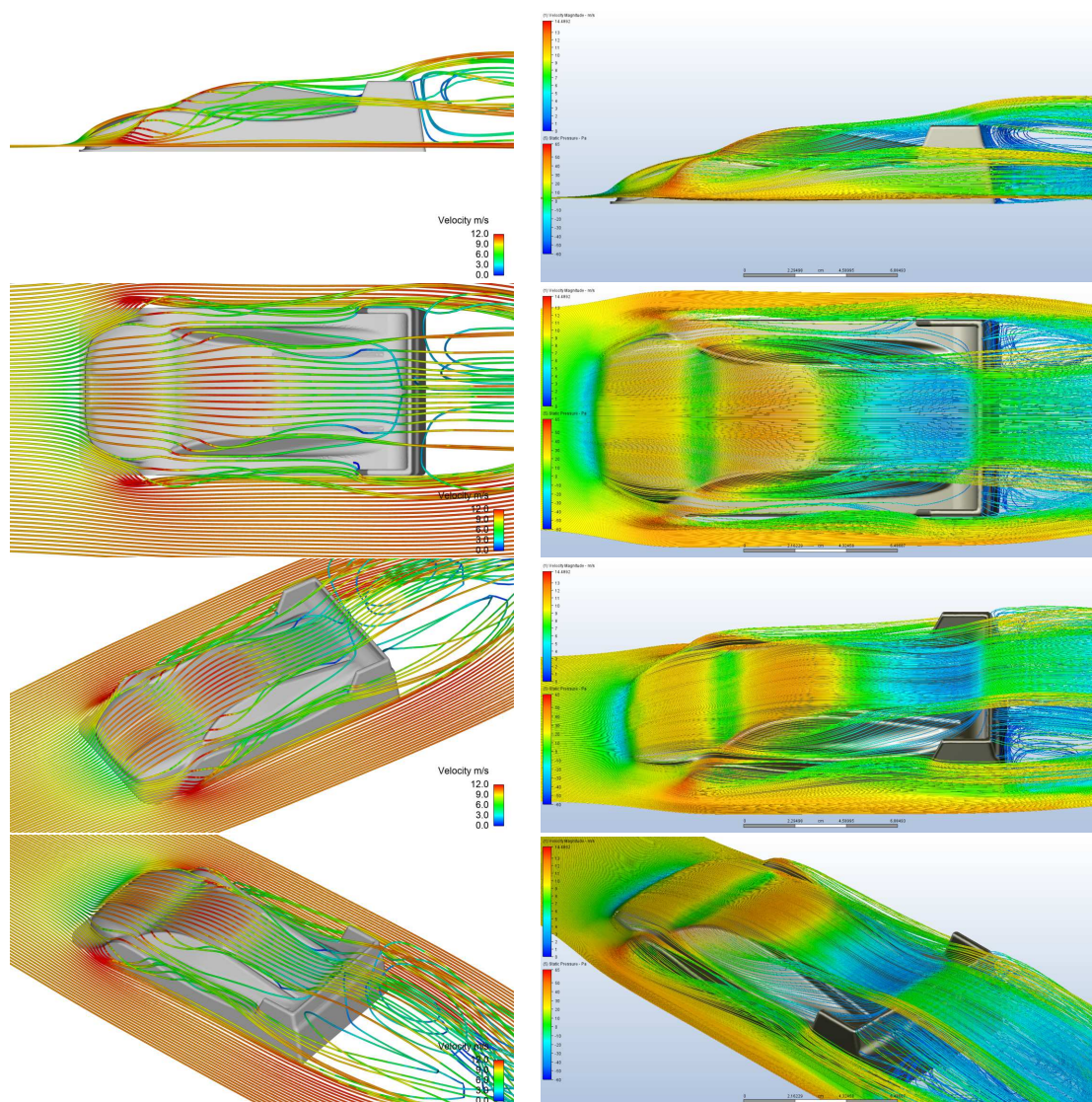
7.3.1.1 Porovnání tlaku působící na karoserii Na těchto obrázcích jsou barevně znázorněna místa s různým tlakem.



Obrázek 69: Porovnání simulace tlaku ze Siemens STAR CCM+ a Autodesk CFD Ultimate 2024

V porovnání těchto dvou odlišných simulací můžeme vidět, že jejich výsledky jsou velmi podobné. Na obou je znázorněna před kapoty jako místo s vysokým tlakem. Na karoserii vzniká v místě střechy podtlak z důvodu jejího zahnutí. Podobný jev je i u běžných osobních aut. Dále následuje přítlačný spoiler, na kterém také působí vyšší tlak. Tento tlak způsobuje přítlak a přitlačení modelu k dráze.

7.3.1.2 Porovnání proudnic okolo modelu Na uvedených obrázcích můžeme vidět znázorněné proudnice vzduchu. Barevně jsou rozlišeny různé rychlosti proudění.



Obrázek 70: Porovnání simulací ze Siemens STAR CCM+ a Autodesk CFD Ultimate 2024

U znázornění proudnic můžeme vidět velmi podobně nasimulované rychlosti proudění. U obou simulací se vzduch zrychluje v oblasti střechy, což tvoří podtlak, jak je možné vidět na předchozích obrázcích. Dále je možné vidět výrazné zpomalení vzduchu u přítláčného spoileru, což je místo, kde je vytvářeno velké množství přítlaku.

Při porovnání simulací vytvořených Siemens STAR CCM+ a Autodesk CFD Ultimate 2024 bylo proudění vzduchu velmi podobné a tudíž se simulace dají považovat přesné a tedy i fyzikálně správné.

7.3.2 Číselné zpracování výsledků CFD-simulací

Číselné výsledky jsem zpracoval do tabulky a následně do grafické podoby. Potřebné výpočty jsem spočítal dle příslušných vzorců.

Pro výpočet koeficientu odporu jsem využil vztah:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot v^2 \cdot A$$

Tabulka 11: Označení veličin [13]

F_d	Aerodynamická odporová síla
ρ	Hustota vzduchu
C_d	Součinitel odporové síly
v	Relativní rychlosti vzduchu vůči vozu
A	Čelní plocha vozu [m^2]

Pro výpočet koeficientu vztlaku je vzorec upraven takto:

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_z \cdot v^2 \cdot A$$

Tabulka 12: Označení veličin [13]

F_z	Aerodynamická vztlaková síla
ρ	Hustota vzduchu
C_z	Součinitel vztlakové síly
v	Relativní rychlosti vzduchu vůči vozu
A	Čelní plocha vozu [m^2]

Tabulka 13: Popis veličin z CFD-simulací [13]

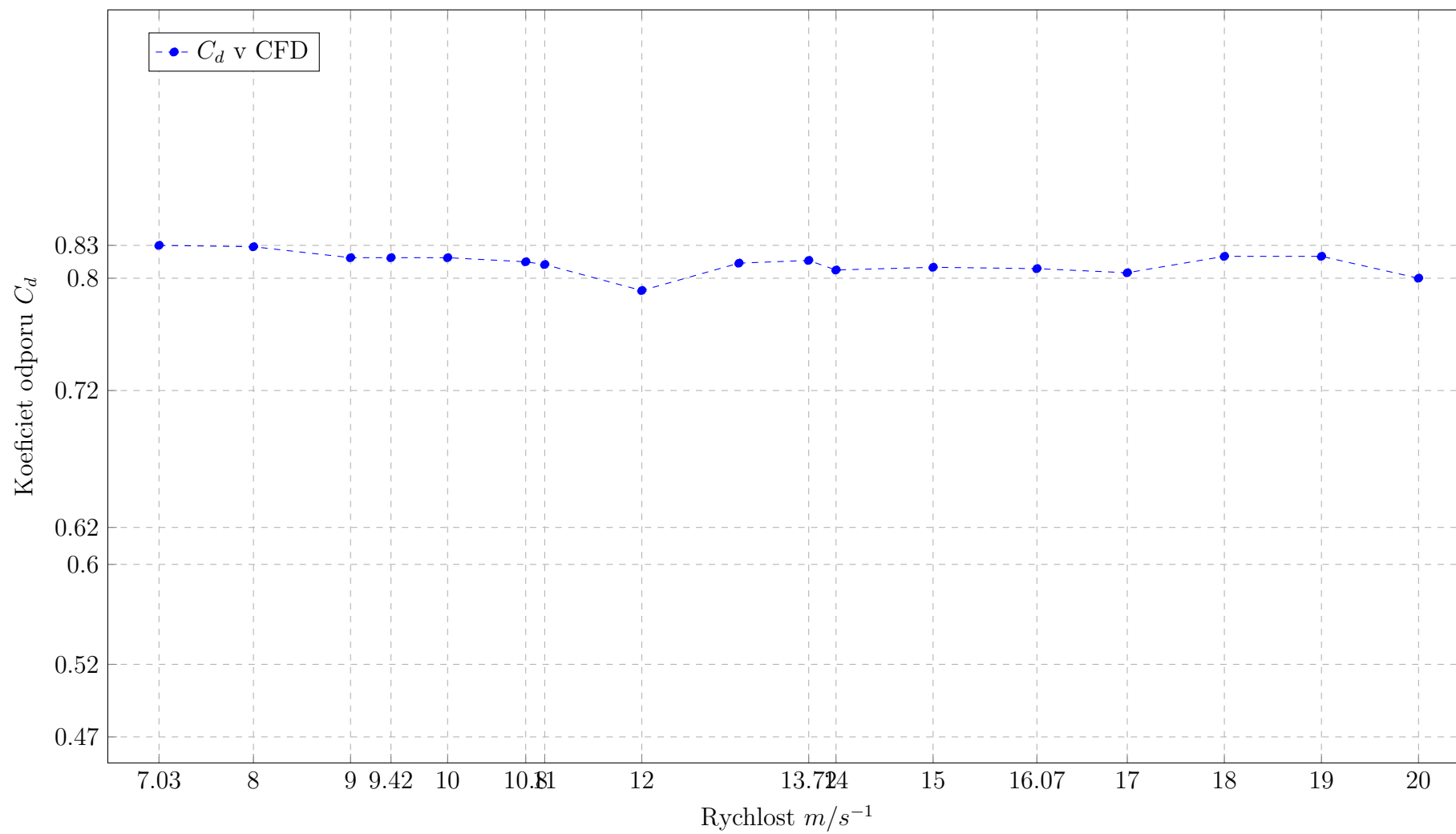
$F_x[N]$	Odporová síla
$F_y[N]$	Boční síla
$F_z[N]$	Vztlaková síla
$rx[m]$	Působíště síly v rovině vozovky
$ry[m]$	Působíště síly v rovině vozovky
$rz[m]$	Působíště síly v rovině vozovky
cD	Koeficient odporu
cZ	Koeficient vztlaku

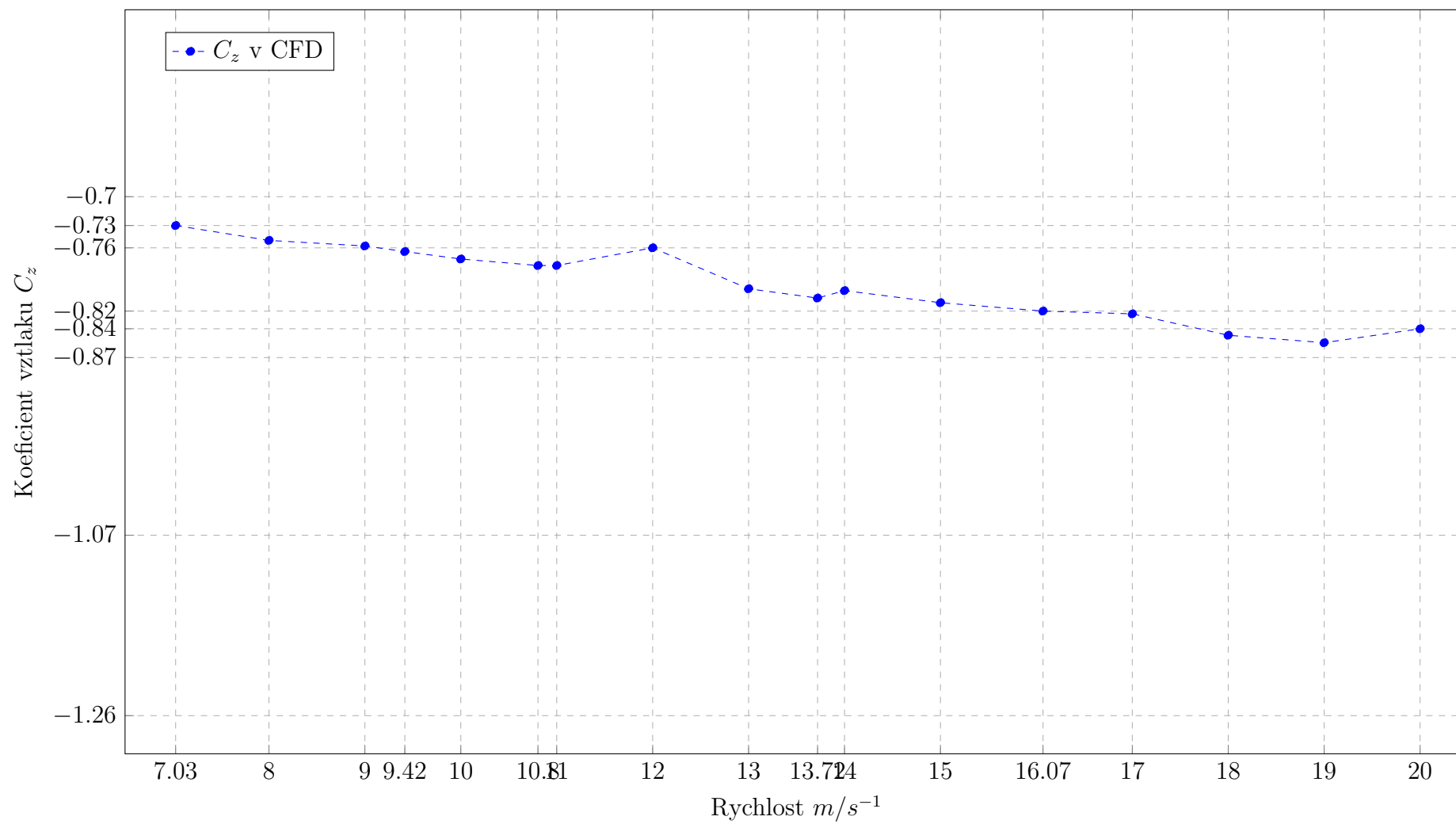
Vstupy z Autodesk CFD - Wall Calculator										
	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final
Fx [N]	0,000189159	0,000234549	0,000273548	0,000277101	0,00032269	0,000439612	0,000470731	0,000668369	0,000608379	
Fy [m]	0,0713536	0,0923538	0,115826	0,126842	0,142937	0,166198	0,171934	0,199923	0,240456	
Fz [m]	-0,0630821	-0,0835596	-0,106589	-0,117678	-0,134089	-0,157868	-0,163635	-0,189978	-0,235912	
Mx [Nm]	-0,00751137	-0,00990085	-0,0125046	-0,0137938	-0,0156893	-0,0184057	-0,019046	-0,0217363	-0,0273984	
My [Nm]	3,20E-07	-1,31E-08	-1,23E-06	-1,82E-06	-1,93E-06	-2,74E-07	7,05E-07	6,33E-06	3,98E-07	
Mz [Nm]	-2,02E-05	-2,49E-05	-2,80E-05	-2,89E-05	-3,39E-05	-4,56E-05	-4,84E-05	-6,91E-05	-6,18E-05	
Vstupy z Autodesk CFD - Wall Calculator										
Vstupy geometrie										
čelní plocha [m2]	0,002898	0,002898	0,002898	0,002898	0,002898	0,002898	0,002898	0,002898	0,002898	0,002898
přední osa x [m]	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
zadní osa x [m]	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
vozovka z [m]	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002
Referenční hodnoty										
rychlost [m/s]	7,0273	8	9	9,41661	10	10,8044	11	12	13	
hustota [kg/m3]	1,20473	1,20473	1,20473	1,20473	1,20473	1,20473	1,20473	1,20473	1,20473	1,20473
Přepočet										
působíště síly v rovině vozovky										
rx [m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ry [m]	0,121335168	0,120698969	0,119489366	0,119372219	0,119138587	0,118694707	0,118494625	0,116519523	0,118176744	
rz [m]	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002
Fz přední osa	0,000935836	0,000648951	-0,000604756	-0,000820844	-0,0012834	-0,0022896	-0,002737022	-0,007346822	-0,0047792	
Fz zadní osa	-0,064017936	-0,084208551	-0,105984244	-0,116857156	-0,1328056	-0,1555784	-0,160897978	-0,182631178	-0,2311328	
cD - CFD	0,828	0,827	0,819	0,819	0,819	0,816	0,814	0,795	0,815	
cZ - CFD	-0,732	-0,748	-0,754	-0,760	-0,768	-0,775	-0,775	-0,756	-0,800	
Vztlaková síla [N]	-0,0630821	-0,0835596	-0,106589	-0,117678	-0,134089	-0,157868	-0,163635	-0,189978	-0,235912	
Odporová síla [N]	0,0713536	0,0923538	0,115826	0,126842	0,142937	0,166198	0,171934	0,199923	0,240456	

Obrázek 71: Získaná data z CFD simulací

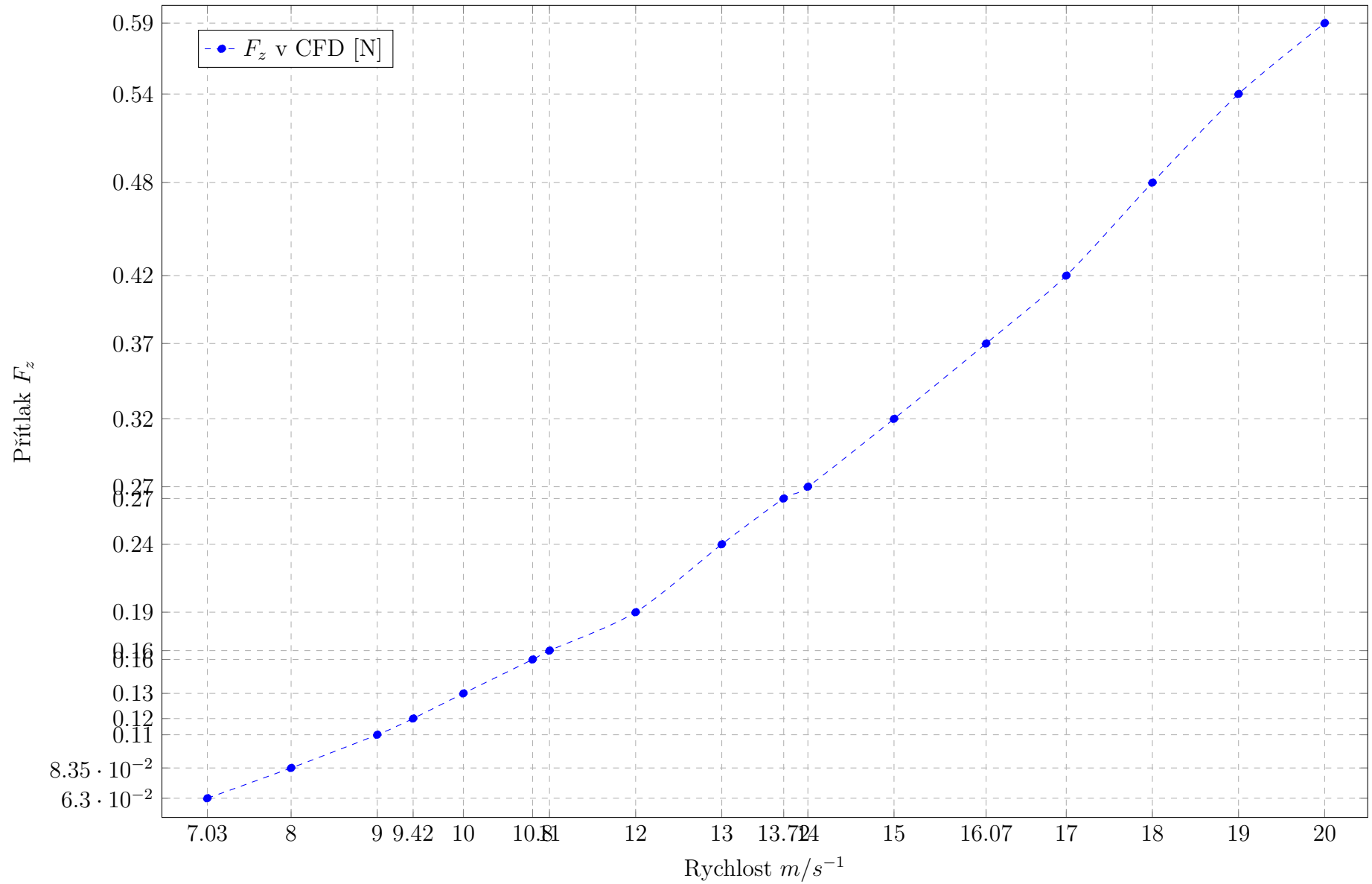
Vstupy z Autodesk CFD - Wall Calculator								
	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final	Beran_83.2_final
Fx [N]	0,000565971	0,000744927	0,000788482	0,000936259	0,00105659	0,00109062	0,00147582	0,001414
Fy [m]	0,268414	0,277184	0,31901	0,365753	0,407833	0,463868	0,516976	0,561642
Fz [m]	-0,266156	-0,274511	-0,320252	-0,371399	-0,417162	-0,480569	-0,5409	-0,588934
Mx [Nm]	-0,0309145	-0,0317235	-0,0370326	-0,0428757	-0,048016	-0,05569	-0,0626555	-0,0674824
My [Nm]	2,01E-06	1,50E-06	4,19E-07	1,91E-06	4,45E-06	4,42E-06	7,63E-06	3,70E-06
Mz [Nm]	-5,78E-05	-7,64E-05	-8,02E-05	-9,33E-05	-1,06E-04	-1,09E-04	-1,50E-04	-1,37E-04
Vstupy z Autodesk CFD - Wall Calculator								
Vstupy geometrie								
čelní plocha [m2]	0,002898	0,002898	0,002898	0,002898	0,002898	0,002898	0,002898	0,002898
přední osa x [m]	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
zadní osa x [m]	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
vozovka z [m]	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002
Referenční hodnoty								
rychlost [m/s]	13,7191	14	15	16,0691	17	18	19	20
hustota [kg/m3]	1,20473	1,20473	1,20473	1,20473	1,20473	1,20473	1,20473	1,20473
Přepočet								
působíště síly v rovině vozovky								
rx [m]	0	0	0	0	0	0	0	0
ry [m]	0,118168773	0,11758315	0,117628055	0,117413364	0,117056841	0,117813958	0,117747184	0,116491294
rz [m]	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002
Fz přední osa	-0,005415467	-0,007371689	-0,008440222	-0,010674156	-0,013641933	-0,011672711	-0,013539422	-0,022959956
Fz zadní osa	-0,260740533	-0,267139311	-0,311811778	-0,360724844	-0,403520067	-0,468896289	-0,527360578	-0,565974044
cD - CFD	0,817	0,810	0,812	0,811	0,808	0,820	0,820	0,804
cZ - CFD	-0,810	-0,802	-0,815	-0,824	-0,827	-0,850	-0,858	-0,843
Vztlaková síla [N]								
Vztlaková síla [N]	-0,266156	-0,274511	-0,320252	-0,371399	-0,417162	-0,480569	-0,5409	-0,588934
Odporová síla [N]	0,268414	0,277184	0,31901	0,365753	0,407833	0,463868	0,516976	0,561642

Obrázek 72: Získaná data z CFD simulací

G1: Koeficient odporu C_d při různých rychlostech

G2: Koeficient vztlaku C_z při různých rychlostech

G3: Znázornění přítlaču při různých rychlostech naměřených v CFD simulacích



Tabulky na stranách 64 a 65 na sebe vzájemně navazují a jsou zpracovány do jednotlivých grafů.

První graf „G1: Koeficient odporu C_d při různých rychlostech“ znázorňuje vypočítané hodnoty koeficientu odporu z dat CFD-simulací při různých rychlostech proudění vzduchu. Rychlost proudění vzduchu se pohybovala v rozmezí 7 m/s - 20 m/s . Hodnota koeficientu odporu se pohybuje v rozmezí $0,79$ - $0,83$.

Druhý graf „G2: Koeficient vztlaku C_z při různých rychlostech“ ukazuje jak se mění koeficient vztlaku v závislosti na rychlosti proudění vzduchu. Data opět vycházejí z CFD-simulací pro rychlost proudění vzduchu 7 m/s - 20 m/s .

Třetí graf „G3: Znázornění přítlaku při různých rychlostech“ ukazuje změnu přítlaku v závislosti na rychlosti proudění vzduchu v rychlostech 7 m/s - 20 m/s .

Z grafu vyplývá, že čím je vyšší rychlost proudění, tím je přítlak vyšší.

Tabulka 14: Přepočet síly na hmotnost v závislosti na rychlosti

$v[m/s]$	7 m/s	8 m/s	9 m/s	10 m/s	11 m/s	12 m/s	13 m/s
$g - force$	6,432	8,520	10,869	13,6732	16,686	19,372	24,056

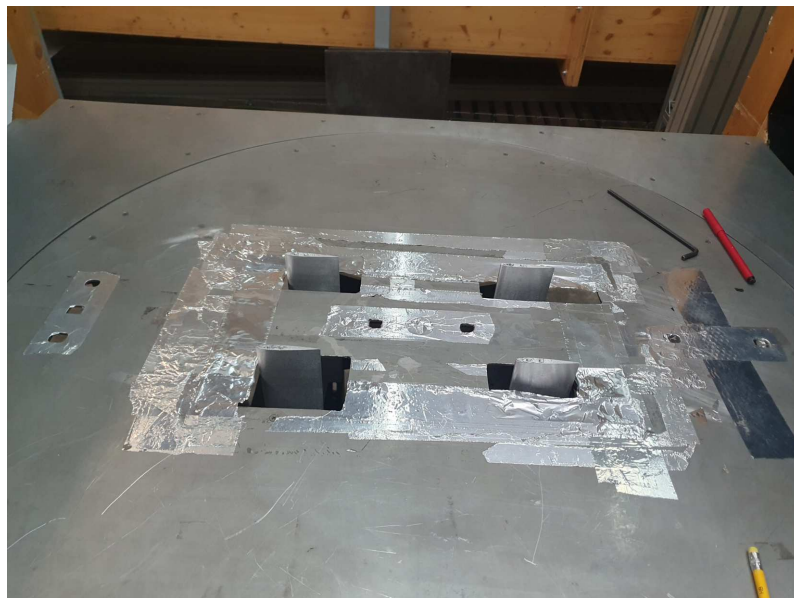
$v[m/s]$	14 m/s	15 m/s	16 m/s	17 m/s	18 m/s	19 m/s	20 m/s
$g - force$	27,992	32,656	37,872	42,538	49,004	55,156	60,054

Tabulka ukazuje jakou hmotností je tlačeno na karoserii modelu při jednotlivých rychlostech. Vlastní hmotnost modelu auta je 75 g . Z tabulky vyplývá, že se stoupající rychlostí je hmotnost, kterou je tlačeno na karoserii větší.

7.4 Testování v aerodynamickém tunelu ČVUT

Dne 29. listopadu 2023 jsem měl možnost testovat svůj návrh karoserie v aerodynamickém tunelu na Strojní fakultě ČVUT pod vedením pana Ing. Jakuba Suchého.

Aerodynamický tunel na FS ČVUT je uzavřený s otevřeným měřicím prostorem, což umožňuje snadné sledování měřeného objektu. Podrobněji je aerodynamický tunel popsán v teoretické části v kapitole 3.2.



Obrázek 73: Měřicí body v aerodynamickém tunelu

Tento aerodynamický tunel měří data z proudění vzduchu pomocí čtyř bodů, na které je model připevněn. Jednotlivé body mají aerodynamický tvar, tak, aby co nejméně ovlivňovaly proudění vzduchu okolo měřeného modelu.



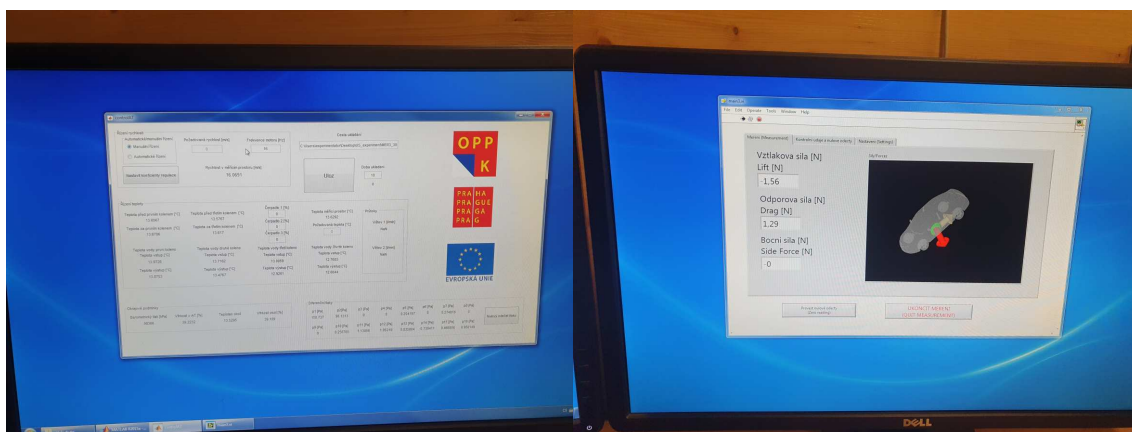
Obrázek 74: Připevnění modelu v aerodynamickém tunelu



Obrázek 75: Moje karoserie v aerodynamickém tunelu

Model, který jsem měřil v aerodynamickém tunelu, byl z důvodu charakteristiky tunelu zvětšen na 200 % reálné velikosti. V tomto okamžiku platí vztah, že při dvojnásobné velikosti oproti reálné velikosti je potřeba, aby na model proudil vzduch v poloviční rychlosti, než by proudil ve skutečné velikosti.

Bohužel kvůli charakteristice a schopnostem tunelu a s jakou přesností je schopen měřit takto nízké rychlosti, jsem nemohl dodržet poloviční proud vzduchu, což by znamenalo od 5 – 10 m/s . Nakonec jsem měřil v rychlostech 7 – 16 m/s . Pro měření dat byl využíván software NI 9205.



Obrázek 76: Ovládací a měřicí software aerodynamického tunelu NI 9205

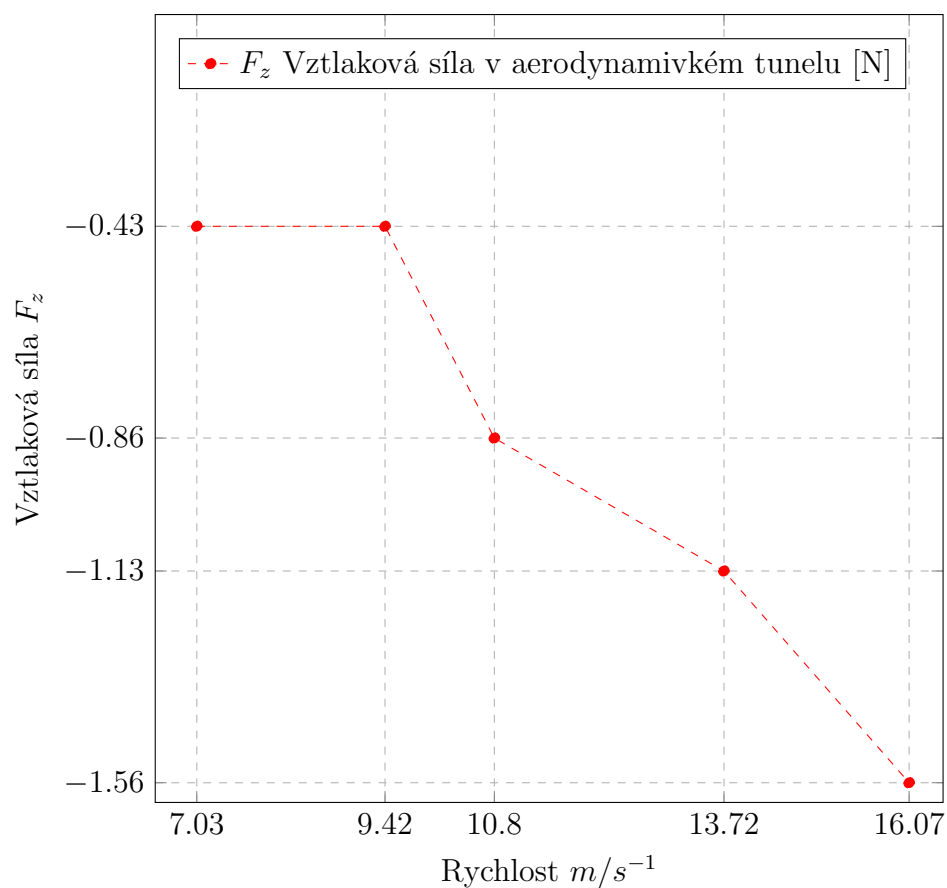
7.4.1 Konečné výsledky z aerodynamického tunelu

Data z měření v aerodynamickém tunelu jsem zaznamenal do příslušné tabulky a následně graficky zpracoval.

Tabulka 15: Naměřené hodnoty v aerodynamickém tunelu Strojní fakulty ČVUT

Frekvence motoru [Hz]	8	10	12	14	16
Rychlost v měřicím prostoru [m/s^{-1}]	7,0273	9,41661	10,8044	13,7191	16,0691
Vztlaková síla [N]	-0,43	-0,43	-0,86	-1,13	-1,56
Odporová síla [N]	0,16	0,32	0,48	0,81	1,29
Boční síla [N]	0	0	0	0	0
Teplota měřicí prostor [°C]	13,5368	13,5626	13,5741	13,5971	13,6292
Teplota před prvním kolenem [°C]	13,5154	13,5632	13,5785	13,6112	13,6567
Teplota za prvním kolenem [°C]	13,5675	13,595	13,6097	13,6352	13,6706
Teplota před třetím kolenem [°C]	13,4811	13,5214	13,5299	13,5464	13,5767
Teplota za třetím kolenem [°C]	13,5105	13,5552	13,5669	13,5863	13,617
Teplota okolí [°C]	13,4982	13,4808	13,5087	13,5295	13,5295
Barometrický tlak [kPa]	98361,3	98364,1	98366	98366	98366
Vlhkost v AT [%]	39,9127	39,3972	39,3845	39,4098	39,2232
Vlhkost okolí [%]	39,3197	39,1412	39,173	39,1188	39,189

G4: Znázornění vztlakové síly při různých rychlostech naměřených v aerodynamickém tunelu

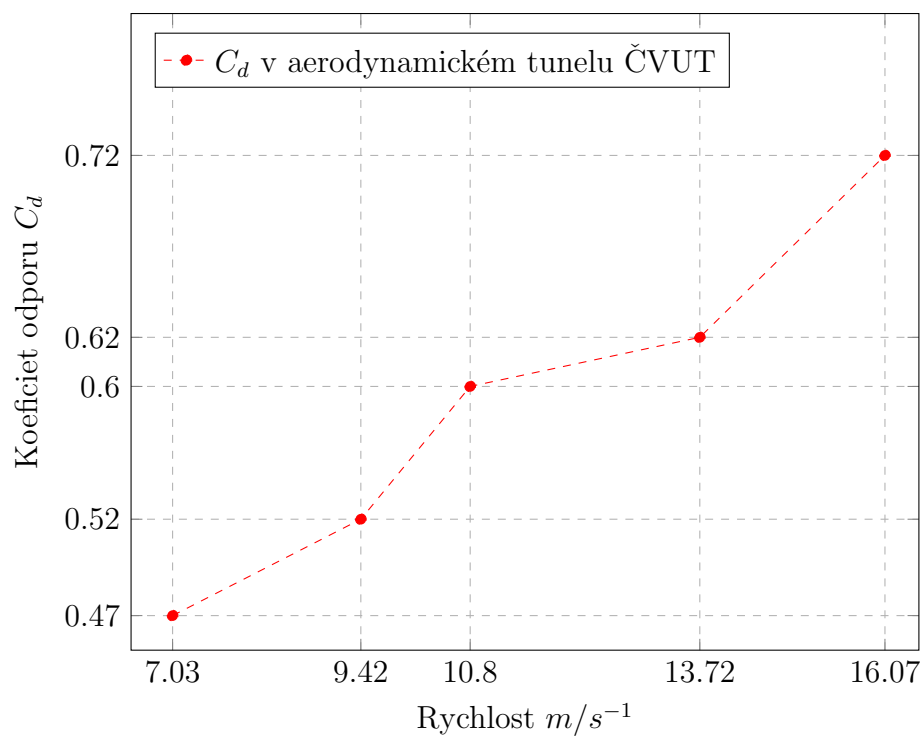


Z těchto naměřených hodnot jsem vypočítal koeficient odporu a vztlakové síly. K výpočtu jsem použil vzorce z kapitoly 7.3.2, zapsal do tabulky a zpracoval do grafu

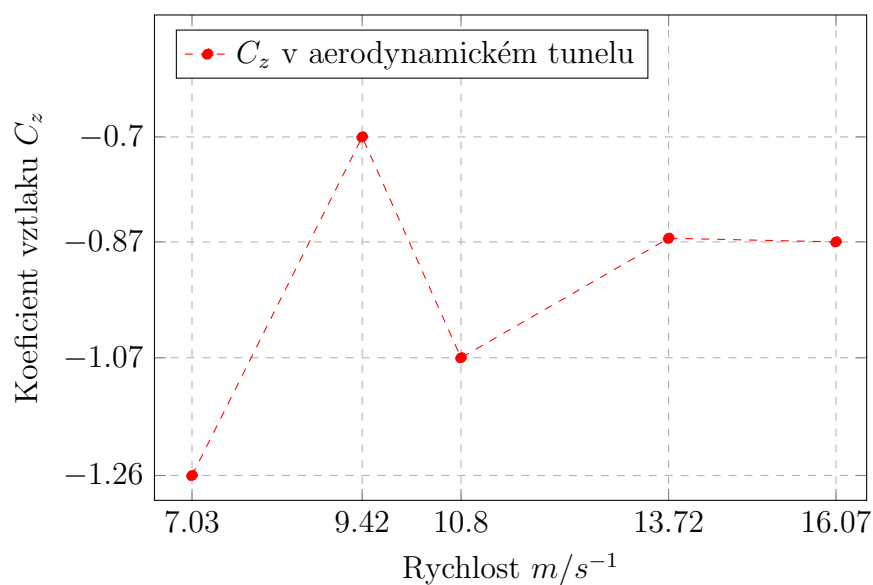
Tabulka 16: Vypočítaný koeficient odporu a vztlaku z aerodynamického tunelu

Rychlost vzduchu m/s^{-1}	7,0273	9,41661	10,8044	13,7191	16,0691
Koeficient odporu C_d	0,469	0,522	0,595	0,622	0,722
Koeficient vztlaku C_z	-1,259	-0,701	-1,065	-0,868	-0,874

G5: Koeficientu odporu C_d při různých rychlostech



G6: Koeficientu vztlaku C_z při různých rychlostech



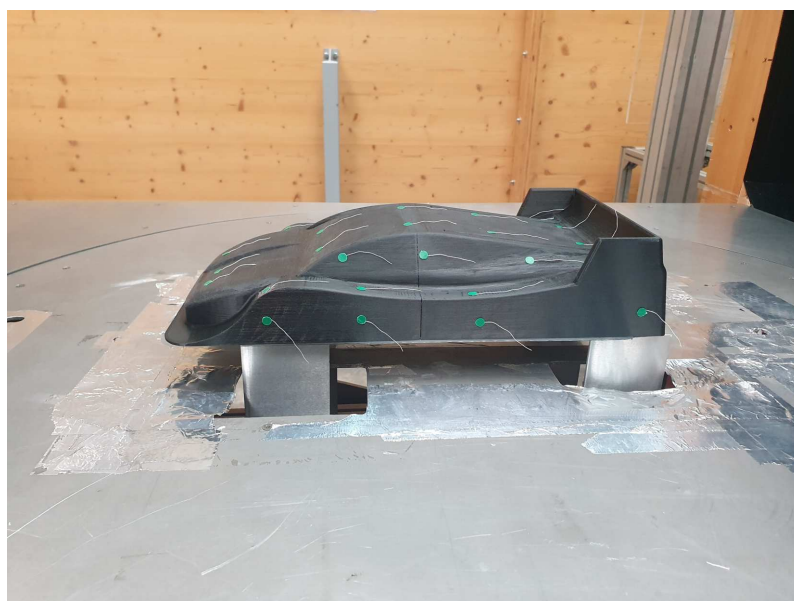
7.4.2 Vizuální zhodnocení proudění vzduchu okolo karoserie

V aerodynamickém tunelu jsem chtěl znázornit proudění vzduchu okolo modelu. Pro vizualizaci proudění jsem si vybral způsob, který je také využíván u Škody Auto v rámci testování v aerodynamickém tunelu. Principem je připevnění bavlnek na určitá místa na karoserii, kde chceme sledovat proudění vzduchu.

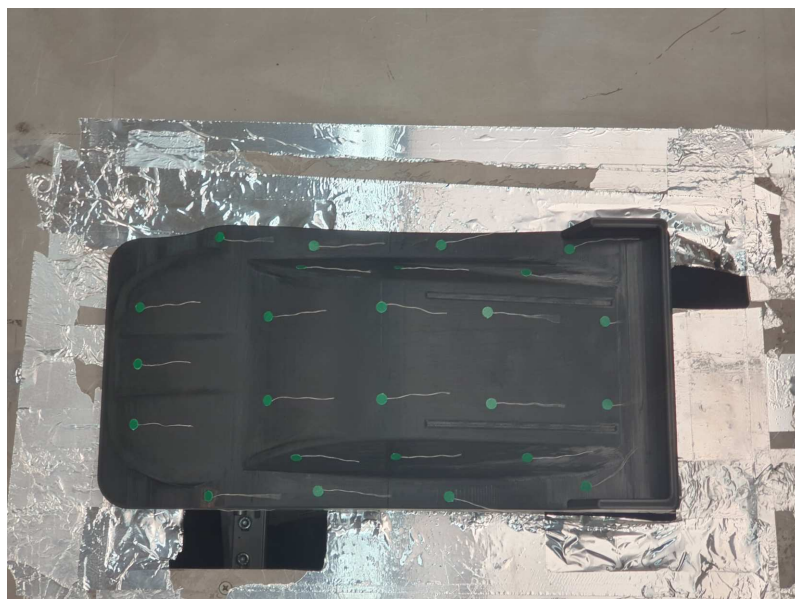


Obrázek 77: Škoda Enyaq s připevněnými bavlnkami pro znázornění proudění vzduchu [22]

Místa pro upevnění bavlnek jsem konzultoval s panem Ing. Vojtěchem Jakubcem, tak aby bavlnky skutečně reflektovaly proudění vzduchu okolo modelu. Bavlnky jsem rozmístil následovně. Tři bavlnky byly umístěny na přední kapotě, dvě na čelním okně, dvě na vrcholu střechy, dvě ve střední části střechy, dvě těsně před zadním spoilerem, tři na každé straně boku kabiny, jednu na každou stranu před přední blatník, tři na bok vedle kabiny a čtyři na každé straně podél modelu.

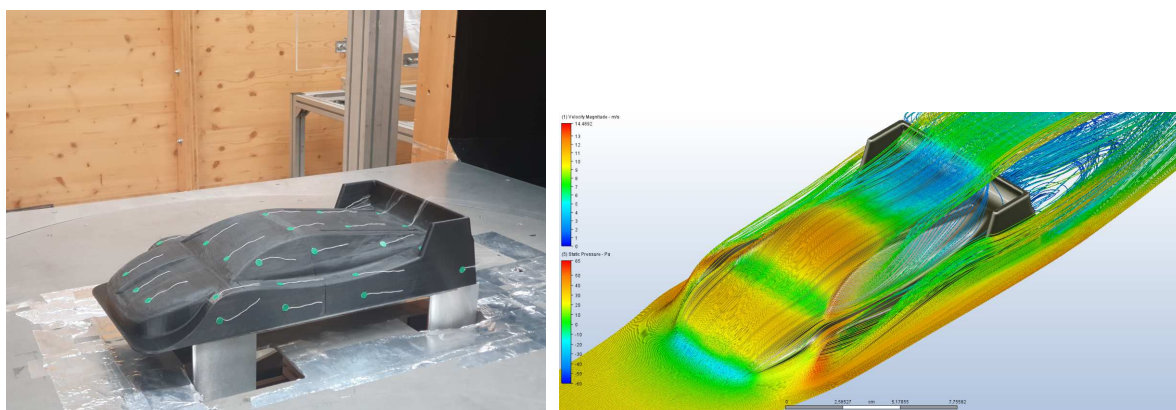


Obrázek 78: Umístění bavlnek na můj model



Obrázek 79: Vrchní pohled na model testovaný v aerodynamickém tunelu

Na obrázku z aerodynamického tunelu je možné vidět, že víření vzduchu vzniká převážně před přítláčným spoilerem.

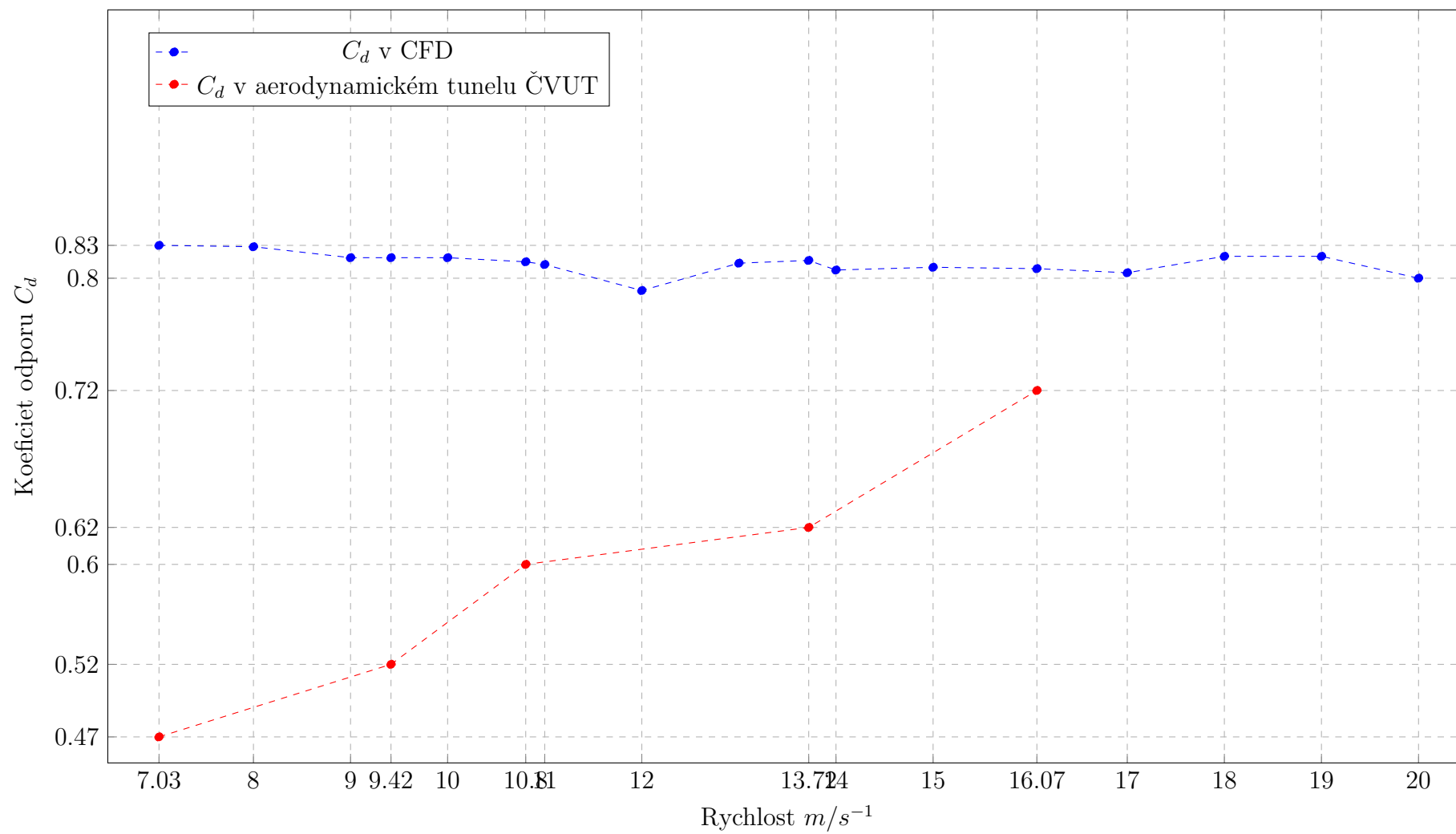


Obrázek 80: Porovnání proudění z CFD simulací a aerodynamického tunelu

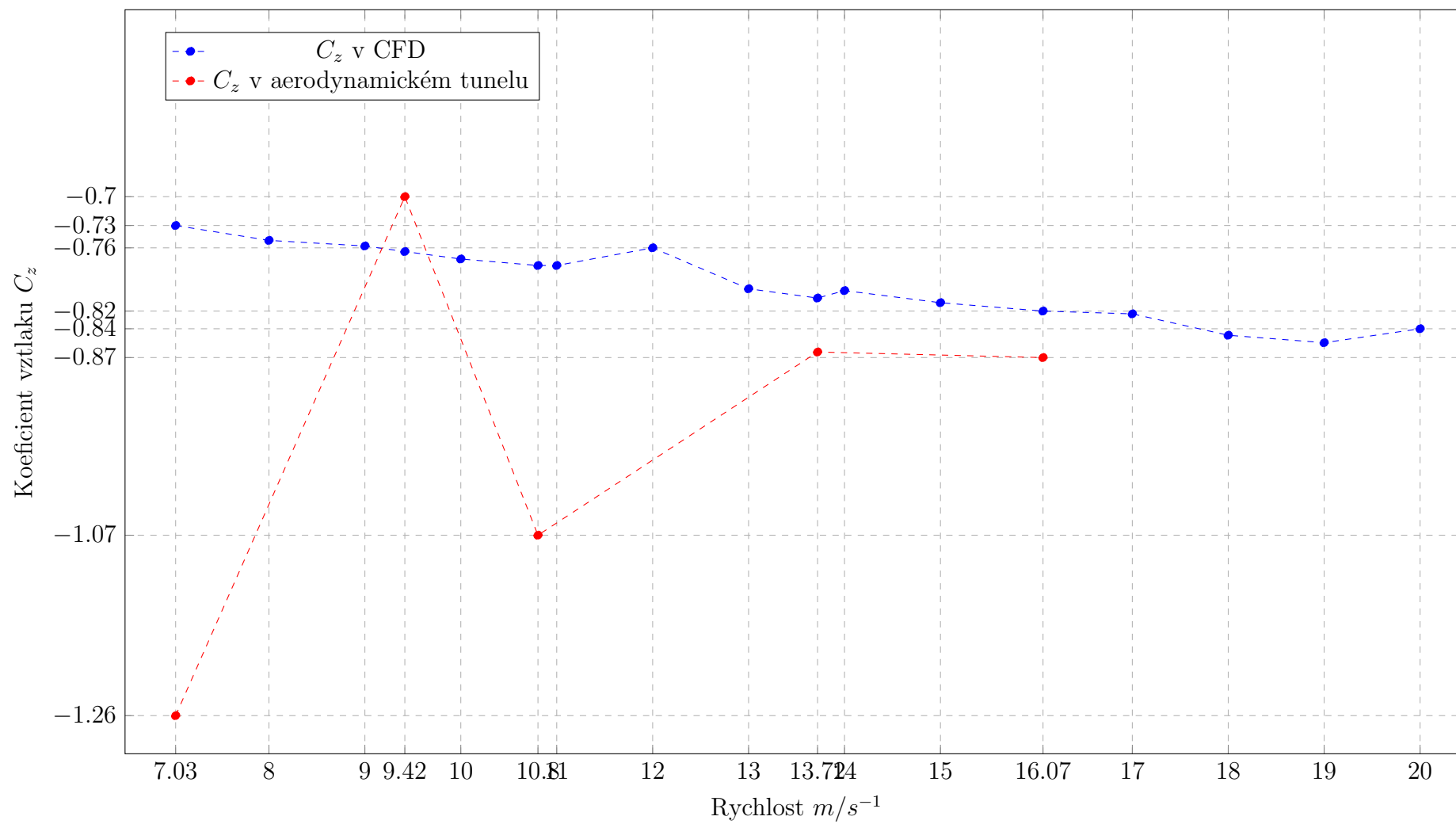
Obrázek ukazuje proudění vzduchu okolo modelu v aerodynamickém tunelu za pomoci bavlnek a CFD simulací. Na obrázcích je vidět, že si jsou velmi podobné, je zde vidět velmi podobné směřování vzduchu mírně vzhůru na krajích v zadní části před spoilerem. Zároveň je i proudění na stranách modelu velmi podobné, a to tak že první bavlnka znázorňuje, že vzduch proudí lehce směrem vzhůru, což je vidět i na CFD simulacích.

7.5 Porovnání výsledků z CFD simulací a aerodynamického tunelu konečného návrhu karoserie Beraq

Data z CFD simulací a data naměřená v aerodynamickém tunelu jsem porovnal mezi sebou. Vytvořil jsem společný graf pro koeficient C_d a koeficient C_z . Zjištěná a vypočítaná data jsem konzultoval s panem Ing. Vojtěchem Jakubcem. Data z aerodynamického tunelu se liší oproti CFD-simulacím zejména proto, že aerodynamický tunel FS ČVUT není schopen měřit v takto nízkých rychlostech s dostatečnou přesností. Rychlosti, ve kterých jsem prováděl měření se nacházejí na okraji měřícího rozsahu tohoto tunelu. To je důvod větší nepřesnosti. Optimální rychlost proudění vzduchu pro má měření je nad 13 m/s .

G7: Porovnání koeficientu odporu C_d při různých rychlostech

G8: Porovnání koeficientu vztlaku C_z při různých rychlostech



Oba grafy na předcházejících dvou stranách ukazují porovnání měření v aerodynamickém tunelu a výsledků vycházejících z CFD-simulací, které jsem prováděl. Tato data jsem konzultoval s Ing. Vojtěchem Jakubcem a požádal jej o vyjádření z jakého důvodu se naměřená data v nízkých rychlostech takto liší.

Vyjádření pana Ing. Vojtěcha Jakubce: „*Aerodynamický tunel nebo trať bývají navrženy na určitý rozsah rychlostí proudění. Pokud se měření provádí při nižší rychlosti proudění, nemusí být proudící vzduch v tunelu úplně v ideálním stavu (ve smyslu vyrovnané rychlosti a směru proudění v celém průřezu tunelu) a to může způsobovat ve finále odchylky v měřených silách. Nevyšší přesnosti měření sil dosaženo řekněme v horní polovině nebo třetině měřicího rozsahu. Velmi malé síly (u spodní hranice měřicího rozsahu) pak bývají zatíženy velkou relativní chybou.*“[32]

Z diskuse a komentářů pana Ing. Vojtěcha Jakubce vyplynulo, že graf „Porovnání koeficientu odporu C_d při různých rychlostech“ z měření na ČVUT je zajímavý z hlediska teorie mechaniky tekutin, z hlediska optimalizace tvaru karoserie není podstatný.

7.6 Společné prvky návrhu mé karoserie a ostatních aut

Moje karoserie si vzala za základ model Škoda Enyaq coupe iV. Proto také disponuje určitými charakteristickými rysy. Například celkový tvar vozidla nebo charakteristický prolis na přední kapotě, kterým disponují veškeré nové modely automobilky Škoda.



Obrázek 81: Porovnání tvaru mé karoserie a Škody Enyaq coupe iV



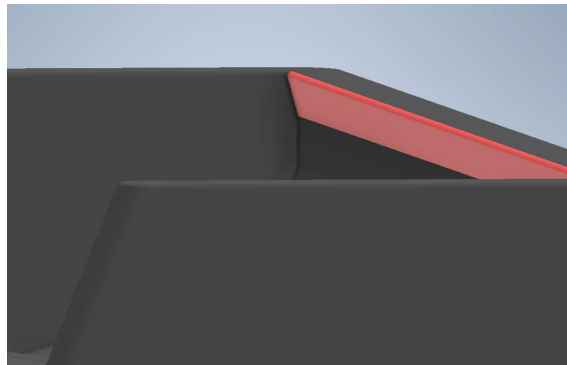
Obrázek 82: Má karoserie a model Škoda Enyaq coupe iV [25]

U návrhu předních blatníků jsem se inspiroval řešením, které využívá Toyota u svých závodních aut pro WRC - FIA World Rally Championship. Toyota toto aerodynamické řešení využívá již už roku 2018.



Obrázek 83: Má karoserie a Toyota GR YARIS Rally1 HYBRID pro rok 2024 [33]

Důležitým prvkem na mé karoserii je zadní spoiler, proto jsem se této oblasti podrobněji věnoval.



Obrázek 84: Zadní spoiler mé karoserie a přitlačné křídlo Škoda Fabia RS Rally2 [34]

Tento prvek na konci spoileru mého modelu je inspirovaný koncem přitlačného křídla na voze Škoda Fabia RS Rally2. O tomto jsem vedl krátkou diskusi s Ing. Lukášem Vojíkem odborníkem na aerodynamiku z Škoda Auto, který se také podílel na vývoji závodního speciálu Škoda Fabia RS Rally 2.

8 Výroba samotné karoserie pro slotracing

Před vlastním lisováním karoserie z lexanu je nutno provést řadu přípravných prací. Při návrhu karoserie je třeba myslet na její vyrobiteľnost. Karoserie nesmí mít žádné ostré hrany (mohou být zakřivené) a žádné převisy (kopyto nejde sundat). Konečný návrh karoserie je vytištěn jako 3D model na 3D tiskárně. Tento model pak vstupuje do celého procesu výroby až po závěrečného lisování samotné karoserie. Proces výroby má několik fází.



Obrázek 85: Vylisovaná karoserie Mercedes AMG C 63 DTM s nalepenými výlepkami oken [24]

8.1 Vytvoření formy s negativním obrazem

První fází výroby je vytvoření formy s negativním obrazem 3D modelu. Vytisknutý 3D model musí být povrchově upraven do hladka. K tomu jsem použil řadu brusných papírů různé hrubosti a plnič pórů Acryl spray. Několikrát byl 3D model nastříkán a přebroušen až do hladkého provedení. Hladkost 3D modelu je důležitá pro konečný vzhled vylisované karoserie z lexanu. Hladký vybroušený 3D model je připraven k odlití negativní formy. K odlití jsem použil zalévací silikonovou kaučukovou pastu



Obrázek 86: 3D výtisk pro výrobu negativní formy

Lukopren N1522 s katalyzátorem N. Při odlévání jsem postupoval dle návodu. V této fázi mě vedl člen našeho klubu SCRC Pardubice Radek Novák, který se odléváním dlouhodobě zabývá. Hmotu jsem postupně nalil do připraveného rámečku s 3D modelem tak, aby byl celý zalitý. Postupoval jsem velmi pomalu a pečlivě, aby na povrchu nevznikaly bublinky vzduchu. Hmotu jsem nechal 24 hodin zatuhnout dle návodu za pokojové teploty. Následující den jsem vytisknutý model vyjmul a měl tak připravenou formu s negativním obrazem mého modelu a mohl přistoupit k druhé fázi výroby.



Obrázek 87: Zalití 3D výtisku do Lukoprenu N1522



Obrázek 88: Vytvrzená negativní forma pro výrobu kopyta

8.2 Výroba kopyta pro lisování

Druhá fáze výroby je výroba kopyta pro vlastní lisování z lexanu. Pro tuto fázi je důležité mít připravenou negativní formu karoserie. Vlastní výroba kopyta probíhá nalitím hmoty do formy s negativním obrazem 3D modelu. Tuto část výroby pro mě zpracoval Jan Žemlička z klubu Attan Slot Racing Všejanya a velmi za to děkuji. Informace a detaily technologie výroby kopyta, použité materiály a podmínky jsou chráněny tímto klubem. Kopyto se z důvodu roztažnosti nikdy nedělá plné, a proto je ve spodní části kopyta otvor. Materiál, ze kterého je kopyto vyrobeno musí mít vysokou teplotní odolnost přesahující 250 °C a také dostatečnou tepelnou vydatnost. Po vylití do formy je velmi důležité kopyto nechat dostatečně dlouho vytvrdit. Tvrzení trvá nejméně 14 dní, než je možné přistoupit k lisování.



Obrázek 89: Kopyto v lisovacím stroji

8.3 Lisování karoserie z lexanu

Poslední fází výroby je vlastní lisování pomocí vytvořeného a správně vytvrzeného kopyta. Karoserie pro slotracing se lisují z lexanu. Lexan je polykarbonát a pro lisování se používá v tloušťkách 0,07 a 0,05 mm. Pro mé karoserie jsem zvolil tloušťku 0,07 mm. Karoserie je pevnější, méně se kroučí, a pro testování na závodní dráze je vhodnější. Vlastní lisování pro mě zpracoval Jan Žemlička z klubu Attan Slot Racing Všejaný a patří mu poděkování. Vlastní lisování probíhá s kopytem, které je nutné zahřát na teplotu 250°C. Před začátkem lisování je důležité udělat na kopytu dostatečný počet výpustných otvorů pro vzduch, který zůstává na povrchu karoserie po vakuovém lisování. Následně se lexan zahřeje na podobnou teplotu a pomalu se přikládá na kopyto za současného odsávání vzduchu zespodu. Výsledkem jsou jednotlivě vylišované karoserie o dané tloušťce.



Obrázek 90: Kopyto po vylišování karoserie



Obrázek 91: Vývoj výroby mé karoserie

Obrázek ukazuje proces vývoje mé karoserie od vytisknutého 3D modelu až po finální vylišovanou a barevně připravenou karoserii.

9 Testování mé karoserie na dráze

Poslední částí praktické části mé práce je ověření jízdních vlastností mnou navržené karoserie. Navrženou karoserii porovnávám s vybranými karoseriemi cestovních vozů, které se běžně používají při závodech slotracingu. Vybranými modely jsou MERCEDES AMG C63 DTM, Honda CUP a Peugeot 406 coupe BTC. Cílem je porovnání jízdních vlastností modelů s danými karoseriemi a zjištění nejvýhodnější karoserie pro závody slotracingu dle pravidel ISRA. Chci také zjistit, zda můj návrh karoserie může být konkurence schopný pro závody slotracingu.

9.1 Metodika a parametry měření

Měření a testovací jízdy v rámci této práce jsem prováděl na dvou odlišných drahách, kde se pravidelně konají závody ve slotracingu. První je dráha klubu AMC Nová Paka, druhá pak dráha klubu SCRC Pardubice. Pro každou dráhu byl sestaven model autíčka odpovídající charakteru dráhy a zmapovány parametry prostředí za kterých měření a testovací jízdy probíhaly. Vše jsem zaznamenal do přehledných tabulek a následně vyhodnotil.

9.1.1 Parametry měření

Měření jsem prováděl vždy se stejným modelem autíčka pro danou dráhu. Stejný podvozek, motor, kola a ostatní části modelu. Vše dle pravidel ISRA. Jen typ karoserie byl vždy jiný. Výška karoserie odpovídala pravidlům závodů ISRA. Parametry, za kterých jsem měření prováděl jsou rozděleny na parametry prostředí, parametry modelu autíčka, parametry nastavení ovladače a parametry dráhy.

9.1.2 Metodika vlastního měření

Pro vlastní měření s připraveným modelem (parametry modelu autíčka) a zvolenou karoserií (typy karoserií) jsem měřil zajetý čas modelu na jedno kolo. Předem jsem určil pořadí typů karoserií, se kterými bylo měření prováděno. Prvním typem je Honda, následuje Peugeot, poté Mercedes a nakonec můj návrh karoserie označený jako Beraq v předepsané výšce. Měření bylo prováděno vždy na modré drážce a ovladač jsem nastavil dle svých závodních zkušeností pro co nejplynulejší jízdu a snadné ovládání modelu na příslušné dráze. Nastavení ovladače ukazují parametry nastavení ovladače v příslušné tabulce pro každou zvolenou dráhu. Modrá drážka na obou drahách byla zvolena proto, že se jedná o jednu ze středových drah autodráhy a pro co nejplynulejší jízdu. Aby byla měření co nejpřesnější a nejvyrovnanější, nechal jsem autíčko několik kol tzv. zajet. Následně pak zaznamenával zajížděné časy na jedno kolo u patnácti za sebou zajetých kol bez přerušení. Časy na jedno kolo jsou měřeny a zaznamenávány automaticky pomocí závodního softwaru SPYTECH race manager v.1.5 BETA 6, který se součástí na obou slotracingových drahách. Měření jsem takto opakoval pro každý typ karoserie. Celkem byly

provedeny čtyři měřené jízdy na dráze v Nové Pace a čtyři v Pardubicích. Všechny jízdy na dané dráze jsem prováděl v jeden den po sobě.



Lane	Total	Best	Last laps
1	0		
2	0		
3	0		
4	0		
5	12	4.347	5.055 5.517 5.251 5.325 5.391 4.347 4.621
6	0		
7	0		
8	0		

Countdown to end: 00:03:07

SpyTech Race Manager
http://www.spytech.cz

Obrázek 92: SPYTECH race manager

9.1.3 Typy karoserií pro testování a vlastní měření

V rámci měření jsem použil běžně dostupné karoserie cestovních vozů pro slotracing pro porovnání s mým návrhem karoserie označeným jako Beraq. Při měření se měnil pouze typy karoserie dle předem určeného pořadí. První je karoserie Honda, následuje Peugeot, pak Mercedes a poslední můj návrh pod označením Beraq ve výšce předepsané mezinárodními pravidly ISRA. Toto platilo pro obě dráhy, kde jsem prováděl měření a testování.

Tabulka 17: Jednotlivé měřené karoserie

Typy Karoserií	označení výrobce	výrobce
Honda CUP	HONDA CUP 078	SLOT-BPA
Peugeot 406 Coupe BTC	P406BTC 054	SLOT-BPA
Mercedes AMG C63 DTM	Mercedes AMG C63 DTM	Attan slot-racing
Má karoserie	Beraq	(Attan slot-racing)

Vlastní karoserie je vyrobena z polykarbonátu, který je uváděn pod názvem LEXAN. Tloušťka materiálu je 0,07 mm. Karoserie jsou vyráběny lisováním dle příslušné formy. Následně jsou stříkány speciálními barvami pro LEXAN. Použita je barva bílá PS-1 white a barva oranžová PS-24 fluorescent orange, TAMIYA COLOR – Tamiya America, Made in Japan.



Obrázek 93: Jednotlivé měřené karoserie, Zleva: Honda CUP, Peugeot 406 coupe BTC, Mercedes AMG C63 DTM, Beraq

9.1.4 Parametry modelu autíčka

Veškeré technické parametry modelu se řídí mezinárodními pravidly pro závody ISRA. Výška modelu je měřena jako výška horní hrany zadní části karoserie směrem k podložce. Šířka modelu 83 mm je měřena jako vnější hrana disků zadních kol. Veškerá měření jsem prováděl pomocí digitálního posuvného měřítka Filletta 0-100 mm/0,01 mm. Kola jsou gumové válce, které jsou na plastové disky nalepeny pomocí lepidla PATTEX Chemopren Extrém 50 ml pro namáhané spoje. Průměr kol je zvolen tak, aby světlost modelu – tj. vzdálenost mezi podvozkem auta při nasazených kolech a podložkou byla 0,5-0,6 mm. To zaručuje optimální jízdní vlastnosti modelu na dráze. Na příslušnou výšku jsou kola nabroušena brusku kol ILPE Products for SLOT and RC cars.

9.1.5 Zápis hodnot a výpočty

Hodnoty času $[t] = s$ za jednotlivá kola a za všechna proběhlá měření jsem pomocí automatického měřicího systému SPYTECH zaznamenal do příslušných tabulek dle typů karoserií a dle dráhy, kde bylo měření prováděno. Měření jsem prováděl na tři desetinná místa. Data z tabulek jsem přenesl do grafů. Následně jsem vypočítal průměrný čas t z naměřených hodnot u jednotlivých typů karoserií a dráhy, kde jsem měření prováděl. Vypočítána je také odchylka jednotlivých měření od průměru, kvadrát odchylky a směrodatná odchylka. Vše jsem zapsal do příslušných tabulek. Do závěrečné tabulky jsem shrnul všechna provedena měření a výpočty pro všechny typy karoserií. Data jsem utřídil a následně zpracoval do grafu. K veškerým výpočtům a jsem využil software Microsoft Office–EXCEL.

$$\bar{s}_x = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^k \Delta_n^2}{k(k-1)}} \Rightarrow \bar{s}_t = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{15} \Delta_n^2}{15(15-1)}}$$

Tabulka 18: Označení veličin

n	číslo měření
k	počet měření
$[t] = s$	naměřený čas
$\frac{\bar{t}}{s}$	průměrný čas z naměřených hodnot
$\frac{\Delta_n}{s}$	odchylka od průměru $\bar{t}$
$\frac{\Delta_n^2}{s^2}$	kvadrát odchylky od průměru $\bar{t}$
$\bar{s}_t$	vypočtená směrodatná odchylka

Pro výpočet směrodatné odchylky jsem použil uvedený vzorec a výsledek zaokrouhlil na tři desetinná místa.

9.2 Měření na dráze AMC Nová Paka

Pro první testování a měření jsem si zvolil dráhu klubu AMC Nová Paka. Na této dráze se konají závody ve slotracingu v několika kategoriích a v roce 2023 klub pořádal Mistrovství České republiky dětí a mládeže.

9.2.1 Parametry dráhy AMC Nová Paka

Parametry dráhy jsou popsány v tabulce. Po celou dobu měření byly tyto parametry konstantní.



Obrázek 94: Dráha AMC Nová Paka

Tabulka 19: Parametry dráhy pro měření AMC Nová Paka

Délka dráhy	26 m
Počet zatáček	6
Použitá drážka pro měření	Modrá
Napětí dráhy	14 V
Měřicí software	SPYTECH race manager v.1.5 BETA 6

9.2.2 Parametry prostředí

Parametry prostředí popisují prostředí v jakém jsem měření prováděl a po dobu měření byly tyto parametry konstantní.

Tabulka 20: Obecné parametry měření na autodráze AMC Nová Paka

Datum	17.1.2024
Teplota	22 °C
Vlhkost vzduchu	39 %
Dráha	AMC Nová Paka, U teplárny 1258, Nová Paka

9.2.3 Parametry modelu autíčka pro měření na dráze

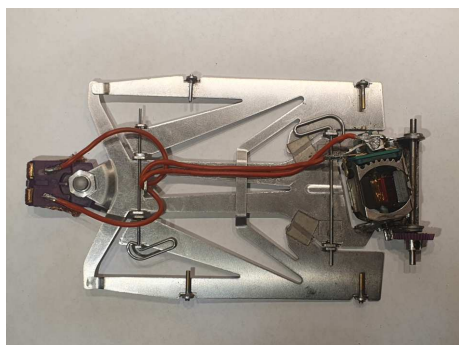
Parametry modelu autíčka popisují model, s nimž jsem prováděl testovací jízdy a měření. Model je sestaven dle mezinárodních pravidel ISRA pro seriál cestovních vozů z komponent uvedených v tabulce. Během měření nedošlo k žádné výměně součástí na modelu auta. V rámci měření jsem měnil pouze typy karoserií dle předem určeného pořadí.

Tabulka 21: Základní rozměry modelu autíčka [30]

Šířka modelu	Zadní kola – 83 mm
Výška modelu - karoserie	Zadní křídlo 35 mm

Tabulka 22: Parametry auta pro měření na dráze AMC Nová Paka

Podvozek	JKC43 Cheetah Aeolos
Motor	třída X-12 r.2021 – František Poledna
Převod	Cahoza 72P-44T-16°
Ložiska	kluzná zadní ložiska HRC
Pastorek	6 zubů na 1,5 mm hřídelka
Disky kol	CAHOZA – vnitřní průměr 10 mm, šíře 20 mm
Sběrače napětí	Cahoza Light – HRC
Vodítko	REDFOX – fialové – délka 27 mm
Pneumatiky	typ 4/15, výška pro světlost modelu 0,5-0,6 mm

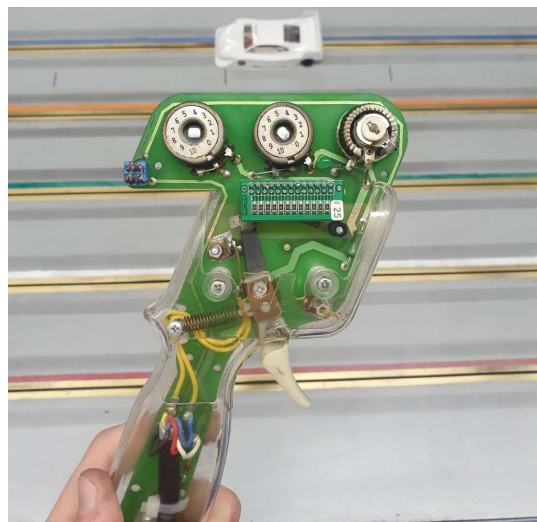
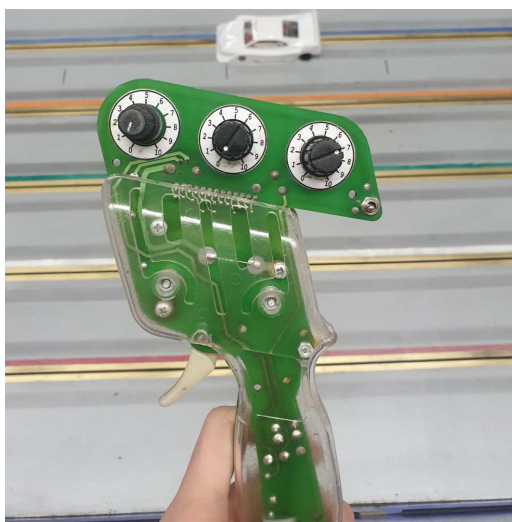


Obrázek 95: Model auta pro měření - AMC Nová Paka

9.2.4 Parametry ovladače pro měření

Tabulka 23: Nastavení ovladače modelu pro měření na dráze AMC Nová Paka

Odporový prvek	25 ohmů
Brzda	0
Zrychlení	0
Relé	vypnuto
CHOKE	7



Obrázek 96: Nastavení ovladače na dráhu AMC Nová Paka

Výrobce ovladače je JMS - Jiří Míček senior. Pro všechna měření je stejné nastavení ovládacích prvků a stejný odporový prvek.

9.3 Měření na dráze SCRC Pardubice

Pro druhé testování a měření jsem si zvolil moji domovskou dráhu klubu SCRC Pardubice. Na této dráze se konají závody ve slotracingu v několika kategoriích.

9.3.1 Parametry dráhy SCRC Pardubice

Parametry dráhy jsou popsány v tabulce. Po celou dobu měření byly tyto parametry konstantní.



Obrázek 97: Dráha SCRC Pardubice

Tabulka 24: Parametry dráhy pro měření SCRC Pardubice

Délka dráhy	39 m
Počet zatáček	10
Použitá drážka pro měření	Modrá
Napětí dráhy	13,13 V
Měřicí software	SPYTECH race manager v.1.5 BETA 6

9.3.2 Parametry prostředí

Parametry prostředí popisují prostředí, v jakém jsem měření prováděl a po dobu měření byly tyto parametry konstantní.

Tabulka 25: Obecné parametry měření na autodráze SCRC Pardubice

Datum	27.1.2024
Teplota	18 °C
Vlhkost vzduchu	63 %
Dráha	SCRC Pardubice, Erno Košťála 991, Pardubice

9.3.3 Parametry modelu autíčka pro měření na dráze

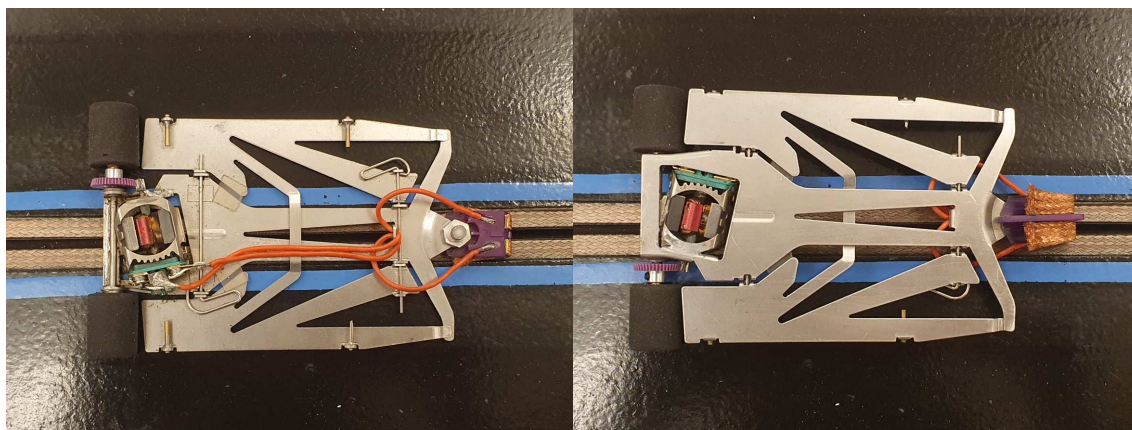
Parametry modelu autíčka popisují model, s nimž jsem prováděl testovací jízdy a měření. Model je sestaven dle mezinárodních pravidel ISRA pro seriál cestovních vozů z komponent uvedených v tabulce. Během měření nedošlo k žádné výměně součástek na modelu auta. V rámci měření jsem měnil pouze typy karoserií dle předem určeného pořadí.

Tabulka 26: Základní rozměry modelu autíčka [30]

Šířka modelu	Zadní kola – 83 mm
Výška modelu - karoserie	Zadní křídlo 35 mm

Tabulka 27: Parametry auta pro měření na dráze SCRC Pardubice

Podvozek	JKC43 4" Cheetah Aeolos
Motor	třída X-12 r.2021 – František Poledna
Převod	Cahoza 72P-42T-16°
Ložiska	kluzná zadní ložiska HRC
Pastorek	7 zubů na 1,5 mm hřídelka
Disky kol	CAHOZA – vnitřní průměr 10 mm, šíře 20 mm
Sběrače napětí	Cahoza Light – HRC
Vodítko	REDFOX – fialové – délka 27 mm
Pneumatiky	typ LMP1, výška pro světlost modelu 0,5-0,6 mm

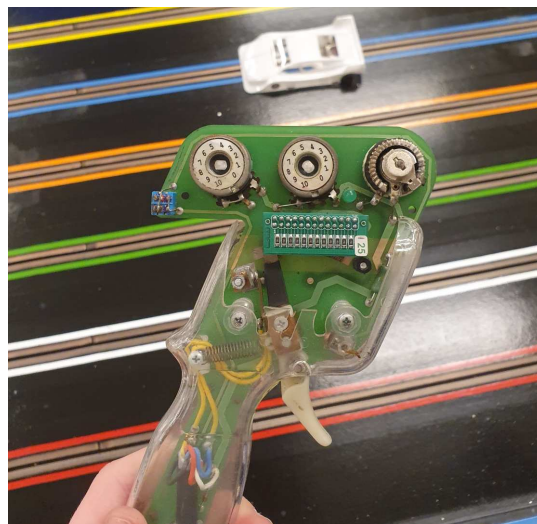
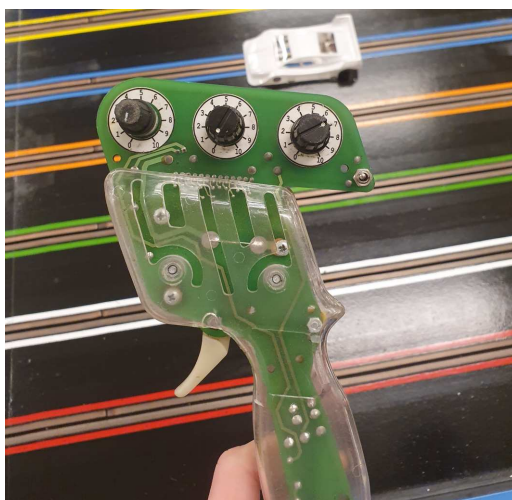


Obrázek 98: Model auta pro měření - SCRC Pardubice

9.3.4 Parametry ovladače pro měření

Tabulka 28: Nastavení ovladače modelu pro měření na dráze SCRC Pardubice

Odporový prvek	25 ohmů
Brzda	0
Zrychlení	0
Relé	vypnuto
CHOKE	7



Obrázek 99: Nastavení ovladače na dráhu SCRC Pardubice

9.4 Přehled výsledků z měření na dráze AMC Nová Paka

Při měření byly zaznamenávány časy na jedno kolo pro jednotlivé typy karoserií. Časy jsou zaznamenávány automaticky pomocí softwaru SPYTECH. Data jsem přepsal do tabulky pro další zpracování a porovnání výsledků měření.

9.4.1 Honda CUP

První měření bylo prováděno s karoserií Honda CUP.

Tabulka 29: Honda CUP

n	$[t] = s$	$\frac{\Delta_n}{s}$	$\frac{\Delta_n^2}{s^2}$
1	3,335	-0,015	0,000233
2	3,339	-0,011	0,000127
3	3,235	-0,115	0,013286
4	3,302	-0,048	0,002330
5	3,284	-0,066	0,004391
6	3,384	0,034	0,001138
7	3,394	0,044	0,001913
8	3,398	0,048	0,002278
9	3,375	0,025	0,000612
10	3,353	0,003	0,000007
11	3,363	0,013	0,000162
12	3,395	0,045	0,002001
13	3,402	0,052	0,002676
14	3,348	-0,002	0,000005
15	3,347	-0,003	0,000011
$\bar{t} = 3,350s$ $\bar{s}_t = 0,012$			$\sum \Delta_n^2 = 0,031171s^2$

Legenda k tabulce: n - číslo kola, $\bar{t}$ - průměrný čas, $[t] = s$ - naměřený čas na kolo, $\bar{s}_t$ - vypočtená směrodatná odchylka, $\frac{\Delta_n}{s}$ - odchylka od průměru, $\frac{\Delta_n^2}{s^2}$ - kvadrát odchylky od průměru.



Obrázek 100: Karoserie Honda CUP

9.4.2 Peugeot 406 Coupe BTC

Druhé měření bylo prováděno s karoserií Peugeot 406 Coupe BTC.

Tabulka 30: Peugeot 406 Coupe BTC

n	$[t] = s$	$\frac{\Delta_n}{s}$	$\frac{\Delta_n^2}{s^2}$
1	3,347	0,031	0,000969
2	3,349	0,033	0,001098
3	3,299	-0,017	0,000284
4	3,342	0,026	0,000683
5	3,335	0,019	0,000366
6	3,328	0,012	0,000147
7	3,304	-0,012	0,000141
8	3,340	0,024	0,000582
9	3,315	-0,001	0,000001
10	3,314	-0,002	0,000003
11	3,327	0,011	0,000124
12	3,281	-0,035	0,001216
13	3,327	0,011	0,000124
14	3,266	-0,050	0,002487
15	3,264	-0,052	0,002690
$\bar{t} = 3,316s$ $\bar{s}_t = 0,007$			$\sum \Delta_n^2 = 0,010916s^2$

Legenda k tabulce: n - číslo kola, $\bar{t}$ - průměrný čas, $[t] = s$ - naměřený čas na kolo, $\bar{s}_t$ - vypočtená směrodatná odchylka, $\frac{\Delta_n}{s}$ - odchylka od průměru, $\frac{\Delta_n^2}{s^2}$ - kvadrát odchylky od průměru.



Obrázek 101: Karoserie Peugeot 406 Coupe BTC

9.4.3 Mercedes AMG C63 DTM

Třetí měření bylo prováděno s karoserií Mercedes AMC C63 DTM.

Tabulka 31: Mercedes AMG C63 DTM

n	$[t] = s$	$\frac{\Delta_n}{s}$	$\frac{\Delta_{n^2}}{s^2}$
1	3,268	0	0
2	3,257	-0,011	0,000131
3	3,217	-0,051	0,002649
4	3,295	0,027	0,000704
5	3,279	0,011	0,000111
6	3,234	-0,034	0,001188
7	3,241	-0,027	0,000754
8	3,271	0,003	0,000006
9	3,279	0,011	0,000111
10	3,275	0,007	0,000043
11	3,297	0,029	0,000814
12	3,283	0,015	0,000211
13	3,273	0,005	0,000021
14	3,299	0,031	0,000932
15	3,259	-0,009	0,000090
$\bar{t} = 3,268s$ $\bar{s}_t = 0,006$			$\sum \Delta_{n^2} = 0,007766s^2$

Legenda k tabulce: n - číslo kola, $\bar{t}$ - průměrný čas, $[t] = s$ - naměřený čas na kolo, $\bar{s}_t$ - vypočtená směrodatná odchylka, $\frac{\Delta_n}{s}$ - odchylka od průměru, $\frac{\Delta_{n^2}}{s^2}$ - kvadrát odchylky od průměru.



Obrázek 102: Karoserie Mercedes AMG C63 DTM

9.4.4 Karoserie dle mého návrhu s označením Beraq

Poslední měření bylo provedeno se mnou navrženou karosérií s označením Beraq.

Tabulka 32: Beraq

n	$[t] = s$	$\frac{\Delta_n}{s}$	$\frac{\Delta_{n^2}}{s^2}$
1	3,221	0,018	0,000339
2	3,227	0,024	0,000595
3	3,200	-0,003	0,000007
4	3,155	-0,048	0,002266
5	3,216	0,013	0,000180
6	3,197	-0,006	0,000031
7	3,233	0,030	0,000924
8	3,231	0,028	0,000807
9	3,235	0,032	0,001050
10	3,224	0,021	0,000458
11	3,184	-0,019	0,000346
12	3,169	-0,034	0,001129
13	3,166	-0,037	0,001340
14	3,156	-0,047	0,002172
15	3,225	0,022	0,000502
$\bar{t} = 3,203s$ $\bar{s}_t = 0,008$			$\sum \Delta_{n^2} = 0,012144s^2$

Legenda k tabulce: n - číslo kola, $\bar{t}$ - průměrný čas, $[t] = s$ - naměřený čas na kolo, $\bar{s}_t$ - vypočtená směrodatná odchylka, $\frac{\Delta_n}{s}$ - odchylka od průměru, $\frac{\Delta_{n^2}}{s^2}$ - kvadrát odchylky od průměru.



Obrázek 103: Karoserie Beraq

9.5 Přehled výsledků měření na dráze SCRC Pardubice

9.5.1 Honda CUP

První měření bylo prováděno s karoserií Honda CUP.

Tabulka 33: Honda CUP

n	$[t] = s$	$\frac{\Delta_n}{s}$	$\frac{\Delta_n^2}{s^2}$
1	5,158	0,040	0,001589
2	5,206	0,048	0,002291
3	5,184	0,026	0,000669
4	5,198	0,040	0,001589
5	5,096	-0,062	0,003861
6	5,148	-0,010	0,000103
7	5,208	0,050	0,002487
8	5,221	0,063	0,003752
9	5,116	-0,042	0,001775
10	5,097	-0,061	0,003737
11	5,134	-0,024	0,000582
12	5,195	0,037	0,001359
13	5,078	-0,080	0,006421
14	5,187	0,029	0,000833
15	5,106	-0,052	0,002718
$\bar{t} = 5,158s$ $\bar{s}_t = 0,013$			$\sum \Delta_n^2 = 0,033968s^2$

Legenda k tabulce: n - číslo kola, $\bar{t}$ - průměrný čas, $[t] = s$ - naměřený čas na kolo, $\bar{s}_t$ - vypočtená směrodatná odchylka, $\frac{\Delta_n}{s}$ - odchylka od průměru, $\frac{\Delta_n^2}{s^2}$ - kvadrát odchylky od průměru.



Obrázek 104: Karoserie Honda CUP

9.5.2 Peugeot 406 Coupe BTC

Druhé měření bylo prováděno s karoserií Peugeot 406 Coupe BTC.

Tabulka 34: Peugeot 406 Coupe BTC

n	$[t] = s$	$\frac{\Delta_n}{s}$	$\frac{\Delta_{n^2}}{s^2}$
1	5,178	-0,002	0,000003
2	5,148	-0,032	0,000999
3	5,203	0,023	0,000548
4	5,193	0,013	0,000180
5	5,151	-0,029	0,000818
6	5,170	-0,010	0,000092
7	5,150	-0,030	0,000876
8	5,168	-0,012	0,000135
9	5,170	-0,010	0,000092
10	5,205	0,025	0,000645
11	5,199	0,019	0,000376
12	5,182	0,002	0,000006
13	5,184	0,004	0,000019
14	5,192	0,012	0,000154
15	5,201	0,021	0,000458
$\bar{t} = 5,180s$ $\bar{s}_t = 0,005$			$\sum \Delta_{n^2} = 0,005400s^2$

Legenda k tabulce: n - číslo kola, $\bar{t}$ - průměrný čas, $[t] = s$ - naměřený čas na kolo, $\bar{s}_t$ - vypočtená směrodatná odchylka, $\frac{\Delta_n}{s}$ - odchylka od průměru, $\frac{\Delta_{n^2}}{s^2}$ - kvadrát odchylky od průměru.



Obrázek 105: Karoserie Peugeot 406 Coupe BTC

9.5.3 Mercedes AMG C 63 DTM

Třetí měření bylo prováděno s karoserií Mercedes AMC C63.

n	$[t] = s$	$\frac{\Delta_n}{s}$	$\frac{\Delta_n^2}{s^2}$
1	4,957	-0,024	0,000557
2	4,959	-0,022	0,000467
3	4,952	-0,029	0,000818
4	4,967	-0,014	0,000185
5	4,983	0,002	0,0000006
6	4,946	-0,035	0,001197
7	4,993	0,012	0,000154
8	4,972	-0,009	0,000074
9	5,027	0,046	0,002153
10	4,989	0,008	0,000071
11	4,995	0,014	0,000207
12	4,982	0,001	0,000002
13	5,001	0,020	0,000416
14	4,987	0,006	0,000041
15	4,999	0,018	0,000339
$\bar{t} = 4,981s$ $\bar{s}_t = 0,006$			$\sum \Delta_n^2 = 0,006686s^2$

Tabulka 35: Mercedes AMG C63 DTM

Legenda k tabulce: n - číslo kola, $\bar{t}$ - průměrný čas, $[t] = s$ - naměřený čas na kolo, $\bar{s}_t$ - vypočtená směrodatná odchylka, $\frac{\Delta_n}{s}$ - odchylka od průměru, $\frac{\Delta_n^2}{s^2}$ - kvadrát odchylky od průměru.



Obrázek 106: Karoserie Mercedes AMG C63 DTM

9.5.4 Karoserie dle mého návrhu s označeném Beraq

Poslední měření bylo provedeno se mnou navrženou karosérií.

n	$[t] = s$	$\frac{\Delta_n}{s}$	$\frac{\Delta_n^2}{s^2}$
1	4,943	0,045	0,002128
2	4,893	-0,004	0,000015
3	4,917	0,020	0,000405
4	4,888	-0,009	0,002079
5	4,915	0,018	0,000329
6	4,879	-0,018	0,000319
7	4,908	0,011	0,000124
8	4,854	-0,047	0,001838
9	4,840	-0,057	0,003234
10	4,916	0,019	0,000366
11	4,854	-0,043	0,001838
12	4,945	0,048	0,002317
13	4,947	0,050	0,002513
14	4,874	-0,023	0,000523
15	4,880	-0,017	0,000284
$\bar{t} = 4,897s$ $\bar{s}_t = 0,009$			$\sum \Delta_n^2 = 0,016312s^2$

Tabulka 36: Beraq

Legenda k tabulce: n - číslo kola, $\bar{t}$ - průměrný čas, $[t] = s$ - naměřený čas na kolo, $\bar{s}_t$ - vypočtená směrodatná odchylka, $\frac{\Delta_n}{s}$ - odchylka od průměru, $\frac{\Delta_n^2}{s^2}$ - kvadrát odchylky od průměru.



Obrázek 107: Karoserie Beraq

Tabulka 37: Souhrn výsledků z provedených měření na drahách

Typ karoserie n	AMC Nová Paka				SCRC Pardubice			
	Honda [t] = s	Peugeot [t] = s	Mercedes [t] = s	Beraq [t] = s	Honda [t] = s	Peugeot [t] = s	Mercedes [t] = s	Beraq [t] = s
1	3,335	3,347	3,268	3,221	5,198	5,178	4,957	4,943
2	3,339	3,349	3,257	3,227	5,206	5,148	4,959	4,893
3	3,235	3,299	3,217	3,200	5,184	5,203	4,952	4,917
4	3,302	3,342	3,295	3,155	5,198	5,193	4,967	4,888
5	3,284	3,335	3,279	3,216	5,096	5,151	4,983	4,915
6	3,384	3,328	3,234	3,197	5,148	5,170	4,946	4,879
7	3,394	3,304	3,241	3,233	5,208	5,150	4,993	4,908
8	3,398	3,340	3,271	3,231	5,221	5,168	4,972	4,854
9	3,375	3,315	3,279	3,235	5,116	5,170	5,027	4,840
10	3,353	3,314	3,275	3,224	5,097	5,205	4,989	4,916
11	3,363	3,327	3,297	3,184	5,134	5,199	4,995	4,854
12	3,395	3,281	3,283	3,169	5,195	5,182	4,982	4,945
13	3,402	3,327	3,273	3,166	5,078	5,184	5,001	4,947
14	3,348	3,266	3,299	3,156	5,187	5,192	4,987	4,874
15	3,347	3,264	3,259	3,226	5,106	5,201	4,999	4,880
$\bar{t}_s$ = průměrný čas na kolo	3,350	3,316	3,268	3,203	5,158	5,180	4,981	4,897
$\bar{s}_t$ = směrodatná odchylka	0,012	0,007	0,006	0,008	0,013	0,005	0,006	0,009

Legenda k tabulce: n - číslo kola, $\bar{t}$ - průměrný čas,

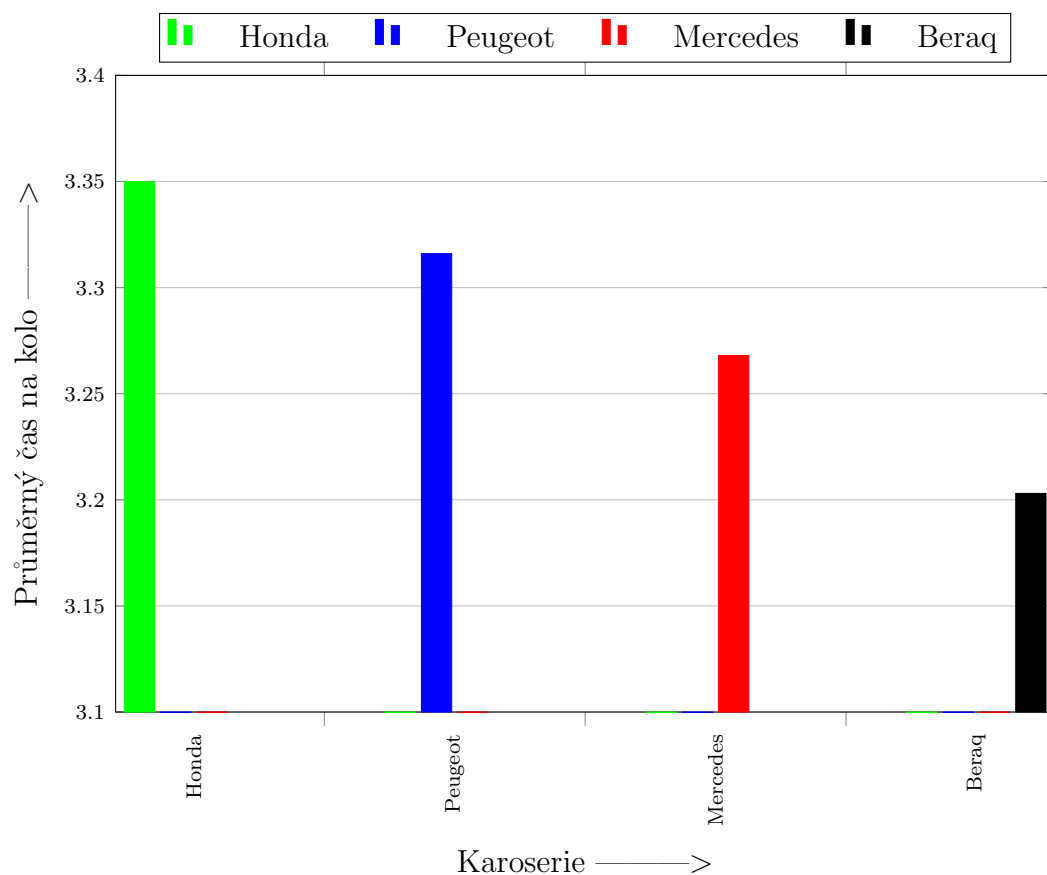
[t] = s - naměřený čas na kolo, $\bar{s}_t$ - vypočtená směrodatná odchylka,

tučně jsou zvýrazněné nejrychlejší časy daného typu karoserie na příslušné dráze

9.6 Souhrnné výsledky a porovnání

Závěrečná tabulka zobrazuje souhrn naměřených hodnot časů za jednotlivá kola u jednotlivých typů karoserií pro jednotlivé dráhy. Je vypočítaná průměrná hodnota času na jedno kolo u jednotlivých typů karoserií pro každou dráhu zvlášť. Dále je vypočítána směrodatná odchylka z naměřených hodnot a zaokrouhlená na 3 desetinná místa.

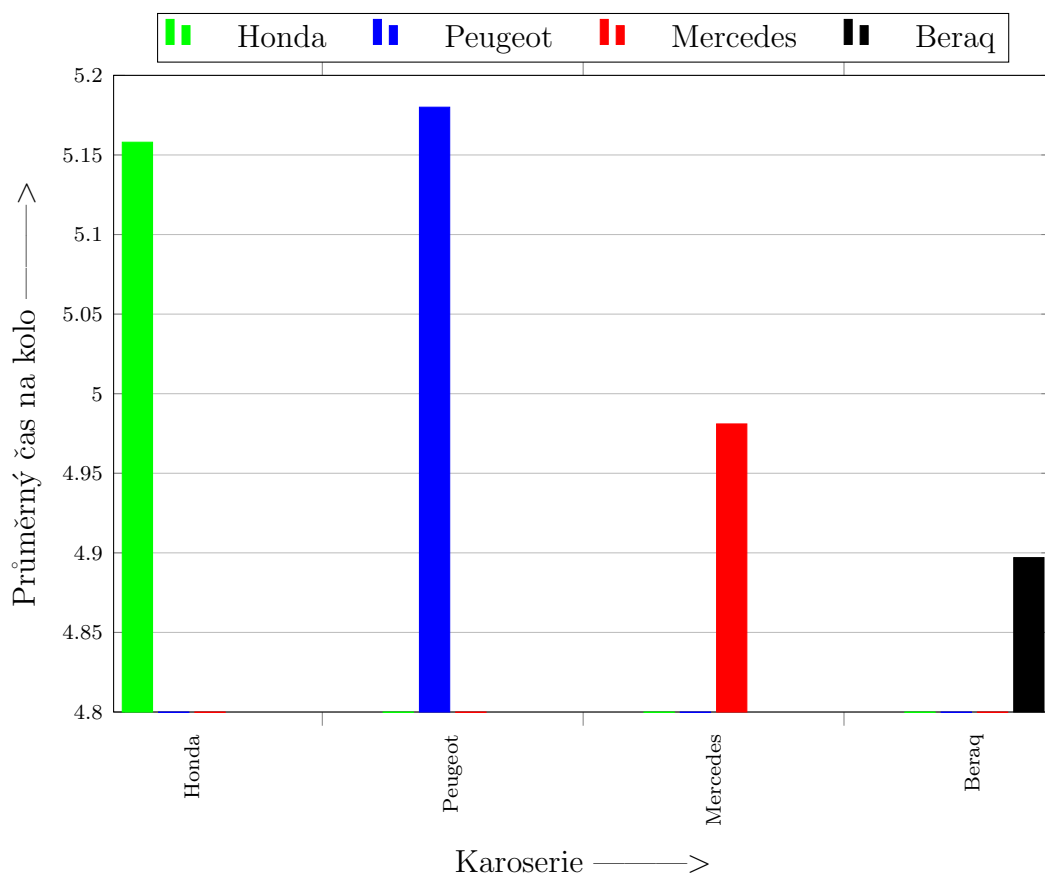
Výsledné průměrné hodnoty časů pro jednotlivé karoserie a dráhy jsem zpracoval do grafů.



Obrázek 108: Porovnání průměrných časů na jedno kolo na dráze AMC Nová Paka

Z grafu vyplývá, že na dráze AMC Nová Paka vykazovala nejrychlejší časy na jedno kolo karoserie dle mého návrhu s označením Beraq. Karoserie byla v průměru rychlejší o téměř 2 % na jedno kolo než karoserie Mercedes.

Z hlediska jízdních vlastností má karoserie byla rychlejší převážně z důvodu, že její aerodynamické vlastnosti, přítlak, umožňují rychlejší průjezd rychlými zatáčkami.



Obrázek 109: Porovnání průměrných časů na jedno kolo na dráze SCRC Pardubice

Z grafu vyplývá, že na dráze SCRC Pardubice vykazovala nejrychlejší časy na jedno kolo karoserie dle mého návrhu s označením Beraq. Karoserie byla v průměru rychlejší o 1,6 % na jedno kolo než karoserie Mercedes. Tím se potvrdily výsledky z měření a testování na dráze AMC Nová Paka

Jelikož dráha SCRC Pardubice je delší a má více rychlých zatáček, tak se časový rozdíl na jedno kolo u karoserie Beraq ke karoserii Mercedes zvětšil téměř na 0,1 s na kolo.

10 Názory odborníků

Se svými výsledky jsem se obrátil na odborníky v oblasti aerodynamicky závodních, cestovních vozů a slotracingu a požádal je o jejich vyjádření a poznatky k mé práci. Vždy se jedná o jejich osobní názor.

Miguel Jiménez

I'm not sure how much can you change the shape of the car now, but I would focus on the rear part. If you see real cars, they have rear wings with a very specific shape. I would try to copy them. The profile of the wing is very important, you can find online something called NACA profiles for wings. You have to find in what position to place it to generate negative lift! That would give you extra down force while reducing a bit of lift. Maybe you would need to attach a wing to the model with some screws, so design it already with that in mind. Having 2 times more down force than drag should be possible with that. The rear part I think it's too flat. Imagine one of the most efficient shape is a golf ball, and the worst possible is a flat shape! You have to imagine the air should go around the body of the car and not detach from it at any point.

Apart from that, if you want to improve the quality of the report I can give you some advice. It would be very interesting you commented why the real test is different compared to the CFD. Take into account C_d and C_l could be constant no matter the air speed, so a strong dependency between air speed and these parameters must have a reason. The whole on the floor, disruption of the walls, error in the pressure measurements maybe...

If you have the opportunity, you can measure the car at different ride heights, the coefficients should be something different and would give you a very good data for analysis! That's something we do in Formula 1 actually!

Miguel Jiménez - český překlad

Nyní pracuje na pozici Simulation & Modeling Engineer v Red Bull Racing.

Nejsem si jistý, jak moc můžete nyní změnit tvar vozu, ale zaměřil bych se na zadní část. Pokud vidíte skutečná auta, mají zadní křídla velmi specifický tvar. Pokusil bych se je okopírovat. Profil křídla je velmi důležitý, na internetu můžete najít něco, co se jmenuje NACA profily pro křídla. Musíte zjistit, v jaké poloze ho umístit, aby vytvářelo záporný vztlak! To by vám poskytlo dodatečnou přítlakovou sílu a zároveň trochu snížilo vztlak. Možná bys potřeboval křídlo k modelu připevnit nějakými šrouby, takže to navrhni už s ohledem na to mít 2x větší přítlakovou sílu než odpor by s tím mělo být možné. Zadní část je podle mě příliš plochá. Představte si, že jeden z nejúčinnějších tvarů je golfový míček a nejhorší možný je plochý tvar! Musíte si představit, že vzduch by měl obtékat karoserii vozu a v žádném bodě se od ní neoddělovat.

Kromě toho, pokud chcete zlepšit kvalitu zprávy, mohu vám poradit. Bylo by velmi zajímavé, kdybyste okomentoval, proč se skutečný test liší od CFD. Vezměte v úvahu, že C_d a C_l by mohly být konstantní bez ohledu na rychlost vzduchu, takže silná závislost mezi rychlostí vzduchu a těmito parametry musí mít nějaký důvod. Možná je to celá podlaha, narušení stěn, chyba v měření tlaku...

Pokud máte možnost, můžete změřit vůz při různých výškách jízdy, koeficienty by měly být něco jiného a poskytly by vám velmi dobrá data pro analýzu! To je něco, co děláme ve Formuli 1.

Oliver Littlewood

I'm not at all familiar with the regulations you have to follow etc. but looking at the CFD post-pro images it seems like having to maintain a shape that resembles the real life counterpart of the car is unhelpful for your goal of additional downforce. Mainly the areas like the cabin roof, where convex curvature is creating a suction peak reducing downforce, as well as the front wheel arches, and similarly but less so the bonnet.

So if possible reducing the actual size of the replica car shape within the bounding box of the regulations would allow this effect to be minimised. Like if you could shrink the replica car an extra 15% or smth whilst keeping the surfaces like the front splitter and rear spoiler at the bounding box of the regulations then you would expose more area to generate downforce with at the front. And also if the cabin were then lower due to the shrinking the rear spoiler would be exposed to generally cleaner flow.

Basically I think that everywhere you see low pressures on the plots you want to reduce the convex curvature as much as possible whilst keeping it looking like its real life counterpart. And then other things like maximising the rear spoiler performance will probably just require iterative testing in CFD.

Oliver Litterwood - český překlad

Nyní pracuje na pozici CFD Aerodynamicist Industrial Placement v Mercedes-AMG Petronas Formula One Team.

Nejsem vůbec obeznámen s předpisy, kterými se musíte řídit, atd., ale při pohledu na postprofesní obrázky CFD se zdá, že nutnost zachovat tvar, který se podobá skutečnému protějšku vozu, je pro váš cíl, kterým je dodatečný přítlak, neprospěšná. Hlavně v oblastech, jako je střecha kabiny, kde vypouklé zakřivení vytváří sací špičku snižující přítlak, a také v podběžích předních kol a podobně, ale méně v kapotě.

Pokud je to možné, zmenšení skutečné velikosti tvaru repliky vozu v rámci ohraničeného prostoru předpisů by umožnilo tento efekt minimalizovat. Pokud by se například podařilo zmenšit repliku vozu o dalších 15 % nebo něco podobného, přičemž by plochy jako přední splitter a zadní spoiler zůstaly v mezích předpisů, pak by se odkryla větší plocha pro generování přítlaku vpředu. A také kdyby byla kabina díky zmenšení nižší, zadní spoiler by byl vystaven obecně čistšímu proudění.

V podstatě si myslím, že všude tam, kde vidíte nízký přítlak, chcete co nejvíce snížit vypouklé zakřivení a zároveň zachovat vzhled jako v reálném životě. A pak další věci, jako je maximalizace výkonu zadního spoileru, budou pravděpodobně vyžadovat jen opakované testování v CFD.

Ing. Vojtěch Jakubec

Nyní pracuje na pozici CFD Specialist - External aerodynamics ve Škoda Auto a.s.

Tvar karoserie sleduje primárně cíl dosáhnout co největší aerodynamický přítlak na hnací kola (pro rychlejší průjezd zatáčkami). Aerodynamický odpor v tomto případě naopak není příliš relevantní (výkon motoru závodního modelu je dostatečný pro jeho překonání).

Pro dosažení přítlaku je na karoserii správně vymodelován zadní přítlačný spoiler. Jeho optimální funkci je přizpůsobeno i tvarování přídě vozu (aby se příliš nerozrušil nabíhající vzduch, ale přitom i sama příd' přispívá k přítlaku) i tvarování kabiny (které umožňuje vzduchu s vysokou rychlostí/hybností se v co největší míře dostat přímo na zadní spoiler a generovat přítlak). Koncepčně tedy hodnotím výsledný návrh karoserie jako zdařilý.

Z hlediska mechaniky tekutin je nutno dodat, že optimalizace proudění kolem karoserie prezentovaného autodráhového modelu je vzhledem charakteristickým rozměrům a rychlostem jízdy poměrně složitá disciplína. Hodnoty tvz. Reynoldsova čísla indikují, že proudění vzduchu se odehrává poblíž přechodu mezi laminárním a turbulentním režimem, což je zejména pro CFD simulace nejsložitější případ. S tím nejspíše souvisí jedna mírná slabina návrhu karoserie, a to je proudění přes „zadní sklo“ kabiny, kde podle CFD simulací není proudění směřující na zadní spoiler přilnuté a nevyužívá se tak plně potenciál zadního spoileru ke generování přítlaku. Pro plné pochopení tohoto fenoménu by ale bylo nutné věnovat značné úsilí validaci a ladění parametrů CFD simulací s využitím řady experimentů ve specializovaných laboratořích, což by přesahovalo rámec středoškolské odborné činnosti.

Martin Majer

Člen SCRC Pardubice a účastník mnoha závodů ve slotracingu v různých kategoriích.

Během testování na dráze v Pardubicích, kde jsem s modelem kategorie PR/24 porovnával jízdní vlastnosti s běžně dostupnými karoseriemi a Beraq. Oproti karoseriím Tesla, Mercedes a Peugeot má mnohem více přítlaku na přední části v oblasti kapoty. Karoserie Beraq působí mnohem stabilněji v dlouhých zatáčkách a rychlých technických pasážích dráhy, auto tudíž netrpí přetáčivostí. V porovnání s běžně dostupnými karoseriemi má méně přítlaku na zadním křídle, což způsobuje mírně nervózní výjezd ze zatáček, což by se dalo odstranit trochu přilnavějšími pneumatikami. Karoserie Beraq byla v čase na kolo zhruba o 0,150 s rychlejší než Tesla

(momentálně nejlepší dostupná karoserie pro model PR/24) při stejném nastavením vozu a ovladače.

Mgr. Václav Kohout

Člen rady KAuM Svazu modelářů ČR (pověřen prací s mládeží)

Milí Adame,

předem mého stručného zhodnocení tvé ojedinělé práce, bych tě chtěl moc pochválit za tvé snažení a soustavnou píli věnovanou modelaření a závodění od tvého raného dětského věku. Tvé výborné sportovní výsledky prokázaly tvé nadšení a zaujetí pro tuto modelářskou disciplínu.

Tento tvůj projekt v rámci Středoškolské techniky činnosti „Vývoj karoserie cestovního vozu pro závody slotracingu“ je pro modelářskou komunitu velmi cenný a to z několika hledisek. Dotáhl jsi výrobu své vlastní karosérie do podoby hotového výrobku na špičkové úrovni. Všechny své návrhy karosérií, jsi ověřil na základě exaktního a vědeckého postupu. Ověření aerodynamiky ve větrném tunelu je součástí úplně nových metod a výrobních postupů. Vytvoření úplně nového přístupu k výrobě nových typů karosérií pro dráhové modely aut je nutné pro další vývoj a technologický pokrok slotracingu.

Z mých dlouholetých zkušeností z práce s dětmi a mládeží, jsi jediným, který se o něco podobného pokusil. Doufám, že své nabyté zkušenosti, budeš nadále rozvíjet a využívat ku prospěchu zájmového odvětví se jménem slotracing. Rád budu podporovat tvoji současnou práci i případné další budoucí moderní nápady a progresivní projekty.

DISKUZE

V své práci jsem se zaměřil na aerodynamiku cestovních a závodních vozů. Své získané poznatky přenáším do tvorby svých modelů pro závody slotracingu, kterých se pravidelně účastním od roku 2013. V žákovské a juniorské kategorii jsem několikanásobný mistr České republiky a obsadil jsem i několik druhých a třetích míst v různých kategoriích. Nyní se aktivně účastním závodů mezi dospělými a jsem členem Svazu modelářů České republiky a klubu SCRC Pardubice. Cílem mé práce je přenést získané znalosti o aerodynamice a spojit je se svými praktickými zkušenostmi a znalostmi při stavbě modelů autíček pro slotracing a vytvořit vlastní návrh karoserie pro závody slotracingu dle pravidel ISRA. Navrhnout vlastní tvar karoserie, návrh zpracovat, ověřit jeho aerodynamické vlastnosti a připravit pro tvorbu formy a kopyta pro vylišování karoserie z lexanu. Výsledný vyrobený návrh karoserie použít pro sestavené autíčko, otestovat a porovnat jeho jízdní vlastnosti při jízdě na dráze s karoseriemi běžně dostupnými a používanými při závodech.

V rámci své práce jsem oslovil Vývojové centrum Škoda Auto a.s., Strojní fakultu ČVUT Praha a své poznatky s nimi pravidelně konzultoval. Velkým přínosem byla pravidelná setkání s vedoucím Vývojového centra ŠKODA AUTO a.s. Ing. Vojtěchem Jakubcem, který pro mě provedl některé CFD simulace jako ověření mého postupu při tvorbě mých návrhů. Nové poznatky jsem také získal na ČVUT Praha na Strojní fakultě, kdy jsem si vyzkoušel měření aerodynamických sil v uzavřeném aerodynamickém tunelu a získal tím další porovnání k mým CFD simulacím mého návrhu. Některé poznatky zejména z důvodů vyrobitelnosti jsem konzultoval s kolegy z mého klubu SCRC Pardubice a kolegy z klubu ATTAN Slot Racing Všejanya.

Zajímá mě vývoj a trendy ve výrobě cestovních automobilů v České republice, mnoho zajímavých informací jsem získal spoluprací se ŠKODA AUTO a.s. z jejich internetových stránek i z osobní návštěvy ve vývojovém centru v Mladé Boleslavi. Při tvorbě svého návrhu jsem jako základ vzal model vozu Škoda Enyaq Coupe iV, díky jeho koeficientu odporu. Tvar karoserie tohoto modelu jsem počítačově upravil pro model pro slotracing. Dle provedených počítačových CFD simulací jsem prováděl úpravy na vylepšení aerodynamiky příslušného návrhu a znovu prováděl CFD simulace. Takto jsem získal několik generací návrhů, některé cesty byly dále rozvíjeny a některé se ukázaly jako slepé. K některým generacím mého návrhu jsem požádal o vyjádření Ing. Jakubce, který mi objasnil některé možnosti pro zlepšení aerodynamiky mého návrhu. Nakonec vznikl definitivní návrh, který byl upraven tak, aby byl vyrobitelný lisováním a přitom neztratil nic ze svých aerodynamických vlastností.

Definitivní návrh postoupil do procesu výroby, který má několik fází. Jednotlivé fáze jsem konzultoval s odborníky v příslušných oblastech. Od vytištění modelu 1:1 a 2:1 na 3D tiskárně, přes vytvoření formy s negativním obrazem modelu po-

mocí speciální hmoty. Další fází je tvorba kopyta ze speciální pryskyřice vhodné pro následné lisování lexanu. Poslední fází je pak vlastní lisování karoserie z lexanu. Tím byl dokončen celý proces od vývoje návrhu, ověření aerodynamických vlastností CFD simulacemi i v aerodynamickém tunelu. Následně pak tvorbu formy až po konečný výlisek. Výliskem je karoserie dle mého návrhu pro uplatnění při jízdě modelu auta na dráze. Jak aerodynamické, tak jízdní vlastnosti jsem následně ověřil při testování a měření na dráze. Porovnával jsem jízdy modelů aut s různými karoseriemi odpovídajícím pravidlům ISRA. Měřil jsem zajeté časy na kolo a následně vyhodnocoval.

Měření jsem prováděl na dvou odlišných drahách AMC Nová Paka a SCRC Pardubice. Porovnával jsem karoserie Honda Cup, Peugeot 406 coupe BTC, Mercedes AMG C63 DTM a karoserii dle mého návrhu s označením Beraq. Pro každý model s příslušnou karoserií jsem zaznamenal hodnoty časů na jedno kolo u patnácti po sobě zajetých kol bez vypadnutí. Hodnoty byly měřeny a zaznamenávány automaticky závodním softwarem, který se součástí závodních drah. Získané údaje jsem zpracoval pro jednotlivé typy karoserií a vzájemně porovnal. Data dále využiji pro stavbu svých závodních modelů a svůj návrh karoserie použiji při některém z následujících závodů ve slotracingu dle platných pravidel ISRA.

Měření ukázalo, že model dle mého návrhu je zcela konkurenceschopný k modelu již vyráběných karoserií pro slotracing. U všech testovaných karoserií se ukazuje jak důležitý prvek pro závody slotracingu je zadní spoiler, který vytváří potřebný přítlak na zadní část modelu. U některých modelů je i charakteristická „anti-hrana“, která je i součástí závodního speciálu ŠKODA FABIA Rally 2. Současně se ukazují jako zajímavý aerodynamický prvek přední nárazníky, které napomáhají správnému obtékání vzduchu okolo karoserie. Tento prvek využívají karoserie Peugeot, Mercedes i moje karoserie Beraq. Karoserii Honda tento prvek chybí.

Můj návrh karoserie byl prověřený počítačovými CFD simulacemi pomocí dvou odlišných počítačových programů. Prvním je AUTODESK CFD Ultimate 2024, kde jsem ověření prováděl sám a druhý pak SIEMENS STAR CCM+, kde ověření bylo provedeno ve Vývojovém centru ŠKODA AUTO a.s. Poslední ověření aerodynamiky mého návrhu bylo v aerodynamickém tunelu na Strojní fakultě ČVUT v Praze. Na základě těchto měření se moje karoserie odlišuje od ostatních postupným klesáním kabiny vozu až k zadnímu spojleru. Tento prvek je i charakteristický pro reálný model Škoda Enyaq Coupe iV. Současně také dvě podélné drážky na střeše v zadní části mé karoserie vytvářejí lepší tuhost v této části karoserie. Bočnice mé karoserie vycházejí z mé zkušenosti ze závodů s modely řady ES24. Jsou to závody s karoseriemi typu LMP1. Tyto karoserie mají rovné bočnice a na dráze dosahují vyšší rychlosti. Ukázalo se, že model s karoserií Beraq byl na dráze stabilnější a bočnice byly pohyblivější. Model tím dosáhl vyšší rychlosti a stability v zatáčkách.

Při testování jednotlivých karoserií se ukázalo, že aerodynamika má vliv na jízdní vlastnosti a rychlost modelu. Určitě bude zajímavé, jak moje karoserie obstojí při

skutečných závodech a zda se svými modely dosáhnou zajímavých výsledků.

Velmi mě těší, že se mi povedlo navrhnout 3D model karoserie v počítači a otestovaný počítačový model přenést až do reálné výroby a výrobu uskutečnit a ověřit si vše v reálném testování a měření na dráze.

V rámci diskuse jsem své výsledky simulací zaslal odborníkům v oblasti aerodynamiky závodních a cestovních vozů a požádal o vyjádření. Jejich poznatky jsou uvedeny v samostatné kapitole mé práce.

V oblasti aerodynamiky vozidel je k dispozici několik prací, které popisují aerodynamické chování závodních vozů. Ukazují aerodynamické úpravy na vozech pro dosažení lepších závodních výsledků. Jednou z prací, se kterou jsem porovnával své poznatky je práce „*Metodika aerodynamického řešení vozidla*“ od pana Ing. Jana Vorlíka. Ten ve své práci porovnává různá aerodynamická řešení detailu karoserie vozu Praga R1 před chladičem. Ukazuje, že konstrukční úpravy na karoserii mají vliv na aerodynamické chování vozu. Je zřejmé, že některé úpravy aerodynamiku zlepšují, jiné naopak zhoršují.

Moje práce potvrdila, že poznatky pana Ing. Jana Vorlíka jsou správné a i já jsem ve svém návrhu karoserie využíval některé z konstrukčních prvků vhodných pro slotracing ke zlepšení aerodynamiky svého návrhu. Můj konečný tvar karoserie označený Beraq byl čtyřikrát nezávisle testován. Paralelně aerodynamicky testován pomocí dvou CFD-simulací v softwaru Autodesk CFD Ultimate 2024 a Siemens STAR CCM+. Jednou v aerodynamickém tunelu FS ČVUT a při samotném testování jízdních vlastností na drahách. Tímto se odlišuji od pana Ing. Jana Vorlíka, který prováděl pouze CFD-simulace.

Není mi známa informace, že by byla dostupná podobná práce na téma aerodynamiky u modelů pro slotracing, která by popisovala danou problematiku a spojovala počítačově vytvořený návrh modelu karoserie pro slotracing, 3D model a následnou výrobu vlastní karoserie pomocí vakuového lisování z lexanu dle pravidel ISRA. Tímto je moje práce unikátní.

Ve své práci jsem si dokázal, že již umím více rozpracovat dané téma, nebojím se oslovit odborníky v dané oblasti. Naučil jsem se i mnoho počítačových dovedností, pronikl do problematiky CFD simulací a poznal i proces výroby forem z pryskyřic i problematiku lisování karoserií. Naučil jsem se konzultovat danou problematiku a je to pro mě velkým přínosem do budoucího studia i dalších závodů.

ZÁVĚR

Po zkušenostech s aerodynamikou modelů pro slotracing, kdy jsem porovnával vliv tvaru a výšky jednotlivých karoserií na rychlost a ovladatelnost modelů pro slotracing na dráze, jsem chtěl své dovednosti posunout ještě více a rozhodl jsem se vytvořit vlastní návrh karoserie pro slotracing. Cílem bylo vycházet z cestovních vozů, tak aby model s mým návrhem karoserie se mohl účastnit závodů slotracingu. Proto jsou dodrženy všechny mezinárodní pravidla ISRA pro tyto závody. Navázal jsem spolupráci s Vývojovým centrem ŠKODA-AUTO a.s. v Mladé Boleslavi a svůj projekt představil Ing. Vojtěchu Jakubcovi a domluvil se na společných konzultacích v rámci mé práce a mého vývoje. Také jsem navázal spolupráci s ČVUT Praha Strojní fakultou pro možné konzultace a možnost provádění měření aerodynamických vlastností v aerodynamickém tunelu.

Jako základní karoserii pro svůj návrh jsem si vybral model Škoda Enyaq Coupe iV, který tvarem karoserie nejvíce vyhovoval mé představě. Tím začal dlouhý proces vývoje mé nové karoserie pro závody slotracingu, kterých se pravidelně již přes 10 let účastním. Modely jsem vytvářel v počítači, různě upravoval a testoval jejich aerodynamické vlastnosti pomocí CFD simulací. Své poznatky pak konzultoval s Ing. Jakubcem a postupně se posunoval ve svém vývoji. Některé cesty byly slibné, jiné naopak, někdy jsem se musel vrátit o krok zpět a začít jinak. Takto se mi povedlo vytvořit mnoho generací karoserií. Vždy jsem si zaznamenával změny a jejich vliv na aerodynamiku. Některé generace jsem si nechal ověřit Ing. Vojtěchem Jakubcem, zda mé úvahy jsou správné a mohou být pro moji karoserii prospěšné. Po dokončení vývoje, když už jsem byl se svým návrhem spokojený, byly provedeny ještě změny z důvodu vyrobitelnosti lisováním dané karoserie. Cílem bylo, aby změny měly co nejmenší či vůbec žádný vliv na aerodynamiku modelu. Další částí byl tisk modelu na 3D tiskárně. Aerodynamické vlastnosti jsem ověřoval pomocí CFD simulací. U konečné verze jsem prováděl CFD simulace dvakrát – jednu osobně a druhá pak byla provedena Ing. Jakubcem ve Vývojovém centru v Mladé Boleslavi. Pro kontrolu pak ještě ověřením v aerodynamickém tunelu na Strojní fakultě ČVUT Praha. Tím byl model připraven do výrobní části. Byl povrchově upraven, vytvořena forma pro tvorbu kopyta a vlastní lisování karoserie z lexanu. Na závěr proběhlo měření rychlosti a ověření jízdních vlastností modelu s mojí karoserií na dvou odlišných drahách a provedeno porovnání s dalšími vybranými karoseriemi používanými při závodech slotracingu.

Prínosem mé práce je, že jsem dokázal svůj návrh karoserie vymodelovat pomocí počítačového programu. Tento model aerodynamicky paralelně otestovat pomocí CFD-simulací a reálným měřením v aerodynamickém tunelu. Konečný návrh pak vytisknou na 3D tiskárně a použít jako základ pro výrobu kopyta k vakuovému lisování karoserie z lexanu.

Do současné doby se výroba kopyta na vakuové lisování prováděla ručním opracováním dřevěného základu s nanesenou epoxidovou pryskyřicí. Kopyto se vytváří

pomocí nástrojů dlát, brousků a fréz, kterými se opracovává epoxidová vrstva do požadovaného tvaru dle skutečného modelu auta. Uplatňují se zde zkušenosti a znalosti z aerodynamiky skutečných vozů a z výroby dřívějších modelů karosérií pro slotracing. Po dokončení opracování je kopyto připraveno pro vakuové listování z lexanu. Pro každou následující změnu, či úpravu vylisované karoserie je nutná úprava původního kopyta.

Hlavním rozdílem oproti tradiční výrobě kopyta je, že mé kopyto je vytvořeno odlitkem z negativní formy z vytištěného 3D modelu, který je aerodynamicky testován a upravován podle CFD-simulací, oproti původnímu manuálnímu opracování epoxidové pryskyřice na dřevěném základu bez jakéhokoli aerodynamického prověřování. Můj 3D model je po aerodynamické stránce mnohem více prověřen než kopyto manuálně opracovávané. Tento můj postup považuji za velkou změnu a velký přínos pro výrobu karosérií s dosahem nejen pro modeláře v České republice, ale i v zahraničí. Celý proces výroby karoserie se výrazně zrychlí a zefektivní.

Výsledky mé práce jsou využitelné v automobilovém průmyslu pro vývoj nových modelů automobilů. Lze je využít i pro karosáře či vývojáře závodních automobilů. Má práce má také význam pro širokou veřejnost, pro každého, kdo využívá automobil, ale i pro jiná odvětví lidské činnosti, kde lze vytvořit počítačový návrh a ten následně přenést do reálné podoby pomocí odlitků či lisování. Nelze opomenout ekonomický přínos aerodynamicky na provoz a jízdní vlastností automobilů.

Prospěšnost mé práce do budoucna je ve zjednodušení a zefektivnění výroby karosérií pro slotracing. Odpadá dlouhé manuální opracování epoxidové pryskyřice na kopytě. Kopyto vzniká odlitím do negativní formy 3D modelu.

Přínos mé práce pro každého člověka je v tom, že ukazuje, jak lze využít výpočetní techniku a nové technologie pro usnadnění a zefektivnění různých činností v lidském konání prakticky v každé oblasti.

Svoji práci chci završit přihláškou mé karoserie s označím Beraq do výběrového řízení na karoserii, se kterou se v roce 2025 pojede mistrovství světa ISRA v České republice. Moje karoserie splňuje veškeré požadavky pro tento výběr.

V praxi jsem si dokázal a ověřil, že je možné vymyslet vlastní návrh karoserie, vytvořit počítačový model, ten testovat a upravovat. Konečnou verzi pak přenést do výroby a celý proces pak završit testovacími jízdami s novou mojí karosérií s konkurenceschopnými výsledky. Ukazuje se, že i dílčí aerodynamické úpravy dokážou jak model pro slotracing, tak reálný vůz posunout v jízdních vlastnostech či ekonomice provozu. Modely automobilky ŠKODA AUTO a.s. patří ke špičkovým modelům a jsem rád, že jsem mohl nahlédnout do tohoto procesu.

LITERATURA

- [1] Klub automodelářů ČR. *Slotracing*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: <https://svazmodelaru.cz/kaum/pravidla/charakteristika-drahovych-modelu-src/>.
- [2] Beran, A. *Vlastní tvorba*. Hradec Králové, 2024.
- [3] Attanslot. *Autodráha Attanslot-Všejany*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: <https://www.attanslot-vsejany.cz/>.
- [4] František Poledna. *PR24, ES24, ES32, F1 32, Honda, Škoda 130 RS*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: <https://www.facebook.com/photo/?fbid=1019064319310897&set=ecnf.100036220150915/>.
- [5] Koford. *G27*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: <https://www.koford.com/slot/picsRTR.html>.
- [6] Morava Open. *G12 Morava Open*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: http://www.moravaopen.cz/sites/default/files/pravidla/MO_pravidla_24.pdf.
- [7] Petr Vaněček. *G12 Morava Open - SCRC Pardubice*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: <https://onedrive.live.com/?authkey=%21ACDSzUQmpvrAY3w&cid=38656D4A9DCC1AAA&id=38656D4A9DCC1AAA%211125&parId=38656D4A9DCC1AAA%211098&o=OneUp>.
- [8] ISRA. *ISRA Ranking*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: <https://isra-slot.com/rankings/>.
- [9] ISRA. *Čeští reprezentanti na ISRA 2022*. [online], [cit. 2024-1-29]. URL: <https://isra-slot.com/pictures/2020-2029/2022-riga/>.
- [10] Motortrend. *The Chaparral 2E Was A Guiding Light in Race Car Aerodynamics*. [online], [cit. 2024-1-3]. URL: <https://www.motortrend.com/features/chaparral-2e-guiding-light-race-car-aerodynamics/?galleryimageid=b45491ec-12c3-4ff4-ad77-84cad60644e5>.
- [11] Ing. Jan Vorlík. *METODIKA AERODYNAMICKÉHO ŘEŠENÍ VOZIDLA*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/97351>.
- [12] Beran, A. *Vliv tvaru a výšku karoserie na rychlost modelu auta*. Hradec Králové, 2023.
- [13] Ing. Vojtěch Jakubec. *Interní prezentace Škoda - Auto, Aerodynamika - Student Day 2022*. Mladá Boleslav, 2022.
- [14] Bc. Jan Stibůrek. *Vizualizační aerodynamický tunel*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79549/F2-BP-2019-Stiburek-Jan-JanStiburek_BP.pdf.
- [15] The Royal Society. *Rotující rameno*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: <https://prints.royalsociety.org/products/whirling-arm-rs-11565>.

- [16] TimeGraphics. *Francis H. Wenham - wind tunnel*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: <https://time.graphics/event/1550817>.
- [17] UN JOUR DE PLUS A PARIS. *Gustave Eiffel aerodynamický tunel*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: <https://www.unjourdeplusaparis.com/paris-insolite/laboratoire-aerodynamique-eiffel>.
- [18] NATION AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *Otevřený aerodynamický tunel*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunpart.html>.
- [19] NATION AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. *Uzavřený aerodynamický tunel*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunnel1.html>.
- [20] Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky ČVUT. *Aerodynamický tunel na Strojní fakultě ČVUT*. [], [cit. 2023-12-31].
- [21] FKFS. *Aerodynamický tunel FKFS - parametry*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: <https://www.fkfs.de/en/test-facilities/wind-tunnels/vehicle-aeroacoustics-wind-tunnel>.
- [22] ŠKODA AUTO. *Aerodynamický tunel FKFS*. [online], [cit. 2023-12-31]. URL: <https://www.skoda-storyboard.com/en/skoda-world/wuthering-heights/>.
- [23] Jahoda M. *Počítačová dynamika tekutin - užitečný nástroj pro inženýry*. [online], [cit. 2024-1-10]. URL: http://uchi-old.vscht.cz/uploads/pedagogika/bezpecnostni_inzenyrstvi/CFD.shrnuti.pdf.
- [24] Attan Slot-racing. *Karoserie Mercedes AMG C63 DTM 1/24*. [online], [cit. 2024-1-12]. URL: <https://eshop.slot-racing.cz/attan-slot-racing/eshop/1-1-Bodies/0/5/189-Mercedes-AMG-C-63-DTM-1-24-thickness-005-007-010>.
- [25] Škoda Auto. *Storyboard Škoda Auto*. [online], [cit. 2024-1-20]. URL: https://www.skoda-storyboard.com/en/images/?ajax_search_results_image=100.
- [26] myevreview.com. *Skoda Enyaq*. [online], [cit. 2024-1-20]. URL: <https://www.myevreview.com/cs/technicke-specifikace/skoda/enyaq-coupe-iv>.
- [27] myevreview.com. *Tesla X*. [online], [cit. 2024-1-20]. URL: <https://www.myevreview.com/cs/technicke-specifikace/tesla/model-x/plaid#photogallery>.
- [28] myevreview.com. *Audi E-tron GT*. [online], [cit. 2024-1-20]. URL: <https://www.myevreview.com/cs/technicka-data/audi/e-tron-gt/drag-coefficient>.
- [29] myevreview.com. *Porsche Taycan*. [online], [cit. 2024-1-20]. URL: <https://www.myevreview.com/cs/fotky/porsche/taycan>.

- [30] ISRA. *Stavební pravidla*. [online], [cit. 2024-1-21]. URL: <https://isra-slot.com/documentation/rulebook/>.
- [31] Ing. Vojtěch Jakubec. *Konzultace nastavení CFD-simulací*. [online], [cit. 2024-1-24].
- [32] Ing. Vojtěch Jakubec. *Konzultace výsledků*. [online], [cit. 2024-1-24].
- [33] Toyota. *Toyota GR YARIS Rally1 HYBRID 2024*. [online], [cit. 2024-1-21]. URL: <https://toyotagazooracing.com/wrc/cars/2024/>.
- [34] Škoda Auto. *Škoda Fabia RS Rally2*. [online], [cit. 2024-1-21]. URL: <https://www.skoda-motorsport.com/en/skoda-fabia-rs-rally2/aerodynamics/>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

1	Autodráha SCRC Pardubice [2]	14
2	Autodráha Attanslot Všejanya[3]	14
3	Production 1/24 od Františka Poledny - ISRA 2023 [4]	15
4	ES/24 od Františka Poledny - ISRA 2023 [4]	15
5	ES/32 od Františka Poledny - ISRA 2023 [4]	16
6	F1/32 od Františka Poledny [4]	16
7	G27 by Koford [5]	17
8	PR/24 Honda od Františka Poledny [4]	17
9	G12 Morava Open [7]	18
10	Škoda 130 RS od Františka Poledny [4]	18
11	Čeští reprezentanti na ISRA 2022 [9]	20
12	Vůz Chaparral 2E [10]	21
13	Souhrn naměřených časů pro různé typy a výšky karoserií [12]	22
14	Graficky znázorněné pořadí jednotlivých karosérií [12]	22
15	Soustava aerodynamických sil a momentů ŠKODA Scala [13]	23
16	C_d - součinitel odporu různých těles [13]	25
17	Rotující rameno matematika Benjamin Robinse [15]	29
18	Aerodynamický tunel Frank H. Wenham [16]	29
19	Aerodynamický tunel Gustave Eiffel [17]	30
20	Otevřený aerodynamický tunel [18]	31
21	Otevřený aerodynamický tunel [19]	31
22	Aerodynamický tunel na Strojní fakultě ČVUT [2]	33
23	Popis jednotlivých částí aerodynamického tunelu na Strojní fakultě ČVUT [20]	34
24	Popis jednotlivých částí aerodynamického tunelu na Strojní fakultě ČVUT [20]	34
25	Aerodynamický tunel FKFS [13]	35
26	Aerodynamický tunel FKFS s testováním aerodynamiky Škoda Enyaq [22]	36
27	Aerodynamický tunel FKFS s testováním aerodynamiky Škoda Enyaq [22]	36
28	Karoserie Mercedes AMG C 63 DTM 1/24 od Attan slot-racing [24] .	38
29	Karoserie od SLOT-BPA, Vlevo: Peugeot 406 coupe BTC, Vpravo: Honda CUP	39
30	Vlevo: Prvek na zadním spoileru karoserie Peugeot 406 coupe BTC, Vpravo: Prvek na zadním křídle u Škoda Fabia RS Rally 2 [25]	39
31	Vlevo: Škoda Enyaq Coupé iV [26], Vpravo: Tesla X [27]	40
32	Vlevo: Audi E-tron GT [28], Vpravo: Porsche Taycan [29]	40
33	ŠKODA ENYAQ COUPÉ iV [25]	41
34	První čtyři počáteční návrhy mé karoserie	42

35	Vytváření měřicího prostoru, podle konzultací s Ing. Vojtěchem Jakubcem	43
36	Fyzikální vlastnosti vzduchu v CFD simulaci	43
37	Nastavení sítě v CFD simulacích [31]	44
38	Turbulentní model k-epsilon	45
39	Podrobné nastavení turbulentního modelu	45
40	Beran gen 1	46
41	Beran gen 1 CFD	46
42	Beran gen 2	47
43	Beran gen 3	47
44	Beran gen 4	48
45	Beran gen 5	49
46	Beran gen 6	49
47	Beran gen 6 CFD	50
48	Beran gen 7	50
49	Beran gen 8	51
50	Beran gen 9	51
51	Beran gen 10	52
52	Beran gen 11	52
53	Beran gen 12	53
54	Beran gen 12 CFD	53
55	Zobrazení působnicího tlaku na karoserii, Vlevo: Siemens STAR CCM+, Vpravo: Autodesk CFD Ultimate 2024	54
56	Zobrazení proudnic vzduchu, Vlevo: Siemens STAR CCM+, Vpravo: Autodesk CFD Ultimate 2024	54
57	Zobrazení rychlosti vzduchu okolo modelu, Vlevo: Siemens STAR CCM+, Vpravo: Autodesk CFD Ultimate 2024	54
58	Zobrazení rychlosti vzduchu okolo modelu, Vlevo: Siemens STAR CCM+, Vpravo: Autodesk CFD Ultimate 2024	55
59	Beran gen 13	55
60	Beran gen 14	55
61	Beran gen 15	56
62	Beran gen 15 CFD	56
63	Beran gen 16	57
64	Beran gen 17	57
65	Beran gen 18	58
66	Beran gen 19	58
67	Beran gen 20	59
68	Síť v CFD simulacích Siemens STAR CCM+	59
69	Porovnání simulace tlaku ze Siemens STAR CCM+ a Autodesk CFD Ultimate 2024	60

70	Porovnání simulací ze Siemens STAR CCM+ a Autodesk CFD Ultimate 2024	61
71	Získaná data z CFD simulací	63
72	Získaná data z CFD simulací	64
73	Měřicí body v aerodynamickém tunelu	69
74	Přípevnění modelu v aerodynamickém tunelu	69
75	Moje karoserie v aerodynamickém tunelu	70
76	Ovládací a měřicí software aerodynamického tunelu NI 9205	70
77	Škoda Enyaq s přípevněnými bavlnkami pro znázornění proudění vzduchu [22]	73
78	Umístění bavlnek na můj model	73
79	Vrchní pohled na model testovaný v aerodynamickém tunelu	74
80	Porovnání proudění z CFD simulací a aerodynamického tunelu	74
81	Porovnání tvaru mé karoserie a Škody Enyaq coupe iV	79
82	Má karoserie a model Škoda Enyaq coupe iV [25]	79
83	Má karoserie a Toyota GR YARIS Rally1 HYBRID pro rok 2024 [33]	79
84	Zadní spoiler mé karoserie a přitlačné křídlo Škoda Fabia RS Rally2 [34]	80
85	Vylisovaná karoserie Mercedes AMG C 63 DTM s nalepenými výlepkami oken [24]	80
86	3D výtisk pro výrobu negativní formy	81
87	Zalití 3D výtisku do Lukoprenu N1522	81
88	Vytvrzená negativní forma pro výrobu kopyta	82
89	Kopyto v lisovacím stroji	82
90	Kopyto po vylisování karoserie	83
91	Vývoj výroby mé karoserie	83
92	SPYTECH race manager	85
93	Jednotlivé měření karoserie, Zleva: Honda CUP, Peugeot 406 coupe BTC, Mercedes AMG C63 DTM, Beraq	86
94	Dráha AMC Nová Paka	88
95	Model auta pro měření - AMC Nová Paka	90
96	Nastavení ovladače na dráhu AMC Nová Paka	90
97	Dráha SCRC Pardubice	91
98	Model auta pro měření - SCRC Pardubice	92
99	Nastavení ovladače na dráhu SCRC Pardubice	93
100	Karoserie Honda CUP	94
101	Karoserie Peugeot 406 Coupe BTC	95
102	Karoserie Mercedes AMG C63 DTM	96
103	Karoserie Beraq	97
104	Karoserie Honda CUP	98
105	Karoserie Peugeot 406 Coupe BTC	99
106	Karoserie Mercedes AMG C63 DTM	100

107	Karoserie Beraq	101
108	Porovnání průměrných časů na jedno kolo na dráze AMC Nová Paka	104
109	Porovnání průměrných časů na jedno kolo na dráze SCRC Pardubice	105

SEZNAM TABULEK

1	Nejlepších 20 z ISRA 2023 Ranking [8]	19
2	Aerodynamické součinitele - síly a momenty [13]	23
3	Označení veličin [13]	23
4	Označení veličin [13]	26
5	Označení veličin [13]	26
6	Dělení Aerodynamických tunelů podle Machova čísla [14]	32
7	Parametry aerodynamického tunelu na Strojní fakultě ČVUT [20] . .	33
8	Popis částí aerodynamického tunelu na Strojní fakultě ČVUT [20] . .	34
9	Parametry aerodynamického tunelu na FKFS [21]	35
10	ISRA pravidla pro karoserie Production PR/24[30]	42
11	Označení veličin [13]	62
12	Označení veličin [13]	62
13	Popis veličin z CFD-simulací [13]	62
14	Přepočet síly na hmotnost v závislosti na rychlosti	68
15	Naměřené hodnoty v aerodynamickém tunelu Strojní fakulty ČVUT .	71
16	Vypočítaný koeficient odporu a vztlaku z aerodynamického tunelu . .	72
17	Jednotlivé měřené karoserie	85
18	Označení veličin	87
19	Parametry dráhy pro měření AMC Nová Paka	88
20	Obecné parametry měření na autodráze AMC Nová Paka	89
21	Základní rozměry modelu autíčka [30]	89
22	Parametry auta pro měření na dráze AMC Nová Paka	89
23	Nastavení ovladače modelu pro měření na dráze AMC Nová Paka . .	90
24	Parametry dráhy pro měření SCRC Pardubice	91
25	Obecné parametry měření na autodráze SCRC Pardubice	91
26	Základní rozměry modelu autíčka [30]	92
27	Parametry auta pro měření na dráze SCRC Pardubice	92
28	Nastavení ovladače modelu pro měření na dráze SCRC Pardubice . .	93
29	Honda CUP	94
30	Peugeot 406 Coupe BTC	95
31	Mercedes AMG C63 DTM	96
32	Beraq	97
33	Honda CUP	98
34	Peugeot 406 Coupe BTC	99
35	Mercedes AMG C63 DTM	100
36	Beraq	101
37	Souhrn výsledků z provedených měření na drahách	102