



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů  
a kolejových vozidel

Návrh a aerodynamika krytu motoru a  
firewallu na vozidle Formula Student

Formula Student engine cover and firewall –  
design and aerodynamics

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
2020

Jaromír Šolc

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing Petr Hatschbach, CSc.



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šolc** Jméno: **Jaromír** Osobní číslo: **476058**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Návrh a aerodynamika krytu motoru a firewallu na vozidle Formula Student**

Název bakalářské práce anglicky:

**Formula Student engine cover and firewall - design and aerodynamics**

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte řešerši použití aerodynamických prvků na vozidlech Formule Student. V CAD systému Catia proveďte návrh krytu motoru a firewallu zejména s ohledem na požadované aerodynamické vlastnosti. Proveďte potřebné 2D a 3D numerické simulace za účelem vyhodnocení parametrů charakterizujících účinek navrženého aerodynamického prvku a nalezení jeho nejhodnějšího tvaru a konstrukce.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

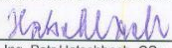
**Ing. Petr Hatschbach, CSc., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **27.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce:

  
Ing. Petr Hatschbach, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

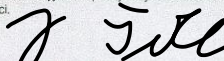
  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

**30.4.2020**

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta



## Anotační záznam

Jméno autora: Jaromír Šolc

Název práce: Návrh a aerodynamika krytu motoru a firewallu na vozidle Formula Student

Anglický název: Formula Student engine Cover and firewall – design and aerodynamics

Rozsah práce:

- 57 stran
- 43 obrázků
- 17 tabulek
- 0 grafů

Akademický rok: 2019/2020

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Petr Hatschbach, CSc.

Klíčová slova: Formula Student, aerodynamika, CFD, kryt motoru, firewall

Key words: Formula Student, aerodynamice, CFD, engine cover, firewall



## Abstrakt

Cílem této práce je pomocí CFD výpočtů v softwaru Star CCM+ zanalyzovat model zadní části vozu Formula Student, navrhnout řešení v podobě krytu motoru a firewallu, optimalizovat je a vybrat nejvýhodnější variantu pro reálnou aplikaci.

## Abstract

The objective of this thesis is to analyze the rear part of the Formula Student racecar in CFD software Star CCM+, to propose several solutions in the form of engine cover and firewall, to optimise them and to choose the most suitable design for the racecar use.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: “Návrh a aerodynamika krytu motoru a firewallu na vozidle Formula Student” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitulu této práce.

V Praze dne: 3. 7. 2020

.....  
(podpis autora)



## Poděkování

Rád bych poděkoval kolegům z týmu CTU Cartech, Bc. Martinovi Ševčíkovi a Bc. Otakaru Volkovi za předávání znalostí potřebných při vývoji, a svému vedoucímu práce Ing. Petru Hatschbachovi, CSc. za průběžné konzultace, poskytnutou zpětnou vazbu a mnoho připomínek.



1 Úvod .....	8
1.1 Motivace a cíle .....	8
1.2 Formula Student .....	8
1.3 CTU Cartech .....	9
2 Problematika zadní části vozů .....	10
2.1 O aerodynamice .....	10
2.2 O krytech .....	12
2.3 Kryty na vozech Formula Student .....	13
2.3.1 Rennteam .....	13
2.3.2 Rennstall .....	14
2.3.3 UPBracing Paderborn .....	15
2.3.4 eForce FEE .....	16
2.4 Technická omezení .....	17
2.5 Rozdělení na kryt motoru a firewall .....	18
2.6 O firewallu .....	19
3 O simulacích .....	20
3.1 CFD simulace a podmínky .....	20
3.2 Vyhodnocování .....	20
3.3 Omezení .....	21
3.4 Popis srovnání s Chassi, Intake, Rwing .....	21
4 Jednotlivé verze .....	22
4.1 Kryt motoru .....	22
4.1.1 01 .....	22
4.1.2 02 .....	24
4.1.3 03 .....	26
4.1.4 04 .....	28
4.1.5 05 .....	30
4.1.6 Kryt motoru – závěr .....	32
4.2 Firewall .....	33
4.2.1 06 .....	33
4.2.2 07 .....	34
4.2.3 08 .....	37
4.2.4 09 .....	39
4.2.5 10 .....	41
4.2.6 11 .....	43
4.2.7 12 .....	45
4.2.8 13 .....	47
4.2.9 14 .....	49
4.2.10 15 .....	51
4.2.11 Firewall – závěr .....	53
5 Budoucí práce .....	55
5.1 „Komplikovaná“ verze .....	55
5.2 Výraznější propojení .....	55
5.3 Jiné sání .....	55
6 Závěr .....	56
7 Seznam použité literatury .....	57



# 1 Úvod

## 1.1 Motivace a cíle

V této práci bych rád více dopodrobna rozebral problematiku zadní části vozu Formula Student z pohledu aerodynamiky. Předně bych chtěl upozornit na fakt, že většina týmů tento prostor nijak neřeší a většinou ho ponechává prázdný. Přeci jen na jízdní vlastnosti auta nemá takový vliv jako přední nebo zadní křídlo, a zároveň nepatří mezi položky potřebné pro zajištění funkcionality auta, kterým se musí věnovat čas, úsilí a finance, jichž nikdy není nazbyt.

Přesto mi přijde, že pokud se na voze typu Formula Student objeví kryt zadní části, celé auto působí celistvým, uklizeným dojmem. Zároveň tato přítomnost svědčí o určité míře profesionality týmu, jenž už není ve stadiu, kdy řeší pouze nezbytně nutné záležitosti, ale může si dovolit hledat způsoby pro dosažení rychlejšího času i ve zbytných oblastech. S tím souvisí i fakt, že neexistuje velké množství literatury zabývající se touto tematikou ve srovnání s problematikou např. profilů, tudíž jsem často musel spoléhat na úsudek a selský rozum a objevoval slepé cesty. K tomu se v této práci podrobněji dostanu v části o konkrétních simulacích.

Abych úvod doplnil i o svou osobní motivaci, proč jsem se rozhodl zabývat tímto tématem, musím se vrátit do sezony 2019, kdy jsem pozoroval monopost FS.11 na trati i v pitu, a nemohl jsem se zbavit pocitu, že mu vzadu něco chybí a je nezakončený. Tato myšlenka mě neopustila, a tak jsem následující sezonu strávil řešením této výzvy, při níž jsem se zároveň seznámil se základy aerodynamiky, jejích výpočtů, a obecně s celým procesem od první myšlenky k realizaci včetně prezentace a obhajování konkrétních řešení.

Než se v této práci dostanu k popisu konkrétních návrhů a verzí, je nejprve potřeba vysvětlit některé základní pojmy.

## 1.2 Formula Student

Formula Student je, jak už název napovídá, studentská soutěž, v níž je hlavním úkolem během jednoho roku sestavit závodní auto formulového typu.

Cílem soutěže je prakticky seznámit studenty vysokých škol s problematikou závodních vozů a připravit je na život po získání diplomu.

Počátky soutěže byly položeny v USA roku 1981, ale v současnosti nejvíce pozornosti přitahuje Evropa a hlavně Německo, odkud pochází nejlepší světové týmy. Na světě existuje více než 500 aktivních týmů, což z Formula Student dělá největší motoristickou soutěž.

Soutěží se v celkem 7 disciplínách, přičemž 4 jsou dynamické a 3 statické. Protože se každá disciplína zaměřuje na jinou problematiku, je každý tým opravdu důkladně prověřen a pro nejlepší výsledky by neměl mít výrazné slabiny. Dynamické části jsou zaměřené na





akceleraci, zatáčení, čas na jedno kolo a vytrvalost, statické hodnotí technický návrh, cenotvorbu a investiční nápad.

### 1.3 CTU Cartech

Tým CTU Cartech vznikl na půdě Fakulty strojní ČVUT v Praze v roce 2008 jako první český tým. Mezi největší inovace patří první monokok z kompozitu s uhlíkovými vlákny v ČR, využití 3D tisku a rozsáhlé využití uhlíku na celém autě – kola, křídla, sání a jiné prvky.

I když se na něj česká konkurence silně dotahuje, stále patří mezi českou i světovou špičku, což dokázal v sezoně 2019 například vítězstvím na soutěži v České republice nebo 3. a 6. celkovým místem na závodech v Itálii a Španělsku.



## 2 Problematika zadní části vozů

### 2.1 O aerodynamice

„Aerodynamika je obor fyziky, speciálně mechaniky, zabývající se studiem pohybu plynů (vzduchu) a jejich interakcí s pevnými objekty.“ [3] Rozvoj aerodynamiky začal v 18. století společně s rozvojem letadel. V automobilovém průmyslu jí nejdříve nebyla věnována příliš velká pozornost, ale v meziválečném období začala honba za dosažením vysokých rychlostí u vozidel s poměrně nízkým výkonem motoru, a tak konstruktéři hledali cesty dosažení nejmenšího odporu. Až v 60. letech se ujala myšlenka umístit převrácené letadlové křídlo na závodní vůz, čímž započala nová etapa v motorsportu. Další milník aerodynamiky nastal ve druhé polovině 70. let objevem přítláčného efektu podlah.

Pro porovnání aerodynamických účinků různých tvarů se používají koeficienty odporu a vzlaku/přítlaku sloužících pro porovnání různých tvarů mezi sebou. Tyto koeficienty jsou jednou z veličin rovnice odporové a přítláčné síly, s jejíž pomocí můžeme určovat potřebný výkon motoru, nastavovat odpružení nebo počítat maximální rychlost.

$$F_x = \frac{1}{2} \rho c_x A v^2 \quad (1)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho c_y A v^2 \quad (2)$$

$F_x$  = Síla odporová [N]

$F_y$  = Síla vzlaková/přítlaková [N]

$\rho$  = Hustota média (vzduchu) [kg/m<sup>3</sup>]

$c_x$  = Koeficient odporu [-]

$c_y$  = Koeficient vzlaku/přítlaku [-]

$A$  = Plocha normálová ke směru síly [m<sup>2</sup>]

$v$  = Rychlost [m/s]

Koeficient odporu vzduchu  $c_x$  dosahuje u silničních vozidel hodnoty okolo 0,3 a u závodních 0,7. Koeficient vzlaku  $c_y$  se řeší především u závodních aut, kde se pohybuje až do hodnoty -4. Silniční vozidla se snaží o co nejmenší koeficient odporu, protože se odráží na spotřebě auta, závodní vozidla naopak dosahují co nejvyšších rychlostí na kolo a v zatáčkách, kterých dosahují pomocí různých aerodynamických prvků generujících přítlak, čímž sekundárně narůstá i aerodynamický odpor.

Zdůraznil bych v této části, že přítláčná a odporová síla závisejí na rychlosti kvadraticky, tudíž se projeví až ve vyšších rychlostech. Jelikož Formula Student dbá na bezpečí, mají jednotlivé vozy nepoměrně velká křídla ve srovnání např. s vozy F1, protože při jízdě nedosahují tak vysokých rychlostí.



Vysvětlení, kde vzniká odpor i přítlak, bych hledal ve třetím Newtonově zákoně. Zákon akce a reakce říká: „Působím-li na těleso určitou silou, působí těleso na mě silou stejně velkou, opačně orientovanou.“ Tedy vzduch a auto mezi sebou interagují a vzájemně na sebe působí, v důsledku čehož vznikají síly působící na oba činitele a podle jejich rozkladu do směru os „x“ a „y“ je následně nazýváme odporem a přítlakem. Čím hustším prostředím se auto pohybuje, čím větší má plochu a čím větší má rychlost, tím větší tyto síly jsou. Tyto síly by se dále daly rozdělit na normálové a smykové. Smykové síly vznikají třením mezi objektem a vzduchem, normálové tlakem působícím normálově k povrchu. Integrací smykového napětí a tlaku přes povrch obtékaného tělesa dostaneme výslednou aerodynamickou sílu nebo moment.

Pokud by nestačilo toto vysvětlení, další pohled na věc by mohla nabídnout upravená Bernoulliho rovnice. [4]

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

$p$  = Tlak [Pa]

$\rho$  = Hustota média (vzduchu) [kg/m<sup>3</sup>]

$v$  = Rychlost [m/s]

Pro profil křídla generující přítlak platí, že na horní straně vzrůstá tlak a klesá rychlost, zatímco na spodní tlak klesá a rychlost se zvětšuje. Výslednice tlaku míří dolů a řidič může projíždět zatáčkou rychleji díky větší přítláčné síle.

Dále je potřeba rozdělit proudění vzduchu na laminární a turbulentní. Při laminárním proudění nevzniká takové množství vírů a má menší třecí odpor. Turbulentní proudění má naopak větší počet vírů i odpor, čehož se využívá například pro zmenšení úplavu za vozidlem nebo pro posouvání místa odtržení.

Pro definování rozdílu mezi laminárním a turbulentním prouděním používáme tzv. Reynoldsovo číslo. To značí poměr setrvačných a vazkých sil v kapalině. Jeho kritická hodnota definuje druh proudění. Pro menší než kritické je proudění laminární, pro větší je turbulentní. Hodnota  $Re_{krit}$  se liší v závislosti na podmínkách experimentu, pro proudění v trubkách kruhového profilu dosahuje hodnoty cca 2300, pro naše podmínky je tato hodnota mezi  $10^5$ – $10^7$ . Velký rozptyl je dán problematikou charakteristického rozměru, jehož volba může  $Re$  řádově posunout.

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} (4)$$

$Re$  = Reynoldsovo číslo [-]

$\rho$  = Hustota média (vzduchu) [kg/m<sup>3</sup>]

$v$  = Rychlost [m/s]



$L$  = Charakteristický rozměr [m]






$\mu$  = Dynamická viskozita [Pa.s]

## 2.2 O krytech

Kryty motoru, jak už jsem psal v části 1.1, se v soutěži Formula Student příliš často nevyskytují. Minimálně ne u spalovacích aut. Elektrická vozidla mají zakrytou zadní část častěji. Tam se většinou jedná o součást kompozitového monokoku, kdy se místo kombinace monokoku vepředu a trubkového rámu vzadu použije tzv. celomonokok. Nejedná se tedy o kryt, ale plní podobnou funkci. Celomonokok je oproti variantě klasického monokoku s trubkovým rámem řešení lehčí a sofistikovanější, přesto neznám žádný tým se spalovacím vozem, který by toto řešení používal. Nejde ani tak o to, že by to nedokázal navrhnout a vyrobit, ale především o chlazení. Zvýšená teplota se negativně podepíše i na výkonu motoru. Proto i ty nejlepší spalovací týmy stále využívají zadního rámu, který dovoluje, aby okolní vzduch proudil kolem motoru a tím ho částečně ochlazoval.

Pro lepší pochopení, jakému tvaru by se měl kryt motoru připodobnit, je dobré podívat se na Obrázek 1, kde jsou zobrazeny různé tvary včetně koeficientů odporu. Cílem bude dosáhnout tvaru s nejmenší hodnotou. Pro můj případ se budu snažit o co nejhladší napojení na monokok, jenž bude sám o sobě představovat největší část profilu, a zároveň s krytem postupně klesat, aby se dohromady s difuzorem co nejvíce přiblížily profilu křídla.



Shape		Drag Coefficient
Sphere		0.47
Half-sphere		0.42
Cube		1.05
Streamlined Body		0.04
Streamlined Half-body		0.09

## Measured Drag Coefficients

Obrázek 1: Tvary s koeficienty odporu [5]

### 2.3 Kryty na vozech Formula Student

Nejprve vysvětlím pojmy, které se budou v popisu krytů vyskytovat:

Kaplička – část přímo navazující na řidiče, která se rychle zužuje a snižuje směrem dozadu, aby se co nejrychleji dostala na úroveň horní hrany monokoku

Kšilt – rovná zadní část přizvednutá na úplném konci

#### 2.3.1 Rennteam

Prvním příkladem je vůz týmu Rennteam z univerzity ve Stuttgartu, který stejně jako CarTech používá čtyřválcový motor, a celkovou koncepcí se vozidla velmi podobají, takže by si mohly být i kryty velmi podobné. Na druhou stranu tým představuje světovou špičku a benefit krytu se může projevit pouze ve správné tvarové kombinaci s ostatními částmi vozu.

Kryt samotný navazuje ve své přední části uprostřed na sání a na stranách na bok monokoku. Směrem dozadu lehce klesá a zužuje se. Zakončen je vzadu do tvaru půl elipsy s mírným přizvednutím ve střední části. V části za sáním se kryt pouze zužuje a nijak výrazně neklesá. Po stranách je kryt doplněn otvory, které nejspíš pomáhají chladit motor. Z detailního zkoumání obrázku jsem vyzoroval, že otvory jsou nastavené tak, aby



pomáhaly dostat teplý vzduch z pod krytu ven – z místa se staticky nižším tlakem, ne pro směřování okolního vzduchu pod kryt. (Obrázek 2)



*Obrázek 2: Vůz týmu Rennteam [6]*

### 2.3.2 Rennstall

Druhým je vůz týmu Rennstall z univerzity v Esslingenu využívající dvouválcový motor. Kryt je proveden ve formě rovného kšiltu navazujícího na monokok s kapličkou navazující na řidiče. Stejně jako u prvního týmu je kryt zakončen ve tvaru elipsy se zvednutím v zadní části. Dostatečné ochlazování motoru je zajištěno nezakrytím boků. (Obrázek 3)

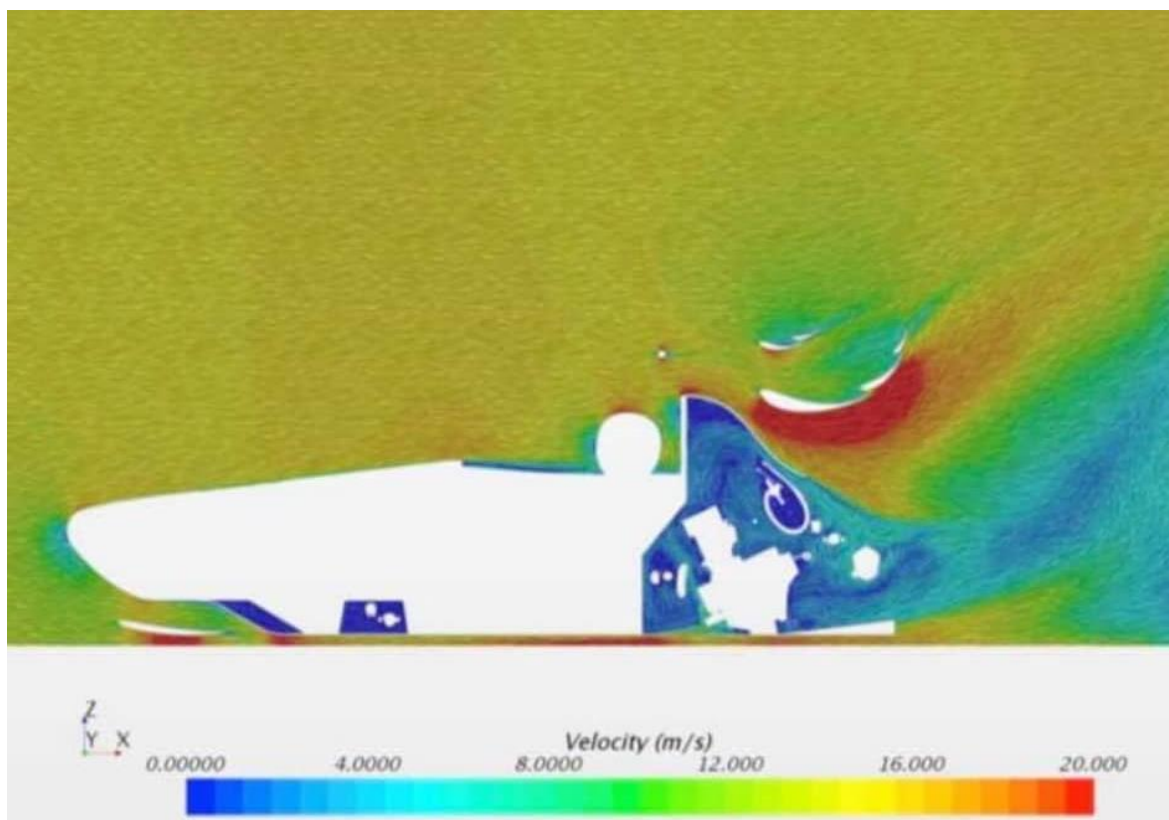


Obrázek 3: Vůz týmu Rennstall [7]

### 2.3.3 UPBracing Paderborn

Třetím je vůz týmu UPBracing Paderborn se čtyřválcovým motorem.

V tomto případě se mi nepodařilo sehnat obrázek vozu z trati, ale pouze screenshot s rozkreslením rychlosti z CFD simulace a náhledu sestavy aerodynamických prvků. Kryt má kapličku za řidičem, více informací z dostupných zdrojů nelze získat. (Obrázek 4 a 5)



Obrázek 4: Simulace týmu UPBracing [8]



Obrázek 5: Sestava rýmu UPBracing [8]

#### 2.3.4 eForce FEE

Posledním je elektrický vůz eForce FEE z FEL ČVUT. Ačkoliv na obrázku není nejnovější vůz, jedná se o poměrně zajímavé provedení, které ale oproti předchozím příkladům nepřináší





mnoho nového, jen potvrzuje celkový trend s kapličkou za řidičem a monokokem. (Obrázek 6)



Obrázek 6: Vůz týmu eForce [9]

## 2.4 Technická omezení

Při návrhu jakéhokoliv komponentu je třeba dívat se na vůz jako celek a zároveň respektovat pravidla dané organizátory soutěže. Pro dosažení nejlepšího výsledku není důležité provedení jediného dílu, ale celku a vztahů mezi jednotlivými částmi.

V koncepční fázi vývoje není tolik potřebné řešit konstrukční detaily jako např. způsob uchycení, ale především fyzikální zákony a z nich plynoucí omezení. Detaily potřebné pro výrobu se řeší až ve fázích návrhu. Přesto je vhodné mít nějaké nápady v hlavě, aby se nemusel koncept od začátku předělávat, jakmile se výrobě přiblížíme. [2]

Omezení při navrhování krytu motoru, jež jsem musel respektovat, jsou následující:

- Dát si pozor na kolize s ostatními díly
- Přímá návaznost na zadní část monokoku
- Teplo od motoru – kryt nesmí být příliš uzavřený, aby se motor nepřehříval a neztrácel výkon
- Obálky – předem definovaný prostor, kde mohou být umístěny aerodynamické prvky – zůstat mezi zadními koly a zároveň nezvedat kryt nad hranu monokoku před opěrkou hlavy řidiče

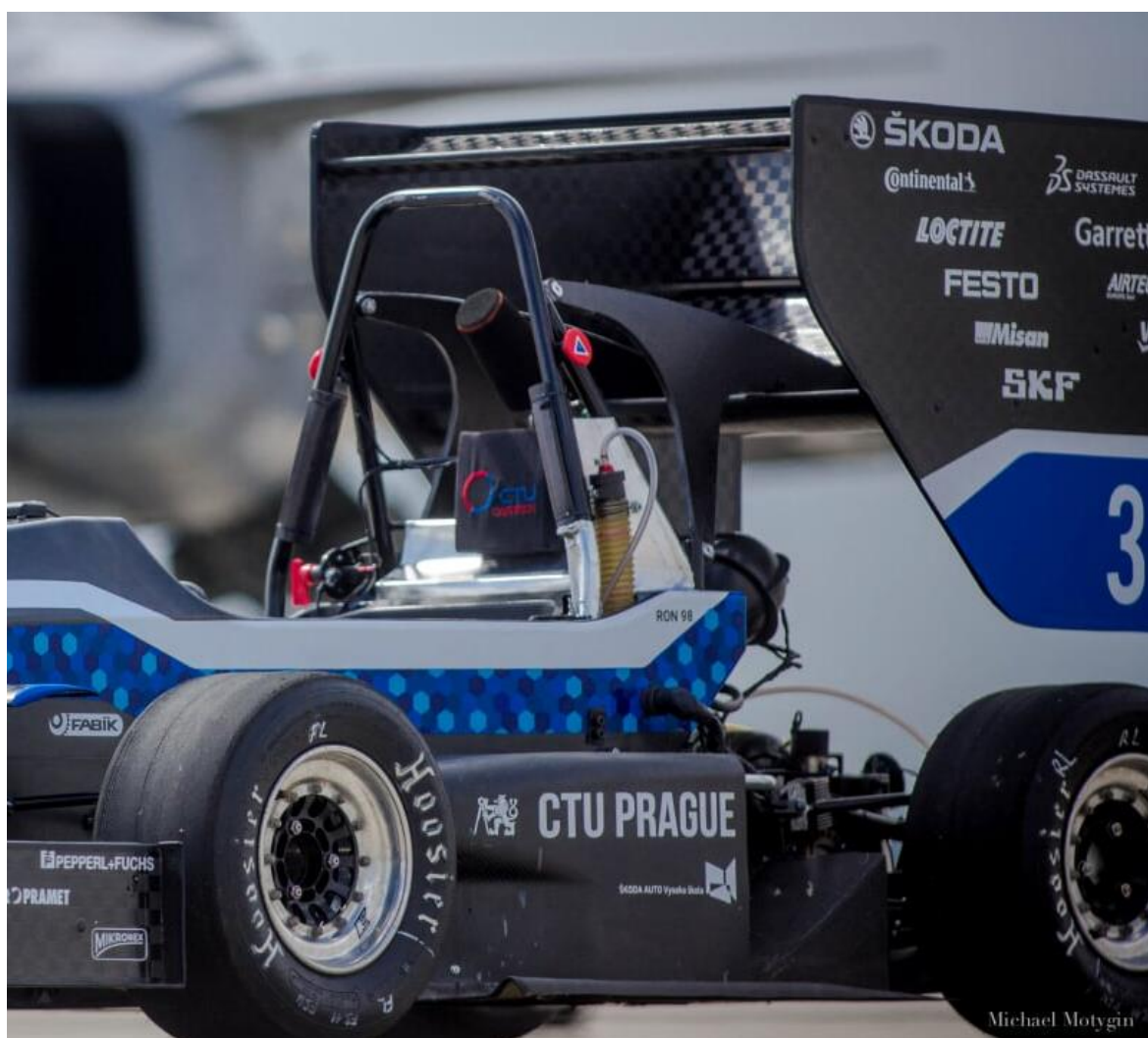


- Neprotahovat kryt příliš dozadu a snaha o kompaktní velikost – pro lepší manévrovatelnost, nižší hmotnost a co nejnižší těžiště
- Vedení krytu v blízkosti zadního trubkového rámu, aby se na něj mohl jednoduše připevnit

## 2.5 Rozdělení na kryt motoru a firewall

Za účelem správného fungování krytu motoru je třeba zajistit jeho hladké napojení na monokok a nestavět mu do cesty žádné překážky, které tam nemusejí nutně být (např. řidič, rám, hlavová opěrka, hrdlo nádrže nebo vypínače elektroniky). Jednou z takových překážek představoval firewall, o němž se podrobněji rozepíšu v další podkapitole. (Obrázek 7)

V první polovině vývoje jsem se soustředil pouze na nalezení optimálního tvaru krytu motoru, který by mohl sloužit také jako firewall, ale když simulace neukázaly žádné velké výhody tohoto řešení, rozhodl jsem se soustředit pouze na optimalizaci tvaru firewallu, čímž jsem vývoj krytu motoru odsunul na později.



Obrázek 7: Vůz CTU CarTech FS.11



## 2.6 O firewallu

Firewall slouží k ochraně řidiče proti hořlavým, výbušným a jiným potenciálně nebezpečným látkám. Přestože se většina jeho objemu nachází pod horní hranou monokoku, z aerodynamického hlediska je důležitá ta část vystupující nad ní. Doposud bylo používáno konstrukční řešení vystupující části složené ze dvou kusů plechu, z nichž jeden chránil řidiče před hrdlem palivové nádrže a druhý před hlavní motorovou částí. Oba kusy se tyčily do výše cca 150 mm nad hranu monokoku a představovaly z aerodynamického hlediska významnou překážku.

Ačkoliv to může znít nepochopitelně, toto řešení se používalo kvůli své jednoduchosti, jelikož k provedení firewallu nebyla přiřazena konkrétní osoba. Většinou se jeho výroba operativně řešila v časovém stresu až těsně před prvními testovacími jízdami nebo závody, kdy se nevěnovala taková pozornost interakci s ostatními díly, natož provedení aerodynamické simulace.

V pravidlech je psáno, že firewall musí ochránit jakéhokoliv řidiče do výše 100 mm nad spodním okrajem přilby. Nikde není napsáno, že to musí být provedeno dosavadním řešením, kdy se zvedá za řidičem výrazná stěna, přestože to může být některými lidmi takto chápáno. Mé první myšlenky vedly ke sklopení stěny dozadu a ke zmenšení firewallu kolem hrdla nádrže na minimální rozměry, protože dosavadní řešení bylo nejjednodušejí kontrolovatelné z pohledu naplnění požadavku pravidel, ale neobsahovalo mnoho nápaditosti.

Chápu, že slovo firewall nebudí v příznivcích českého jazyka příliš velké sympatie, přesto ho budu v této práci používat, jelikož neexistuje jednoduchý vystihující český překlad. Pokud bych se ho pokusil doslovně přeložit, nejspíše bych došel k výrazu „žáruvzdorný plech“ nebo „bezpečnostně požáruodolná stěna“. Ačkoli jsou tyto termíny fakticky správně a pro člověka neznalého motorsportu možná představitelnější, pro lidi z oboru je firewall stejně přirozený jako hardware nebo software v IT. Používání českého překladu by bylo návratem do doby českého obrození, kdy vznikala slova jako knihovtipník (student) nebo rokodník (kalendář), které se dnes vyskytují jen jako zajímavé příklady jedné epochy české historie.

Firewall okolo hrdla nádrže budu nadále pro jednoduchost popisovat pomocí zkratky FHF – z anglického fuel hose firewall.



## 3 O simulacích

### 3.1 CFD simulace a podmínky

Ke znázornění proudění se používají CFD (z angličtiny Computational Fluid Dynamics) simulace. V týmu CTU CarTech se využívá software Star CCM+ s následujícím nastavením:

- Ustálené proudění při rychlosti 15 m/s
- Nestlačitelný vzduch
- Ideální plyn
- Mezní vrstva modelována pomocí stěnové funkce ( $y^+$ )
- RANS model (Reynolds averaged Navier – Stokes)
- Spalart – Allmaras model turbulentního proudění
- Rotující kola a osy
- Pohyblivá vozovka
- Polovina vozu, okrajová podmínka symetrie
- 1600 iterací
- Mnohostěnná síť s postupným zjemněním (polyhedral mesh)
- Zjemnění v oblastech mezní vrstvy (prism layer meshing)

Polyhedral mesh, tedy síť složená z různých mnohostěnů, dosahuje vůči standardnějším variantám, např. čtyřstěnným či šestistěnným elementům, značně vyššího počtu buněk, Výpočty s takovou sítí však konvergují výrazně rychleji. [4]

### 3.2 Vyhodnocování

K CFD simulacím se používá zjednodušený model auta, který se snaží vyvážit délku výpočtu s co nejméně nepřesnými výsledky.

Auto je rozdělené podle důležitých celků, které se na něm nacházejí. Z výsledků je potom patrné, jak moc se která část podílí na vztlaku a odporu.

Pro správnou analýzu změn provedených na autě je potřeba provádět v každé simulaci pouze jednu změnu. Pokud by jich bylo více, nemohli bychom přesně zjistit, jaký vliv konkrétní změna má. Jako výchozí stav, vůči němuž se jednotlivé simulace porovnávají, slouží tzv. konstrukční stav K0, K1, K2... Na podzim 2019 byl konstrukční stav K0 modelem předchozího monopostu FS.11. Další konstrukční stavy se přidávaly postupně, když bylo jisté, že se na autě aplikují inovované nebo zpřesněné díly.

Výsledkem je tabulka hodnot, kde se nachází koeficient vztlaku a přítlaku pro jednotlivé celky, průtok chladičem a rozvážení mezi přední a zadní nápravu, aerodynamická efektivita, přítlačná síla a odporová síla celého auta.



### 3.3 Omezení

Při popisování výsledků jednotlivých verzí je třeba mít určitou rezervu a nedůvěřovat jim na 100 %. CFD model není dokonale přesný, takže ani výsledky nemohou být naprosto důvěryhodné. Na tento fakt jsem narážel zejména u simulací krytu motoru, kdy měl přidáný kryt velmi podobný tvar jako motorová část v konstrukčním stavu, takže ve výsledných hodnotách nebyly příliš velké rozdíly.

Další nepřesností bylo nereálně vymodelované sání, které neobsahovalo filtr vzduchu na konci sací trubice, a zároveň byl airbox (prostřední objemná část) posazen níž než ve skutečnosti, čímž v důsledku docházelo k překrytí s krytem motoru a zamezení proudění vzduchu mezi nimi. Opraveno bylo v konstrukčním stavu K2.

Model motorové části nebo sání není až tak důležitý při návrhu křidel nebo podlah, proto je pochopitelné, že mu doposud nebyla věnována dostatečná pozornost.

Z podmínky symetrie simulace, jež předpokládá osově symetrické auto, vyplývá další neduh, který jsem pociťoval při simulacích s firewallem okolo hrdla nádrže. Varianta bez hrdla nádrže vycházela z aerodynamického hlediska příliš optimisticky, s ním naopak pesimisticky. Abych nemusel simulovat celé auto bez podmínky symetrie, volil jsem řešení v podobě nalezení 2 nejlepších verzí bez hrdla nádrže, k nimž jsem poté hrdlo přidal a nasimuloval znovu. Pro vyčíslení finální varianty jsem nejlepší varianty s hrdlem a bez něj zprůměroval.

Jak s těmito nedokonalostmi naložím do budoucna zmiňuji v závěru v části 5 na straně 55.

### 3.4 Popis srovnání s Chassi, Intake, Rwing

Aby byly výsledky přehledné a stále přesné, budu u každé verze uvádět pouze omezený počet údajů. Vzhledem k velikosti změn, které jsem prováděl, se lehce měnila i síť, která potom ukazovala lehce rozdílné výsledky např. pro přední křídlo, kde by se z pohledu obtékání nic měnit nemělo. Jelikož nebyly změny dostatečně výrazné, aby se podobné nepřesnosti daly zanedbat, budu ukazovat výsledky nejen pro celé auto, ale i pro celky šasi, sání a zadní křídlo, jež jsem ovlivňoval nejvíce.

$C_l$  – koeficient vztlaku

$C_d$  – koeficient odporu

$G_{00}$  – vztaženo na celé auto – součet hodnot jednotlivých celků

$G_{0\_chassi}$  – vztaženo na šasi – jedná se o monokok s řidičem a opěrkou bez špičky, s bočními křídélky a se zjednodušenou motorovou částí

$G_{2\_intake}$  – vztaženo na sání

$G_{11\_r\_wing}$  – vztaženo na zadní křídlo



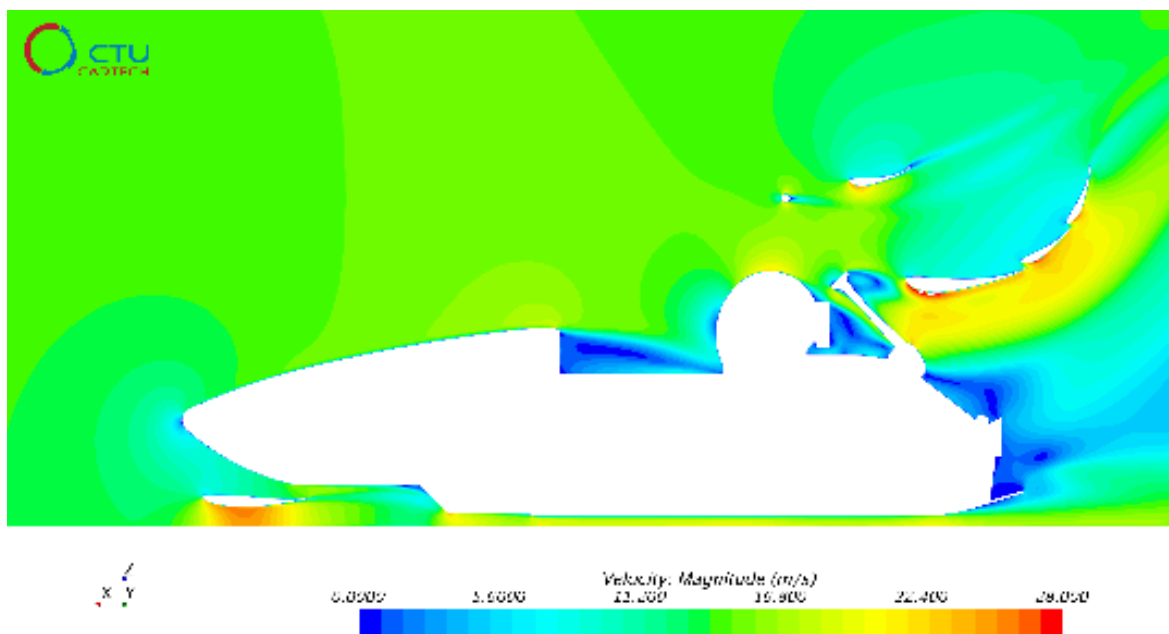
## 4 Jednotlivé verze

### 4.1 Kryt motoru

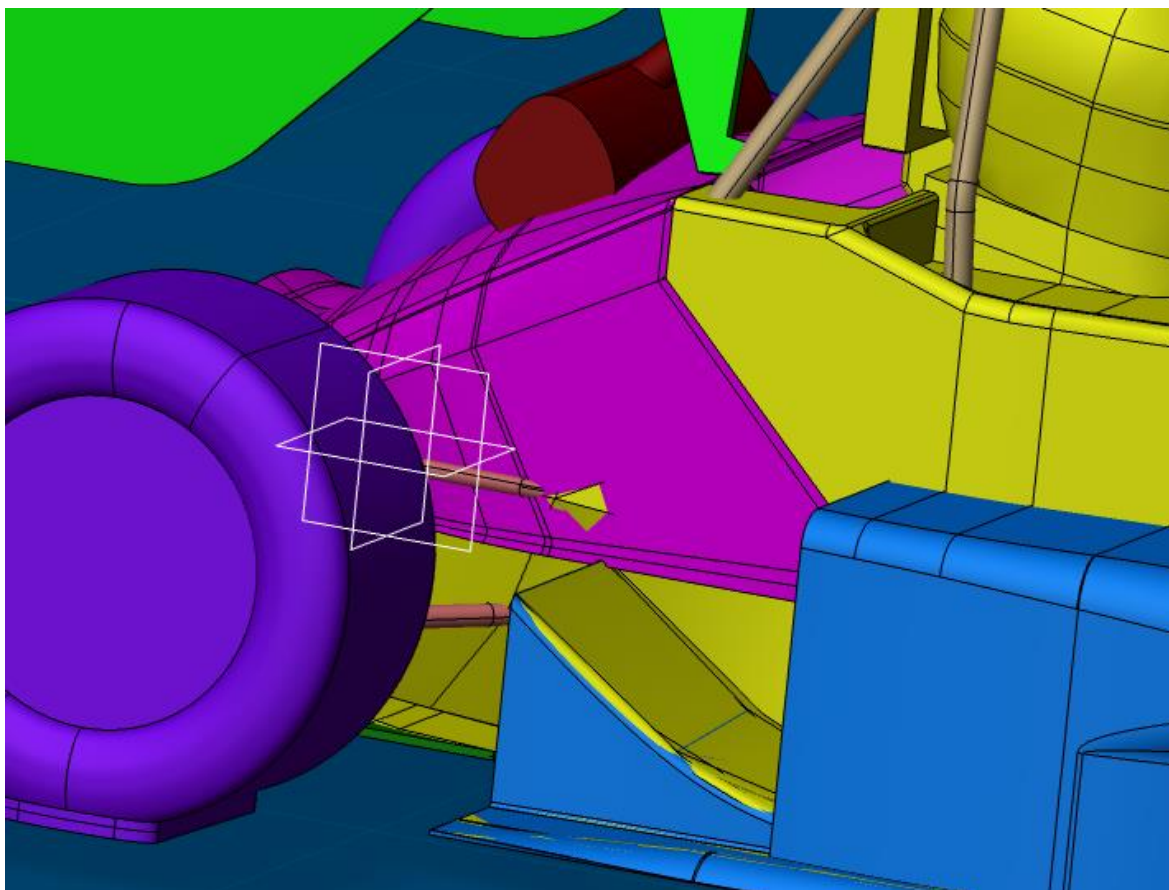
Verze s krytem motoru jsem modeloval pomocí funkce „multi section surface“. Ta z okrajových křivek vytvoří plochu, kterou jsem pro potřeby CFD simulace vyplnil a uzavřel do pevného tělesa. Okrajové křivky jsou celkem 4, z toho 2 jsem výrazněji měnil a 2 jsem nechával neměnné. Neměnné zůstaly zadní elipsa a přední křivka kopírující tvar monokoku. Měnil jsem páteřní křivku, která vedla prostředkem vozidla a tvořila hřbet krytu, a boční křivku, která definovala, jak moc se kryt zužoval směrem dozadu. Dále budu tyto dvě křivky nazývat „páteřní“ a „boční“ s tím, že jejich tvar bude zobrazen na obrázcích při pohledu zesponu a v řezu vedoucím středem vozidla.

#### 4.1.1 01

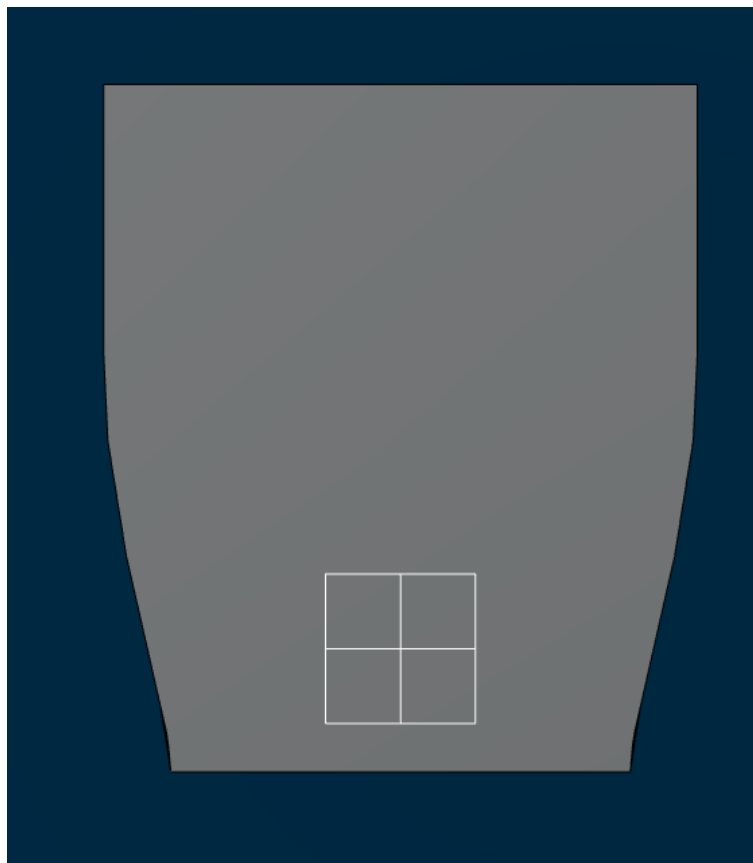
První verzi jsem zkusil „nastřelit“ tak, abych viděl, jak kryt ovlivňuje obtékání vzduchu. Boční křivka je nejdřív rovná a směrem dozadu se zužuje, páteřní je mezi kly monokoku rovná, za nimi se svažuje a na úplném konci je zakřivená nahoru. (Obrázek 8, 9 a 10)



Obrázek 8: Simulace 01 - řez středem se zobrazením rychlosti



Obrázek 9: Simulace 01 – celkový pohled



Obrázek 10: Simulace 01 - pohled zespodu



Z výsledků (Tabulka 1) je jasně patrná kolize z CFD modelem sání, který je položen níž než ve skutečnosti, a zasahuje do krytu, což znemožňuje plynulé obtékání vzduchu. Z tohoto důvodu tedy nemohu vyvodit žádné jasné závěry. V tabulce je vidět, že se snížil odpor chassis a zvýšil přítlak zadního křídla, z čehož vyvozují, že by mohl kryt motoru fungovat, pokud bude CFD model odpovídat skutečnosti.

Tab.1 – Simulace 01

Sim		K0	01
g00	Cd	0.703	0.707
	Cl	-1.505	-1.476
g0_chassis	Cd	0.114	0.111
	Cl	-0.017	-0.004
g11_right_wing	Cd	0.348	0.345
	Cl	-0.735	-0.760
g2_intake	Cd	0.008	0.017
	Cl	0.004	0.025

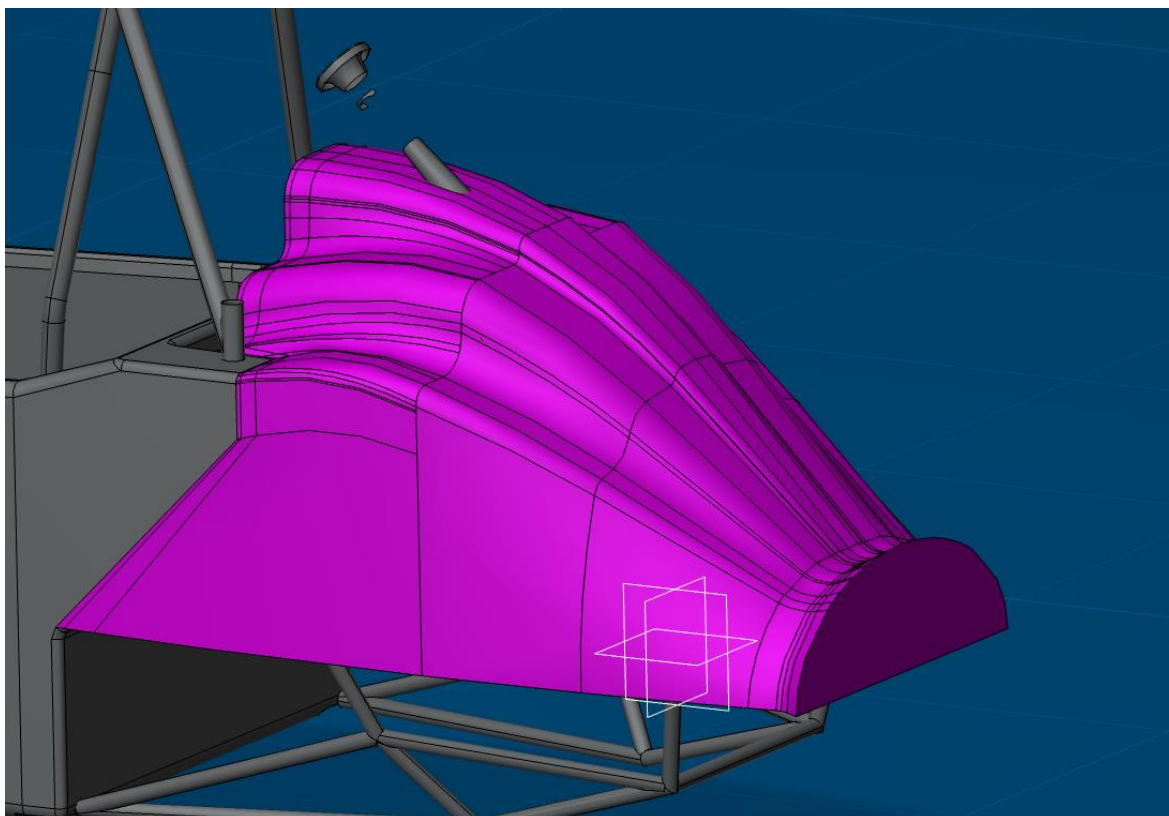
#### 4.1.2 02

Protože jsem nechtěl modelovat sání, zkusil jsem variantu krytu, která vedla přes něj. Kryt navazoval na hlavovou opěrku řidiče a stejně jako v předchozí verzi se páteřní křivka snižovala a na konci zaoblila, zatímco boční se postupně zužovala a na konci se také zakřivila. (Obrázek 11, 12 a 13)

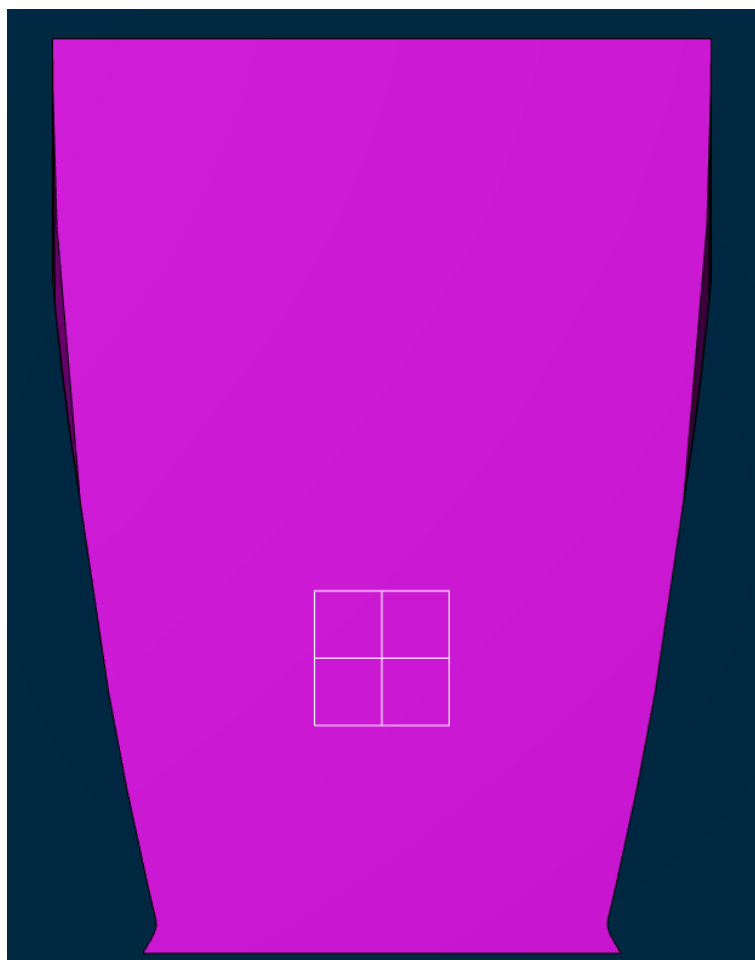


Obrázek 11: Simulace 02 - řez středem





Obrázek 12: Simulace 02 - celkový pohled



Obrázek 13: Simulace 02 - pohled zespodu

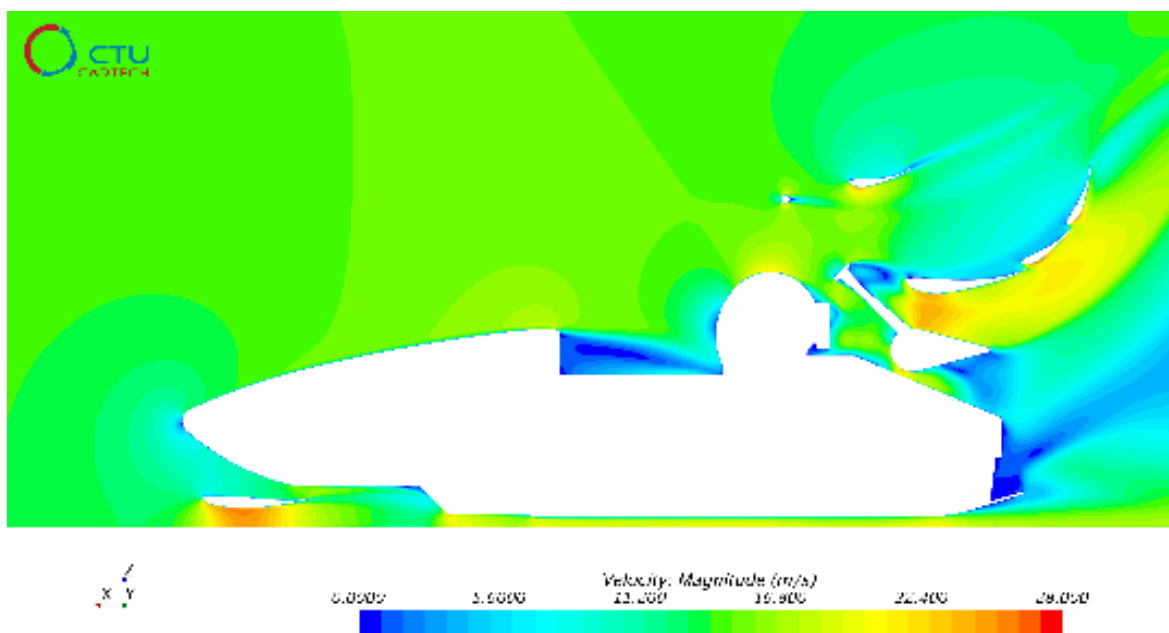


Bohužel se nám tuto verzi nepodařilo nasimulovat, jelikož vykazovala velké množství errorů, které ani zkušenější kolegové z týmu nedokázali opravit. Po úvaze o přínosu takto tvarované a velké varianty jsme se rozhodli, že nemá smysl dál se touto verzí zabírat, protože by nepřinesla mnoho výhod.

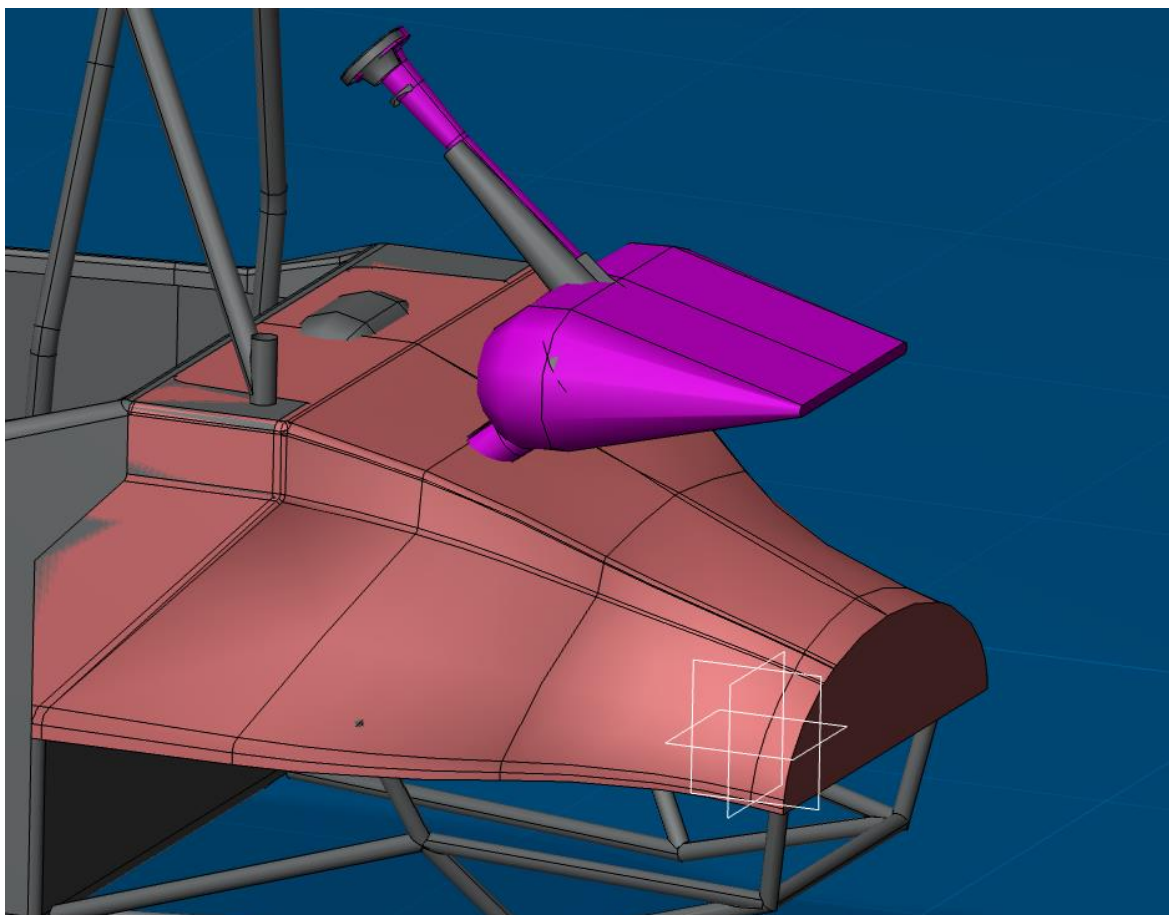
#### 4.1.3 03

Jelikož jsem stále nechtěl dělat model sání v CFD, rozhodl jsem se ho zabalit do krytu v podobě kapky odpovídajícímu skutečnému tvaru sání, s nímž jsem nasimuloval další tři verze. Až příliš pozdě jsem si uvědomil, že jsem dělal dvě změny najednou (kryt motoru a kryt sání), a teprve potom jsem zařídil skutečný model sání v CFD.

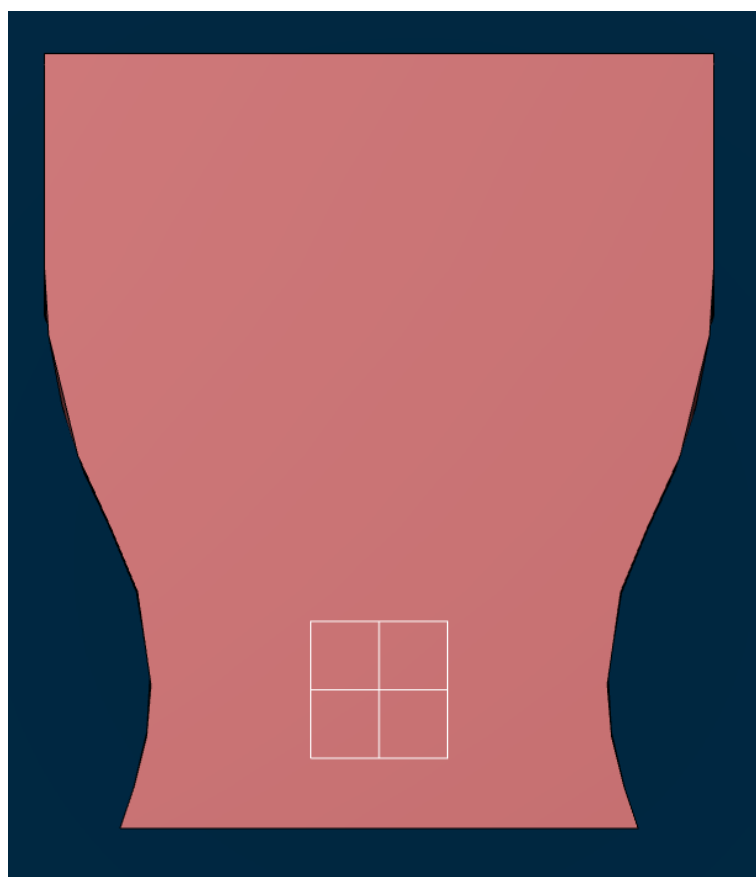
Třetí verze měla co nejrovnější páteřní křivku, ale o to více zaoblenou měla boční. (Obrázek 14, 15 a 16)



Obrázek 14: Simulace 03 - Řez středem se zobrazením rychlosti



Obrázek 15: Simulace 03 - Celkový pohled



Obrázek 16: Simulace 03 - Pohled zespodu



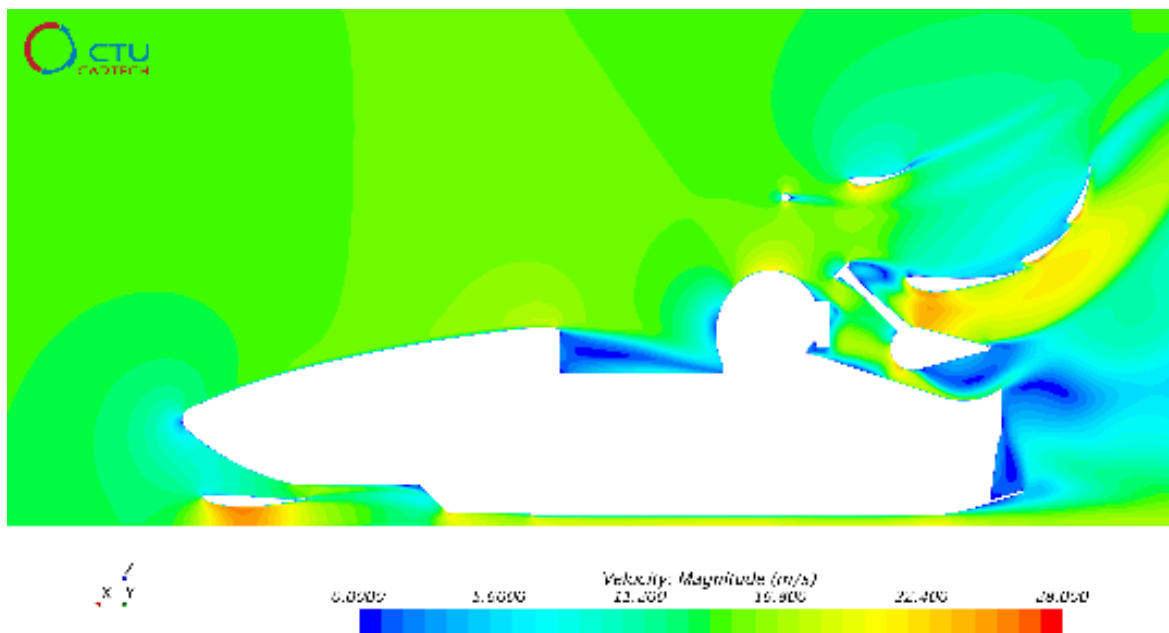
V kombinaci s krytem sání se mi podařilo lehce vylepšit odpor zadního křídla a přítlak chassis. Odpor i přítlak sání se zhoršily, ale to bylo spíše tím, že v předchozích simulacích bylo sání schované za monokokem. (Tabulka 2)

Tab.2 – Simulace 03

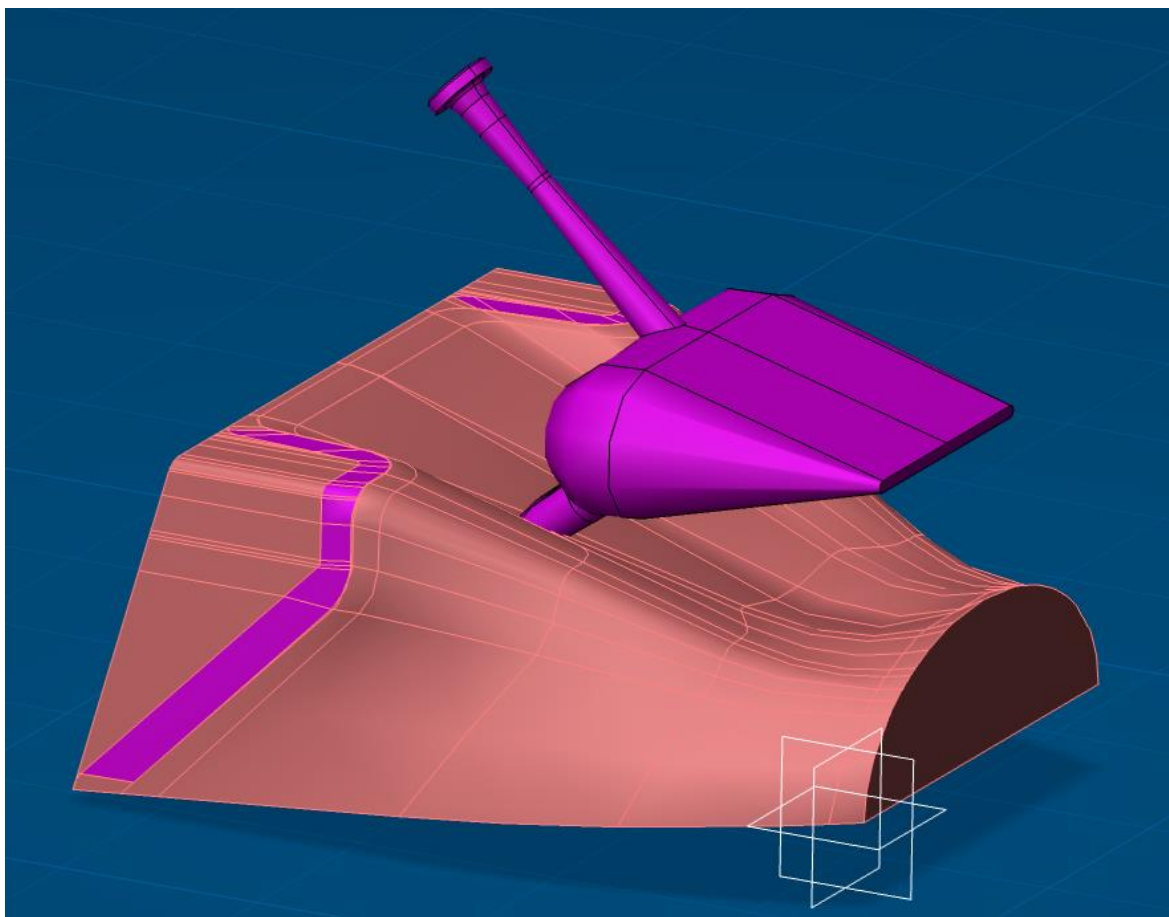
Sim		K1	03
g00	Cd	0.706	0.704
	Cl	-1.492	-1.487
g0_chassis	Cd	0.110	0.109
	Cl	-0.014	-0.026
g11_r_wing	Cd	0.346	0.338
	Cl	-0.730	-0.730
g2_intake	Cd	0.008	0.013
	Cl	0.004	0.022

#### 4.1.4 04

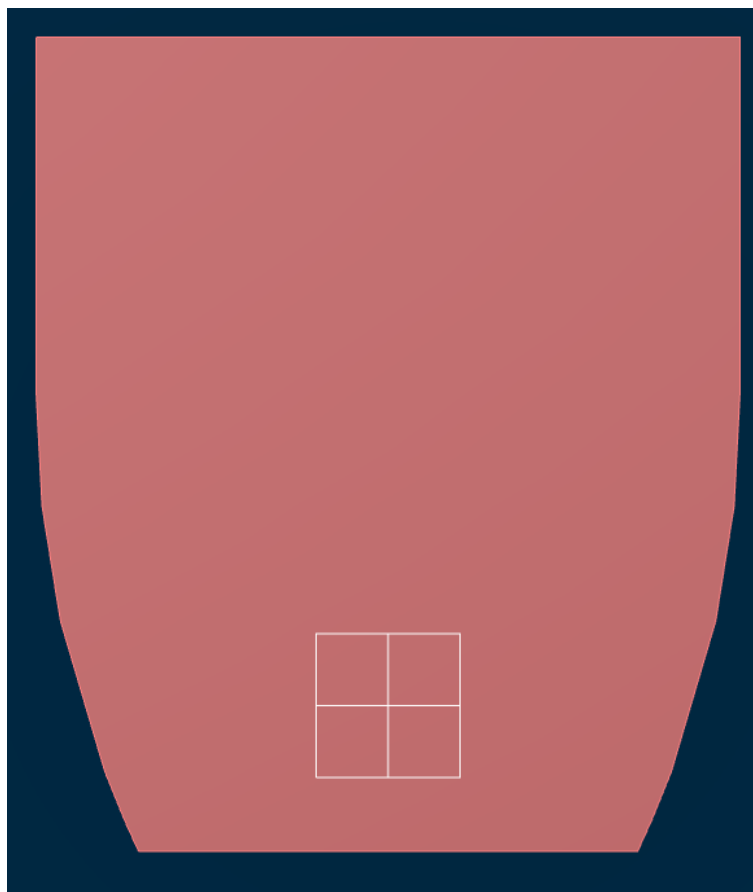
Čtvrtá verze měla páteřní křivku co nejnižší hned od monokoku, aby byl prostor mezi kryty motoru i sání co největší. Boční křivka byla v tomto případě klasická – rovná a pak zužující. Na kryt sání jsem ještě připevnil Gurneyho klapku. (Obrázek 17, 18 a 19)



Obrázek 17: Simulace 04 - řez středem se zobrazením rychlosti



Obrázek 18: Simulace 04 - Celkový pohled bez Gurneyho klapky



Obrázek 19: Simulace 04 - Pohled zespodu

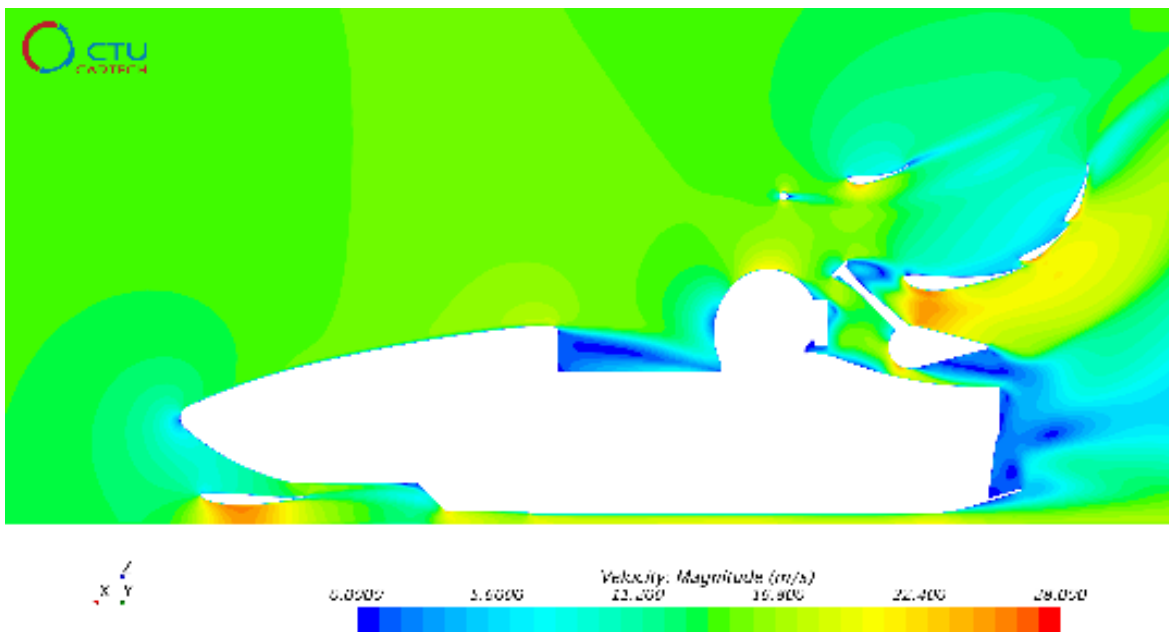
Tato verze dopadla velmi podobně jako předchozí, vylepšila pouze přítlak křídla a sání díky Gurneyho klapce. (Tabulka 3)

Tab.3 – Simulace 04

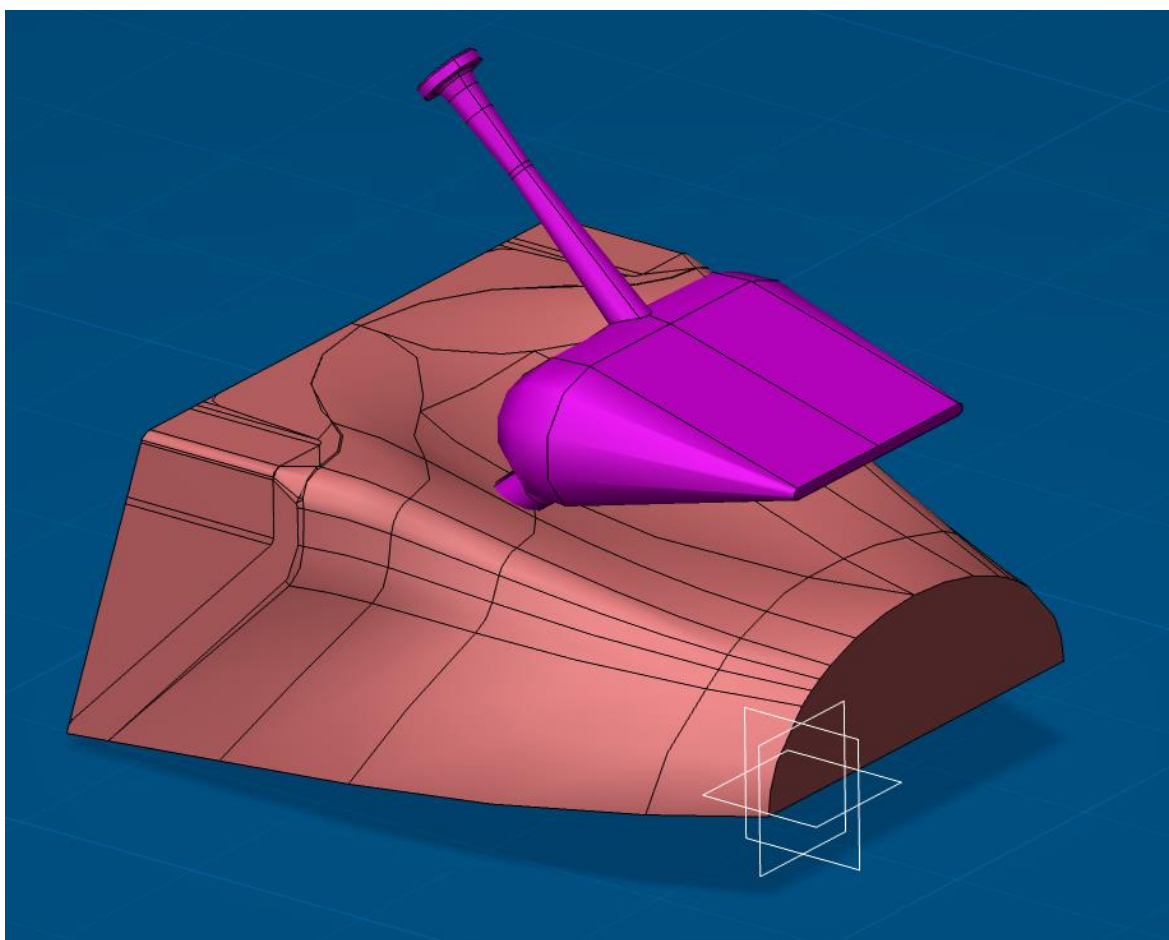
Sim		K1	04
g00	Cd	0.706	0.712
	Cl	-1.492	-1.483
g0_chassis	Cd	0.110	0.113
	Cl	-0.014	-0.013
g11_r_wing	Cd	0.346	0.341
	Cl	-0.730	-0.736
g2_intake	Cd	0.008	0.013
	Cl	0.004	0.018

#### 4.1.5 05

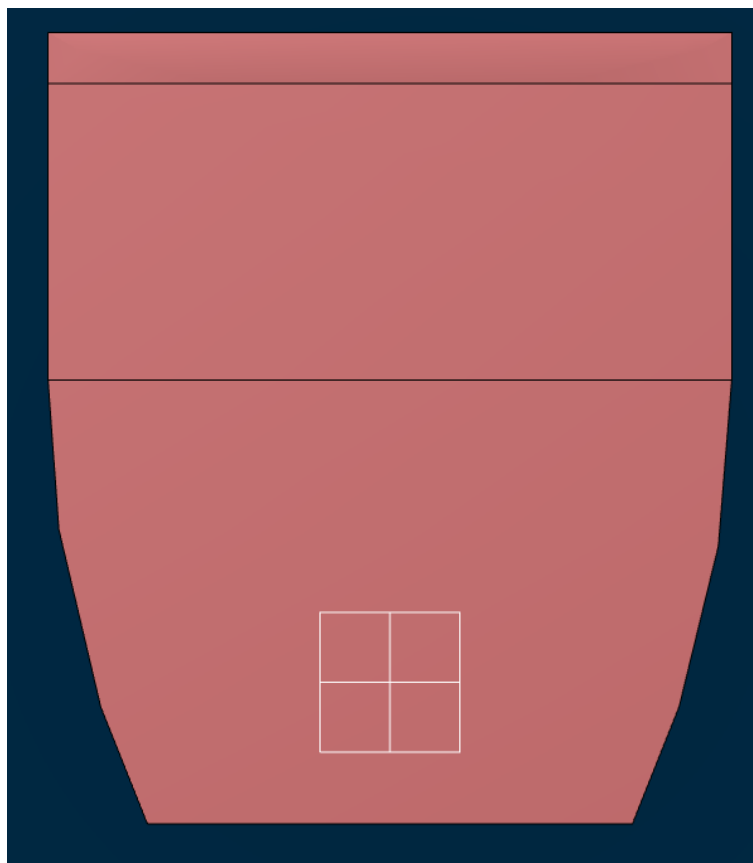
Pátá verze je takřka identická se čtvrtou. Jedinou změnou je absence Gurneyho klapky na sání, absence zaoblení konce páteřní křivky a lehce pozměněné napojení na monokok. (Obrázek 20, 21 a 22)



Obrázek 20: Simulace 05 - Řez středem se zobrazením rychlosti



Obrázek 21: Simulace 05 – Celkový pohled



Obrázek 22: Simulace 05 – Pohled zespodu

Z výsledků (Tabulka 4) je vidět vyšší přítlak zadního křídla, ale to je vše. Proto jsem se rozhodl udělat přesný model sání do CFD modelu do konstrukčního stavu K2.

Tab.4 – Simulace 05

Sim		K1	05
g00	Cd	0.706	0.711
	Cl	-1.492	-1.476
g0_chassis	Cd	0.110	0.112
	Cl	-0.014	-0.002
g11_r_wing	Cd	0.346	0.340
	Cl	-0.730	-0.746
g2_intake	Cd	0.008	0.015
	Cl	0.004	0.023

#### 4.1.6 Kryt motoru – závěr

Ani jedna ze simulovaných verzí nepřinesla očekávané vylepšení. (Tabulka 5) U verzí 3, 4 a 5 je navíc velmi důležitou otázkou, vůči čemu by se měly porovnávat. Vůči sobě navzájem? Vůči K1, která má ale jiné sání? Vůči K2, která má správné sání, ale obsahuje i úpravy





sidepodů? Myslím, že neexistuje jednoduchá odpověď. Mnoho se nedá vyčíst ani z obrázků.

Pro ucelený závěr bych musel dělat další simulace:

- Porovnávat pouze 1 změnu
- Zjistit, jak se projevují jednotlivá provedení páteřní a boční křivky
- Vytvořit verzi odpovídající reálné variantě bez krytu, abych měl porovnání vůči skutečnému stavu

Tab.5 – Simulace krytů motoru a konstrukční stavy – celkové srovnání

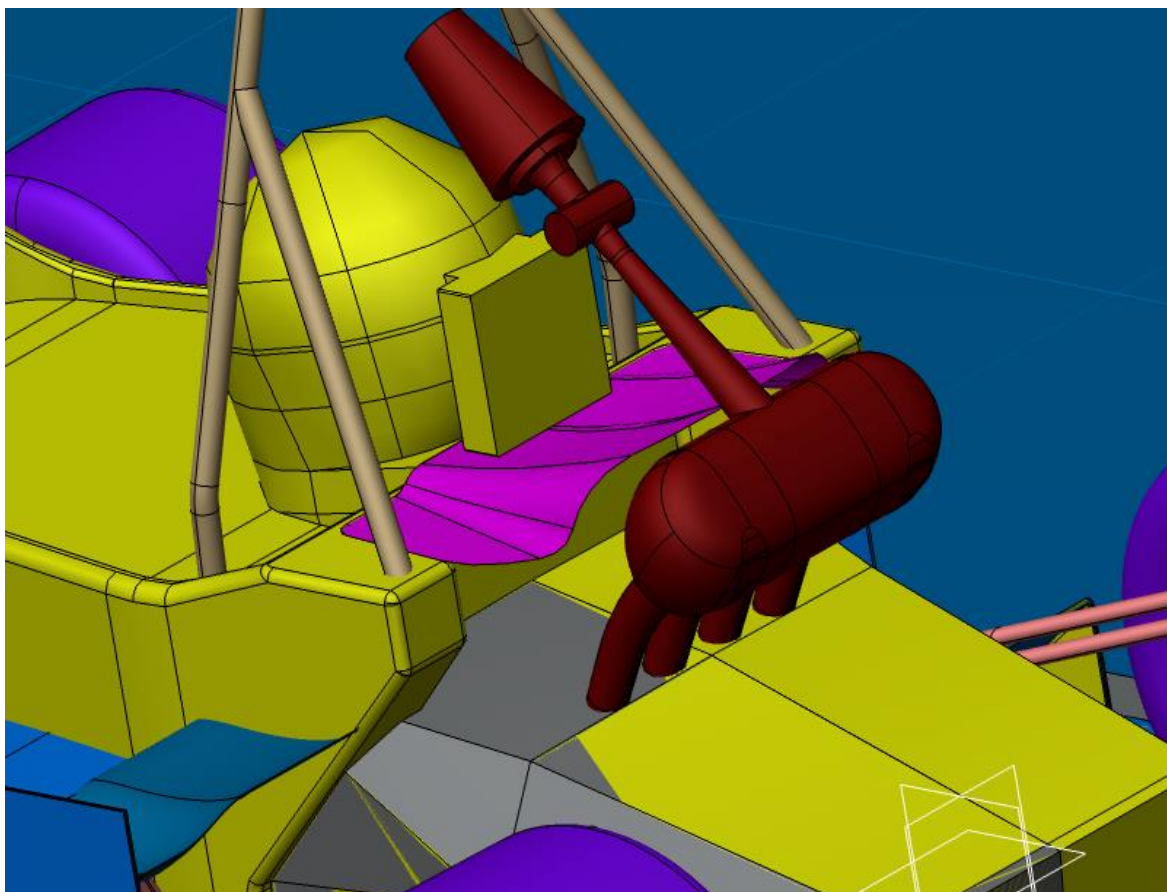
Sim		K0	01	K1	03	04	05	K2
g00	Cd	0.703	0.707	0.706	0.704	0.712	0.711	0.694
	Cl	-1.505	-1.476	-1.492	-1.487	-1.483	-1.476	-1.513
g0_chassis	Cd	0.114	0.111	0.110	0.109	0.113	0.112	0.102
	Cl	-0.017	-0.004	-0.014	-0.026	-0.013	-0.002	-0.041
g11_r_wing	Cd	0.348	0.345	0.346	0.338	0.341	0.340	0.328
	Cl	-0.735	-0.760	-0.730	-0.730	-0.736	-0.746	-0.677
g2_intake	Cd	0.008	0.017	0.008	0.013	0.013	0.015	0.020
	Cl	0.004	0.025	0.004	0.022	0.018	0.023	0.019

## 4.2 Firewall

Jelikož simulace s krytem motoru nevykázaly příliš velká zlepšení, rozhodl jsem se pokračovat pouze s firewallem. Předem bych chtěl upozornit, že vyhodnocování výsledků a zmatení vůči jaké verzi se má porovnávat bude i v tomto případě, ale to je dáno tím, že konstrukční stav firewall doposud neobsahoval a že simulujeme jen polovinu auta.

### 4.2.1 06

Šestou celkovou a první firewallovou simulací je verze s oblým krytem. Jedná se o poměrně malý kryt přímo za řidičem, který směřuje vzduch nad a vedle sání. (Obrázek 23)



Obrázek 23: Simulace 06 – Celkový pohled

Bohužel se vzduch jdoucí přes sání dostává do kolize se zadním křídlem, které citelně odstiňuje a snižuje jeho efektivitu. Tato verze má tedy menší odpor, ale i přítlak, a to jak pro celé auto, tak hlavně pro všechny tři důležité části – chassi, Rwing a intake. V dalším pokračování jsem vyzkoušel směřovat vzduch jen do boku. (Tabulka 6)

Tab.6 – Simulace 06

Sim		K2	06
g00	Cd	0.694	0.674
	Cl	-1.513	-1.501
g0_ch	Cd	0.102	0.101
assi	Cl	-0.041	-0.053
g11_r	Cd	0.328	0.317
_wing	Cl	-0.677	-0.631
g2_int	Cd	0.020	0.011
ake	Cl	0.019	0.009
Chassi	Cd	0.450	0.429
+Rwin	Cl	-0.699	-0.675

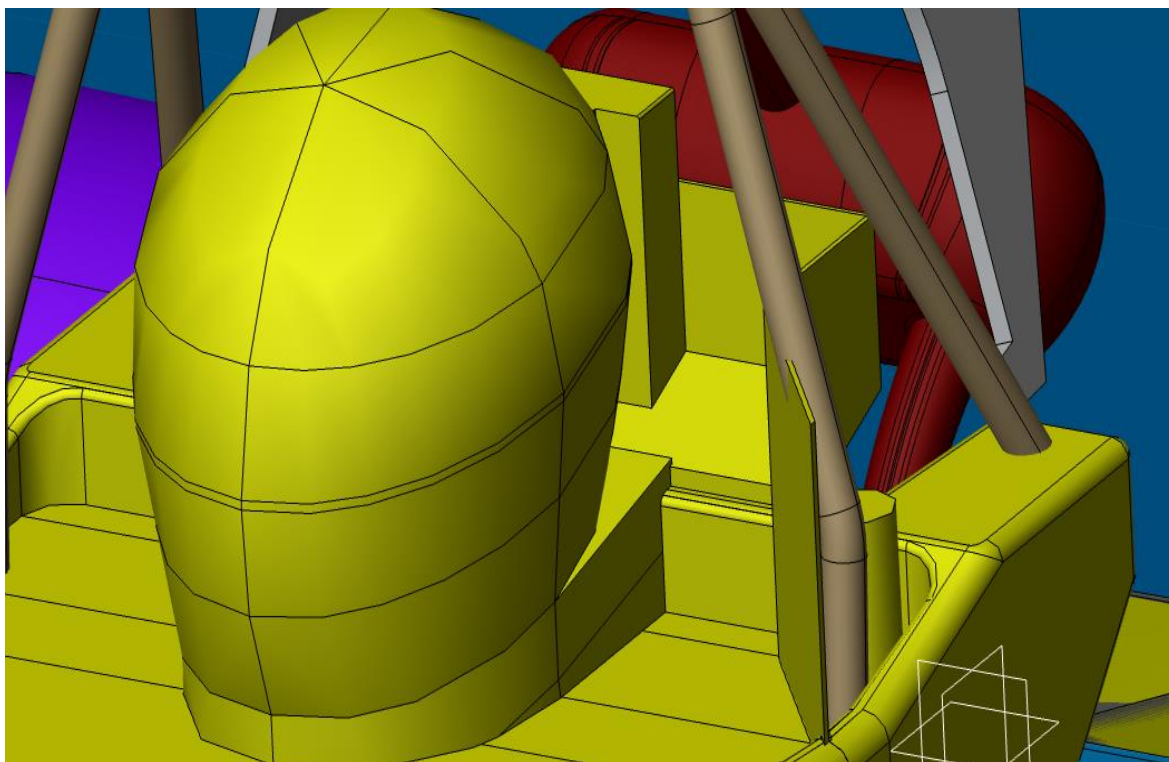
#### 4.2.2 07

Tato verze (Obrázek 24, 25 a 26) představuje firewall tak, jak byl na autě doposud, takže se od ní neočekává moc dobrý výsledek. Zároveň ale představuje verzi, s níž budeme veškeré

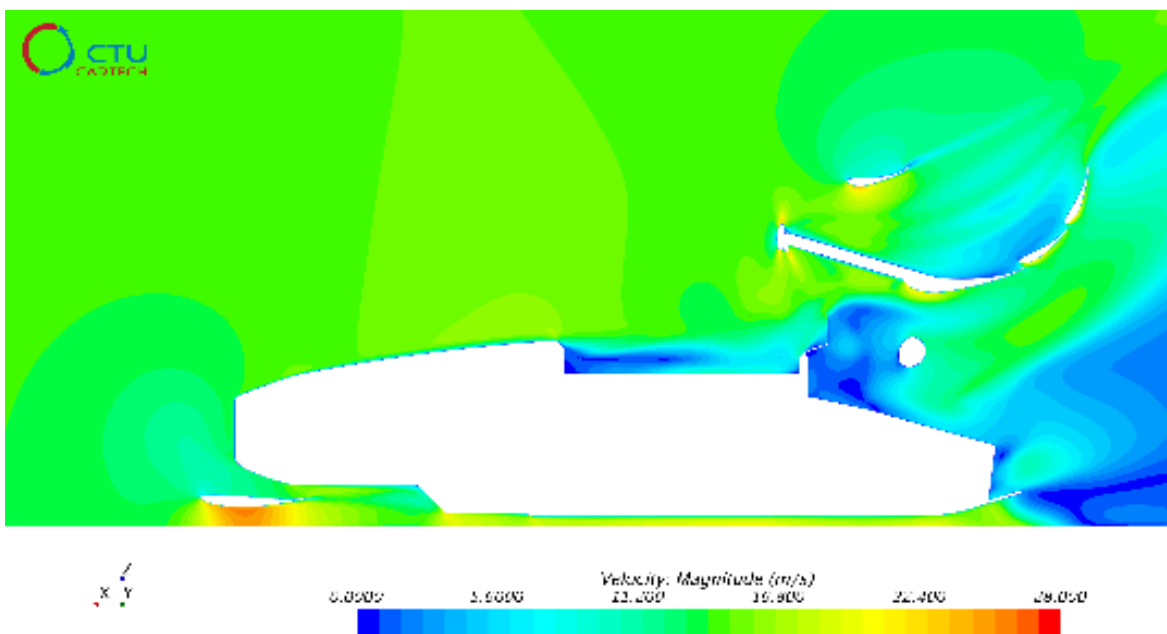


další verze porovnávat, protože se jedná o reálný výchozí stav. Tato verze obsahuje i hrdlo nádrže na obou stranách, které reálně na autě není, takže výsledky budou pesimističtější. Na to si musím dát pozor při vyhodnocování, abych verze s hrdlem nádrže primárně srovnával s touto, verze bez hrdla budu přednostně porovnávat s K2, protože jsou si podobnější. V tabulkách proto budou jednotlivé verze ke srovnání s K2 i s 07.

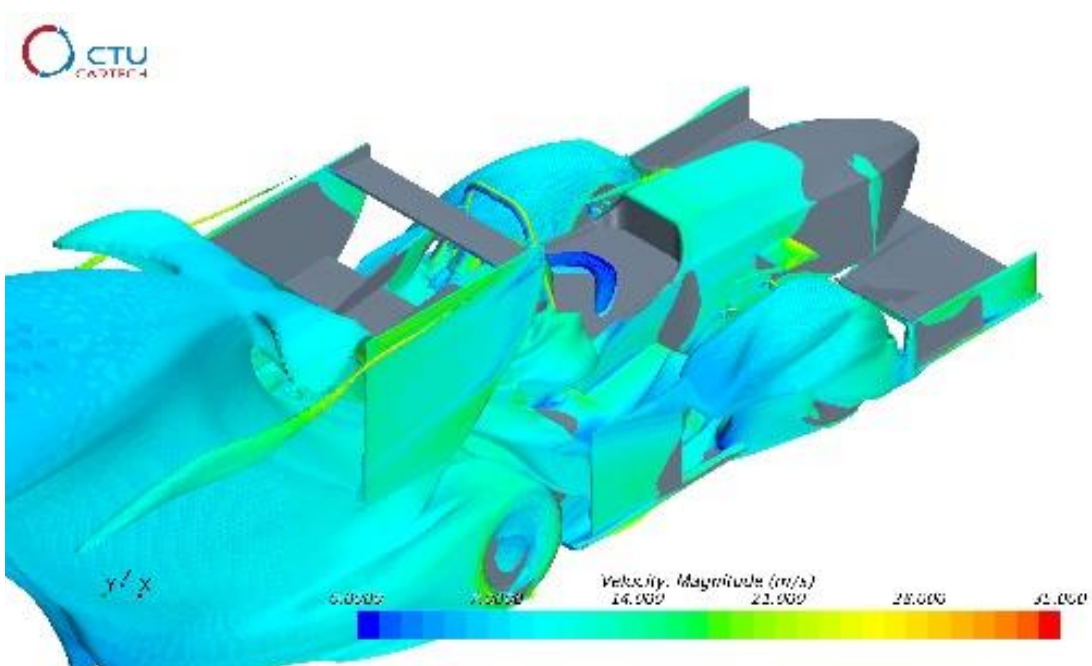
Tuto verzi jsem připravoval souběžně s předchozím kulatým krytem, ale ten se nakonec odsimuloval dřív, jinak by tato verze měla být první v rámci firewallu.



*Obrázek 24: Simulace 07 – Celkový pohled*



Obrázek 25: Simulace 07 – Řez středem se zobrazením rychlosti



Obrázek 26: Simulace 07 – Zobrazení úplavů

Výsledky (Tabulka 7) ukazují výrazné snížení přítlačku, ale i odporu, obojí v důsledku odstínění zadního křídla, kterému se přítlak snížil o celých 20 %.

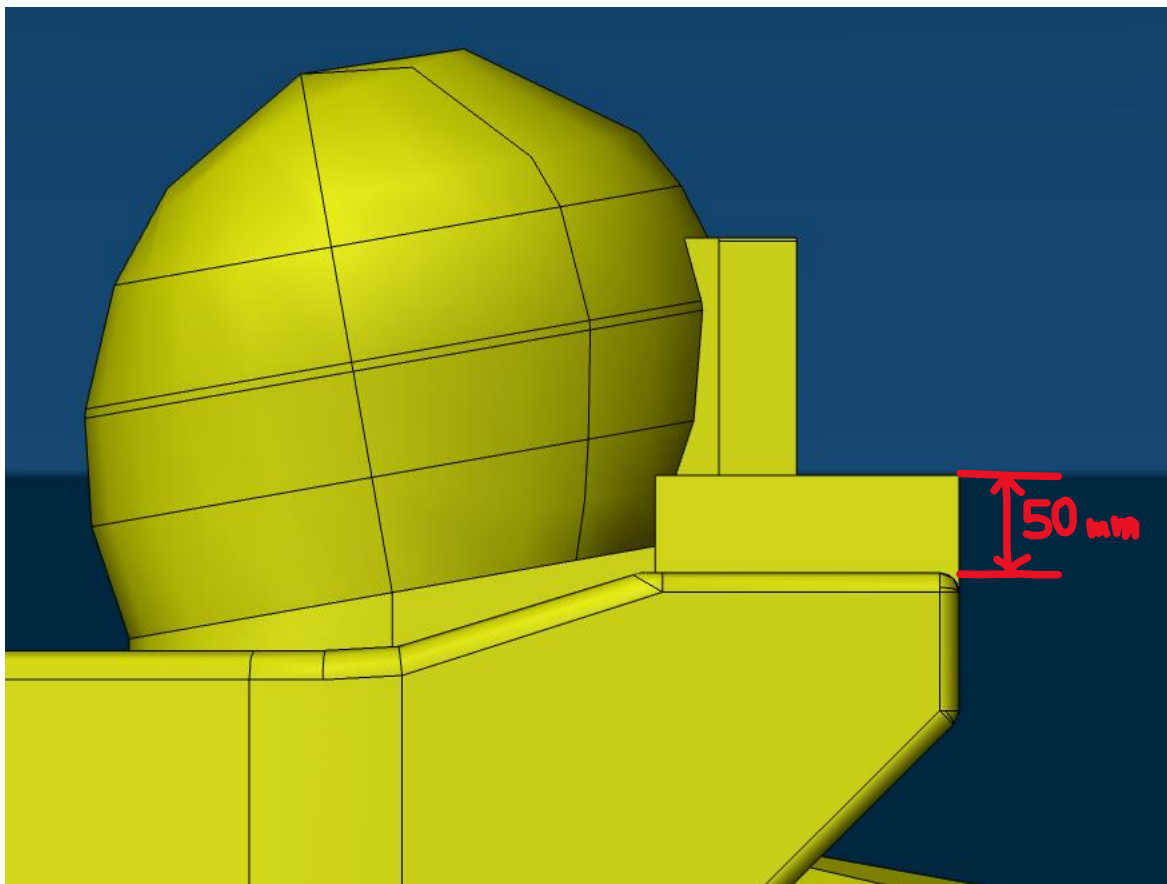


Tab.7 – Simulace 07

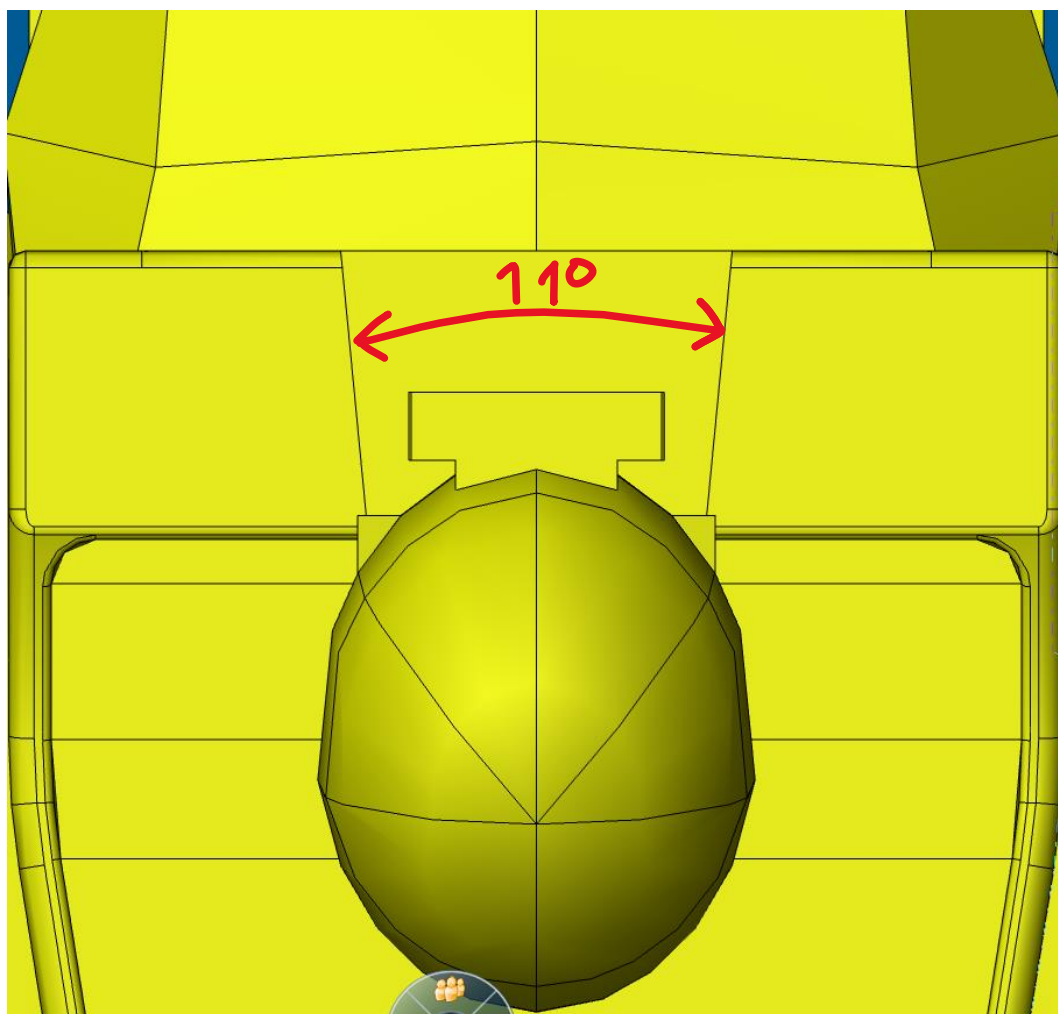
Sim		K2	07
g00	Cd	0.694	0.640
	Cl	-1.513	-1.419
g0_ch assi	Cd	0.102	0.136
	Cl	-0.041	-0.068
g11_r _wing	Cd	0.328	0.261
	Cl	-0.677	-0.539
g2_int ake	Cd	0.020	0.008
	Cl	0.019	0.007
Chassi +Rwin	Cd	0.450	0.405
	Cl	-0.699	-0.600

#### 4.2.3 08

Po vyzkoušení verze 06 jsem přemýšlel o variantě vedoucí vzduch do boků. Nakonec jsem ji vytvořil ve formě klínu přímo za řidičem. Ten nemůže být zarovnan do výše horní hrany monokoku, protože je pod ním umístěna nádoba na stlačený vzduch, která hranu monokoku přesahuje. Volím zvednutí klínu o 50 mm nad hranu monokoku a úhel 11°, který by měl dostatečně odstínit sání. (Obrázek 27 a 28)



Obrázek 27: Simulace 08 Standard – Pohled z boku



Obrázek 28: Simulace 08 Standard – Pohled shora

Výsledky (Tabulka 8) ukazují správný směr. Tato simulace výrazně zvýšila přítlak a nepatrně zvýšila odpor, ale to může být v řádech nepřesnosti simulace.

Po „úspěchu“ této verze jsem se rozhodl zjistit, jak se projevují jednotlivé parametry, a proto jsem se rozhodl u verzí 09, 10, 11 a 12 měnit výšku anebo úhel klínu. Verzi 08 jsem si pojmenoval Standard.

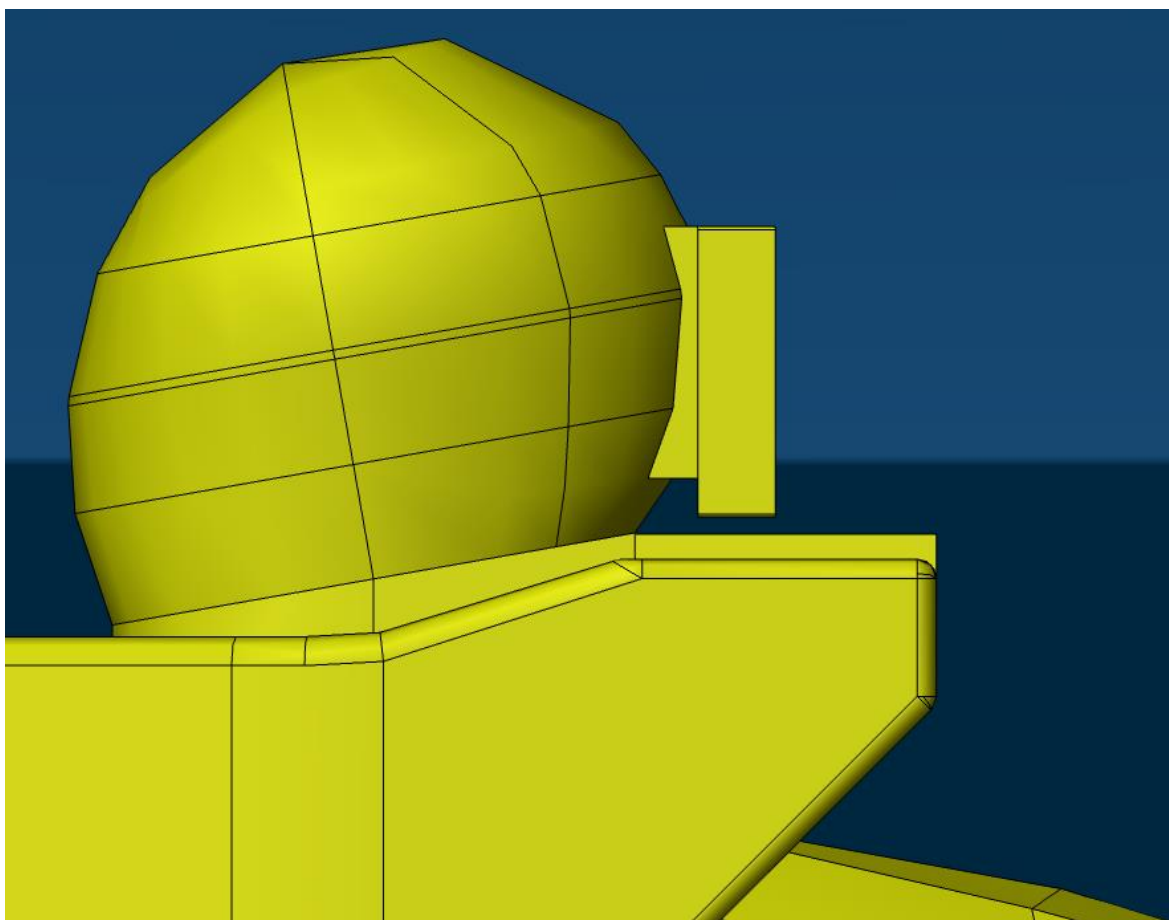
Tab.8 – Simulace 08

Sim		K2	07	08
g00	Cd	0.694	0.640	0.697
	Cl	-1.513	-1.419	-1.550
g0_ch assi	Cd	0.102	0.136	0.097
	Cl	-0.041	-0.068	-0.039
g11_r _wing	Cd	0.328	0.261	0.334
	Cl	-0.677	-0.539	-0.691
g2_int ake	Cd	0.020	0.008	0.020
	Cl	0.019	0.007	0.014
Chassi +Rwin	Cd	0.450	0.405	0.451
	Cl	-0.699	-0.600	-0.717

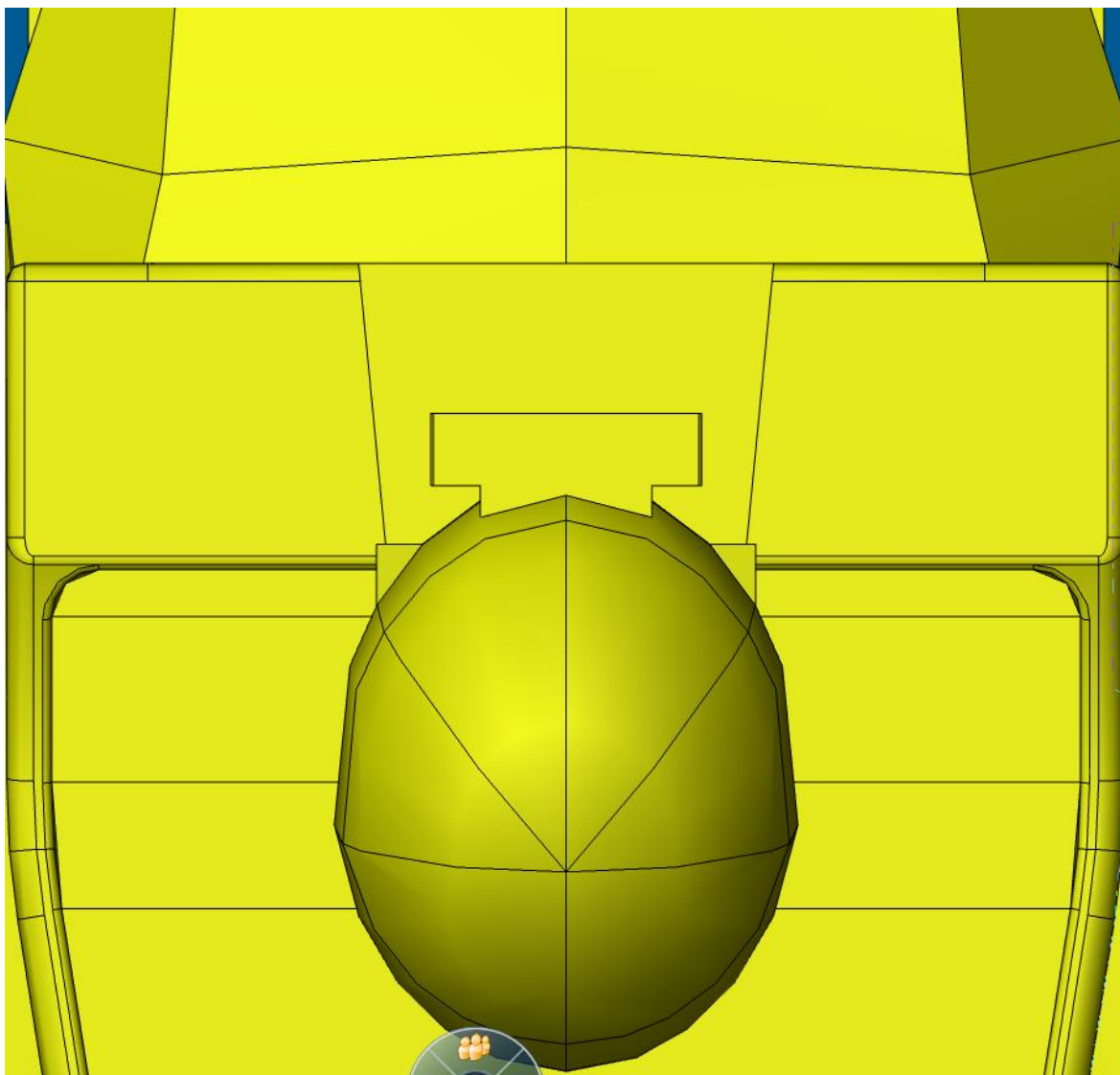


4.2.4 09

Nízká – klín vysoký 13 mm, níže se kvůli nádobě na vzduch nedostanu. Úhel zůstává 11°.  
(Obrázek 29 a 30)



*Obrázek 29: Simulace 09 Nízká – Pohled z boku*



Obrázek 30: Simulace 09 Nízká – Pohled shora

Oproti 08 je pro celé auto mírně horší, ale pro chassi+Rwing+Intake vychází nejlépe na přítlak a druhá nejlepší na odpor. Snížení se ukazuje jako správný směr. (Tabulka 9)

Tab.9 – Simulace 09

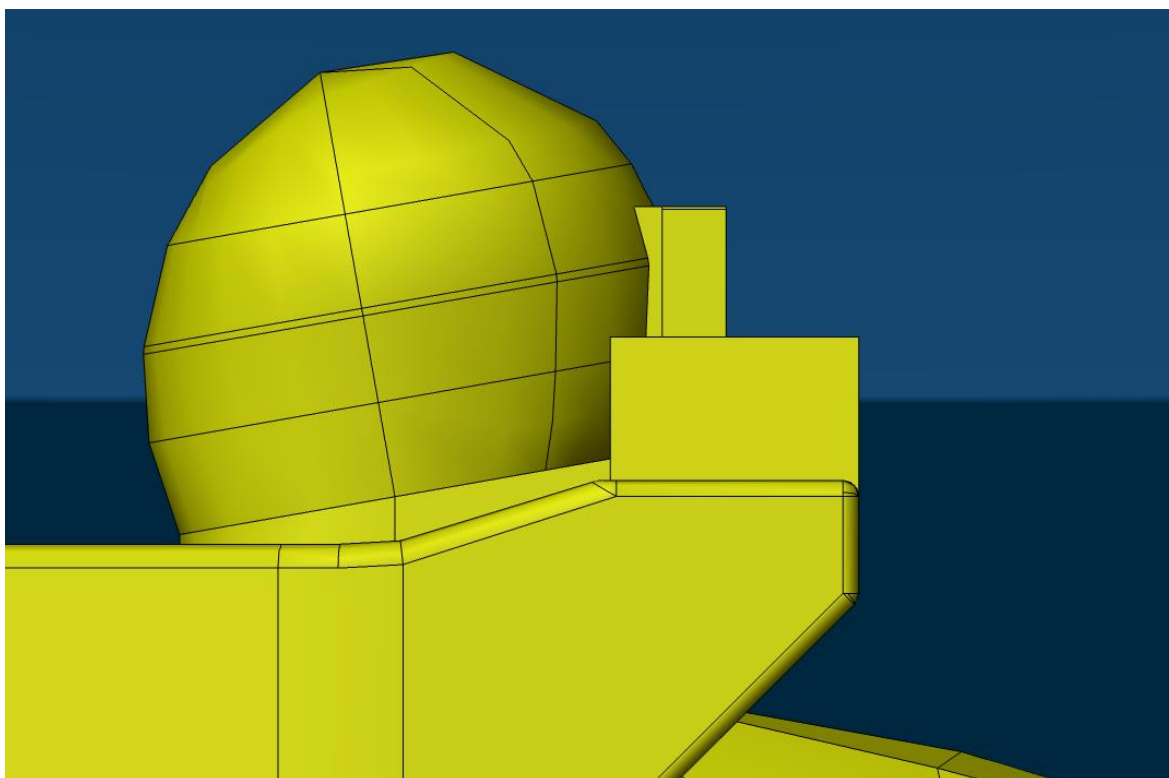
Sim		K2	07	09
g00	Cd	0.694	0.640	0.696
	Cl	-1.513	-1.419	-1.546
g0_ch assi	Cd	0.102	0.136	0.097
	Cl	-0.041	-0.068	-0.040
g11_r _wing	Cd	0.328	0.261	0.334
	Cl	-0.677	-0.539	-0.694
g2_int ake	Cd	0.020	0.008	0.020
	Cl	0.019	0.007	0.015
Chassi +Rwin	Cd	0.450	0.405	0.451
	Cl	-0.699	-0.600	-0.719



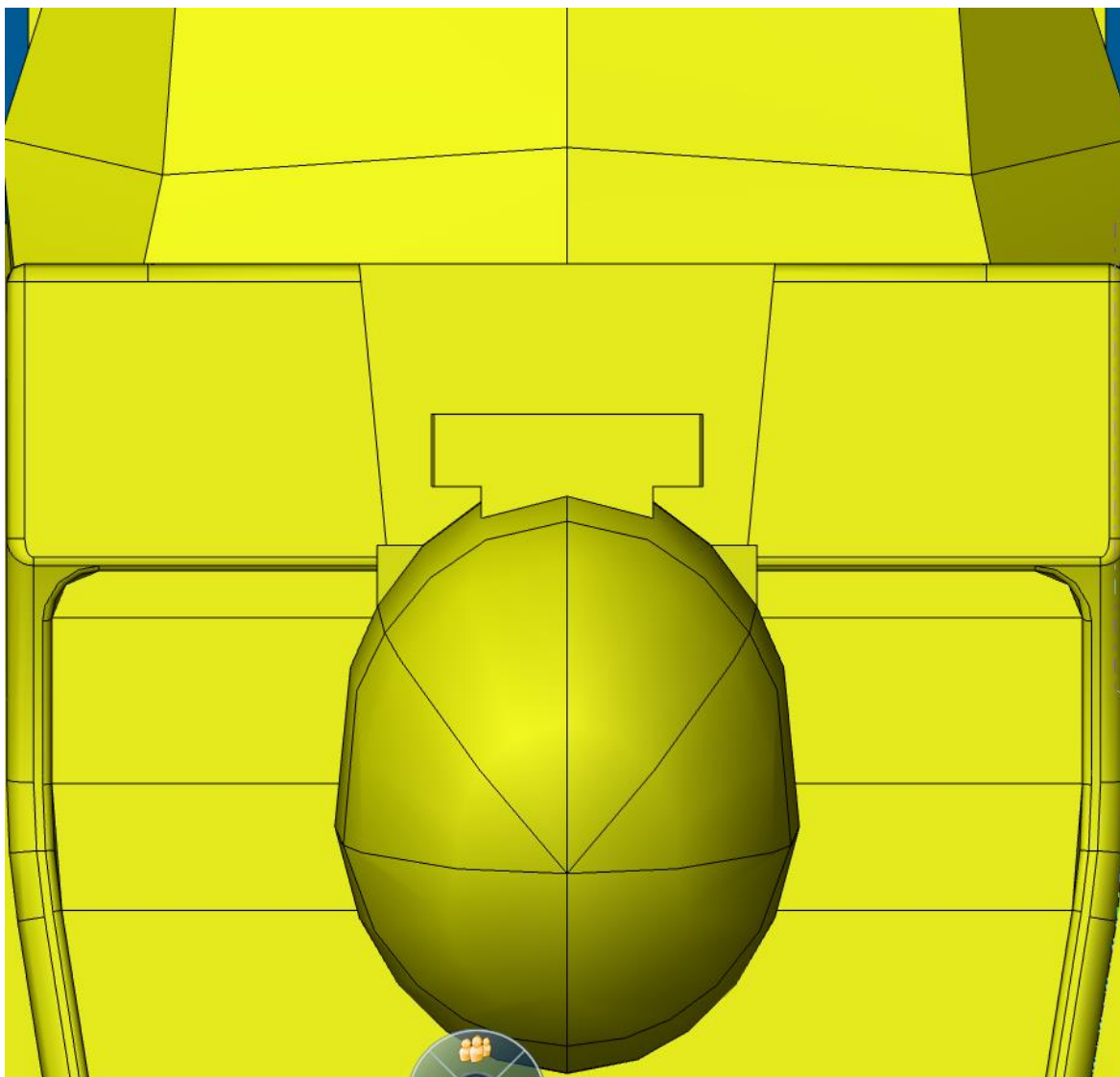


4.2.5 10

Vysoká – klín vysoký 90 mm, úhel zůstává 11°. (Obrázek 31 a 32)



*Obrázek 31: Simulace 10 Vysoká – Pohled z boku*



Obrázek 32: Simulace 10 Vysoká – Pohled shora

Z verzí 08, 09, 10, 11 a 12 má tato nejmenší odpor, ale také citelně nižší přítlak, jelikož zasahuje i do zadního křídla. Zvyšovat klín není správná cesta. (Tabulka 10)

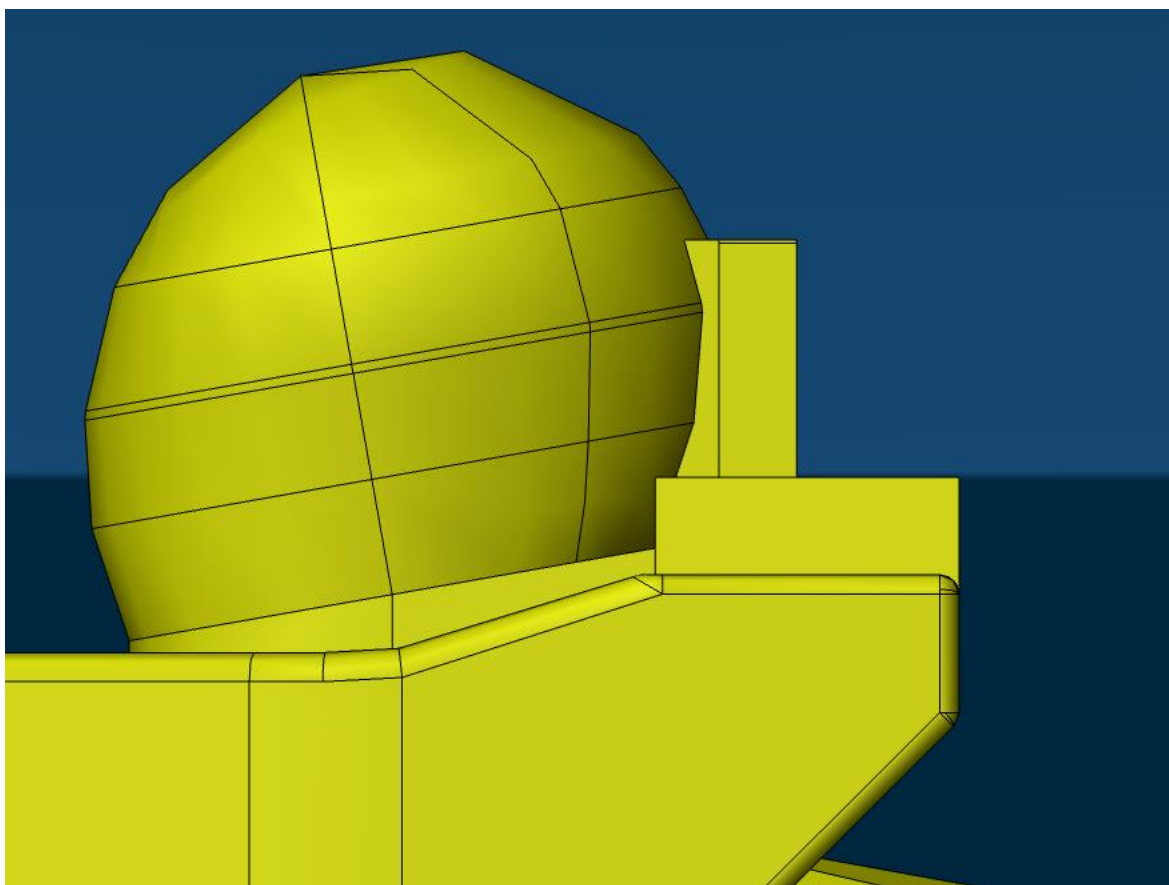
Tab.10 – Simulace 10

Sim		K2	07	10
g00	Cd	0.694	0.640	0.693
	Cl	-1.513	-1.419	-1.534
g0_ch assi	Cd	0.102	0.136	0.099
	Cl	-0.041	-0.068	-0.037
g11_r _wing	Cd	0.328	0.261	0.328
	Cl	-0.677	-0.539	-0.686
g2_int ake	Cd	0.020	0.008	0.021
	Cl	0.019	0.007	0.014
Chassi +Rwin	Cd	0.450	0.405	0.448
	Cl	-0.699	-0.600	-0.709

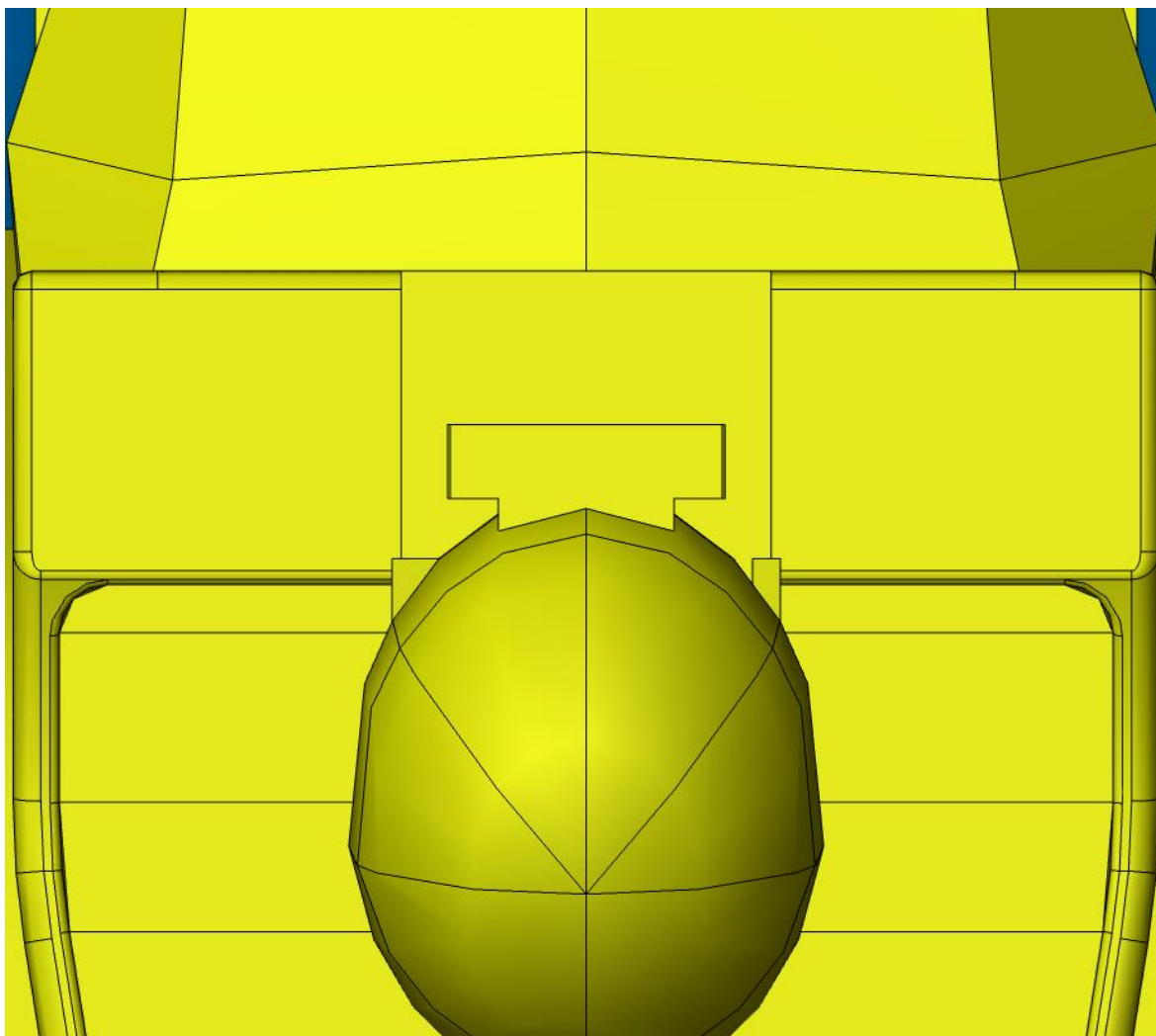


4.2.6 11

Úzká – klín vysoký 50 mm, úhel má 0°. (Obrázek 33 a 34)



*Obrázek 33: Simulace 11 Úzká – Pohled z boku*



Obrázek 34: Simulace 11 Úzká – Pohled shora

Tato verze není nikde z hlediska aerodynamiky nejlepší, ale ve všech oblastech jen lehce zaostává a v celkových počtech se liší nejvíce o tři tisíce. Navíc představuje nejjednodušší možnost z hlediska výroby. Určitě s ní budu dále pracovat. (Tabulka 11)

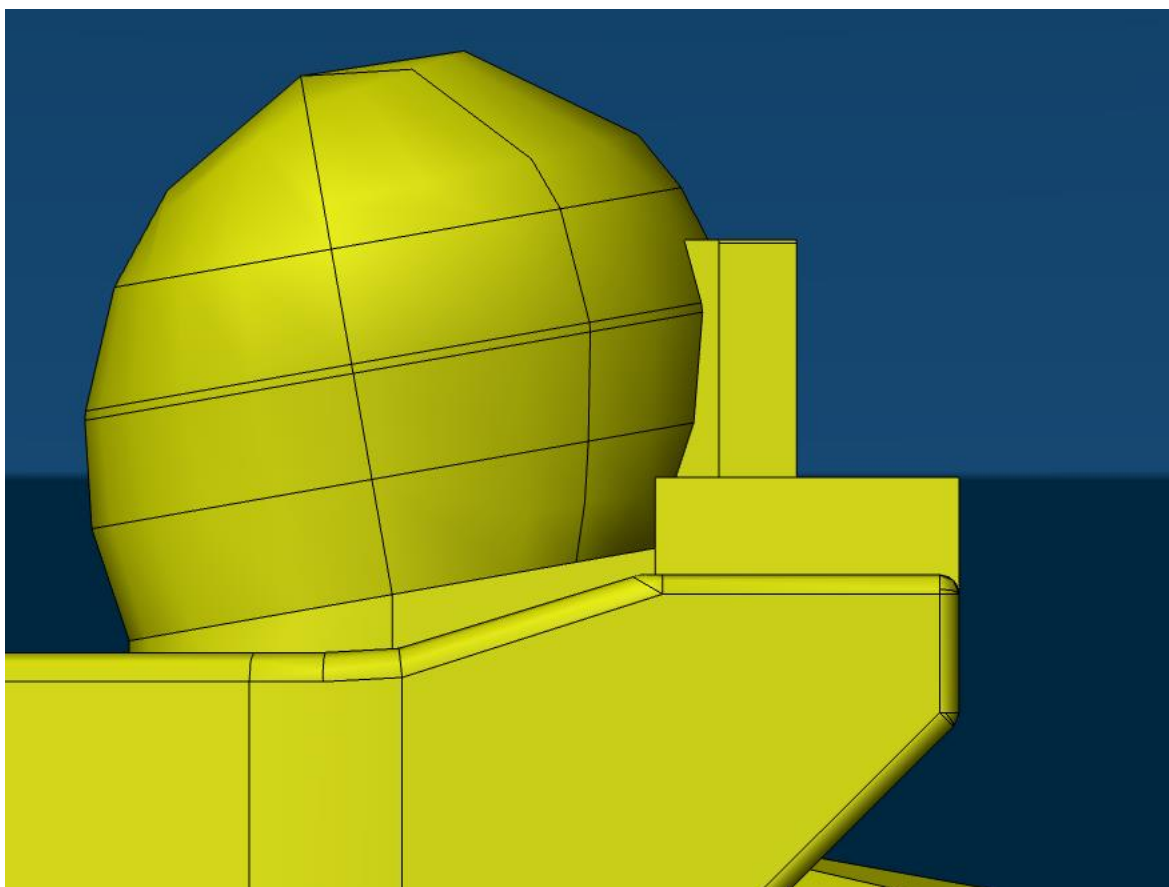
Tab.11 – Simulace 11

Sim		K2	07	11
g00	Cd	0.694	0.640	0.697
	Cl	-1.513	-1.419	-1.543
g0_ch assi	Cd	0.102	0.136	0.097
	Cl	-0.041	-0.068	-0.036
g11_r _wing	Cd	0.328	0.261	0.334
	Cl	-0.677	-0.539	-0.692
g2_int ake	Cd	0.020	0.008	0.021
	Cl	0.019	0.007	0.012
Chassi +Rwin	Cd	0.450	0.405	0.452
	Cl	-0.699	-0.600	-0.716

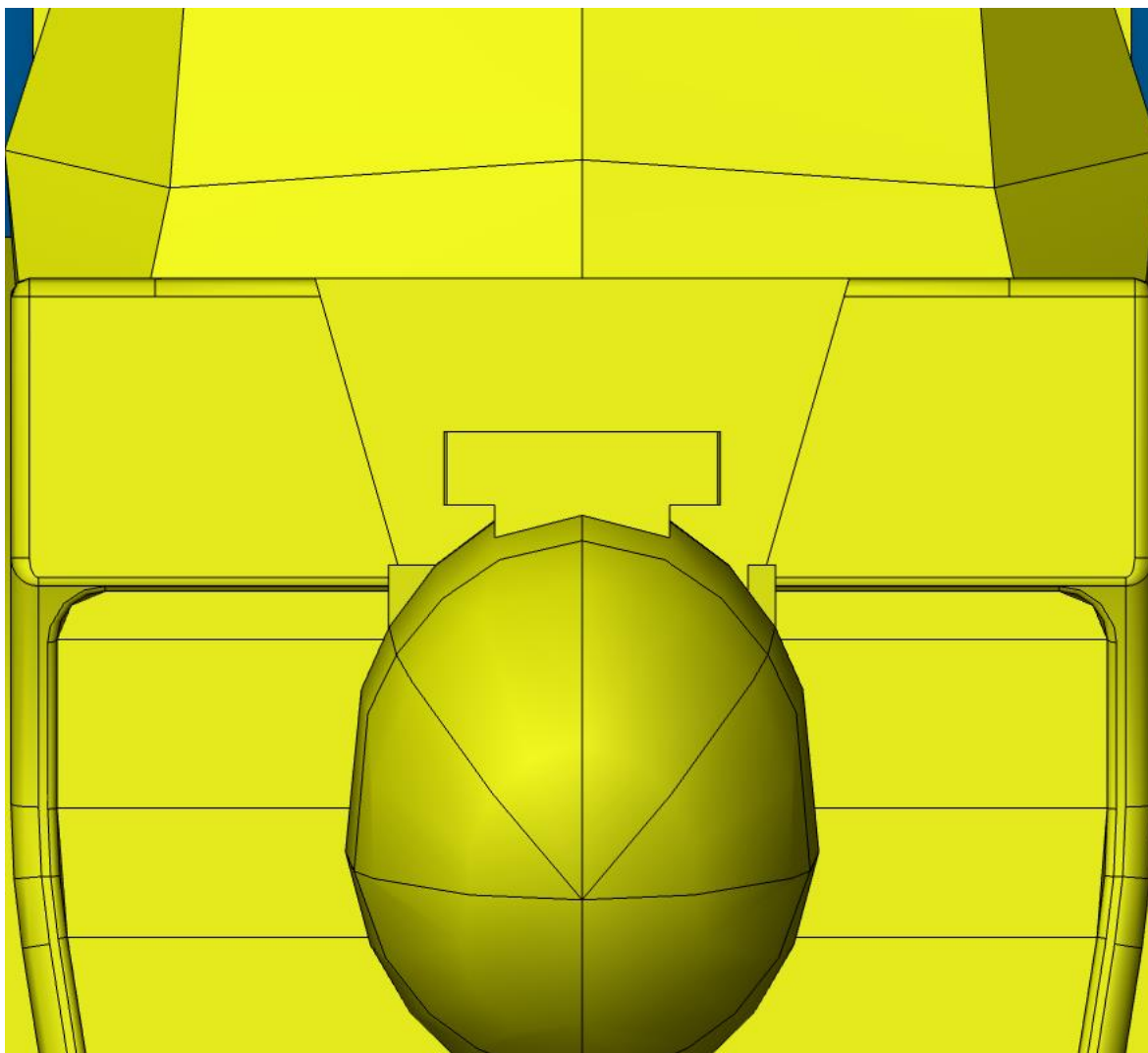


4.2.7 12

Široká – klín vysoký 50 mm, úhel má 32°. (Obrázek 35 a 36)



*Obrázek 35: Simulace 12 Široká – Pohled z boku*



Obrázek 36: Simulace 12 Široká – Pohled shora

Tato verze nemá kromě výrazného odstínění sání výrazně lepší nebo alespoň srovnatelné výsledky jako předchozí verze, rozšiřování tedy není správný směr. (Tabulka 12)

Tab.12 – Simulace 12

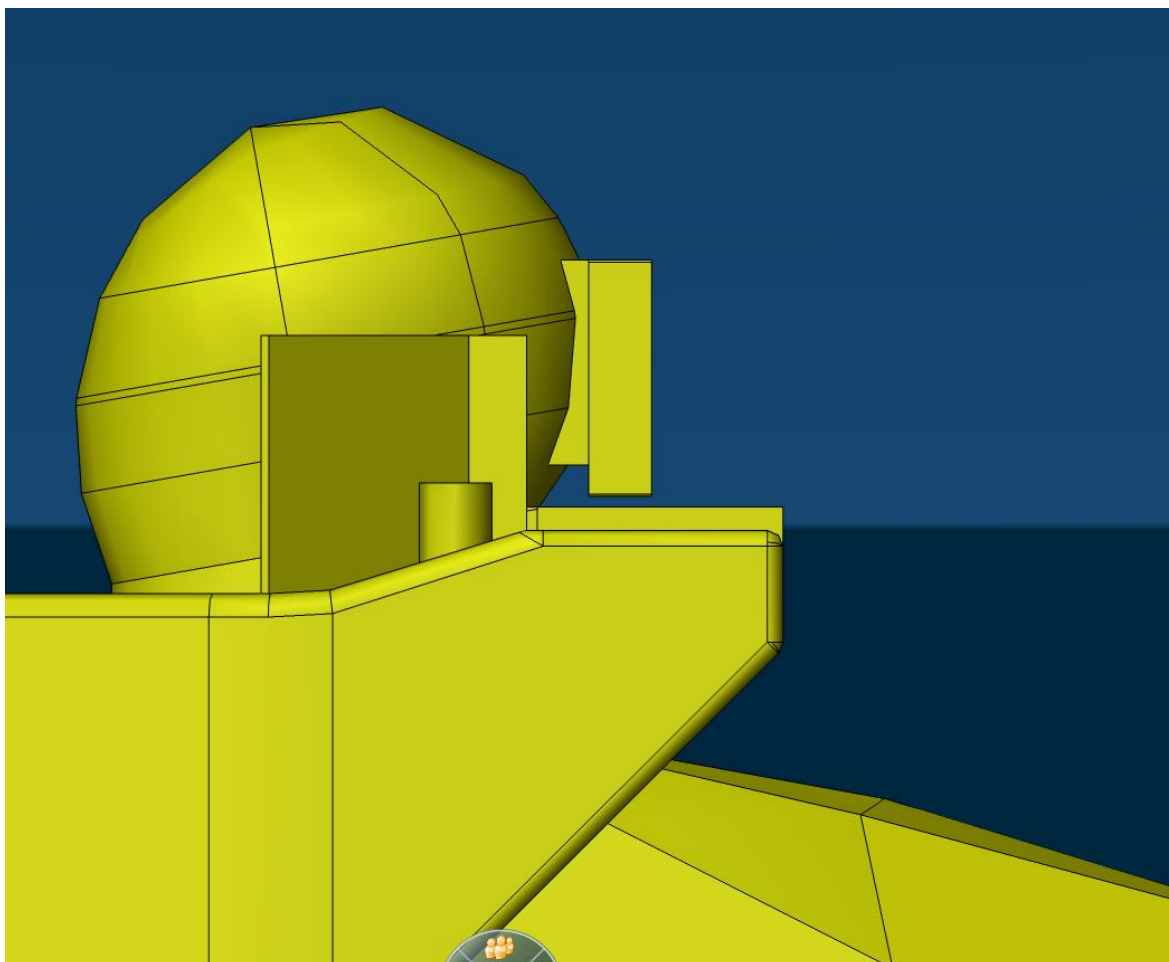
Sim		K2	07	12
g00	Cd	0.694	0.640	0.697
	Cl	-1.513	-1.419	-1.529
g0_ch assi	Cd	0.102	0.136	0.103
	Cl	-0.041	-0.068	-0.034
g11_r _wing	Cd	0.328	0.261	0.334
	Cl	-0.677	-0.539	-0.688
g2_int ake	Cd	0.020	0.008	0.014
	Cl	0.019	0.007	0.012
Chassi +Rwin	Cd	0.450	0.405	0.451
	Cl	-0.699	-0.600	-0.710



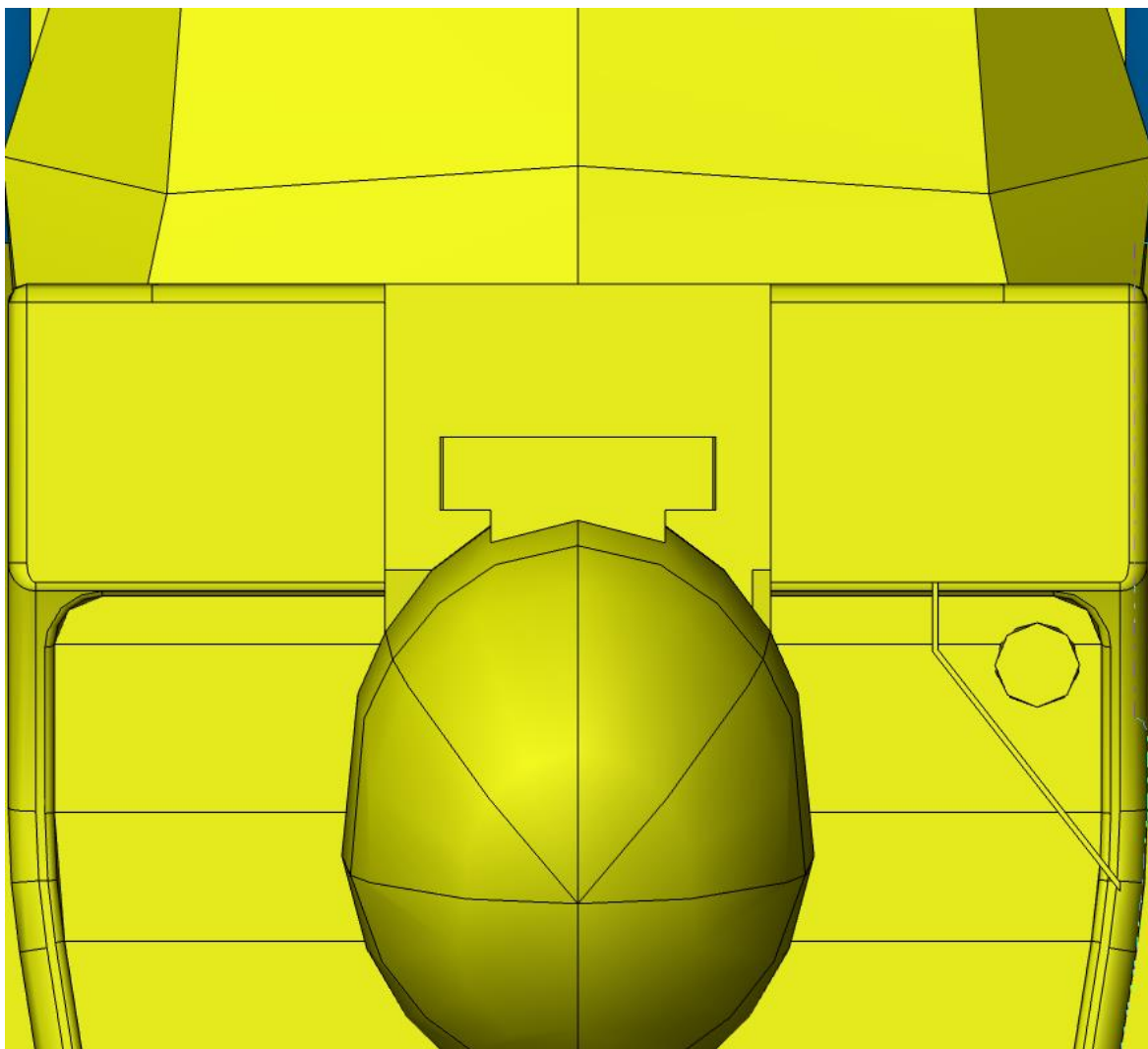
#### 4.2.8 13

Nízká + úzká + FHF – klín vysoký 13 mm, úhel 0°, FHF – kombinace 09 + 11 + FHF. (Obrázek 37 a 38)

Protože vyšly poměrně dobře tři verze – standard, nízká a úzká – rozhodnul jsem se nízkou spojit z úzkou a dále pokračovat se dvěma, a po připojení FHF z přímého srovnání rozhodnout, která je výhodnější.



Obrázek 37: Simulace 13 Nízká + Úzká + FHF – Pohled z boku



Obrázek 38: Simulace 13 Nízká + Úzká + FHF – Pohled shora

Verze nízká + úzká + FHF snižuje odpor i přítlak oproti K2, ale oproti 07 zvyšuje odpor i přítlak. Oproti 14 má sice lehce větší odpor o 0.003, ale vyšší přítlak o 0.022, což je podstatnější. (Tabulka 13)

Tab.13 – Simulace 13

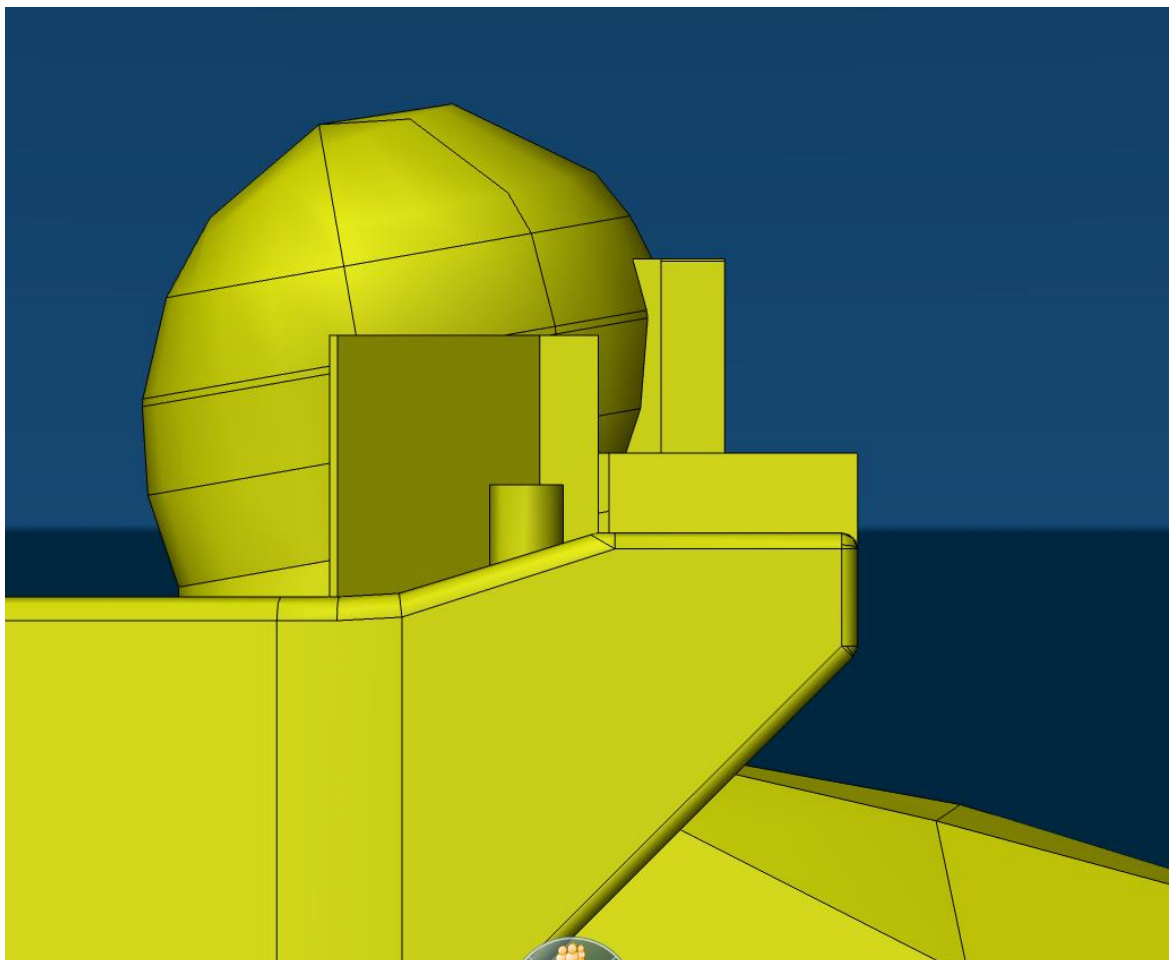
Sim		K2	07	13
g00	Cd	0.694	0.640	0.671
	Cl	-1.513	-1.419	-1.490
g0_ch assi	Cd	0.102	0.136	0.115
	Cl	-0.041	-0.068	-0.056
g11_r _wing	Cd	0.328	0.261	0.304
	Cl	-0.677	-0.539	-0.619
g2_int ake	Cd	0.020	0.008	0.013
	Cl	0.019	0.007	0.006
Chassi +Rwin	Cd	0.450	0.405	0.432
	Cl	-0.699	-0.600	-0.669



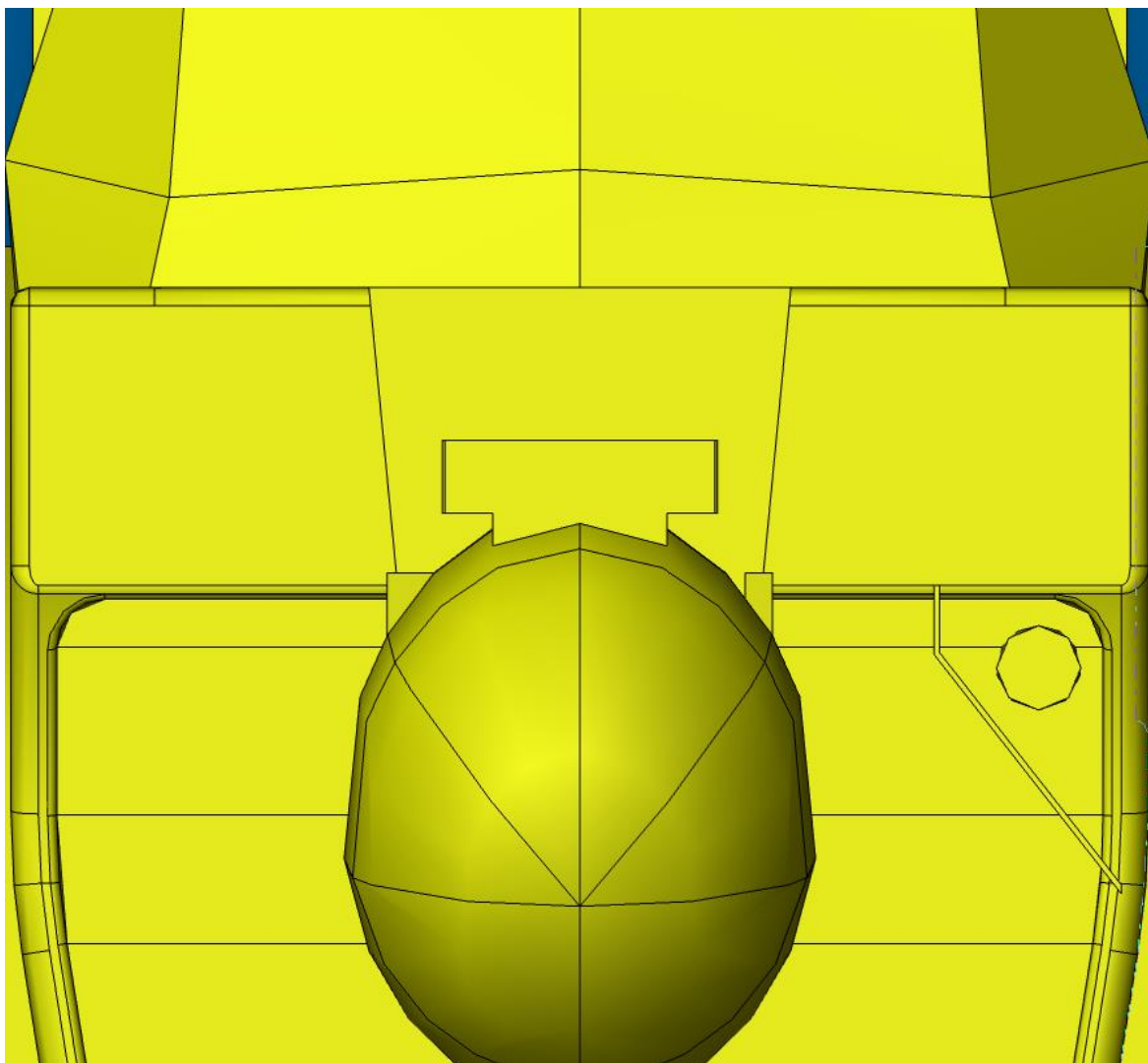


4.2.9 14

Standard + FHF – klín vysoký 50 mm, úhel 11°, FHF – kombinace 08 + FHF. (Obrázek 39 a 40)



*Obrázek 39: Simulace 14 Standard + FHF – Pohled z boku*



Obrázek 40: Simulace 14 Standard + FHF – Pohled shora

Tato verze má oproti verzi 13 menší celkový odpor o 0.003, ale také má přítlak nižší o 0.022, což je neakceptovatelné. (Tabulka 14)

Tab.14 – Simulace 14

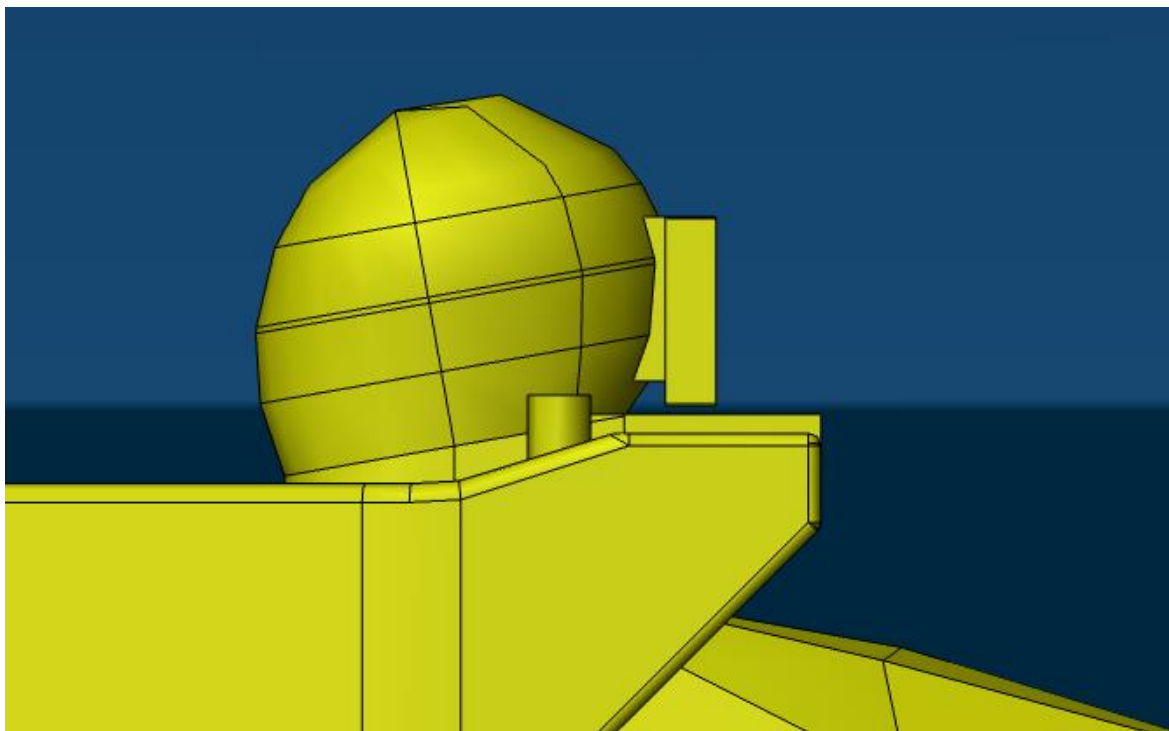
Sim		K2	07	14
g00	Cd	0.694	0.640	0.668
	Cl	-1.513	-1.419	-1.468
g0_ch assi	Cd	0.102	0.136	0.118
	Cl	-0.041	-0.068	-0.050
g11_r _wing	Cd	0.328	0.261	0.299
	Cl	-0.677	-0.539	-0.611
g2_int ake	Cd	0.020	0.008	0.012
	Cl	0.019	0.007	0.006
Chassi +Rwin	Cd	0.450	0.405	0.429
	Cl	-0.699	-0.600	-0.655



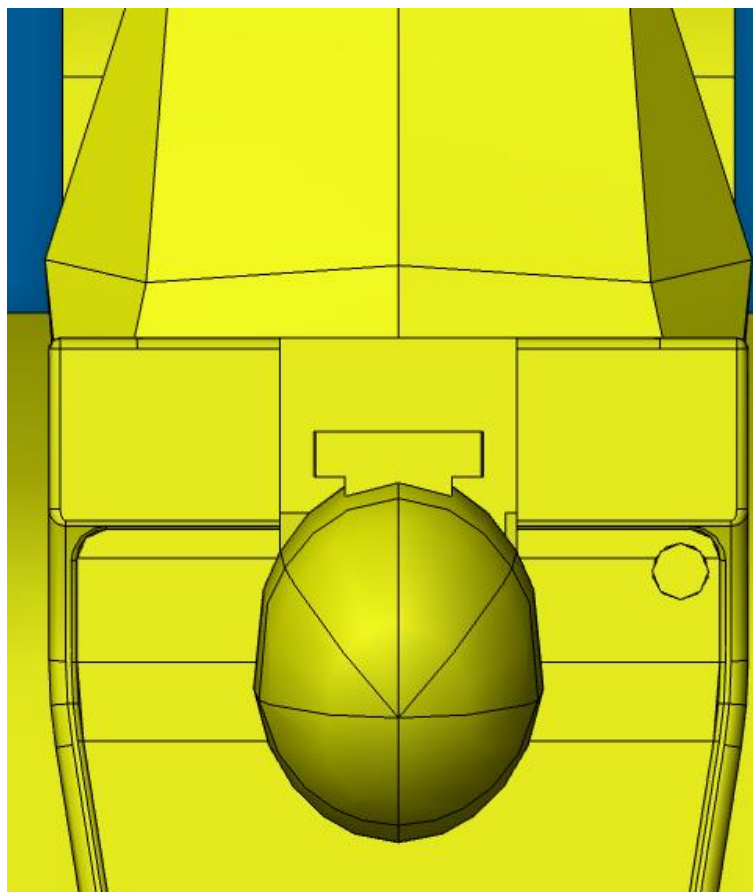
#### 4.2.10 15

Nízká + úzká + minimální FHF – klín vysoký 13 mm, úhel 0°, minimální FHF – kombinace 09 + 11 + minimální FHF

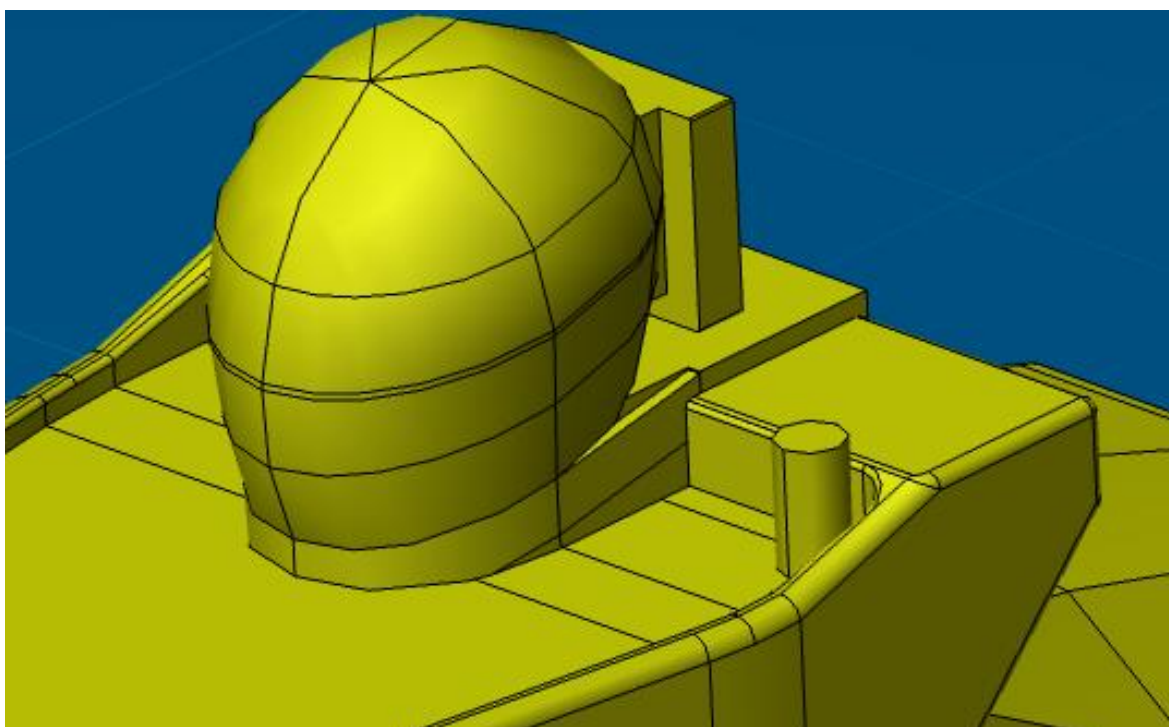
Po úvaze o provedení FHF docházím ke zjištění, že by stačilo, kdyby bylo hrdlo nádrže jen obmotáno nebo zakryto. Modeluji tedy válec vystupující z monokoku s o 10 mm větším průměrem, než má hrdlo nádrže, a přidávám ho místo FHF ve verzi 13. (Obrázek 41, 42 a 43)



Obrázek 41: Simulace 15 Nízká + Úzká + minFHF – Pohled z boku



Obrázek 42: Simulace 15 Nízká + Úzká + minFHF – Pohled shora



Obrázek 43: Simulace 15 Nízká + Úzká + minFHF – Celkový pohled

Tato verze se výsledky (Tabulka 15) více blíží verzím bez hrdla nádrže. Přestože je varianta 15 méně aerodynamicky efektivní než varianta 13, má více přtlaku a pozitivní rozdíl na



zadním křídle je důležitější než negativní na chassi, kde může být přínos verze 13 diskutabilní.

Tab.15 – Simulace 15

Sim		K2	07	15
g00	Cd	0.694	0.640	0.695
	Cl	-1.513	-1.419	-1.525
g0_ch assi	Cd	0.102	0.136	0.098
	Cl	-0.041	-0.068	-0.032
g11_r _wing	Cd	0.328	0.261	0.331
	Cl	-0.677	-0.539	-0.694
g2_int ake	Cd	0.020	0.008	0.021
	Cl	0.019	0.007	0.017
Chassi +Rwin	Cd	0.450	0.405	0.450
	Cl	-0.699	-0.600	-0.709

#### 4.2.11 Firewall – závěr

Protože simulujeme pouze jednu polovinu auta, bude finální varianta kombinací několik verzí. Na pravé straně auta by se měla objevit kombinace verze 09 a 11, na levé by měla být umístěna varianta 15. Abych ukončil tuto část s tabulkou srovnávající stavy před a po mé práci, rozhodl jsem se výsledné hodnoty pro finální verzi „Final“ zprůměrovat z jednotlivých verzí, z nichž se skládá. (Tabulka 16 a 17)

Tab.16 – Celková tabulka srovnávající firewally a konstrukční stavy

Sim		K2	06 Oblý	07 FS.11	08 Stand ard	09 Nízká	10 Vysok á	11 Úzká	12 Široká	13	14	15	Final (09+1 1/15)
g00	Cd	0.694	0.674	0.640	0.697	0.696	0.693	0.697	0.697	0.671	0.668	0.695	0.696
	Cl	-1.513	-1.501	-1.419	-1.550	-1.546	-1.534	-1.543	-1.529	-1.490	-1.468	-1.525	-1.535
g0_ch assi	Cd	0.102	0.101	0.136	0.097	0.097	0.099	0.097	0.103	0.115	0.118	0.098	0.098
	Cl	-0.041	-0.053	-0.068	-0.039	-0.040	-0.037	-0.036	-0.034	-0.056	-0.050	-0.032	-0.035
g11_r _wing	Cd	0.328	0.317	0.261	0.334	0.334	0.328	0.334	0.334	0.304	0.299	0.331	0.333
	Cl	-0.677	-0.631	-0.539	-0.691	-0.694	-0.686	-0.692	-0.688	-0.619	-0.611	-0.694	-0.694
g2_int ake	Cd	0.020	0.011	0.008	0.020	0.020	0.021	0.021	0.014	0.013	0.012	0.021	0.021
	Cl	0.019	0.009	0.007	0.014	0.015	0.014	0.012	0.012	0.006	0.006	0.017	0.015
Chassi +Rwin g+Inta	Cd	0.450	0.429	0.405	0.451	0.451	0.448	0.452	0.451	0.432	0.429	0.450	0.451
	Cl	-0.699	-0.675	-0.600	-0.717	-0.719	-0.709	-0.716	-0.710	-0.669	-0.655	-0.709	-0.713



Tab.17 – Výsledná tabulka porovnávající porovnatelné verze vůči sobě včetně rozdílů

Sim		K2	09	07	Final
g00	Cd	0.694	0.696	0.640	0.696
	Cl	-1.513	-1.546	-1.419	-1.535
dCd [-]	dCd [%]	0.002	0.3	0.056	8.4
dCl [-]	dCl [%]	-0.033	2.2	-0.116	7.9



## 5 Budoucí práce

### 5.1 „Komplikovaná“ verze

Jak je patrné ze závěrů simulací krytu motoru, nejdůležitější první úkol na příští sezonu bude vytvoření podrobně vymodelované verze zadní části (včetně rámu, motoru, poloos, diferenciály a jiných částí), u níž nebude vadit delší čas simulace, a pozdější vytvoření méně podrobné, ale dostatečně přesné a časově méně náročné verze, která by se mohla dostat do konstrukčního stavu.

### 5.2 Výraznější propojení

Firewall jsem tento rok navrhoval i s ohledem na jednoduchou výrobu. Nepouštěl jsem se do žádných složitých tvarů, ale naopak jsem se snažil vytvořit pravoúhlý tvar výrobitelný bez použití nákladných forem. Při výrobě bych buď jen ohýbal plech nebo laminoval uhlík na rovinné desce a jednotlivé díly pospojoval.

Pokud by se tento rok vyrábělo auto, řešil bych v této práci podrobněji i výrobu, způsoby uchycení a jiné konstrukční otázky, ale to se vzhledem k pandemii Covid-19 nekoná.

Pokud by „komplikovaná“ verze ukázala kryt motoru jako opodstatnitelný prvek, jehož přítomnost přináší nesporné výhody a pomáhá auto zrychlit, pokusil bych se vývoj firewallu a krytu motoru více propojit, aby fungovaly společně a aby ideálně byly vyrobeny jako jeden kus.

Zároveň jsem si vědom, že kryt motoru může přinést i problémy s chlazením nebo při výrobě, takže je ve hře i částečné zakrytí boků nebo propojení s podlahou či sidepodem jen v přední části.

### 5.3 Jiné sání

Je mi jasné, že s monokokem, motorem nebo rámem se bude hýbat velmi těžko, ale změnit pozici nebo tvar sání by nemuselo být nereálné, a mohlo by to přinést další pozitivní důsledky z hlediska aerodynamiky.

Pokud se podíváme na foto XX týmu Rennteam, uvidíme, jak kryt motoru přímo navazuje na sání, které je přitisknuté na monokok a řidiče. Tento krok ale není jednoduchý a jeho aplikace jistě zabere více než jednu sezonu.



## 6 Závěr

V této práci shrnuji poznatky, které jsem získal při zkoumání, optimalizování a simulování zadní části vozu Formula Student. Přestože se mé myšlenky nejdříve ubíraly k návrhu krytu motoru, výsledky neprokázaly jeho přínos, věnoval jsem se dále samotnému firewallu. Je otázkou, nakolik jsou tyto výsledky ovlivněny zjednodušením zadní části vozidla v CFD modelu, to se pokusím zjistit v dalším bádání. Pro tuto práci jsem raději věnoval čas a energii konceptu aerodynamického firewallu, který jsem dotáhl do konce vybráním nejuvhodnější varianty (09+11/15) (Obrázek 29, 30, 33, 34, 41, 42 a 43) s prokazatelným zlepšením oproti výchozímu porovnatelnému stavu (07) (Obrázek 24, 25 a 26) i konstrukčnímu stavu K2. (Tabulka 17)





## 7 Seznam použité literatury

- [1] KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: designing for speed. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 0837601428
- [2] Formula Student Germany. FSG Rules & Important Documents [Online]. FSG, cit. Dostupné z <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>
- [3] Wikipedia, The Free Encyclopedia. Aerodynamika [online]. Wikipedia. Poslední změna 5. 6. 2020, cit. [23. 5. 2020]. Dostupné z <https://cs.wikipedia.org/wiki/Aerodynamika>
- [4] Volek, Otakar. Návrh a aerodynamika bočního krytu na vozidle Formula Student. Bakalářská práce, Praha, 2019.
- [5] Obrázek profilů. In Schultzeengineering.us [online]. 23. 5. 2020 cit. [20. 6. 2020]. Dostupné z <https://www.schultzeengineering.us/aero.htm>
- [6] Rennteam. In Facebook.com [online]. 23. 5. 2020 cit. [20. 6. 2020]. Dostupné z <https://www.facebook.com/RennteamUniStuttgart/photos/a.310738565765/10156213396005766/?type=3&theater>
- [7] Rennstall. In Facebook.com [online]. 23. 5. 2020 cit. [20. 6. 2020]. Dostupné z <https://www.facebook.com/Rennstall.Esslingen/photos/a.1468930726496451/2488801421176038/?type=3&theater>
- [8] UPBracing. In Instagram.com [online]. 12. 9. 2019 cit. [20. 6. 2020]. Aktuálně nedostupné
- [9] eForce. In int.eforce.cvut.cz [online]. 23. 5. 2020 cit. [20. 6. 2020]. Dostupné z <https://int.eforce.cvut.cz/en/car/fse03-info>