

**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

# **BEZPEČNOSTNÍ RÁM ZÁVODNÍHO VOZU**

RACE CAR ROLL CAGE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Bc. Jiří Sedlář

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

Ing. Ondřej Blaťák

BRNO 2010

### **Abstrakt:**

Diplomová práce pojednává o zvýšení ochrany posádky závodního automobilu provedením změn v jeho bezpečnostní konstrukci dle současných bezpečnostních předpisů. K posouzení navržených možností konstrukcí bylo použito metody konečných prvků. Výsledkem práce jsou jednotlivé varianty s rozdílnými prvky rámu, které mají za úkol zvýšit bezpečnost daného závodního automobilu.

### **Abstract:**

Master thesis is about increasing of protection the crew in race car with changes in its roll-over protective structure according to current safety rules. For examination was used the Finite Element Method. The products of this thesis are different variation of roll cages, which are tasked to increasing the safety of existent race car.

### **Klíčová slova:**

Bezpečnostní rám, výztuha, metoda konečných prvků, deformace, redukované napětí.

### **Keywords:**

Roll cage, brace, Finite Element Method, deformation, reduced tension.

### **Bibliografická citace**

SEDLÁŘ, J. *Bezpečnostní rám závodního vozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Blaňák.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci, Bezpečnostní rám závodního automobilu, vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Ondřeje Blaťáka s využitím zdrojů uvedených v seznamu použitých zdrojů a neporušil jsem při tom autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským, ve znění pozdějších předpisů).

V Brně, dne 24.5.2010.

Podpis:

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Ondřeji Blažákovi za jeho pomoc a odborné rady při vypracování diplomové práce.

Za pomoc s prací v programu Ansys děkuji panu Ing. Pavlu Ramíkovi.

Za spolupráci dále děkuji firmám CP Auto a Mičánek Motorsport.

Nakonec patří poděkování mým rodičům za jejich podporu při studiu.

## Obsah

1. Úvod .....	9
2. Automobilové závody .....	10
2.1. Bezpečnost na automobilových závodech .....	11
3. Bezpečnostní rám závodního automobilu.....	12
3.1. Vývoj bezpečnostních rámu do dnešní podoby .....	12
3.2. Havárie automobilů při automobilových závodech .....	13
3.3. Konstrukce rámu dle FIA .....	14
3.3.1. Definice částí bezpečnostního rámu .....	14
3.3.2. Základní struktury bezpečnostních rámu.....	16
3.3.3. Povinné vzpěry a výztuhy dle nejnovějších předpisů.....	17
3.3.4. Zesílení a výztuhy úhlů a spojů .....	19
3.3.5. Upevnění ochranné konstrukce ke skeletu/šasi. ....	20
3.3.6. Materiálové specifikace .....	21
3.3.7. Pokyny pro svařování .....	21
3.3.8. Ochranné obložení.....	21
3.4. Výroba rámu a zástavba do vozu .....	22
3.5. Homologační zkouška.....	24
3.5.1. Materiálové zkoušky.....	24
3.5.2. Zkoušky statického zatížení.....	24
4. Projekt Škoda Octavia .....	26
4.1. Bezpečnostní rám Škody Octavia .....	27
4.1.1. Detaily bezpečnostního rámu Škody Octavia.....	28
4.1.2. Vstupní hodnoty bezpečnostního rámu Škody Octavia.....	29
4.2. Práce v programu Ansys .....	30
4.2.1. Metoda konečných prvků (MKP).....	30
4.2.2. Ansys 12.1 .....	31
4.2.3. Použité prvky .....	32
4.2.4. Postup řešení v programu Ansys .....	34
5. Varianty bezpečnostních rámu .....	36
5.1. Kontrola původního rámu - RC20 .....	36
5.1.1. Zkouška na hlavním oblouku .....	36
5.1.2. Boční zatížení .....	38
5.1.3. Zatížení na předním oblouku .....	39
5.2. Kontrola rámu RC30.....	40

5.2.1.	Zatížení na hlavním oblouku .....	41
5.2.2.	Boční zatížení .....	42
5.2.3.	Zatížení na předním oblouku .....	43
5.3.	Kontrola rámu RC40.....	44
5.3.1.	Zatížení na hlavním oblouku .....	45
5.3.2.	Boční zatížení .....	46
5.3.3.	Zatížení na předním oblouku.....	47
5.4.	Kontrola rámu RC41.....	48
5.4.1.	Boční zatížení .....	48
5.5.	Kontrola rámu RC42.....	49
5.5.1.	Zatížení na předním oblouku .....	49
5.6.	Kontrola rámu RC50.....	50
5.6.1.	Zatížení na hlavním oblouku .....	51
5.6.2.	Boční zatížení .....	52
5.6.3.	Zatížení na předním oblouku.....	53
5.7.	Kontrola rámu RC60.....	54
5.7.1.	Zatížení na hlavním oblouku .....	55
5.7.2.	Boční zatížení .....	56
5.7.3.	Zatížení na předním oblouku.....	57
5.8.	Kontrola rámu RC70.....	58
5.8.1.	Zatížení na hlavním oblouku .....	59
5.8.2.	Boční zatížení .....	60
5.8.3.	Zatížení na předním oblouku.....	61
6.	Porovnání výsledků .....	62
6.1.	Tabulka výsledků.....	62
6.2.	Grafy deformací rámu.....	63
6.3.	Hmotnosti jednotlivých variant bezpečnostních rámu.....	64
7.	Závěr.....	65
	Seznam použitých zdrojů.....	66
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	67
	Seznam příloh.....	68

## 1. Úvod

V automobilových soutěžích je díky vysokému pokroku techniky dosahováno stále vyšších rychlostí vozidel s kterou roste riziko vzniku vážné nehody. V případě havárie by mohly být následky velmi často tragické, nebýt neustálého vývoje v oblasti bezpečnosti závodní techniky, bezpečnostních zón pro diváky a celkové organizace soutěží. Ve své diplomové práci jsem se zabýval jedním z bezpečnostních prvků závodního automobilu – bezpečnostním rámem. Tento prvek pasivní bezpečnosti chrání posádku při nehodě zachováním prostoru pro přežití a spolu s dalšími prvky bezpečnosti je povinnou výbavou závodního vozu. Cílem v této práci bylo provést analýzu bezpečnostního rámu závodního vozidla Škoda Octavia a provést změny na rámu za účelem zvýšení pasivní bezpečnosti posádky vozu. Jednotlivé varianty se liší zejména svými prvky konstrukce. Analýzu statického zatížení simulujícího homologační zkoušky jsem provedl v simulačním programu Ansys. V práci jsou dále uvedeny bezpečnostní řády a homologace dle automobilové federace FIA potřebné ke schválení bezpečnostní konstrukce vozidla, která je také podmínkou pro homologaci celého vozidla, postup výroby bezpečnostního rámu, přehled používaných materiálů a nehoda závodního automobilu s ohledem na použitou bezpečnostní konstrukci.



## 2. Automobilové závody

Automobilové soutěže jsou již od počátku automobilismu jeho nedílnou součástí. Automobilky se tak snažily demonstrovat svoji technickou úroveň a tím zvýšit prestiž značky a prodeje vozidel. Automobilové soutěže také sloužily a stále slouží k testování nových technických řešení, kdy se řada z nich později objeví i v sériových automobilech. Kromě technické úrovně a strategie záleželo také na schopnostech řidiče. Vzhledem k nedostatečným nebo vůbec žádným bezpečnostním opatřením však docházelo od počátku automobilismu k častým smrtelným nehodám. To vede mezinárodní automobilovou organizaci k neustálému zpřísnování bezpečnostních předpisů. Prvním uspořádaným závodem byl roku 1887 závod z Neuilly Bridge do Bois de Boulogne ve Francii. Vítězem se stal Georges Bouton na voze De Dion-Bouton [5]. Poté následovala éra dálkových závodů po nebezpečných cestách, mezi které patřily například britská Tourist Trophy nebo italská Mille Miglia. Z dnešních závodů je jim nejbližší Rallye Dakar. Prvním okruhem postaveným pro závodní automobily byla roku 1907 dráha Brooklands v Anglii. Významnou kapitolou v automobilovém sportu byla předválečná éra tzv. stříbrných šípů. Bylo to označení výkonných závodních vozů značek Mercedes-Benz a Auto Union, které již ve své době používaly přeplňování kompresorem a vstřikování paliva. K většímu rozšíření vstřikování paliva došlo u sériových vozidel poháněných zážehovým motorem až v sedmdesátých letech dvacátého století. V poválečné historii došlo k velkému rozvoji automobilových závodů zejména s rozšířením televize a dalších médií. Vzniklo spousta nových disciplín. K nejznámějším patří seriál závodů Formule 1 nebo automobilové soutěže Rallye. Automobilové závody můžeme rozdělit na závody na okruzích (např. Formule 1), na zpevněných komunikacích (např. rallye) nebo nezpevněných komunikacích (rallye Dakar).



Obrázek 1 Předválečný závodní automobil Auto Union [6]

## 2.1. Bezpečnost na automobilových závodech

Při automobilových soutěžích je potřeba zvýšených bezpečnostních opatření z důvodů hraničních výkonů jezdců i techniky. Se zvyšujícími se výkony vozidel a zvyšující se rychlostí docházelo v historii k mnoha tragédiím nejen na straně pilotů vozidel. Vzhledem k rostoucí popularitě závodů docházelo k tragickým událostem i v řadách diváků. V oblasti bezpečnosti závodního vozu musí projít zvláštními úpravami celá řada komponentů vozidla, která musí být vybavena bezpečnostní výbavou, jenž je specifikována v mezinárodním sportovním řádu, konkrétně v příloze J, v článku 253 – BEZPEČNOSTNÍ VÝBAVA. Patří sem zejména speciální předpisy ohledně provedení potrubí a čerpadel, brzdové soustavy, dodatečných uchycení, bezpečnostních pásů, hasicích přístrojů, bezpečnostní nádrže nebo bezpečnostní konstrukce, která je předmětem této práce.

Další důležitou součástí je samozřejmě bezpečnostní zázemí soutěže, např. únikové zóny, bezpečnostní bariéry z pneumatik na okružích závodech, bezpečnostní zóny pro diváky nebo svodidla při závodech do vrchu a mnoho dalších. Zejména při závodech na okruzích tvoří únikové zóny s bezpečnostními bariérami (obr. 2) významný náskok v bezpečnosti v porovnání se závody na silničních komunikacích.



Obrázek 2 Úniková zóna a bezpečnostní bariéry na okružích závodech [7]

### 3. Bezpečnostní rám závodního automobilu

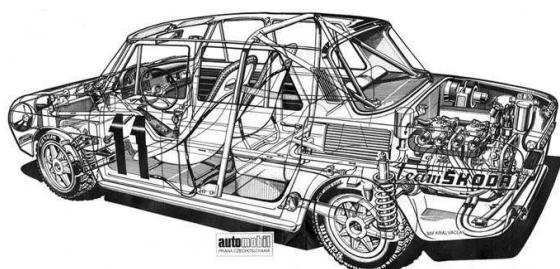
Bezpečnostní rám závodního automobilu je jeho nedílnou součástí. Má za účel zachovat ve vozidle prostor pro přežití posádky. Dalším účelem bezpečnostní konstrukce je zvýšení torzní tuhosti karoserie. Ochranu posádky musí zaručit při nejrůznějších druzích nehod, jako je například tzv. „roll over“ - převrácení vozidla, boční náraz nebo náraz na přední část půloblouku. Bezpečnostní rámy mohou být šroubované, svařované nebo kombinací obou. V profesionálních soutěžích se dnes téměř výhradně používají rámy svařované. Nejčastěji používaným materiálem jsou uhlíkové oceli s obsahem uhlíku do 0,3% C a oceli chrom-molybdenové.

#### 3.1. Vývoj bezpečnostních rámu do dnešní podoby

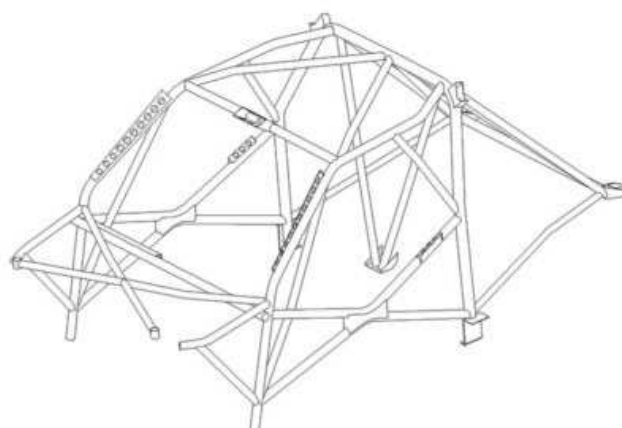
První závodní automobily byly většinou bez pevné střechy a neposkytovaly tak pilotovi žádnou ochranu při převrácení vozidla. Proto prvními bezpečnostními rámy byly oblouky za řidiči. Tento tzv. hlavní oblouk je základním prvkem i u dnešních vozů. Příklad takového jednoduchého oblouku je znázorněn na obrázku 3, kde je vyfocen originální vůz Shelby Cobra z roku 1963. V sedmdesátých letech byla bezpečnostní konstrukce složena již z většího počtu prvků, ale stále zde nebyly žádné výztuhy ve směru od hlavního oblouku dopředu, jak je znázorněno na obrázku 4 v průhledovém řezu Škody 120S. S vývojem a zvyšováním rychlostí vozidel se bezpečnostní struktura postupně zlepšovala až do podoby jako např. na obrázku 5, kde je znázorněna struktura rámu vozidla Subaru Impreza z roku 2008. Vůz, který je dnes homologován pro soutěže rallye, musí být vybaven bezpečnostním rámem s početnými výztuhami a počet těchto povinných výztuh se neustále zvyšuje.



Obrázek 3 Bezpečnostní oblouk vozu Shelby Cobra z roku 1963 [8]



Obrázek 4 Bezpečnostní konstrukce Škody 120S z roku 1972 [9]



Obrázek 5 Bezpečnostní konstrukce vozu Subaru Impreza z roku 2008 [10]

### 3.2. Havárie automobilů při automobilových závodech

Dodržení předepsané bezpečnostní konstrukce je nezbytné pro zachování prostoru pro přežití při nehodě závodního automobilu.

Příklad modrého vozidla Ford Mustang (obrázek 6) ukazuje, jak dopadne vozidlo při nehodě, pokud je vybaveno nevhodnou bezpečnostní konstrukcí. Tato nehoda se stala na okruhu Hallett Circuit ve Spojených státech v roce 2009. Vozidlo bylo vybaveno pouze bezpečnostní montovanou konstrukcí upevněnou ke karosérii jen ve čtyřech bodech. Toto vedlo u vozidla o pohotovostní hmotnosti 1700 kilogramů k totální destrukci vrchní části vozidla. V zakroužkované části (obrázek 7) můžeme vidět svislý sloupek ochranného oblouku, který prošel skrz podlahu, což bylo způsobeno nedostatečným uchycením ochranné konstrukce k podlaze. Posádka nehodu se štěstím přežila.



Obrázek 6 Ford Mustang před nehodou [11]



Obrázek 7 Důsledek nedostatečné bezpečnostní konstrukce. Zakroužkován svislý sloupek, který prošel skrz podlahu vozidla.[11]

### 3.3. Konstrukce rámu dle FIA

Konstrukce závodních rámu se řídí dle řádu FIA, přílohy J, článku 253. Článek 253 pojednává o bezpečnostní výbavě, kde kapitola 8 - Bezpečnostní konstrukce je právě o bezpečnostním rámu. V této kapitole jsou uvedeny nejdůležitější požadavky pro tuto práci z přílohy J z uvedené literatury [2].

Montáž bezpečnostní konstrukce je povinná a může být buď:

- a) vyrobena dle níže uvedených požadavků,
- b) homologovaná nebo certifikovaná ASN v souladu s homologačními předpisy pro bezpečnostní konstrukci,
- c) homologovaná FIA v souladu s homologačními předpisy pro bezpečnostní konstrukci. Musí být předmětem rozšíření (VO) homologačního listu vozidla homologovaného FIA.

Jakákoliv změna homologované nebo certifikované bezpečnostní konstrukce je zakázána. Trubky bezpečnostní konstrukce nesmějí vést kapaliny nebo cokoliv jiného. Bezpečnostní konstrukce nesmějí bránit jezdcí a spolujezdcí v nastoupení do vozu a z vystoupení z něj. Vzpěry mohou zasahovat do prostoru vyhrazeného pro posádku a procházet přitom přístrojovou deskou, obložením a zadními sedadly.

#### 3.3.1. Definice částí bezpečnostního rámu

V další části jsou popsány definice jednotlivých částí:

##### **Ochranná konstrukce**

Vícetrubková struktura instalovaná v prostoru pro posádku co možná nejbližší ke skeletu, jejíž funkcí je omezit deformace skeletu (šasi) v případě nehody.

##### **Oblouk**

Trubková struktura tvořící oblouk se dvěma upevňovacími deskami.

##### **Hlavní oblouk**

Trubkový jednodílný příčný oblouk, téměř vertikální (maximální sklon +/- 10° vzhledem k vertikále), umístěný napříč vozem bezprostředně za předními sedadly (obr. 9).

##### **Přední oblouk**

Identický s hlavním obloukem, ale jeho tvar kopíruje sloupky čelního skla a horní okraj čelního skla (obr. 9).

##### **Boční oblouk**

Jednodílný trubkový oblouk, téměř podélný a téměř svislý, umístěný z pravé a levé strany vozidla, jehož přední sloupek kopíruje sloupek čelního skla a zadní sloupek je téměř svislý a umístěný bezprostředně za předními sedadly (obr. 10).

##### **Boční půloblouk**

Identický s bočním obloukem, ale bez zadního sloupku (obr. 11).

### **Podélná vzpěra**

Téměř podélná trubka spojující horní části předního a hlavního oblouku.

### **Příčná vzpěra**

Téměř příčná trubka spojující horní části bočních půloblouků nebo bočních oblouků.

### **Diagonální vzpěra**

Diagonální trubka spojující jeden z horních rohů hlavního oblouku, nebo jeden z okrajů příčné vzpěry v případě bočního oblouku, s dolní upevňovací deskou proti oblouku nebo horní okraj jedné zadní vzpěry s dolní upevňovací deskou druhé zadní vzpěry.

### **Demontovatelné vzpěry**

Vzpěra bezpečnostní konstrukce, kterou je možné odstranit.

### **Vyztužení konstrukce**

Vzpěra přidaná k bezpečnostní konstrukci pro zlepšení její odolnosti.

### **Upevňovací deska**

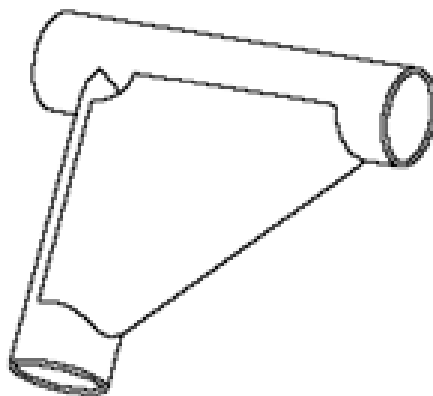
Deska přivařená k okraji trubky oblouku a umožňující její přišroubování a/nebo přivaření ke skeletu/šasi, většinou k výztužné desce.

### **Výztužná deska**

Kovová deska, upevněná ke skeletu/šasi pod kotevní deskou oblouku pro lepší rozdělení zatížení na skeletu/šasi.

### **Rohová výztuha**

Výztuha ohybu nebo spoje z plechů ohnutých do tvaru U, jejichž tloušťka musí být minimálně 1,0 mm. Okraje těchto výztuh musí být umístěny ve vzdálenosti předstávující 2 až 4násobek největšího průměru spojených trubek, vzhledem k vrcholu úhlu.



Obrázek 8 Rohová výztuha [2]

### 3.3.2. Základní struktury bezpečnostních rámu

Každý bezpečnostní rám musí být tvořen jednou ze tří základních struktur:

- 1) 1 hlavní oblouk + 1 přední oblouk +  
2 podélné vzpěry + 2 zadní vzpěry +  
6 upevňovacích desek



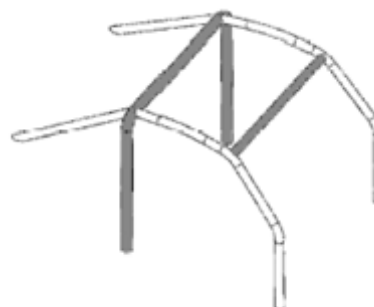
Obrázek 9 Varianta základní struktury [2]

- 2) 2 boční oblouky + 2 příčné vzpěry +  
2 zadní vzpěry + 6 upevňovacích desek



Obrázek 10 Varianta základní struktury [2]

- 3) 1 hlavní oblouk + 2 boční půloblouky +  
1 příčná vzpěra + 2 zadní vzpěry +  
6 upevňovacích desek



Obrázek 11 Varianta základní struktury [2]

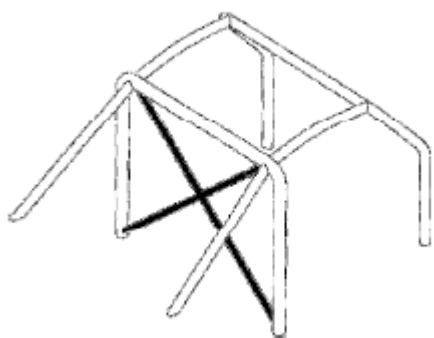
Svislý sloupek hlavního oblouku může mít jen jediný ohyb na své svislé dolní části a musí být co nejbližší k vnitřnímu obrysu skeletu. Přední sloupek předního nebo bočního oblouku musí co možná nejbližší kopírovat sloupky čelního skla a mít pouze jeden ohyb na své dolní svislé části. Vzpěry musí být spojeny s bočními oblouky, předním nebo hlavním obloukem na úrovni střechy. Na úrovni střechy nesmí být více než 4 rozebíratelné spoje. Zadní vzpěry musí být upevněny u střechy a u horních vnějších rohů hlavního oblouku po obou stranách vozidla. Musí se svislicí svírat úhel alespoň  $30^\circ$ , směřovat dozadu, být rovné, co nejbližší k vnitřním bočním panelům skeletu.

### 3.3.3. Povinné vzpěry a výztuhy dle nejnovějších předpisů

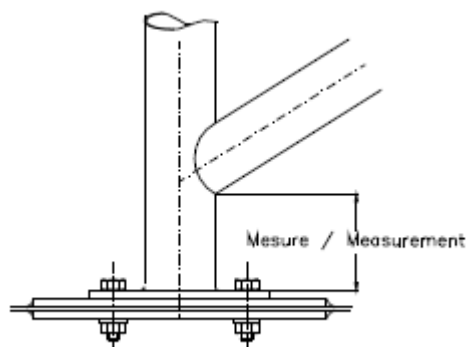
Konstrukce musí mít dvě diagonální vzpěry hlavního oblouku (obr. 12). Vzpěry musí být rovné a mohou být snímatelné.

Dolní okraj diagonály se musí spojovat s hlavním obloukem maximálně 100 mm od upevňovací desky (obr. 13)

Horní okraj diagonály se musí spojit s hlavním obloukem maximálně 100 mm od jeho spojení se zadní vzpěrou.

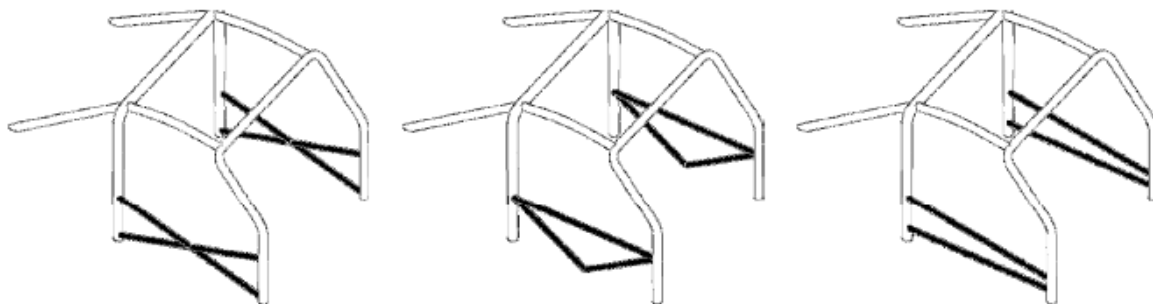


Obrázek 12 Diagonální vzpěry hlavního oblouku [2]



Obrázek 13 Místo spojení trubek [2]

Z každé strany vozu musí být namontovány jedna nebo více podélných vzpěr, které mohou být demontovatelné (obr. 14)

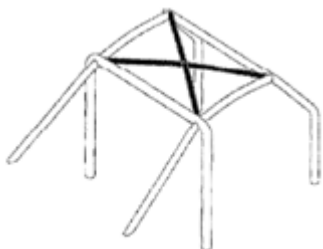


Obrázek 14 Boční vzpěry [2]



Boční ochrana musí být pokud možno co nejvyšší, ale horní bod jejího upevnění nesmí být vyšší než polovina výšky dveřního otvoru, měřeno od jeho základny. Jsou-li tyto horní upevňovací body umístěny před dveřním otvorem nebo za ním, toto omezení výšky zůstává platné pro příslušný průřez vzpěry a dveřního otvoru. V případě ochrany ve tvaru X se doporučuje, aby dolní upevňovací body vzpěr byly upevněny přímo na podélníku skeletu a aby minimálně jedna z větví X byla z jednoho dílu. Spojení vzpěr dveří s výztuhou sloupku čelního skla je povoleno. Pro soutěže bez spolujezdce mohou být boční vzpěry namontovány pouze na straně jezdce.

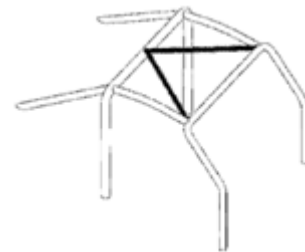
Horní část bezpečnostní konstrukce musí odpovídat jednomu z obrázků 15 – 17. Výztuhy mohou kopírovat zakřivení střechy. Pro soutěže bez spolujezdce, pouze v případě obrázku 15, může být namontována pouze jedna příčná vzpěra, ale její přední spojení musí být na straně jezdce. Okraje zesílení musí být maximálně 100 mm od spojení mezi oblouky a vzpěrami (neplatí pro vrchol ve tvaru V tvořený vzpěrami dle obrázků 16 a 17).



Obrázek 15 Střešní  
výztuha tvaru X [2]



Obrázek 16 Střešní  
výztuha tvaru V [2]



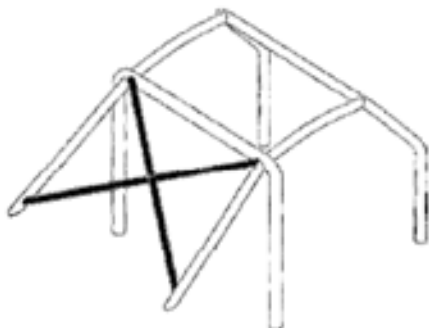
Obrázek 17 Střešní  
výztuha tvaru V [2]

Výztuha sloupku čelního skla (obr. 18) musí být namontována z obou stran předního oblouku a může být zahnutá, pokud je rovná při pohledu ze strany a úhel zahnutí nepřesáhne 20°. Její horní okraj musí být maximálně 100 mm od spojení mezi předním (bočním) obloukem a podélnou (příčnou) vzpěrou. Dolní okraj této vzpěry musí být maximálně 100 mm od kotevní desky předního oblouku nebo od přední desky bočního oblouku.

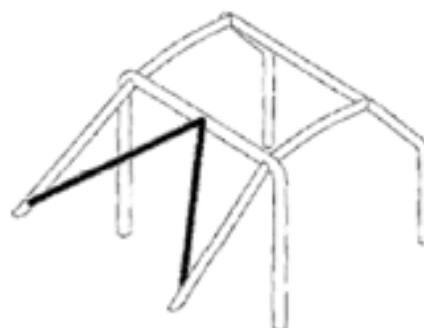


Obrázek 18 Výztuha sloupku čelního skla [2]

Diagonály zadních vzpěr mají konfiguraci dle obrázku 19. Můžou být nahrazeny výztuhami ve tvaru V dle obrázku 20, pokud je použita výztuha střechy ve tvaru V dle obrázku 17.



Obrázek 19 Výztuha  
zadních vzpěr tvaru X [2]

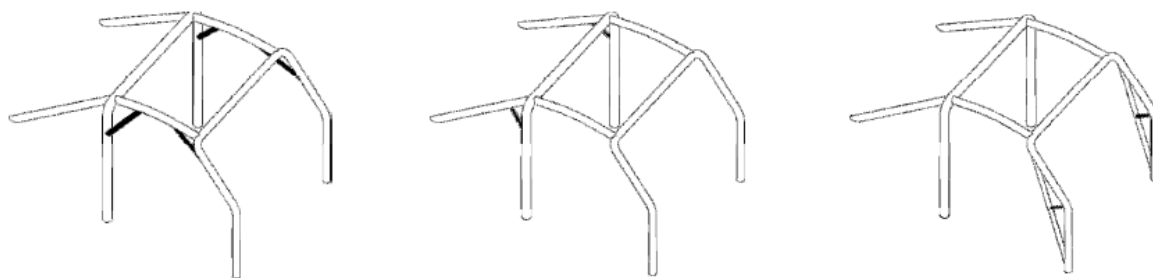


Obrázek 20 Výztuha zadních  
vzpěr tvaru V [2]

### 3.3.4. Zesílení a výztuhy úhlů a spojů

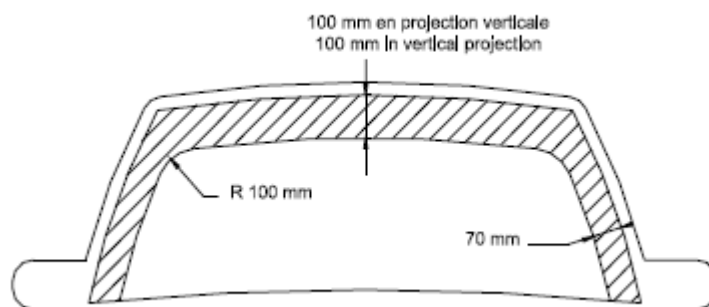
Spoje mezi diagonálními vzpěrami a hlavního oblouku, výztuhami střechy, výztuhami dveří a mezi výztuhami dveří a zesílením sloupku čelního skla (obr. 21) musí být zesíleny minimálně dvěma rohovými výztuhami. Pokud vzpěry dveří a výztuha sloupku čelního skla nejsou umístěny ve stejné rovině, výztuha může být tvořena svařenými plechy.

Výztuhy musí být buď z trubek, nebo plechů ohnutých do tvaru U. Tloušťka dílů tvořících výztuhu střech musí být minimálně 1,0 mm. Okraje výztužných trubek nesmějí být níže nebo dále než je střed výztuh, ke kterým jsou připevněny, s výjimkou spojení předního oblouku, které mohou být připojeny ke spojení výztuha dveří/přední oblouk.



Obrázek 21 Výztuhy úhlů a spojení [2]

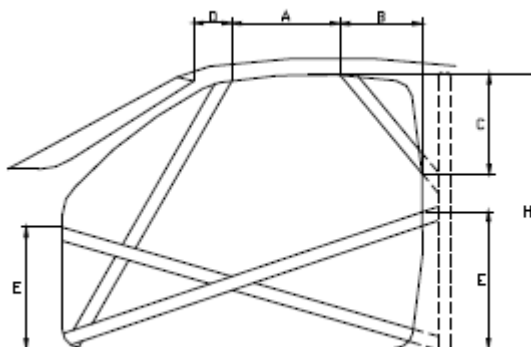
V čelním průmětu musí být výztuhy úhlu a spojení horních úhlů předního oblouku viditelné pouze přes plochu čelního skla, popsanou na obrázku 22.



Obrázek 22 Omezení pro umístění výztuh z důvodu viditelnosti [2]

Umístění zesílení konstrukce v otvoru dveří musí být dodrženy následující rozměry (obr. 23):

- Rozměr A musí být minimálně 300 mm.
- Rozměr B musí být maximálně 250 mm.
- Rozměr C musí být maximálně 300 mm.
- Rozměr E nesmí přesáhnout polovinu výšky otvoru dveří H.



Obrázek 23 Omezení pro umístění zesílení konstrukce v oblasti dveří [2]

### 3.3.5. Upevnění ochranné konstrukce ke skeletu/šasi.

Minimálně jeden upevňovací bod je povinný pro každý sloupek předního oblouku, pro každý sloupek bočních oblouků nebo půloblouků, pro každý sloupek hlavního oblouku a pro každý sloupek zadní vzpěry. Každý upevňovací bod musí zahrnovat jednu výztužnou desku o minimální tloušťce 3 mm. Každý upevňovací bod musí být připevněn minimálně 3 šrouby k ocelové výztužné desce přivařené ke skeletu, o minimální tloušťce 3 mm a minimální ploše  $120 \text{ cm}^2$ . U upevňovacích bodů zadních vzpěr minimálně 2 šrouby M8 a upevňovacími body o minimální ploše  $60 \text{ cm}^2$ . Tato plocha musí být kontaktní plochou mezi výztužnou deskou a skeletem. Upevňovací šrouby musí mít minimální průměr M8 a minimální kvalitu 8.8 (norma ISO) a upevnění musí být samojistícími maticemi nebo s pojistnými podložkami.

Pro skelety/šasi z jiného materiálu než ocel je jakýkoli svar mezi konstrukcí a skeletem/šasi zakázán, je povoleno pouze lepení výztužné desky na skelet/šasi

### 3.3.6. Materiálové specifikace

Jsou povoleny pouze trubky s kruhovým průřezem s následujícími specifikacemi:

Tabulka 1: Materiálové požadavky pro výrobu bezpečnostních rámu [2]

materiál	Minimální pevnost v tahu	Minimální rozměry (mm)	Použití
nelegovaná uhlíková ocel (viz níže) bežešvá tažená za studena obsahující maximálně 0,3 % uhlíku	350 N/mm <sup>2</sup>	45 x 2,5 (1,75"x0,095")	hlavní oblouk nebo boční oblouky podle konstrukce
		nebo 50 x 2,0 (2,0"x0,083")	
		38 x 2,5 (1,5"x0,095") nebo 40 x 2,0 (1,6"x0,083")	boční půloblouky a ostatní části bezpečnostní konstrukce (kromě jiných ustanovení výše)

Pozn.: Pro nelegovanou ocel musí být maximální obsah manganu 1,7% a pro ostatní přísady 0,6%. Při výběru kvality oceli je třeba věnovat pozornost zvláště tažnosti materiálu a vhodnosti pro svařování. Ohýbání musí být provedeno za studena s poloměrem zahnutí osy trubky rovnajícím se nejméně trojnásobku průměru trubky. Pokud je v průběhu této operace trubka tvarována do oválu, poměr mezi velkým a malým průměrem musí být minimálně 0,9. Plocha na úrovni ohnutí musí být jednotná a zbavená zvlnění nebo trhlin.

### 3.3.7. Pokyny pro svařování

Svar musí být proveden po celém obvodu trubky.

Všechny svary musí být v nejlepší možné kvalitě a úplně provařené (nejlépe obloukem v ochranné atmosféře).

V případě použití tepelně zušlechtné oceli je nutno bezpodmínečně dodržet speciální předpisy výrobce pro svařování (speciální elektrody, svařování v ochranné atmosféře).

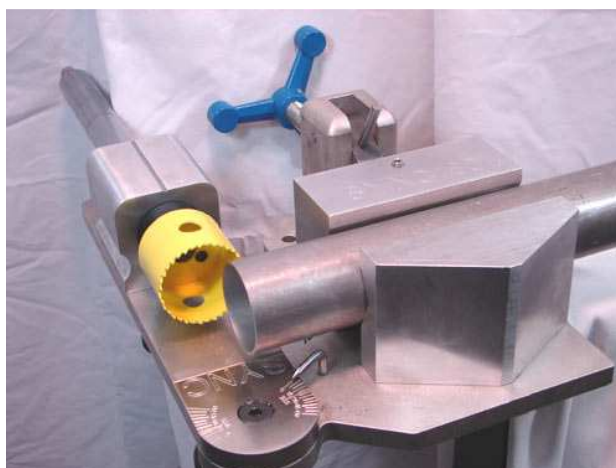
### 3.3.8. Ochranné obložení

V místech, kde by tělo posádky mohlo přijít do styku s bezpečnostní strukturou, je třeba jako ochranu použít nehořlavé obložení.

V místech, kde by se přilby posádky mohly dostat do kontaktu s bezpečnostní strukturou, musí obložení odpovídat normě FIA 8857-2001 typ A (viz technický list č. 23 – Obložení bezpečnostního oblouku homologované FIA).

### 3.4. Výroba rámu a zástavba do vozu

Pro zástavbu rámu do vozu je potřeba, aby byla karosérie odstrojená, tzn. vyjmuté čalounění, sedačky, palubní deska apod. Jednotlivé trubky rámu musí být umístěny tak, aby byly co nejbližší k vnitřnímu obrysu skeletu karoserie. Toho lze dosáhnout naohýbáním brzdových trubiček, z kterých se vytvoří šablony pro naohýbání trubek. Po nařezání trubek pásovou pilou, vytvoření dosedacích ploch mezi trubkami vytvořením výřezu (obr.24) a jejich naohýbání na ohýbacím zařízení za studena (obr. 25) se rám svařuje do jednoho celku uvnitř skeletu. Nejprve se svařuje základní struktura bezpečnostního rámu a střešní výztuhy. Poté se rám přivaří k upevňovacím deskám v karosérii.



Obrázek 24 Vytvoření dosedací plochy trubky nástrojem Sync180 [12]

Nakonec jsou k základní struktuře rámu přivařeny dané výztuhy. Při svařování bezpečnostního rámu je nutné dbát na maximální možnou kvalitu svaru a na jeho úplné provaření. K svařování chrommolybdenových konstrukcí se používá svařování v ochranné atmosféře plynů metodou MIG/MAG. Svar musí být proveden po celém obvodu trubky. Součástí homologace vozidla je také kontrola kvality svaru.



Obrázek 25 Ohýbání trubek pro rám na ručním ohýbacím zařízení [13]

## Použité materiály

Volba materiálu je nezbytným požadavkem pro bezpečnost rámu. Pouze při použití správných a kvalitních materiálů je možné zaručit aby rám plnil funkci, ke které byl navržen, pokud dojde k havárii. Zejména jsou důležité parametry tažnosti materiálu a vhodnosti pro svařování. Následující přehled materiálů popisuje materiály používané v praxi k výrobě bezpečnostních ráků.

### **Nízkouhlíková ocel**

Ocel je základním materiálem pro výrobu bezpečnostních ráků. Je mimojiné doporučen pro výrobu FIA. Jedná se o nelegovanou uhlíkovou ocel. Základním materiálem je ocel třídy 11 373. Je to neušlechtilá uhlíková ocel vhodná ke svařování. Rám je vyráběn z bezešvých trubek tažených za studena s maximálním obsahem uhlíku 0,3%. Výhodou je cenová dostupnost materiálu.

*Tabulka 2: Materiálové charakteristiky oceli 11 373 [14]*

Mez kluzu v tahu $R_e$	260 MPa
Mez pevnosti v tahu $R_m$	420-550 MPa
Tažnost A	21 %
Modul pružnosti E	210 000 MPa

### **Crom-molybdenová ocel**

Pro bezpečnostní konstrukce závodních automobilů se používá nízkolegovaná ušlechtilá chrom-molybdenová ocel s označením 25CrMo4 a obsahem 2,5% chromu a 0,4% molybdenu. Tato ocel vyniká vysokou mezí kluzu v tahu a mezí pevnosti v tahu. V současnosti se jedná o nejčastěji používanou ocel pro výrobu bezpečnostních konstrukcí.

*Tabulka 3: Materiálové charakteristiky oceli 25CrMo4 [4]*

Mez kluzu v tahu $R_e$	695 MPa
Mez pevnosti v tahu $R_m$	765 MPa
Tažnost A	18 %
Modul pružnosti E	210 000 MPa

### **Ocel BS4T45**

V poslední době se objevuje jako materiál pro bezpečnostní ráky ocel s označením BS4T45 o průměru 45 mm. Jedná se o uhlíko-manganovou ocel používanou zejména při konstrukci v leteckém průmyslu. Tato vysokopevnostní ocel se vyznačuje vysokou mezí pevnosti 700-900N/mm<sup>2</sup>.

### **Hliník**

Tento materiál se dříve používal pro svou malou hmotnost. V dnešní době se již ale nepoužívá z důvodů nedostatečné ochrany posádky.

### 3.5. Homologační zkouška

Homologace je vozidlu udělena dle výsledků z homologačních zkoušek. Základními zkouškami jsou zkoušky materiálové a zkoušky statického zatížení. Výrobce rámu může buď dodržet veškeré předpisy přílohy J, včetně materiálových, v případě, že se jeho konstrukce liší, ji musí otestovat buď u příslušné ASN (u nás Autoklub České Republiky) nebo přímo u mezinárodní automobilové federace FIA. Takto homologovaný rám je označen jedinečným, nekopírovatelným, nepřemístitelným štítkem nebo samodestrukční samolepkou. Štítek je označen jménem výrobce, homologačním číslem a jedinečným sériovým číslem výrobce.

#### 3.5.1. Materiálové zkoušky

Výrobce rámu musí doložit potvrzení o původu materiálu použitého pro výrobu rámu a prokázat, že používanými metodami svařování je dosaženo stejných a pevných svarů, které se pravidelně kontrolují laboratorními zkouškami. Také musí prokázat dodržování norem pro kvalitu.

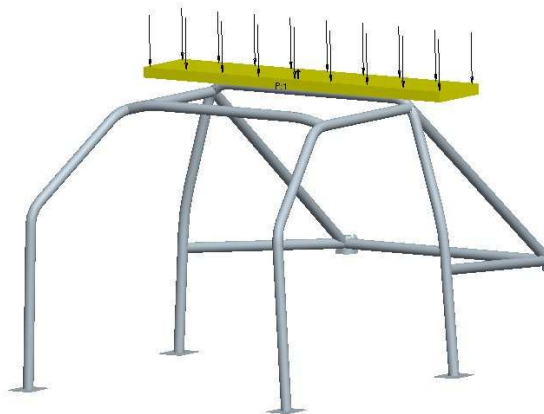
#### 3.5.2. Zkoušky statického zatížení

Dle FIA jsou předepsány 3 statické zkoušky za předepsaných podmínek. Jedná se o zkoušku na hlavní oblouk, boční zatížení a zkoušku na předním oblouku. Následující kapitola vychází z dokumentu ZMĚNY PŘÍLOHY J MSŘ FIA 2005-2006 [15].

##### Zkouška na hlavním oblouku

Zatížení působí na vrchol hlavního oblouku pomocí tuhého trnu vyrobeného z oceli. Konstrukce musí odolat statickému zatížení o velikosti  $4,5p$  [N], kde  $p$  je hmotnost vozu + 150 kg. Zatížení musí být aplikováno po dobu minimálně 15 sekund ve svislém směru. Na bezpečnostní konstrukci nesmí během zkoušky dojít k roztržení konstrukce ani pružné deformaci větší než 50 mm ve směru osy zatížení. Trn musí mít následující rozměry:

- Délka trnu musí být minimálně o 100 mm delší než šířka hlavního oblouku
- Šířka je 250 +/- 50mm
- Tloušťka minimálně 40 mm
- Poloměr 20 mm +/- 5 mm na hranách na straně oblouku



Obrázek 26 Model zkoušky na hlavním oblouku [4]

### Boční zatížení

Statické zatížení působí na svislý sloupek hlavního oblouku pomocí tuhého trnu z oceli. Konstrukce musí odolat zatížení o velikosti  $3,5p$  [N], kde  $p$  je hmotnost vozu + 150kg. Zatížení musí působit na konstrukci ve vodorovném směru ve výšce  $550 \pm 50$  mm nad nejnižším bodem upevnění hlavního oblouku po dobu minimálně 15 sekund. Na bezpečnostní konstrukci nesmí dojít k roztržení ani pružné deformaci vyšší než 50 mm ve směru osy zatížení. Trn musí mít následující rozměry:

- Délku 450mm +/- 50 mm
- Šířku 250 mm +/- 50mm
- Tloušťku minimálně 40 mm
- Poloměr 20 mm +/- 5 mm na hranách na straně oblouku.

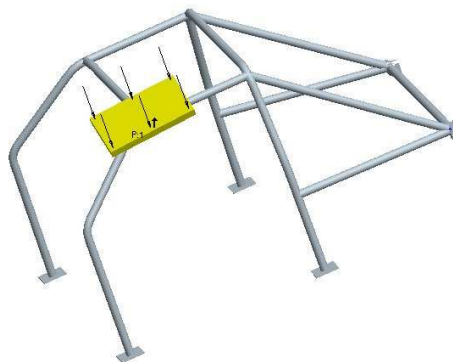


Obrázek 27 Model zkoušky bočního zatížení [4]

### Zkouška na předním oblouku

Konstrukce musí odolat zatížení o velikosti  $3,5p$  [N], kde  $p$  je hmotnost vozu + 150kg. Zatížení působí pomocí zátěžného tuhého ocelového trnu na vrchol předního oblouku v oblasti jeho křížení s přední příčnou vzpěrou po dobu minimálně 15 sekund. Podélná osa trnu je orientována vpřed ve směru jízdy vozu a zároveň směrem dolů pod úhlem  $5^\circ \pm 1^\circ$  vzhledem k horizontální rovině. Příčná osa trnu je orientována směrem ven z vozu směrem dolů pod úhlem  $25^\circ \pm 1^\circ$  vzhledem k horizontální rovině. Na bezpečnostní konstrukci nesmí dojít k roztržení ani pružné deformaci vyšší než 100 mm ve směru působení zatížení. Trn musí mít následující rozměry:

- Délku 450mm +/- 50 mm
- Šířku 250 mm +/- 50mm
- Tloušťku minimálně 40 mm
- Poloměr 20 mm +/- 5 mm na hranách na straně oblouku.



Obrázek 28 Model zkoušky na předním oblouku [4]

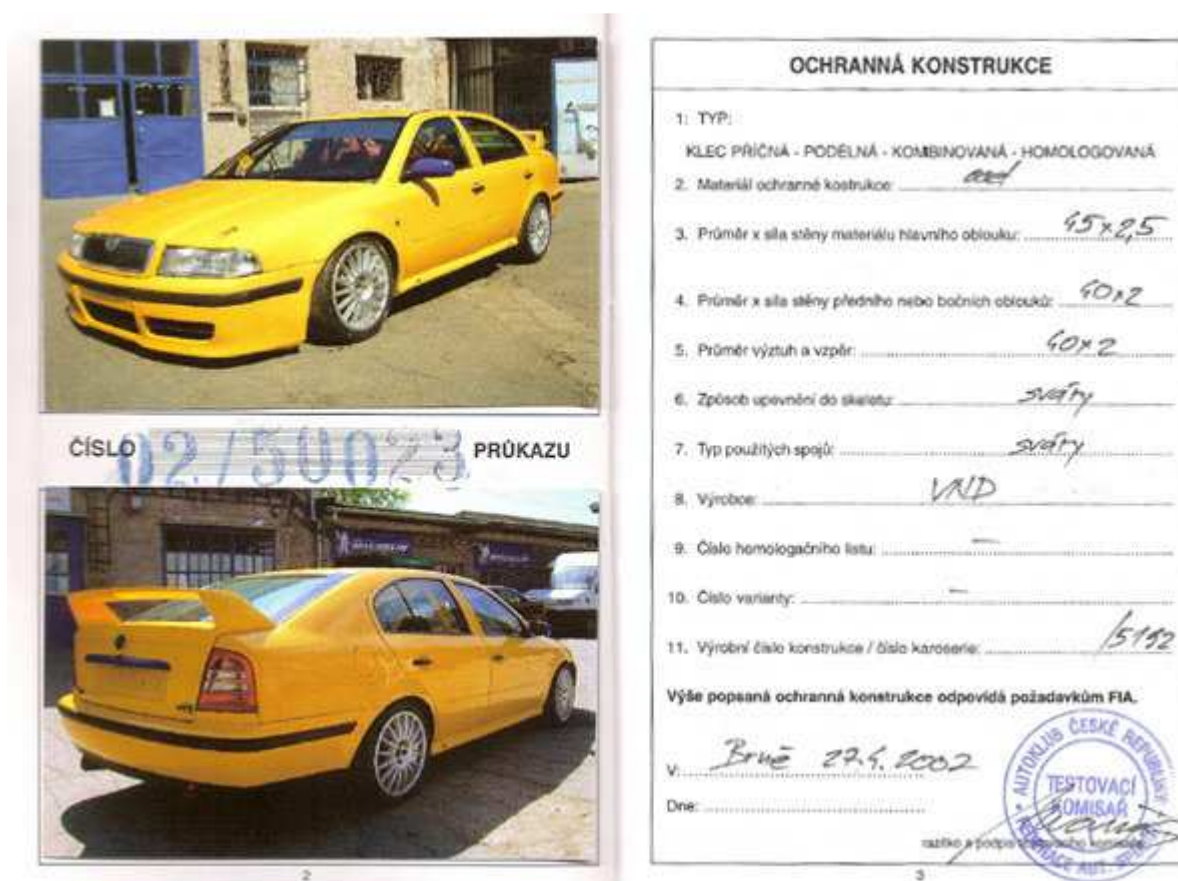


## 4. Projekt Škoda Octavia

Vozidlo Škoda Octavia bylo používáno v závodech českého seriálu Škoda Octavia Cup. Nyní je přestavováno firmou CP Auto na vozidlo pro Mistrovství České Republiky v divizi 4 do 1400 ccm. Mezi hlavní změny, které mají být na vozidle provedeny, patří:

- Výměna motoru – původní motor o zdvihovém objemu 2,0 litru bude nahrazen motorem 1,4 16V 200PS
- Odlehčení karosérie – původní dveře, střecha, kapota a přední blatníky jsou nahrazeny díly z karbonu a laminátu
- Nový bezpečnostní rám – původní rám, který byl schválen AČR v roce 2002 bude nahrazen novým bezpečnostním rámem

Mým úkolem bylo navrhnout možnosti řešení bezpečnostního rámu odpovídající aktuálním požadavkům FIA na bezpečnostní konstrukce deformačně-napěťovou analýzou.



Obrázek 29 Sportovní průkaz Škody Octavia s atestací původní ochranné konstrukce

#### 4.1. Bezpečnostní rám Škoda Octavia

Bezpečnostní rám závodního automobilu Škoda Octavia je vyroben z tenkostěnných bežešvých ocelových trubek třídy 11 373. Je tvořen následující základní strukturou. Základ tvoří hlavní oblouk, jehož dva svislé sloupky jsou přivařeny ke dvěma upevňovacím deskám v podlaze vozu. Na hlavní oblouk jsou v oblasti jeho ohybu u střechy přivařeny dva boční půloblouky, na každé straně jeden. Spodní části svislých sloupek obou bočních půloblouků jsou přivařeny k upevňovacím deskám. Na úrovni střechy a horní hrany čelního skla spojuje oba boční půloblouky jedna příčná vzpěra. Dalšími částmi základní struktury jsou dvě zadní vzpěry, které jsou k hlavnímu oblouku přivařeny ve stejném místě jako boční půloblouky, ale z druhé strany hlavního oblouku. Obě vzpěry jsou opět přivařeny k upevňovacím deskám. Pro základní strukturu rámu byly použity tenkostěnné bežešvé ocelové trubky o průměru 45 mm a tloušťce stěny 2,5 mm.



Obrázek 29 Bezpečnostní rám Škoda Octavia

Materiálem pro všechny ostatní vzpěry jsou trubky průměru 40 mm o tloušťce stěny 2 mm. Zlepšené upevnění rámu a zvýšení torzní tuhosti automobilu je zajištěno pomocí dvou podélných vzpěr, které jsou přivařeny k upevňovacím deskám na karoserii u předních tlumičů. Každá z těchto vzpěr je doplněna jednou šikmou vzpěrou. Hlavní oblouk je ve spodní části zpevněn jednou příčnou vzpěrou. Chybí tu však jakákoliv diagonální vzpěra. Ta je umístěna mezi zadními vzpěrami ve tvaru X. Mezi spodními konci kříže jsou zadní vzpěry vyztuženy jednou příčnou výztuhou. Další zpevnění konstrukce je dosaženo podélnými výztuhami mezi spodní částí zadních vzpěr a hlavním obloukem v oblasti ohybu jeho svislého sloupku. Na každé straně automobilu je po jedné takové výztuze. Proti bočnímu nárazu jsou na bezpečnostním rámu pouze dvě podélné šikmé výztuhy, na každé straně jedna. Výztuha je přivařena k hlavnímu oblouku v místě jako podélné výztuhy od zadních vzpěr. K svislému sloupku bočního půloblouku je přivařen v místě spodní výztuhy vedoucí od předních tlumičů. Zlepšení pevnosti karoserie dále zajišťují rohové vzpěry mezi hlavním obloukem a bočními půloblouky. V blízkosti přílby hlavy řidiče jsou trubky chráněny nehořlavým ochranným obložím.

#### 4.1.1. Detaily bezpečnostního rámu Škoda Octavia



Obrázek 30 Detail upevnění bezpečnostního rámu k uložení předního



Obrázek 31 Boční výztuhy



Obrázek 32 Výztužný kříž mezi zadními vzpěrami



Obrázek 33 Ochrana hlavy řidiče



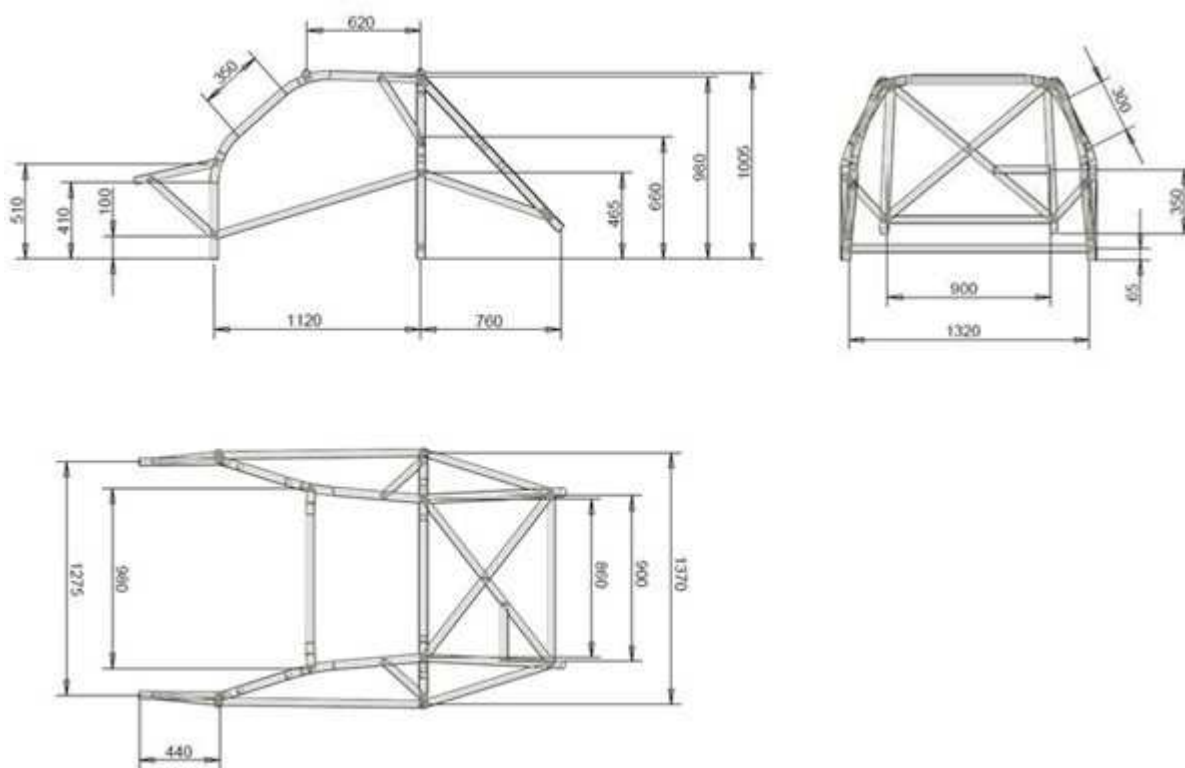
Obrázek 34 Upevnění bezpečnostního rámu k přednímu sloupku



Obrázek 35 Vzpěry vedoucí k uložení předního tlumiče

#### 4.1.2. Vstupní hodnoty bezpečnostního rámu Škody Octavia

Základními vstupními hodnotami byly rozměry původního bezpečnostního rámu, které jsem si na vozidle změřil. Použil jsem svinovacího metru a odměřil si zejména souřadnice potřebných bodů na rámu. Měřil jsem s přesností na 5 mm, což je vzhledem k velikosti rozměrů a způsobu výroby rámu dostatečná přesnost. Průměry trubek jsem změřil posuvným měřidlem. Pro kontrolu celkových rozměrů jsem změřil také potřebné úhly univerzálním úhломěrem. Souřadnice jsem zadal do programu ProEngineer, kde jsem vytvořil střednicový model rámu. Ten jsem poté importoval jako soubor IGES do výpočtového programu ANSYS, kde jsem prováděl analýzu jednotlivých řešení.



Obrázek 36 Základní rozměry bezpečnostního rámu Škody Octavia

Další vstupní hodnotou byla hmotnost vozidla, potřebná jako vstupní údaj při simulaci zatížení konstrukce. Hmotnost vozidla po daných úpravách by měla klesnout až na 1030 kilogramů. Ve svých simulacích jsem proto vycházel z hmotnosti vozidla 1050 kilogramů.

## 4.2. Práce v programu Ansys

Hlavní část své diplomové práce jsem prováděl simulace statického zatížení jednotlivých variant rámu. Využil jsem k tomu program Ansys 12.1 a ve výsledcích jsem se zaměřil na výsledné redukované napětí a na příslušné deformace. V této kapitole je popsána metoda konečných prvků, simulační program Ansys, použité prvky a postup řešení při simulaci zatížení.

### 4.2.1. Metoda konečných prvků (MKP)

Vznik této metody se datuje od padesátých let 20. Století. Její rozvoj je spojen s rozvojem výpočetní techniky. Jedná se o nejrozšířenější metodu napěťově-deformační analýzy. Používá se pro nejrůznější inženýrské výpočty jako je např. vedení tepla, proudění kapalin, elektřina a magnetismus. V této práci jsem metodu konečných prvků použil pro napěťově-deformační analýzu při statickém zatěžování. MKP je založena na variačním počtu, kdy hledá minimum nějakého funkcionálu. Funkcionál je zobrazení z množiny funkcí do množiny čísel. Je to pravidlo, podle kterého přiřadíme funkci na jejím definičním oboru nějakou číselnou hodnotu. Základním funkcionálem v deformačně-napěťové analýze pružných těles je jejich energie napjatosti. Energie napjatosti je práce spotřebovaná na deformaci tělesa, která je v případě pružné deformace vratná. Je to číselná hodnota přiřazená např. funkcím popisujícím deformační posuvy jednotlivých bodů tělesa. Tuto energii lze určit z přetvoření a napětí ve všech bodech tělesa pro libovolný deformovaný tvar tělesa. Zadáme-li dané zatížení a vazby, pak je deformovaný tvar tělesa jednoznačně definován. Těleso je deformováno energeticky nejméně náročným způsobem, což je matematicky vyjádřeno tzv. větou o minimu kvadratického funkcionálu, která formuluje princip, že z možných dějů proběhne ten, k jehož uskutečnění je potřeba minimální energie. Daným energetickým funkcionálem, jehož minimum určuje skutečný deformovaný tvar tělesa, je celková potenciální energie tělesa  $\Pi$ . Ta je definovaná jako rozdíl energie napjatosti tělesa a potenciálu vnějšího zatížení.

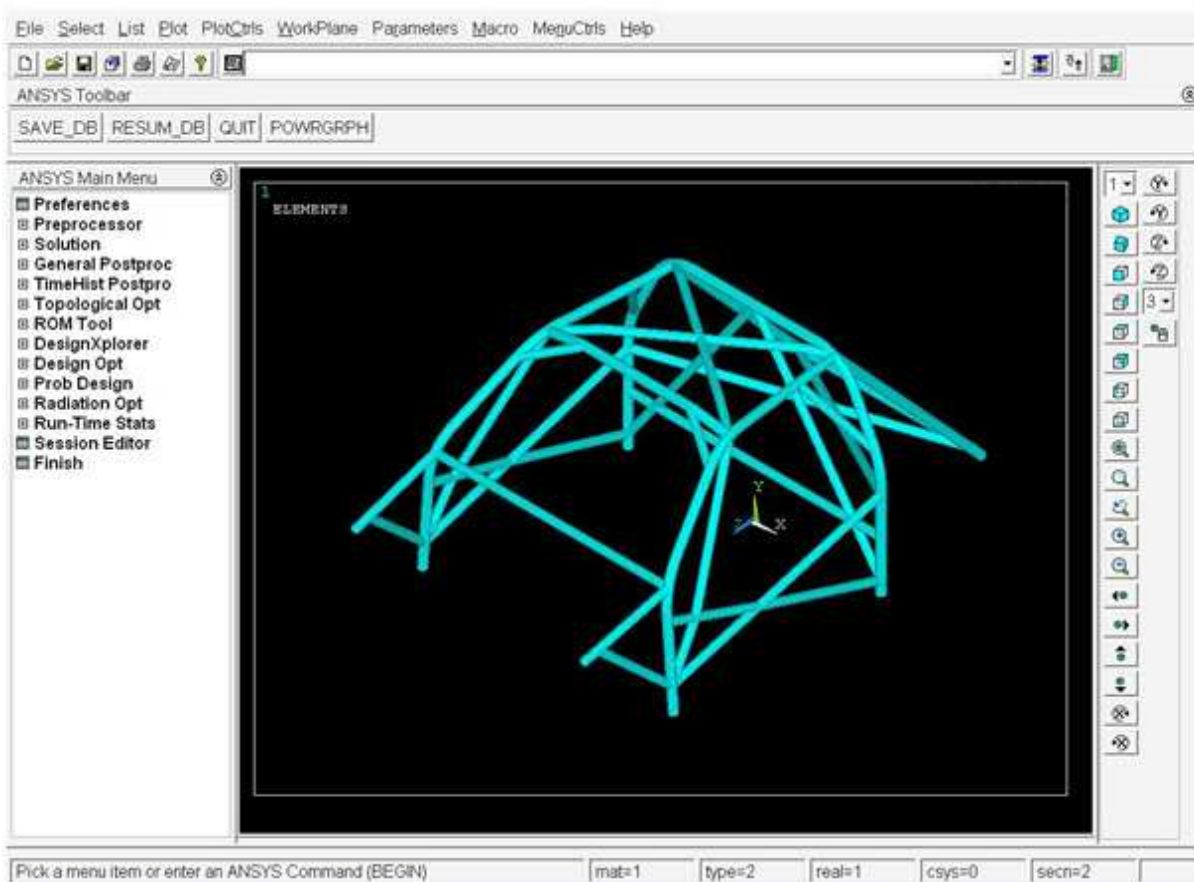
$$\Pi = W - P, \quad (1)$$

kde  $\Pi$  je celková potenciální energie tělesa,  $W$  je energie napjatosti tělesa,  $P$  je potenciál vnějšího zatížení.

Celková potenciální energie tělesa je potom funkcí posuvů jeho jednotlivých bodů. Pomocí variačních metod matematiky je poté nalezeno minimum funkcionálu, tzn. je nalezen takový tvar, u kterého bude při zadaných okrajových podmínkách funkcionál  $\Pi$  nejmenší a který se tedy ve skutečnosti jako jediný realizuje. Z deformačních posuvů jednotlivých bodů jsou pak určeny složky tenzoru přetvoření a z nich pomocí konstitutivních vztahů poté složky tenzoru napětí.

#### 4.2.2. Ansys 12.1

Ansys je simulační program založený na metodě konečných prvků. Je určen k řešení rozsáhlých lineárních a nelineárních úloh různých druhů: strukturální, teplotní, teplotně-mechanické, elektromagnetické, akustické, atd. Ansys má celou škálu produktů, jako je například Ansys Workbench, Ansys Multiphysics, Ansys Mechanical, Ansys CFX, Ansys Fluent, Ansys Academic a další. Ke své práci jsem využil verzi Ansys Academic 12.1 na fakultě strojního inženýrství. Při zadávání vstupních parametrů nejsou rozlišovány fyzikální jednotky. Jednotky musí být zadány tak, aby byly vzájemně konzistentní [1]. Tento program také umožňuje analýzu modelů importovaných z CAD systémů, např. z programu Pro/Engineer. Postup řešení v Ansysu na sebe navazuje v jednotlivých krocích. Záložka Preprocessing slouží k volbě typu elementů, zadání reálných konstant elementů, zadání materiálových vlastností, k tvorbě modelu a jeho vysíťování. Záložka Solution slouží zejména k zadání okrajových podmínek a zatížení. Část Preprocessingu slouží k načtení výsledků a k jejich zobrazení. Podstatou pro tvorbu sítě z konečného počtu prvků je vhodné zvolení elementu. K dispozici je velký výběr prvků, jako jsou například prvky typu link, beam, pipe, solid, shell, contact a další. Každý prvek má určité reálné konstanty, které musí být zadány uživatelem.

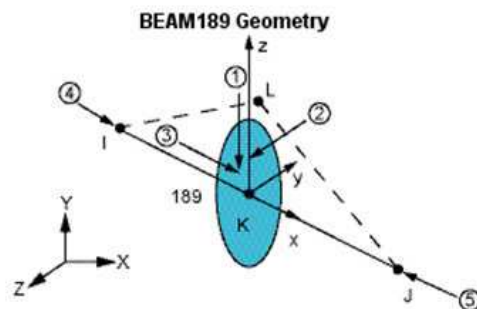


Obrázek 37 Pracovní prostředí programu Ansys s modelem bezpečnostního rámu

### 4.2.3. Použité prvky

#### Beam189

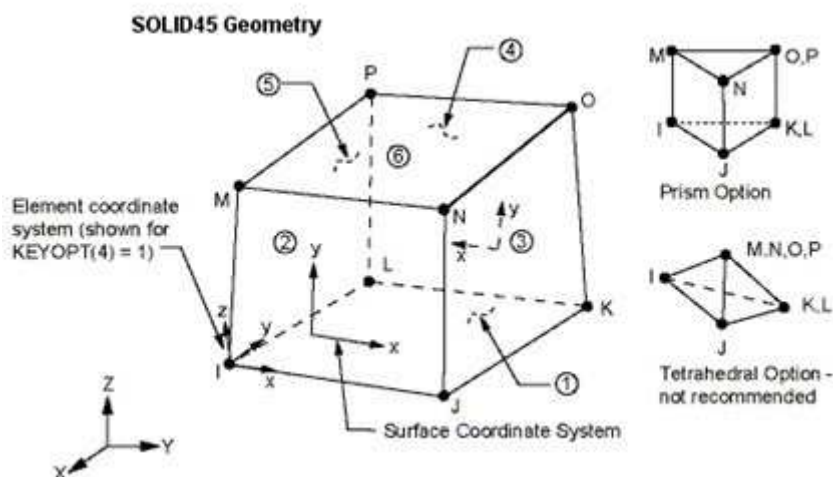
Prvek Beam189 patří mezi kvadratické 3-uzlové prvky. V základním nastavení se vyskytuje v každém uzlu 6 stupňů volnosti, které zahrnují posuvy v osách x, y, z a rotace okolo jejich os. Každý uzel může být doplněn sedmým stupněm volnosti, kterým je krut. Prvek je vhodný pro síťování štíhlých i mírně silnějších prutů. Pomocí tohoto prvku jsou určeny průřezové charakteristiky zadáním geometrických charakteristik daného průřezu. Prvek také umožňuje lineární zužování průřezu.



Obrázek 38 Geometrie prvku Beam189

#### Solid45

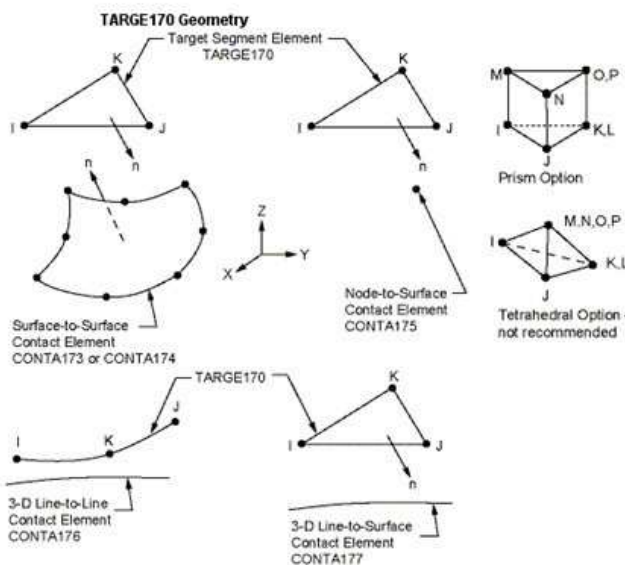
Prvek Solid45 se používá k 3D modelování struktur tělesa. Prvek je definován osmi uzly, které mají 6 stupňů volnosti na každém uzlu – posuvy v osách x, y, z a rotace kolem jejich os. Prvek je definován osmi uzly a materiálovými vlastnostmi. Využívá se pro tvorbu mapovaných a volných sítí. Výhodou mapovaného síťování (mapped meshing) je jednodušší síť, která zkracuje potřebnou dobu výpočtu. Výhodou volného síťování je, že síť je vytvořena plně automaticky počítačem (free meshing).



Obrázek 39 Geometrie prvku Solid45

### Targe170

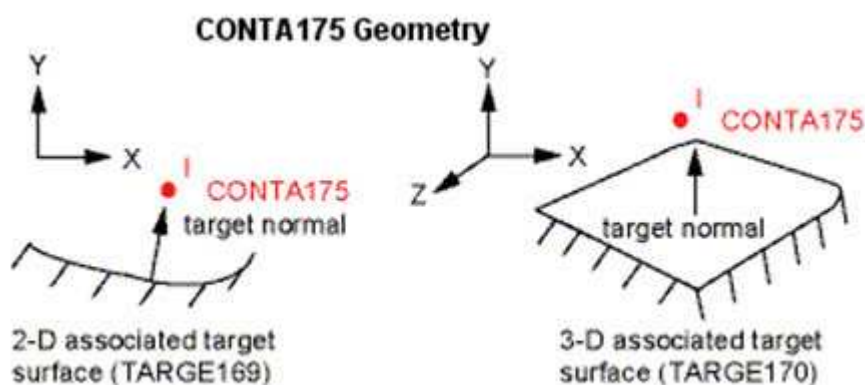
Prvek Targe170 se používá k určení 3D cílové plochy u kontaktní dvojice. Používá se spojená s následujícími kontaktními prvky: CONTA173, CONTA174, CONTA175, CONTA176 a CONTA177. Kontaktní prvky pokrývají těleso, skořepinu nebo čárový element. Tato plocha je pak pokryta řadou prvků Targe170 a tvoří pár s odpovídajícím kontaktním prvkem se vzájemnými reálnými konstantami. Na tyto prvky je možné vložit síly, momenty, posunutí nebo rotaci.



Obrázek 40 Geometrie prvku Targe170

### Conta175

Prvek Conta175 patří mezi kontaktní prvky, které se používají k definování kontaktu nebo skluzu mezi dvěma povrchy, mezi uzlem a povrchem nebo mezi čarou a povrchem. Prvek je použitelný pro 2D nebo 3D oblast kontaktní analýzy. Prvek Conta175 se umísťuje na povrch tělesa, prutu nebo skořepinového elementu. Kontakt nastane, když prvek pronikne jednu z částí cílového elementu typu targe na dané ploše. Kontakt umožňuje suché tření, smykové tření i tření zadané uživatelem.



Obrázek 41 Geometrie prvku Conta175



#### 4.2.4. Postup řešení v programu Ansys

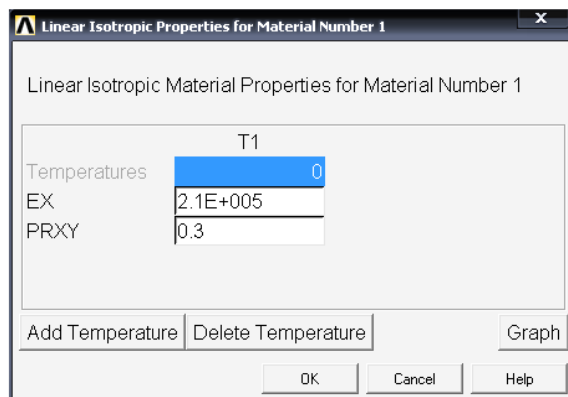
Na počátku práce v programu Ansys je potřeba rozhodnout, v jakých jednotkách se budou zadávat hodnoty, tak aby byly jednotky vzájemně konzistentní. Jsou 2 možnosti, jaké jednotky použít:

- 1) m, kg, N, °C, s, V, A
- 2) mm, tuny, N, °C, s, mV, mA

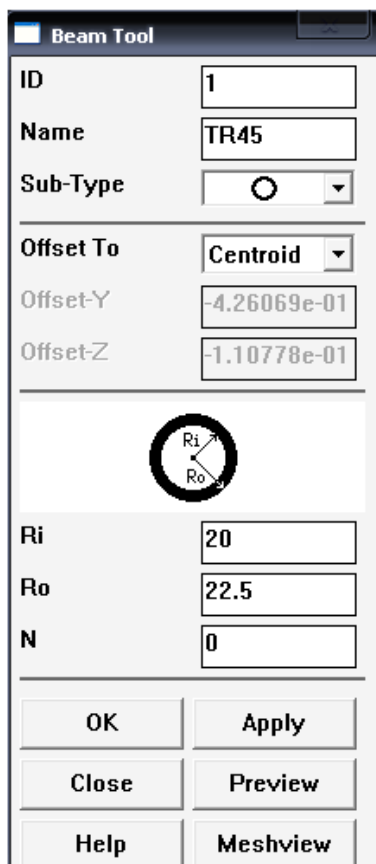
Vzhledem k rozměrům rámu jsem vybral 2. možnost. Výsledná napětí pak vycházely v MPa a posunutí v milimetrech [1].

Postup simulace v programu Ansys byl následující: nejprve jsem importoval střednicový model rámu, který jsem vytvořil v programu Pro/Engineer. Po úpravě modelu spočívající v rozdělení jednotlivých čar modelu v místech křížení čar, které je nezbytné pro správnou funkci modelu jsem připravil model v sekci Preprocessor.

V záložce Element Type → Add/Edit/Delete jsem zvolil prvky typu Beam189 pro vysíťování prutů rámu a prvek Solid45 pro vysíťování kvádrů, kterým jsem zatěžoval bezpečnostní rám. V záložce Material Props → Material Models jsem nastavil potřebné materiálové vlastnosti oceli: hodnoty modulu pružnosti a Poissonova čísla (viz obr. 42).

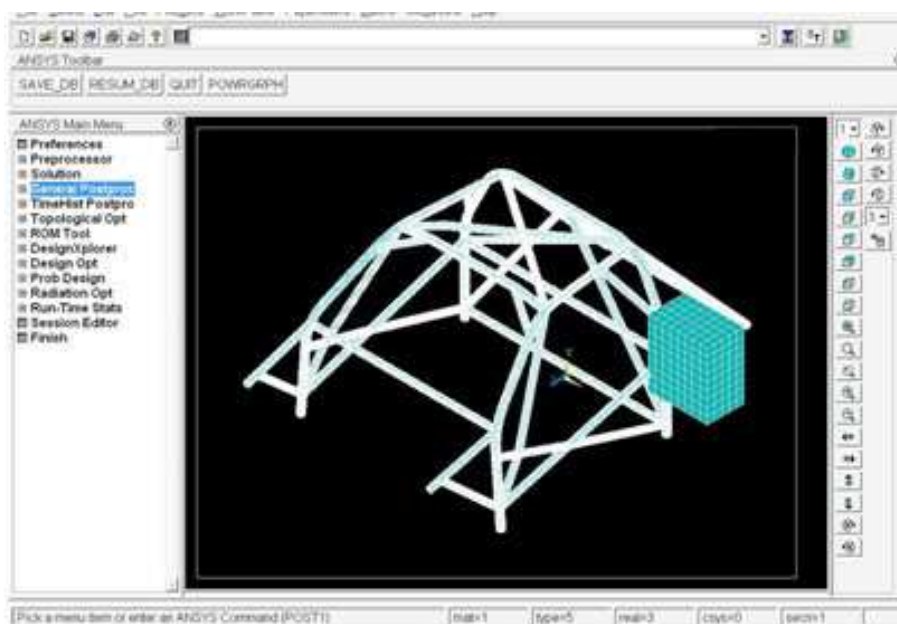


Obrázek 42 Zadané materiálové vlastnosti



V dalším kroku jsem v záložce Sections → Beam → Common Sections nastavil vlastnosti průřezů pro prvek Beam189 – tvar průřezu, poloměr trubek 22,5 mm odpovídající trubkám pro základní strukturu rámu nebo 20 mm u trubek pro výztuhy a vnitřní poloměr trubek 20 mm nebo 18 mm. V záložce Meshing → MeshTool jsem zadal vysíťování modelu rámu pomocí prvku Beam189. Velikost prvku jsem zvolil 5 z důvodu přesnosti výsledků. Tento způsob síťování prvkem Beam189 jsem zvolil z toho důvodu, že na rozdíl od objemového modelování stačí prutovému prvku pouze nadefinovat střednici. Kolem té se pak vytvoří prutový prvek dle zadaného průřezu. V případě, že bychom použili objemový model rámu, značně by se zvýšily výpočtové časy. Vzhledem k tomu, že jsem použil symetrické průřezy,

Obrázek 43 Nastavení základního tvaru prvku Beam189



Obrázek 43 Vysíťovaný model bezpečnostního rámu a zátěžného trnu

Pomocí záložek Modeling → Create → Keypoints, Lines, Areas, Volumes jsem potom vytvořil zátěžný trn dle předepsaných rozměrů pro zatížení na hlavní oblouk, boční zatížení a na přední oblouk. Nejprve jsem vytvořil klíčové body (Keypoints) pomocí souřadnic v souřadném systému. Tyto body jsem spojil čarami (Lines), ze kterých jsem vytvořil plochy (Areas). Z ploch je již možné vytvořit objem (Volumes), který je potřeba pro vysíťování prvkem Solid45. Vysíťování zátěžného trnu jsem provedl velikostí 50 mapovaně pro snížení výpočetního času. Následovalo zavedení kontaktu mezi plochou zátěžného trnu a pruty rámu, které byly se zátěžným trnem v kontaktu. Kontakt jsem zavedl pomocí příkazu Contact Manager. Prvky Targe170 a Conta175 vytvoří a přiřadí Contact Manager automaticky dle zadaného kontaktu.

Poté jsem v záložce Solution → Define Loads → Apply → Structural → Displacement → On Areas, On Keypoints zadal potřebné okrajové podmínky: osmi místům pro upevnění rámu jsem omezil posuvy v osách x, y, z. Zátěžnému trnu jsem odebral dva stupně volnosti, vždy na dvou protějších stranách po jednom stupni volnosti podle toho, jestli se jednalo o zkoušku na hlavním nebo předním oblouku nebo o boční zatížení tak, aby se mohl trn pohybovat vždy v jedné ose ve směru zatížení. V záložce ... → Structural → Pressure → On Areas jsem zadal tlak působící na zátěžný trn dle předpisů. V případě zatížení na hlavní oblouk se jednalo o sílu 54000 N působící na plochu (1600 . 250) mm. V případě bočního zatížení a zatížení na přední oblouk byla síla 42000N na plochu (450 . 250) mm. Následně jsem spustil řešení v záložce Solution → Solve → Current LS.

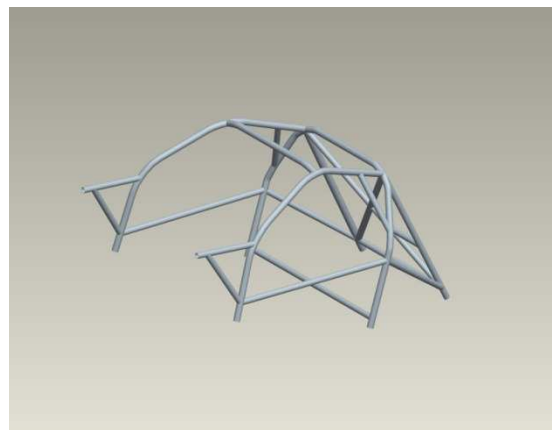
Načtení výsledků jsem provedl v záložce General Postproc → Read Results → First Set. Výsledky jsem vytiskl v záložce General Postproc → Plot Results → Contour Plot → Nodal Solution. Zde jsem vybral výsledky von Mises Stress pro redukované napětí a Displacement vector sum pro průhyb. Výsledky jednotlivých variant jsem uvedl v následující kapitole. Před vytisknutím výsledků jsem pomocí záložky Select → Entities vybral elementy napojené na čáry, aby se při výsledcích zobrazily pouze jednotlivé elementy rámu a nebyly zakrývány zátěžným trnem. Vytisknutí obrázků pro tuto práci jsem provedl v záložce PlotCtrls → Redirect Plots → To JPEG File ...

## 5. Varianty bezpečnostních rámu

V této kapitole jsou uvedeny jednotlivé varianty rámu, které jsem vytvořil s důrazem na interpretaci výsledných redukovaných napětí na modelu a hodnoty deformací. Každý rám má svůj pracovní název skládající se z písmen RC (rollcage) a pracovního čísla. První variantou je analýza původní bezpečnostní konstrukce s pracovním názvem RC20.

### 5.1. Kontrola původního rámu - RC20

Původní konstrukci jsem kontroloval simulací homologační zkoušky v programu Ansys. Vzhledem k malému počtu výztuh jsem očekával větší průhyby ve všech třech zkouškách. Tato simulace sloužila zejména k porovnání s nově navrženými řešeními a k nalezení slabých míst konstrukce.

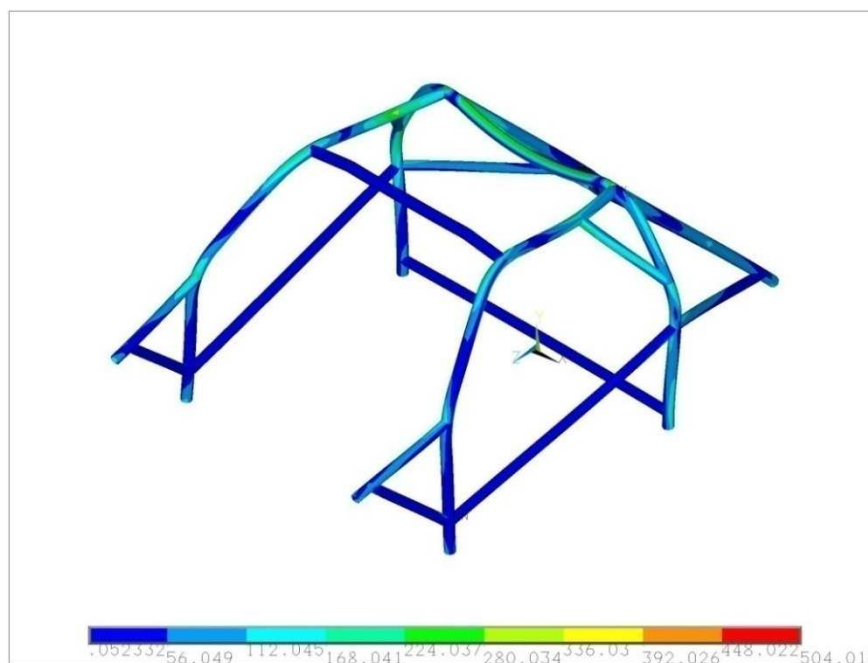


Obrázek 44 Model bezpečnostního rámu RC20

#### 5.1.1. Zkouška na hlavním oblouku

##### Redukované napětí

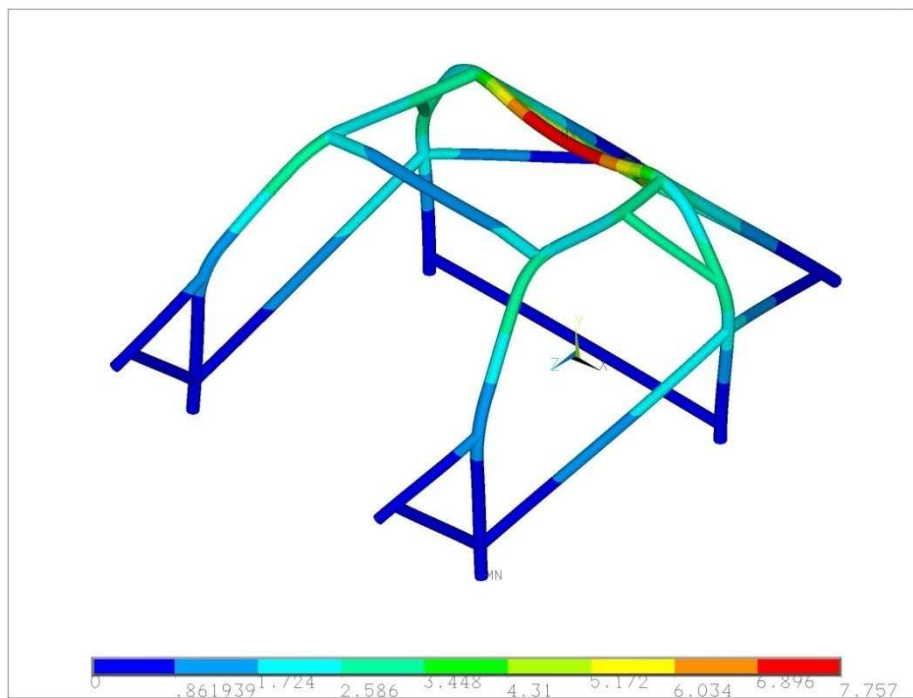
Při zkoušce na hlavním oblouku byla maximální hodnota redukovaného napětí na modelu 504 MPa v místech průniku jednotlivých prutů v horní části hlavního oblouku. Hodnoty redukovaného napětí v příčném prutu hlavního oblouku dosahovaly maximálních hodnot mezi 336 MPa a 392 MPa. Průběh redukovaných napětí je znázorněn na obrázku 45.



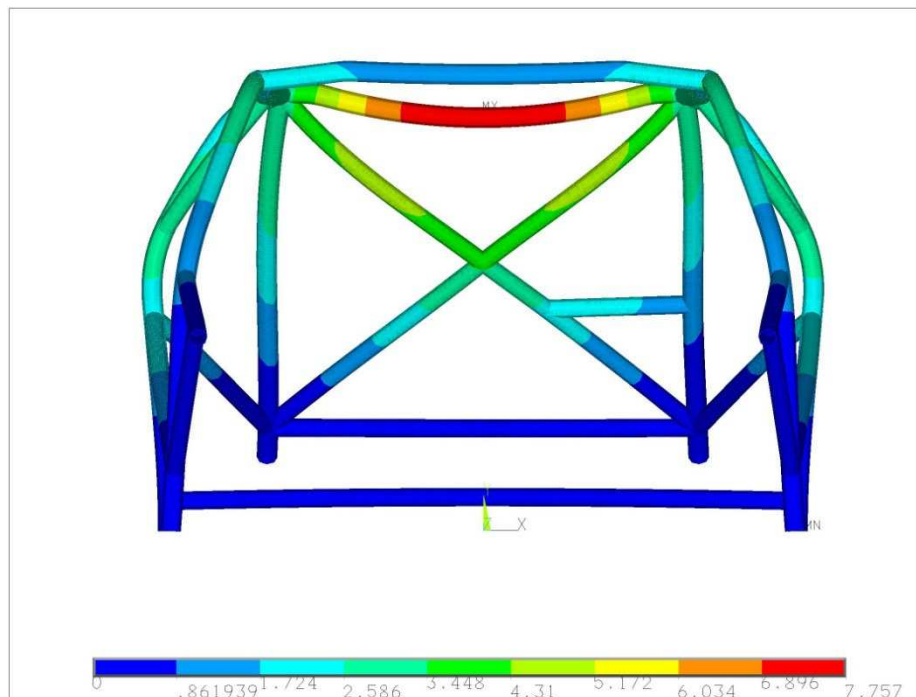
Obrázek 45 Průběh redukovaných napětí při zatížení na hlavní oblouk modelu RC20

### Deformace

K největším deformacím došlo ve střední části příčného prutu hlavního oblouku. Nejvyšší hodnota deformace dosahovala hodnoty 7,8 mm. Došlo zde k největšímu ohybu (obr. 47) prutu mezi rohy hlavního oblouku, jelikož zde není žádná výztuha, které jsem aplikoval v dalších variantách rámu. Grafické zobrazení deformací jsou znázorněny na obrázcích 46 a 47.



Obrázek 46 Průběh deformací při zatížení na hlavním oblouku modelu RC20

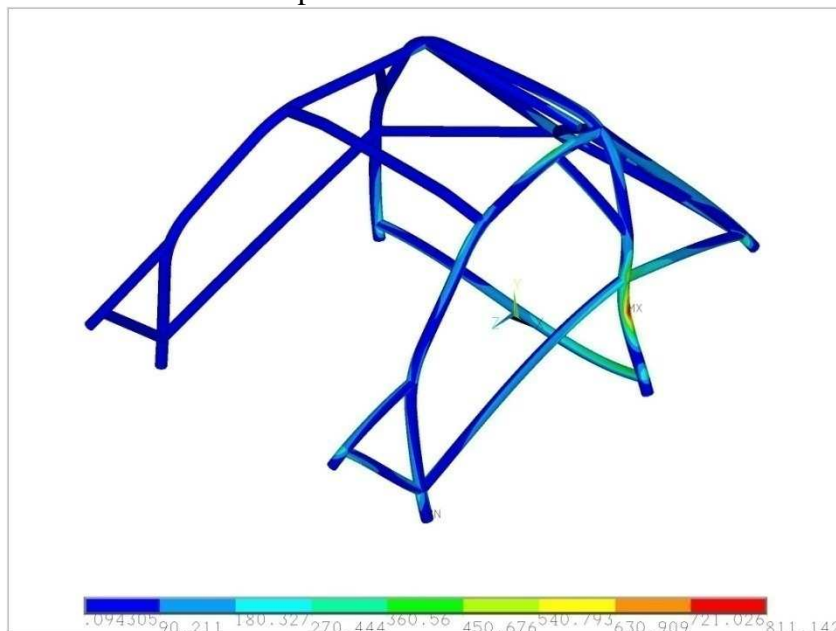


Obrázek 47 Průhyb hlavního oblouku modelu rámu RC20

### 5.1.2. Boční zatížení

#### Redukované napětí

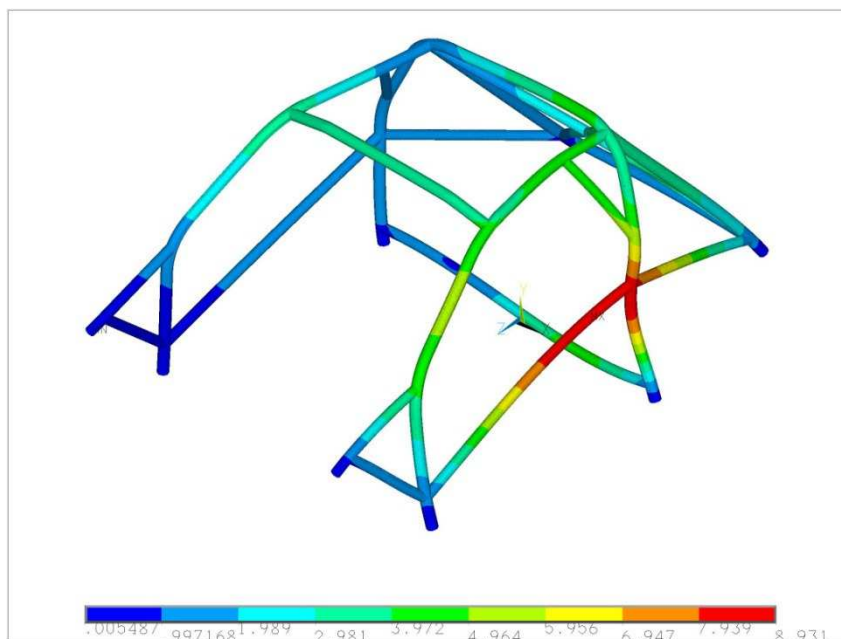
Při aplikaci bočního zatížení došlo u rámu ke zvýšenému namáhání v oblasti zatěžování zátěžným trnem a v oblasti podélných prutů, do kterých se rozložilo napětí (obr. 48). Maximální hodnota redukovaného napětí v oblasti zatěžování dosahovala hodnoty 811 MPa.



Obrázek 48 Průběh napětí při bočním zatížení modelu RC20

#### Deformace

Největší posuvy prutů o hodnotě 7,9 mm až 8,9 mm byly dosaženy v oblasti zatížení zátěžným trnem a podélných bočních výztuh v blízkosti svislého sloupku hlavního oblouku.

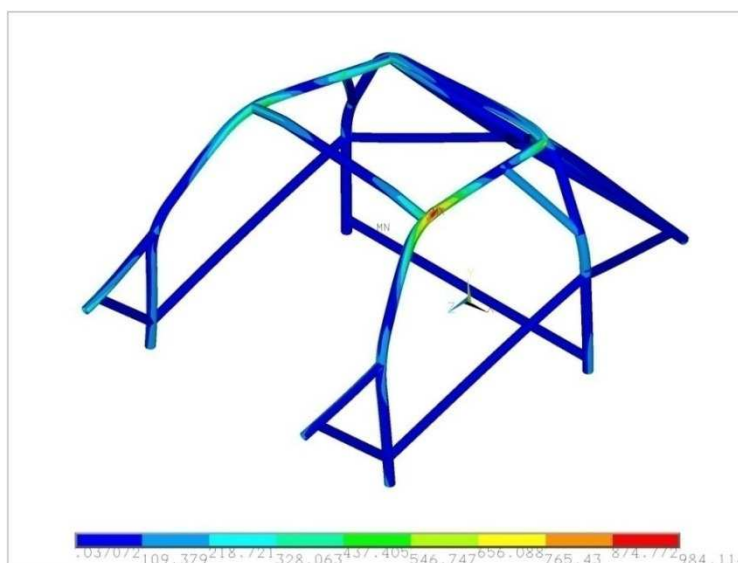


Obrázek 49 Průběh deformací při bočním zatížení modelu RC20

### 5.1.3. Zatížení na předním oblouku

#### Redukované napětí

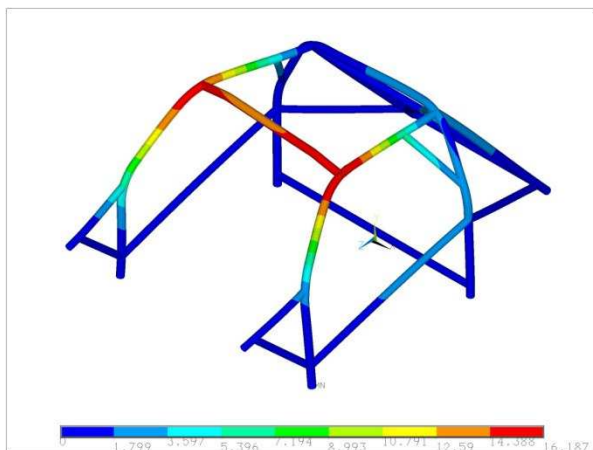
Průběh redukovaného napětí při tomto zatížení je zobrazeno na obrázku 50. Nejvyšší hodnoty 984 MPa bylo dosaženo v místě styku se zátěžným trnem. V zadní části bočního půloblouku je vidět snížení napětí v oblasti umístění rohové výztuhy, která vede od sloupku hlavního oblouku.



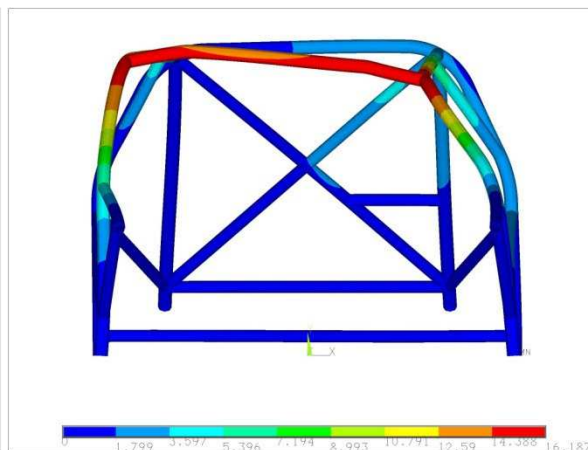
Obrázek 50 (vpravo) Průběh napětí při zatížení na předním oblouku modelu RC20

#### Deformace

Na obrázcích č. 51 a 52 je vidět deformovaný tvar rámu a maximální hodnoty deformací. Oproti předchozím zkouškám zde dochází k výrazným deformacím, což je pochopitelné, protože zde nejsou umístěny žádné výztuhy, které by deformaci snižovali. Nejvyšší hodnota deformací zde dosahuje 16,2 mm.



Obrázek 51 Průběh deformací při zatížení na předním oblouku modelu RC20



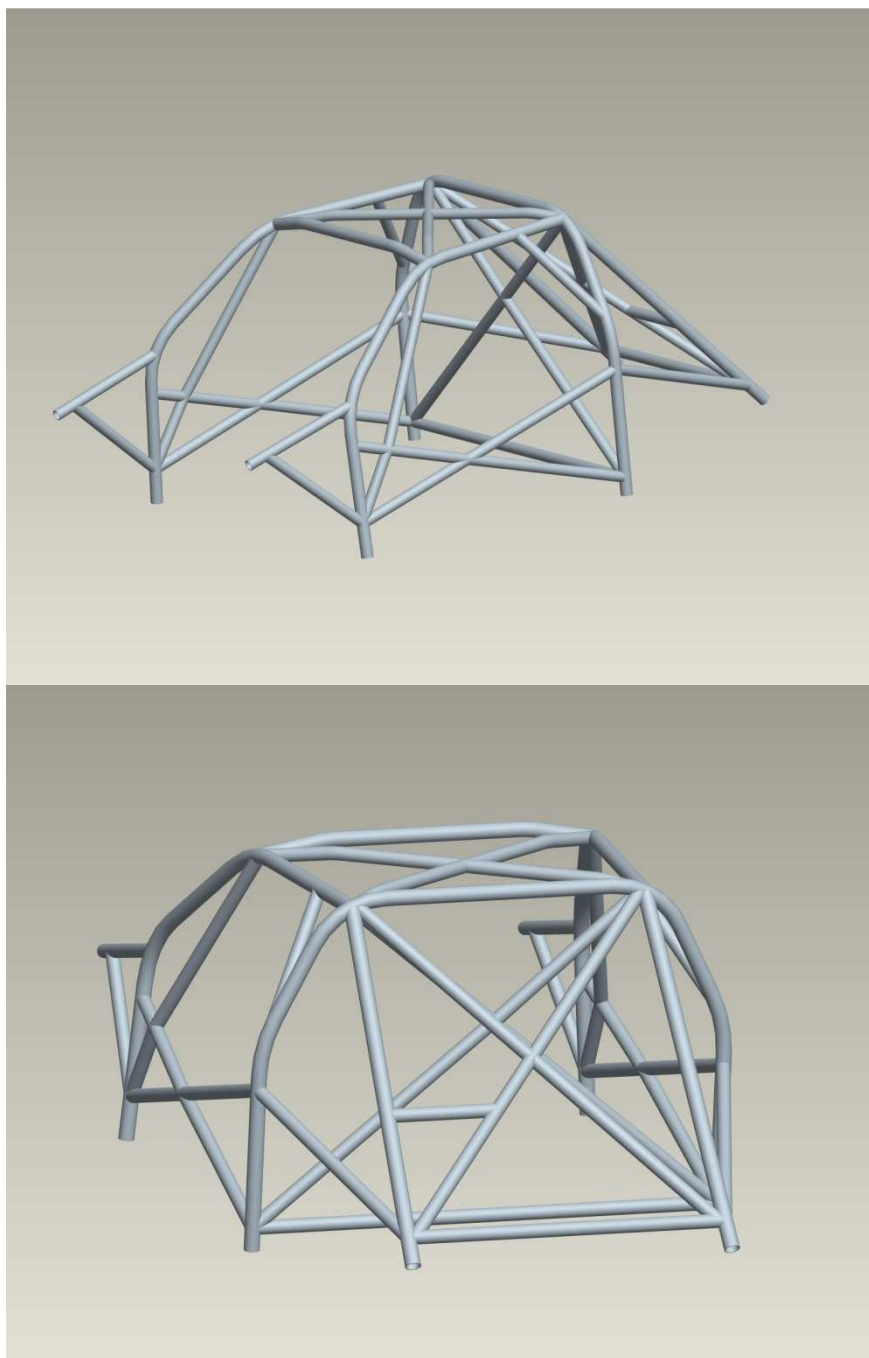
Obrázek 52 Průhyb prutů předního oblouku modelu RC20

#### Vyhodnocení statické zkoušky rámu RC20

Vzhledem k nejvyššímu dosaženému redukovanému napětí při zkoušce na předním oblouku tato konstrukce z hlediska bezpečnosti nevyhovuje. Přestože hodnoty deformací nepřekračují stanovenou mez, hodnota redukovaného napětí 984 MPa je vysoko nad mezí pevnosti oceli třídy 11373 a při zkoušce by tedy došlo k roztržení konstrukce rámu, což zakazuje mimojiné i homologační zkouška.

## 5.2. Kontrola rámu RC30

V první navrhované variantě jsem vytvořil model bezpečnostního rámu, který odpovídá dnešním bezpečnostním předpisům. Pro vyztužení bezpečnostní konstrukce jsem použil výztuhy ve tvaru X. Tento model potom sloužil k porovnání s modelem, kde jsem umístil převážně vzpěry ve tvaru V. Na tomto modelu jsou oproti původní konstrukci zesíleny přední sloupky povinnou výztuhou. Proti bočnímu nárazu jsou zde boční výztuhy ve tvaru X. Dále je těmito výztuhami oproti původnímu modelu vybavena i střecha a hlavní oblouk. Všechny nové konstrukce byly uvažovány pro výrobu z chrom – molybdenové oceli.

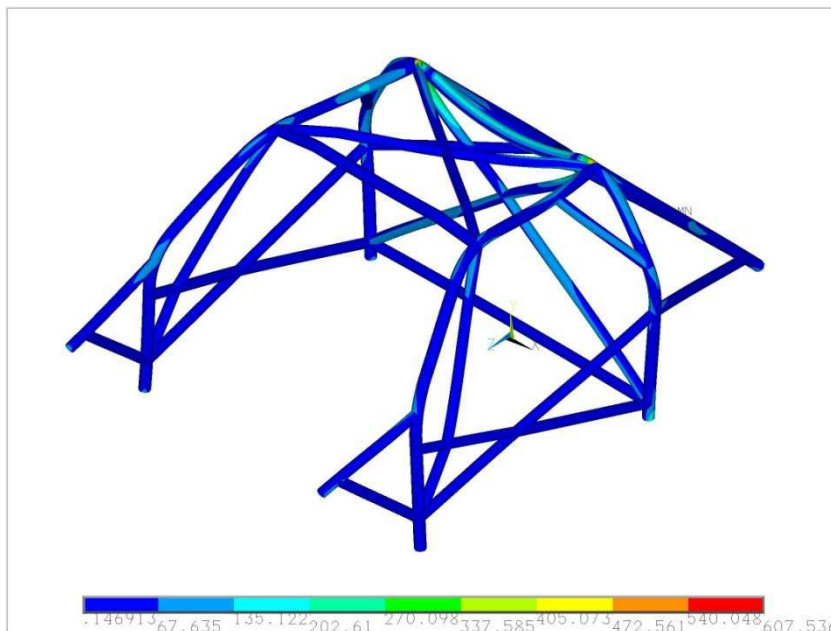


Obrázek 53 Model bezpečnostního rámu RC30

### 5.2.1. Zatížení na hlavním oblouku

#### Redukované napětí

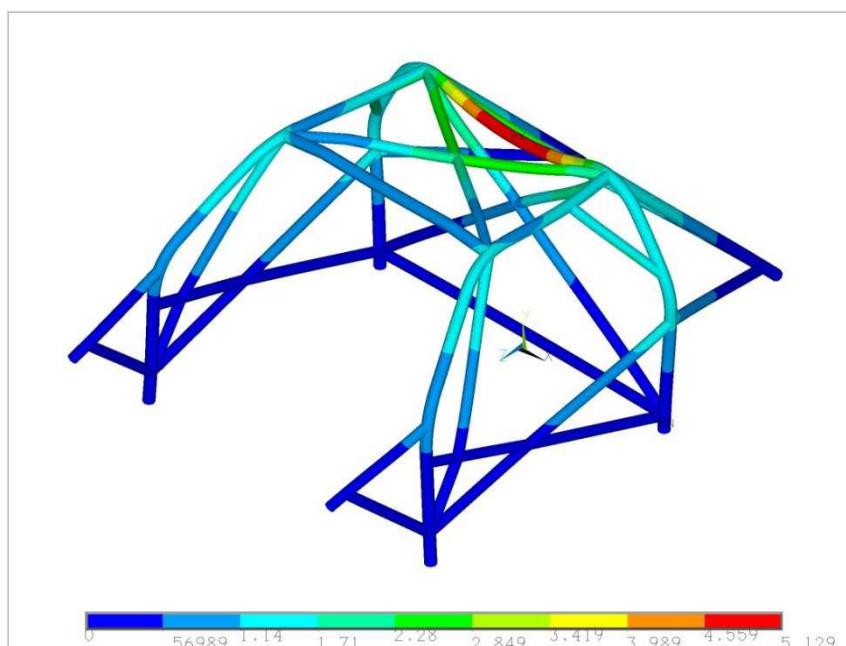
U tohoto modelu došlo ke zvýšení maximálního redukovaného napětí v oblasti křížení prutů na vrcholu hlavního oblouku na hodnotu 607 MPa, ale došlo ke snížení deformací.



Obrázek 54 Průběh redukovaných napětí při zatížení na hlavní oblouk modelu RC30

#### Deformace

Proti předchozí konstrukci došlo k poklesu deformací na rámu o 35% na hodnotu 5,1mm.



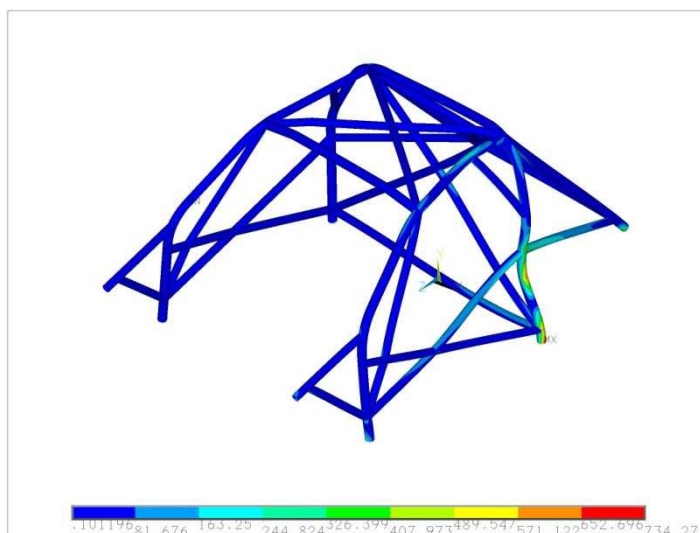
Obrázek 55 Průběh deformací při zatížení na hlavním oblouku modelu RC30



### 5.2.2. Boční zatížení

#### Redukované napětí

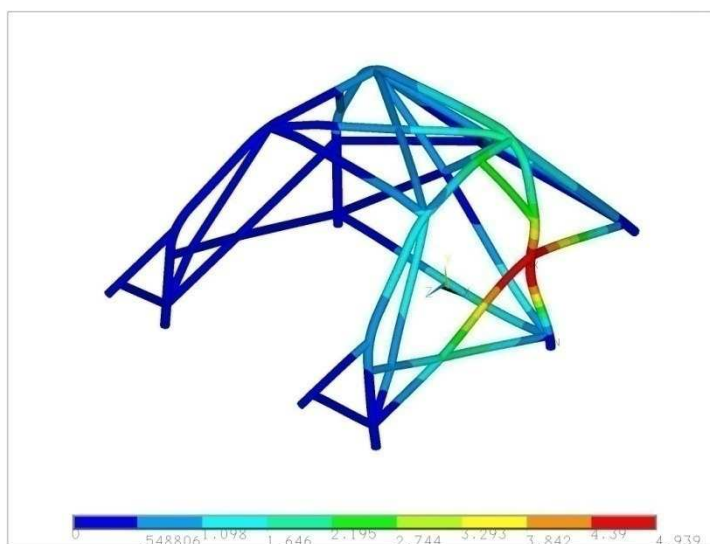
U tohoto modelu došlo ke snížení nejvyššího redukovaného napětí na hodnotu 734 MPa. Na obrázku lze vidět, že napětí se kromě svislého sloupku hlavního oblouku nejvíce rozložilo do podélné výztuhy proti bočnímu nárazu, podélné výztuhy mezi hlavním obloukem a zadní vzpěrou a do příčné výztuhy hlavního oblouku.



Obrázek 56 Průběh napětí při bočním zatížení modelu RC30

#### Deformace

Nejvyšší hodnota deformace 4,9 mm je v tomto případě o 45% menší než u původní konstrukce. Vzpěrami dle předpisů se tak podařilo dosáhnout výrazného snížení deformací.

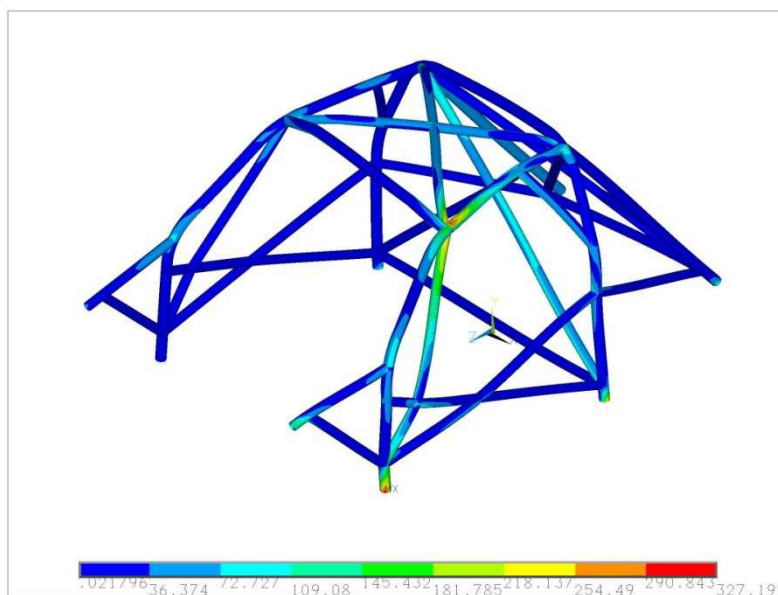


Obrázek 57 Průběh deformací při bočním zatížení modelu RC30

### 5.2.3. Zatížení na předním oblouku

#### Redukované napětí

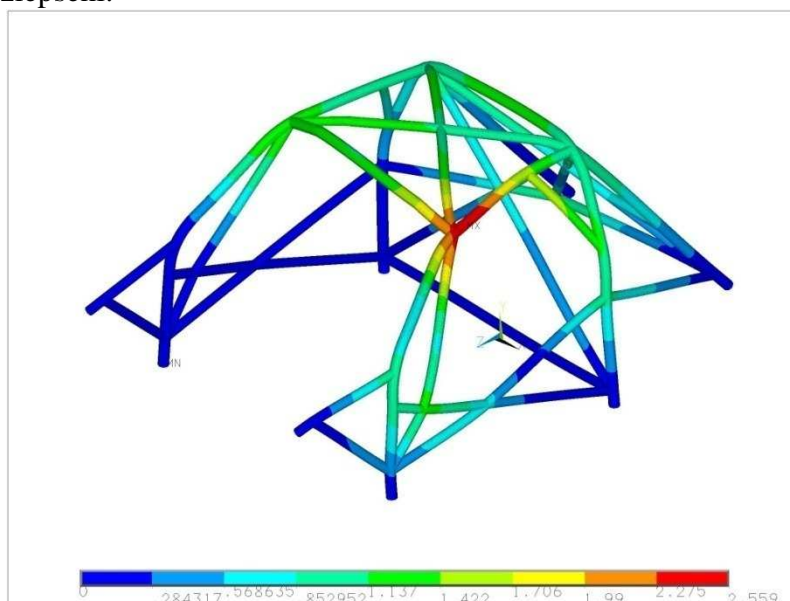
Přidáním výztuhy předního sloupku, výztuh v oblasti střechy a bočních vzpěr došlo k výraznému snížení napětí v konstrukci. Rozložení napětí je zřetelné z obrázku 58. Napětí se rozložilo oproti původní konstrukci do výztuhy předního sloupku, střešní výztuhy ve tvaru X, výztuhy hlavního oblouku i bočních vzpěr ve tvaru X. Na modelu byla nejvyšší hodnota napětí 322 MPa.



Obrázek 58 Průběh napětí při zatížení na předním oblouku modelu RC30

#### Deformace

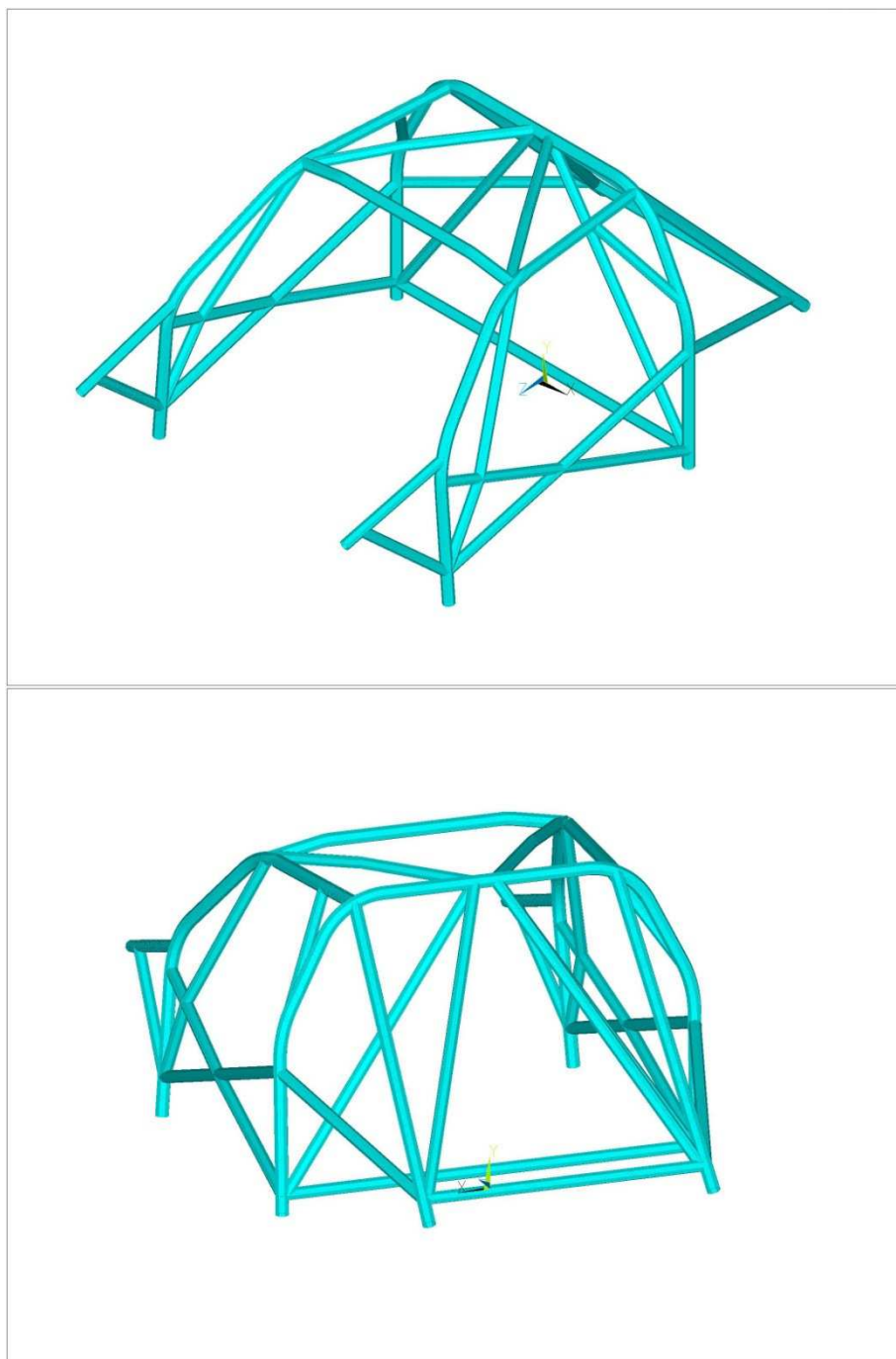
Stejně jako u napětí došlo k velice výraznému snížení hodnot i u deformací. Nejvyšší hodnota posunutí prutů rámu činila v tomto případě 2,6 mm, což byla o 85% nižší hodnota než u původní konstrukce. V případě této konstrukce se tedy jednalo u zkoušky na předním oblouku o nejvýraznější zlepšení.



Obrázek 59 Průběh deformací při zatížení na předním oblouku modelu RC30

### 5.3. Kontrola rámu RC40

Varianta rámu RC40 se vyznačuje zejména použitím výztuh ve tvaru V. Výztuhami ve tvaru V jsem nahradil výztuhy ve tvaru X v oblasti střechy, hlavního oblouku a mezi zadními vzpěrami. Výztuha předního sloupku a boční vzpěra zůstala oproti modelu RC30 nezměněna. Tuto variantu jsem srovnával s variantou s výztuhami ve tvaru X. Od této změny jsem předpokládal především snížení průhybu na hlavním oblouku, což se také potvrdilo. Umístění nově navržených výztuh je zřetelné z obrázku č. 60.

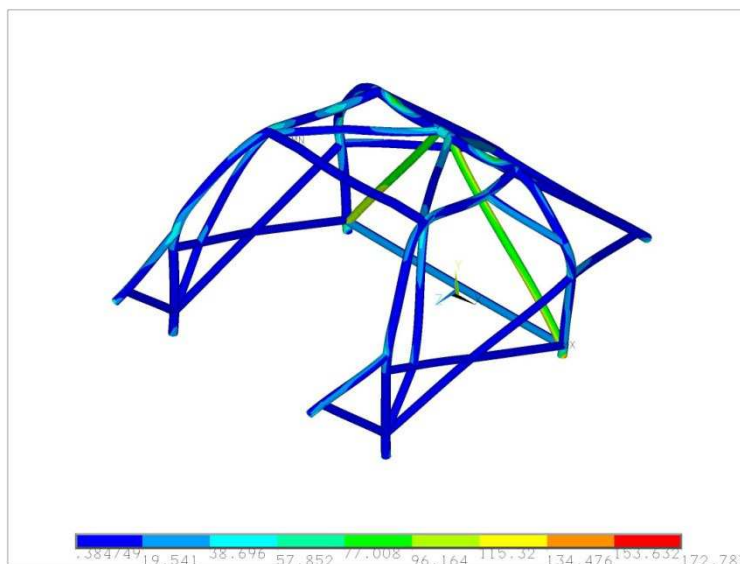


Obrázek 60 Model rámu RC40

### 5.3.1. Zatížení na hlavním oblouku

#### Redukované napětí

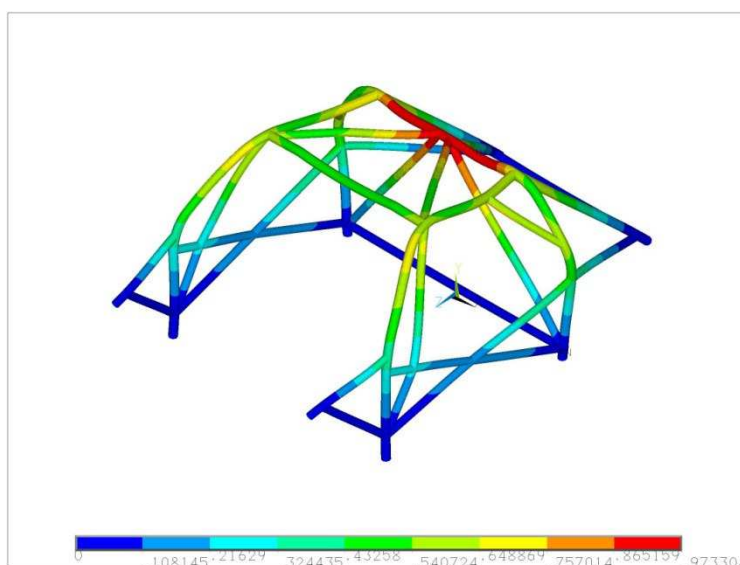
V tomto modelu kleslo nejvyšší redukované napětí na hodnotu 173 MPa. Na příčném prutu hlavního oblouku poklesly nejvyšší hodnoty redukovaného napětí na 115 MPa až 134 MPa. Část napětí byla rozložena na pruty tvaru V mezi hlavním obloukem a také na výztuhy v oblasti střechy, které tvořily se zátěžným trnem částečně kontaktní plochu.



Obrázek 61 Průběh redukovaných napětí při zatížení na hlavní oblouk modelu RC40

#### Deformace

Největší průhyb na hlavním oblouku výrazně klesl proti variantě RC30 o 80% na hodnotu 1mm. Vzhledem ke zřetelnému zlepšení v této oblasti jsem se rozhodl tuto výztuhu zařadit i do dalších modelů.

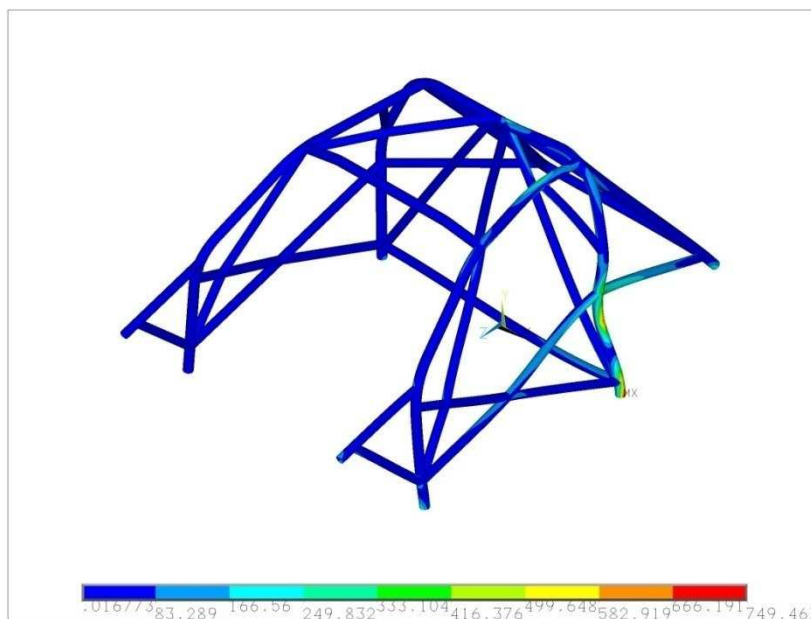


Obrázek 62 Průběh deformací při zatížení na hlavním oblouku modelu RC40

### 5.3.2. Boční zatížení

#### Redukované napětí

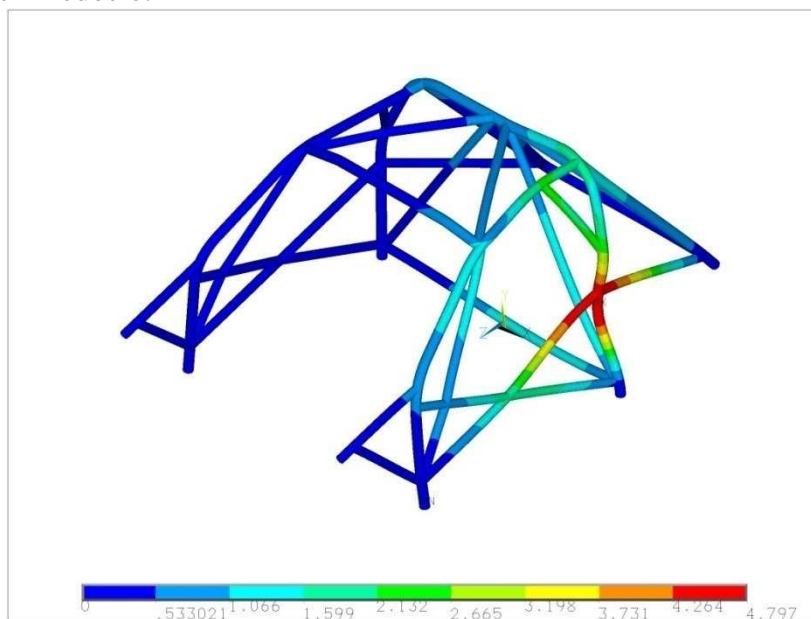
Nejvyšší hodnota redukovaného napětí na modelu při bočním zatížení dosáhla hodnoty 749 MPa. Na obrázku lze vidět, že výztuhy ve tvaru V nejsou cíleně navrženy pro boční zatížení. V dalších variantách jsem proto tuto výztuhu doplnil dalšími výztuhami zaměřenými na snížení napětí a deformací při bočním zatížení.



Obrázek 63 Průběh napětí při bočním zatížení modelu RC40

#### Deformace

Proti modelu RC30 došlo k nepatrnému snížení hodnoty nejvyšších deformací o 2% na hodnotu 4,8 mm, což je zanedbatelné. Při bočním zatížení tedy proti rámu RC30 k téměř žádnému zlepšení nedošlo.

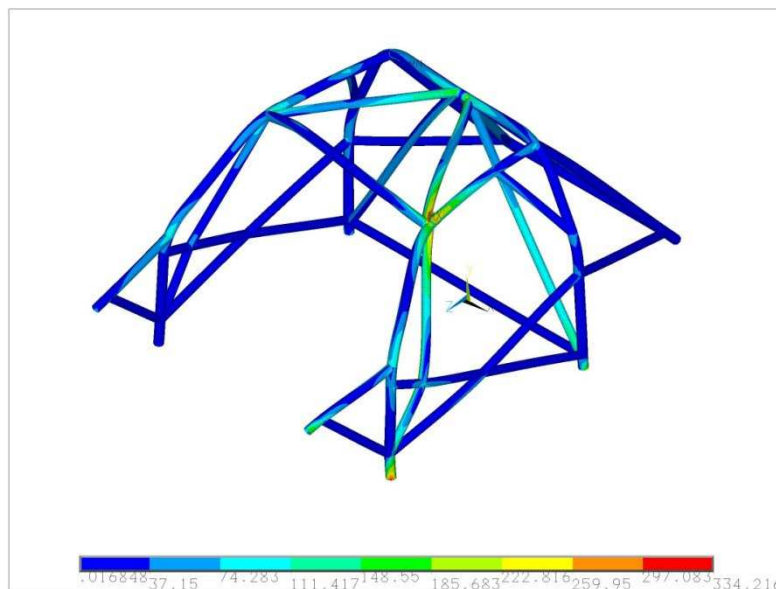


Obrázek 64 Průběh deformací při bočním zatížení modelu RC40

### 5.3.3. Zatížení na předním oblouku

#### Redukované napětí

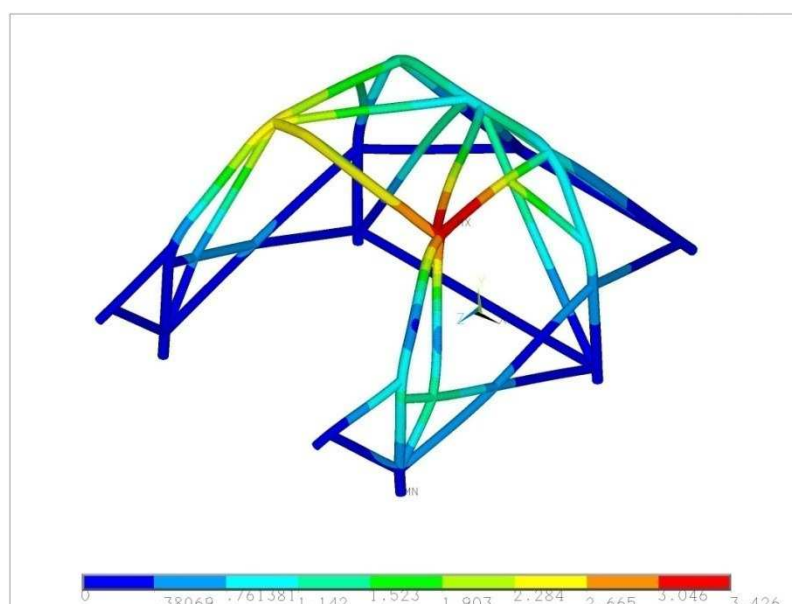
Nejvyšší hodnota napětí na modelu 334 MPa je v oblasti zatížení zátěžným trnem. Na obrázku 65 lze vidět rozložení napětí do jednotlivých prutů, jako např. do výztuhy předního sloupku nebo jednoho z prutů výztuhy V.



Obrázek 65 Průběh napětí při zatížení na předním oblouku modelu RC40

#### Deformace

Nejvyšší hodnota deformace se oproti modelu RC30 zvýšila o 31% na hodnotu 3,4 mm. Z tohoto důvodu jsem u dalších modelů zkoušel také kombinaci výztuhy tvaru X v oblasti střechy s výztuhami ve tvaru V v dalších místech.



Obrázek 66 Průběh deformací při zatížení na předním oblouku modelu RC40

## 5.4. Kontrola rámu RC41

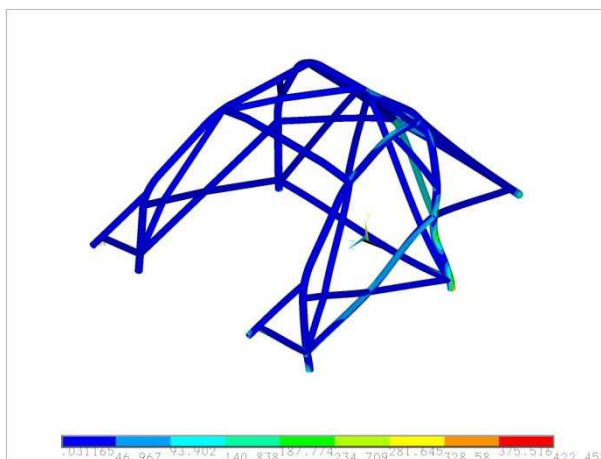
U této varianty jsem se zaměřil na boční zkoušku rámu, u které dosud nebylo dosaženo výrazného zlepšení. Po úvaze jsem zvolil jako zpevňující prvek konstrukce diagonální výztuhu, kterou jsem umístil mezi svislý sloupek hlavního oblouku na místě řidiče a mezi pravou zadní vzpěru v její spodní části.

Tímto jednoduchým prvkem došlo k výraznému snížení průhybu rámu. Redukovaná napětí na modelech se také snížila.

### 5.4.1. Boční zatížení

#### Redukované napětí

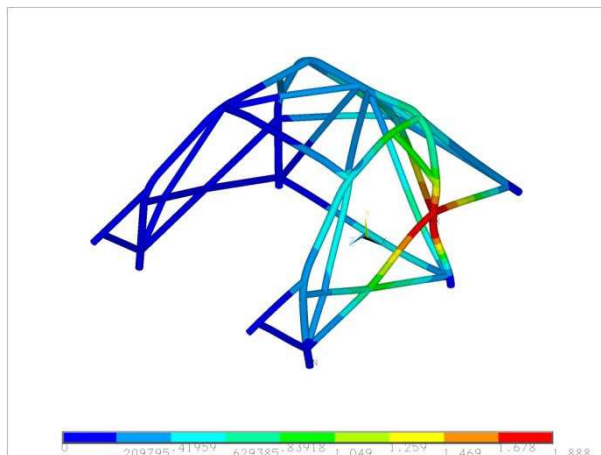
Nejvyšší hodnotou redukovaného napětí u této varianty bylo 423 MPa. Napětí se rozložilo mimojiné do diagonální vzpěry, která byla použita v tomto modelu.



Obrázek 67 Průběh napětí při bočním zatížení modelu RC41

#### Deformace

Hodnota největší deformace byla výrazně snížena oproti předchozí variantě s výztuhami V o 60% na velikost 1,9 mm.



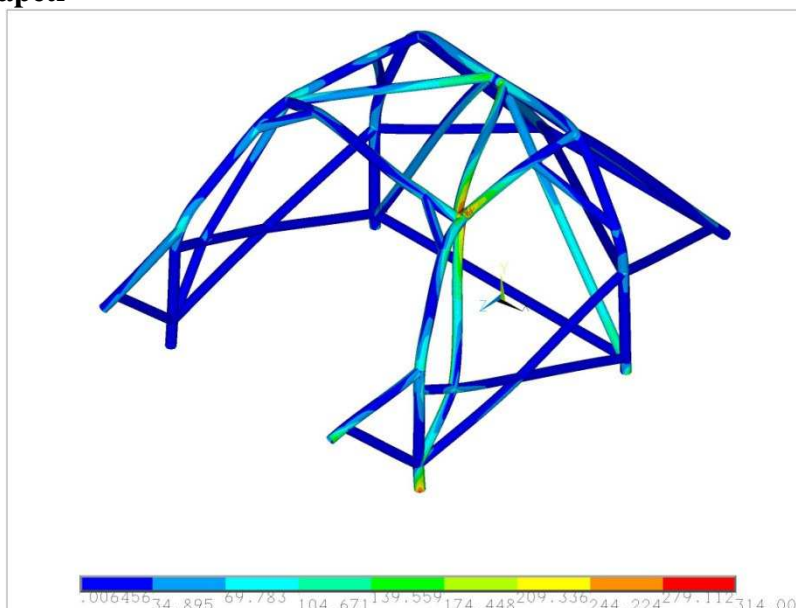
Obrázek 68 Průběh deformací při bočním zatížení modelu RC41

## 5.5. Kontrola rámu RC42

Na tomto modelu jsem simuloval, jaký vliv budou mít při zkoušce na přední oblouk dvě malé rohové výztuhy umístěné v rohu mezi přední příčnou vzpěrou na úrovni střechy a horním rohem bočního půloblouku. Tato varianta vychází z rámu RC40. Výsledky se zlepšily minimálně, pokleslo redukované napětí a deformace se snížily o 0,1 mm na 3,3 mm. Přesto považuji tyto výztuhy vzhledem k jejich malým rozměrům a tedy i hmotnosti za vhodné zpevnění konstrukce.

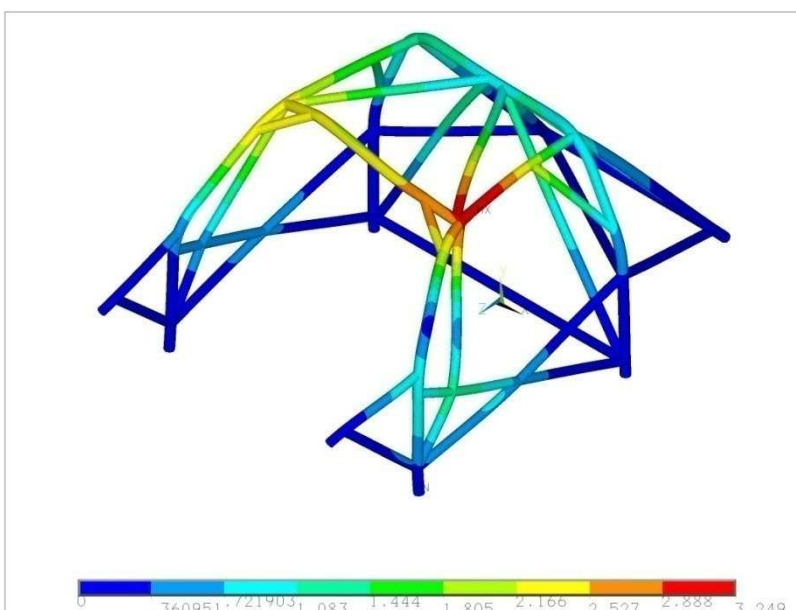
### 5.5.1. Zatížení na předním oblouku

#### Redukované napětí



Obrázek 69 Průběh napětí při zatížení na předním oblouku modelu RC40

#### Deformace



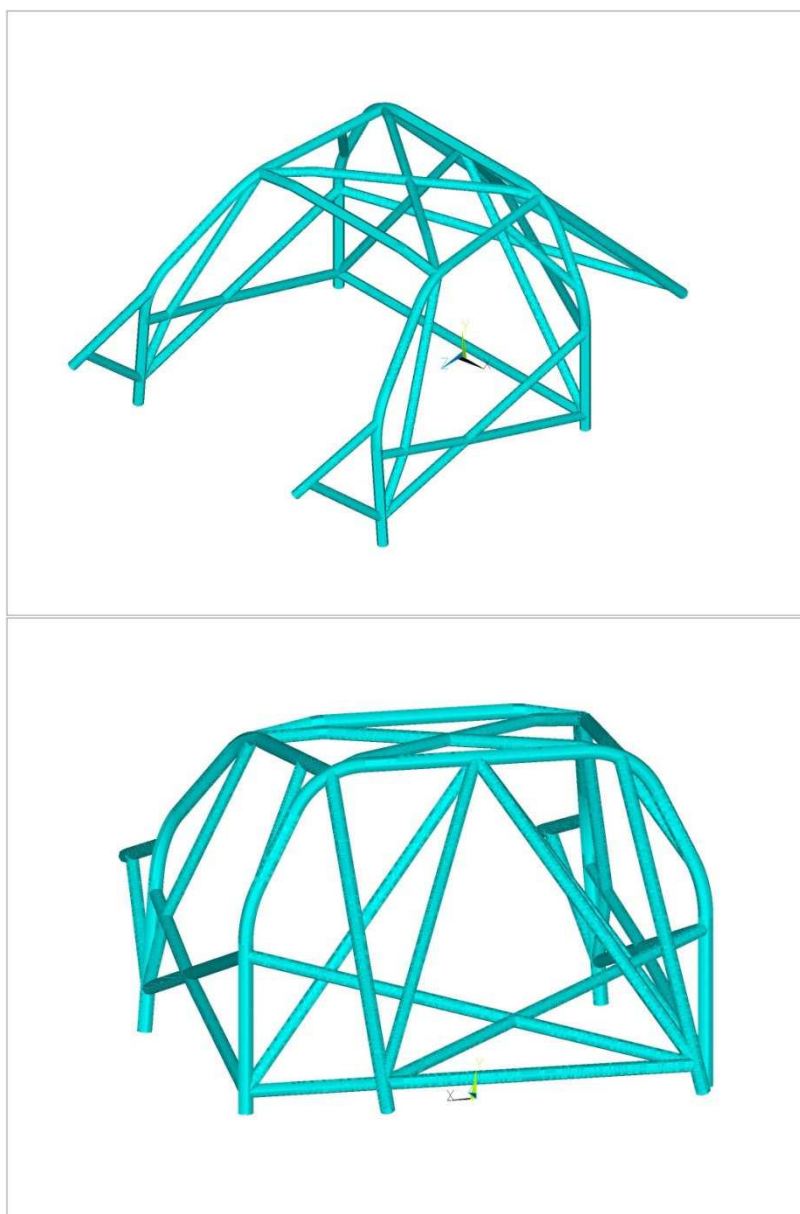
Obrázek 70 Průběh deformací při zatížení na předním oblouku modelu RC42



## 5.6. Kontrola rámu RC50

U této konstrukce jsem se pokusil zvolit vhodnou kombinaci výztuh ve tvaru X a V. Výztuhy ve tvaru V jsou umístěny jako u modelu RC30 s tím rozdílem, že jako střešní výztuhu jsem zvolil výztuhu ve tvaru X. Od tohoto řešení jsem očekával zlepšení při zkoušce na přední oblouk.

Další úpravou tohoto rámu je výztuha ve tvaru X mezi středními částmi svislých sloupků hlavního oblouku a mezi spodními rohy zadních vzpěr. Oproti předešlým řešením jsem z modelu odejmul podélné výztuhy mezi sloupky hlavního oblouku a rohy zadních výztuh. Od tohoto řešení jsem očekával zejména zlepšení sledovaných hodnot při bočním zatížení.

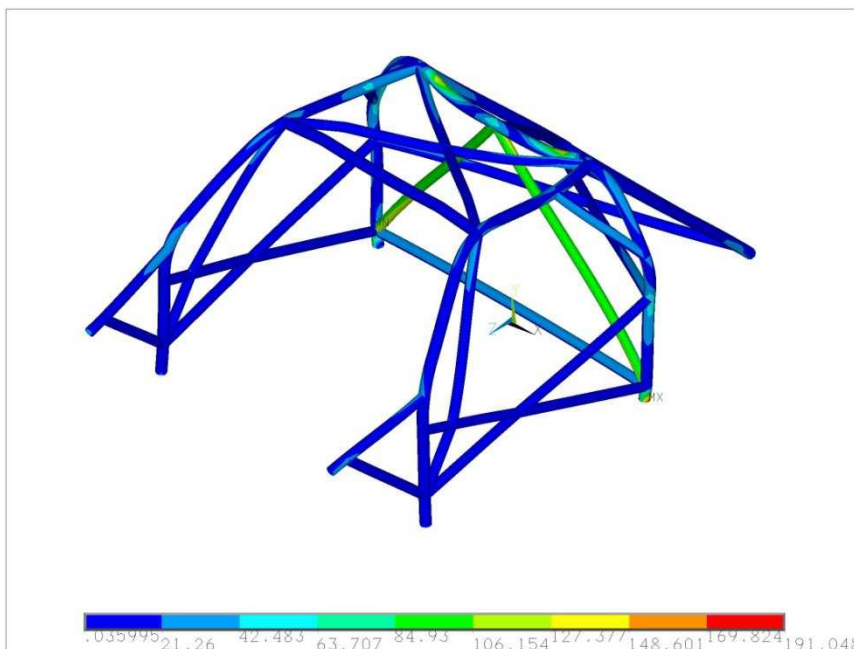


Obrázek 71 Model rámu RC50

### 5.6.1. Zatížení na hlavním oblouku

#### Redukované napětí

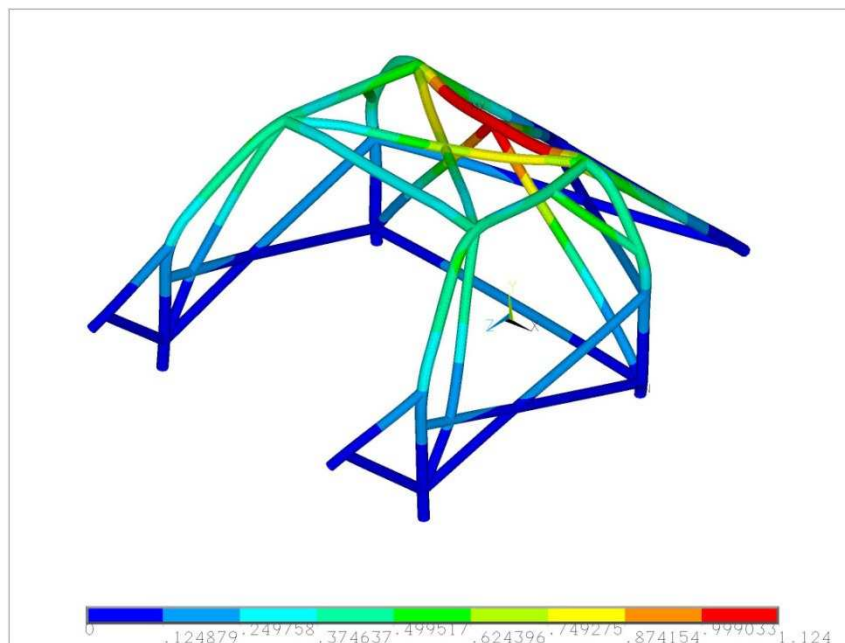
Nejvyšší redukované napětí na tomto modelu o hodnotě 191 MPa se mírně zvýšilo proti rámu RC40. Napětí je opět rozloženo také na vzpěrách V na hlavním oblouku.



Obrázek 72 Průběh redukovaných napětí při zatížení na hlavní oblouk modelu RC50

#### Deformace

Nejvyšší hodnota deformace o hodnotě 1,1 mm je o 10% vyšší než rámu RC40. Vzhledem k minimálním rozměrům deformací u obou rámu je ovšem tento rozdíl zanedbatelný.

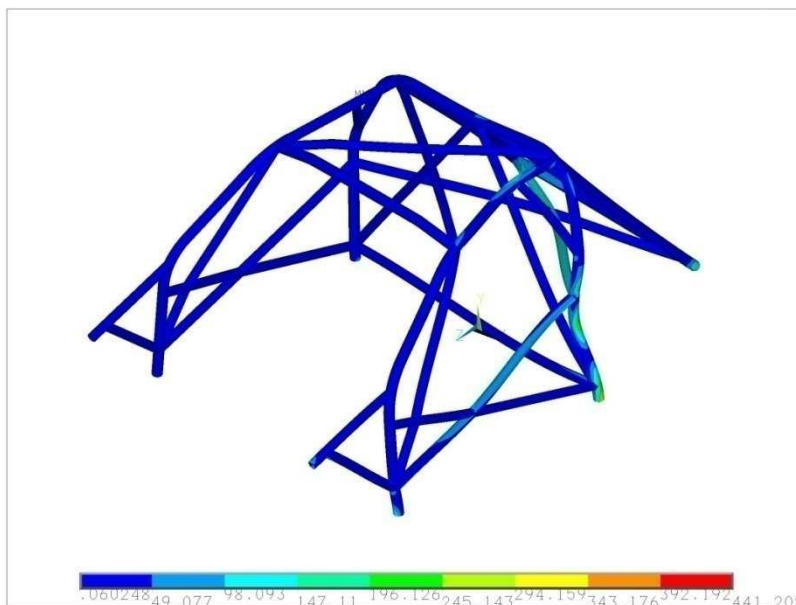


Obrázek 73 Průběh deformací při zatížení na hlavním oblouku modelu RC50

### 5.6.2. Boční zatížení

#### Redukované napětí

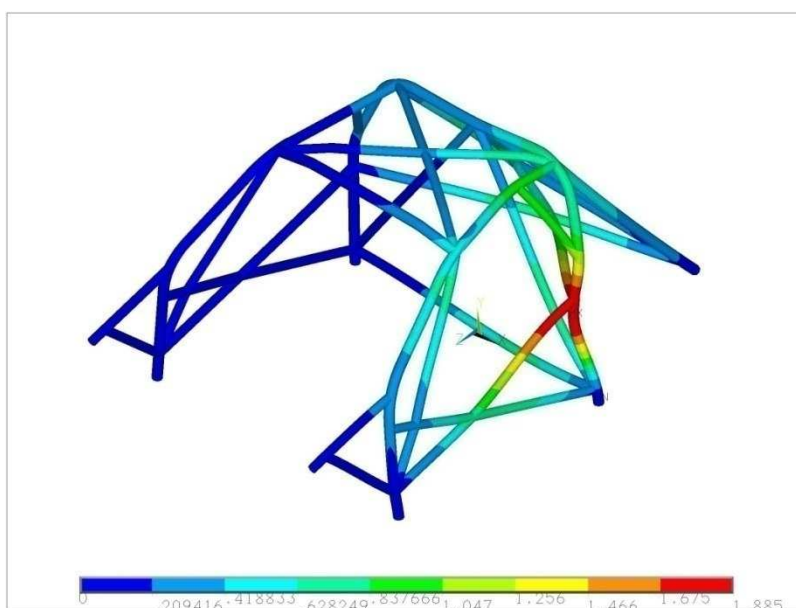
Nejvyšší hodnoty redukovaného napětí na modelu ukazovali 441 MPa. Hodnota napětí je mírně zvýšená proti předchozím modelům. Vysvětluji si to odstraněním podélné výztuhy mezi zadní vzpěrou a sloupkem hlavního oblouku, což snížilo kontaktní plochy se zátěžným trnem. Podélné výztuhy jsem odstranil z důvodu snížení hmotnosti, což se ovšem z bezpečnostního hlediska neosvědčilo.



Obrázek 74 Průběh napětí při bočním zatížení modelu RC50

#### Deformace

Nejvyšší deformace 1,9 mm zůstala na stejné úrovni, jako u modelu RC41.



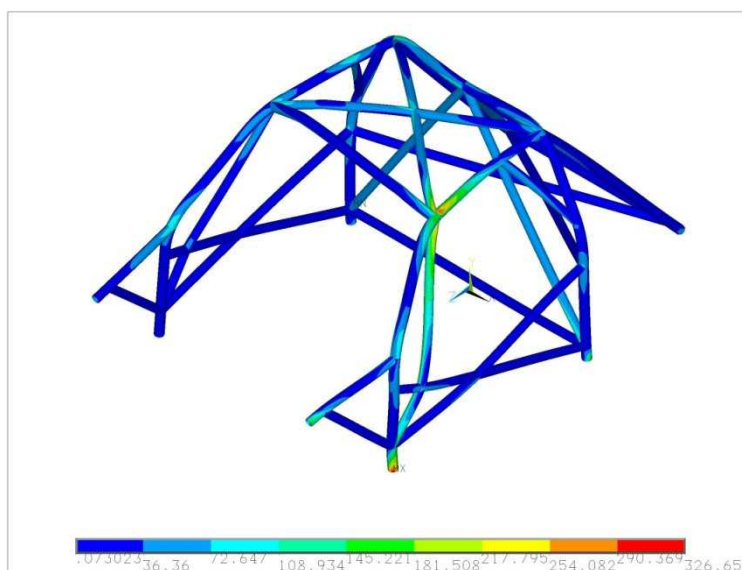
Obrázek 75 Průběh deformací při bočním zatížení modelu RC50

### 5.6.3. Zatížení na předním oblouku

Maximální napětí při této zkoušce se nepatrně snížilo. Došlo i ke snížení průhybu. Proto jsem se rozhodl u dalších modelů použít jako vrchní výztuhu ve tvaru X, kterou dále doplním úhlovými výztuhami, které byly použity u rámu RC42.

#### Redukované napětí

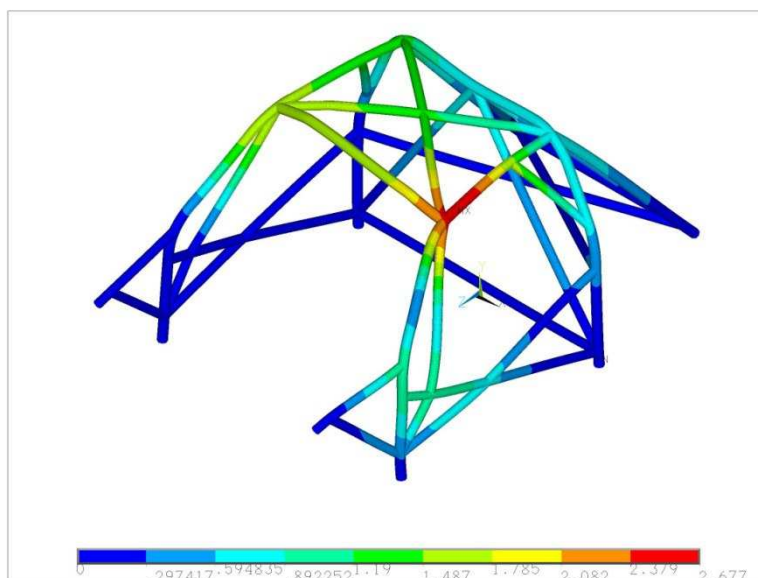
Maximální redukované napětí se na tomto modelu při této zkoušce mírně snížilo. Na modelu se napětí rozložilo díky vzpěrám ve tvaru X i do sloupků hlavního oblouku na opačné straně.



Obrázek 76 Průběh napětí při zatížení na předním oblouku modelu RC50

#### Deformace

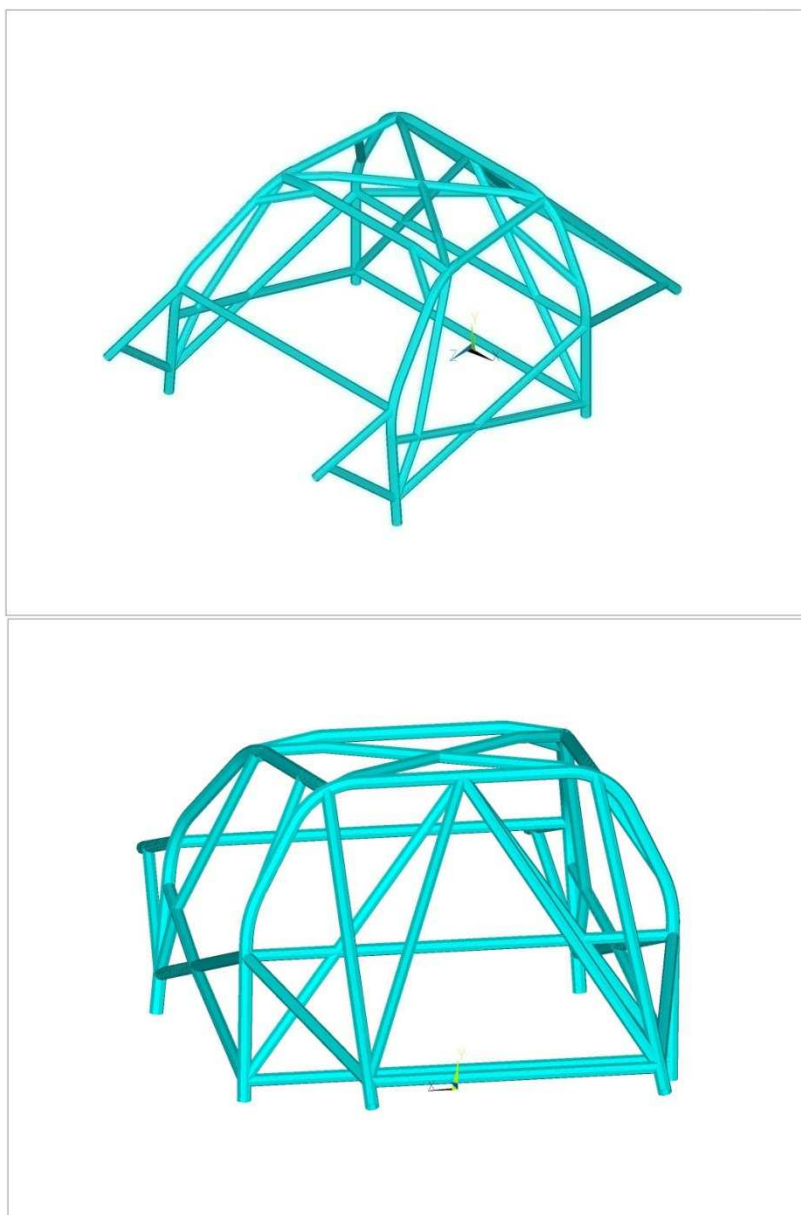
Nejvyšší hodnota deformace při zatížení na přední půloblouk se snížila oproti konstrukci RC40 o 21% na 2,7 mm. Proti konstrukci RC30 se vzpěrami tvaru X se nepatrně zvýšila o 4%. Dalšího snížení deformace při této zkoušce bude dosaženo použitím rohových výztuh z rámu RC42.



Obrázek 77 Průběh deformací při zatížení na předním oblouku modelu RC50

### 5.7. Kontrola rámu RC60

V rámu RC60 jsem aplikoval prvky, které se osvědčily v předchozích řešeních, a doplnil o příčnou výztuhu umístěnou mezi svislé sloupky hlavního oblouku v místě, kde jsou upevněny podélné výztuhy. Výztuhu ve tvaru X mezi svislými sloupky hlavního oblouku a zadními vzpěrami jsem v této variantě nepoužil a vrátil jsem se v této variantě k podélným výztuhám, které nebyly v předchozí variantě použity. Bylo to také z důvodu vyzkoušení, zda bude nové řešení příčné vzpěry stačit pro zlepšení sledovaných veličin. Dále jsem doplnil model rámu o příčnou vzpěru v přední části. Změna rámu je patrná z obrázku 78.

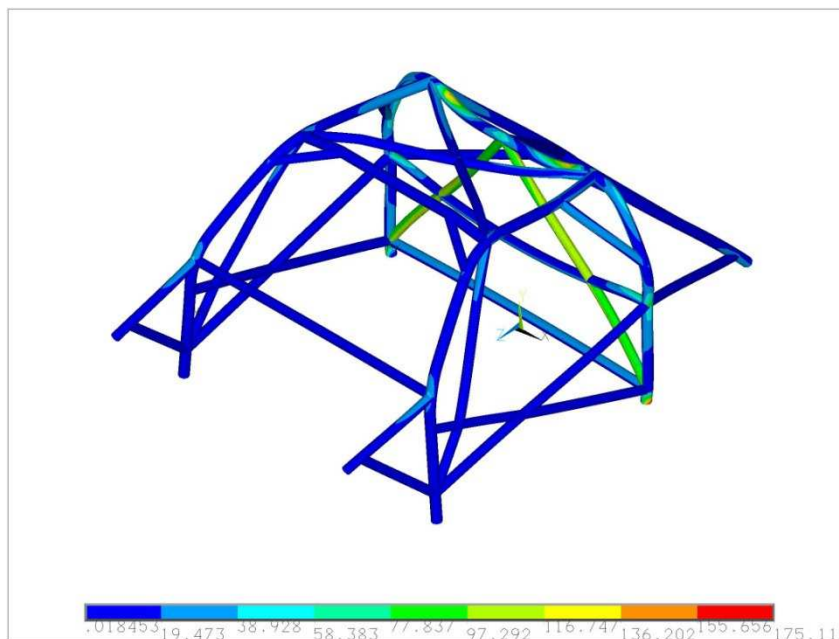


Obrázek 78 Model rámu RC60

### 5.7.1. Zatížení na hlavním oblouku

#### Redukované napětí

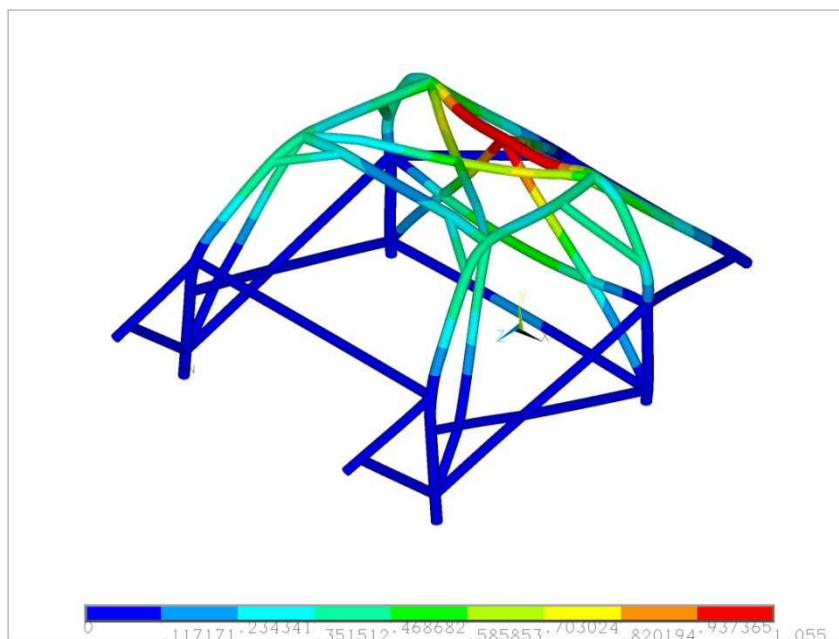
Při zatěžování na hlavním oblouku bylo dosaženo obdobných hodnot redukovaného napětí jako na předchozích modelech. Hodnota nejvyššího redukovaného napětí na tomto modelu byla 175 MPa.



Obrázek 79 Průběh redukovaných napětí při zatížení na hlavní oblouk modelu RC60

#### Deformace

Nejvyšší hodnota deformace byla podobná jako u předchozích nejlepších výsledků. V tomto případě dosahovala hodnoty 1,1 mm.

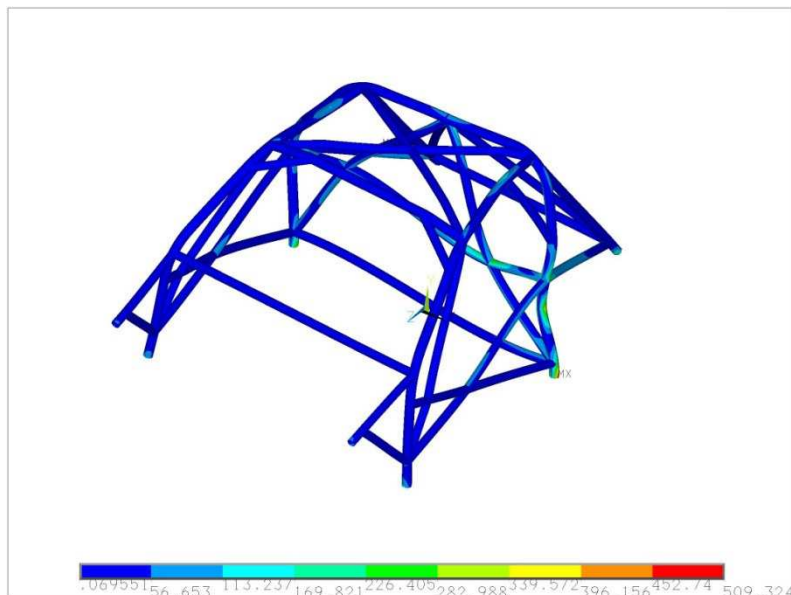


Obrázek 80 Průběh deformací při zatížení na hlavním oblouku modelu RC60

### 5.7.2. Boční zatížení

#### Redukované napětí

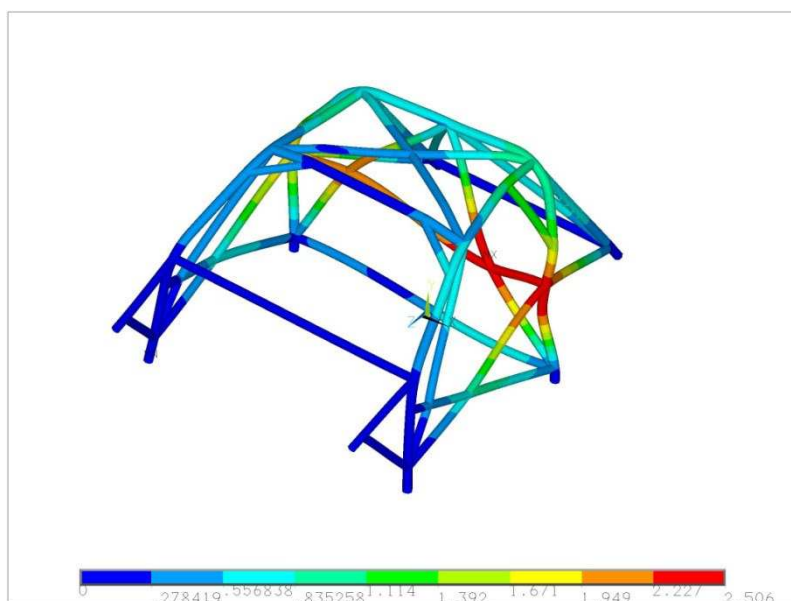
U bočního zatížení byly u tohoto modelu výsledkem přidáním příčné vřpěry zvýšená redukovaná napětí. Maximální hodnota redukovaného napětí byla v tomto modelu 509 MPa.



Obrázek 81 Průběh napětí při bočním zatížení modelu RC60

#### Deformace

Nejvyšší posunutí prutu v tomto modelu byla hodnota 2,5 mm a jednalo se z doposud uvedených modelů o třetí nejnižší hodnotu posunutí při bočním zatížení. V dalších případech jsem se rozhodl tuto vřztuhu doplnit další vhodnou vřztuhou pro snížení posunutí.

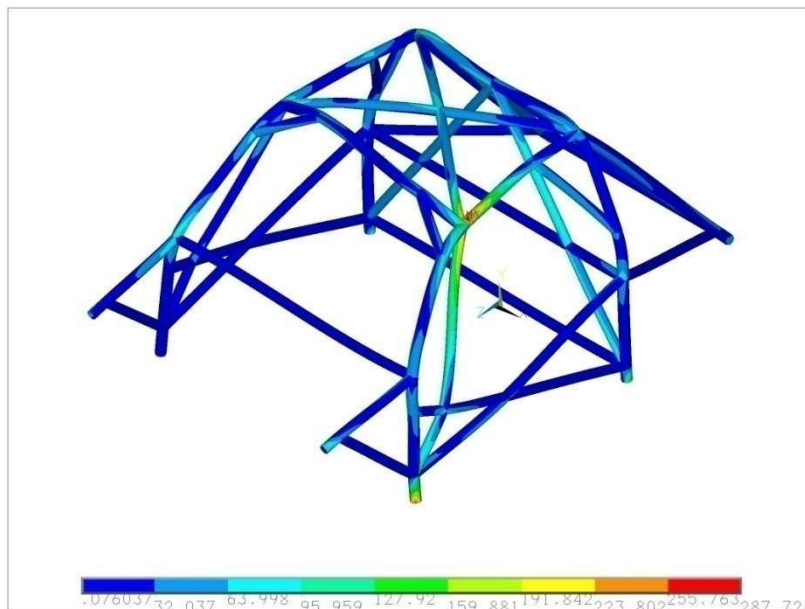


Obrázek 82 Průběh deformací při bočním zatížení modelu RC60

### 5.7.3. Zatížení na předním oblouku

#### Redukované napětí

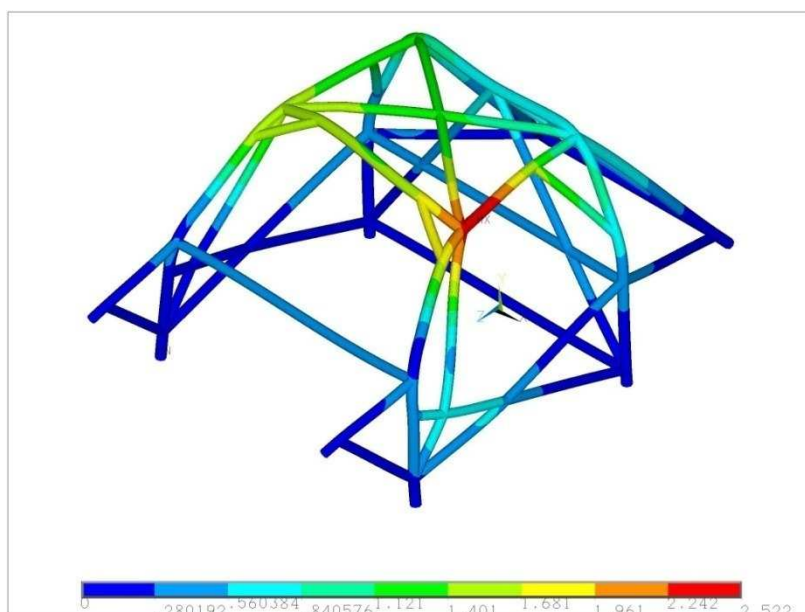
Při tomto zatížení byla dosažena u modelů prozatím nejnižší hodnota redukovaného napětí 288 MPa.



Obrázek 83 Průběh napětí při zatížení na předním oblouku modelu RC60

#### Deformace

Nejvyšší hodnota deformace u tohoto modelu byla s hodnotou 2,5 mm doposud nejnižší. Byla tak o 8% nižší než u doposud nejnižší hodnoty deformace při tomto zatížení u modelu RC50.

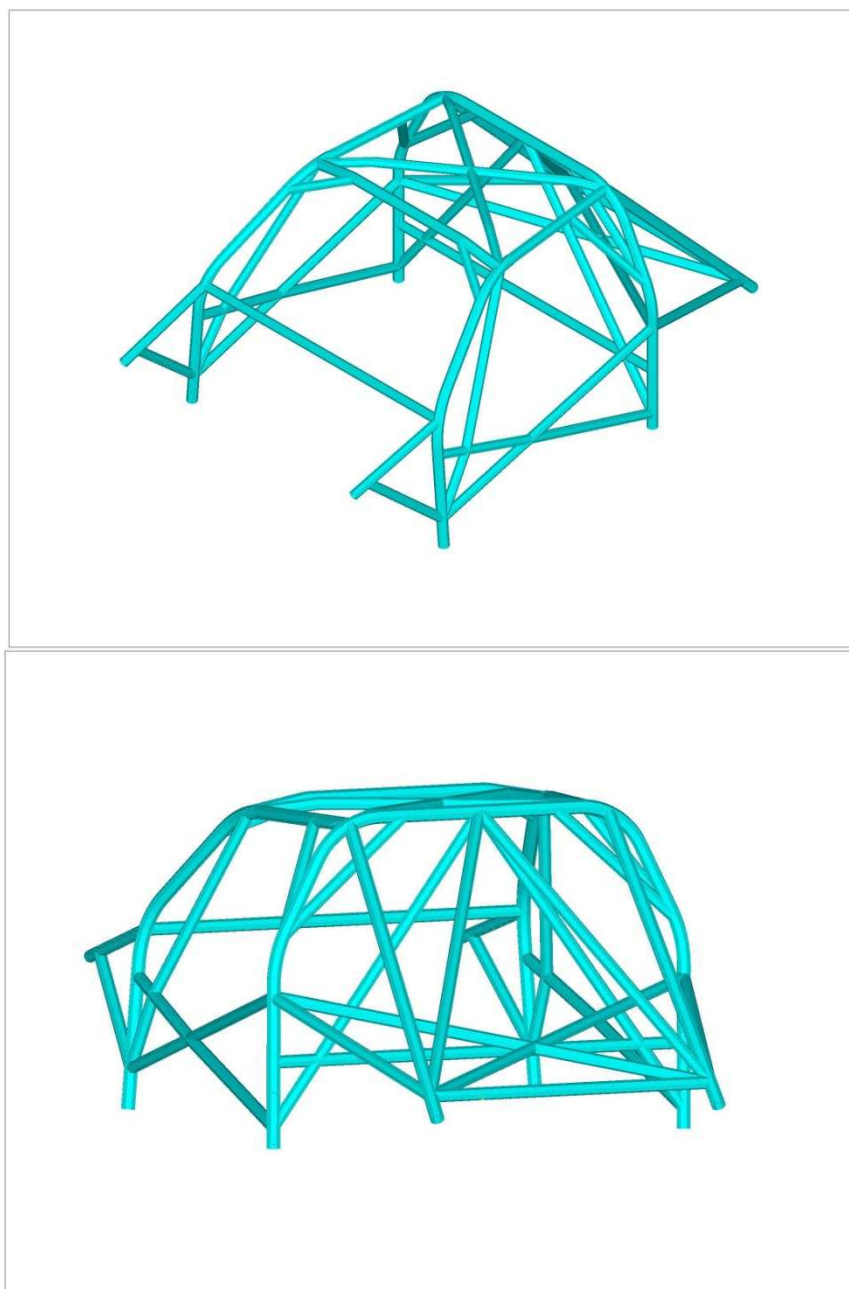


Obrázek 84 Průběh deformací při zatížení na předním oblouku modelu RC60



### 5.8. Kontrola rámu RC70

U rámu RC70 jsem se pokusil místo dvou příčných výztuh použít z důvodu snížení hmotnosti jen jednu. Tu jsem uložil do místa mezi původními příčnými výztuhami, které byly odstraněny. Z předchozích příkladů jsem ponechal osvědčené prvky, kterými jsou např. přední rohové výztuhy a střešní výztuha ve tvaru X. V tomto modelu jsem se vrátil k výztuze ve tvaru X mezi středem sloupku hlavního oblouku a zadními vzpěrami. Hlavní oblouk jsem doplnil dvěma rohovými výztuhami. Umístění jednotlivých výztuh je patrné z obrázku č. 85.

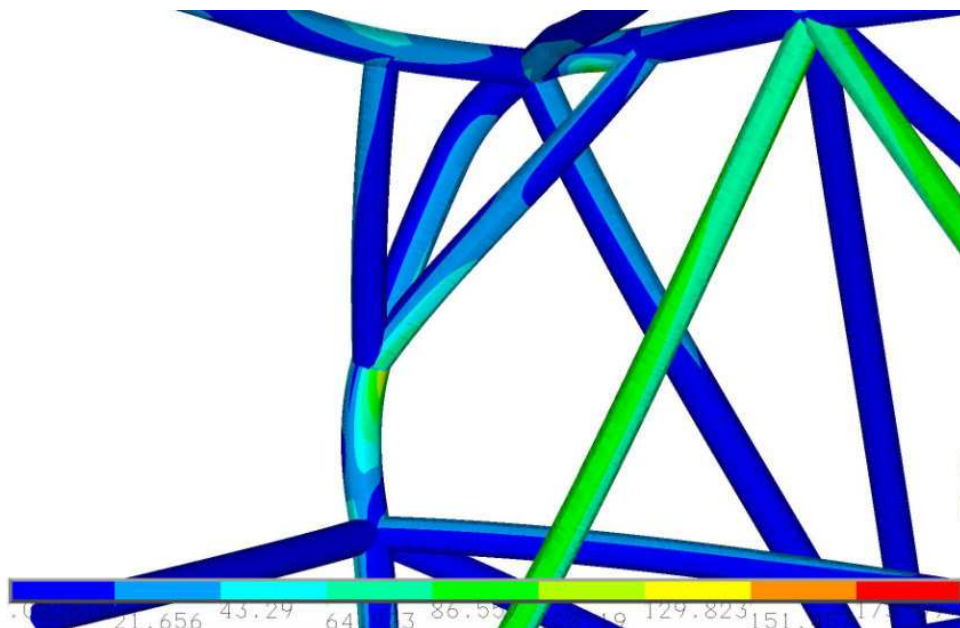


Obrázek 85 Model rámu RC70

### 5.8.1. Zatížení na hlavním oblouku

#### Redukované napětí

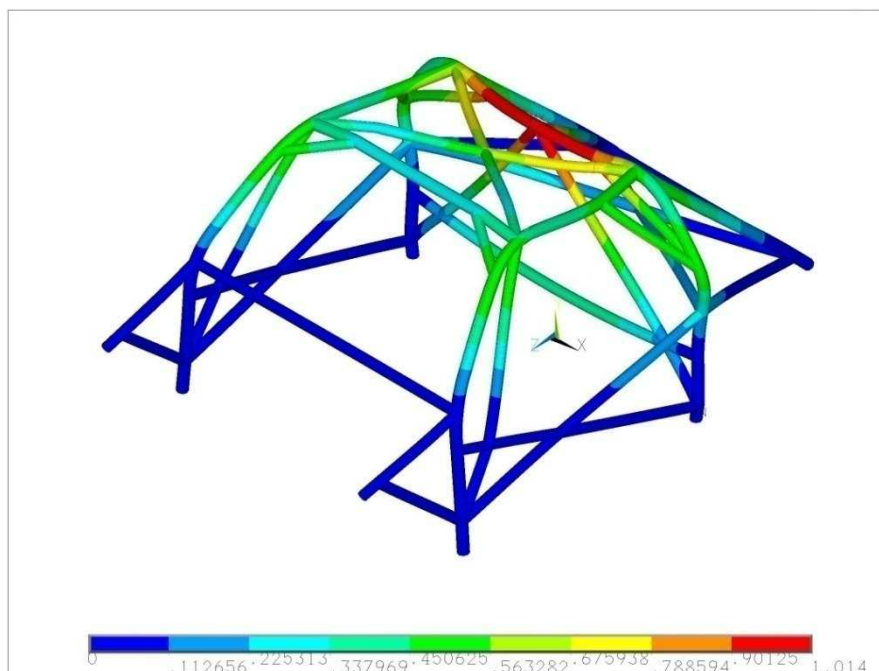
U této varianty nedošlo k zásadním změnám v průběhu napětí při zkoušce na hlavním oblouku. Na obrázku 86 je vidět průběh napětí na nových rohových výztuhách. Nejvyšší hodnota redukovaného napětí byla 195 MPa.



Obrázek 86 Průběh redukovaných napětí při zatížení na hlavní oblouk modelu RC70 – detail rohové výztuhy hlavního oblouku

#### Deformace

Největší deformace se s hodnotou 1 mm po instalaci rohové výztuhy mírně snížila.

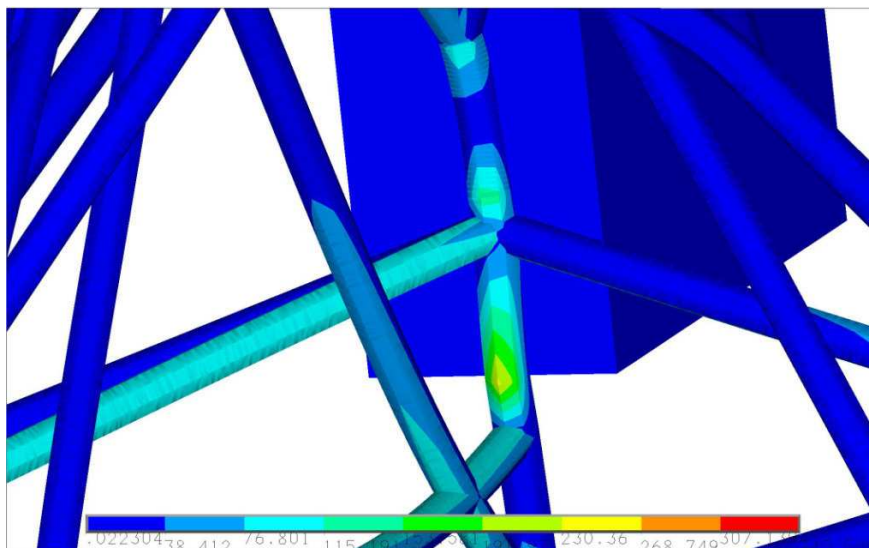


Obrázek 87 Průběh deformací při zatížení na hlavním oblouku modelu RC70

### 5.8.2. Boční zatížení

#### Napětí

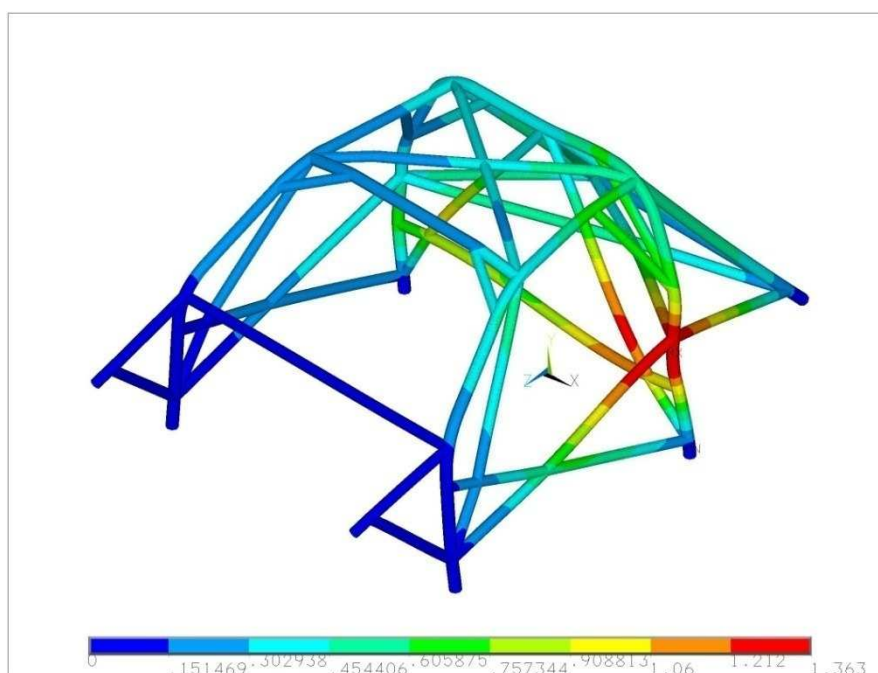
Nejvyšší hodnotou redukovaného napětí tohoto modelu byla hodnota 346 MPa. Při bočním zatížení se tak jednalo o nejmenší hodnotu redukovaného napětí při bočním zatížení.



Obrázek 88 Detail průběhu napětí při bočním zatížení modelu RC70

#### Deformace

Použitím uvedených výztuh se podařilo snížit deformace prutů modelu při tomto zatížení na nejnižší hodnotu, která činí 1,4 mm. Tato hodnota je o 44% nižší než u doposud nejnižší hodnoty deformace při bočním zatížení rámu RC60, která činila 2,5 mm.

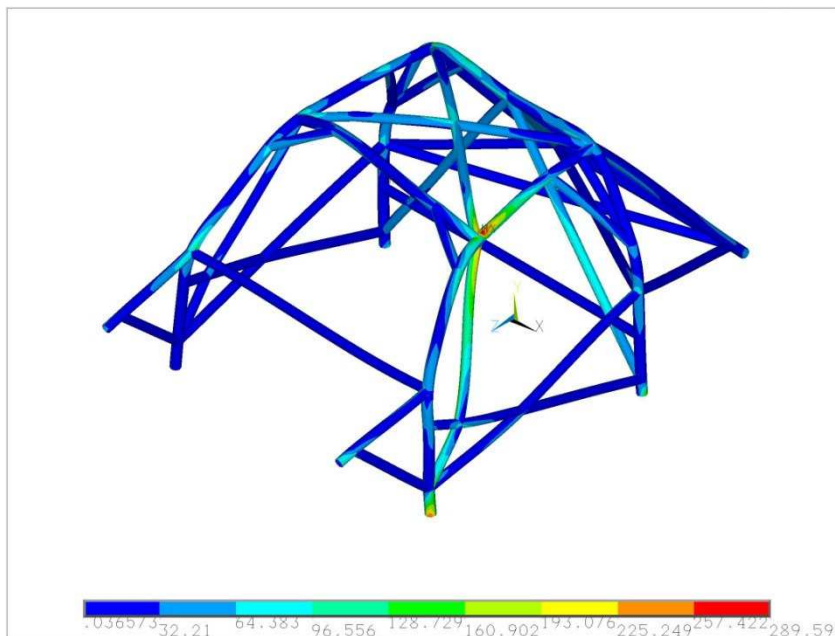


Obrázek 89 Průběh deformací při bočním zatížení modelu RC70

### 5.8.3. Zatížení na předním oblouku

#### Redukované napětí

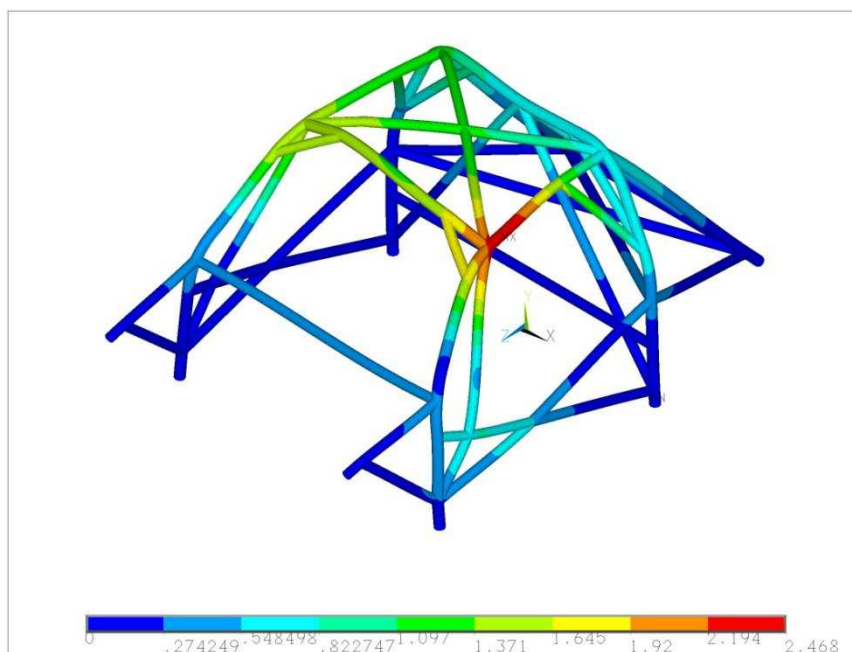
Průběh redukovaného napětí a jeho hodnoty se téměř neliší od předešlé varianty RC60, z které konstrukce RC70 vychází.



Obrázek 90 Průběh napětí při zatížení na předním oblouku modelu RC70

#### Deformace

V případě deformací jsou výsledky opět prakticky shodné s předchozí variantou. Varianta RC70 tak posloužila zejména ke snížení deformací při bočním zatížení.



Obrázek 91 Průběh deformací při zatížení na předním oblouku modelu RC70

## 6. Porovnání výsledků

Kapitola srovnává zejména výsledky deformací a hmotností jednotlivých konstrukcí. Výsledky redukováných napětí jsou uvedeny v tabulce, ale nemůžeme je brát za směrodatné, jak je vysvětleno v závěru.

### 6.1. Tabulka výsledků

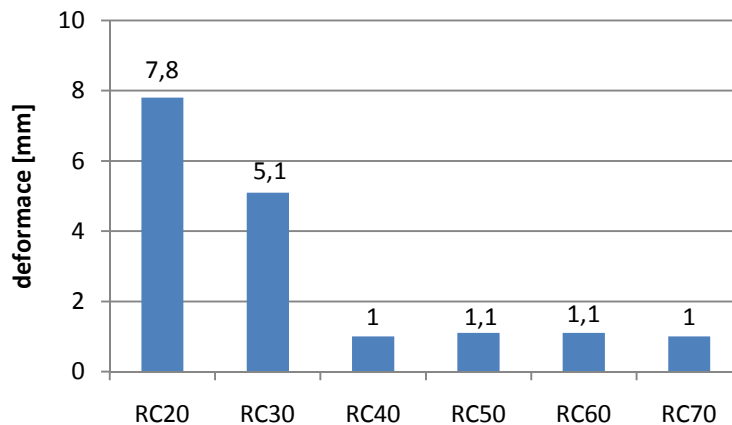
V následující tabulce jsou uvedeny největší redukováná napětí a deformace jednotlivých variant modelů.

*Tabulka 4: Porovnání výsledných hodnot redukováných napětí a deformací*

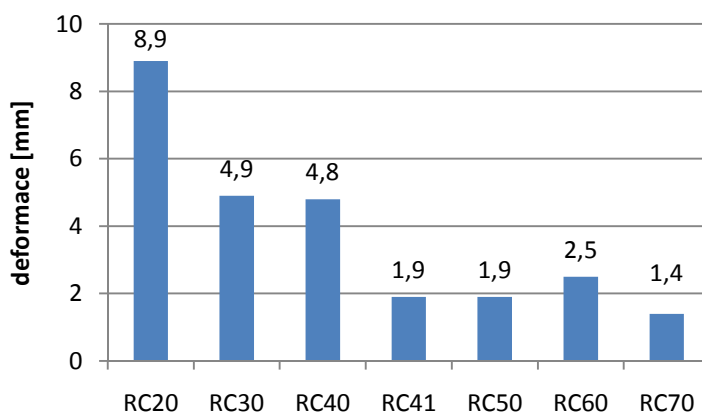
	Hlavní oblouk		Boční zatížení		Přední půloblouk	
	Redukované napětí	Deformace	Redukované napětí	Deformace	Redukované napětí	Deformace
RC20	504	7,8	811	8,9	984	16,2
RC30	608	5,1	734	4,9	327	2,6
RC40	173	1	749	4,8	334	3,4
RC41	-	-	422	1,9	-	-
RC42	-	-	-	-	314	3,3
RC50	191	1,1	441	1,9	327	2,7
RC60	175	1,1	509	2,5	288	2,5
RC70	195	1	348	1,4	289	2,5

## 6.2. Grafy deformací rámů

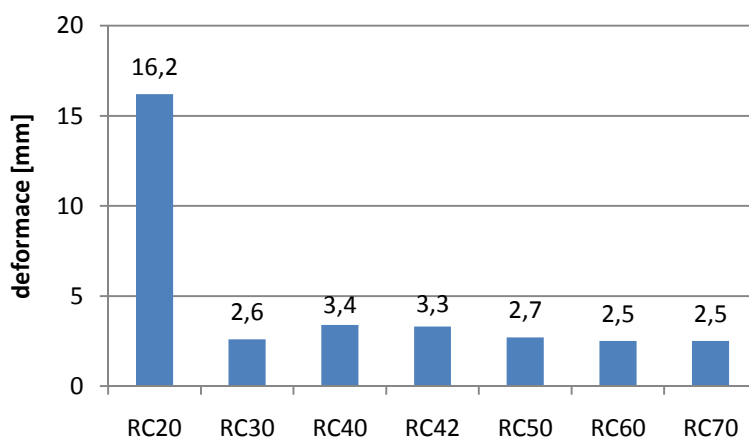
V následujících grafech jsou přehledně uvedeny nejvyšší dosažené deformace jednotlivých variant bezpečnostních konstrukcí.



Obrázek 92 Hodnoty nejvyšších deformací při zatížení na hlavním oblouku



Obrázek 93 Hodnoty nejvyšších deformací při bočním zatížení



Obrázek 94 Hodnoty nejvyšších deformací při zatížení na předním oblouku

### 6.3. Hmotnosti jednotlivých variant bezpečnostních rámu

Pro výpočet hmotnosti každé z variant jsem vycházel ze základního vzorce

$$m = \rho \cdot V, \quad (2)$$

kde  $m$  je celková hmotnost bezpečnostní konstrukce v  $kg$ ,  $\rho$  je hustota materiálu  $kg/m^3$  a  $V$  je objem materiálu bezpečnostní konstrukce v  $m^3$ .

Pro výpočet jsem neuvažoval hmotnost svarů o který je hmotnost konstrukce zvýšena, ani hmotnost odpadního materiálu z dosedacích ploch trubek, o kterou je hmotnost snížena. Vzhledem k celkové hmotnosti rámu je tato hmotnost zanedbatelná. Pro výpočet jsem použil program Mathcad, do kterého jsem zadal potřebné hodnoty (viz příloha 1). Nejprve jsem spočítal hmotnost základní struktury z trubek 45x2,5 mm, která byla pro všechny varianty stejná a k ní jsem potom přičítal hmotnost jednotlivých výztuh z trubek o rozměru 40x2 mm. Výsledné hodnoty zaokrouhlené na jedno desetinné místo jsou v tabulce 5.

$$m = m_{ZS} + m_V \quad (3)$$

$$m = (\rho \cdot S_{pZS} \cdot l_{ZS} + \rho \cdot S_{pV} \cdot l_V) \quad (4)$$

$$m = \rho \cdot \pi \cdot [(R_{oZS}^2 - R_{iZS}^2) \cdot l_{ZS} + (R_{oV}^2 - R_{iV}^2) \cdot l_V] \quad (5)$$

kde

$m_{ZS}$  je hmotnost základní struktury v  $kg$ ,  $m_V$  je hmotnost výztuh v  $kg$ ,  $\rho$  je hustota materiálu v  $kg/m^3$ ,  $S_{pZS}$  je obsah průřezu trubky základní struktury v  $mm^2$ ,  $S_{pV}$  je obsah průřezu trubky výztuh konstrukce v  $mm^2$ ,  $l_{ZS}$  je celková délka trubek základní struktury v  $mm$ ,  $l_V$  je celková délka trubek výztuh konstrukce v  $mm$ ,  $\pi$  je Ludolfovo číslo,  $R_{oZS}$  je vnější poloměr trubky pro základní strukturu v  $mm$ ,  $R_{iZS}$  vnitřní poloměr trubky pro základní strukturu v  $mm$ ,  $R_{oV}$  vnější poloměr trubky pro výztuhy v  $mm$ ,  $R_{iV}$  vnitřní poloměr trubky pro výztuhy v  $mm$ .

Výsledné hodnoty zaokrouhlené na jedno desetinné místo jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5 Hmotnosti bezpečnostních rámu

	Hmotnost (kg)
RC20	47,8
RC30	65,5
RC40	62,1
RC41	64,7
RC42	63,3
RC50	68,6
RC60	71,3
RC70	75,8

## 7. Závěr

Ve zpracované diplomové práci bylo hlavním cílem provést změny na stávající bezpečnostní konstrukci rámu automobilu Škoda Octavia za účelem zvýšení ochrany posádky. Pro splnění tohoto cíle jsem použil simulačního programu Ansys 12.1 pro deformačně-pevnostní analýzu stávající i navržených konstrukcí. Změnu v konstrukci jsem prováděl vhodnou kombinací různých druhů výztuh při zachování základní struktury bezpečnostní konstrukce dle předpisů FIA, dle přílohy J, článku 253. Základem pro tuto práci bylo nastudování těchto předpisů a seznámení se s konstrukcí bezpečnostních rámu pro závodní automobily.

V této práci jsem vytvořil sedm řešení bezpečnostních konstrukcí, které se lišily použitými typy výztuh. Základní otázkou bylo, kde zvolit výztuhy ve tvaru V a ve tvaru X vzhledem k bezpečnosti konstrukce, jak bylo uvedeno v kapitolách 5.2 Kontrola rámu RC30 a 5.3 Kontrola rámu RC40. U konečného modelu s pracovním označením RC70 (kapitola 5.8) jsem po posouzení výsledků pro střešní výztuhu zvolil výztuhu ve tvaru X, jelikož zde docházelo k nižším deformacím. Výztuhy ve tvaru X byly použity i u bočních výztuh. U hlavního oblouku a zadních vzpěr jsem použil výztuhy ve tvaru V z důvodu lepších výsledných hodnot deformací. Výsledné hodnoty nejvyšších redukovaných napětí jednotlivých modelů a jejich deformací jsou zřetelné z uvedené tabulky (kapitola 6.1).

V tabulce je zřetelně vidět, že vhodnou kombinací výztuh bylo dosaženo u výsledné varianty bezpečnostní konstrukce rámu nejnižších deformací. Tyto deformace se s přehledem vešly do limitu 50 mm u zatížení na hlavním oblouku a při bočním zatížení a do 100 mm při zatížení na předním oblouku, jak ukládá homologační zkouška. Deformace u zkoušky na hlavním oblouku byly sníženy oproti původní konstrukci při zkoušce na hlavním oblouku o 87%, při bočním zatížení o 84% a při zkoušce na předním oblouku došlo ke snížení deformací o 85%. V tabulce jsou také uvedeny hodnoty nejvyšších redukovaných napětí jednotlivých modelů. Tyto hodnoty ovšem nejsou směrodatné. V místech spojení prutů na modelech bezpečnostního rámu by bylo potřeba použít podrobnějšího typu modelu, např. vytvořeného s použitím skořepinových prvků, případně při řešení detailů použít 3D prvky typu solid. Prutové prvky Beam189 jsem u modelů použil, protože umožňovaly sledovat hodnoty deformací a redukovaných napětí po délce prutu s výjimkou oblastí spojení prutů. Pro tyto účely bylo použítí prvku Beam189 vhodnější zejména z toho důvodu, že jsem mohl rychleji a efektivněji vytvořit různé varianty bezpečnostních konstrukcí. Místa spojení prutů, zejména svarů, jsou řešeny provedením zkoušek svarů před danou homologační zkouškou.

Možným pokračováním v návaznosti na tuto diplomovou práci by mohlo být vytvoření skořepinového modelu pro vysíťování prvky typu shell, případně solid, kde by bylo možno analyzovat výsledky i v místech spojení prutů.



## Seznam použitých zdrojů

- [1] NÁVRAT, Tomáš; PETRUŠKA, Jindřich; IVÁN, László. *Řešené úlohy metodou konečných prvků* [online]. 2007 [cit. 2010-04-28]. Programový systém Ansys. Dostupné z WWW: <<http://www.umt.fme.vutbr.cz/~tnavrat/mkp/>>.
- [2] *Příloha J mezinárodního sportovního řádu [překlad]*, 2010. 415 s.
- [3] DUNOVSKÝ, Václav. *Výroba bezpečnostního rámu do závodního automobilu*. Pardubice, 2007. 49 s. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [4] DUNOVSKÝ, Václav. *Bezpečnostní rám závodního automobilu z hlediska posouzení konstrukce výpočtovým modelováním*. Pardubice, 2009. 79 s. Diplomová práce. Univerzita Pardubice.
- [5] *Wikipedia* [online]. 2010 [cit. 2010-04-28]. Auto racing. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Auto\\_racing](http://en.wikipedia.org/wiki/Auto_racing)>.
- [6] *Auto union* [online]. 2008 [cit. 2010-05-18]. The cars. Dostupné z WWW: <<http://www.autounion.org.uk/cars/autog.jpg>>.
- [7] *Alpina safety systems unlimited* [online]. 2009 [cit. 2010-04-28]. Alpina Super Defender I. Dostupné z WWW: <<http://www.alpina.at/index.php?region=79> <=deu>.
- [8] *Bring a trailer* [online]. 2009 [cit. 2010-03-15]. Straight Line History: 1963 Shelby Cobra. Dostupné z WWW: <<http://bringatrailer.com/2009/05/10/straight-line-history-1963-shelby-cobra/>>.
- [9] *Foltýn sportovní a GT vozy/sport cars* [online]. 2008 [cit. 2010-03-15]. Škoda 120S. Dostupné z WWW: <[http://www.foltyn.cz/car/skoda/skoda120S\\_2v.jpg](http://www.foltyn.cz/car/skoda/skoda120S_2v.jpg)>.
- [10] *Custom cages* [online]. 2008 [cit. 2010-02-21]. Roll cages. Dostupné z WWW: <<http://www.customcages.co.uk/Rollcage/LoadRollCage.castle?manufacturer=Subaru&mode=Impreza%20GRB%20Gen%202&type=2008%20Int>>.
- [11] *Focaljet* [online]. 2009 [cit. 2010-01-17]. Bolt-in roll cage fail. Dostupné z WWW: <<http://forums.focaljet.com/team-pit-stop/617185-bolt-roll-cage-fail.html>>.
- [12] *The Syncnotching System* [online]. 2010 [cit. 2010-04-20]. The Sync Notcher. Dostupné z WWW: <<http://www.syncnotcher.com/>>.
- [13] *4wheeloffroad* [online]. 2010 [cit. 2010-04-26]. Gen Right Jeep Roll Cage Tubing Bender. Dostupné z WWW: <[http://www.4wheeloffroad.com/techarticles/body/131\\_0907\\_gen\\_right\\_jeep\\_cj\\_roll\\_cage/photo\\_03.html](http://www.4wheeloffroad.com/techarticles/body/131_0907_gen_right_jeep_cj_roll_cage/photo_03.html)>.
- [14] LEINVEBER, Jan; VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. Úvaly : Albra, 2008. 914 s.
- [15] *Autoklub ČR* [online]. 2004 [cit. 2010-01-17]. ZMĚNY PŘÍLOHY J MSŘ FIA 2005-2006. Dostupné z WWW: <[http://www.autoklub.cz/acr/fasacr/radyfia/zmeny/2006/zmena\\_prilohaJ\\_05\\_06..pdf](http://www.autoklub.cz/acr/fasacr/radyfia/zmeny/2006/zmena_prilohaJ_05_06..pdf)>.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Označení	Legenda	Jednotka
$R_m$	mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_e$	mez kluzu v tahu	[MPa]
A	tažnost	[%]
E	modul pružnosti	[MPa]
m	hmotnost	[kg]
$\rho$	hustota	[ $kg/m^3$ ]
$S_p$	obsah průřezu trubky	[ $mm^2$ ]
$l$	délka	[mm]
$\pi$	ludolfovo číslo	[-]
$R_o$	vnější průměr trubky	[mm]
$R_i$	vnitřní průměr trubky	[mm]
$\sigma_{red}$	redukované napětí	[MPa]
FIA	Federation Internationale de l'Automobile	
ASN	Národní klub nebo federace uznaná FIA	
AČR	Autoklub České Republiky	
MSŘ	Mezinárodní sportovní řády	
VO	Volitelné varianty	
MKP	Metoda konečných prvků	
Pro/E	PRO/ENGINEER	
ISO	International Organization for Standardization	
IGES	Initial Graphics Exchange Specification	
CAD	Computer-aided design	

## Seznam příloh

Příloha – Výpočet hmotností variant bezpečnostních rámu

Příloha

—

Výpočet hmotností variant  
bezpečnostních rámu

Vstupní hodnoty

Hustota

$$\rho := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 7.85 \times 10^3 \text{ m}^{-3} \cdot \text{kg}$$

Ludolfovo číslo

$$\pi := 3.14$$

Vnější poloměr trubky základní struktury

$$R_{oZS} := 22.5 \text{ mm}$$

Vnitřní poloměr trubky základní struktur

$$R_{iZS} := 20 \text{ mm}$$

Vnější poloměr trubky výztuh

$$R_{oV} := 20 \text{ mm}$$

Vnitřní poloměr trubky výztuh

$$R_{iV} := 18 \text{ mm}$$

$$l_{ZS1} := \begin{pmatrix} 500 \\ 500 \\ 178 \\ 178 \\ 233 \\ 233 \\ 253 \\ 253 \\ 667 \end{pmatrix} \text{ mm} \quad l_{ZS2} := \begin{pmatrix} 450 \\ 450 \\ 240 \\ 240 \\ 355 \\ 355 \\ 227 \\ 227 \\ 565 \\ 565 \end{pmatrix} \text{ mm}$$

$$l_{ZS3} := \begin{pmatrix} 1120 \\ 1120 \end{pmatrix} \text{ mm} \quad l_{ZS4} := \begin{pmatrix} 177 \\ 177 \\ 37 \\ 37 \\ 563 \end{pmatrix} \text{ mm}$$

$$\sum l_{ZS1} = 2.995 \text{ m} \quad \sum l_{ZS3} = 2.24 \text{ m}$$

$$\sum l_{ZS2} = 3.674 \text{ m} \quad \sum l_{ZS4} = 0.991 \text{ m}$$

$$l_{ZSn} := \begin{pmatrix} \sum l_{ZS1} \\ \sum l_{ZS2} \\ \sum l_{ZS3} \\ \sum l_{ZS4} \end{pmatrix}$$

↖  
Délka trubek základní struktury

Hmotnost základní struktury rámu

$$m_{ZS} := \rho \cdot \pi \cdot (R_{oZS}^2 - R_{iZS}^2) \cdot l_{ZS} \quad m_{ZS} = 25.928 \text{ kg}$$

Délky výztuh jednotlivých variant bezpečnostních rámu

	RC20	RC30	RC50	RC40
	( 477 )	( 477 )	( 469 )	( 477 )
	( 477 )	( 477 )	( 469 )	( 477 )
	( 469 )	( 469 )	( 477 )	( 469 )
	( 469 )	( 469 )	( 477 )	( 469 )
	( 1170 )	( 1170 )	( 1170 )	( 1170 )
	( 1170 )	( 1170 )	( 1170 )	( 1170 )
	( 770 )	( 685 )	( 685 )	( 685 )
$l_{v201} :=$	( 770 )	( 685 )	( 685 )	( 685 )
mm	( 440 )	( 487 )	( 487 )	( 487 )
	( 440 )	( 487 )	( 487 )	( 487 )
	( 1367 )	( 280 )	( 280 )	( 280 )
	( 1367 )	( 280 )	( 280 )	( 280 )
	( 1370 )	( 704 )	( 704 )	( 704 )
	( 934 )	( 704 )	( 704 )	( 704 )
		( 440 )	( 440 )	( 440 )
		( 440 )	( 440 )	( 440 )
		( 770 )	( 1370 )	( 770 )
		( 770 )	( 934 )	( 770 )
		( 1370 )	( 1135 )	( 1370 )
		( 934 )	( 1135 )	( 934 )
		( 1370 )	( 1127 )	( 1135 )
		( 1370 )	( 1127 )	( 1135 )
		( 1445 )	( 440 )	( 1127 )
		( 1445 )	( 440 )	( 1127 )
		( 205 )	( 330 )	( 440 )
		( 205 )	( 330 )	( 440 )
		( 750 )	( 100 )	( 330 )
		( 750 )	( 100 )	( 330 )
		( 100 )	( 750 )	( 0 )
		( 100 )	( 750 )	( 0 )
		( 60 )	( 205 )	( 0 )
		( 60 )	( 205 )	( 0 )
		( 60 )	( 60 )	( 0 )
		( 60 )	( 60 )	( 0 )
		( 1370 )	( 1370 )	( 0 )
		( 1370 )	( 1370 )	( 0 )
		( 0 )	( 0 )	( 0 )
		( 0 )	( 0 )	( 0 )
		( 0 )	( 0 )	( 0 )
		( 0 )	( 0 )	( 0 )

RC20

$$l_{V20} := \sum l_{V201} = 11.69\text{m}$$

$$m_{20} := m_{ZS} + ro \cdot \pi \cdot \left( R_{oV}^2 - R_{iV}^2 \right) \cdot l_{V20} \quad m_{20} = 47.827\text{kg}$$

RC30

$$l_{V30} := \sum l_{V301} = 21.128\text{m}$$

$$m_{30} := m_{ZS} + ro \cdot \pi \cdot \left( R_{oV}^2 - R_{iV}^2 \right) \cdot l_{V30} \quad m_{30} = 65.507\text{kg}$$

RC40

$$l_{V40} := \sum l_{V401} = 19.332\text{m}$$

$$m_{40} := m_{ZS} + ro \cdot \pi \cdot \left( R_{oV}^2 - R_{iV}^2 \right) \cdot l_{V40} \quad m_{40} = 62.143\text{kg}$$

RC41

$$m_{41} := m_{40} + ro \cdot \pi \cdot \left( R_{oV}^2 - R_{iV}^2 \right) \cdot 1370\text{mr} \quad m_{41} = 64.709\text{kg}$$

RC42

$$l_{V42P} := 2 \cdot 300\text{mr}$$

$$l_{V42P} = 0.6\text{m}$$

$$m_{42} := m_{40} + ro \cdot \pi \cdot \left( R_{oV}^2 - R_{iV}^2 \right) \cdot l_{V42P} \quad m_{42} = 63.267\text{kg}$$

RC50

$$l_{V50} := \sum l_{V501} \quad l_{V50} = 22.762\text{m}$$

$$m_{50} := m_{ZS} + ro \cdot \pi \cdot \left( R_{oV}^2 - R_{iV}^2 \right) \cdot l_{V50} \quad m_{50} = 68.568\text{kg}$$

RC60

$$l_{V601P} := \begin{pmatrix} 1370 \\ 770 \\ 770 \\ 1265 \\ 0 \end{pmatrix} \text{mm} \quad l_{V601N} := 2 \cdot 1370 \text{mm} = 2.74 \text{m}$$

$$l_{V60X} := \sum l_{V601P} - l_{V601N} \quad l_{V60X} = 1.435 \text{m}$$

$$m_{60} := m_{50} + \rho_0 \cdot \pi \cdot \left( R_{oV}^2 - R_{iV}^2 \right) \cdot l_{V60X} \quad m_{60} = 71.256 \text{kg}$$

RC70

$$l_{V701P} := (1370 + 1370 + 550 + 550) \text{mm} = 3.84 \text{m}$$

$$l_{V701N} := 1370 \text{mm}$$

$$l_{V70X} := l_{V701P} - l_{V701N} = 2.47 \text{m}$$

$$m_{70} := m_{60} + \rho_0 \cdot \pi \cdot \left( R_{oV}^2 - R_{iV}^2 \right) \cdot l_{V70X} \quad m_{70} = 75.884 \text{kg}$$