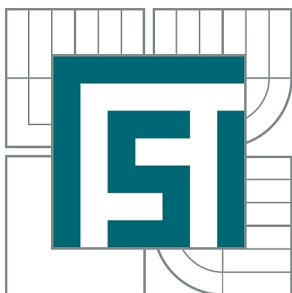


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ ZADNÍ ČÁSTI RÁMU VOZIDLA FORMULE STUDENT

FORMULA STUDENT CHASSIS REAR PART DESIGN

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. VÁCLAV HAJER

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. PAVEL RAMÍK

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Václav Hajer

který/která studuje v **magisterském navazujícím 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:

### **Konstrukční uspořádání zadní části rámu vozidla Formule Student**

v anglickém jazyce:

#### **Formula Student Chassis Rear Part Design**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte konstrukční uspořádání zadní části rámu vozidla Formule Student. Proved'te analýzu torzní tuhosti rámu a vyslovte se k navrženému řešení.

Cíle diplomové práce:

1. Proved'te rešerši současného stavu v oblasti rámu vozidel se zaměřením na formulové vozy.
2. Proved'te konstrukční návrh zadní části rámu vozidla Formule Student v systému CAD s použitím uvažovaných komponent a s ohledem na dosažení dostatečné torzní tuhosti a na vyrobiteľnost rámu.
3. Začleňte zadní část rámu do celkové sestavy vozidla.
4. Vytvořte výpočtový model pro simulaci torzní tuhosti navrženého rámu.
5. Proved'te výpočtovou simulaci torzní tuhosti rámu. V případě potřeby návrh upravte a postup opakujte.
6. Zhodnot'te získané výsledky, vyslovte se k vhodnosti navrženého tvaru a možnostem dalšího vývoje.

Seznam odborné literatury:

- [1] Formula Student web page [online], 2010, poslední revize 3.10.2010. Dostupné z:  
<<http://www.formulastudent.com/>>
- [2] Formula SAE web page [online], 2010, poslední revize 7.10.2010. Dostupné z:  
<<http://students.sae.org/competitions/formulaseries>>
- [3] JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J. Pružnost a pevnost I, VUT Brno 1992
- [4] Release 12.1 Documentation for ANSYS, ANSYS Inc., Canonsburg, USA 2010
- [5] Pro/Engineer WildFire 4.0 Resource Center [online], Parametric Technology Corporation, 2010, poslední revize 7.10.2010. Dostupné z:  
<[http://www.ptc.com/community/resource\\_center/proengineer/index.htm](http://www.ptc.com/community/resource_center/proengineer/index.htm)>

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Ramík

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 19.12.2010

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.  
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan



## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem konstrukce zadní části vozidla Formule Student zpracované pomocí 3D CAD systému. Ta musí splňovat veškeré požadavky kladené pravidly Formule Student, zástavbou motoru a dalších uvažovaných komponent. Finální verze konstrukce zadní části je zkompletována s dodanou přední částí a je vytvořen výpočtový model pro simulaci torzní tuhosti v MKP systému. Další výpočtový model je vytvořen pro dodaný rám cizí konstrukce. Oba tyto rámy jsou z hlediska torzní tuhosti vyhodnoceny a vzájemně porovnány. V práci jsou také uvedena vybraná pravidla Formule Student a přehled formulových rámu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Formule Student, formulové rámy, pravidla, konstrukce rámu, torzní tuhost, MKP

## ABSTRACT

This diploma thesis deals with description of the design of the rear of the vehicle structure of Formula Student processed by using a 3D CAD system. Formula have to fulfill all requirements Formula Student rules. The requirements and rules are given by building of engine and other considered engine components. The final version of the design of the rear part is assembled with the supplied front and the computational model is created to simulate the torsional stiffness of the FEM system. Another analysis model is created for a foreign supplied frame construction. Both of these frames are in terms of torsional stiffness evaluated and mutually compared. There are also mentioned selected Formula Student rules and overview of the formula frames and their overview.

## KEYWORDS

Formula Student, formula frame, rules, frame design, torsional stiffness, FEM



**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HAJER, V. *Konstrukční uspořádání zadní části vozidla Formule Student*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 66 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 27. května 2011

.....

Bc. Václav Hajer



## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval především mému vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Ramíkovi za jeho ochotu, cenné rady a užitečná doporučení během zpracovávání mé práce.

Zvláštní poděkování patří také mým rodičům, kteří mě neustále podporovali během celé doby studia.



## OBSAH

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Klíčová slova .....                                                  | 4  |
| Abstract .....                                                       | 4  |
| Keywords.....                                                        | 4  |
| Úvod.....                                                            | 10 |
| 1 Formule Student .....                                              | 11 |
| 2 Rámy formulových vozů .....                                        | 12 |
| 2.1 Vývoj formulových ráků .....                                     | 12 |
| 2.2 Formule student a její konstrukce u jednotlivých týmů .....      | 18 |
| 3 Pravidla pro konstrukci rámu formule student .....                 | 21 |
| 3.1 Všeobecná ustanovení (odstavec B3.1) .....                       | 21 |
| 3.2 Vybrané definice pojmů (odstavec B3.2).....                      | 21 |
| 3.3 Minimální materiálové požadavky (odstavec B3.3).....             | 22 |
| 3.4 Hlavní a přední oblouk – obecná ustanovení (odstavec B3.9) ..... | 23 |
| 4 Konstrukce rámu .....                                              | 26 |
| 4.1 Požadavky na rám Formule Student .....                           | 26 |
| 4.2 Použití systému Pro/Engineer WF5 .....                           | 26 |
| 4.3 Model rámu .....                                                 | 27 |
| 4.4 Vývojové varianty.....                                           | 29 |
| 4.5 Model motoru .....                                               | 33 |
| 5 Výpočet torzní tuhosti .....                                       | 34 |
| 5.1 Torzní tuhost.....                                               | 34 |
| 5.2 Postup výpočtu .....                                             | 34 |
| 5.2.1 Výpočet torzní tuhosti celého rámu .....                       | 34 |
| 5.2.2 Výpočet torzní tuhosti po částech.....                         | 35 |
| 6 Výpočtový model.....                                               | 37 |
| 6.1 Použití systému Ansys 12.1 .....                                 | 37 |
| 6.2 Možnosti výpočtu .....                                           | 37 |
| 6.3 Tvorba výpočtového modelu.....                                   | 38 |
| 6.3.1 Úprava modelu .....                                            | 38 |
| 6.3.2 Nastavení parametrů .....                                      | 40 |
| 6.3.3 Tvorba výpočtové sítě.....                                     | 43 |
| 6.3.4 Zadání okrajových podmínek .....                               | 44 |
| 6.3.5 provedení výpočtu .....                                        | 45 |
| 7 Vyhodnocení výsledků .....                                         | 46 |
| 7.1 Celková torzní tuhost .....                                      | 46 |





|                                         |                                            |    |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------|----|
| 7.2                                     | Torzní tuhost v jednotlivých úsecích ..... | 53 |
| 7.3                                     | Porovnání obou rámců .....                 | 60 |
| 7.4                                     | Shrnutí výsledků a případné úpravy .....   | 61 |
| Závěr .....                             |                                            | 62 |
| Seznam použitých zkratk a symbolů ..... |                                            | 66 |



## ÚVOD

Tématem mé diplomové práce je konstrukční uspořádání zadní části rámu vozidla Formule Student. Vozidlo je navrhováno samotnými studenty z technických univerzit, vytvářejících jeden tým, se kterým se pak mohou účastnit mezinárodních soutěží. Zde dochází ke konfrontaci s ostatními týmy a jejich formulovými vozy v různých disciplínách.

Při výběru konstrukce, která bude sloužit jako nosný prvek vozu, bude zvolena varianta, nejlépe vyhovující většině požadavků a současným možnostem týmu. Mezi tyto požadavky patří jednoduchost, dostatečná torzní tuhost, nízká hmotnost, snadná opravitelnost, nízká cena a relativně jednoduchý výpočet v MKP systémech.

Mým hlavním úkolem je navrhnout pomocí CAD systému vlastní konstrukční řešení zadní části rámu formulového vozidla, které odpovídá všem technickým a bezpečnostním pravidlům předepsaným pro závody Formule Student/SAE. Tato konstrukce rámu bude podřízena navržené geometrii náprav z důvodů co nejlepších jízdních vlastností. Dále bude počítáno se zástavbou motoru a dalších použitých komponent.

Po kompletaci navrhnuté zadní části rámu s dodanou přední částí bude vytvořen výpočtový model pro simulaci torzní tuhosti. Ta do jisté míry ovlivňuje chování vozu na závodní dráze. Snahou je, aby byla co nejvyšší, nikoli však na úkor příliš vysoké hmotnosti rámu. Jde tak o hledání vhodného kompromisu mezi těmito veličinami.



# 1 FORMULE STUDENT

Samotnému vzniku závodů Formule Student předcházela americká Formule SAE (Society of Automotive Engineers). Ta byla založena v roce 1981 a její závody pořádány pod záštitou Univerzity v Austinu. Od roku 1986 byly závody přesunuty do Michigenu a podporovány takzvanou „Velkou trojkou“ (Chrysler, General Motors, Ford). S přibývajícímí léty se této soutěže účastní stále více týmů a zpřesňují se pravidla.

Teprve roku 1997 se na startu soutěže Formule SAE objevuje první evropský tým. O rok později se již na britských ostrovech v rámci prezentace při akci UK Event utkávají dva britské a dva americké vozy. Díky této akci bylo odsouhlaseno společností IMechE (Institution of Mechanical Engineers) pořádání evropské soutěže s partnerstvím SAE pod názvem Formule Student. V této soutěži se utkávají studenti technických univerzit s jejich navrženými vozy v předepsaných disciplínách. Ty jsou stejně jako technické požadavky na vozy popsány v pravidlech. V současné době se můžeme setkat ve startovním poli závodů nejen s vozy poháněnými klasickým spalovacím motorem, ale také vozy kategorie Formule Hybrid (viz **Obr. 1**), poháněné hybridním pohonem, nebo vozy kategorie Formule Electric (viz **Obr. 2**), k jejichž pohonu slouží motor elektrický. I proto se závody Formule Student těší stále většímu zájmu a celosvětově se jich účastní na více než 270 týmů.



*Obr. 1 Logo Formule Hybrid [5]*



*Obr. 2 Logo Formule Electric [6]*



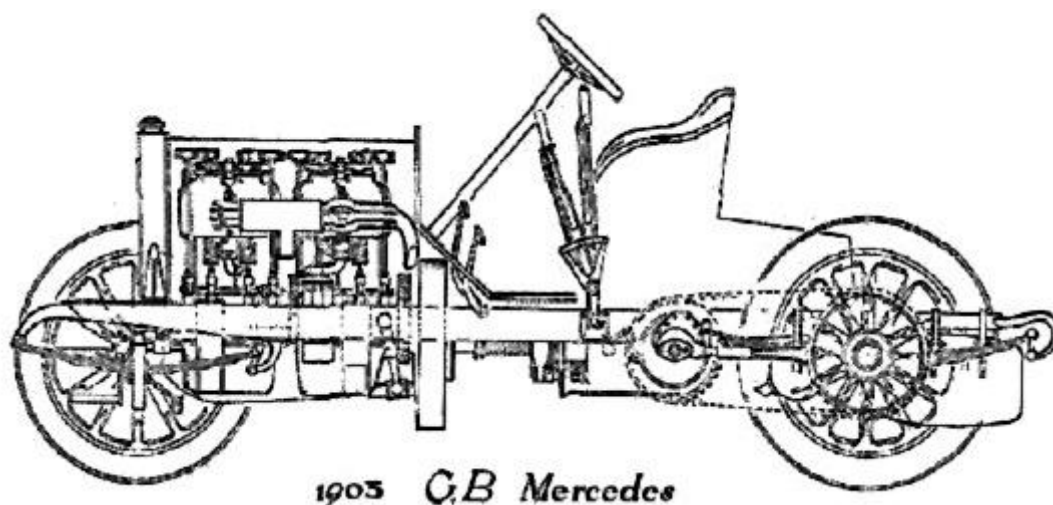
## 2 RÁMY FORMULOVÝCH VOZŮ

Rám formulového vozu, stejně jako u jiných vozů tvořených touto konstrukcí, plní funkci základní nosné části. Spojuje převážnou část komponentů vozu jako je například hnací soustava, řízení, nápravy a příslušenství v jeden konstrukční celek. Další z jeho funkcí je přenášet suvnou sílu od převodů na kola hnací nápravy, brzdné síly od náprav, hmotnost vozu a pilota na nápravy a zachycovat pohyb vozu. Tou nejdůležitější funkcí je však ochránit zdraví pilota v případné kolizi.

Hlavním požadavkem a jednou s nejsledovanějších veličin u rámu je jeho hmotnost, která by měla být co nejnižší, zároveň však musí být rám dostatečně pevný a tuhý.

### 2.1 VÝVOJ FORMULOVÝCH RÁMŮ

První závody byly uskutečněny necelých 10 let od vynálezu automobilu v roce 1894. Měly však spíše charakter dnešních rallyových závodů po veřejných komunikacích mezi městy. Žebřinové rámy těchto vozů byly technologicky jednoduché a robustní, ale s vysokou hmotností. Vyznačovaly se podélníky s profilů „U“ o výšce 130 mm, jak je z části vidět na **Obr. 3**. I přes svou robustnost měly značně nízkou torzní tuhost. Byly zde pokusy o vyztužení pevnými čtyřbodovými úchyty motoru případně převodovky. V tomto období se daly najít i dřevěné rámy s plechovou výztuží, jež vycházely z praxe v tehdejší letecké výrobě.



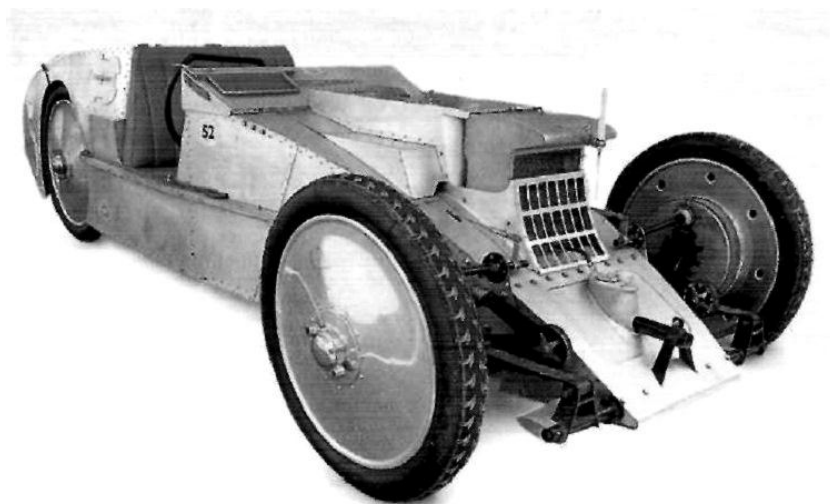
Obr. 3 Žebřinový rám s dvěma podélníky ve voze Mercedes z roku 1903 [1]

V roce 1906 byla uskutečněna první Velká cena GP Francie na okruhu v Le Mans. Zde se účastnily vozy ještě s nezměněnou podobou rámu. Až v roce 1912 se začala konstrukce radikálněji měnit. Začal se používat žebřinový rám postavený z „U“ profilů o výšce 75 mm. Klesla jeho hmotnost, ale stále se potýkal s velmi nízkou torzní tuhostí. Tato skutečnost byla nově řešena příčnou výztuhou před zadní nápravou ve tvaru „X“, jež výrazně zpevnila rám. Objevila se také konstrukce, která předběhla svoji dobu o celé půl století. Jednalo se o lehkou nosnou konstrukci z ocelových trubek, jež byla použita u vozu, který jako první překonal rychlost sto mil za hodinu.

V období po První světové válce byly pořádány závody vozů s koncepcí dvou sedadel. Konstrukce žebřinového rámu se příliš nezměnila. Přestože byly použity kvalitnější oceli a příhodněji tvarované profily, vykazovala konstrukce stále nízkou torzní tuhost. Tu zlepšovalo čtyřbodové uchycení motoru, nyní v jednom konstrukčním celku s převodovkou, k podélným

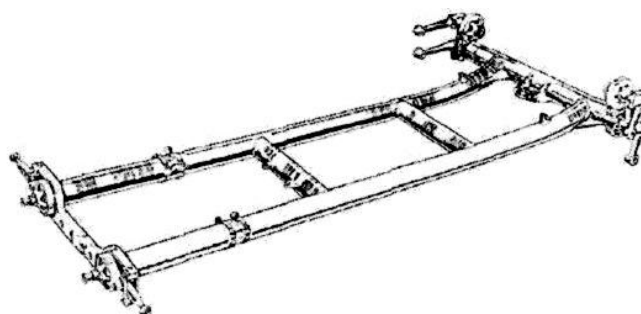


nosníkům a již dříve zmíněné výztuhy ve tvaru „X“. V roce 1923 se dokonce objevilo nekonvenční řešení, které opět daleko předběhlo svojí dobu. Jednalo se o vůz pojmenovaný Laboratoire (viz **Obr. 4**) se skořepinovou konstrukcí, která díky tehdejším málo vyspělým technologiím mohla být plně použita až roku 1962, jako převratný nápad, Colinem Chapmanem. Jsou také známy pokusy o poloskořepinovou duralovou konstrukci s pomocným rámem, která čekala na své uplatnění podobně dlouho dobu.



*Obr. 4 Vůz Laboratoire se skořepinovou konstrukcí s roku 1923 [1]*

V roce 1928 nastupují do závodů monoposty. Monoposty jsou charakterizovány jako jednomístné vozy s otevřenou kabinou a nekrytými koly. Mezi lety 1934-1939 dominovaly monoposty Auto Union a Mercedes-Benz s motory přeplňovanými kompresory. Používaly jsou stále žebřinové rámy, přičemž dosahují svého vrcholu. Monopost Mercedes-Benz W25 měl dva podélné nosníky o rozměrech 170x70 mm, které byly spojeny příčnými kruhovými profily vpředu o  $\varnothing 70$  mm a vzadu o  $\varnothing 75$  mm. Později byl přestavěn na typ 125 se silnějším motorem. U jeho rámu byla zvýšena torzní tuhost, byly použity podélné oválné profily 140x90x1,5 mm z ocele legované chromem, niklem a molybdenem, příčně spojeny čtyřmi kruhovými profily o  $\varnothing 100$  mm, hmotnost se tímto zvýšila o 15 kg. Konkurenční Auto Union typu A, B, C mělo rám svařen ze dvou podélných nosníků kruhové profilu o  $\varnothing 75 \times 2,5$  mm z chrommolybdenové ocele, svázané přední oválnou příčkou a dvěma kruhovými příčkami. Zadní profil byl přišroubován (viz **Obr. 5**). Celou touto konstrukcí byla vedena chladicí kapalina, ale díky netěsnosti svarů bylo od tohoto systému později ustoupeno. Hmotnost činila 60 kg.



*Obr. 5 Žebřinový rám s přední nápravou Auto Unionu typu C [1]*



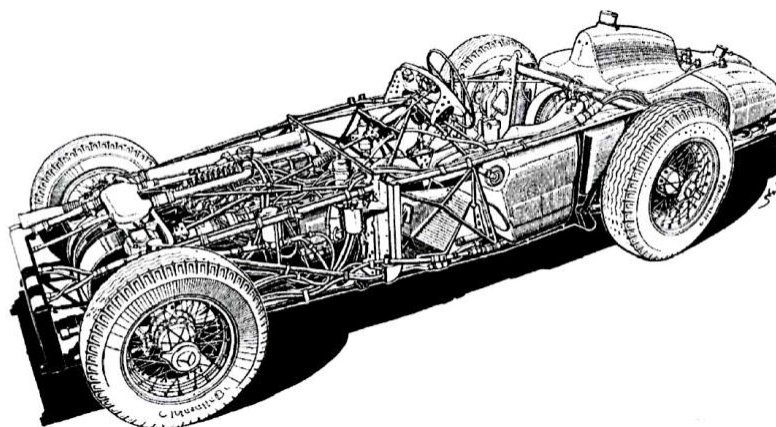
V poválečném období se začaly objevovat konstrukce žebřinových ráků z oválných nebo kruhových profilů vyztužených prostorovou nřstavbou kruhových profilů menřího průměru. Tyto konstrukce znamenaly přechodový stav mezi žebřinovým rákem a rákem příhradovým.

Jedním z vozů reprezentující tuto konstrukci byl například typ Ferrari F1 4,5 litru, jež měl rák svařen z dvou podélných oválných profilů 120x57 mm s příčnými kruhovými profily o  $\varnothing 75$  mm. Tento rák nevyztuřoval agregát, proto byla vpředu vestavěna výztužná deska. Dále byl pak doplněn prostorovou nřstavbou z tenčích kruhových profilů, jak je vidět na **Obr. 6**.



*Obr. 6 Žebřinový rák vyztuřený prostorovou nřstavbou Ferrari F1 4,5 litru [1]*

V roce 1954 začaly být definitivně ve velké mře používány příhradové ráky. Jedná se o prostorovou konstrukci svařenou z kruhových tenkostěnných profilů, která tvoří pevný a tuhý celek s nižší hmotností, než tomu bylo u předchozích typů ráku. Jedním z mnoha závodních vozů využívající tuto konstrukci byl monopost Mercedes W196 (viz **Obr. 7**). Měl lehký prostorový rák zkonstruovaný tak, aby byly jednotlivé kruhové profily o rozměrech  $\varnothing 20$  a  $\varnothing 25$  mm s tloušťkou stěny 1 mm namáhány pouze tahem nebo tlakem s vyloučením ohybu. Rák byl dostatečně tuhý, a to i za cenu nřrůstu hmotnosti. Například hodnoty jeho deformace při zatížení dosahovaly 2x menřích hodnot, než rák konkurenčního vozu Maserati 250 F. Odhadovaná hmotnost byla 25 až 30 kg, některé prameny uvádějí pravděpodobnějši hodnotu 38 kg.

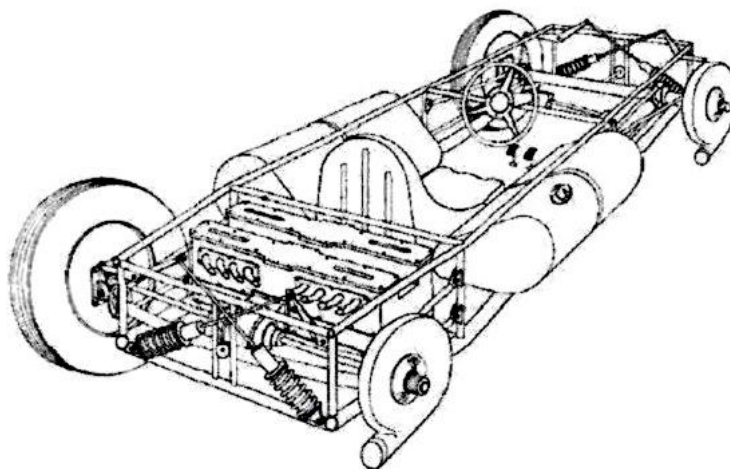


*Obr. 7 Příhradový rák ve voze Mercedes W 196 [1]*



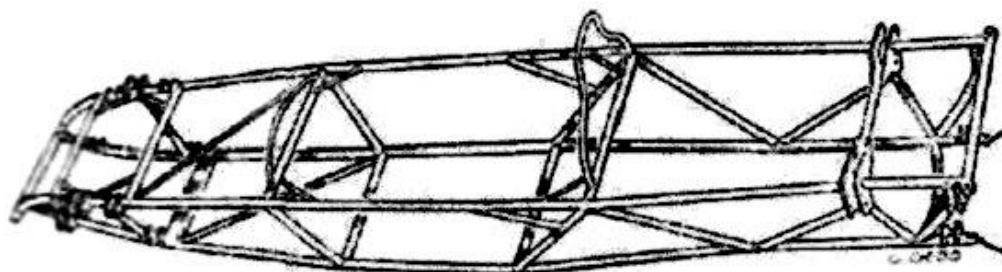


Zajímavou konstrukcí byl rám vozu Bugatti 251 s motorem umístěným napříč. Jeho příhradový prostorový rám byl svařen z kruhových profilů o  $\varnothing 76$  a  $\varnothing 35$  mm, mezi jehož podélné profily byly na každou stranu umístěny palivové nádrže jak je vidět na **Obr. 8**.



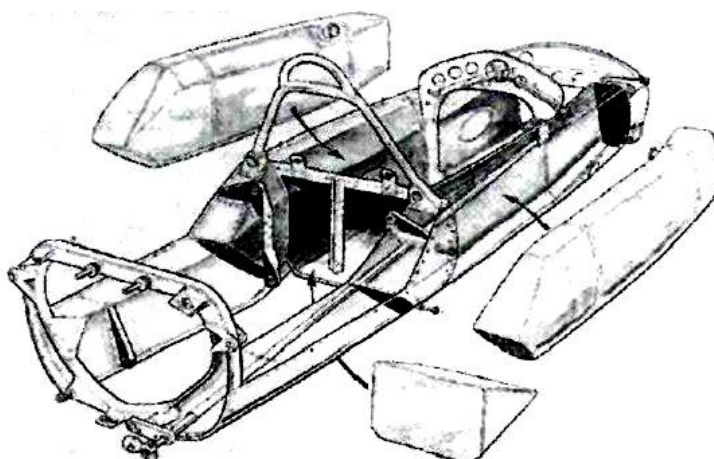
*Obr. 8 Příhradový rám Bugatti 251 F1s motorem umístěným napříč vozu [1]*

Od začátku šedesátých let používali prostorový příhradový rám všichni výrobci. Byl svařen z ocelových kruhových profilů s tloušťkou stěn 1,5 mm (viz **Obr. 9**). Jeho výhodou byla snadná vyrobitelnost a oprava. Karosérie vozu byla většinou z laminátu a téměř nepřispívala ke zvýšení tuhosti rámu. Ferrari vyztužil příhradový rám vkládáním panelů z hliníkových voštin do jeho volných polí.



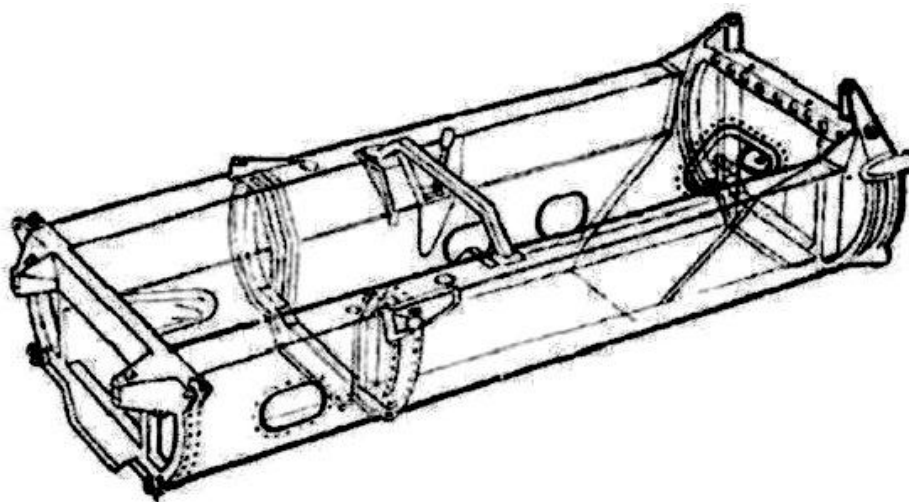
*Obr. 9 Příhradový rám z ocelových trubek (Cooper 1962) [1]*

V roce 1962 se na scéně objevil vůz Lotus 25. Klasická konstrukce příhradového typu byla nahrazena konstrukcí samonosné skořepiny leteckého typu, jež se vyznačovala prvky z ocele a lehkých hliníkových slitin. Základ tvořila dvojice hlavních bočních nosníků o rozměrech 300x150 mm, které byly snýtovány a slepeny z tvrzeného hliníkového plechu. Společně s podlahou a čtveřicí příček tvořily kompaktní blok (viz **Obr. 10**). Pro díly jako přední příčný nosník nesoucí hřebenové řízení, odlehčený oblouk přístrojové desky, ochranný oblouk za hlavou řidiče a ukotvení ramen předního závěsu byla použita ocel především z důvodu bezpečnosti. Celková konstrukce byla lehká, vůz Lotus se 450 kg byl nejlehčím ve startovním poli, a přitom s dostatečnou torzní tuhostí. Také disponovala značnou odolností při nárazu.



Obr. 10 Skořepina Lotusu 25 z roku 1962 [1]

U některých vozů jako byl například vůz McLaren F1 1,5 litru, byla použita skořepina jen pro střední část (viz **Obr. 11**), ve které se nacházel prostor pro pilota. Zbylé části byly řešeny jako svařovaná konstrukce sloužící k uchycení motoru, převodovky a závěsů zadních kol.



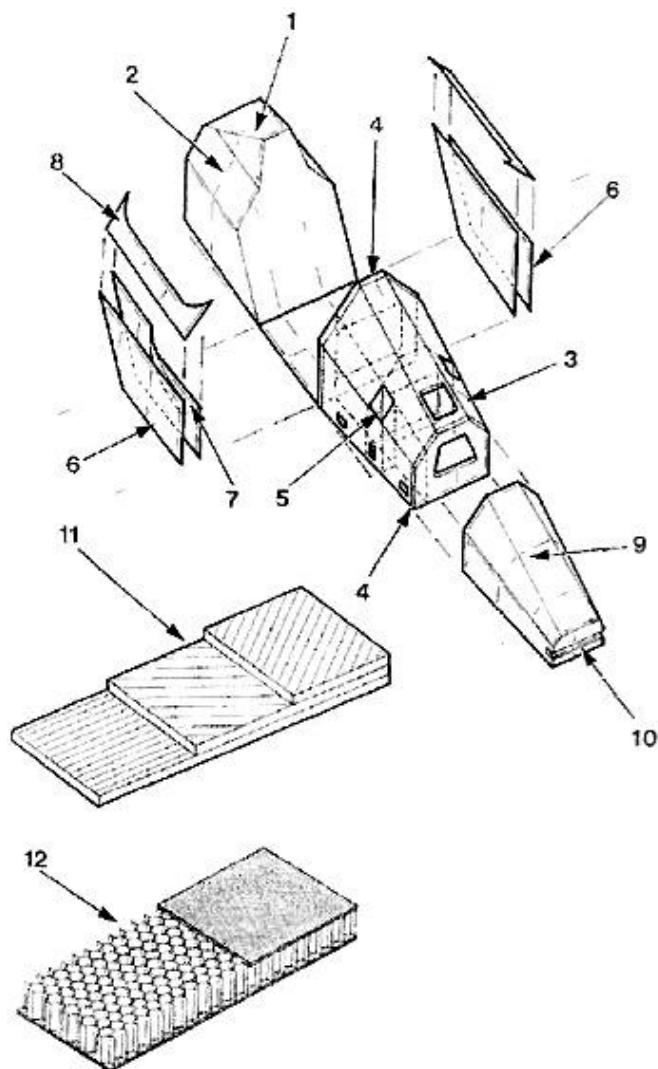
Obr. 11 Skořepina střední části 1,5 litrového vozu McLaren F1 [1]

Až do roku 1981 nedošlo k žádnému revolučnímu konstrukčnímu posunu. Teprve vůz McLaren MP4/4 přinesl změnu. Poprvé vyjel s nosnou částí vozu, jež byla tvořena skořepinou z uhlíkových kompozitů (viz **Obr. 12**). Tento kompaktní nosný celek obsahující kokpit pilota, držáky pro závěsy kol, hnací agregát, řízení a další součásti, daleko předčil doposud používané konstrukce. Materiál, který je k této konstrukci použit je kombinací mnoha komponent. Mezi ně patří karbon, kevlar, nomex, hliníkové voštiny a adhezně vytvrditelná pryskyřice. Celek se pak spéká, za nepřístupu vzduchu, několik hodin v autoklávu při teplotách převyšujících sto stupňů celsia. Během tohoto procesu se pryskyřice roztaví a vytvoří s uhlíkovými vlákny tvrdou skořápku. Uhlíková skořepina je tak velice tuhá. Pokud je namáhána, nevykazuje pružné deformace jak je tomu u kovů. Na rozdíl od nich, při





překročení meze pevnosti praská bez předchozích plastických změn. Oproti hliníkovým konstrukcím je přibližně o 25% tužší a při stejných rozměrech vykazuje její hmotnost o třetinu menší hodnotu. Hmotnost uhlíkových skořepin nynějších monopostů F1 se pohybuje mezi 55-65 kg. Zatím největší nevýhodou jsou vysoké náklady na výrobu.



Obr. 12 Skořepina s uhlíkových kompozitů vozu McLaren Mp4/4 z roku 1981, jednotlivé pozice: 1) schránka z uhlíkových kompozitů pro 150 litrovou nádrž, 2) zesílení stěn schránky nádrže pro držáky uchycení motoru, 3) hliníková voština s vnějšími plasty z uhlíkových kompozitů, 4) čelní deska s hliníkové slitiny, 5) otvory pro pružící elementy, 6), 7), 8) deformační struktura z hliníkových voštin a uhlíkových kompozitů, 9) čelní deformační struktura z hliníkových voštin a uhlíkových kompozitů, 10) držák pro upevnění křídla, 11) příklad vrstvení laminátu, 12) uhlíková epoxidová pryskyřice se spojí s hliníkovou voštinou a utvoří na ní z obou stran tvrdou kůru [1]

Díky své vysoké pevnosti se stala skořepina z uhlíkových vláken ve F1 od roku 1988 povinným bezpečnostním prvkem, jejíž prototyp musí projít náročnými zkouškami. Ty se skládají mimo jiné z odolnosti při čelním či bočním nárazu, za přísně určených podmínek, kdy může dojít jen k maximální předepsané deformaci. Pokud při těchto zkouškách skořepina neobstojí, nemůže být celý vůz homologován a tím se stává nezpůsobilým pro použití v závodech.



## 2.2 FORMULE STUDENT A JEJÍ KONSTRUKCE U JEDNOTLIVÝCH TÝMŮ

V konstrukci rámu vozů kategorie Formule Student/SAE můžeme najít řadu různých a nápaditých řešení. Ta musejí samozřejmě splňovat veškeré technické a bezpečnostní předpisy, které zahrnují i požadavky na materiál.

Mezi základní, a formulovými týmy stále nejvíce využívanou konstrukci, patří svařovaný příhradový rám z tenkostěnných ocelových profilů. Důvodů, proč se na startovních polích jednotlivých závodů objevuje v nejpoměrnějším zastoupení je hned několik. Především jde o relativně jednoduchou konstrukci s dostatečnou tuhostí, jejíž složitost při výpočtech v MKP systémech nevyžaduje tolik zkušeností oproti jiným konstrukcím. Proto je nejvíce využívána začínajícími formulovými týmy, jichž rok od roku přibývá. Dále pro ni hovoří snadná výroba z běžně dostupných komponent a tím i nízká cena. Je zde také možnost snadné opravy či doplnění dalších elementů pro vyztužení rámu. Asi největší nevýhodou je pak samotná hmotnost celé konstrukce, která bývá o něco vyšší než u jiným způsobem řešených konstrukcí.

Jedním z formulových týmů využívající příhradového rámu je například Universita Di Firenze z Itálie (viz **Obr. 13**).



*Obr. 13 Příhradový rám Univezity Di Firenze z Itálie [7]*

Druhou nejpočetnější skupinou ve startovním poli jsou formulové týmy využívající kompozitní uhlíkovou skořepinu, která musí být dle pravidel doplněna předním a hlavním ochranným obloukem s výztuhami z ocelového kruhového tenkostěnného profilu. Mezi její výhody patří nízká hmotnost a zároveň vysoká torzní tuhost. Nevýhody jsou naopak složitější výroba, téměř nemožnost opravy při porušení a především vysoká cena. Pro výpočty v MKP systémech je zapotřebí již dostatečných zkušeností. Proto je kompozitní uhlíková skořepina většinou používána formulovými týmy, které za sebou mají zkušenosti z předchozích verzí závodních vozů. Zpravidla většina formulových týmů používající kompozitní uhlíkovou skořepinu začínala vozy s příhradovým rámem.

Na **Obr. 14** je ukázána kompozitní uhlíková skořepina během výroby formulového týmu Karat z Technické Univerzity Kaiserslautern v Německu.



*Obr. 14* Skořepina z uhlíkových kompozitů Univerzity Kaiserslautern v Německu [8]

Zajímavou a téměř ojedinělou konstrukcí, jež byla k vidění ve startovním poli závodů Formule Student, je vůz Cardiff University ze Spojeného Království. Ten má skořepinu tvořenou hliníkovými voštinami doplněnou předním a hlavním ochranným obloukem s výztuhami z ocelového kruhového tenkostěnného profilu (viz **Obr. 9**).



*Obr. 15* Skořepina s hliníkových voštin Univerzity Cardiff ze spojeného Království [9]

Další konstrukce použité pro stavbu vozů jsou hybridními variantami, jež kombinují prvky z předchozích třech variant.

Vůz UAS Cologne v Německu je kombinací kompozitní uhlíkové skořepiny v přední části končící hlavním ochranným obloukem a příhradového rámu pro zadní část vozu (viz **Obr. 16**).





Obr. 16 Hybridní konstrukce skořepiny z uhlíkových kompozitů a příhradového rámu UAS Cologne v Německu [10]

Naproti tomu vůz Brunel University ze Spojeného Království je kombinací hliníkové skořepiny přední části končící hlavním ochranným obloukem a příhradového rámu zadní části (viz Obr. 17).



Obr. 17 Hybridní konstrukce hliníkové skořepiny a příhradového rámu Univerzity Brunel ze Spojeného Království [11]

Mimo výše uvedené konstrukce se také ve velké míře používají příhradové rámy s výztuhami pomocí panelů vkládaných mezi ocelové tenkostěnné profily. Jedná se převážně o hliníkové voštiny nebo desky z uhlíkového vlákna. Dále nejsou výjimkou ani příhradové rámy z rozdílných kusů materiálů a také skořepiny z uhlíkových vláken smontované z více částí.

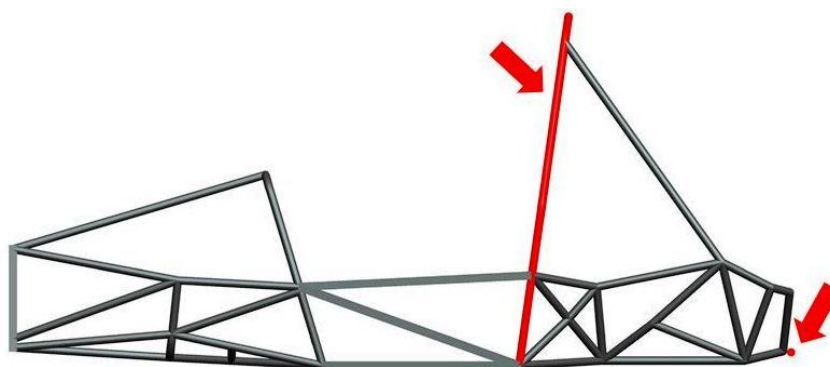


### 3 PRAVIDLA PRO KONSTRUKCI RÁMU FORMULE STUDENT

Rám Formule Student je, stejně jako u ostatních automobilových soutěží, popsán pravidly viz [13], [14], která musejí být bezpodmínečně splněna. Tato pravidla mají zajistit především bezpečnost pilota v případě kolizi. Proto jejich závažné porušení může být důvodem zákazu startu v závodě.

V následujících odstavcích jsou popsána pravidla pro tvorbu rámu, kterými je potřeba se řídit již od začátku konstrukčního návrhu. Vzhledem k zadání diplomové práce, jsou uvedena převážně taková, která se týkají zadní části nebo s ní úzce souvisejí.

Zadní částí je rozuměna konstrukce ležící v oblasti mezi hlavním ochranným obloukem a místem, které slouží pro zvedání vozu. Na **Obr. 18** jsou tyto části vyznačeny pomocí šipek a červenou barvou.



Obr. 18 Vymezení zadní části rámu vozidla Formule Student

#### 3.1 VŠEOBECNÁ USTANOVENÍ (ODSTAVEC B3.1)

Konstrukční uspořádání vozidla musí obsahovat dva ochranné oblouky (hlavní a přední), které jsou vyztuženy vzpěrami. Přední přepážku se vzpěrami, deformační člen pro čelní náraz a ochrannou strukturu pro náraz z boku.

#### 3.2 VYBRANÉ DEFINICE POJMŮ (ODSTAVEC B3.2)

Hlavní ochranný oblouk – ochranný oblouk kruhového profilu, jenž je umístěn podél řidičova trupu nebo těsně za ním.

Ochranné oblouky – hlavní a přední ochranný oblouk jsou značeny jako „ochranné oblouky“.

Podpora vzpěry ochranného oblouku – konstrukce rámu vedoucí od spodního konce vzpěry ochranného oblouku k ochrannému oblouku.

Člen rámu – představuje jednotlivý nepřerušovaný kus, spojitou trubku.

Rám – vytvořená konstrukční sestava, ke které jsou připojeny veškeré funkční systémy vozidla. Tato sestava může být jednoduchá svařovaná konstrukce, vícedílná svařovaná konstrukce nebo kombinace kompozitní skořepiny se svařovanou konstrukcí.



Primární struktura – je složena z následujících částí rámu:

- 1) hlavní ochranný oblouk
- 2) přední ochranný oblouk
- 3) vzpěry ochranných oblouků a jejich podpory
- 4) ochranná struktura pro náraz z boku
- 5) přední přepážka
- 6) podpora přední přepážky
- 7) všechny členy rámu, kteří přenášejí zatížení ze zádržného systému řidiče do členů 1 až 6

Hlavní struktura rámu – část konstrukce rámu, která neleží uvnitř obálky definované primární strukturou. Horní části hlavního ochranného oblouku a jeho podpory nejsou již součástí této obálky.

### 3.3 MINIMÁLNÍ MATERIÁLOVÉ POŽADAVKY (ODSTAVEC B3.3)

Primární struktura automobilu musí být zkonstruována z nízkouhlíkové oceli s minimálním obsahem uhlíku 0,1 % nebo legované oceli. Minimální průřezy profilů a jejich použití na jednotlivé části rámu jsou uvedeny v **Tab. 1**.

Tab. 1 Použití profilů

| Člen nebo použití                                           | Vnější rozměr x tloušťka stěny       |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| hlavní a přední ochranný oblouk,                            | Ø 25,4 mm x 2,2 mm                   |
| profil použitý pro uchycení pásu jdoucích přes ramena       | Ø 25 mm x 2,5 mm                     |
| ochrana pro náraz z boku,                                   | Ø 25,4 mm x 1,65 mm                  |
| přední přepážka,                                            | Ø 25 mm x 1,75 mm                    |
| vzpěry ochranných oblouků,                                  | □ 25 mm x 25 mm x 1,25 mm            |
| úchyty pro zádržný systém řidiče (s výše uvedenou výjimkou) | □ 26 mm x 26 mm x 1,2 mm             |
| podpora přední přepážky,                                    | Ø 25,4 mm x 1,25 mm                  |
| členy navazující na podpory hlavního ochranného oblouku     | Ø 25 mm x 1,5 mm<br>Ø 26 mm x 1,2 mm |

Poznámka 1: Při použití legované oceli není dovoleno použít menší tloušťku stěny, než jak tomu je u nízkouhlíkové oceli.

Poznámka 2: Pro konkrétní aplikace je možnost použít profily se specifikovaným vnějším rozměrem a větší tloušťkou stěny nebo specifikovanou tloušťkou stěny s větším vnějším rozměrem. Anebo záměna kruhového profilu na čtvercový se stejným či větším rozměrem pro ty, které jsou uvedeny nahoře. Nejde o pravidla vyžadující schválení.

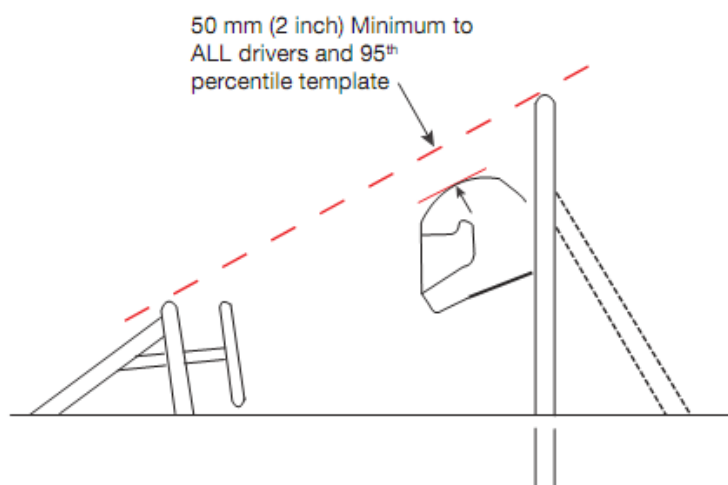


Také je tu možnost využití alternativních materiálů, které jsou popsány v dalších pravidlech. Ta zde však nebudou uvedena, vzhledem k budoucí volbě stavby rámu z ocelových profilů.

### 3.4 HLAVNÍ A PŘEDNÍ OBOUK – OBECNÁ USTANOVENÍ (ODSTAVEC B3.9)

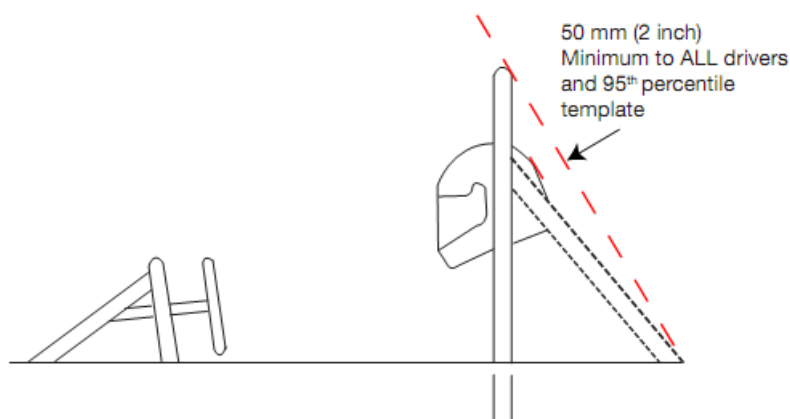
Hlava a ruce řidiče nesmí být v kontaktu se zemí při převrácení vozidla. Rám musí obsahovat hlavní ochranný a přední ochranný oblouk. Když je řidič (95% muž) usazen v normální poloze a připoután, musí jeho helma nebo kohokoliv s řidičského týmu:

- a) být vzdálena minimálně 50,8 mm od přímky spojující vrcholy hlavního ochranného oblouku a předního ochranného oblouku (viz **Obr. 19**).



Obr. 19 Vzdálenost a) [13]

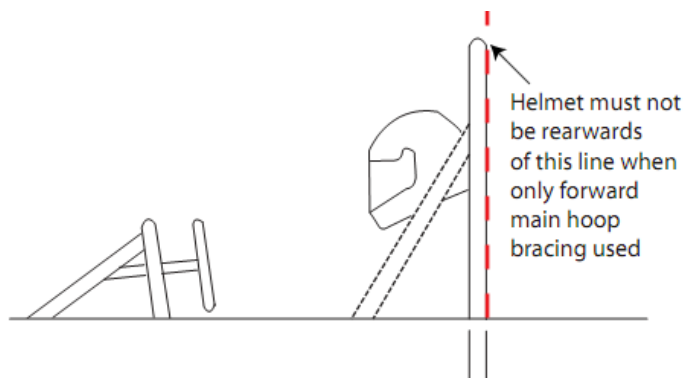
- b) být vzdálena minimálně 50,8 mm od přímky spojující vrchol hlavního ochranného oblouku s nejnižším místem vzpěr hlavního ochranného oblouku, jestliže směřují k zadní části (viz **Obr. 20**).



Obr. 20 Vzdálenost b) [13]

- c) být nejdále v úrovni hlavního ochranného oblouku, jestliže vzpěry hlavního ochranného oblouku směřují k přední části (viz **Obr. 21**).

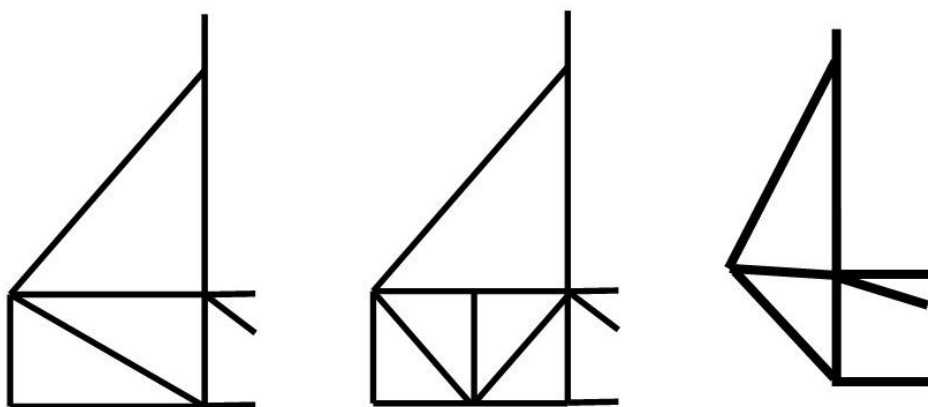




Obr. 21 Vzdálenost c) [13]

Rádusy ohybu měřené od střednice profilu musí mít minimálně trojnásobnou hodnotu vnějšího rozměru ohýbaného profilu. Ohyb musí být plynulý s žádnou známkou promáčknutí či poškození na stěně profilu.

Hlavní a přední ochranný oblouk musí být pevně integrovány do primární struktury pomocí vzpěr a triangulace profilů (viz **Obr. 22**).



Obr. 22 Triangulace profilů [14]

### HLAVNÍ OCHRANNÝ OBLOUK

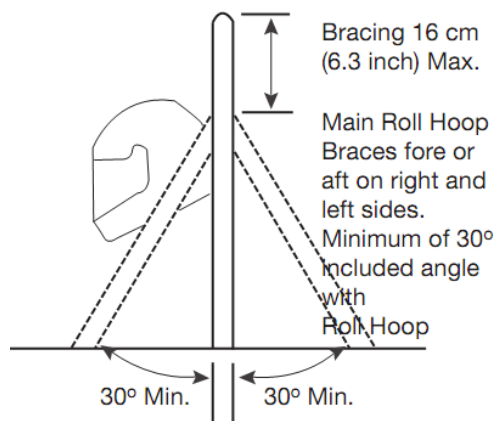
Hlavní ochranný oblouk musí být vyroben z jednoho bezešvého souvislého uzavřeného kusu daného profilu. Použití slitin hliníku, titanu a kompozitních materiálů je zakázáno. Musí sahat od nejnižšího členu rámu na jedné straně, přes vrch, po nejnižšího členu rámu na straně druhé. Z bočního pohledu na vozidlo, nesmí být ta část hlavního ochranného oblouku, od místa, kde je připevněna k hlavní struktuře rámu, nahnuta o více než  $10^\circ$  od vertikály. Při čelním pohledu na vozidlo musí být vnitřní vzdálenost v místě, kde je připevněn hlavní ochranný oblouk k hlavní struktuře rámu, minimálně 380 mm.

### VZPĚRY HLAVNÍHO OCHRANNÉHO OBLOUKU

Vzpěry hlavního ochranného oblouku musí být vyrobené z uzavřených profilů. Musí být rovné bez záhybů. Při bočním pohledu musí být dvojice vzpěr umístěna na tu stranu, kam se naklání hlavní ochranný oblouk (dopředu nebo dozadu) a musí ho podepírat na pravé i levé straně. Jedny konce vzpěr musí být uchyceny co nejbližší k vrcholu hlavního ochranného



oblouku do maximální vzdálenosti 160 mm. Úhel, který s ním svírají, musí být minimálně  $30^\circ$  (viz **Obr. 23**). Vzpěry musí být schopny bezchybně přenášet zatížení z hlavního ochranného oblouku do hlavní struktury rámu. Proto musí být spodní konce vzpěr pomocí triangulace profilů, upevněny ke spodním koncům hlavního ochranného oblouku a uzlovému bodu profilů pro ochranu při bočním nárazu. Zatížení ze vzpěr nesmí být přenášeno na motor, převodovku, diferenciál nebo prvky odpružení.



Obr. 23 Vzdálenost d) [13]

### MÍSTO PRO ZVEDÁNÍ VOZU

Místo pro zvedání vozu (viz **Obr. 23**) musí být schopno podpírat hmotnost vozu a být v souladu s použitím „rychlouzvedáků“ organizátorů. Musí být umístěno na zadním konci vozu a dále musí splňovat tyto uvedené požadavky:

- viditelné pro osobu stojící 1 metr za vozem,
- natřeno oranžovou barvou,
- orientováno horizontálně a kolmo na osu vozu,
- vyrobeno z hliníkového nebo ocelového kruhového profilu o rozměrech  $\varnothing$  25-29 mm,
- minimální délka 300 mm,
- spodní část profilu musí být po obvodu  $180^\circ$  dlouhá minimálně 280 mm,
- výška umístění musí být taková, aby minimální vzdálenost mezi vozovkou a místem pro zvedání vozu byla 75 mm a aby se při zvednutí nad 200 mm (mezi místem pro zvedání vozu a vozovkou) nedotýkala kola při plném vyvážení vozovky.



Obr. 24 Místo pro zvedání vozu [23]



## 4 KONSTRUKCE RÁMU

Pro letošní rok bude zkonstruován vůbec první vůz Formule Student na Ústavu automobilního a dopravního inženýrství, Fakulty strojního inženýrství, VUT v Brně. Hlavní myšlenkou je postavit formulový vůz s co nejnižší hmotností a co nejlepšími jízdními vlastnostmi. Díky těmto požadavkům a po konzultaci s ostatními kolegy, podílejícími se na tomto projektu, byla zvolena konstrukce příhradového rámu z uhlíkové oceli. Tato konstrukce nejlépe vyhovovala současným finančním a technickým možnostem týmu. Charakteristické rysy příhradového rámu Formule Student a jiných možných alternativ byly již popsány v kapitole 2.2.

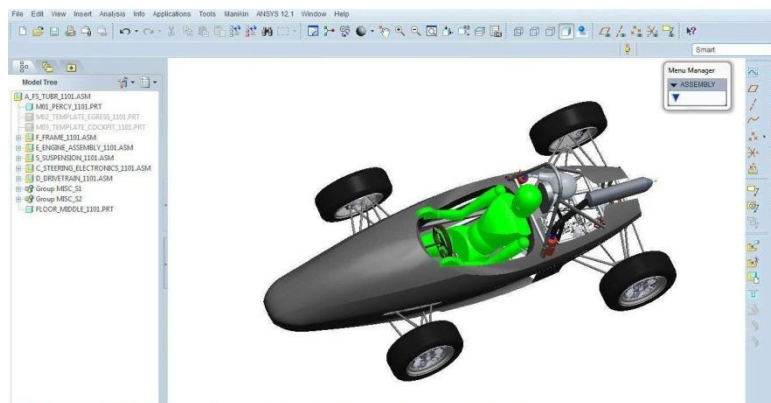
### 4.1 POŽADAVKY NA RÁM FORMULE STUDENT

Hlavním požadavkem je, aby nově zkonstruovaný rám vyhovoval všem požadavkům, jak konstrukčním, tak především bezpečnostním, které jsou popsány v pravidlech (část uvedena v kapitole 3). Jedním z nejdůležitějších parametrů, které jsou u rámu sledovány, je jeho celková hmotnost. Snahou je, aby byla co nejnižší z důvodu menších setrvačných sil, jež výrazně ovlivňují chování formulového vozu na závodní dráze. Zároveň však musí mít rám dostatečnou tuhost, která především zajistí bezpečnost pilota v případné kolizi a má také do značné míry podíl na jízdních vlastnostech. Tyto dva parametry spolu úzce souvisejí a při konstrukci rámu jde o to, nalézt mezi nimi vhodný kompromis. Dalším požadavkem je, aby byla celá konstrukce co nejjednodušší z důvodu dobré vyrobitelnosti i opravitelnosti rámu a také umožňovala snadný přístup k ostatním komponentům použitých ve voze.

### 4.2 POUŽITÍ SYSTÉMU PRO/ENGINEER WF5

„Pro/Engineer WF5 je komplexní modulární systém založený na plně asociativním parametrickém objemovém modelování pomocí konstrukčních prvků. Obsahuje celou řadu nástrojů pro souběžný vývoj, od fáze návrhu průmyslového designu, přes koncepční návrh, detailní konstrukci, analýzu a optimalizaci, tvorbu výrobní dokumentace, NC obrábění a verifikaci. Jakákoliv změna jednotlivých modelů se okamžitě projeví na všech souvisejících dílech díky plné asociativitě a integraci jednotlivých modulů“. [18]

Tento systém se vyučuje na našem ústavu, a to byl jeden z hlavních důvodů, proč byl vybrán pro konstrukci modelu. Dalším bylo, aby byl rám kompatibilní s jinými součástmi použitými do sestavy vozidla Formule Student. Toho bylo rovněž docíleno dohodou o modelování v tomto programu ostatními kolegy zpracovávajícími další součásti do sestavy. Na **Obr. 25** je vidět pracovní prostředí programu Pro/Engineer Wildfire 5.

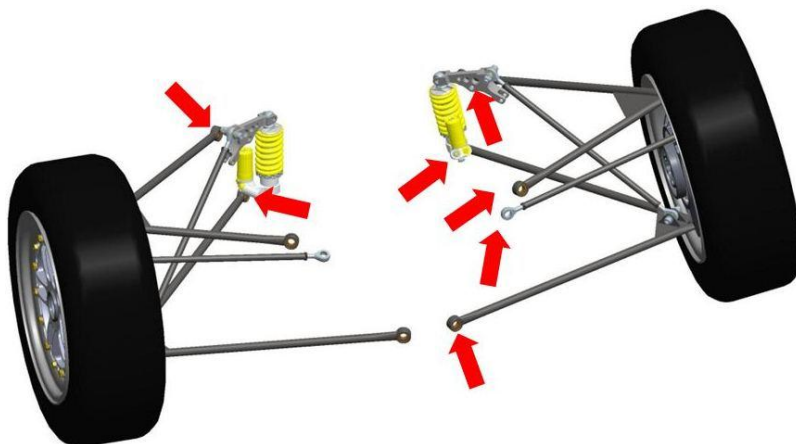


Obr. 25 Prostředí programu Pro/Engineer WF5



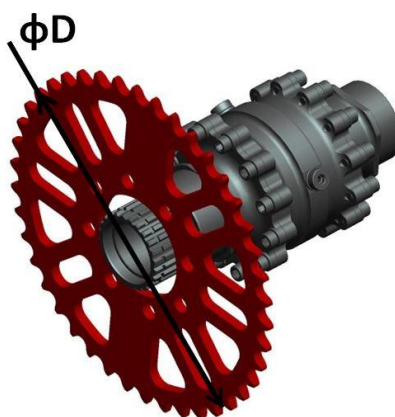
### 4.3 MODEL RÁMU

Při návrhu zadní části rámu bylo jako první potřeba domluvit se s kolegou, konstruujícím přední část rámu, na tvaru hlavního ochranného oblouku. Ten určuje hranici mezi přední a zadní částí rámu, aby bylo možné později spojit obě konstrukční části v jeden celek. Také bylo dohodnuto, že konstrukce rámu bude podřízena geometrii náprav, aby bylo docíleno co nejlepších jízdních vlastností. Na základě výpočtů od kolegy byl dodán souřadný systém a body určující celou geometrii náprav. Pro konstrukci zadní části rámu byly důležité body pro uchycení ramen zadní nápravy, vahadel a odpružení, jak je označeno na **Obr. 26** červenými šipkami.



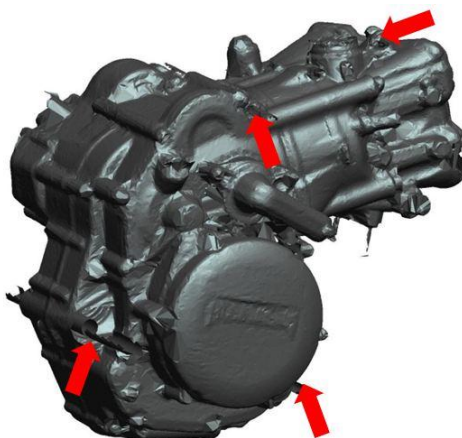
*Obr. 26 Zadní náprava vozu Formule Student*

Další součástí, jejíž polohu a rozměr je potřeba znát, je diferenciál a především průměr rozety sekundárního převodu. Obě tyto součásti jsou znázorněny na **Obr. 27**. Také je potřeba počítat s polohou poloos hnacího řetězce vedoucích z diferenciálu k nábojům kol, aby zde nedošlo ke kolizi s některým z profilů rámu i při pohybu během pružení celé nápravy.



*Obr. 27 Diferenciál s rozetou vozu Formule Student*

Poslední součástí, u které pak bylo potřeba znát její rozměry, přesnou polohu umístění a body pro uchycení (označené červenými šipkami viz **Obr. 28**) byl jednoválcový motor použitý z motocyklu Husaberg FS 570. Ten byl naskenován pomocí 3D skeneru, jímž disponuje Ústav automobilního a dopravního inženýrství, aby byly body úchytnů a celkové rozměry motoru co nejpřesnější.



Obr. 28 Motor z motocyklu Husaberg FS 570

Poloha součástí umístěných v zadní části rámu jako chladič, nádrž, výfuk a jiné budou řešeny kolegy, zabývajícími se právě těmito komponenty až po zkonstruování celého rámu.

Samotná konstrukce byla řešena jako návrh takzvaného prutového modelu. Jde o vymodelování tvaru rámu jen pomocí čar, které představují středové osy použitých profilů. Jako první byly do prostoru, vůči základnímu souřadnému systému, umístěny souřadné systémy (**Coordinate system**) zadní nápravy, motoru a diferenciálu a k nim přiřazeny potřebné body (**Point**). Od bodů úchytů ramen, vahadel a odpružení byl zvolen offset 35 mm od střednic profilů pro budoucí úchyty. Také byla snaha, aby konce úchytů ramen byly umístěny v uzlových místech styku profilů z důvodu přenášení sil od náprav na více profilů rámu. Veškeré zadané souřadné systémy a body jsou uvedeny v **Tab. 2**.

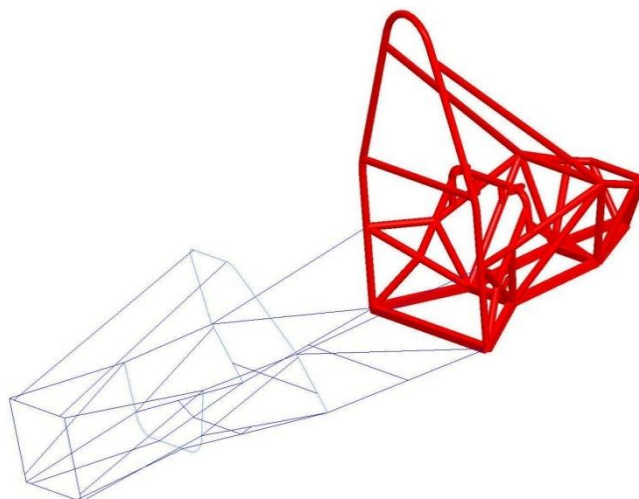
Tab. 2 Souřadné systémy a body komponent

| Název                                            | Body | Kartézské souřadnice [mm] |         |          | Natočení [°] |
|--------------------------------------------------|------|---------------------------|---------|----------|--------------|
|                                                  |      | X                         | Y       | Z        | Osa Y        |
| Souřadný systém vozovky (základní)               |      | 0                         | 0       | 0        |              |
| Souřadný systém zadní nápravy                    |      | -700                      | 0       | 30       |              |
| Body konců ramen zadní nápravy (na jedné straně) | A    | 520                       | 230     | 173      |              |
|                                                  | B    | -100                      | 55      | 80       |              |
|                                                  | D    | 436                       | 230     | 279      |              |
|                                                  | E    | -59                       | 215     | 279      |              |
|                                                  | H    | -124                      | 172,449 | 268,2834 |              |
| Souřadný systém motoru                           |      | -440                      | 0       | 204      | 10           |
| Body úchytů motoru (na jedné straně)             | D2   | -65,114                   | 59      | 0        |              |
|                                                  | D4   | 76,0442                   | 64      | 213,306  |              |
|                                                  | D6   | 229,838                   | 12      | 271,398  |              |
|                                                  | D8   | 151,053                   | 51      | -47,156  |              |
| Souřadný systém diferenciálu                     |      | 10                        | 0       | 224      |              |





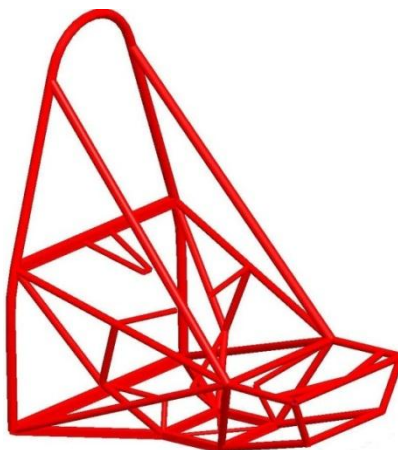
Umístěné body v prostoru byly propojeny čarami (**Curve**) a složitější tvary vytvořeny pomocí skicáře (**Sketch**). Tímto způsobem byl postupně vytvářen celý model zadní části. Pro tvorbu výpočtového modelu by postačoval pouze prutový model, avšak pro zjištění hmotnosti bylo potřeba vytáhnout po čarách skutečné profily. Nejprve byly vytaženy tvary profilů pomocí ploch (funkce **Extrude** nebo **Sweep**). Ty byly následně ořezány v místech styku, kde se protínaly (**Trim**). Poslední operací bylo přiřazení tloušťek stěn jednotlivým profilům (**Thicken**). Na **Obr. 29** jde vidět celý rám, kdy jeho přední část je prutový model a zadní část již zhotovena z profilů. Všechny vývojové varianty jsou znázorněny a popsány v následující kapitole 4.4.



*Obr. 29 Rozpracovaný rám vozidla Formule Student*

#### 4.4 VÝVOJOVÉ VARIANTY

Na **Obr. 30** je první vývojová varianta. V době, kdy byla vytvářena, nebyly ještě známy body pro uchycení zadní nápravy, vahadel a odpružení. Proto byly body orientačně voleny z původního modelu Formule Student, který byl zpracován v loňském roce. Snaha byla tato místa co nejvíce vyztužit z důvodu přenosu sil od náprav na rám. Tato varianta splňuje všechna pravidla, až na místo pro zvedání vozu, které bude řešeno u konečné varianty. Podpory vzpěr hlavního ochranného oblouku se nacházejí vně zbývající strukturu rámu jako samostatný prvek. Uchycení motoru není plně vyřešeno, opět bude patrné až u závěrečné varianty. Zatím je nahrazeno profily s malým průměrem.

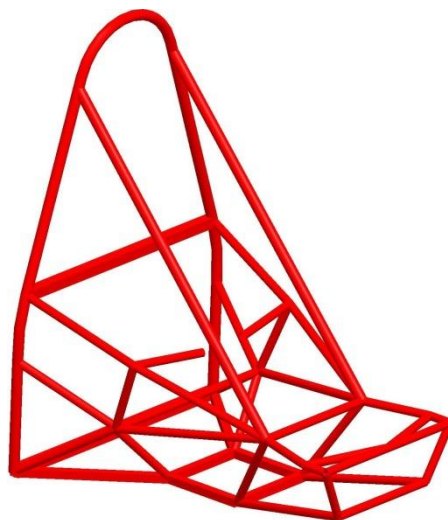


*Obr. 30 Varianta 1*



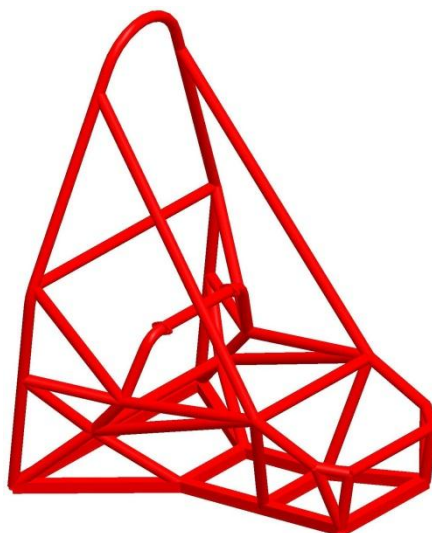


Na **Obr. 31** je druhá vývojová varianta. Zde jsou již zabudovány podpory vzpěr hlavního ochranného oblouku do celé struktury rámu. Odstraněna vzpěra střední části podlahy a změněny profily napojené na hlavní ochranný oblouk.



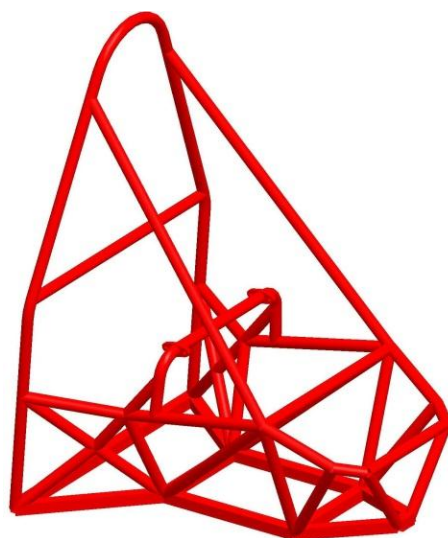
*Obr. 31 Varianta 2*

Na **Obr. 32** je třetí vývojová varianta. U této varianty byl nově znám rozměr rozety sekundárního převodu. Při stávajícím provedení by zasahovala do rámu. Proto byla změněna poloha příčného profilu spojujícího konce vzpěr hlavního ochranného oblouku tak, aby nezasahovala do rozety a zároveň byly přesunuty profily vyztužující úchyty horních ramen náprav v zadní části, z vodorovné polohy do polohy svislé. Poslední úpravou bylo přidání profilu ve tvaru připomínající „hrazdu“ pro úchyty motoru na jeho vrchní straně.

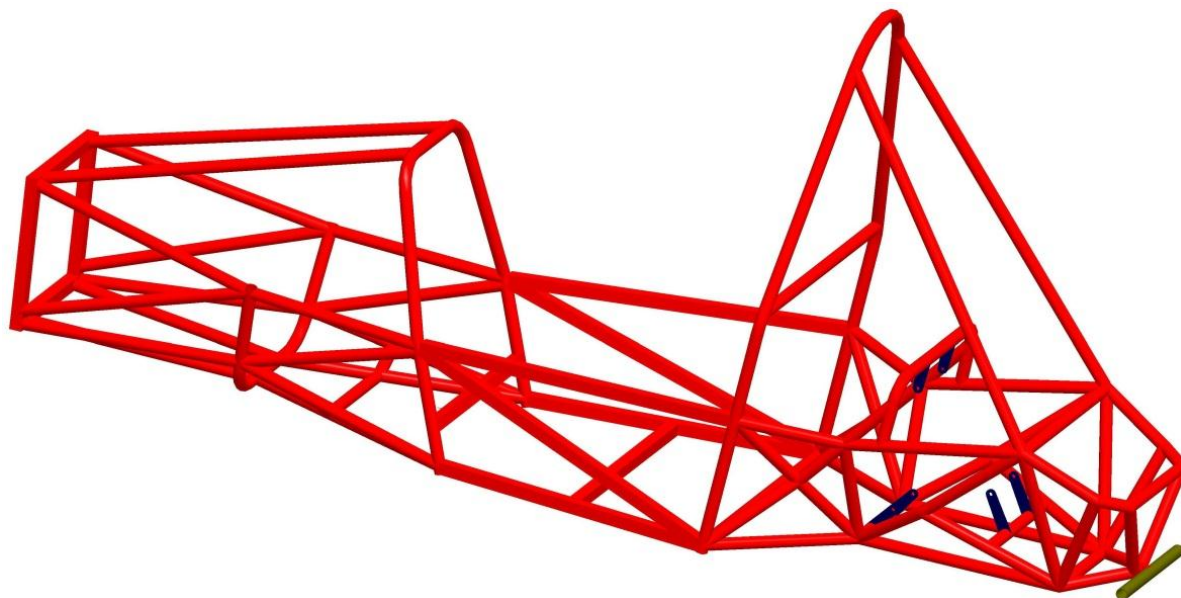


*Obr. 32 Varianta 3*

Na **Obr. 33** je čtvrtá vývojová varianta. Zde byly již známy přesné body pro uchycení náprav, vahadel a odpružení. Nejpatrnější změna se projevila na spodním zadním rameni, kdy byly body pro uchycení posunuty výrazně do středu rámu. V důsledku těchto změn bylo pozměněno další napojení profilů. Zjednodušena byla triangulace pro podpory vzpěr hlavního ochranného oblouku. Odebrány byly profily vyztužující příčný profil pro horní uchycení pásů na hlavním ochranném oblouku. Dále byla vyztužena „hrazda“ pro vrchní uchycení motoru.

*Obr. 33 Varianta 4*

Na **Obr. 34** je pátá, závěrečná, vývojová varianta napojená k přední variantě rámu dodané kolegou. Změněna je opět triangulace profilů podpory vzpěr hlavního ochranného oblouku, především z důvodu uchycení spodního oka tlumiče. Také přibyl příčný profil, ke kterému jsou přivařeny úchyty pro uchycení spodní zadní části motoru. Ostatní jsou přivařeny k horní „hrazdě“ a přednímu příčnému profilu, pro přehlednost jsou označeny modrou barvou. Aby byla splněna všechna pravidla, přibýlo ještě místo pro zvedání vozu označené oranžovou barvou. Chybí zde pouze úchyty náprav a dalších součástí umístěných v zadní části, které budou řešeny kolegy zabývajícími se právě těmito komponentami. Parametry tohoto rámu jsou uvedeny v **Tab. 3**.

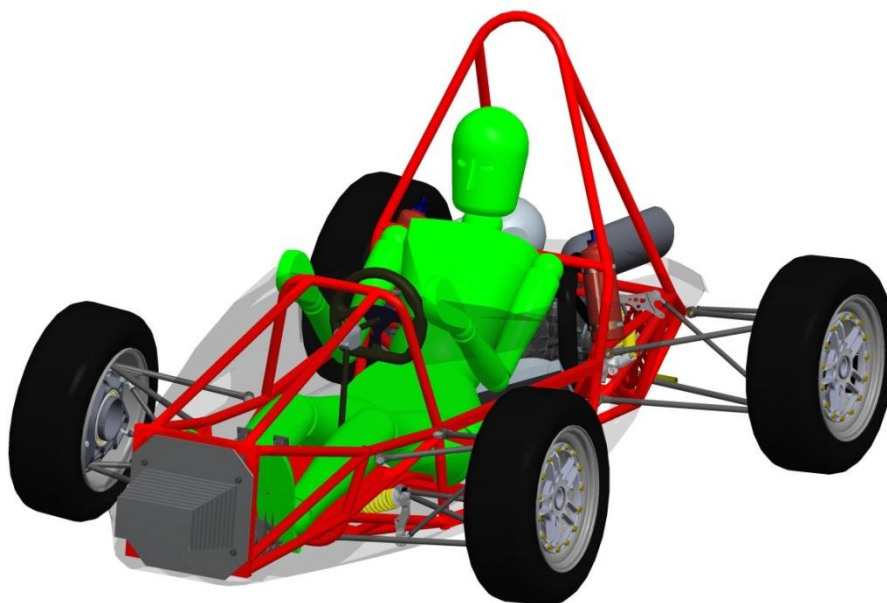
*Obr. 34 Varianta 5*



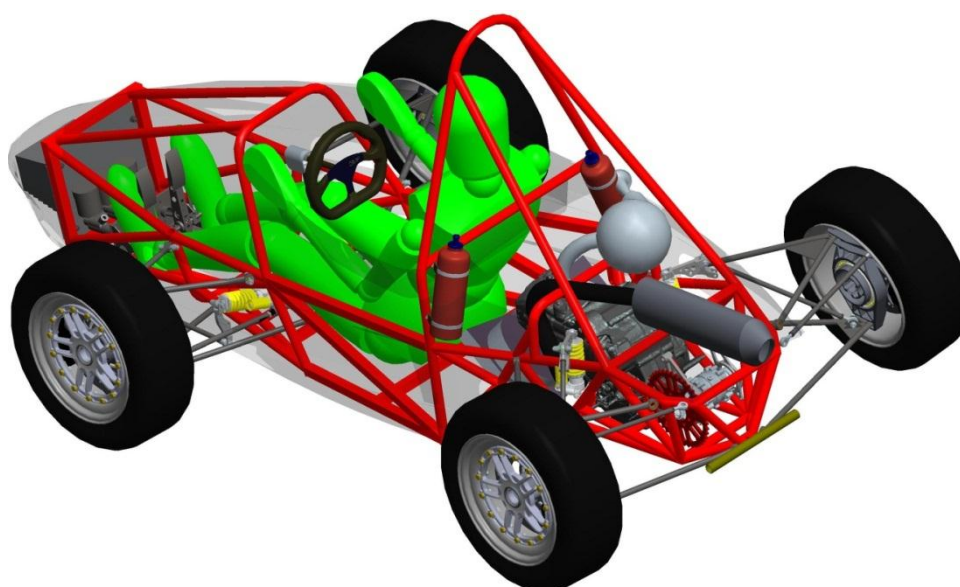
Tab. 3 Parametry - Rám 1

|          |           |
|----------|-----------|
| Délka    | 2403,3 mm |
| Výška    | 1101,7 mm |
| Šířka    | 643,7 mm  |
| Hmotnost | 30,184 kg |
| Materiál | 11 523    |

Po kompletaci zadní a přední části byl začleněn kompletní rám do celkové sestavy Formule Student (viz **Obr. 35** a **Obr. 36**). Je zde vidět umístění motoru, náprav, diferenciálu s rozetou a dalších komponent, které jsem měl v danou chvíli k dispozici.



Obr. 35 Celková sestava – přední pohled



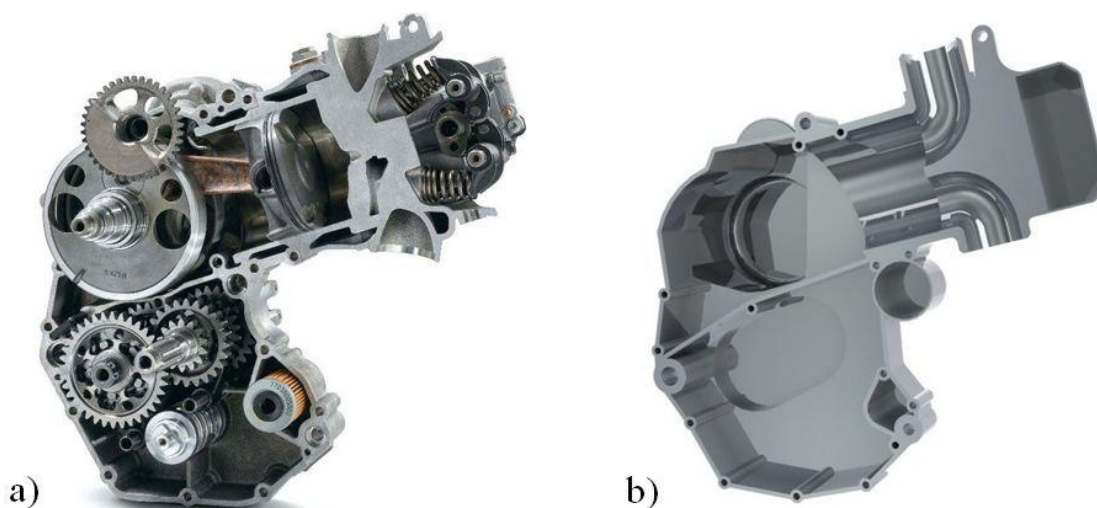
Obr. 36 Celková sestava - zadní pohled



## 4.5 MODEL MOTORU

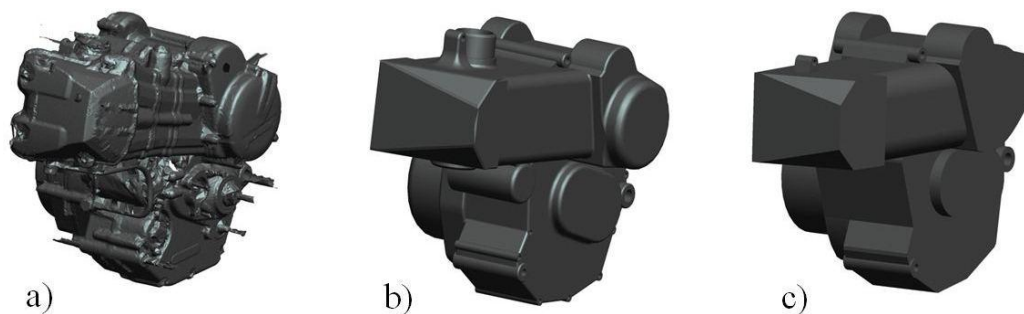
Skutečný motor byl naskenován pomocí 3D skeneru a převeden jako model do programu Pro/Engineer WF5 v datovém formátu STL (Stereolithographie), který je charakterizován tím, že model je tvořen malými ploškami. Ty po načtení do programu Pro/Engineer WF5 nebyly v některých místech celistvé a značné množství jich chybělo. Takový model byl použitelný jen pro zjištění přesných poloh úchytů motoru, jeho rozměrů a zabudování do celkové sestavy vozidla. Pro export do programu Ansys 12.1, kde bude vytvořen výpočtový model je však nepoužitelný. Navíc je naskenovaný model příliš detailní, což není pro použití ve výpočtovém modelu žádoucí. Z tohoto důvodu bylo potřeba vytvořit zjednodušený model naskenovaného motoru.

Nejprve byly na naskenovaný model umístěny body důležité pro určení rozměrů a geometrie. Díky těmto bodům, které byly přeneseny do souřadného systému nově vytvářeného modelu, byl postupně vytvářen celkový tvar vytahováním obrysů (**Extrude**), které byly vytvořeny ve skicáři (**Sketch**). Tímto se postupně docílilo základního tvaru motoru, jehož ostré hrany byly patřičně zaobleny (**Round**). Poté následovala úprava plného modelu na skořepinu (**Shell**), aby model co nejvíce odpovídal skutečnému motoru. Na **Obr. 37** můžeme vidět řez skutečným motorem **a)** a řez vytvořeným modelem **b)**.



Obr. 37 Řez skutečným motorem a modelem

Jak se později ukázalo, při vytváření výpočtového modelu, byl model motoru stále až příliš detailní. Z tohoto důvodu musel být zjednodušen odebráním veškerých zaoblení hran, odstraněny byly otvory pro spojovací šrouby a také sací a výfukový kanál. Na **Obr. 38** je patrný postupný vývoj při vytváření od naskenovaného modelu, přes detailnější model, až ke zjednodušenému, který byl nakonec použit ve výpočtovém modelu.



Obr. 38 Zjednodušování modelu motoru a) naskenovaný model, b) vytvořený model, c) zjednodušený model



## 5 VÝPOČET TORZNÍ TUHOSTI

### 5.1 TORZNÍ TUHOST

Hodnota torzní tuhosti určuje odolnost rámu vůči zkroucení kolem podélné osy formule, vlivem působících sil. Ke stavu, kdy dochází k namáhání rámu krutem během jízdy, patří například přejezd formule přes nerovnost na vozovce či obrubník. Je žádoucí, aby byla hodnota torzní tuhosti co nejvyšší z důvodu správné funkce komponent zajišťujících odpružení náprav. Pokud tomu tak není a rám má příliš nízkou hodnotu torzní tuhosti, dochází vlivem sil k jeho deformaci a tím k ovlivnění nastavení odpružení formule. To negativně působí na jízdní vlastnosti, které se stávají nepředvídatelnými.

Samotná hodnota torzní tuhosti rámu, zvláště pak v poměru k jeho hmotnosti, je vhodná pro porovnání s ostatními torzními tuhostmi jiných rámu. Torzní tuhost celé formule je však dále ovlivněna i komponenty, které jsou na rám uchyceny a mohou jej vyztužit. Jedná se například o motor s převodovkou nebo části karosérie. Také je dopředu počítáno s tím, že střední část rámu, kde sedí pilot, bude vyztužena hliníkovými panely vloženými mezi profily.

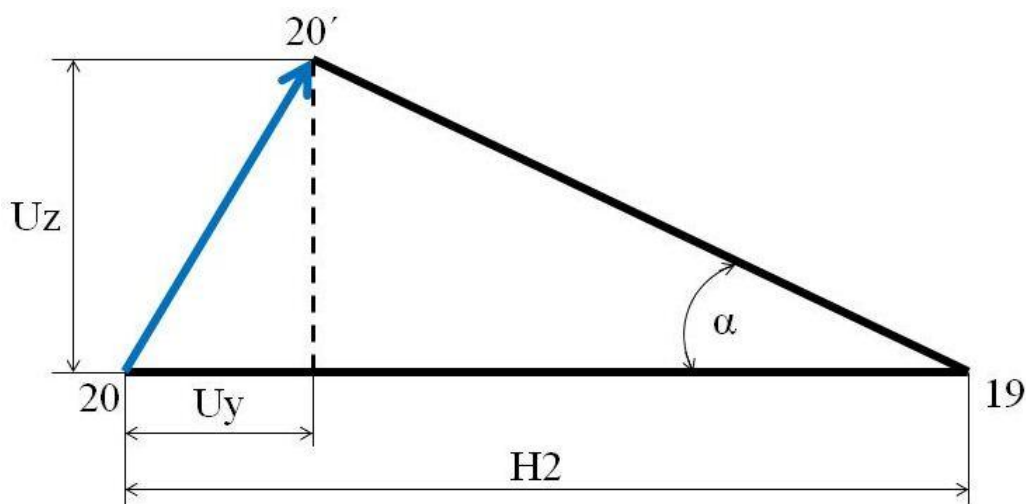
### 5.2 POSTUP VÝPOČTU

Výpočet torzní tuhosti je proveden nejprve pro zjištění torzní tuhosti celého rámu. Následně je pak proveden rozbor torzní tuhosti jednotlivých úseků rámu, aby bylo zjištěno, kde dosahuje nejnižších hodnot.

#### 5.2.1 VÝPOČET TORZNÍ TUHOSTI CELÉHO RÁMU

Výpočet torzní tuhosti celého rámu vychází ze zjednodušeného **Obr. 39** zadní nápravy. Na zadní nápravu o rozchodu kol **H2** bylo aplikováno zatížení, kdy na střed levého zadního kola (bod **20**) působí síla **F = 1000 N** ve směru osy **z**. U středu pravého zadního kola (bod **19**) jsou omezeny posuvy ve všech směrech os **x**, **y**, **z**. Tyto vazby i u ostatních kol jsou uvedeny v následující kapitole **6.3.4**. Po tomto zatížení dochází k pohybu středu levého zadního kola z bodu **20** do polohy bodu **20'**. Tím nastává natočení osy celé zadní nápravy vůči původní poloze o úhel  $\alpha$ , který je vypočítán ze zjištěných posuvů **Uy** a **Uz** ve výpočtovém modelu.

Kromě výpočtu samotné torzní tuhosti bude ještě spočtena torzní tuhost na délku úseku (**L**), představující rozvor náprav a poměr torzní tuhosti na hmotnost rámu.



Obr. 39 Schéma pro výpočet torzní tuhosti při pohledu zezadu na zadní nápravu



POČÍTANÉ HODNOTY BYLY URČOVÁNY PODLE NÁSLEDUJÍCÍCH VZTAHŮ:

Úhel natočení

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U_z}{H_2 - U_y} \Rightarrow \alpha = \arctg \left( \frac{U_z}{H_2 - U_y} \right) \quad (1)$$

Krouticí moment

$$M_k = H_2 \cdot F \quad (2)$$

Torzní tuhost

$$C = \frac{M_k}{\alpha} \quad (3)$$

Torzní tuhost na jednotku délky

$$C_L = C \cdot L \quad (4)$$

Poměr torzní tuhost/hmotnost

$$C_m = \frac{C}{m} \quad (5)$$

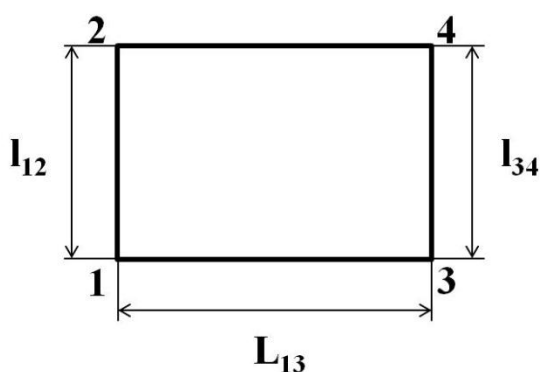
Poměr torzní tuhost na jednotku délky/hmotnost

$$C_{Lm} = \frac{C_L}{m} \quad (6)$$

### 5.2.2 VÝPOČET TORZNÍ TUHOSTI PO ČÁSTECH

Při výpočtu torzní tuhosti rámu po částech jsem vycházel z jednoho zjednodušeného úseku rámu (viz **Obr. 40**). Vzdálenost mezi uzlovými body **1, 3** a **2, 4** je označena jako **L<sub>13</sub>**, která představuje vzdálenost mezi příčnými profily podlahy rámu. Další vzdálenosti jsou mezi uzlovými body **1, 2**, která je označena **l<sub>12</sub>** a body **3, 4** označena **l<sub>34</sub>**. Tyto vzdálenosti představují délky příčných profilů podlahy rámu. Tentokrát se zjišťuje natočení příčných profilů v úseku o dané úhly a určení jejich rozdílu opět pomocí posuvů uzlových bodů **U<sub>y</sub>** a **U<sub>z</sub>** ve výpočtovém modelu popsanych v **Tab 4**. Následně je vypočtena torzní tuhost v tomto úseku a torzní tuhost na jednotku délky tohoto úseku.





Obr. 40 Zjednodušené schéma pro jeden úsek rámu

Tab. 4 Posuvy pro jeden úsek rámu

|          | Posuv ve směru osy <b>y</b> | Posuv ve směru osy <b>z</b> |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>1</b> | $U_{y1}$                    | $U_{z1}$                    |
| <b>2</b> | $U_{y2}$                    | $U_{z2}$                    |
| <b>3</b> | $U_{y3}$                    | $U_{z3}$                    |
| <b>4</b> | $U_{y4}$                    | $U_{z4}$                    |

**POČÍTANÉ HODNOTY BYLY URČOVÁNY PODLE NÁSLEDUJÍCÍCH VZTAHŮ:**

Natočení úseku **12**:

$$U_{y12} = U_{y2} - U_{y1} \quad (7)$$

$$U_{z12} = U_{z2} - U_{z1} \quad (8)$$

$$tg_{\alpha_{12}} = \frac{U_{z12}}{l_{12} - U_{y12}} \Rightarrow \alpha_{12} = \arctg \left( \frac{U_{z12}}{l_{12} - U_{y12}} \right) \quad (9)$$

Natočení úseku **34**:

$$U_{y34} = U_{y4} - U_{y3} \quad (10)$$

$$U_{z34} = U_{z4} - U_{z3} \quad (11)$$

$$tg_{\alpha_{34}} = \frac{U_{z34}}{l_{34} - U_{y34}} \Rightarrow \alpha_{34} = \arctg \left( \frac{U_{z34}}{l_{34} - U_{y34}} \right) \quad (12)$$

Výsledné natočení úseku **13**:

$$\alpha_{13} = \alpha_{12} - \alpha_{34} \quad (13)$$

Torzní tuhost úseku **1-3**:

$$C_{13} = \frac{M_k}{\alpha_{13}} \quad (14)$$

$$C_{L13} = C_{13} \cdot L_{13} \quad (15)$$



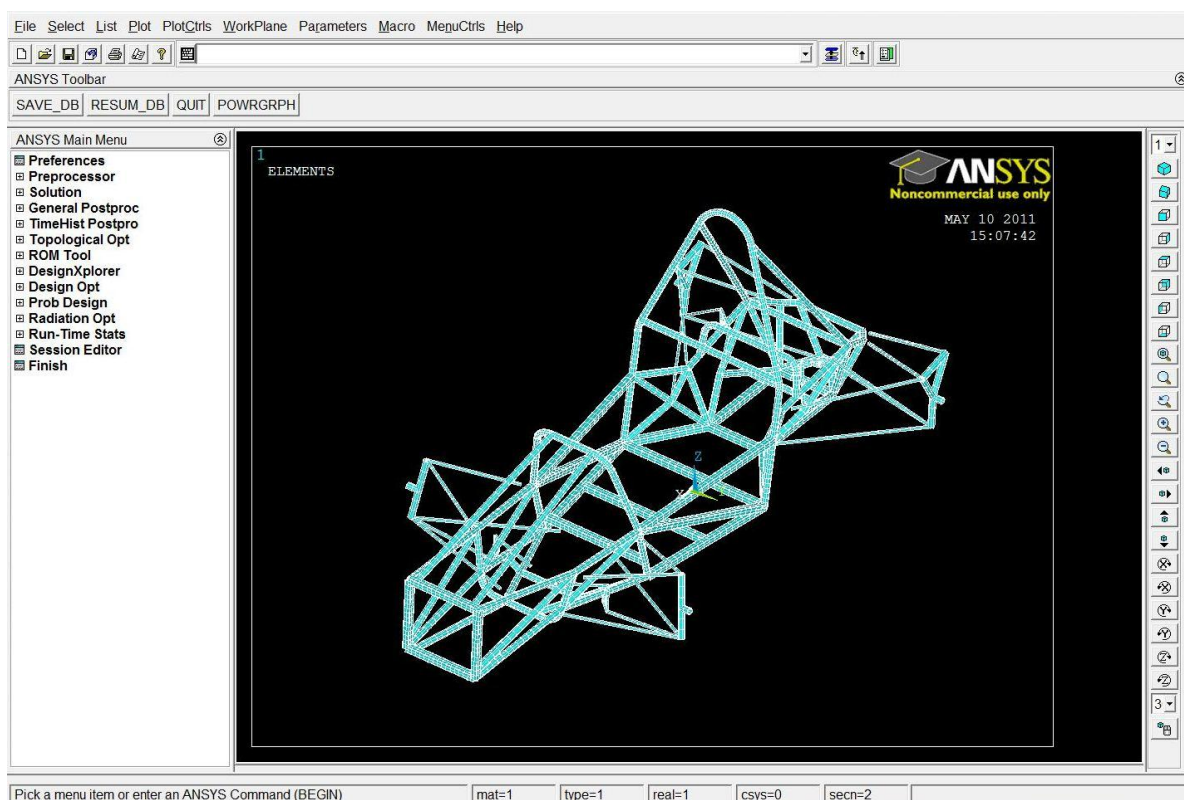
## 6 VÝPOČTOVÝ MODEL

Pro určení torzní tuhosti je potřeba vytvořit výpočtový model pro její simulaci.

### 6.1 POUŽITÍ SYSTÉMU ANSYS 12.1

„Ansys 12.1 je obecně nelineární, multifyzikální program zahrnující strukturální a termodynamickou analýzu, analýzu proudění kontinua, analýzu elektrostatických a elektromagnetických polí a akustické analýzy. Veškeré tyto analýzy lze jednak provádět jednotlivě, ale díky multifyzikálnímu pojetí programu Ansys 12.1 je lze také zahrnout do jediné, společné analýzy“. [16]

V prostředí systému Ansys 12.1 (viz **Obr. 41**) jsou zadávány parametry výpočtového modelu pomocí roletové nabídky umístěné na levé straně. Nacházejí se v ní 3 důležité nabídky. První je **Preprocessor**, kde jsou nastaveny vlastnosti výpočtového modelu. Následuje část **Solution**, kde jsou nastaveny vazby a zatížení výpočtového modelu a proveden samotný výpočet. Třetí nabídkou je pak **General postprocessor** sloužící k přečtení a vyhodnocení výsledků.



Obr. 41 Prostředí programu Ansys 12.1

### 6.2 MOŽNOSTI VÝPOČTU

Vytvoření výpočtového modelu mohlo být řešeno třemi různými způsoby:



### PRUTOVÝ MODEL (POUŽITÍ ELEMENTŮ TYPU BEAM)

Výpočtový model vytvořený pomocí elementů typu **Beam** a **Link**. K tomu je vhodné použít prutový model složený z čar, které představují osy budoucích profilů. Jednotlivé čáry prutového modelu jsou rozděleny na menší části, určují tak velikost elementů použitých pro vysíťování, ke kterým jsou přiřazeny materiálové charakteristiky a průřezy profilů. Výhodou tvorby tohoto výpočtového modelu je jeho relativní jednoduchost a menší časová náročnost na výpočet. Nevýhodou jsou naopak nevypovídající hodnoty napětí v uzlových místech styku dvou profilů a jejich stěn.

### MODEL TVOŘENÝ PLOCHAMI (POUŽITÍ ELEMENTŮ TYPU SHELL)

Výpočtový model vytvořený pomocí skořepinových elementů **Shell**. K tomu je zapotřebí použít model tvořený střednicovými plochami budoucích profilů, které nemají zadanou tloušťku. Těmto plochám jsou ve výpočtovém modelu pomocí konstant při síťování přiřazeny jednotlivé tloušťky stěn profilů. Tento výpočtový model již dává korektní výsledky o napětí ve stěnách. V uzlových místech styku profilů je o něco přesnější, než předchozí model, avšak výsledná napětí stále neodpovídají skutečným hodnotám. Výpočet je časově náročnější.

### OBJEMOVÝ MODEL (POUŽITÍ ELEMENTŮ TYPU SOLID)

Výpočtový model vytvořený pomocí elementů typu **Solid**. K tomu je zapotřebí použít model tvořený objemy, který odpovídá skutečnému rámu, kdy mají profily patřičnou tloušťku stěny. Tento výpočtový model by poskytl již reálné informace jak o napětí ve stěnách, tak i ve styku použitých profilů. S použitím elementů Solid by však výpočtová síť modelu musela být příliš jemná, což by tím pádem vedlo k velkému počtu elementů spojenému až s nemožností provést výpočet s dostupným hardwarovým vybavením.

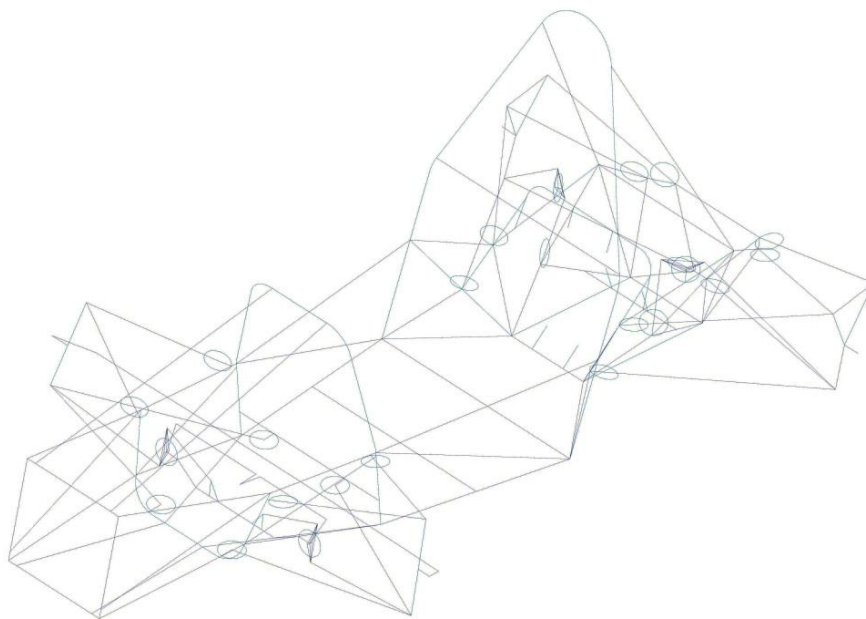
Zůstaly varianty tvořené elementy Beam společně s Link nebo Shell. Nakonec bylo rozhodnuto vytvoření výpočtového modelu z elementu Beam a Link namísto Shell. Jedním z důvodů bylo, že při výpočtu torzní tuhosti budou z výpočtového modelu zjišťovány především posuvy v uzlových bodech. Dalším důvodem je menší časová náročnost výpočtu, což je příznivé vzhledem k tomu, že budou vytvořeny dva výpočtové modely rámu (rám mé konstrukce a rám použitý v aktuální verzi Formule Student) a na nich počítány různé varianty výztuh.

## 6.3 TVORBA VÝPOČTOVÉHO MODELU

Samotná tvorba výpočtového modelu se skládá z jednotlivých kroků, které na sebe postupně navazují a jsou popsány v následujících podkapitolách.

### 6.3.1 ÚPRAVA MODELU

Prutový model v programu Pro/Engineer WF5 musí obsahovat nejen samotnou geometrii celého rámu, ale i geometrii přední a zadní nápravy, jež jsou potřebné pro výpočet torzní tuhosti. Byly zde také vytvořeny zjednodušené úchyty náprav jako obvyčejné napojení čarami od konce ramen náprav k samotnému rámu, které jsou vidět v kroužcích (viz **Obr. 42**) a dále byla upravena vahadla, aby funkčně vyhovovala ve výpočtovém modelu. Poslední úpravou byla příprava úchytů motoru taktéž nahrazením jednoduchými čarami.

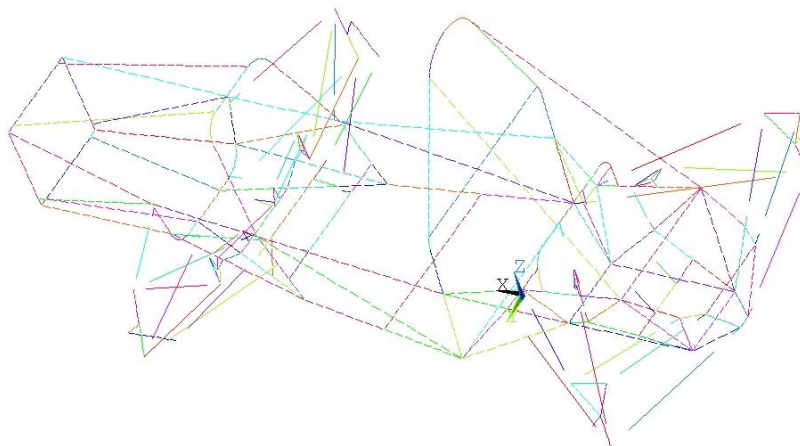


Obr. 42 Prutový model rám v programu Pro/Engineer WF5

Dalším krokem, který bylo potřeba udělat, bylo převedení „drátěného modelu“ z modelovacího programu Pro/Engineer WF5 do výpočtového programu Ansys 12.1. K tomuto posloužilo uložení modelu do univerzálního formátu IGES (Initial Graphics Exchange Specification) jako wireframe, který umožnil importovat veškerou geometrii rámu do programu Ansys 12.1.

Po načtení geometrie do programu Ansys 12.1 je potřeba další úprava prutového modelu. Jde o vymazání čar pomocné geometrie, jako jsou například osy a jiné pomocné čáry, které byly při importu taktéž načteny a nejsou ve výpočtovém modelu potřeba. Jednou z nejdůležitějších věcí je pak zkontrolovat, zda na sebe navazují jednotlivé čáry prutového modelu svými konci v místech styku s ostatními čarami, takzvaných uzlech. Pokud tomu tak není, výpočtový model by se po vytvoření sítě a započetí výpočtu nechoval celistvě a rozpadl se právě v těchto místech. Pokud tedy nejsou navazující čáry prutového modelu ve styku svými konci v uzlech, musí toho být docíleno. Buďto příkazem **Glue**, pokud chceme čáry slepit dohromady nebo příkazem **Partition**, když chceme čáry vzájemně rozdělit.

Po těchto operacích je prutový model, jenž je vidět na **Obr. 43**, připraven pro vytvoření výpočtové sítě.



Obr. 43 Prutový model rámu v programu Ansys 12.1

Pro další výpočtové modely byl použit také model motoru, který byl k rámu samostatně načten ze souboru ANF, který byl vytvořen z formátu IGES. Díky definované poloze motoru vůči souřadnému systému rámu byl motor po načtení umístěn tak, jak tomu bylo v celkové sestavě vozu a nemuselo s ním být dodatečně manipulováno.

Při tvorbě výpočtového modelu s výztuhami, bylo potřeba vytvořit plochy mezi čarami (budoucími profily). Toho bylo docíleno příkazem **Create-Areas** pomocí čar v nabídce **Modeling**.

### 6.3.2 NASTAVENÍ PARAMETRŮ

Při vytváření výpočtového modelu je důležité nastavit veškeré parametry tak, aby se výsledný model co nejvíce blížil reálnému stavu. Jde o vhodný výběr typu elementů pro síťování, zadání materiálových vlastností, reálných konstant a tvarů použitých profilů.

Z důvodu co nejlepšího nasimulování pro výpočet jsou v modelu rámu připojeny i nápravy. Aby nám však jejich deformace neovlivňovala výsledky výpočtu, musíme zajistit jejich dokonalou tuhost. Té lze docílit buďto použitím elementů typu MPC, které jsou dokonale tuhé, nebo při volbě charakteristiky materiálu zvýšit modul pružnosti oceli o několik řádů. Zvolena byla druhá možnost, a to zvýšení modulu pružnosti o šest řádů oproti oceli na hodnotu  $2,1 \cdot 10^{11}$  MPa. Všechny tyto parametry byly zadány v podnabídkách programu nazvaném **Preprocessor** a jsou popsány v následujících odstavcích. Zde jsou použité typy elementů, jejichž podrobnější popisy jsou uvedeny v nápovědě programu Ansys 12.1 [22]:

#### BEAM 189 (3-D 3-NODE BEAM)

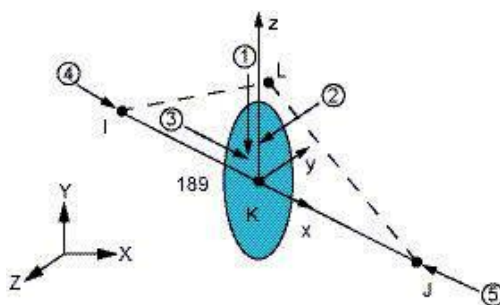
Element (viz **Obr. 44**) je vhodný pro analýzy tenkostěnných a mírně tlustostěnných prutových konstrukcí. Jde o kvadratický 3-uzlový element. Ve výchozím nastavení má v každém uzlu 6 stupňů volnosti (posuvy v ose x, y, z a rotace kolem těchto os).

Tímto elementem byl vysíťován celý rám a má tento materiálový model:

- Strukturní, lineární, elastický, izotropický
- Modul pružnosti:  $E_x = 2,1 \cdot 10^5$  MPa
- Poissonovo číslo:  $\mu = 0,3$

Také byly tímto elementem vysíťovány těhlice a úchyty náprav a motoru s těmito materiálovými charakteristikami:

- Strukturní, lineární, elastický, izotropický
- Modul pružnosti:  $E_x = 2,1 \cdot 10^{11}$  MPa
- Poissonovo číslo:  $\mu = 0,3$



Obr. 44 Element typu Beam 189 [22]

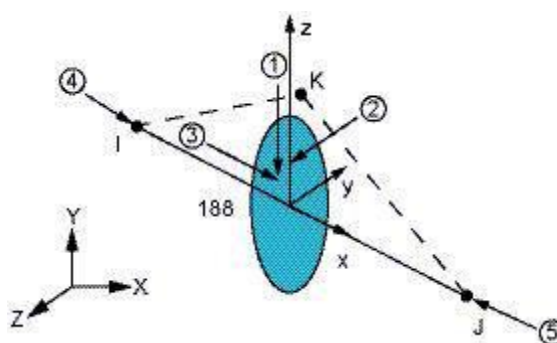


### BEAM 188 (3-D 2-NODE BEAM)

Element (viz **Obr. 45**) je vhodný pro analýzy tenkostěnných a mírně tlustostěnných prutových konstrukcí. Jde o 3-uzlový element v prostoru. Ve výchozím nastavení má v každém uzlu 6 stupňů volnosti (posuvy v ose x, y, z a rotace kolem těchto os).

Tímto elementem byly vysíťovány prutové náhrady (nazývané také „ježek“) pro přichycení motoru k úchytům v rámu a má tento materiálový model:

- Strukturní, lineární, elastický, izotropický
- Modul pružnosti:  $E_x = 2,1 \cdot 10^{11}$  MPa
- Poissonovo číslo:  $\mu = 0,3$



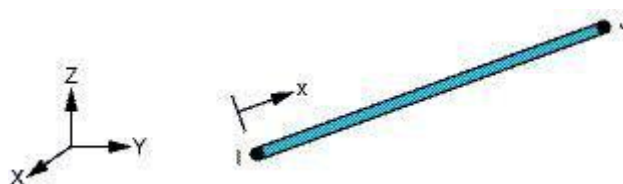
Obr. 45 Element typu Beam 188 [22]

### LINK 8 (3-D SPAR)

Element (viz **Obr. 46**), který může být použit jako podpěry, visutá lana, pružiny atd. Jde o prostorový 2-uzlový element s třemi stupni volnosti v každém uzlu (posuvy v ose x, y, z), schopný přenášet napětí jen v jeho ose (tah-tlak). Na koncích těchto elementů se nacházejí sférické vazby.

Tímto elementem byla vysíťována ramena nápravy, vahadla a odpružení. Kromě materiálových charakteristik vyžadoval tento prvek zadání reálné konstanty v podobě příčného průřezu použitého profilu a počáteční napětí:

- Strukturní, lineární, elastický, izotropický
- Modul pružnosti:  $E_x = 2,1 \cdot 10^{11}$  MPa
- Poissonovo číslo:  $\mu = 0,3$
- Příčný průřez:  $AREA = 63,6 \text{ mm}^2$
- Počáteční napětí:  $ISTRN = 0 \text{ MPa}$



Obr. 46 Element typu Link 8 [22]

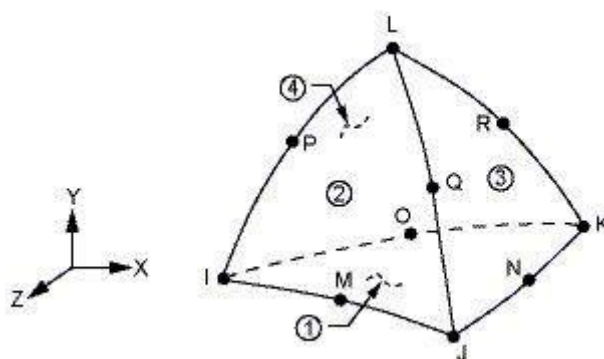


### SOLID 92 (3-D 10-NODE TETRAHEDRAL STRUCTURAL SOLID)

Element (viz **Obr. 47**) má kvadratický posuv a je vhodný pro vysíťování tuhých těles vymodelovaných v různých CAD programech. Jde o 10-uzlový element s třemi stupni volnosti v každém uzlu (posuvy v ose  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ).

Tímto elementem byl vysíťován motor a má tento materiálový model:

- Strukturní, lineární, elastický, izotropický
- Modul pružnosti:  $E_x = 68\,000\text{ MPa}$
- Poissonovo číslo:  $\mu = 0,33$



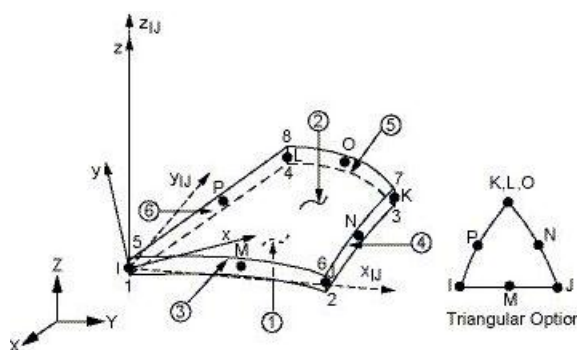
Obr. 47 Element typu Solid 92 [22]

### SHELL 93

Element (viz **Obr. 48**) se hodí obzvláště použít i pro zakřivené skořepiny. Jde o 8-uzlový prvek se 6 stupni volnosti v každém uzlu (posuvy v ose  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a rotace kolem těchto os).

Tento element byl použit pro vysíťování výztuh rámu nahrazujících hliníkové panely. Kromě materiálových charakteristik vyžadoval tento prvek zadání reálné konstanty v podobě tloušťky stěny:

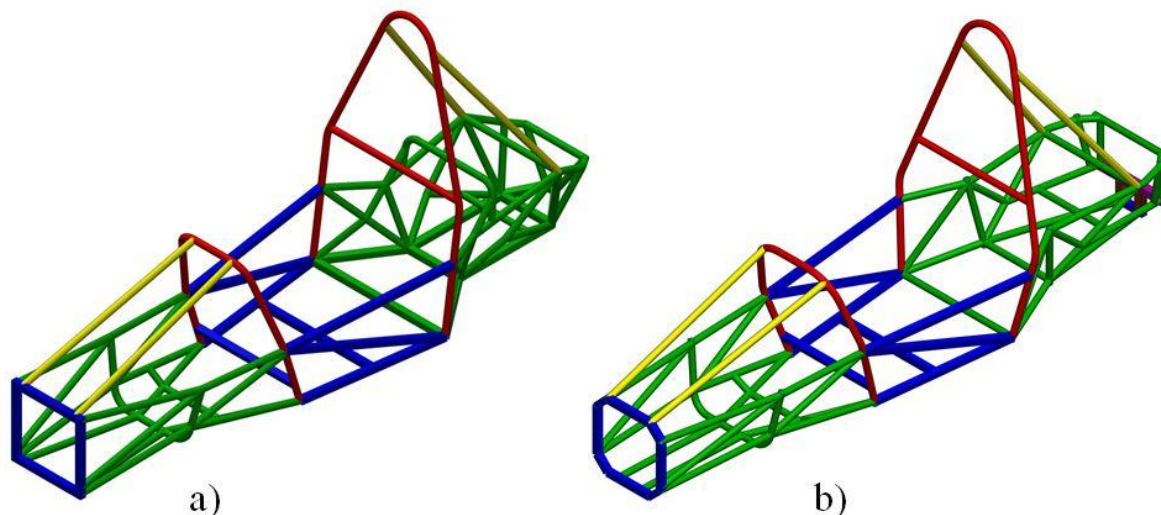
- Strukturní, lineární, elastický, izotropický
- Modul pružnosti:  $E_x = 68\,000\text{ MPa}$
- Poissonovo číslo:  $\mu = 0,33$
- Tloušťka stěny:  $TK = 2\text{ mm}$



Obr. 48 Element Shell 93 [22]



Následovalo nastavení rozměrů a tvarů použitých profilů na rámu. Ty byly nastaveny v menu **Sections** podnabídce **Beam**. Rozložení použitých profilů na mnou navrženém rámu (**Rám 1**) a rámu použitém v nynější Formuli Student (**Rám 2**) je barevně vidět na **Obr. 49** a jejich rozměry jsou patrné v **Tab. 5**. Zbylé profily použité na nápravy a jiné prvky nesouvisející s rámem nejsou důležité a to vzhledem k tomu, že jsou z dokonale tuhého materiálu a tím pádem neovlivňuje jejich rozměr výpočet ani konečné výsledky.



Obr. 49 Rozložení profilů a) Rám 1 b) Rám 2

Tab. 5 Použité profily - Rám 1 a Rám 2

| PROFIL | ROZMĚR |          | BARVA  |
|--------|--------|----------|--------|
|        | ØDxT   | Ø25x2,5  | Red    |
|        |        | Ø25x1,75 | Yellow |
|        |        | Ø25x1,5  | Green  |
|        | □SxT   | □25x1,25 | Blue   |
|        |        | □30x2    | Purple |
|        |        |          |        |
|        | LxLxT  | 25x25x2  | Brown  |
|        |        |          |        |
|        |        |          |        |

### 6.3.3 TVORBA VÝPOČTOVÉ SÍTĚ

Pokud jsou nastaveny veškeré potřebné parametry, může být vytvořena výpočtová síť (**Meshing**). Nejprve bylo potřeba rozdělit každou čáru prutového rámu na potřebnou velikost, která po vysítování určuje velikost jednoho elementu použitého v síti. U elementu **Link**, použitého pro vysítování náprav (jednotlivá ramena náprav, vahadla a odpružení), bylo důležité, aby nebyl rozdělen na více elementů a zůstal pouze jeden. Je to dáno tím, že na konci elementu jsou sférické vazby a pokud by bylo rameno nápravy složeno z více elementů,

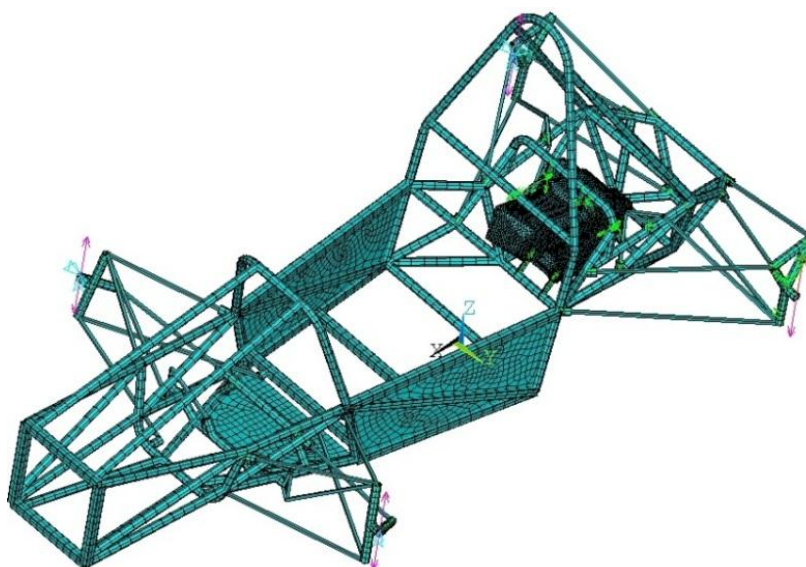


chovalo by se jako lano. Pro přichycení motoru k úchytům motoru byla použita prutová náhrada (tzv. „ježek“) pomocí vhodného makra. Veškeré vysítované části a parametry použitých elementů, jejich velikostí a materiálu jsou uvedeny v **Tab. 6**. Použité profily byly již uvedeny v kapitole **6.3.2**.

Tab. 6 Použité typy elementů na jednotlivé části rámu

| Část modelu                           | Typ elementu | Velikost elementu     | Materiál          |
|---------------------------------------|--------------|-----------------------|-------------------|
| Celý rám                              | Beam 189     | 50, 40, 30            | ocel              |
| Tyč řízení                            | Beam 189     | 40                    | tuhý              |
| Úchyty náprav                         | Beam 189     | 20                    | tuhý              |
| Úchyty motoru                         | Beam 189     | 20                    | tuhý              |
| Těhlice                               | Beam 189     | 20                    | tuhý              |
| Ramena náprav                         | Link 8       | = délka síťované čáry | tuhý              |
| Odpružení                             | Link 8       | = délka síťované čáry | tuhý              |
| Prutové náhrady pro přichycení motoru | Beam 188     | = délka síťované čáry | tuhý              |
| Motor                                 | Solid 92     | 10                    | Hliníková slitina |
| Výztuhy rámu                          | Shell 93     | 20                    | Hliníková slitina |

Kompletně vysítovaný výpočtový model rámu je na **Obr. 50**. Je zde vidět nejen samotný rám, ale i hliníkové panely použité jako výztuhy rámu a motor.



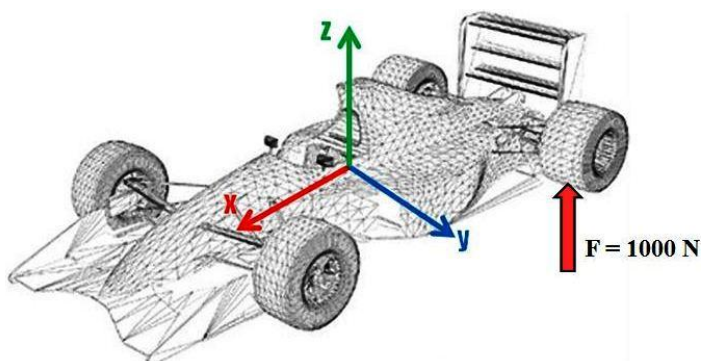
Obr. 50 Vysítovaný model v programu Ansys 12.1

#### 6.3.4 ZADÁNÍ OKRAJOVÝCH PODMINEK

Pro samotné dokončení výpočtového modelu je důležité správné nastavení okrajových podmínek (v podnabídce **Solution**). V případě výpočtového modelu vytvořeného pro výpočet torzní tuhosti jde o vazby pro omezení posuvů na třech kolech a zatížení čtvrtého kola konkrétní silou ( $F = 1000\text{N}$ ). Vazby jsou nastaveny tak, aby výpočtový model co nejvíce odpovídal reálnému stavu. Přidáním vazeb jsme schopni zamezit posuvu ve třech směrech os  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a také tří rotací kolem těchto os. Vazby odebírající stupně volnosti a působící síla byly zadány v klíčovém bodech. Souřadný systém použitý ve výpočtovém modelu je patrný na



**Obr. 51** a zadané vazby uvedeny v **Tab. 7**, kde byly omezeny jen posuvy, které jsou vyznačeny „X“.



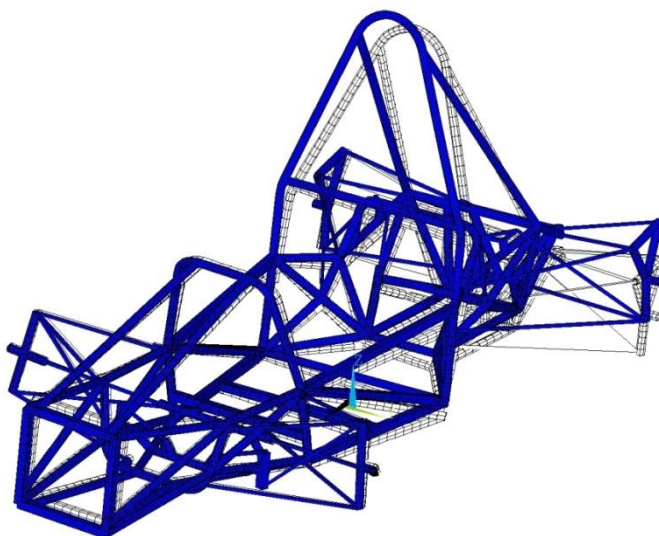
*Obr. 51 Souřadný systém výpočtového modelu [17]*

*Tab. 7 Nastavení vazeb pro omezení posuvu a zatížení na nápravách*

| Kolo         | Posuv v ose x | Posuv v ose y | Posuv v ose z | Síla v ose z |
|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| Pravé přední |               | X             | X             |              |
| Levé přední  |               |               | X             |              |
| Pravé zadní  | X             | X             | X             |              |
| Levé zadní   |               |               |               | F = 1000N    |

### 6.3.5 PROVEDENÍ VÝPOČTU

Nastavením okrajových podmínek je výpočtový model připraven na výpočet. Ten je spuštěn v podnabídce **Solution** nazvané **Solve**. Po proběhnutí výpočtu je v podnabídkách **General Postprocessor** možnost vypsání požadovaných hodnot (v našem případě hodnoty posuvů v uzlových bodech  $U_y$  a  $U_z$ ) a jiných různých jak numerických, tak grafických výsledků. Na **Obr. 52** je vidět deformovaný tvar vypočteného rámu ve zvětšeném měřítku, kdy průhledná část představuje nezatížený rám a modrá zdeformovaný rám po zatížení silou na levé zadní kolo.



*Obr. 52 Deformace rámu po zatížení*



## 7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V následujících kapitolách jsou popsány výsledky výpočtů a jejich vyhodnocení.

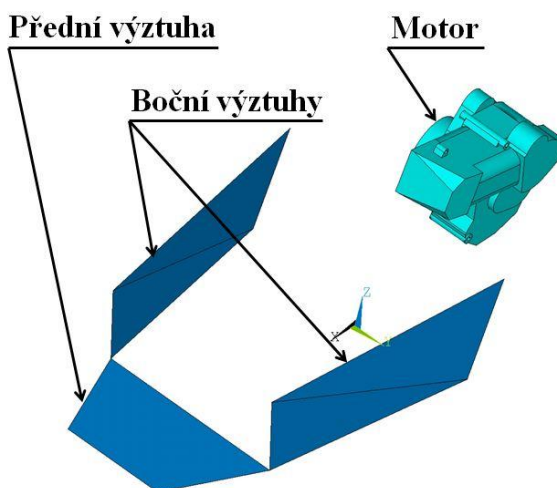
Byly řešeny dvě konstrukce rámu. První je mnou navržená konstrukce popsána v kapitole 4, pro kterou byl vytvořen výpočtový model a je značena jako **Rám 1**. Druhá je konstrukce aktuálně použitá na prvním voze Formule Student zkonstruovaném a sestavovaném na našem ústavu. Tu jsem dostal k dispozici jako 3D model zpracovaný v programu Pro/Engineer WF5 od svých kolegů, kteří ji vyvinuli, a bylo potřeba zjistit její torzní tuhost. Proto jsem vytvořil její výpočtový model stejným postupem jako u Rámu 1, kdy byl použit stejný materiál a podobné profily, které byly již uvedeny v kapitole 6.3.2. Tato konstrukce je značena jako **Rám 2**.

Vzhledem k velkému množství dat a výpočtů byl ke zpracování použit program MS Excel, který výrazně zrychlil výpočetní operace.

### 7.1 CELKOVÁ TORZNÍ TUHOST

Tento výpočet byl proveden podle postupu uvedeném v kapitole 5.2.1. Kromě výpočtu torzní tuhosti samotného rámu byly do výpočtu zahrnuty také komponenty, které budou dodatečně vyztužovat rám a se kterými bylo od začátku počítáno. Jedná se především o motor a uvažované hliníkové panely, jež mají za úkol vyztužit prostor pilota patrné na **Obr. 53**. Výpočtové modely, které byly použity a na nich sledovány účinky jednotlivých výztuh, jsou vypsány v **Tab 8**.

Výsledky obsahují torzní tuhost, torzní tuhost na jednotku délky a pak poměry těchto hodnot vůči hmotnostem rámu (u konfigurací, kde je použit motor, se hmotnost nezjišťuje, protože motor není brán za konstrukční prvek pro vyztužení rámu, který by byl jeho součástí).



Obr. 53 Výztuhy rámu





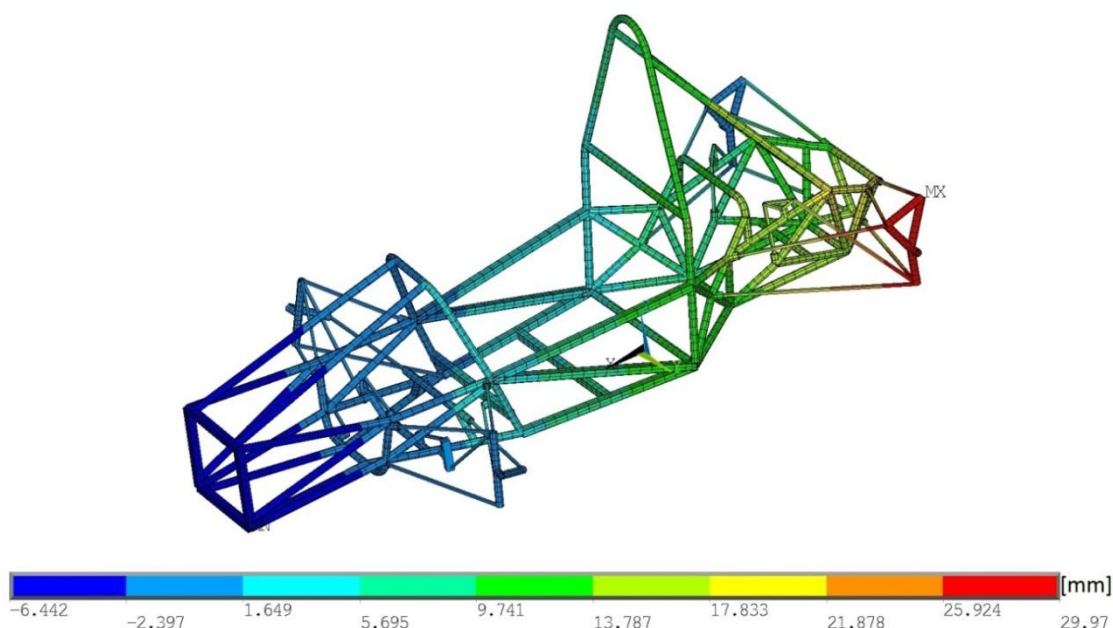
Tab. 8 Konfigurace výpočtových modelů

| Konfigurace výpočtového modelu       | Zkratka konfigurace |
|--------------------------------------|---------------------|
| Rám samotný                          | RS                  |
| Rám + přední výztuha                 | R+P                 |
| Rám + boční výztuha                  | R+B                 |
| Rám + přední + boční výztuha         | R+P+B               |
| Rám + motor                          | R+M                 |
| Rám + motor + přední výztuha         | R+M+P               |
| Rám + motor + boční výztuha          | R+M+B               |
| Rám + motor + přední + boční výztuha | R+M+P+B             |

### RÁM 1

Z výpočtových modelů byly odečteny hodnoty posuvů uzlových bodů ( $U_y$  a  $U_z$ , jež jsou ukázány na rámu v **Obr. 54**) zafixovaného pravého kola zadní nápravy a zatíženého levého kola zadní nápravy silou  $F$ , které jsou pro jednotlivé konfigurace výpočtových modelů uvedeny v **Tab. 10**. V **Tab. 9** jsou uvedeny zadané hodnoty použité ve výpočtech, které jsou shodné pro všechny konfigurace výpočtových modelů vyjma jejich hmotností. Veškeré dílčí a konečné výsledky jsou uvedeny v **Tab. 11**. Nejprve byly vypočteny výpočtové modely postupně jen s výztuhami a poté k nim byl přidán motor, který vyztužuje zadní část a bude pokaždé součástí vozu. Graficky znázorněné výsledky jsou vidět na **Obr. 55** pro torzní tuhost a na **Obr. 56** pro torzní tuhost na jednotku délky.

Výsledek torzní tuhosti samotného rámu má hodnotu  $808,89 \text{ Nm/}^\circ$ , což je poměrně dobrý výsledek s porovnáním hodnoty loňského rámu EVO1 u Kamila Krkošky, dosahující  $701,1 \text{ Nm/}^\circ$  (nemusí být porovnáváno s torzní tuhostí na jednotku délky, protože mají stejný rozvor) viz **[19]**. Z výsledků torzní tuhosti je dále patrné, že nejvýrazněji přispívá k jejímu zvýšení zabudovaný motor, se kterým dosahuje hodnoty  $856,46 \text{ Nm/}^\circ$ . Dalšího zvýšení pak dosáhneme použitím bočních výztuh z hliníkových panelů, kdy vzroste torzní tuhost oproti samotnému rámu na  $851,35 \text{ Nm/}^\circ$ . Jako málo účinné se pak ukazuje použití uvažované přední výztuhy, se kterou dává rám torzní tuhost s hodnotou  $819,08 \text{ Nm/}^\circ$ .



Obr. 54 Posuv uzlových bodů ve směru osy z - Rám 1





Tab. 9 Zadané hodnoty - Rám I

|                                                      |        |
|------------------------------------------------------|--------|
| Působící síla v ose z <b>F</b> [N]                   | 1000   |
| Rozchod kol zadní nápravy <b>H2</b> [mm]             | 1172,4 |
| Rozvor náprav <b>L</b> [mm]                          | 1600   |
| Hmotnost rámu samotného <b>m</b> [kg]                | 30,184 |
| Hmotnost rámu + přední výztuha <b>m</b> [kg]         | 30,728 |
| Hmotnost rámu + boční výztuha <b>m</b> [kg]          | 32,028 |
| Hmotnost rámu + přední + boční výztuha <b>m</b> [kg] | 32,572 |

**V NÁSLEDUJÍCÍCH TABULKÁCH JSOU UVEDENY POSUVY BODŮ, DÍLČÍ A KONEČNÉ VÝSLEDKY:**

Tab. 10 Posuvy u zadní nápravy - Rám I

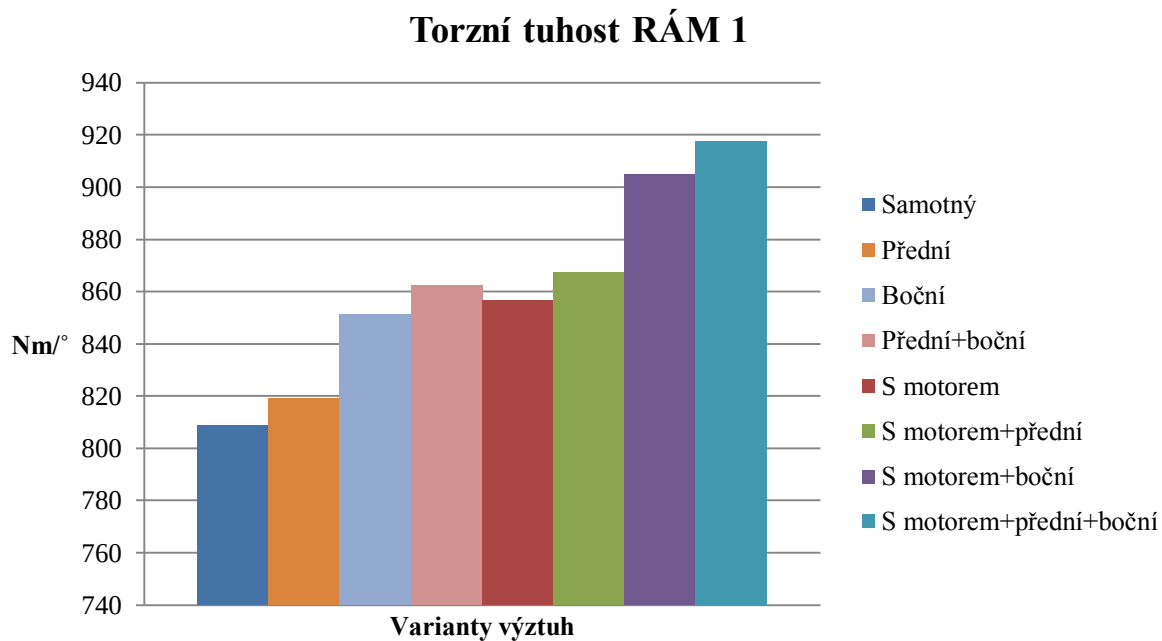
| Číslo uzlového bodu                  | Posuvy uzlových bodů [mm] |                      |
|--------------------------------------|---------------------------|----------------------|
|                                      | <b>U<sub>y</sub></b>      | <b>U<sub>z</sub></b> |
| Rám samotný                          |                           |                      |
| 2460                                 | -0,000010478              | 29,664               |
| 2525                                 | 0                         | 0                    |
| Rám + přední výztuha                 |                           |                      |
| 2460                                 | -0,0000044244             | 29,295               |
| 2525                                 | 0                         | 0                    |
| Rám + boční výztuha                  |                           |                      |
| 2460                                 | -0,0000007888             | 28,184               |
| 2525                                 | 0                         | 0                    |
| Rám + přední + boční výztuha         |                           |                      |
| 2460                                 | -0,00000011771            | 27,821               |
| 2525                                 | 0                         | 0                    |
| Rám + motor                          |                           |                      |
| 2460                                 | -0,00016135               | 28,016               |
| 2525                                 | 0                         | 0                    |
| Rám + motor + přední výztuha         |                           |                      |
| 2460                                 | 0,00015833                | 27,666               |
| 2525                                 | 0                         | 0                    |
| Rám + motor + boční výztuha          |                           |                      |
| 2460                                 | -0,00026631               | 26,519               |
| 2525                                 | 0                         | 0                    |
| Rám + motor + přední + boční výztuha |                           |                      |
| 2460                                 | -0,00049302               | 26,148               |
| 2525                                 | 0                         | 0                    |



Tab. 11 Torzní tuhosti a torzní tuhosti na jednotku délky a jejich poměry vůči hmotnosti - Rám 1

| Úhel $\alpha$ [°]                    | Krouticí moment [Nm] | Torzní tuhost C [Nm/°] | Torzní tuhost na jednotku délky $C_L$ [Nm <sup>2</sup> /°] | Poměr torzní tuhost/hmotnost $C_m$ [Nm/kg°] | Poměr torzní tuhost na jednotku délky/hmotnost $C_{Lm}$ [Nm <sup>2</sup> /kg°] |
|--------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Rám samotný                          |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,449385419                          | 1172,4               | 808,8945733            | 1294,231317                                                | 26,79878655                                 | 42,87805848                                                                    |
| Rám + přední výztuha                 |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,43136359                           | 1172,4               | 819,0790995            | 1310,526559                                                | 26,65578949                                 | 42,64926318                                                                    |
| Rám + boční výztuha                  |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,377101065                          | 1172,4               | 851,3536366            | 1362,165819                                                | 26,58154229                                 | 42,53046767                                                                    |
| Rám + přední + boční výztuha         |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,359371186                          | 1172,4               | 862,4575921            | 1379,932147                                                | 26,47849663                                 | 42,3655946                                                                     |
| Rám + motor                          |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,368895722                          | 1172,4               | 856,4567639            | 1370,330822                                                |                                             |                                                                                |
| Rám + motor + přední výztuha         |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,351800315                          | 1172,4               | 867,2878584            | 1387,660573                                                |                                             |                                                                                |
| Rám + motor + boční výztuha          |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,29577624                           | 1172,4               | 904,7858415            | 1447,657346                                                |                                             |                                                                                |
| Rám + motor + přední + boční výztuha |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,277654673                          | 1172,4               | 917,6188407            | 1468,190145                                                |                                             |                                                                                |

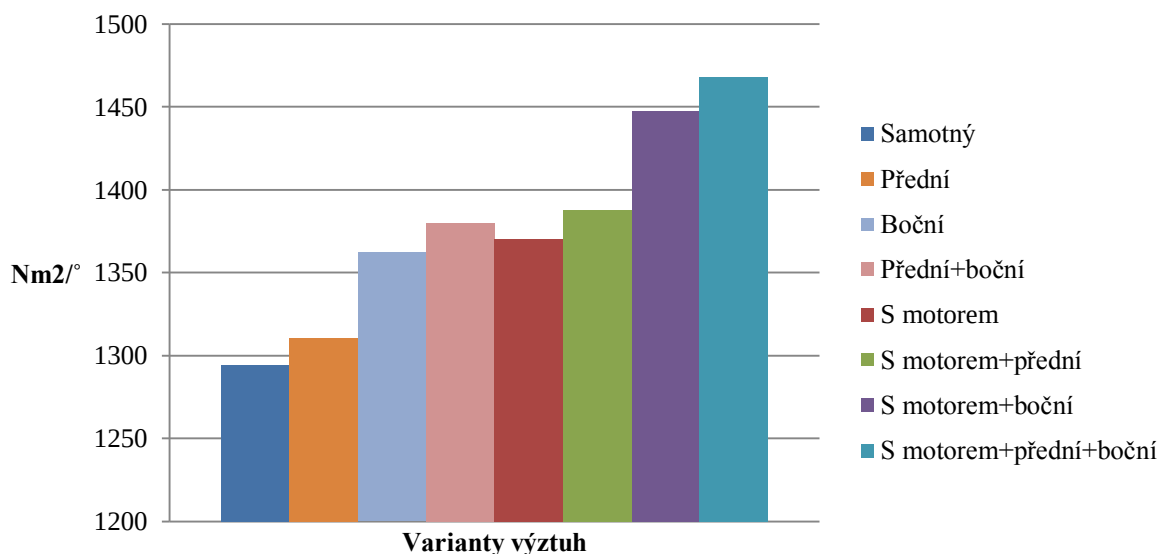
ZDE JSOU KONEČNÉ VÝSLEDKY ZPRACOVANÉ V GRAFICKÉ PODOBĚ:



Obr. 55 Graf torzní tuhosti - Rám 1



### Torzní tuhost na jednotku délky RÁM 1

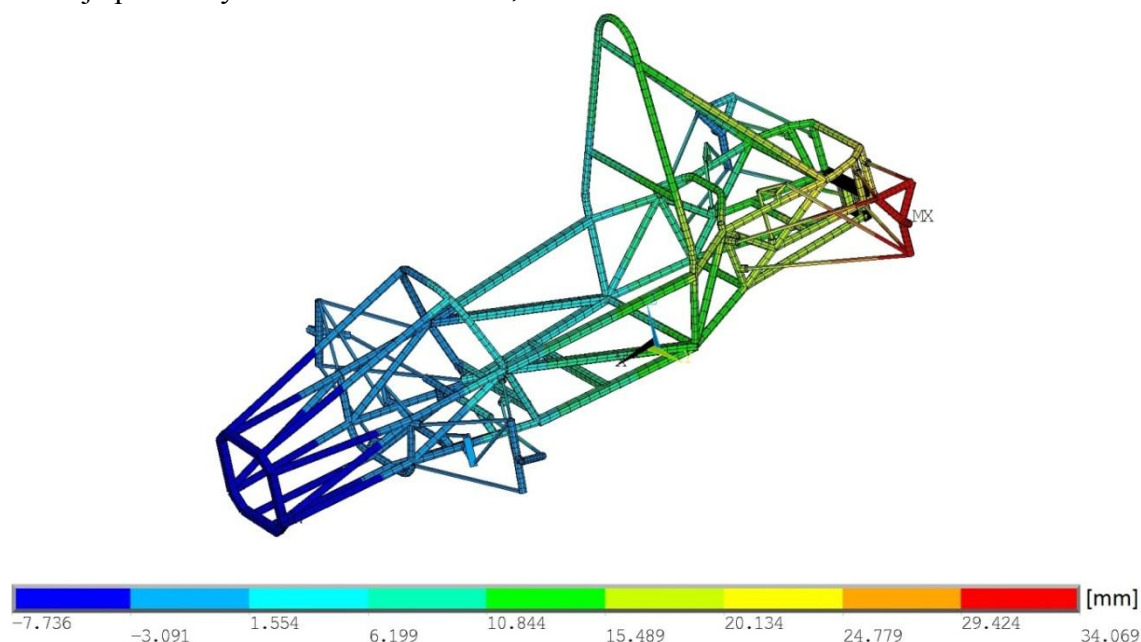


Obr. 56 Graf torzní tuhosti na jednotku délky - Rám 1

### RÁM 2

Zde byly provedeny stejné výpočty, jako tomu bylo u **Rámu 1** (znázorněné posuvy **U<sub>z</sub>** na **Obr. 57**). V **Tab. 12** jsou uvedeny vstupní veličiny pro tento rám. Posuvy uzlových bodů jsou uvedeny v **Tab. 13** a veškeré vypočítané výsledky v **Tab. 14**. Grafické výsledky jsou pak znázorněny na **Obr. 58** pro torzní tuhost a na **Obr. 59** pro torzní tuhost na jednotku délky.

Z výsledků Rámu 2 vychází, že samotný rám dosahuje hodnoty torzní tuhosti 708,01 Nm/°, což přibližně odpovídá rámu EVO1 od pana Krkošky. Prvkem, který nejvíce zvyšuje její hodnotu, je v tomto případě použití bočních výztuh, kdy dosáhneme 746,95 Nm/°. Přidáním motoru vzroste oproti samostatnému rámu na 741,07 Nm/° a opět jako málo účinná se ukazuje přední výztuha s hodnotou 714,99 Nm/°.



Obr. 57 Posuv uzlových bodů ve směru osy z - Rám 2

Tab. 12 Zadané hodnoty - Rám 2

|                                                      |        |
|------------------------------------------------------|--------|
| Působící síla v ose z <b>F</b> [N]                   | 1000   |
| Rozchod kol zadní nápravy <b>H2</b> [mm]             | 1172,4 |
| Rozvor náprav <b>L</b> [mm]                          | 1600   |
| Hmotnost rámu samotného <b>m</b> [kg]                | 30,879 |
| Hmotnost rámu + přední výztuha <b>m</b> [kg]         | 31,356 |
| Hmotnost rámu + boční výztuha <b>m</b> [kg]          | 32,742 |
| Hmotnost rámu + přední + boční výztuha <b>m</b> [kg] | 33,219 |

**V NÁSLEDUJÍCÍCH TABULKÁCH JSOU UVEDENY POSUVY BODŮ, DÍLČÍ A KONEČNÉ VÝSLEDKY:**

Tab. 13 Posuvy u zadní nápravy - Rám 2

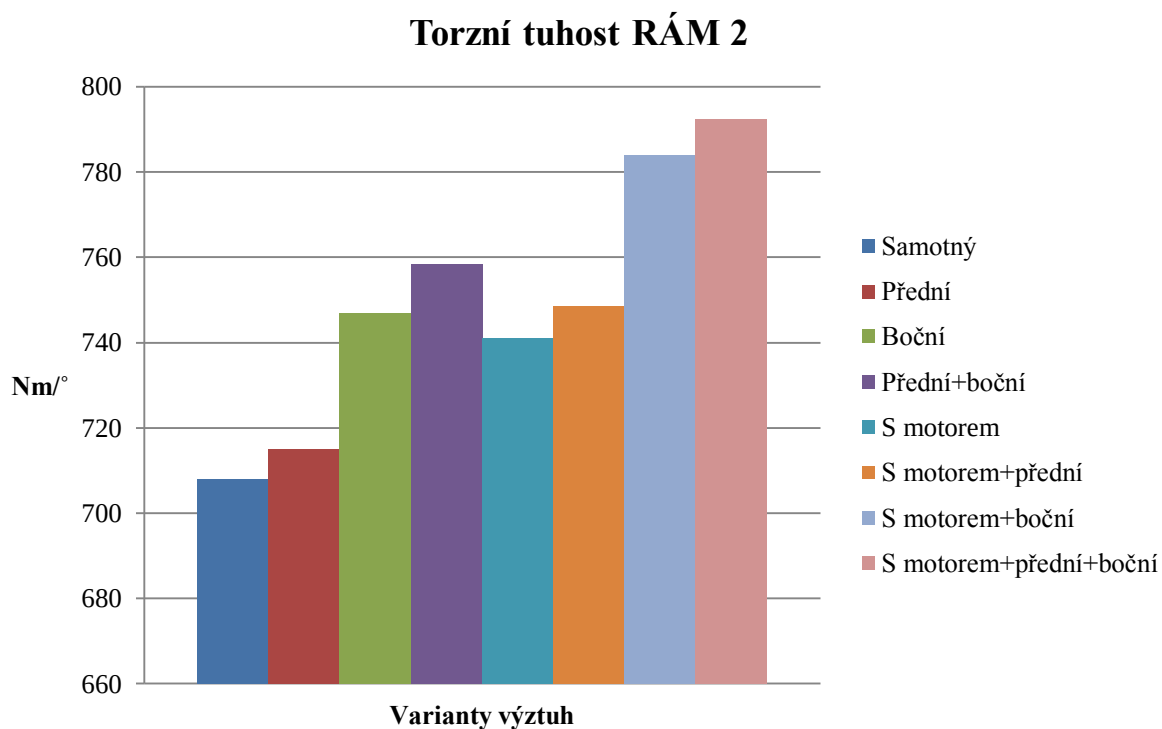
| Číslo uzlového bodu                  | Posuvy uzlových bodů [mm] |                      |
|--------------------------------------|---------------------------|----------------------|
|                                      | <b>U<sub>y</sub></b>      | <b>U<sub>z</sub></b> |
| Rám samotný                          |                           |                      |
| 2737                                 | -0,0039173                | 33,893               |
| 2803                                 | 0                         | 0                    |
| Rám + přední výztuha                 |                           |                      |
| 2737                                 | -0,0039156                | 33,562               |
| 2803                                 | 0                         | 0                    |
| Rám + boční výztuha                  |                           |                      |
| 2737                                 | -0,0039066                | 32,125               |
| 2803                                 | 0                         | 0                    |
| Rám + přední + boční výztuha         |                           |                      |
| 2737                                 | 0,0031107                 | 31,642               |
| 2803                                 | 0                         | 0                    |
| Rám + motor                          |                           |                      |
| 2737                                 | -0,0041385                | 32,38                |
| 2803                                 | 0                         | 0                    |
| Rám + motor + přední výztuha         |                           |                      |
| 2737                                 | -0,0040067                | 32,062               |
| 2803                                 | 0                         | 0                    |
| Rám + motor + boční výztuha          |                           |                      |
| 2737                                 | -0,0039876                | 30,608               |
| 2803                                 | 0                         | 0                    |
| Rám + motor + přední + boční výztuha |                           |                      |
| 2737                                 | -0,0039371                | 30,282               |
| 2803                                 | 0                         | 0                    |



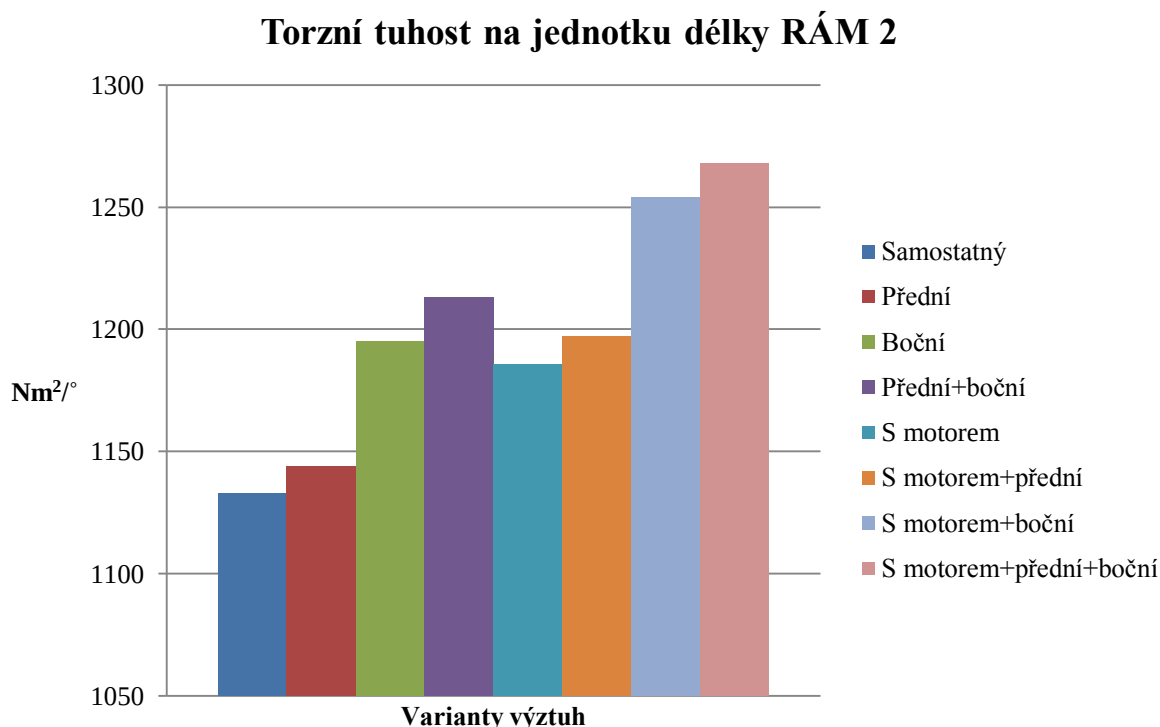
Tab. 14 Torzní tuhosti a torzní tuhosti na jednotku délky a jejich poměry vůči hmotnosti - Rám 2

| Úhel $\alpha$ [°]                    | Krouticí moment [Nm] | Torzní tuhost C [Nm/°] | Torzní tuhost na jednotku délky $C_L$ [Nm <sup>2</sup> /°] | Poměr torzní tuhost/hmotnost $C_m$ [Nm/kg°] | Poměr torzní tuhost na jednotku délky/hmotnost $C_{Lm}$ [Nm <sup>2</sup> /kg°] |
|--------------------------------------|----------------------|------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Rám samotný                          |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,655912343                          | 1172,4               | 708,0084915            | 1132,813586                                                | 22,92847862                                 | 36,6855658                                                                     |
| Rám + přední výztuha                 |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,63974953                           | 1172,4               | 714,9872474            | 1143,979596                                                | 22,80224669                                 | 36,48359471                                                                    |
| Rám + boční výztuha                  |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,569577443                          | 1172,4               | 746,9526305            | 1195,124209                                                | 22,81328662                                 | 36,50125859                                                                    |
| Rám + přední + boční výztuha         |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,545981107                          | 1172,4               | 758,3533815            | 1213,36541                                                 | 22,82890459                                 | 36,52624734                                                                    |
| Rám + motor                          |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,58203035                           | 1172,4               | 741,0730133            | 1185,716821                                                |                                             |                                                                                |
| Rám + motor + přední výztuha         |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,56650103                           | 1172,4               | 748,4195525            | 1197,471284                                                |                                             |                                                                                |
| Rám + motor + boční výztuha          |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,49549378                           | 1172,4               | 783,9551149            | 1254,328184                                                |                                             |                                                                                |
| Rám + motor + přední + boční výztuha |                      |                        |                                                            |                                             |                                                                                |
| 1,479572617                          | 1172,4               | 792,390983             | 1267,825573                                                |                                             |                                                                                |

ZDE JSOU KONEČNÉ VÝSLEDKY ZPRACOVANÉ V GRAFICKÉ PODOBĚ:



Obr. 58 Graf torzní tuhosti - Rám 2



Obr. 59 Graf torzní tuhosti na jednotku délky - Rám 2

Výsledky torzních tuhostí na jednotku délky jsou u obou rámců ve stejném poměru k jejich celkové torzní tuhosti, neboť geometrie náprav je totožná a tím i rozvor náprav 1600 mm, použitý ve výpočtech. Porovnání mezi těmito rámy z hlediska torzní tuhosti je uvedeno v kapitole 7.3.

## 7.2 TORZNÍ TUHOST V JEDNOTLIVÝCH ÚSECÍCH

Tento výpočet je důležitý pro zjištění úseků na rámu, kde by bylo vhodné použít výztuhy z důvodu malé torzní tuhosti. Ve výpočtu je postupováno podle kapitoly 5.2.2. Úseky jsou voleny zespodu podlahy rámu a rozděleny příčnými profily. Každý rám je tedy díky své konstrukci rozdělen na různé velikosti úseků, a proto se nedají torzní tuhosti úseků u odlišných rámců vzájemně porovnávat. Po konzultaci s vedoucím diplomové práce byly analyzovány tři konfigurace. Půjde o samostatný rám, rám s přední a boční výztuhou a rám s motorem, přední a boční výztuhou, a to z toho důvodu, aby byl patrný vliv výztuh na jednotlivé úseky.

### RÁM 1

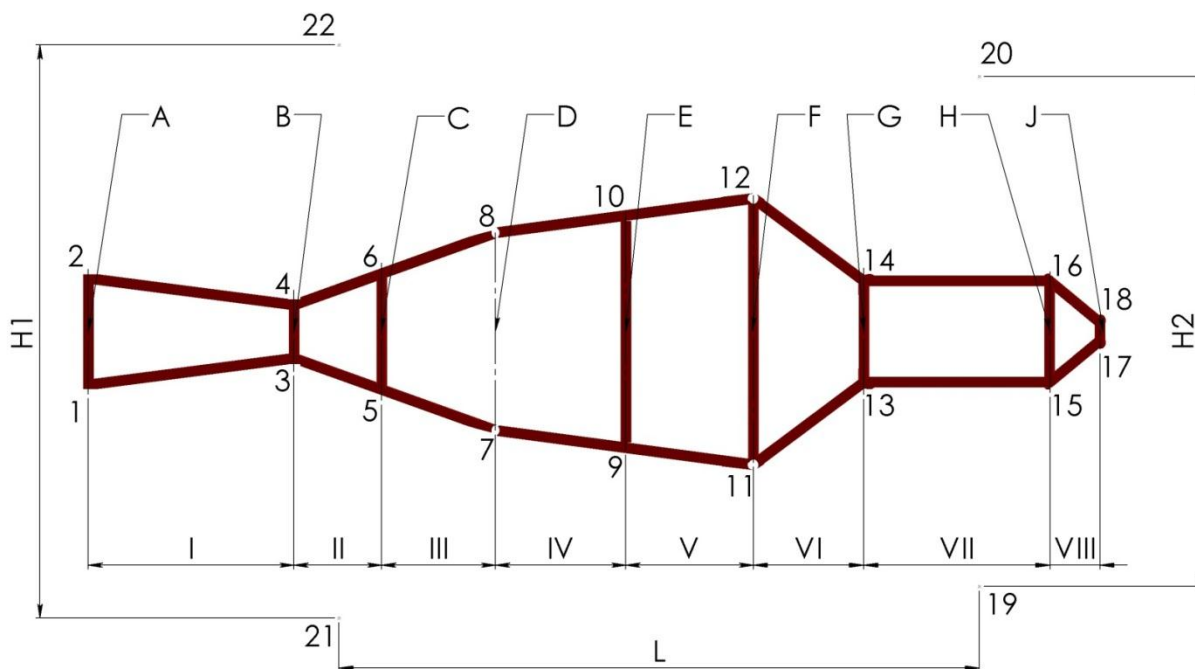
Na Obr. 60 je spodní pohled na rozdělenou podlahu na celkem osm úseků (označeny římskými číslicemi). Rozměry příčných profilů a jejich natočení jsou uvedeny v Tab. 15. Posuvy ( $U_y$ ,  $U_z$ ) uzlových bodů (1-18) jsou uvedeny v Tab. 16. Veškeré dílčí a konečné výsledky jednotlivých úseků pro torzní tuhost a torzní tuhost na jednotku délky jsou pak uvedeny v Tab. 17 a graficky zpracovány na Obr. 61 a Obr. 62.

Z výsledků torzní tuhosti na jednotku délky úseků vyplývá, že nejproblematictější místem na rámu je úsek III ( $985,84 \text{ Nm}^2/^\circ$ ). Ani přidáním přední vzpěry u tohoto úseku nedochází k příliš výraznému vyztužení ( $1033,61 \text{ Nm}^2/^\circ$ ), proto zde tato vzpěra nemá přílišné opodstatnění. Přidáním motoru značně vzrostla torzní tuhost posledních dvou zadních úseků





VII, VIII ( $8273,10$  a  $4679,16 \text{ Nm}^2/^\circ$ ), v důsledku toho však poklesla v úseku VI ( $2287,74$  z  $7725,39 \text{ Nm}^2/^\circ$ ). Ten je vzhledem k výsledku jiných úseků stále dostatečně tuhý. Úsek IV vykazuje nízké hodnoty a měl by být stejně jako úsek III dodatečně vyztužen.



Obr. 60 Rozdělení na úseky - Rám I

**V NÁSLEDUJÍCÍCH TABULKÁCH JSOU UVEDENY POSUVY BODŮ, DÍLČÍ A KONEČNÉ VÝSLEDKY:**

Tab. 15 Příčné profily a jejich natočení - Rám I

| Příčný profil | Rozměr [mm] | Úhel $\alpha$ [°] v RS | Úhel $\alpha$ [°] v R+P+B | Úhel $\alpha$ [°] v R+M+P+B |
|---------------|-------------|------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| A             | 248         | -0,10715222            | -0,1168093                | -0,1145452                  |
| B             | 124         | 0,028139618            | 0,016218402               | 0,020145935                 |
| C             | 259,916     | 0,092205177            | 0,090546594               | 0,092653552                 |
| D             | 460         | 0,424329767            | 0,407322527               | 0,40782077                  |
| E             | 540,832     | 0,679584268            | 0,602628455               | 0,601547985                 |
| F             | 620         | 0,845374841            | 0,759059979               | 0,756251128                 |
| G             | 235,852     | 0,886141894            | 0,798049843               | 0,887914866                 |
| H             | 235,852     | 1,031616776            | 0,942730413               | 0,949287764                 |
| J             | 41,677      | 1,084554326            | 0,995224521               | 0,978732323                 |

Tab. 16 Posuvy uzlových bodů - Rám I

| Bod | Číslo uzlového bodu | Rám samotný |         | Rám+přední+boční výztuha |           | Rám+motor+přední+boční výztuha |           |
|-----|---------------------|-------------|---------|--------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|
|     |                     | Uy [mm]     | Uz [mm] | Uy [mm]                  | Uz [mm]   | Uy [mm]                        | Uz [mm]   |
| 1   | 51                  | -2,9074     | -5,7965 | -2,8504                  | -5,401    | -2,8195                        | -5,0661   |
| 2   | 49                  | -2,9074     | -6,2603 | -2,8504                  | -5,9066   | -2,8195                        | -5,5619   |
| 3   | 357                 | -0,4439     | -1,6086 | -0,41732                 | -1,4977   | -0,41617                       | -1,4139   |
| 4   | 252                 | -0,4439     | -1,5477 | -0,41732                 | -1,4626   | -0,41617                       | -1,3703   |
| 5   | 560                 | -0,1054     | -0,0284 | -0,046918                | -0,035915 | -0,05221                       | -0,051943 |
| 6   | 613                 | -0,1054     | 0,38983 | -0,046915                | 0,37484   | -0,0522                        | 0,36837   |
| 7   | 544                 | 0,67925     | 1,0665  | 0,51978                  | 0,96265   | 0,50566                        | 0,80295   |
| 8   | 576                 | 0,67925     | 4,4733  | 0,51977                  | 4,2329    | 0,5057                         | 4,0772    |
| 9   | 1072                | 1,4121      | 2,3774  | 1,1032                   | 2,3936    | 1,0539                         | 2,0818    |
| 10  | 1041                | 1,4121      | 8,7925  | 1,1032                   | 8,0822    | 1,0539                         | 7,7602    |
| 11  | 1005                | 1,8766      | 3,7675  | 1,5298                   | 3,7167    | 1,4041                         | 3,2591    |
| 12  | 933                 | 1,8766      | 12,916  | 1,5298                   | 11,931    | 1,4041                         | 11,443    |
| 13  | 1413                | 1,772       | 8,9     | 1,4594                   | 8,4147    | 1,2153                         | 7,6227    |
| 14  | 1443                | 1,772       | 12,548  | 1,4594                   | 11,7      | 1,2153                         | 11,278    |
| 15  | 1759                | 3,7074      | 12,616  | 3,4373                   | 11,883    | 3,2146                         | 11,036    |
| 16  | 1700                | 3,7074      | 16,863  | 3,4373                   | 15,764    | 3,2146                         | 14,944    |
| 17  | 2034                | 3,5807      | 15,434  | 3,366                    | 14,483    | 3,2201                         | 13,594    |
| 18  | 2012                | 3,5807      | 16,223  | 3,366                    | 15,207    | 3,2201                         | 14,306    |

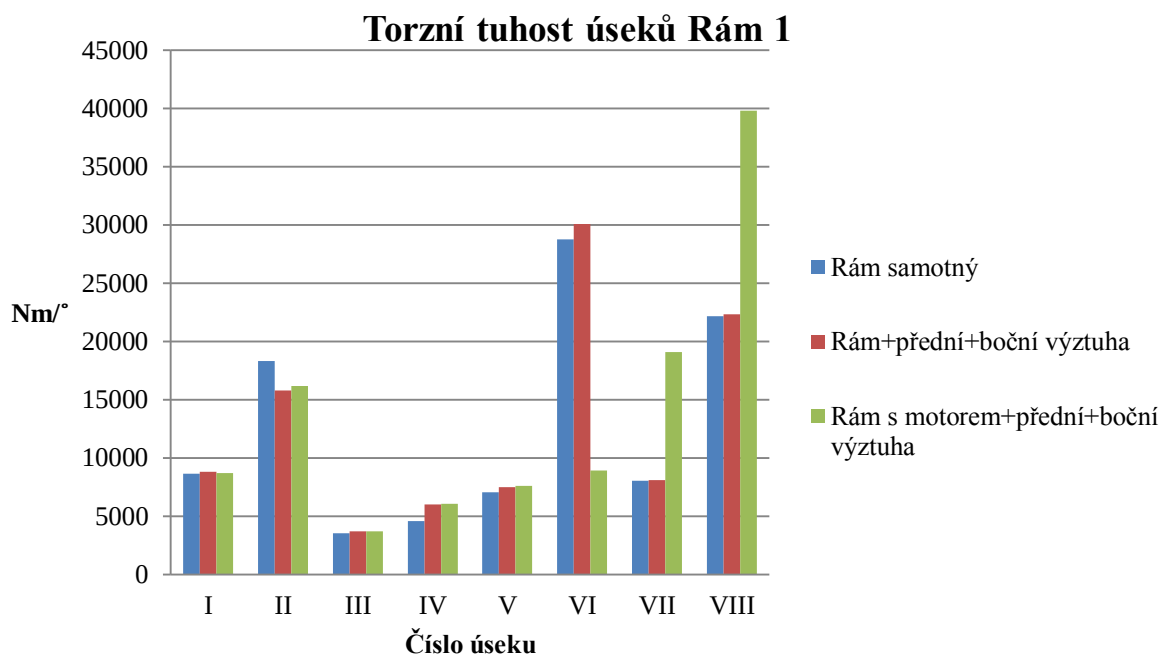
Tab. 17 Torzní tuhost a torzní tuhost na jednotku délky u úseků - Rám I

| Úsek rámu [-]                | Délka úseku [m] | Natočení úseku [°] | Torzní tuhost úseku [Nm/°] | Torzní tuhost úseku na jednotku délky [Nm <sup>2</sup> /°] |
|------------------------------|-----------------|--------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------|
| Rám samotný                  |                 |                    |                            |                                                            |
| I                            | 0,48            | 0,135291843        | 8665,710942                | 4159,541252                                                |
| II                           | 0,189715        | 0,064065558        | 18300,00448                | 3471,785351                                                |
| III                          | 0,279275        | 0,332124591        | 3530,000587                | 985,8409139                                                |
| IV                           | 0,303633        | 0,2552545          | 4593,062996                | 1394,605497                                                |
| V                            | 0,297377        | 0,165790573        | 7071,572137                | 2102,922907                                                |
| VI                           | 0,256919        | 0,040767053        | 28758,51753                | 7388,609566                                                |
| VII                          | 0,433081        | 0,145474882        | 8059,1232                  | 3490,253134                                                |
| VIII                         | 0,117516        | 0,052937549        | 22146,85065                | 2602,609301                                                |
| Rám + přední + boční výztuha |                 |                    |                            |                                                            |
| I                            | 0,48            | 0,133028           | 8813,202062                | 4230,33699                                                 |
| II                           | 0,189715        | 0,074328           | 15773,28816                | 2992,429363                                                |
| III                          | 0,279275        | 0,316776           | 3701,038746                | 1033,607596                                                |
| IV                           | 0,303633        | 0,195306           | 6002,889988                | 1822,675496                                                |
| V                            | 0,297377        | 0,156432           | 7494,653069                | 2228,737446                                                |
| VI                           | 0,256919        | 0,03899            | 30069,35347                | 7725,388223                                                |
| VII                          | 0,433081        | 0,144681           | 8103,368676                | 3509,41501                                                 |
| VIII                         | 0,117516        | 0,052494           | 22333,93499                | 2624,594704                                                |

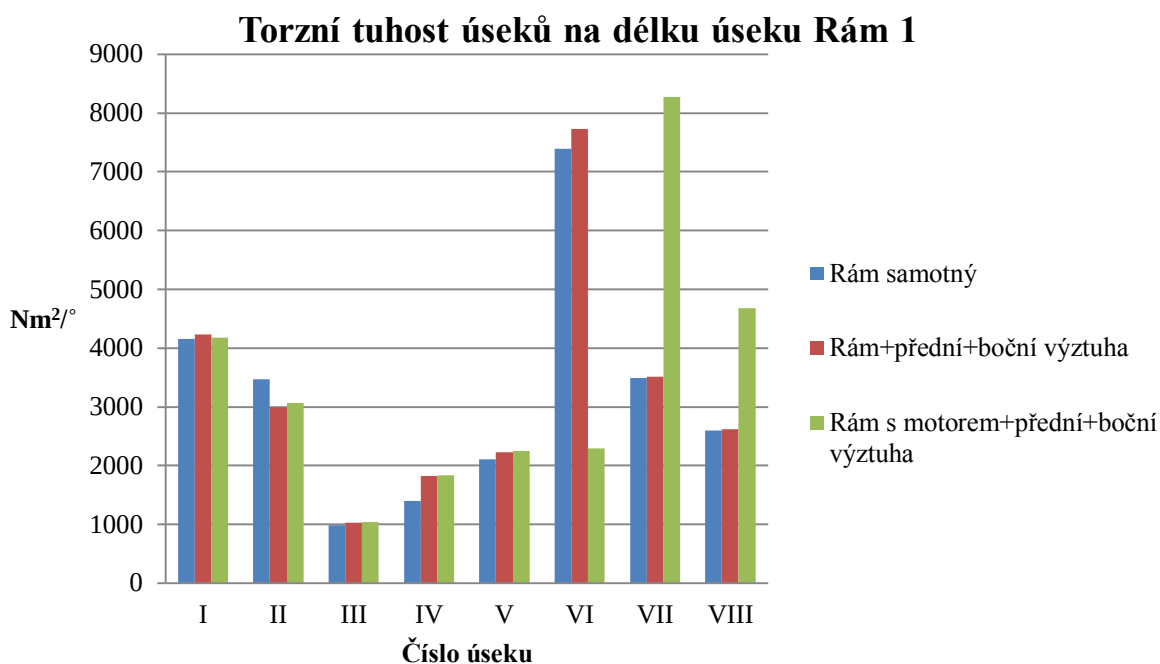


| Rám + motor + přední + boční výztuha |          |             |             |             |
|--------------------------------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| I                                    | 0,48     | 0,134691135 | 8704,35907  | 4178,092354 |
| II                                   | 0,189715 | 0,072507618 | 16169,33551 | 3067,565486 |
| III                                  | 0,279275 | 0,315167218 | 3719,930038 | 1038,883461 |
| IV                                   | 0,303633 | 0,193727215 | 6051,808455 | 1837,528757 |
| V                                    | 0,297377 | 0,154703143 | 7578,385142 | 2253,637438 |
| VI                                   | 0,256919 | 0,131663737 | 8904,501912 | 2287,735727 |
| VII                                  | 0,433081 | 0,061372898 | 19102,89455 | 8273,100674 |
| VIII                                 | 0,117516 | 0,029444559 | 39817,20376 | 4679,158517 |

ZDE JSOU KONEČNÉ VÝSLEDKY ZPRACOVANÉ V GRAFICKÉ PODOBĚ:



Obr. 61 Graf torzní tuhosti úseků - Rám 1



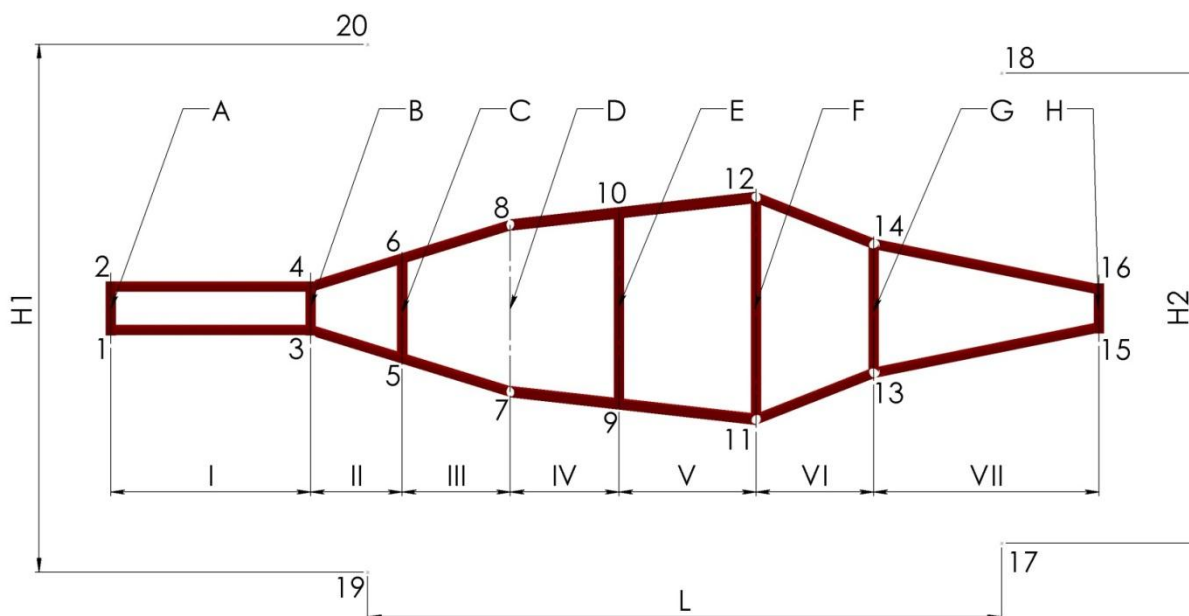
Obr. 62 Graf torzní tuhosti úseků na jednotku délky - Rám 1



## RÁM 2

Výpočtová analýza tohoto rámu probíhala stejným způsobem, jak tomu bylo u předešlého Rámu 1. Na **Obr. 63** je spodní pohled na podlahu rámu, který je rozdělen na sedm úseků (označeny římskými číslicemi). Rozměry příčných profilů a jejich natočení jsou uvedeny v **Tab. 18**. Posuvy ( $U_y$ ,  $U_z$ ) uzlových bodů (1-16) jsou potom v **Tab. 19**. Veškeré dílčí a konečné výsledky jednotlivých úseků pro torzní tuhost a torzní tuhost na jednotku délky jsou pak uvedeny v **Tab. 20** a graficky zpracovány na **Obr. 64** a **Obr. 65**.

I na tomto rámu je nejproblematictější místem úsek III ( $861,17 \text{ Nm}^2/^\circ$ ) u samostatného rámu. Dosahuje nízkých hodnot, stejně jako tomu bylo u Rámu 1. Také zde neplní patřičně svoji roli přední výztuha ( $901,83 \text{ Nm}^2/^\circ$ ), a proto zde nemusí v této podobě být. Přidáním motoru dojde opět ke zpevnění posledních dvou zadních částí VI, VII ( $3993,47$  a  $3275,11 \text{ Nm}^2/^\circ$ ) a v důsledku toho však oproti Rámu 1 dojde k nepatrnému zvýšení navazujícího úseku V ( $1819,15$  z  $1814,48 \text{ Nm}^2/^\circ$ ). Ten je však stále nedostatečně tuhý a společně s úseky III a IV vyžaduje dostatečné vyztužení.



Obr. 63 Rozdělení na úseky - Rám 2

### V NÁSLEDUJÍCÍCH TABULKÁCH JSOU UVEDENY POSUVY BODŮ, DÍLČÍ A KONEČNÉ VÝSLEDKY:

Tab. 18 Příčné profily a jejich natočení - Rám 2

| Příčný profil | Rozměr [mm] | Úhel $\alpha$ [°] v RS | Úhel $\alpha$ [°] v R+P+B | Úhel $\alpha$ [°] v R+M+P+B |
|---------------|-------------|------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| A             | 104         | -0,266313273           | -0,28041653               | -0,2770009                  |
| B             | 104         | 0,046442626            | 0,029198808               | 0,032669609                 |
| C             | 226,297     | 0,121456075            | 0,1187771                 | 0,120577008                 |
| D             | 400         | 0,504934633            | 0,484968531               | 0,485713372                 |
| E             | 455,024     | 0,776313426            | 0,694505459               | 0,694429766                 |
| F             | 524         | 1,012652119            | 0,907788606               | 0,90716568                  |
| G             | 310         | 1,067537095            | 0,960667467               | 0,990101882                 |
| H             | 90          | 1,352567211            | 1,239305389               | 1,183944237                 |

Tab. 19 Posuvy uzlových bodů - Rám 2

| Bod | Číslo uzlového bodu | Rám samotný |          | Rám+přední+boční výztuha |          | Rám+motor+přední+boční výztuha |          |
|-----|---------------------|-------------|----------|--------------------------|----------|--------------------------------|----------|
|     |                     | Uy [mm]     | Uz [mm]  | Uy [mm]                  | Uz [mm]  | Uy [mm]                        | Uz [mm]  |
| 1   | 58                  | -3,6484     | -6,644   | -3,6389                  | -6,1723  | -3,495                         | -5,9019  |
| 2   | 59                  | -3,6484     | -7,1274  | -3,6389                  | -6,6813  | -3,495                         | -6,4047  |
| 3   | 761                 | -0,6459     | -1,843   | -0,63234                 | -1,7073  | -0,60025                       | -1,6396  |
| 4   | 762                 | -0,6459     | -1,7587  | -0,63234                 | -1,6543  | -0,60025                       | -1,5803  |
| 5   | 2062                | -0,00617    | 0,060183 | 0,041983                 | 0,045494 | 0,032074                       | 0,029205 |
| 6   | 2030                | -0,00617    | 0,53989  | 0,041984                 | 0,51462  | 0,032074                       | 0,50544  |
| 7   | 321                 | 1,1219      | 1,5214   | 0,99713                  | 1,3723   | 0,9285                         | 1,2381   |
| 8   | 157                 | 1,1219      | 5,0466   | 0,99712                  | 4,7581   | 0,92853                        | 4,6291   |
| 9   | 101                 | 1,8351      | 2,9746   | 1,5857                   | 2,8959   | 1,4466                         | 2,6541   |
| 10  | 100                 | 1,8351      | 9,1402   | 1,5858                   | 8,4117   | 1,4466                         | 8,1693   |
| 11  | 208                 | 2,4523      | 4,9028   | 2,1066                   | 4,7471   | 1,8636                         | 4,3698   |
| 12  | 283                 | 2,4523      | 14,165   | 2,1065                   | 13,05    | 1,8636                         | 12,667   |
| 13  | 1337                | 2,3838      | 9,6384   | 2,081                    | 9,0918   | 1,7445                         | 8,5135   |
| 14  | 1392                | 2,3838      | 15,415   | 2,0809                   | 14,29    | 1,7445                         | 13,871   |
| 15  | 1713                | 5,2421      | 17,201   | 4,8864                   | 16,053   | 4,7055                         | 15,388   |
| 16  | 1741                | 5,2422      | 19,326   | 4,8864                   | 18       | 4,7055                         | 17,248   |

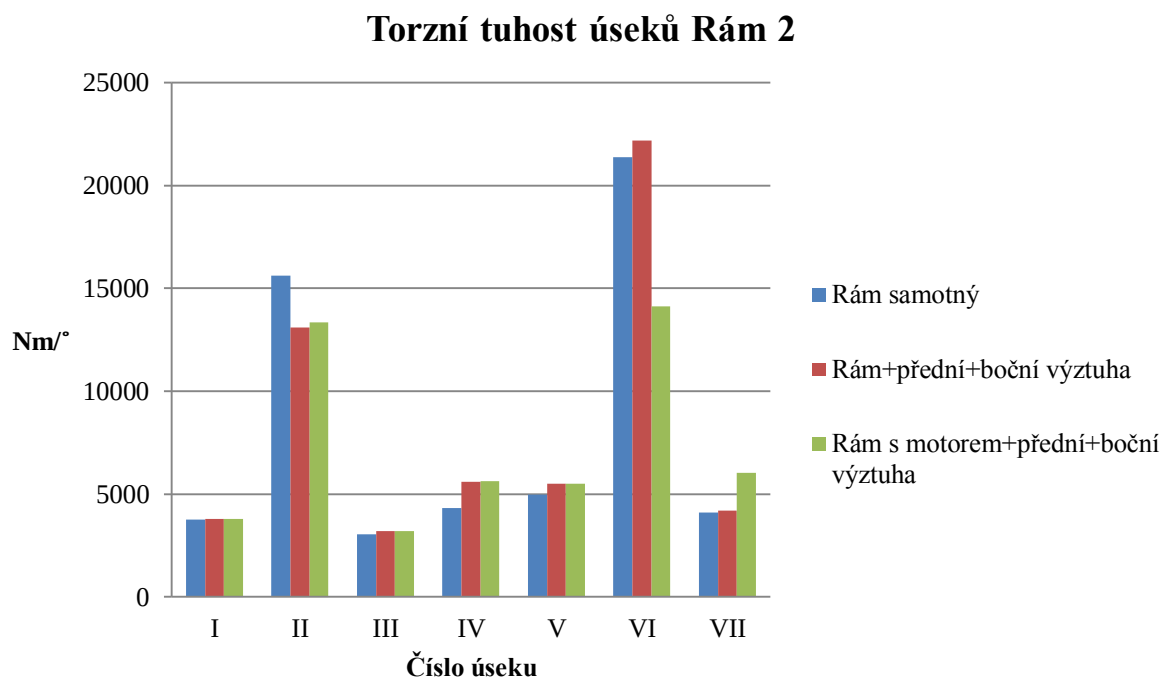
Tab. 20 Torzní tuhost a torzní tuhost u úseků - Rám 2

| Úsek rámu [-]                       | Délka úseku [m] | Natočení úseku [°] | Torzní tuhost úseku [Nm/°] | Torzní tuhost úseku na jednotku délky [Nm <sup>2</sup> /°] |
|-------------------------------------|-----------------|--------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------|
| Rám samotný                         |                 |                    |                            |                                                            |
| I                                   | 0,48            | 0,312755899        | 3748,610348                | 1799,332967                                                |
| II                                  | 0,19832         | 0,075013448        | 15629,19755                | 3099,582458                                                |
| III                                 | 0,28168         | 0,383478558        | 3057,276543                | 861,1736568                                                |
| IV                                  | 0,261807        | 0,271378794        | 4320,160705                | 1131,048314                                                |
| V                                   | 0,33009         | 0,236338693        | 4960,677344                | 1637,469985                                                |
| VI                                  | 0,2825          | 0,054884976        | 21361,037                  | 6034,492952                                                |
| VII                                 | 0,5415          | 0,285030116        | 4113,249561                | 2227,324637                                                |
| Rám + přední + boční výztuha        |                 |                    |                            |                                                            |
| I                                   | 0,48            | 0,309615336        | 3786,634132                | 1817,584383                                                |
| II                                  | 0,19832         | 0,089578292        | 13087,99232                | 2595,610638                                                |
| III                                 | 0,28168         | 0,366191431        | 3201,604135                | 901,8278526                                                |
| IV                                  | 0,261807        | 0,209536927        | 5595,195152                | 1464,861257                                                |
| V                                   | 0,33009         | 0,213283147        | 5496,918132                | 1814,477706                                                |
| VI                                  | 0,2825          | 0,052878861        | 22171,43074                | 6263,429185                                                |
| VII                                 | 0,5415          | 0,278637922        | 4207,611054                | 2278,421386                                                |
| Rám + motor +přední + boční výztuha |                 |                    |                            |                                                            |
| I                                   | 0,48            | 0,309670508        | 3785,959493                | 1817,260557                                                |
| II                                  | 0,19832         | 0,087907399        | 13336,7613                 | 2644,946501                                                |
| III                                 | 0,28168         | 0,365136363        | 3210,855225                | 904,4336998                                                |
| IV                                  | 0,261807        | 0,208716395        | 5617,1917                  | 1470,620107                                                |

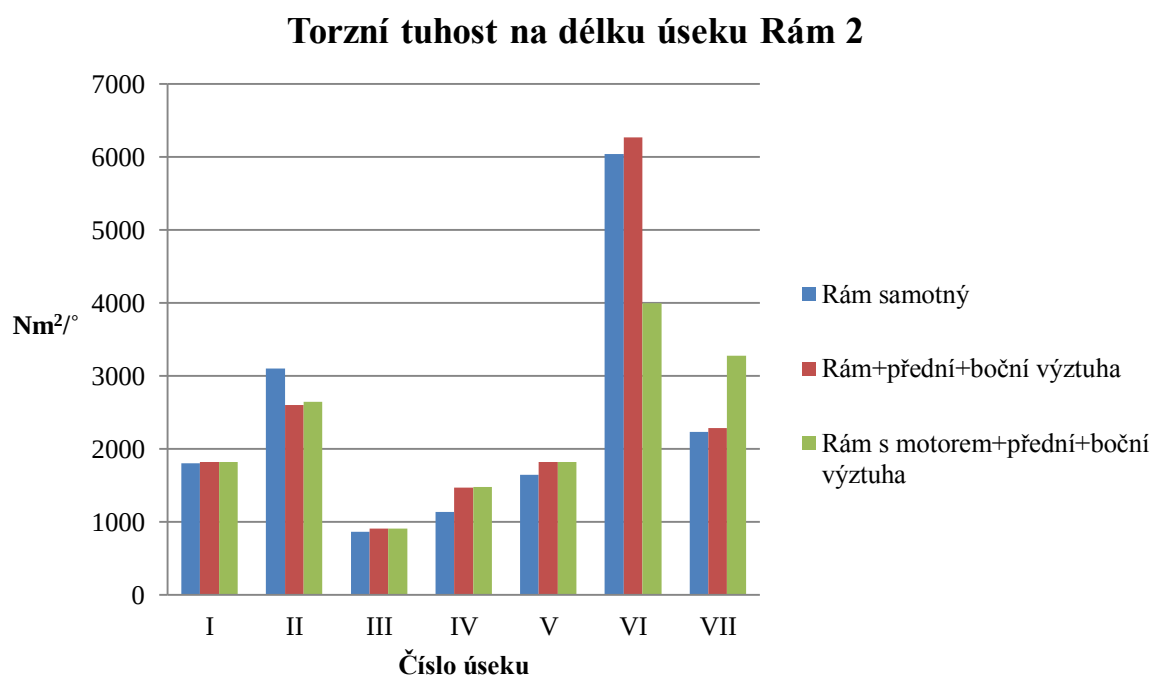


|     |         |             |             |             |
|-----|---------|-------------|-------------|-------------|
| V   | 0,33009 | 0,212735914 | 5511,058192 | 1819,145199 |
| VI  | 0,2825  | 0,082936202 | 14136,16699 | 3993,467176 |
| VII | 0,5415  | 0,193842355 | 6048,213761 | 3275,107751 |

ZDE JSOU KONEČNÉ VÝSLEDKY ZPRACOVANÉ V GRAFICKÉ PODOBĚ:



Obr. 64 Graf torzní tuhosti úseků - Rám 2



Obr. 65 Graf torzní tuhosti úseků na jednotku délky - Rám 2





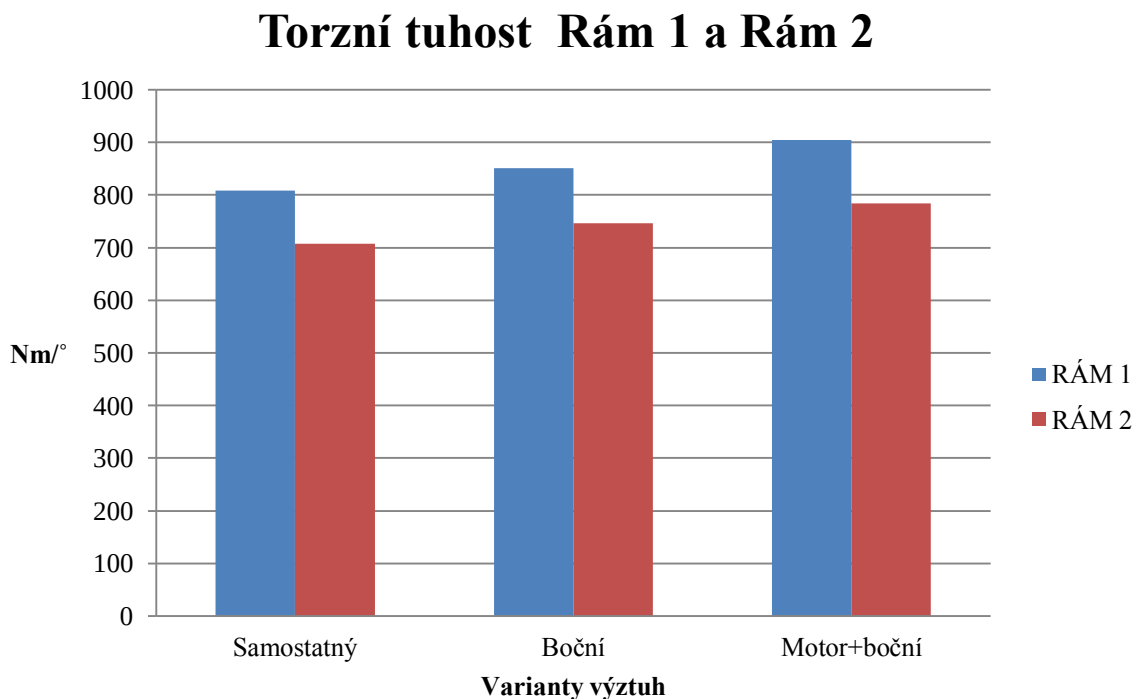
### 7.3 POROVNÁNÍ OBOU RÁMŮ

Pro porovnání obou ráků byly vybrány konfigurace výpočtových modelů samostatného ráku, ráku s boční výztuhou a ráku s motorem a boční výztuhou. Přední výztuha byla úplně odstraněna, z důvodů jejího malého vlivu na zvýšení torzní tuhosti u použitého úseku, jak bylo zjištěno předcházející kapitole 7.2.

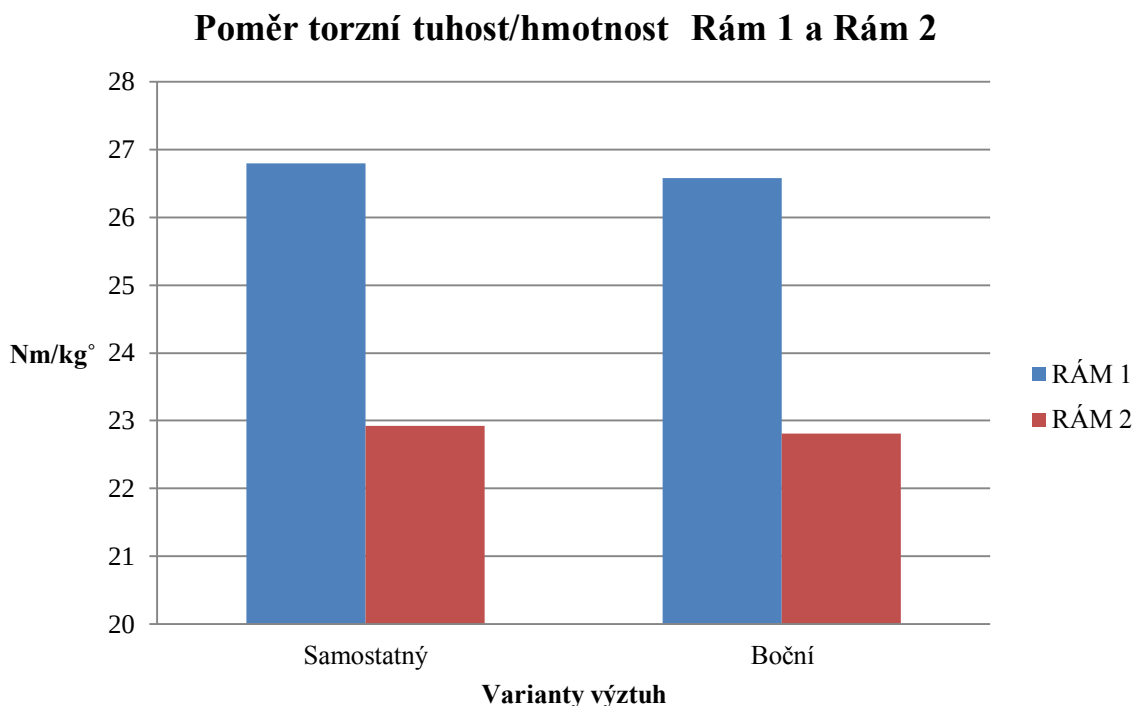
V **Tab. 21** jsou číselně porovnány oba ráky a to z hlediska torzních tuhostí a poměru torzní tuhosti na hmotnost ráku, mimo konfigurace, kde je použit motor (vysvětleno v kapitole 7.1). Taktéž jsou tyto hodnoty graficky znázorněny na **Obr. 66** a **Obr. 67**. Porovnávat ráky v torzní tuhosti na jednotku délky nemělo smysl, vzhledem ke stejnému rozvoru náprav.

Tab. 21 Porovnání - Rám 1 a Rám 2

| Veličiny<br>k porovnání                     | Rám samostatný |        | Rám+boční výztuha |        | Rám+motor+boční<br>výztuha |        |
|---------------------------------------------|----------------|--------|-------------------|--------|----------------------------|--------|
|                                             | Rám 1          | Rám 2  | Rám 1             | Rám 2  | Rám 1                      | Rám 2  |
| Torzní tuhost<br>[Nm/°]                     | 808,89         | 708,01 | 851,35            | 746,95 | 904,79                     | 783,96 |
| Poměr torzní<br>tuhost/hmotnost<br>[Nm/kg°] | 26,80          | 22,93  | 26,58             | 22,81  |                            |        |



Obr. 66 Torzní tuhost - Rám 1 a Rám 2



Obr. 67 Poměr torzní tuhost/hmotnost - Rám 1 a Rám 2

Z uvedených hodnot je jasné patrné, že návrh Rámu 1 dosahuje podstatně vyšších hodnot torzní tuhosti, než jak tomu je u Rámu 2 a to výrazným rozdílem více než 120 Nm/° při použití bočních výztuh a vsazeném motoru, tj. 904,79 Nm/° u Rámu 1 a 783,96 Nm/° u Rámu 2. To samé platí i pro hodnoty poměru torzní tuhosti na hmotnost rámu v konfiguraci s použitými bočními výztuhami, kdy je rozdíl necelé 4 Nm/°kg. Konkrétní hodnoty pak jsou 26,58 Nm/°kg a 22,81 Nm/°kg.

#### 7.4 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ A PŘÍPADNÉ ÚPRAVY

S dosažených výsledků jednotlivých rámu vyplynuly jisté skutečnosti, které by měly být zohledněny.

U Rámu 1 je celková torzní tuhost svojí výší na relativně dobré úrovni, kdy tato hodnota byla pro lepší představu porovnána s hodnotou rámu EVO 1 z diplomové práce Kamila Krkošky. Při výpočtu torzních tuhostí na jednotlivých úsecích bylo zjištěno, že přední výztuha neplní zcela svoji funkci a proto není důvod, ji zde vůbec umisťovat. Naopak instalací motoru vzrostla torzní tuhost zadní části. Dalším zjištěním pak byla nízká torzní tuhost některých úseků (III, IV), především se jednalo o úsek III. Veškeré tyto úseky se nacházely pouze v přední části rámu, která nebyla mou vlastní konstrukcí. Z toho důvodu a po konzultaci s vedoucím práce, nebyly tyto úseky upravovány.

Rám 2 dosahuje znatelně nižší hodnoty torzní tuhosti než Rám 1. Již z tohoto prvního hlediska potřebuje nutné úpravy, které by tuto hodnotu zvýšily. Při výpočtu torzní tuhosti jednotlivých úseků byly zjištěny skutečnosti obdobné jako u Rámu 1. Opět neplnila přední výztuha dostatečně svoji funkci a úseky v přední části (III, IV, V), tentokrát s jedním navíc, vykazovali nízké torzní tuhosti. Ani zde však nebudou provedeny žádné konstrukční změny, které by byly zahrnuty do této práce.

Porovnáním obou rámu se tak jasně ukazuje, že konstrukce Rámu 1 z hlediska torzní tuhosti výrazně převyšuje Rám 2.



## ZÁVĚR

Hlavní navrhovanou nosnou konstrukcí byl v týmu Formule Student zvolen příhradový rám svařovaný z tenkostěnných profilů. Mým hlavním úkolem v diplomové práci byl návrh konstrukce zadní části tohoto rámu a provedení analýzy torzní tuhosti celého rámu.

Pomocí CAD systému Pro/Engineer WF5 byla postupně navržena konstrukce této zadní části vozidla. Nejprve mi byla dodána vypočtená geometrie náprav, které byla podřízena celá tato konstrukce, aby bylo dosaženo co nejlepších jízdních vlastností. Dále pak byla uzpůsobena pro zástavbu jednoválcového motoru z motocyklu Husaberg 570 FS a všech dalších uvažovaných komponent. Celá konstrukce taktéž vyhovuje veškerým požadavkům v pravidlech. Finální verze zadní části rámu byla poté zkompleťována s danou přední částí v jeden celek pod názvem Rám 1. Mimoto vznikla v týmu Formule Student i varianta označena Rám 2 navržená mými kolegy, která byla i vyrobena.

Pro tyto dvě varianty byly v diplomové práci vytvořeny výpočtové modely pro simulaci torzní tuhosti s využitím MKP systému Ansys 12.1.

Rám 1 bez plánovaných výztuh dosáhl hodnoty torzní tuhosti  $808,89 \text{ Nm}^\circ$  a hodnoty torzní tuhosti na jednotku délky  $1294,23 \text{ Nm}^2/\circ$ . To se jeví s porovnáním rámu EVO 1, od Kamila Krkošky z minulého roku s hodnotou  $701,1 \text{ Nm}^\circ$  ( $1121,76 \text{ Nm}^2/\circ$ ), jako přijatelná hodnota. Po plánovaném vyztužení předními a bočními hliníkovými panely pak vzrostla hodnota torzní tuhosti na  $862,46 \text{ Nm}^\circ$  ( $1379,93 \text{ Nm}^2/\circ$ ) a po začlenění motoru na hodnotu  $917,62 \text{ Nm}^\circ$  ( $1468,19 \text{ Nm}^2/\circ$ ). Při výpočtu torzní tuhosti na Rámu 1 pro jednotlivé úseky se ukázalo, že přední výztuha zcela neplní svoji funkci a dostatečně nevyztužuje požadovaný úsek III, a proto zde nemusí být umístěna. Rozdíl v tuhosti úseku na jednotku délky činil pouze necelých  $22 \text{ Nm}^2/\circ$  ( $985,84 \text{ Nm}^2/\circ$  bez přední výztuhy,  $1007,81 \text{ Nm}^2/\circ$  s přední výztuhou). Také úsek IV nedosahoval přijatelných hodnot v porovnání s jinými úseky. I po přidání bočních výztuh a motoru do rámu s hodnotou  $1836,31 \text{ Nm}^2/\circ$  nedosahoval dostatečné tuhosti. Proto by bylo vhodné v úsecích III a IV rám dodatečně vyztuzit nebo upravit. Tyto úseky se nacházejí v přední části rámu, jehož návrh nebyl mým úkolem. Z tohoto důvodu budou dodatečné výztuhy a úpravy řešeny kolegy, který tuto část navrhl případně jinými kolegy, kteří se zlepšením vlastností přední částí rámu budou zabývat v budoucnu. U mnou navrhované zadní části rámu lze konstatovat, že se jeví jak z hlediska torzní tuhosti, tak i na zástavbu jednotlivých komponent včetně motoru jako vyhovující a snadno výrobitelnou.

Rám 2 bez plánovaných výztuh dosáhl hodnoty torzní tuhosti  $708,01 \text{ Nm}^\circ$  a hodnoty torzní tuhosti na jednotku délky  $1132,81 \text{ Nm}^2/\circ$ . Tyto hodnoty nejsou s porovnáním Rámu 1 na dobré úrovni, rozdíl zde činí více než  $100 \text{ Nm}^\circ$ . Ještě větší rozdíl je patrný při použití plánovaných bočních výztuh a začlenění motoru do rámu, kdy rozdíl činí více než  $120 \text{ Nm}^\circ$  ( $783,96 \text{ Nm}^\circ$  Rám 2,  $904,79 \text{ Nm}^\circ$  Rám 1). Již při tomto srovnání je patrné, že Rám 2 není zcela optimálně navržen. Při výpočtu torzní tuhosti pro jednotlivé úseky se opět ukázalo jako v případě Rámu 1, že přední výztuha zcela neplní svoji funkci a dostatečně nevyztužuje požadovaný úsek III, a proto zde nemusí být umístěna. Rozdíl v tuhosti úseku na jednotku délky činil pouze o něco málo více než  $13 \text{ Nm}^2/\circ$  ( $861,17 \text{ Nm}^2/\circ$  bez přední výztuhy,  $874,43 \text{ Nm}^2/\circ$  s přední výztuhou). Také jako u Rámu 1 úsek IV a navíc ještě úsek V nedosahoval přijatelných hodnot v porovnání s jinými úseky. Po přidání bočních výztuh a motoru do rámu úsek IV s hodnotou  $1474,67 \text{ Nm}^2/\circ$  a úsek V s hodnotou  $1812,19 \text{ Nm}^2/\circ$  nedosahoval dostatečné tuhosti. I zde je tedy vhodné v úsecích III, IV a V rám dodatečně vyztuzit nebo upravit. To bude opět řešeno stejným způsobem jako u Rámu 1. Jelikož je Rám 2 již vyroben,



je otázkou, jak dodatečné výztuhy dokáží výrazně zvýšit hodnotu torzní tuhosti celé konstrukce.

Při samotném porovnání obou rámu je kromě hodnot torzní tuhosti důležitá také hmotnost. K tomuto porovnání tak slouží hodnota poměru torzní tuhosti vůči hmotnosti. Ta u samostatného Rámu 1 činí  $26,80 \text{ Nm/kg}^\circ$ , oproti Rámu 2 s  $22,83 \text{ Nm/kg}^\circ$ . Po umístění bočních výztuh do rámu dosahují obě varianty téměř stejných hodnot jako u samostatných rámu ( $26,58 \text{ Nm/kg}^\circ$  Rám 1 a  $22,81 \text{ Nm/kg}^\circ$  Rám 2). Je to způsobeno nárůstem hmotnosti rámu díky výztuhám a k tomu úměrné zvýšení torzní tuhosti. Z tohoto porovnání lze konstatovat, že i v tomto ohledu Rám 1 předčí svojí konstrukcí Rám 2.

Oba tyto návrhy příhradových rámu z tenkostěnných profilů mohou být použity pro stavbu vozu Formule Student. Je však vhodné, aby úseky s nízkou hodnotou torzní tuhosti byly upraveny nebo dostatečně vyztuženy, především v případě Rámu 2. V budoucích letech by však mohlo být postupným cílem nahradit stávající konstrukci kompozitní uhlíkovou skořepinou.

**POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE**

- [1] PAUER, Václav. *Vývoj konstrukce závodních vozů : Vše podstatné z historie techniky formulových vozů*. 1. vydání. Praha : Granada Publishing, 2011. 356 s. ISBN 978-80-247-3015-8.
- [2] MOTEJL, Vladimír; HOREJŠ, Karel; KOŠEK, Jiří ; ZELINKA, Bohumír. *Učebnice pro řidiče a opraváře automobilů*. 2. vydání. Brno : Littera, 2001. 600 s. ISBN 80-85763-14-1.
- [3] UWB [online]. 02.11.2010 [cit. 2011-05-24]. Historie. Dostupné z WWW: <<http://www.uwbformula.cz/cz/fsae/historie.php>>.
- [4] CTU CarTech [online]. © 2008-2010 [cit. 2011-05-24]. Historie. Dostupné z WWW: <<http://www.carttech.cvut.cz/formula-student-sae/historie>>.
- [5] *Formula Hybrid International Competition* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Downloads. Dostupné z WWW: <<http://www.formula-hybrid.org/downloads.php>>.
- [6] *Formula Student Electric* [online]. 28-3-2011-22:50 [cit. 2011-05-24]. Electrical Safety Form Template online. Dostupné z WWW: <<http://www.formulastudentelectric.de/public-relations/fsg-news/news-details/article/electrical-safety-form-template-online/>>.
- [7] *Firenze Race Team* [online]. 2008 [cit. 2011-05-24]. Media & Docs. Dostupné z WWW: <[http://www.firenzerace.it/ing/vettura2010\\_2.php#](http://www.firenzerace.it/ing/vettura2010_2.php#)>.
- [8] *Karat racing* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Media. Dostupné z WWW: <<http://www.karat-racing.de/typo3temp/pics/8218943f03.jpg>>.
- [9] *Cardiff Racing* [online]. © 2010 [cit. 2011-05-24]. CR06. Dostupné z WWW: <<http://cardiffracing.co.uk/Pictures/Cars/CR06/CR06-1.jpg>>.
- [10] *Formula Racing Cologne* [online]. 2010 [cit. 2011-05-24]. Fotos. Dostupné z WWW: <[http://www.fr-c.de/Medien\\_Presse\\_\\_\\_Fotos.htm?ActiveID=1042](http://www.fr-c.de/Medien_Presse___Fotos.htm?ActiveID=1042)>.
- [11] *Brunel Racing* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Galllery. Dostupné z WWW: <<http://www.brunelracing.co.uk/gallery/folder.php?folder=12&photo=166>>.
- [12] *Autolexicon* [online]. © 2011 [cit. 2011-05-24]. Monopost. Dostupné z WWW: <<http://www.brunelracing.co.uk/gallery/folder.php?folder=12&photo=166>>. ISSN 1804-2554.
- [13] *Formula SAE®* [online]. © 2010 [cit. 2011-05-24]. Rules & Important Documents. Dostupné z WWW: <<http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/2011fsaerules.pdf>>.
- [14] *FSAE Online* [online]. 1.2. 18-Dec-09 [cit. 2011-05-24]. Rule Clarifications and Examples. Dostupné z WWW: <<http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/2011fsaerules.pdf>>.



- [15] ČEVELA, Lubomír. *Automa* [online]. © 2010 [cit. 2011-05-24]. Výměna dat mezi různými systémy CAD. Dostupné z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=33435](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33435)>.
- [16] *Svsfem* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. Produkty firmy ANSYS Inc. Dostupné z WWW: <<http://www.svsfem.cz/content/produkty-firmy-ansys-inc>>.
- [17] *3D Models, 3D Modeling Textures and Plugins at TurboSquid* [online]. © 2011 [cit. 2011-05-24]. Jordan 191 european formula 3d model. Dostupné z WWW: <<http://www.turbosquid.com/FullPreview/Index.cfm/ID/399512>>.
- [18] VÉVODA, A. *Porovnání moderních 3D CAD programů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Dosedla
- [19] KRKOŠKA, K. *Optimalizace konstrukce rámu vozidla Formule Student*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík
- [20] ČÍPEK, V. *Výpočtová analýza rámu formulového vozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík.
- [21] NIESNER, M. *Návrh konstrukčního uspořádání vozidla studentské formule*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Ramík.
- [22] Návod k MKP systému Ansys 12.1
- [23] NIELSEN, Jesper, *IMG\_1105* [online]. 2011 [cit. 2011-05-24]. photos. Dostupné z WWW: <<ftp://147.229.86.4>>.





## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

|                  |                        |                                                           |
|------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------|
| C                | [Nm/°]                 | celková torzní tuhost                                     |
| C <sub>13</sub>  | [Nm/°]                 | celková torzní tuhost úseku 13                            |
| C <sub>L</sub>   | [Nm <sup>2</sup> /°]   | torzní tuhost na jednotku délky                           |
| C <sub>L13</sub> | [Nm/°]                 | torzní tuhost na jednotku délky v úseku 13                |
| C <sub>Lm</sub>  | [Nm <sup>2</sup> /kg°] | poměr torzní tuhosti na jednotku délky a hmotnosti        |
| C <sub>m</sub>   | [Nm/kg°]               | poměr celkové torzní tuhosti a hmotnosti                  |
| F                | [N]                    | působící síla                                             |
| H2               | [mm]                   | rozchod vozu                                              |
| L                | [mm]                   | rozvor vozu                                               |
| l <sub>12</sub>  | [mm]                   | vzdálenost mezi body 1 a 2 (délka příčného profilu)       |
| L <sub>13</sub>  | [mm]                   | délka úseku 13                                            |
| l <sub>34</sub>  | [mm]                   | vzdálenost mezi body 3 a 4 (délka příčného profilu)       |
| m                | [kg]                   | hmotnost                                                  |
| M <sub>k</sub>   | [Nm]                   | krouticí moment                                           |
| U <sub>y</sub>   | [mm]                   | deformační posuv ve směru osy y                           |
| U <sub>y1</sub>  | [mm]                   | deformační posuv ve směru osy y v bodě 1                  |
| U <sub>y12</sub> | [mm]                   | rozdíl deformačních posuvů ve směru osy y mezi body 2 a 1 |
| U <sub>y2</sub>  | [mm]                   | deformační posuv ve směru osy y v bodě 2                  |
| U <sub>y3</sub>  | [mm]                   | deformační posuv ve směru osy y v bodě 3                  |
| U <sub>y34</sub> | [mm]                   | rozdíl deformačních posuvů ve směru osy y mezi body 4 a 3 |
| U <sub>y4</sub>  | [mm]                   | deformační posuv ve směru osy y v bodě 4                  |
| U <sub>z</sub>   | [mm]                   | deformační posuv ve směru osy z                           |
| U <sub>z1</sub>  | [mm]                   | deformační posuv ve směru osy z v bodě 1                  |
| U <sub>z12</sub> | [mm]                   | rozdíl deformačních posuvů ve směru osy z mezi body 2 a 1 |
| U <sub>z2</sub>  | [mm]                   | deformační posuv ve směru osy z v bodě 2                  |
| U <sub>z3</sub>  | [mm]                   | deformační posuv ve směru osy z v bodě 3                  |
| U <sub>z34</sub> | [mm]                   | rozdíl deformačních posuvů ve směru osy z mezi body 4 a 3 |
| U <sub>z4</sub>  | [mm]                   | deformační posuv ve směru osy z v bodě 4                  |
| α                | [°]                    | úhel natočení osy zadní nápravy                           |
| α <sub>12</sub>  | [°]                    | úhel natočení úseku 12                                    |
| α <sub>13</sub>  | [°]                    | úhel natočení na délce úseku 13                           |
| α <sub>34</sub>  | [°]                    | úhel natočení úseku 34                                    |