

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Pavel STRÁNSKÝ
Osobní číslo: S11B0385P
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: Konstrukce průmyslové techniky
Název tématu: Aerodynamické prvky sportovních automobilů
Zadávací katedra: Katedra konstruování strojů

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

Základní požadavky:

Úkolem práce je provést rešerši prvků pro zvýšení aerodynamického přitlaku sportovních vozů a prvků pro snížení odporu. Získané poznatky aplikovat na stávající řešení studentské formule SAE. Práce bude obsahovat základní výpočty.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Rešerše aerodynamických prvků v automobilovém sportu
2. Rešerše aerodynamických prvků formule
3. Vlastní návrh vybraných částí aerodynamických prvků u formule SAE

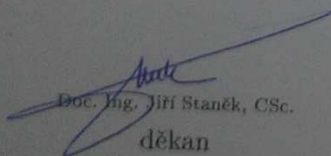
Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 30-40 stran A4
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

WRIGHT, P. *Formula 1 technology*. Warrendale: SAE International, 2001

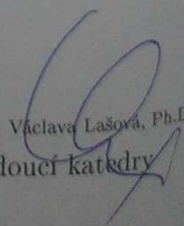
Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Eva Krónerová, Ph.D.
Katedra konstruování strojů
Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Barták
KKS

Datum zadání bakalářské práce: 19. září 2011
Termín odevzdání bakalářské práce: 25. května 2012


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




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

V Plzni dne 19. září 2011

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2341 Strojírenství
Studijní zaměření: Konstrukce průmyslové techniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Aerodynamické prvky sportovních automobilů

Autor: **Pavel Stránský**

Vedoucí práce: **Ing. Eva Krónerová, Ph.D.**

Akademický rok 2011/2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
F A K U L T A S T R O J N Í

Katedra konstruování strojů

Akad. rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Pavel Stránský**
Osobní číslo: **S11B0385P**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **Konstrukce průmyslové techniky**
Název tématu: **Aerodynamické prvky sportovních automobilů**
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

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

Základní požadavky:

Úkolem práce je provést rešerši prvků pro zvýšení aerodynamického přítlaku sportovních vozů a prvků pro snížení odporu. Získané poznatky aplikovat na stávající řešení studentské formule SAE. Práce bude obsahovat základní výpočty.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Rešerše aerodynamických prvků v automobilovém sportu
2. Rešerše aerodynamických prvků formule
3. Vlastní návrh vybraných částí aerodynamických prvků u formule SAE

Rozsah bakalářské práce:

- a) **textová část:** **30-40 stran formátu A4**
b) **grafická část** **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná a elektronická (CD)**

Doporučená literatura:

WRIGHT, P., *Formula 1 Technology*. Warrendale: SAE International, 2001

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

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Eva KRÓNEROVÁ, Ph.D.
Katedra konstruování strojů

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Jiří BARTÁK
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce:

19. září 2011

Termín odevzdání bakalářské práce:

25. května 2012

Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan

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

V Plzni dne: 19. září 2011

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucí bakalářské práce Ing. Evě Krónerové, Ph.D., za cenné rady a připomínky.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení STRÁNSKÝ	Jméno Pavel	
STUDIJNÍ OBOR	Konstrukce průmyslové techniky		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. KRÓNEROVÁ, Ph.D.	Jméno Eva	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Aerodynamické prvky sportovních automobilů		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2012
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	47	TEXTOVÁ ČÁST	44	GRAFICKÁ ČÁST	3
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	---

ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Tématem této práce jsou aerodynamické prvky sportovních automobilů. Prvním cílem této práce je seznámit čtenáře se základními principy aerodynamiky a poskytnout stručný a jasný přehled o základních pojmech a vzorcích. Druhým cílem je ukázat několik typů sportovních automobilů a jejich aerodynamické prvky. Posledním cílem je navrhnout funkční uchycení zadního přítláčného křídla podle vlastních znalostí a zkušeností z oboru strojírenství, a to ve zvoleném softwaru.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	aerodynamika, aerodynamický odpor, aerodynamický vztlak, boční síly, proudění vzduchu

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname STRÁNSKÝ	Name Pavel	
FIELD OF STUDY	Design of Manufacturing Machines		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. KRÓNEROVÁ, Ph.D.	Name Eva	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Aerodynamic elements of sports cars		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2012
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	47	TEXT PART	44	GRAPHICAL PART	3
BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The theme of this work is the aerodynamic elements of sports cars. The first objective of this work is to introduce the basic principles of aerodynamics and provide a brief and clear overview of basic concepts and formulas. The second objective is to show several types of sports cars and aerodynamic elements. The last objective is to design a functional rear Wing attachment according to their own knowledge and experience in engineering, in the selected software.</p>				
KEY WORDS	<p>aerodynamics, aerodynamic drag , aerodynamic lift , side force, the air flow</p>				

Obsah

Obsah.....	7
Úvod	9
Seznam zkratk.....	10
1. Teorie.....	11
1.1. Aerodynamický tunel.....	12
1.2. Druhy proudění	12
1.2.1. Přilnuté a odtržené proudění	13
1.2.2. Lamelární a turbulentní proudění	13
1.2.3. Reynoldsovo číslo	14
1.2.4. Bernoulliho rovnice	14
1.3. Vztlak, odpor a boční síly.....	15
2. Aerodynamické prvky sportovních vozů	17
2.1. Cestovní vozy.....	17
2.2. Vozy se zakapotovanými koly-prototypy	19
2.3. Závodní vozy s nezakapotovanými koly	20
3. Aerodynamické prvky vozů Formule 1	22
3.1. Přední přítláčné křídlo	23
3.2. Podvozek a karoserie.....	24
3.3. Zadní přítláčné křídlo.....	26
4. Praktická část.....	29
4.1. Návrh uchycení přítláčného křídla.....	32
4.1.1. Zadání	32
4.1.2. Cíl práce	32
4.1.3. Materiálové charakteristiky.....	32
4.1.4. Konstrukce součástí.....	33
5. Způsob uchycení a simulace zatížení.....	34
5.1. Uchycení	34
5.2. Simulace zatížení	35
5.2.1. Zatížení ze shora	35
5.2.3. Zatížení na kraj křídla.....	37

6.	Dimenzování.....	38
6.1.	Varianta A.....	38
6.1.1.	Napětí a posunutí při působení síly v ose y.....	38
6.1.2.	Napětí a posunutí při působení síly v ose z (při akceleraci)	40
6.1.3.	Napětí a posunutí při zatížení v ose – z (při brzdění)	42
6.1.4.	Napětí a posunutí při zatížení v ose y na rameni o velikosti 500 mm	44
6.1.5.	Tabulka výsledků	46
7.	Změna geometrie a typu uchycení.....	47
7.1.	Varianta B	47
7.1.1.	Tabulka výsledků	49
7.2.	Varianta C	50
7.2.1.	Tabulka výsledků	52
8.	Váha součástí.....	52
9.	Zhodnocení výsledků.....	53
	Seznam obrázků	54
	Seznam tabulek	55
	Použitá literatura.....	56

Úvod

Aerodynamické prvky jsou nedílnou součástí každého sportovního vozu. Optimální tvary zásadním způsobem rozhodují při bojích o drahocenné vteřiny na závodních tratích. Před každou soutěžní sezónou, inženýři všech týmů, pracují na vylepšení stávající konstrukce automobilu. Při této těžké práci je nutné dodržet dvě základní pravidla. V první řadě musí aerodynamické komponenty vytvořit přítlak, který zaručuje ideální přilnutí automobilu k závodní dráze. Přítlak dovoluje rychlejší průjezd zatáčkami a zlepšuje ovladatelnost vozu. Druhým úkolem je minimalizace odporu. S rostoucím přítlakem se zvětšuje i odpor, z čehož vyplývají ztráty a vůz se stává pomalejším. Úkolem je tedy najít maximální potřebný přítlak, který vozidlu vylepší jeho manévrovací schopnosti a nebude ho zbytečně brzdit.

V první části svojí práce se věnuji rozboru aerodynamických prvků v automobilovém sportu. V tomto sportovním odvětví je aerodynamika rozhodujícím faktorem při konstrukci vozů. Cílem konstruktérů je co největší přiblížení k dokonalosti. Vývoj designu začíná modelováním na počítači a končí desítkami testů v aerodynamickém tunelu a nakonec na závodní dráze. V druhé části se zabývám aerodynamickými prvky formule. U toho typu sportovních vozů je snaha o nalezení optimálního tvaru patrná na první pohled. Ze současného dění na závodních okruzích Formule 1 vyplývá, že vylepšení difuzoru přidá na rychlosti více, než motor, který má o tři koňské síly navíc.

Projekt, na kterém pracuji, se nazývá studentská formule SAE. Mým úkolem bude návrh řešení uchycení zadního přítláčného křídla. Pomocí metody konečných prvků navržen tvar a rozměry součásti pro dané zatížení.

Seznam zkratek

Re	[-]	Reynoldsovo číslo
v_s	[m/s]	střední hodnota proudění kapaliny v daném průřezu
d	[m]	průměr trubice
ν	[Pa]	kinematická viskozita
p	[Pa]	tlak
ρ	[kg/m ³]	hustota proudící tekutiny
v	[m/s]	rychlost
v_∞	[-]	rychlost volného proudu
F_x	[N]	aerodynamický odpor
F_y	[N]	aerodynamická boční síla
F_z	[N]	aerodynamický vztlak
c_x	[-]	koeficient odporu
c_y	[-]	koeficient boční síly
c_z	[-]	koeficient vztlaku
A	[m ²]	průřez čelní plochy vozu
l	[m]	rozvor kol vozu
r	[m]	rozchod kol vozu
M_x	[Nm]	moment klopení
M_y	[Nm]	moment klonění
M_z	[Nm]	moment stáčení

1. Teorie

[1, 2, 3]

Aerodynamika je obor mechaniky, který se zabývá silovým působením proudu vzduchu na těleso při jeho obtékání. Mezi obory, ve kterých se aerodynamika nejvíce uplatňuje, patří letecký a automobilový průmysl ale také i architektura.

Proudění vzduchu je relativní. Z toho vyplývá, že na těleso působí stále stejné síly, pokud je těleso vůči okolí v klidu a vzduch kolem něj obtéká nebo naopak.

Pokud proud vzduchu obtéká těleso, vytváří se na jeho povrchu nerovnoměrná tlaková pole. Tyto pole způsobují tlakovou nerovnováhu. Rozlišujeme tři druhy tlaků:

1. Statický tlak – měříme, když se vzduch nepohybuje.
2. Dynamický tlak – měříme za pohybu vzduchu jako pokles statického tlaku.
3. Celkový tlak – součet statického a dynamického tlaku.

Součet statického a dynamického tlaku je konstantní. Pokud je těleso vůči okolnímu vzduchu v klidu, je statický tlak maximální a dynamický tlak roven nule. Pokud je těleso v pohybu pak stoupá dynamický tlak a statický o stejnou hodnotu klesá. Při rostoucí rychlosti vzrůstá i dynamický tlak. Když se statický tlak dostane do nerovnovážného stavu, vznikají aerodynamické síly. Tyto síly umožňují létat letadlům, která jsou těžší než vzduch.

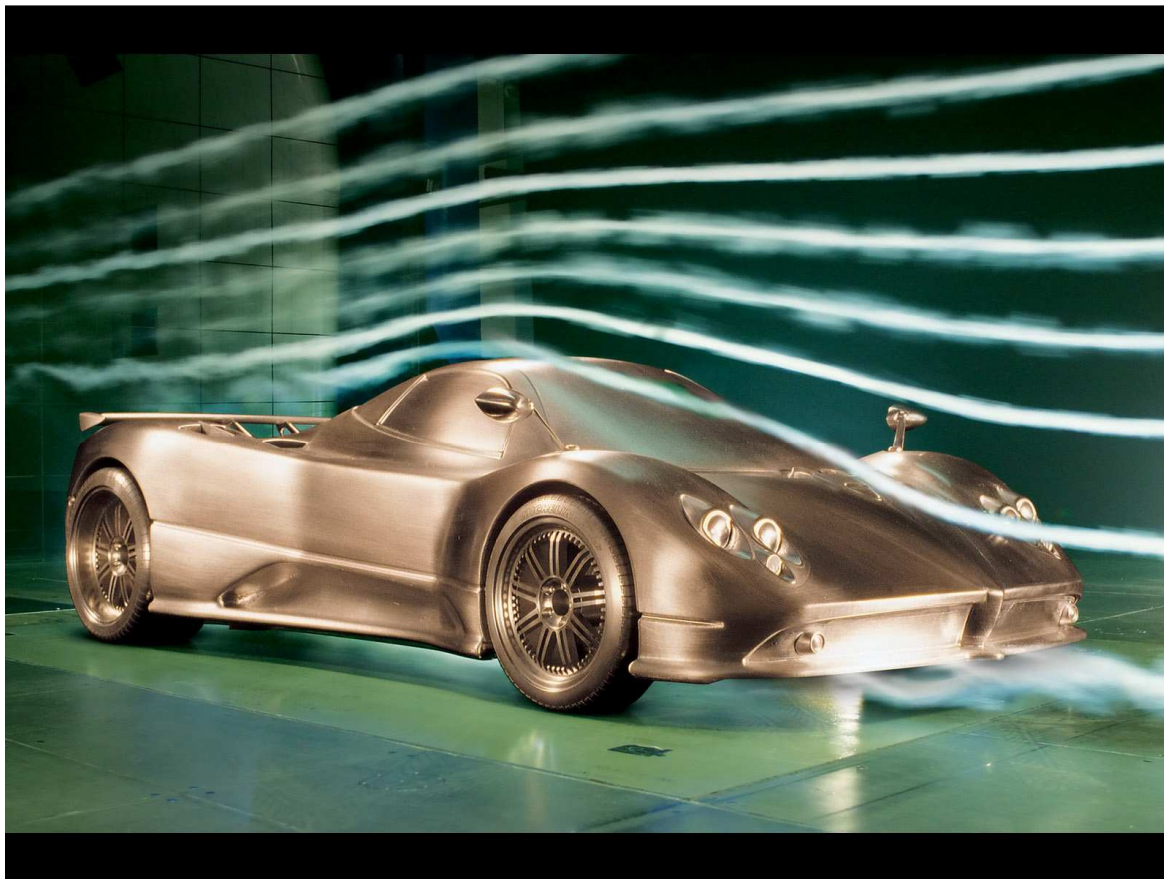


Obr. 1 Vzduchový vír za letadlem¹

¹Zdroj: <http://koosunkim.blogspot.com> 21. 11. 2011

1.1. Aerodynamický tunel

V tomto zařízení se vytváří ovladatelný vzduchový proud. Tím je umožněno studovat účinky vzduchu, který se pohybuje okolo statických předmětů. Pro snadné vyhodnocení výsledků, je v těchto zařízeních používány barevné látky, jejichž fyzikální vlastnosti jsou shodné se vzduchem. Na *obr. 2* je vzduch zviditelňován pomocí svazků kouře.



Obr. 2 Zviditelňování vzduchu pomocí kouřových svazků²

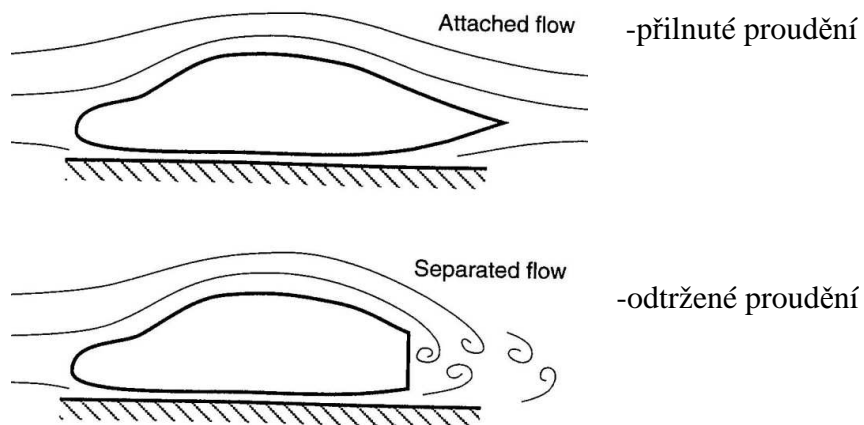
1.2. Druhy proudění

Předtím, než budou popisovány aerodynamické prvky sportovních vozů. Je nutné vysvětlit základní pojmy. Důležité je si uvědomit, že jinak nehybný vzduch působí proti vozidlu jako odpor. Pokud je těleso obtékáno vzduchem, vznikají různé druhy proudění, které zásadním způsobem ovlivňují výkon a ovladatelnost vozidla. Ke zkoumání aerodynamických vlastností těles je v praxi využíváno aerodynamického tunelu.

² Zdroj: <http://podpora-techniky.fs.cvut.cz/www/pokusy/kourovy-tunel/> 26. 11. 2011

1.2.1. Přilnuté a odtržené proudění

Proudění nazýváme přilnuté, pokud proudnice přesně obtékají tvar daného předmětu. Opakem přilnutého proudění, je proudění odtržené. K tomu dochází u zadní části vozu, při náhlém ukončení obtékaného povrchu.

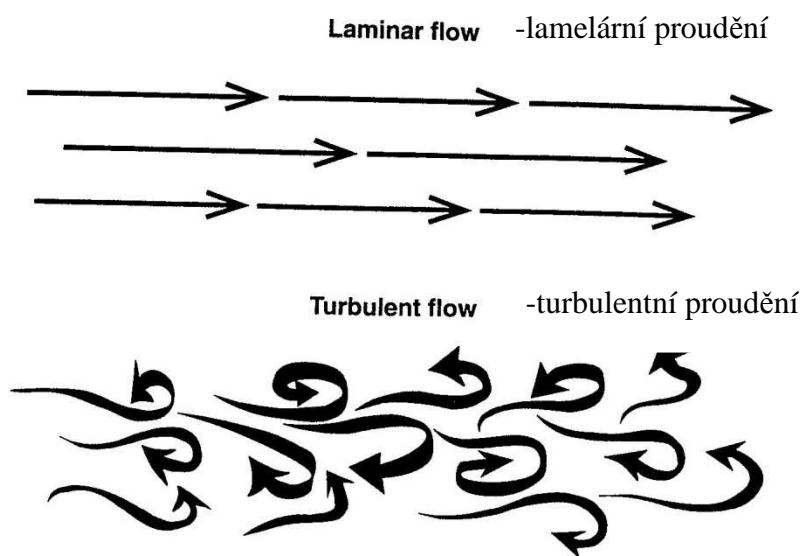


Obr. 3 Přilnuté a odtržené proudění [1]

1.2.2. Lamelární a turbulentní proudění

Pokud se proudnice nekříží a zdají se být uspořádané, nazýváme proudění lamelárním. A pokud se částice posouvají, aniž by rotovaly. Vzniká lamelární tření.

Při turbulentním proudění, se proudnice navzájem kříží a kromě posuvného pohybu, vykonávají vlastní, obecný pohyb.



Obr. 4 Lamelární a turbulentní proudění [1]

1.2.3. Reynoldsovo číslo

Udává vztah mezi setrvačnou silou a viskozitou. Jinými slovy, vyjadřuje odpor prostředí důsledkem vnitřního tření. Při dosažení určité kritické hodnoty Reynoldsova čísla, dochází ke změně proudění. Toto číslo vyjadřuje, zda je proudění lamelární nebo turbulentní.

Reynoldsovo číslo je dáno vztahem:

$$Re = \frac{v_{sd} d}{\nu} [-] \quad (1)$$

- v_{sd} ...střední hodnota proudění kapaliny v daném průřezu [m/s]
- d ...průměr trubice [m]
- ν ... kinematická viskozita [Pa]

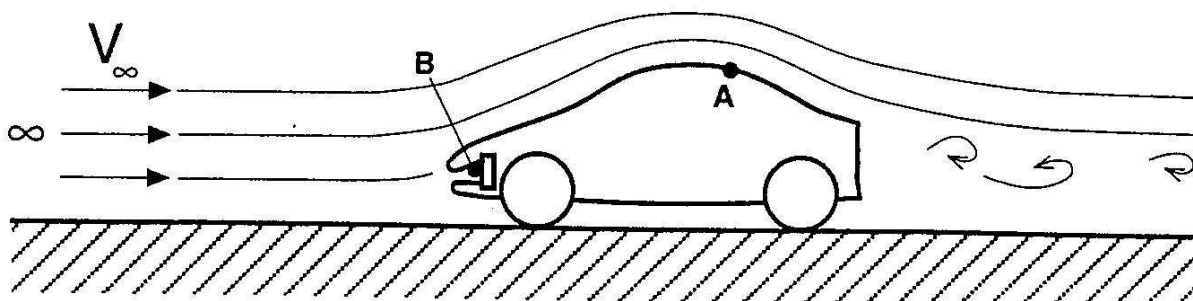
Při výpočtu Reynoldsova čísla u závodních automobilů je vzorec definován takto:

$$Re = \frac{\rho v L}{\nu} [-] \quad (2)$$

- v ...rychlost [m/s]
- L ...délka vozu [m]
- ν ... kinematická viskozita [Pa]
- ρ ...hustota vzduchu[kg/m³]

1.2.4. Bernoulliho rovnice

Vozidlo, které je v pohybu způsobuje změny směru a velikost rychlosti proudění. V blízkosti obtékaného povrchu, pohyb proudění vytváří aerodynamické zatížení působící na vozidlo. Toto zatížení je děleno na dva typy. Za prvé, je zde odporová síla (povrchové tření), která působí tečně k povrchu obtékaného tělesa a napomáhá odporu. Druhá síla je síla tlaková, která působí kolmo k povrchu a přispívá k odporu a vztlaku. Zde uvažujeme obtékaným tělesem vozidlo.



Obr. 5 Znárodnění Bernoulliho rovnice [1]

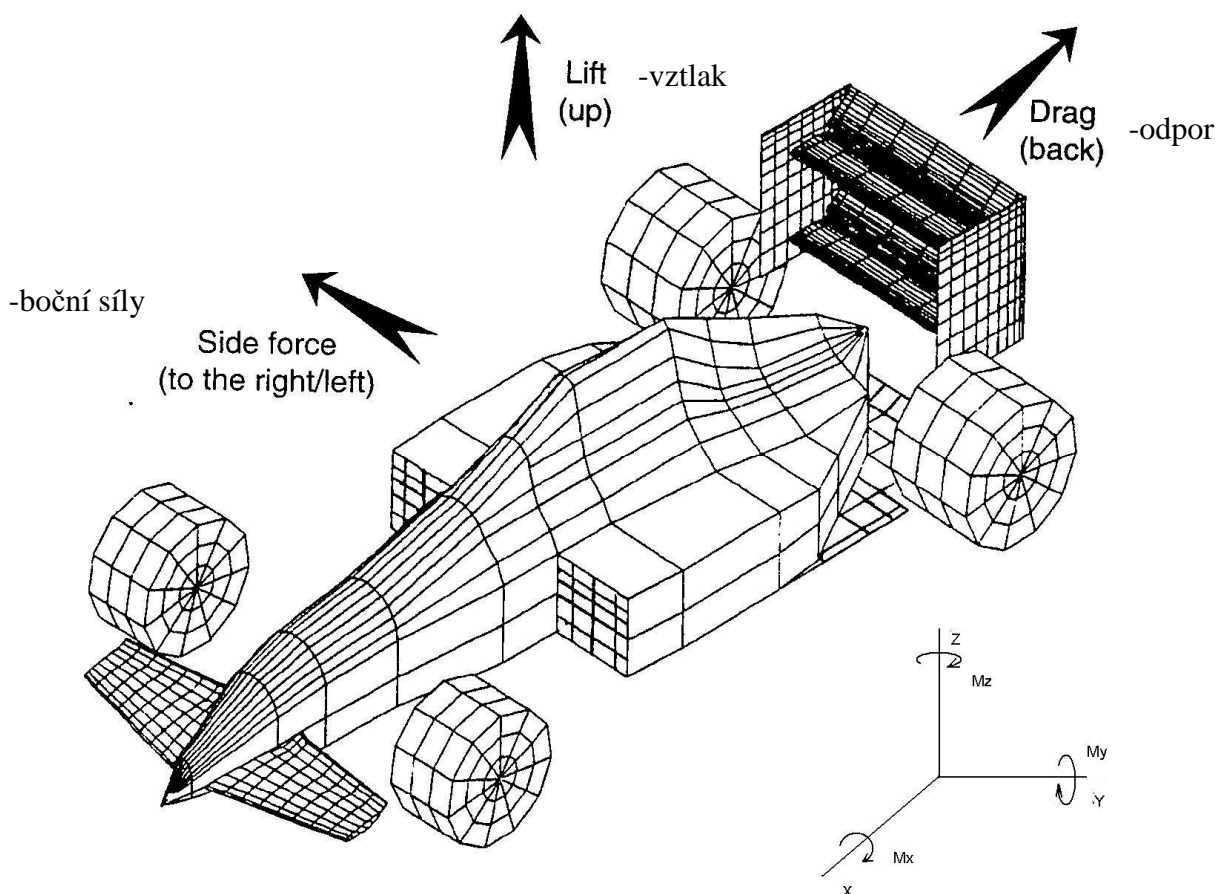
Bernoulliho rovnice vyjadřuje vztah mezi rychlostí vzduchu a tlakem vzduchu. V každém bodě proudnice je vztah mezi lokálním tlakem p , hustotou ρ a rychlostí v , popsán následovně:

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

- p ...tlak vzduchu [Pa]
- ρ ...hustota vzduchu[kg/m³]
- v ...rychlost [m/s]

1.3. Vztlak, odpor a boční síly

Celková aerodynamická síla má obecný tvar a velikost a je zapotřebí ji rozložit, proto je nutné zavést vhodný souřadný systém. Nejčastěji se zavádí takový, se středem ležícím v rovině symetrie vozu, v polovině rozvoru kol a v rovině tečné ke kolům vozu. Pro nás je zajímavá velikost sil vzhledem k těžišti, proto musíme síly přepočítat.



Obr. 6 Aerodynamické síly a momenty [1]

Pomocí souřadného systému rozdělujeme celkovou aerodynamickou sílu do tří momentových a tří silových složek. V ose x působí odporová síla, v ose z tlaková síla a v ose y boční síla.

Moment v ose x je moment klopení, v ose y moment klonění, v ose z moment stáčení. Nejpodstatnější moment je moment klonění. Podle směru působení momentu, buď nadzvedává přední část vozu, nebo ji tlačí k vozovce. Jeho hodnota při vysokých rychlostech ovlivňuje stabilitu vozu.

Aerodynamický odpor:
$$F_x = -\frac{1}{2} \cdot c_x \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \quad (4)$$

Aerodynamická boční síla:
$$F_y = \frac{1}{2} \cdot c_y \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \quad (5)$$

Aerodynamický vztlak:
$$F_z = \frac{1}{2} \cdot c_z \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \quad (6)$$

- A ...největší průřez čelní plochy [m^2]
- ρ ...hustota vzduchu [kg/m^3]
- v ...rychlost [m/s]
- c_x ... součinitel odporu
- c_y ...součinitel boční síly
- c_z ...součinitel vztlaku

Moment klopení:
$$M_x = \frac{1}{2} \cdot c_{Mx} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot r \quad (7)$$

Moment klonění:
$$M_y = \frac{1}{2} \cdot c_{My} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot l \quad (8)$$

Moment stáčení:
$$M_z = \frac{1}{2} \cdot c_{Mz} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot l \quad (9)$$

- r ...rozvor kol [m]
- l ...rozchod kol [m]

2. Aerodynamické prvky sportovních vozů

Tvar a parametry sportovních vozidel je výsledkem předpisů pro danou závodní skupinu. V této části budou popsány skupiny závodních vozů. Hlavní rozdělení z hlediska aerodynamiky jsou závody cestovních vozů, vozů se zakapotovanými koly a s otevřenými koly.

2.1. Cestovní vozy

Transformace tvarů cestovních vozů v závodní vozy nezajišťuje velkou úroveň, co se týče aerodynamického efektu. Je to dáno hlavně tím, že veškeré úsilí vkládané do vývoje aerodynamických prvků je orientované na vozy s odkrytými koly. Navíc, v tomto typu závodů je úroveň aerodynamiky obvykle omezena řídicími předpisy.

Přesto, je důležité řešit u těchto vozů aerodynamické problémy. Jako je redukce vzlaku a vytvoření určité úrovně přítlaku. U těchto druhů závodních vozidel je především řešen přítlak na zadní část karoserie a prostor podvozku. Pokud je pod vozem hladká deska, popřípadě difuzor, zvyšuje se přítlak a je redukováno proudění vzduchu za vozem. Přilnuté proudění vzduchu za vozem je zajišťováno zadním křídlem a spoilery. Příkladem je Seat Leon, který je zobrazen na *obr. 7*.

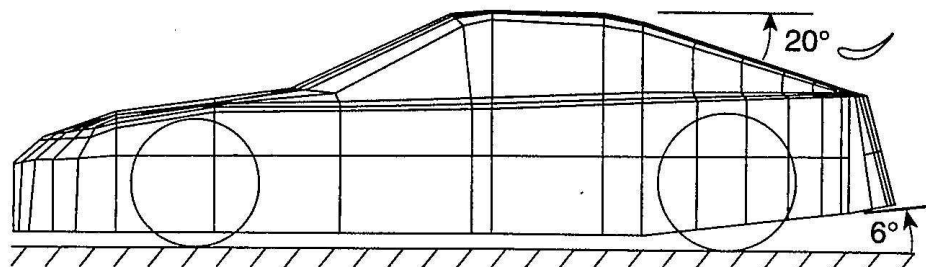


Obr. 7 Seat Leon při závodech cestovních vozů³

³ Zdroj: <http://www.autanet.cz/autonews-seat-leon-eurocup-miri-do-brna-michal-matejovsky-se-predstavi-ceskym-fanouskum-1011> 1. 12. 2011

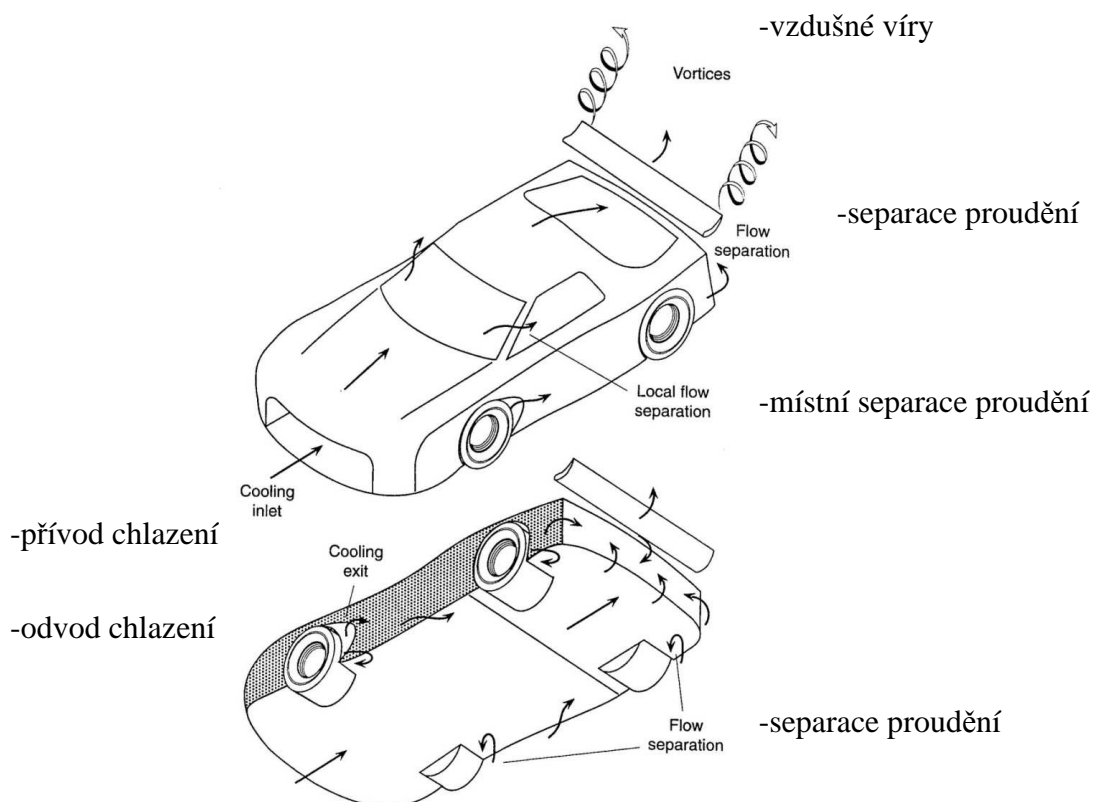
Z obrázku je patrné, že modifikace spočívá pouze v úpravě přední části pomocí spoileru a snížením podvozku. Dále pak je patrné užití sportovních pneumatik a zadní část vozidla je opatřena křídlem.

Další podstatnou částí je malý difuzor (obr. 8), který má počátek před zadními koly a sklon 6° .



Obr. 8 Difuzor používaný u cestovních vozů [1]

Proudění vzduchu okolo cestovního vozu je znázorněno na obr. 9. Aby nevznikaly ztráty způsobené velkým aerodynamickým odporem, musí být proudění vzduchu okolo vozidla a za ním, přilnuté.



Obr. 9 Proudění vzduchu okolo cestovních vozů [1]

Ve spodní části *obr. 9* je znázorněno proudění v místě podvozku. Zde je patrné, že největší proudění se nachází za všemi čtyřmi koly vozidla.

2.2. Vozy se zakapotovanými koly-prototypy

U těchto typů závodních automobilů, řídicí předpisy dovolují užití speciálních aerodynamických prvků pro zlepšení jejich jízdních vlastností. Vysoce aerodynamické tělo nejen, že snižuje vztlak, ale zároveň zaručuje dosažení vyšší úrovně přítlaku. A to i bez přínosu přítlačných křídel. Ale jako u ostatních závodních vozů je maximální aerodynamický účinek úzce spjat s použitím difuzoru a pomocí předního nebo zadního přítlačného křídla. Typickým příkladem vozu z této skupiny je Jaguar XJR 9, který je znázorněn na *obr. 10*.

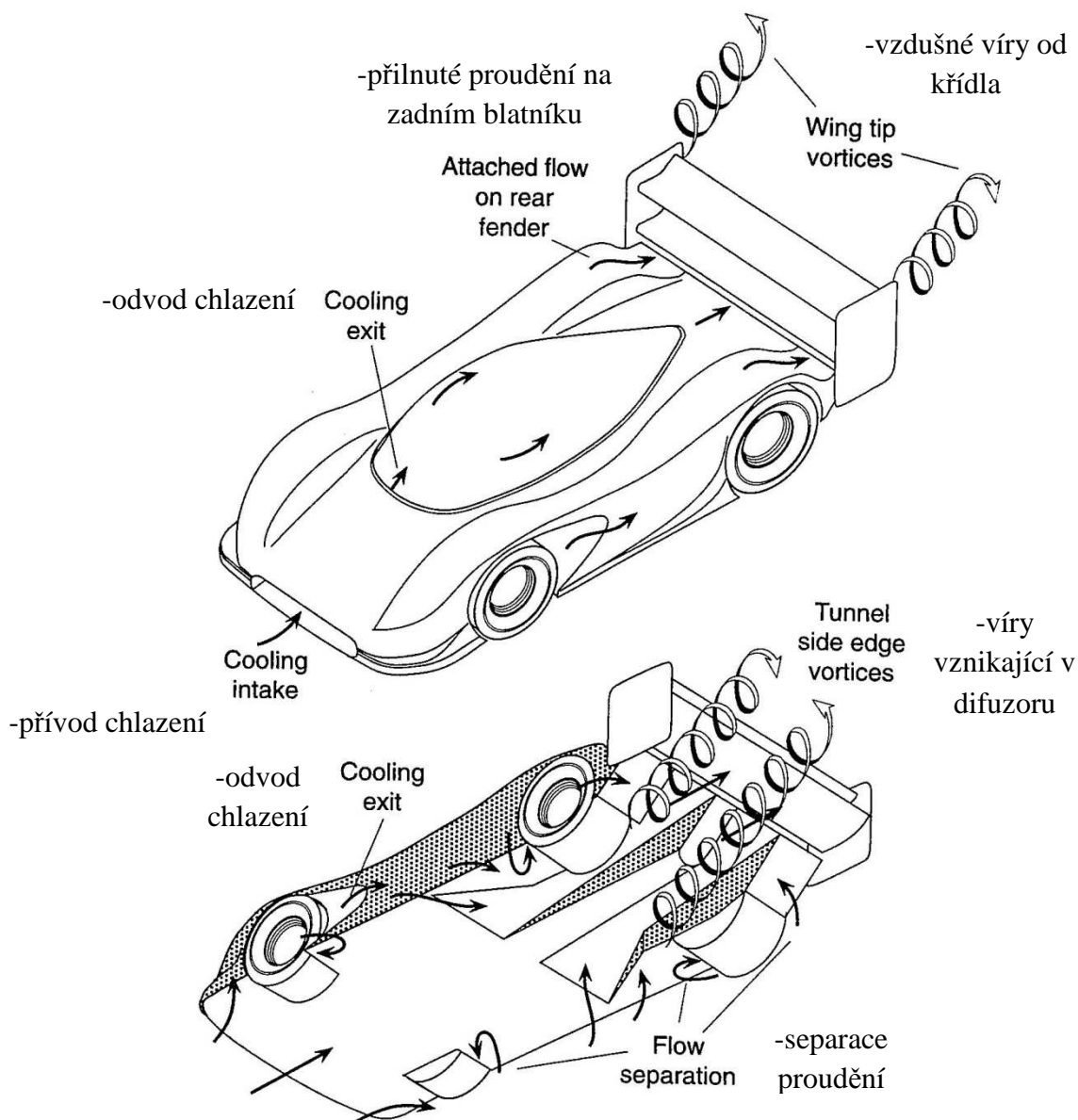


Obr. 10 Jaguar XJR 9⁴

Schéma geometrie a proudění okolo vozu je vyobrazeno na *obr. 11*. Vrchní část vozidla má vysoce aerodynamický tvar, který zajišťuje dokonalé přilnuté proudění. Hlavní přívod chlazení je umístěn v přední části vozidla. V zadní části vozu, před přítlačným křídlem mezi zadními koly, vzduch opouští podvozkovou část pomocí difuzorů.

⁴ Zdroj: http://www.ultimatecarpage.com/pic/764/Jaguar-XJR-9-LM_14.html

14. 5. 2012

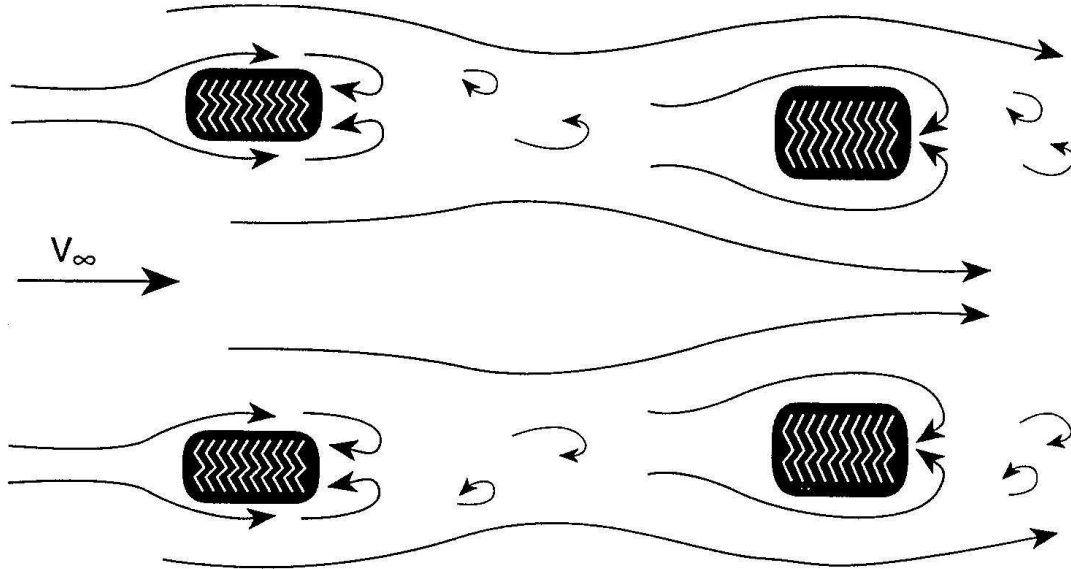


Obr. 11 Proudění vzduchu okolo prototypů [1]

2.3. Závodní vozy s nezakapotovanými koly

Tato skupina závodních vozů je, co se týče aerodynamického odporu, nejkomplicovanější. Hlavní odpor totiž způsobují nekrytá kola. Dá se říci, že tento tvar je, díky řídicím předpisům, noční můrou pro dokonalý, vysokoaerodynamický efekt.

Pro ukázkou složitosti, je na *obr. 12*, znázorněno proudění vzduchu, okolo všech čtyřech kol. Nekrytá kola tvoří kolem 65% odporové plochy vozu a způsobují zhruba 40% celkového odporu. Navíc produkují vztlak, který je velice těžké experimentálně zjistit. Podle výpočtů, by stávající vůz Formule 1 dosahoval rychlostí okolo 500 km/h pokud by jeho kola byla zakryta.



Obr. 12 Proudění vzduchu okolo nezakapotovaných kol [1]

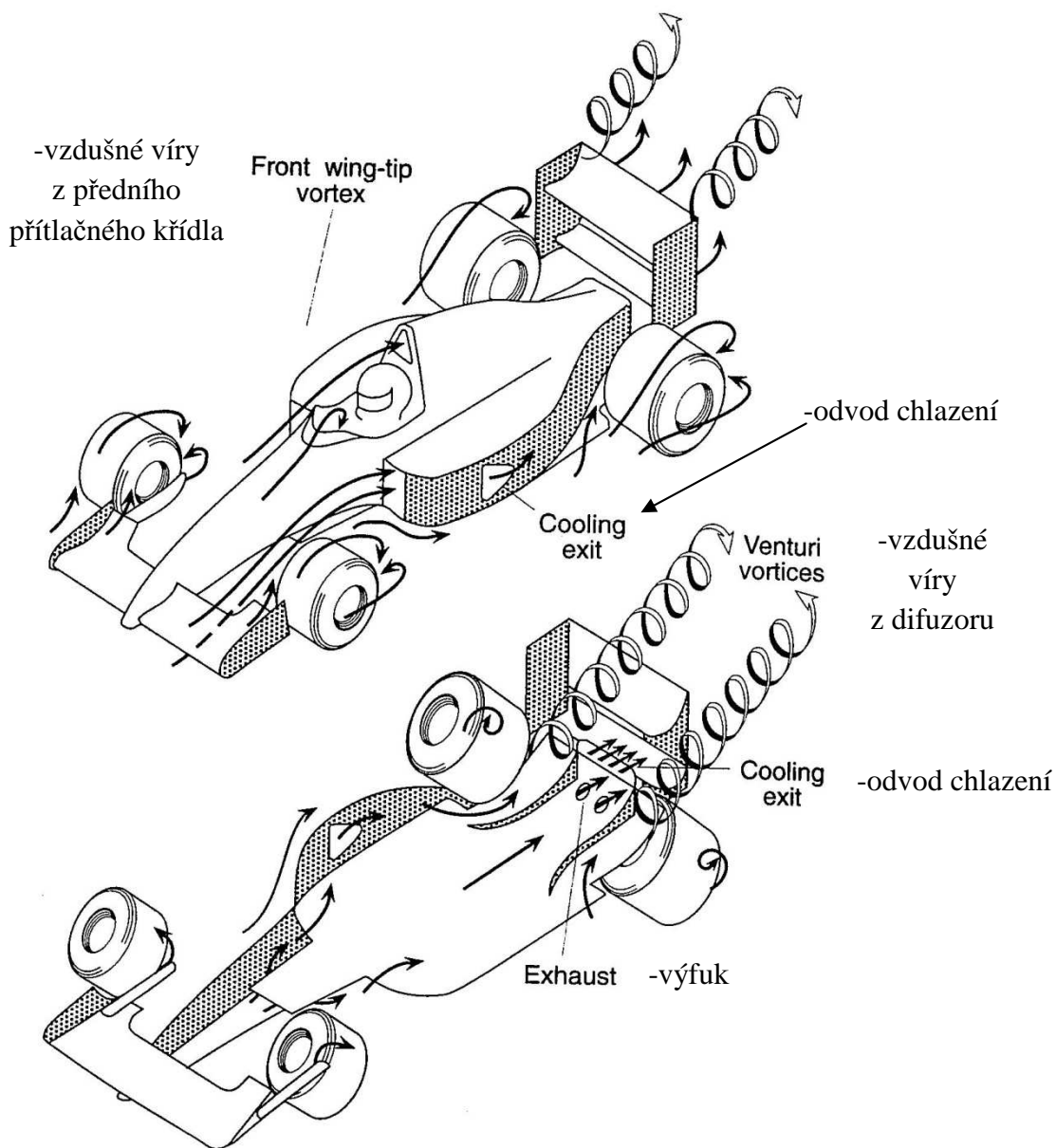
I když je odpor kol vysoký, aerodynamické prvky používané v této kategorii zajišťují daleko vyšší přítlak než prvky ostatních skupin závodních vozů. Příklad je zobrazen na *obr. 13*.



Obr. 13 Sauber C30⁵

⁵ Zdroj: http://www.f1fanatic.co.uk/2011/01/31/sauber-c30-launch-first-pictures/sauber_c30_studio_2011-1/ 2. 12. 2011

Hlavní aerodynamické prvky u vozů typu Formule 1 budou popsány v následující kapitole.



Obr. 14 Proudění vzduchu okolo Formule [1]

3. Aerodynamické prvky vozů Formule 1

V této části budou popsány různé komponenty, které jsou důležité ke správnému proudění okolo vozu typu formule.

Základní filozofií konstruktérů je dosažení maximálního přítlaku při minimálním odporu vzduchu. Tento ideální aerodynamický stav, pro udržení aerodynamické rovnováhy, je snahou všech vývojových inženýrů.

3.1. Přední přítláčné křídlo

Přední přítláčné křídlo u vozů F1 je typicky dvou elementární, vysokozdvižné křídlo, které má nastavitelnou polohu pro změnu přítlaku. Hlavní funkcí této komponenty je zvýšení přilnavosti předních pneumatik. V důsledku faktu, že další prvky operují s tímto tlakem, generovaným předním křídlem vyplývá, že správné nastavení ovlivňuje ostatní aerodynamické komponenty.

Tento prvek pracuje s velice silným přízemním efektem a jeho vzdálenost od vozovky bývá mezi 70 až 100 mm. Při závodech vůz zvyšuje svou světlou výšku a stává se nedotáčivým v důsledku snižování hmotnosti, která je závislá na úbytku spotřebovávaného paliva. Proto je nutné měnit nastavení přítlaku předního křídla během závodu.

Hranový efekt, na stranách křídla, je minimalizován pomocí tzv. endplates. Endplate je vertikální příčka sloužící k zamezení úniku vzduchu ze stran. Čím níže je křídlo u země tím se stává efektivnějším a endplates účinnějšími.

Efektivita tohoto prvku se v automobilové terminologii znázorňuje pomocí poměru přítlak/odpor. Hodnoty se pohybují okolo 7 až 9, z čehož vyplývá, že přítlak musí být minimálně sedminásobně vyšší než odpor. Výkon křídla je silně závislý na přítomnosti předních kol. Rotující kolo způsobuje turbulentní proudění blízko u země před koly. Tyto víry jsou vysoce významné a jejich efekt se mění s úhlem natočení kol.

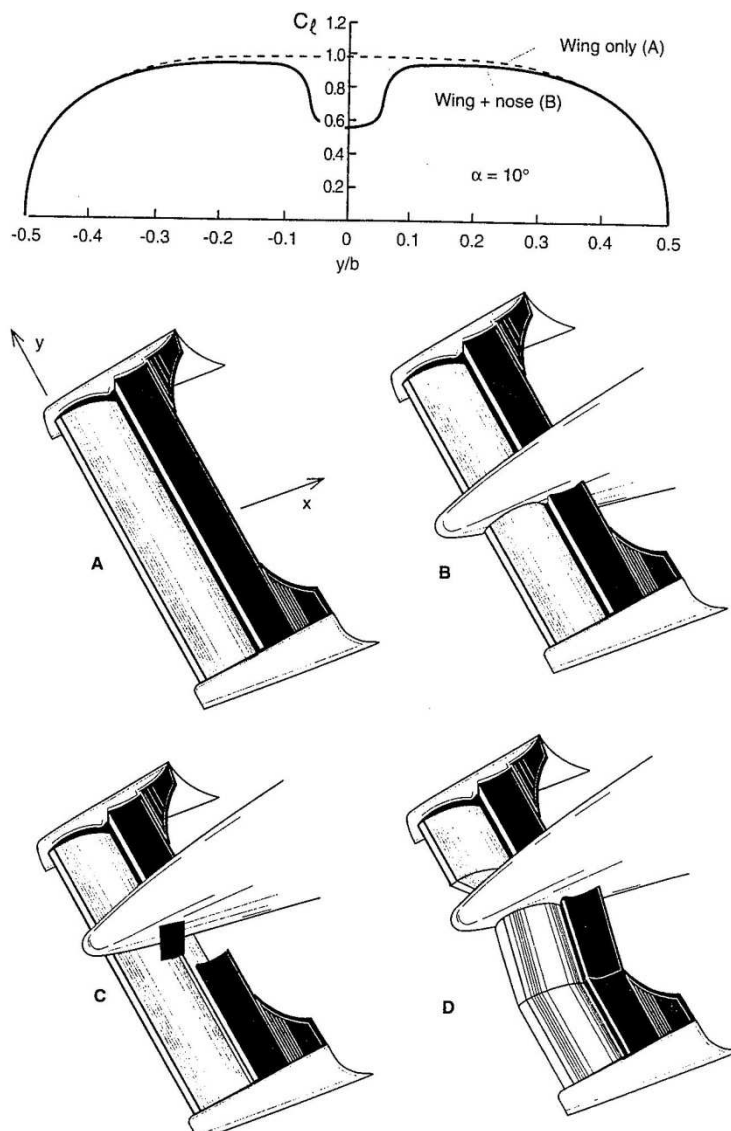
Přední křídlo produkuje 25-30% celkového přítlaku. Velikost přítláčné síly je závislá na vzdálenosti od země, a proto je produkce většího podílu aerodynamické stability problémem. Správná konstrukce zajišťuje vynikající ovladatelnost a výkon vozu F1.



Obr. 15 Přední přítláčné křídlo⁶

⁶ Zdroj: http://tapety.na-pc.cz/distribuce-s1/Redbull_RB6_17_1920x1200.jpg 12. 12. 11

Přítlak na předním křídle je ovlivněn jak jeho uchycením, tak i jeho tvarem. Toto je znázorněno na *obr. 16*.



Obr. 16 Uchycení a tvary přítláčného křídla [1]

Horní částí je zobrazen graf, znázorňující součinitel přítlaku c_L na samotném křídle (varianta A) a s uchycením na nosu formule (varianta B).

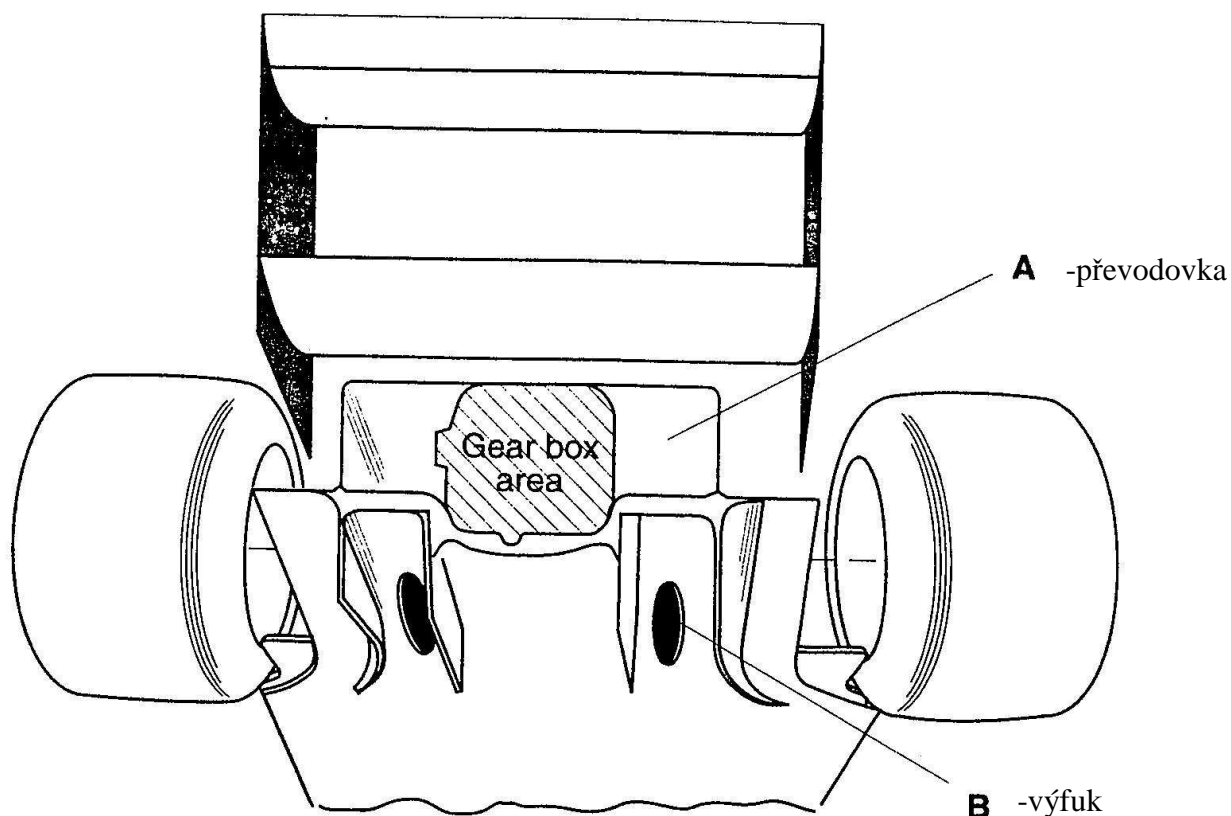
Dva nejpoužívanější tvary přítláčných křídel jsou typy C a D. V případě C, je křídlo účinnější a dolní plocha nosu formule musí sloužit k zavedení chladícího vzduchu na podvozek a do sání. Tento druh uchycení je používán ve formuli 1 viz *obr. 13*.

3.2. Podvozek a karoserie

Plocha podvozku musí být rovná, tuhá a nepropustná. Na této části vozu je umístěn difuzor. Difuzor je speciálně tvarovaná část vozu, která slouží k snížení tlaku pod vozem a ke generování přítlaku. Podvozkem a karoserií je tvořeno zhruba 40% z celkového přítlaku.

Obvykle konstrukční zlepšení difuzoru a produkce nižšího tlaku pod vozem nevede k nárůstu odporu a proto je získávání přítlaku pomocí karoserie, klíč k aerodynamické efektivitě vozu.

Úkolem difuzoru je zpomalení urychleného vzduchu pod vozem zpět na rychlosti, které jsou blízké okolnímu proudění. Díky tomuto principu se vzduch vycházející za autem stává méně turbulentním. Začleněním výfukového systému do difuzoru (*obr. 16*) dochází k lepšímu odsátí vzduchu z podvozku. Výfukové plyny pomáhají ke zvyšování tlaku v podvozku.

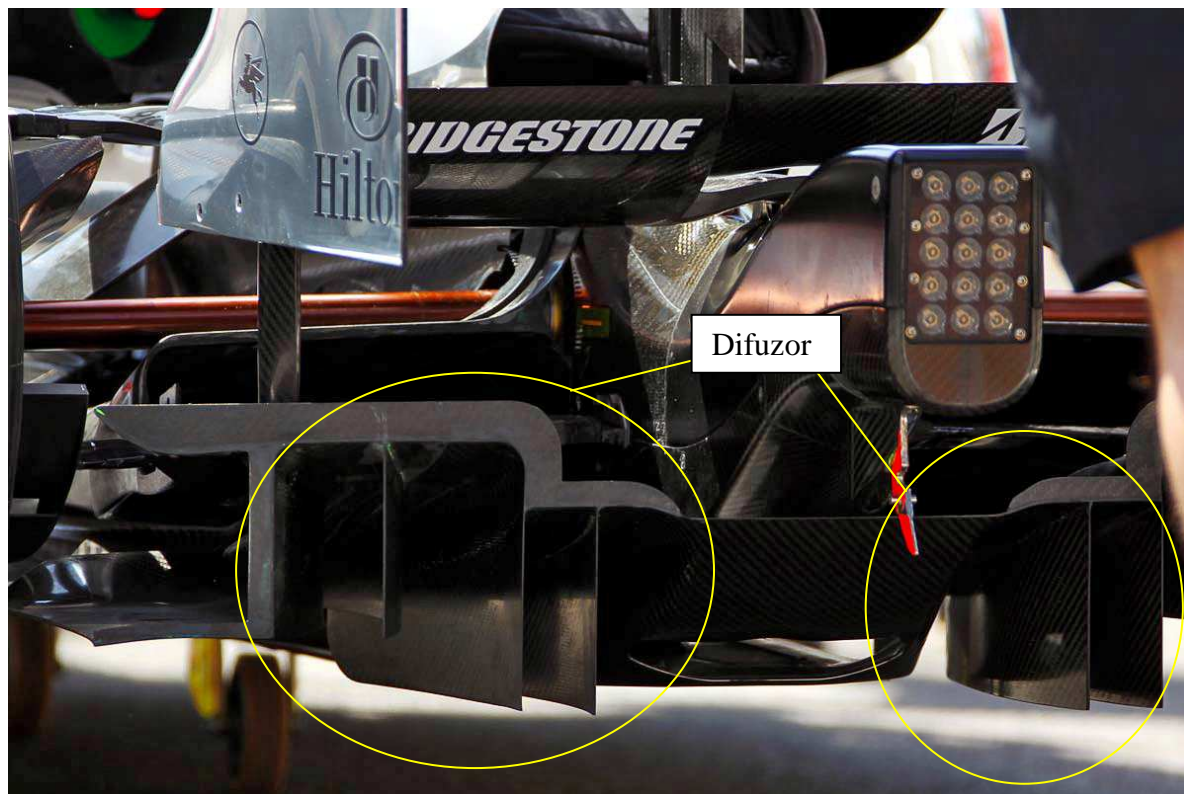


Obr. 17 Umístění výfuku do difuzoru [1]

Konstrukce difuzoru je neustále inovována a některé typy nevyžadují zavedení výfukového systému ke zlepšení přítlaku. Tento aerodynamický prvek v poslední době nejvíce ovlivňoval pořadí závodních vozů v cíli.

Aplikace difuzoru je velice důležitá pro ovladatelnost vozu. Konkrétní úhel difuzoru je kompromis mezi aerodynamickou efektivitou a stabilitou vozu.

V důsledku nízkého poměru šířky k výšce podvozku a také v důsledku přítomnosti zadních kol je vzduch pod difuzorem charakterizován velkými plochami trojrozměrného proudění. Měření povrchového tlaku, vizualizace povrchového proudění a numerické modelování je možné pochopit pouze pomocí pokusů.



Obr. 18 Difuzor Formule 1⁷

3.3. Zadní přitlačné křídlo

Zadní přitlačné křídlo používané vozy Formule 1 je tvořeno dvěma nebo třemi plochami křidel.

Nastavení přitlaku je individuální pro každý závodní okruh. Pokud je trať vysokorychlostního typu, například okruh v Monze, je úhel sklonu menší, aby bylo dosaženo minimálního aerodynamického odporu.

Tento typ závodního vozu má náhon na zadní kola, z tohoto důvodu má zadní křídlo především vliv na maximální akceleraci, jejíž účinek je důležitý zejména na startovním roštu a také při výjezdu ze zatáček.

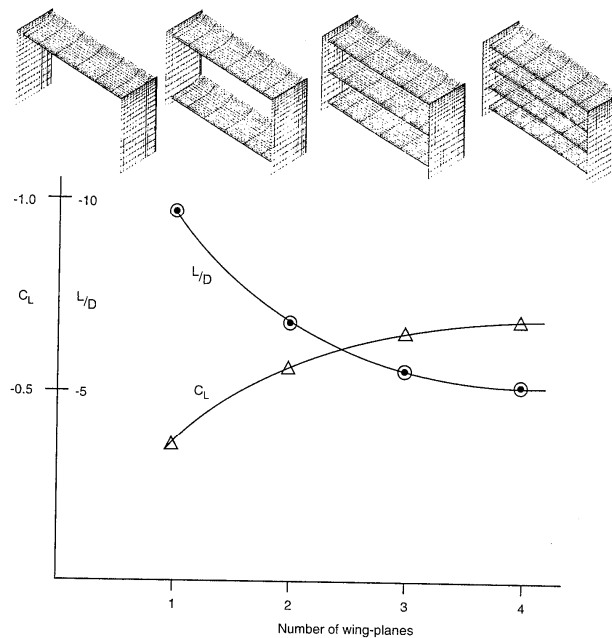
Zadní křídlo produkuje přibližně 30-35% celkového přitlaku a přibližně 25-30% odporu. Optimalizace těchto elementů a vzájemné působení s prvky difuzoru je velice důležité pro celkovou aerodynamiku vozu. Správné nastavení zadního přitlačného křídla je jedno z mála okruhů, kde jsou použitelné izolované numerické aplikace. Speciálně pro vícekomponentová křídla, kde je proudění relativně „čistě“.

⁷ Zdroj: <http://www.race-f1.com/content/articles/nodes/84.jpg> 11. 1. 12



Obr. 19 Zadní přitlačné křídlo⁸

Možnost jak zvýšit účinnost zadního křídla je zvýšení počtu plátů. Tento druh úpravy je zobrazen na obr. 20.



Obr. 20 Efektivita víceplátových zadních křídel [1]

⁸ Zdroj: <http://f1news.cz/pictures/photo/2009/01/12/123175181541057234.jpg> 11. 1. 12

Z grafu vyplývá, že při vzrůstajícím počtu plátů, vzrůstá koeficient přítlaku c_L , ale zároveň klesá poměr přítlak/odpor, z čehož je zřejmé, s přibývajícimi pláty také výrazně stoupá aerodynamický odpor. Proto použití více jak dvou plátů není doporučeno.

4. Praktická část

Na západočeské univerzitě v Plzni vznikl na konci roku 2008 studentský tým UWB Racing Team Pilsen, jehož cílem byla účast v prestižním mezinárodní studentské soutěži Formule SAE, které se mohou zúčastnit univerzitní týmy z celého světa.

Tento projekt, po odsouhlasení vedením Fakulty strojní a katedry konstruování strojů, následovaly nezbytné organizační přípravy. Na počátku roku 2009 se začal tvořit studentský tým s názvem UWB Racing Team Pilsen, který tento projekt zrealizoval.

Kvůli složitosti konstrukce, bylo zapotřebí zapojit do tohoto projektu i studenty z ostatních fakult ZČU. Ústav umění a designu navrhl vzhled karoserie. Studenti fakulty elektrotechnické vypracovali elektronickou zástavbu a fakulta ekonomická zajistila finanční zprávy pro účely soutěže, které jsou důležité pro hodnotící komisi.



Obr. 21 První náčrty formule SAE⁹

Z prvních skic bylo vytvořeno několik zmenšených modelů. Následovala realizace polyuretanové makety v měřítku 1:1 (viz obr. 22), která byla vytvořena pro sejmutí laminátových forem, jež byly určeny k výrobě kompozicové karoserie.



Obr. 22 Polyuretanová maketa⁹



Obr. 23 Kompozicová karoserie⁹

Formule SAE je mezinárodní projekt studentské formule (www.fsae.com). Z názvu vyplývá, že se jedná o závody formulí a to na univerzitní úrovni. První soutěžní závod se jel roku 1981 v USA. Od té doby soutěž doznala řady změn a modifikací.

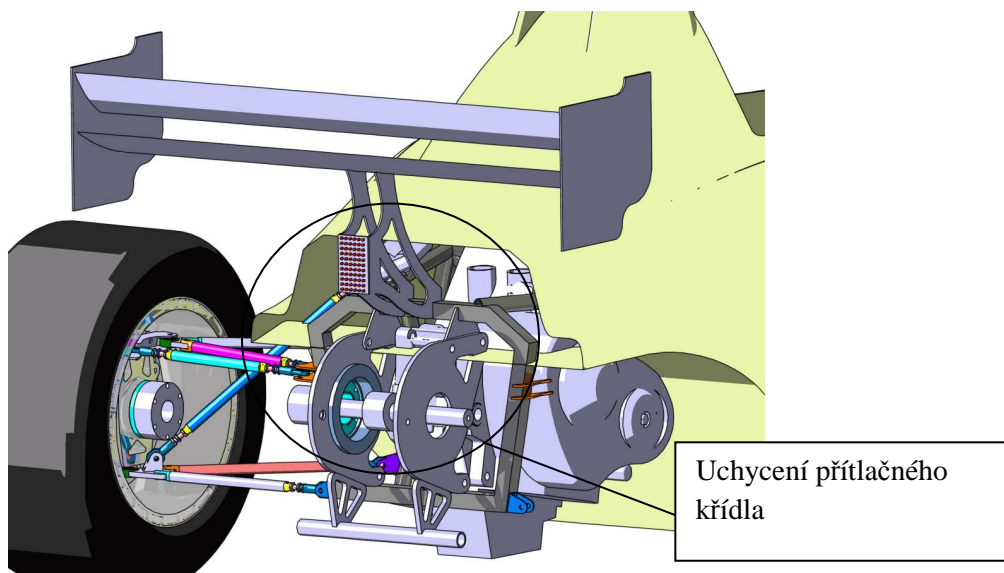
Všechny týmy neustále vyvíjejí svoje závodní vozy pro zvýšení konkurenceschopnosti ve startovním poli. Na monopostech přibývají aerodynamické prvky, které jsou typické pro vozy typu Formule 1. ^[9]

⁹ Zdroj: <http://www.auto-design.cz/default.aspx?id=507&ido=48&sh=-598999464> 21. 2. 2012



Obr. 24 FSAE¹⁰

Mým úkolem bude návrh uchycení zadního přitlačného křídla pomocí hliníkových plechů, pro předem nadefinované namáhání, které působí na tento aerodynamický prvek při jízdě na závodní trati.



Obr. 25 Schéma možného uchycení zadního přitlačného křídla

¹⁰Zdroj:

http://www.wwufsa.com/Waltman/Pictures/Hosted/Competition/2009_FSAE_West/Web_Linked/IMG_8223_resized1200_%2313_ps.jpg 21. 2. 2012

4.1. Návrh uchycení přitlačného křídla

4.1.1. Zadání

Navrhněte uchycení přitlačného křídla formule. Proveďte takové konstrukční úpravy, které povedou ke zvýšení tuhosti. Minimalizujte hmotnost řešení.

-zadané hodnoty:

- tlak vzduchu ze shora na celé křídlo..... 450 kg
- tlak ze předu a ze zadu..... 200 kg
- tlak na stranu křídla (krut).....200 kg
- povolené posunutí..... 5 mm

Protože nebylo možné použít ke zjištění skutečných aerodynamických sil, které působí na křídlo, praktické metody např.: aerodynamický tunel, byly tyto hodnoty nadefinovány pomocí teoretických znalostí.

Pomocí výpočtů je zjištěno, že při jízdě v maximální rychlosti působí na zadní přitlačné křídlo tlak, jenž dosahuje velikosti až 1,5 násobek váhy vozu.

Formule SAE západočeské university má hmotnost 295 kilogramů. Na uchycení křídla by v tomto případě měl působit tlak až 442,5 kilogramů. Z hlediska bezpečnosti, byla tato hodnota zvýšena na 450 kg.

Podobně byly zvoleny i další hodnoty, avšak zde nebyla uvažována hmotnost vozidla ale hmotnost samotného křídla, na které působí během jízdy přetížení způsobené gravitací.

4.1.2. Cíl práce

Jedná se o pevnostní analýzu s přihlédnutím na hmotnost. Cílem úlohy je navrhnout optimální konstrukci uchycení zadního přitlačného křídla, z pevnostního a tuhostního hlediska, při čtyřech variantách zatížení. Problém byl řešen pomocí simulace MKP v programu NX Nastran.

4.1.3. Materiálové charakteristiky

Úchytka je tvořena třemi svařenými plechy a je připevněna na rámu konstrukce pomocí šesti šroubů. Je vyrobena z hliníku (Al). Norma konkrétního materiálu je EN AW-6082.

Součást je svařena z tenkých hliníkových desek, kde svary jsou pevnější a tužší, než samotná deska, proto nebyly v tuhostní analýze uvažovány.

Vlastnosti materiálu:

Konstrukční materiál s dobrou tvárností, leštitelností a odolností proti korozi, dobrou schopností elektrolytické oxidace, vhodný ke svařování. Má dobré plastické vlastnosti v žíhaném stavu, vyhovující ve vytvrzeném stavu. Tvařitelnost při teplotách 450 - 500°C je velmi dobrá. Korozní odolnost je velmi dobrá, u tohoto materiálu se neprojevuje sklon ke koroznímu praskání pod napětím. Obrobitelnost řeznými nástroji je nevyhovující v žíhaném stavu a vyhovující ve vytvrzeném stavu. Používá se na součásti se střední pevností dlouhodobě pracující při teplotách 50 až -70°C, u nichž se požaduje dobrá technologičnost, korozní odolnost a dekorativní vzhled ve stavebnictví, potravinářství, pro jemnou mechaniku, na letadla, vozidla apod. Typické výrobky: kabiny letadel a vrtulníků, krytiny, mostové jeřáby, stožáry.

Materiál	Stav	Rm (Mpa)		Rp0,2 (MPa)
		max.	min.	

ISiMgMn EN AW 6082	0	měkký	neuvádí se	15	max. 85
	T4/T451	přirozeně vystárnutý	205	neuvádí se	110
	T6/T651	uměle vystárnutý	310	neuvádí se	260

Tab. 1 Mechanické vlastnosti materiálu¹¹

4.1.4. Konstrukce součásti

Součást je svařenec, který je tvořen třemi plechy. Skládá se ze dvou nosných částí a jedné spojovací, jenž zároveň plní funkci uchycení zadního světla. Základní tvar, jenž byl zvolen, znázorňuje obr. 26. Výkresy jednotlivých částí sestavy je uveden v příloze.

¹¹Zdroj: <http://www.alfun.cz/sortiment/hlinik/plechy-a-pasy> 21. 2. 2012

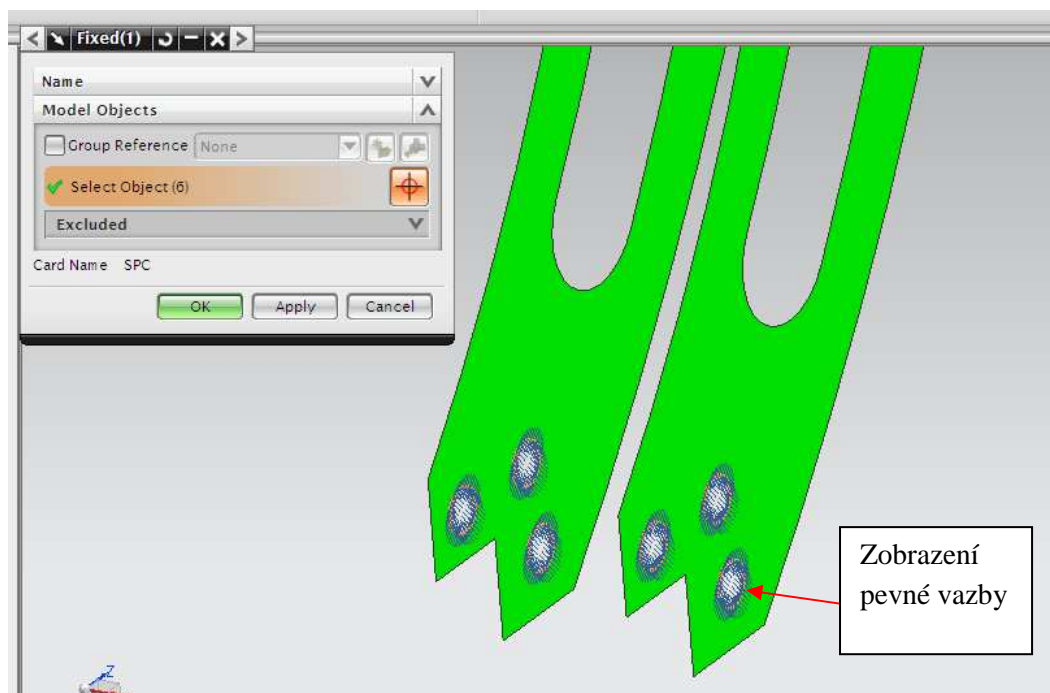


Obr. 26 Model součásti

5. Způsob uchycení a simulace zatížení

5.1. Uchycení

Součást bude uchycena k rámu vozu pomocí šesti šroubů a je tedy uvažována jako dokonale tuhá vazba. Zde bude použita funkce „Fixed constrain“ neboli pevná vazba. Simulace pevné vazby je vyobrazena na *obr. 27*.



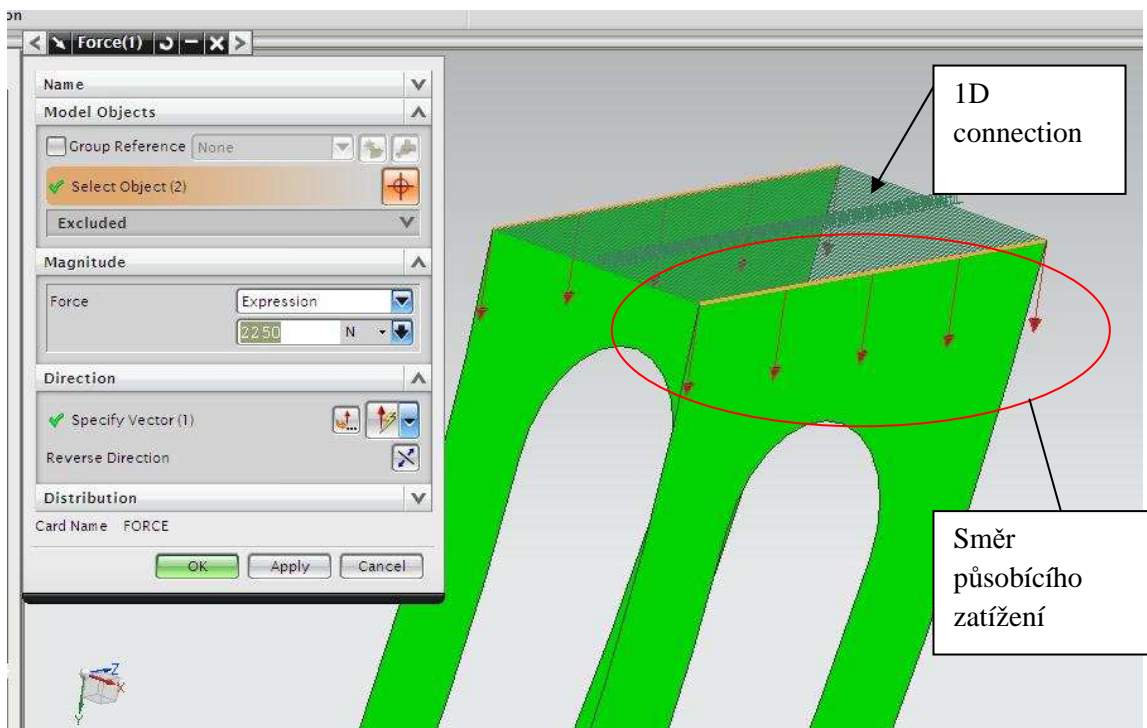
Obr. 27 Fixed constrain

5.2. Simulace zatížení

V zadání této práce jsou nadefinovány čtyři různé druhy zatížení, které vytváří tlak vzduchu na plochu přítlačného křídla. Předpokladem je rovnoměrné zatížení obou plechů. Pro každý druh zatížení je nutné správně nadefinovat směr, velikost a místo působení daných sil, aby byly získány výsledky, které se budou přibližovat skutečnosti.

5.2.1. Zatížení ze shora

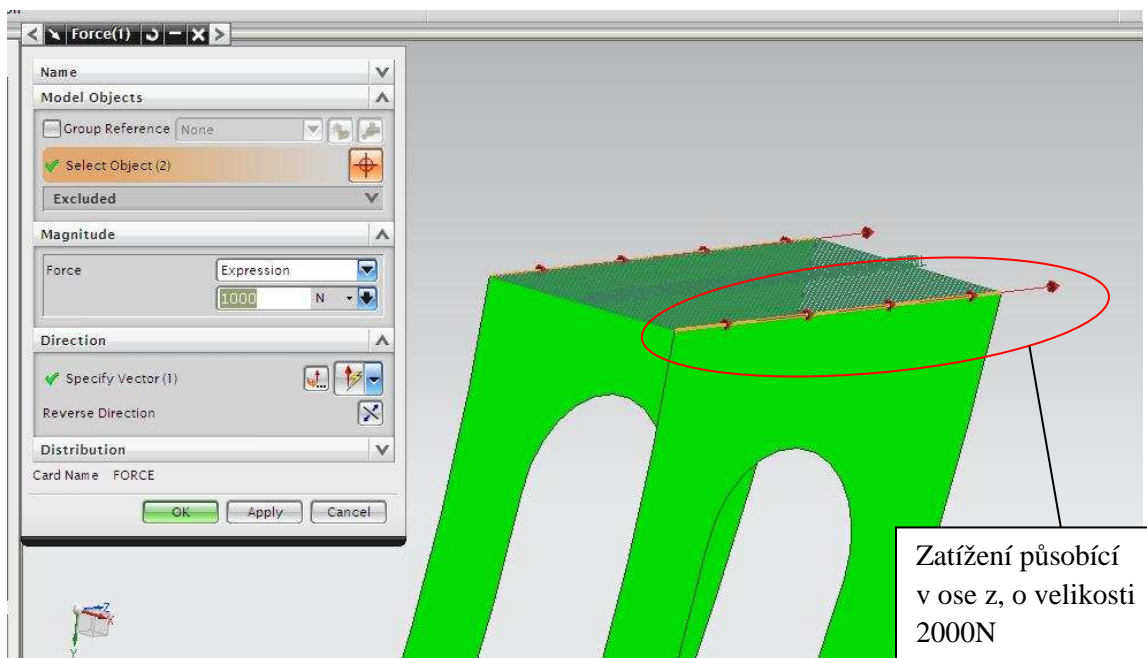
Toto zatížení simuluje tlak vzduchu, který působí na přítlačné křídlo během jízdy v maximálních rychlostech. Mezi oběma plechy byla použita pevná vazba 1D connection, jenž znázorňuje pevné uchycení obou plechů v křídle a tím je mezi nimi vymezena konstantní vzdálenost. Zatížení je definováno na 4500N, tedy na každý plech působí síla o velikosti 2250N. Na obr. 28, je zobrazena velikost a směr daného typu namáhání.



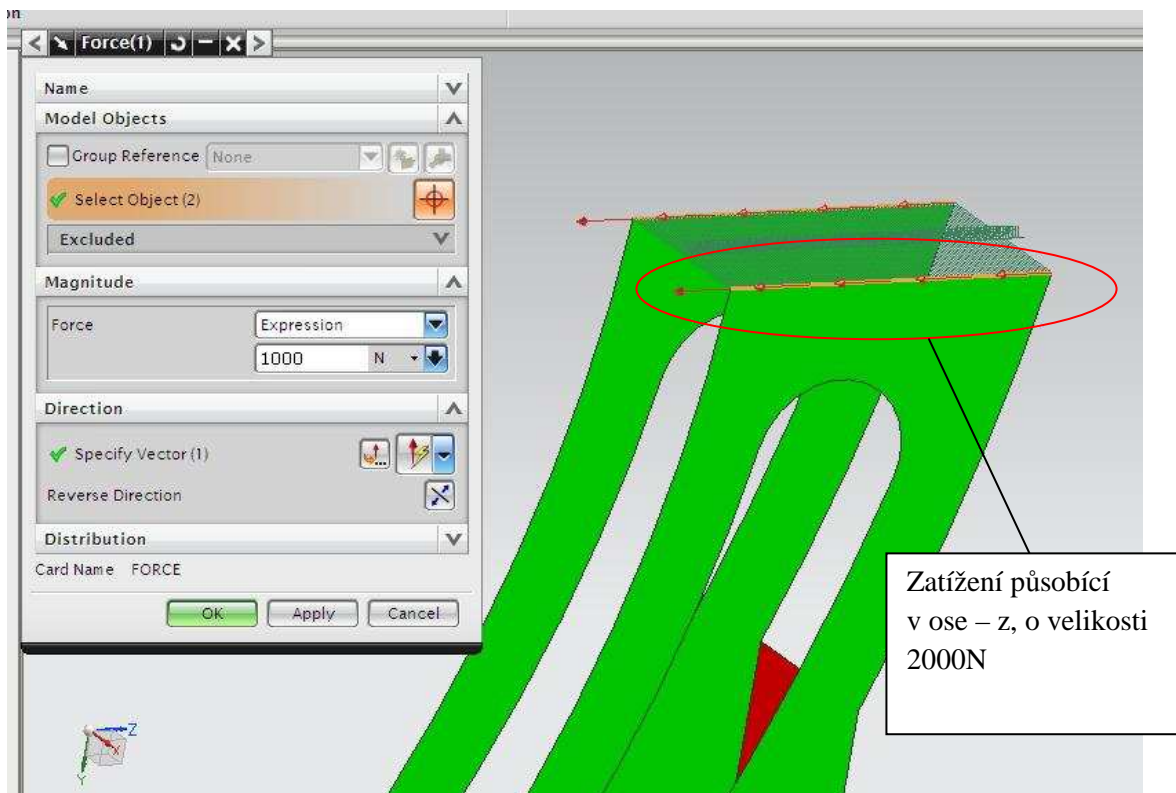
Obr. 28 Síla ze shora

5.2.2. Zatížení při akceleraci a brzdění

Tento typ namáhání je způsoben akcelerací a brzděním. Na *obr. 29* a *30* je zobrazena síla, jež může dosáhnout i velikosti 2000N, proto na každý plech působí 1000N.



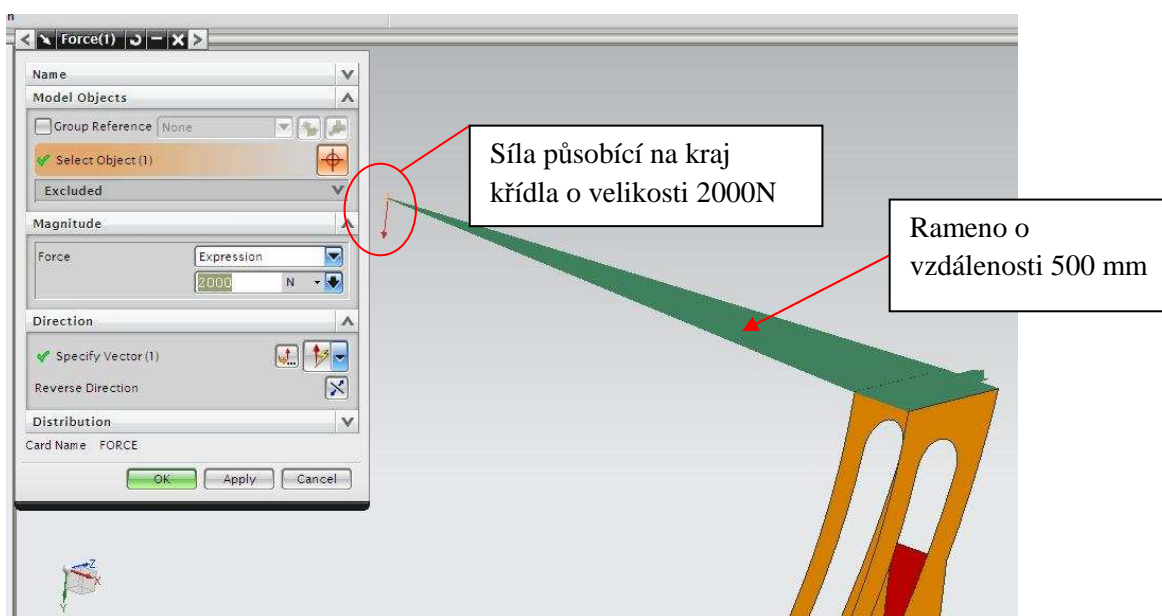
Obr. 29 Síla při akceleraci



Obr. 30 Síla při brzdění

5.2.3. Zatížení na kraj křídla

Toto namáhání je extrémní případ, který by mohl nastat při jízdě za zhoršených povětrnostních podmínek. Pokud není uchycení dostatečně tuhé oproti jednostrannému zatížení, hrozí rozkmitání přítláčného křídla. Síla působí na rameni o velikosti 500 mm, viz obr. 31. Pomocí 1D connection je simulováno toto rameno. Velikost zatížení je 2000 N.



Obr. 31 Síla na stranu

6. Dimenzování

V této části bude součást namáhána nadefinovanými zatíženími. Hlavním úkolem dimenzování je nalezení optimálních rozměrů, jež budou vyhovovat z hlediska tuhosti konstrukce při její minimální hmotnosti.

6.1. Varianta A

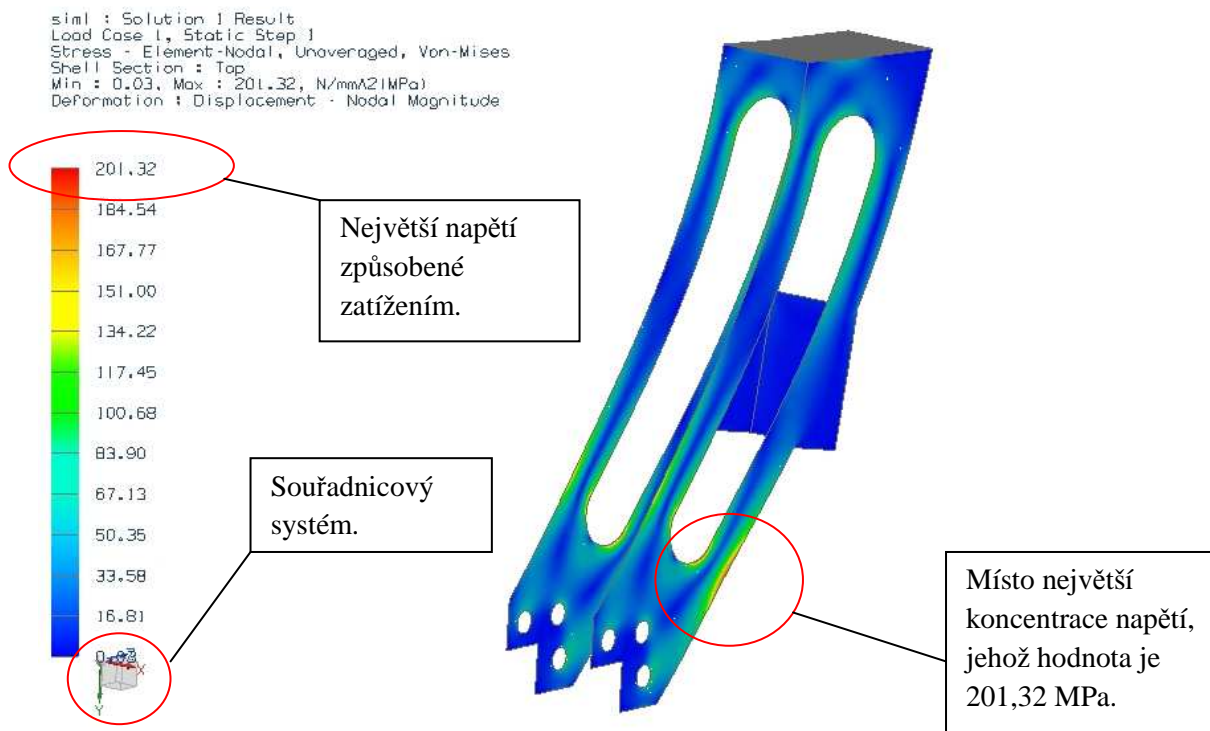
Jako výchozí rozměry byly zvoleny:

tloušťka bočních plechů..... $t_1 = 2,5 \text{ mm}$

tloušťka spojovacího plechu... $t_2 = 2,5 \text{ mm}$

6.1.1. Napětí a posunutí při působení síly v ose y

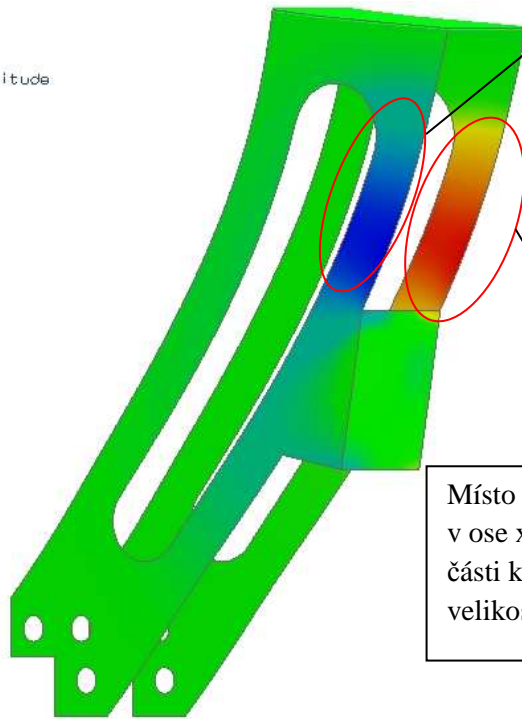
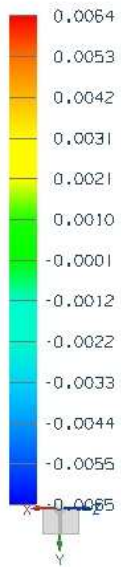
Zatížení působí směrem ze shora o velikosti $F = 4500 \text{ N}$. Na obr. 32 je zobrazeno místo, kde je koncentrace napětí největší o velikosti 201,32 MPa.



Obr. 32 Maximální napětí při působení síly v ose y

Důležitou hodnotou je také posunutí, které vykoná součást při zatížení. Pokud nebude konstrukce dostatečně tuhá, dojde k rozkmitání křídla během jízdy a následkem by mohla být i destrukce uchycení. Velikosti posunutí a místa největšího posuvu, jsou znázorněny na obr. 33, 34, 35.

sim1 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, X
Min : -0,0065, Max : 0,0064, mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

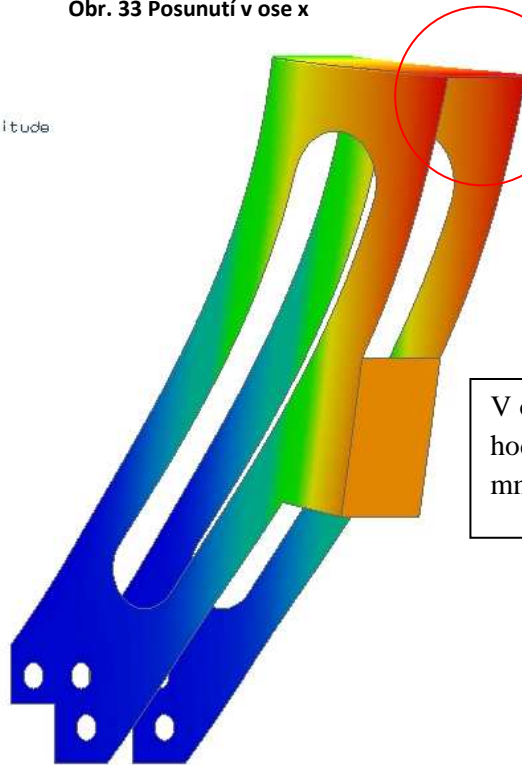
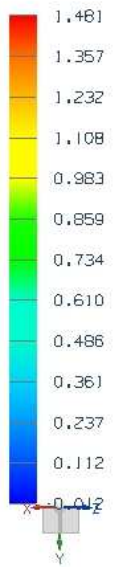


V tomto místě se součást posune o -0,065 mm. Konstrukce se tedy pod tímto zatížením přetáčí.

Místo největšího posuvu v ose x, se nachází v horní části konstrukce a jeho velikost je 0,0064 mm.

Obr. 33 Posunutí v ose x

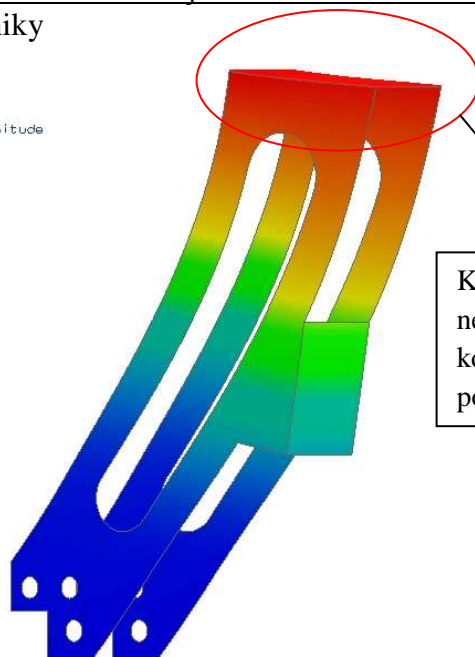
sim1 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Y
Min : -0,012, Max : 1,481, mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



V ose y, je maximální hodnota posunutí 1,481 mm.

Obr. 34 Posunutí o ose y

siml : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Displacement : Nodal, Z
Min : -0,012, Max : 2,676, mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Konstrukce vykoná největší posuv v ose z, kde dosáhne velikost posunutí 2,676 mm.

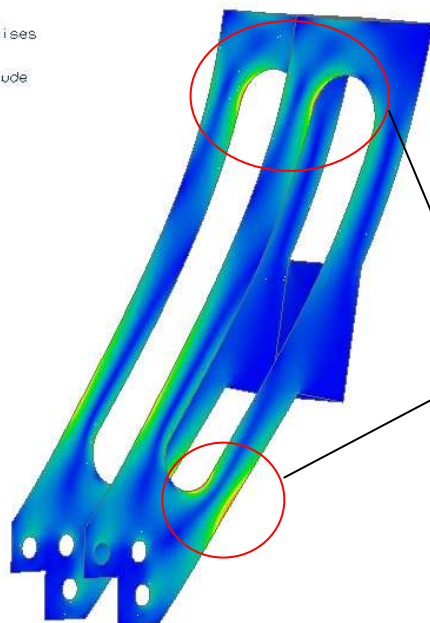
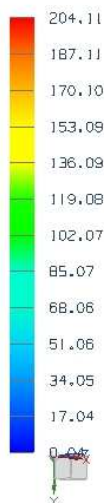
Obr. 35 Posunutí v ose z

Z výsledných hodnot vyplývá, že daný typ zatížení nemá pro součást destruktivní účinek. Napětí a posunutí vyhovuje, za předpokladu použití uměle vystárnutého hliníku viz Tab. 1. Maximální napětí, které se v součásti koncentruje, dosáhne velikosti 201,32 MPa a největší posunutí vykoná konstrukce v ose z o velikosti 2,676 mm.

6.1.2. Napětí a posunutí při působení síly v ose z (při akceleraci)

V ose z, je úchytka namáhána silou o velikosti $F = 2000$ N. Na obr. 36 je znázorněno největší napětí, jež se v součásti nachází. Posunutí součásti při daném směru zatížení je vyobrazeno na obr. 37, 38, 39.

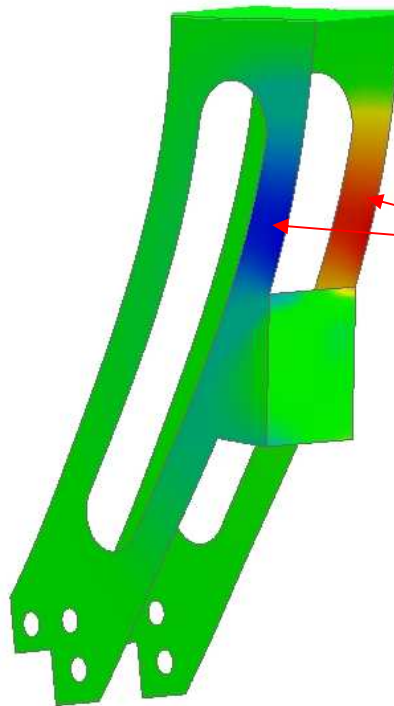
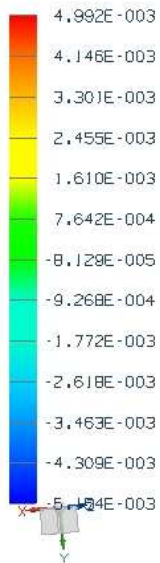
siml : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Stress : Element-Nodal, Unaveraged, Von-Mises
Shell Section : Top
Min : 0,04, Max : 204,11, N/mm2(MPa)
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Při namáhání silou o velikosti 2000 N, se v těchto místech koncentruje napětí o velikosti 204,11 MPa.

Obr. 36 Maximální napětí při působení síly v ose z

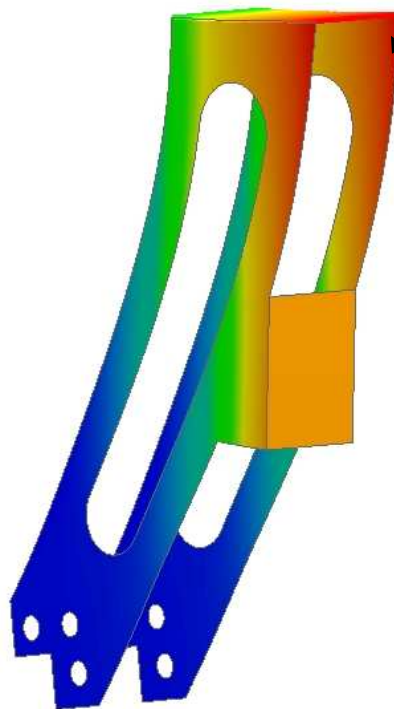
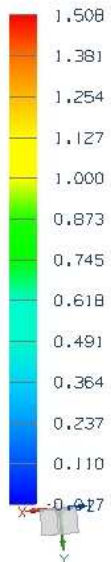
sim1 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, X
Min : -5,154E-003, Max : 4,992E-003, mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



V ose x je posunutí téměř nulové.

Obr. 37 Posunutí v ose x

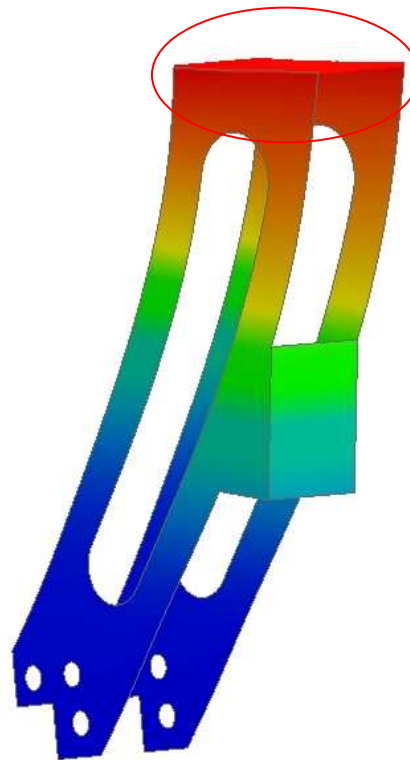
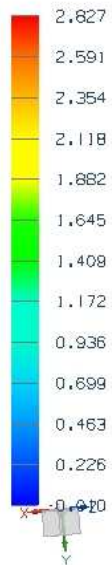
sim1 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Y
Min : -0,017, Max : 1,508, mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Horní část konstrukce vykoná posuv o velikosti 1,508 mm.

Obr. 38 Posunutí v ose y

sim1 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Z
Min : -0.010, Max : 2.827, mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



V ose z, je velikost posunutí 2,827 mm.

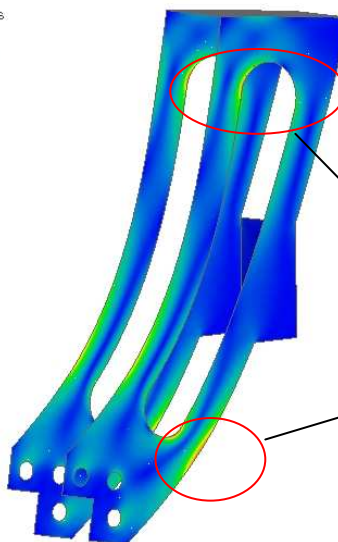
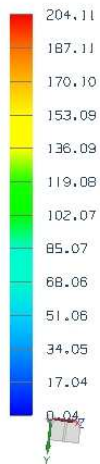
Obr. 39 Posunutí v ose z

Pro tento druh zatížení, daná konstrukce vyhovuje. Napětí 204,11 MPa je pro uměle vystárnutý hliník přípustné a největší posunutí, jenž se nachází v ose z, jehož velikost dosáhne maximální hodnoty 2,827 mm je v dané toleranci 5 mm.

6.1.3. Napětí a posunutí při zatížení v ose – z (při brzdění)

Velikost zatížení bude $F = 2000\text{N}$. Výsledky této simulace jsou shodné jako v předchozím případě.

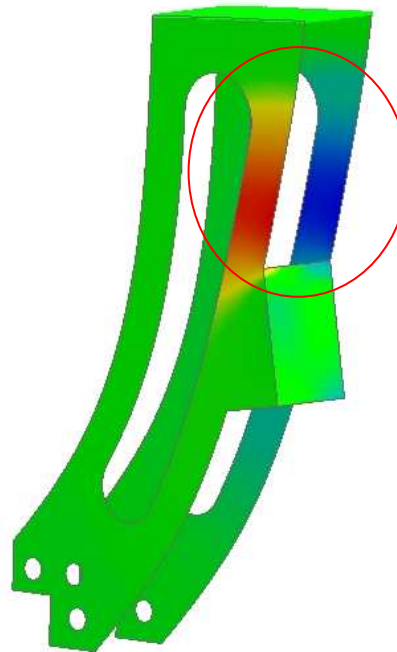
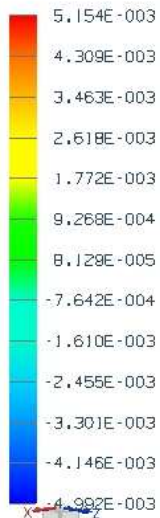
sim1 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Stress - Element-Nodal, Unaveraged, Von-Mises
Shell Section : Top
Min : 0.04, Max : 204.11, N/mm²(MPa)
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Místa největší koncentrace napětí o velikosti 204,11 MPa.

Obr. 40 Maximální napětí při působení síly v ose – z

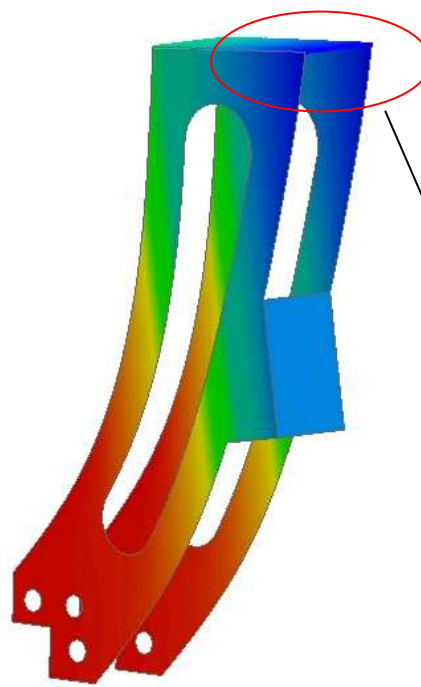
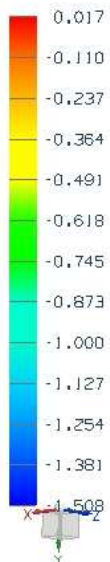
sim1 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, X
Min : -4,992E-003, Max : 5,154E-003, mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



V ose x, se konstrukce posune o minimální hodnoty. Z obrázku je patrné, že konstrukce je náchylná k přetáčení

Obr. 41 Posunutí v ose x

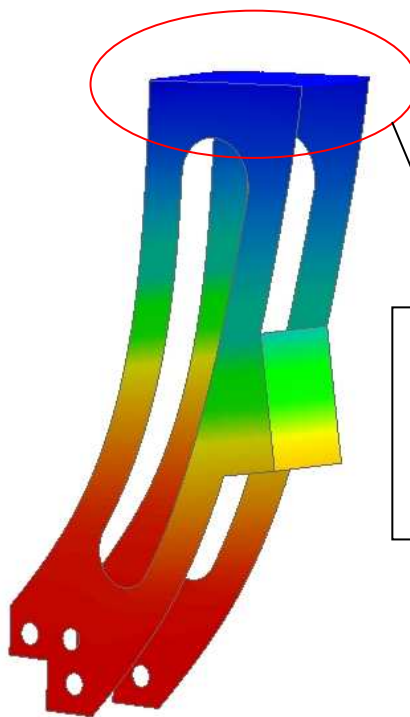
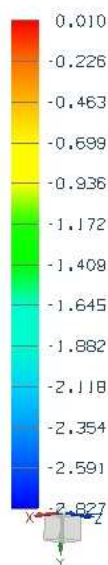
sim1 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Y
Min : -1,508, Max : 0,017, mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Pokud je součást namáhána tlakem ze zadu, v ose y se horní část posune o 1,508 mm.

Obr. 42 Posunutí v ose y

sim1 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Z
Min : -2.827, Max : 0.010, mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



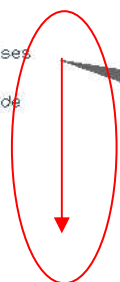
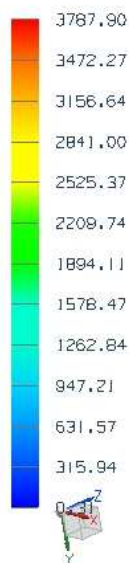
Síla, o velikosti 2000N, působící na součást ze zadu, způsobí posunutí v ose z o délku 2,827 mm.

Obr. 43 Posunutí v ose z

6.1.4. Napětí a posunutí při zatížení v ose y na rameni o velikosti 500 mm

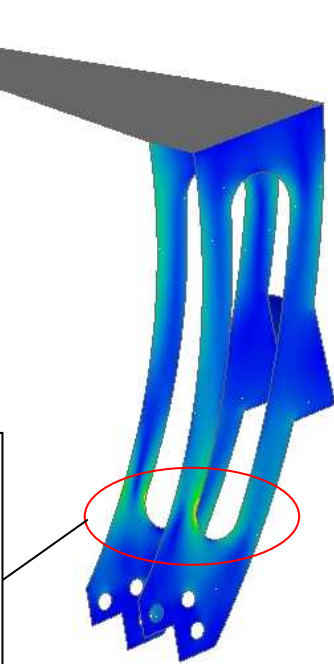
Toto namáhání je extrémní případ, což vyplývá i z výsledků této simulace. Z napětí (obr. 44) a posunutí (obr. 45, 46, 47) je patrné, že konstrukce uchycení přítláčného křídla bude dimenzována podle tohoto typu zatížení.

sim1 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Stress - Element-Nodal, Unaveraged, Von-Mises
Shell Section : Top
Min : 0.31, Max : 3787.90, N/mm²MPa
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



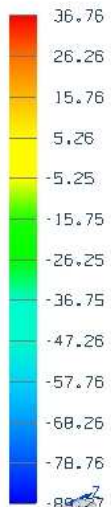
Místo působící síly o velikosti 2000N.

Koncentrace napětí o velikosti 3787,90 MPa, se nachází ve spodní části. Pro tuto konstrukci je toto napětí nepřijatelné

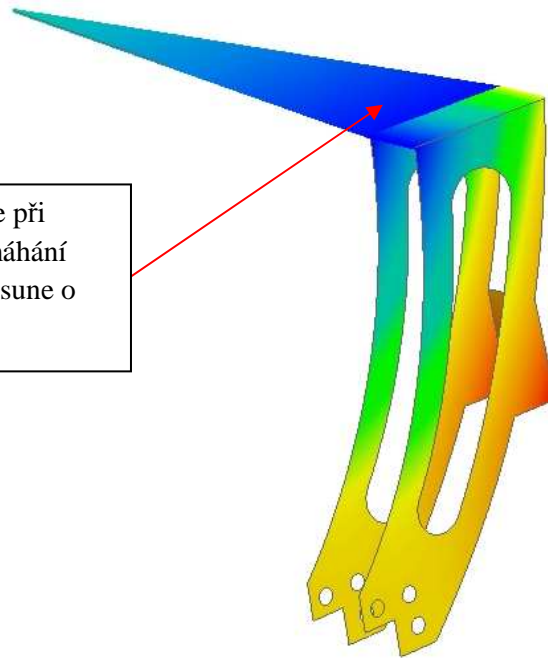


Obr. 44 Maximální napětí při zatížení v ose y

sim1 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, X
Min : -89.27, Max : 36.76, mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

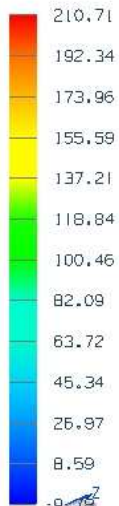


V ose x, se při tomto namáhání součást posune o 88,2 mm.

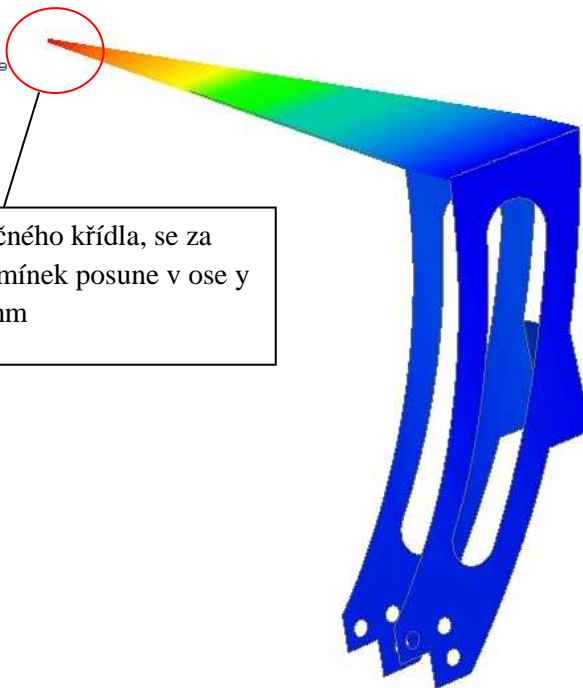


Obr. 45 Posunutí v ose x

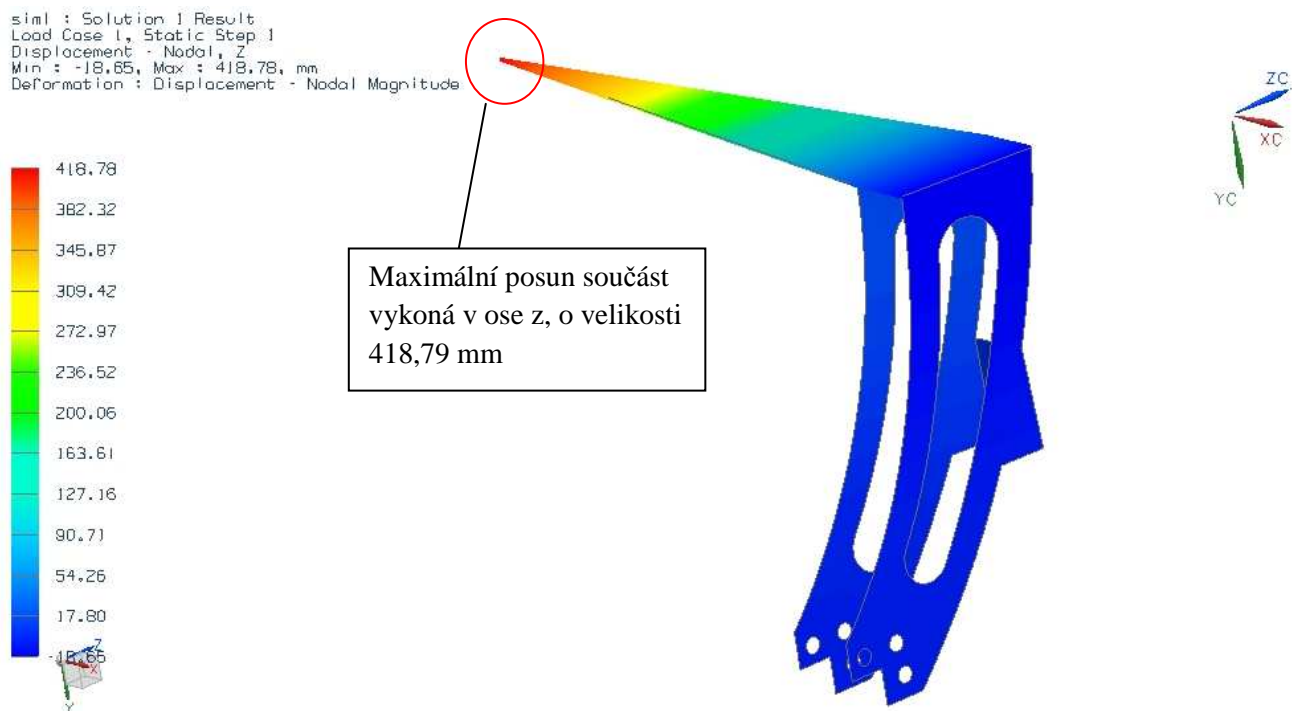
sim1 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Y
Min : -9.76, Max : 210.71, mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Kraj přítláčného křídla, se za těchto podmínek posune v ose y o 210,71 mm



Obr. 46 Posunutí v ose y



Obr. 47 Posunutí v ose z

6.1.5. Tabulka výsledků

směr zatížení	y	z	-z	y (ohyb)
σ_{\max} [MPa]	201,32	204,11	204,11	3787,9
	(obr. 32)	(obr. 36)	(obr. 40)	(obr. 44)
posunutí v ose x [mm]	0,65	0,0049	0,00515	89,27
	(obr. 33)	(obr. 37)	(obr. 41)	(obr. 45)
posunutí v ose y [mm]	1,481	1,508	1,508	210
	(obr. 34)	(obr. 38)	(obr. 42)	(obr. 46)
posunutí v ose z [mm]	2,676	2,827	2,827	418,78
	(obr. 35)	(obr. 39)	(obr. 43)	(obr. 47)

Tab. 2 Napětí a posunutí při t=2,5mm

Z tabulky výsledků je zřejmé, že při namáhání v osách y, z a -z, se napětí a posunutí odpovídá vyhovujícím hodnotám, při použití uměle vystárnutého hliníkového plechu (viz. Tab. 1).

Hodnoty pro ohyb dosahují velikostí, které jsou pro součást destruktivní. Dalším měřením, bylo zjištěno, že daný typ konstrukce není dostatečně tuhý, při jednostranném namáhání, ani

po zvýšení tloušťky plechu na 5 mm. Dalším krokem, při navrhování optimální konstrukce, bude zvýšení vzdálenosti mezi plechy a následně úprava odlehčení.

Rozhodující faktor pro návrh konstrukce je zatížení na kraji přitlačného křídla, protože tyto hodnoty dosahují největších velikostí.

7. Změna geometrie a typu uchycení

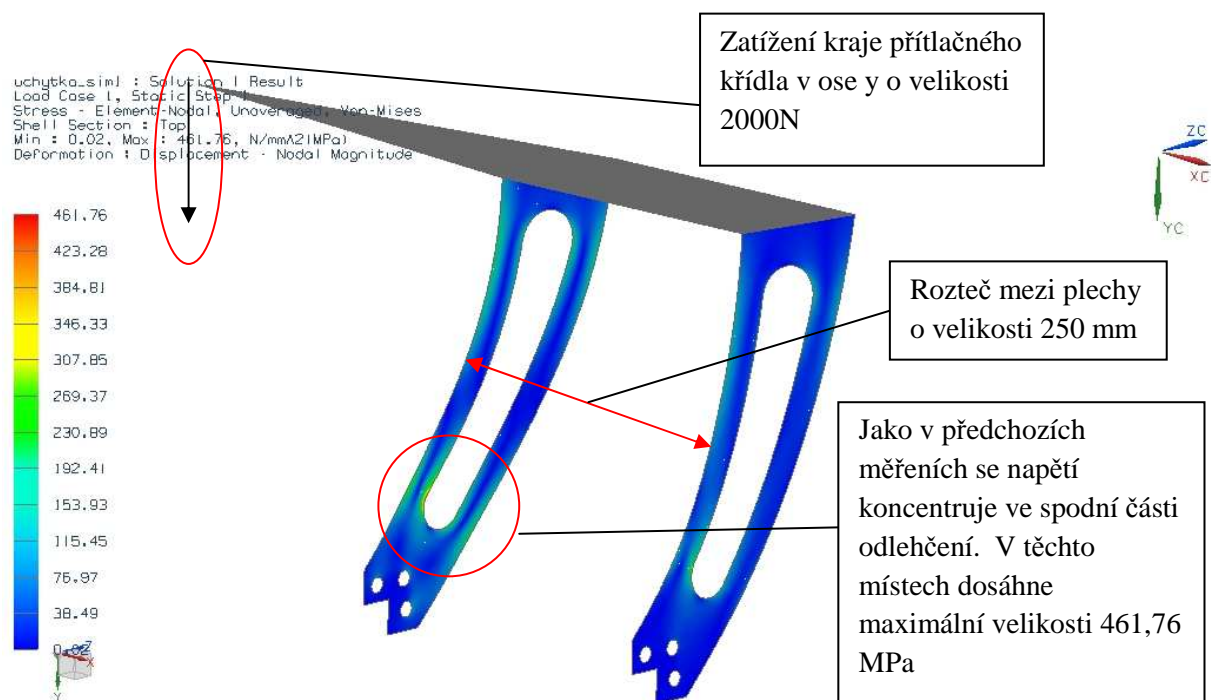
Pro nalezení optimálního uchycení je nutné změnit vzdálenosti mezi plechy a geometrii odlehčení, kde se nachází největší koncentrace napětí na součásti, jak bylo zjištěno předchozím měřením.

Rám, na kterém je tato součást uchycena dovoluje, aby součásti držící křídlo, byly vzdáleny až 300 mm.

7.1. Varianta B

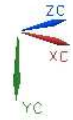
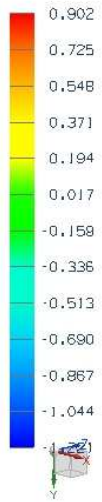
Nejdříve bude měřeno napětí a posunutí při změně roztečné vzdálenosti mezi plechy, pokud hodnoty nebudou vyhovovat, bude dalším krokem úprava odlehčení.

Pro zmenšení velikosti ramene, na kterém působí síla na ohyb, bude stanovena vzdálenost mezi plechy na 250 mm. Spojovací plech je z konstrukce odstraněn, protože z předešlých výsledků vyplývá, že tato část nemá rozhodující vliv na pevnost uchycení. Rozhodujícím faktorem pro tuhost konstrukce je roztečná vzdálenost mezi plechy. Tloušťka stěn obou plechů, bude ponechána hodnotě 5 mm.



Obr. 48 Maximální napětí při zatížení v ose y

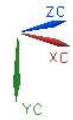
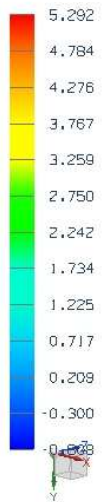
uchytka_sim1 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, X
Min : -1,221, Max : 0,902, mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



V ose x je daný
typ konstrukce
dostatečně tuhý.
Posunutí dosáhne
velikosti 0,902
mm.

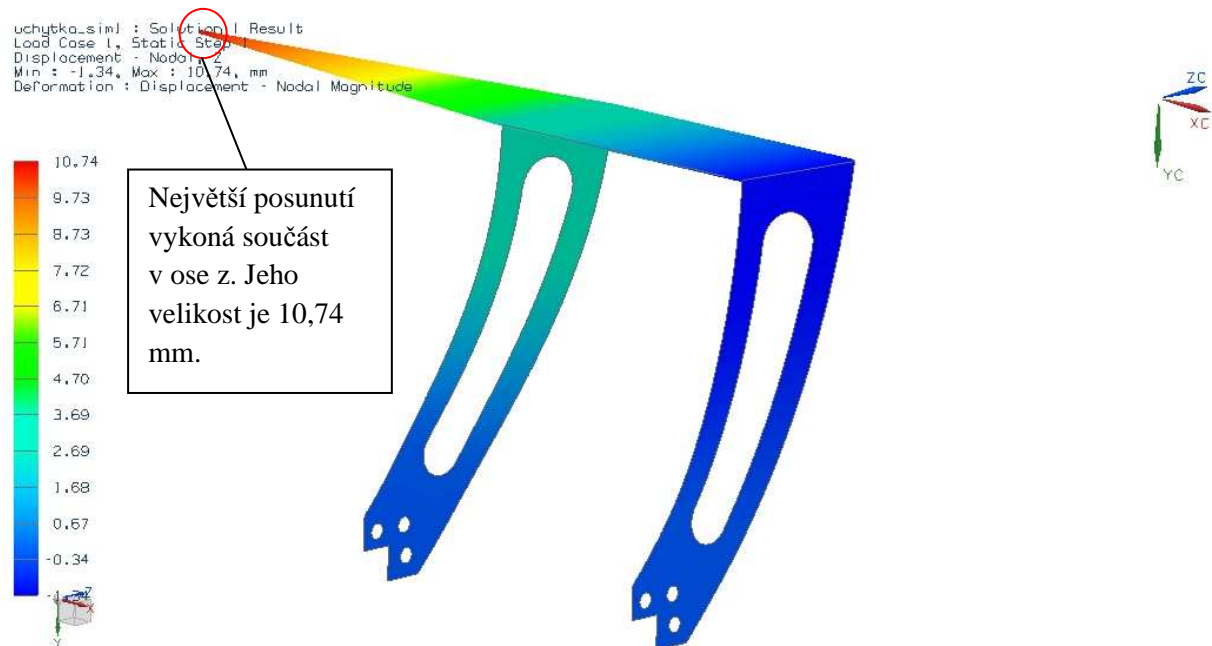
Obr. 49 Posunutí v ose x

uchytka_sim1 : Solution 1 Result
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Y
Min : -0,808, Max : 5,292, mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Kraj přítláčného
křídla se v ose y
posune o 5,292 mm

Obr. 50 Posunutí v ose y



Obr. 51 Posunutí v ose z

7.1.1. Tabulka výsledků

Směr zatížení	y
σ_{\max} [MPa]	461,76 (obr. 48)
posunutí v ose x [mm]	1,221 (obr. 49)
posunutí v ose y [mm]	5,229 (obr. 50)
posunutí v ose z [mm]	10,74 (obr. 51)

Tab. 3 Výsledky měření

V důsledku zvýšení vzdálenosti mezi plechy, kleslo napětí, jež se v součásti koncentruje. Ovšem napětí o velikosti 461,76 MPa je pro daný typ materiálu nepřijatelné.

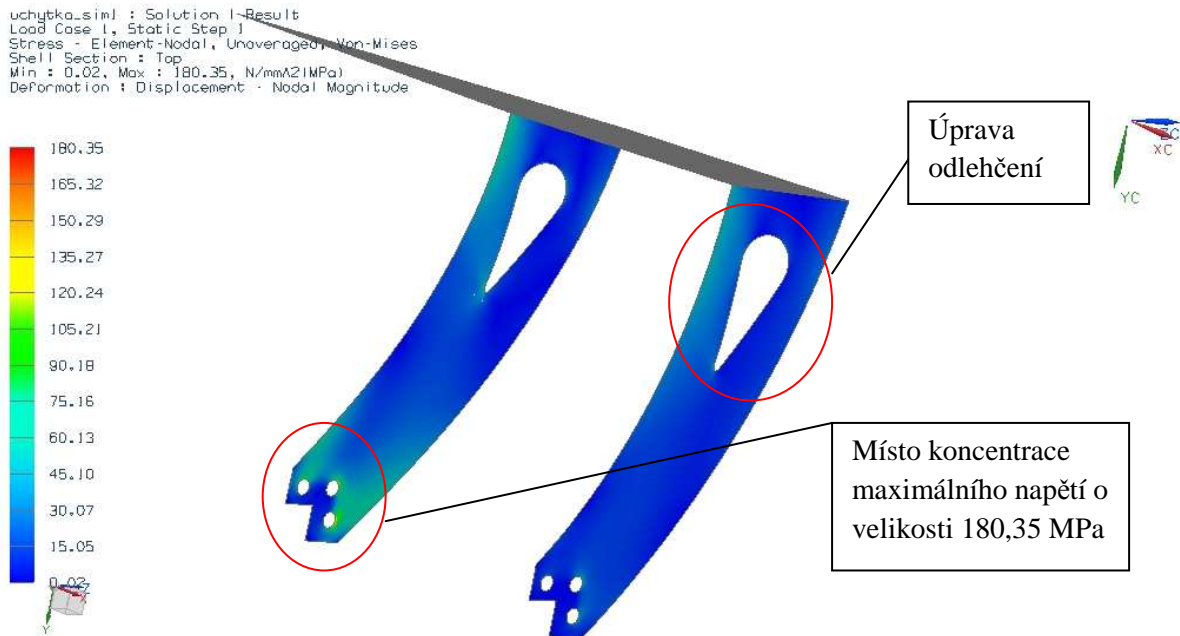
Z obr. 48 je patrné, že největší koncentrace napětí se nachází ve spodní části odlehčení, z čehož vyplývá nutnost úpravy geometrie.

Maximální posunutí o velikosti 10,74 mm, které se nachází v ose z, značí, že křídlo má tendenci uhybat do strany.

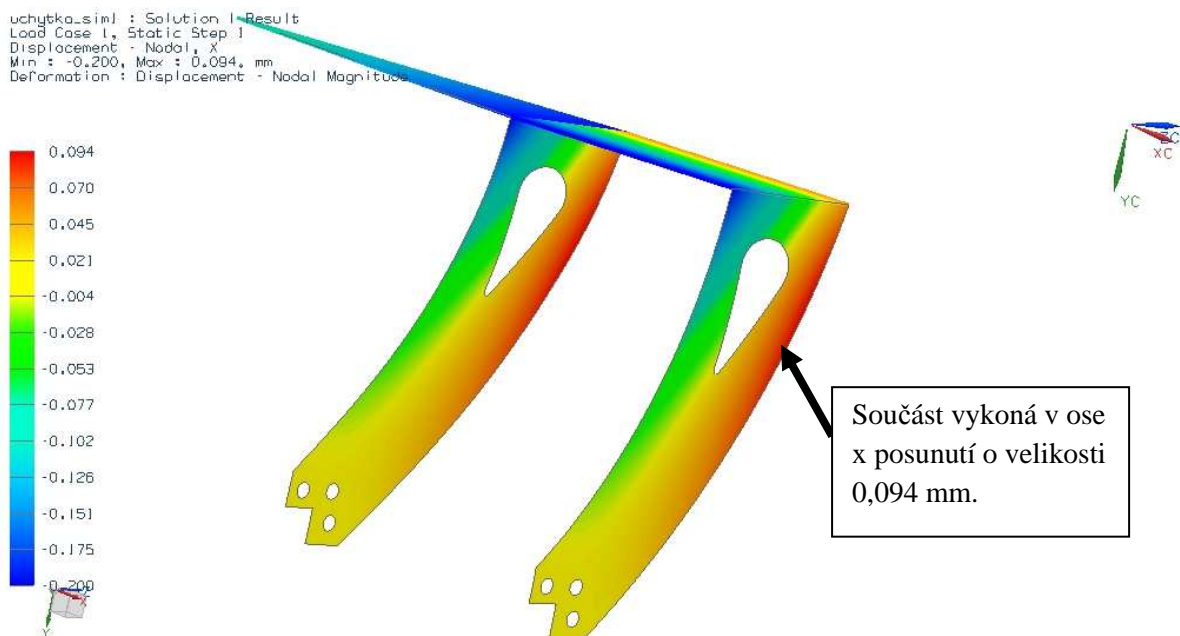
Zkrácením ramene, na kterém působí síla, došlo ke zlepšení vlastností při namáhání v ohybu. Ovšem tyto výsledky jsou z pevnostního a tuhostního hlediska nepřijatelné.

7.2. Varianta C

Zkrácení ramene, na němž vzniká ohybové napětí, značně zlepšilo tuhost uchycení. Aby se křídlo nepřetáčelo do stran, bude nutné změnit geometrii odlehčení.

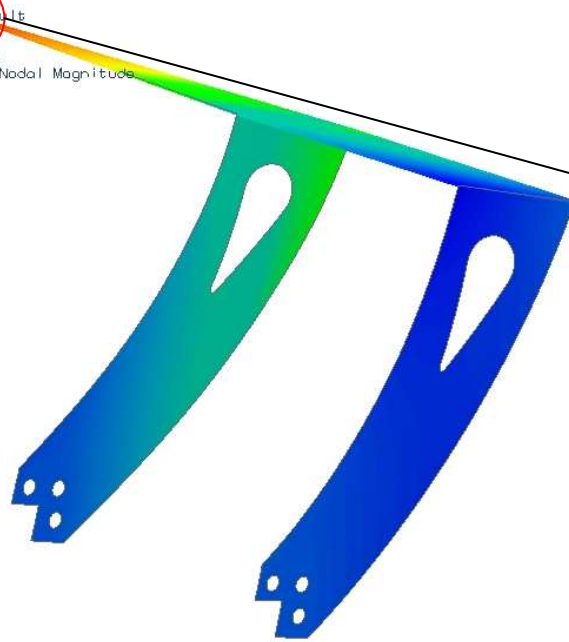
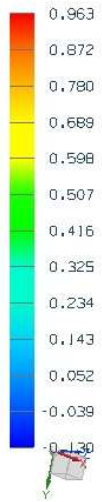


Obr. 52 Maximální napětí při zatížení v ose y



Obr. 53 Posunutí v ose x

uchytka_sim1 : Solution 1 - Result
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Y
Min : -0.130, Max : 0.963, mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

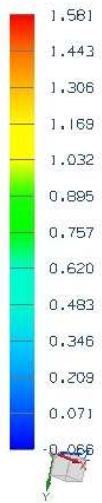


Kraj
přítláčneh
o křídla
vykoná
posuv
v ose y o
velikosti
0,963 mm

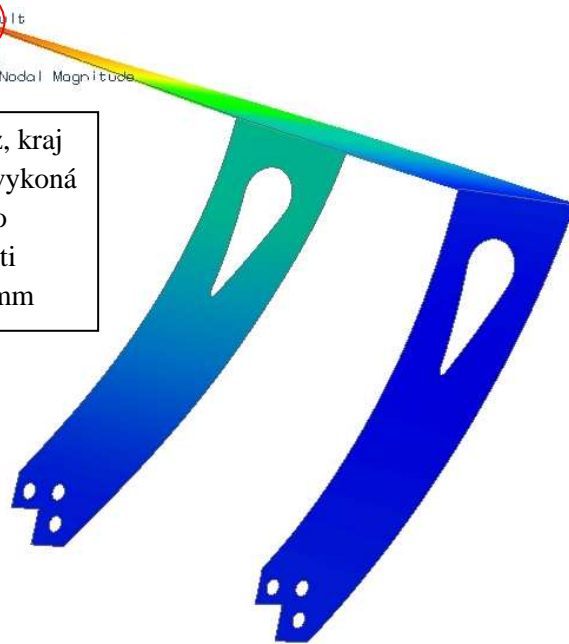


Obr. 54 Posunutí v ose y

uchytka_sim1 : Solution 1 - Result
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Z
Min : -0.086, Max : 1.581, mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



V ose z, kraj
křídla vykoná
posuv o
velikosti
1,581 mm



Obr. 55 Posunutí v ose z

7.2.1. Tabulka výsledků

Směr zatížení	y
σ_{\max} [MPa]	180,35
	(obr. 52)
posunutí v ose x [mm]	0,2
	(obr. 53)
posunutí v ose y [mm]	0,963
	(obr. 54)
posunutí v ose z [mm]	1,581
	(obr. 55)

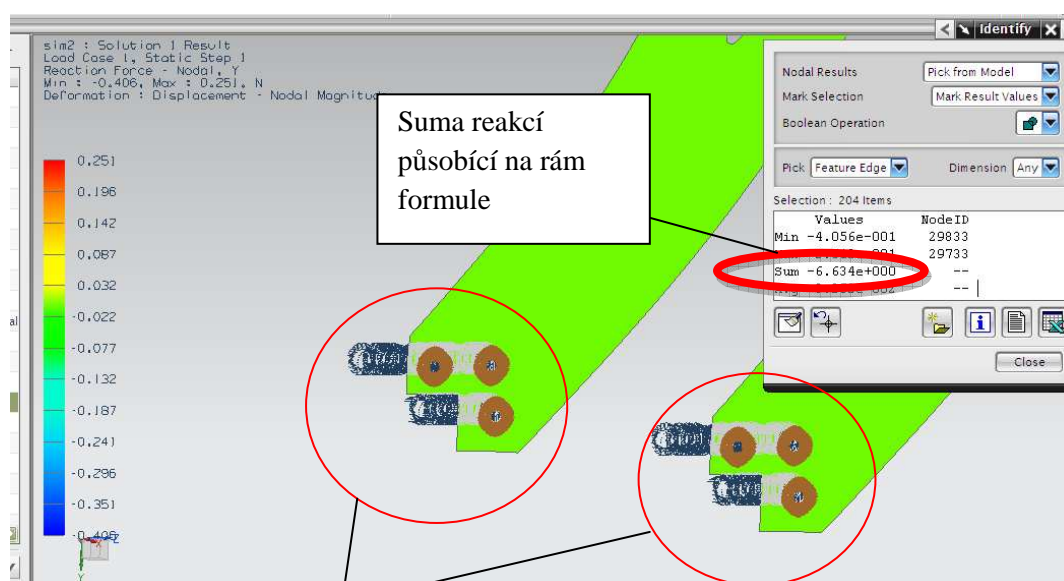
Tab. 4 Výsledky měření

Výsledky tohoto měření udávají, že maximální posunutí nastane v ose z o velikosti 1,581 mm, jež je z hlediska tuhosti součásti přípustné.

Napětí dosáhne maximální velikosti 180,35 MPa a tím daná konstrukce odpovídá i pevnostnímu kritériu, protože mez kluzu, u uměle vystárnutého hliníku, má velikost 260 MPa.

8. Váha součásti

Pokud chceme zjistit váhu výsledného uchycení, bude součást zatížena vlastní gravitací a následně se odečte velikost reakce v uchycení. Z obr. 56 vyplývá, že součást působí na rám silou o velikosti 6,634N. Z toho vyplývá, že jeden plech má hmotnost 0,332 kg.



Grafické znázornění reakcí

Obr. 56 Váha součásti

9. Zhodnocení výsledků

Tímto měření byla zjištěna optimální konstrukce uchycení přitlačného křídla, které je namáháno více druhy zatížení.

V první části byla hledána vhodná tloušťka plechu. Z výsledků měření bylo zjištěno, že vhodná síla stěny, která zajišťuje dostatečně tuhé uchycení je maximální tloušťka dodávaná výrobcem, tedy $t = 5\text{mm}$.

Při měření bylo také zjištěno, že svařená konstrukce, která je tvořena třemi plechy, nevyhovuje pro jednostranné zatížení. Hrozilo by rozkmitání křídla.

Jako další bylo nutné vyřešit konstrukci tak, aby posunutí konce křídla bylo minimální. Dovolená hodnota byla stanovena na 5 mm. Vyhovují tvar konstrukce je **Varianta C**.

Hlavním důvodem pro vysoké napětí, které v součásti vznikalo vlivem ohybového zatížení, bylo ve velikosti ramene, na němž zatížení působilo. Jako ideální vzdálenost, vyšla z výsledků měření hodnota **250mm**.

V důsledku snížení velikosti ramene, se posunutí ve svislé ose přiblížilo k dovolené hodnotě 5,229 mm, ovšem geometrie odlehčení by umožňovala křídlu posouvat se ve vodorovné ose (přetáčet se) o vzdálenost 10,74 mm.

Jako poslední byla řešena geometrie odlehčení. Z měření bylo zjištěno že, ideálním místo pro odlehčení se nachází v horní polovině součásti, kde je úchytka namáhána nejméně.

Oba plechy mají hmotnost 0.664 kg. Při daných typech zatížení je toto minimální hmotnost, kterou může součást mít. Experimentálně bylo zjištěno, že na zadní přitlačné křídlo působí jeden a půl násobek váhy formule, proto musí být konstrukce uchycení dostatečně pevná a tuhá.

Vhodný materiál pro tento typ konstrukce je uměle vystárnutý hliníkový plech **EN AW 6082** s mezí kluzu o velikosti 260 MPa.

Seznam obrázků

Obr. 1 Vzduchový vír za letadlem ¹	11
Obr. 2 Zviditelňování vzduchu pomocí kouřových svazků ²	12
Obr. 3 Přilnuté a odtržené proudění [1]	13
Obr. 4 Lamelární a turbulentní proudění [1]	13
Obr. 5 Znázornění Bernoulliho rovnice [1]	14
Obr. 6 Aerodynamické síly a momenty [1]	15
Obr. 7 Seat Leon při závodech cestovních vozů ³	17
Obr. 8 Difuzor používaný u cestovních vozů [1]	18
Obr. 9 Proudění vzduchu okolo cestovních vozů [1]	18
Obr. 10 Jaguar XJR 9 ⁴	19
Obr. 11 Proudění vzduchu okolo prototypů [1]	20
Obr. 12 Proudění vzduchu okolo nezakapotovaných kol [1]	21
Obr. 13 Sauber C30 ⁵	21
Obr. 14 Proudění vzduchu okolo Formule [1]	22
Obr. 15 Přední přítláčné křídlo ⁶	23
Obr. 16 Uchycení a tvary přítláčného křídla [1]	24
Obr. 17 Umístění výfuku do difuzoru [1]	25
Obr. 18 Difuzor Formule 1 ⁷	26
Obr. 19 Zadní přítláčné křídlo ⁸	27
Obr. 20 Efektivita víceplátových zadních křídel [1]	27
Obr. 21 První náčrty formule SAE ⁹	29
Obr. 22 Polyuretanová maketa ⁹	30
Obr. 23 Kompozicová karoserie ⁹	30
Obr. 24 FSAE ¹⁰	31
Obr. 25 Schéma možného uchycení zadního přítláčného křídla	31
Obr. 26 Model součásti	34
Obr. 27 Fixed constrain	35
Obr. 28 Síla ze shora	36
Obr. 29 Síla při akceleraci	36
Obr. 30 Síla při brzdění	37
Obr. 31 Síla na stranu	37
Obr. 32 Maximální napětí při působení síly v ose y	38
Obr. 33 Posunutí v ose x	39
Obr. 34 Posunutí o ose y	39
Obr. 35 Posunutí v ose z	40
Obr. 36 Maximální napětí při působení síly v ose z	40
Obr. 37 Posunutí v ose x	41
Obr. 38 Posunutí v ose y	41
Obr. 39 Posunutí v ose z	42
Obr. 40 Maximální napětí při působení síly v ose – z	42
Obr. 41 Posunutí v ose x	43
Obr. 42 Posunutí v ose y	43
Obr. 43 Posunutí v ose z	44

Obr. 44 Maximální napětí při zatížení v ose y	44
Obr. 45 Posunutí v ose x.....	45
Obr. 46 Posunutí v ose y.....	45
Obr. 47 Posunutí v ose z.....	46
Obr. 48 Maximální napětí při zatížení v ose y	47
Obr. 49 Posunutí v ose x.....	48
Obr. 50 Posunutí v ose y.....	48
Obr. 51 Posunutí v ose z.....	49
Obr. 52 Maximální napětí při zatížení v ose y	50
Obr. 53 Posunutí v ose x.....	50
Obr. 54 Posunutí v ose y.....	51
Obr. 55 Posunutí v ose z.....	51
Obr. 56 Váha součástí.....	52

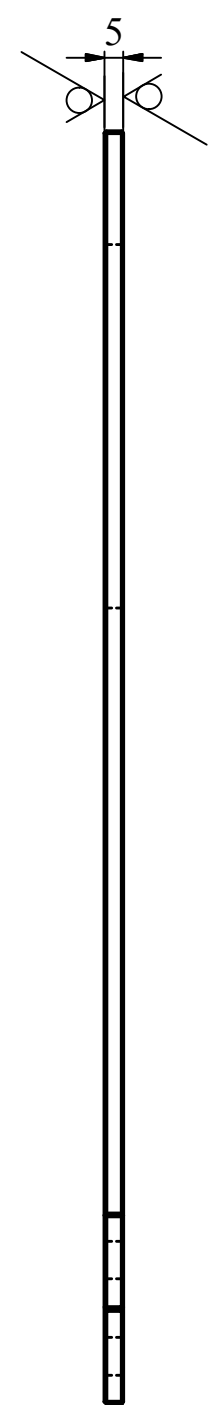
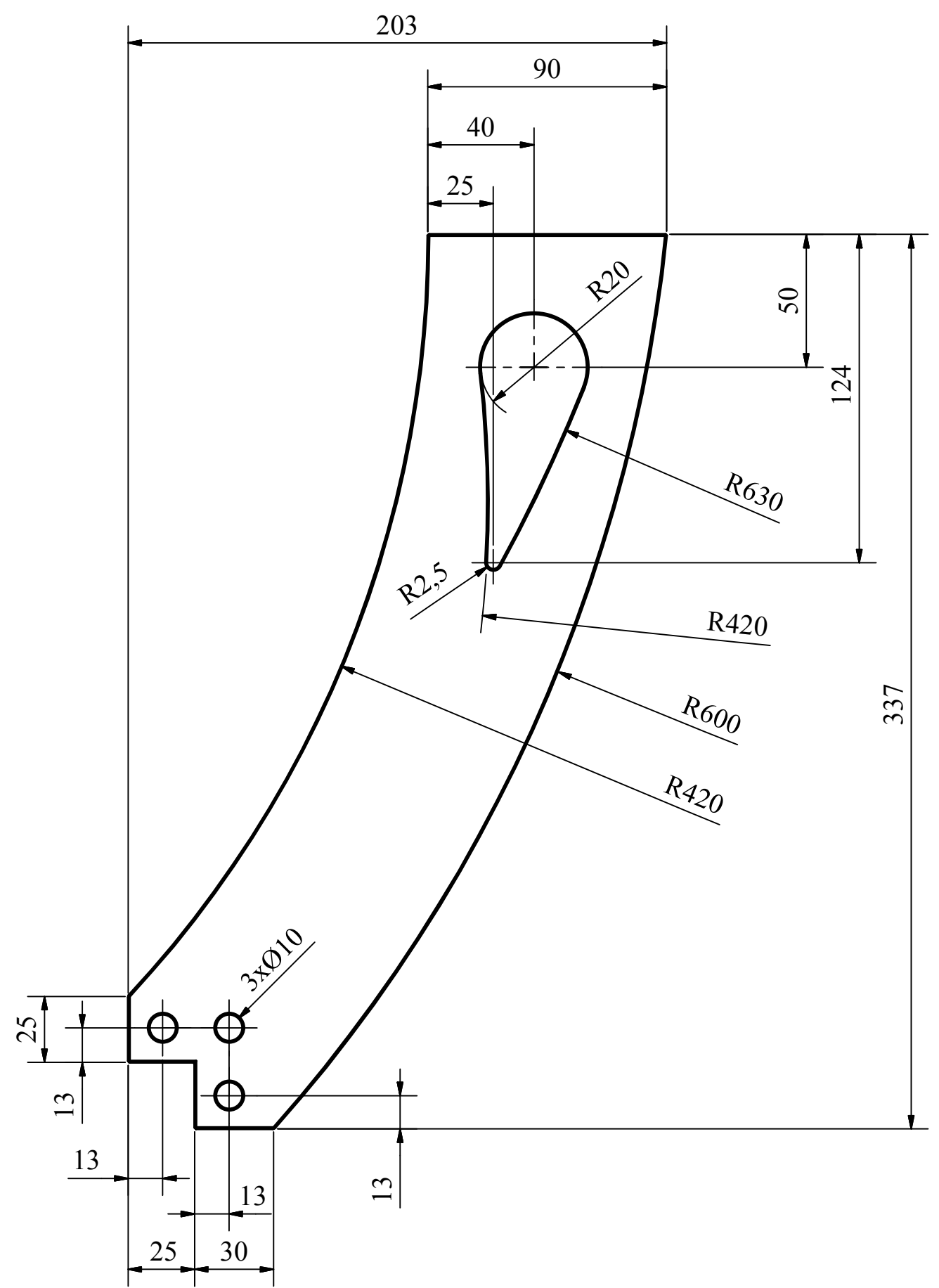
Seznam tabulek

Tab. 1 Mechanické vlastnosti materiálu ¹¹	33
Tab. 2 Napětí a posunutí při $t=2,5\text{mm}$	46
Tab. 3 Výsledky měření	49
Tab. 4 Výsledky měření	52

Použitá literatura

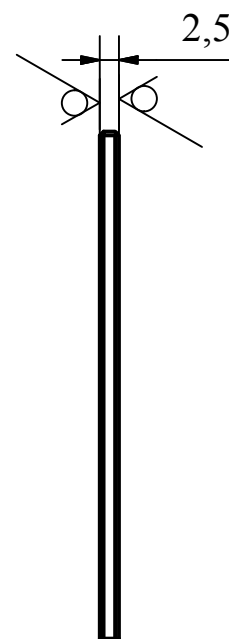
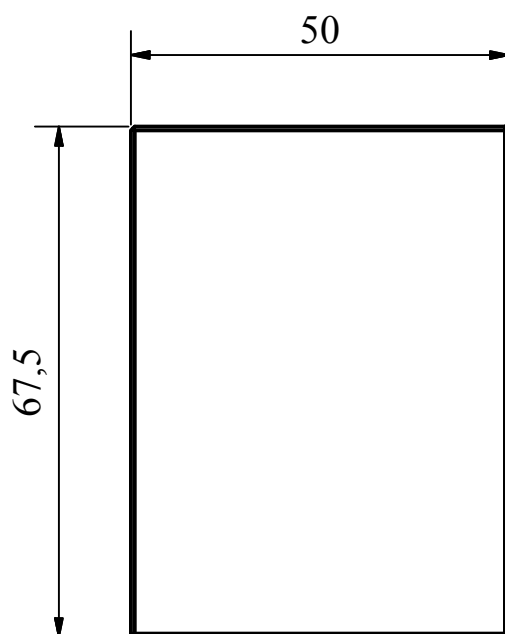

- [1] KATZ, J. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Bentley Publishers, 2006
- [2] WRIGHT, P. *Formula 1 Technology*. Warrendale: SAE International, 2001
- [3] BRAES, H., SEIFFERT, U. *Handbook of Automotive Engineering*. SAE International 2005

Ra 3,2 (✓)



NEKÓTOVANÉ HRANY SRAZIT 0,5x45°

Kreslil Pavel Stránský	Materiál Al	Norma EN AW 6082	1 : 2	Datum 10.3.2012	0.334 kg
FST-ZČU			BP-01-03		Polotovar Plech 5x230x350
			Plech 3		Vydání 1

Ra 3,2 

NEKÓTOVANÉ HRANY SRAZIT 0,5x45°

Kreslil Pavel Stránský	Materiál Al	Norma EN AW 6082	1 : 1	Datum 10.3.2012	0.05 kg
FST-ZČU		BP-01-02		Polotovár Plech 2,5x60x75	
		Plech 2		Vydání 1	List 2/3

Aerodynamické prvky sportovních vozů

Bakalářská práce

Vypracoval: Pavel Stránský
Akademický rok: 2011/2012

Vedoucí práce: Ing. Eva Krónerová, Ph.D.

Osnova prezentace

- Teorie aerodynamiky a druhy proudění
- Základní vzorce pro výpočet proudění
- Vztlak, odpor a boční síly
- Aerodynamické prvky sportovních vozů
- Aerodynamické prvky vozu typu Formule 1

Teorie aerodynamiky a druhy proudění

- Aerodynamika je obor mechaniky, který se zabývá silovým působením proudu vzduchu na těleso při jeho obtékání.
- Proudění vzduchu je relativní.



-Statický tlak

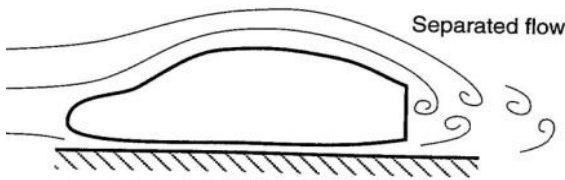
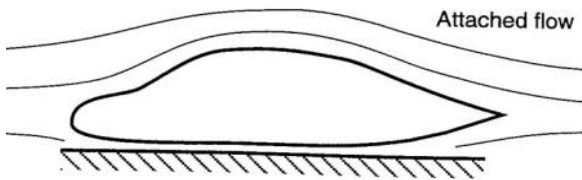
-Dynamický tlak

-Celkový tlak

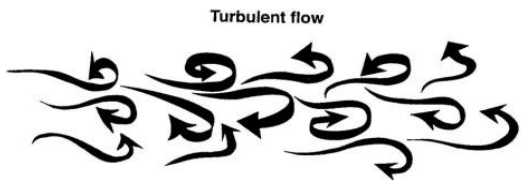
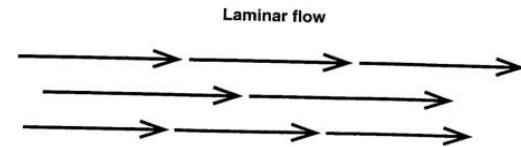
Teorie aerodynamiky a druhy proudění, vzorce pro výpočet proudění

■ Druhy proudění

-přilnuté a odtržené proudění



-lamelární a turbulentní proudění



Reynoldsovo číslo

Udává vztah mezi setrvačnou silou a viskozitou

$$Re = \frac{v_{sd}}{\nu} [-]$$

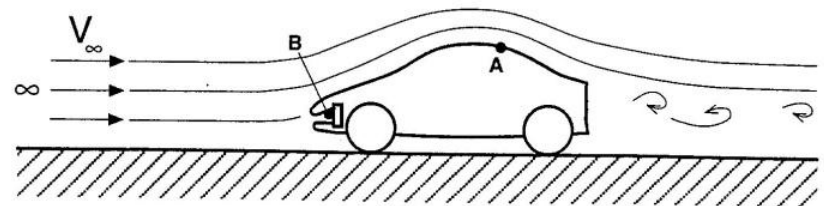
Při výpočtu Reynoldsova čísla u závodních automobilů je vzorec definován takto:

$$Re = \frac{\rho v L}{\nu} [-]$$

Bernoulliho rovnice

Vozidlo, které je v pohybu způsobuje změny směru a velikost rychlosti proudění

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = konst$$



Vztlak, odpor a boční síly

- Celková aerodynamická síla má obecný tvar a velikost a je zapotřebí ji rozložit, proto je nutné zavést vhodný souřadný systém.

Aerodynamický odpor:

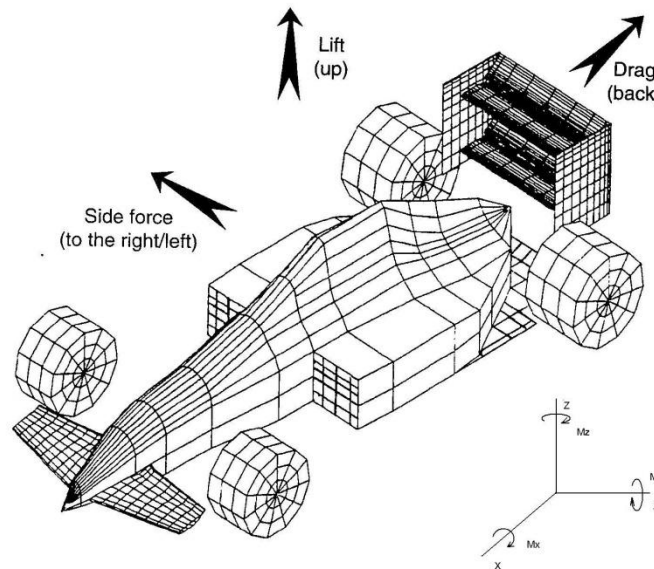
$$F_x = -\frac{1}{2} \cdot c_x \cdot \rho \cdot v_\infty^2 \cdot A$$

Aerodynamická boční síla:

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot c_y \cdot \rho \cdot v_\infty^2 \cdot A$$

Aerodynamický vztlak:

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot c_z \cdot \rho \cdot v_\infty^2 \cdot A$$



Moment klopení:

$$M_x = \frac{1}{2} \cdot c_{Mx} \cdot \rho \cdot v_\infty^2 \cdot A \cdot r$$

Moment klonění:

$$M_y = \frac{1}{2} \cdot c_{My} \cdot \rho \cdot v_\infty^2 \cdot A \cdot l$$

Moment stáčení:

$$M_z = \frac{1}{2} \cdot c_{Mz} \cdot \rho \cdot v_\infty^2 \cdot A \cdot l$$

Aerodynamické prvky sportovních vozů

- Tvar a parametry sportovních vozidel je výsledkem předpisů pro danou závodní skupinu.

-cestovní vozy



-vozy se zakapotovanými koly (prototypy)



-vozy s nezakapotovanými koly (formule)



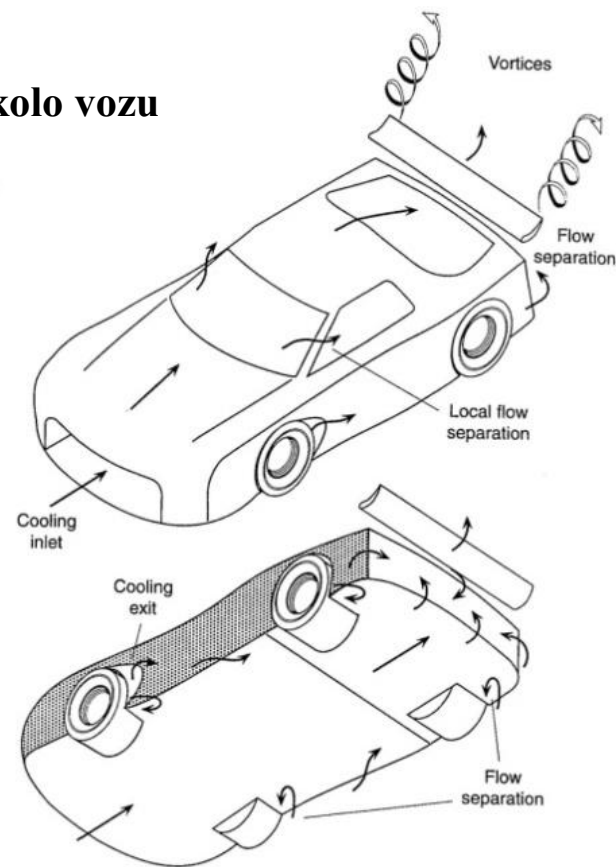
Aerodynamické prvky sportovních vozů

Cestovní vozy

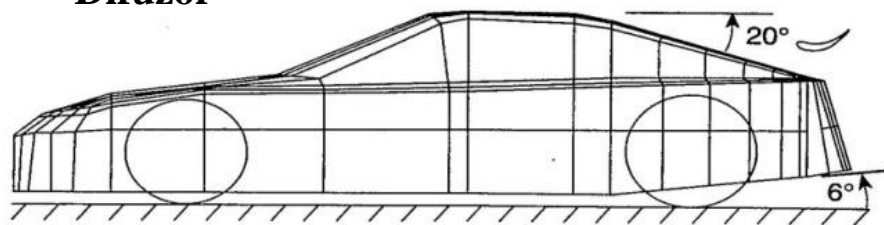
Transformace tvarů cestovních vozů v závodní vozy nezajišťuje velkou úroveň, co se týče aerodynamického efektu.



-Proudění okolo vozu



-Difuzor



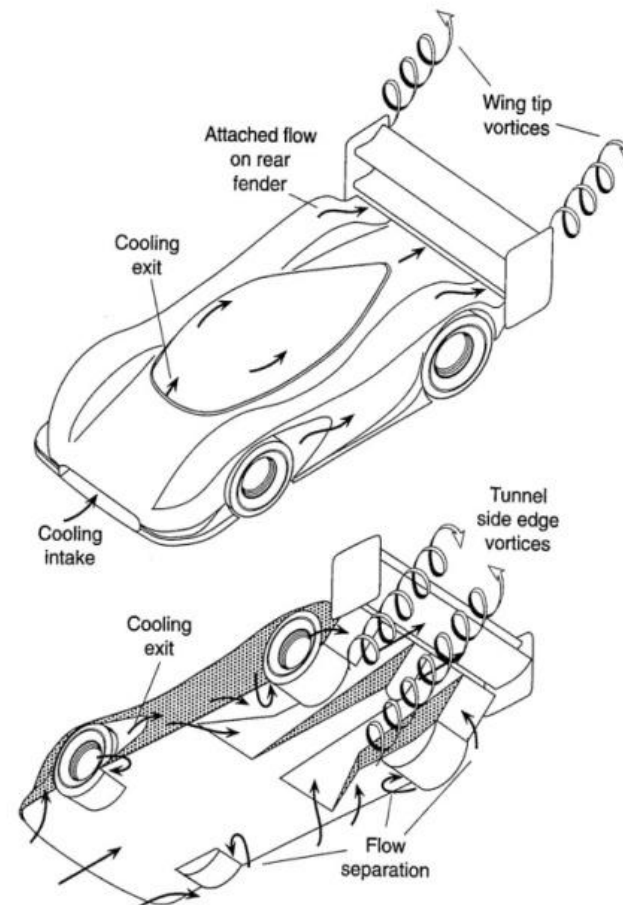
Aerodynamické prvky sportovních vozů

Vozy se zakapotovanými koly (prototypy)

Vysoce aerodynamické tělo nejen, že snižuje vztlak, ale zároveň zaručuje dosažení vyšší úrovně přitlaku.



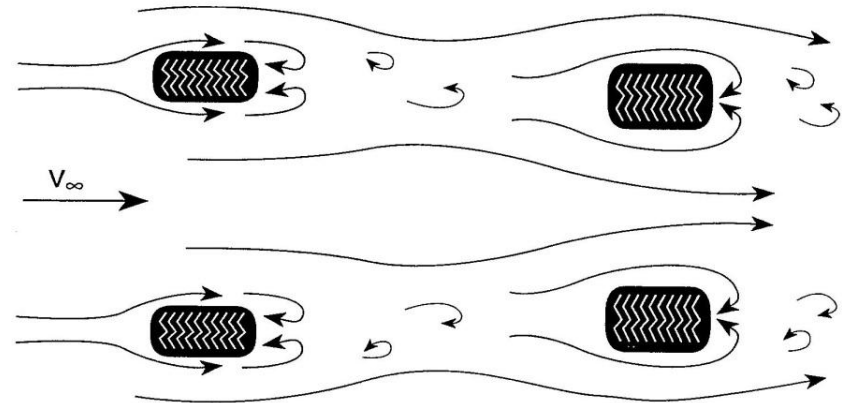
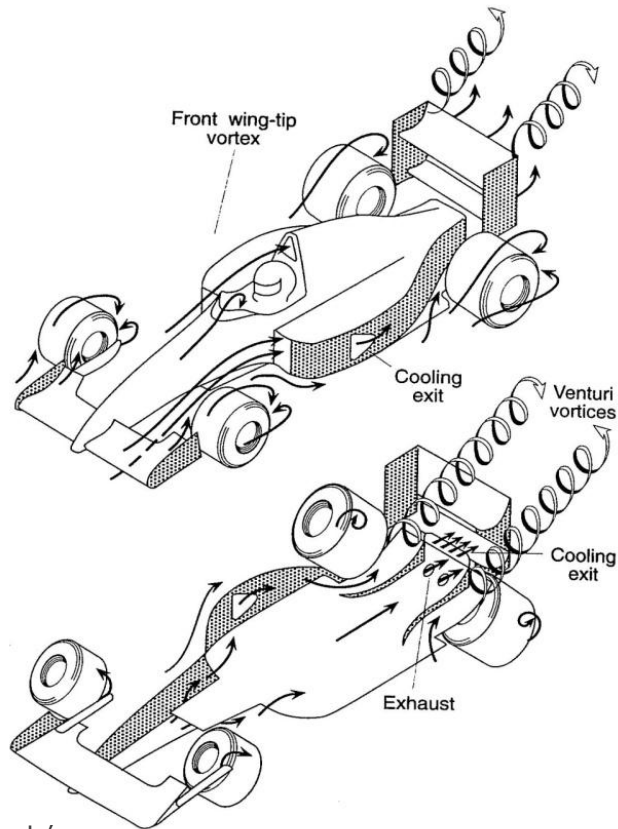
-Proudění okolo vozu



Aerodynamické prvky sportovních vozů

Závodní vozy s nezakapotovanými koly (formule)

Tato skupina závodních vozů je, co se týče aerodynamického odporu, nejkomplicovanější.



Aerodynamické prvky vozu typu Formule 1

- Základní filozofií konstruktérů je dosažení maximálního přitlaku při minimálním odporu vzduchu.

-přední přitlačné křídlo



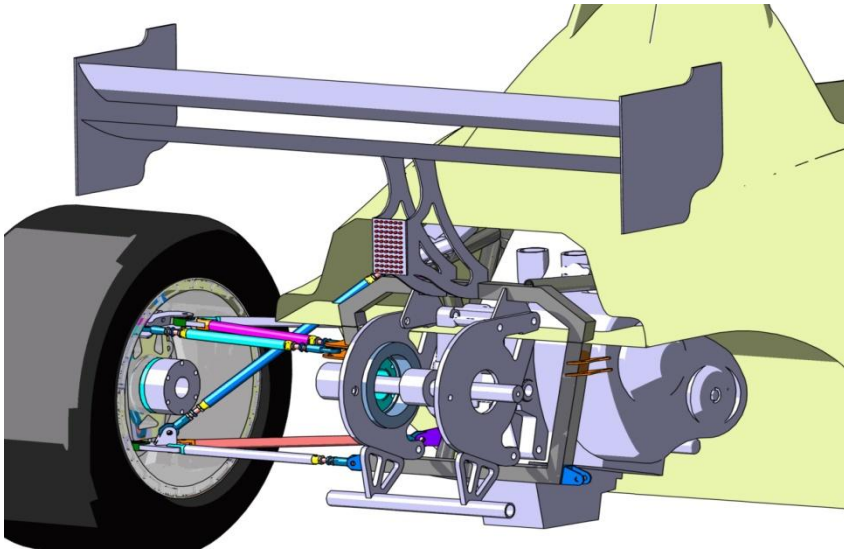
-zadní přitlačné křídlo



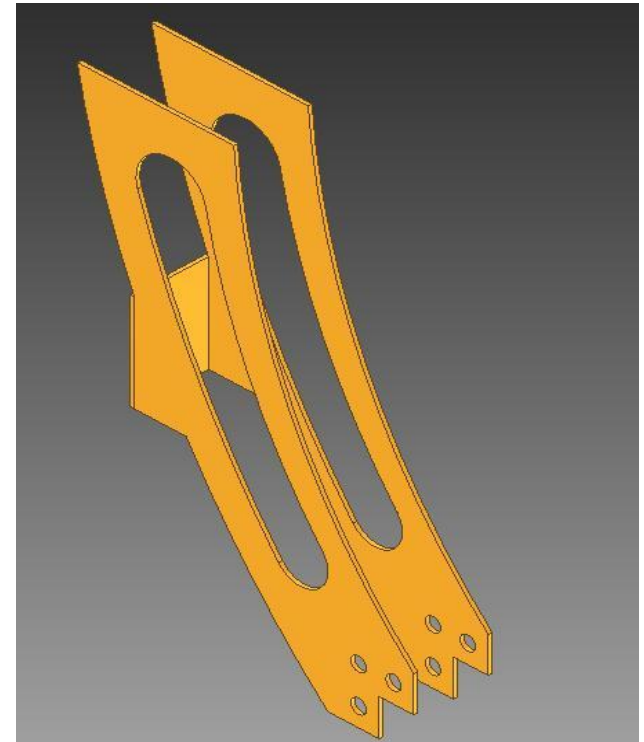
-podvozek



Návrh uchycení přitlačného křídla

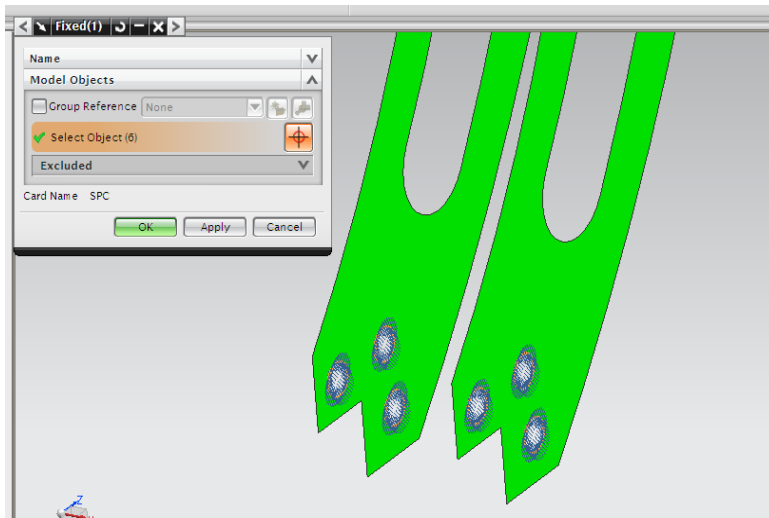


Konstrukce součásti

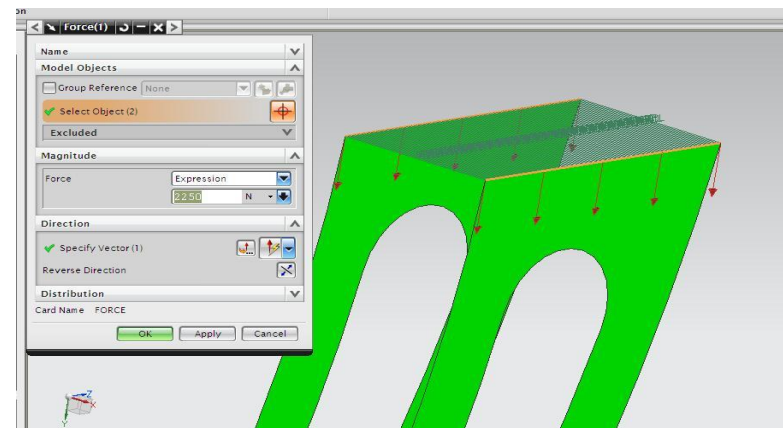


Způsob uchycení a simulace zatížení

-uchycení

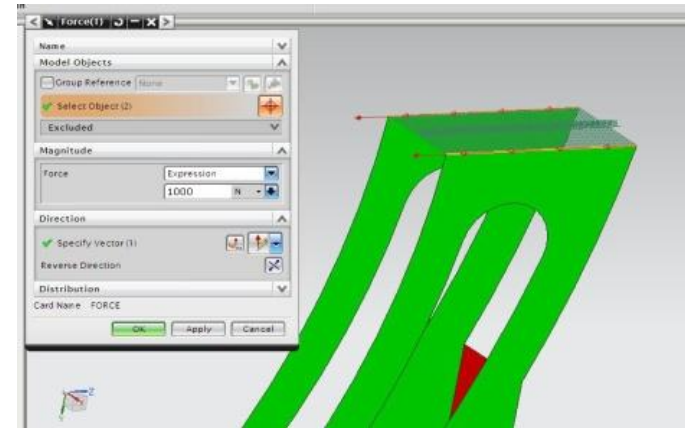
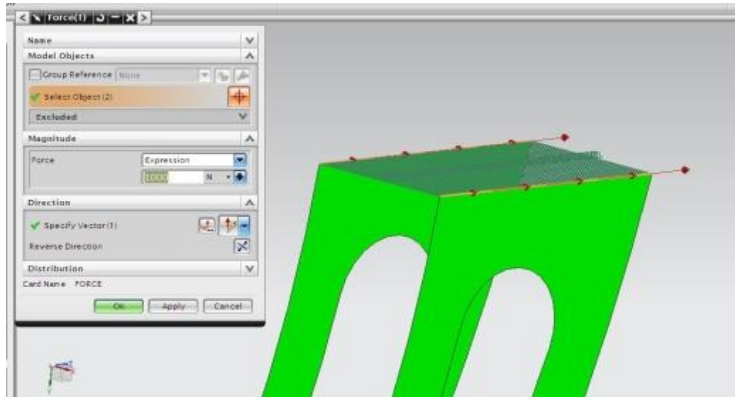


-zatížení ze shora (tlakem vzduchu)

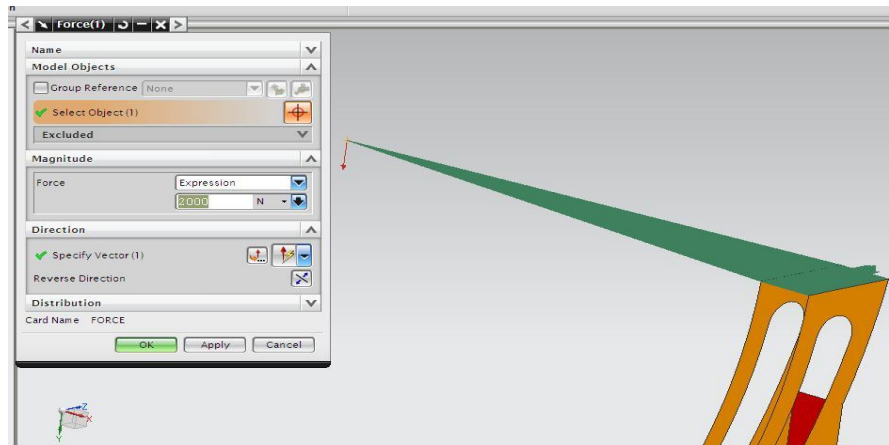


Způsob uchycení a simulace zatížení

-zatížení při akceleraci a brzdění



-zatížení na okraji přitlačného křídla



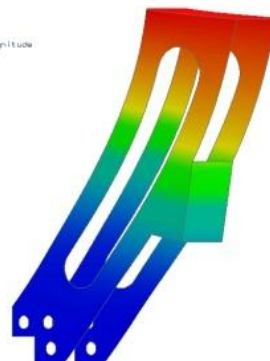
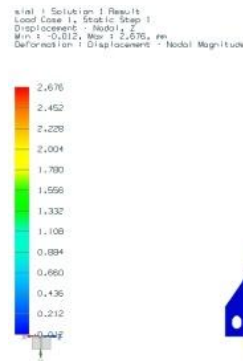
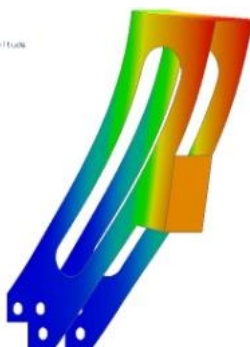
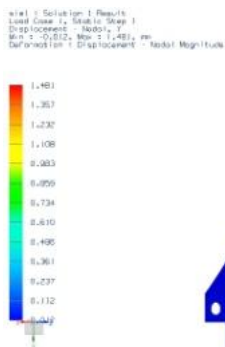
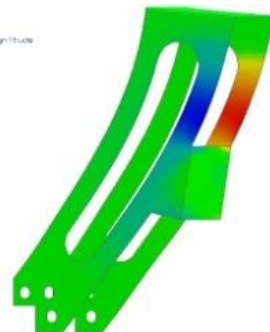
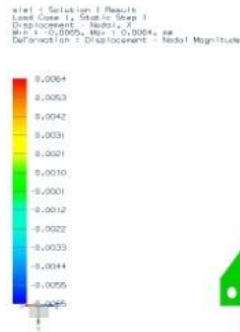
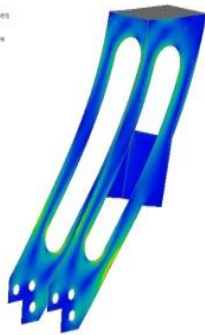
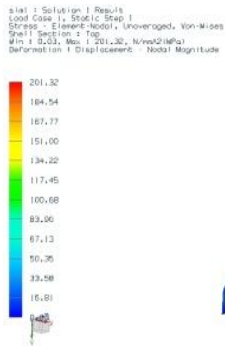
Dimenzování

Varianta A

tloušťka bočních plechů..... $t_1 = 2,5 \text{ mm}$

tloušťka spojovacího plechu... $t_2 = 2,5 \text{ mm}$

Napětí a posunutí při působení síly v ose y (tlak vzduchu)

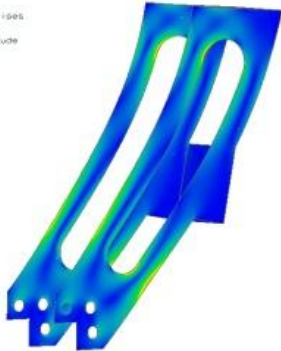
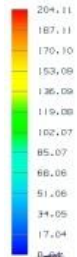


směr zatížení	y
σ_{\max} [MPa]	201.32
posunutí v ose x [mm]	0.65
posunutí v ose y [mm]	1.481
posunutí v ose z [mm]	2.676

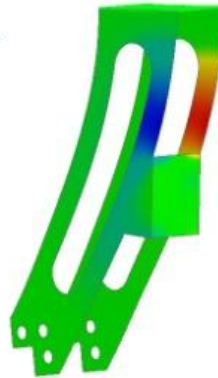
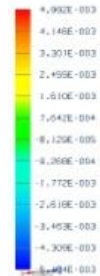
Dimenzování

Napětí a posunutí při působení síly v ose z (při akceleraci)

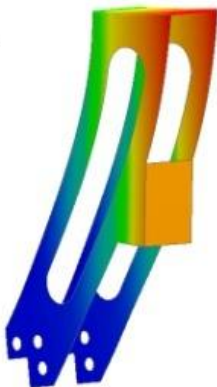
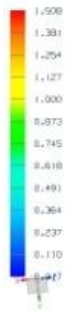
slal : Solution 1 Results
Load Case 1, Static Step 1
Element Node 1 Unaveraged, Von-Mises
Shell Section 1 Top
Min = 0.04, Max = 204.11, N/mm2(MPa)
Deformation 1 Displacement - Nodal Magnitude



slal : Solution 1 Results
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Node 1, X
Min = -5.154E-003, Max = 4.992E-003, mm
Deformation 1 Displacement - Nodal Magnitude



slal : Solution 1 Results
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Node 1, Y
Min = -0.517, Max = 1.508, mm
Deformation 1 Displacement - Nodal Magnitude



slal : Solution 1 Results
Load Case 1, Static Step 1
Displacement - Node 1, Z
Min = -0.510, Max = 2.827, mm
Deformation 1 Displacement - Nodal Magnitude

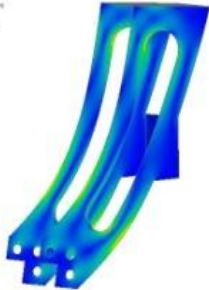
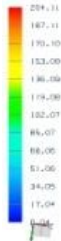


směr zatížení	z
σ_{\max} [MPa]	204.11
posunutí v ose x [mm]	0.0049
posunutí v ose y [mm]	1.508
posunutí v ose z [mm]	2.827

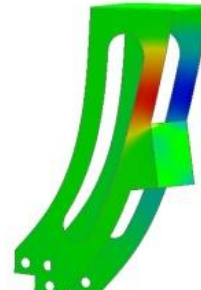
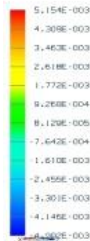
Dimenzování

Napětí a posunutí při zatížení v ose – z (při brzdění)

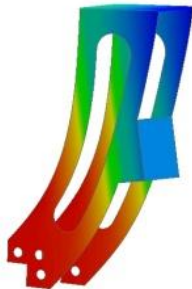
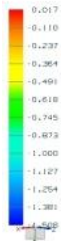
sial : Solution 1 Results
 Load Case 1: Static Step 1
 Stress - Element Nodal - Unaveraged, Von-Mises
 Min: 0.04, Max: 204.11, Avg: 22.14
 Deformation 1 Displacement - Nodal Magnitude



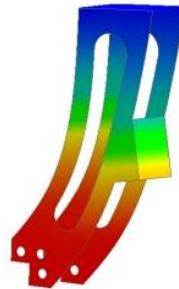
sial : Solution 1 Results
 Load Case 1: Static Step 1
 Displacement - Nodal, Z
 Min: -4.582E-003, Max: 5.154E-003, mm
 Deformation 1 Displacement - Nodal Magnitude



sial : Solution 1 Results
 Load Case 1: Static Step 1
 Displacement - Nodal, X
 Min: -1.259E-004, Max: 0.00515, mm
 Deformation 1 Displacement - Nodal Magnitude



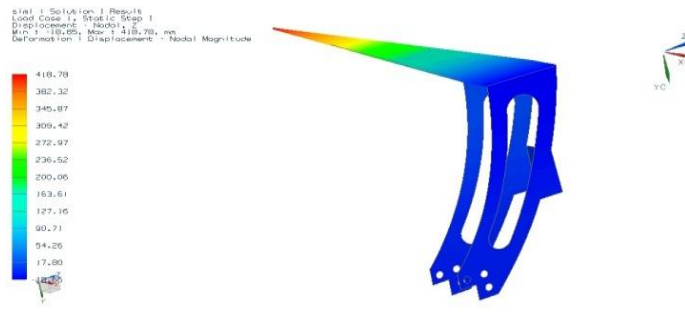
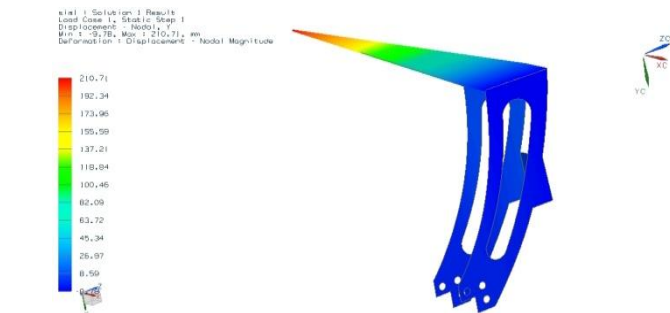
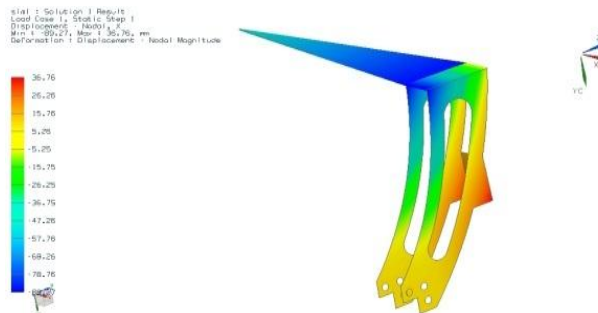
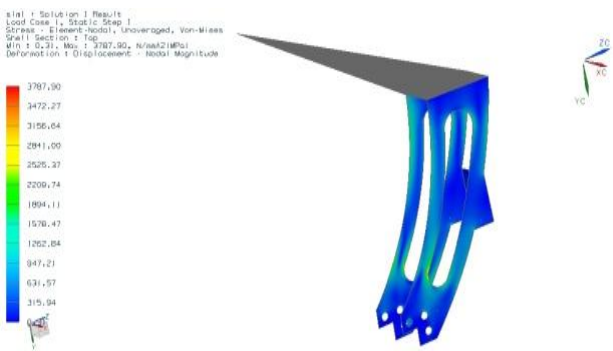
sial : Solution 1 Results
 Load Case 1: Static Step 1
 Displacement - Nodal, Y
 Min: -2.827, Max: 0.000, mm
 Deformation 1 Displacement - Nodal Magnitude



směr zatížení	-z
σ^{\max} [MPa]	204.11
posunutí v ose x [mm]	0.00515
posunutí v ose y [mm]	1.508
posunutí v ose z [mm]	2.827

Dimenzování

Napětí a posunutí při zatížení v ose y na rameni o velikosti 500 mm



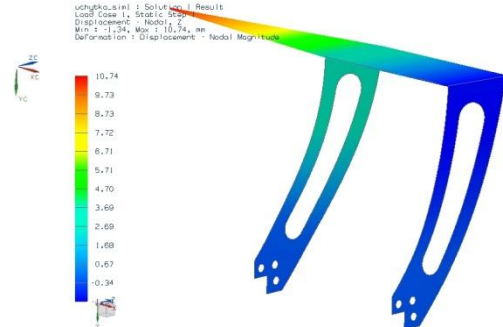
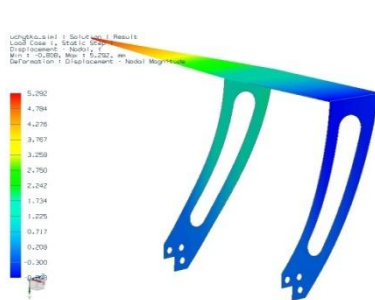
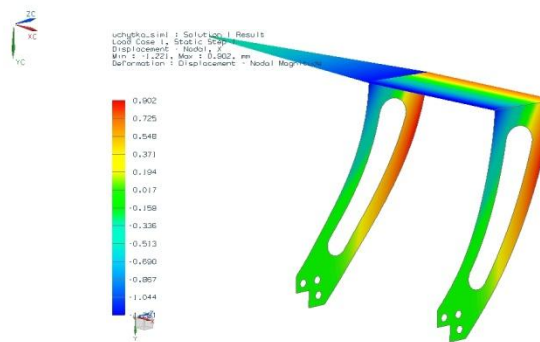
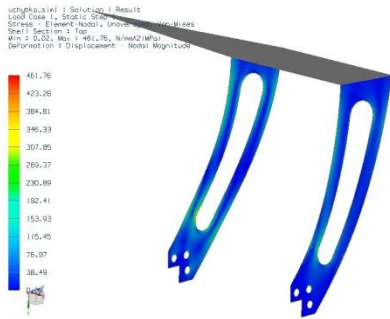
směr zatížení	y (ohyb)
σ_{\max} [MPa]	3787.9
posunutí v ose x [mm]	89.27
posunutí v ose y [mm]	210
posunutí v ose z [mm]	418.78

Dimenzování

Varianta B

-zvýšení rozteče mezi plechy na 250 mm

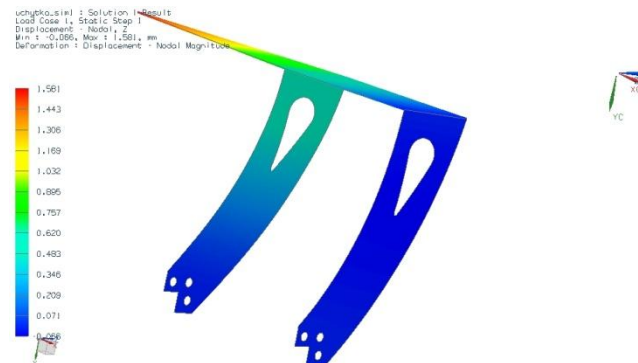
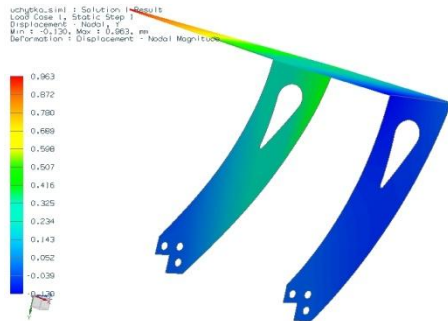
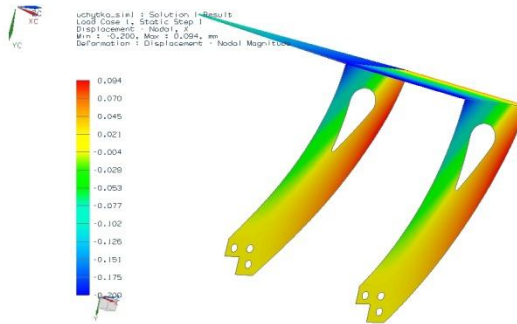
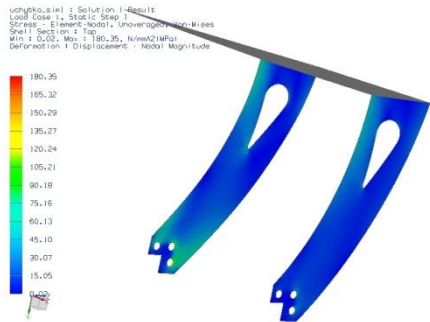
Napětí a posunutí při působení síly v ose y (tlak vzduchu)



σ_{\max} [MPa]	461,76
posunutí v ose x [mm]	1,221
posunutí v ose y [mm]	5,229
posunutí v ose z [mm]	10,74

Dimenzování

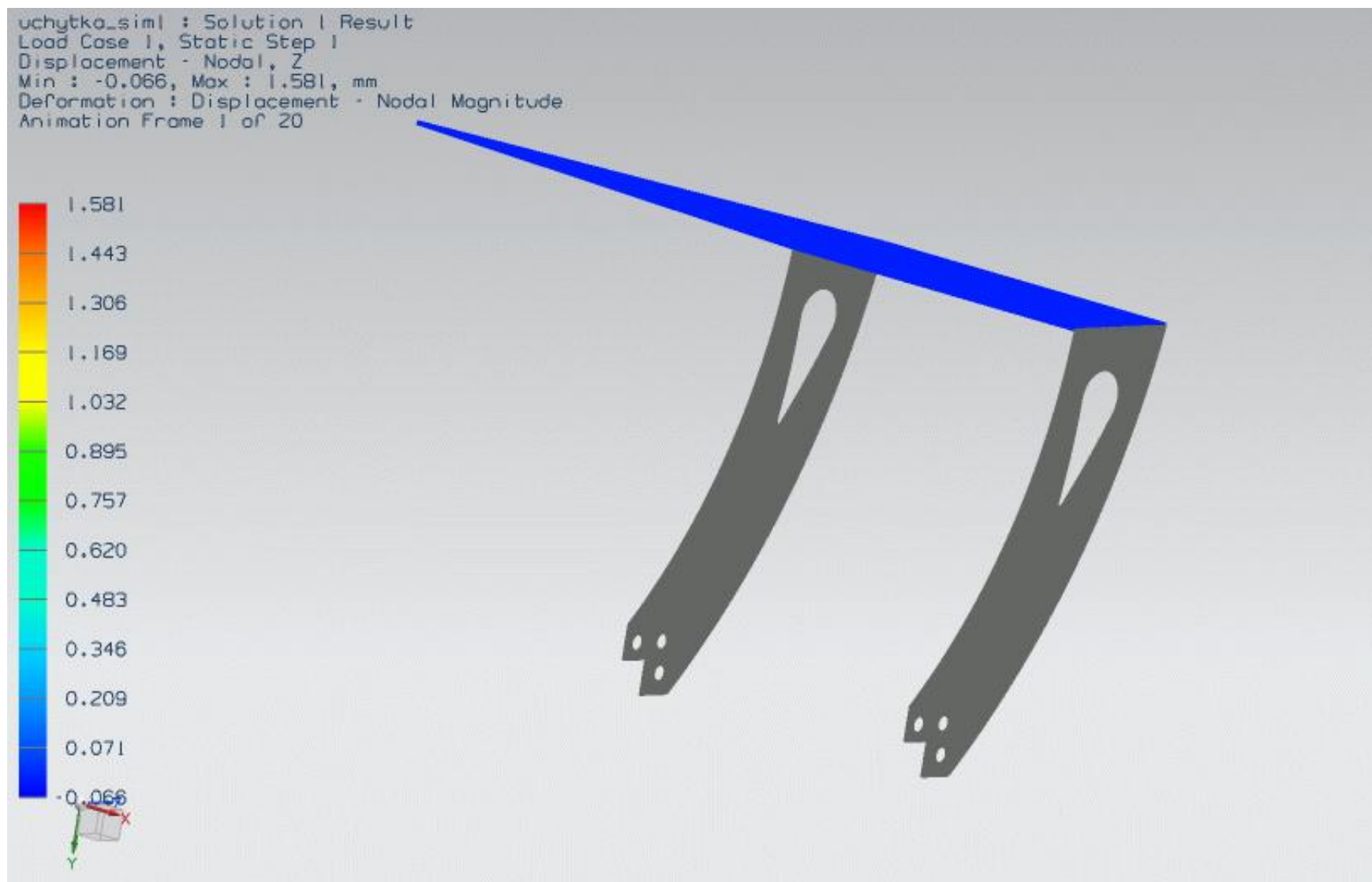
Úprava geometrie odlehčení



Tabulka výsledků

σ_{\max} [MPa]	180,35
posunutí v ose x [mm]	0,2
posunutí v ose y [mm]	0,963
posunutí v ose z [mm]	1,581

Animace průběhu posunutí



Děkuji za pozornost