

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: 2301R016 Dopravní a manipulační technika

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh alternativního rámu pro vůz Formule student

Autor: **Helena Průchová**
Vedoucí práce: **Doc. Ing. Martin Hynek, Ph.D.**

Akademický rok 2016/2017

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

V první řadě bych ráda poděkovala vedoucímu práce panu Doc. Ing. Martinovi Hynkovi, Ph.D. za ochotu a vedení práce, Ing. Michalovi Skovajsovi za konzultace. Dále bych chtěla poděkovat týmu UWB Racing Team Pilsen za ochotu a spolupráci

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Průchová	Jméno Helena		
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Dopravní a manipulační technika“			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Hynek, Ph.D.	Jméno Martin		
PRACOVIŠTĚ	ZČU – FST – KKS			
DRUH PRÁCE	DIPLLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Návrh alternativního rámu pro vůz Formule Student			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

CELKEM	66	TEXTOVÁ ČÁST	46	GRAFICKÁ ČÁST	20
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce se zabývá návrhem alternativního rámu pro závodní vůz Formule SAE. Dále se zabývá výpočtem torzní tuhosti rámu a dalších výpočtů zadaných podle pravidel FSAE. Výsledkem práce je navržený alternativní rám, který má lepší vlastnosti oproti původnímu rámu.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">torzní tuhost, CAD model, alternativní rám, počítačová simulace, přípravek</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Průchová	Name Helena	
FIELD OF STUDY	B2301 “Transport Vehicles and Handling Machinery“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Hynek, Ph.D.	Name Martin	
INSTITUTION	ZČU – FST – KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	The design of alternative frame for the Formula SAE		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2017
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

TOTALLY	66	TEXT PART	46	GRAPHICAL PART	20
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor thesis deals with the design of alternative frame for the Formula SAE. Then this work deals with the calculation of torsion rigidity and another calculation given by rules of FSAE. The result of this work is the design of alternative frame which has got better qualities than the original frame.
KEY WORDS	Torsion rigidity, CAD model, alternative frame, computer simulation, jig

Obsah:

1. Úvod.....	2
2. Rešerše alternativních ocelových rámu vozidel kategorie FS	2
2.1. Příklad alternativního rámu	2
2.2. Rozdělení prvků primární struktury rámu	3
2.1.1 Hlavní oblouk	3
2.3. Vyztužení hlavního oblouku	4
2.4. Přední oblouk	4
2.5. Vyztužení předního oblouku	5
2.6. Přední nárazová přepážka	6
2.7. Vyztužení přední nárazové přepážky	7
2.8. Boční nárazová struktura	7
2.9. Geometrické vlastnosti trubkového rámu	8
2.9.1. Šablona 95% muže	8
2.9.2. Kokpit	8
2.9.3. Rozměry trubkových profilů podle pravidel FSAE	10
3. Původní rám.....	10
4. Návrh alternativního rámu	11
4.1. Specifikace požadavků kladených na alternativní rám.....	11
4.2. Návrh materiálu a polotovarů pro alternativní rám	13
4.3. Návrh prostoru pro řidiče a oblouků.....	14
4.4. Návrh přední části rámu	16
4.5. Návrh zadní části rámu	17
5. Konstrukční řešení alternativního ocelového rámu	18
5.1. Varianta ocelového rámu	19
5.2. Varianta hliníkovo - ocelového rámu	21
5.3. Důležité výpočty zadané pravidly Formule SAE	21
5.4. Zhodnocení variant	21
5.5. Výpočet torzní tuhosti	22
5.6. Výpočtové řešení torzní tuhosti	24
5.7. Zásíťování rámu a vypočtené hodnoty	26
5.8. Svařování rámu	28
6. Závěr.....	30
Seznam použitých symbolů a zkratk	31
Seznam použité literatury	32
Použitý software	32
Seznam obrázků a tabulek	32
Seznam příloh	33
Výkresová dokumentace.....	33

1. Úvod

Úkolem této práce je navrhnout alternativní rám pro vůz Formula SAE. Bakalářská práce se po rešerši alternativních ocelových rámu bude zabývat konstrukčními návrhy rámu pro sezónu 2017. K návrhu bude použit CAD program Siemens NX 11.0, ve kterém bude proveden výpočet pomocí řešiče NX Nastran. Podle pravidel Formula SAE bude alternativní rám propočten pro jednotlivé prvky primární struktury rámu. Dále bude počítána torzní tuhost pomocí 1D prvků, která bude simulována na tzv. rámové houpačce. V konečné fázi bude následovat sestavení finálního návrhu rámu pomocí přípravku z ocelových plechů

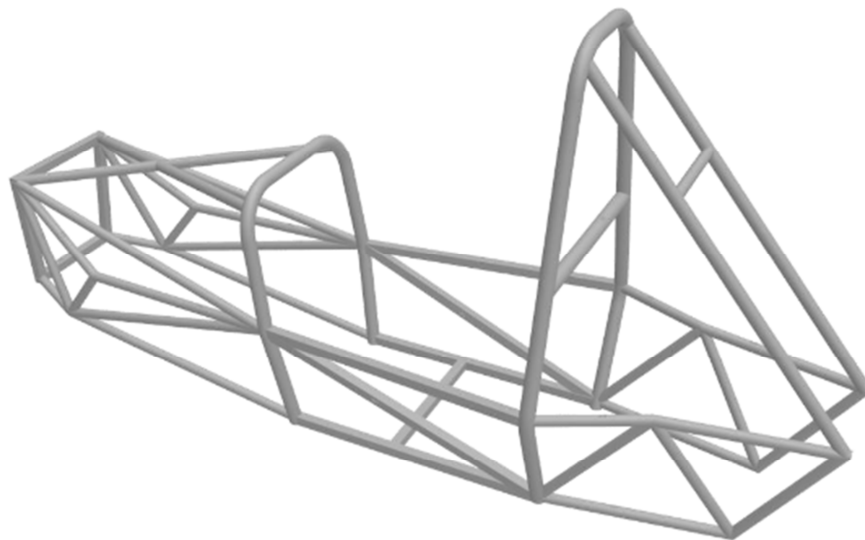
2. Rešerše alternativních ocelových rámu vozidel kategorie FS

2.1. Příklad alternativního rámu

Alternativní rám vychází z pravidel pro standardní rám. Odlišnost těchto rámu je v rozměrech použitých trubek, v použitém materiálu a v konstrukčním uspořádání. Jelikož si jednotlivé týmy mohou navrhnout svoji vlastní konstrukci rámu, je nutné doložit veškeré výpočty tohoto rámu pro schválení komisí FSAE.

Nejvíce používaný rám je trubkový, hlavně díky jednoduchosti konstrukce a nízké ceně. Návrh daného rámu umožňuje snadné provedení výpočtových modelů na pevnost, tuhost a proto je vhodný pro začínající týmy s malými finančními možnostmi. Strukturu lze snadno upravit, a tím vytvořit více variant, které je možné porovnávat.

Nevýhodou je velká hmotnost, která má u vozidla značný vliv na jeho jízdní vlastnosti. Pokročilejší týmy tuto variantu opouštějí se snahou vyrobit alternativní konstrukci. Největší rozvoj těchto rámu je u konkurenčního týmu TU Brno Racing. Na obrázku níže je alternativní rám Dragon 5, splňující pravidla FSAE pro rok 2016.[1]



Obrázek 1 – Alternativní rám Dragon 5 [1]

2.2. Rozdělení prvků primární struktury rámu

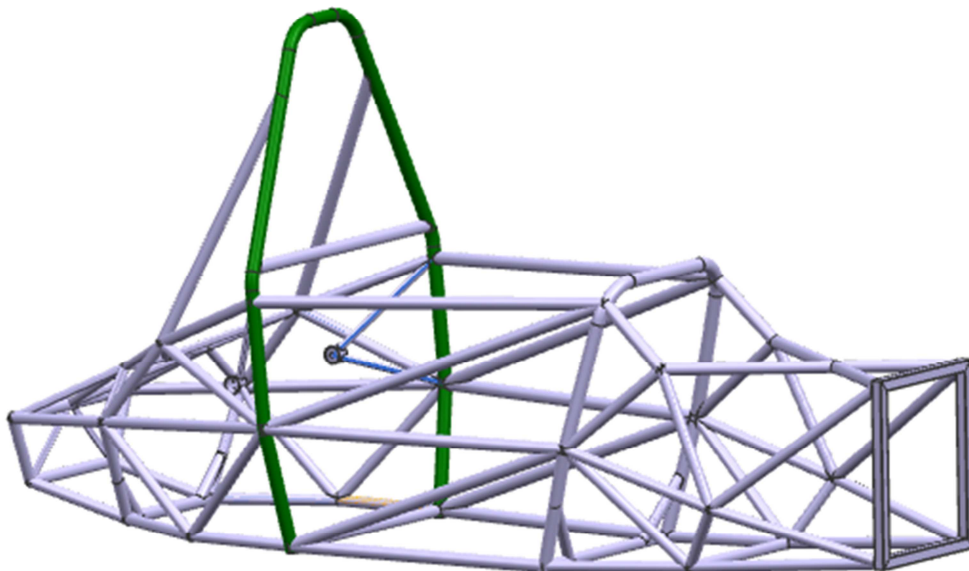
V této kapitole budou popsány jednotlivé části primární struktury rámu společně s kritérii pro jejich konstrukční návrh.

Primární struktura se skládá z hlavního oblouku, předního oblouku, přední nárazové přepážky a boční nárazové struktury.

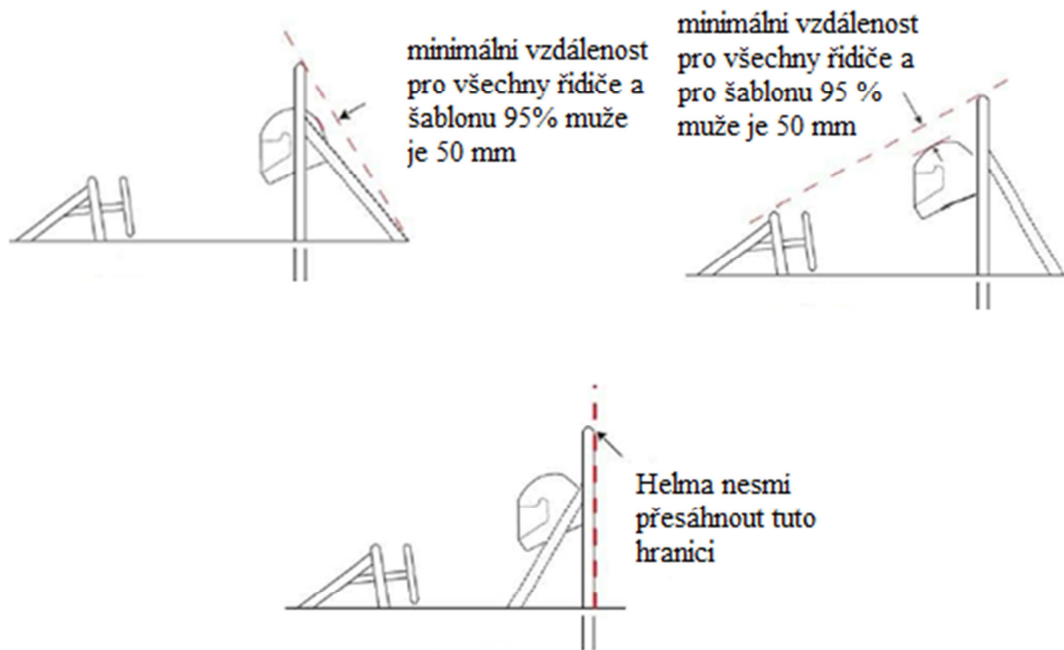
2.1.1 Hlavní oblouk

Hlavní oblouk je vyroben z jediné ohýbané trubky, tvar viz obrázek 2. Oblouk se nachází těsně za sedadlem řidiče a chrání ho před zraněním, při případném přetočení vozidla.

Pro rám platí, že při pohledu z boku nesmí být hlavní oblouk skloněn o více než 10° od místa, kde je propojen s hlavní strukturou rámu a minimální vzdálenost od tohoto místa musí být 380mm. Na obrázku 3 je minimální vzdálenost 50mm od helmy řidiče mezi fiktivní spojnici vrcholu hlavního a předního oblouku.



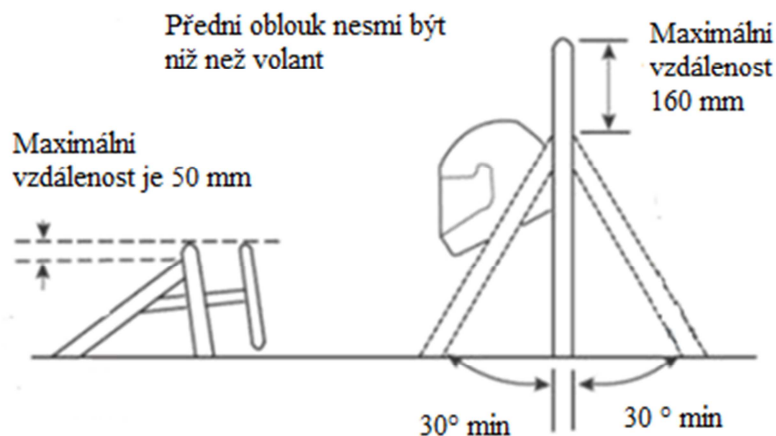
Obrázek 2 – Hlavní oblouk



Obrázek 3 – Minimální bezpečná vzdálenost hlavy řidiče [2]

2.3. Vyztužení hlavního oblouku

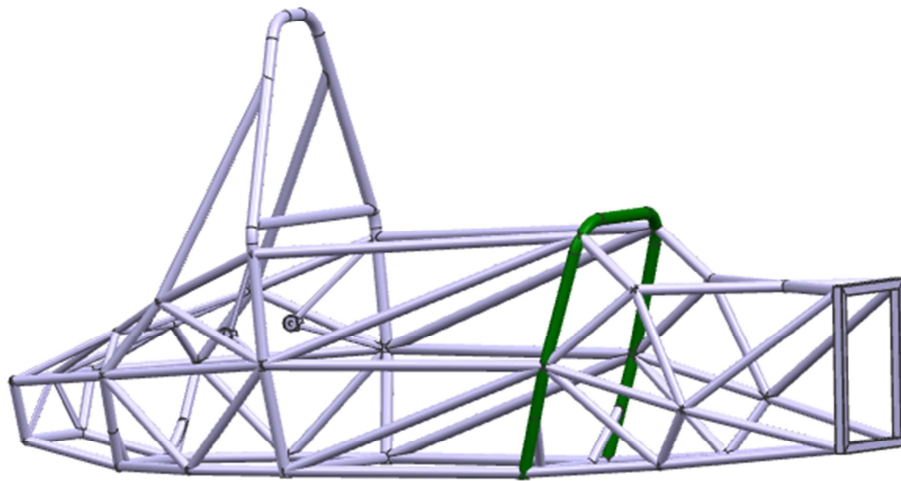
Pro lepší stabilitu se používají dvě rovné trubky, které zároveň zajistí bezpečnost rámové konstrukce. Ty podpírají hlavní oblouk a svírají minimální úhel 30° . Vyztužení nesmí být níže položeno než 160mm od nejvyššího bodu oblouku. Na obrázku 4 vidíme vyztužení hlavního oblouku a také vyztužení předního oblouku.



Obrázek 4 – Vyztužení předního a hlavního oblouku [2]

2.4. Přední oblouk

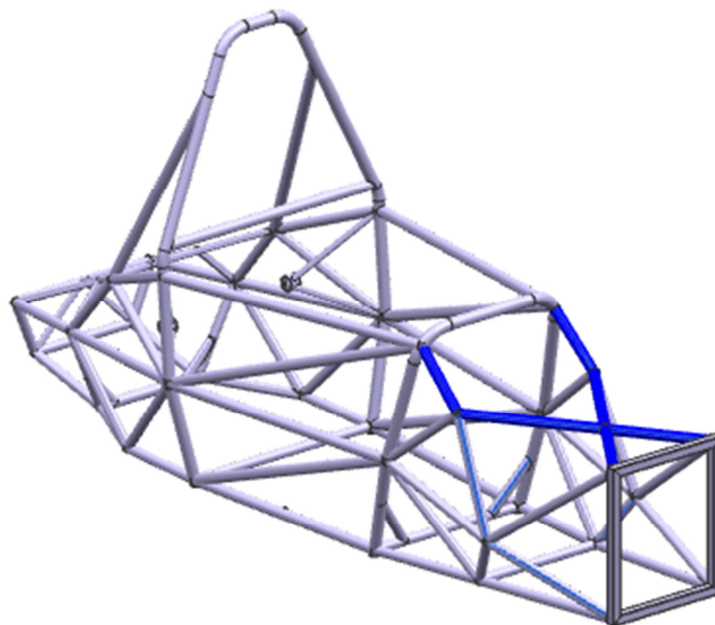
Nachází se před volantem a chrání ruce řidiče. Spojuje nejnižší body hlavní rámové konstrukce a zároveň musí přesahovat výšku volantu z bezpečnostních důvodů při převrácení vozidla. Přední oblouk je tvořen z trubkového profilu a nemusí být z jednoho dílu jako hlavní oblouk. Sklon oblouku nesmí překročit hodnotu 20° z boku a zároveň musí být největší vzdálenost mezi volantem a přední nárazovou přepážkou do 250mm.



Obrázek 5 – Přední oblouk

2.5. Vyztužení předního oblouku

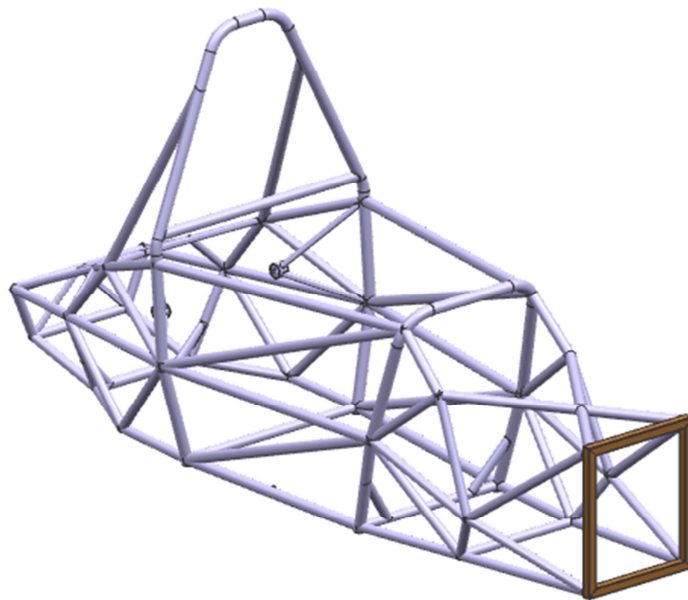
Tento prvek má obdobné vlastnosti jako výztuže hlavního oblouku. Podpěry směřují k přední nárazové přepážce, čímž chrání nohy řidiče při nehodě. Vzpěry se připojují co nejbližší k vrcholu předního oblouku. Vyztužení se nesmí nacházet níže než 50mm od nejvyššího bodu oblouku.



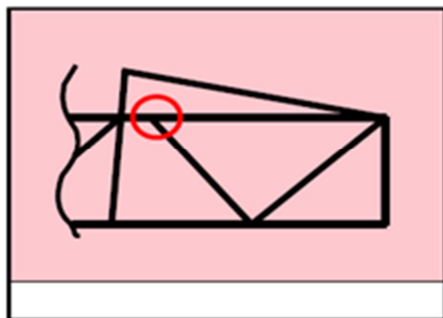
Obrázek 6 – Vyztužení předního oblouku

2.6. Přední nárazová přepážka

Přední nárazová přepážka chrání chodidla řidiče před nárazem, je pevně spojena s rámovou konstrukcí minimálně třemi členy na obou stranách. Přepážka musí být tvořena správnou triangulací rámových trubek dle obrázku 8, tj. prvky rámu promítneme do roviny a umístíme v této rovině libovolně směřované zatížení do libovolného bodu spoje. Vzniklá napětí budou tahová nebo tlačná. Horní část spojů nesmí přesahovat vzdálenost 50mm vzhledem k bezpečnosti řidiče.

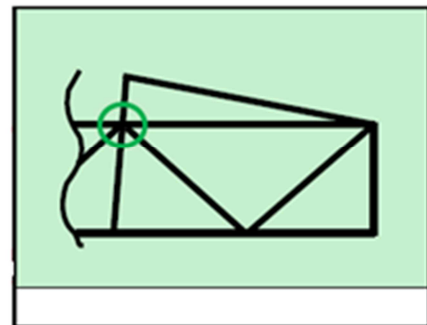


Obrázek 7 – Přední přepážka



ŠPATNĚ

VS.

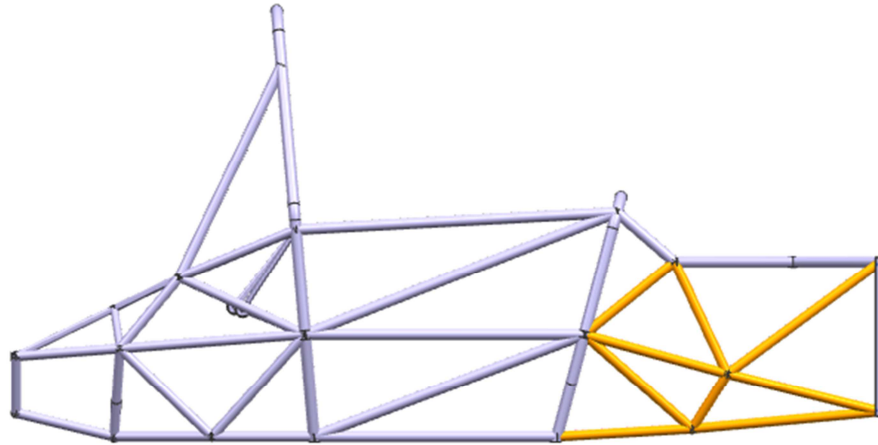


SPRÁVNĚ

Obrázek 8 - Triangulace rámu

2.7. Vyztužení přední nárazové přepážky

Vyztužení je provedeno nejméně třemi členy na každé straně rámu. Musí být spojena s horním i spodním bodem hlavní konstrukce, aby při nárazu rozkládala síly působící na rám.

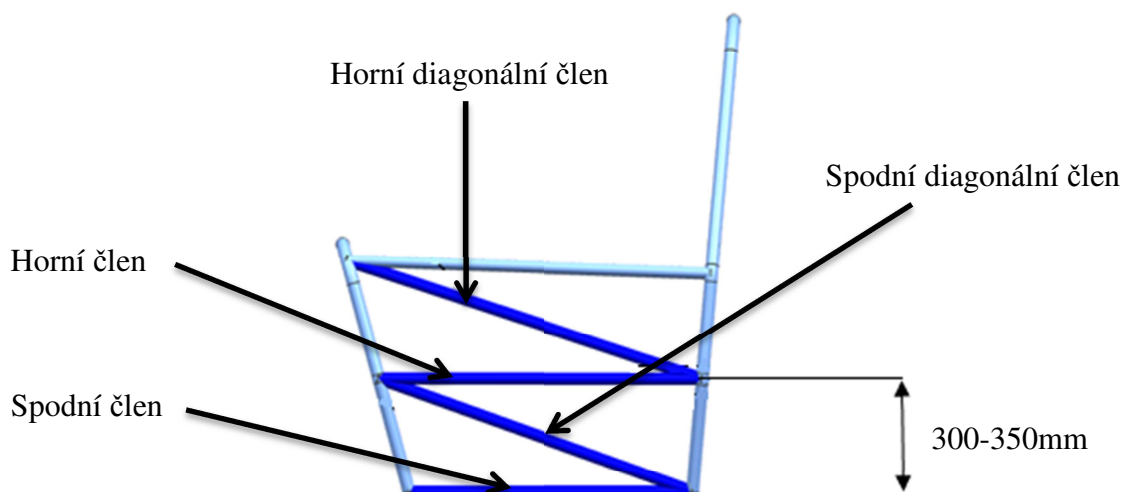


Obrázek 9 – Vyztužení přední nárazové přepážky

2.8. Boční nárazová struktura

Struktura se skládá ze tří trubek. Chrání jezdce před bočním nárazem a musí splňovat níže uvedené požadavky:

- Horní člen spojuje přední a hlavní oblouk. Pro řidiče vážící 77kg sedící v jízdní poloze musí nejvyšší člen být ve vzdálenosti mezi 300 až 350mm od spodní části rámu.
- Spodní člen spojuje dolní část horního a předního oblouku.
- Diagonální člen spojuje dolní a horní členy horního hlavního a předního oblouku. [2]



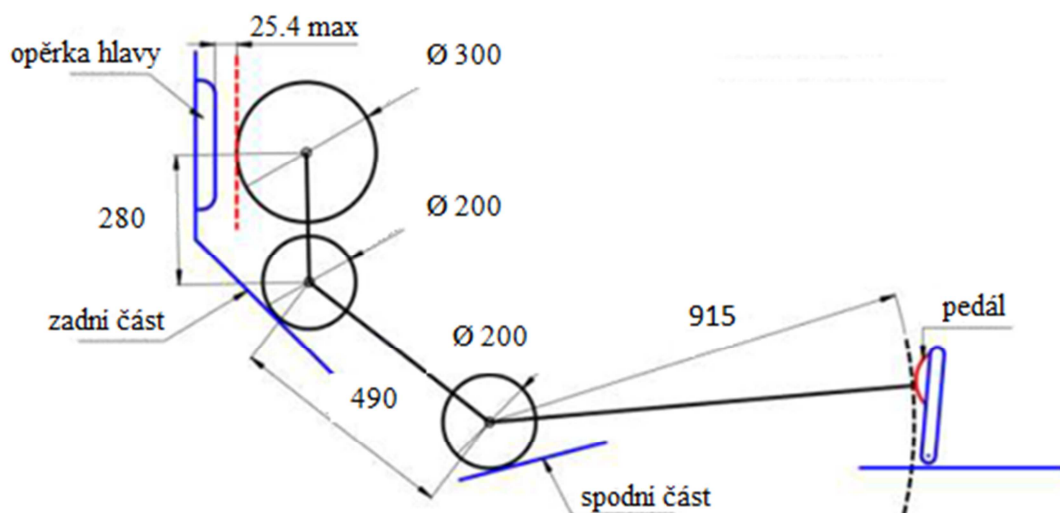
Obrázek 10 – Boční nárazová struktura

2.9. Geometrické vlastnosti trubkového rámu

Tyto vlastnosti slouží k určení minimálních rozměrů vnitřního prostoru rámu z důvodu zajištění bezpečnosti řidiče. Mezi geometrické vlastnosti patří: tzv. Šablona 95% muže, která určuje minimální rozměr posedové části rámu a šablona pro určení minimálních rozměrů pro nohy řidiče.

2.9.1. Šablona 95% muže

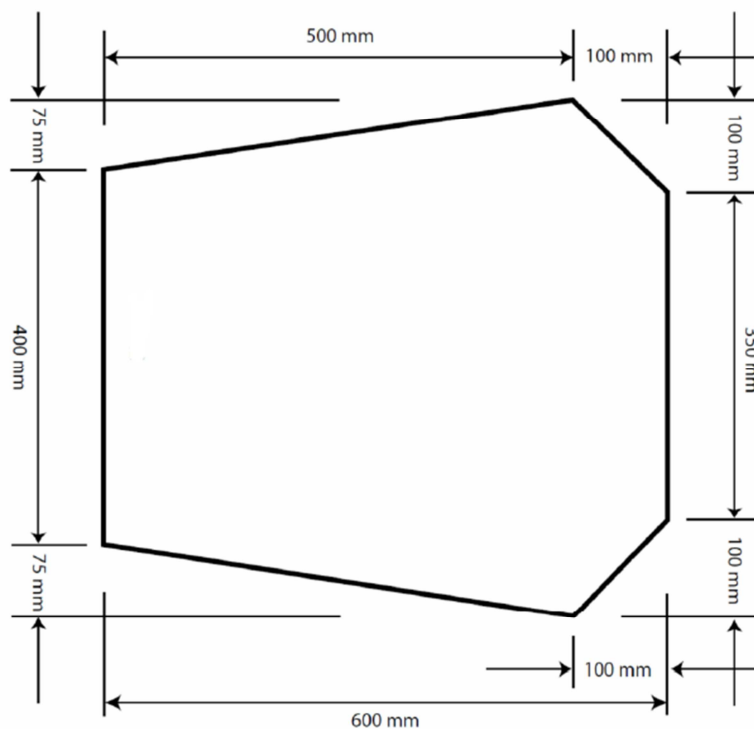
Tato šablona představuje 95% muže, který je vytvořen třemi kruhy. První kruh o průměru 300mm zobrazuje hlavu s helmou. Druhý kruh o průměru 200mm znázorňuje ramena a třetí kruh, průměr 200mm, jsou hýždě. Vzdálenost mezi hlavou a rameny je 280mm. Spojnice mezi rameny a hýžděmi má délku 490mm a vzdálenost mezi hýžděmi a pedálem je rovna poloměru 915mm. Kruh o průměru 300mm musí být od opěrky hlavy vzdálen maximálně 25,4mm.



Obrázek 11 – Šablona 95 % muže [2]

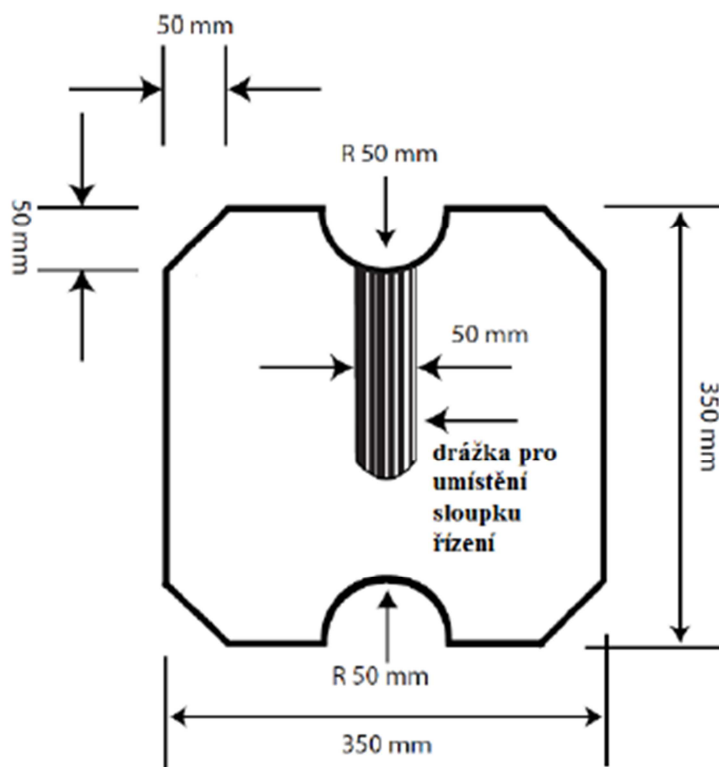
2.9.2. Kokpit

Vnitřní prostor rámu je kontrolován pomocí dvou šablon. Jedna je pro dobrý přístup do vozidla, vkládá se do rámu horizontálně ve vodorovné poloze a musí klesnout pod horní trubku boční nárazové struktury. Během zkoušky, kdy je šablona vkládána do rámu, může být volant se sedačkou vymontovány. Řadicí páka s protipožární přepážkou musí zůstat ve vozidle. Na obrázku 12 je šablona s nejmenšími možnými rozměry vnitřní části kokpitu, které jsou určeny pro posed řidiče.



Obrázek 12 – Šablona pro minimální posedovou část rámu [2]

Druhá šablona představuje bezpečnost končetin uvnitř rámu a vymezuje jejich prostor. Šablona musí projít v horizontální poloze pod volantem až k chodidlům, tedy 100mm před pedály.



Obrázek 13 – Šablona představující nohy řidiče [2]

2.9.3. Rozměry trubkových profilů podle pravidel FSAE

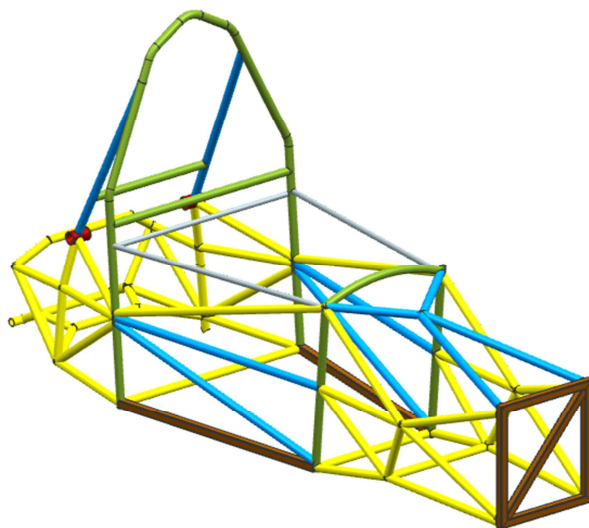
Pravidla stanovují různé materiálové kombinace s minimálními rozměry z důvodů bezpečnosti řidiče. Pro navrhovaný rám byla zvolena konstrukční ocel S355, která je dobře svařitelná. V tabulce níže jsou uvedeny minimální rozměry tloušťky stěn trubek, pro daný prvek primární struktury.

Tabulka 1 - Minimální tloušťky rozměrů trubek [3]

Název trubkové součásti	Alternativní rám
	minimální tloušťka
hlavní a přední oblouk	2mm
boční struktura, přední přepážka, obloukové výztuže	1,2mm
přední podpora přepážky, výztuže hlavního oblouku	1,2mm







3. Původní rám

Na obrázku 14 je rámová konstrukce standardního rámu. Tento rám byl vytvořen v souladu s pravidly pro konstrukci studentských formulí. UWB Racing Team Pilsen použil tento standardní rám v sezoně roku 2016. Podle pravidel FSAE se každý rok musí navrhnout nový, nebo významně pozměnit rámová konstrukce předešlého rámu, jinak se tým nemůže zúčastnit závodů. V tabulce 2 jsou barevně rozděleny velikosti trubek.



Obrázek 14 - Původní rám

Tabulka 2 - Velikosti a tloušťky trubek v původním rámu

Polotovár	Starý rám	
Jekl	25×25×1,5	
Trubka	25×1,5	
	25×2,5	
	40×3	
	25×2	
	16×1,5	

4. Návrh alternativního rámu

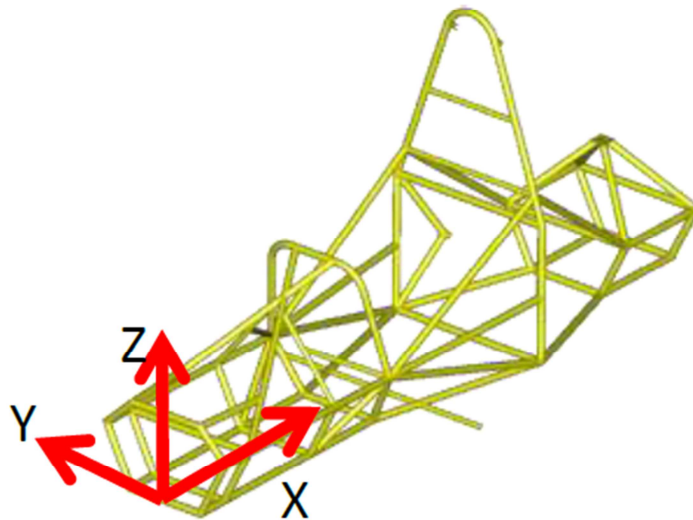
Při návrhu se vycházelo z pravidel FSAE a z konstrukce standardního rámu. Pravidla vystihují návrh veškerých komponent potřebných pro bezpečný chod stroje. V našem případě jsme se drželi pokynů pro konstrukci alternativního rámu, kde jsou např. dovolené deformace vnitřního prostoru, jsou stanoveny minimální rozměry použitých trubek a také minimální rozměry prostoru potřebného pro řidiče.

4.1. Specifikace požadavků kladených na alternativní rám

Jak už bylo řečeno, v pravidlech FSAE jsou zadány požadavky na výpočet rámové konstrukce. Pravidla se hlavně zaměřují na bezpečnost řidiče.

Výpočty jsou vztaženy na primární strukturu rámu (viz Kapitola 2.2.) a na trubky uchycující bezpečnostní pásy. Pro uchycení ramenních pásů je určena trubka procházející hlavním obloukem ve výšce ramenou jezdce. Břišní pásy jsou ukotveny na postranních trubkách ve spodní rámové konstrukci, kde se nachází sedadlo řidiče.

Pro lepší názornost byla vytvořena tabulka s danými parametry pro výpočet. Na Obrázku 15 je znázorněno umístění počátku kartézského souřadnicového systému, dle kterého jsou určovány okrajové podmínky. Výpočtu byl podroben nejen původní rám, ale i také nové navržené varianty rámu.



Obrázek 15 – Rám se středem souřadnicového systému

Tabulka 3 - Zadané parametry podle pravidel FSAE

	Zatížení [kN]	Fixace proti posunu	Fixace proti rotaci	Fixovaná místa	Možná deformace [mm]
Hlavní oblouk	$F_x = 6$ $F_y = 5$ $F_z = -9$	osa X,Y,Z	X	nejnižší uzly předního a hlavního oblouku	25
Přední oblouk	$F_x = 6$ $F_y = 5$ $F_z = -9$	osa X,Y,Z	X	nejnižší uzly předního a hlavního oblouku	25
Boční nárazová struktura	$F_y = 7$ (síla z obou stran rámu směřující k řidiči)	osa X,Y,Z	X	nejnižší uzly předního a hlavního oblouku	25
Přední přepážka	$F_x = 120$ $F_y = 10,5$	osa X,Y,Z	X	nejnižší body hl. oblouku a konce trubky pro uchycení ramenních pásů	25
Přední přepážka a deformační člen	$F_x = 120$	osa X,Y,Z	X	nejnižší body hl. oblouku a konce trubky pro uchycení ramenních pásů	25
Trubka pro výpočet ramenních pásů	$F_z = 7$	osa X,Y,Z	X	nejnižší uzly předního a hlavního oblouku	25
Trubka pro výpočet břišních pásů	$F_y = 19,5$ (skloněná síla o úhel 55° směřující k řidiči z obou stran rámu)	osa X,Y,Z	X	nejnižší uzly předního a hlavního oblouku	25

4.2. Návrh materiálu a polotovarů pro alternativní rám

Pro návrh trubkového rámu byla použita ocel S355 s parametry: $Re = 305\text{MPa}$, $Rm=365\text{MPa}$ a $E = 210\text{GPa}$, která je dobře svařitelná. Podle pravidel je možná hliníková konstrukce s ocelovými prvky primární struktury, jako je přední přepážka, přední a hlavní oblouk. Nejčastějším polotovarem pro konstrukci rámu je trubka nebo jekl. V tabulce 4 jsou uvedeny části primární struktury s trubkovými polotovary. Z uvedených rovnic jsou vypočteny kvadratické momenty průřezu trubkových polotovarů.

Dle rovnice je kvadratický moment kruhového průřezu dán vztahem[5]:

$$I = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} \quad (1)$$

V rovnici: $I[\text{mm}^4]$ je kvadratický moment průřezu, D [mm] je vnější průměr polotovaru a d [mm] je vnitřní průměr polotovaru.

Podle rovnice je kvadratický moment obdélníkového průřezu dán[5]:

$$I = \frac{\pi \cdot (HB^3 - hb^3)}{12} \quad (2)$$

V rovnici: $I[\text{mm}^4]$ je kvadratický moment průřezu, H a B [mm] jsou vnější rozměry polotovaru a h a b [mm] jsou vnitřní rozměry polotovaru.

Tabulka 4 - Návrh polotovarů primární struktury

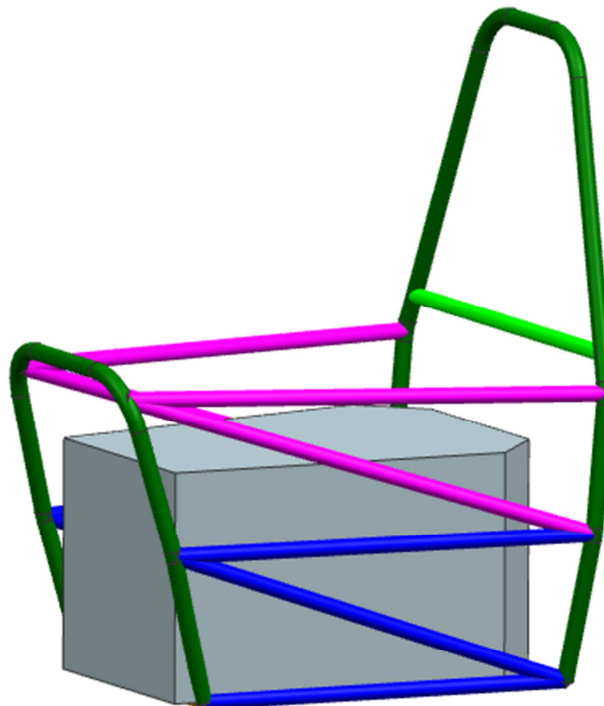
Prvky primární struktury	polotovar [mm]	I [mm ⁴]
Přední nárazová přepážka	25×25×1,5	40 937,31
Vyztužení přední nárazové přepážky	Ø 25 × 1,5	7 675,75
Přední oblouk	Ø 30 × 2	17 329,03
Vyztužení předního oblouku	Ø 28 × 1,5	10 997,10
Hlavní oblouk	Ø 30 × 2	17 329,03
Vyztužení hlavního oblouku	Ø 28 × 1,5	10 997,10
Boční nárazová struktura	Ø 28 × 1,5	10 997,10
Zadní podpůrná struktura	Ø 18 × 1	1 936,01
Trubka pro montáž ramenních pásů	Ø 28 × 2	13 885,84

4.3. Návrh prostoru pro řidiče a oblouků

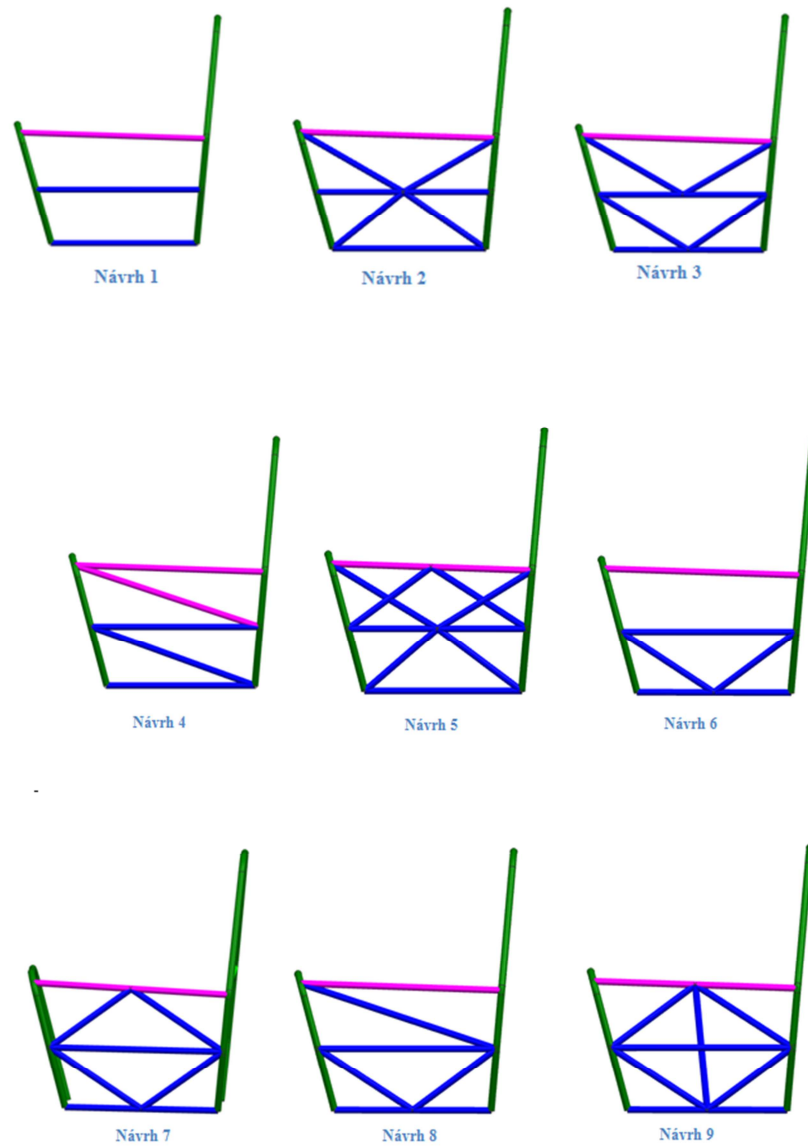
Velikost prostoru střední části se odvíjí od minimálních rozměrů, viz Šablona 95 % muže, to definuje vzdálenost oblouků od sebe, a také jejich šířku. V této části je uloženo sedadlo a volant řidiče. Výška hlavního a předního oblouku musí dodržet minimální vzdálenost, která je 50mm od helmy z důvodu bezpečnosti při převrácení vozidla. Střední část je limitována prostřední trubkou. Musí být umístěna ve vzdálenosti 300-350mm od spodní části rámu. Zároveň je potřeba usnadnit řidiči vozidla nástup a výstup z vozu. V této části je potřeba zvolit vyztužení pro vyšší torzní tuhost. Hlavní oblouk je vyroben z jednodílné, ohýbané trubky. Trubka vede od podlahy na jedné straně rámu přes hlavu jezdce k druhé straně rámu. Pro rozšíření sedadlového prostoru byl hlavní oblouk položen oproti původnímu rámu o 5° níže. Sedadlo bylo upraveno zvýšením posedu pro lepší zorný úhel řidiče. Přední oblouk je skloněn o 15° směrem k přední přepážce pro zvětšení vnitřního prostoru a pro uchycení volantu. V kapitole: 5.5 Torzní tuhost budou spočteny jednotlivé varianty a následně bude zvolena nejvýhodnější z nich.

Tabulka 5 - Rozměry použitých trubek

	Ø 30×2
	Ø 28×2
	Ø 28×1.5
	Ø 28×1



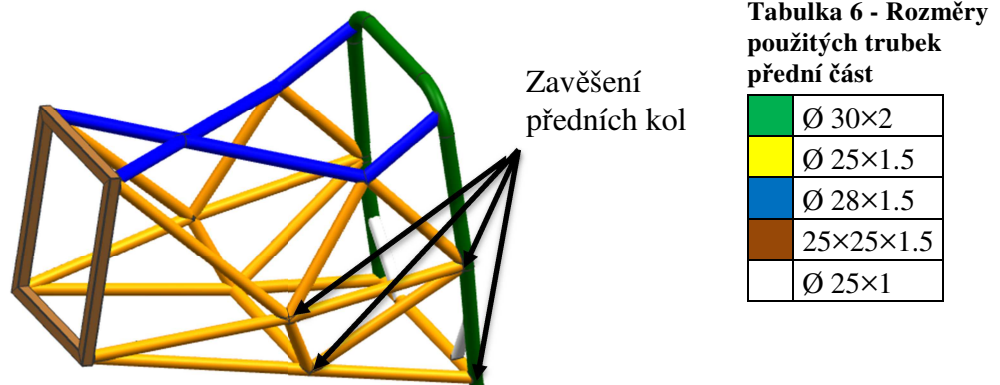
Obrázek 16 – Středová část rámu



Obrázek 17 - Varianty konstrukce středové části

4.4. Návrh přední části rámu

Délka této části je limitována prostorem daným pravidly Formule SAE pro chodidla řidiče a pedály. Přední část je tvořena ze tří různých profilů. První je čtvercový jekl o rozměrech 25×25×1,5×1,5mm, který má lepší pevnost a tuhost při nárazu. Druhý profil je kruhová trubka o průměru 25×1,5mm a třetí je také kruhová trubka, která je zároveň podporou předního oblouku a má rozměry 28×1,5mm. Přední část zvenčí ovlivňuje uchycení zavěšení předních kol a vnitřní prostor vyplňují pedály a hřídel volantu.



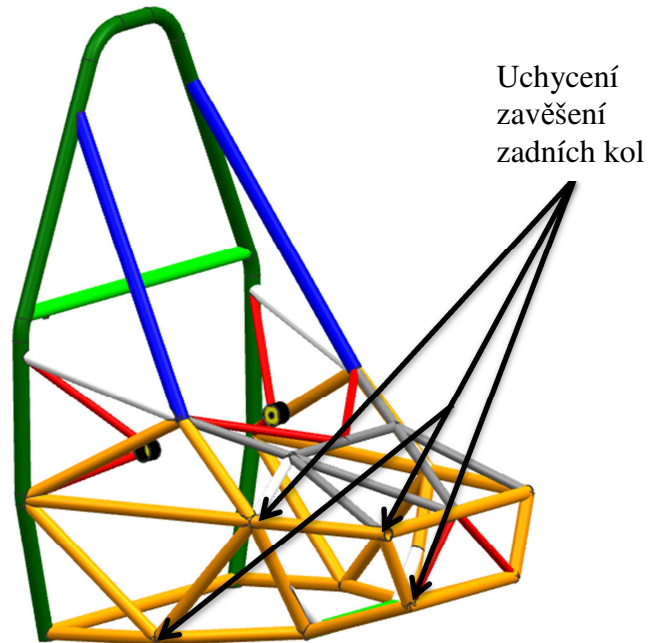
Obrázek 18 - Přední část rámu

4.5. Návrh zadní části rámu

Zadní část rámu je dle pravidel Formule SAE omezena sklonem podpor hlavního oblouku a dodržením triangulace trubek z hlediska lepší torzní tuhosti. V zadní části je uložen motor, systém mazání motoru, systém chlazení motoru, řídicí jednotka motoru a elektronickými řídicími systémy a uchycení zavěšení zadních kol.

Tabulka 7 - Rozměry
použitých trubek zadní
část

	Ø 30×2
	Ø 28×2
	Ø 25×1.5
	Ø 28×1.5
	Ø 25×1
	Ø 16×1
	Ø 40×3
	Ø 18×1













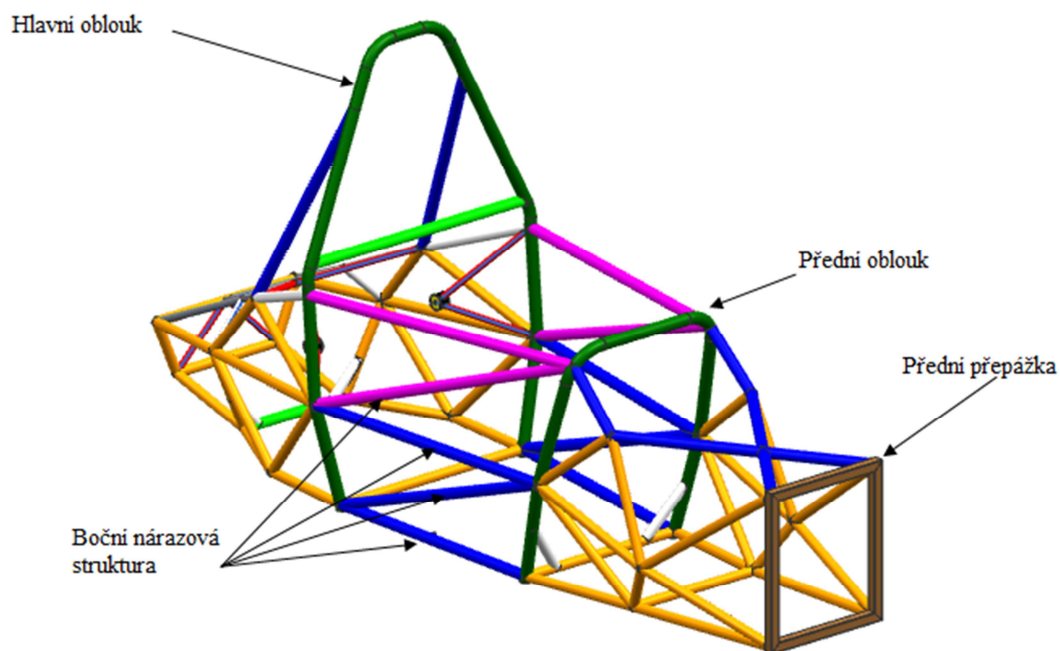
Obrázek 19 - Zadní část rámu

5. Konstrukční řešení alternativního ocelového rámu

Na obrázku 20 je zobrazena výsledná konstrukce alternativního rámu. Rám musí odpovídat požadovaným výpočtům podle pravidel FSAE a dále musí být spočten na torzní tuhost. V tabulce jsou uvedeny rozměry jednotlivých profilů, které jsou použity v rámové konstrukci.

Tabulka 8 - Rozměrové parametry jednotlivých trubek

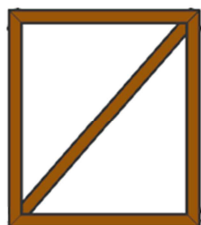
Trubka		40×3
		30×2
		28×2
		28×1,5
		28×1
		25×1,5
		25×1
		18×1
Jekl		16×1
		25×25×1,5



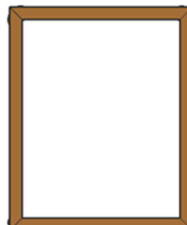
Obrázek 20 – Rozměrové rozdělení jednotlivých trubek v rámové konstrukci

5.1. Varianta ocelového rámu

Tato varianta vychází z původní koncepce standardního rámu. Přední přepážka je tvořena z čtvercových profilů, které nejsou vyztuženy jako u původní koncepce diagonálním profilem, který byl na úkor nižší hmotnosti odebrán.



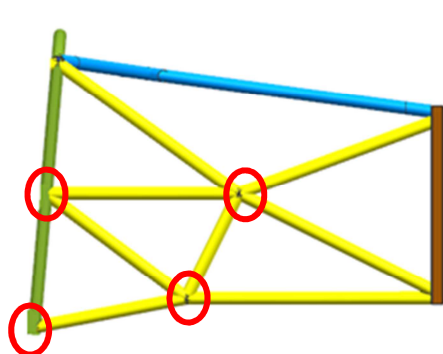
PŮVODNÍ



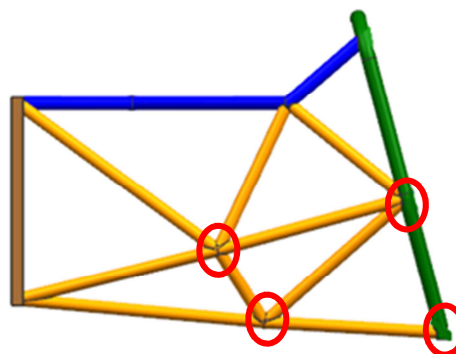
NOVÁ KONCEPCE

Obrázek 21 - Srovnání přední přepážky rámu

V přední části díky novému způsobu zavěšení byla změněna struktura seskupení trubek. Zavěšení je na novém návrhu v nižší poloze kvůli lepší stabilitě celého vozidla. Z obrázků 22 je viditelné, že nový rám má v oblasti podpory předního oblouku lepší vyztužení než rám původní a také líbivější vzhled. Nová koncepce rámu má přední oblouk více skloněn dopředu z hlediska vytvoření většího sedadlového prostoru.



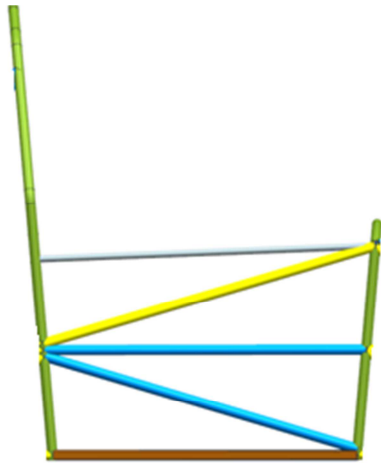
PŮVODNÍ



NOVÁ KONCEPCE

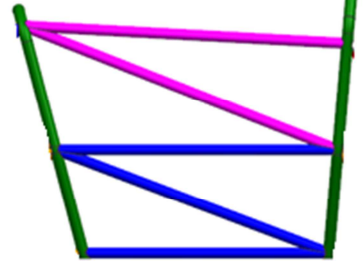
Obrázek 22 - Srovnání přední struktury rámu

Nejvhodnější varianta konstrukce středové části je vybrána na základě FEM analýzy, viz kapitola: 5.5 Torzní tuhost. Spodní prvek rámové konstrukce není navržen z jeklu jako v původním rámu, ale byla zde použity trubka o rozměrech 28x1.5 mm.



Jekl
(25x25x1.5mm)

PŮVODNÍ

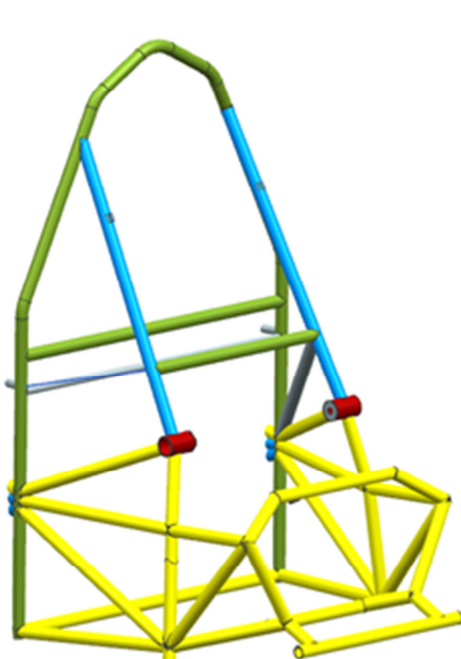


Trubka
(28x1.5mm)

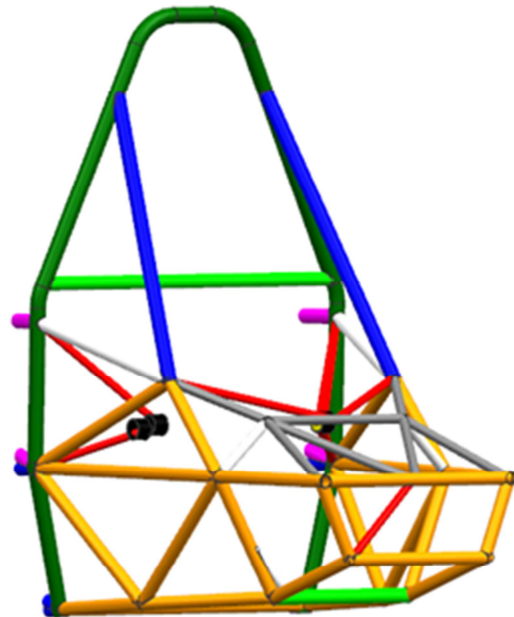
NOVÁ KONCEPCE

Obrázek 23 - Porovnání středů obou rámu

Zadní část závisí na typu použitého motoru a místa pro zavěšení zadních kol. Během návrhu byla tato část prodloužena pro zajištění většího vnitřního prostoru a také byla vytvořena triangulace.



PŮVODNÍ



NOVÁ KONCEPCE

Obrázek 24 - Porovnání zadní části obou variant

5.2. Varianta hliníkovo - ocelového rámu

Mezi výhody hliníkových ráků s ocelovými prvky patří malá hmotnost, vysoká odolnost proti korozi a vysoká houževnatost. Problém nastává při svařování, jelikož hliník má velkou afinitu proti kyslíku. Kvůli kyslíku vznikají při svařování reakce a vytváří se elektricky nevodivé vrstvy kysličníku hlinitého, který zůstává na povrchu svaru. Kysličník je hydrofilní a váže vodu, která je zdrojem vodíku ve svaru. Vodík způsobí vnitřní napětí a tím je zvýšena pravděpodobnost porušení v místě svaru. Proto se svařuje obalenou elektrodou, která chrání svar proti kyslíku. Další nevýhodou hliníkových konstrukcí oproti ocelovým je jejich vysoká cena. Rám bude tvořen hlavním a přední obloukem, které jsou z oceli S353 a zbylá konstrukce je z hliníkových profilů [7].

5.3. Důležité výpočty zadané pravidly Formule SAE

V tabulce 9 jsou uvedeny hodnoty deformace pro jednotlivé varianty ráků. Výpočty byly provedeny v souladu s pravidly FSAE.

Tabulka 9 -Srovnání posunutí jednotlivých variant

Srovnání hodnot jednotlivých variant		Původní rám	Ocelový rám	Hliníkovo - ocelového rám
hlavní oblouk	celkové posunutí [mm]	15,66	17,38	32,68
přední oblouk		9,141	8,654	10,766
boční nárazová struktura		4,333	5,265	5,284
přední přepážka		20,36	24,28	35,76
přední přepážka a deformační člen		4,044	10,68	14,2
trubka pro ramenní pásy		46,61	7,161	29,49
trubka pro uchycení břišních pásů		22,61	15,63	24,84

5.4. Zhodnocení variant

Z požadavků vyplývá, že se rám nesmí posunout o více než je 25 mm. Na základě výsledků z tabulky 9 se ukazuje jako optimální varianta ocelový rám, který splňuje požadavky pravidel uvedené v kapitole: 4.1 Specifikace požadavků kladených na alternativní rám, jako nevyhovující varianty jsou původní a hliníkovo – ocelový rám.

5.5. Výpočet torzní tuhosti

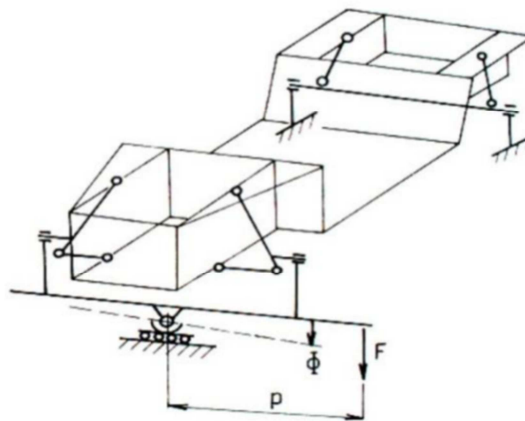
Obecný vztah pro výpočet torzní tuhosti:

$$C = \frac{T_k}{\alpha} \quad [\text{Nm}/^\circ] \quad (3)$$

Je to poměr síly a deformace v našem případě se deformace uvažuje úhlové zkroucení, které způsobuje zkrutný moment. Jednotlivé veličiny v daném vztahu jsou: T_k je zkrutný moment [Nm], α je změna natočení rámu působením daného zkrutného momentu [°].[8]

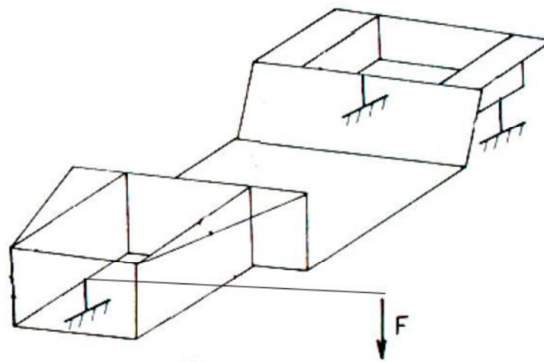
Torzní tuhost ovlivňuje ovládání vozidla při průjezdu zatáčkou a zajišťuje přenos zatížení kola mezi přední a zadní nápravou. Při nízké hodnotě torzní tuhosti dochází k velké deformaci rámu a to má za příčinu nežádoucí změnu geometrie a vozidlo se stává neovladatelné.

Měření torzní tuhosti je možné provést několika způsoby. Nejznámější způsob měření je pomocí tzv. rámové houpačky, která simuluje průjezd zatáčkou. Zadní kola jsou pevně fixována a přední kola jsou uchycena na přidavném rámu s otočným bodem v podélné ose, na jedno rameno působí zátažná síla, která způsobuje kroticí moment. Zkroucení lze měřit úhlem odklonu ramena, který se zatěžuje, nebo pomocí hodinkových úchylkoměrů, kde se měří rozdíl výšek jednotlivých bodů rámu vůči podlaze.[4]



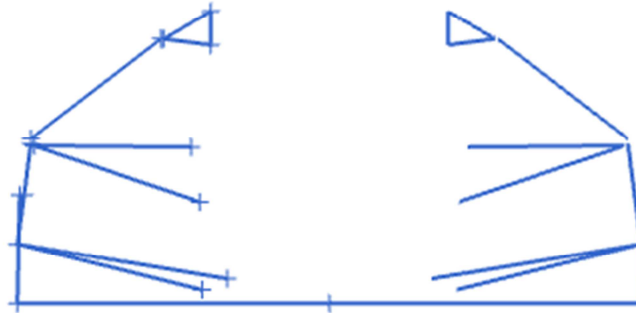
Obrázek 25 – Torzní tuhost na rámové houpačce

Druhou metodou je fixace rámu pomocí tří bodů a následné zatěžování kroticím momentem u předního opěrného bodu. Tato metoda má výhodu v tom, že nejsou do výsledku vnášeny poddajnosti náprav a houpačky. Nevýhoda spočívá v měření tuhosti mezi zadanými body a ne mezi nápravami.

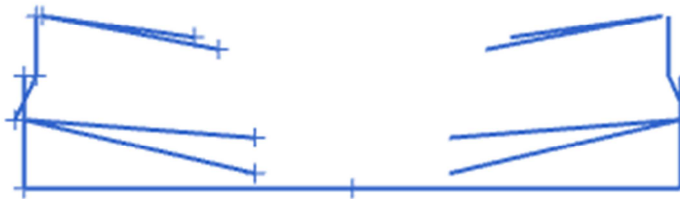


Obrázek 26 – Druhý výpočtový model [4]

Na obrázcích 27 a 28 jsou zobrazeny přední a zadní části rámové houpačky, které jsou využity při výpočtu alternativního rámu. Houpačka je připojena v místech zavěšení předních a zadních kol. Přední část je namáhána na krut a zadní část je pevně uložena proti posuvu a rotaci. Rámová houpačka je zasítována 1D prvky. Při výpočtech byla použita kruhová tyč o průměru 200mm.



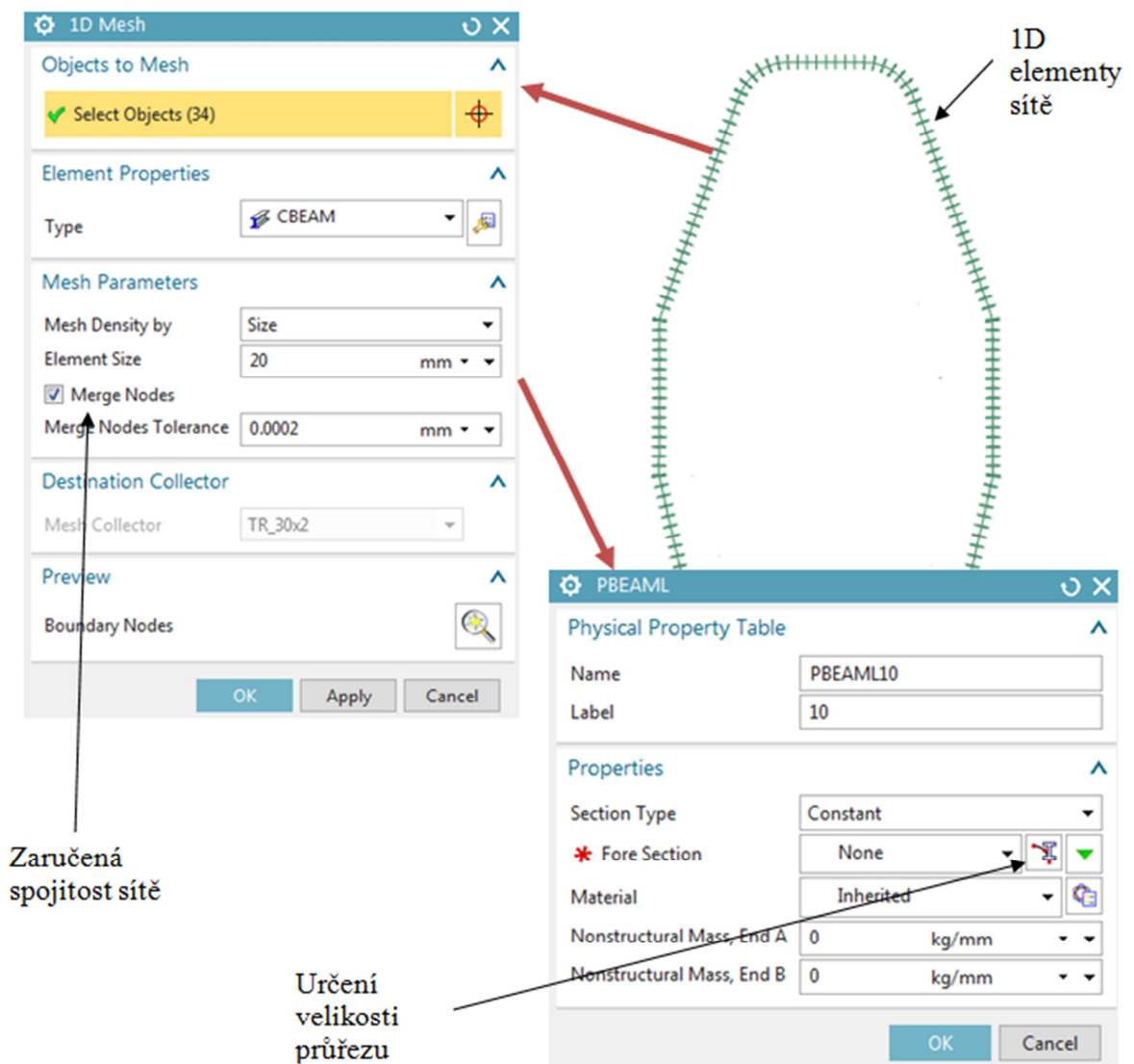
Obrázek 27 – Přední část rámové houpačky



Obrázek 28 – Zadní část rámové houpačky

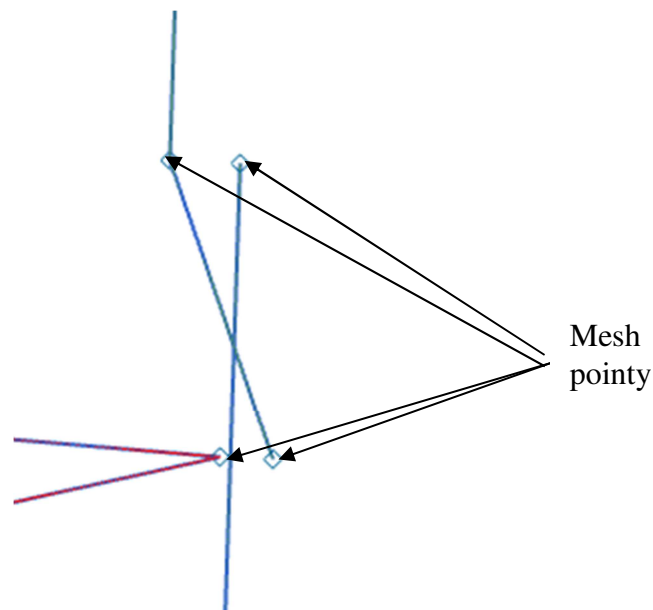
5.6. Výpočtové řešení torzní tuhosti

Pro vytvoření výpočtového modelu rámu a následný výpočet torzní tuhosti byl využit CAD program NX 11.0, s výpočtovým řešičem Nastran. Pro zjednodušení byla použita 1D síť, aby nedošlo k přerušení při výpočtu, musí být síť spojitá. Spojitost zaručí funkce MERGE NODES. Problém se spojitostí lze řešit přímo při modelování rámu nebo v podprogramu SIM. V prvním případě se rám rozdělí v kritických místech, aby na sebe síť navazovala. Nebo pomocí vazby MANUAL COUPLING se rám v kritických místech spojí. Při použití této vazby se zamezí veškeré posuvy a rotace. Na obrázcích níže jsou zobrazeny kritické spoje při síťování. Poté je potřeba nadefinovat průměr, tloušťku dané trubky a zvolit materiál. Totožný postup síťování je možné aplikovat na zbylé součásti struktury rámu.



Obrázek 29 – Postup při výpočtu hlavního oblouku

Výpočet je rozdělen do dvou částí. První je tvořena v podprogramu FEM viz obrázek 29, zde je rám zasítován. Druhá část je tvořena v podprogramu SIM, kde se nadefinují okrajové podmínky. K rámu byla potřeba připojit rámovou houpačku, ta je spojena v místech zavěšení kol. Při tomto výpočtu se využilo vazby MANUAL COUPLING, která definuje, jak se rám bude natáčet. Spojení této vazby se tvoří pomocí koncových bodů MESH POINT, anebo pomocí prvků na zasítované součásti NODE. Nevýhoda využití prvků NODE je v tom, že při novém sítování se vazby zruší a je nutné je znovu obnovit. V našem případě byly vazby spojovány pomocí bodů MESH POINT.

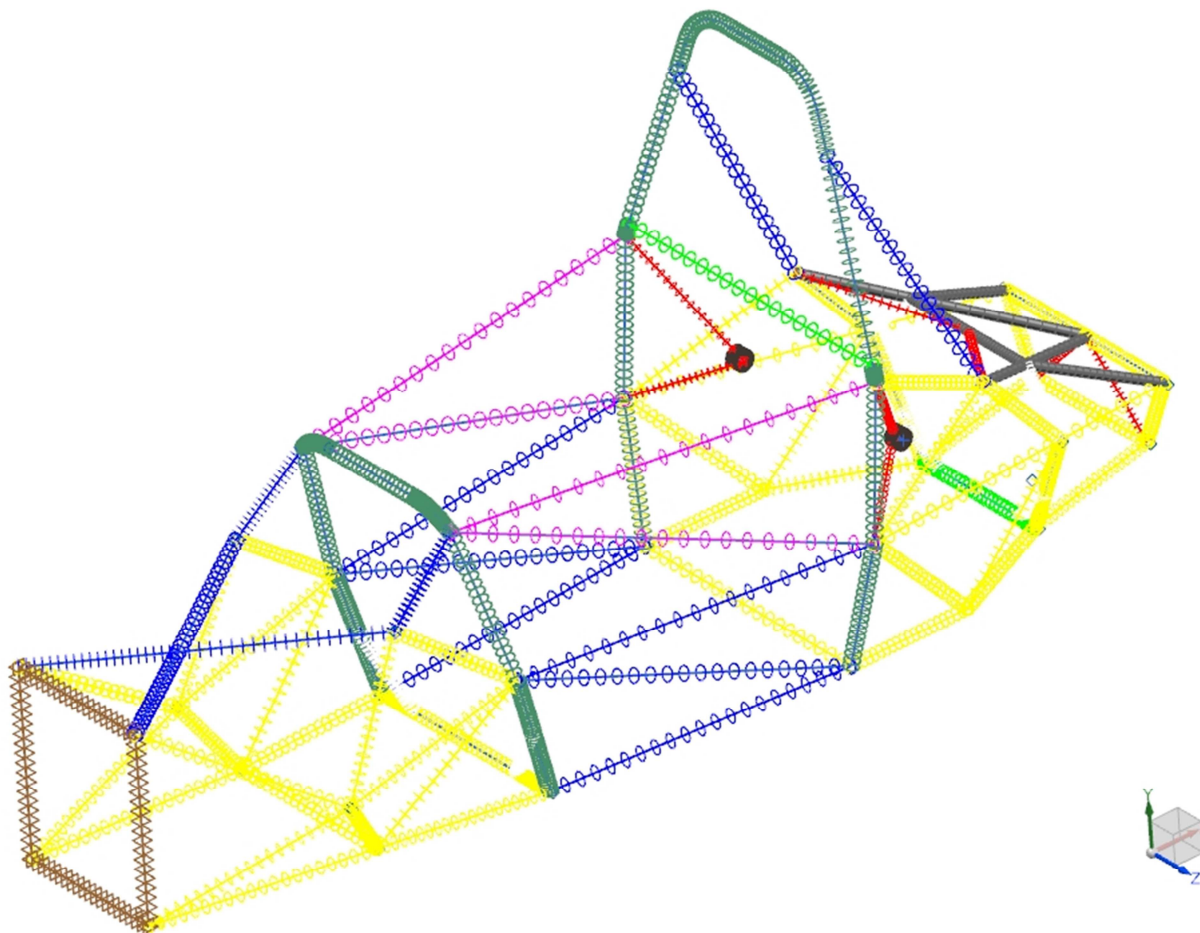


Obrázek 30 – Zobrazení Mesh pointů

Pro zadní část rámové houpačky je nutné definovat okrajové podmínky, které představují odebrání všech šest stupňů volnosti. Naopak přední část houpačky je rozdělena na dvě poloviny, kdy jedné z nich je odebráno opět všech šest stupňů volnosti a druhé je ponechána rotace okolo osy x o hodnotu 1° .

5.7. Zasiťování rámu a vypočtené hodnoty

Rám je zasiťován podle různých rozměrů trubek a jejich tloušťek. V obrázku jsou viditelné vzdálenosti a velikosti elementů. Okrajové parametry byly zvoleny uzly pro zavěšení kol. Rám je zasiťován pomocí 1D sítě o různých průměrech podle velikosti trubek. Rámová houpačka byla zasiťována pomocí Rigidových prvků, které simulují dokonalou tuhost houpačky.



Obrázek 31 – Zobrazení zasiťování alternativního rámu

Během výpočtu je využito tvrdého zatěžování, kdy máme předem definovanou hodnotu deformace. Výstupem této analýzy je reakční moment potřebný pro zajištění zadané deformace. Celková torzní tuhost rámu je dopočtena pomocí rovnice 3.

V tabulce 10 jsou uvedeny tuhosti obou rámových konstrukcí. Alternativní rám byl podroben výpočtu pro všechny možné konstrukční řešení středu, viz kapitola: 0. Z výsledků je viditelné, že alternativní ocelový rám má menší posunutí než rám původní.

Tabulka 10 - Hodnoty torzní tuhosti

		Reakční moment [Nm]	Torzní tuhost [Nm/°]
Standardní rám		2652,51	2652,51
Alternativní rám	Střed 1	889,69	889,69
	Střed 2	1310,62	1310,62
	Střed 3	1101,23	1101,23
	Střed 4	1633,68	1633,68
	Střed 5	1419,50	1419,50
	Střed 6	964,85	964,85
	Střed 7	1125,35	1125,35
	Střed 8	1449,80	1449,80
	Střed 9	1131,30	1131,30

Výpočet z výsledků analýzy původního rámu:

$$M_k = 2652,51 \text{ Nm}$$

$$\alpha_k = 1^\circ$$

$$C = \frac{M_k}{\alpha_k} = 2652,51 \left[\frac{\text{Nm}}{^\circ} \right]$$

Výpočet z výsledků analýzy pro alternativní rám:

$$M_k = 1686,11 \text{ Nm}$$

$$\alpha_k = 1^\circ$$

$$C = \frac{M_k}{\alpha_k} = 1686,11 \left[\frac{\text{Nm}}{^\circ} \right]$$

5.8. Svařování rámu

Rám byl svařen metodou TIG a MAG. Metoda MAG je svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu. Aktivní plyn má zamezit přístup vzduchu k roztavenému kovu. Jako aktivní plyn byl použit oxid uhličitý díky snadné dostupnosti a nízké ceně. Metoda TIG je svařování elektrickým obloukem za pomoci netavící se wolframové elektrody a ochranné atmosféry inertního plynu. [6]

Pro určení umístění jednotlivých trubek rámové konstrukce byl vytvořen přípravek z tenkých plechů o tloušťce 3mm. Tenké plechy jsou na sebe kolmé a naskládáné pomocí drážek. Na obrázku 32 je zobrazen přípravek pro svařování rámu a na obrázcích 33 a 34 je zobrazen rám s přípravkem na svařování. Nejprve se svařoval střed rámu a oblouky, aby zbylá konstrukce měla na co navázat.



Obrázek 32 – Přípravek pro svařování rámové konstrukce



Obrázek 33 – Alternativní rám s přípravkem na svařování zezadu



Obrázek 34 – Alternativní rám s přípravkem na svařování zepředu

6. Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo navrhnout alternativní rám Formula SAE. V práci byla popsána primární struktura rámové konstrukce.

Bylo provedeno srovnání jednotlivých variant, ze kterých byla vyhodnocena ocelová konstrukce. Toto hodnocení bylo podloženo výpočty na primární strukturu dle pravidel FSAE, dále byl rám podroben výpočtu na torzní tuhost. V řešení bylo 9 různých variant středové konstrukce. Návrh 4 byl vybrán z tabulky 10 jako nejlepší díky vysoké torzní tuhosti.

Analýza torzní tuhosti byla plánovaná i jako experiment, ale z důvodu dřívějšího odevzdání bakalářské práce se tento experiment neuskutečnil včas a proto není v práci uveden.

Posledním bodem této bakalářské práce je sestavení alternativního rámu do přípravku a následné svaření.

Seznam použitých symbolů a zkratek

UWB	University of West Bohemia (Západočeská univerzita)
ZČU	Západočeská univerzita
FST	Fakulta strojní
KKS	Katedra konstruování strojů
SAE	Society of Automotive Engineers (Sdružení automobilových Inženýrů)
CAD	Computer – aided design (Počítačem podporované projektování)
NX	Systém pro modelování
FS	Formula Student
TU	Technical University (Technická univerzita)
1D	Jednorozměrný prvek
S353	Označení oceli
°	Jednotka úhlu
mm	Jednotka délky (1 mm = 0,001 m)
%	Procentuální vyjádření celku
Kg	Základní jednotka hmotnosti
Ø	Průměr
R	Rádus
E	Youngův modul pružnosti
I	Kvadratický moment v průřezu
kN	Jednotka síly (kN = 1000 N)
GPa	Jednotka tlaku (1 GPa = 10 ⁹ Pa)
Re	Mez kluzu
Rm	Mez pevnosti
MPa	Jednotka tlaku (1 MPa = 10 ⁶ Pa)
SIM	Simulation (Simulace)
FEM	Finite element modeling and result (Modelování a výsledky konečných prvků)
C	Torzni tuhost [Nm/°]
T _k	Zkrutný moment [Nm]
α	Úhel natočení [°]

Seznam použité literatury

- [1] Ženčák, J. *Konstrukční návrh trubkového rámu formule student*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 43s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Janoušek
- [2] 2017-18 Formula SAE Rules[online], Dostupné z:
<<http://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20FSAE%20Rules%20PRELIMINARY.pdf>>
- [3] 2017 Formula Student Rules [online], Dostupné z:
<https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2017/rules/Rules2017>
- [4] Ing. Skovajsa, M. *Optimalizace prostorového rámu formule student UWB2012b s dosažením minimální hmotnosti s dostatečnou torzní tuhostí*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. 2014, 29s.
- [5] HOSNEDL, Stanislav a Jaroslav KRÁTKÝ. *Příručka strojního inženýra: obecné strojní části*. Praha: Computer Press, 1999. Edice strojaře. ISBN 80-7226-055-3.
- [6] *Svarbazar:Magazín praktického svařování* [online]. Svarinfo ©2011 [cit. 24. 5. 2017]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/>
- [7] *Konstrukce:Hliník a jeho možnosti svařování*. [online]. Konstrukce odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství [cit 28.5.2017]. Dostupné z <http://www.konstrukce.cz/>
- [8] Bc-Miroslav Malchárek, *Měření torzní tuhosti vozidla s využitím 3D scanneru*. Brno. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 83s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Portes, Dr.

Použitý software

- [9] Siemens NX 11.0

Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 – Alternativní rám Dragon 5 [1]	2
Obrázek 2 – Hlavní oblouk	3
Obrázek 3 – Minimální bezpečná vzdálenost hlavy řidiče [2]	4
Obrázek 4 – Vyztužení předního a hlavního oblouku [2]	4
Obrázek 5 – Přední oblouk	5
Obrázek 6 – Vyztužení předního oblouku	5
Obrázek 7 – Přední přepážka	6
Obrázek 8 - Triangulace rámu	6
Obrázek 9 – Vyztužení přední nárazové přepážky	7
Obrázek 10 – Boční nárazová struktura	7
Obrázek 11 – Šablona 95 % muže [2]	8
Obrázek 12 – Šablona pro minimální posedovou část rámu [2]	9
Obrázek 13 – Šablona představující nohy řidiče [2]	9
Obrázek 14 - Původní rám	10

Obrázek 15 – Rám se středem souřadnicového systému	11
Obrázek 16 – Středová část rámu.....	14
Obrázek 17 - Varianty konstrukce středové části.....	15
Obrázek 18 - Přední část rámu	16
Obrázek 19 - Zadní část rámu	17
Obrázek 20 – Rozměrové rozdělení jednotlivých trubek v rámové konstrukci.....	18
Obrázek 21 - Srovnání přední přepážky rámu.....	19
Obrázek 22 - Srovnání přední struktury rámu.....	19
Obrázek 23 - Porovnání středů obou rámu.....	20
Obrázek 24 - Porovnání zadní části obou variant	20
Obrázek 25 – Torzní tuhost na rámové houpačce	22
Obrázek 26 – Druhý výpočtový model [4].....	22
Obrázek 27 – Přední část rámové houpačky	23
Obrázek 28 – Zadní část rámové houpačky	23
Obrázek 29 – Postup při výpočtu hlavního oblouku	24
Obrázek 30 – Zobrazení Mesh pointů	25
Obrázek 31 – Zobrazení zasíťování alternativního rámu	26
Obrázek 32 – Přípravek pro svařování rámové konstrukce	28
Obrázek 33 – Alternativní rám s přípravkem na svařování zezadu	29
Obrázek 34 – Alternativní rám s přípravkem na svařování zepředu	29
Tabulka 1 - Minimální tloušťky rozměrů trubek [3].....	10
Tabulka 2 - Velikosti a tloušťky trubek v původním rámu	10
Tabulka 3 - Zadané parametry podle pravidel FSAE.....	12
Tabulka 4 - Návrh polotovarů primární struktury	13
Tabulka 5 - Rozměry použitých trubek.....	14
Tabulka 6 - Rozměry použitých trubek přední část	16
Tabulka 7 - Rozměry použitých trubek zadní část.....	17
Tabulka 8 -Rozměrové parametry jednotlivých trubek.....	18
Tabulka 9 -Srovnání posunutí jednotlivých variant	21
Tabulka 10 - Hodnoty torzní tuhosti	27

Seznam příloh

Příloha č. 1 - FEM a SIM analýza alternativního rámu

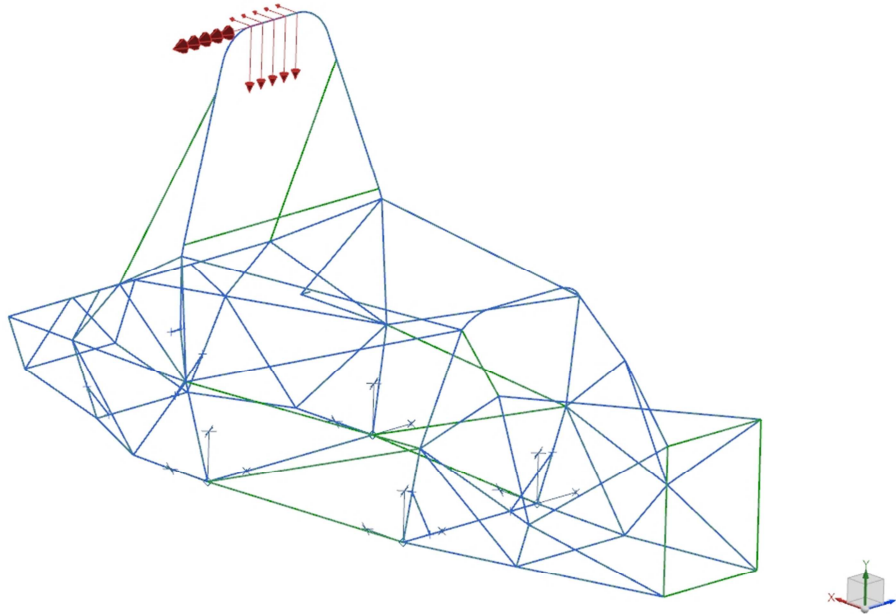
Výkresová dokumentace

Koncepční výkres	UWB-17-01-02-000
Hlavní oblouk	UWB04-01-02-001P
Přední oblouk	UWB04-01-02-004P

PŘÍLOHA č. 1

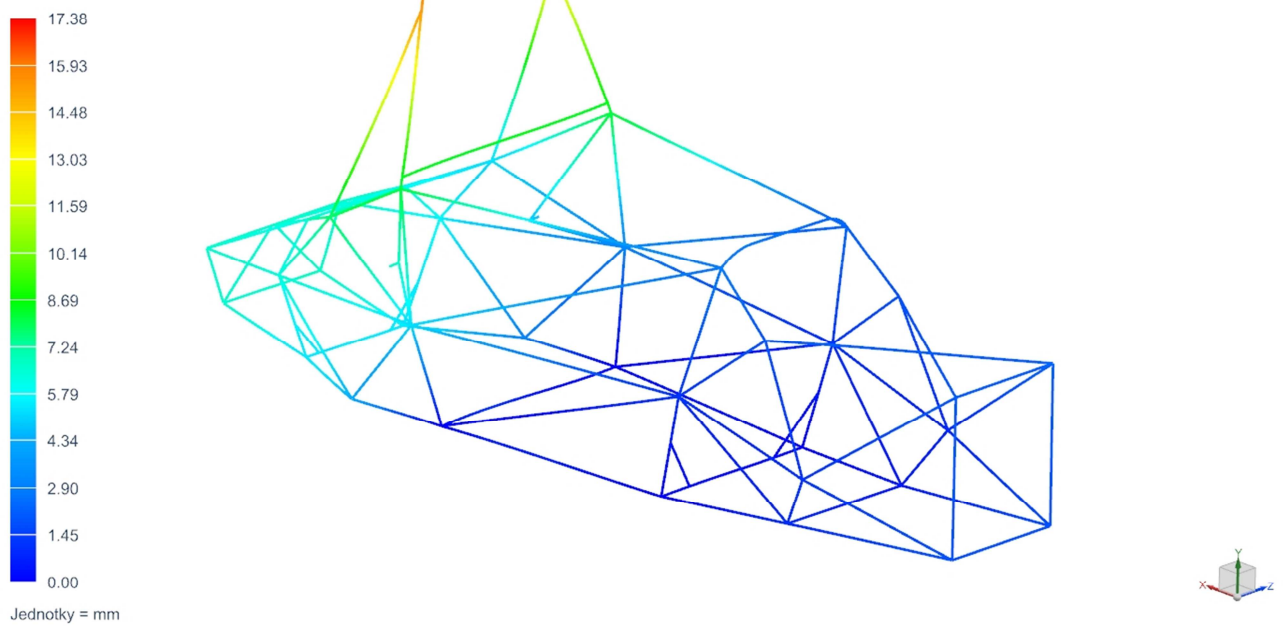
FEM a SIM analýza alternativního rámu

1. Hlavní oblouk



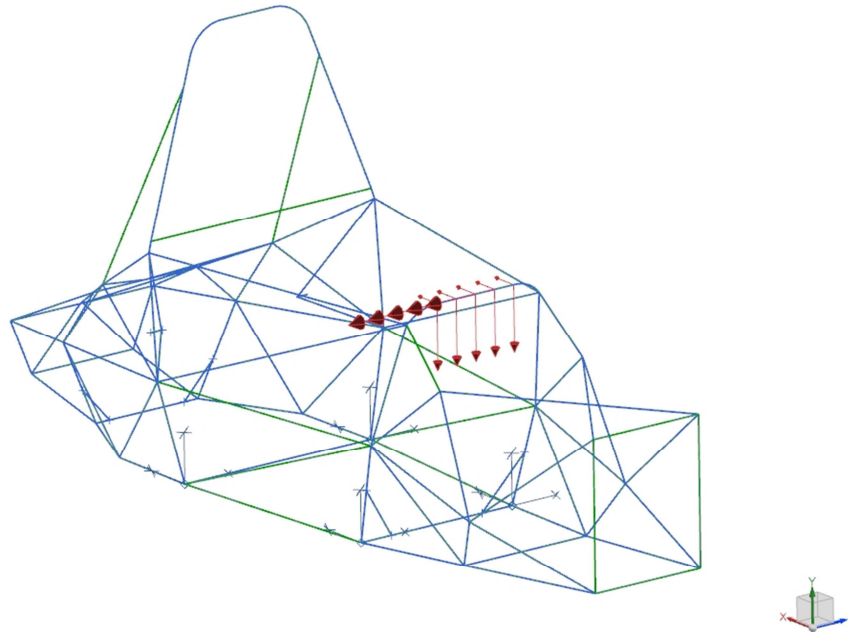
Obrázek 1 - Okrajové podmínky : Hlavní oblouk

Výsledek vypočtovy_model_fem1_sim1 : Solution 1
Subcase - Static Loads 1, Statický krok 1
Posuv - Uzlový, Hodnota
Min : 0.00, Max : 17.38, Jednotky = mm
Deformace : Posuv - Uzlový Hodnota



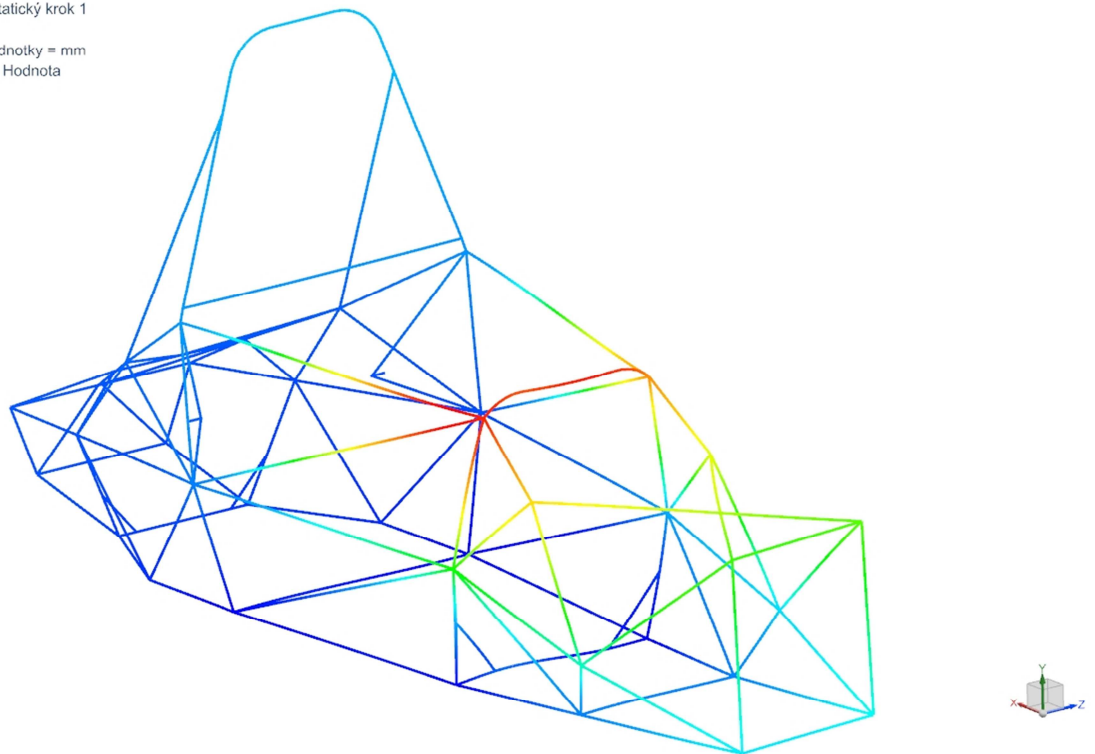
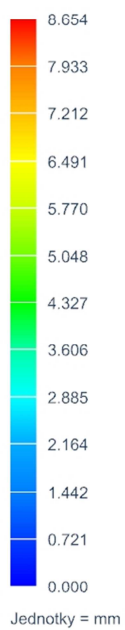
Obrázek 2 - Celková deformace : Hlavní oblouk [mm]

2. Přední oblouk



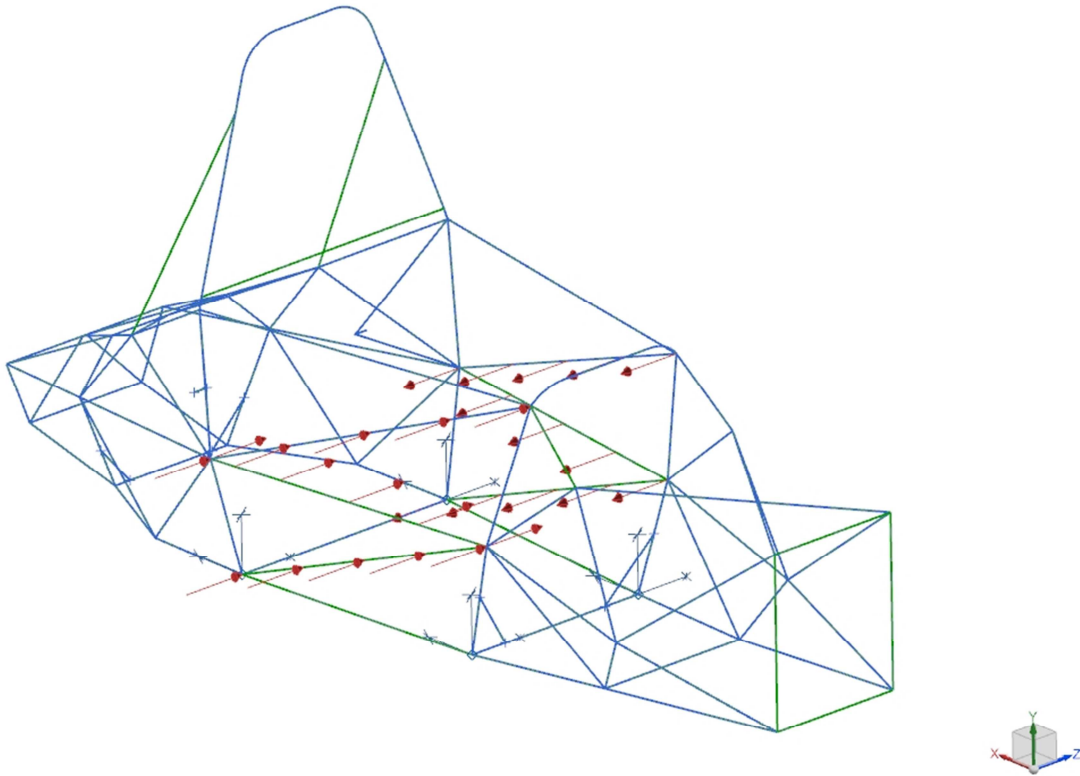
Obrázek 3 - Okrajové podmínky : Přední oblouk

Výsledek výpočtovy_model_fem1_sim1 : Solution 1
Subcase - Static Loads 1, Statický krok 1
Posuv - Uzlový, Hodnota
Min : 0.000, Max : 8.654, Jednotky = mm
Deformace : Posuv - Uzlový Hodnota



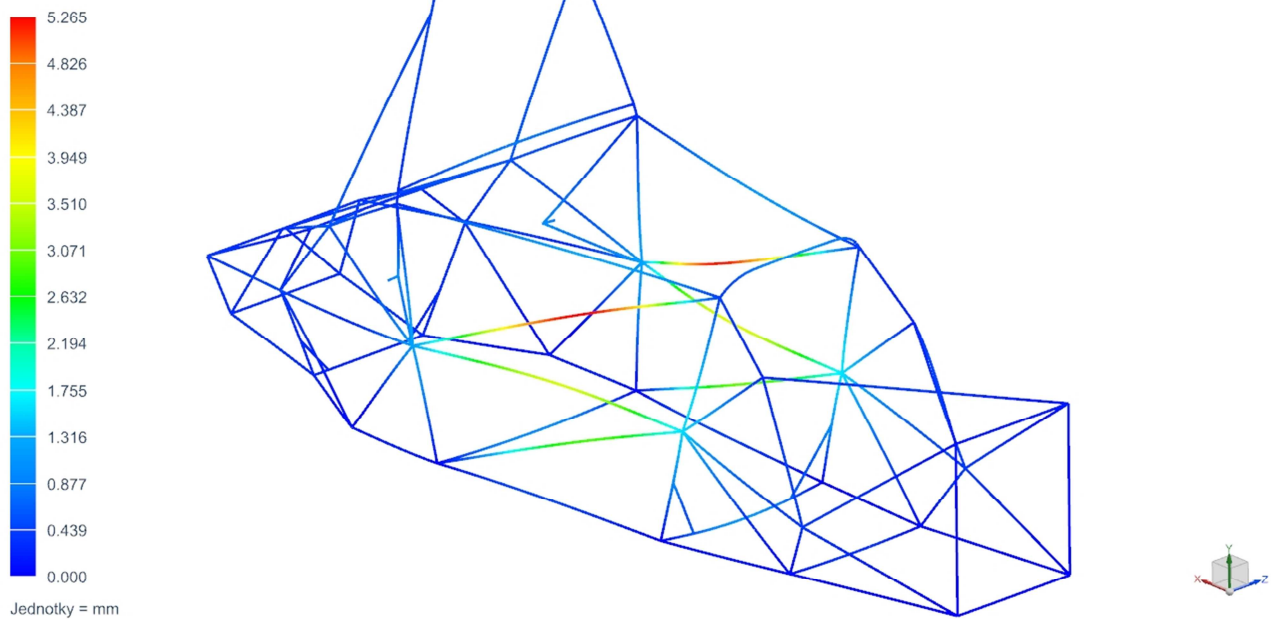
Obrázek 4 – Celková deformace : Přední oblouk [mm]

3. Boční nárazová struktura



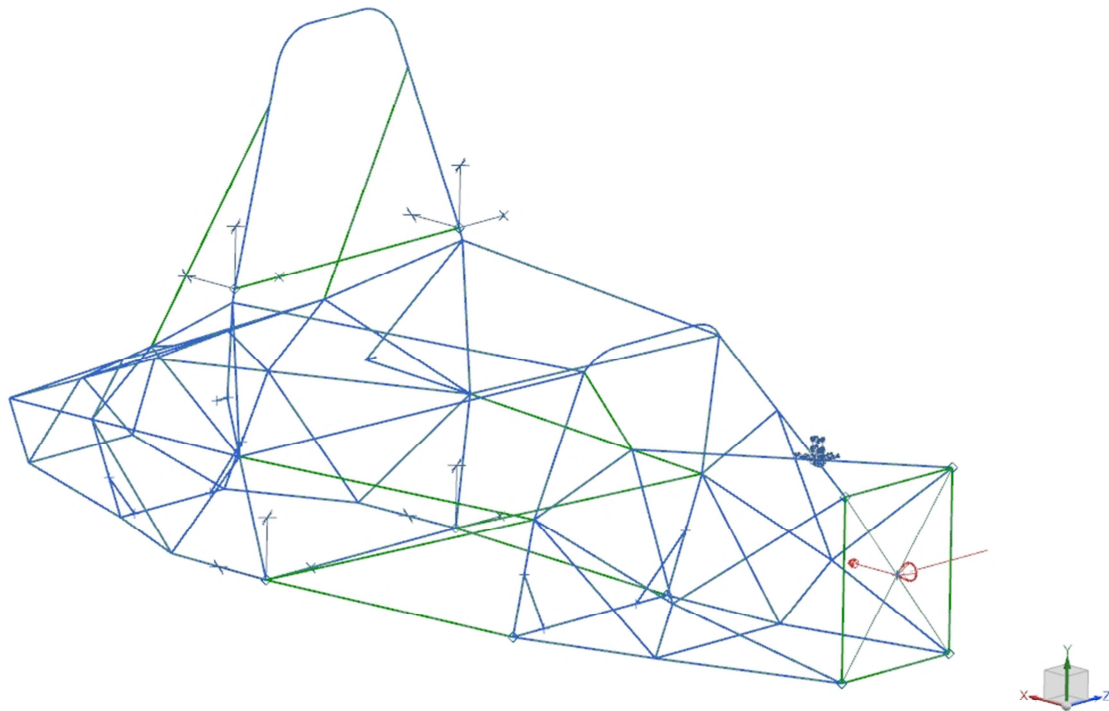
Obrázek 5 – Okrajové podmínky : Boční nárazová struktura

Výsledek výpočtovy_model_fem1_sim1 : Solution 1
Subcase - Static Loads 1, Statický krok 1
Posuv - Uzlový, Hodnota
Min : 0.000, Max : 5.265, Jednotky = mm
Deformace : Posuv - Uzlový Hodnota



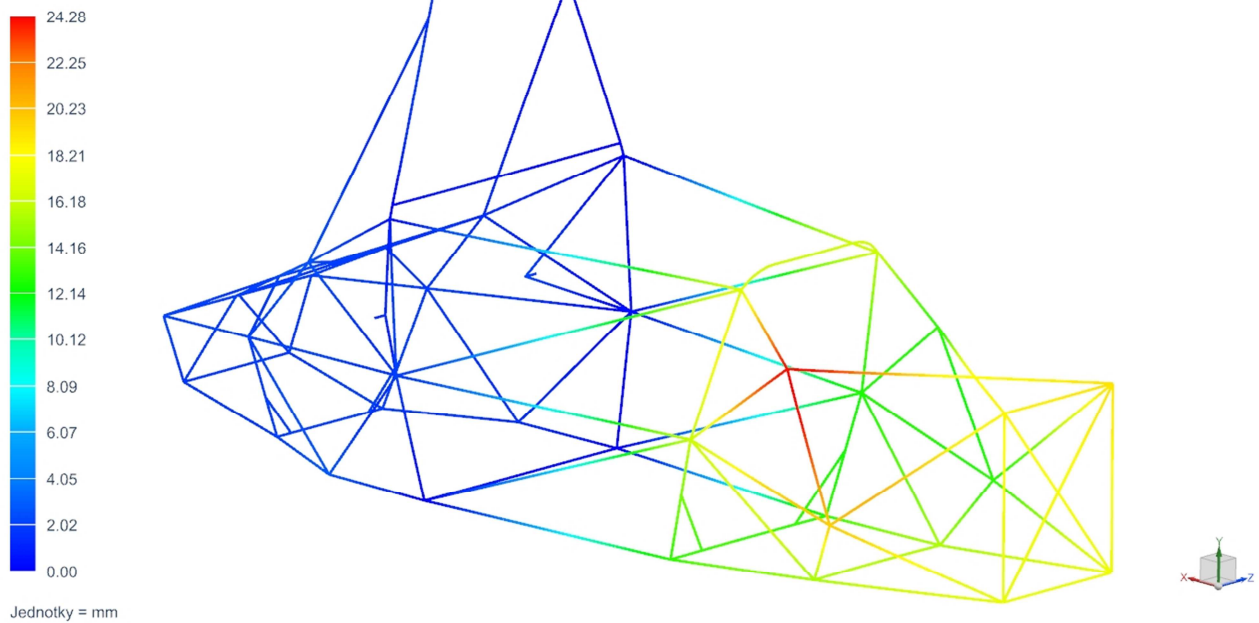
Obrázek 6 - Celková deformace : Boční nárazová struktura [mm]

4. Přední přepážka



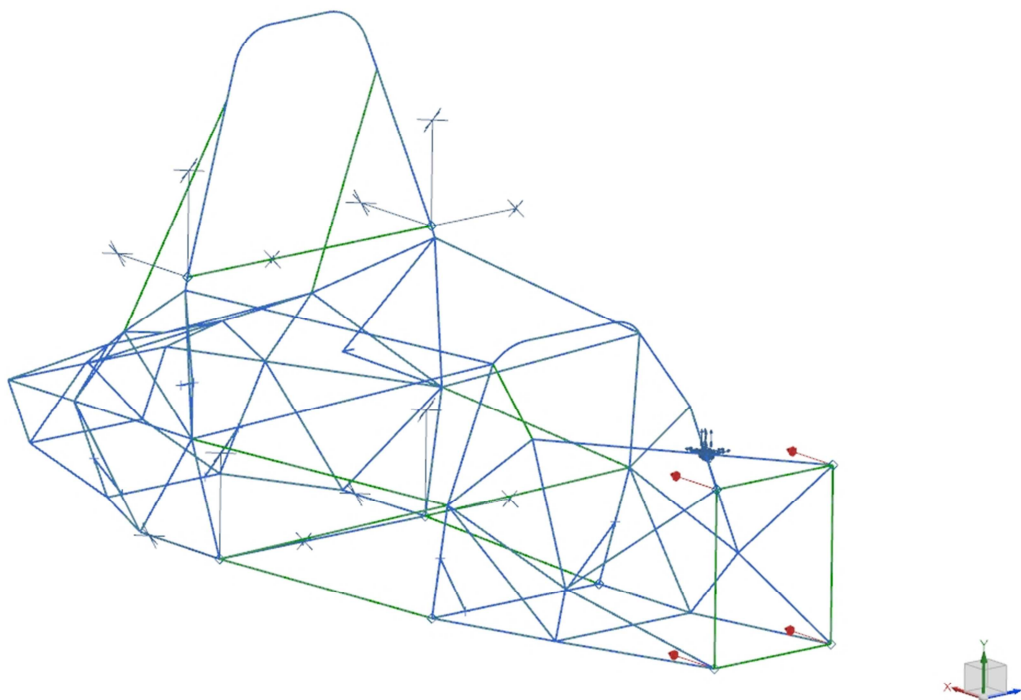
Obrázek 7 - Okrajové podmínky : Přední přepážka

Výsledek vypoctovy_model_fem1_sim1 : Solution 1
Subcase - Static Loads 1, Statický krok 1
Posuv - Uzlový, Hodnota
Min : 0.00, Max : 24.28, Jednotky = mm
Deformace : Posuv - Uzlový Hodnota



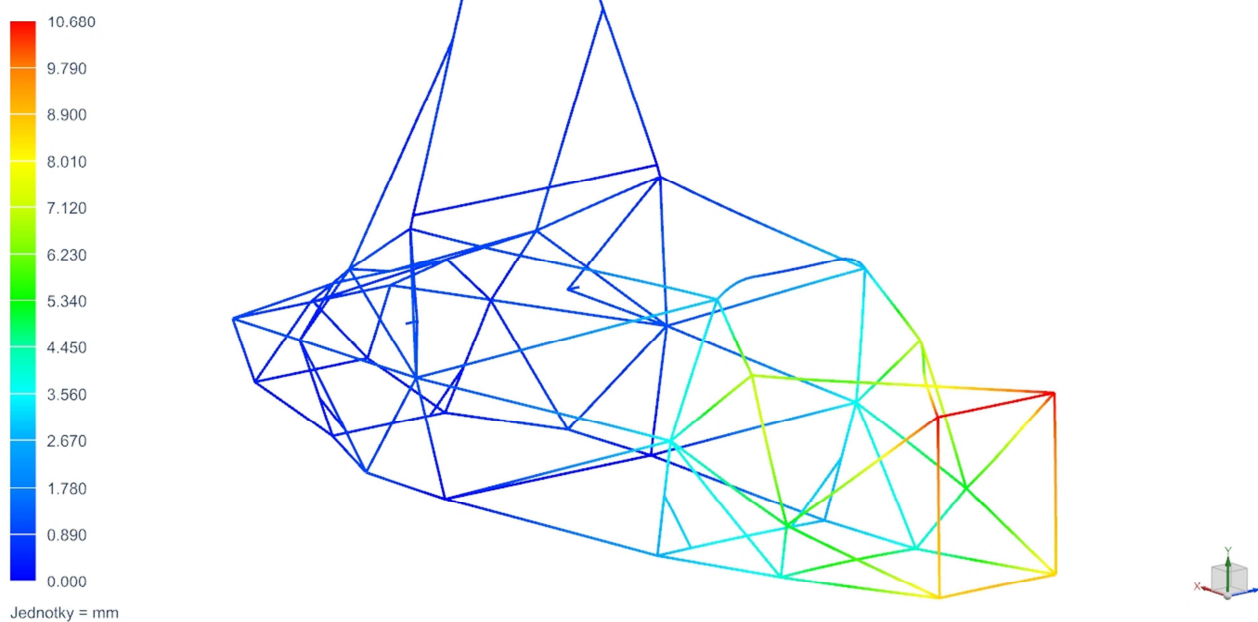
Obrázek 8 - Celková deformace : Přední přepážka [mm]

5. Přední přepážka, deformační člen



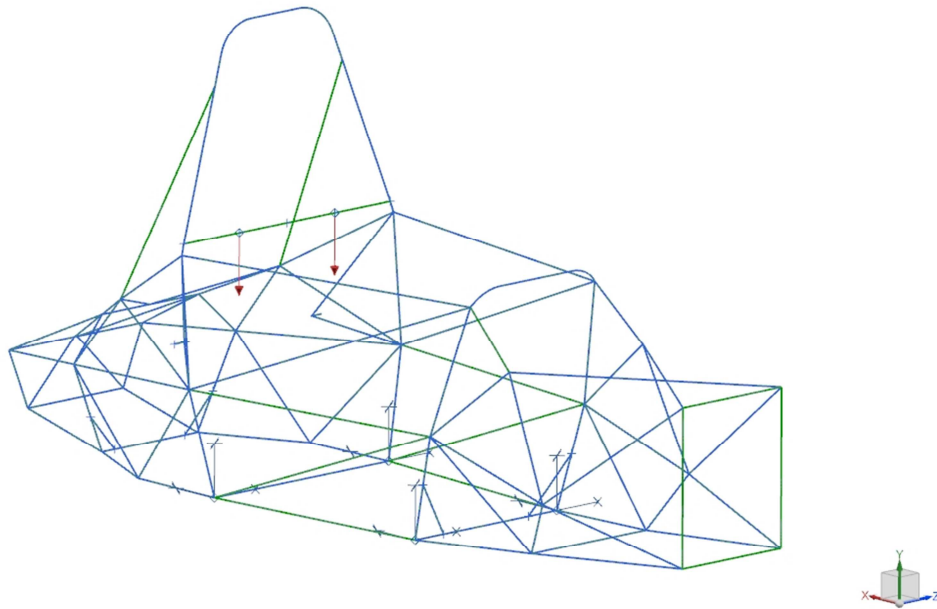
Obrázek 9 - Okrajové podmínky : :Přední přepážka, deformační člen

Výsledek vypočtovy_model_fem1_sim1 : Solution 1
Subcase - Static Loads 1, Statický krok 1
Posuv - Uzlový, Hodnota
Min : 0.000, Max : 10.680, Jednotky = mm
Deformace : Posuv - Uzlový Hodnota



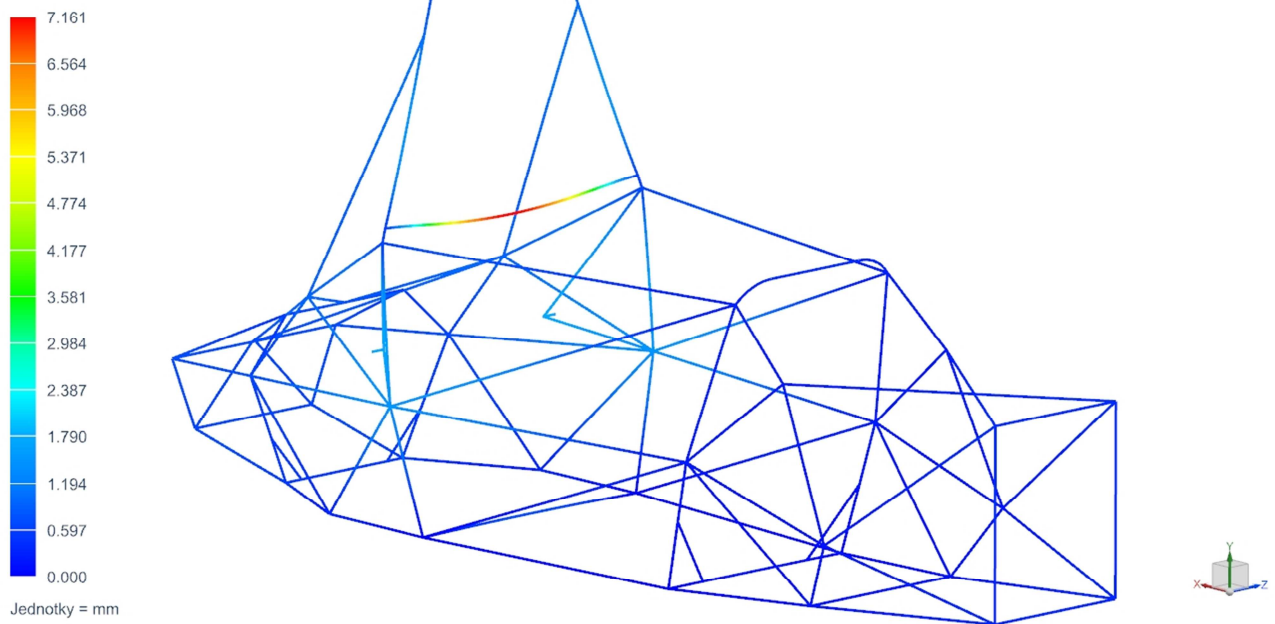
Obrázek 10 - Celková deformace : Přední přepážka, deformační člen [mm]

6. Ramenní pásy



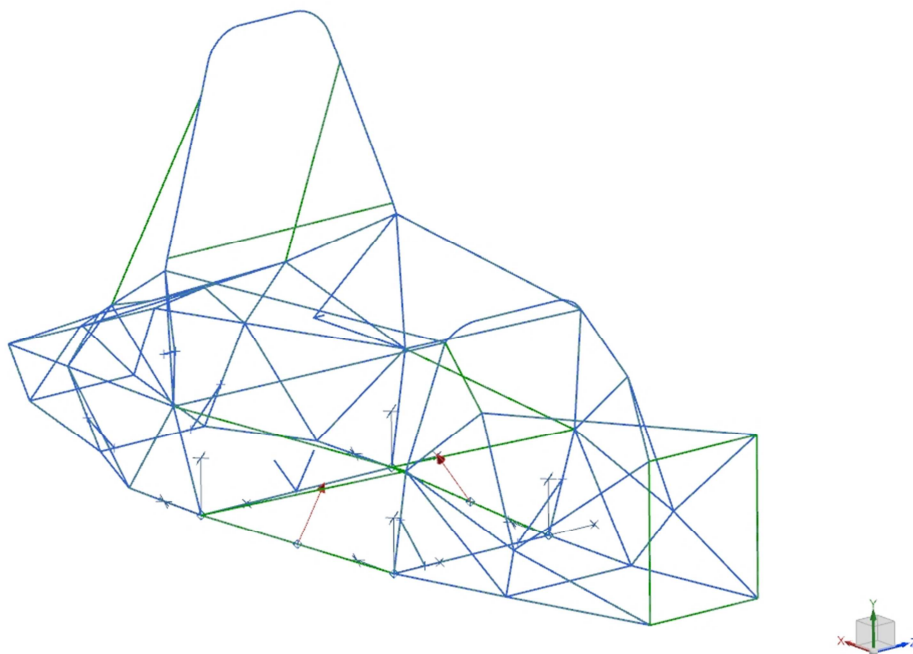
Obrázek 11 - Okrajové podmínky : Ramenní pásy

Výsledek vypočtovy_model_fem1_sim1 : Solution 1
Subcase - Static Loads 1, Statický krok 1
Posuv - Uzlový, Hodnota
Min : 0.000, Max : 7.161, Jednotky = mm
Deformace : Posuv - Uzlový Hodnota



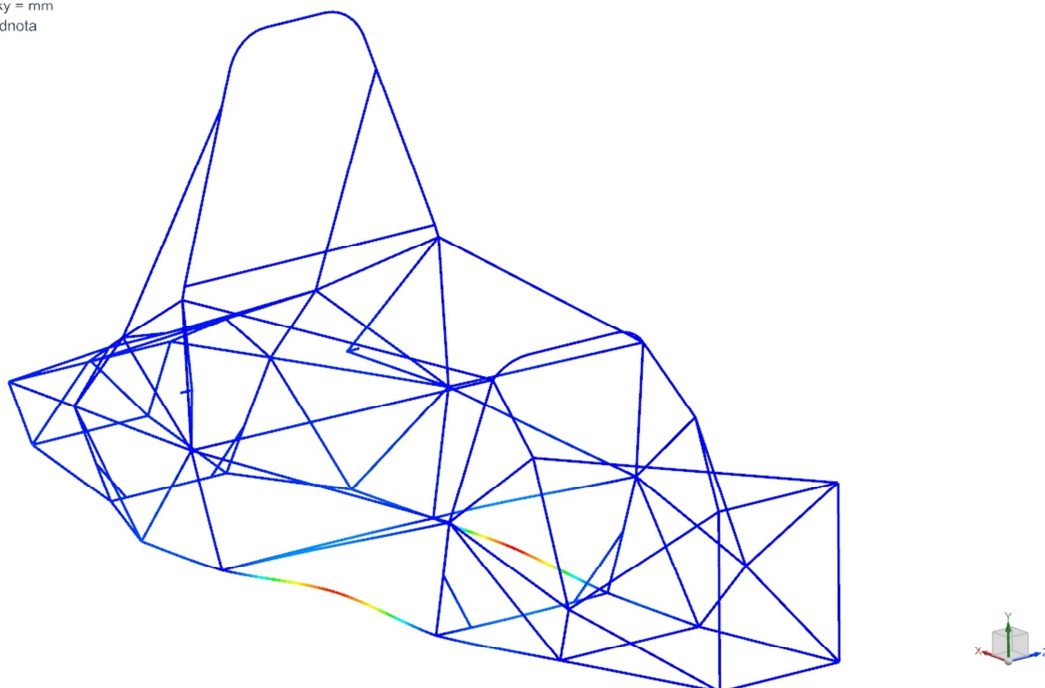
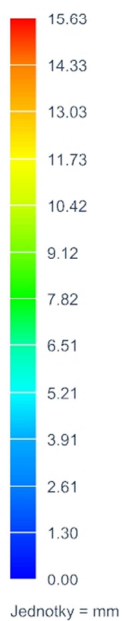
Obrázek 12 - Celková deformace : Ramenní pásy [mm]

7. Břišní pásy



Obrázek 13 - Okrajové podmínky : Břišní pásy

Výsledek vypočtovy_model_fem1_sim1 : Solution 1
Subcase - Static Loads 1, Statický krok 1
Posuv - Uzlový, Hodnota
Min : 0.00, Max : 15.63, Jednotky = mm
Deformace : Posuv - Uzlový Hodnota



Obrázek 14 - Celková deformace : Břišní pásy [mm]