



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**NÁVRH PŘEDNÍHO KŘÍDLA VOZU FORMULE
STUDENT**

FRONT WING FOR FORMULA STUDENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vít Vrubel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Janoušek, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Vít Vrubel**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Michal Janoušek, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh předního křídla vozu Formule Student

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aerodynamika je důležitou součástí vývoje vozu, platí to i pro kategorii Formula Student. Přední křídlo ovlivňuje proudění vzduchu přes celý vůz, proto je třeba jeho návrhu věnovat náležitou pozornost. Předpokládá se využití jednak výpočtových nástrojů, tak i experimentální ověření výpočtu měření.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši používaných řešení předního křídla v soutěži Formula Student.
Ověřit konstrukci aktuálního křídla pomocí experimentu.
Porovnat výsledky experimentu s výpočtním modelem.

Seznam doporučené literatury:

KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: designing for speed. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 08-376-0142-8.

2019-20 Formula SAE Rules. September 2, 2020. Michigan: SAE International, 2020, 175 s. Rev A. Dostupné také z: <http://www.fsaeonline.com/content/2019-20%20SAE%20Rules%209.2.20a.pdf>.

Formula Student Germany All FSAE Teams. Formula Student Germany [online]. 2020 [cit. 2020-09-22]. Dostupné z: <http://www.formulastudent.de/fsc/>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá ověřením návrhu předního křídla na voze Formule Student. Práce je rozdělena do tří částí. V první je provedena rešerše používaných křídel v soutěži Formule Student. Druhá část je věnována experimentu a poslední část se věnuje CFD výpočtům a porovnání s naměřenými hodnotami. Výpočtové zdroje na provedení simulací byly poskytnuty projektem e-Infrastruktura CZ“ (e-INFRA LM2018140) financovaných z programu MŠMT. Projekty velkých infrastruktur pro VaVaI a projektem ELIXIR-CZ (LM2015047), částí mezinárodní infrastruktury ELIXIR.

KLÍČOVÁ SLOVA

Formule Student, Aerodynamika, CFD, validace, větrný tunel

ABSTRACT

This work deals with the verification of the design of the front wing on the Formula Student car. The work is divided into three parts. In the first, a search of the wings used in the Formula Student competition is performed. The second part is devoted to the experiment and the last part is devoted to CFD calculations and comparisons with measured values. Computations were done on computational resources supplied by the project „e-Infrastruktura CZ“ (e-INFRA LM2018140) provided within the program Projects of Large Research, Development and Innovations Infrastructures. Computational resources were provided by the ELIXIR-CZ project (LM2015047), part of the international ELIXIR infrastructure.

KEYWORDS

Formule Student, Aerodynamics, CFD, validation, wind tunnel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VRUBEL, Vít. *Návrh předního křídla vozu Formule Student*. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Michal Janoušek. Dostupné také z: VRUBEL, Vít. *Návrh předního křídla vozu Formule Student* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137256>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Michal Janoušek

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michalovi Janouškovi, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 19. května 2022

.....

Vít Vrabel

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Michalovi Janouškovi, Ph.D. za vedení a cenné rady, týmu TU Brno Racing za možnost realizace, členům týmu a přátelům za pomoc a doc. Ing. Karlu Jarošovi, CSc. za příležitost a možnost provést měření.

A zvláštní poděkování patří mé rodině za podporu během studia.

OBSAH

Úvod.....	11
1 Formule student	12
1.1 Historie.....	12
1.2 Tu Brno Racing	13
1.3 Pravidla	14
2 Stav minulý	15
2.1 Měření pomocí tenzometrů na zavěšení vozu	15
2.2 Výsledky validace.....	16
3 Přední křídlo v soutěži Formule Student.....	17
3.1 Přední křídlo na Dragon X	17
3.2 Přední křídla ostatních týmů.....	18
4 Větrné Tunely	23
4.1 Otevřené aerodynamické tunely	23
4.2 Uzavřené aerodynamické tunely	24
4.3 Měřicí prostor	24
4.4 Tunel pro měření.....	25
5 Volba Modelu a měřené veličiny.....	26
5.1 Celý vůz	26
5.2 Zmenšený model.....	26
5.3 Část vozidla	26
5.4 Popis geometrie křídla	27
5.5 Síly působící na profil.....	27
5.5.1 Přítlačná síla	27
5.5.2 Odporová síla	27
5.5.3 Klopný moment	28
6 Experiment	29
6.1 Přípravek pro měření.....	29
6.2 3D měření.....	30
6.3 Metodika měření	31
6.3.1 Žurnál zkušebny	33
6.3.2 Měřené varianty.....	33
7 Výsledky měření	34
7.1 Zhodnocení vlivu přípravku	34
7.2 Výsledky 3D měření	40
8 CFD.....	42
8.1 Příprava modelu.....	42
8.1.1 Příprava geometrie pro měření	42
8.1.2 Doména	42
8.1.3 Výpočetní síť.....	43
8.1.4 Okrajové podmínky	44

8.1.5	Turbulentní model.....	44
8.1.6	Nastavení řešiče	45
8.2	Porovnání simulace a experimentu	45
8.3	Porovnání výsledků z 3D aparatury.....	48
Závěr.....		52
Použité informační zdroje.....		53
Seznam použitých zkratk a symbolů		56
Seznam příloh.....		Chyba! Záložka není definována.

ÚVOD

Aerodynamika se stále více prosazuje ve světě automobilního průmyslu, kde se primárně dbá na snížení odporu vozidel za účelem snížení spotřeby a emisí. Ve světě motorsportu je odpor až na druhém místě a první místo zaujímá aerodynamická přítlačná síla. K jejímu vytvoření se využívá mnoha způsobů, které pravidla dané soutěže dovolují. I ve světě Formule Student se tento trend velmi rozmohl. Vývoj aerodynamického paketu se řídí podle výsledků CFD simulací, pomocí kterých se hledá řešení s co možná nejvyšším přítlakem a nejnižším odporem. Ovšem simulace jsou dosti náročné na nastavení a optimalizaci pro získání validních dat.

Tato práce se bude zabývat validací simulovaných dat na reálném modelu předního křídla ze soutěže Formule Student. Měření bude probíhat ve větrném tunelu u doc. Ing. Karla Jaroše, CSc. a simulace budou prováděny v programu Ansys Fluent. Cílem je ověřit přesnost výpočtového modelu, který je využíván při simulacích celého auta.

1 FORMULE STUDENT

Formule student (FS) je mezinárodní vzdělávací projekt, ve kterém studenti z bakalářského a magisterského studia mají za úkol postavit závodní monopost formulového typu a vše co je s tím spojené. Tedy vlastní návrh, výroba, testování, ale zároveň i zajištění financování jejich projektu a nábor dalších členů, předání vědomostí a znalostí dalším generacím. Dále také řešení logistických problémů s dopravou na jednotlivé závody FS po celém světě. Je to tedy kompletní balíček znalostí a dovedností, který má studenty připravit pro jejich budoucí povolání. [1]

Soutěžit se může v těchto kategoriích:

Combustion (CV) – vozidlo se spalovacím pohonem,

Electric (EV) – vozidlo s elektrickým pohonem,

Hybrid (HV) – vozidlo s hybridním pohonem,

Driverless (DV) – autonomní vozidlo.

Aby tým mohl závodit, musí se kvalifikovat na závody skrze znalostní testy. Na závodech musí auto projít technickou přejímkou. Na té se kontroluje, zda monopost splňuje všechna potřebná pravidla a regule. Následně se soutěží jak v dynamických disciplínách, kde se závodí na čas, tak ve statických, kde se hodnotí znalosti a příprava jednotlivých týmů. [8]

Business presentation – tým musí představit ekonomický plán, jak s vozem/vozy vydělávat,

Cost and Manufacturing – tým obhájí vypracovanou nákladovou studii, v níž je seznam všech dílů na autě a rozepsány jejich výrobní procesy a nacenění,

Engineering Design Event – hodnotí se daný návrh a porozumění dané problematice,

Acceleration – sprint s pevným startem na 75 metrů dlouhé rovince,

Skid Pad – trať ve tvaru ležaté osmičky, každé kolo se jede dvakrát, test na ustálený stav zatáčení,

Autocross - jedno kolo na trati o délce 1km která je velmi podobná trati endurance. Čas z trati slouží jako kvalifikace na finální disciplínu endurance,

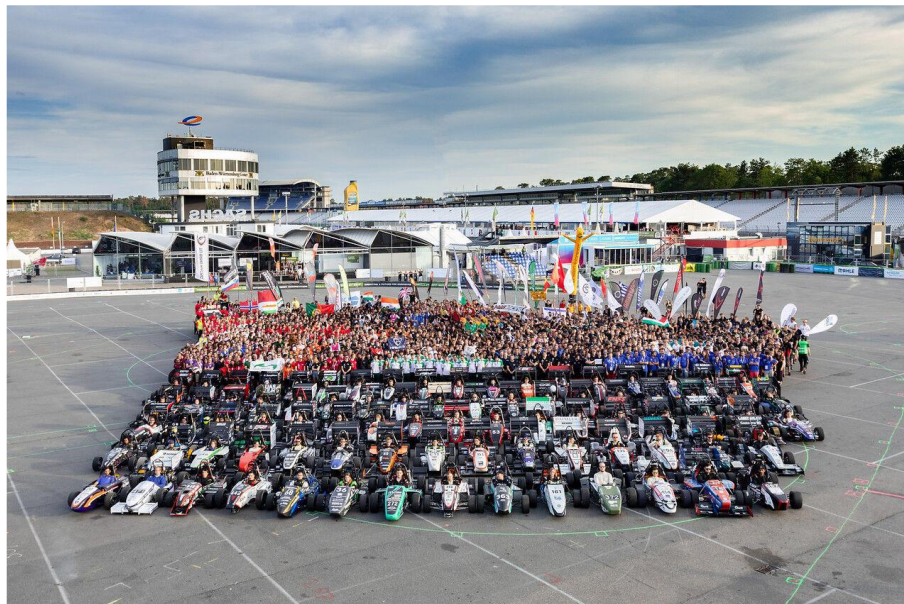
Endurance – vytrvalostní závod na 22 km. Nejnáročnější disciplína, ale také nejlépe hodnocená. Její dokončení je podmínkou pro dobré umístění v celkovém hodnocení. Trať je velmi technická (ostré zatáčky, slalomy, šikany). Auto po dokončení vždy musí opět projít technickou přejímkou. Aby mohla být disciplína bodovaná.

Efficiency – hodnotí se spotřeba paliva/elektrické energie v poměru vzhledem k rychlosti na trati z výsledku na endurance. [2]

1.1 HISTORIE

Projekt původně pochází z USA a první závod se zde konal již v roce 1981. Od té doby soutěž získávala na popularitě. Do Evropy se dostala až v roce 1998. V roce 2005 se konal první závod Formule Student Germany, (viz obr. 1) který je považován za neoficiální mistrovství světa. Má

největší prestiž a podle jeho pravidel se řídí všechny evropské týmy, stejně tak jako tým TU Brno Racing. V dnešní době je na světě zhruba 900 týmů. Závody se konají po celém světě (Japonsko Brazílie Moskva atd....) [3]



Obr. 1 společná fotografie ze závodu FSG [4]

1.2 TU BRNO RACING

Tým vznikl v roce 2010 na Fakultě strojního inženýrství a od té doby se podařilo postavit 10 vozů se spalovacím pohonem a jedno s elektrickým pohonem. (viz obr. 2) Také se podařilo rozšířit řady o studenty z dalších fakult a to z fakulty elektrotechnické, podnikatelské i informačních technologiích. V této době vzniká druhé auto na elektrický pohon a zároveň připravené pro autonomní řízení. S jubilejním desátým monopostem se tým umístil 24. ve světě a 9. v Evropě a s prvním elektrickým autem skončil na 36. pozici ve světovém žebříčku. [5][6][7]



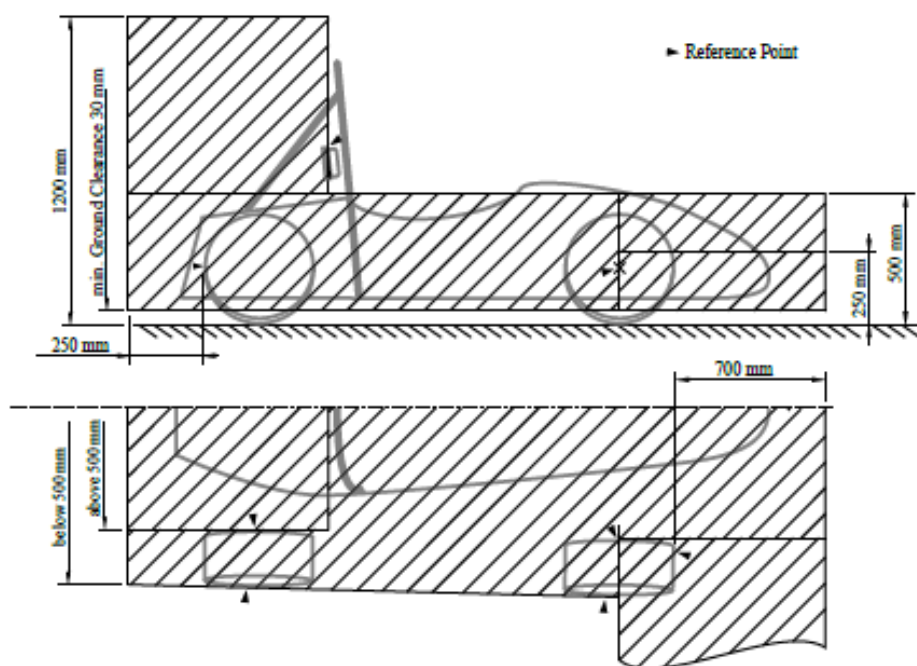
Obr. 2 tým TU Brno Racing na závodech FS Czech [5]

1.3 PRAVIDLA

Většina evropských závodů se řídí podle FSG pravidel. Ty mají převážně bezpečnostní charakter, ovšem s dostatečnou vůlí pro kreativitu jednotlivých týmů. Co se týče pravidel, kterým se musí podřizovat aerodynamické oddělení, jedná se převážně o vymezení oblasti, kde se aerodynamické prvky mohou vyskytovat a také požadavky na jejich dostatečnou tuhost a bezpečnost vůči chodcům. [8]

Aerodynamický prvek je definován jako jakékoliv zařízení nainstalované na monopostu, jenž ovlivňuje proudění vzduchu za účelem vytváření aerodynamické přitlačné síly nebo redukce odporu. Většinou jde o hlavní prvky aerodynamického balení, jako je přední a zadní křídlo, podlaha s případnými bočními elementy, sidepody, bargeboardy atd. [8]

Pokud má prvek větší plochu než 225 cm² musí vydržet zatížení ve směru svislém o síle 200 N a jejich deformace nesmí být větší než 10 mm. Zároveň musí vydržet zatížení z jakéhokoliv směru o velikosti 50 N a maximální deformace může být 25 mm. [8]



Obr. 3 prostor pro aerodynamické prvky [8]

Co se bezpečnosti týče, všechny horizontální hrany, jež mohou přijít do kontaktu s chodcem, musí mít bezpečnostní rádius 5 mm (např. náběžná hrana předního elementu) a všechny vertikální hrany musí mít rádius 3 mm (např. bočnice předního křídla). [8]

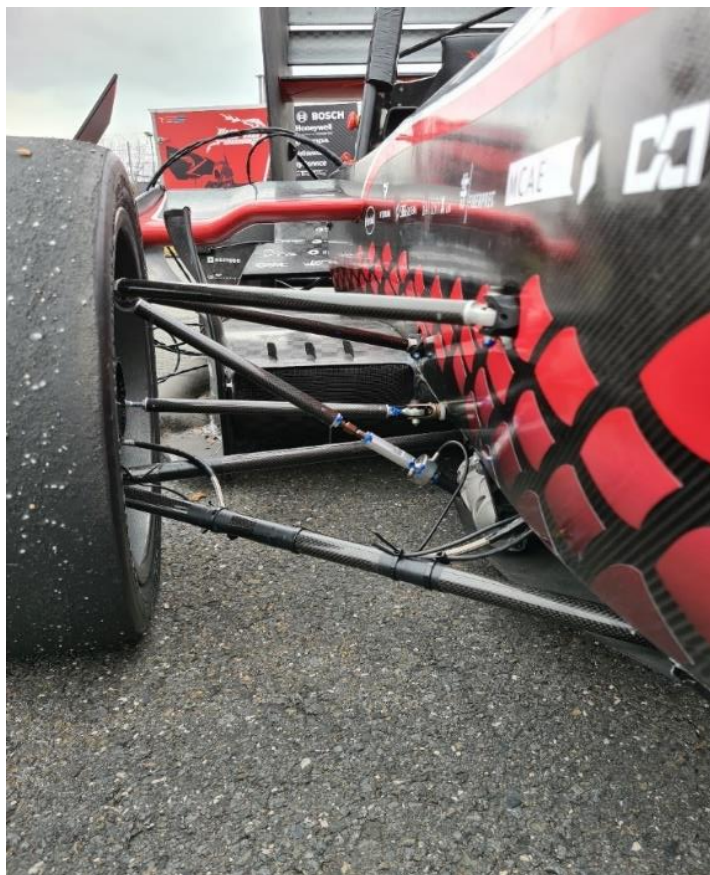
Na obr. 3 jsou vyznačené oblasti pro aerodynamické prvky. Oblast vyhrazená pro přední křídlo se nachází před předními koly, a to ve vzdálenosti od 75 do 700 mm od pneumatiky. V tomto prostoru před pneumatikou je minimální výška 30 mm a maximální 250 mm. V prostoru mezi kolem a rámem je horní výška omezena na 500 mm. Šíře křídla není omezena, ovšem je potřeba dbát na manévrovatelnost mezi kuželkami. Proto křídlo nepřesahuje vnější okraj pneumatik. [8]

2 STAV MINULÝ

Životní cyklus Formule Student se skládá z návrhu, výroby, validace a závodění. Doposud byl převážně kladen důraz na návrh, zdokonalení CFD výpočtů, jejich automatizaci a na výrobní část. Ovšem validační část byla v minulých letech opomíjena, a to z důvodu absence času a lidských a materiálních zdrojů. Přičemž je validace velmi důležitá i co se budoucího vývoje týče, aby návrh nebyl založen na špatných vstupních datech. Dalším podstatným přínosem validace je zlepšení pozice před porotci během EDR (Engineering Design Report). Kde je úkolem návrh obhájit, proč a jak se postupovalo při vývoji a z jakých dat se vycházelo. První validace proběhla na Dragonu 9. Závěrem bylo zjištění, že konstrukce předního křídla není ideální, a přestože generovalo velké množství přítláčivé síly, negativně ovlivňovalo proudění kolem zbylých částí monopostu. Toto zjištění se následně promítlo do konceptu křídla pro Dragon X, kde bylo cílem se tomuto problému vyvarovat.

2.1 MĚŘENÍ POMOCÍ TENZOMETRŮ NA ZAVĚŠENÍ VOZU

Měření probíhalo na polygonu firmy Continental Barum s.r.o. v Otrokovicích kvůli dlouhé rovině, dobrému povrchu a minimálnímu sklonu tratě. Validace probíhala pomocí tenzometrů instalovaných na zavěšení monopostu (viz *obr. 4*). A pomocí pitotovy trubice umístěné na kapotě formule s termočlánekem pro určení přesné rychlosti okolního vzduchu. Měření probíhalo při ustálených rychlostech od 40 do 80 km/h. Vždy se provádělo několik jízd při jedné rychlosti i v opačném směru, aby se eliminoval vliv větru a sklonu tratě na výsledky měření.

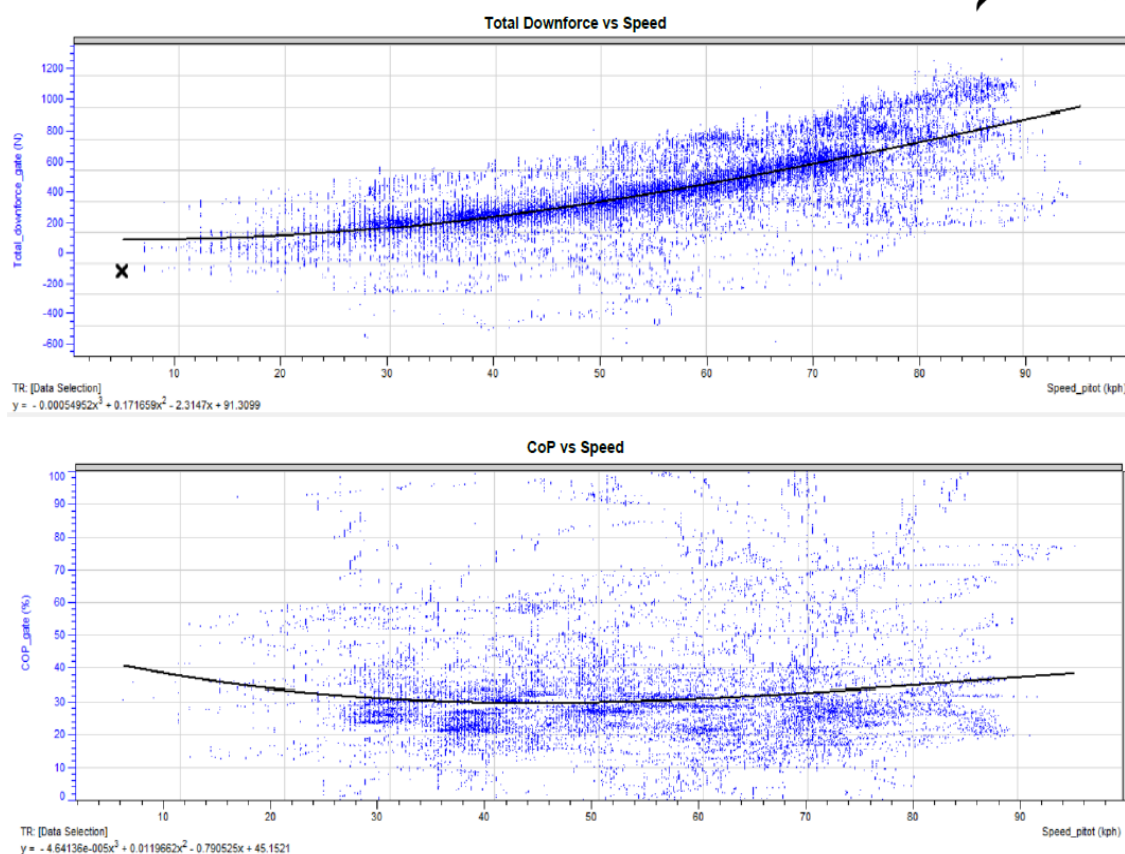


Obr. 4 tenzometr na předním zavěšení monopostu

2.2 VÝSLEDKY VALIDACE

Výsledkem měření, viz obr. 5, je průběh zatížení na přední a zadní nápravě, celková přítlačná síla a poloha centra přítlačných sil vůči rychlosti.

TU Brno Racing | Brno University of Technology | Test report



5

Obr. 5 naměřená data z validace aeropaketu

Toto měření dává dobrou představu o chování vozu v různých rychlostech a hodnotu celkového přítlaku. Ta odpovídá vypočteným hodnotám. CoP se pohybuje v ideálním intervalu, ale jeho absolutní hodnota neodpovídá návrhu. Měření nedává přesnou informaci o tom, kde konkrétně přítlačná síla vzniká, kde dochází k separaci proudění atd. Navíc jsou výsledky ovlivněny okolními vlivy jako proměnlivá teplota, nepříznivé proudění vzduchu ovlivněné okolní zástavbou. Na celém autě je celá spousta detailů, které do CFD simulací nemohou být obsaženy z důvodu náročnosti výpočtu a kvality sítě.

3 PŘEDNÍ KŘÍDLO V SOUTĚŽI FORMULE STUDENT

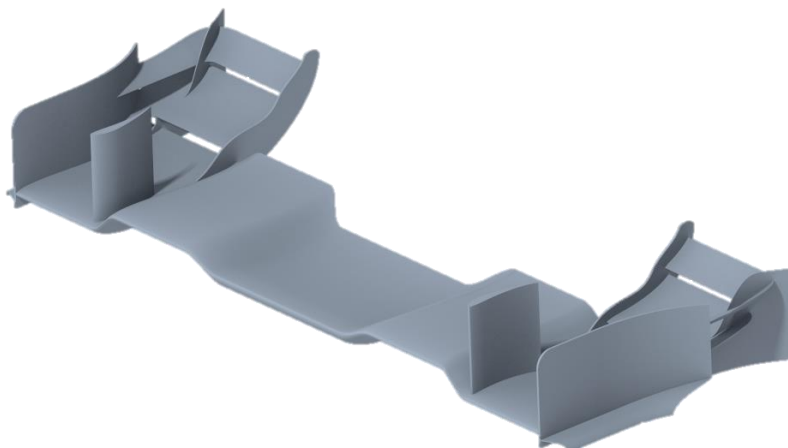
Rozvoj aerodynamiky u závodních vozidel a celkově v automobilním průmyslu se nevyhnul ani světu Formule Student, kde už nyní dominují na předních příčkách pouze týmy s velmi pokročilými aerodynamickými pakety. Primární cíl je poskytnout přitlačnou sílu s minimálním zvýšením hmotnosti a momentu setrvačnosti, za účelem zvýšení adheze mezi pneumatikou a vozovkou. Optimalizací výše zmíněných faktorů lze docílit maximální rychlosti při průjezdu zatáčkou. Daň za to je v podobě odporu, který snižuje maximální rychlost na rovinkách. Proto je aerodynamika závodních vozidel o hledání kompromisu mezi objemem přitlačné síly a hodnotou odporu. Dalšími cíli je stabilizace středu přitlačných sil, protože pozice CoP má vliv na jízdní dynamiku vozidla. Je nutné docílit předvídatelného chování vozidla v nejrůznějších jízdních stavech. Další faktor, který ovlivňuje aerodynamiku, je správné fungování chlazení monopostu.

Aerodynamický paket, kterým jsou vybaveny závodní speciály i vozy FS lze rozdělit na sekce, jako je přední křídlo, zadní křídlo, boční podlahy a podlaha samotná. Jako první do styku s volným prouděním přichází přední křídlo. To má za úkol jednak vytvářet přitlačnou sílu a také rozvádět vzduch kolem a skrz celý monopost k zajištění co nejlepšího fungování zbytku aeropaketu a chlazení.

Vozy FS se pohybují v relativně malých rychlostech. Průměrná rychlost dosahovaná na trati se pohybuje kolem 60 km/h a většina trati je až z 90 % tvořena zatáčkami. Z toho vyplývá, že profily využívané při vývoji křídel FS jsou navrhovány pro nízké Reynoldsové čísla, a proto zde není taková možnost ovlivňovat proudění tvorbou vírů, jako je tomu například v F1.

3.1 PŘEDNÍ KŘÍDLO NA DRAGON X

Když na voze Dragon 9 proběhla validace aeropaketu, bylo zjištěno, že přední křídlo má negativní vliv na zbytek monopostu. Přední křídlo generovalo velké množství přitlačné síly, ale zároveň díky masivnímu úplavu ztrácely ostatní aerodynamické prvky, jako jsou boční podlahy/sidewingy a zadní křídlo. To se projevilo na zhoršení jízdních vlastností monopostu. Z toho se odvíjely návrhové cíle pro sezonu s Dragon X. Stabilizace středu přitlačných sil CoP, minimálně zachovat nebo získat na přitlačné síle a co nejméně ovlivnit proudění za předním křídlem a tím podpořit funkci bočních podlah, chlazení a zadního křídla. Proto se zvolila poměrně ojedinělá koncepce předního křídla ve světě Formule Student (viz obr. 6).



Obr. 6 přední křídlo z Dragon X

Aby přední křídlo co nejméně ovlivňovalo proudění mezi koly a monokokem, byl zde zvolen aerodynamický profil s velmi malým prohnutím. Tyto profily negenerují velké množství přitlaků, ale o to méně ovlivní celkové proudění a pokud se nachází v oblasti přízemního efektu, tedy do vzdálenosti délky tětiny od země, je jejich přínos z hlediska přitlačné síly násoben. Střední část křídla je velmi ovlivněna nosem monopostu. Proto má profil kratší tětinu a má upravený úhel náběhu kvůli co nejlepší kooperaci s nosem k zajištění dostatečného průtoku vzduchu pod auto, tedy do podlahy, která je nejvíce efektivní co se týče poměru přitlačné síly a odporu. Tyto dvě zmíněné oblasti tedy neposkytovaly moc prostoru k získání požadovaného objemu přitlačné síly. Proto se oblastí zájmu stala část před předními koly. Jejím cílem je krom jiného odvést proudění od předních kol a tím snížit tlakový rozdíl mezi přední a zadní částí kola čímž se sníží celkový odpor vozidla. Zároveň kontrolovat úplav za kolem, aby co nejméně ovlivnil zbytek monopostu; toho je docíleno pomocí tvarovaných bočnic předního křídla. Poloha jednotlivých elementů byla získána pomocí 2D optimalizace, kde se díky genetickému algoritmu povedlo vybrat nejlepšího kandidáta. Klasické bočnice dotváří netradiční profily zahnuté do tvaru písmene L. Ve světě motorsportu se jim říká anglicky „infinity wings“, tedy nekonečná křídla. Mají tu funkci, že bočnice směřují proudění i do stran, kde lomená část profilu generuje stále přitlak, ale vektor odporové síly nesměruje proti směru jízdy. Takže nepřispívají do celkového odporu. [9]

3.2 PŘEDNÍ KŘÍDLA OSTATNÍCH TÝMŮ

Pravidla týkající se návrhu aerodynamického paketu jsou velmi benevolentní a nechávají dostatek prostoru k představivosti. Jak již bylo zmíněno výše, pravidla určují pouze prostor, ve kterém prvky mohou být a zároveň minimální radiusy na hranách. Proto může být ve světové konkurenci viděno spousty různých konceptů a variant předních křídel odvíjejících se od toho, jakým způsobem je auto poháněno, zda má motory v kolech či nikoliv, kde jsou umístěny chladiče a jejich rozměry a jak dokáží ostatní sekce vyřešit svoji zástavbu. Některé prvky se však opakují skrze týmy a mají společné rysy.

Nejjednodušší a zároveň nejvíce využívaný koncept předního křídla je jeden hlavní element přes celou délkou s případnou změnou profilu v prostřední části pod nosem. V prostoru mezi koly a rámem se nachází kaskáda profilů, takzvaná víceelementová křídla, u nichž dochází k pozdější separaci, než kdyby to byl pouze jeden jediný profil s tak velkým camberem. Docílí se toho pomocí průduchů mezi jednotlivými profily, vzduch tudy proudí a tím energizuje mezní vrstvu na straně nízkého tlaku a tak se oddálí separace, která má za následek ztrátu přitlaku a razantní zvýšení odporu. Další menší kaskáda profilů se nachází před předním kolem. Tento koncept využíval i tým TU Brno Racing ještě na předchozím monopostu Dragon 9.

Ukázkový příklad je přední křídlo týmu FaSTUBE z Berlína, viz obr. 7. Výhodou této koncepce je jednodušší návrh, výroba a strukturální pevnost. U týmu FaSTTUBE elementy ve střední části mezi rámem a koly dosahují velmi extrémního úhlu náběhu. To může být nevýhodou při nižší rychlosti, kdy vzduch nemá dostatek energie aby zustal přilnutý k profilu. Dále křídlo může velmi ovlivňovat zbytek auta, jelikož všechen vzduch směřuje nahoru. K redukci tohoto jevu se často využívají negativní elementy, tedy profily obrácené oproti všem zbylým na autě, které usměrňují vzduch za předním křídlem. I přesto, že vytváří pozitivní vztlak, je to výhodné kvůli podpoře bočních podlah náfuků na chladiče a zadního křídla.



Obr. 7 tým FaSTTUBE [10]

Setkáváme se i s více konzervativním návrhem, například u týmu Rennstall Esslingen (obr. 9). Zde využívají také kaskádu profilů, ovšem s ne tak agresivním úhlem náběhu elementů ve střední části křídla. Chladiče jsou uloženy v sidepodech po stranách vozu a je potřeba zajistit jejich fungování. Menší kaskáda před koly slouží primárně k vytváření přitlačné síly, ale taky pro odklon vzduchu od přímého nárazu na rotující pneumatiku. Tím je zajištěna redukce odporu, který vytvářejí rotující kola. Na křídlech můžeme vidět vždy bočnice, které slouží hlavně k oddělení oblasti vysokého tlaku nad křídlem a oblasti nízkého tlaku pod křídlem. Zároveň můžou generovat vír vedoucí podél monopostu a může sloužit například k separaci bočních podlah od okolního vzduchu, redukce odporu pneumatik nebo na chlazení brzd.



Obr. 9 tým Rennstall Esslingen [12]

Další prvky, které můžeme pozorovat na křídlech ostatních týmů jsou sestavy malých elementů v předních částech křidel, jako například zde u BCN eMotorsport. (obr. 8) Soustava elementů s oranžově označenou náběžnou hranou slouží částečně k vytváření přitlačné síly, ale hlavní účel je generování vírů které kontrolují úplav za kolem.



Obr. 8 tým BCN eMotorsport [13]

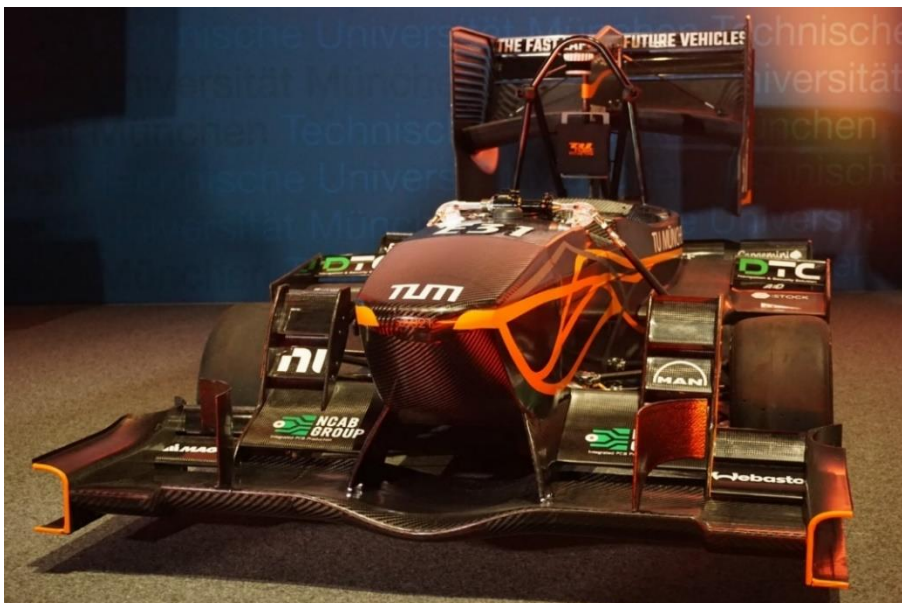
Přední křídlo je první aerodynamický prvek na autě, který se dostane do styku s volným prouděním. Z tohoto důvodu bývají často nejvíce komplexní aerodynamické díly na autě. Musí totiž správně nasměrovat proudění vzduchu, aby byly správně a co nejvíce využity ostatní prvky na autě. Proto se můžeme setkat s velmi propracovanými návrhy, jako třeba Rennteam Stuttgart. (obr. 10) Ten využívá několik různých strategií. Krom prvků zmíněných dříve jsou zajímavé například dva hlavní elementy táhnoucí se přes celou šířku předního křídla. Zde je maximálně využita obálka, která vymezuje prostor pro aerodynamické prvky.



Obr. 10 tým Rennteam Stuttgart [14]

Mezi další týmy, které mají velmi propracované aeropakety a pravidelně se umisťují na předních příčkách na závodech Formule Student, jsou například TUfast (obr. 11).

Zde lze vidět rozdělení hlavního elementu na tři různé části. Každá využívá jiný aerodynamický profil s jiným úhlem náběhu pro co nejlepší a nejvyšší efektivitu. Přednímu křídlu dominuje vertikální klapka, která má opět za účel kontrolovat úplav za kolem a podpořit funkci bočních podlah a sidewingu. Střední části sice dominuje věž profilů, ale pouze z části a je zde ponechán dostatečný prostor k průchodu vzduchu skrz zbytek vozu.



Obr. 11 tým TUfast Racing Team [15]

U týmu Ecurie Aix (obr. 12) je tato vertikální klapka tvořena kaskádou profilů. Oproti ostatním týmům se můžou pyšnit velmi komplexními bočnicemi, na nichž se nachází další profil, který vytváří přítlačnou sílu a sérií tunelů tvořící víry uzavírající auto a podlahy od okolního vzduchu. Velmi významný prvek, který dále ovlivňuje přední křídlo je nos. U posledních dvou týmů můžeme vidět jeho výrazné zvednutí, aby sloužil jako konfuzor. Celý monopost má připomínat letecký profil a právě nos tvoří jeho náběžnou hranu.



Obr. 12 tým Ecurie Aix - Formula Student Team RWTH Aachen e.V [16]

4 VĚTRNÉ TUNELY

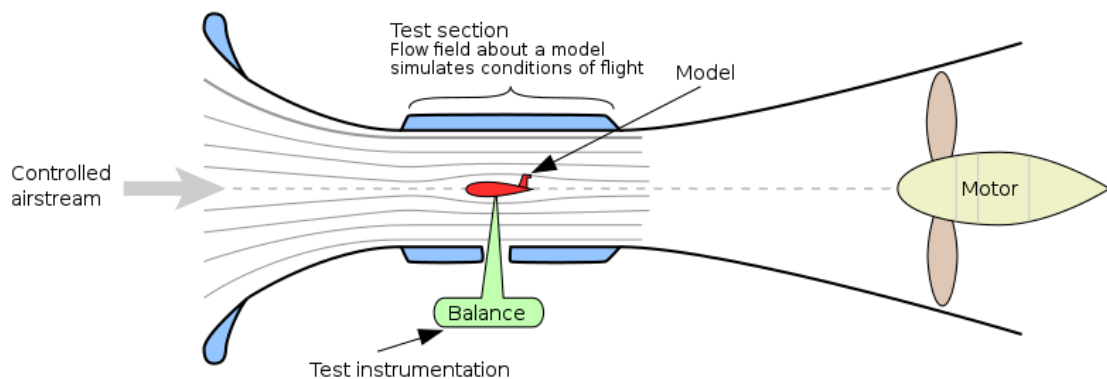
Větrné tunely slouží k testování a měření vlivu proudění vzduchu na měřené objekty, a to za laboratorních, dobře známých a kontrolovaných podmínek. [18]

Větrné tunely jsou, co se týče nákladů a složitosti konstrukce, velmi náročné. Proto existují různé typy větrných tunelů podle jejich primárního využití. Malé tunely na měření leteckých profilů nebo obrovské tunely pro testování vozidel ve skutečné velikosti, popřípadě letadel a jejich modelů. [18]

Podle toho se liší také jejich vybavenost. Pokud by měl být zaměřen na testování vozidel, je nutností pohybující se pás simulující vozovku, odsávání mezní vrstvy aby se co nejlépe simulovali reálné jízdní podmínky atd. [18]

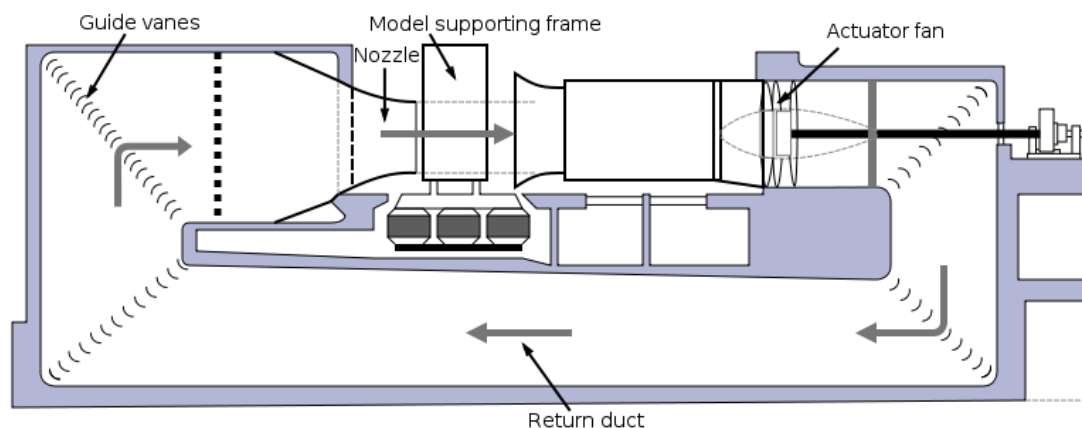
4.1 OTEVŘENÉ AERODYNAMICKÉ TUNELY

Jedná se o nejjednodušší verzi větrného tunelu zobrazeného na *obr. 13*. Vzduch je nasáván z okolí pomocí konfuzoru, ten je často vybaven voštinou o tvaru medových pláství, aby redukoval vliv venkovních podmínek a ustaloval proudění v tunelu. Dále proudí přes testovací oblast, ta je zároveň nejužším bodem a proto jsou zde dosahovány nejvyšší rychlosti. Vzduch odchází difuzorem, jenž zpomaluje vzduch před ventilátorem pro zvýšení efektivity. Výhodou tohoto typu jsou levnější pořizovací náklady a menší složitost návrhu a požadavku na prostor. Zároveň zde není problém s kouřem, pokud je využíván pro vizualizaci proudění. Nevýhodou je dražší provoz, vlivy venkovního prostředí a zvýšená hladina hluku pro okolí. [18]



Obr. 13 schéma otevřeného větrného tunelu [17]

4.2 UZAVŘENÉ AERODYNAMICKÉ TUNELY

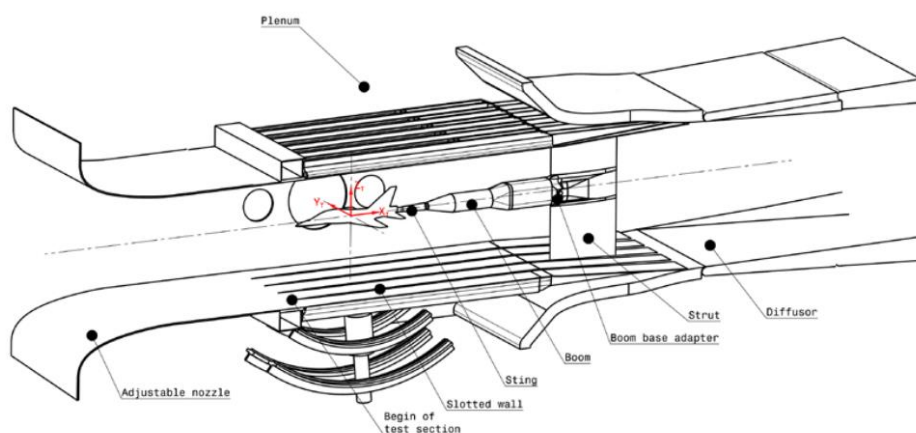


Obr. 14 schéma uzavřeného větrného tunelu [17]

Oproti otevřeným větrným tunelům mají tu výhodu, že vzduch zde cirkuluje, tím si zachovává svou energii a není již potřeba jí tolik dodávat. Z toho se odvíjí nižší náklady na provoz. Na druhou stranu, výstavba je nákladnější a vzduch je potřeba chladit, aby byly konstantní testovací podmínky. Pro vedení vzduchu v tunelu se využívají usměrňovače pro zachování co nejvíce stabilního proudění. Oblast pro měření je velmi podobná, jako při otevřených tunelech. [18]

4.3 MĚŘÍCÍ PROSTOR

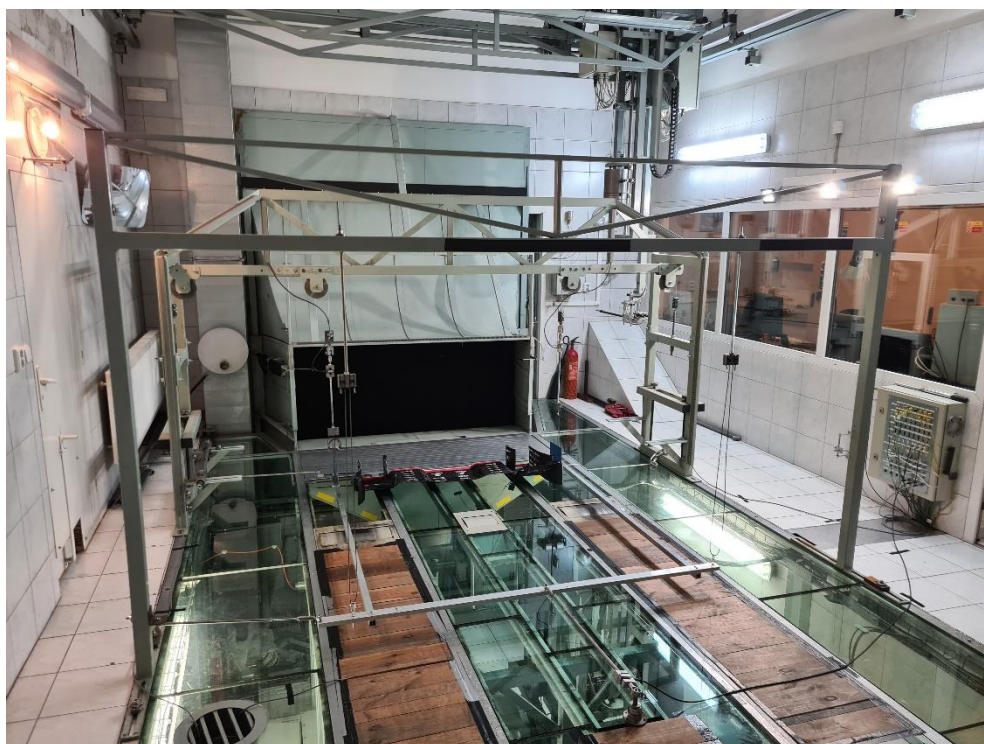
Opět můžeme mít otevřený a uzavřený prostor. Do otevřeného prostoru mohou být umístěny větší modely a výsledky nejsou tolik ovlivněny blízkostí modelu ke stěnám. Na druhou stranu musí být oblast kratší a proudící vzduch se mísí s okolím, a proto jsou větší požadavky na výkon ventilátoru. Při uzavřeném typu může být oblast delší, ale za to se zde projevuje vliv okolních stěn na proudění okolo modelu. To řeší třetí typ měřicího prostoru, a to je polopropustný. 30% obsahu stěn je otevřeno viz obr. 15. Zde získáváme výhody z obou předchozích řešení. Model může být větší a zároveň není tolik ovlivňován okolními stěnami a proudící vzduch neztrácí tolik energie míšením s okolím, jako u otevřeného typu. [18]



Obr. 15 testovací oblast s polopropustnými stěnami [19]

4.4 TUNEL PRO MĚŘENÍ

Větrný tunel viz *obr. 16*, který je k dispozici u pana doc. Ing. Karla Jaroše Csc. Je uzavřeného typu. To poskytuje výhodu šetření nákladu při provozu. Otevřený prostor navíc eliminuje nežádoucí vliv okolních stěn. Hubice má průřez 2000x850 mm a její výšku lze nastavit. Maximální rychlosti lze dosáhnout až 150 km/h.



Obr. 16 větrný tunel u doc. Ing. Karel Jaroš Csc.

5 VOLBA MODELU A MĚŘENÉ VELIČINY

Pro přesné měření v tunelu je potřeba dodržet podmínka maximální blokace plochy tunelu do 8 %, jinak hrozí zkreslení výsledků [18][22]

5.1 CELÝ VŮZ

Možnost testování celého vozu ve větrném tunelu je nejlepším způsobem validace. Tunel zvolený pro měření je uzpůsoben pro osobní automobily. Ovšem, není zde pohybující se pás simulující ubíhající vozovku, aby bylo možné napodobit chování mezní vrstvy při jízdě vozu. Jsou zde válce na protáčení kol, ty ovšem nejsou uzpůsobeny pro měření přítláčné síly. Pro účely validace se do výsledného měření navíc promítají i faktory, které byly v CFD simulaci zanedbány, a to z důvodu nadměrné náročnosti simulace bez výrazné přidané hodnoty. [10]

5.2 ZMENŠENÝ MODEL

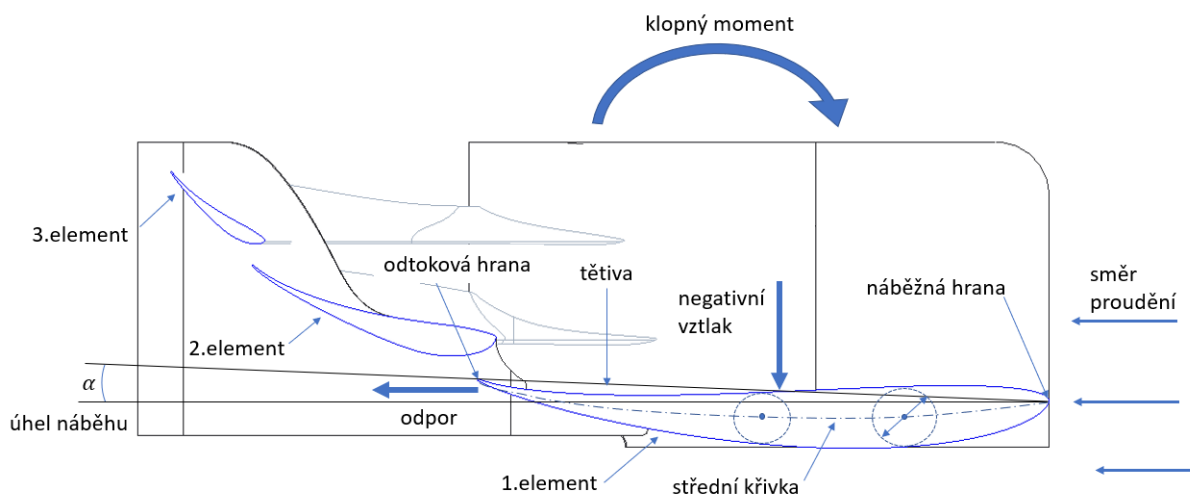
Při zmenšování modelu se musí dodržovat pravidlo o zachování Reynoldsova čísla. To znamená, že se zvedá rychlost proudění s obrácenou hodnotou zmenšení monopostu. Pokud by měl být testován zmenšený model ve velikosti 1:4, znamenalo by to, že rychlost 16,7 m/s, na kterou je navrhována aerodynamika vozidla, je nutné vynásobit 4. Bylo by nutné vyvinout rychlost 66,8 m/s což už je mimo rychlostní rozsah větrného tunelu. [10]

Důvodem zavržení této metody je komplikovanost výroby. Auto má velmi detailní prvky i co se týče aerodynamických zařízení, které by bylo velmi náročné vyrobit ve zmenšené variantě. Další roli hraje velikost mezní vrstvy, která by měla mnohem větší efekt na výsledky měření a způsobovala by nepřesné výsledky.[10]

5.3 ČÁST VOZIDLA

Z výše uvedených důvodů se jako ideální prvek k měření jeví použít pouze část monopostu a v tomto případě přední křídlo. Podmínku pro 8% blokaci tunelu splňuje. Zároveň je křídlo bez nutnosti dalších významných úprav připraveno na měření v aerodynamickém tunelu. Při jeho vývoji byla využita 2D optimalizace polohy elementů na vnější části křídla. Tunel disponuje 3D technologií, která dokáže měřit tlakové a vektorové pole ve vybrané rovině. Právě optimalizovaná část křídla se jeví jako vhodná oblast pro validaci výpočtů.

5.4 POPIS GEOMETRIE KŘÍDLA



Obr. 17 popis geometrie křídla [21]

Zde na obr. 17 lze vidět průřez testovaným křídlem a jeho hlavním profilem, který má popsané důležité části geometrie.

Na čele profilu je tzv. náběžná hrana. Její poloha je určena střední křivkou, jenž prochází kružnicemi vepsanými do celého profilu. Náběžná hrana je spojena pomocí tětivy s odtokovou hranou. Úhel, který tětiva svírá s volným prouděním, se nazývá úhel náběhu. Tloušťka profilu je daná jako průměr největší kružnice a prohnutí profilu se uvádí jako rozdíl mezi tětivou a střední křivkou. [21]

5.5 SÍLY PŮSOBÍCÍ NA PROFIL

Vlivem proudění vzduchu kolem aerodynamických profilů vznikají síly, jenž na profil působí. Primárně se jedná o vztlak, odpor a klopný moment.

5.5.1 PŘÍTLAČNÁ SÍLA

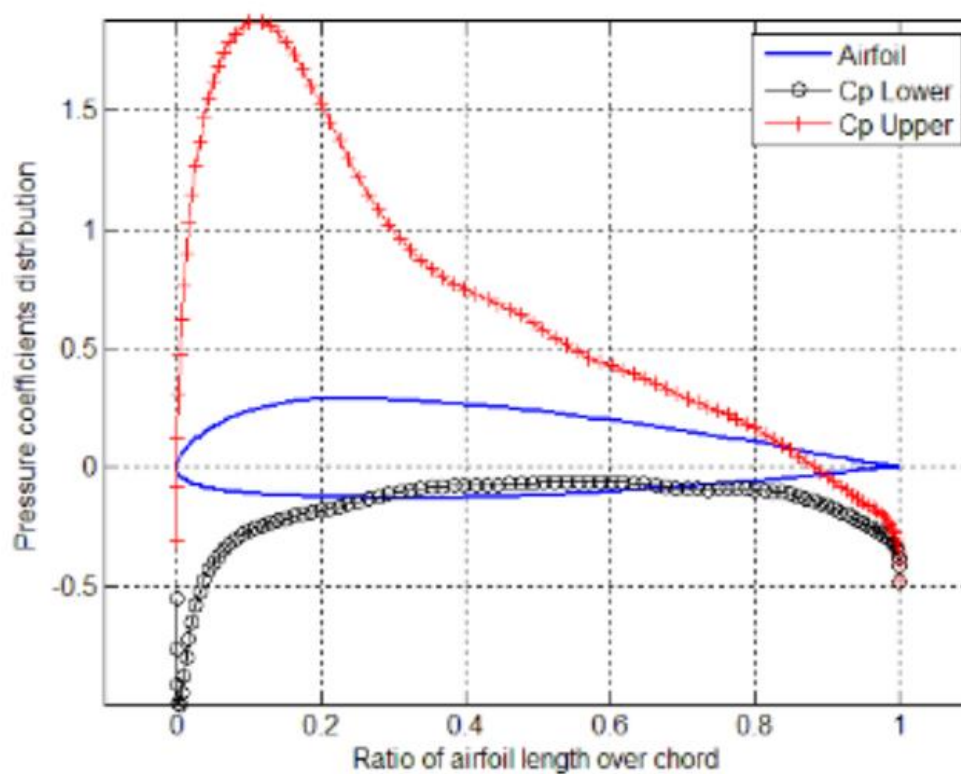
V našem případě se bude jednat o negativní vztlak, tedy přítlak, který vzniká rozdílnou rychlostí proudění kolem horního a spodního potahu profilu. Díky velké křivosti spodního potahu dochází k urychlení proudění, tedy ke snížení tlaku. Naopak na horní straně profilu vzduch díky jeho geometrii zpomaluje a vzniká tak oblast vyššího tlaku. Rozdílem tlaků na jednotlivých potazích vzniká právě přítlačná síla.

5.5.2 ODPOROVÁ SÍLA

Odpor profilu se skládá ze tří složek první je odpor vznikající třením vzduchu v mezní vrstvě, druhou významnější část tvoří rozdíl tlaků před profilem a za ním. Na náběžné hraně, kde se proudění rozděluje na část směřující pod profil a nad profil, je oblast, kde se rychlost proudění blíží k hodnotě 0. Zde je tlak působící proti pohybu křídla největší. Zároveň, pokud dojde na mezní stav a odtržení proudění před odtokovou hranou, dojde ke ztrátě přítlaku a rapidnímu zvýšení odporu. Třetí indukovaný odpor vzniká vyrovnáváním tlaků na konci křídla. Ten je částečně redukován bočnicemi, ale u konečných elementů je tento jev nevyhnutelný.

5.5.3 KLOPNÝ MOMENT

Klopný moment vzniká nepravidelným rozložením tlaků na profilu, viz *obr. 18*. Ovšem pro účely validace není významný a jeho hodnota se měřit nebude. [22]



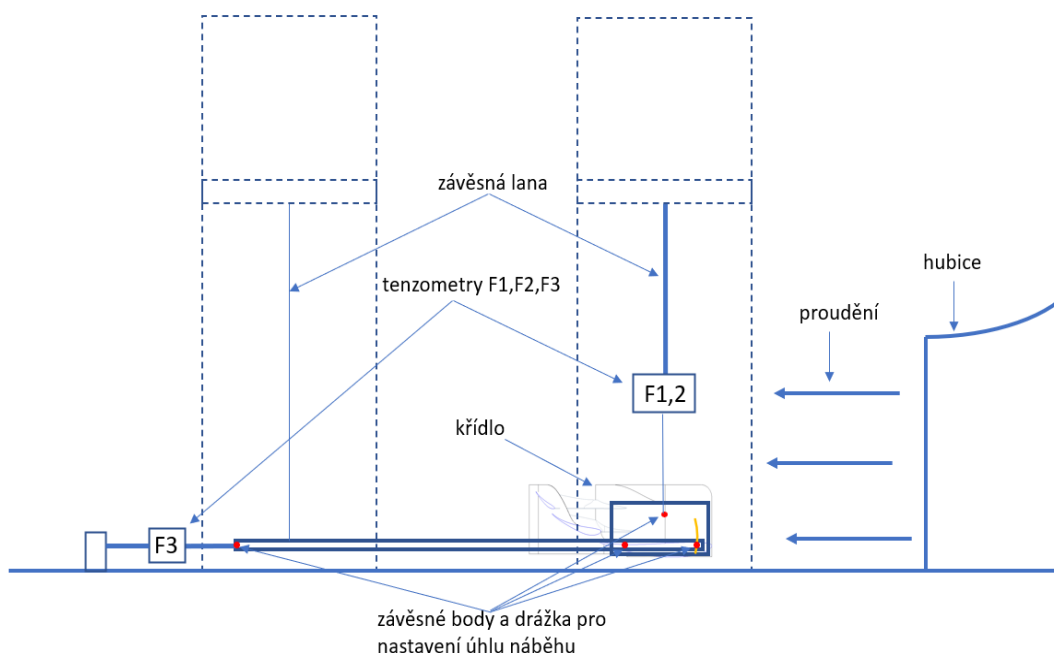
Obr. 18 rozložení tlakového koeficientu pro základní geometrii profilu křídla [22]

6 EXPERIMENT

Měření budou síly působící na křídlo při různých rychlostech proudění a při různých nastavení křídla, co se týče světlé výšky a úhlu náběhu. Dále budou měřeny 2 roviny pomocí 3D měřicí aparatury v zájmové oblasti, tedy nad vnější částí předního křídla a za ní.

6.1 PŘÍPRAVEK PRO MĚŘENÍ

Pro měření byl sestrojen přípravek, viz *obr. 19*. Křídlo je zavěšeno na 4 lankách. Na předních dvou jsou zavěšeny také dva tenzometry značeny F1 (levý) a F2 (pravý) pro měření přítláčné síly. Třetí tenzometr F3 je v zadní části ve vodorovné poloze vůči celému přípravku a měří odporovou sílu. Konstrukce se skládá z hliníkových profilů. Ke křídlu je přimontována přes šrouby spojující bočnici předního křídla a hlavní element. V plechovém plátu po bocích předního křídla jsou drážky pro nastavení úhlu náběhu. Výšku je potom možné korigovat pomocí závitových tyčí v rámu. Celý systém je vymezen vůči bočnímu pohybu rameny opatřenými na koncích kloubovou hlavou. Tenzometry využívané pro měření jsou model SSM-AJ-10KN S/N 221682. (*obr. 20*)



Obr. 19 náčrt přípravku pro měření



Obr. 20 přípravek umístěný v tunelu a jeden z tenzometrů využívaných pro měření

6.2 3D MĚŘENÍ

Proběhly dvě 3D měření v zájmové oblasti předního křídla. K vizualizaci proudění během reálného měření slouží 3D systém na zkušebně, viz obr. 21. Princip fungování je založen na měření rozdílu tlaku v 8 různých směrech v daných bodech. Z výsledků lze získat přesné údaje jako je rychlost, její vektor a tlak v síti bodů. Lze zvolit rozměry a hustotu měřících bodů na danou rovinu.



Obr. 21 detailní záběr na měřící sondu

6.3 METODIKA MĚŘENÍ.

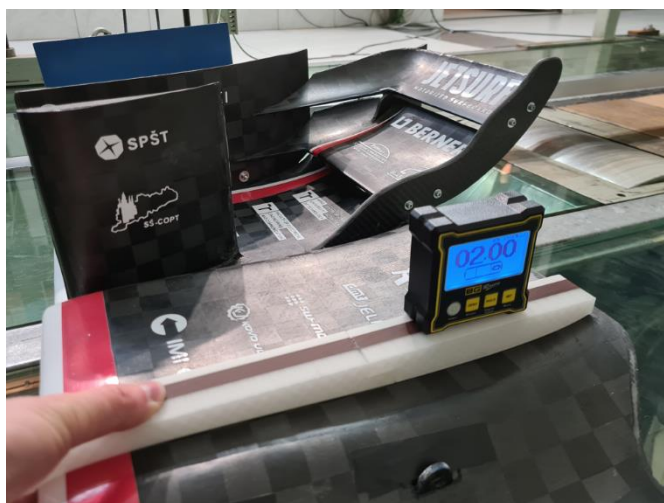
Před samotným měřením:

- kontrola funkčnosti všech měřidel,
- kontrola křídla a přípravku,
- nastavení konkrétní výšky pomocí závitových tyčí, na nichž byl přípravek zavěšen,
- kontrolováno na obou stranách od spodní hrany bočnice a odtokové hrany třetího elementu a porovnáno s CAD modelem,



Obr. 22 kontrola aktuální měřené varianty

- nastavení konkrétního úhlu náběhu (pomocí 3D tištěného přípravku na střední části hlavního elementu pomocí digitální vodováhy),



Obr. 23 kontrola aktuální měřené varianty AoA

- kontrola zda je přípravek ve vodorovné pozici (tenzometry F1 a F2),
- kontrola zda je uchycení tenzometru F3 v rovnoběžné pozici s přípravkem,
- vynulování tenzometrů.

Samotné měření

- Rychlost proudění se nastavuje v procentech pomocí předem nachystané tabulky hodnot.
- Začíná se na 20 km/h do rychlosti 70 km/h (krok 10 km/h) tato rychlost je stanovena z prvního měření při vyšších rychlostech se křídlo s přípravkem chovalo nestabilně a hrozilo poškození.
- Měření probíhá vždy 3 min k ustálení proudění a k získání reprezentativního vzorku dat.
- Hodnoty zaznamenané se zapisují do pomocného záznamu zkušebny, potřeba zapnout a vypnout po každé změně rychlosti.

Měření 3D sondou

- Sestavení a ověření funkčnosti 3D měřící aparatury,
- kalibrace aparatury pomocí externího kalibračního stojanu,
- nastavení sondy do požadovaného bodu,
- definování zájmové oblasti a počtu měřených bodů,
- zápis úhlů natočení sondy do systému,
- přesné nafocení krajních poloh měřící roviny (pomocí měřící sondy a stativu),
- nájezd měřící sondou do výchozího bodu měřící roviny,
- nastavení rychlosti ofuku,
- start samotného měření – měřící systém automaticky postupně odměří celou rovinu.

6.3.1 ŽURNÁL ZKUŠEBNY

- Hodnoty zaznamenávané zkušebnou

Tab. 1 Tabulka 1 zaznamenávané hodnoty zkušebnou

měřená hodnota			čidlo
označení	popis	jednotka	typ
Teplota	teplota vzduchu okolí na zkušebně	°C	NiCr (K)
Tlak	atmosférický tlak vzduchu na zkušebně	kPa	piezo
Vlhkost	relativní vlhkost vzduchu na zkušebně	%	-
venkovní_teplota	teplota vzduchu mimo zkušebnu - venku	°C	NiCr (K)
vzduch	rychlost ofuku vozu	km/h	Pitotova trubice
hubice	teplota vzduchu v ofukové hubici	°C	NiCr (K)
Síly	Síla působící na křídlo	N	Tenzometry

6.3.2 MĚŘENÉ VARIANTY

Tab. 2 měřené varianty

světlá výška	úhel náběhu	rychlost proudění	poznámka
20 mm	2°	20-70 km/h; 70-20 km/h	Kontrola vlivu hystereze na měření
20-100 mm	2°	70-20 km/h	Měření pro validaci
70 mm (podle měřené var.)	0°-12°	40-70 km/h	Měření pro validaci
70 mm	2°	50 km/h	3D měření

Pozn.

- Bázový stav, jak bylo křídlo navrženo (úhel náběhu střední části hlavního elementu 2°, výška bočnice od země 70 mm)

7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

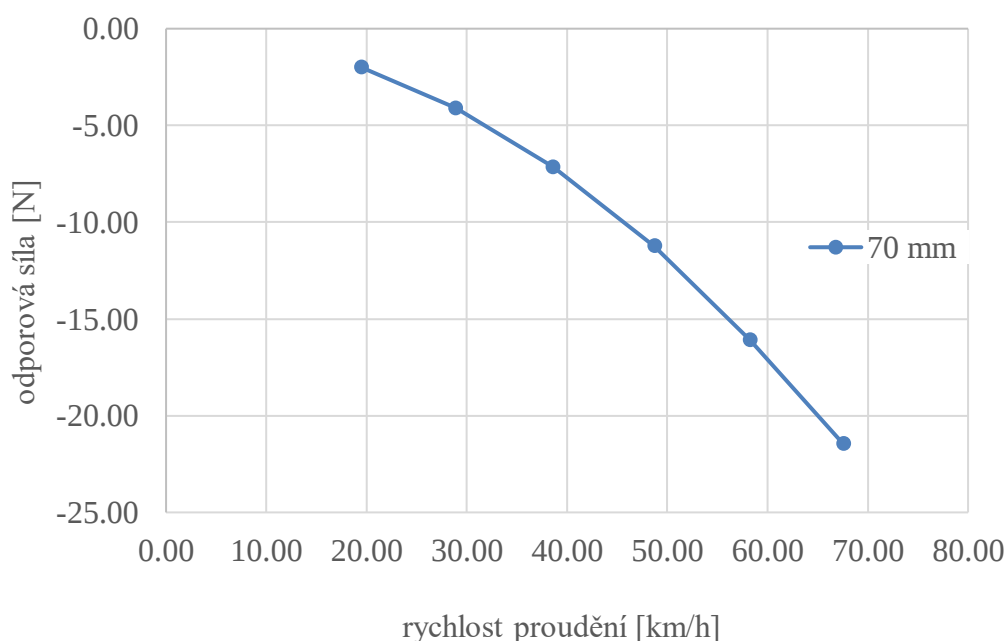
V následující kapitole jsou zpracovány výsledky všech provedených měření. Vybrané výsledky budou porovnány s vypočtenými hodnotami z CFD v následující kapitole. Během prvních měření se postupně zvyšovala a snižovala rychlost proudění při jednom nastavení, za účelem zjištění, zda na výsledky nemá vliv hystereze. To se nepotvrdilo. Při změnách úhlu náběhu se znovu měřil bazový stav pro kontrolu, zda měření, nastavení a výsledné hodnoty jsou totožné. To odpovídalo.

7.1 ZHODNOCENÍ VLIVU PŘÍPRAVKU

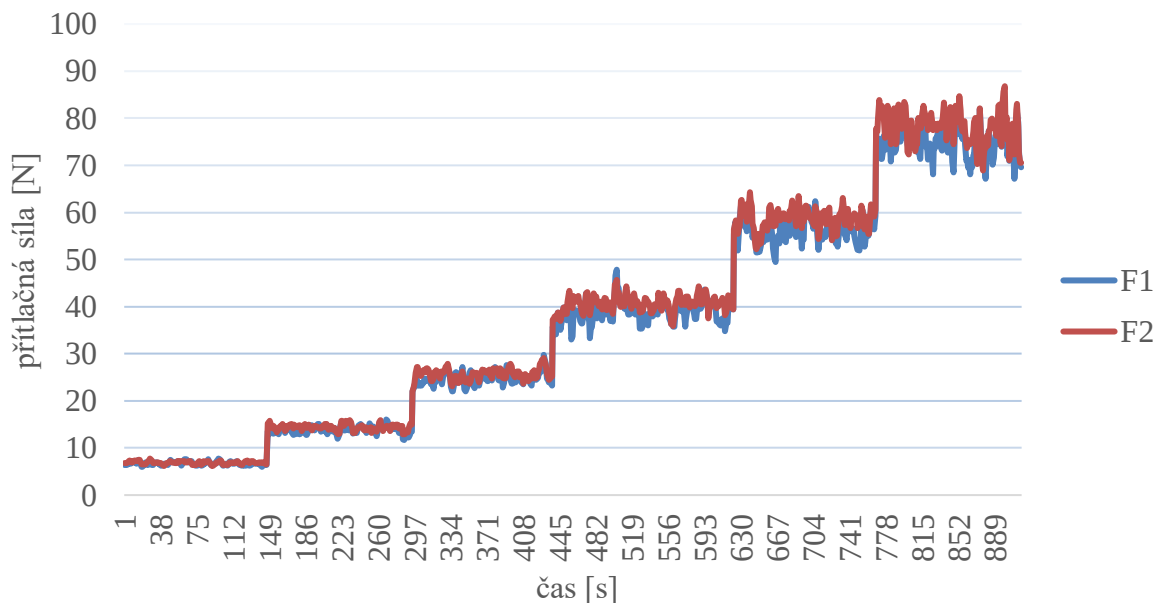
První měření probíhalo bez křídla, aby byl zjištěn vliv přípravku na výsledné hodnoty měření, viz obr. 24, a ty mohly být následně odečteny. Ukázalo se, že přípravek má vliv pouze na hodnoty odporové síly. Na měření přitlačné síly je jeho příspěvek zanedbatelný, a proto naměřené hodnoty přitlačné síly nebudou tímto způsobem korigovány.

Tab. 3 výsledky měření samotného přípravku

rychlost vzduch	odporová F	celková F
[km/h]	[N]	[N]
19.46	-2.00	0.08
28.89	-4.11	0.35
38.59	-7.15	0.84
48.71	-11.23	0.90
58.27	-16.09	1.02
67.54	-21.45	1.02

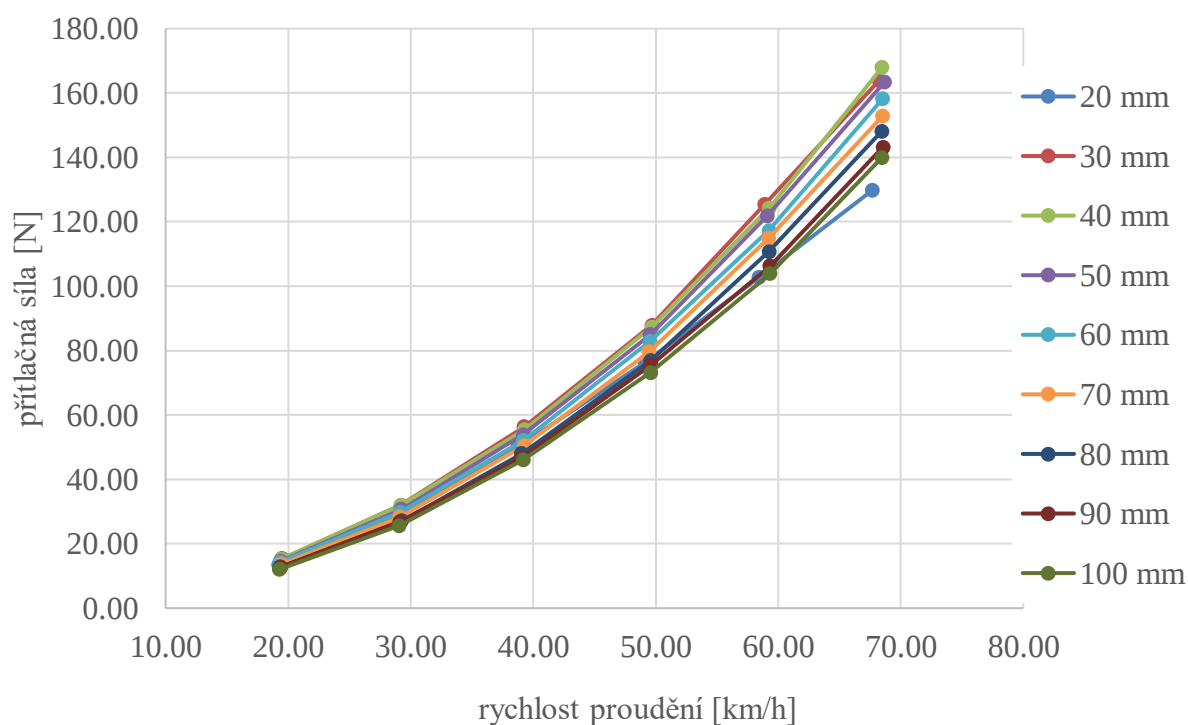


Obr. 24 závislost odporu přípravku na rychlosti proudění v 70 mm



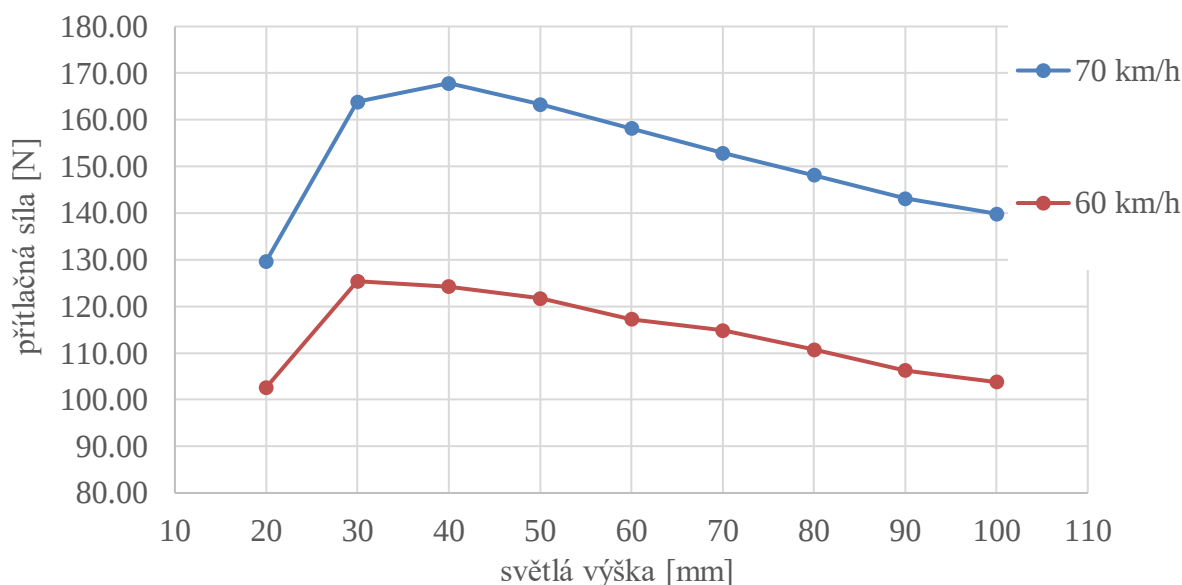
Obr. 25 data naměřená tenzometry F1 a F2 v závislosti na čase

Ve vyšších rychlostech dochází k většímu rozptylu naměřených hodnot, viz obr. 25. To je způsobeno vibracemi, které ovlivňuje proudění vzduchu, tuhost přípravku a křídla samotného. Také hodnoty F1 a F2 se mírně rozcházejí, což je nejspíše způsobené výrobními nepřesnostmi křídla. Při zkoušce zatížení břemenem ve středu křídla ukazovaly tenzometry totožnou hodnotu.



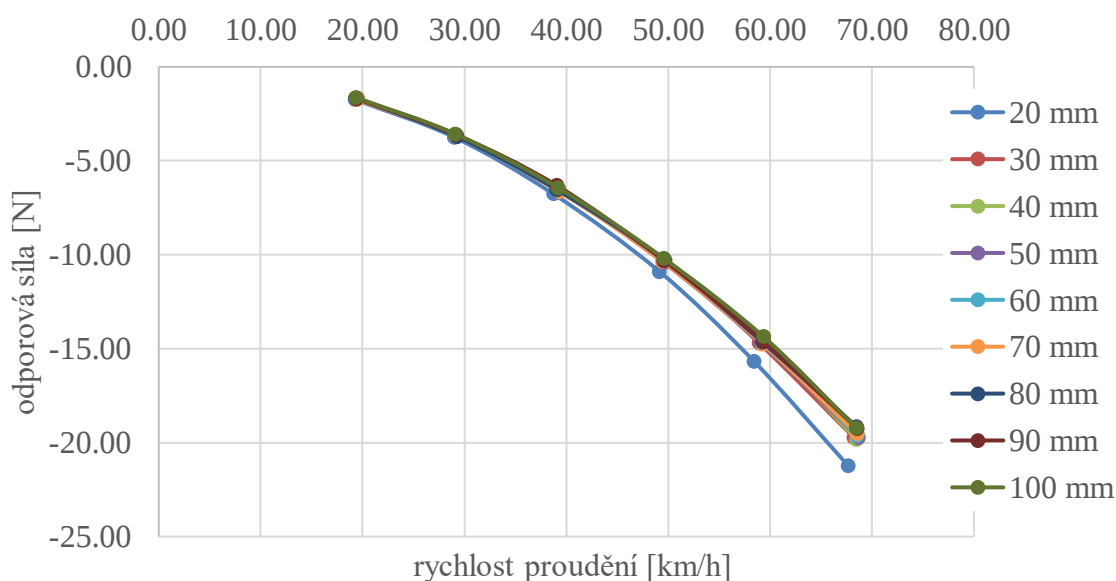
Obr. 26 hodnoty přtlaku závislé na rychlosti proudění při různých jízdních výškách

Přítlačná síla roste exponenciálně, jak bylo předpokládáno. Její maximální hodnota při návrhové rychlosti 60 km/h je při světlé výšce předního křídla 30 – 40 mm, viz obr. 26.

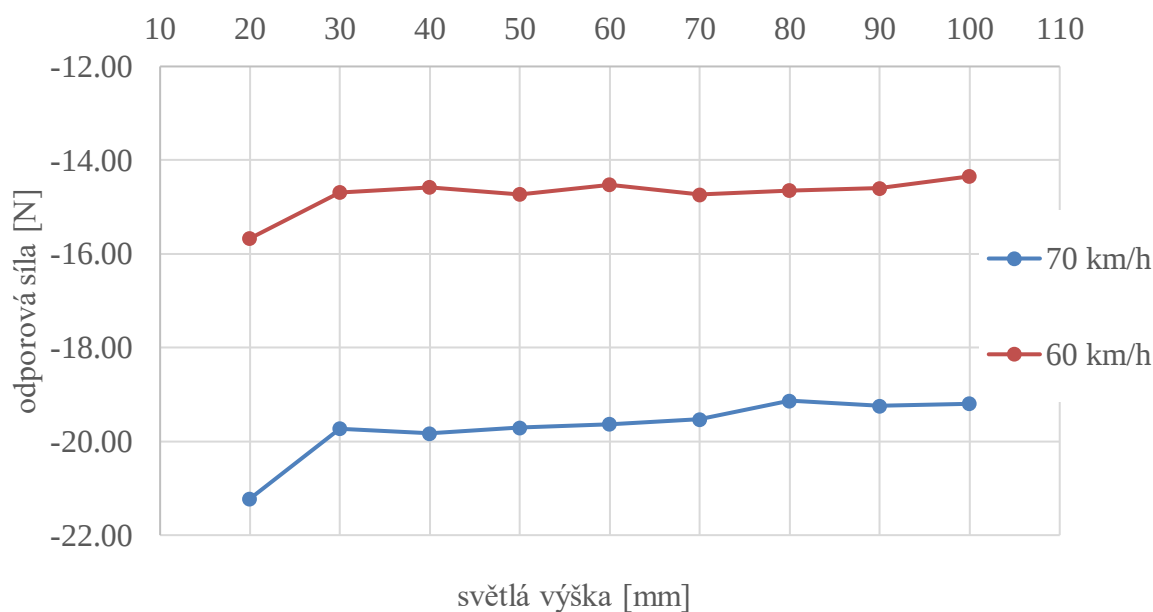


Obr. 27 nejvyšší hodnoty přítlaku při 60 km/h a 70 km/h a různých jízdních výškách

Přestože nejvyšší hodnoty přítlaku nastávají při 30 – 40 mm viz obr. 27 nejvyšší hodnoty přítlaku při 60 km/h a 70 km/h a různých jízdních výškách a návrhová výška byla 70 mm, při jízdě je tento stav velmi reálný. Například při stavu brždění před zatáčkou. Tlumiče na předním a zadním zavěšení se mohou pohybovat každý v rozmezí 25 mm aby nedošlo při jízdě k extrémnímu stavu, kdy přední křídlo zablokuje proudění pod sebou a celý monopost ztratí značný objem přítlačné síly, je bazový stav nastaven výše. Pokud by proběhlo měření dynamické jízdní výšky, mohla by být tato hodnota optimalizována.

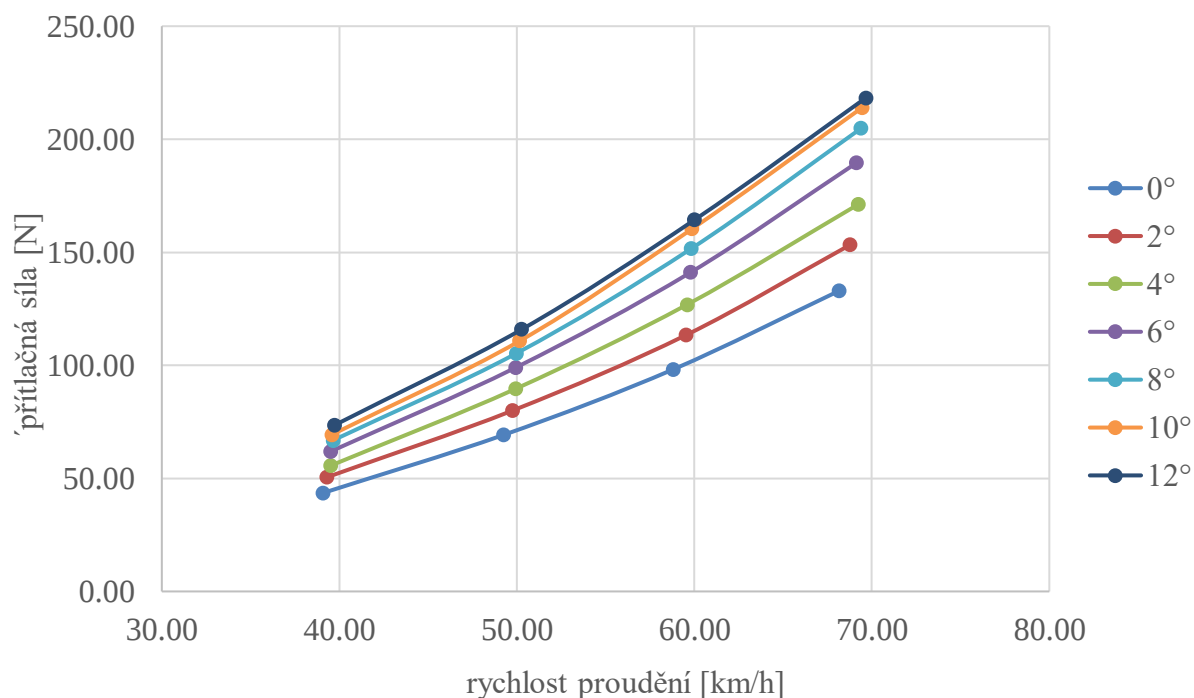


Obr. 28 hodnoty odporu při různých jízdních výškách a rychlostech



Obr. 29 závislost odporové síly na jízdní výšce

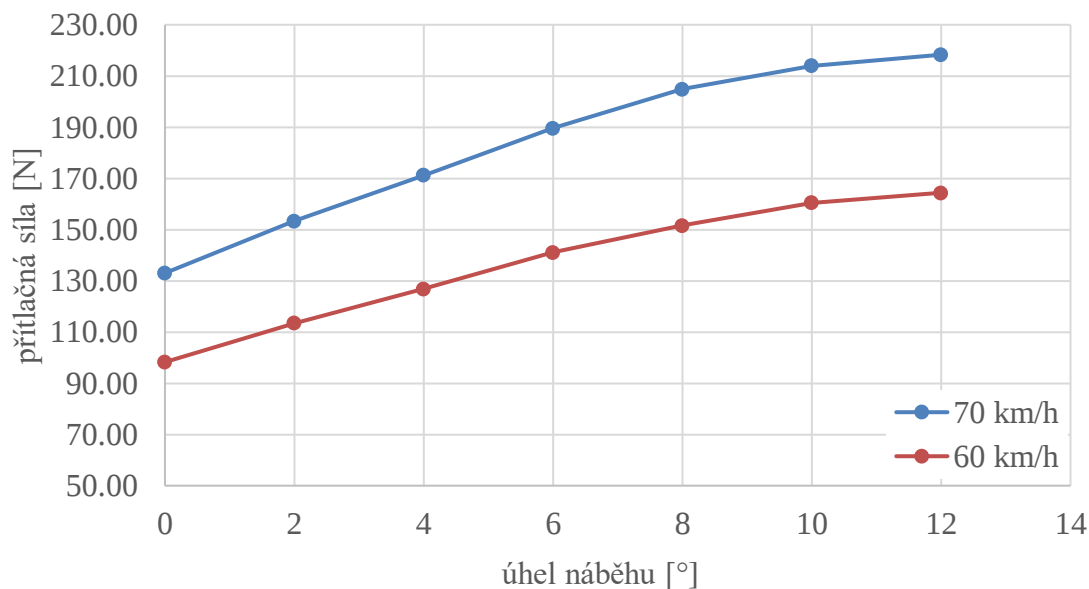
Odpor se se zvyšující jízdní výškou výrazně nemění, viz *obr. 28* a *obr. 29*. Pouze v nejnížší jízdní výšce je zde patrnější rozdíl. Toto zvýšení odporu je nejspíše způsobeno blokadí vzduchu proudícího pod křídlem, a tím pádem nárůstu odporové síly.



Obr. 30 hodnoty přitlaku při různém úhlu náběhu a rychlostech

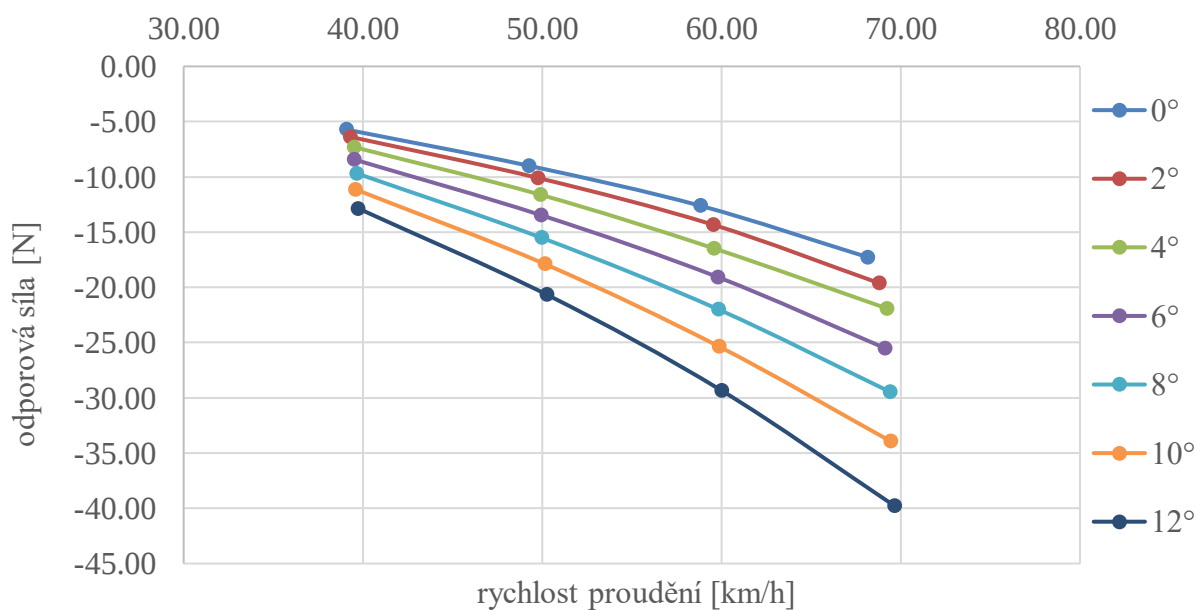
Z grafu je vidět, že úhel náběhu, viz *obr. 30*, má mnohem větší vliv na hodnotu přitlačné síly, než změna jízdní výšky. Ovšem při návrhu uchycení se se změnou AoA nepočítalo, zejména

s ohledem na ovlivnění proudění za křídlem a jeho spoluprací se zbytkem monopostu. Pokud se vezmou v potaz jednotlivé možné nastavení jízdní výšky na přední a zadní nápravě během jízdy, úhel náklonu se pohybuje v rozmezí $\pm 1^\circ$. To přidává na stabilním chování aerodynamických prvků.



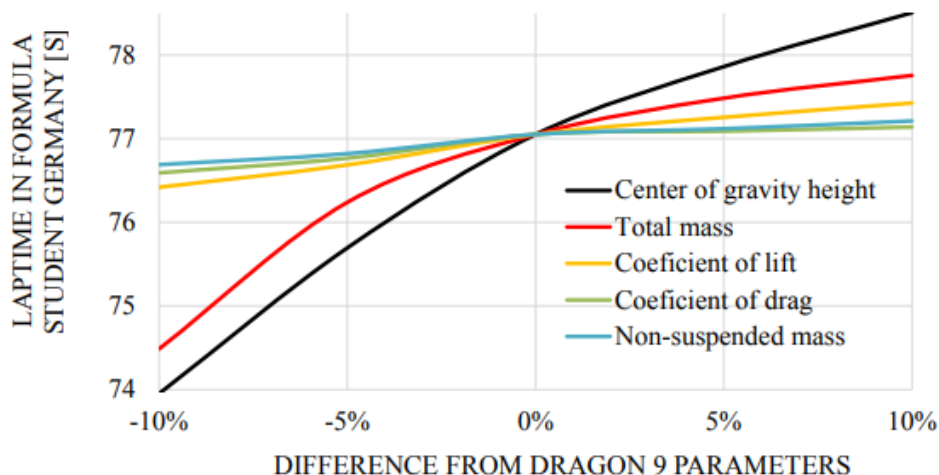
Obr. 31 nejvyšší hodnoty přítlaku při 60 km/h a 70 km/h a různém AoA

Lze vidět postupný růst, který ovšem začíná viditelně zpomalovat od úhlu 6° podle takového vývoje lze očekávat při dalším zvětšování AoA stagnaci hodnoty přítlakové síly a následné odtržení proudění na straně nízkého tlaku, tím dojde k velké ztrátě přítlaku a prudkému navýšení odporové síly viz obr. 31 a obr. 32.

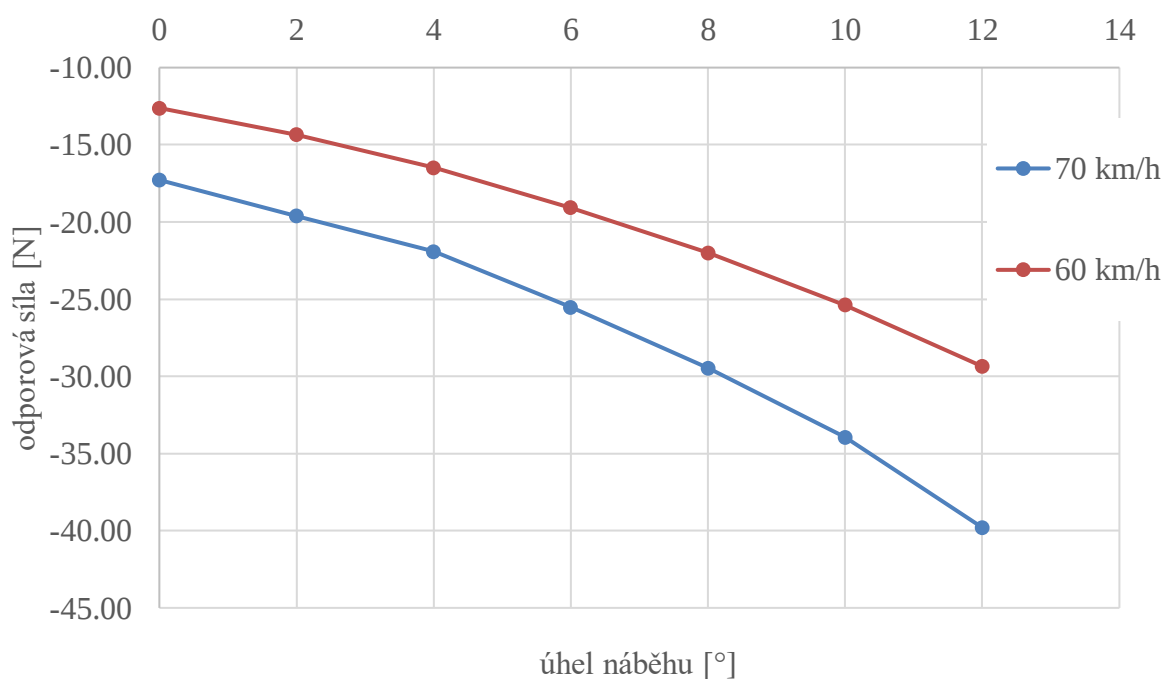


Obr. 32 závislost odporové síly na úhlu náběhu a rychlosti

Podobně jako u přítláčné síly se odpor výrazně zvětšuje s rostoucím AoA viz *obr. 32*. Snížení odporu však není primární cíl při návrhu monopostu. Jak ukazují výsledky ze simulace pro jedno kolo okruhu FSG na *obr. 33*. Kde má zvýšení přítláčné síly větší vliv na čas na jedno kolo, než snížení odporu monopostu.



Obr. 33 Simulace na jedno kolo na trati FSG z programu ChassisSim [24]



Obr. 34 nejvyšší hodnoty odporu při 60 km/h a 70 km/h a různém AoA

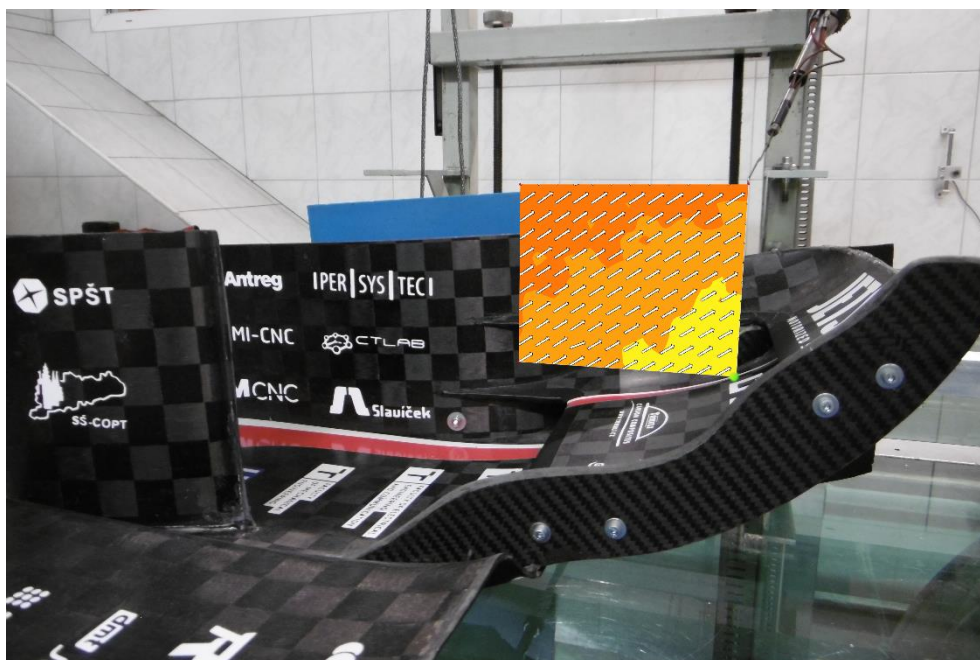
Odporová síla roste se zvyšujícím se úhlem náběhu podobně jako hodnota přítlaku, viz *obr. 34*, ovšem nemůžeme zde očekávat podobné chování jako u přítláčné síly. Naproti tomu v bodě odtržení proudění nastane prudký nárůst odporové síly.

7.2 VÝSLEDKY 3D MĚŘENÍ

Na obrázcích *obr. 35* a *obr. 36* jsou umístěny měřené roviny vůči křídlu. Jsou na nich zobrazeny tlakové pole společně s vektory rychlosti. Detailní porovnání měřených dat s vypočtenými je v kapitole věnované CFD výpočtům.

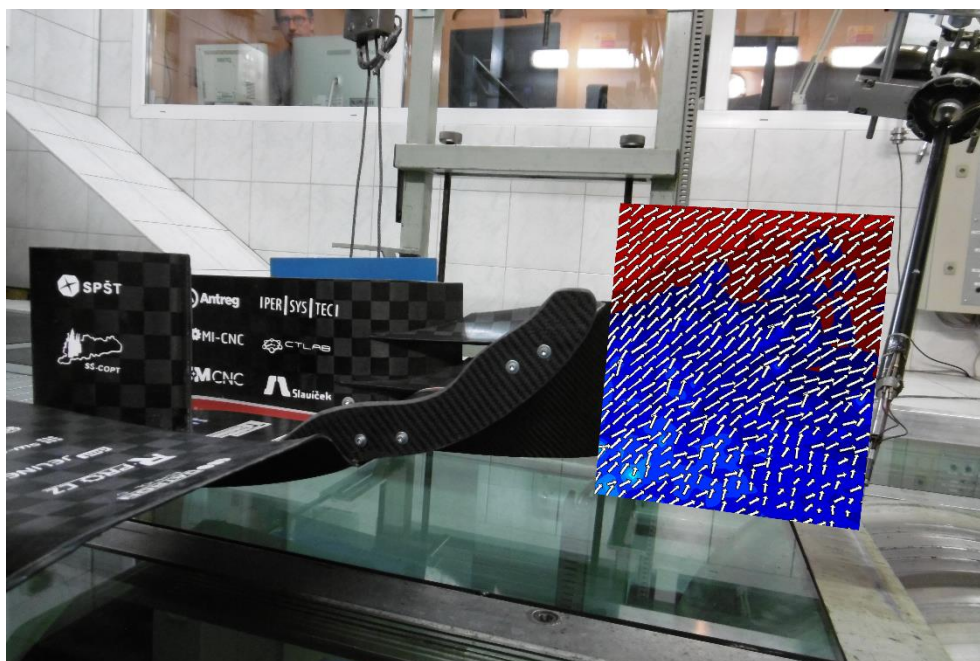
Tab. 4 parametry měřených rovin

Parametry roviny	Rozměr	Krok	Počet měřících bodů
1. rovina	120x100mm	10x10mm	142
2. rovina	200x240mm	10x10mm	524



Obr. 35 1. měřená rovina

Měřená rovina na *obr. 35* se nachází v oblasti vysokého tlaku nad vnější částí předního křídla. Žlutě zbarvená část značí nejvyšší tlak. Ten postupně s rostoucí vzdáleností od náběžné hrany třetího elementu a druhého elementu klesá. Šipky znázorňují směr proudění ve směru X a Y. Ve směru osy Z kolmé na rovinu není proudění významně ovlivněno.



Obr. 36 2. měřená rovina

Cílem 2. měřené roviny obr. 36 bylo sledovat úplav za křídlem. V horní části lze vidět přechod mezi oblastí vysokého a nízkého tlaku, který se postupně mísí. Podle vektorů rychlosti lze soudit, že nedochází k předčasné separaci na odtokové hraně třetího elementu.

8 CFD

Při vývoji vozidla a jeho aerodynamického paketu jsou využívány CFD (Computational fluid dynamics) simulace k vizualizaci a získávání dat z proudění kolem vozu. V době vývoje reálný model pro testování na trati ještě neexistuje a výroba zmenšeného modelu pro testování v tunelu by byla velmi časově i finančně náročná. Proto jsou nejvhodnější možností CFD simulace, které poskytují informace za pomoci numerických metod modelující proudění. Jejich matematický základ tvoří Navier-Stokesovy rovnice. Jelikož ještě i dnes nejsou vyřešené, CFD nám poskytuje pouze přibližné výsledky.

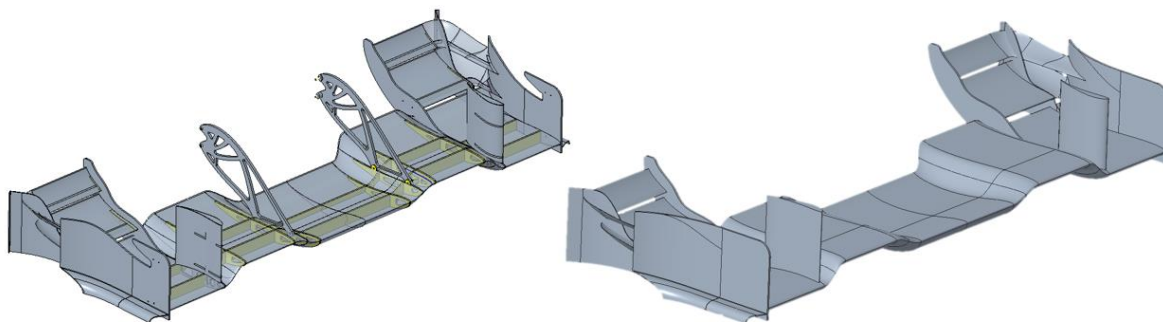
Proto je i v dnešní době stále potřeba validace, a to buďto v podobě větrného tunelu, nebo testování v reálných podmínkách.

Jedním z cílů této práce je porovnání naměřených dat z tunelu s výpočty, podle kterých probíhá návrh monopostu. Proto bude využito stejného nastavení fyzikálního modelu a sítě, jako na celém autě v době vývoje.

8.1 PŘÍPRAVA MODELU

Do přípravy modelu se dá zařadit vše od úpravy samotné geometrie, definování okrajových podmínek jako jsou vstupní hodnoty simulace, vytvoření virtuálního tunelu podobného tomu reálnému, ve kterém probíhalo měření a vytvoření výpočetní sítě, tedy rozdělení prostoru na konečný počet prvků.

8.1.1 PŘÍPRAVA GEOMETRIE PRO MĚŘENÍ



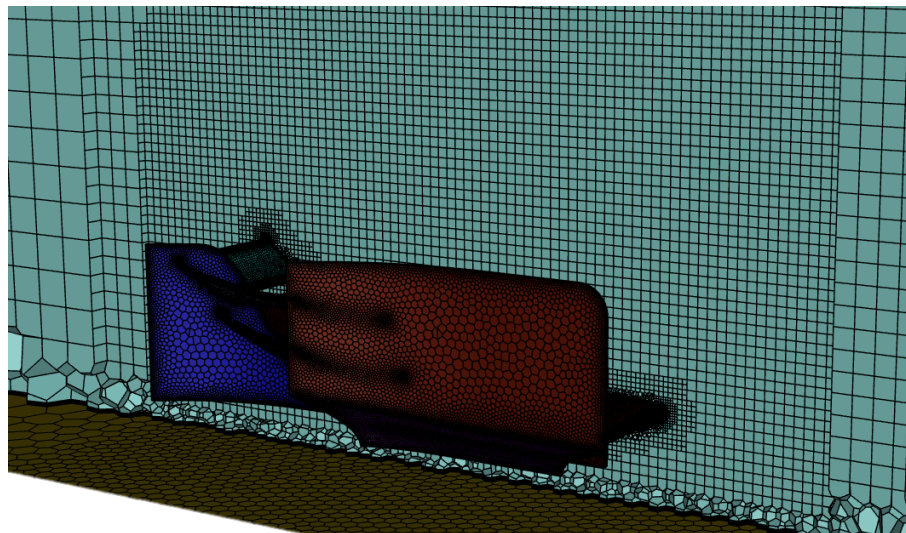
Obr. 37 vlevo neupravená geometrie vpravo upravená

Model je potřeba připravit tak, aby byl zbaven přebytečné geometrie, tedy prvků, které nemají pro výpočet reálný význam, ale přesto jej mohou komplikovat nebo naprosto znemožnit. Jak je patrné z obr. 37, jedná se primárně o konstrukční prvky jako je vnitřní struktura, držáky, šrouby a díry. Také je potřeba zajistit, aby byla geometrie v pořádku, co se týče CAD dat. Aby model neobsahoval malé plošky, nenacházely se zde neuzavřené prvky nebo protínající se geometrie.

8.1.2 DOMÉNA

Doména je oblast, ve které probíhá výpočet proudění na konečném počtu prvků. Díky tomu, že je křídlo symetrické, využije se možnost simulovat pouze polovinu křídla kvůli ušetření výpočetního výkonu a urychlení výpočtů. Pro docílení ustálení proudění je potřeba vytvořit dostatek prostoru před a za měřeným objektem. Délka tělvis křídla je 0,5 m. Před křídlem bude

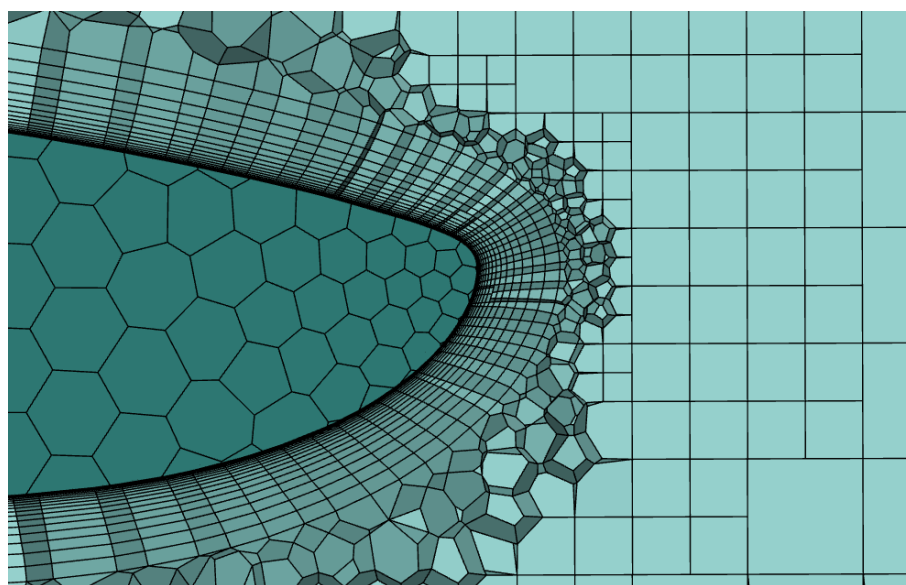
prostor o délce 2násobku tětiny a za křídlem její 6násobek výška domény bude 1.5 m. (viz *obr. 38*)



Obr. 38 objemová síť pro výpočet proudění

8.1.3 VÝPOČETNÍ SÍŤ

Kvalita sítě má velký vliv na přesnost výsledků simulací. Data vychází z nastavení používaného při vývoji Dragona 10. Pro tvorbu objemové sítě byla využita kombinovaná síť. Na povrchu objektů se generují tzv. prismatické vrstvy, viz *obr. 39*. Jejich přítomnost je zásadní pro modelování mezní vrstvy. Ty následně přechází v mnohostěnné buňky a dále v buňky šestistěnné. Pro samotné křídlo byla nastavena jemnější povrchová síť nežli pro bočnice. Dále i v okolí křídla byla využita zjemněná objemová síť. Při tvorbě výpočetní sítě je potřeba dbát na ukazatele její kvality. Parametr, který se hodnotí, je tzv. skewness. Ta udává ukazatel pokrivení buněk, tedy jejich nepravidelnost. Takové buňky s vysokou hodnotou (>0.85) mohou negativně ovlivnit výsledek, popřípadě způsobit, že hodnoty nebudou konvergovat a výsledek tak nebude platný. Velikost první prismatické vrstvy byla vypočítána podle nástroje od



Obr. 39 detail na prismatické vrstvy

společnosti Cadence. Hodnota y^+ byla zvolena <5 . Aby bylo možné lépe zachytit odtrhávání mezní vrstvy. Síť obsahuje přibližně 5 milionů buněk. [25]

Tab. 5 Parametry sítě

Oblast	Hodnota
Okolí	85 mm
Zájmová oblast	10 mm
Míra růstu	1.2
Prvky	
Křídla	0,5 – 3,5 mm
Bočnice	1,5 – 10 mm
Normálový úhel	10 °
Míra růstu	1,2
Prismatické vrstvy	
Křídla	0,045 mm
Počet na křídlech	16
Bočnice	0,07 mm
Počet na bočnicích	13
Zem	0.5 mm
Počet zem	10
Míra růstu	1,2

8.1.4 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Simulace byly prováděny v rozmezí rychlostí, které byly měřeny během experimentu. Fyzikální vlastnosti vzduchu byly zvoleny podle databáze z Ansys Fluent pro vzduch o teplotě 20 °C. Tak jak tomu bylo během experimentu ± 1 °C.

8.1.5 TURBULENTNÍ MODEL

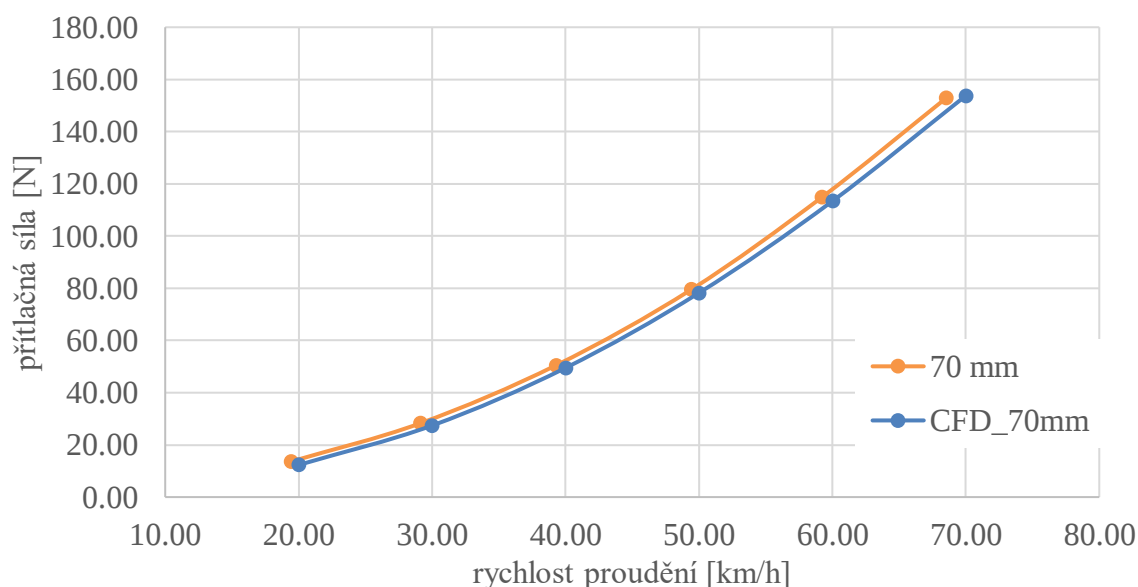
K simulacím celého monopostu je využíván model K-omega SST. Proto byl zvolen i v tomto případě.

K-omega SST je dvourovňový model, který vychází z modelu K-omega BSL, a využívá vlastnosti modelů k-omega v blízkosti stěn a k-epsilon ve vzdálenějších oblastech a v oblastech volného proudění. Byl primárně zvolen kvůli své robustnosti, způsobené dobrou předpovědí turbulentní viskozity. [27]

8.1.6 NASTAVENÍ ŘEŠIČE

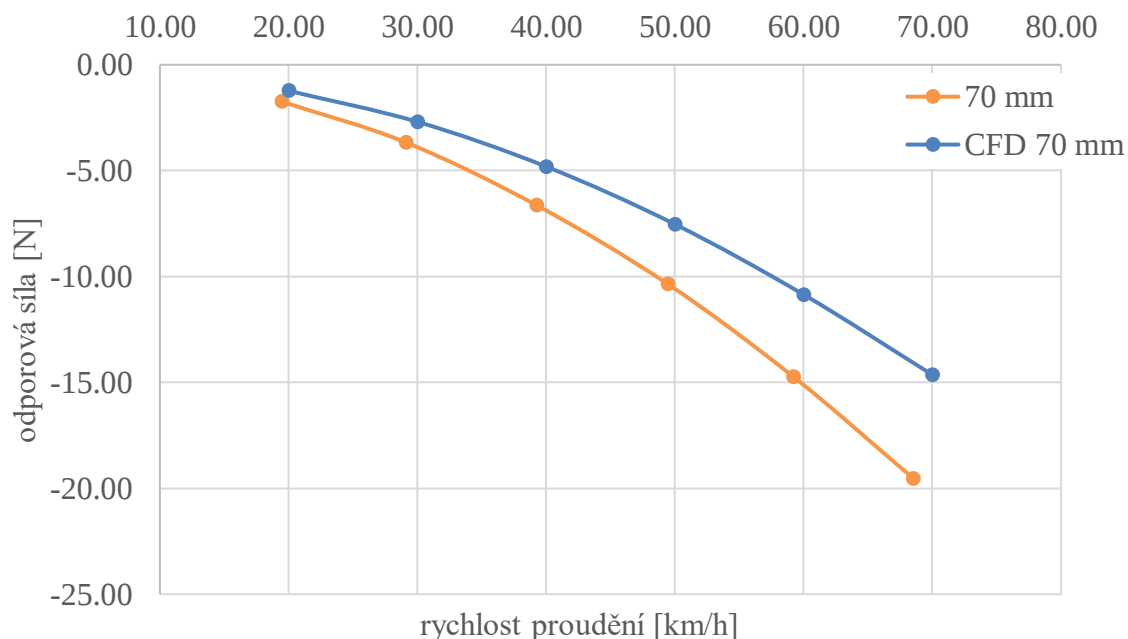
Diskretizace druhého řádu je obecně vhodnější pro případy, kdy proudění není jen rovnoběžné a využívá se jiná než hexahedrická síť. Výpočtem lze získat přesnější data a není tolik zatížen diskretizační chybou, nýbrž jeho použití je méně stabilní a nemusí dojít ke konvergenci. To je důvod, proč je při výpočtech celého monopostu využíván právě první stupeň, i přes méně přesné výsledky. Bude tedy využit i při simulacích předního křídla. Čelní stěna je nastavena jako velocity inlet, zadní stěna pressure outlet. Je simulována pouze polovina křídla, a tedy dělicí rovina má podmínku symmetry. Ostatní stěny jsou nastavené jako slip wall a zem je nastavena jako stationary wall. [26]

8.2 POROVNÁNÍ SIMULACE A EXPERIMENTU



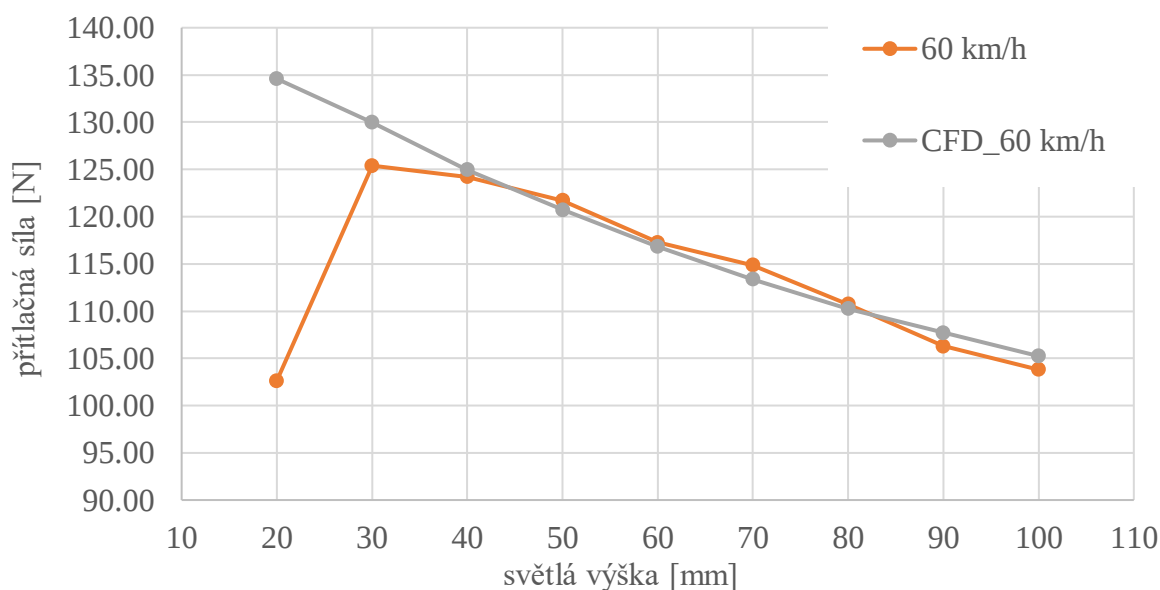
Obr. 40 porovnání naměřená data s CFD v závislosti na rychlosti proudění

Simulovaná byla návrhová jízdní výška 70 mm v rychlostech od 20 do 70 km/h, viz obr. 40. Průběh je odpovídající naměřeným hodnotám. Způsobená odchylka je minimální. Při nižších rychlostech, a tím pádem nízké průměrné síle, je větší odchylka způsobena nejistotou měření a výrobními nepřesnostmi.



Obr. 41 porovnání závislosti odporové síly v závislosti na rychlosti proudění

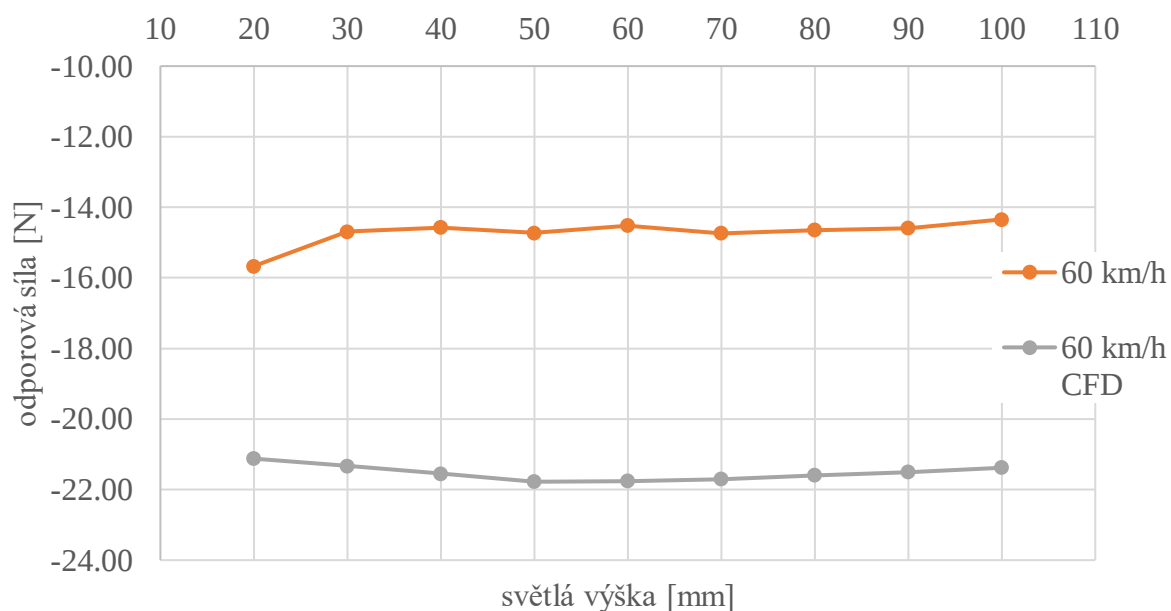
Na obr. 41 je porovnání odporové síly v závislosti na rychlosti a při konstantní světlé výšce. Trend i absolutní hodnoty se se zvyšující rychlostí více rozcházejí. Odporová síla je ale až sekundární cíl a její nárůst nemá takový vliv na čas na kolo, jako je zisk přítláčné síly.



Obr. 42 porovnání přítláčné síly v závislosti na světlé výšce

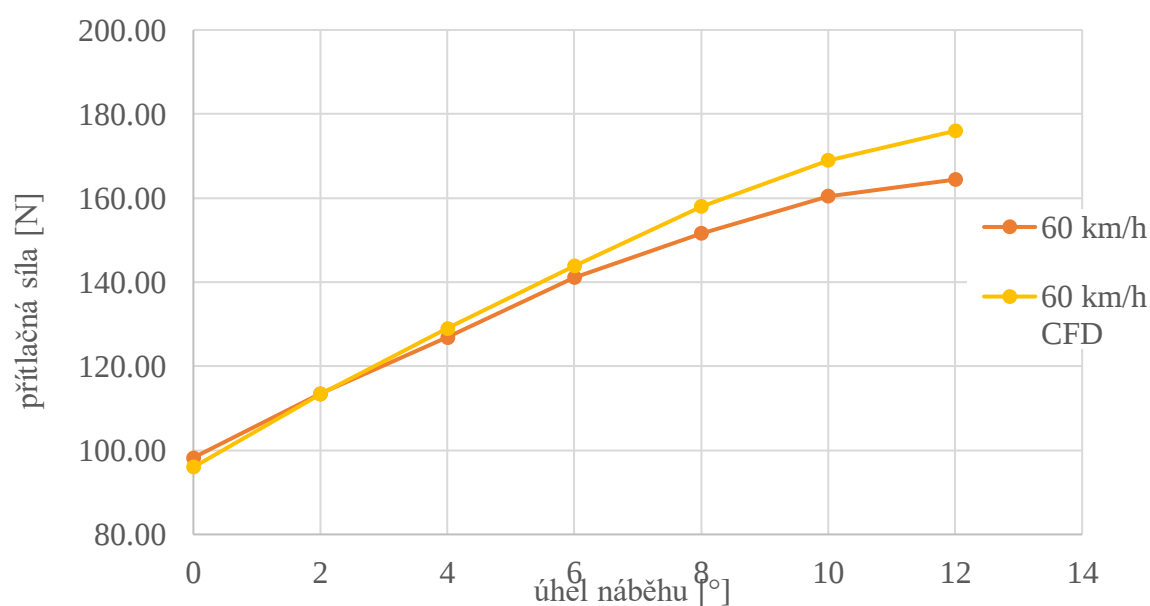
Graf na obr. 42 zobrazuje průběh přítláčné síly v závislosti na světlé výšce. Trend i hodnoty odpovídají, až na případ při 20 mm světlé výšce. Výrazný úbytek přítláčné síly v nízkých výškách se opakoval v průběhu všech rychlostí. Nejedná se tedy o chybu měření. Rozptyl ve výpočtu lze přisoudit špatnému modelování mezní vrstvy, která vzniká před předním křídlem ihned po styku s podlahou. Tunel není vybaven pohybujícím se pásem, který by zamezoval předčasnému vzniku mezní vrstvy.

Na obr. 43 je porovnán vývoj odporové síly v závislosti na světlé výšce. Trend je relativně podobný. Odporová síla se s výškou výrazně nemění. Ovšem absolutní hodnoty zcela neodpovídají. Při vývoji je však důležitý trend, kterým se jednotlivé návrhové varianty vydávají.



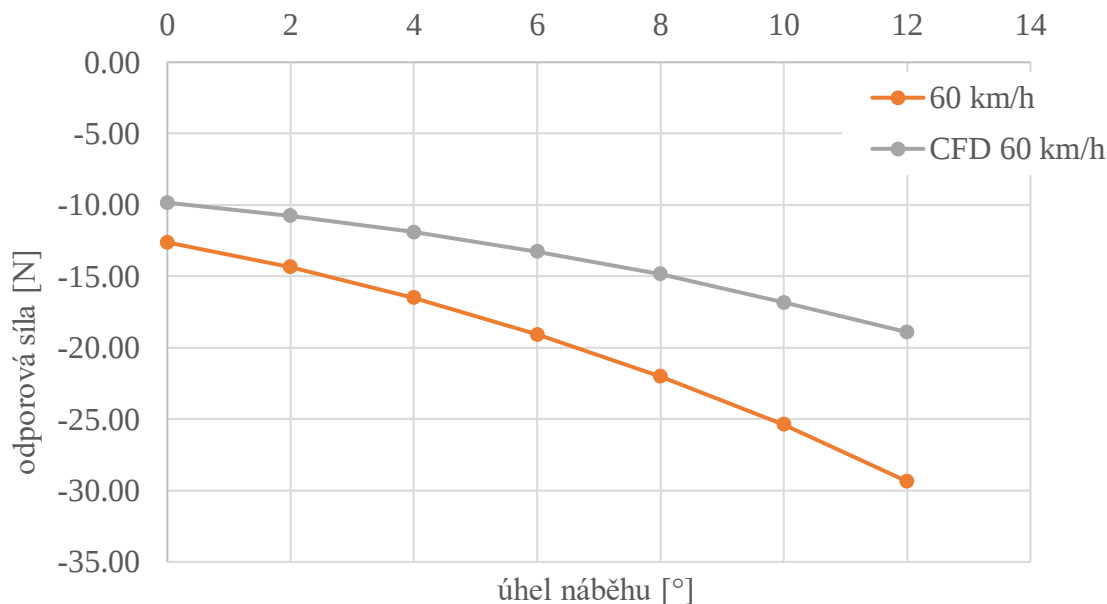
Obr. 43 porovnání závislosti odporové síly v závislosti na jízdní výšce

Zde na obr. 45 je zobrazen průběh závislosti přítláčné síly na úhlu náběhu. Trend naměřených hodnot s vypočtenými hodnotami se s rostoucím úhlem náběhu rozchází. To je nejspíše způsobené špatnou předpovědí odtrhávání proudění v CFD. Rozdíl v odtrhávání může být také způsobený nesrovnalostmi mezi měřeným a simulovaným modelem. Důležité je, že na předním křídle se tak velké úhly náběhu nevyskytují a v oblasti okolo 2 - 8° AoA výsledky odpovídají.



Obr. 45 porovnání závislosti přítláčné síly v závislosti na úhlu náběhu

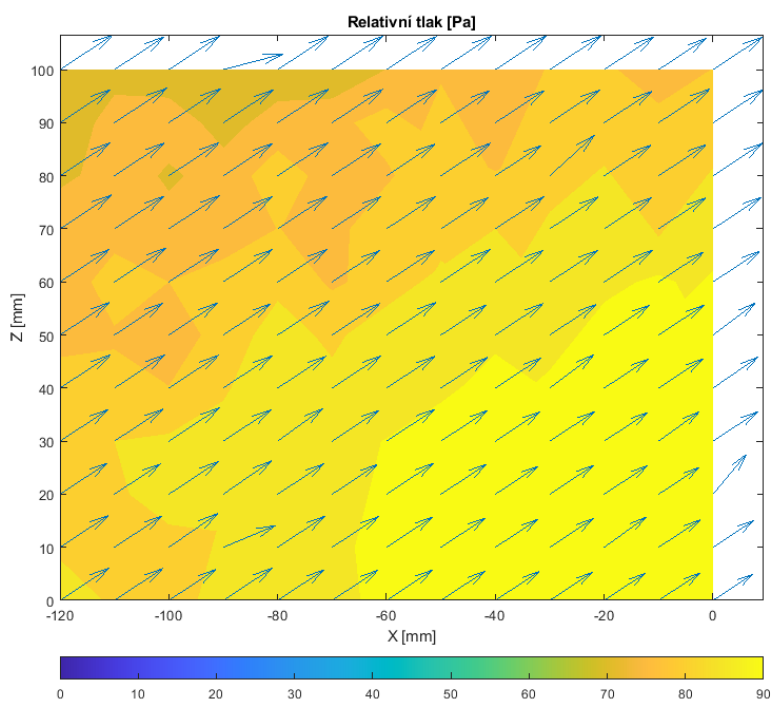
Průběh odporové síly v závislosti na úhlu náběhu se rozchází jak v trendu, tak absolutní hodnotě, viz obr. 46. Za příčinu rozptylu se dají považovat stejné faktory, jako u předchozích měřených výpočtech, špatné modelování vírů v CFD a indukovaného odporu, nepřesný měřený model atd.



Obr. 46 porovnání závislosti odporové síly v závislosti na úhlu náběhu

8.3 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ Z 3D APARATURY

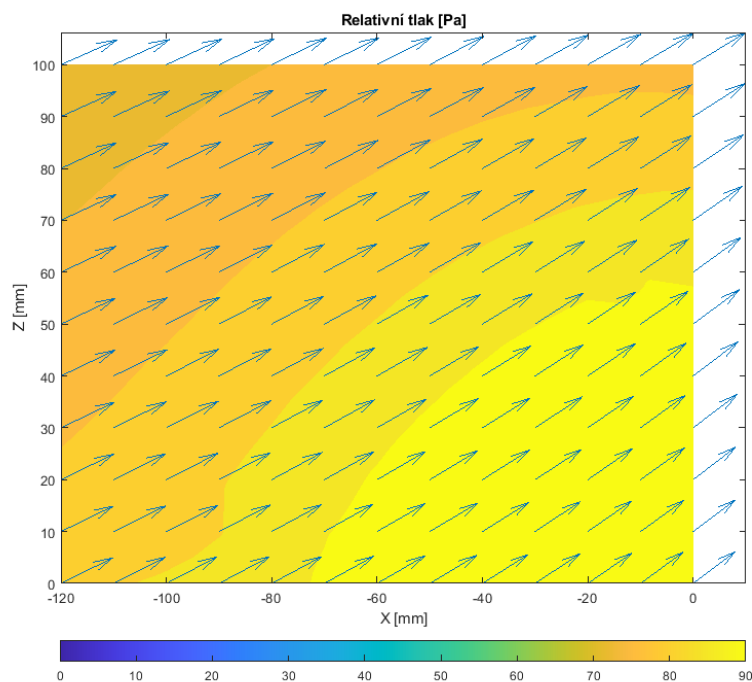
Jak bylo výše zmíněno, ve dvou oblastech bylo pomocí 3D aparatury zjištěno tlakové pole a vektorové pole rychlostí. Díky těmto datům bylo možné porovnat rozložení tlaků a vektorů rychlostí s CFD výpočtem. Data byla pro lepší názornost zpracována v programu Matlab.



Obr. 47 1. měřená rovina vykreslena v programu MATLAB

Na obrázcích *obr. 47* a *obr. 48* níže je možno vidět tyto pole nad náběžnou hranou v oblasti druhého elementu. Při porovnání tlakového rozložení můžeme vidět velmi podobné rozložení jednotlivých tlaků. Hodnoty tlaků jsou velice blízké. V případě experimentálního měření jsou hranice isobar velmi členité, kdežto CFD výpočet poskytuje značně plynulejší rozložení tlaků. Toto je zapříčiněno způsobem řešení turbulentního proudění CFD řešičem. Ten neřeší proudění přímo pomocí Navier-Stokesových rovnic, ale pomocí zjednodušených modelů RANS, kdy jsou turbulentní oblasti nahrazeny časově průměrovaným prouděním a jednotlivé víry se tudíž nevyskytují.

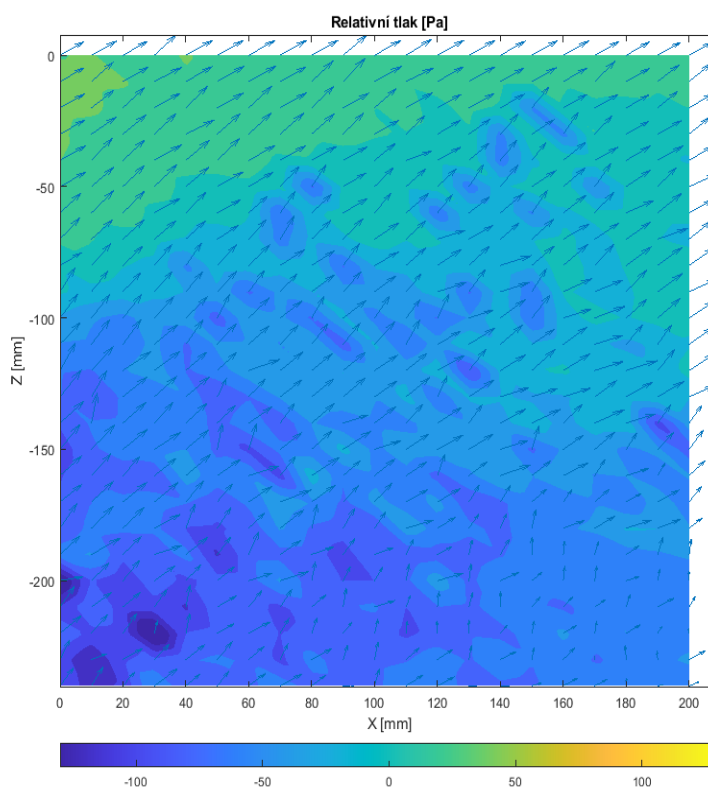
Vektorové pole je v obou případech velice podobné s mírnými odchylkami způsobené turbulentním prouděním. V této oblasti se ovšem nevyskytuje výrazně rozrušené proudění a odchylky jednotlivých vektorů jsou zanedbatelné.



Obr. 48 vypočítaná rovina vykreslena v programu MATLAB

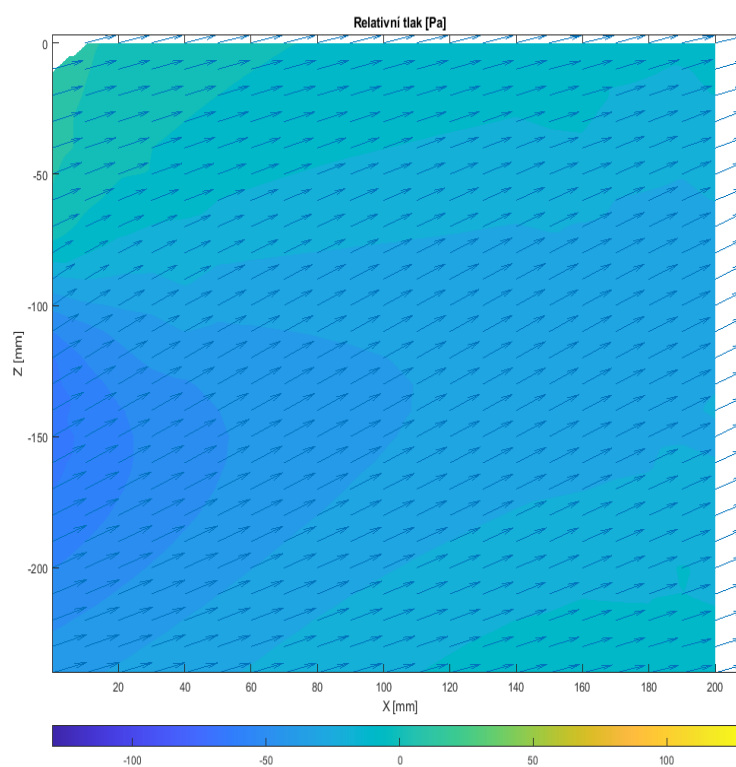
V případě druhé oblasti, jejichž experimentální rozložení tlaků a vektorové pole rychlostí můžete vidět na obrázku *obr. 49* a *obr. 50*, CFD na obrázku *obr. 50* vypočítaná 2. rovina vykreslena v programu matlab je možno vidět významnější rozdíly mezi těmito dvěma případy. I zde CFD poskytuje poměrně plynulé rozložení tlaku. Je zde možno vidět podtlakovou oblast. Jedná se o úplav od profilu křídla. Tento jev je podpořen i očekávaným směrem proudění vzduchu, kdy je vidět tendence postupného usměrnění proudění do směru proudění v celém aerodynamickém tunelu. Při porovnání s experimentem je možno si povšimnout velmi značných rozdílů. Tlakové rozložení není kontinuální, jako v oblasti nad elementem předního křídla. Vyskytují se zde řada lokálních tlakových minim. Vektorové pole rychlosti je také značně rozrušené. Oba tyto jevy je opět možno vysvětlit značně rozrušeným prouděním, které je velmi obtížné zachytit CFD výpočtem. Odchylky jsou v této oblasti výrazně větší než v případě první oblasti. Nicméně i zde je možno vidět oblast úplavu za elementem. Proto je výpočet CFD

shledán dostačujícím pro popis chování v této oblasti. Přesnost je samozřejmě možné zlepšit lepší kalibrací rozlišení výpočetní sítě a zvolením vyššího stupně diskretizace.



Obr. 49 měřená 2. rovina vykreslena v programu MATLAB

Při porovnání absolutních hodnot odporů z měření bylo zjištěno značné odchylky mezi hodnotami z experimentu a CFD výpočtu. Odpor je složen z několika složek. Odpor tlakový, který je způsoben tlakovým gradientem ve směru proudění, a tlak třecí způsobený třecími silami na povrchu objektů. Odporové síly jsou často problematicky zjistitelné pomocí CFD výpočtů, jak z důvodů špatné predikce třecího odporu, tak poměrně složité integraci v tomto směru. Tlakové rozložení je v přetlakových oblastech velmi podobné. V podtlakových oblastech dochází ovšem k výraznějším odchylkám. Tyto chyby způsobují rozdíly v hodnotách odporu.



Obr. 50 vypočítaná 2. rovina vykreslena v programu MATLAB

ZÁVĚR

S vozem Dragon X byla provedena validace aerodynamického paketu za reálných jízdních podmínek pomocí tenzometrů na nápravách vozidla. Hodnota celkového přitlaku odpovídala hodnotám zjištěných simulacemi, poloha CoP již nikoliv. Až 75% celkové přitlačné síly bylo na zadní nápravě. To naznačovalo horší efektivnost předního křídla. Na druhou stranu byla pozice CoP stabilní. Pohybovala se v rozmezí zhruba 5 % a nepřecházela přes těžiště vozidla, to přispívalo k jeho předvídatelnému chování. Zároveň přední křídlo negativně neovlivňovalo proudění kolem zbytku monopostu. Cíle pro sezónu byly částečně splněny.

V rešerši byl popsán předpokládaný princip fungování křídel ostatních týmů v soutěži Formule Student, kde lze spatřit velké množství různých konceptů a různými prvky využívaných na předních křídlech. Společným prvkem všech křídel jsou kaskádovité profily. U komplexnějších aerodynamických paketů jsou často víry využívány ke kontrole proudění.

V následující kapitole byla popsána konstrukce přípravku a postup měření, aby mohlo být v případě potřeby v budoucnu replikováno.

Jako první byl změřen samotný přípravek kvůli zjištění jeho vlivu na výsledky. Vliv měl pouze na odporovou sílu. Každé nastavení polohy a úhlu náběhu předního křídla bylo změřeno při všech rychlostech proudění. Aby mohla být vytvořena aerodynamická polára. Měřen byl vliv změny světlé výšky a změny úhlu náběhu. Následně byly zvoleny dvě roviny v oblasti zájmu, ty byly proměřeny pomocí 3D aparatury, kterou je větrný tunel vybaven. K detailnímu porovnání tlakových a rychlostních polí.

Poslední kapitola je věnována výpočtům proudění. Jsou zde popsány parametry výpočtu a jeho nastavení. Ty vycházely z nastavení, při kterém byl simulován celý monopost, aby se ověřila jeho správnost.

Výsledkem práce je porovnání experimentálních dat s daty vypočtenými. Absolutní hodnoty přitlačné síly odpovídají a jejich trend také, až na případy kdy, je přední křídlo v minimální vzdálenosti nad zemí a při kritických úhlech náběhu. CFD výpočet nebyl schopen správně předpovídat separaci proudění a chování v oblasti nejvíce ovlivněné vznikající mezní vrstvou a při maximálních úhlech náběhu. Ty se na předním křídle v reálném provozu nevyskytují, a proto byly výsledky shledány jako přijatelné. Hodnoty odporu již nejsou tak přesné. Absolutní hodnoty se liší a jejich trend se shoduje jen částečně. To je pravděpodobně způsobeno špatnou predikcí třecího odporu, tak komplikovanou integrací podél ploch v daném směru.

Naměřená data byla porovnána pomocí programu MATLAB pro lepší porovnatelnost. Data z CFD se shodovala v rovině nad měřenými elementy. Kdy rozložení tlakového pole velmi dobře odpovídá a směry vektorů také. V případě druhé oblasti za elementy v oblasti nízkého tlaku již docházelo k významnějším odchylkám. Ovšem i přesto je ve výsledném grafu viditelný úplav za elementy. To je způsobeno CFD řešičem, při kterém jsou vykreslovány průměrné hodnoty ale samotné víry, které zaznamenala sonda již nikoliv. Z toho důvodu byly viditelné značné odchylky mezi experimentem a výpočtem.

Další navrhovaný postup, který je už mimo rozsah této práce navrhuji porovnání měřeného objektu s modelem a zjištění výrobních nepřesností například pomocí 3D skeneru. A porovnání jejich vlivu na výsledky měření. Dále, by bylo možné výpočty zlepšit optimalizací sítě, studii vlivu sítě na výsledky výpočtu a vyšším stupněm diskretizace.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] *Formula Student Germany: International design competition* [online]. Langenhagen [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/>
- [2] *Disciplines* [online]. [cit- 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/about/disciplines/>
- [3] History of Formula SAE. *Formula SAE* [online]. Warrendale, ©2020 [cit- 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>
- [4] Photos Hockenheim: Panoramic Picture. In: *Formula Student Germany: International design competition* [online]. ©2021 [cit- 2022-05-15]. Dostupné z: <https://media.formulastudent.de/2019/Hockenheim/Panoramic-Picture/i-hxz64pG>
- [5] O nás. *TU Brno Racing* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://tubrnoracing.cz/o-nas/tu-brno-racing/>
- [6] *Formula Student Combustion – World Ranking List* [online]. [cit- 2022-05-20]. Dostupné z: <https://fs-world.org/C/>
- [7] *Formula Student Electric – World Ranking List* [online]. [cit- 2022-05-20]. Dostupné z: <https://fs-world.org/E/>
- [8] Rules & Important Documents. *Formula Student Germany* [online]. [cit- 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [9] HAVRAN, Edmund. Návrh a konstrukce elementů předního křídla Formule student. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/121507>. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. 60 s. Vedoucí práce Robert Popela.
- [10] PACON, Lukáš. Ověření CFD simulací v aerodynamickém tunelu. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [11] FaSTTUBe. In: *Instagram* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.instagram.com/fasttube_tuberlin/
- [12] Rennstall Esslingen. In: *Facebook* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/Rennstall.Esslingen>
- [13] BCN eMotorsport. In: *Instagram* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.instagram.com/bcnemotorsport>
- [14] Rennteam Uni Stuttgart e.V.. In: *Facebook* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/RennteamUniStuttgart>

- [15] TUfast Racing Team. In: *Facebook* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/Tufast.Racing.Team>
- [16] Ecurie Aix - Formula Student Team RWTH Aachen e.V.. In: *Facebook* [online]. [cit. 2022-5-15]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/EcurieAix>
- [17] Subsonic and transonic wind tunnel. *Wikiwand* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.wikiwand.com/en/Subsonic_and_transonic_wind_tunnel
- [18] KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: designing for speed. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 08-376-0142-8.
- [19] WUBBEN, Frenk, MASELAND, Hans *Verification of wind tunnel model support and wall interference assessments in DNW-HST by CFD simulations*. THE NETHERLANDS, 2018. ISBN 978-92-837-2175-8
- [20] LIŠKA, Leoš. *ULL Aerodynamika a mechanika letu*. [online]. 2020 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: https://www.okafs.cz/wp-content/uploads/2020/03/ULL-1-Aerodynamika-a-mechanika-letu_2020-1.pdf
- [21] SLAVĚTINSKÝ, Dušan, *Profil křídla* [online]. [cit. 2022-5-15]. Dostupné z: http://www.slavetind.cz/stavba/konstrukce/kridlo/Profil_kridla.aspx
- [22] BARBARINO, Silvestro, Wulf G. DETTMER a Michael I. FRISWELL. *Morphing Trailing Edges with Shape Memory Alloy Rods* [online]. 2010, 18 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228531008_Morphing_Trailing_Edges_with_Shape_Memory_Alloy_Rods
- [23] KERNDL, Jindřich. Vývoj a přehled leteckých profilů. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [24] GELLNER, Pavel. Design book of TU Brno Racing Dragon 9. Brno, 2019.
- [25] Compute Grid Spacing for a Given Y+. Cadence Design Systems, Inc. [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.cadence.com/en_US/home/tools/system-analysis/computational-fluid-dynamics/y-plus.html
- [26] First-Order Accuracy vs. Second-Order Accuracy. ANSYS Help [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/flu_uh/ x1-174200027.2.1.html
- [27] Shear-Stress Transport (SST) k- ω Model. *ANSYS Help* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v195/flu_th/flu_th_sec_turb_kw_sst.html

- [28] ČECHOVIČ, Juraj. Aktivní aerodynamické prvky Formule Student. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121471>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 51s. Vedoucí práce Michal Janoušek.
- [29] KASPAR, Štěpán. Analýza elementů zadního křídla Formule Student. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/132393>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. 67 s. Vedoucí práce Robert Popela.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>CAD</i>	Computer aided desing
<i>CFD</i>	Computational fluid dynamics
<i>EDR</i>	Engineering Design Report
<i>F1</i>	Formula 1
<i>FS</i>	Formule Student
<i>FSG</i>	Formule Student Germany
<i>RANS</i>	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
<i>CoP</i>	Centure of Pressure
<i>AoA</i>	Angle od Attack
<i>SAE</i>	Society of Automotive Engineers
<i>SST</i>	Shear-Stress Transport