



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

**FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING**

ALTERNATIVNÍ RÁM FORMULE STUDENT VYHOVUJÍCÍ POŽADAVKŮM MEZINÁRODNÍCH PRAVIDEL

*FORMULA FRAME ALTERNATIVE DESIGN ACCORDING INTERNATIONAL RULES
REQUIREMENT*

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. LUKÁŠ ONDÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PAVEL RAMÍK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lukáš Ondák

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

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

Alternativní rám Formule Student vyhovující požadavkům mezinárodních pravidel

v anglickém jazyce:

Formula Frame Alternative Design According International Rules Requirements

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte návrh rámu vozidla Formule Student vyhovující pravidlům Formula SAE International Rules pro tzv. alternativní rámy.

Cíle diplomové práce:

1. Proveďte rešerši požadavků na tzv. alternativní rámy Formule Student dané pravidly Formula SAE International Rules a rešerši rámu tohoto provedení používaných v současnosti.
2. Vytvořte návrh alternativního rámu studentské formule v návaznosti na související komponenty vozidla.
3. Vytvořte návrh výpočtových analýz vlastností rámu požadovaných mezinárodními pravidly studentské soutěže tak, aby byly k dispozici ve formátu Nastran analysis deck pro schválení konstrukce rámu pro použití v mezinárodních soutěžích.
4. Proveďte výpočtovou simulaci zátěžných stavů rámu požadovaných mezinárodními pravidly.
5. S ohledem na výsledky analýz požadovaných pravidly sestavte v případě potřeby simulační modely pro zhodnocení dalších důležitých vlastností navržené konstrukce. Proveďte příslušné analýzy.
6. V případě potřeby proveďte konstrukční úpravy navrženého rámu a zopakujte simulační analýzy dle bodů 4. a 5. Postup opakujte s cílem zlepšit sledované vlastnosti rámu.
7. Zhodnoťte dosažené výsledky a vyslovte se k vhodnosti konstrukčního provedení rámu alternativního provedení vyhovujícího pro použití v mezinárodních soutěžích.

Seznam odborné literatury:

- [1] AIRD, F., Race Car Chassis. Design and Construction. Motorbooks Intl. 1997, ISBN 0-7606-0283-9
- [2] JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J. Pružnost a pevnost I, VUT v Brně 1992
- [3] Formula Student Rules web page [online], 2013, poslední revize 9. 9. 2013. Dostupné z: <<http://www.formulastudent.com/formula-student/formula-student-2013/Teams/Rules>>
- [4] PTC Creo Parametric Tutorials [online], Parametric Technology Corporation, 2013, poslední revize 9. 9. 2013. Dostupné z: <http://learningexchange.ptc.com/tutorials/listing/sub_product_id:14>
- [5] MSC Academic Video Tutorial Series [online], 2013, poslední revize 9. 9. 2013. Dostupné z: <<http://www.mscsoftware.com/page/msc-academic-video-tutorial-series>>

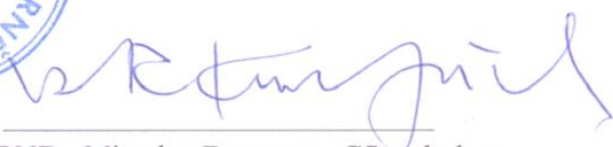
Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Ramík

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 9.9.2013




prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan



ABSTRAKT

Diplomová práce popisuje návrh rámové konstrukce formulového vozu kategorie Formule Student. Cílem bylo snížit váhu a zvýšit torzní tuhost vzhledem k předchozí verzi vozidla a prokázat výhody alternativního řešení formulových rámu. Toho bylo docíleno postupnou transformací konstrukce standardní v alternativní, využívající pravidel pro alternativní rámy vozidel kategorie Formule Student. Hmotnost byla snížena o 20% a torzní tuhost navýšena o 34% díky využití MKP simulací a sofistikovaných změn alternativního rámu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Formule Student, rám, alternativní rám, torzní tuhost, prutový model, prutová náhrada, Nastran Analysis Deck,

ABSTRACT

This master thesis describes design of frame construction of Formula Student car. The objective was to reduce weight and increase the torsional stiffness against to last version of the car. Next objective was to prove advantages of alternative frame. This had been achieved by gradual transformation of standard design of frame to alternative with the usage of FSAE alternative frame rules. The weight was reduced by 20% and torsional stiffness was increased by 34% thanks to FEM simulation and sophisticated changes of alternative frame design.

KEYWORDS

Formula Student, frame alternative frame, torsional stiffness, beam model, beam substitution, Nastran Analysis Deck



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ONDÁK, L. *Alternativní rám Formule Student* vyhovující požadavkům mezinárodních pravidel. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 88 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Pavla Ramíka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 30. května 2014

.....

Lukáš Ondák



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Pavlu Ramíkovi za cenné rady a udržování práce na správné straně, která vedla ke zdárnému konci. Dále, alespoň touto cestou, chci poděkovat všem, kteří mě během studia podporovali, zejména rodině a přátelům. Nesmím a nechci opomenout v této části zmínit všechny členy týmu TU Brno Racing, z nichž každý mi je dobrým kolegou a přítelem. Děkuji...



OBSAH

Úvod	10
1. Pravidla FSAE spojená s rámy Formule Student	11
1.1 Obecná pravidla a požadavky kladené na standardní rámy	11
1.1.1 Materiálové a geometrické požadavky	11
1.1.2 Rozdělení a definice prvků primární struktury	12
1.1.3 Geometrické požadavky na konstrukci trubkových ráků	17
1.2 Alternativní konstrukce ráků formule student	19
1.2.1 Konstrukční omezení pro alternativní rámy	19
1.2.2 Popis zátěžných stavů podle požadavků pravidel FSAE	20
1.2.3 Prevence proti vniknutí cizích těles	24
2 Alternativní rámy používané pro Formuli Student	25
2.1 Monash Motorsport	25
2.2 Squadra Corse	25
2.3 UNI Maribor Grand Prix Engineering	26
2.4 Zhodnocení možnosti návrhů alternativních ráků Formule Student	27
3 Návrh rámu Formule Student dle pravidel FSAE pro standardní rámy	28
3.1 Návrh rámu monopostu kategorie formula student DRAGON 4	28
3.1.1 Porovnání hmotnosti a torzní tuhosti dvou polotovarů o různém průřezu	28
3.1.2 Návrh oblouků a prostoru pro řidiče	30
3.1.3 Návrh zadní části rámu	31
3.1.4 Návrh přední části rámu	33
3.1.5 Porovnání rámu nové a předešlé evoluce monopostů DRAGON	35
3.2 Tvorba a příprava výpočtového modelu	35
3.2.1 Prutová náhrada příhradové konstrukce	36
3.2.2 Síťování prutového drátěného modelu, definice zatížení a vazeb	38
3.2.3 Výpočet jednotlivých zátěžných stavů a zhodnocení výsledků	39
3.2.4 Výpočet torzní tuhosti standardní konstrukce	41
3.3 Zhodnocení návrhu rámu podle standardních pravidel Formula SAE	44
4 Návrh rámu Formule Student dle pravidel FSAE pro alternativní konstrukce	46
4.1 Předběžný návrh formulového rámu dle pravidel pro alternativní rámy	46
4.1.1 Analýzy předběžného návrhu	48
4.1.2 Zhodnocení předběžného návrhu alternativní konstrukce	49
4.2 Fáze 1: Modifikace oblouků, úprava přední nárazové přepážky a zúžení předku	49
4.2.1 Analýzy jednotlivých zátěžných stavů alternativní konstrukce	51
4.2.2 Zhodnocení úprav alternativní konstrukce monopostu Formula Student	52



4.3	Fáze 2: Modifikace střední části rámu za účelem zvýšení bezpečnosti.....	52
4.3.1	Modifikace uzlu A	53
4.3.2	Modifikace uzlu B	54
4.3.3	Modifikace uzlu C	56
4.3.4	Modifikace uzlů D, E, F	59
4.3.5	Výsledek a zhodnocení modifikace	61
4.4	Fáze 3: Úprava rámu s ohledem na body zavěšení a uložení motoru	62
4.4.1	Analýzy dle pravidel FSAE a kontrola bezpečností	65
4.4.2	Výsledek a zhodnocení konstrukčních úprav	66
5	Porovnání vlastností standardní a alternativní konstrukce formulového rámu	67
6	Tvorba MKP modelu v programu PATRAN	69
6.1	MKP model v prostředí PATRAN.....	69
6.2	Vytvoření souboru NASTRAN analysis deck	72
6.3	MKP výpočet alternativní konstrukce rámu pomocí řešiče NASTRAN	73
6.4	Porovnání výsledků analýz výpočtových modelů	74
	Závěr	76
	Seznam použitých zkratk a symbolů	79
	Seznam příloh	80



ÚVOD

Hlavním důvodem a smyslem vypracovávání této práce byla snaha o zdokonalení formulového trubkového rámu vozidla kategorie Formule Student. Cestou k úspoře hmotnosti a současně minimálně k zachování torzní tuhosti je využití části pravidel, která umožňuje větší konstrukční volnost.

Ta je ovšem podmíněna nutnou dávkou výpočtů, jejichž cílem je prokázat bezpečnost navrhovaného rámu. Řešením problému bude návrh alternativní konstrukce příhradového formulového rámu vycházejícího z monopostu Dragon 3. S využitím výpočetních konečnoprvkových modelů a postupnými systematickými úpravami bude vytvořen konstrukční model rámu, který v nějaké fázi návrhu bude použit na novém modelu závodního vozu Dragon 4[®].

Tímto postupem by měly být splněny všechny požadavky na formulový rám kategorie Formule Student. Zejména bezpečnost konstrukce bude odpovídat požadavkům FSAE se všemi náležitostmi. Vhodnou volbou polotovarů a volbou souřadnic klíčových uzlů bude díky zpětné vazbě z MKP analýz a postupnou modifikací s ohledem na jejich výsledky jistě docíleno nižší hmotnosti a vyšší torzní tuhosti.

Tyto vlastnosti rámu jsou závislé na kompatibilitě komponentů a příslušenství formule s rámem. Proto bude při návrhu na tuto skutečnost ve všech směrech přihlíženo, aby byl výsledek použitelný a rám mohl být vyroben.

.



1. PRAVIDLA FSAE SPOJENÁ S RÁMY FORMULE STUDENT

Konstrukce monopostů Formule student je řízena a z velké části omezována mezinárodními pravidly Formule SAE (SAE – Society of Automotive Engineers). Ty pojednávají nejen o návrhu monopostu, ale také dalších aktivitách, které jsou spojeny se závodním víkendem, zejména potom se soutěžními disciplínami statickými i dynamickými. Velká část ovlivňující samotný návrh vozidla se zabývá návody a striktními pravidly v oblasti podvozku, motoru, elektroniky, bezpečnosti. Největší kapitola je zaměřena na návrh formulového rámu ať standardní nebo alternativní koncepce.

1.1 OBECNÁ PRAVIDLA A POŽADAVKY KLADE NÉ NA STANDARDNÍ RÁMY

Pravidla pro standardní rámy se snaží zabezpečit, aby každý rám byl postavený tak, aby splňoval přísné bezpečnostní požadavky. V případě kolize nesmí nedocházet k nadměrným deformacím, které by mohli vést k ohrožení života řidiče i ostatních účastníků. Standardní trubkový rám se skládá z několika typických členů. Jsou většinou jednoduše rozlišitelné a vztahují se na ně striktní pravidla, které je nezbytné dodržet. Požadavky bývají vztaženy na pozici ve vozidle, geometrické rozměry a materiálové charakteristiky. Týkají se tzv. primární struktury rámu, do které patří hlavní oblouk, přední oblouk, výztuhy oblouků, boční struktura, přední nárazová přepážka a její podpory.

1.1.1 MATERIÁLOVÉ A GEOMETRICKÉ POŽADAVKY

ZÁKLADNÍ MATERIÁL A POLOTOVARY

Základním materiálem na konstrukci trubkových rámu Formule Student je ocel: Youngův modul: $E=200\text{GPa}$, Mez kluzu $Re=305\text{MPa}$, Mez pevnosti 365MPa

Tab. 1 Základní polotovary pro jednotlivé části rámu [4]

Člen primární struktury	Polotovar
Hlavní oblouk, přední oblouk, trubka připevnění pásů	$\varnothing 25,4 \times 2,4$ nebo $\varnothing 25 \times 2,5$
Boční struktura, přední nárazník, výztuhy oblouků	$\varnothing 25,4 \times 1,65$ nebo $\varnothing 25 \times 1,75$ nebo $\varnothing 25,4 \times 1,6$ nebo $25 \times 25 \times 1,25$ nebo $26 \times 26 \times 1,2$
Podpory předního nárazníku a podpory výztuh hlavního oblouku	$\varnothing 25,4 \times 1,25$ nebo $\varnothing 25 \times 1,5$ nebo $\varnothing 26 \times 1,2$

Na různé části primární struktury je možné aplikovat různé polotovary, které jsou považovány za základní materiál standardních rámu. Je nutné zachovat tloušťku stěny a zvýšit vnější průměr, nebo zachovat vnější průměr a zvýšit tloušťku stěny, aby mohl být daný polotovar použit.



ALTERNATIVNÍ MATERIÁLY A POLOTOVARY

Pravidla FSAE Formule Student umožňují určitou volnost v použití jiného materiálu a polotovaru než je základní ocel. V případě využití tohoto privilegia je nezbytné vyplnit a odeslat pořadatelům závodů tzv. Structural Equivalency Spreadsheet, který potvrzuje, že zvolený materiál a polotovar má stejné nebo lepší vlastnosti než základní ocel. Musí platit, že součin Youngova modulu základní oceli E_z a nejmenšího kvadratického momentu základního polotovaru I_z musí být stejný nebo menší než součin Youngova modulu alternativního materiálu E_a a nejmenšího kvadratického momentu alternativního polotovaru I_a

$$E_z \cdot I_z \leq E_a \cdot I_a \quad (4)$$

ALTERNATIVNÍ POLOTOVARY PRO OCELOVÉ TRUBKY

Tab. 2 Alternativní polotovary pro jednotlivé části rámu [4]

Člen primární struktury	Minimální tloušťka stěny
Hlavní oblouk, přední oblouk, trubka připevnění pásů	2mm
Boční struktura, přední nárazník, výztuhy oblouků Podpory předního nárazníku a podpory výztuh hlavního oblouku	1,2mm

ALTERNATIVNÍ POLOTOVARY PRO HLINÍKOVÉ TRUBKY

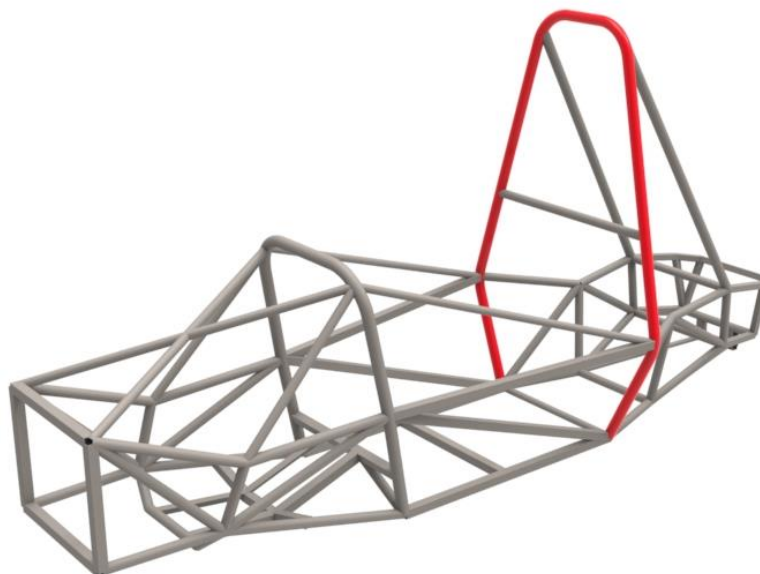
Pro standardní rámy využívající možností hliníkových polotovarů je nutné dodržet minimální tloušťku stěny všech trubek 3mm. Dále je dáno, že hlavní i přední oblouk musí být ocelové konstrukce, mechanicky implementované do primární struktury.

1.1.2 ROZDĚLENÍ A DEFINICE PRVKŮ PRIMÁRNÍ STRUKTURY

Konstrukce trubkového příhradového rámu formule student je definována a popisována pravidly FSAE pro standardní rámy.

HLAVNÍ OBLOUK

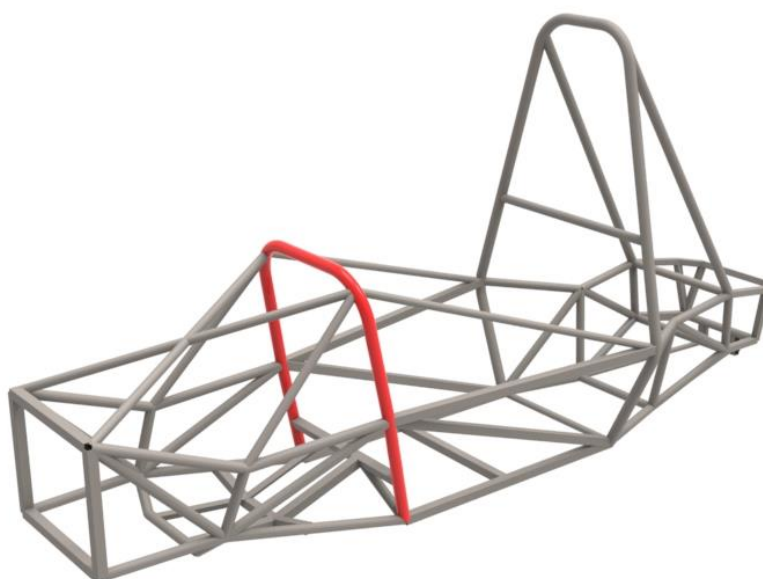
Hlavní oblouk musí být navrhnout jako jednodílný a celistvý z polotovaru o uzavřeném profilu. Minimální ohyb oblouku musí mít hodnotu trojnásobku vnějšího průměru trubky. Jediný přípustný materiál je ocel. Podle pravidel FSAE začíná hlavní oblouk v nejnižším místě primární struktury jedné strany, pokračuje nad hlavou řidiče a je opět integrován do primární struktury v nejnižším místě druhé strany rámu. V bočním pohledu nesmí být hlavní oblouk skloněn více než 10° od místa, kde je připojen k hlavní struktuře rámu a současně musí být od tohoto místa vysoký minimálně 380mm



Obr. 1 Hlavní oblouk rámu FSAE

PŘEDNÍ OBLOUK

Tento prvek primární struktury musí být konstruován z uzavřeného ocelového profilu, splňující základní nebo alternativní ocelové požadavky. Přední oblouk musí, stejně jako hlavní, spojovat nejnižší členy hlavní struktury každé strany. Nemusí být ovšem z jednoho kusu. Důležitou vlastností předního oblouku je, že chrání řidičovy ruce v případě nehody. Proto je pravidly stanoveno, že nesmí být níže než volant v kterékoliv pozici vozidla, zejména potom při převrácení. Současně nesmí být vzdálen od volantu více než 250mm směrem k přední nárazové přepážce. V bočním pohledu nesmí žádná část předního oblouku být skloněná více než 20°.

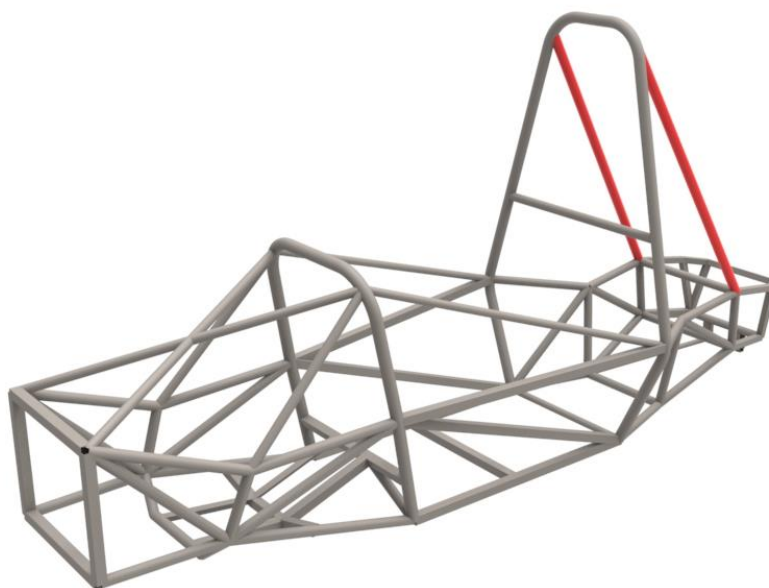


Obr. 2 Přední oblouk rámu FSAE



VÝZTUHY HLAVNÍHO OBLOUKU

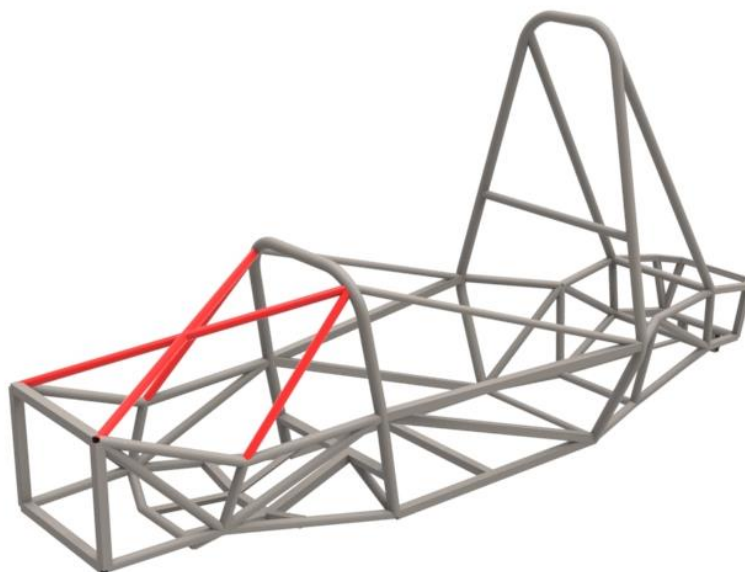
Pro zajištění správného přenosu sil z hlavního oblouku do zbytku primární struktury při havárii musí být tento oblouk vyztužen dvěma výztuhami z uzavřeného profilu, jehož vlastnosti se řídí standardními nebo alternativními pravidly pro standardní rámy. Vzpěry mohou směřovat dopředu nebo dozadu a to podle toho, na kterou stranu je hlavní oblouk skloněn. Minimální úhel mezi vzpěrami a obloukem je pravidly FSAE stanoven na 30° v bočním pohledu. V místě připojení vzpěr k oblouku je měřena vzdálenost od vrcholu k tomuto místu, která nesmí být větší než 160 mm. Aby nedocházelo ve vzpěrách k nechtěnému ohybovému napětí, je přikázáno, aby byly zcela přímé bez jakéhokoliv ohybu.



Obr. 3 Výztuhy hlavního oblouku rámu FSAE

VÝZTUHY PŘEDNÍHO OBLOUKU

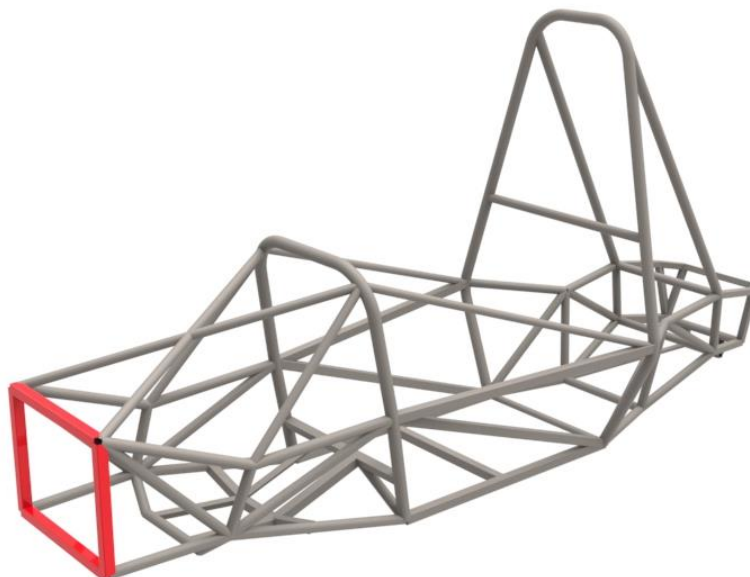
Tento prvek primární struktury má za úkol podepírat přední oblouk. Musí být navržen tak, že směřuje směrem k přednímu nárazové přepážce a současně chrání řidičova chodidla. Vzpěry musí být k oblouku připojené co nejbližší jeho vrcholu. Pravidla FSAE definují tuto vzdálenost jako maximální při 50,8mm. V případě, že konstrukce rámu zahrnuje přední oblouk skloněný směrem dozadu více než 10° , musí vzpěry být orientované i dozadu.



Obr. 4 Výztuhy předního oblouku rámu FSAE

PŘEDNÍ NÁRAZOVÁ PŘEPÁŽKA

Leží v rovině, která je definována nejpřednějšími body rámu. Musí být navržen z uzavřeného polotovaru podle pravidel standardních rámu. Před nárazníkem již nesmí být žádné rozbitné části vozidla jako baterie, brzdové válce nebo expanzní nádoby. Jediný povolený a současně nařízený objekt před nárazníkem je tzv. deformační člen, jehož úkolem je absorbovat určitou energii při nárazu. V podstatě se chová jako deformační zóna osobního automobilu.



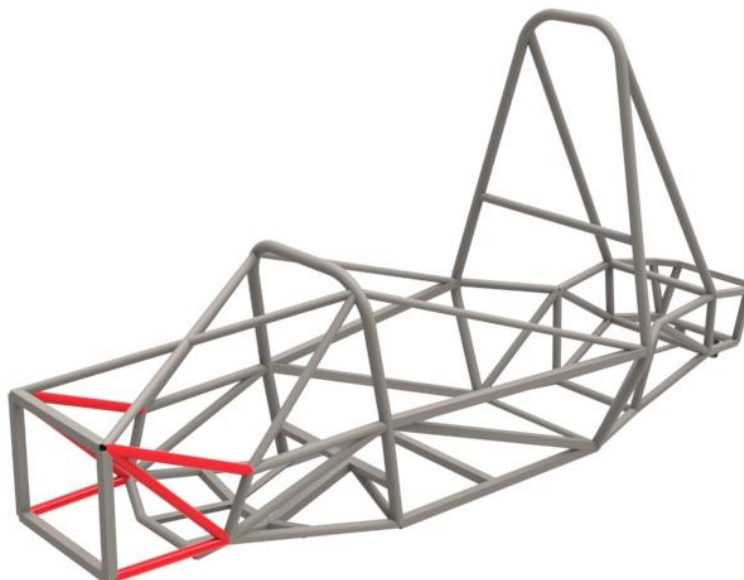
Obr. 5 Přední nárazník rámu FSAE

VÝZTUHY PŘEDNÍ NÁRAZOVÉ PŘEPÁŽKY

Přepážka musí být integrována do hlavní struktury rámu tak, že musí být podpírána minimálně třemi trubkami na každé straně. Jednou v horním uzlu předního nárazníku, druhou



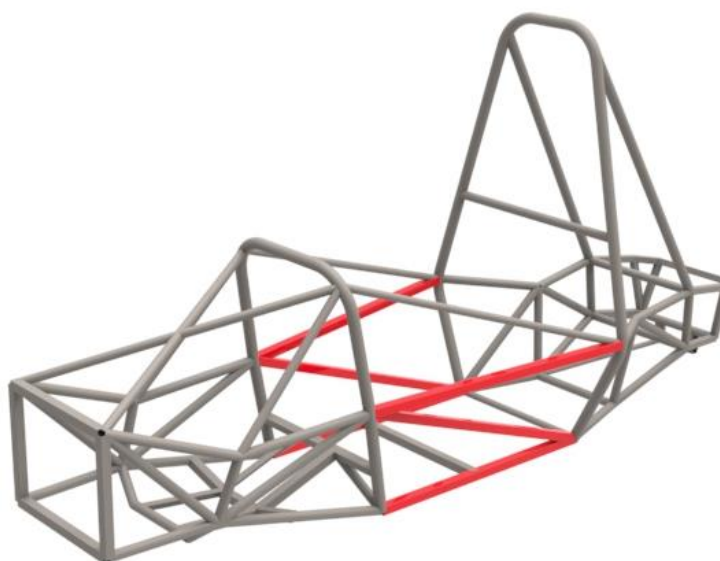
v dolním a třetí diagonální. Jedině tak je splněna podmínka uzlové triangulace a dobré rozkládání sil během nárazu. Výztuhy musí být navrženy z uzavřeného polotovaru podle pravidel pro standardní nebo alternativní polotovary.



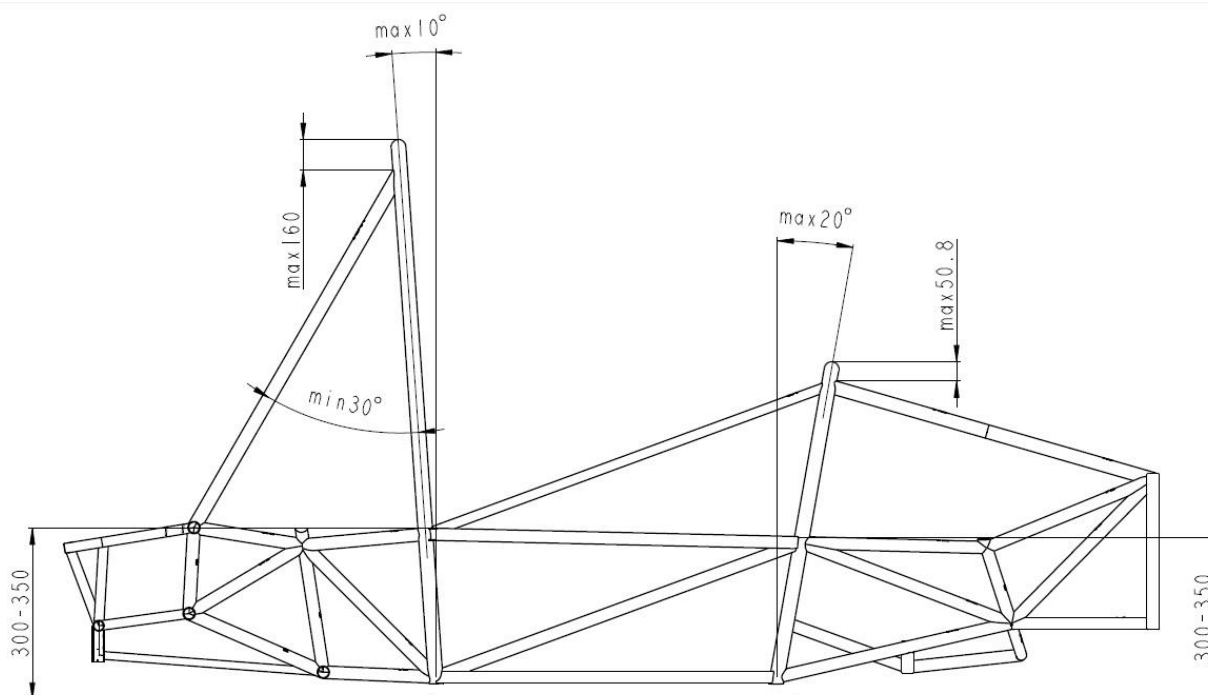
Obr. 6 Výztuhy předního nárazníku rámu FSAE

BOČNÍ NÁRAZOVÁ STRUKTURA

Pro trubkové rámy je definována třemi trubkovými členy, navrženými podle materiálových a geometrických pravidel popsanych výše, na každé straně v oblasti řidiče. Spodní trubka musí spojit hlavní oblouk a přední oblouk v nejnižších bodech. Horní člen je pravidly FSAE definován tak že spojuje hlavní a přední oblouk. Je ovšem nutné aby se nacházel ve výšce od 300 do 350 od země. Třetí člen spodní a horní trubku spojuje v uzlech diagonálně.



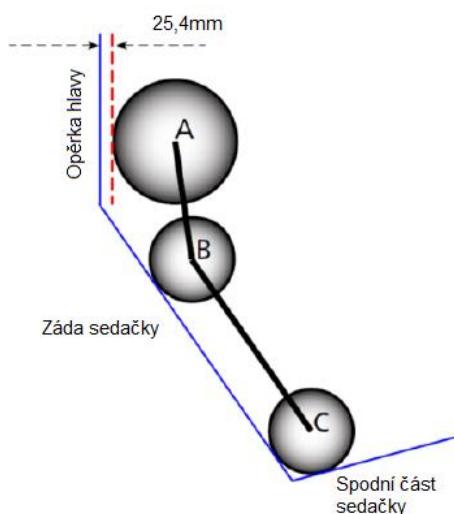
Obr. 7 Boční nárazová struktura rámu FSAE



Obr. 8 Shrnutí geometrických požadavků na jednotlivé členy rámu FSAE

1.1.3 GEOMETRICKÉ POŽADAVKY NA KONSTRUKCI TRUBKOVÝCH RÁMŮ

S ohledem na bezpečnostní požadavky rámu a ochranu řidiče je nepřípustné, aby během režimu jízdy nebo kolize došlo k jakémukoliv kontaktu části těla řidiče se zemí nebo jiným externím objektem. Největším rizikem je samozřejmě havárie, při které by došlo k převrácení monopostu. Proto jsou pravidly FSAE definované geometrické požadavky na ochranu řidičových rukou a hlavy. Ty jsou vztahovány na 95 percentilního mužského řidiče s helmou tzv. Percy.

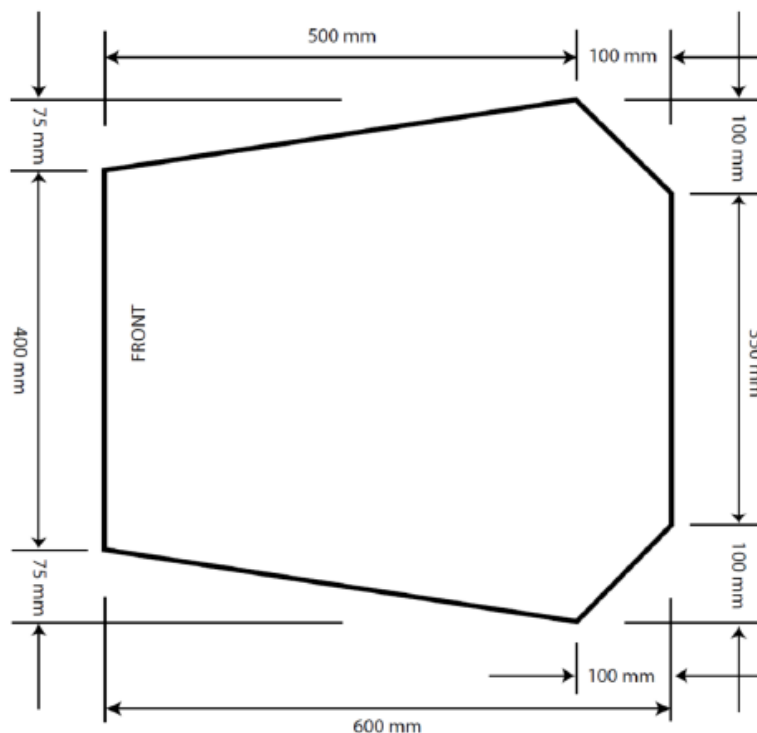


Obr. 9 Šablona 95percentylního muže "PERCY" [4]



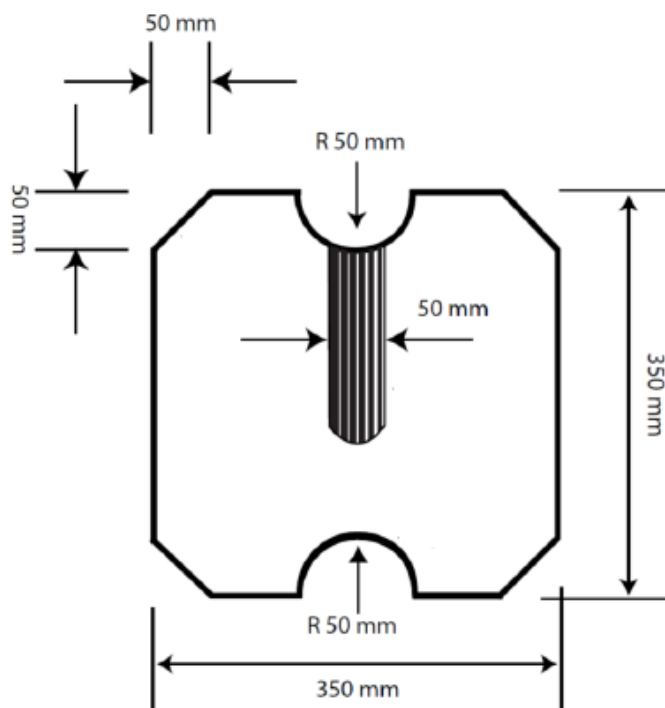
Jeho rozměry jsou definované průměry jednotlivých kružnic a vzdálenostmi mezi body. Průměr hlavy s helmou $D_A=300\text{mm}$, ramena $D_B=200\text{mm}$ a boky $D_C=200\text{mm}$. Pravidly FSAE dána vzdálenost mezi body A-B jako 280mm a B-C 490mm. Těmi je řízená také šablona, která se vkládá do monopostu během technické přejímky, jež probíhá následovně. Sedačka je nastavena v nejzazší pozici, pedálová skupina co nejvíce vpředu. Percy se vloží do monopostu podle obrázku a měří se vzdálenost od bodu C ke středu nejbližšího pedálu. Ta nesmí přesáhnout 915 mm. Dále se měří vzdálenost helmy řidiče od spojnice vrcholů hlavního a předního oblouku (min 50mm) a od spojnice vrcholu hlavního oblouku a nejnižšího místa vzpěr oblouku (min 50mm).

Aby byl zabezpečen adekvátní prostor kokpitu, jsou pravidly FSAE vytvořeny šablony, které je nezbytné během návrhu rámu respektovat. První z nich definuje prostor v okolí trupu řidiče. Během přejímek se ve většině případů demontuje sedačka, šablona se vkládá shora v horizontální rovině, postupně se pohybuje směrem dolů až do výšky horního členu boční deformační zóny standardních rámu nebo do výšky 350mm u alternativních a mono kokových rámu.



Obr. 10 Kokpitová šablona [4]

Druhá šablona je navržena tak, aby rám poskytoval dostatek prostoru pro řidičovy nohy a současně aby je chránil. Šablona se vkládá od sloupku řízení ve vertikální rovině, posouvá se postupně směrem k pedálové skupině až do vzdálenosti 100 mm k nejbližšímu pedálu.



Obr. 11 Šablona průchodnosti rámu [4]

1.2 ALTERNATIVNÍ KONSTRUKCE RÁMŮ FORMULE STUDENT

Jelikož standardní rámy neumožňují výraznější změny v konstrukci, je možné postavit monopost podle alternativních pravidel FSAE pro tyto konstrukce. Alternativní rámy ať už trubkové nebo voštinové, poskytují prostor pro zvyšování torzní tuhosti a snižování hmotnosti. Týmy, které se rozhodnou pro alternativní konstrukci rámu, musí uvědomit o tomto úmyslu speciální komisi a odeslat potřebný průvodní dopis, v němž musí prokázat, že je v jejich možnostech i schopnostech tento rám navrhout. Pokud komise uzná a umožní týmu alternativní konstrukci, musí být do určitého data, které určují pořadatelé závodů, odeslán dokument tzv. Structural requirement certification form, ve kterém je popsán výpočet metodou konečných prvků, výsledky jednotlivých zátěžných stavů a bezpečnosti vzhledem k povolené deformaci. Dále dokument musí obsahovat výkres rámu a tabulku s polotovary. Během návrhu je možné volit téměř libovolný materiál a polotovary. Otevírá se také prostor v oblasti návrhu boční nárazové struktury.

1.2.1 KONSTRUKČNÍ OMEZENÍ PRO ALTERNATIVNÍ RÁMY

I přes to, že pravidla umožňují volnost při konstrukčním návrhu rámu, je nezbytné některé podmínky dodržet. Tato omezení jsou konstrukčně společná pro standardní rámy a byla zavedena zejména z bezpečnostních důvodů. Týkají se zpravidla oblouků a jejich výztuh. Hlavní oblouk v bočním pohledu nesmí být skloněn více než 10° a současně sklon předního oblouku nesmí překročit 20° . Vzpěry hlavního oblouku nesmí být připojeny k oblouku níže než 160 mm od vrcholu oblouku a musí s ním svírat úhel nejméně 30° . Vzpěry mohou být šroubované, spoj ovšem musí plně přenést zatížení do primární struktury. Pro vzpěry předního oblouku jsou dána také omezení vyplývající ze standardní koncepce. Musí být k přednímu oblouku připojeny v co nejvyšší poloze, maximální vzdálenost od vrcholu oblouku je stanovena na 50,8 mm. Aby byla zaručena bezpečnost při čelním a bočním nárazu, je pravidly

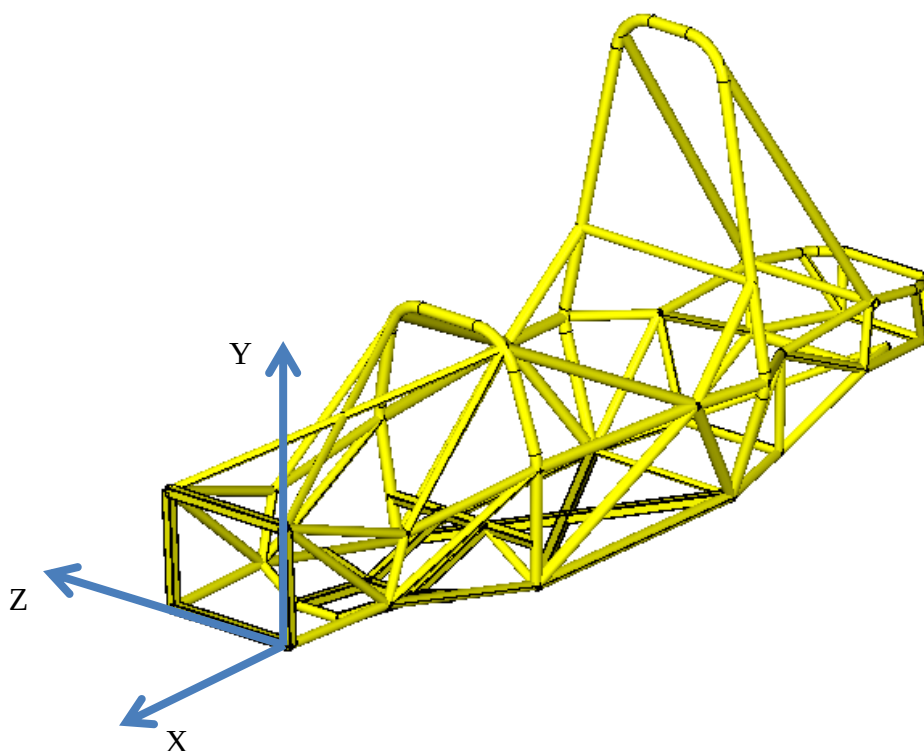


FSAE pro alternativní konstrukce nařízená triangulace v oblasti boční nárazové struktury a přední nárazové přepážky.

1.2.2 POPIS ZÁTĚŽNÝCH STAVŮ PODLE POŽADAVKŮ PRAVIDEL FSAE

Aby bylo možné posoudit kvalitu návrhu alternativního rámu a aby bylo zaručeno rovných podmínek, je pravidly FSAE stanoveno několik zátěžných stavů. Ty jsou popsány přesně definovanými podmínkami, které mají za úkol simulovat situaci nárazů ať čelních nebo bočních. Dále zkoumají, jestli rám dokáže přenášet napjatost do primární struktury přes oblouky v případě převrácení.

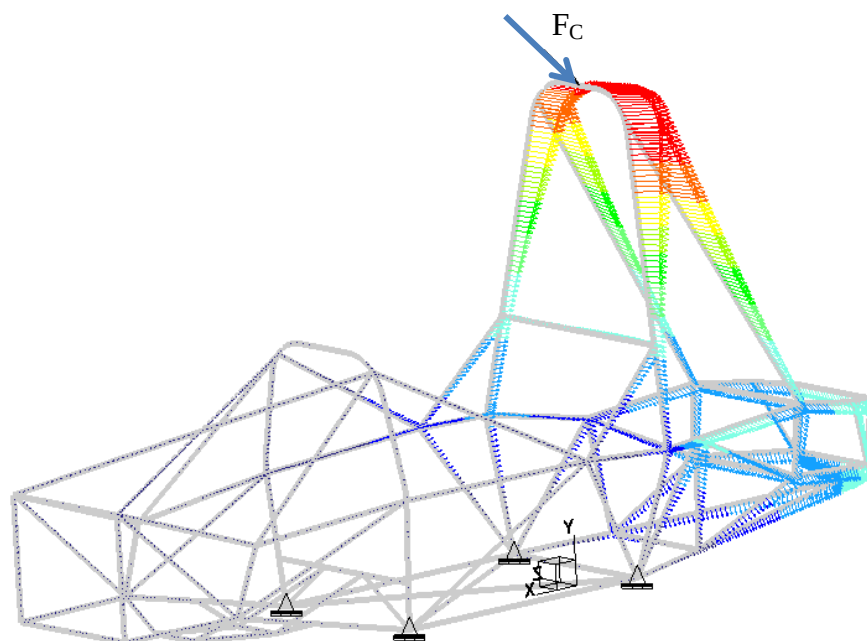
Výsledky těchto simulací musí být zaznamenány v příslušném schvalovacím dokumentu. K němu je také nezbytné dodat vstupní soubory pro MKP výpočtový řešič MSC Nastran. Jedná se textový soubor popisující geometrii, výpočtovou síť, zátěžné a vazební podmínky. Musí být vytvořen pro každý zátěžný stav.



Obr. 12 Zobrazení souřadného systému

ZÁTĚŽNÝ STAV Č. 1 HLAVNÍ OBLOUK A VZPĚRY HLAVNÍHO OBLOUKU

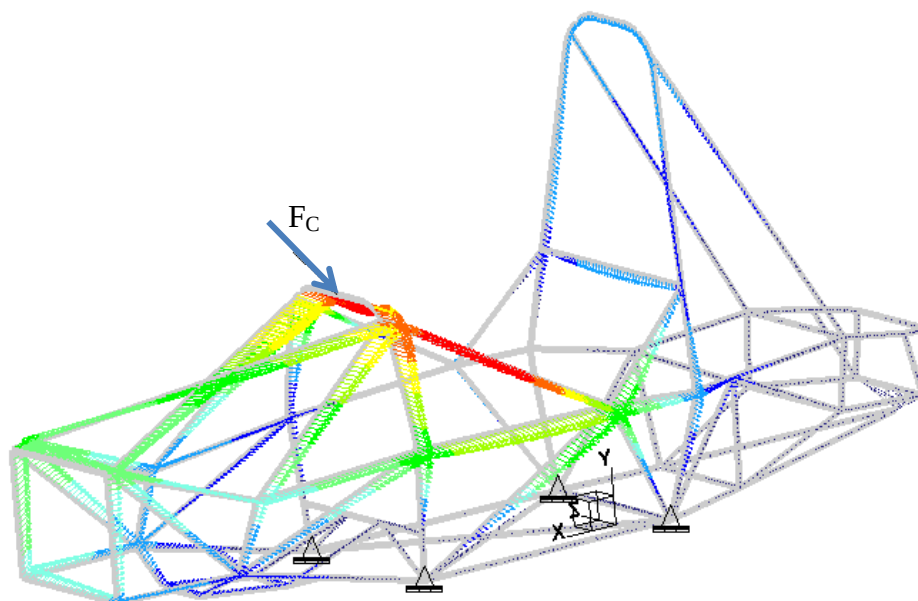
Působíště sil je ve vrcholu hlavního oblouku. Rám je uchycen na obou stranách v nejnižším místě obou oblouků. Musí být zamezeno posuvům ve všech osách, rotacím ovšem nikoliv.



Obr. 13 Vazební a zátěžné podmínky pro zátěžný stav č.1

ZÁTĚŽNÝ STAV Č. 2 PŘEDNÍ OBLOUK

Působíště sil i vazební podmínky jsou shodné jako v předchozím případě. Velikost sil a maximální deformace je také stejná. Situace simuluje převrácení vozidla a poukazuje na důležitost přenosu sil do primární struktury a stabilitu oblouků.

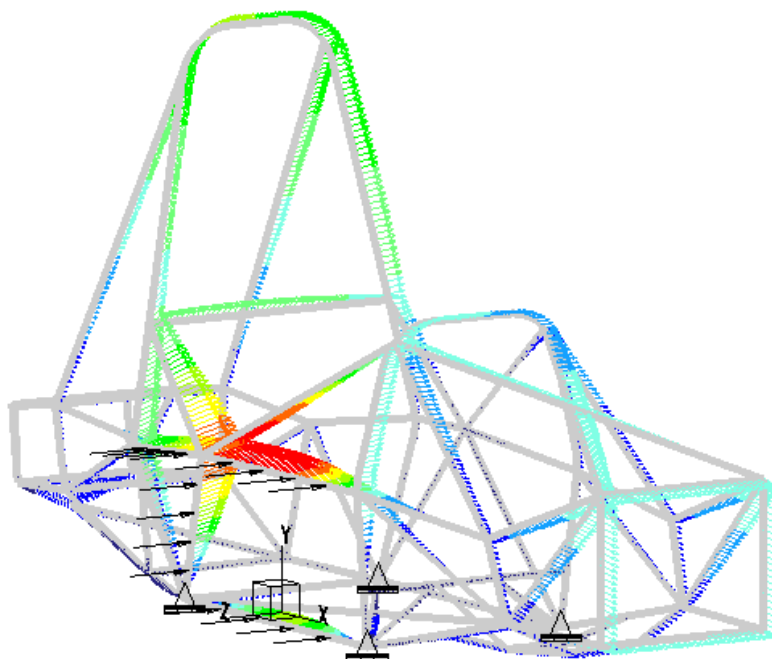


Obr. 14 Vazební a zátěžné podmínky pro zátěžný stav č.2



ZÁTĚŽNÝ STAV Č.3 BOČNÍ NÁRAZOVÁ ZÓNA

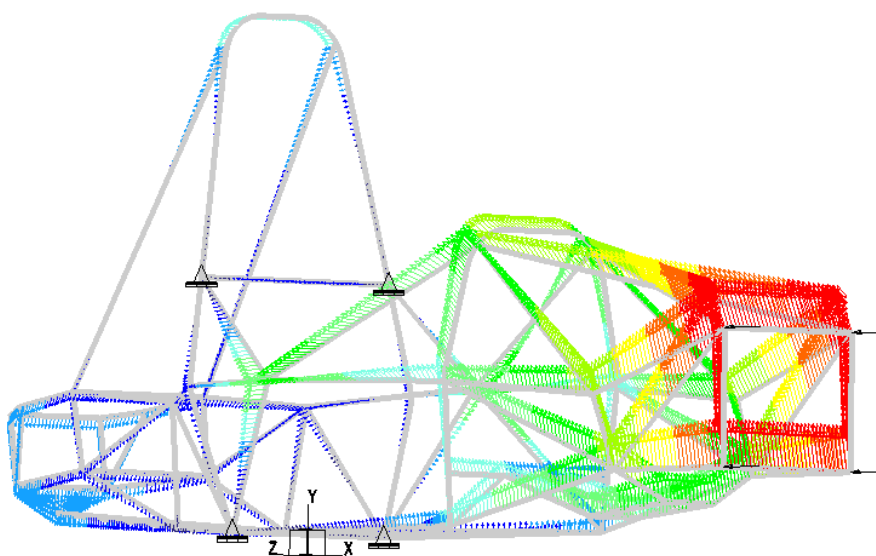
V tomto případě se kontroluje maximální deformace boční nárazové zóny. Zatěžovací síla působí v příčném směru na všechny členy mezi předním a hlavním obloukem, které jsou umístěny níže než 350 mm. Tento zátěžný stav simuluje boční náraz do vozidla, během kterého nesmí být v konstrukci rámu větší deformace než povolených 25 mm. Vazební podmínky jsou stejné jako v předchozích případech.



Obr. 15 Vazební a zátěžné podmínky pro zátěžný stav č.3

ZÁTĚŽNÝ STAV Č.4 PŘEDNÍ NÁRAZOVÁ PŘEPÁŽKA

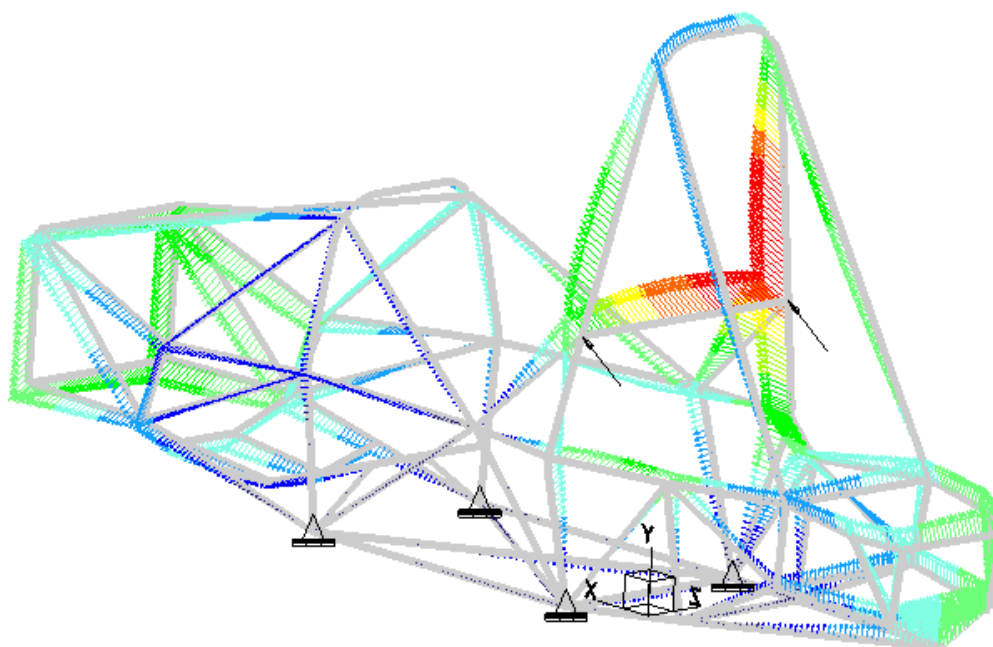
Podle podmínek pro tento test se provádí kontrola přenosu sil do rámu během čelního nárazu. Jejich působišti jsou body, ve kterých je připevněn deformační člen k přední přepážce. Během tohoto testu je rám přivazben za spodní body hlavního oblouku a současně za uzly styku trubky na pásy a hlavního oblouku.



Obr. 16 Vazební a zátěžné podmínky pro zátěžný stav č.4

ZÁTĚŽNÝ STAV Č.5 PŘÍPOJNÉ BODY PÁSŮ

Během čelního nárazu vozidla dochází k výraznému namáhání rámu v oblasti přípojných bodů pásů vlivem setrvačnosti řidičova těla. Vhodnou konstrukcí musí být zamezeno zborcení rámu. Pravidla FSAE pro alternativní rámy stanovují zatěžovací sílu 13,2 kN ve směru k řidičovým ramenům v každém přípojném bodě pásů. Rám je zavazben za spodní uzly obou oblouků.

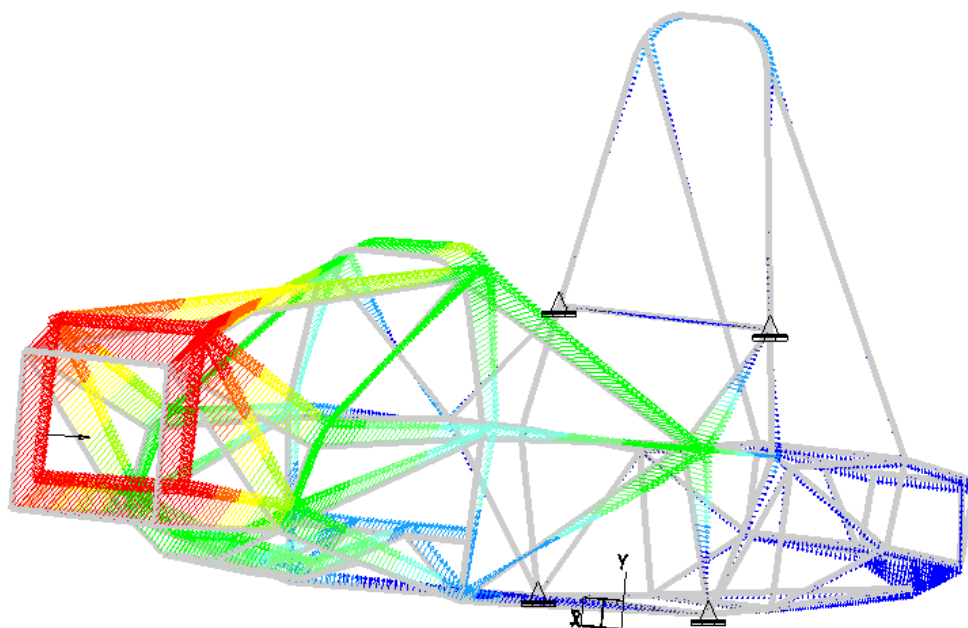


Obr. 17 Vazební a zátěžné podmínky pro zátěžný stav č.5



ZÁTĚŽNÝ STAV Č.6 PŘEDNÍ NÁRAZOVÁ PŘEPÁŽKA S PŘÍDAVNÝM BOČNÍM ZATÍŽENÍM

Součástí této simulace je zahrnutí vlivu přidaného bočního zatížení během čelního nárazu. Aplikačním místem síly je střed předního přepážky, který je pevně spojen k připojovacím bodům k deformačnímu členu tuhými, nehmotnými a nedeformovatelnými prvky. Vazby jsou umístěny ve spodních uzlech hlavního oblouku a ve spojnicích oblouku s členem držícím pásy. Jako v předchozích případech, velikosti složek síly jsou definovány pravidly a maximální přípustná deformace nesmí překročit 25mm kdekoli v primární struktuře.



Obr. 18 Vazební a zátěžné podmínky pro zátěžný stav č.6

Tab. 3 Shrnutí zátěžných podmínek pro jednotlivé zátěžné stavy [4]

Zátěžný stav	síla v ose X	síla v ose Y	síla v ose Z	max. deformace	poznámka
-	[kN]	[kN]	[kN]	[mm]	
č.1	-6.0	-9.0	5.0	25	Hlavní oblouk
č.2	-6.0	-9.0	5.0	25	Přední oblouk
č.3	0	0	7.0	25	Boční zóna
č.4	150.0	0	0	25	Přední zóna
č.5	13,2 kN ve směru spojnice s řidičovými rameny			25	Pásy
č.6	-149.0	0	17,25	25	Přední zóna 2

1.2.3 PREVENCE PROTI VNIKNUTÍ CIZÍCH TĚLES

Článek 6 pravidel formule FSAE pro alternativní rámy se zabývá prevencí proti vniknutí cizích těles do struktury rámu. Tomu je zabezpečeno tzv. Impactorem – kruhovým diskem o průměru 254 mm. Tloušťka není definována, ale během technických přejímek mívá obvykle 2 mm. Tímto prostředkem se rám testuje tak, že se postupně vkládá do struktury rámu, kterou nesmí projít. Průniku musí bránit vždy nejméně 3 členy rámu.

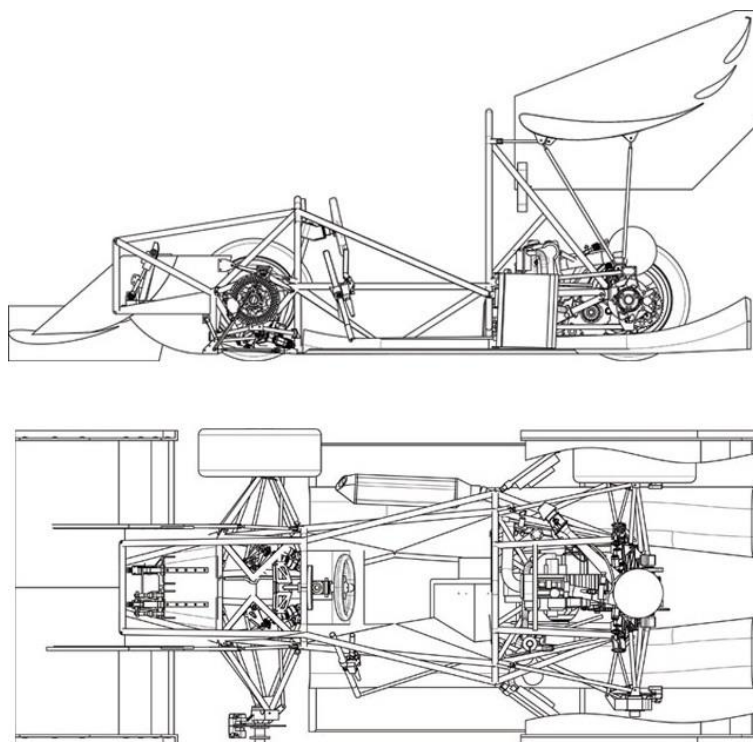


2 ALTERNATIVNÍ RÁMY POUŽÍVANÉ PRO FORMULI STUDENT

Použití trubkových rámu navržených podle alternativních pravidel je cestou ke snižování hmotnosti a zvyšování tuhosti. V podstatě je to levnější a v jistých směrech snadnější varianta než užití kompozitových monokoků. Avšak parametrům kompozitů, zejména hmotnosti, se trubkový rám nedokáže vyrovnat. I přes to se alternativní konstrukce objevují na monopostech Formule student a to i u týmů umístěných v první desítce světového žebříčku.

2.1 MONASH MOTORSPORT

Typickým příkladem špičkového týmu využívající alternativní konstrukci rámu je australský Monash Motorsport působící pod záštitou Monash University. V současné době zaujímají druhé místo světové žebříčku a vyvinuli již čtrnácté auto s trubkovou konstrukcí. Typickým prvkem rámu jsou kapsy ve střední části. Tvoří je trubka směřující od horní části předního oblouku k hlavnímu oblouku. Není připojena přímo k němu, ale navazuje na zadní konstrukci a vytváří široký profil kapes patrný z pohledu shora. Ty způsobí velké zvýšení torzní tuhosti. [5]



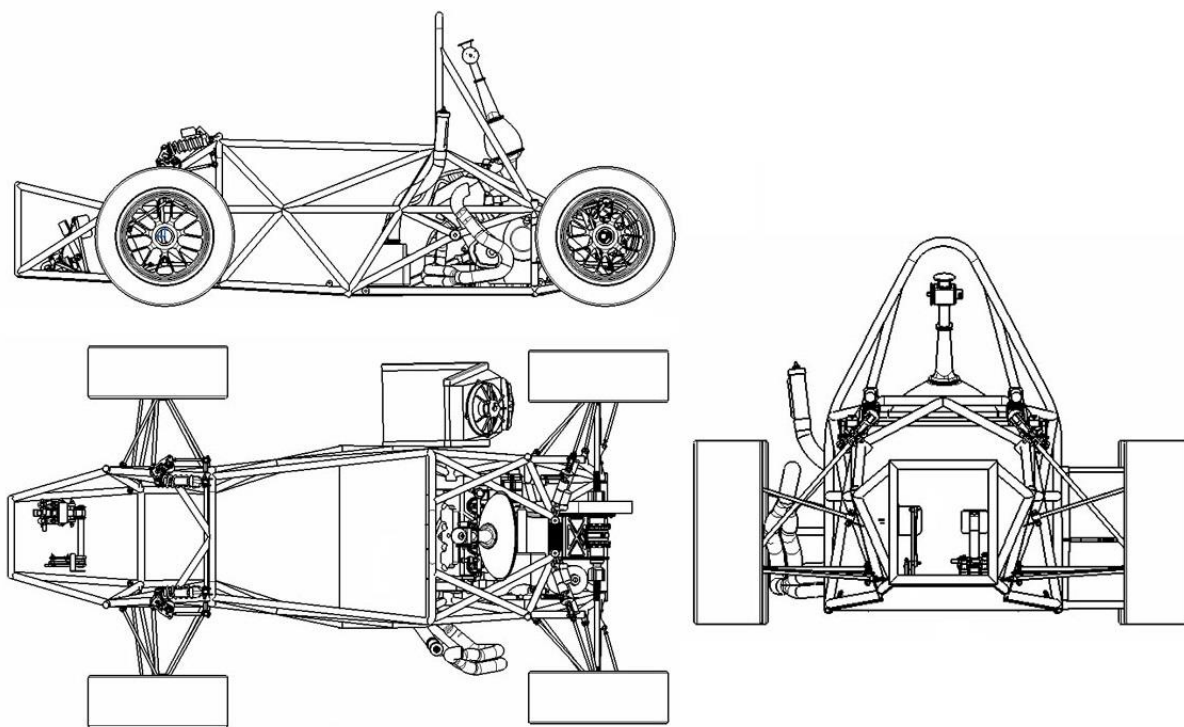
Obr. 19 Alternativní rám Monash Motorsport [10]

2.2 SQUADRA CORSE

Alternativním rámem navrženým dle pravidel FSAE se pyšní také italský studentský tým Squadra Corse. V pořadí sedmé auto univerzity Politecnico di Torino má zajímavou konstrukci příhradového návrhu šasi. Typický prvek se nachází opět ve střední části. Zvyšování torzní tuhosti je zde řešeno uzlem, do kterého ústí 6 trubek. Výhodou tohoto řešení je možnost ovlivňování vlastností rámu polohou tohoto bodu. Dalším rysem je přední struktura, kde výztuha předního oblouku nesměruje až k přednímu nárazníku, jako tomu je u



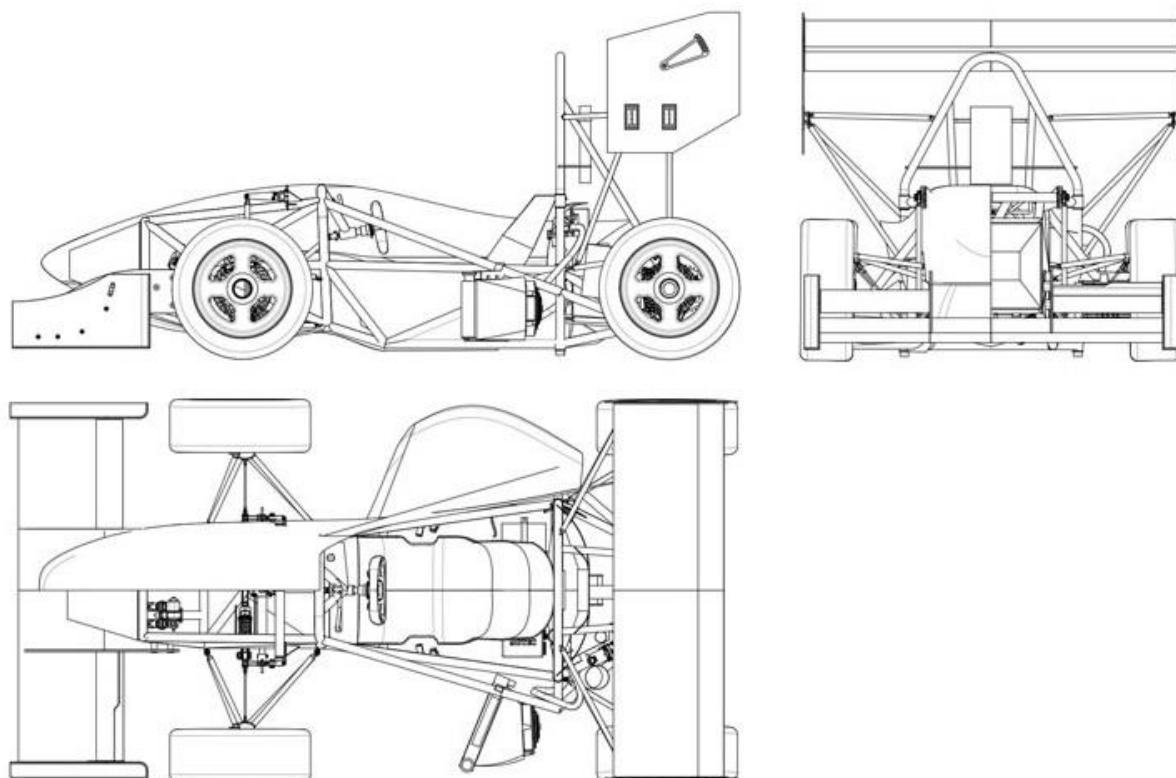
většiny formulových ráků. Ten je velice úzký, což značí použití deformačního členu vlastního návrhu. [11]



Obr. 20 Alternativní rám týmu univerzity Politecnico di Torino [10]

2.3 UNI MARIBOR GRAND PRIX ENGINEERING

Formule Student Mariborské univerzity ze Slovinska staví teprve čtvrté auto, ale i přes to nevyužívá standardní konstrukce. Alternativní rám týmu UNI Maribor Grand Prix Engineering byl zřejmě inspirován australským Monashem. Kapsy ve střední části jsou jasným důkazem. Zvláštností této šasi je značná šířka v oblasti hlavního oblouku, která vytváří nepoměr s úzkou přední strukturou. Z Obr. 21 je patrné užití standardního deformačního členu, jehož značné rozměry jistě hrály při návrhu velkou roli. Důsledkem tohoto omezení bude vyšší hmotnost monopostu. [12]



Obr. 21 Formulový rám týmu Univezity v Mariboru [10]

2.4 ZHODNOCENÍ MOŽNOSTI NÁVRHŮ ALTERNATIVNÍCH RÁMŮ FORMULE STUDENT

Během návrhu alternativního rámu monopostu Formule Student se lze koncepčně ubírat dvěma směry. Prvním je vytvoření uzlu ve střední části. Ten má výhodu možnosti ladění torzní tuhosti polohou tohoto uzlu. Nevýhodou je ovšem komplikovaná výroba této části a náročné dodržení přesnosti a tolerancí. Druhou variantou je rozšíření rámu v oblasti od horní části předního oblouku a spodních konců hlavního oblouku tvorbou kapes. Výhodou je snadná výroba. Na druhé straně vlivem značně širokého rámu mohou nastat komplikace s umísťováním komponent a příslušenství monopostu. Za účelem minimální hmotnosti a velké torzní tuhosti je nutné vhodně volit průřezy profilů a správně dodržovat triangulaci.



3 NÁVRH RÁMU FORMULE STUDENT DLE PRAVIDEL FSAE PRO STANDARDNÍ RÁMY

Příhradový rám pro závodní vozidlo kategorie Formule Student je charakterizován oblouky, které spolu s boční nárazovou strukturou vytvářejí prostor pro řidiče. Přední a zejména potom zadní část je typická vedením trubkových profilů do uzlů, ve kterých se nachází body zavěšení, motoru nebo jiných důležitých částí podvozku a pohonného ústrojí jako například stabilizátory či diferenciál.

Hlavním požadavkem formulového rámu jsou nízká hmotnost a dostatečná torzní tuhost. Při návrhu samotného rámu je kromě splnění požadavků pravidel, v tomto případě pravidel Formule SAE, brát zřetel zejména na definované body zavěšení, přípojný body motoru, diferenciálu a v neposlední řadě opásání řetězu.

Nejvíce svazujícím faktorem jsou právě body zavěšení, jejichž poloha z velké části určuje výsledné upořádání příhradové konstrukce. Aby nebyla ovlivněna kinematika podvozku, je možné posouvat body lichoběžníkové nápravy po vektoru klopné osy každého ramene. Současně je nezbytné kontrolovat případné kolize zavěšení v rozmezí od úplného vyvěšení náprav po maximální stlačení.

3.1 NÁVRH RÁMU MONOPOSTU KATEGORIE FORMULE STUDENT DRAGON 4

Pro poslední, v pořadí čtvrtý monopost Dragon 4, bylo poprvé v historii využito možnosti navrhnout rám z alternativních polotovarů podle pravidel FSAE. Touto cestou lze ušetřit hmotnost a současně zvýšit torzní tuhost konstrukce.

3.1.1 POROVNÁNÍ HMOTNOSTI A TORZNÍ TUHOSTI DVOU POLOTOVARŮ O RŮZNÉM PRŮŘEZU

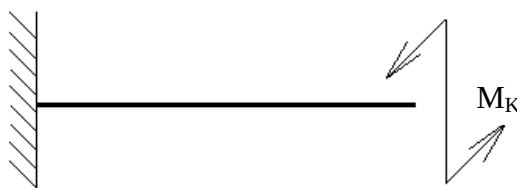
Pro srovnání byl vybrán polotovar mezikruhového průřezu podle pravidel FSAE pro základní materiály a polotovary Ø 25 x 1,75 a podle alternativních pravidel zvolen Ø 28 x 1,2

Materiálem pro oba polotovary byla zvolena konstrukční ocel 11523, z jejichž vlastností plyne následující:

$$E=210\text{GPa}, \mu=0,3, \rho=7850\text{kg/m}^3$$

Kde E je Youngův modul, μ Poissonovo číslo a ρ hustota materiálu. Z Youngova modulu a Poissonova čísla lze pro izotropní materiály dopočítat modul pružnosti ve smyku

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{210}{2 \cdot (1 + 0,3)} = 80,76\text{GPa} \quad (2)[2]$$

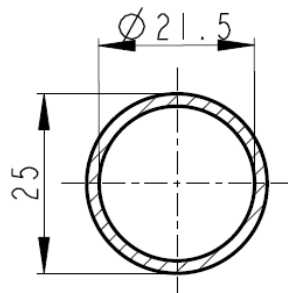


Obr. 22 Vazba a zatížení prutu



Pro výpočty byl polotovár nahrazen vetknutým prutem o délce 300 mm a zatížen momentem $M_K=100 \text{ Nm}$.

a) Trubka Ø 25 x 1,75



Hmotnost trubky

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{\pi \cdot L}{4} \cdot (D^2 - d^2) = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\pi \cdot 0,3\text{m}}{4} \cdot (0,025\text{m}^2 - 0,0215\text{m}^2) = 0,301\text{kg} \quad (3)[2]$$

Polární moment průřezu

$$J_p = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{32} \cdot (0,025\text{m}^4 - 0,0215\text{m}^4) = 1,737 \cdot 10^{-8}\text{m}^4 \quad (4)[2]$$

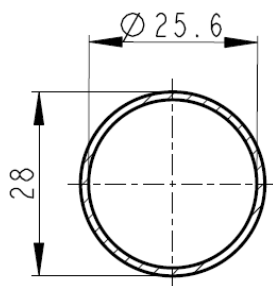
Zkroucení vlivem zatížení

$$\varphi = \frac{M_K \cdot L}{G \cdot J_p} = \frac{100\text{Nm} \cdot 0,3\text{m}}{80,76 \cdot 10^9 \text{Pa} \cdot 1,737 \cdot 10^{-8}\text{m}^4} = 0,021 \text{ rad} = 1,2^\circ \quad (5)[2]$$

Torzní tuhost prutu

$$C = \frac{M_K}{\varphi} = \frac{100\text{Nm}}{1,2^\circ} = 83,3 \frac{\text{Nm}}{^\circ} \quad (6)[2]$$

b) Trubka Ø 28 x 1,2



Hmotnost trubky

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot \frac{\pi \cdot L}{4} \cdot (D^2 - d^2) = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\pi \cdot 0,3\text{m}}{4} \cdot (0,028\text{m}^2 - 0,0256\text{m}^2) = 0,237\text{kg} \quad (7)[2]$$



Polární moment průřezu

$$J_p = \frac{\pi}{32} \cdot (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{32} \cdot (0,028m^4 - 0,0256m^4) = 1,818 \cdot 10^{-8}m^4 \quad (8)[2]$$

Zkroucení vlivem zatížení

$$\varphi = \frac{M_K \cdot L}{G \cdot J_p} = \frac{100Nm \cdot 0,3mm}{80,76 \cdot 10^9 Pa \cdot 1,818 \cdot 10^{-8}m^4} = 0,0204 rad = 1,17^\circ \quad (9)[2]$$

Torzní tuhost prutu

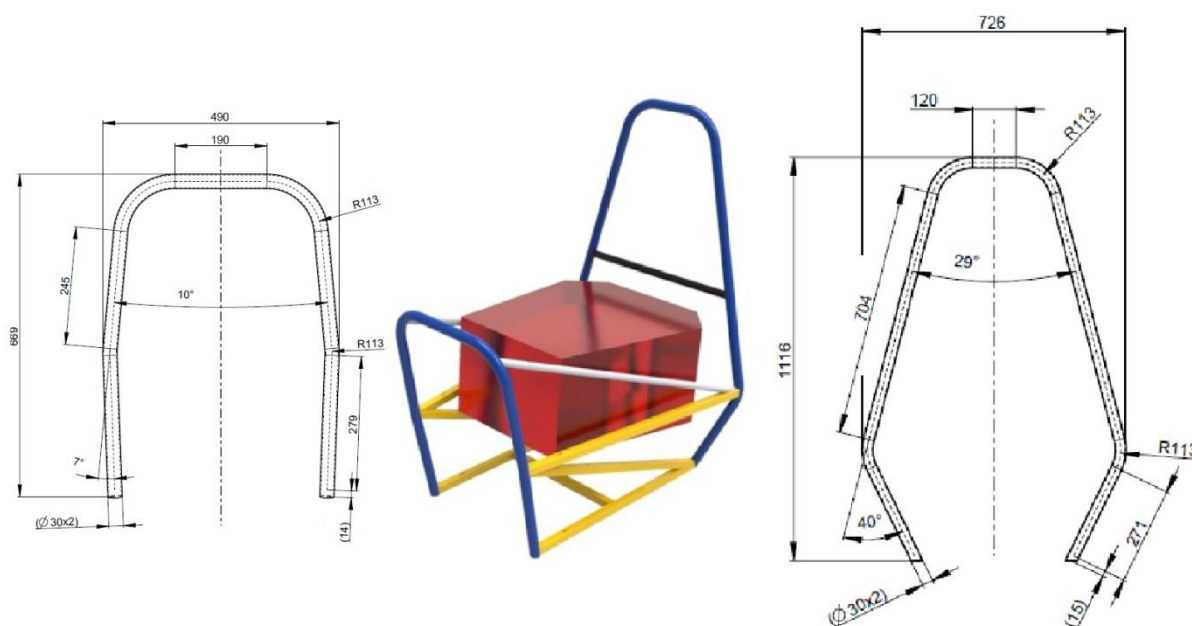
$$C = \frac{M_K}{\varphi} = \frac{100Nm}{1,17^\circ} = 85,47 \frac{Nm}{^\circ} \quad (10)[2]$$

Z výpočtů je potvrzené, že vhodnou volbou průřezů a využitím alternativních ocelových polotovarů dle FSAE je možné navrhnout příhradový rám lehčí a tužší než v případě základních variant průřezů. Je ovšem nutné znát sortiment a dostupnost trubkových profilů.

Při návrhu byl zachován koncept předešlých evolucí Dragonů, který byl doveden do větší dokonalosti. Byla snaha o posunutí těžiště vozidla více dozadu, jelikož špatné rozvážení a vysoká hmotnost byl základní nedostatek předchozího modelu.

3.1.2 NÁVRH OBLOUKŮ A PROSTORU PRO ŘIDIČE

Prostřední část je značně svázaná pravidly pro standardní rámy FSAE, nicméně nejsou s touto částí spojeny žádné významné prvky vozidla. Proto je vhodné zde začít a udělat si představu, jak bude konstrukce vypadat. Ukazuje se, že z hlediska torzní tuhosti je v prostoru řidiče dobré zvolit polotovar ze čtvercových dutých profilů.[3]



Obr. 23 Prostřední část rámu Dragona 4



Přední oblouk je skloněn o 10° směrem vpřed, zadní je o 4° zakloněn. Ze záklonu hlavního oblouku je zřejmé, že vzpěry budou orientovány dozadu. Oba oblouky jsou vyrobeny z trubky mezikruhového průřezu o průměry 30 mm a tloušťkou stěny 2mm. Nejmenší možný poloměr ohybu je podle pravidel FSAE 90 mm. Jelikož jsou oblouky ohýbané strojově, je vhodné zjistit si, jaké matrice k ohýbacímu stroji jsou dostupné a případně poloměry ohybu upravit. V případě rámu Dragona 4 byly poloměry po konzultacích stanoveny na 113 mm. Prostor řidiče je limitován šablonou viz 1.1.3. Častá kontrola a zkušební vkládání šablon již v zárodku návrhu směřují k dalšímu postupu a zamezí nepříjemnému překvapení a nesplnění základních požadavků a pravidel.

Tab. 4 Značení a rozměry polotovarů pro střední část

Rozměr polotovaru	
Modrá	$\varnothing 30 \times 2$
Žlutá	$25 \times 25 \times 1,5$
Černá	$\varnothing 25 \times 2,5$
šedá	$\varnothing 20 \times 1,2$

3.1.3 NÁVRH ZADNÍ ČÁSTI RÁMU

Z hlediska pravidel FSAE je zadní část limitována pouze sklonem vzpěr hlavního oblouku a dodržením materiálových a geometrických vlastností polotovarů hlavní struktury. Vzpěry jsou skloněny o 34° vzhledem k rovině hlavního oblouku. Z hlediska dobrého přenosu sil a zvýšení torzní tuhosti je nutné dodržet triangulaci z uzlu do uzlu (oranžové trubky) od konce vzpěr hlavního oblouku až po samotný oblouk. Tato podmínka je také dána pravidly FSAE pro standardní konstrukce rámu.



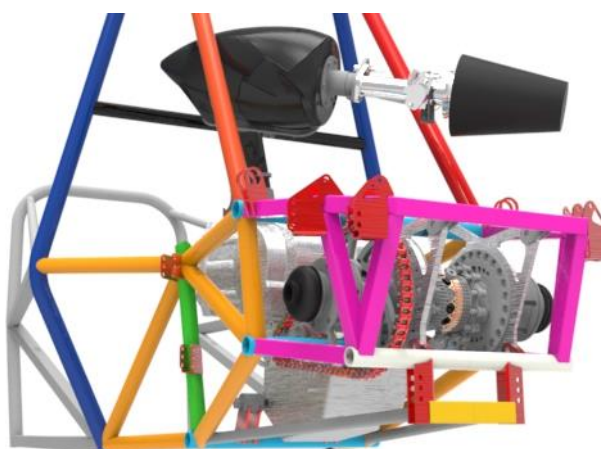
Obr. 24 Konstrukce zadní části rámu

Profily označené podle obr.24 fialovou barvou již nejsou součástí hlavní struktury a proto se nemusí řídit pravidly. V tomto případě byl zvolen čtvercový polotovar $20 \times 20 \times 1,5$.



Tab. 5 Značení a rozměry polotovarů pro zadní část

	Rozměr polotovaru
modrá	Ø 30 x 2
oranžová	Ø 26 x 1,2
černá	Ø 25 x 2,5
zelená	Ø 25 x 1,5
Bílá	Ø 22 x 1,2
Červená	Ø 28 x 1,5
Fialová	20 x 20 x 1,5
Žlutá	25 x 25 x 1,5



Obr. 25 Detail zadní části rámu s držáky zavěšení v uzlových bodech

Tato nejzadnější část je určena k uložení diferenciálu a části zavěšení. Působí na ní nezanedbatelné síly od tahu řetězu a částečně síly od zatížení zadní nápravy přes horní rameno. Při návrhu je vhodné přizpůsobit konstrukci rámu tak, aby uzlové body byly současně body zavěšení.



Obr. 26 Zadní část rámu s držáky zavěšení a řetězem



Jelikož jsou monoposty Dragonů vybaveny excentrickým mechanismem napínání řetězu, zadní část rámu nesmí kolidovat s řetězem v žádné poloze. Spolu s požadavky zavěšení je konstrukce zadní části značně omezená a je těžké hledat jiné varianty konstrukce.

Snahou příhradové konstrukce bylo posunout řidiče, jakožto značnou hmotu ovlivňující těžiště vozidla, co nejvíce dozadu. Bylo toho docíleno zmenšením úhlu sklonu hlavního oblouku a zkrácením vzdálenosti mezi hlavou motoru a obloukem rámu. To mělo za následek prodloužení střední části. Současně s konstrukcí rámu probíhal také vývoj sekundárního převodu. Závěrem bylo použít jiného řetězu, menšího pastorku a rozety. Díky tomu se zmenšila jejich osová vzdálenost a motor se mohl posunout dozadu spolu s hlavním obloukem. Limitní vzdálenost je dána pozicí vstřikovače motoru.



Obr. 27 Detail na vstřikovač motoru

3.1.4 NÁVRH PŘEDNÍ ČÁSTI RÁMU

Přední část monopostu bývá typická dlouhými vzpěrami hlavního oblouku, směřujícími k přední nárazové přepážce, na kterou se připojuje deformační člen. Od něj směrem vzad, k přednímu oblouku, je příhradová konstrukce charakterizována členy vytvářející triangulaci z uzlu do uzlu. Z hlediska pravidel FSAE je nezbytné dodržet prostor definovaný šablonou dle 1.1.3.

U nové evoluce Dragona pro sezónu 2014 bude použito aerodynamických prvků a to: zadního křídla, difuzoru a předního křídla. V případě posledních dvou jmenovaných je nutné přizpůsobit konstrukci. Velký vliv má při návrhu přední křídlo a jeho uložení. Právě uložení křídla určuje nutnost dynamického nárazového testu předního deformačního členu s nebo bez předního křídla. Jelikož test je finančně náročný a příprava je též obtížná, bylo určeno, že v případě nového monopostu bude křídlo uloženo za přední přepážkou, tudíž nemusí být součástí nárazového testu. To sebou přineslo zvýšení přední části rámu, což spolu s kříženými vzpěrami předního oblouku přineslo zvýšení torzní tuhosti.

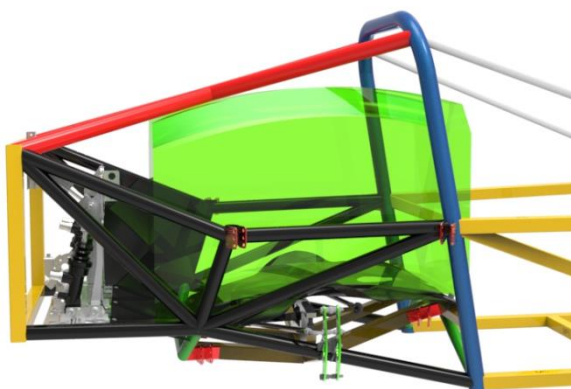


Obr. 28 Konstrukce přední části rámu

Tab. 6 Značení a rozměry polotovarů pro přední část

	Rozměr polotovaru
modrá	Ø 30 x 2
červená	Ø 28 x 1,5
černá	Ø 25 x 1,5
zelená	Ø 22 x 1,2
žlutá	25 x 25 x 1,5

Šablona se vkládá z kokpitu a ve vertikální rovině se posouvá směrem k přednímu nárazníku, obtočí se kolem sloupku řízení a pokračuje až do vzdálenosti 100 mm od nejvzdálenějšího nášlapu pedálu. Stejně jako v případě interiérové šablony je vhodné důsledně kontrolovat tento prostor a průběžně podrobovat přední část rámu testování vkládáním šablony.



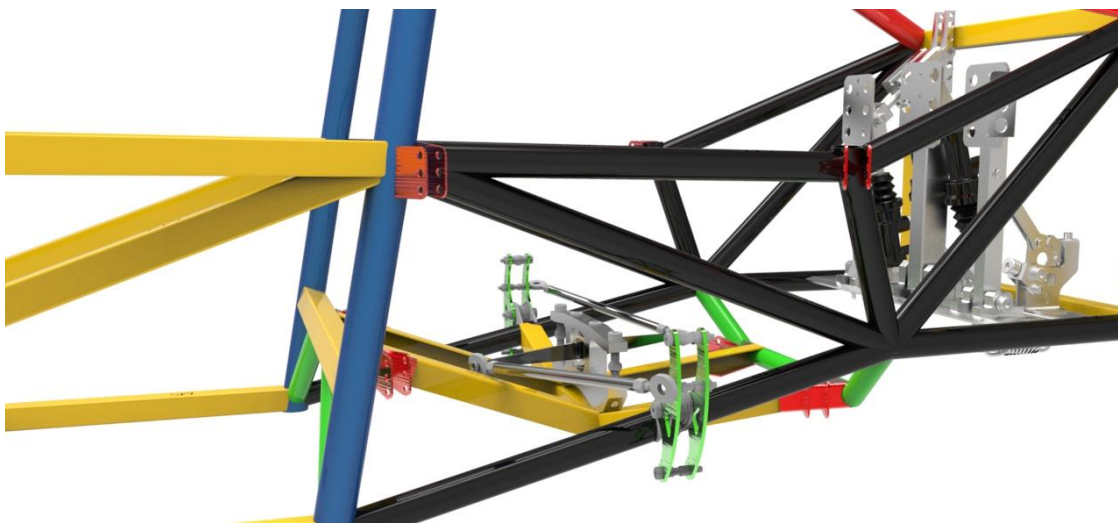
Obr. 29 Detail na přední šablonu

Ohledně zástavby komponent nacházejících se v přední části příhradové konstrukce je nutné přizpůsobit návrh zejména bodům zavěšení, pedálové skupině a sružené jednotce tlumičů a předního stabilizátoru.

Tato jednotka je charakteristickým prvkem monopostů Dragon od druhé evoluce až po současnost a bývá vždy obdivována a vychvalována komisaři při designových prezentacích. Z pohledu rámu je ovšem prvkem značně zneprůjemňujícím a současně s body zavěšení lze



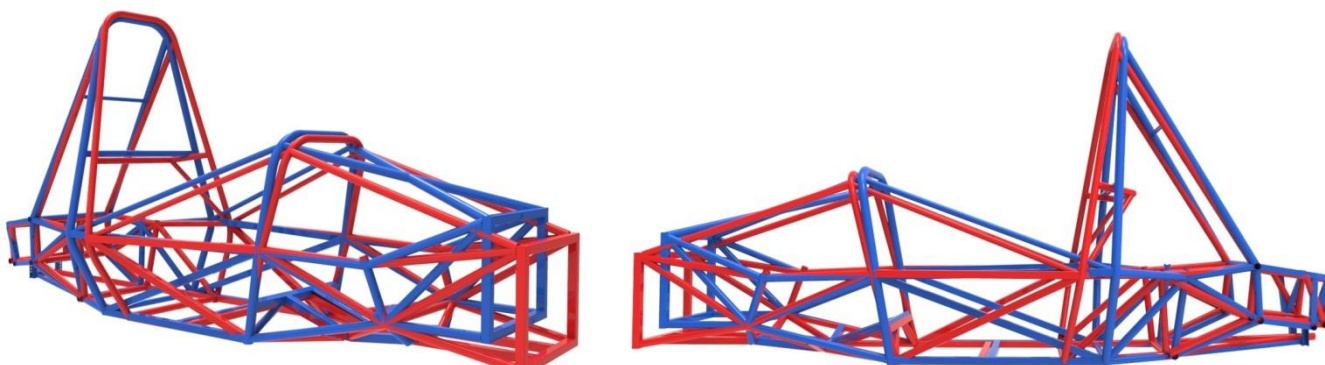
těžko v této oblasti navrhnu kompaktní a lehkou konstrukci. V tomto případě byla zvolena kombinace čtvercových polotovarů a profilů tvaru L.



Obr. 30 Detail na pružící a stabilizační jednotku

3.1.5 POROVNÁNÍ RÁMU NOVÉ A PŘEDEŠLÉ EVOLUCE MONOPOSTŮ DRAGON

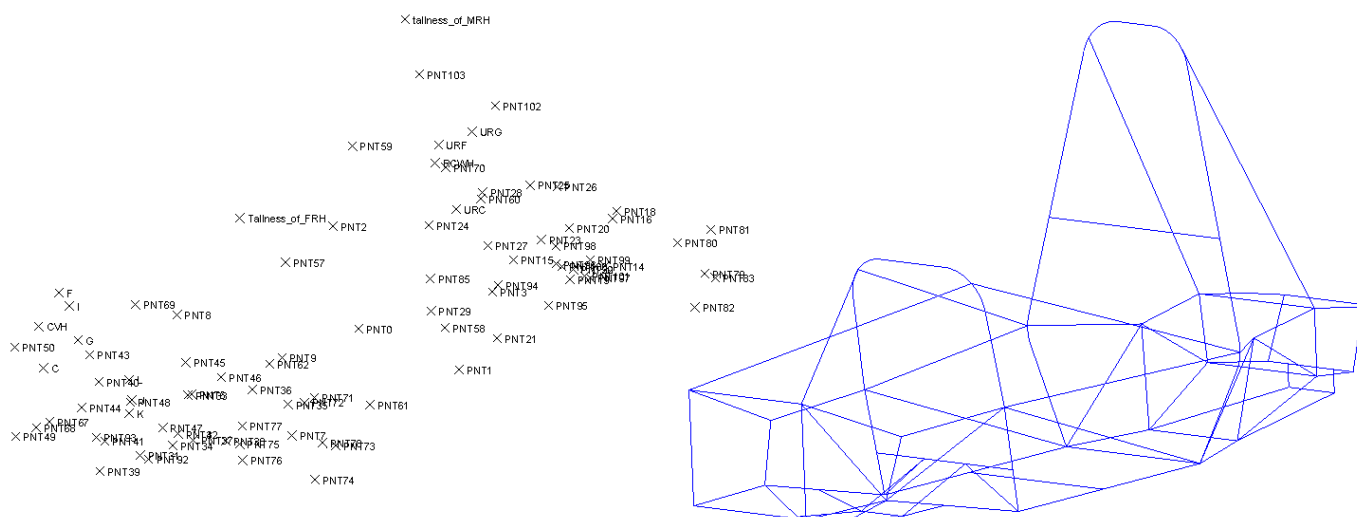
Na obrázku 31 jsou zobrazeny rozdíly mezi jednotlivými monoposty. Nový je znázorněn modrou barvou. Jsou patrné všechny hlavní rysy zmíněné výše, jako zmenšení úhlu hlavního oblouku, prodloužení střední částí, posunutí řidiče i motoru směrem vzad a v poslední řadě i zkrácení a zvednutí příďe. Společným prvkem jsou body zavěšení, jejichž poloha se posouvala po klopné ose ramene jen nepatrně.



Obr. 31 Porovnání rámu Dragon 3 vs. Dragon 4

3.2 TVORBA A PŘÍPRAVA VÝPOČTOVÉHO MODELU

Pro následující analýzy byl vytvořen MKP model drátěné konstrukce s využitím Creo Simulate. Ten byl zvolen z důvodu časové úspory, jelikož rám samotný byl tvořen právě programem Creo Parametric 2.0. Této nástavbě lze s výhodou využít. Základním prvkem při tvorbě MKP modelu je založení tzv. skeleton partu, do kterého se importují jednotlivé body příhradové konstrukce jako souřadnice v kartézském souřadném systému vzhledem k vybranému souřadnému systému.



Obr. 32 Import bodů a vytvoření prutové konstrukce

3.2.1 PRUTOVA NAHRADA PRIHRADOVE KONSTRUKCE

Pro zjednodušení výpočtu byly jednotlivé profily rámové konstrukce nahrazeny pruty, kterým byl přidělen průřez. Tímto způsobem lze zkrátit čas výpočtu vlivem snížení počtu elementů současně zachovat velkou přesnost výsledků. Tento postup byl proveden v programu Creo, tentokrát v nastavbě Simulate [8][9]

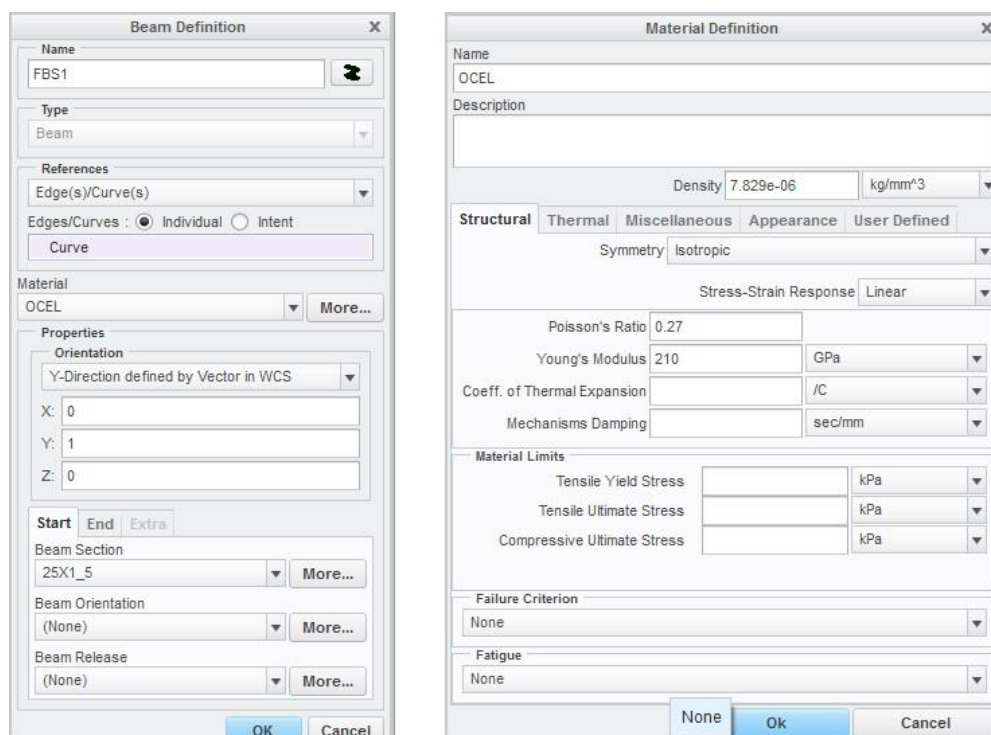
V preprocesoru se definuje materiál, jeho chování, hustota Youngův modul a Poissonovo číslo. Dále je pro prutovou náhradu potřeba určit průřez prutu. Jeho určením základními geometrickými rozměry si Creo dopočítá ostatní parametry potřebné k řešení jako například kvadratický moment průřezu a momenty setrvačnosti k jednotlivým osám viz obr.33.

Beam Section "28x1 5"	
Property	Value
Description	BRACING
Type	Hollow Circle 
Dimensions	R = 14 [mm] Ri = 12.5 [mm]
Area	124.878 [mm^2]
J	21994.2 [mm^4]
Moment of Inertia (Principal Coordinate System)	$\begin{bmatrix} 10997.1 & 0 \\ 0 & 10997.1 \end{bmatrix}$ [mm^4]
Shear Area Factor (Principal Coordinate System)	$\begin{bmatrix} 0.530788 \\ 0.530788 \end{bmatrix}$
Shear Center (Principal Coordinate System)	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ [mm]
Stress Computation Offsets (Principal Coordinate System)	$\begin{bmatrix} 14 \\ 14 \end{bmatrix}$ [mm]
Moments of Inertia (Shape Coordinate System)	$\begin{bmatrix} 10997.1 & 0 \\ 0 & 10997.1 \end{bmatrix}$ [mm^4]
Shear Area Factor (Shape Coordinate System)	$\begin{bmatrix} 0.530788 \\ 0.530788 \end{bmatrix}$

Obr. 33 Automaticky dopočtené parametry průřezu prutu

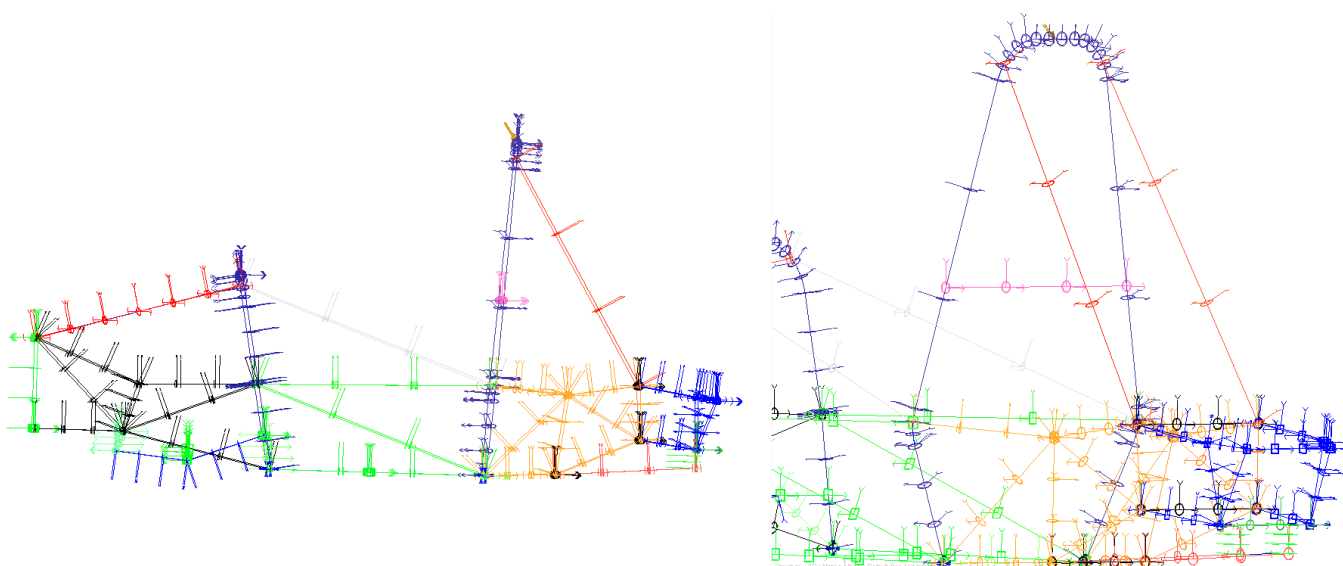


Následně je možné drátěný model tvořený pouze křivkami transformovat v prutovou náhradu vhodnou k výpočtu. Prut je určen materiálem, průřezem, křivkou, po které je tažen a jednotkovým vektorem, který definuje jeho orientaci.



Obr. 34 Definice materiálu a prutové náhrady

Tímto způsobem lze vytvořit celý drátěný model z prutových náhrad. Komplikace mohou nastat, jestliže se v modelu vyskytuje průřez polotovaru na více prutech, jejichž orientace je následující: střednice právě tvořeného prutu je rovnoběžná s jednotkovým vektorem, definující orientaci průřezu již vytvořeného prutu. Cestou k úspěšnému překonání této překážky je vytvoření nového průřezu, stejně definovaného jen jinak orientovaného.



Obr. 35 Prutová náhrada příhradové konstrukce



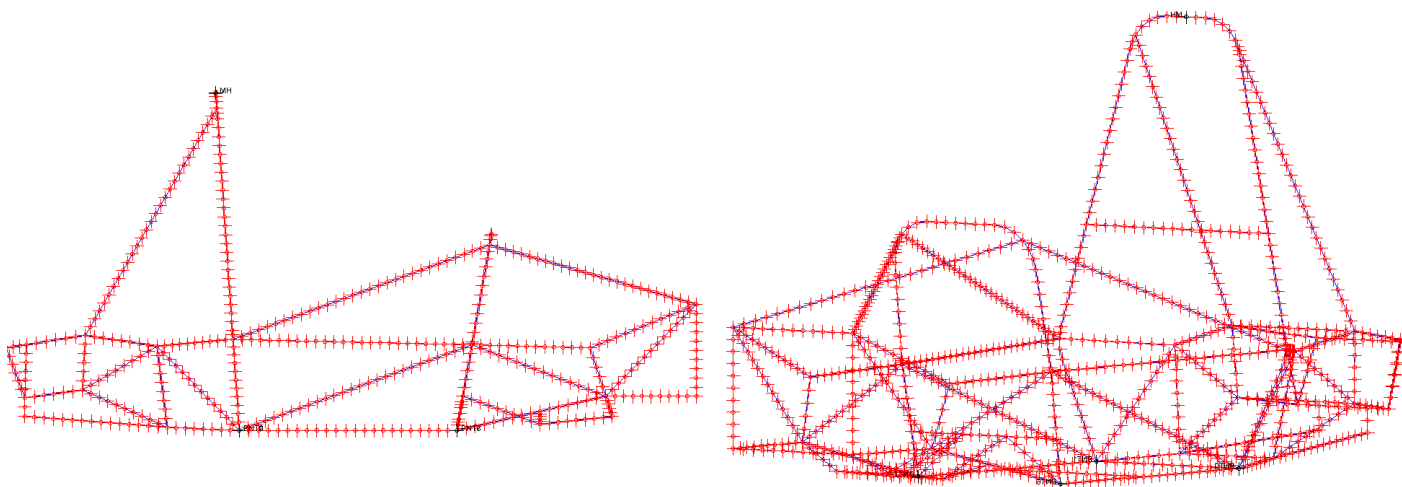
Jelikož je použito poměrně mnoho různých polotovarů, je vhodné dodržovat barevné rozlišení jednotlivých průřezů.

3.2.2 SÍŤOVÁNÍ PRUTOVÉHO DRÁTĚNÉHO MODELU, DEFINICE ZATÍŽENÍ A VAZEB

Další preprocesorovou operací je vytvoření výpočtové sítě. V aplikaci Creo Simulate se aplikuje na drátěný model pomocí nástrojů určujících minimálních velikost elementu. Jelikož takto vytvořená síť vytvoří určitý počet uzlů ve vzdálenosti určené velikostí elementů, vznikne velké množství prvků. K jejich redukci a zkrácení výpočtového času je výhodné definovat i maximální velikost elementů. Výpočtová síť je následně automaticky vytvořena z elementů a uzlů, jejichž parametry jsou závislé na délce a zakřivení prutu. Vlastnosti sítě jsou následně zapsány do souboru.

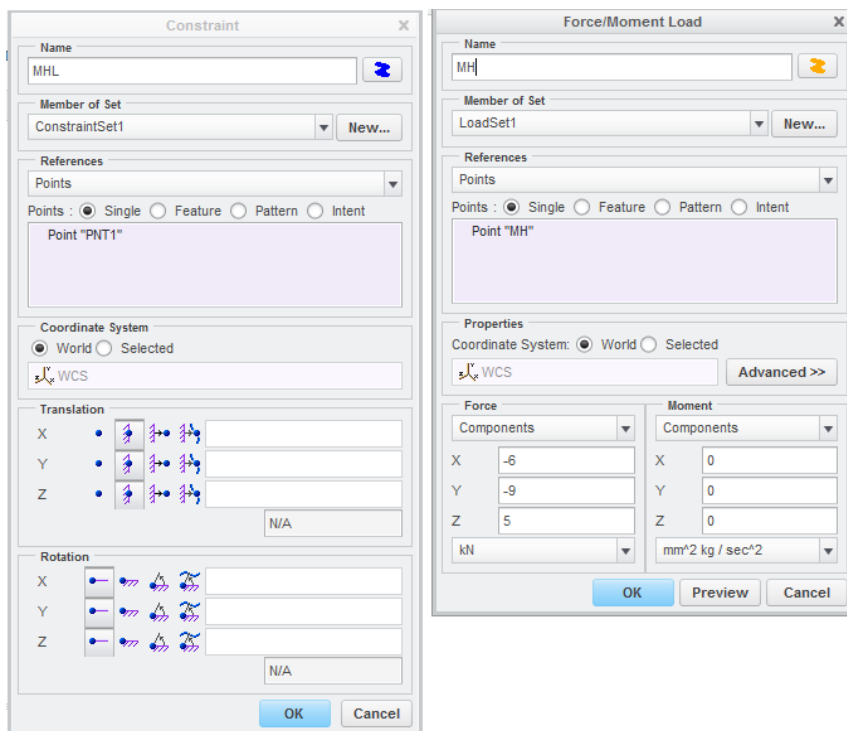
Total Number of Nodes	1057
Total Number of Elements	1109
Node ID Range	1 - 1057
Element ID Range	1 - 1109
Advanced Beams	1109

Obr. 36 Výpis ze souboru vytvořeným v Creo Simulate

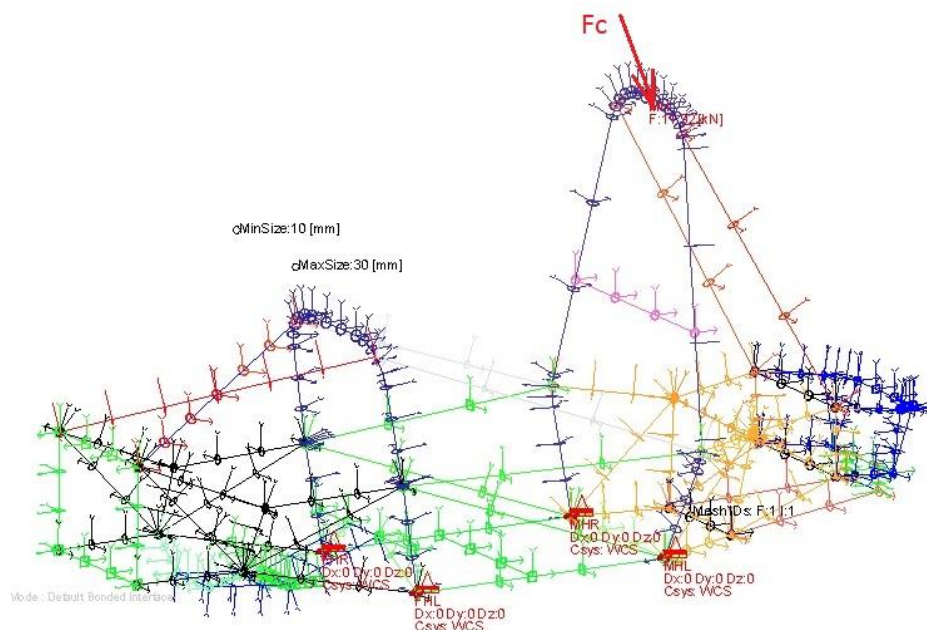


Obr. 37 Výpočtová síť reprezentována jednotlivými uzly

Posledním krokem před samotným výpočtem je určení okrajových podmínek. V tomto případě vazebních a zatěžovacích. Pro následné analýzy podle Tab.3 odstavce 1.2.2.



Obr. 38 Příklad zadání vazby a zatížení podle požadavků FSAE pro alternativní rámy



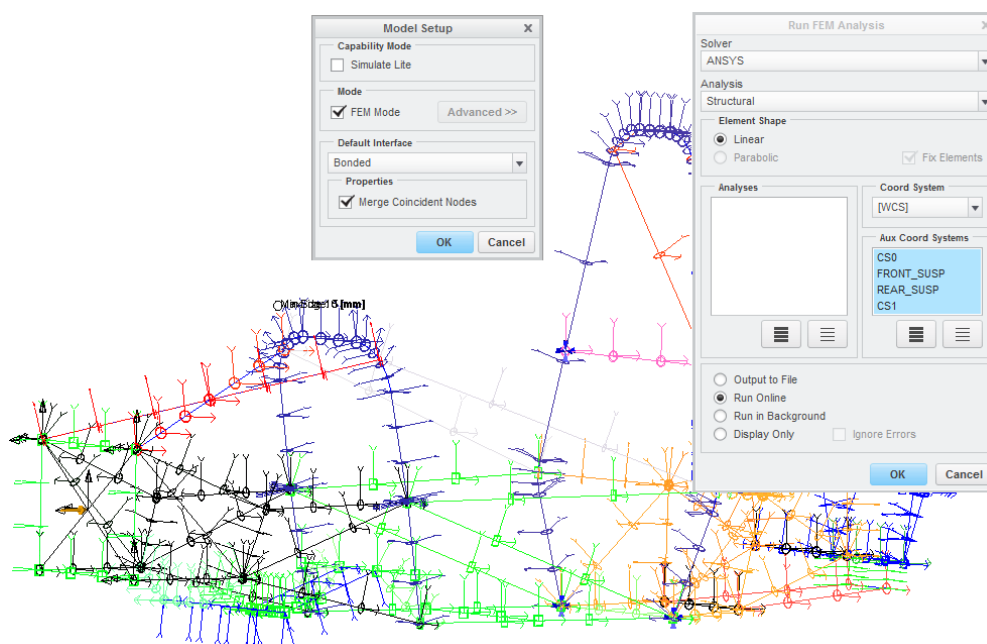
Obr. 39 Model připravený k výpočtu

3.2.3 VÝPOČET JEDNOTLIVÝCH ZÁTĚŽNÝCH STAVŮ A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Pro navrženou příhradovou konstrukci standardního rámu byla provedena analýza všech zátěžných stavů požadovaných podle pravidel FSAE pro alternativní rámy. Cílem těchto výpočtů bylo zjistit, zda standardní rám splňuje přísné požadavky alternativních konstrukcí. Pro samotný výpočet bylo využito opět prostředí Creo Simulate, které umožňuje užití externího řešiče, v tomto případě ANSYSU. Zde se ukazuje další výhoda kompletního návrhu



v jednom CAD prostředí. Návrh i výpočet proběhl bez jediného převodu formátů mezi aplikacemi.



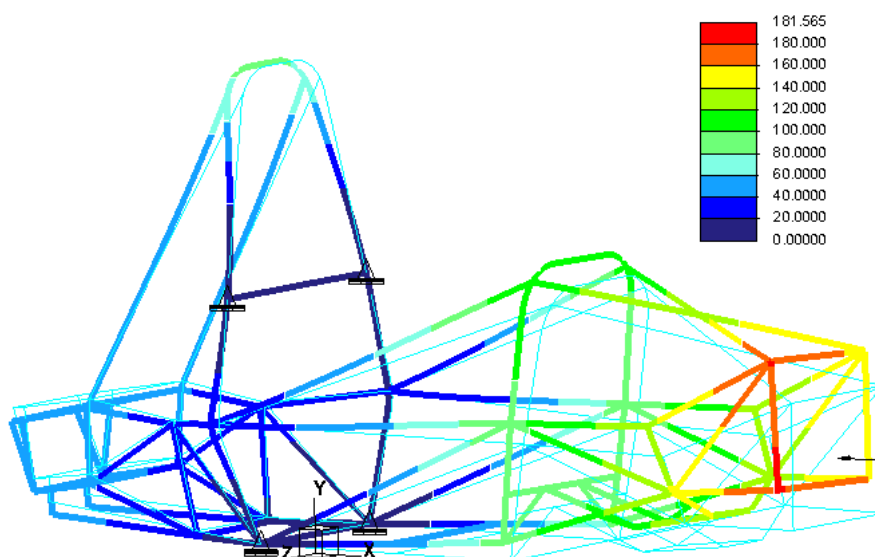
Obr. 40 Volání ANSYSU z Creo Simulate

Podle výsledných deformací vzniklých během jednotlivých zátěžných stavů oba oblouky v tomto směru vyhovují požadavkům, stejně tak i boční nárazová struktura. V těchto případech nepřekročila deformace příhradové konstrukce 25 mm. Nevyhovující výsledky byly ovšem prokázány při zatížení Č.4 a Č.6 viz 1.2.2. V posledním případě byla vypočtená deformace rozdílná dokonce o 181 mm od nezatíženého stavu. To překračuje minimální požadavky více než sedminásobně. Tento nepříznivý výsledek je dán zatížením velkou silou 149 kN, která působí v důsledku zvýšení přední části na rameni k vazbám hlavního oblouku. Tento moment ohýbá rám od hlavního oblouku až k přední nárazové přepážce a právě v této oblasti vzniká největší výsledná deformace rámu.

Tab. 7 Deformace konstrukce způsobené vlivem zatížení podle FSAE

Zátěžný stav	1	2	3	4	5	6
	Hlavní oblouk	Přední oblouk	Boční struktura	Přední přepážka	Body pásů	Přední přepážka 2
požadovaná deformace [mm]	25	25	25	25	25	25
vypočtená deformace [mm]	23,2	8,4	3	157	9,6	181,6
Bezpečnost k [-]	1,08	2,97	8,33	0,16	2,60	0,14

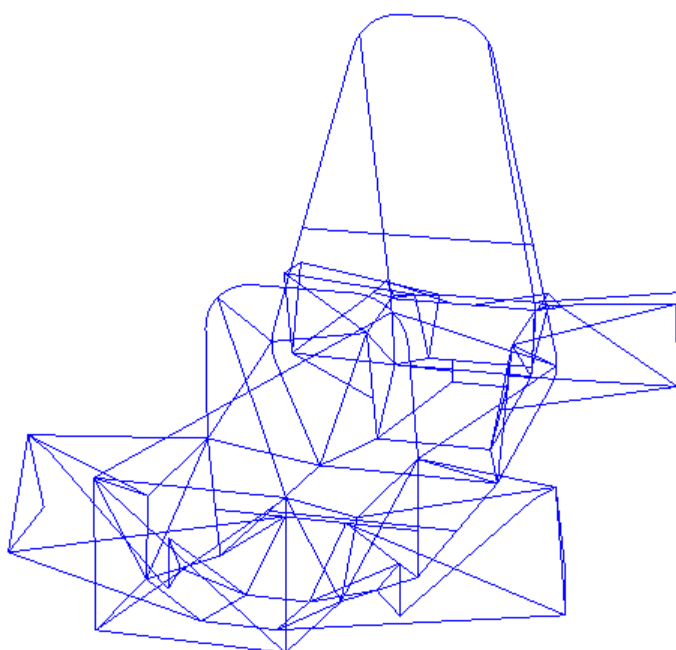
I přes to, že příhradová konstrukce vykazuje nedostatky při zatěžovacích podmínkách pro alternativní rámy, není na ně v tomto případě brán zřetel, jelikož se návrh řídí standardními pravidly FSAE a je i tak prezentován. Z analýz uvedených výše ovšem vyplývá, že standardní rámy nemusí splňovat požadavky alternativních konstrukcí i přes dodržení všech striktně daných podmínek, které vyplývají z pravidel pro standardní konstrukce FSAE.



Obr. 41 Vypočtená deformace pro zátěžný stav č.6 (ostatní zátěžné stavy v příloze)

3.2.4 VÝPOČET TORZNÍ TUHOSTI STANDARDNÍ KONSTRUKCE

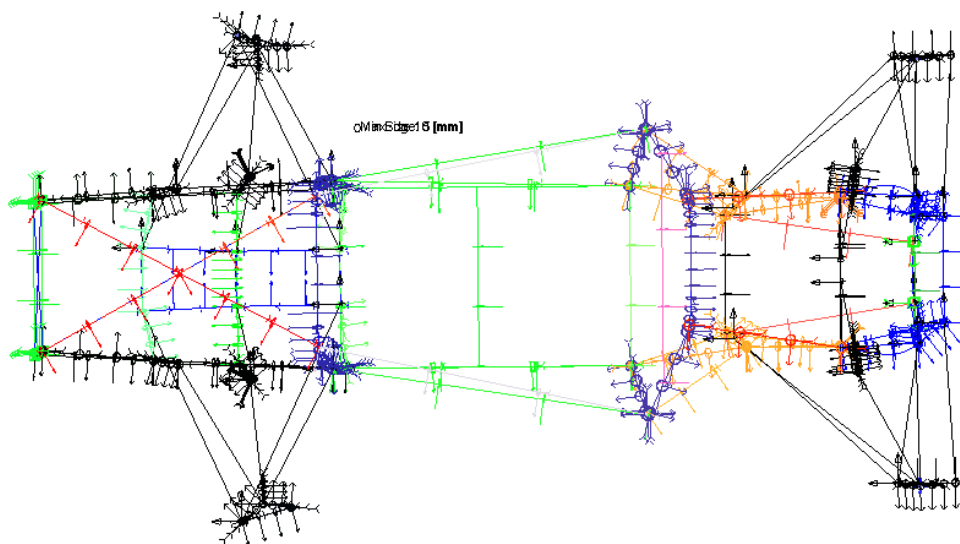
Torzní tuhost spolu s hmotností jsou hlavními sledovanými parametry rámu závodního vozidla. Stejně tak je tomu v případě konstrukčního návrhu příhradové konstrukce monopostu kategorie Formule SAE. Výpočtový model, vytvořený dle specifikací uvedených výše, je pro následující analýzu nutné doplnit o části zavěšení. Konkrétně o náhrady ramen, vahadel, tlumičů a těhlic.



Obr. 43 Drátěný model doplněný o zavěšení

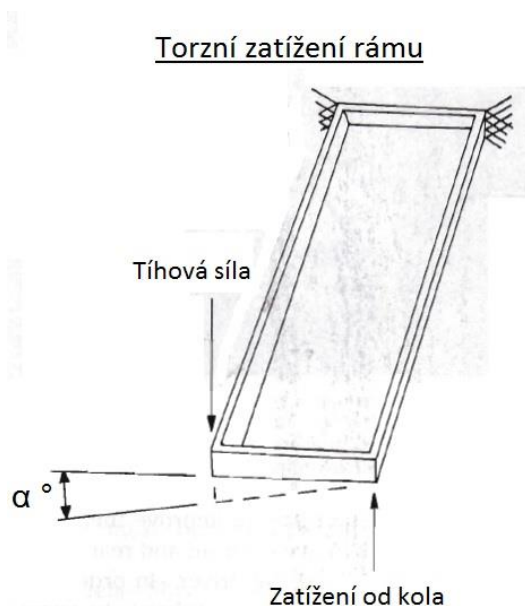


Při výpočtu torzní tuhosti rámu se nesmí projevovat deformace náhrad zavěšení a musí být zamezeno pohybu vahadel a zdvihu tlumičů. Z tohoto důvodu bylo použito tuhých nehmotných prvků. Tímto způsobem lze zjistit torzní tuhost pouze příhradové konstrukce bez vlivu vlastní tuhosti zavěšení. Současně je zajištěn správný směr i orientace sil působících na rám přes ramena lichoběžníkových náprav.



Obr. 44 Pohled shora na prutové náhrady zavěšení

Torzní zatížení rámu se projevuje zejména při průjezdu vozidla zatáčkou nebo při přejezdu nerovnosti jedním kolem. Pro tyto situace je nutné určit vazební a zatěžovací podmínky pro samotný výpočet.



Obr. 45 Torzní zatížení rámu [1]

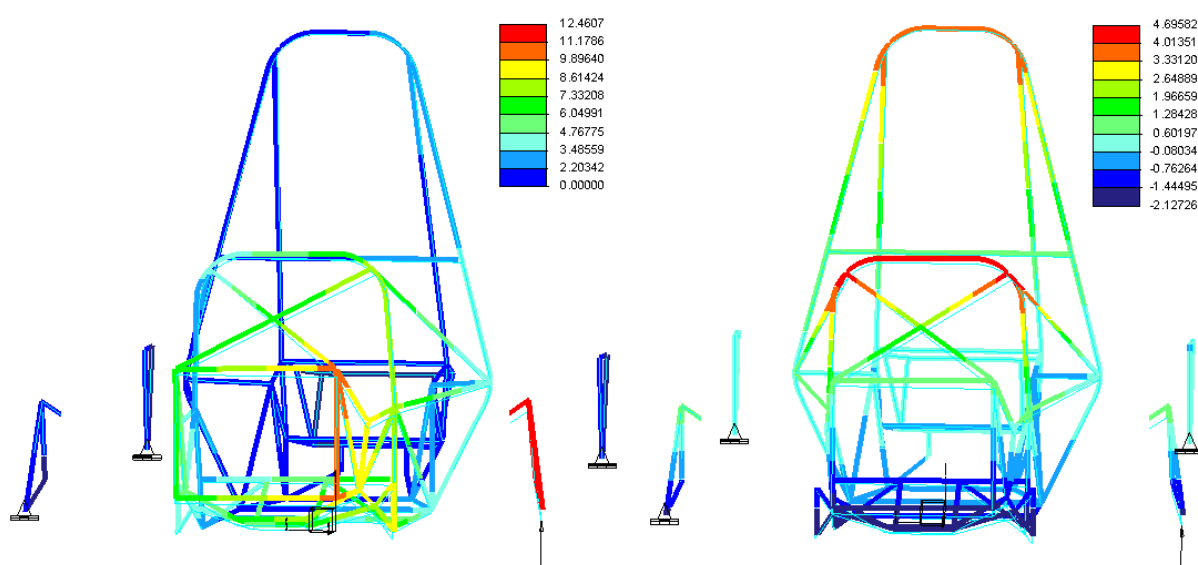
Tab. 8 popisuje okrajové podmínky výpočtu. Jednotlivé vazby mají povolené rotace kolem všech tří os, posuvy jsou omezené. Symbol X charakterizuje zamezení posuvu a - značí jeho povolení v dané ose



Tab. 8 Okrajové podmínky pro výpočet torzní tuhosti [3]

kolo	Okrajová podmínka v ose X	Okrajová podmínka v ose Y	Okrajová podmínka v ose Z
Zadní levé	X	X	X
Zadní pravé	X	X	-
Přední levé	0 N	1000 N	0 N
Přední pravé	-	X	-

Levé přední kolo je zatíženo silou 1000 N ve směru osy Y. Aby bylo zabezpečeno torzní namáhání příhradové konstrukce, je pomocí vazeb o určitém stupni volnosti zamezeno pohybu zbylým kolům.



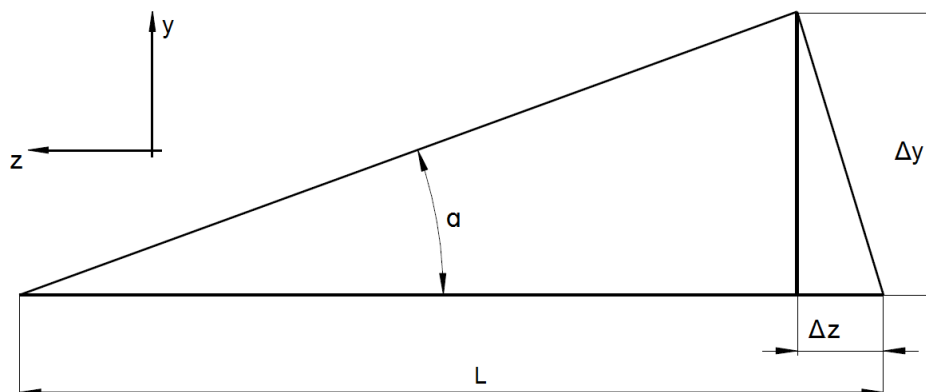
Obr. 46 Zobrazení výsledné deformace rámu způsobené torzním namáháním. Vlevo deformace v ose Y, vpravo deformace v ose Z

Výpočtem metodou konečných prvků zjistíme deformace ve sledovaných osách. Sledovaným místem je pro následující výpočet torzní tuhosti spodní bod levé přední těhlice, ve kterém působí zatěžovací síla. Posunutí tohoto bodu je v ose Δy 12.46 mm a v ose Δz -2.13 mm.

Torzní tuhost lze spočítat ze vztahu

$$C \left[\frac{N \cdot m}{^\circ} \right] = \frac{M [N \cdot m]}{\alpha [^\circ]} \quad (11)[3]$$

Kde C je torzní tuhost, M moment vyvolaný zátěžnou silou a α je zkroucení rámu. Výchozí vztah je nutné upravit do tvaru vhodného pro výpočet podle pravidel zmíněných výše a to tak, aby ve vztahu figuroval rozchod L přední nápravy a výsledná deformace v ose Y a Z.

Obr. 47 Výpočet α z rozchodu nápravy a deformací v jednotlivých osách

Deformace v osách Y a Z převedeme na úhlovou deformaci příhradové konstrukce s využitím trojúhelníku zobrazeného na Obr. 47.

$$\alpha = \operatorname{atan} \frac{\Delta y}{l - \Delta z} = \operatorname{atan} \frac{12,46 \text{ mm}}{1190 \text{ mm} - 2,13 \text{ mm}} \Rightarrow \alpha = 0,6^\circ \quad (12)$$

Výsledná rovnice pro výpočet torzní tuhosti je potom

$$C = \frac{F \cdot l}{\operatorname{atan} \frac{\Delta y}{l - \Delta z}} = \frac{1000 \text{ N} \cdot 1,190 \text{ m}}{\operatorname{atan} \frac{12,46 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1,190 \text{ m} - 2,13 \cdot 10^{-3} \text{ m}}} = 1983 \frac{\text{Nm}}{^\circ} \quad (13)$$

Pro další porovnávání je názornější určit měrnou torzní tuhost s ohledem na vlastní hmotnost rámu.

$$c = \frac{C}{m} = \frac{1983 \frac{\text{Nm}}{^\circ}}{29,6 \text{ kg}} = 67 \frac{\text{Nm}}{^\circ \cdot \text{kg}} \quad (14)$$

Za dostatečnou hodnotu torzní tuhost pro závodní okruhové vozidlo kategorie roadster považuje odborná literatura [1] $10000 \frac{\text{lbs} \cdot \text{ft}}{^\circ}$, což odpovídá $1382,8 \frac{\text{Nm}}{^\circ}$. Jelikož je obtížné odhadovat dostatečnou torzní tuhost rámu Formule Student, bylo k této hodnotě při návrhu přihlíženo.

Tab. 9 Shrnutí výsledků standardní konstrukce rámu

Hmotnost	Deformace v ose Y	Deformace v ose Z	Natočení rámu	Torzní tuhost	Měrná torzní tuhost
Kg	mm	mm	°	Nm/°	Nm/°kg
29,6	12,46	2,13	0,6	1983	67

3.3 ZHODNOCENÍ NÁVRHU RÁMU PODLE STANDARDNÍCH PRAVIDEL FORMULE SAE

Během návrhu byly splněny všechny geometrické a materiálové požadavky stanovené pravidly Formule SAE. Současně byl brán zřetel na důležité komponenty vozidla zejména podvozek, řízení, motor s jeho příslušenstvím, aerodynamické prvky a v neposlední řadě i na



posazení a ergonomii řidiče. Snahou bylo docílit co nejmenší hmotnosti a dostatečné torzní tuhosti. Jestliže budeme považovat torzní tuhost, která se vyskytuje v literatuře [1][1] za dostatečnou, otevírá se prostor pro další vývoj rámu směrem ke snížení torzní tuhosti, což má většinou za následek i snížení hmotnosti rámu. V případě návrhu standardní příhradové konstrukce Dragona 4 bylo použito polotovarů o minimálních tloušťkách stěn, tudíž další snížení hmotnosti bude spojeno se změnou geometrie rámu.

I přes dodržení pravidel pro standardní rámy bylo provedenými analýzami zjištěno, že tato konstrukce nesplňuje přísné požadavky na alternativní konstrukce a je možné konstatovat, že za určitých podmínek bude méně bezpečná.



4 NÁVRH RÁMU FORMULE STUDENT DLE PRAVIDEL FSAE PRO ALTERNATIVNÍ KONSTRUKCE

Využití alternativních pravidel Formule SAE poskytuje jistou volnost při návrhu formulového rámu. Vhodnou volbou polotovarů a geometrie šasi je možné docílit nižší hmotnosti. Jelikož se průměrná váha monopostů Formule Student pohybuje kolem 200 kg, má každý ušetřený kilogram na rámové konstrukci velký vliv. Návrh alternativního rámu je podstatně náročnější z důvodu přísných zatěžovacích podmínek, které se u standardního návrhu nevyskytují. Z tohoto důvodu bylo vycházeno ze standardního rámu Dragon 4.

4.1 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH FORMULOVÉHO RÁMU DLE PRAVIDEL PRO ALTERNATIVNÍ RÁMY

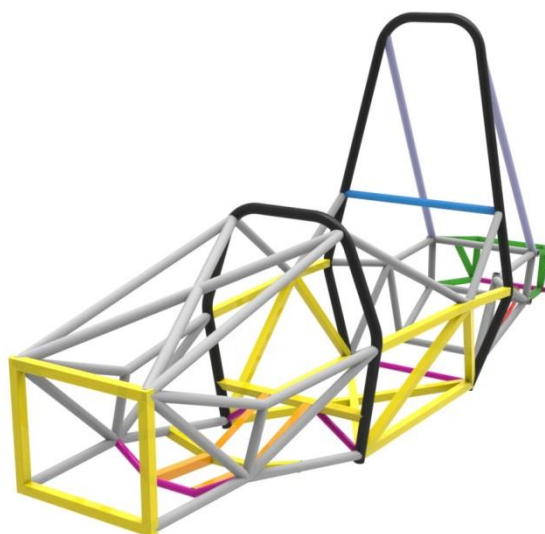
Z předchozích analýz standardní konstrukce bylo zjištěno, že vlivem zvýšené přední části dochází při zatěžování přes přední nárazovou přepážku k ohýbání střední části šasi. Důsledkem této deformace se přední část rámu několikanásobně posune ze své původní pozice a podmínka maximální deformace 25 mm dána pravidly v tomto případě není splněna.

Nicméně i přes tyto nedostatky může být rám standardní konstrukce využit a přepracován tak, aby splňoval všechny podmínky pro alternativní konstrukce. Prvním krokem byla úprava polotovarů. Pravidla FSAE stanovují minimální tloušťku stěny uzavřených profilů na 1,25 mm. Výjimkami jsou přední a hlavní oblouk, kde jsou požadovány polotovary s tloušťkou stěny 2 mm.

Tab. 10 Použité polotovary alternativní konstrukce

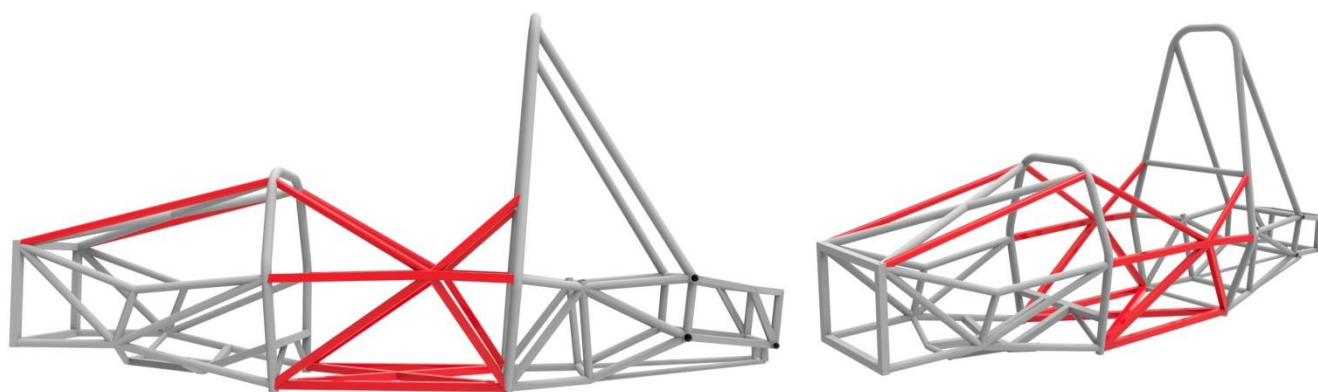
barva	polotovar	pozn.
černá	Ø30x2	Oblouky
šedá	Ø25x1,25	
modrá tmavá	Ø25x2,5	Uchycení pásů
modrá světlá	Ø28x1,25	Výztuhy hlavního oblouku
fialová	Ø20x1,25	
červená	Ø16x1	Krytí motoru
žlutá	25x25x1,25	
zelená	20x20x1,25	

Volba polotovarů má zásadní vliv na deformaci rámu, tedy na výsledky analýz. Při předběžném návrhu alternativní konstrukce byly zachovány vnější rozměry profilů, ale jejich stěna byla snížena na minimum. V zadní spodní části šasi jsou použity trubky Ø 16x1 Ty slouží pouze k ochraně motoru proti proražení skříně. Nepodílí se na tuhosti rámu. Byly zvoleny tak, aby plnily svou funkci a současně měli malou hmotnost. Stěna profilu je pouze 1mm, proto podle pravidel nemohou být použity při výpočtu.



Obr. 48 Použití polotovarů alternativní konstrukce

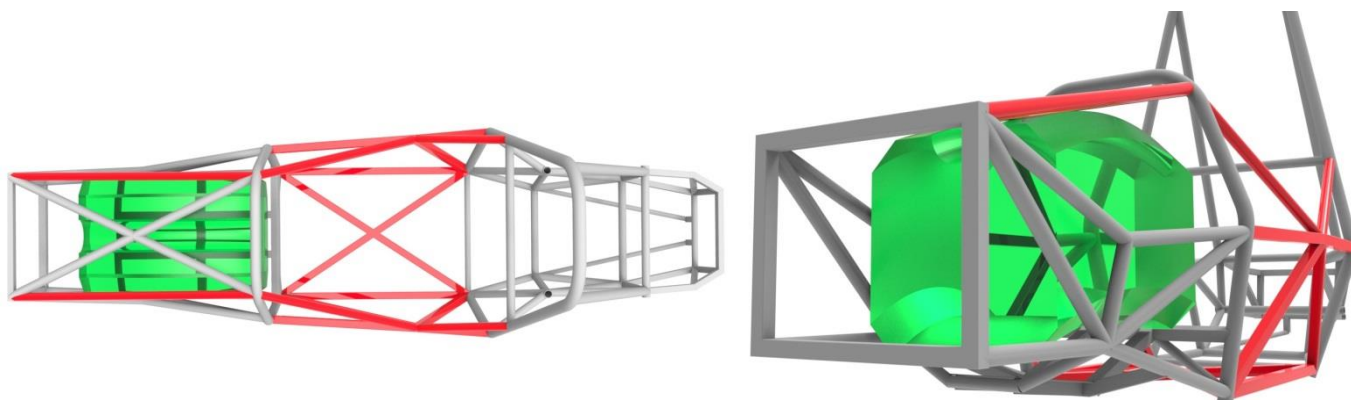
Prvotní návrh alternativní konstrukce vychází značně ze standardního rámu. Zadní část je v podstatě shodná. V přední části přibýly pouze další vzpěry předního oblouku, které vytvářejí torzně i ohybově tuhý prvek rámu. Tento postup je vhodný zejména z důvodu zachování bodů zavěšení a kompatibility rámu s většinou komponentů.



Obr. 49 Úprava standardního rámu na alternativní

Největší změnou a současně typickým prvkem alternativních konstrukcí je střední část. Z důvodu ohybového namáhání této části při čelním zatěžování, přibyl kříž ve spodu rámu. Boční nárazová struktura je nyní tvořena šesti členy vycházející z jednoho uzlu a spojující oba oblouky. Na první pohled tyto úpravy vedou k zvýšení hmotnosti a torzní tuhosti. Jelikož byly všechny polotovary upraveny na minimální tloušťku stěny, konstrukce nabyla na hmotnosti pouze o 0,5 kg.

Přední i střední části předběžného návrhu alternativního rámu vyhovují kontrolám pomocí definovaných šablon. Při kontrole přední šablony byla zjištěna zbytečná šířka konstrukce v této oblasti a tedy přebytečná hmotnost. Následnými úpravami bude tento nedostatek napraven.



Obr. 50 Kontrola šablony přední části, patrná přebytečná šířka

4.1.1 ANALÝZY PŘEDBĚŽNÉHO NÁVRHU

Výpočtové modely byly vytvořeny podle kapitoly 3.2. Stejně jako v případě standardní konstrukce bylo pro výpočet využito nástavby Creo Simulate z důvodu rychlejšího a efektivnějšího porovnávání konstrukčních změn na výsledcích analýz. Úpravy rámu monopostu Dragon 4 vedly ke splnění všech požadavků. Předběžný návrh alternativní konstrukce splňuje pravidla FSAE a mohl by být použit.

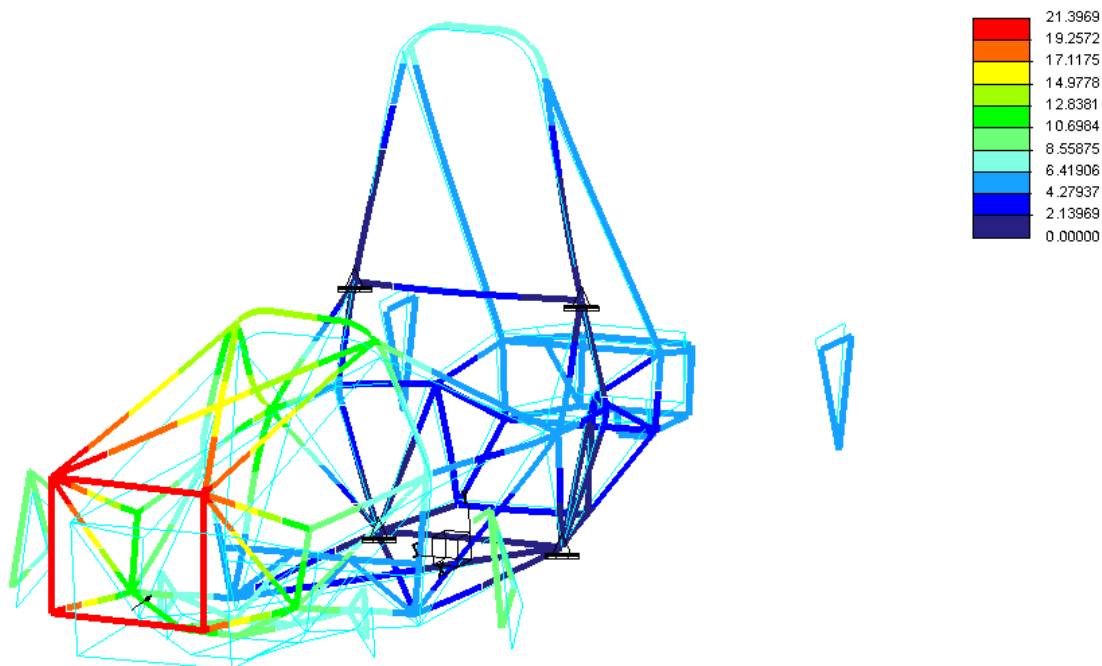
Tab. 11 Vypočtené deformace a bezpečnosti pro jednotlivé zátěžné stavy

Zátěžný stav	1 Hlavní oblouk	2 Přední oblouk	3 Boční struktura	4 Přední přepážka	5 Body pásů	6 Přední přepážka 2
požadovaná deformace [mm]	25	25	25	25	25	25
vypočtená deformace [mm]	18,09	2,45	1,99	17,7	1,43	21,40
Bezpečnost k [-]	1,38	10,2	12,56	1,41	17,48	1,17

Konstrukčními modifikacemi narostla hmotnost, ovšem zvýšila se podstatně také měrná torzní tuhost rámu.

Tab. 12 Torzní tuhost alternativní konstrukce

	Hmotnost	Deformace v ose Y	Deformace v ose Z	Natočení rámu	Torzní tuhost	Měrná torzní tuhost
	kg	Mm	mm	°	Nm/°	Nm/°kg
Standardní rám	29,6	12,46	2,13	0,6	1983	67
Předběžný návrh	30,3	5,54	0,9	0,567	2134	70,43



Obr. 51 Deformace alternativního rámu pro zátěžný stav č.6

4.1.2 ZHODNOCENÍ PŘEDBĚŽNÉHO NÁVRHU ALTERNATIVNÍ KONSTRUKCE

Úpravami standardního rámu bylo docíleno zmenšení ohybového namáhání střední části rámu. Nicméně malé bezpečnosti uvedené v Tab.11 při zátěžném stavu č.4 a č.6 naznačují komplikace při dalším odlehčování a úpravě příhradové konstrukce.

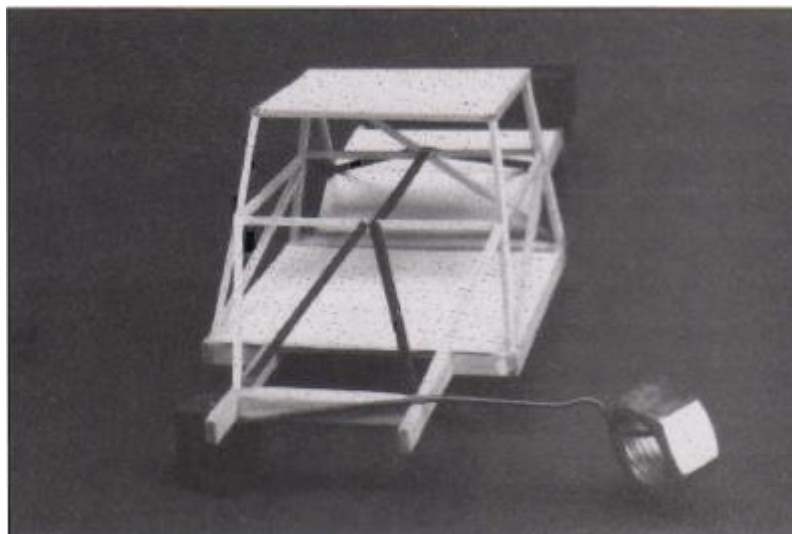
Měrná torzní tuhost alternativní šasi se zvýšila o 2,3 %. Jelikož odborná literatura [1][1] považuje dostatečnou torzní tuhost závodního monopostu kolem 1400 Nm/°, otevírá se prostor dalším úpravám cestou snižování hmotnosti za možnou cenu snižování torzní tuhosti.

4.2 FÁZE 1: MODIFIKACE OBLOUKŮ, ÚPRAVA PŘEDNÍ NÁRAZOVÉ PŘEPÁŽKY A ZÚŽENÍ PŘEDKU

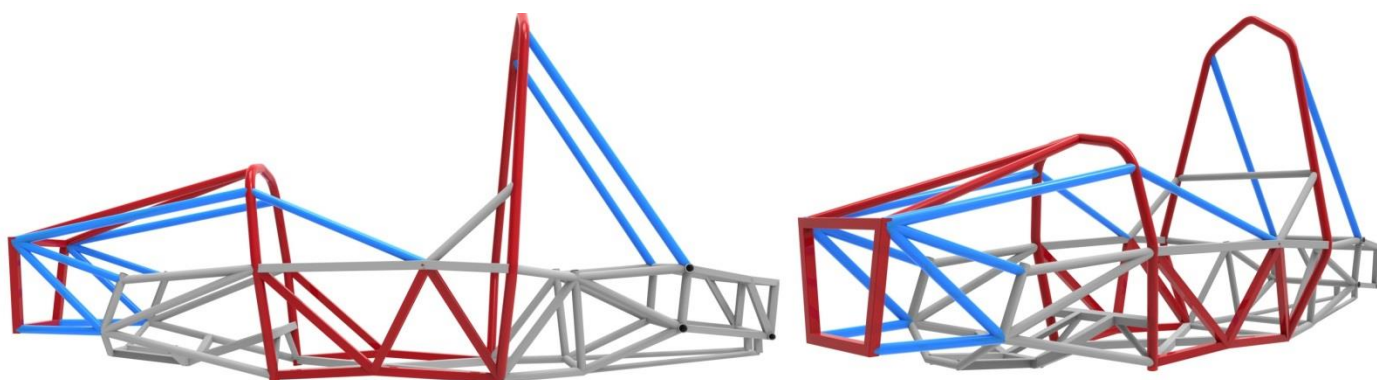
Modifikovaná alternativní konstrukce zobrazená na Obr. 53 ukazuje pozměněné profily proti předběžnému návrhu. Ty jsou označené červenou barvou. Modře jsou zvýrazněné trubky, které se posunuly vlivem změněné geometrie červených trubek.

Za účelem snížení hmotnosti byl hlavní oblouk doplněn o jeden ohyb. Horní část oblouku nyní vytváří zaoblený trojúhelník, jehož nejvyšší bod je důležitý v případě převrácení vozidla a chrání řidičovu hlavu. Takto navrhnutý hlavní oblouk je z geometrického hlediska hmotnostně nejvýhodnější.

Stejnou metodou je upraven také přední oblouk. Rádus v nejvyšším místě oblouku je výhodný i z hlediska umístění vzpěr předního oblouku. Toto uspořádání vede ke konstrukční změně vzpěr. Ty nyní tvoří ohraničený kříž, ale tvar písmene W.[1]

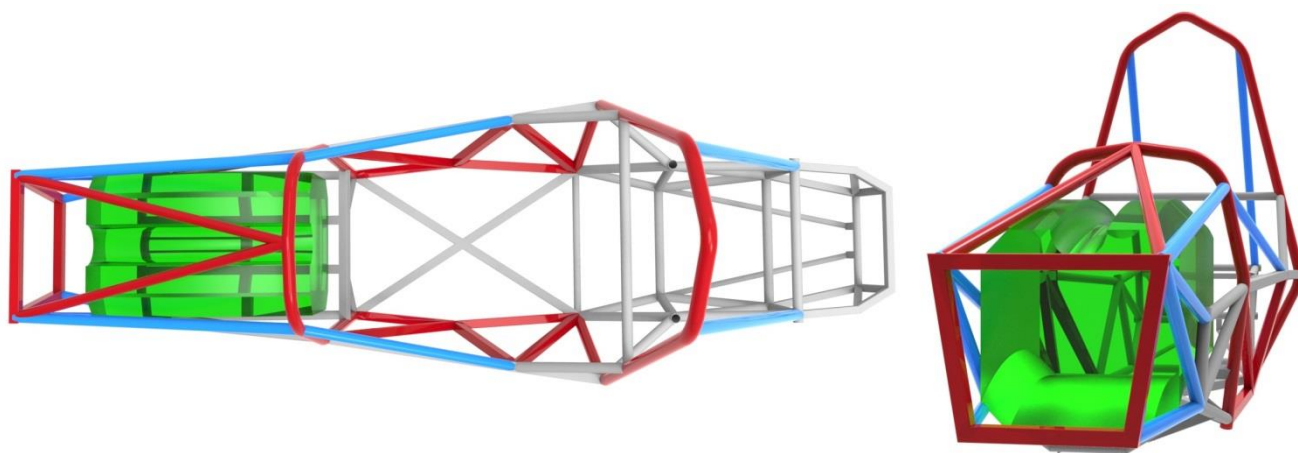


Obr. 52 Využití upořádání profilů do W [1]



Obr. 53 Konstrukční změny alternativní konstrukce. Červená: změněné členy, modrá: posunuté členy

Za účelem minimalizace rozměrů přední části rámu a další snížení hmotnosti byla upravena přední nárazová přepážka. Snížení horní části a celkové zúžení přepážky, zejména potom vespod je podmíněno užitím deformačního členu vlastní konstrukce.

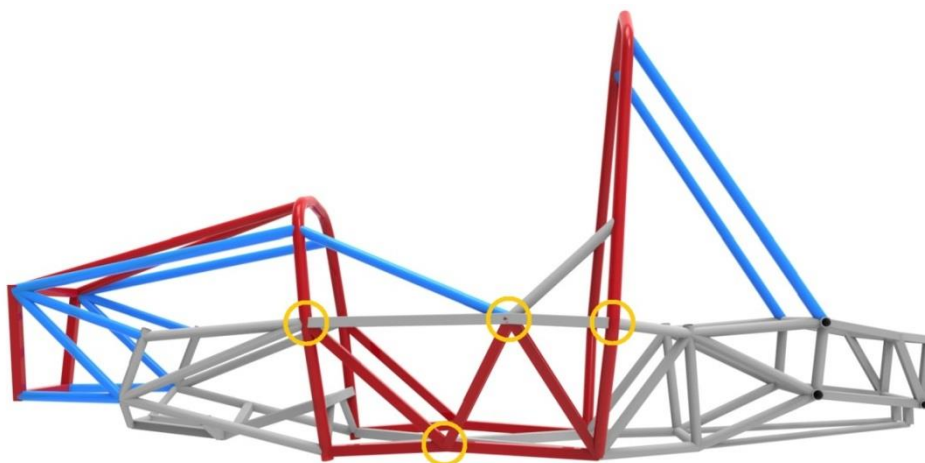


Obr. 54 Minimalizace prostoru na přední šablonu



Standardní rám popsaný v kapitole 3 užívá standardního deformačního členu homologovaného pro závody Formule Student. Mimo něj lze použít deformovatelný prvek vlastní konstrukce, jehož požadované vlastnosti musí být testovány v certifikované zkušebně. Výsledky musí být potom prezentovány ve speciálním dokumentu.

Přední část rámu od předního oblouku až po nárazovou přepážku je nyní navržena tak, že šablona prostorem těsně prochází. Je zde ovšem dodržena minimální vzdálenost mezi šablonou a rámem 5 mm z důvodu možné nepřesnosti výroby šasi.



Obr. 55 Hlavní konstrukční uzly střední části rámu

Zúžení přední části rámu si vyžádalo také úpravy středu konstrukce. Při zatěžování přes přední nárazovou přepážku docházelo opět k ohýbání střední části rámu a k překročení maximální povolené deformace o 4 mm. Největší změnou bylo přidání dalšího profilu. Díky němu dochází k lepšímu rozdělení sil. Z Obr. 55 je vidět triangulace z uzlu do uzlu jednotlivých členů rámu od předního nárazové přepážky až k ústí vzpěr hlavního oblouku v zadní části.

Další změnou je vytvoření nového uzlu v dolní oblasti boční nárazové struktury. Tento bod neleží přímo na spojnici uzlů předního a hlavního oblouku, ale je situován výše. Při čelním zatěžování rámu se tyto body vzdalují od sebe ve směru osy Z a příhradová konstrukce má menší sklon ke zvedání přídě. Na Obr.55 jsou vyznačeny významné body ve střední části šasi. Změnou jejich souřadnic lze ovlivňovat výsledky analýz pro jednotlivé zátěžné stavy.

4.2.1 ANALÝZY JEDNOTLIVÝCH ZÁTĚŽNÝCH STAVŮ ALTERNATIVNÍ KONSTRUKCE

Tab. 13 Tabulka výsledků pro zátěžné stavy

Zátěžný stav	1 Hlavní oblouk	2 Přední oblouk	3 Boční struktura	4 Přední přepážka	5 Body pásů	6 Přední přepážka 2
požadovaná deformace [mm]	25	25	25	25	25	25
vypočtená deformace [mm]	20,88	2,39	2,64	24,37	1,90	24,85
Bezpečnost k [-]	1,20	10,46	9,46	1,03	13,16	1,01



Tab. 14 Vypočtená torzní tuhost alternativního rámu

	Hmotnost	Deformace v ose Y	Deformace v ose Z	Natočení rámu	Torzní tuhost	Měrná torzní tuhost
	kg	Mm	mm	°	Nm/°	Nm/°kg
Standardní rám	29,6	12,46	2,13	0,6	1983	67
Předběžný návrh	30,3	5,54	0,9	0,567	2134	70,43
Fáze 1	29,8	13,1	1,44	0,631	1884	63,24

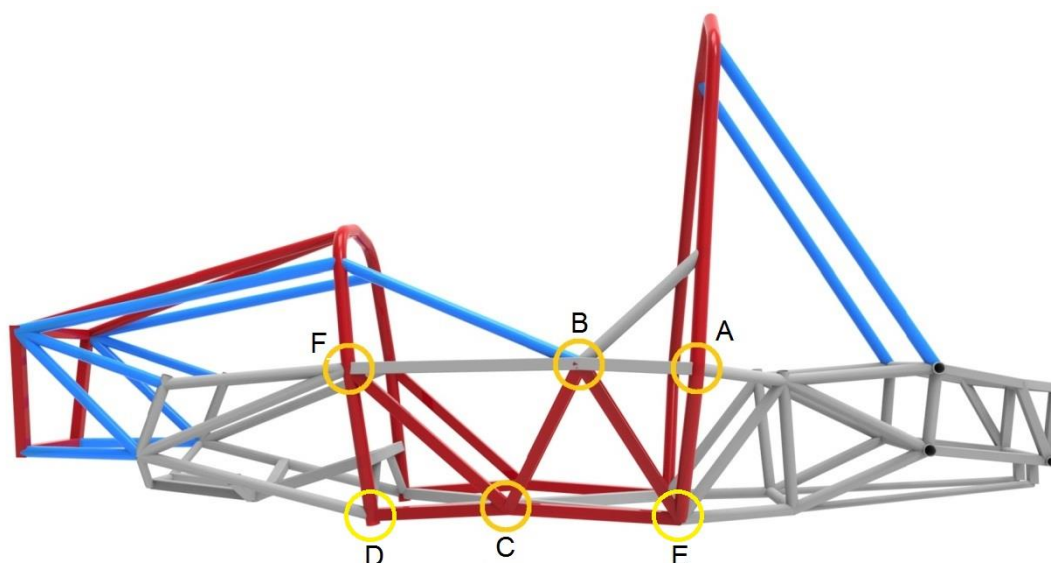
4.2.2 ZHODNOCENÍ ÚPRAV ALTERNATIVNÍ KONSTRUKCE MONOPOSTU FORMULE STUDENT

Výsledky všech šesti analýz splňují pravidla FSAE a alternativní rám v této podobě by mohl být použit. Nicméně z Tab.13 je patrná hraniční bezpečnost při zatěžování přes přední nárazovou přepážku, tedy zátěžné stavy 4 a 6.

Změny obou oblouků a zúžení přední části rámu mělo za následek snížení hmotnosti o 500g. Současně se snížila torzní tuhost příhradové konstrukce na stále přijatelnou mez 1884 Nm/°. Jelikož šířka rámu se významně podílí i na výsledcích analýz jednotlivých zátěžných stavů dle pravidel FSAE pro alternativní konstrukce, musela být upravena také střední část šasi. Ta je navržena tak, že nabízí velké množství kombinací souřadnic jednotlivých uzlů, kterými lze střední část modifikovat.

4.3 FÁZE 2: MODIFIKACE STŘEDNÍ ČÁSTI RÁMU ZA ÚČELEM ZVÝŠENÍ BEZPEČNOSTI

Prostřední část šasi nyní obsahuje několik významných uzlů. Změnou jejich polohy ji lze úspěšně navrhnout tak, aby se zvýšila bezpečnost při zatěžování přes přední nárazovou přepážku. Lze také docílit zvýšení měrné torzní tuhosti rámu.



Obr. 56 Uzly, jejichž souřadnice byly měněny

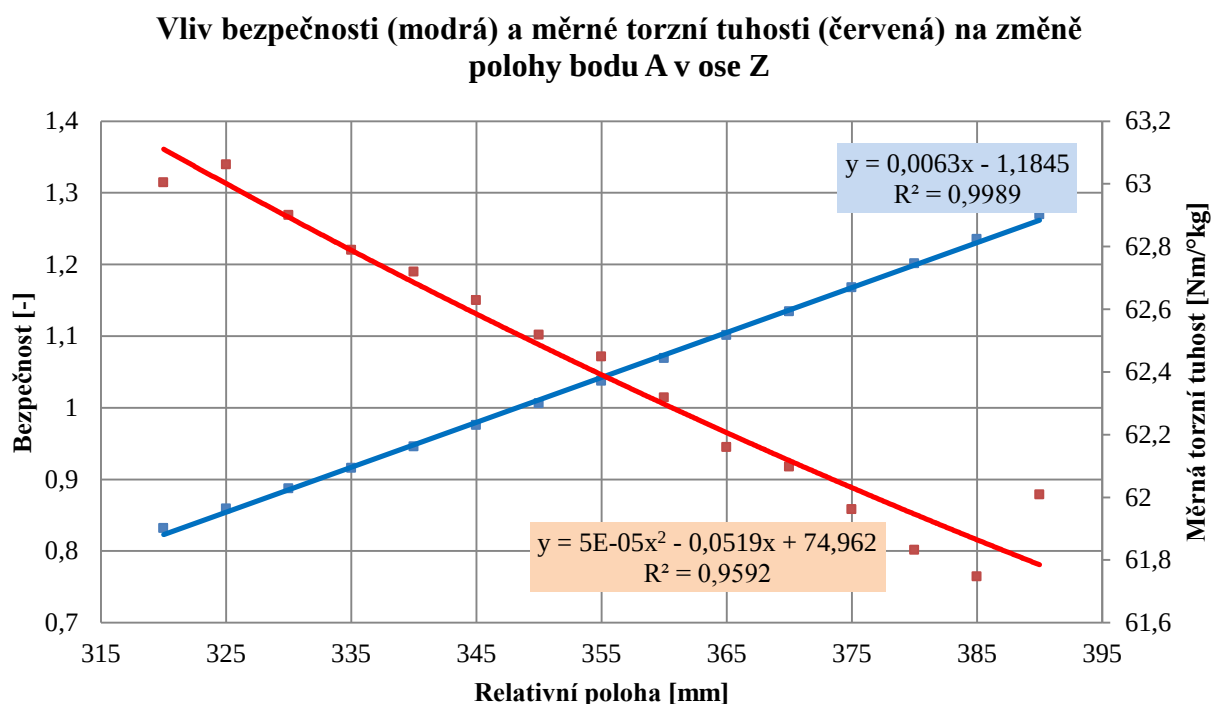


Na Obr.56 jsou uzly označené body A-F. Modifikace byla provedena postupnou změnou polohy jednotlivých bodů vždy po 5 mm ve vhodném směru a orientaci od polohy navržené v předchozí kapitole. Při každé změně byla vypočtena bezpečnost při zatěžování přes přední nárazovou přepážku, současně byla počítána měrná torzní tuhost. Tímto způsobem lze správně zvolit nejvhodnější polohu uzlu v závislosti na bezpečnosti, torzní tuhosti a hmotnosti.

Během návrhu byla bezpečnost i torzní tuhost 125 krát spočtena a vyhodnocena. Byly využity výpočtové modely vytvořené v programu Creo Simulate použité v předchozích návrzích. Při úpravách se projevila již zmiňovaná výhoda propojení CAD programu s řešičem ANSYS. Tímto způsobem odpadla nezbytná konverze formátů a byla zvýšena efektivita řešení.

4.3.1 MODIFIKACE UZLU A

Souřadnice bodu A ovlivňují šířku oblouku. Relativní poloha byla měřena od podélné roviny vozidla. V původním návrhu je tato vzdálenost 350 mm. Modifikace byla prováděna kolem této hodnoty ve směru osy Z.



Graf 1 Modifikace bodu A

Z vypočtených hodnot je patrné, že se vzrůstající šířkou oblouku roste bezpečnost při zatěžování přes přední nárazovou přepážku. Roste ovšem také hmotnost a klesá tedy měrná torzní tuhost rámu. Z těchto důvodů byla zvolena hodnota 355 mm. Dojde k zvýšení bezpečnosti, ovšem také k mírnému navýšení hmotnosti a snížení měrné torzní tuhosti.



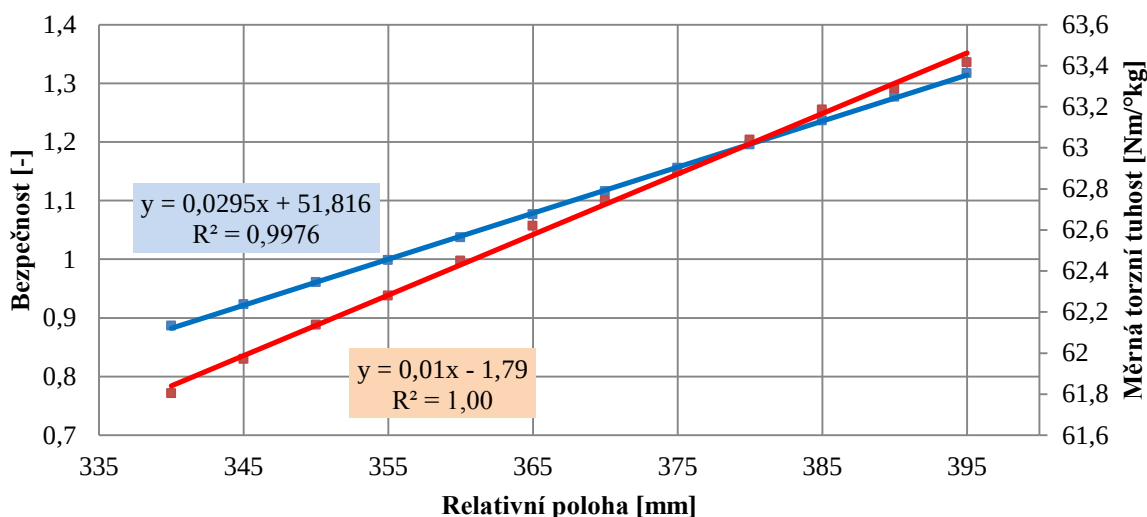
Tab. 15 Modifikace relativní polohy uzlu A

	posunutí	deformace	bezpečnost	hmotnost	deformace Z	deformace Y	torzní tuhost	měrná tuhost
	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[mm]	[mm]	[Nm/°]	[Nm/°kg]
Před	350	24,85	1,006	30	7,08	13,1	1875,5	62,52
Po	355	24,1	1,037	30,2	7,09	13,11	1885,3	62,43

4.3.2 MODIFIKACE UZLU B

Bod B je nevýznamnějším prvkem střední části příhradové konstrukce. Jeho polohu lze měnit ve všech osách kartézského souřadného systému. V první řadě byla upravována relativní poloha v ose Y. Ta je měřena od roviny vozovky.

Vliv bezpečnosti a měrné torzní tuhosti na změně polohy bodu B v ose Y



Graf 2 Modifikace bodu B v ose Y

Modifikací relativní polohy uzlu B v ose Y je výhodné jak z hlediska bezpečnosti, tak měrné tuhosti. Z grafu 2 je zřejmé, že vzrůstající výška bodu B se kladně podílí na zlepšení parametrů šasi. Jelikož dle pravidel FSAE je výška střední části limitována šablonou, byla relativní poloha bodu B navýšena pouze o 15 mm v kladném směru osy Y.

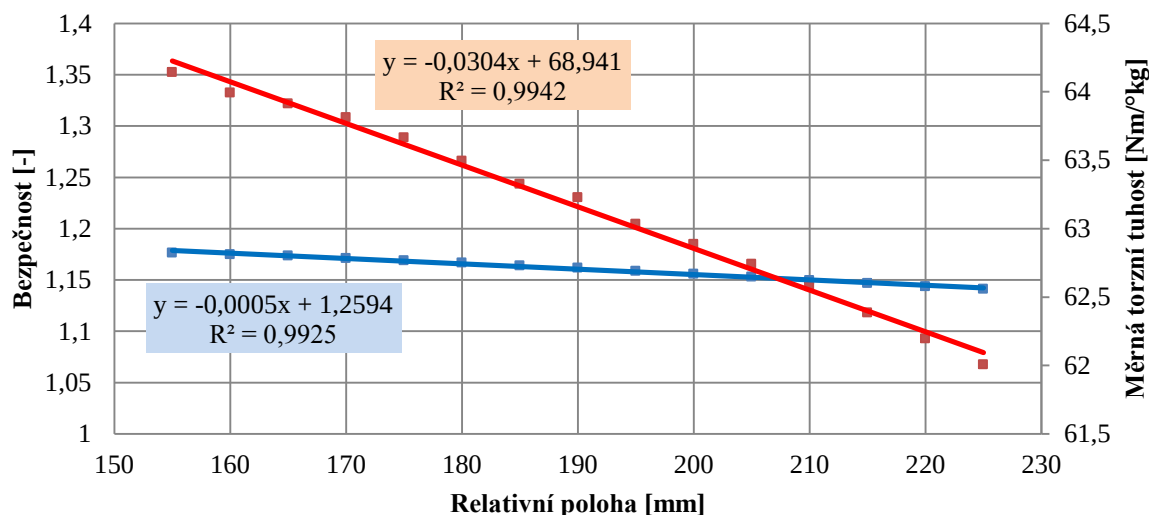
Tab. 16 modifikace relativní polohy uzlu B

	posunutí	deformace	bezpečnost	hmotnost	deformace Z	deformace Y	torzní tuhost	měrná tuhost
	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[mm]	[mm]	[Nm/°]	[Nm/°kg]
Před	360	24,1	1,037	30,2	7,09	13,11	1885,3	62,43,
Po	375	21,63	1,156	30,03	7,09	13,01	1888,5	62,89



I přes toto omezení došlo k navýšení bezpečnosti, snížení hmotnosti a zvýšení torzní tuhosti i měrné torzní tuhosti šasi. Pro další úpravy bodu B využijeme změnu polohy uzlu v podélném směru vozidla.

Vliv bezpečnosti a měrné torzní tuhosti na změně polohy bodu B v ose X



Graf 3 Modifikace bodu B v ose X

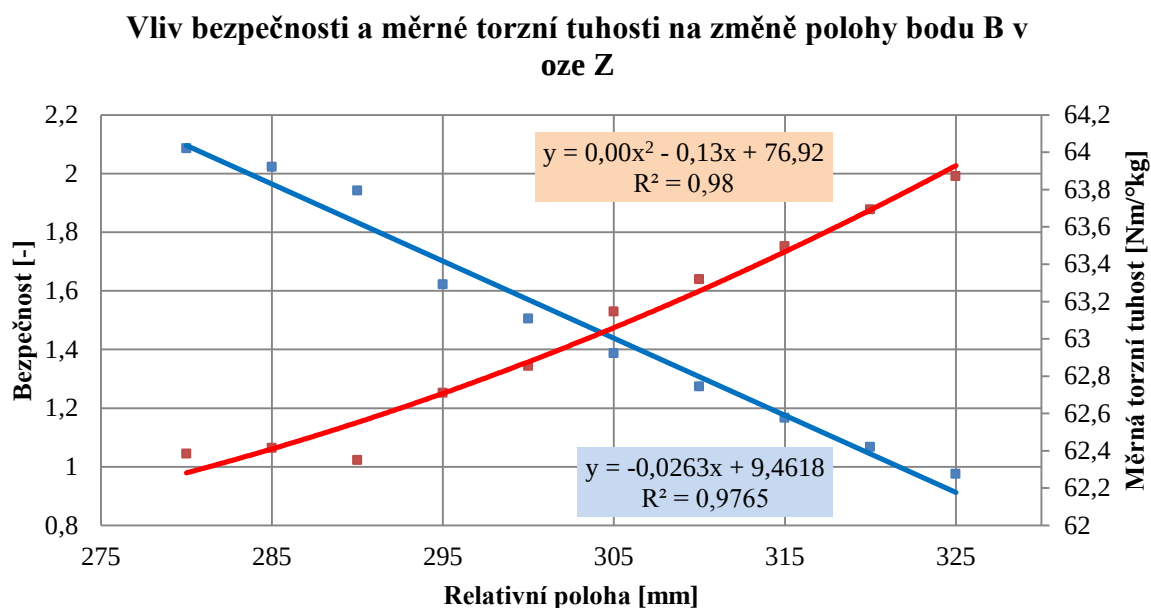
Relativní poloha v tomto případě je měřena od roviny hlavního oblouku směrem k přední nárazové přepážce. I zde se projevuje příznivý vliv modifikace. Ukazuje se, že s posouváním uzlu blíže k hlavnímu oblouku dochází sice k nepatrnému zvyšování bezpečnosti, ale k poměrně velkému zvyšování měrné torzní tuhosti rámu.

Tab. 17 Modifikace relativní polohy uzlu B

	posunutí	deformace	bezpečnost	hmotnost	deformace Z	deformace Y	torzní tuhost	měrná tuhost
	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[mm]	[mm]	[Nm/°]	[Nm/°kg]
Před	200	21,63	1,156	30,03	7,09	13,01	1888,5	62,89,
Po	180	21,43	1,167	30,02	7,07	12,89	1906,1	63,49

I v tomto případě je limitním prvkem kokpitová šablona. Uzel B byl posunut ve směru osy X k hlavnímu oblouku o 20 mm. Bezpečnost i měrná torzní tuhost se opět navýšila.

Poslední možností modifikace bodu B je změna šířky rámu v této oblasti. Tedy byla měněna relativní poloha v ose Z. Ta je měřena od podélné roviny vozidla.



Graf 4 Modifikace uzlu B v ose Z

Z grafu 4 je patrný vliv šířky rámu v oblasti uzlu B. Čím je šasi v tomto místě užší, tím značně narůstá bezpečnost při zatěžování konstrukce zátěžným stavem č.6. Klesá ovšem měrná torzní tuhost.

Tab. 18 Modifikace relativní polohy bodu B

	posunutí	deformace	bezpečnost	hmotnost	deformace Z	deformace Y	torzní tuhost	měrná tuhost
	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[mm]	[mm]	[Nm/°]	[Nm/°kg]
Před	315	21,43	1,167	30,02	7,07	12,89	1906,1	63,49,
Po	300	16,62	1,50	30	7,07	13,03	1885,6	62,85

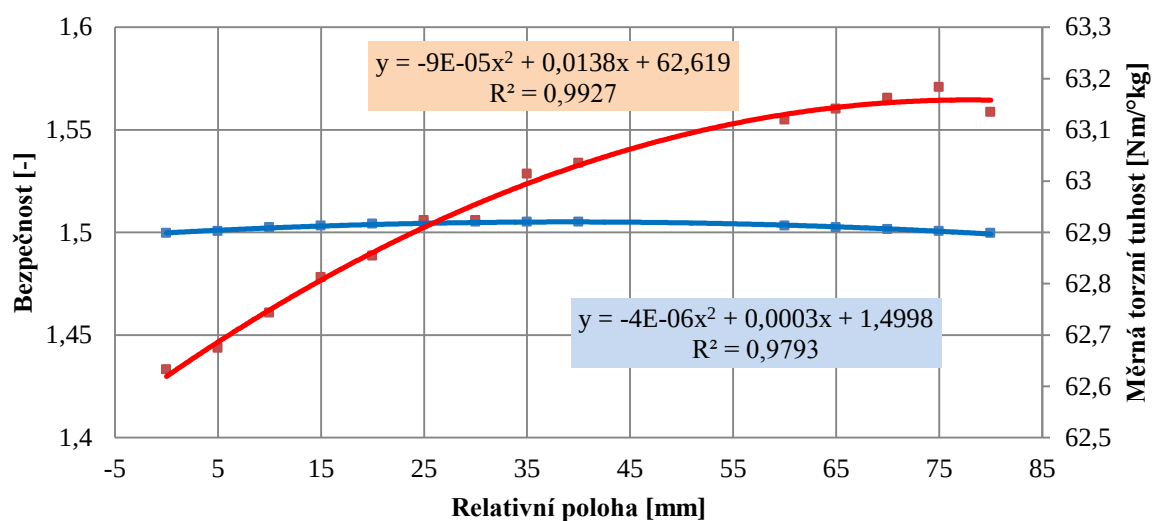
Uzel B byl přiblížen k podélné rovině monopostu o 15 mm. Díky tomu se navýšila bezpečnost na 1,5. Torzní tuhost ovšem klesla na stále přijatelnou hodnotu 1885,6 Nm/°.

4.3.3 MODIFIKACE UZLU C

Stejně jako uzel B je bod C navrhnout tak, aby jej bylo možné posouvat ve všech osách. Ukazuje se, že poloha tohoto uzlu neovlivňuje ve větší míře bezpečnost, ale má velký vliv na hmotnost rámu a torzní tuhost konstrukce. V první řadě byl otestován vliv na vlastnosti šasi změnou výšky uzlu.



Vliv bezpečnosti a měrné torzní tuhosti na změně polohy bodu C v ose Y



Graf 5 Modifikace bodu C

Postupnou změnou výšky nepatrně klesá bezpečnost a roste měrná torzní tuhost příhradové konstrukce. Svého maxima nabývá ve výšce 65 mm nad rovinou vozovky. V tomto případě je přírůstek měrné torzní tuhosti významný i přes pokles bezpečnosti.

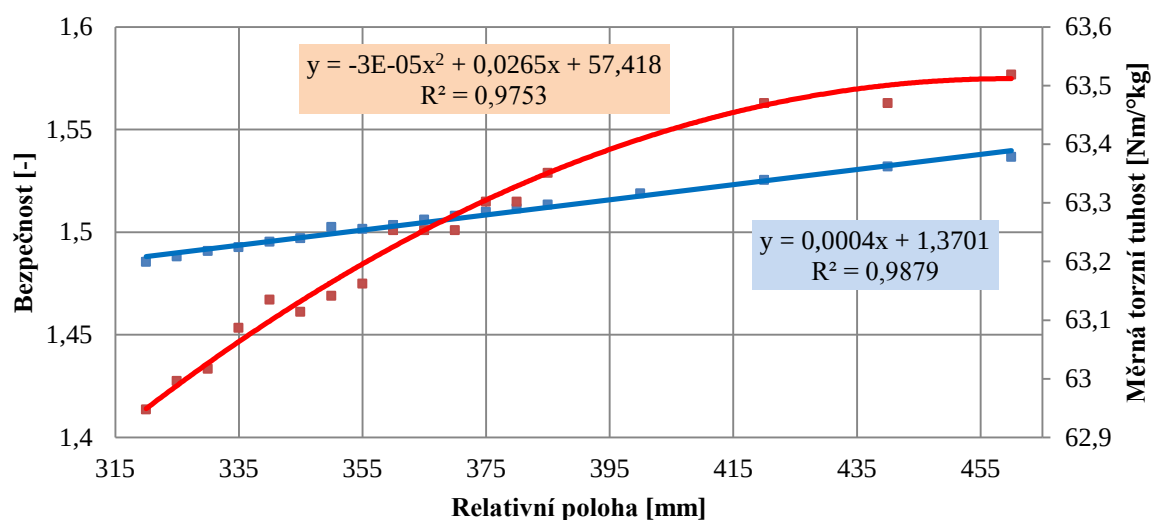
Tab. 19 Modifikace relativní polohy bodu C v ose Y

	posunutí	deformace	bezpečnost	hmotnost	deformace Z	deformace Y	torzní tuhost	měrná tuhost
	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[mm]	[mm]	[Nm/°]	[Nm/°kg]
Před	20	16,62	1,502	30	7,07	13,03	1885,6	62,85
Po	65	16,64	1,500	29,9	7,06	13,01	1888,5	63,14

Následně byl zkoumán vliv polohy uzlu C v podélné ose X. Zde se opět projevuje příznivý důsledek modifikace, když se vzrůstající bezpečností narůstá i měrná torzní tuhost. Bod C byl postupně posouván ve směru osy X až do vzdálenosti 445 mm od hlavního oblouku, kde se nachází maximum měrné torzní tuhosti. I přes to, že bezpečnost dále narůstá, klesá torzní tuhost šasi. Z tohoto důvodu nemá smysl uzel posouvat dále.



Vliv bezpečnosti a měrné torzní tuhosti na změně polohy bodu C v ose X



Graf 6 Modifikace uzlu C v ose X

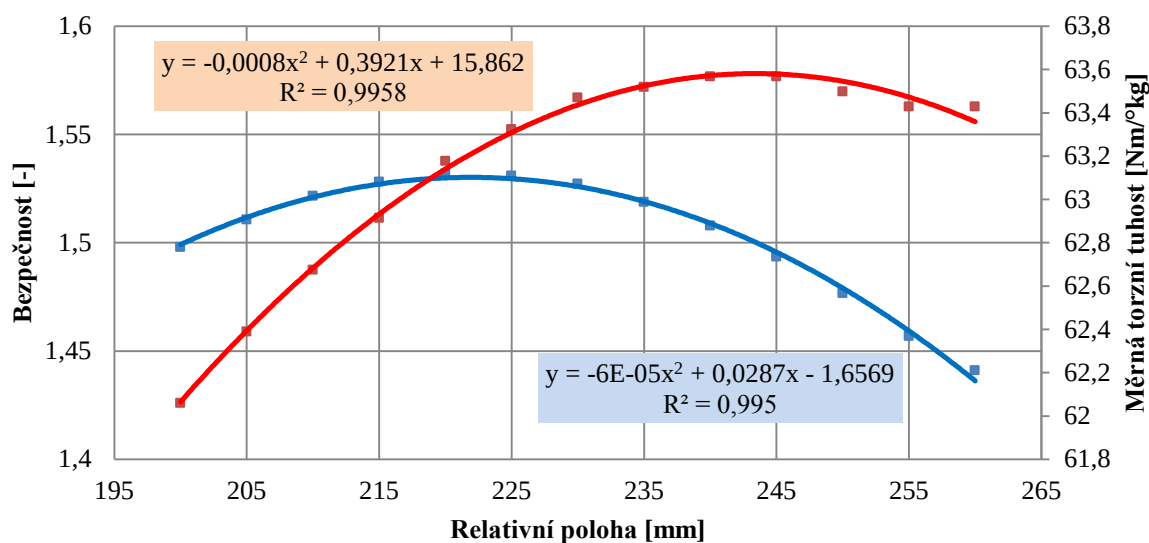
Tab. 20 Modifikace relativní polohy bodu C v ose X

	posunutí	deformace	bezpečnost	hmotnost	deformace Z	deformace Y	torzní tuhost	měrná tuhost
	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[mm]	[mm]	[Nm/°]	[Nm/°kg]
Před	350	16,64	1,50	29,9	7,06	13,01	1888,5	63,14
Po	445	16,37	1,53	29,9	7,06	12,96	1895,8	63,47

Úpravou polohy uzlu C v ose X se navýšila bezpečnost o 0,03 a měrná torzní tuhost se navýšila na 63,47 Nm/°kg. Poslední možností modifikace bodu C je testování vlastností rámu změnou relativní polohy v ose Z.



Vliv bezpečnosti a měrné torzní tuhosti na změně polohy bodu C v ose Z



Graf 7 Modifikace uzlu C v ose Z

V tomto případě je rozšiřování rámu vzhledem k bezpečnosti nežádoucí. Roste ovšem měrná torzní tuhost rámu. Jelikož byla snaha navýšit vlivem modifikace bezpečnost a jelikož je torzní tuhost rámu vysoká, byl v tomto kroku volen ústupek bezpečnosti za cenu snížení měrné torzní tuhosti.

Tab. 21 Modifikace relativní polohy uzlu C v ose Z

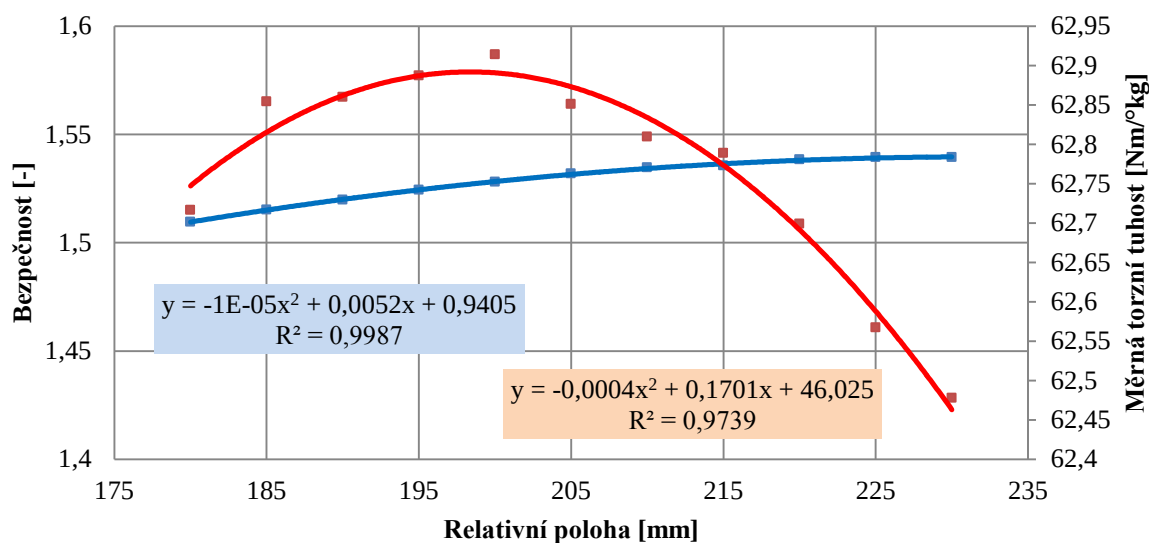
	posunutí	deformace	bezpečnost	hmotnost	deformace Z	deformace Y	torzní tuhost	měrná tuhost
	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[mm]	[mm]	[Nm/°]	[Nm/°kg]
Před	230	16,37	1,53	29,9	7,06	12,96	1895,8	63,47
Po	220	16,36	1,54	29,88	7,06	13,07	1879,9	62,9

4.3.4 MODIFIKACE UZLŮ D, E, F

Poslední možností, jak navýšit bezpečnost případně zvýšit měrnou torzní tuhost příhradové konstrukce, je modifikovat šířku spodních uzlů obou oblouků. V první řadě byla optimalizována šířka předního oblouku. Z grafu 8 lze odečíst maximum měrné torzní tuhosti při relativní poloze uzlu D od podélné roviny vozidla 200 mm. Ukazuje se, že varianta 1 alternativního rámu navržená v kapitole 4.2 je v tomto směru optimální a souřadnice bodu D nebyla změněna. Vlastnosti šasi tedy zůstaly zachovány jako po optimalizaci bodu C.



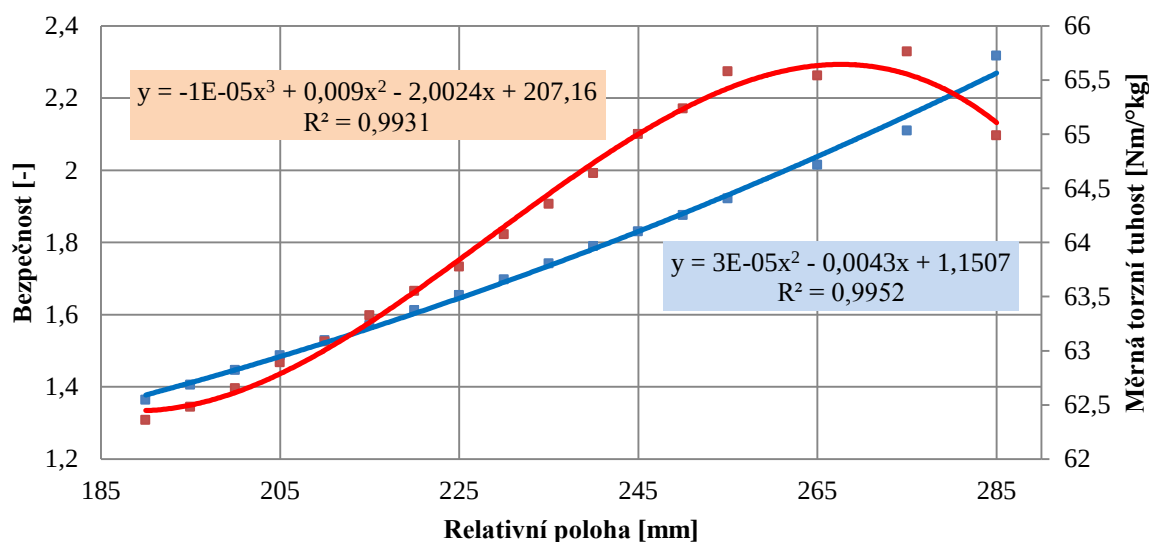
Vliv bezpečnosti a měrné torzní tuhosti na změně polohy bodu D v ose Z



Graf 8 Modifikace uzlu D

Patrně nejpriznivější vliv na vlastnosti alternativního rámu má šířka spodních uzlů hlavního oblouku. Zkoumáním změny vzdálenosti uzlu E od podélné roviny vozidla bylo zjištěno, že bezpečnost při zatěžování přes přední nárazovou přepážku rychle narůstá, stejně jako měrná torzní tuhost šasi.

Vliv bezpečnosti a měrné torzní tuhosti na změně polohy bodu E v ose Z



Graf 9 Modifikace relativní polohy uzlu E

Maximum měrné torzní tuhosti nastane, pokud je relativní poloha uzlu E 270 mm. Bezpečnost se přitom navýší na 2,11.



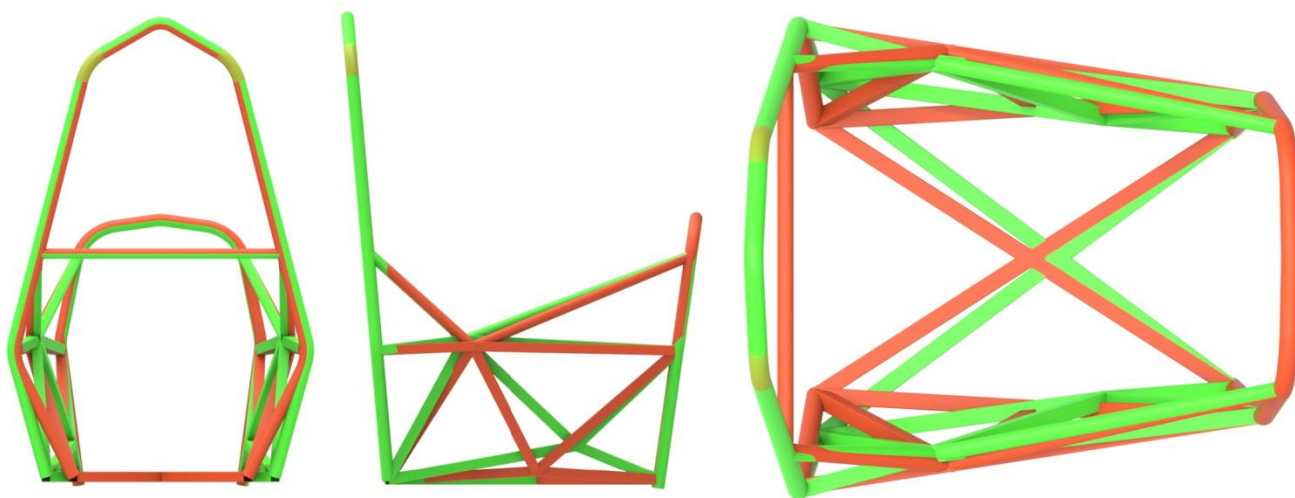
Tab. 22 Modifikace relativní polohy uzlu E

	posunutí	deformace	bezpečnost	hmotnost	deformace Z	deformace Y	torzní tuhost	měrná tuhost
	[mm]	[mm]	[-]	[kg]	[mm]	[mm]	[Nm/°]	[Nm/°kg]
Před	210	16,36	1,54	29,88	7,06	13,07	1879,9	62,9
Po	275	11,85	2,11	29,9	6,65	12,5	1966,3	65,8

Na Obr.56 je znázorněn také bod F. Jeho změna by jistě také ovlivňovala vlastnosti příhradové konstrukce. Nicméně přesně v tomto uzlu se nachází zadní bod horního ramena. Z tohoto důvodu nebyl tento uzel optimalizován, ale rám je zde přizpůsobený zavěšení.

4.3.5 VÝSLEDEK A ZHODNOCENÍ MODIFIKACE

Modifikace byla prováděna zejména za účelem zvýšení bezpečnosti při zatěžování dle pravidel FSAE pro alternativní rámy zátěžnými stavy č.4 a č.6. Změnou souřadnic klíčových uzlů střední části docházelo také k ovlivňování dalších vlastností příhradové konstrukce.



Obr. 57 Porovnání středních částí varianty 1 (červená) a optimalizované varianty 2 (zelená)

Po ukončení modifikace byly testovány všechny zátěžné stavy. Ve všech případech bylo docíleno stanovení bezpečnosti na přijatelnou hodnotu. Pokles byl zaznamenán v případě zátěžných stavů č.2 s č.3. Nicméně bezpečnost zde dosahuje minimální hodnoty 7,18, proto nemá zvláštní význam tímto se zabývat. Na druhé straně navýšení bezpečnosti při zatížení přes přední nárazovou přepážku bylo po optimalizaci více než o 100 %.



Tab. 23 Tabulka výsledků pro zátěžné stavy

	1.Hlavní oblouk	2.Přední oblouk	3.Boční struktura	4.Přední přepážka	5.Body pásů	6.Přední přepážka 2
požadovaná deformace [mm]	25	25	25	25	25	25
vypočtená deformace [mm]	18,04	3,11	3,48	9,91	1,26	11,85
Bezpečnost k [-]	1,38	8,04	7,18	2,52	19,84	2,11

Tab. 24 Porovnání torzních tuhostí jednotlivých variant

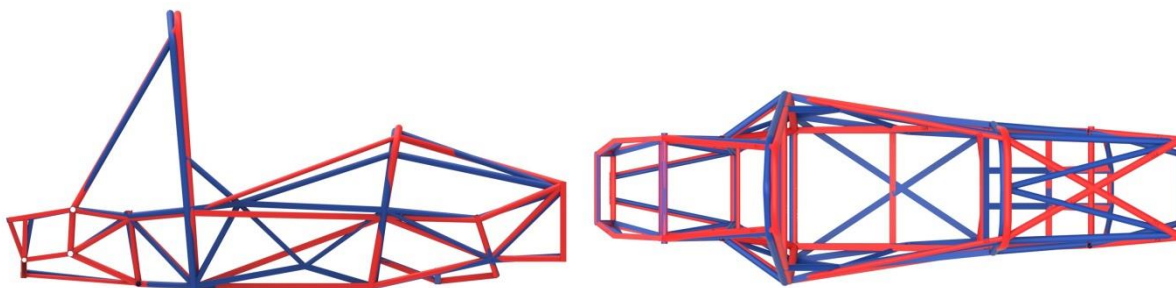
	Hmotnost	Deformace v ose Y	Deformace v ose Z	Natočení rámu	Torzní tuhost	Měrná torzní tuhost
	kg	mm	mm	°	Nm/°	Nm/°kg
Standardní rám	29,6	12,46	2,13	0,6	1983	67
Předběžný návrh	30,3	5,54	0,9	0,267	2134	70,43
Fáze 1	29,8	13,1	7,44	0,631	1884	63,24
Fáze 2	29,9	12,5	6,65	0,605	1966	65,76

Alternativní rámová konstrukce přibyla na váze o 100 g, torzní tuhost se zvýšila na 1966 Nm/°. Se střední částí šasi již za daných podmínek nelze více pracovat. Následně bude alternativní rám v zadní oblasti přizpůsoben držákům zavěšení a uložení motoru.

4.4 FÁZE 3: ÚPRAVA RÁMU S OHLEDEM NA BODY ZAVĚŠENÍ A ULOŽENÍ MOTORU

Jelikož navržený rám se během vývoje několikrát měnil a většina uzlových bodů nezůstala na původním místě, je nezbytné zkontrolovat a případně přizpůsobit konstrukci uložení všech důležitých komponent vozidla. Týká se to zejména motoru, bodů a dílů zavěšení a aerodynamických prvků.

Nejjednodušším a nejrychlejším způsobem, jak zjistit kompatibilitu nového šasi s ostatním částmi sestavy je vložení alternativní konstrukce do standardního návrhu, který je pro všechny části vozidla navržený. Tímto porovnáním sledujeme odchylky klíčových bodů v návrzích.



Obr. 58 Porovnání alternativní a standardní konstrukce

Proložením návrhů bylo zjištěno, že se obrysově alternativní rám standardnímu podobá, zejména je důležité, že odchylka uzlů v místech bodů zavěšení je velice malá. Následně byly jednotlivé komponenty vkládány do šasi.



Obr. 59 Motor vložený do rámu

Motor je v rámu uložen ve čtyřech bodech na dvou trubkových členech šasi. Poloha těchto trubek je důležitá z hlediska návrhu držáků motoru. Současně musí být dodržen jistý prostor zadní části návrhu z důvodu montáže případně demontáže motoru. Příslušenství motoru má většinou pevně stanovenou pozici. Zejména vstřikovač a sací systém motoru. Je nezbytné kontrolovat kolizi vzpěr hlavního oblouku se zásobníkem vzduchu.



Obr. 60 Ergonomické prvky vložené do rámu



Aerodynamické prvky mají na návrh rámu také velký vliv. Zejména přední část konstrukce, která musela ustoupit přednímu přitlačnému křídlu. Tato velká změna koncepce vnesla do návrhu mnoho komplikací, které se obtížně řešily. Pro použití aerodynamických prvků vozu Dragon 4 i na rám alternativní konstrukce je nutné při návrhu brát na tyto komponenty zřetel a kontrolovat případné kolize zejména podlahy s difuzory.



Obr. 61 Aerodynamické prvky aplikované na alternativní rám

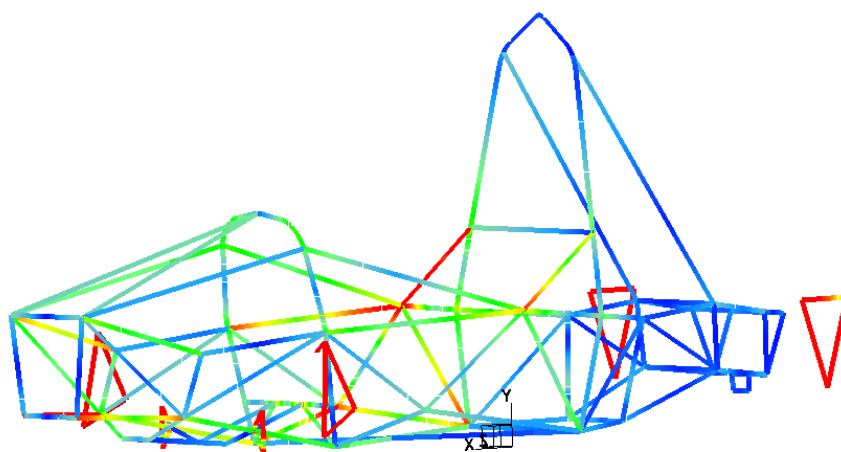
Posledním, patrně nejdůležitějším a nejvíce limitujícím prvkem je zavěšení. Hlavním omezením je nutnost dodržení klopných os ramen. Změnou klopné osy by došlo i ke změnám jízdních vlastností vozidla. Nejvíce by se projevil rozdílné tzv. antisquad a antidive efekty. Je nutné kontrolovat případné kolize ramen s rámem při maximálním vyvěšení kol nebo stlačení pružin tlumičů.



Obr. 62 Aplikované zavěšení na alternativní konstrukci

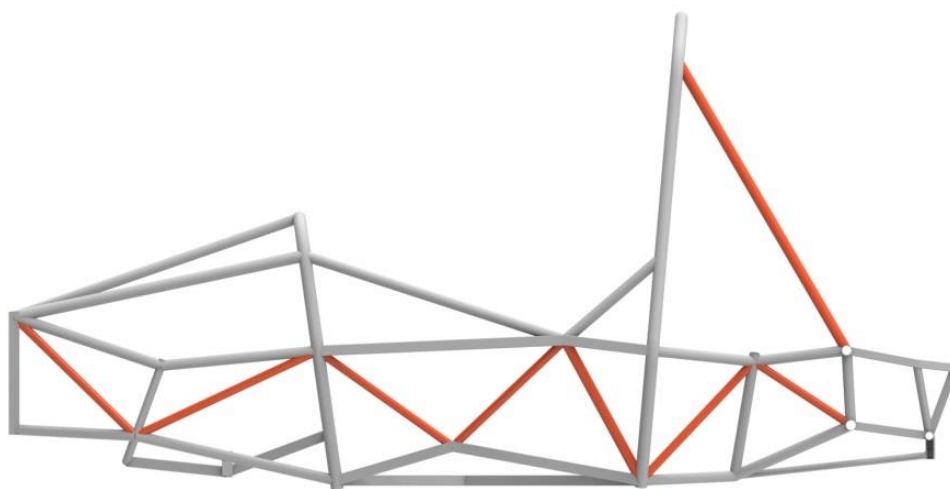
Tímto postupným vkládáním a kontrolováním jednotlivých komponent do rámu byla zajištěna kompatibilita alternativního rámu s rámem formule Dragon 4. Při tomto procesu byly uzly posouvány v mezích 1-2 mm. Tyto změny se neprojevily na vlastnostech návrhu.

Posledním krokem k dalšímu snížení hmotnosti byla vhodná změna některých polotovarů příhradové konstrukce. K posouzení redukce hmotnosti na polotovarech bylo vykresleno napětí při zatěžování s nejmenší výslednou bezpečností.



Obr. 63 Zobrazené napětí

Nejmenší napětí se objevuje na diagonálních profilech rámu. Ty byly nahrazeny polotovarem TR 20 x 1,25 a TR 25 x 1,25 i ve střední části, kde se doposud nacházely pouze čtvercové profily. Později se ukázalo, že tato změna má pozitivní vliv na torzní tuhost rámu. Změnu dostaly také vzpěry hlavního oblouku, kde byl původní TR 28x1,25 nahrazen TR 25x1,25



Obr. 64 Změna polotovarů

4.4.1 ANALÝZY DLE PRAVIDEL FSAE A KONTROLA BEZPEČNOSTÍ

Výpočtový model byl vytvořený stejným způsobem jako v předchozích případech. Stejně tak byly při výpočtech definované stejné okrajové podmínky. Změnou polotovarů bylo zapříčiněno očekávané snížení bezpečnosti. Ukazuje se, že ve střední části je vhodná kombinace profilů jak kruhových, které jsou vhodnější při torzním namáhání, tak čtvercových, jejichž výhody se projevují při ohybovém zatěžování.



Tab. 25 Výsledky bezpečností pro jednotlivé zátěžné stavy

	1 Hlavní oblouk	2 Přední oblouk	3 Boční struktura	4 Přední přepážka	5 Body pásů	6 Přední přepážka 2
požadovaná deformace [mm]	25	25	25	25	25	25
vypočtená deformace [mm]	18,2	3,16	3,41	9,98	1,41	12,74
Bezpečnost k [-]	1,37	7,91	7,33	2,51	17,73	1,96

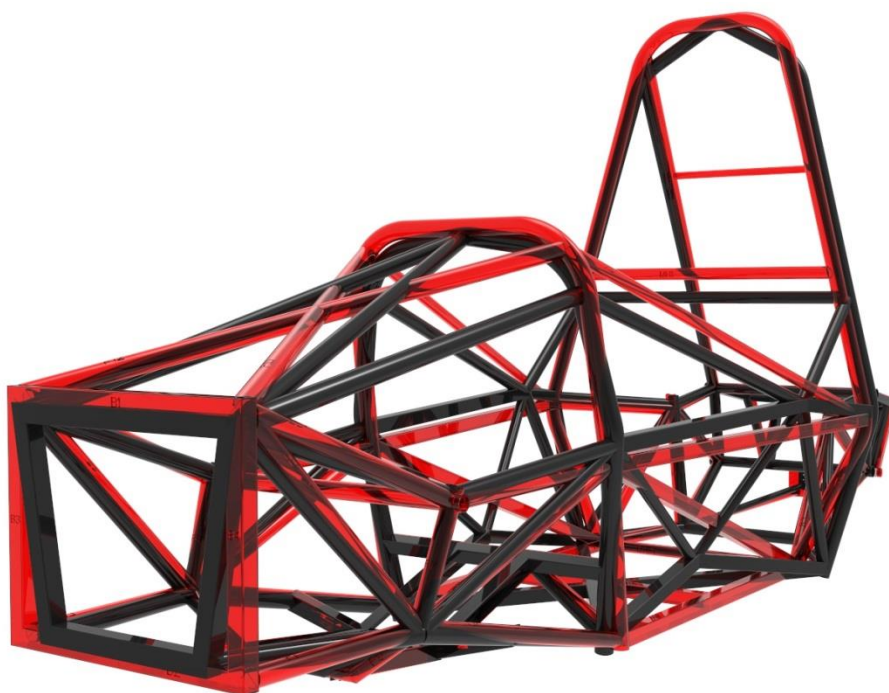
4.4.2 VÝSLEDEK A ZHODNOCENÍ KONSTRUKČNÍCH ÚPRAV

Posledními úpravami alternativní konstrukce bylo docíleno lepších vlastností než u všech předchozích variant návrhu. Hmotnost příhradové konstrukce je 28,2 kg, což je o 1,4 kg méně než v případě standardního rámu. Torzní tuhost se navýšila o 5 %, stoupla také měrná torzní tuhost.



5 POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ STANDARDNÍ A ALTERNATIVNÍ KONSTRUKCE FORMULOVÉHO RÁMU

Navržený standardní rám zcela splňuje požadavky pravidel a byl použit ve vozidle Dragon 4. Nicméně konstrukce nesplňuje požadavky pravidel na alternativní rámy. Vlivem zvýšené přední části dochází při definovaném zatížení k překročení povolené deformace. V některých případech i několikanásobně.



Obr. 65 Porovnání standardního (červená) a alternativního (černá) rámu

I přes tyto nedostatky má šasi standardního návrhu velice dobré vlastnosti. Nízká hmotnost, pouze 29,6 kg a vysoká torzní tuhost 1983 Nm/° jsou hlavními rysy nové konstrukce Dragona 4. Postupnými úpravami standardního rámu bylo docíleno přeměny návrhu v rám limitovaný alternativními pravidly. V konečné fázi konstrukčního návrhu vykazoval lepší vlastnosti než standardní šasi. Snížila se hmotnost a současně se zvýšila torzní tuhost. Tyto dvě skutečnosti měly za následek zvýšení měrné torzní tuhosti.

Tab. 26 Porovnání vlastností jednotlivých variant rámu

	Hmotnost	Deformace v ose Y	Deformace v ose Z	Natočení rámu	Torzní tuhost	Měrná torzní tuhost
	kg	mm	mm	°	Nm/°	Nm/°kg
Standardní rám	29,6	12,46	2,13	0,6	1983	67
Předběžný návrh	30,3	5,54	0,9	0,267	2134	70,43
Fáze 1	29,8	13,1	7,44	0,631	1884	63,24
Fáze 2	29,9	12,5	6,65	0,605	1966	65,76
Fáze 3	28,2	11,95	6,38	0,578	2057	72,95



Při zatěžování jednotlivých modifikací dle specifikací definovaných v pravidlech pro alternativní rámy byla vždy kontrolována bezpečnost při daném zátěžném stavu. Standardní návrh ukázal svoje nedostatky při zatěžování přes přední nárazovou přepážku jak v případě čistě podélného zatěžování, tak při zahrnutí boční síly. Tedy zátěžné stavy 4 a 6.

Změnou konceptu standardního rámu a transformací na alternativní konstrukci bylo docíleno zvyšování bezpečností. Nicméně důležitým faktorem návrhu je nízká hmotnost. V poslední návrhové fázi byl proveden ústupek právě ve smyslu snížení bezpečnosti na stále přijatelnou mez ve prospěch snížení hmotnosti až o 1,2 kg.

Tab. 27 Porovnání jednotlivých variant z hlediska bezpečnosti

Bezpečnost	1 Hlavní oblouk	2 Přední oblouk	3 Boční struktura	4 Přední přepážka	5 Body pásů	6 Přední přepážka 2
Standard	1,08	2,97	8,33	0,16	2,6	0,14
Předběžný návrh	1,38	10,2	12,56	1,41	17,48	1,17
Fáze 1	1,2	10,46	9,46	1,03	13,16	1,01
Fáze 2	1,38	8,04	7,18	2,52	19,84	2,11
Fáze 3	1,37	7,91	7,33	2,51	17,73	1,96



6 TVORBA MKP MODELU V PROGRAMU PATRAN

Posledním krokem při návrhu alternativního rámu bylo finální variantu vytvořit v modelovém prostředí programu Patran. Hlavním důvodem volby této metody je požadavek ze strany pravidel FSAE pro alternativní konstrukce. Zde je zadáno, že ke schválení návrhu je nezbytné odeslat ke kontrole tzv. Nastran Analysis Deck, což je soubor generovaný Patranem pro sdružený řešič Nastran.

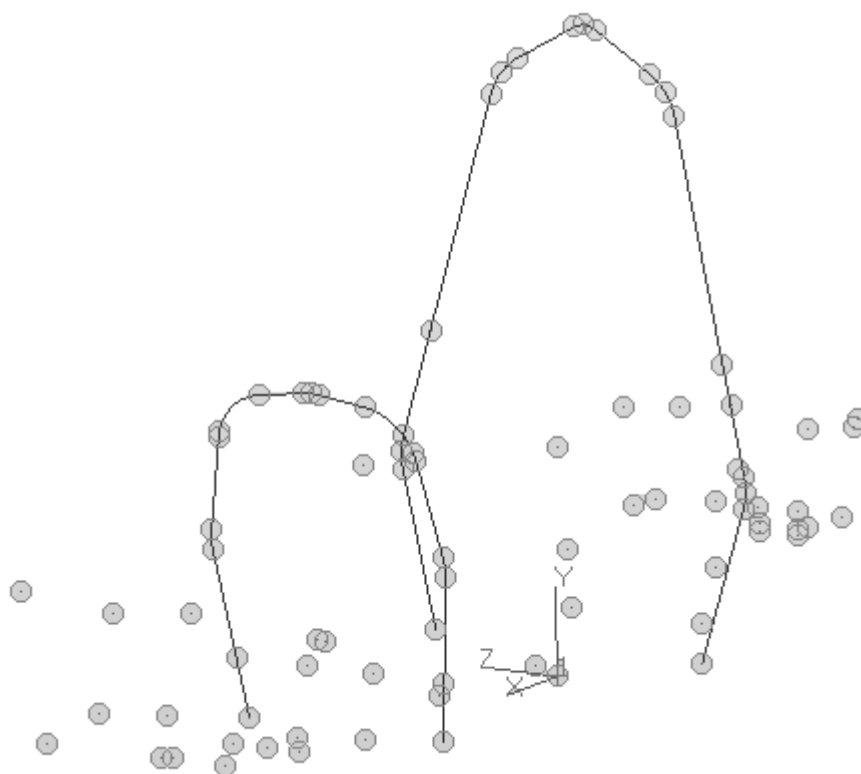
6.1 MKP MODEL V PROSTŘEDÍ PATRAN

Prvotním úkonem bylo ujasnění jednotek, v kterých bude model tvořen. Jelikož Patran odvozuje jednotky z Druhého Newtonova zákona, rozhodujícím faktorem je délková jednotka. V tomto případě byly uzlové body importovány v metrech. Všechny jednotky jsou tedy v základním tvaru. Ostatní případy popisuje tabulka 28.

Tab. 28 Systém jednotek v prostředí PATRAN [6]

System of Units	Input							Output		
	Length	Force	Elastic Modulus	Mass	Mass Density	WTMASS Parameter	1 G	Disp	Force	Stress
1	m	N	Pa	kg	kg/m ³	1.0	9.807 m/sec ²	m	N	Pa
2	mm	N	MPa	t or Mg	t/mm ³ or Mg/mm ³	1.0	9807 mm/sec ²	mm	N	MPa
3	ft	lb _f	psf	slug	slug/ft ³	1.0	32.17 ft/sec ²	ft	lb _f	psf
4	in	lb _f	psi	lb _f -sec ² /in	lb _f -sec ² /in ⁴	1.0	386.1 in/sec ²	in	lb _f	psi
5	in	lb _f	psi	lb _f	lb _f /in ³	2.59x10 ⁻³	386.1 in/sec ²	in	lb _f	psi

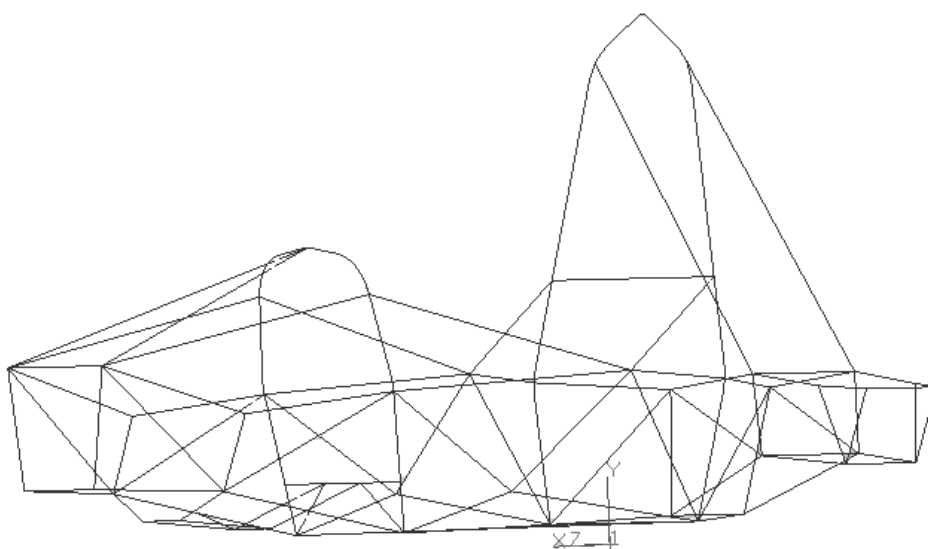
Jako základní stavební kámen modelu byla využita přednost skeleton partu vytvořeného v programu Creo 2.0 Parametric. Tento prvek obsahuje pouze body a některé křivky. Jeho největší výhodou je, že se s ním dá pracovat jako s kteroukoliv jinou součástí. Tento skeleton model byl exportován do formátu IGES a následně naimportován do Patranu. Právě v tomto okamžiku je důležité správně určit délkovou jednotku, ve které bude geometrie naimportována.



Obr. 66 Importovaná geometrie

V tomto kroku byly importovány také body některých skic. Některé byly zdvojené. Proto musela být geometrie zkontrolována a duplicitní body byly odstraněny, aby nevznikaly chyby při tvorbě drátěného modelu.

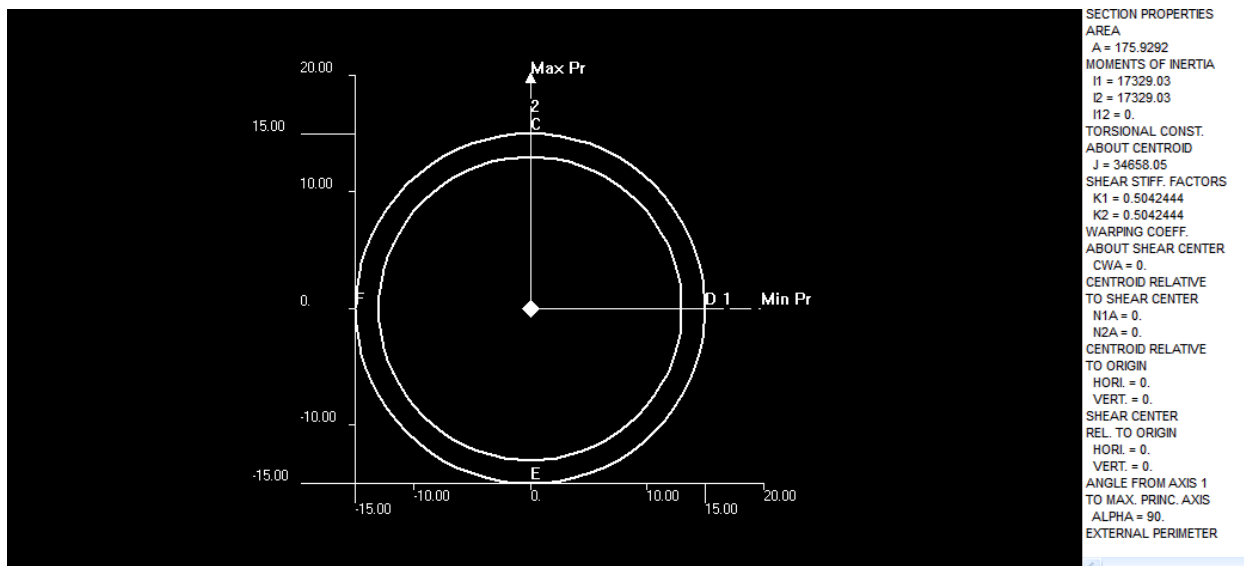
Stejně jako v programu Creo 2.0 Simulate byl model tvořen pomocí křivek, kterým byl přidělen průřez. Tím vznikl drátěný model tvořený z prutových náhrad.



Obr. 67 Body spojené křivkami, dokončená geometrie

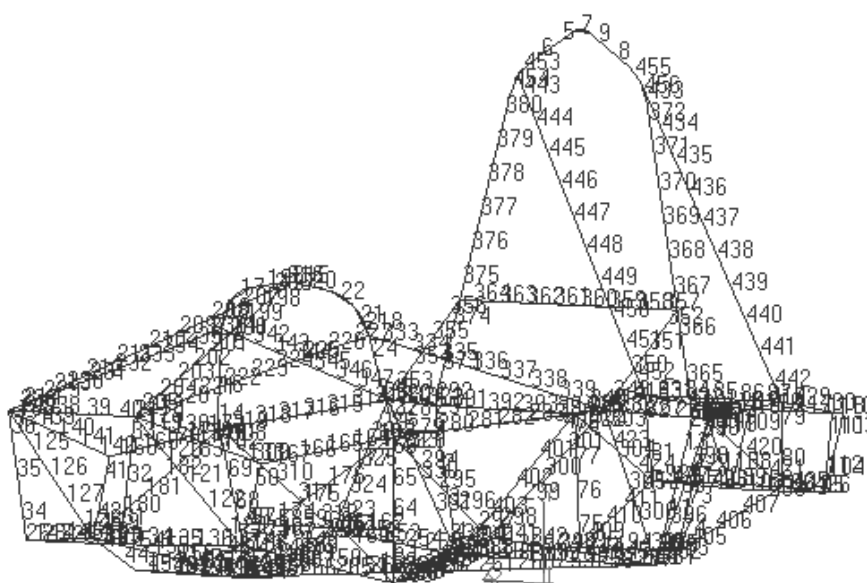


Následně byl definován materiál jako izotropní s Youngovým modulem 210 GPa, Poissonovým číslem 0.27 a hustotou 7829 kg/m^3 . V dalším kroku byly určeny průřezy prutových náhrad použitých v příhradové konstrukci rámu. Stejně jako v Creu 2.0 se průřezy definují základními rozměry a program Patran si všechny potřebné veličiny dopočítá z těchto vstupů. I zde je důležité pamatovat na používané jednotky a respektovat stejnou míru, jako má importovaná geometrie.



Obr. 68 Průřez použitý při tvorbě modelu

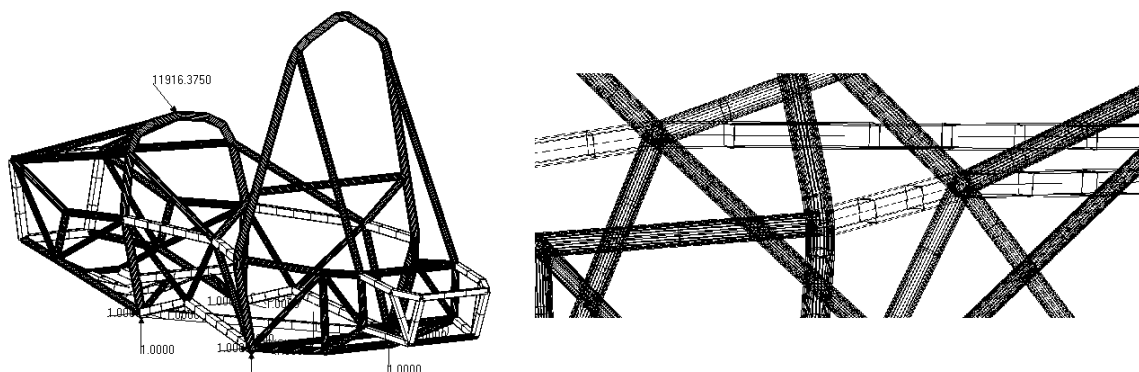
Po přidělení příslušného průřezu všem křivkám bylo dalším krokem vytvoření sítě. Velikost prvku byla zvolena 10 mm. Na vytvořenou síť bylo nezbytné aplikovat funkci “Ekvivalence”. Tímto způsobem dojde ke sjednocení dvou blízkých uzlových bodů, pokud jejich souřadné systémy leží ve zvolené velikosti ekvivalence.[7]



Obr. 69 Vytvořená síť s popisky uzlů



Model s vytvořenou sítí nyní vykazuje požadované vlastnosti příhradové konstrukce. Jednotlivé pruty mají materiálové i pevnostní charakteristiky. Pro kontrolu byla v prostředí Patran provedena hmotnostní analýza. Vypočtená hmotnost 28,87 kg se od hmotnosti určené v programu Creo 2.0 Parametric liší o 670 g. Tento rozdíl byl zapříčiněn tím, že v simulačním modelu nejsou zahrnuty ořezy trubek v uzlových bodech, jak je patrné z obrázku 69. Z tohoto důvodu je možné hmotnost prohlásit za správnou. V tomto směru je tedy model v pořádku. V poslední fázi tvorby byly aplikovány vazby a zatížení pro jednotlivé zátěžné stavy požadované pravidly FSAE



Obr. 70 Model připravený k výpočtu

6.2 VYTVOŘENÍ SOUBORU NASTRAN ANALYSIS DECK

Analysis deck je textový soubor generovaný programem PATRAN. Obsahuje všechny údaje potřebné k výpočtu jako geometrii, přidělený materiál, a okrajové podmínky. Tento soubor je vždy vytvářen do složky s modelem, má příponu BDF.

Na obr.71 je zobrazen výťah z textového výpočtového souboru. V první části je zapsán typ analýzy, dále je definován průřez prutu, který bude přidělován zvoleným křivkám. V tomto případě průřez PBARL, kde následující hodnoty definují jeho rozměry v metrech následovně: šířka 0.025 m, výška 0.025 m, tloušťka jedné stěny 0.00125 m a druhé stěny 0.00125 m.

Za částí definující vlastnosti prutů se nachází odstavec s přiděleným materiálem MAT1 s Youngovým modulem 2.1×10^{11} Pa, Poissonovým číslem 0.27 a hustotou 7829 kg/m^3 . Následují parametry prutů typu Rigid Beam: RBE2.

Geometrie modelu je popsána souřadnicemi jednotlivých uzlů výpočtové sítě. V souboru jsou uzly pojmenovány GRID, následuje číslo uzlu a jeho souřadnice v kartézském souřadném systému. V závěru dokumentu jsou popsány okrajové podmínky jako vazby a zatížení. V tomto případě byly použity vazby odebírající všechny posuvy. Taková vazba je potom zapsána jako SPC1, kde 123 značí odebrané stupně ve formátu $U_x, U_y, U_z, R_x, R_y, R_z$ a poslední číslo značí uzel, kterému je vazba přiřazena. Obdobně se zapisuje zadaná síla, která je definována velikostí a vektorem.



```

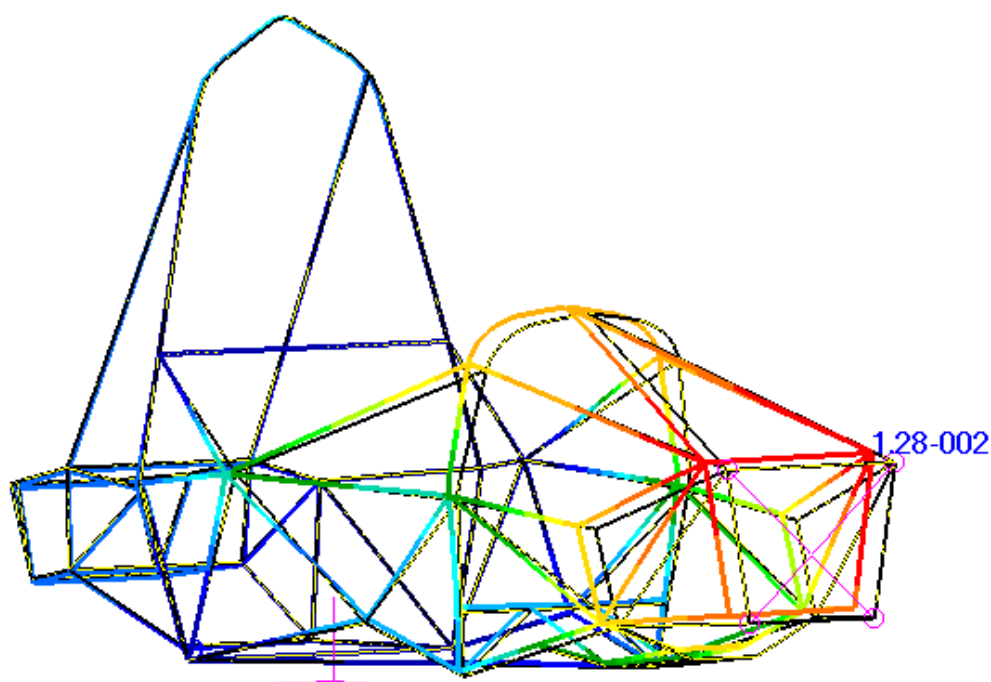
$ NASTRAN input file created by the Patran 2012 64-Bit input file
.
.
$ Linear Static Analysis, Database
.
.
$ Elements and Element Properties for region : 25x25x1_25_hor_vert
PBARL      1      1      BOX
           .025    .025    .00125 .00125
$ Pset: "25x25x1_25_hor_vert" will be imported as: "pbar1.1"
CBAR      440      1      2636    2639    1.      0.      0.
CBAR      441      1      2639    2640    1.      0.      0.
CBAR      442      1      2640    2641    1.      0.      0.
.
.
.
.
.
$ Referenced Material Records
$ Material Record : steel
MAT1      1      2.1+11      .27      7829.
|
$ Multipoint Constraints of the Entire Model
RBE2      334      2633    123456    2635    2637
RBE2      336      2633    123456    2634    2636
.
$ Nodes of the Entire Model
GRID      212      .766667 .661665 -.016034
GRID      561      .764811 .648463 -.109035
GRID      903      1.43063 .426892 .175946
GRID      941      1.43063 .426892 -.175946
.
.
.
.
.
$ Displacement Constraints of Load Set : MainHR
SPC1      1      123    2723
$ Displacement Constraints of Load Set : MainHL
SPC1      3      123    2694
$ Displacement Constraints of Load Set : MHL
SPC1      4      123    4820
$ Displacement Constraints of Load Set : MHR
SPC1      5      123    4446
$ Nodal Forces of Load Set : sila
FORCE     1      2633    1      149995. -.993365 0.      .115004

```

Obr. 71 Výtah ze souboru analysis deck

6.3 MKP VÝPOČET ALTERNATIVNÍ KONSTRUKCE RÁMU POMOCÍ ŘEŠIČE NASTRAN

Model vytvořený v programu PATRAN lze nejjednodušeji spočítat pomocí řešiče MSC NASTRAN. Řešičem se otevře v pracovním adresáři soubor s příponou BDF, tedy Nastran analysis deck. V této fázi je vhodné mít pracovní adresář otevřený a sledovat soubory, které při výpočtu vznikají. Nastran totiž nehlásí výsledek činnosti. Při zdárném ukončení výpočtu se v pracovním adresáři objeví soubor s příponou F06. Ten lze otevřít v poznámkovém bloku. Obsahuje výsledky jak deformační, tak napjatostní. Současně se souborem typu F06 musí vzniknout textový dokument s koncovkou XDB.



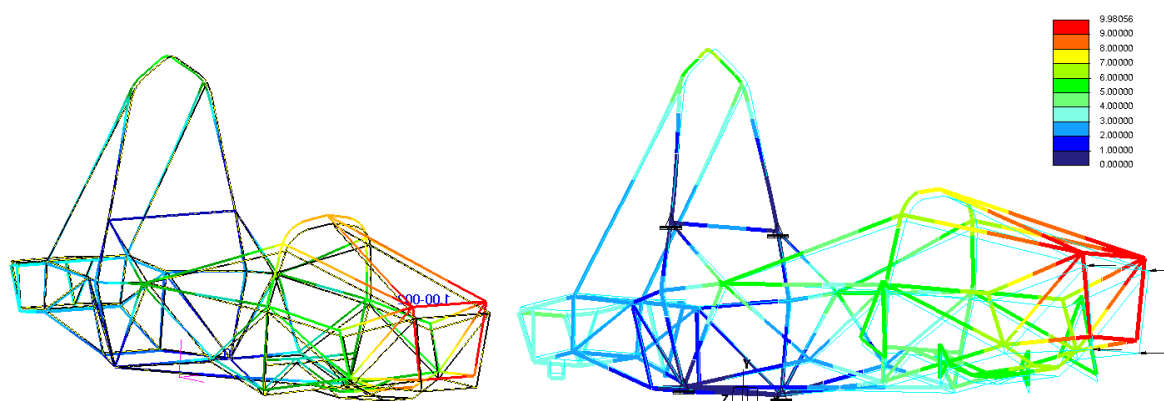
Obr. 72 Deformační výsledek MKP analýzy

V této fázi se v programu MSC Patran přiřadí výsledky výpočtu právě souborem XDB. Následně je možné požadované hodnoty zobrazit a dále s nimi pracovat.

Na Obr. 72 je zobrazena deformace alternativního rámu vlivem zatížení přes přední nárazovou přepážku. Maximální velikost byla vypočtena 12,8 mm, což plní pravidla FSAE s dostatečnou bezpečností. Výsledné deformace ostatních zátěžných stavů jsou přiloženy v příloze.

6.4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ANALÝZ VÝPOČTOVÝCH MODELŮ

Konečný návrh alternativního rámu, byl zatížen jednotlivými zátěžnými stavy dle pravidel FSAE v programech MSC.Patran/Nastran a Creo Simulate. Maximální hodnoty deformací byly zapsány a porovnány v tab.29.



Obr. 73 Porovnání výsledků Patran (vlevo) Creo Simulate (vpravo)



Výpočtové modely mají shodně definovaný materiál i geometrii, mají stejné okrajové podmínky a podobnou výpočtovou síť. Odchylky deformací se pohybují do 0,4 %. V jednom z případů byly výsledky dokonce totožné. Právě zmíněné odchylky jsou způsobeny mírně rozdílnými výpočtovými sítěmi, vytvořenými v odlišných MKP programech.

Díky tomu lze konstatovat, že pro tento typ úlohy jsou oba MKP programy rovnocenné a zvolený postup byl správný.

Tab. 29 Porovnání výsledků

Zátěžný stav	1 Hlavní oblouk	2 Přední oblouk	3 Boční struktura	4 Přední přepážka	5 Body pásů	6 Přední přepážka 2
Creo Simulate [mm]	18,2	3,16	3,41	9,98	1,41	12,74
Patran/Nastran [mm]	18,1	3,17	3,40	10,00	1,41	12,8
odchylka [mm]	0,1	0,01	0,01	0,02	0	0,06
Bezpečnost Creo Simulate	1,37	7,91	7,33	2,51	17,73	1,96
Bezpečnost Patran/Nastran	1,38	7,88	7,35	2,5	17,73	1,95
Bezpečnost odchylka	0,01	0,03	0,02	0,01	0	0,01



ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout rám monopostu Formule Student s ohledem na nízkou hmotnost a dostatečnou torzní tuhost. Podmínkou bylo využití pravidel Formule SAE umožňující nestandardní konstrukci, která je ovšem podmíněna několika analýzami.

Jelikož návrh takového rámu je poměrně složitý úkol, bylo z počátku využito standardních pravidel pro monoposty Formule Student, podle kterých byl rám navrhnut. Tímto způsobem vznikl nový koncept příhradové konstrukce, s ohledem na všechny komponenty a požadavky vozidla. Takto vzniklý standardní návrh je typický krátkou zvýšenou přídílí, zkrácenou zadní částí a velkým počtem různých druhů polotovarů. V této fázi konstrukčního návrhu byl rám použit u vozidla Dragon 4 brněnského studentského týmu. V porovnání s předchozí evolucí je hmotnost nižší o 5,9 kg současně se zvýšila torzní tuhost o 633 Nm/°. Tato zlepšení jsou důsledkem využití alternativních polotovarů, které jsou vhodně použity, a omezení zbytečně větších rozměrů předchozího modelu.

V dalším postupu docházelo postupně ke změně návrhu dle standardních pravidel v konstrukci alternativní. Využití této alternativy se sebou nese větší volnost při návrhu konstrukce. Bylo nezbytné dodržet pouze několik nařízení dle pravidel FSAE, jinak je návrh rámu libovolný. Při návrhu byl respektován požadavek na výpočet maximálních deformací v šesti zátěžných stavech simulujících různé typy nárazů. Aby bylo možné odhadnout další vhodné úpravy, byl rám standardní zatížen stavy pro alternativní rámy Formule student. Bylo zjištěno, že dosavadní návrh nesplňuje přísné požadavky FSAE. Proto jsem dopěl k závěru, že tyto dvě možnosti nejsou z hlediska bezpečnosti rovnocenné. I když standardní pravidla pro rámy Formule student jsou velice přísná a striktní právě z důvodu bezpečnosti, může nastat situace, kdy i přes dodržení všech pravidel může konstrukce při zátěžných stavech pro alternativní konstrukce projevit vyšší deformace, než jsou povolené. Nicméně tyto analýzy se v případě posuzování standardních rámu nedělají, proto je návrh pro Dragona 4 akceptovatelný a doposud prošel všemi kontrolami ze strany pořadatelů závodů.

Během dalších konstrukčních úprav a po vyhodnocení jejich důsledků z výpočtových simulací bylo určeno několik uzlů rámu, jejichž poloha má významný vliv na vlastnosti návrhu. Další fáze návrhu se nesly v duchu neustálého systematického testování změny polohy klíčových bodů v jednotlivých osách. Byly vytvořeny bezpečnosti a měrné torzní tuhosti. Pomocí získaných závislostí jsem pak posuzoval, která poloha každého z bodů, je z hlediska hmotnosti, tuhosti, bezpečnosti a pravidel FSAE nejvhodnější. Docílil jsem zvýšení bezpečnosti pro jednotlivé zátěžné stavy na přijatelnou mez, konkrétní hodnoty jsou poznamenány v příslušných kapitolách. Současně se navýšila měrná torzní tuhost.

V poslední fázi práce byla kontrolována kompatibilita všech komponent vozidla s alternativní konstrukcí rámu. Výsledný návrh je plně kompatibilní se všemi hlavními komponenty vozidla a mohl by nahradit standardní návrh v plném rozsahu. S ohledem na působící napětí při zátěžných stavech, byly nahrazeny některé polotovary ve snaze snížit hmotnost. Díky tomu hmotnost dále klesla o 1,7 kg. Navíc vhodná náhrada některých čtvercových profilů za mezikruhové ve střední části měla za příčinu zvýšení torzní tuhosti o 91 Nm/°.

Až do této fáze vývoje probíhal návrh i provedené simulace v programu Creo 2.0. (model byl tvořen v aplikaci Creo 2.0 Parametric, Výpočtový model byl připravován v nástavbě Creo 2.0 Simulate) V tomto prostředí byla využita možnost použití externího řešiče a to ANSYSu.



Jelikož během vývoje bylo provedeno poměrně velké množství analýz, ukázal se tento přístup velice efektivní. Odpadla totiž nutná konverze formátů mezi CAD a MKP programem.

Na základě získaných zkušeností je vhodné uvést, že návrh Alternativní konstrukce je podstatně časově náročnější než návrh standardní koncepce formulového rámu. Poskytuje sice více možností a jistou konstrukční volnost, ale je podmíněna prokázáním bezpečnosti navrženého rámu. Ta je prokazována odevzdáním vstupních dat pro výpočet jednotlivých zátěžných stavů ve formátu BDF. V rámci řešení diplomové práce jsem tento soubor, pro prostředí MSC Patran, známý jako Nastran Analysis Deck, vytvořil pro každý zátěžný stav a provedl simulaci řešičem MSC Nastran. Z tohoto důvodu je finální verze návrhu vymodelována také v Patranu a výsledky z Nastranu byly porovnány s výsledky z programu Creo 2.0. Jelikož se výsledky z jednotlivých MKP řešičů liší pouze do 1%, bylo možné posoudit vhodnost zvoleného postupu. Oba přístupy jsou rovnocenné a zvolený postup je možné považovat za správný.

Trubkový rám je jednodušší na návrh, výpočet i výrobu, než šasi kompozitové nebo voštinové. Z hlediska v práci dosažených vlastností navrženého rámu kategorie Formule Student se alternativní přístup ukázal jako vhodný. Oproti standardnímu návrhu předchozí evoluce bylo ušetřeno 7,8 kg což je 21% úspora hmotnosti. Současně byla navýšena torzní tuhost o 724 Nm/°. Tyto dvě veličiny jsou pro závodní monopost zcela zásadní a velkou mírou se podílí na celkových vlastnostech vozidla. S využitím pravidel FSAE pro alternativní rámy se otevírá prostor pro další zlepšení těchto vlastností, které budou určitě spjaté se změnou geometrie rámu. Jistě má smysl se ve vývoji šasi touto cestou ubírat a hledat další konstrukční řešení vycházejících z návrhu, popsaném v této diplomové práci.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HERB,A. Chassis engineering: chassis design building & tuning for high performance handling / by Herb Adams, The Penguin Group, USA 1993, ISBN 1-55788-055-7
- [2] JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J. Pružnost a pevnost I, VUT v Brně 1992
- [3] TRNĚNÝ, P. *Rám formulového vozu s návrhem upevňovacích prvků karosérie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 59 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Pavel Ramík
- [4] 2014 Formula SAE Rules [online], 2014, poslední revize 30. 12. 2013. Dostupné z: < <http://www.formulastudent.com/formula-student/Teams/Rules>>
- [5] Monash Motorsport [online], poslední revize 13. 2. 2014. Dostupné z: < <http://www.monashmotorsport.com/>>
- [6] MSC Nastran Beginner [online], 2014, poslední revize 28.3.2014. Dostupné z <<http://mscnastrannovice.blogspot.cz/2011/12/what-units-does-nastran-use.html>>
- [7] MSC FEM Modeling [online], 2014, poslední revize 28.3.2014. Dostupné z <http://www.mscsoftware.com/training_videos/patran/Reverb_help>
- [8] PTC Creo® Advanced Simulation Extension [online], 2014, poslední revize 28. 1. 2014. Dostupné z: <http://www.ptc.com/WCMS/files/149393/en/J0696_PTC_Creo_Advanced_Simulation_DS_EN.pdf>
- [9] PTC Creo® Simulate [online], 2014, poslední revize 28. 1. 2014. Dostupné z: <http://www.ptc.com/WCMS/files/128132/en/J0695_PTC_Creo_Simulate_DS_EN.pdf>
- [10] Racecar-engineering [online], poslední revize 13. 2. 2014. Dostupné z: < <http://www.racecar-engineering.com/cars/monash/>>
- [11] Squadra Corse [online], poslední revize 13. 2. 2014. Dostupné z: < <http://squadracorse-polito.com/WP/>>
- [12] UNI Maribor Grand Prix Engineering [online], poslední revize 13. 2. 2014. Dostupné z:< <http://formula.fs.uni-mb.si/index.php?id=104> >



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

c	[Nm/°/kg]	Měrná torzní tuhost
C	[Nm/°]	Torzní tuhost
d	[m]	Vnitřní průměr
D	[m]	Vnější průměr
E	[GPa]	Youngův modul oceli
E _Z	[Pa]	Youngův modul základní oceli
E _α	[Pa]	Youngův modul alternativní oceli
F	[N]	Síla
G	[GPa]	Modul pružnosti ve smyku
I _Z	[m ⁴]	Kvadratický moment průřezu základního polotovaru
I _α	[m ⁴]	Kvadratický moment průřezu alternativního polotovaru
J _p	[m ⁴]	Polární moment průřezu
l	[m]	Rozhod kol
L	[m]	Délka prutu
m	[kg]	Hmotnost
M _K	[Nm]	Krouticí moment
V	[m ³]	Objem
α	[°]	Úhlová deformace rámu
Δy	[m]	Deformace v ose Y
Δz	[m]	Deformace v ose Z
ρ	[kg/m ³]	Hustota oceli
φ	[°]	Zkroucení prutu
SAE		Society of automotive engineers
FSAE		Formula SAE
MKP		Metoda konečných prvků



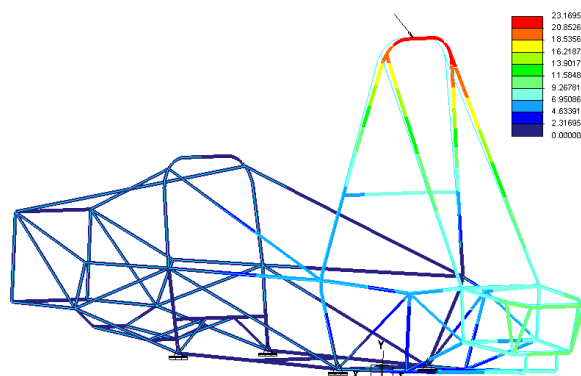
SEZNAM PŘÍLOH

Vypočtené deformace standardního rámu dle požadavků pro alternativní konstrukce.....	I
Vypočtené deformace předběžného návrhu alternativního rámu	II
Vypočtené deformace fáze 1 alternativního rámu	III
Vypočtené deformace fáze 2 alternativního rámu	IV
Vypočtené deformace fáze 3 alternativního rámu	V
Vypočtené deformace finální varianty alternativního rámu v prostředí PATRAN.....	VI
Torzní tuhosti jednotlivých variant rámu	VII
Detailní náhledy na sestavu alternativního rámu.....	VIII



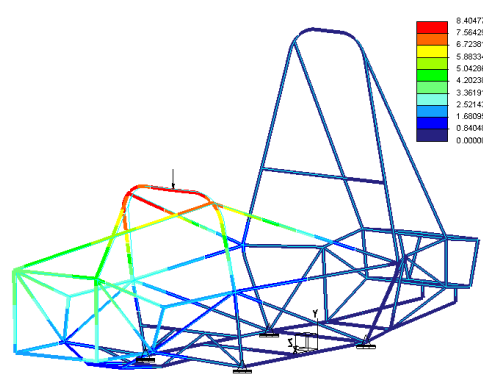
Vypočtené deformace standardního rámu dle požadavků pro alternativní konstrukce

Zatížení hlavního oblouku



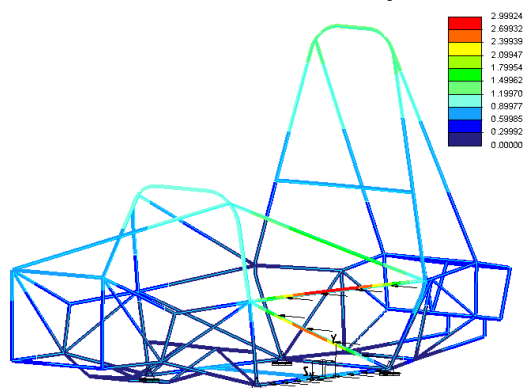
maximální deformace 22,18 mm

Zatížení předního oblouku



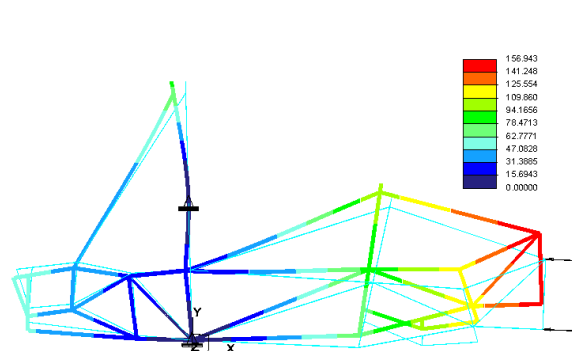
maximální deformace 8,40 mm

Zatížení boční struktury



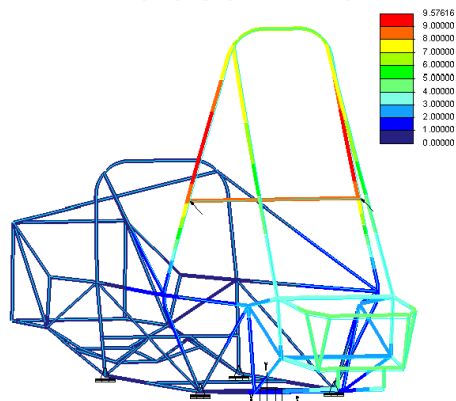
maximální deformace 3 mm

Zatížení přední nárazové přepážky



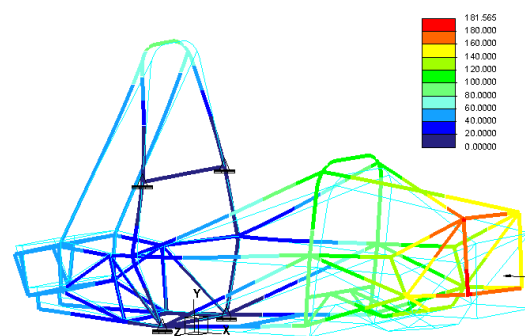
maximální deformace 150,9 mm

Zatížení přípojných bodů pásů



maximální deformace 9,6 mm

Zatížení přední nárazové přepážky s bočním vlivem

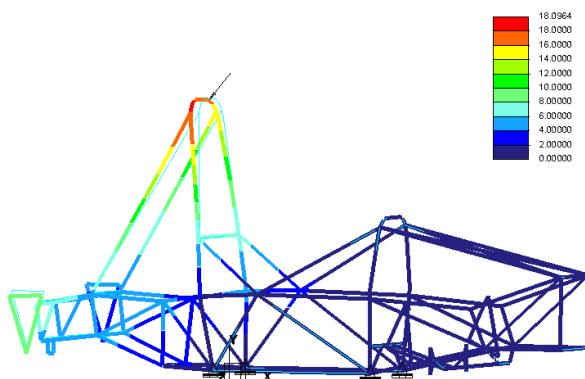


ilní deformace 181,6 mm



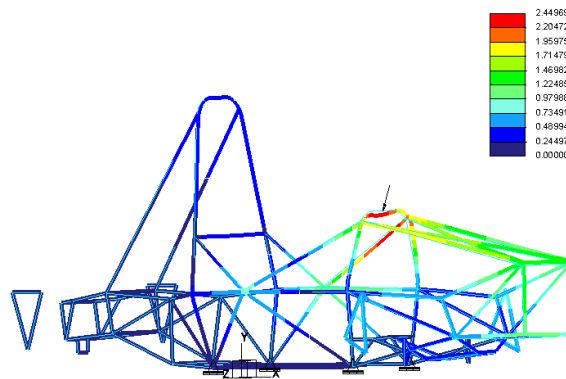
Vypočtené deformace předběžného návrhu alternativního rámu

Zatížení hlavního oblouku



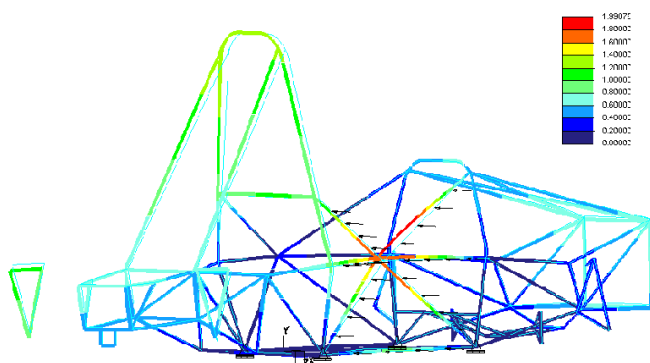
maximální deformace 19,1 mm

Zatížení předního oblouku



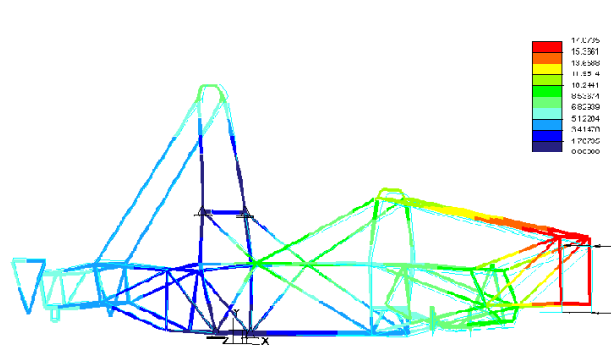
maximální deformace 2,45 mm

Zatížení boční struktury



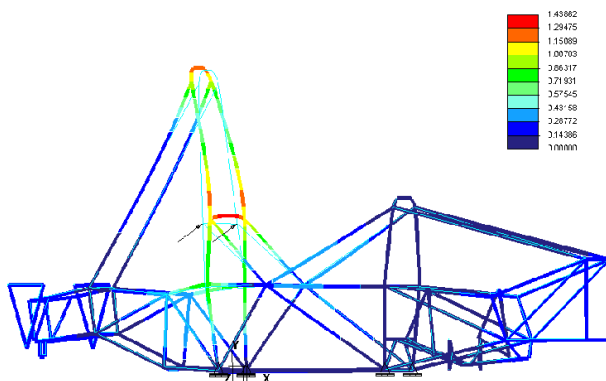
maximální deformace 1,99 mm

Zatížení přední nárazové přepážky



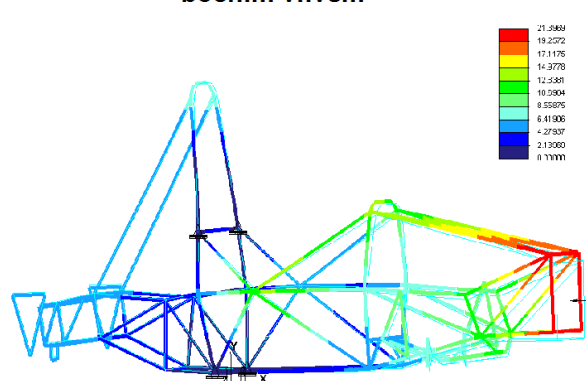
maximální deformace 17,07 mm

Zatížení přípojných bodů pásů



maximální deformace 1,46 mm

Zatížení přední nárazové přepážky s bočním vlivem

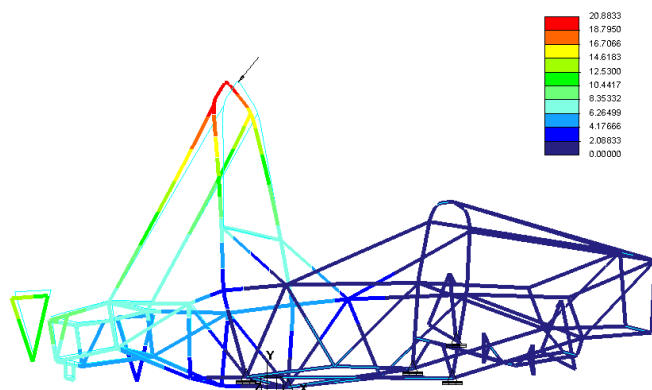


maximální deformace 21,6 mm



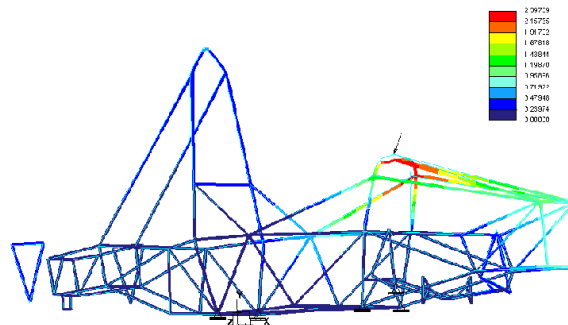
Vypočtené deformace fáze 1 alternativního rámu

Zatížení hlavního oblouku



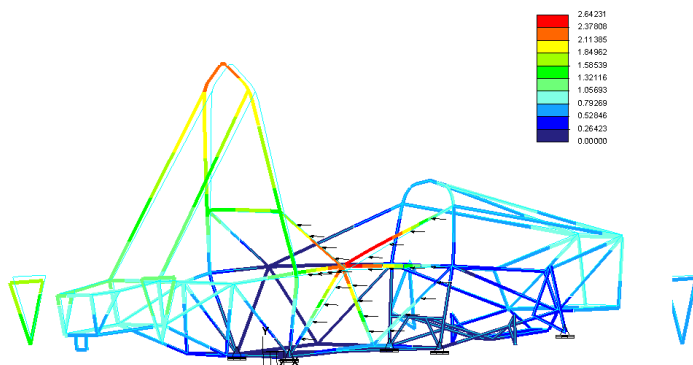
maximální deformace 20,88 mm

Zatížení předního oblouku



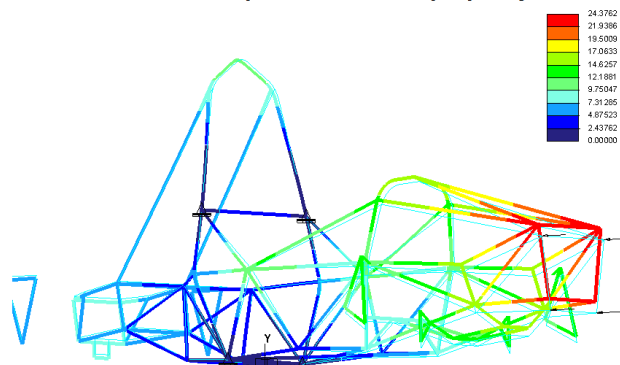
maximální deformace 3,09 mm

Zatížení boční struktury



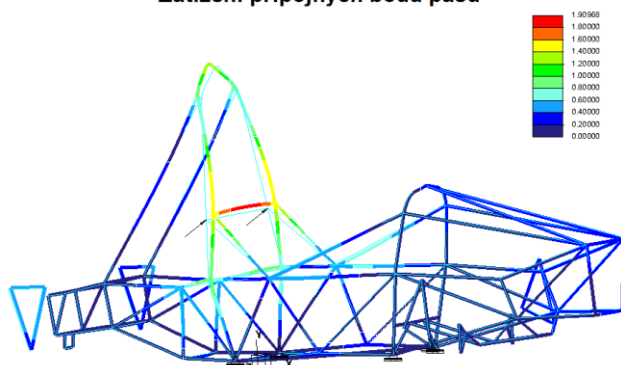
maximální deformace 2,64 mm

Zatížení přední nárazové přepážky



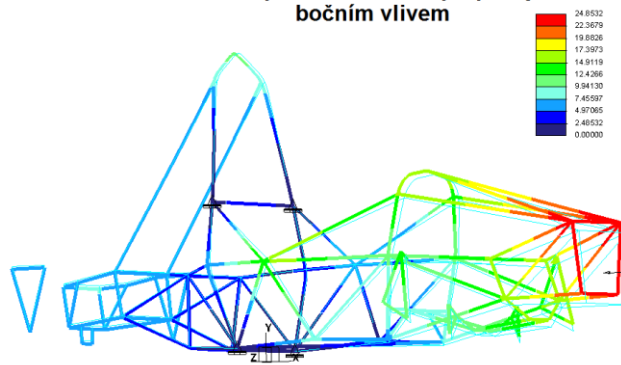
maximální deformace 24,37 mm

Zatížení přípojných bodů pásů



maximální deformace 1,9 mm

Zatížení přední nárazové přepážky s bočním vlivem

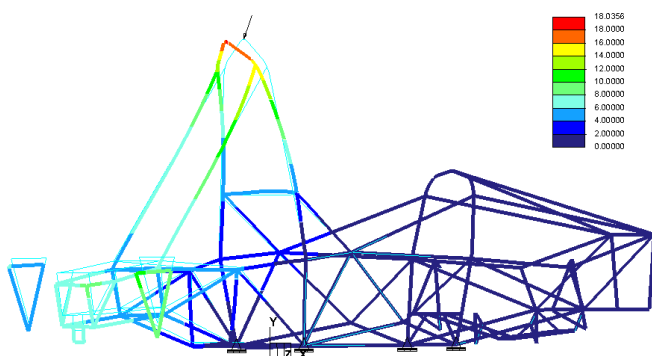


maximální deformace 24,85 mm

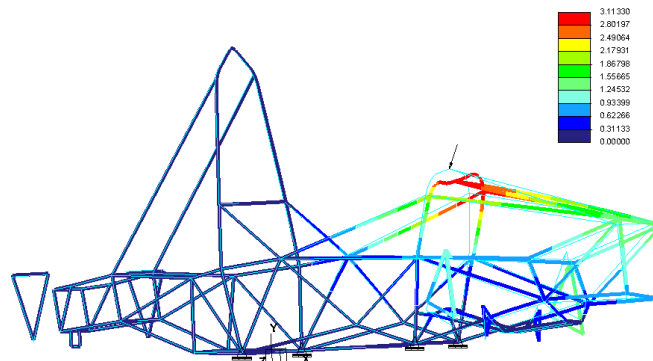


Vypočtené deformace fáze 2 alternativního rámu

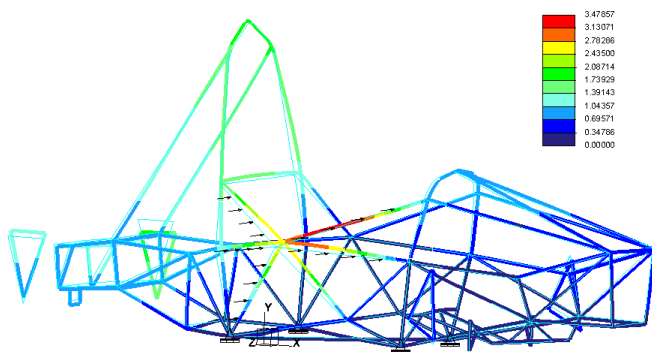
Zatížení hlavního oblouku



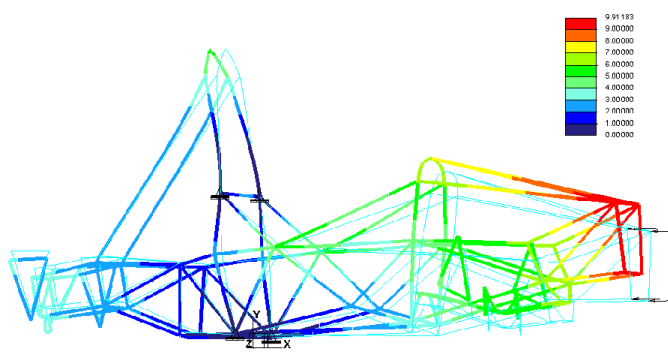
Zatížení předního oblouku



Zatížení boční struktury



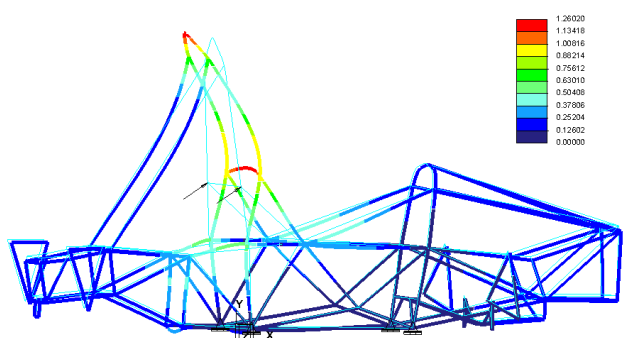
Zatížení přední nárazové přepážky



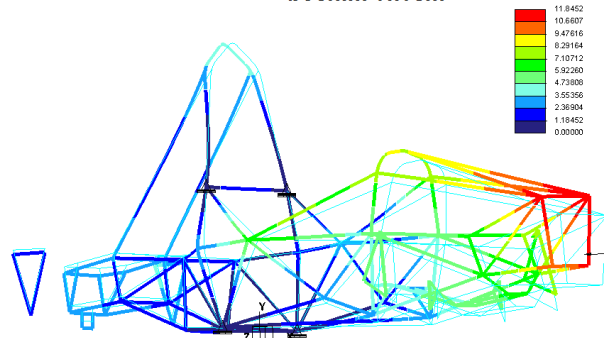
maximální deformace 3,47 mm

maximální deformace 9,91 mm

Zatížení přípojných bodů pásů



Zatížení přední nárazové přepážky s bočním vlivem



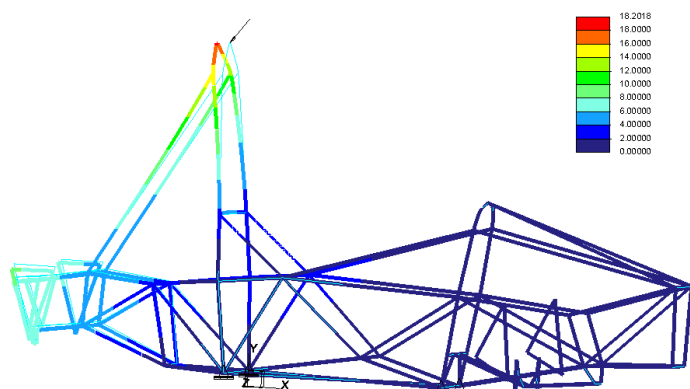
maximální deformace 1,26 mm

maximální deformace 11,85 mm



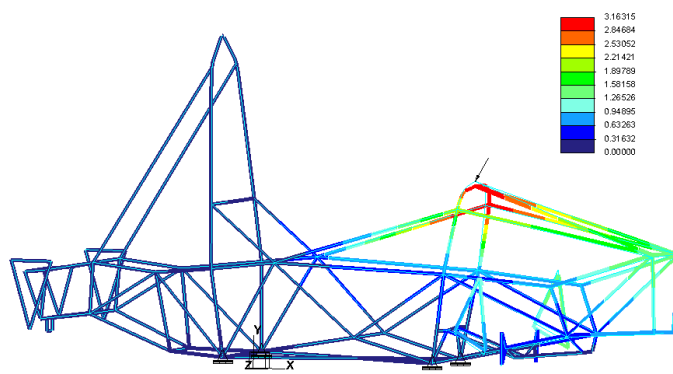
Vypočtené deformace fáze 3 alternativního rámu

Zatížení hlavního oblouku



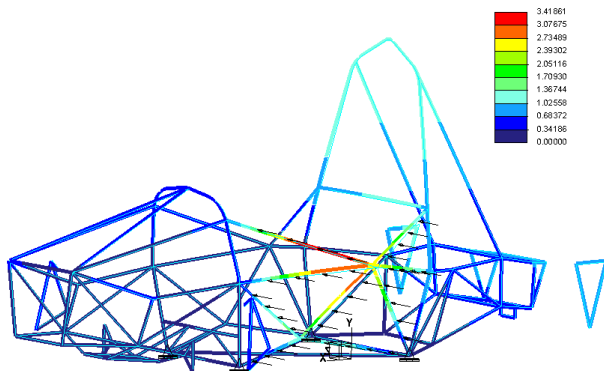
Maximální deformace 18,2 mm

Zatížení předního oblouku



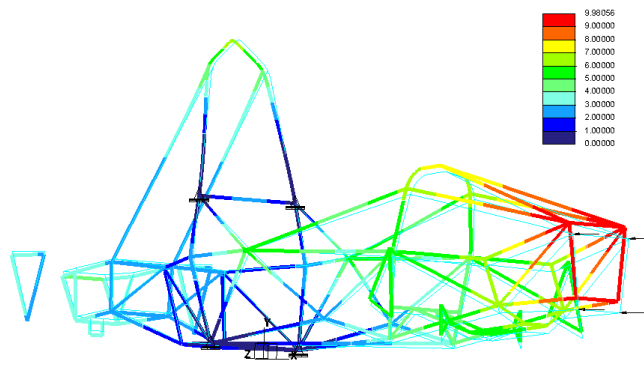
Maximální deformace 3,16 mm

Zatížení boční struktury



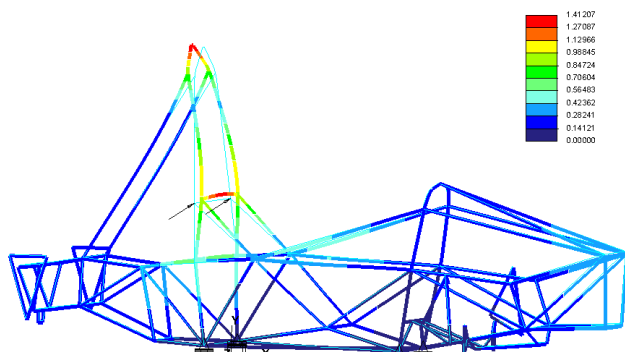
maximální deformace 3,41 mm

Zatížení přední nárazové přepážky



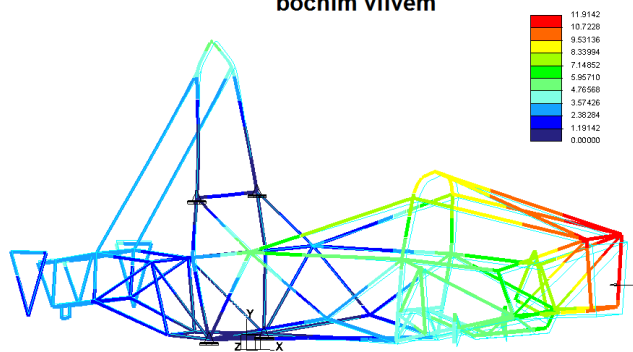
maximální deformace 9,98 mm

Zatížení přípojných bodů pásů



maximální deformace 1,41 mm

Zatížení přední nárazové přepážky s
bočním vlivem

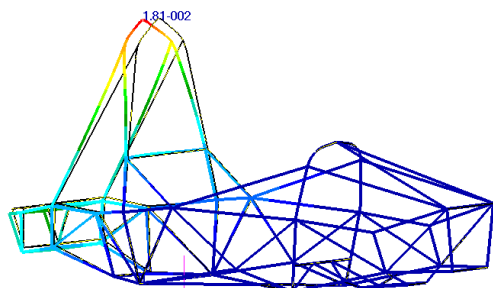


maximální deformace 11,91 mm



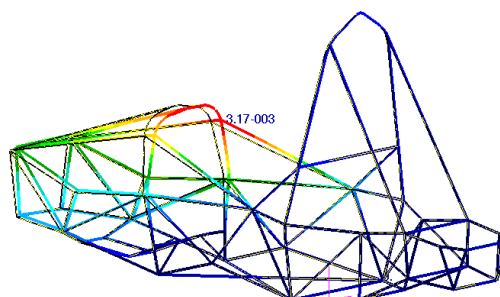
Vypočtené deformace finální varianty alternativního rámu v prostředí PATRAN

Zatížení hlavního oblouku



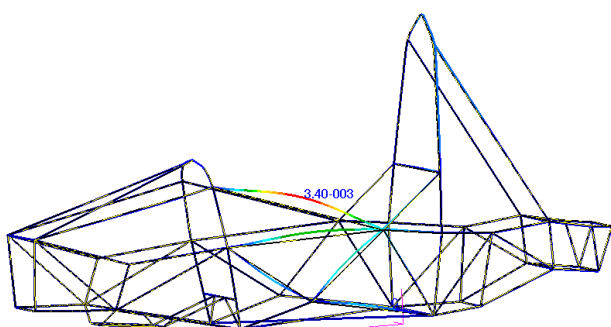
Maximální deformace 18,1 mm

Zatížení předního oblouku



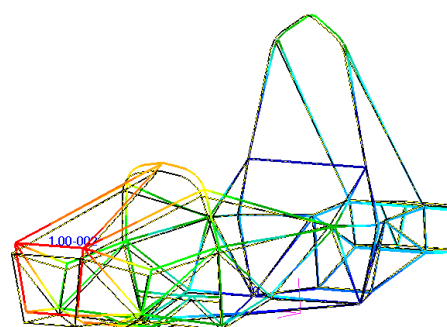
Maximální deformace 3,17 mm

Zatížení boční struktury



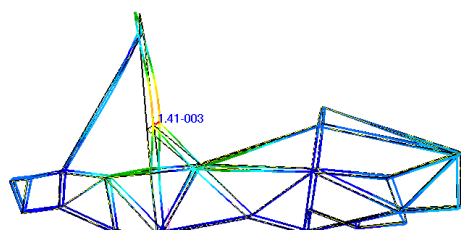
maximální deformace 3,4 mm

Zatížení přední nárazové přepážky



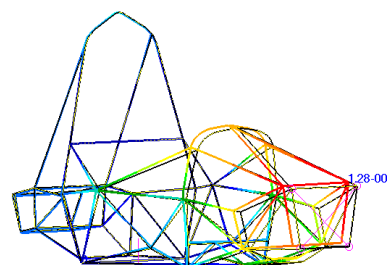
maximální deformace 10 mm

Zatížení přípojných bodů pásů



maximální deformace 1,41 mm

Zatížení přední nárazové přepážky s bočním vlivem

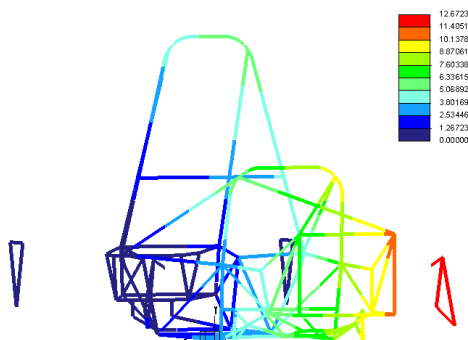


maximální deformace 12,8 mm



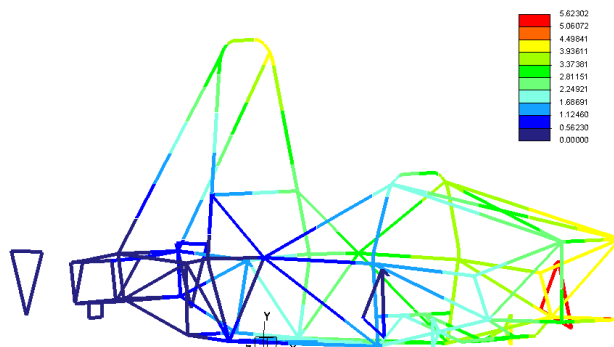
Torzní tuhosti jednotlivých variant rámu

Standardní rám



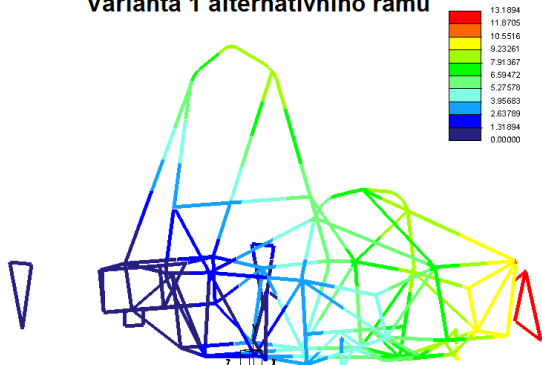
Torzní tuhost 1983 Nm/°

Předběžný návrh alternativního rámu



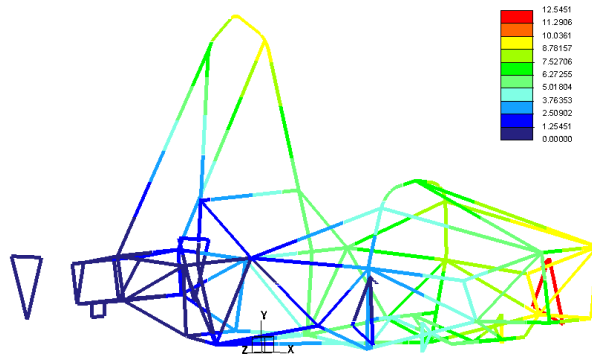
Torzní tuhost 2134 Nm/°

Varianta 1 alternativního rámu



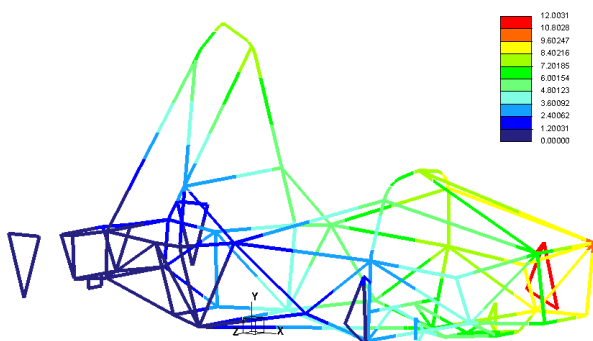
Torzní tuhost 1884 Nm/°

Varianta 2 alternativního rámu



Torzní tuhost 1966 Nm/°

Varianta 3 alternativního rámu



Torzní tuhost 2057 Nm/°



Detailní náhledy na sestavu alternativního rámu

