

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: 2301T001 Dopravní a manipulační technika

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Topologická optimalizace rámu studentské formule SAE

Autor: **Bc. Petr CHYLÍK**

Vedoucí práce: **doc. Ing. Ladislav NĚMEC, CSc.**

Akademický rok 2018/2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr CHYLÍK**

Osobní číslo: **S16N0073P**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**

Název tématu: **Topologická optimalizace rámu studentské formule SAE**

Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

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

Základní požadavky:

Student vypracuje obecnou rešerši na téma stavba karosérií silničních vozidel. Student se zorientuje v problematice topologické optimalizace. Cílem práce bude topologická optimalizace rámu formule. Předpokládá se využití výsledků práce při stavbě studentské formule SAE.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Úvod
2. Rešerše v oblasti karosérií a možnosti využití topologické optimalizace při návrhu karoserie
3. Návrh výpočetního modelu pro topologickou optimalizaci
4. Topologická optimalizace
5. Zhodnocení práce, závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **50-70 stran A4**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

MAREŠ, T. Základy Konstrukční Optimalizace. Sv.2. Praha: Vlastním nákladem, 2006

VLK, F. Karosérie motorových vozidel. Brno: nakl.Vlk, 2000


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

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Ladislav Němec, CSc.**
Katedra konstruování strojů
Konzultant diplomové práce: **Ing. Stanislav Špírk, Ph.D.**
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2018**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2019**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 16. října 2018

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora: Petr Chylík

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé práce panu doc. Ing. Ladislavovi Němcovi, CSc. za velkou trpělivost a cenné rady. Také bych tímto rád poděkoval mému konzultantovi panu Ing. Stanislavovi Špírkovi Ph.D. za poskytnuté rady a zkušenosti.

Velké poděkování patří také mým rodičům, mé partnerce a mé novorozené dcerce Emmě, za to že mě motivovali, poskytli mi finanční prostředky a umožnili mi tak dostudovat.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Chylík	Jméno Petr	
STUDIJNÍ OBOR	B2301 „Dopravní a manipulační technika“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Němec CSc.	Jméno Ladislav	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Topologická optimalizace rámu studentské formule SAE		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2019
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	66	TEXTOVÁ ČÁST	66	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS	Tato diplomová práce se zabývá topologickou optimalizací rámu závodního vozu kategorie Formula Student, Součástí je krátká rešerše v oblasti soutěže Formula student a konstrukce rámu. Dále obsahuje popis procesu topologické optimalizace. Výpočet tuhosti stávajícího rámu, vlastní optimalizaci a model nového návrhu rámu. Závěrem jsou oba stavy porovnány a výsledek optimalizace zhodnocen.
KLÍČOVÁ SLOVA	Rám, Formula SAE, FSAE, optimalizace, topologie

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Chylík	Name Petr		
FIELD OF STUDY	B2301 „Transport Vehicles and Handling Machinery“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Němec CSc.	Name Ladislav		
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Topology Optimization of a Formula SAE Frame			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2019
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	66	TEXT PART	66	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION	This thesis deals with optimization of a car frame of the Formula Student category. The first component is a short research on Formula Student competition and frame design. Thesis also mentions topology optimization process, FEM analysis of existing frame, custom topology optimization and new design of the frame. Finally, both states are compared and the optimization result evaluated.
KEY WORDS	Frame, Formula SAE, FSAE, optimization, Topology

Obsah

Úvod	3
1. Cíl práce	4
2. Formula SAE	5
2.1. Hodnocení soutěže Formula Student	6
3. Rámy vozidel [4]	7
3.1. Vozidlové rámy	7
3.1.1. Obdélníkový (žebřinový)	7
3.1.2. Páteřový	7
3.1.3. Plošinový	8
3.1.4. Obvodový	8
3.1.5. Smíšený	9
3.1.6. Příhradový	9
3.2. Rámy Formule Student	10
3.2.1. Příhradový rám	10
3.2.2. Karbonový monokok	11
3.2.3. Hybridní koncepce	11
4. Optimalizace	12
4.1. Typy optimalizace	12
4.1.1. Optimalizace tvaru	13
4.1.2. Topologická optimalizace	13
4.1.3. Topografická optimalizace	13
4.1.4. Optimalizace topometrie	14
4.2. Topologie	14
4.3. Topologická optimalizace	14
4.3.1. Metoda SIMP	14
5. Specifikace požadavků na návrh rámu	17
5.1. Požadavky obecné	17
5.2. Materiálové požadavky:	17
5.3. Požadavky kladené pravidly soutěže	17
5.3.1. Primární struktura	17
5.3.2. Hlavní a přední oblouk	17
5.3.3. Bulkhead – přední nárazová část	18

5.3.4.	Způsob propojení jednotlivých trubek	19
5.3.5.	Prostor a poloha pilota	19
6.	Workflow	22
6.1.	Jízdní stavy	22
6.2.	Síly vstupující do výpočtu	23
6.2.2.	Zadní těhlice	25
6.2.3.	Síly v uložení pérování	25
6.2.4.	Torzní tuhost	27
6.3.	Stávající stav	28
6.3.1.	Výpočtový model	29
6.3.2.	Vytvoření výpočtové sítě	29
6.3.3.	Definice okrajových podmínek	30
6.3.4.	Vyhodnocení výsledků (B)	31
6.3.5.	Torzní tuhost (A)	32
6.4.	Topologická optimalizace	32
6.4.1.	Parametry optimalizace	33
6.4.1.	Výpočtový model	42
6.4.2.	Vytvoření výpočtové sítě	43
6.4.3.	Parametry vlastní optimalizace rámu	45
6.4.4.	Vyhodnocení výsledků	47
6.4.5.	Zkrácení výpočtového času	52
6.5.	Reverzní inženýrství	53
6.6.	Nový návrh (verifikace výsledků)	55
6.6.1.	Výpočtový model	55
6.6.2.	Vytvoření výpočtové sítě	55
6.6.3.	Definice okrajových podmínek	55
6.6.4.	Torzní tuhost	56
6.6.5.	Vyhodnocení výsledků – jízda	57
6.7.	Porovnání výsledků	59
6.7.1.	Torzní tuhost:	59
6.7.2.	Celková tuhost	60
	Zhodnocení práce, závěr	61
	Použité zdroje	62

Úvod

Snahou každého konstruktéra by mělo být navrhnout takový produkt, který vyhovuje účelovým požadavkům, zároveň nepřekračuje omezení, která mohou být dána dostupnou technologií nebo celkovým rozpočtem zakázky. Cílem by též mělo být, aby produkt disponoval určitou přidanou hodnotu, tedy takový produkt, který nejen vyhovuje zmíněnému, ale který nějakým svým parametrem převyšuje konkurenci. Tímto parametrem může být nižší cena, lepší mechanické vlastnosti, delší životnost, nižší hmotnost aj. Právě pro toto dosažení zkvalitnění výrobku se využívá proces nazývaný optimalizace.

Dříve se výrobky optimalizovaly na základě zkušeností a konstruovalo metodou pokusu a omylu, která se v neprobádaných oblastech sice využívá dodnes, ale těchto oblastí je s ohledem na celosvětovou produkci minimum. Ve zbylých částí vývoje se využívá poznatků z historie, které nám dávají dostatečné množství informací, na jejichž základě se lze poučit a zoptimalizovat tak produkty budoucí.

Zejména díky stálému zdokonalování výpočetní techniky, se v posledních desetiletích možnosti optimalizace výrazně zvýšily a zpřesnily. Díky tomu jsou výrobky stále kvalitnější a efektivnější, což v extrému přímo ovlivňuje možnosti lidstva (poznání vesmíru) a nepřímo např. životní prostředí. Proto je proces optimalizace velice důležitý a měl by ho zahrnovat každý výrobek ve svém procesu vývoje.

Obsahem této diplomové práce je optimalizace rámu vozu Formula Student. Konkrétně je zaměřena na optimalizaci topologickou, která se zabývá rozložením materiálu v celém díle. Řadí se mezi složitější a komplexnější druh optimalizace, proto ještě nebývá součástí většiny vývojových procesů a bývá spíše využívána v oblastech požadující maximum, jako jsou letectví, astronautika, nebo právě motorsport.

Práce je rozčleněna do tří dílčích bloků, první se zabývá teoretickou částí, možnostmi a způsoby optimalizace. Druhým blokem je blok, který se zaměřuje na koncepce využívaných rámu a v posledním, třetím bloku je rozepsán průběh optimalizace a její výsledky. Kterých bylo docíleno metodou MKP (metoda konečných prvků).

1. Cíl práce

Cílem této práce je vlastní topologická optimalizace rámu vozu Formula Student, následné vymodelování rámu na základě výsledků a znovu ověření tuhosti návrhu metodou MKP.

Očekávaným výsledkem je návrh rámu, který by mohl ve své podstatě vypadat stejně futuristicky jako na obr.1, kterým se chlubí motocykl Light Riders, jehož rám je dutý a prochází jím kabeláž. Tento rám byl vytištěn na 3D tiskárně, respektive jeho díly, protože díky omezení stavebního prostoru současných 3D tiskáren musela být konstrukce svařena z několika částí.

Zde bylo optimalizováno s cílem snížení hmotnosti a výsledkem byl rám o hmotnosti 6 kg.



Obrázek 1 Rám motocyklu Light Riders [1]

2. Formula SAE

Formula SAE je soutěž, která je pořádána mezinárodní organizací SAE (“Society of Automotive Engineers”) pro technické univerzity po celém světě. V soutěži se nehodnotí pouze časy v jednotlivých disciplínách, jako bývá v motorsportu zvykem, ale hodnocení je komplexní. U vozu se hodnotí: cena, konstrukce, design, spotřeba paliva a jeho dynamika. Cílem týmu tedy není postavit jenom nejrychlejší vůz, ale navrhnout vůz, který bude vynikat po všech stránkách.

Pravidla Formula SAE jsou stanovena komisí Formula SAE, snahou komise je kromě zajištění bezpečnosti závodů, také nutit studenty k inovacím v dané oblasti, proto jsou pravidla často lehce měněna, mnohokrát tato malá odchylka v pravidlech donutí konstruktéry k velkým změnám na další generaci vozu. Tím je zajištěn pokrok a zamezeno neustálému opakování již „dokonalých“ konstrukcí.



Obrázek 2 Zahájení soutěže FSAE [2]

2.1. Hodnocení soutěže Formula Student

O umístění zúčastněných týmů rozhoduje počet obdržených bodů z jednotlivých disciplín. Maximální získatelný počet je 1000 bodů. Podrobný popis disciplín včetně jejich hodnocení je uveden v tab.1. [3]

Disciplína	Popis	Dosažitelný počet bodů
Statické disciplíny		
Prezentace konstrukce	Obhájení jednotlivých prvků vozidla před odbornou porotou.	150
Cenová relace	Hodnocení poměru dosažených vlastností vozidla k celkovým nákladům na jeho výrobu	100
Prezentace	Prezentace ekonomického plánu, představení cílové skupiny zákazníku, předpoklady zisku potenciálního výrobce.	75
Dynamické disciplíny		
Endurance	Vytrvalostní závod na 22 km.	300
Autokros	Závod na jedno kolo technickou tratí.	150
Skid pad	Závod na trati tvaru „8“.	50
Akcelerace	Zrychlení vozidla na vzdálenosti 75 m.	75
Spotřeba paliva	Hodnocení spotřeby paliva, evidované při disciplíně endurance.	100

Tabulka 1 Hodnocení soutěže

3. Rámy vozidel [4]

Rám je základním nosným prvkem všech vozidel. Spojuje všechny navazující systémy v jeden celek, a veškeré síly, které na vozidlo působí, z velké části pohlcuje právě rám.

Účel rámu:

- a) Umožnit uchycení navazujících systémů (nápravy, hnací ústrojí, karosérii)
- b) Přenášet hnací, brzdné a suvné síly

Mimo výše zmíněné hlavní účely rámu musí rám splňovat i další požadavky.

- a) Umožnit implementaci prostoru pro posádku
- b) Musí být tuhý, aby nedocházelo k degradaci funkce zavěšení vozu a následně ke změněným jízdním vlastnostem.
- c) Pevný
- d) Lehký

3.1. Vozidlové rámy

3.1.1. Obdélníkový (žebřinový)

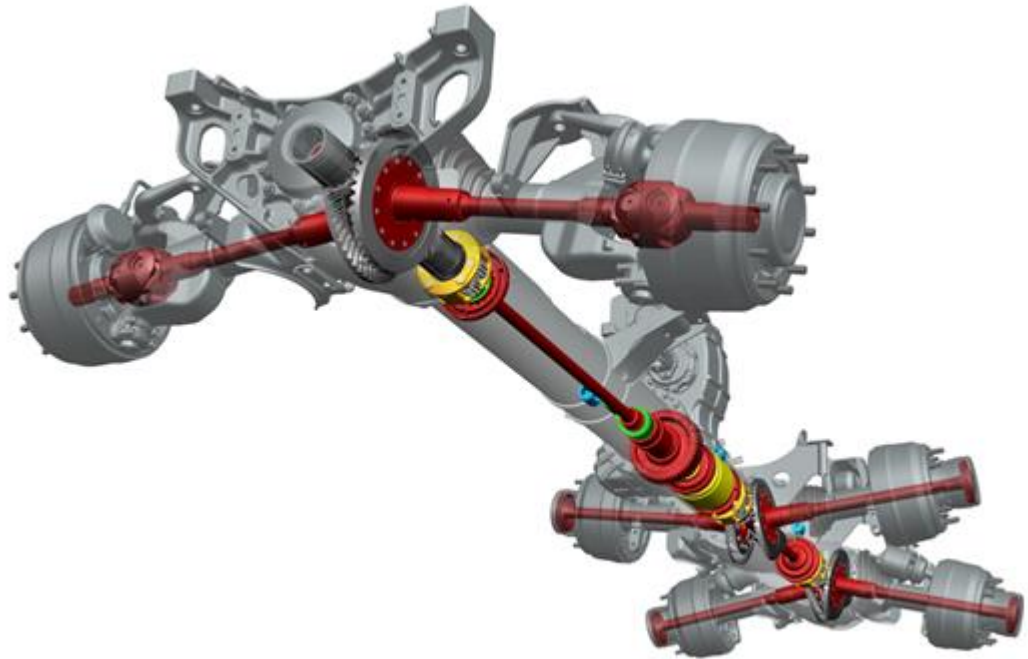
- Rám tvoří dva podélníky a několik příčníků ze silných ocelových plechů, které jsou navzájem spojeny šrouby, sváry nebo nýty. Je lehký pružný, ale méně tuhý. Používá se u nákladních automobilů.



Obrázek 3 Obdélníkový rám

3.1.2. Páteřový

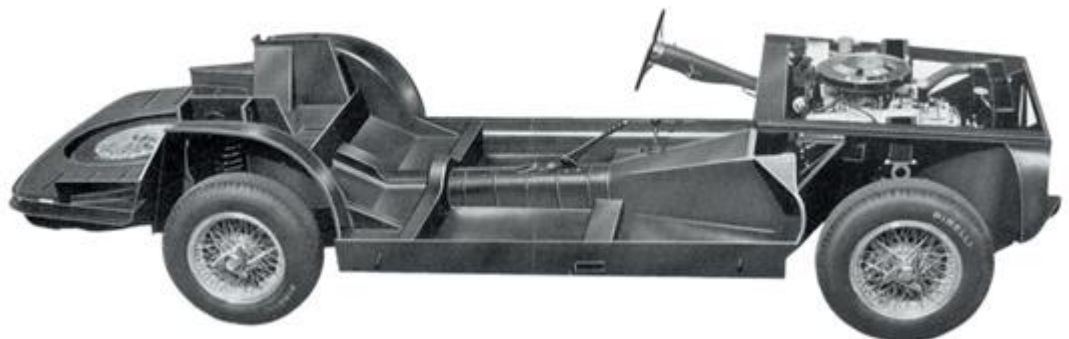
- Základem rámu je jeden nosník (páteř), který tvoří silnostěnná roura velkého kruhového průřezu. Která je rozdělena na části a spojena přírubami. Mezi těmito částmi jsou umístěné skříně nápravových rozvodovek. Vlastníkem tohoto patentu je automobilka Tatra. Rám je velice pevný, tuhý, ale velmi hmotný. Je určen pro nákladní automobily pracující v těžkém terénu.



Obrázek 4 Páteřový rám

3.1.3. Plošinový

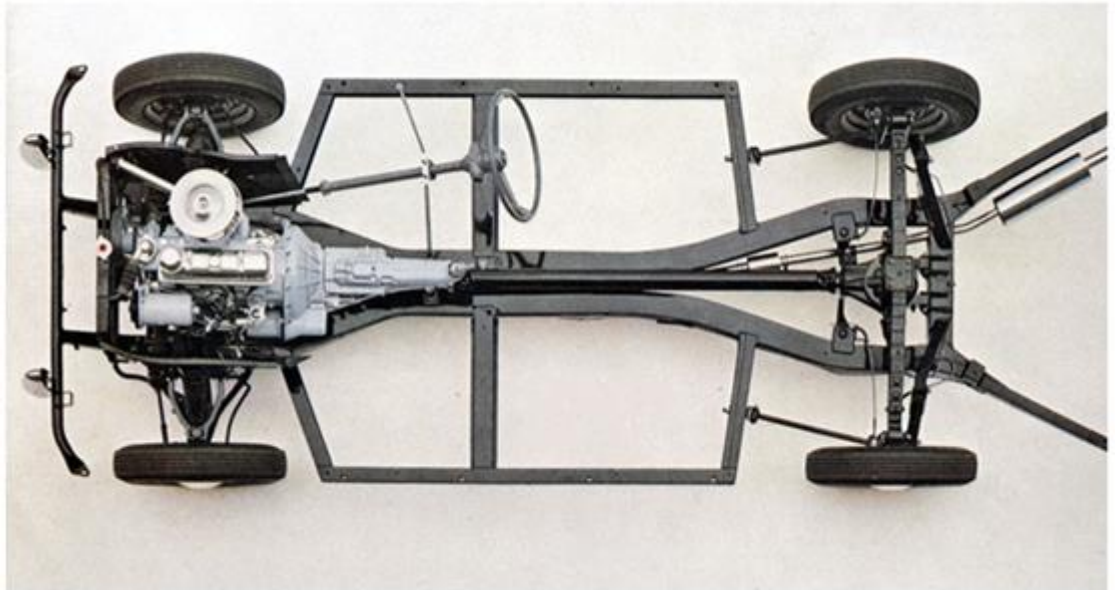
- Tento rám je předchůdcem samonosné karosérie. Základ tvoří plošina vylisována z ocelového plechu, který je na okrajích zpevněn podélníky.



Obrázek 5 Plošinový rám

3.1.4. Obvodový

- U tohoto typu rámu je střední část rozšířena na šíři karosérie. Okrajové části rámu jsou naopak zúženy pro montáž náprav.



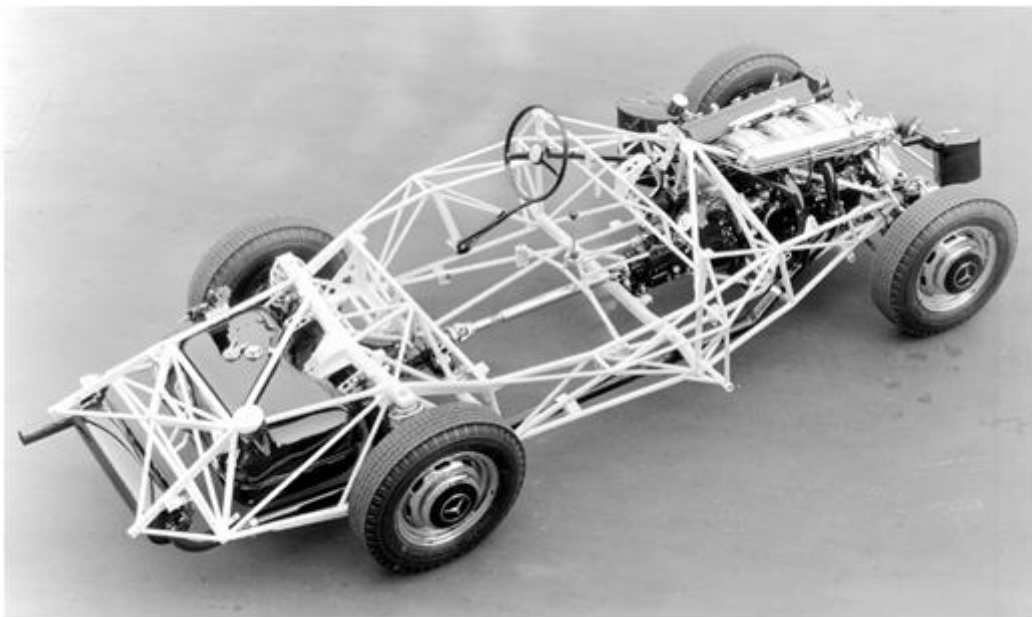
Obrázek 6 Obvodový rám

3.1.5. Smíšený

- Jedná se o rám, jehož konstrukce disponuje prvky z několika druhů rámu (žebřinový, příhradový...) Tato kombinace se hojně využívá u autobusů.

3.1.6. Příhradový

- Tento rám se skládá z trubek, výlisků nebo tenkostěnných ocelových profilů a jako celek tvoří prostorovou příhradovou konstrukci. Nahrazuje tak částečně funkce karoserie vozu. Nejčastěji tento typ rámu najdeme u závodních speciálů. Výhodou je celková pevnost, tuhost a jeho nízká hmotnost. Naopak oproti předešlým disponuje horší opravitelností.



Obrázek 7 Příhradový rám

Dnešní automobily již nevyužívají koncept rámových konstrukcí, nýbrž využívají samonosné karoserie, které jsou tvořeny převážně lisovanými plechy a v některých místech odlitky. Tímto

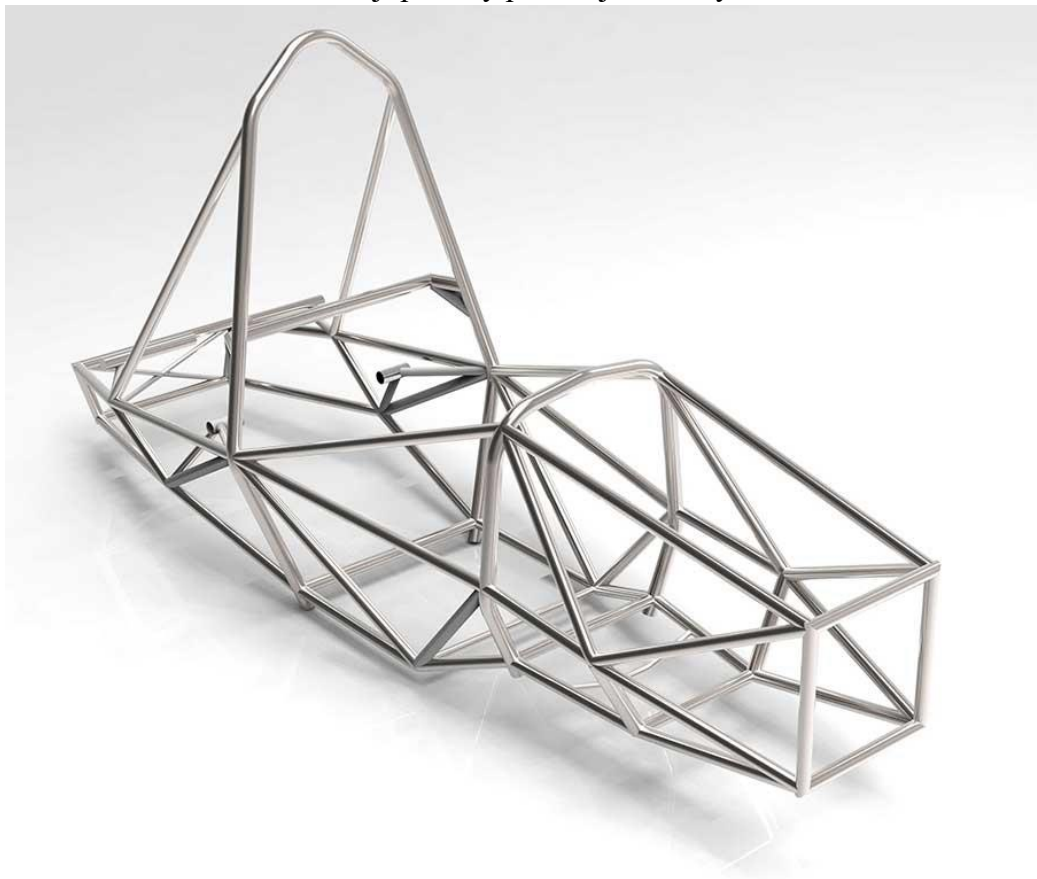
řešením automobilky dosahují výborného poměru tuhosti/hmotnosti, ale je velmi náročné na technologii, konstrukci a finance.

3.2. Rámy Formule Student

- V soutěži Formule Student, jsou využívány tři nejběžnější koncepce:
 - Příhradový rám
 - Karbonový monokok
 - Hybrid-kombinace příhradového rámu a monokoku

3.2.1. Příhradový rám

- Tento typ, je technologicky, časově a ekonomicky nejméně náročný na realizaci, ale s ohledem na tuhost a hmotnost tento typ rámu zaostává za ostatními. Ze zmíněných koncepcí bývá tento typ nejtěžší a hodnota dosažitelné torzní tuhosti je daleko nižší. Z velké části limitují tento typ konstrukce samotná pravidla soutěže, které striktně definují průřezy profilů jednotlivých částí rámu.



Obrázek 8 Příhradový rám týmu Race UP [5]

3.2.2. Karbonový monokok

- monokok (monocoque – mono-jeden; coque – skořepina), je konstrukce, která plní funkci rámu. Ve srovnání s příhradovým rámem je zde možné dosáhnout vyšší torzní tuhosti a zároveň velice ušetřit na hmotnosti (50%).
- Monokoky se vyrábí kladením uhlíkových vláken, které jsou propojeny epoxidovou pryskyřicí. Touto technologií lze docílit téměř jakéhokoli tvaru. Místa, kde dochází ke zvýšenému namáhání lze vyztužit např. voštinovými jádry.
- Tento koncept je využíván i v přední motoristické soutěži – Formule 1.



Obrázek 9 Karbonový monokok formule 1 [6]

3.2.3. Hybridní koncepce

- Jde o kombinaci předchozích dvou variant, kde v přední části vozu je použita koncepce monokoku a v zadní části příhradový rám. Tyto části jsou následně slepeny v jeden celek. Toto řešení umožňuje dobrý přístup k motoru, a tím ztelně usnadňuje případné opravy a úpravy. Zároveň přináší výhody monokoku, tedy dobrá tuhost a vynikající hmotnost.

4. Optimalizace

Cílem všech konstruktérů dnešní doby je navrhnout takový systém, který bude vyhovovat požadavkům daných účelem systému, za současného minimalizování kontraproduktivních faktorů. Každý návrh musí dokázat plnit požadavky funkce, pro kterou byl navržen a musí být vyrobitelný na dostupném zařízení. Zda se jedná o dobrý nebo špatný návrh určuje právě velikost těch faktorů, které snižují efektivitu systému. Požadavkem funkce rozumíme nejen schopnost zabezpečit prvotní funkce systému, ale i splnění jiných funkcí, které jsou požadovány. Tento požadavek klade na uspořádání konstrukce jistá omezení, která jsou obecně kvantitativně vyjádřena vedlejší podmínkou. Za vedlejší podmínky je nutno považovat také vztahy popisující chování konstrukce, jako jsou rovnice rovnováhy nebo deformační podmínky. Pod kontraproduktivními faktory si můžeme nejčastěji představit vysoké náklady, špatnou technologičnost výroby nebo vysokou hmotnost výrobku. Procesu, který vede k zachování funkčnosti a minimalizování nechtěných faktorů tedy k maximalizaci efektivitu systému říkáme optimalizace. Optimalizovat lze metodou „pokus omyl“, na základě zkušeností nebo analyticky. Zatímco v dřívějších dobách byly využívány především první možnosti, dnes díky dostupným výkonným výpočetním stanicím lze hledat optimální řešení numericky a to v přijatelném časovém úseku.

Aby bylo možné jednoznačně zhodnotit kvalitu konstrukce, je potřeba si specifikovat taková kritéria, která lze hodnotit kvantitativně. Zavádíme tedy zde tzv. návrhové proměnné. Tyto návrhové proměnné zapisujeme souhrnně do sloupcového vektoru x_n . Takové uspořádání, které tento vektor učiní extrémem, označujeme jako optimální. Tato funkce je pak označována jako funkce cílová $f(\mathbf{X}_n)$. Těmito kritérii bývá nejčastěji tuhost, hmotnost, stabilita, vlastní frekvence.

Definují se tři typy návrhových proměnných označené jako soubory proměnných \mathbf{X}_r , \mathbf{X}_t a \mathbf{X}_m . Nazývané zleva: rozměrové, tvarové a materiálové proměnné. Návrhové proměnné pak lze souhrnně zapsat do sloupcového vektoru: [7]

$$\mathbf{X}_n = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_r \\ \mathbf{X}_t \\ \mathbf{X}_m \end{pmatrix}$$

O návrhové proměnné můžeme prohlásit, že je přijatelná, jestliže se konstrukce vlivem změny (minimalizace/maximalizace) cílové funkce při daných vedlejších podmínkách nedostane do některého ze základních mezních stavů (např. mezní stav pružnosti) a zároveň nepřekročí předem stanovené limity, např. minimální tuhost konstrukce. Vedlejší podmínka vlastně zajišťuje proveditelnost návrhu konstrukce a můžeme ji zapsat: [8]

$$g_l(x_n) \leq 0; (l = 1, 2, \dots, k)$$

4.1. Typy optimalizace

Optimalizaci konstrukcí lze rozdělit na a) rozměrovou b) tvarovou a c) optimalizaci topologie. Základní rozdíl mezi nimi je patrný z obrázku č.10.

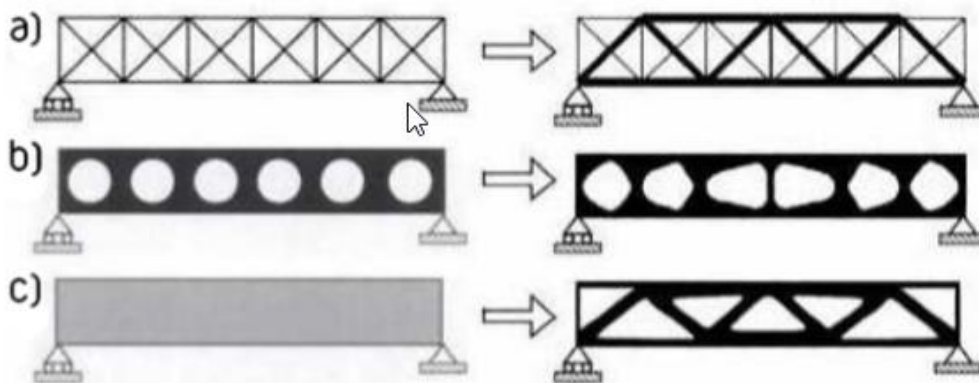
Během procesu rozměrové optimalizace je hledáno řešení změnou rozměrů průřezů již navržených tvarů při zachování polohy daných prvků. Nejčastěji se tedy jedná o rozměry průřezů nosníků, nebo o tloušťku desek. Jedná se o nejběžnější a nejjednodušší způsob optimalizace.

4.1.1. Optimalizace tvaru

Řeší samotný tvar prvků v návrhu (díry, žebra, atd). Ideální řešení hledá postupnou změnou hranic daného prvku.

4.1.2. Topologická optimalizace

Topologická optimalizace řeší ideální prostorové rozmístění materiálu navrhovaného objektu. Řeší tedy celý objem produktu s ohledem na okrajové podmínky. Tento druh optimalizace je z hlediska výpočtových časů nejnáročnější, ale také nejpřínosnější.



Obrázek 10 Ukázka principu jednotlivých typů optimalizace [9]

4.1.3. Topografická optimalizace

Tato optimalizace je podobná topologické, ale týká se změny 2D prvků. Řeší průběh střední roviny konstrukce. Je široce využívána především u plechových konstrukcí, kde je snahou udržet konstantní malou tloušťku materiálu, ale přesto dosáhnout dobrých hodnot tuhosti. Ukázkovým příkladem mohou být prolisy na korbě pickupu viz obr. č.11.



Obrázek 11 Korba pickupu - ukázka využití topografické optimalizace [10]

4.1.4. Optimalizace topometrie

Na rozdíl od předchozí, kde byla snaha zachovat stejnou tloušťku materiálu, se zde jedná o optimalizaci hodnotící průběh tloušťky v celém produktu a postupně ji měnit tak, aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků.

Produkty, které prošli procesem topologické optimalizace bývají zpravidla tvarově složité a z tohoto důvodu jsou mnohdy nevyrobitelné konvenčními technologiemi. Proto se tyto optimalizace dočkali svého rozmachu až s příchodem aditivních technologií. Díky těmto optimalizacím lze dnes dosáhnout nejlepšího možného využití materiálu a díky aditivním technologiím tyto návrhy zrealizovat.

V této práci se budeme podrobněji zabývat pouze optimalizací topologie.

4.2. Topologie

Lze definovat jako studii zabývající se způsobem propojení, či organizování určitých částí v jeden celek.

V oblasti konstrukce můžeme výše zmíněné chápat jako způsob propojení bodů, v nichž jsou definovány okrajové podmínky, pomocí materiálu. Můžeme tedy říct, že každý produkt má svoji topologii, nehledě na to, jak je tato topologie efektivní. Efektivní topologií rozumíme stav, kdy produkt dosáhl dobrého poměru *objem materiálu/požadovaný stav*. Požadovaným stavem může být nejčastěji předepsaná tuhost, pevnost, ale i specifikované tepelné, elektrické vlastnosti a podobně. Topologická optimalizace pak hledá způsoby organizace hmoty v rámci produktu s ohledem na okrajové podmínky, a to tak, aby bylo dosaženo požadovaného stavu při co nejmenším objemu použitého materiálu.

4.3. Topologická optimalizace

Jak již vyplývá z úvodu této kapitoly, topologická optimalizace prakticky kompletně řeší výsledný tvar produktu. Před procesem optimalizace je známé pouze prostředí, cílová funkce a zatížení. Cílem optimalizace je nejčastěji maximální redukce objemu potažmo hmotnosti konstrukce. Nejenže redukce objemu, respektive hmotnosti velmi pozitivně ovlivňuje (pomineme-li některé technologie výroby) hospodárnost výroby, ale v některých případech je i velice žádoucí pro funkčnost celého systému, konkrétně jde o systémy, u kterých se předpokládá častá změna rychlosti, např. dopravní prostředky.[7]

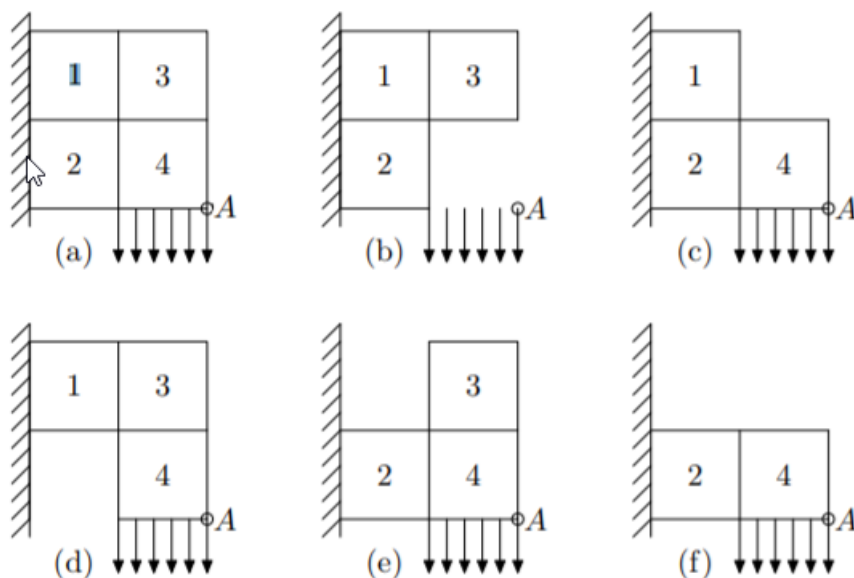
4.3.1. Metoda SIMP

Pro realizování topologické optimalizace je vymyšleno několik metod. V této práci bude použita metoda SIMP (solid Isotropic Material with Penalization; Metoda izotropní materiálové struktury s penalizací). Jedná se o jednu ze základních výpočtových strategií pro třídu topologií ISE (Isotropic Solid or Empty element; izotropní pevný či prázdný element), tato třída, jak již označení napovídá, klasifikuje dva typy elementů, element prázdný nebo element s vlastnostmi daného izotropního materiálu.

Pozn: Ostatní třídy: ASE – anizotropní pevný či prázdný element

ISEP – izotropní pevný, prázdný či pórovitý element

Elementární ukázka ISE topologie: Je dán návrhový prostor, poloha a vektor zatížení a okrajové podmínky (vetknutí), prostor byl pokryt sítí a rozdělen tak na čtyři elementy. Požadavkem je, aby svislá posunutí v bodě A byla minimální a aby byl objem redukován alespoň o 25%. [7]



Obrázek 12 Úloha ISE topologie (a) vstupní model, (b) nepřipustné řešení (c) optimální řešení [7]

Algoritmus SIMP metody je vytvořen tak, aby hledal extrém cílové funkce $f(x_N)$ s ohledem na vedlejší podmínku ($gl(x_N)$). Neznámý parametr je "pseudohustota" η_i pro každý itý element v diskretizovaném návrhovém prostoru. $\eta_i \in \langle 1; 0 \rangle$.

Pokud $\eta_i = 0$ znamená, že hmota i-tého elementu by měla být odstraněna

$\eta_i = 1$ znamená, že hmota i-tého elementu by měla být zachována

Elementy s vyšší energií napjatosti získají vyšší imaginární hustotu.

Algoritmus hledá extrém cílové funkce $f(x_N)$ při stanovených vedlejších podmínkách:

$$0 < \eta_i < 1 (i=1, 2, \dots, n)$$

$$0 < gl_j \leq gl_j^U (j=1, 2, \dots, M)$$

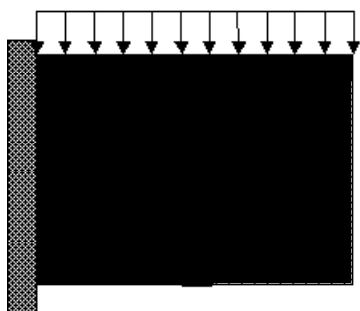
kde: N – počet elementů v diskretizovaném návrhovém prostoru

M – počet vedlejších podmínek

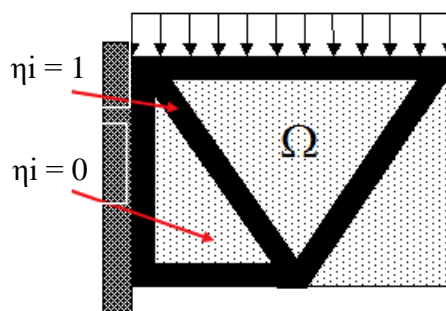
gl_j – vypočtená hodnota j-té vedlejší podmínky

gl_j^L – nejnižší přípustná hodnota j-té vedlejší podmínky

gl_j^U – nejvyšší přípustná hodnota j-té vedlejší podmínky [8]



Obrázek 14 Výchozí model pro optimalizaci



Obrázek 13 Ukázka rozložení pseudohustoty

Na obrázku č.13/14 je znázorněn nosník, zatížen spojitou silou. Z rozdílu obrázků je patrné, že došlo k výrazné redukci objemu. V místech odpovídající pozici elementů s pseudohustotou $\eta_i=1$ byl materiál ponechán (černé). Naopak elementy s pseudohustotou $\eta_i=0$ byly odebrány. Elementy, které se nacházejí na hranicích mezi těmito oblastmi nabývají hodnot pseudohustoty $\eta_i=0-1$, není tedy jednoznačné, zda element patří do řešení, či nikoli. Toto značně komplikuje proces optimalizace. Proto metoda disponuje tzv. penalizací středních hustot, čímž přiměje finální návrh, aby byl reprezentován pouze elementy o pseudohustě blízké 1 nebo 0. [8]

Penalizaci lze vyjádřit vztahem:

$$K'(\eta) = \eta^p \cdot K$$

Kde:

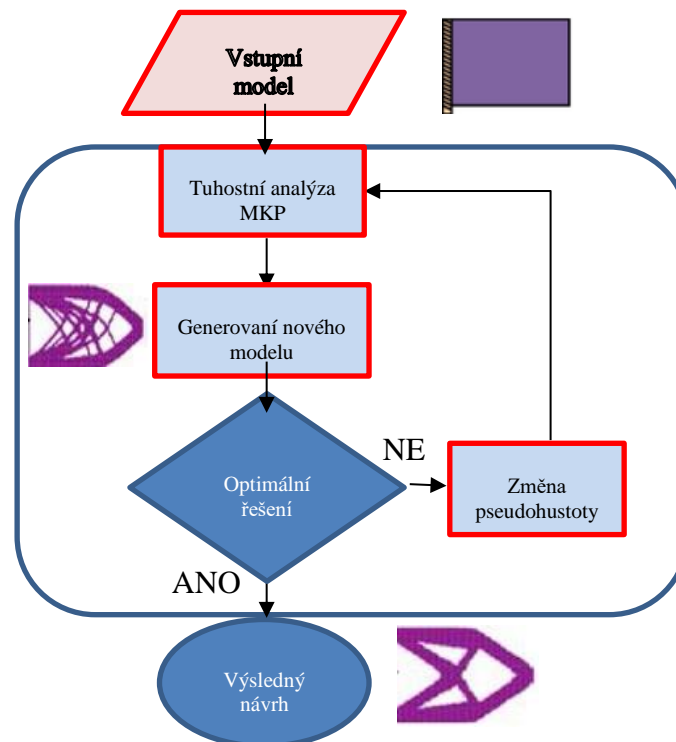
$K'(\eta)$ – penalizovaná tuhost elementu

K – „skutečná“ tuhost elementu

p – faktor penalizace; $p>1$

η – pseudohustota

Prvním krokem je zavedení výchozího modelu a jeho diskreditace. Dalším krokem je definování okrajových podmínek a přiřazení materiálových vlastností. Poté proběhne první analýza na jejímž základě se rozhodne, který element zůstane zachován a který se potlačí. Jestliže model konverguje, je generován výsledný návrh. V opačném případě je opakován druhý a třetí krok, dokud není splněna cílová funkce, nebo nedošlo k porušení některého z omezení (např. tuhost). Tento postup je zjednodušeně znázorněn následujícím algoritmem.



Obrázek 15 Algoritmus procesu topologické optimalizace

5. Specifikace požadavků na návrh rámu

Požadavky je možné rozdělit do 2 kategorií.

- a) Požadavky kladené pravidly
- b) Požadavky obecné

5.1. Požadavky obecné

Jedním z hlavních cílů konstrukce rámu v motorsportu je maximální redukce hmotnosti při zachování požadované tuhosti a schopnosti plnit svůj účel. Pokud by rám byl nedostatečně tuhý, docházelo by v něm k nechtěnému pružení a tím by degradovalo funkce systému zavěšení a následně ke změnám jízdním vlastnostem vozu.

Není důležitá pouze samotná hmotnost, ale i její rozložení tedy poloha těžiště. Snahou je umístění těžiště vozu co nejnižší, aby nedocházelo k přílišnému klopení vozu při změně rychlosti nebo směru jízdy.

Dále by rám měl být dostatečně pevný a v neposlední řadě vyrobitelný.

5.2. Materiálové požadavky:

Při použití koncepce příhradového rámu pravidla přikazují použití oceli pro jeho výrobu a to za současného splnění následujících podmínek:

Youngův modul pružnosti	E:	200GPa
Mez kluzu	Re:	305MPa
Mez pevnosti	Rm:	365MPa

5.3. Požadavky kladené pravidly soutěže

Omezení pro konstrukci rámu jsou detailně popsána mezinárodními pravidly Formule SAE. Zde budou uvedeny pouze ty nejdůležitější, které přímo ovlivní výsledek této práce.

Pravidla pro konstrukci rámu jsou postavené především tak, aby se docílilo maximální bezpečnosti. Některé části rámu přímo pravidla definují a jsou zde dovoleny pouze malé odchylky, konkrétně se jedná o části primární struktury, pozici pilota a jeho prostor, mechanické vlastnosti použitého materiálu a průřezy některých profilů. Toto vše má za následek minimální deformaci rámu při nehodě, a tak zamezení ohrožení pilota na životě.

Zároveň, díky tomu, je zde málo prostoru pro inovace. Výsledek topologické optimalizace bude patrně pouze informativní a nebude jej možné využít na monopostu Formule ZČU. Z tohoto důvodu budou brány ohledy pouze na pravidla, která definují pozici určitých hlavních prvků (hlavní a přední oblouk, prostor a pozice řidiče, vnější rozměry). Pravidla, která definují průřezy apod., budou zanedbány.

5.3.1. Primární struktura

Do primární struktury patří následující konstrukční části: hlavní a přední oblouk, výztuhy a podpěry těchto oblouků, boční a přední nárazová struktura včetně jejich výztuh.

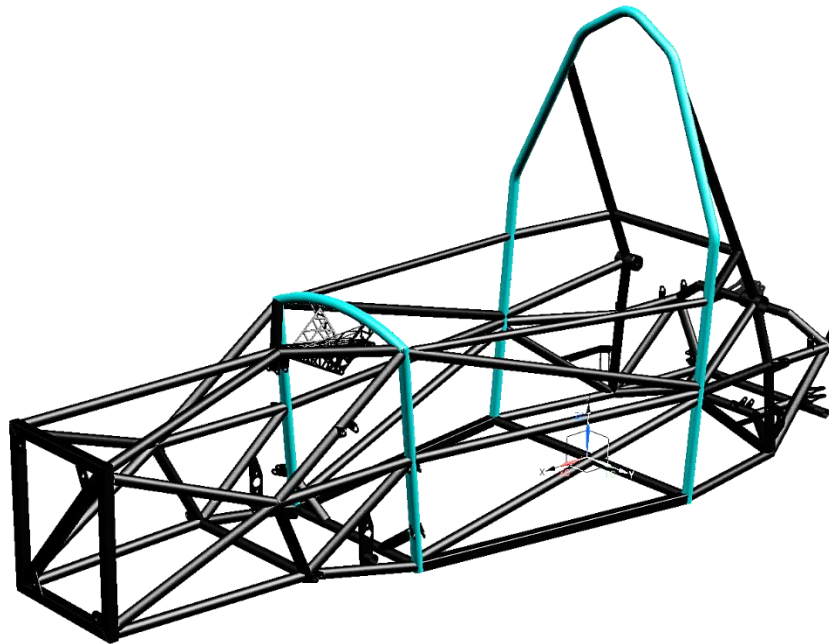
5.3.2. Hlavní a přední oblouk

Pravidla předepisují, že tyto dva zmíněné oblouky musí být zkonstruovány z trubkového profilu a nesmí být složeny z více částí. Toto pravidlo platí pro všechny koncepce rámu. Oblouky jsou

umístěné a konstruované tak, aby minimalizovaly nebezpečí zranění řidiče při převrácení vozu. Z tohoto důvodu je můžeme řadit i mezi prvky pasivní bezpečnosti.

Hlavní oblouk musí být umístěn za zády pilota a tvoří nejvyšší část vozu. Minimální rádius trubky z níž je oblouk tvořen nesmí být menší než je trojnásobek jejího průměru. Dále nesmí být oblouk skloněný více než o 10° proti vertikální rovině vozu.

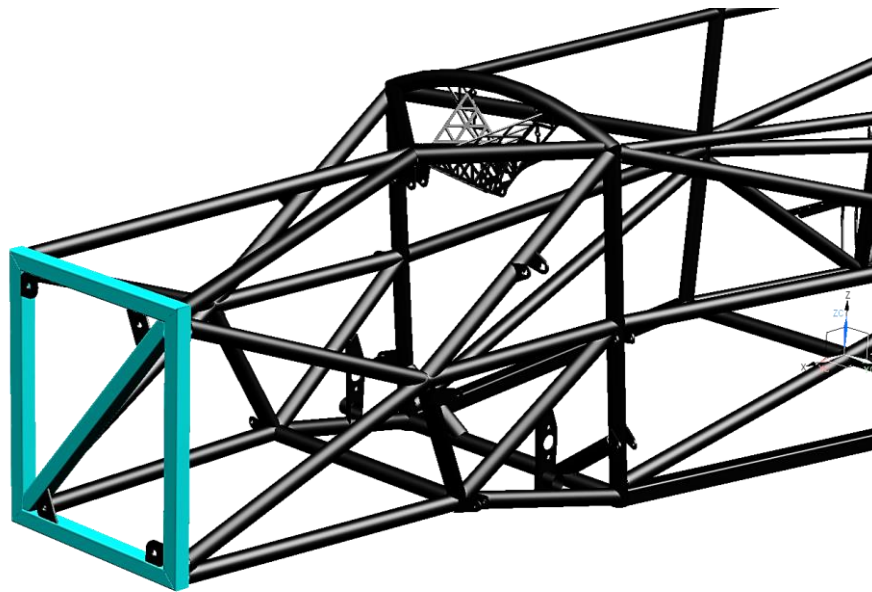
Pozice předního oblouku je dána především pozicí a prostorem pro pilota. Tento prostor definují šablony, které jsou dány pravidly. Stejně jako pro hlavní oblouk i pro tento platí předpisy pro sklon oblouku a omezení pro rádiusy.



Obrázek 16 Přední a hlavní oblouk rámu

5.3.3. Bulkhead – přední nárazová část

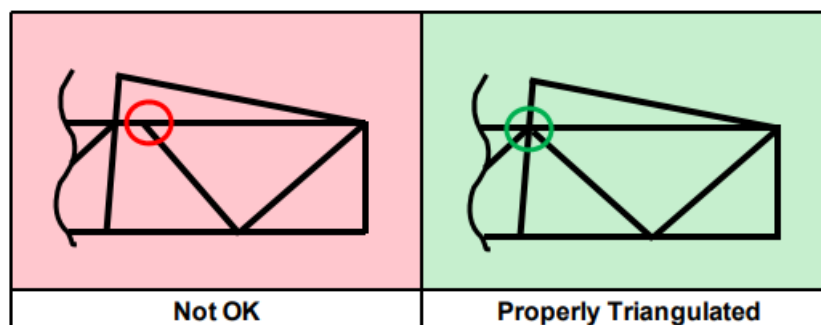
Bulkhead je složen z profilů předepsaných rozměrů a tvoří uzavřenou část, jak určují pravidla. Tato část je umístěna v přední části rámu a má za úkol chránit dolní končetiny pilota. Na této struktuře musí být přimontovaný plech, který zabraňuje vniknutí předmětu do prostoru pilota během čelního nárazu. Následně na zmíněném plechu je umístěn deformační člen, který má za úkol svou deformací pohltit energii a zmírnit tak následky nárazu.



Obrázek 17 Nárazová část – bulkhead

5.3.4. Způsob propojení jednotlivých trubek

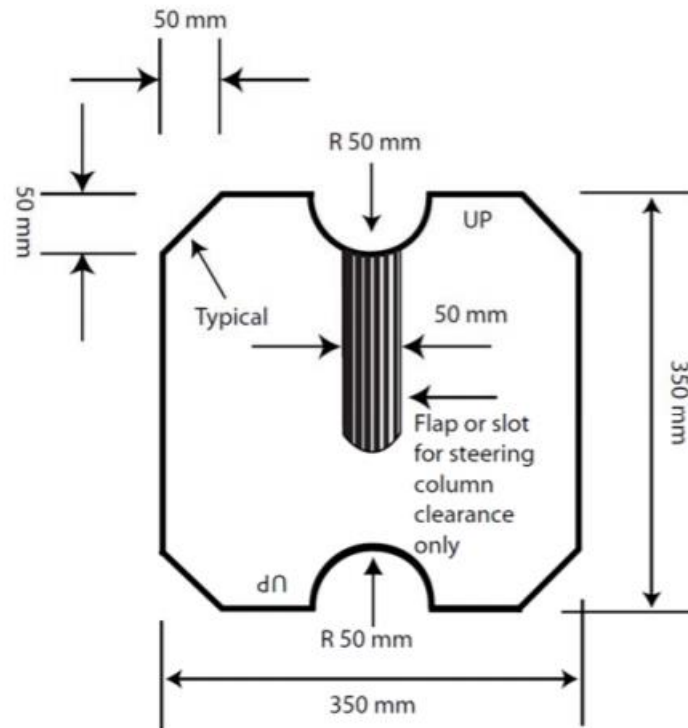
Ve všech částech konstrukce, musí být dodržena správná triangulace trubek, a to z uzlu do uzlu jako je znázorněno na následujícím obrázku č.18.



Obrázek 18 Triangulace dle pravidel FSAE

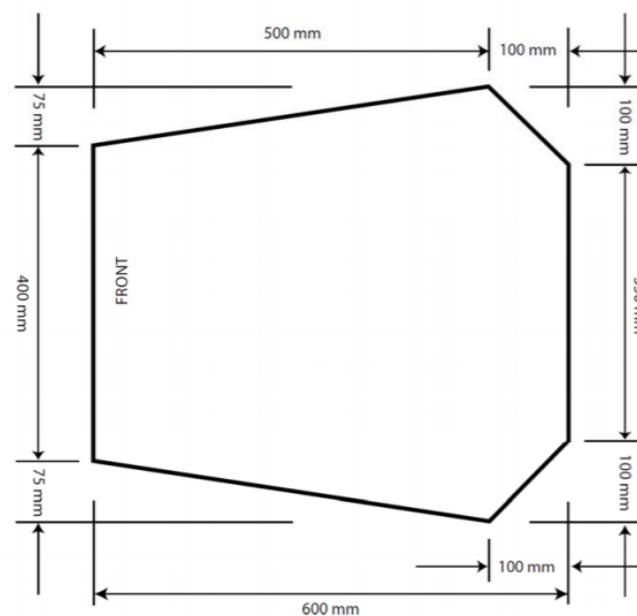
5.3.5. Prostor a poloha pilota

Jak již bylo zmíněno, pravidla blíže specifikují minimální prostor řidiče. Tento prostor je kontrolován pomocí dvou šablon viz obr. 19 a 20.



Obrázek 19 Šablona A [11]

Šablonou „A“ je kontrolován a definován minimální prostor pro nohy řidiče. Při kontrole je šablona vkládána vertikálně do prostoru mezi předním obloukem a pedály. Šablona musí bez kolize projít celým zmíněným prostorem. Vyjimku tvoří pouze tyč řízení, která může “kolidovat” ve znázorněném prostoru šablony.

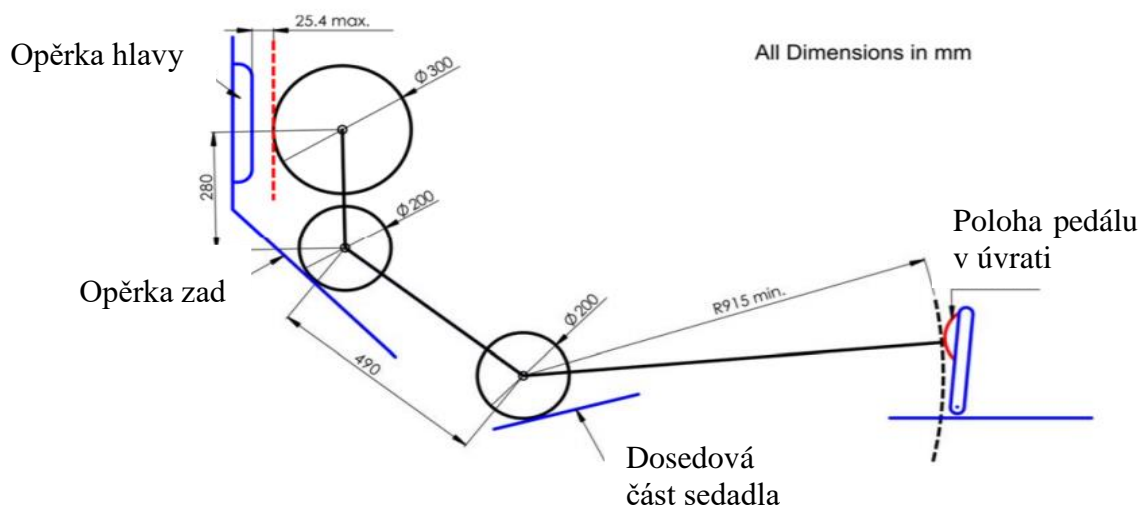


Obrázek 20 Šablona B[11]

Šablona „B“ definuje prostor jezdce mezi předním a hlavním obloukem. Je vkládána horizontálně a tažena od výšky, která odpovídá vzdálenosti 350 mm od země, nahoru. Stejně tak, jako v předchozím případě, ani zde nemůže šabloně nic bránit v pohybu.

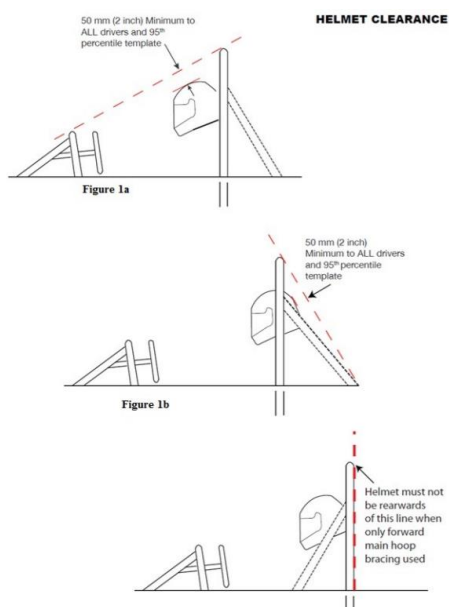
Pravidla pamatují i na férovost soutěže a definují i minimální proporce pilota, kterého musí vůz pojmout, což zabraňuje zvýhodnění týmů, které disponují jezdci nižšího vzrůstu. Dodržení tohoto pravidla je kontrolováno šablonou „C“ viz obr. č.21.

Rozměry této šablony reprezentují tzv. 95% muže.



Obrázek 21 Šablona C [12]

Od polohy a rozměrů jezdce se odvíjí výška oblouků, které musí zabránit styku přilby s vozovkou při převrácení vozu. Konkrétní předepsané vzdálenosti jsou patrné z obrázku č.22.



Obrázek 22 Předepsané minimální vzdálenosti [12]

6. Workflow

V této práci se bude vycházet ze stávajícího rámu, který byl navržen tak, aby vyhovoval výše zmíněným požadavkům.

Stávající rám bude analyzován metodou MKP a bude tak zjištěna jeho tuhost, která nakonec bude sloužit pro porovnání s modelem, který prošel optimalizací.

Poté bude vytvořen vstupní model, kde bude zohledněn prostor pro řidiče a pro okolní systémy.

Následně bude provedena vlastní topologická optimalizace, na jejímž základě bude provedena rekonstrukce modelu a jeho kontrola, která bude porovnána s výsledky stávajícího rámu.

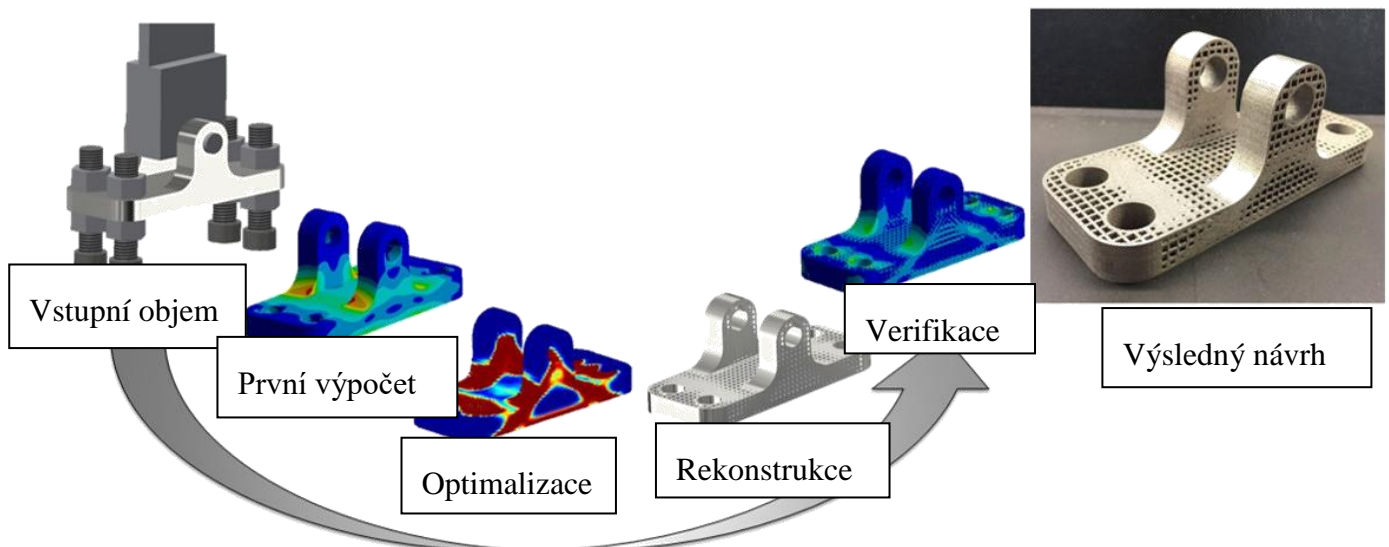
Veškeré zmíněné procesy budou provedeny v prostředí softwaru Siemens NX 12.

Pro všechny sítě následujících výpočtů byl zvolen materiál z knihovny NX Siemens – Ocel

- Youngův modul 210 GPa
- Poissonovo číslo 0.3

Parametry počítače použitého pro výpočty:

- CPU: Intel i7 8700 4.6GHz
- RAM: 32 GB 3200 MHz
- Scratch disk: Samsung 970 Evo Plus 500 GB



Obrázek 23 Proces optimalizace [12]

6.1. Jízdní stavy

Stojící vůz: Vůz se nepohybuje ani na něj nepůsobí žádné vnější síly, komponenty jsou tedy zatěžovány pouze vahou vozidla. Síly v tomto stavu jsou tedy oproti jiným stavům zanedbatelné a není třeba tento stav uvažovat.

Přímá jízda: Jedná se o stav, kde nepůsobí žádné setrvačné účinky, pouze jízdní odpory, které generují malé zanedbatelné síly. Tento stav se dá tedy považovat za stejný jako první

případ, byl by důležitý při výpočtech životnosti rámu. To ale není cílem této práce, proto tento stav při výpočtu není potřeba zohledňovat.

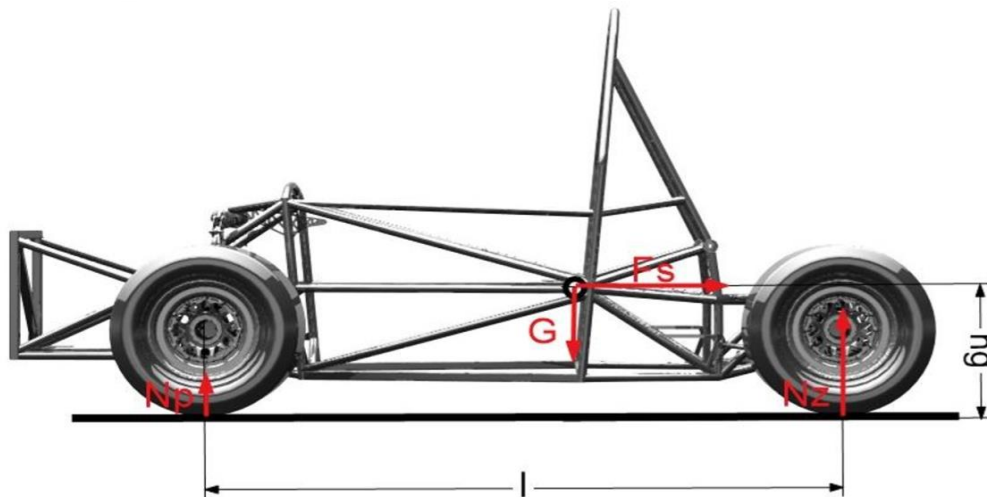
Akcelerace: Během tohoto stavu vzniká navíc setrvačná síla, která má snahu udržet vozidlo ve stavu před změnou stylu jízdy. Tato síla má za následek přesun zatížení na zadní nápravu.

Decelerace/brždění: Tento stav je opakem „akcelerace“, zde setrvačné síly udržují vozidlo v pohybu a zatížení je tedy přenášeno na přední nápravu.

Jízda zatáčkou: Zde vznikají setrvačné odstředivé síly, které nejvíce zatěžují vnější kola vozidla.

Přejezd nerovnosti: Přejezd nerovnosti generuje dynamické vertikální zatížení na postižené kolo. Pro výpočet tohoto zatížení byl zahrnut tzv. dynamický součinitel, který představuje dvojnásobně větší zatížení než u statické polohy.

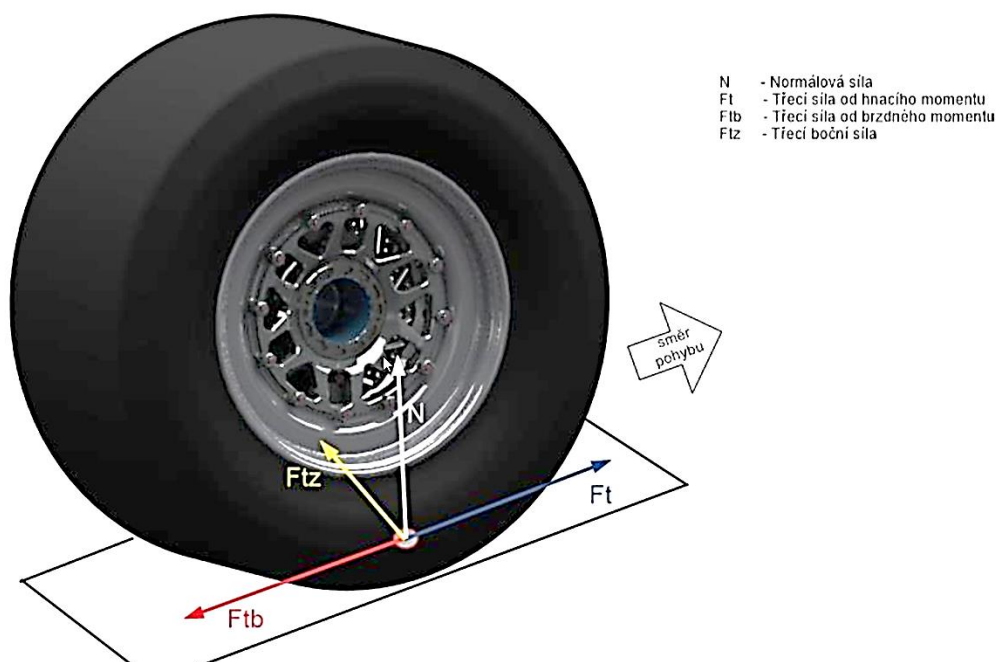
Přesto, že závody FSAE jsou konány na rovných plochách, kde se neobjevují žádné výmoly, bylo počítáno i s jízdním stavem „přejezd nerovnosti“, do tohoto jízdního stavu může vůz dostat jakýkoli předmět na vozovce, či výjezd mimo trať. Rám nepatří mezi prvky konstrukce, které lze snadno během závodů opravit, proto by měl odolat i těmto situacím.



Obrázek 24 Ukázka rozložení sil akcelerace

6.2. Síly vstupující do výpočtu

Síly, které je nutné uvažovat při výpočtu rámu, jsou především síly, které jsou do rámu přenášeny z vozovky přes kola, uložení kola a následně zavěšení.



Obrázek 25 Síly přenášené z kola do rámu

Pro topologickou optimalizaci není důležité znát přímo velikost sil, stačí pouze směr, jejich poměr a pozice působení síly, velikost sil je nutné znát pro následné porovnání výsledků.

Aplikované síly byly přebrány z minulé generace vozu. Pro jednodušší definování následné analýzy byly síly rozloženy do tří složek F_x , F_y , F_z . Síly byly zkoumány v bodech zavěšení. U přední těhlice to byly horní (A), spodní (B) bod připojení ramene. U zadní těhlice šlo o body horní (A) a spodní (B) bod uchycení ramene.

F_x – složka výsledné síly F v rovině rovnoběžné s vozovkou, která je kolmá na směr jízdy.

F_y – složka výsledné síly F , jejíž směr je kolmý na vozovku.

F_z – složka výsledné síly F , která má totožný smysl se směrem jízdy.

Jelikož síly působící na rám při stavu kombinovaného zatížení, byly téměř dvojnásobně větší než v ostatních stavech, byl jeden výpočet právě v tomto stavu shledán jako dostačující. Dále cílem této práce není zhodnotit skutečné deformace rámu, ale pouze se pokusit rám optimalizovat, tzn zlepšit aktuální tuhost rámu a pro toto následné porovnání stačí aplikovat stejné okrajové podmínky /síly na stávající a nový model.

6.2.1. Přední těhlice

Stav: kombinace

Body	Síly rozložené do složek		
	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
A	2672	5325	0
B	-5801	-1929	0

Tabulka 2 Přehled sil působících na přední těhlici

6.2.2. Zadní těhlice

Stav: kombinace:

Body	Síly rozložené do složek		
	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]
A	2352	487	0
B	-2323	1951	0

Tabulka 3 Přehled sil působících na zadní těhlici

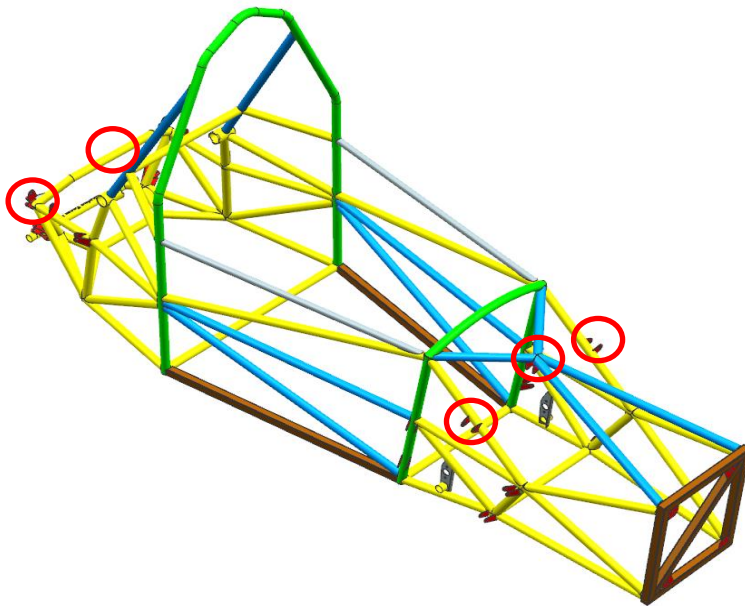
Síla ve směru Z je zachycována v prvcích uložení pérování. Proto je zde nulová.

6.2.3. Síly v uložení pérování

Kinematický model zavěšení byl zhotoven pro zjištění reakčních sil vyvolaných tlumičem pérování v bodech uložení prvků zavěšení k rámu.

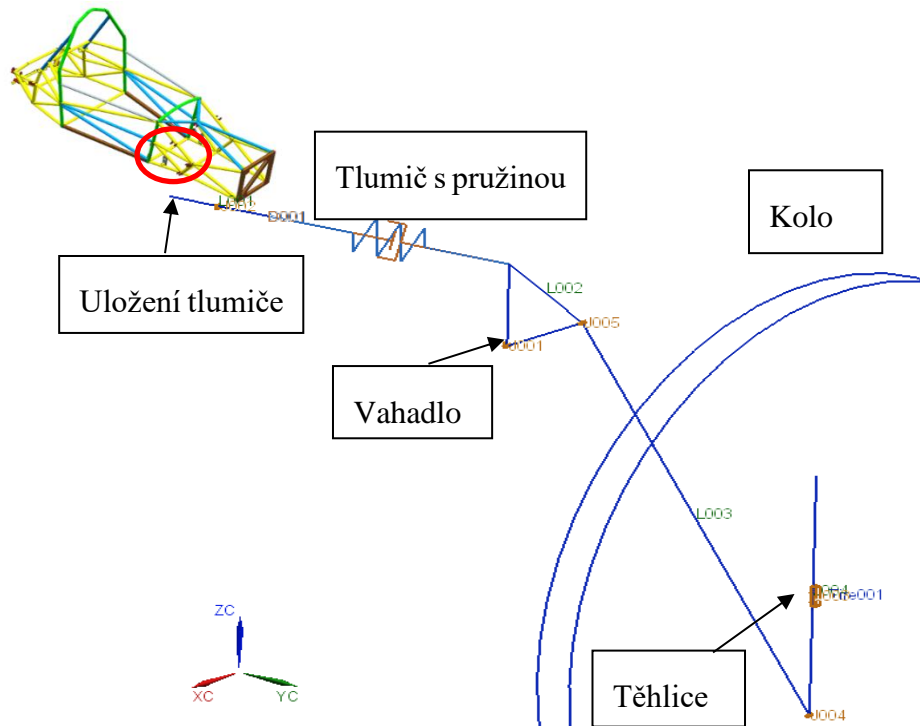
Parametry použité ve výpočtu:

- Rozměry jsou přebrané z modelu stávajícího zavěšení
- Tuhost pružiny: 28 N/mm
- Propružení kola: 40 mm (+/- v ose těhlice)



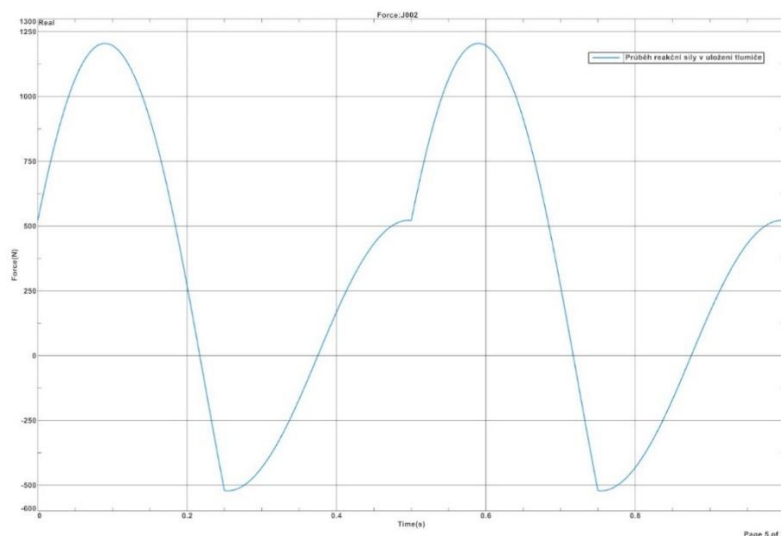
Obrázek 26 Body uložení prvků zavěšení k rámu

Kinematika byla řešena v programu NX a jeho modulu motion, kde byly nalinkovány jednotlivé, pro tento výpočet relevantní, prvky: těhlice, vahadlo a element pro uložení tlumiče. Těmto prvkům byly odebrány odpovídající stupně volnosti v odpovídajících bodech uložení každého prvku. Následně byla definována pružina, která spojuje vahadlo a bod uložení tlumiče. Té byla definována příčná tuhost, která přímo ovlivní vzniklé síly v uložení. Nakonec byla zadána výchylka těhlice a rychlost změny této výchylky, tedy 40mm výchylka nahoru/dolu během 0.5s.



Obrázek 27 Kinematický model zavěšení kola

Výsledkem kinematické analýzy jsou průběhy reakčních sil v uložení v závislosti na čase/výchylce těhlice.



Obrázek 28 Graf – Příklad průběhu reakční síly v uložení tlumiče $F(t)$

	přední		zadní	
	Uložení vahadla	Uložení tlumiče	Uložení vahadla	Uložení tlumiče
X	0	0	0	0
Y	-520	1180	220	930
Z	-930	0	-780	0

Tabulka 4 Maximální síly v uložení

6.2.4. Torzní tuhost

Torzní tuhost rámu reprezentuje odolnost proti kroucení rámu kolem podélné osy rámu. Pro správné chování vozu v zatáčce je žádoucí, aby tato tuhost dosahovala co nejvyšších hodnot. Nízká torzní tuhost má za následek degradaci funkce prvků podvozku, především zkrutných stabilizátorů a prvků tlumení.

Hodnotu torzní tuhosti zjistíme dosazením do následujícího vzorce:

$$C = \frac{M_k}{\alpha}$$

kde:

- C N*m*deg⁻¹ torzní tuhost
- M_k N*m kroucí moment oproti podélné ose
- α deg úhel natočení nápravy

z následujících výpočtů budeme schopni vyčíst pouze hodnoty sil a vektory posuvů jednotlivých elementů, proto je vhodné si vyjádřit torzní tuhost právě na těchto hodnotách.

$$C = \frac{F \cdot b}{\tan^{-1}\left(\frac{U_y}{b \cdot U_z}\right)}$$

Jelikož deformace jsou v poměru k velikosti rozchodu očekávány jako velmi malé, můžeme říci, že přepona v pomyslném trojúhelníku je rovna velikosti rozchodu, tento předpoklad vzorec výrazně zjednoduší.

$$C = \frac{L \cdot F}{\sin^{-1}\left(\frac{U_z}{L}\right)}$$

Důležitým vypovídajícím ukazatelem o efektivnosti vyztužení rámu je měrná torzní tuhost, tedy torzní tuhost vztažená k hmotnosti rámu. Pokud se hodnota měrné torzní tuhosti zvýší, můžeme sledovat vyztužení jako efektivní.

$$c = \frac{C}{m}$$

kde:

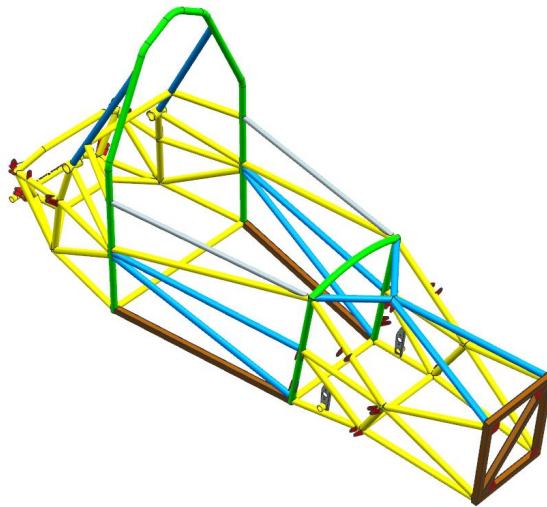
- F N působící síla
- U_y mm posuv ve směru y
- U_z mm posuv ve směru z
- b mm rozchod kol

- m kg hmotnost
- c N*m*deg⁻¹*kg⁻¹ měrná torzní tuhost
- L mm polovina rozchodu kol

Pro stávající a nový model budou aplikovány dva druhy okrajových podmínek, první pro porovnání torzních tuhostí jednotlivých variant (A) a druhá pro zjištění rozdílů snášení zátěžných stavů, které vznikají při běžné jízdě (B).

6.3. Stávající stav

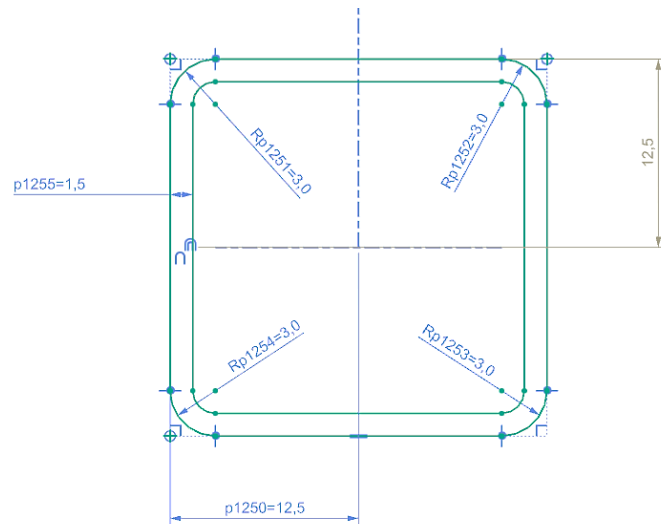
Aktuální rám je konstruován jako svařenec profilů o různých průřezech viz tabulka č.5.



Obrázek 29 Stávající stav rámu

Barva vizualizace trubky	Vnější průměr	Vnitřní průměr
šedá	20 mm	18 mm
Zelená	25 mm	20 mm
Modrá	25 mm	21 mm
žlutá	25 mm	22 mm
Hnědá		Viz obr. č. 30

Tabulka 5 Průřezy trubek rámu



Obrázek 30 Průřez nárazové části rámu

Stávající rám váží 34 kg, tato hodnota bude pro tuto práci referenční, cílem bude tuto hodnotu co nejvíce zredukovat při zachování aktuální tuhosti rámu, nebo zvýšit tuhost a přitom zachovat hmotnost.

6.3.1. Výpočtový model

Modelem použitým pro výpočet stávajícího stavu, je soubor střednic jednotlivých trubek rámu, které jsou vhodně rozdělené na místech, kde se protínají, aby došlo k provázání jednotlivých výpočtových sítí.

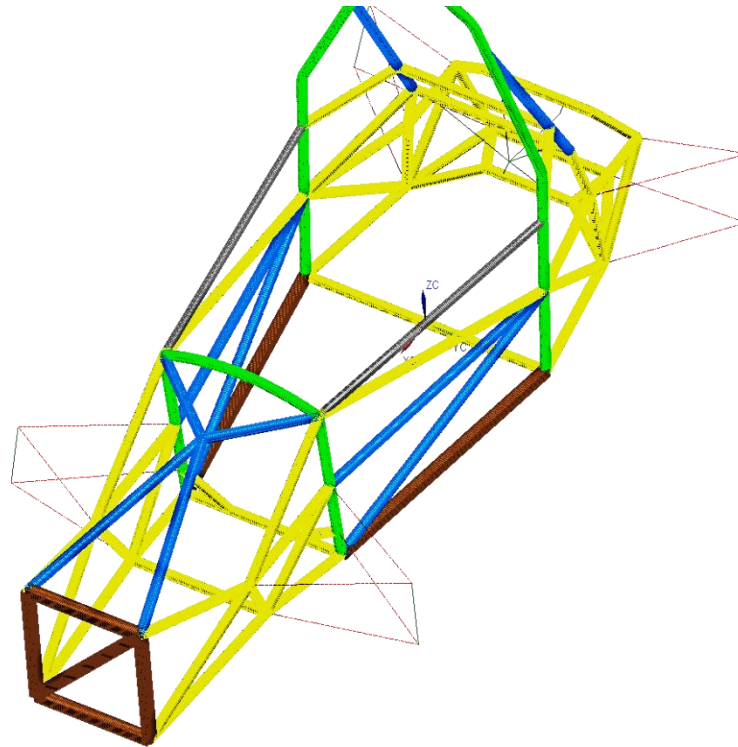
6.3.2. Vytvoření výpočtové sítě

Pro simulaci prvků s konstantními rozměry průřezů je vhodné použít 1D síť. Jelikož se celý model skládá pouze z právě takových profilů, byl zde zvolen prvek síť CBEAM. Jedná se o prvek, který má v každém uzlu 6 stupňů volnosti. Tyto stupně volnosti jsou uzlům odebrány v závislosti na navazujícím elementu, případně aplikovaných okrajových podmínkách. Dále je u něj možné definovat parametry průřezu. Tyto parametry byly definované tak, aby odpovídaly tabulce č.5.

Jelikož okrajové podmínky budou aplikovány v bodech mimo síť rámu, je nutné tyto body propojit s vlastní sítí rámu. Toto zde bylo docíleno za pomoci prvků RBE2, tento prvek je aplikován tak, aby nahradil ramena zavěšení. Jelikož RBE2 element je definován jako dokonale tuhý, může vnést do výsledků mírné nepřesnosti (špičky napětí) v bodech spojení s prvky CBEAM. Je nutné na to brát při vyhodnocování ohled.

Parametry sítě:

- Velikost elementů: 5 mm
- Počet elementů: 6561
- Materiál: Ocel



Obrázek 31 Nasíťovaný výpočtový model aktuálního stavu

6.3.3. Definice okrajových podmínek

Pro výpočet byla využito typu řešiče NX Nastran SOL101, který se běžně využívá pro řešení případů lineární statiky.

Hotový výpočtový model bylo nutné umístit v prostoru – tedy odebrat 6 stupňů volnosti.

Okrajové podmínky pro řešení (A) – torzní tuhost

- Levé zadní kolo – odebrána možnost posuvu v ose Y a ose Z
- Pravé zadní kolo – odebrána možnost posuvu v ose Z
- Přední kola – odebrána možnost posuvu v ose X

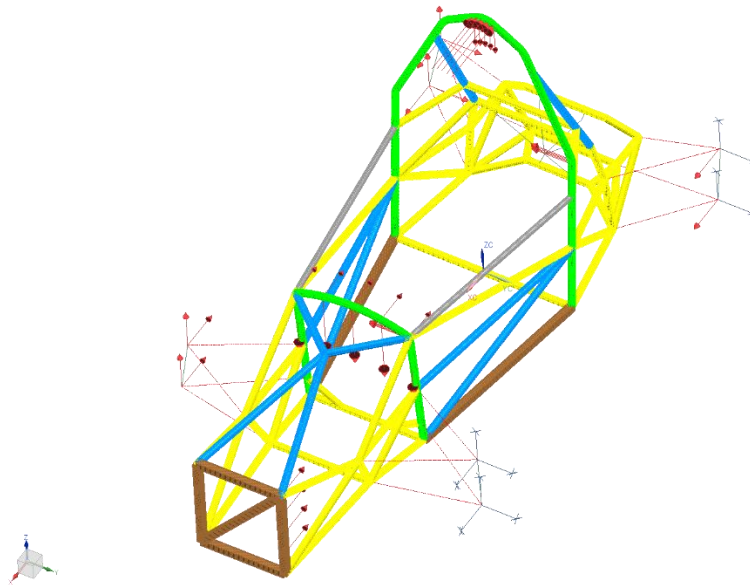
Aplikace sil pro řešení (A) – torzní tuhost

- Levé přední kolo – 500 N ve směru osy-Z
- Pravé přední kolo – 500 N v opačném směru osy-Z

Okrajové podmínky pro řešení (B) – jízda

Jelikož ve výsledném modelu chybí prvek pro uložení pérování, nebudou aplikovány okrajové podmínky v souladu s kapitolou 6.2.

Okrajové podmínky byly zvoleny tak, aby výsledek, který bude určen pouze pro porovnání stavů, ukázal rozdíl tuhosti rámu, a to i od sil působících na bezpečnostní prvky.



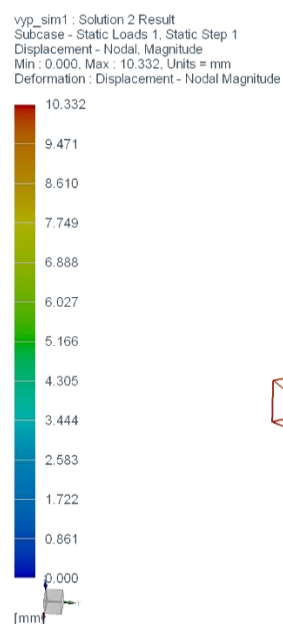
Obrázek 32 Okrajové podmínky pro výpočet A

6.3.4. Vyhodnocení výsledků (B)

- Počet řešených rovnic jedné iterace: 38 000
- Počet iterací: 1
- Doba výpočtu: 6.5 s

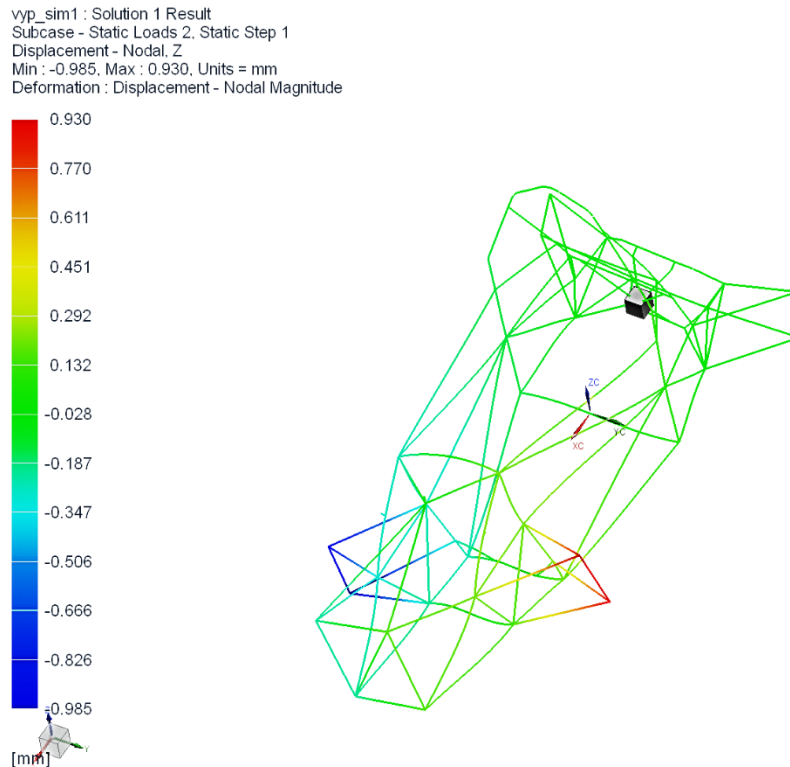
Výsledná posunutí:

- Max. celková deformace: 10.33 mm



Obrázek 33 Deformace při výpočtu A

6.3.5. Torzní tuhost (A)



Obrázek 34 Posunutí v ose-Z výpočet B

Výsledná posunutí:

- V ose-Z max: 0.930 mm U_{z1}
- V ose-Z min: 0.985 mm U_{z2}

Výsledná torzní tuhost:

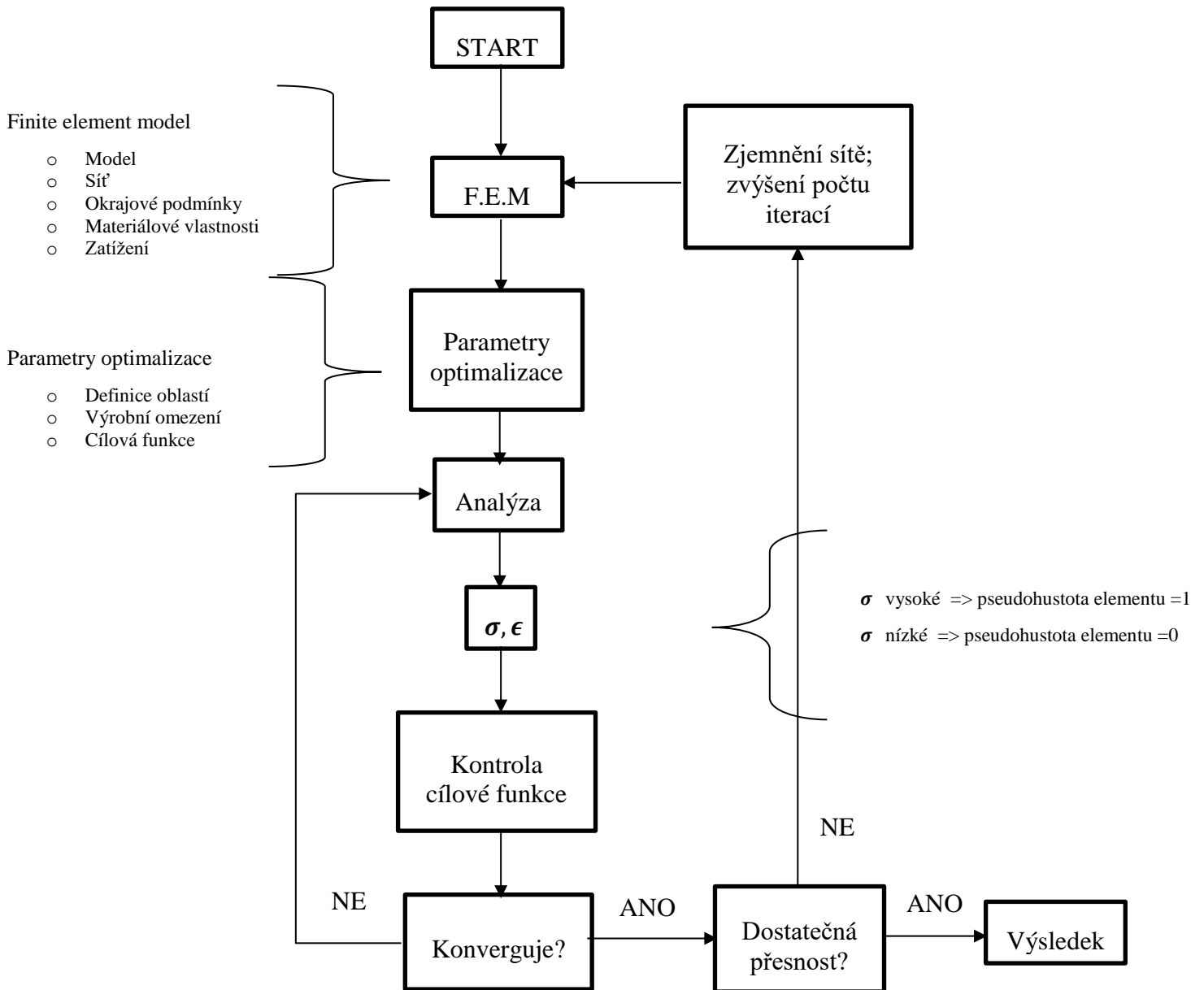
$$C = \frac{L \cdot F}{\sin^{-1}\left(\frac{U_{z1} + U_{z2}}{L}\right)}$$

$$C = \frac{0.560 \cdot (500 + 500)}{\sin^{-1}\left(\frac{0.930 + 0.985}{560}\right)}$$

$$C = 2886.1 \frac{Nm}{\circ}$$

6.4. Topologická optimalizace

Topologická optimalizace je proces využívající více kroků v pracovním postupu. Tento postup není jasně definován a v praxi bývá rozdílný. Kroky, které byly provedeny v navazujícím procesu popisuje následující obrázek č.35.



Obrázek 35 Proces topologické optimalizace

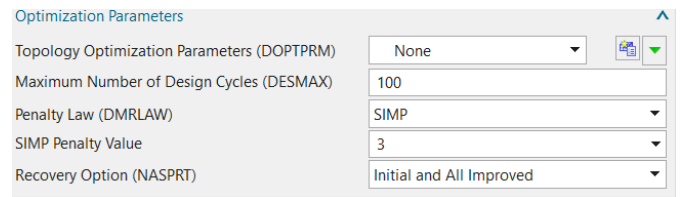
6.4.1. Parametry optimalizace

Pro účel optimalizace byl zvolen řešič NX Nastran, konkrétně typ analýzy SOL200, který je určen právě pro optimalizace návrhu.

SOL 200 nám nabízí stejné možnosti jako SOL 101, který byl využit pro výpočet posuvů a napětí, navíc disponuje funkcemi, které nám umožní nastavit vlastní topologickou optimalizaci.

Parametry kontrolující průběh optimalizace:

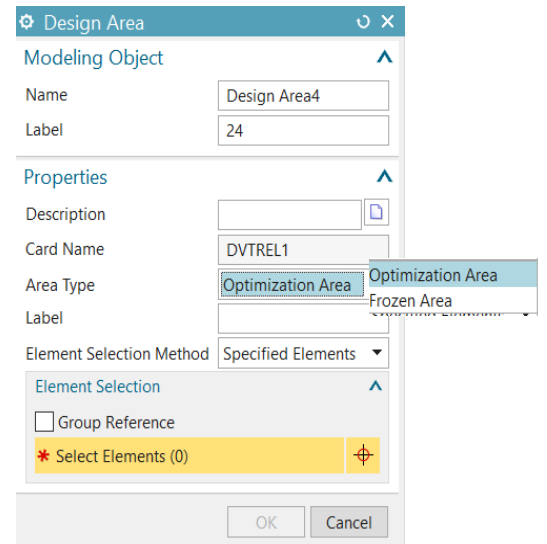
- Maximální počet cyklů výpočtu: = 100
- Metoda penalizace:
SIMP/RAMP/lattice
- Uložené výsledky iterací:
pouze vstupní a zdokonalené/
všechny/ pouze vstupní a nejlepší



Obrázek 36 Parametry optimalizace

Oblast návrhu:

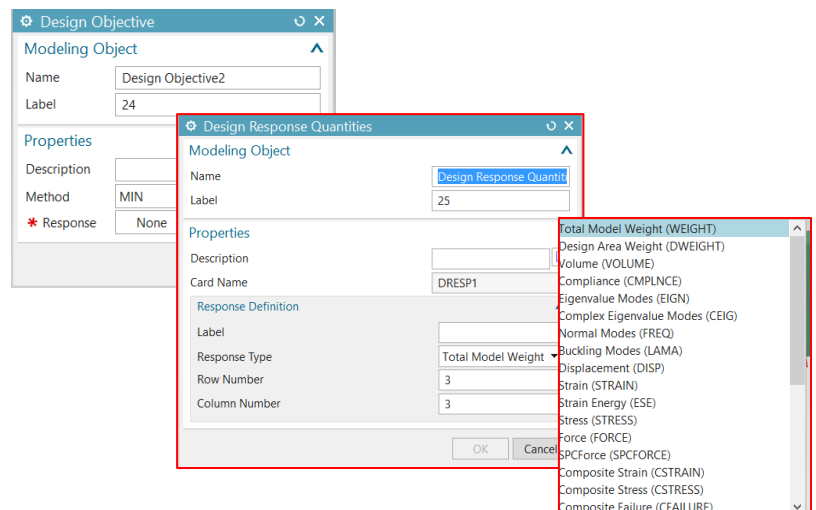
- Pomocí této funkce lze definovat oblasti, které jsou určené k optimalizaci nebo naopak oblasti, které je žádoucí zachovat.
- Je možné je definovat jako celé body, síť nebo jako jednotlivé elementy.
- Jako oblast návrhu lze nastavit pouze 2D, nebo 3D typy elementů.
- Nedefinované oblasti jsou implicitně určené k zachování.
- Pokud se oblasti protínají, pak jejich průnik je určen jako oblast k zachování.



Obrázek 37 Ukázka definice oblastí návrhu

Cíl optimalizace:

- Pouze jeden cíl může být definován pro každé řešení
- Nejběžnějším cílem bývá minimální deformační energie (compliance)



Obrázek 38 Ukázka definice cíle optimalizace

Compliance

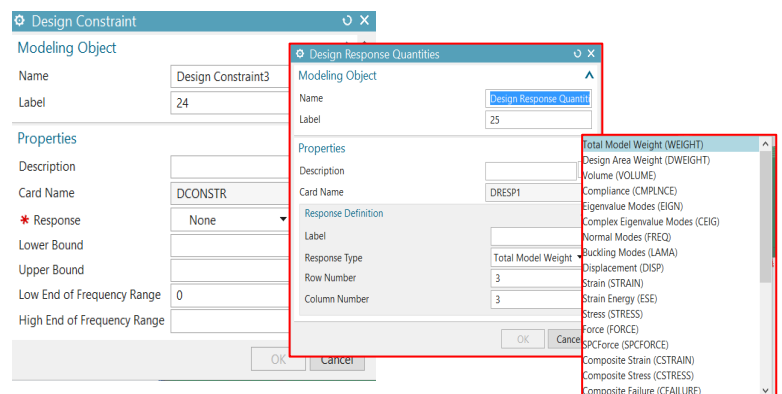
MSC Nastran Design Sensitivity and Optimization User's Guide popisuje compliance jako „Compliance is simply the product of the displacement times the applied load“. Dalo by se tedy říci, že jde o produkt/funkci deformace a působících sil. Přesněji $compliance = F \cdot \Delta L$ z toho vyplývá, že jednotka je $N \cdot m$ (J). Pokud se budeme pohybovat v mezích Hookova zákona, tedy v oblasti malých deformací, respektive do meze úměrnosti, můžeme říci, že compliance se rovná dvojnásobku deformační energie.

Compliance tedy představuje sumu obsažených deformačních energií v každém elementu. Z výše uvedeného vyplývá, že pokud nastavíme řešič, aby hledal minimální hodnotu compliance, výsledkem bude produkt, který bude obsahovat minimální množství deformační energie.

Je zřejmé, že odebráním elementů se bude rozložení sil přesouvat z odebraných elementů na ostatních, dojde zároveň k větším posuvům a tím i ke zvýšení deformační energie, potažmo hodnoty compliance. Snahou řešiče je tedy odebírat elementy tak, aby tento nárůst byl co nejmenší. Výjimku, kdy výsledná compliance může být nižší, umožňuje působící síla, která je závislá na počtu elementů, tedy v případech, kdy počítáme s vlastní hmotností optimalizovaného tělesa.

Hranice optimalizace

- Hranice optimalizace udávají omezení pro cílovou funkci. Např. hranice maximálního a minimálního posuvu, hranice maximálního a minimálního objemu, rozsah vlastní frekvence apod.

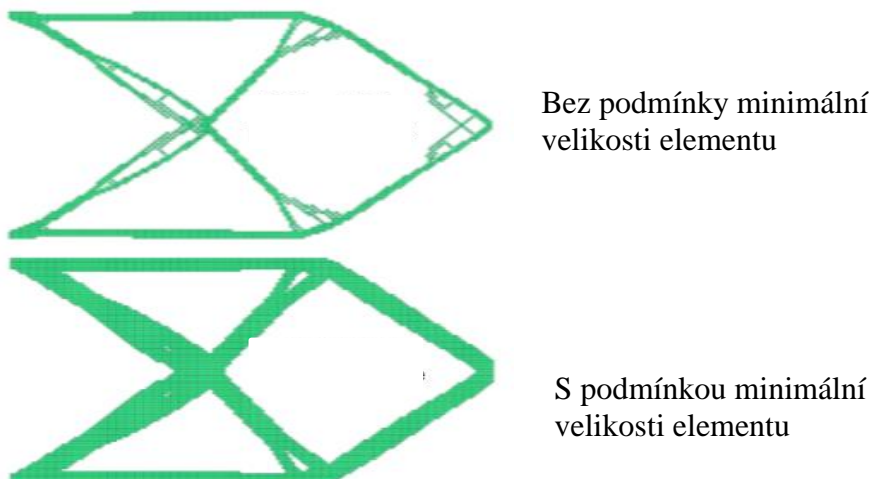


Obrázek 39 Ukázka definice hranic optimalizace

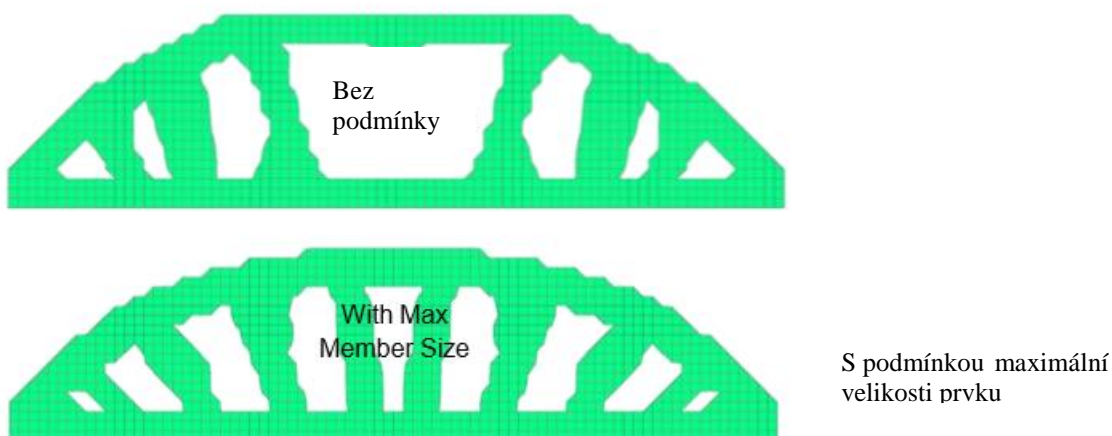
Definice výrobních omezení

Využívají se za účelem dosažení takového tvaru, který je možné vyrobit určitou technologií, případně pro zjednodušení výpočtu. Možné je definovat i více výrobních omezení pro jedno řešení.

- Rovinná symetrie
- Kruhová symetrie
- Maximální velikost prvku
- Minimální velikost prvku
- Formování
- Tažení
- Omezení pro aditivní technologie



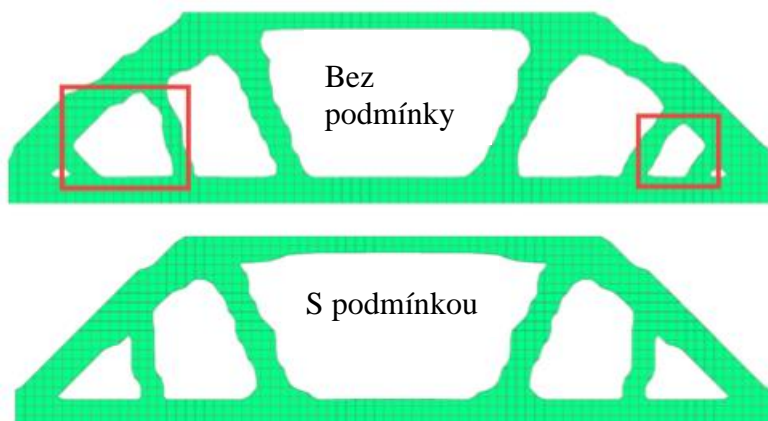
Obrázek 40 Ukázka rozdílu výsledků při použití podmínky pro minimální velikost elementu [13]



Obrázek 41 Ukázka rozdílu výsledku při použití podmínky pro maximální velikost elementu [13]

Rovinná symetrie

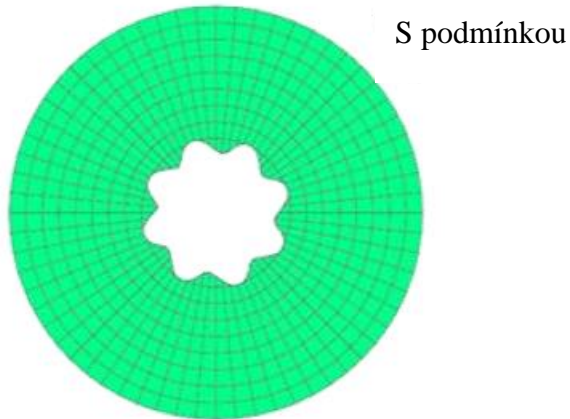
Tato podmínka vyžaduje pro plnou definici bod v rovině symetrie a vektor, který je kolmý na rovinu symetrie. Podmínka zajišťuje, aby výsledný produkt byl symetrický vůči definované rovině.



Obrázek 42 Ukázka podmínky - rovinná symetrie [13]

Kruhová symetrie

Tato podmínka vyžaduje pro plnou definici středový bod symetrie a vektor, který definuje směr rotace, zde je respektováno pravidlo pravé ruky. Podmínka je často využívána u rotačních těles, kvůli značnému zjednodušení výpočtu a zkrácení výpočtového času.

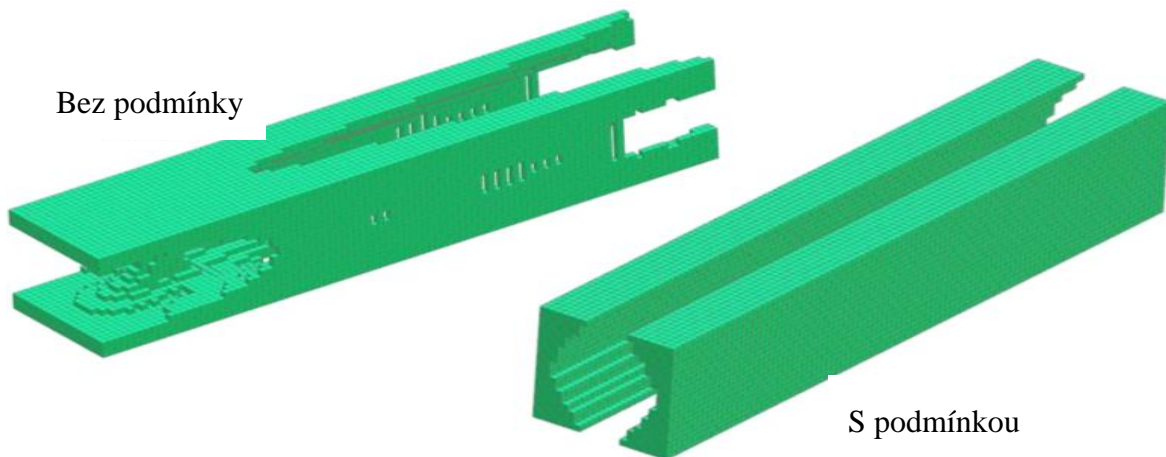


Obrázek 43 Ukázka podmínky - kruhová symetrie [13]

Podmínka formování

Tato podmínka vyžaduje pro plnou definici bod v dělicí rovině, normálový vektor dělicí roviny a vektor formování.

Podmínka tažení



Obrázek 44 Ukázka podmínky – tažení [13]

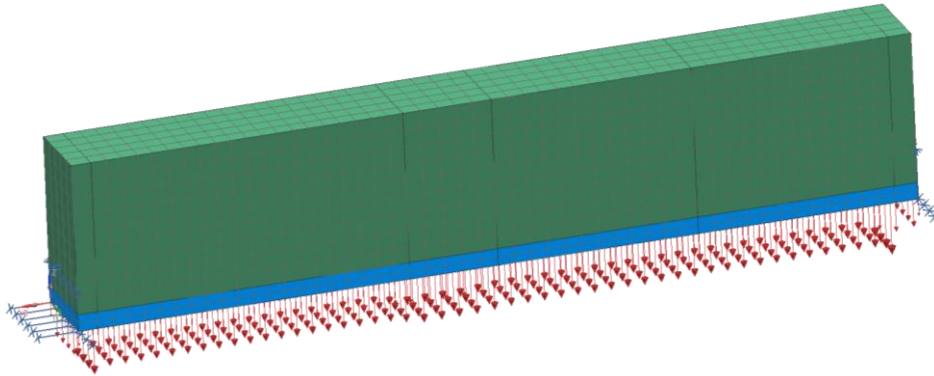
Tato podmínka vyžaduje pro plnou definici pouze vektor tažení.

Aditivní technologie

Tato podmínka vyžaduje pro plnou definici bod v základní rovině, normálový vektor základní roviny, maximální úhel přehřívání a minimální povolený rozměr.

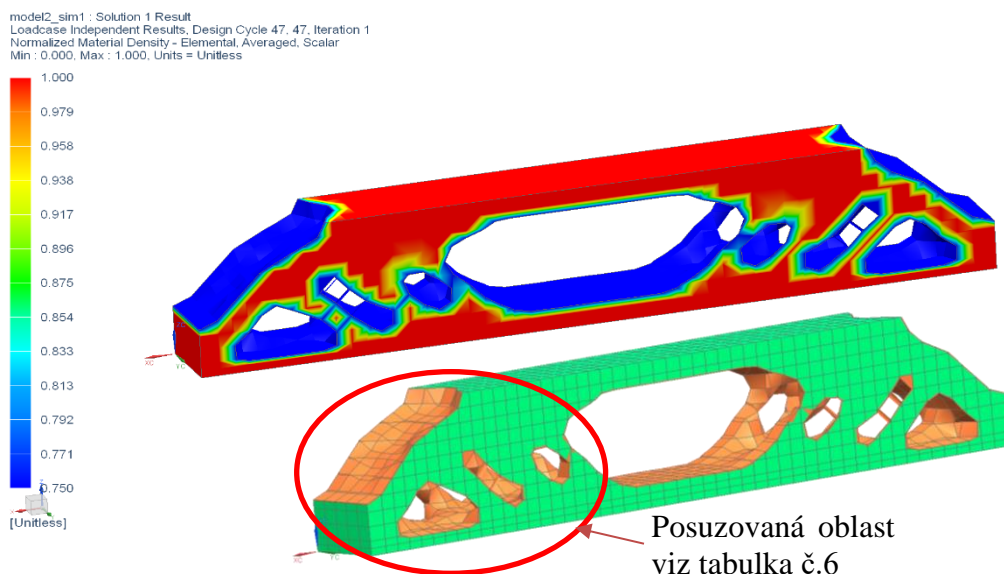
Ukázka topologické optimalizace:

Parametry řešiče: Maximální počet iterací: 50
Metoda penalizace: SIMP

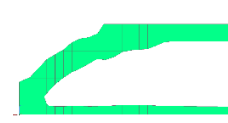
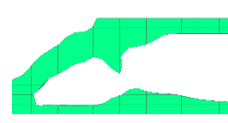
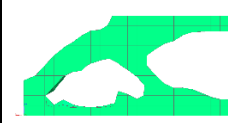
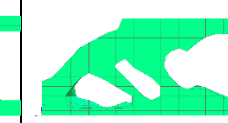
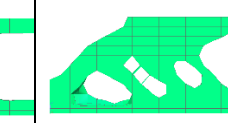


Obrázek 45 Výpočtový síťovaný model pro ukázkou topologické optimalizace

- Model: 2 kvádry (modrý a zelený) viz obrázek č.45
- Okrajové podmínky: Spodní levá hrana – omezení všech posuvů; natočení neomezené.
Spodní pravá hrana – omezení posuvů v ose-Z a ose-Y.
Síla – spodní plocha $F=1$ N v opačném směru osy-Z.
- Oblast návrhu: Zelený kvádr – určen k optimalizaci.
Modrý kvádr – určen k zachování.
- Cíl optimalizace: minimální compliance.
- Hranice optimalizace: hmotnost 6-11 Kg (původní hmotnost 25Kg).
- Výrobní omezení: 2x rovinná symetrie; maximální velikost prvků – 30 mm (velikost elementu sítě 10 mm).
- Výsledek:

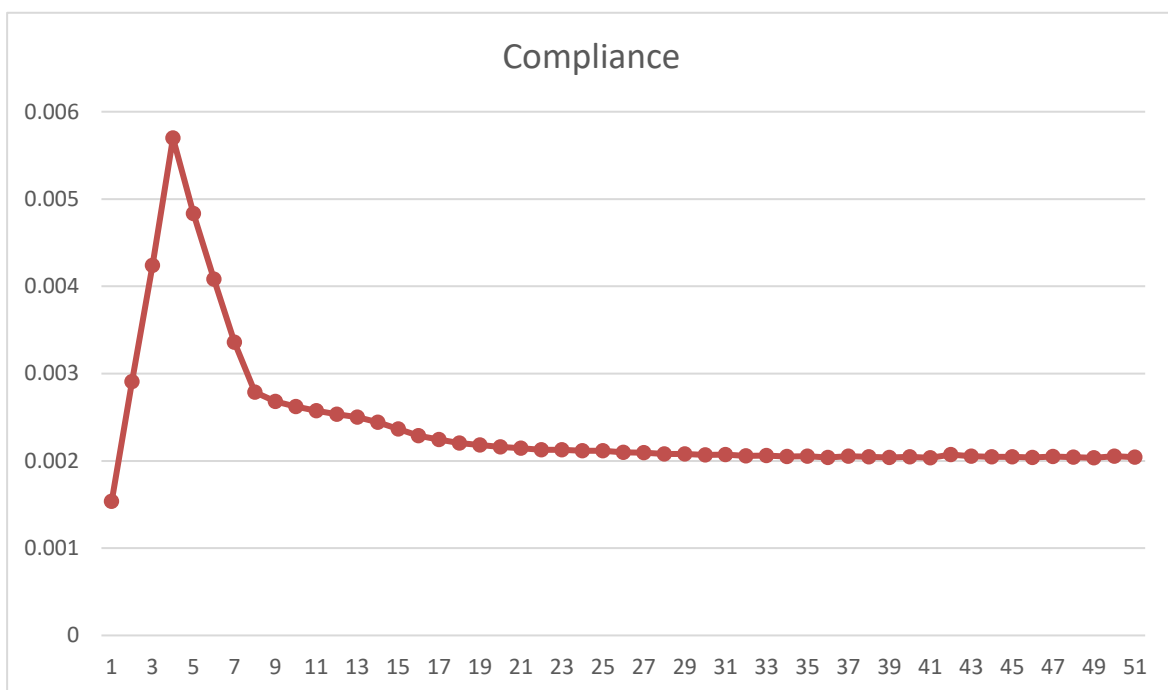


Obrázek 46 Výsledky ukázky optimalizace

				
a) Iterace č.10 Compliance = 2.622E-3	b) Iterace č.14 Compliance = 2.442E-3	c) Iterace č.18 Compliance = 2.203E-3	d) Iterace č.24 Compliance = 2.116E-3	e) Iterace č.47 Compliance = 2.2049E-3

Tabulka 6 Rozdíly různých iterací a jejich hodnoty compliance

Z tabulky vyplývá, že program, v tomto případě v první iteraci, zachoval hlavní nosný oblouk, a poté „přesouval hmotu“ z něj do podpěr.



Graf 1 Hodnota compliance při různých iteracích

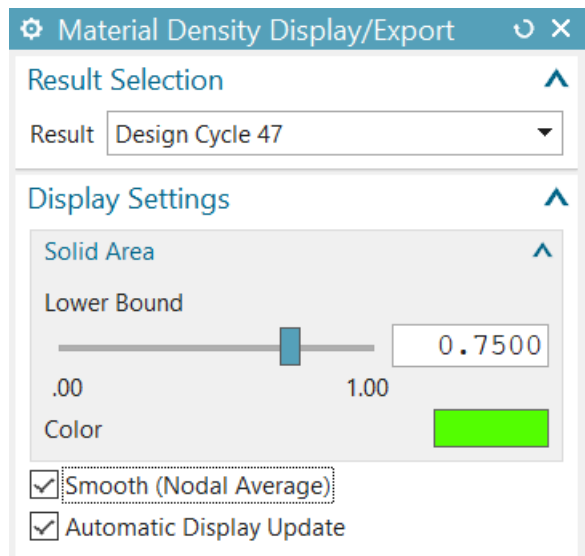
Z grafu je patrné, že řešení stále konverguje a bylo by tedy možné dosáhnout i přesnějších výsledků, ale pro ukázkou bylo shledáno 50 iterací jako dostatečné.

Během optimalizačního procesu, NX Nastran redukuje Youngův modul a hustotu každého elementu v optimalizované oblasti. Následně každému elementu přiřadí tzv. normalizovanou materiálovou hustotu (pseudohustotu), která je v rozsahu od 0.0 do 1.0.

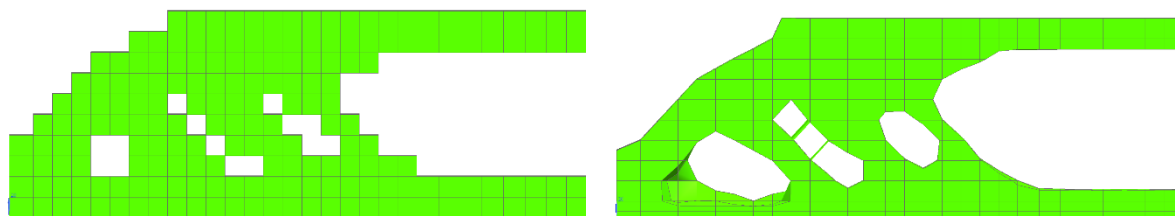
Každý výsledek iterací má tyto hodnoty v sobě uchované a v post-procesu je možné, na základě této hodnoty, zobrazovat soubory elementů.

K tomu slouží „Material Density Display“.

- Umožňuje vybrat konkrétní iteraci.
- Lze zadat spodní hranici hustoty pro zobrazení a export.
- Je možné nastavit vyhlazení elementu na základě blízkých elementů

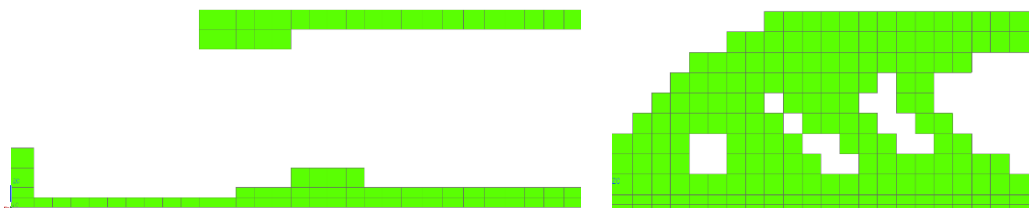


Obrázek 47 Nastavení vykreslování/exportu hranic materiálové hustoty výsledku



Obrázek 48 Rozdíl vykreslování při/bez funkce vyhlazení

V některých případech může při použití funkce vyhlazení dojít k přílišnému zkruslení výsledků viz následující obrázek č.49.



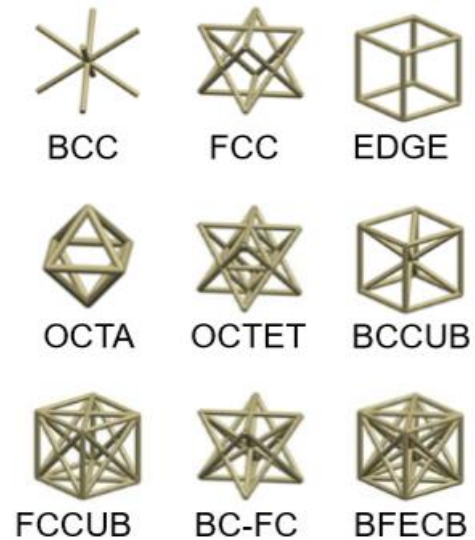
Obrázek 49 Hustota 1.0-1.0; Zkruslení výsledků funkcí vyhlazení – vlevo, bez vyhlazení – vpravo

Hustota: 0.0-1.0	Hustota: 0.01-1.0	Hustota: 0.25-1.0	Hustota: 0.50-1.0	Hustota: 0.75-1.0	Hustota: 1.0-1.0

Tabulka 7 Ukázka rozdílů vykreslování při různých hranicích materiálové hustoty

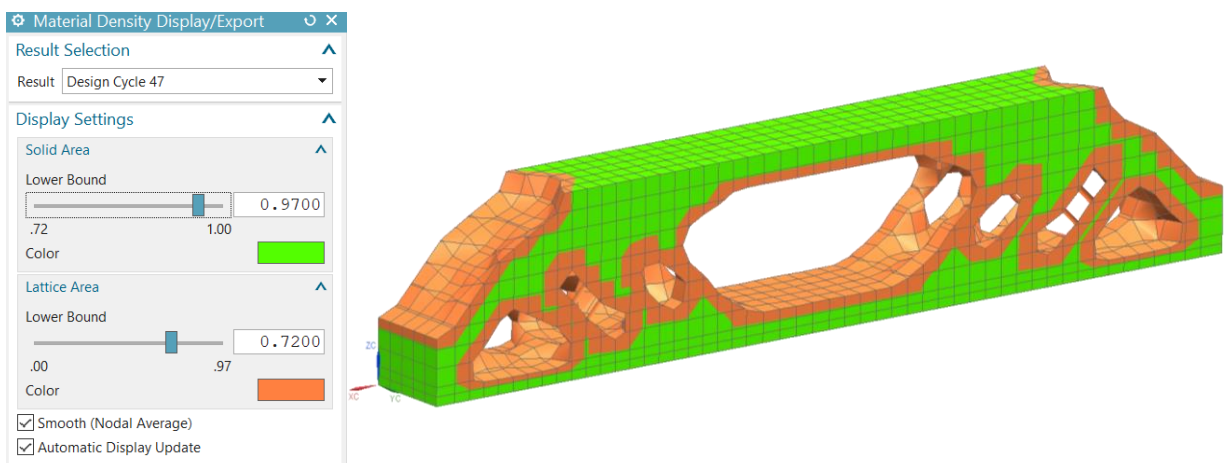
NX Nastran také umožňuje nahradit určité elementy, selektované dle výše zmíněné hustoty, určitými prvky (mříží). Tyto prvky mají optimální poměr tuhost/hmotnost pro daný směr zátěže a používají se pro výplň určitých oblastí. Pro svou složitost jsou využívány především u produktů, které jsou vyráběny za pomoci aditivních technologií. [14]

- Body Centered Cubic (BCC)
- Face Centered Cubic (FCC)
- Edge of Face Centered Cubic (EDGE)
- Octahedral (OCTA)
- Kombinace
 - FCC+OCTA (OCTET)
 - BCC+EDGE (BCCUB)
 - FCC+EDGE (FCCUB)
 - BCC+FCC (BC-FC)
 - BCC+FCC+EDGE (BFECB)



Obrázek 50 Druhy výplňových mříží [14]

Na následující ukázce byly ponechány klasické elementy pro hustotu 0.97-1.0 a prvky o hustotě 0.72-0.97 byly nahrazeny výplňovou mřížkou, zbylé elementy byly zcela potlačeny.



Obrázek 51 Ukázka vykreslení při použití výplňové mřížky

Nakonec je uvedena ukázka již hotových výrobků, při jejichž návrhu byla využita zmíněná mřížka.

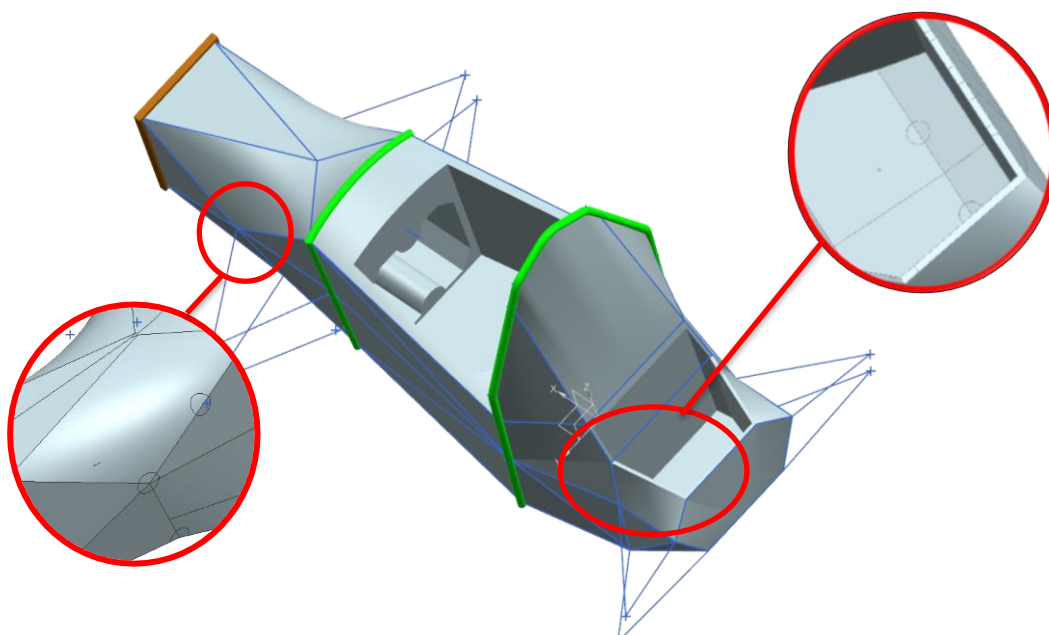


Obrázek 52 Hotové výrobky s využitím výplňové mřížky [14]

6.4.1. Výpočtový model

Během procesu topologické optimalizace je materiál „odebírán“ z míst, kde není potřeba. Za tohoto předpokladu lze říci, že samotný výpočtový model tvoří okrajové podmínky pro výpočet. Proto je vhodné ponechat model v co nejobjemnějším stavu a využít tak každý dostupný prostor.

Model pro výpočet byl vytvořen jako obálka aktuálního rámu, od které byla následně odečtena těla reprezentující prostory nutné k zachování – prostor pro řidiče a prostor pro motor.



Obrázek 53 Výpočtový model pro topologickou optimalizaci

Jak je patrné z obrázku č.53, byly zde ponechány modely oblouků a přední nárazové oblasti, které předepisují pravidla. Tyto modely budou sloužit jako nutné výztuže při výpočtu a bude u nich potlačena možnost optimalizace.

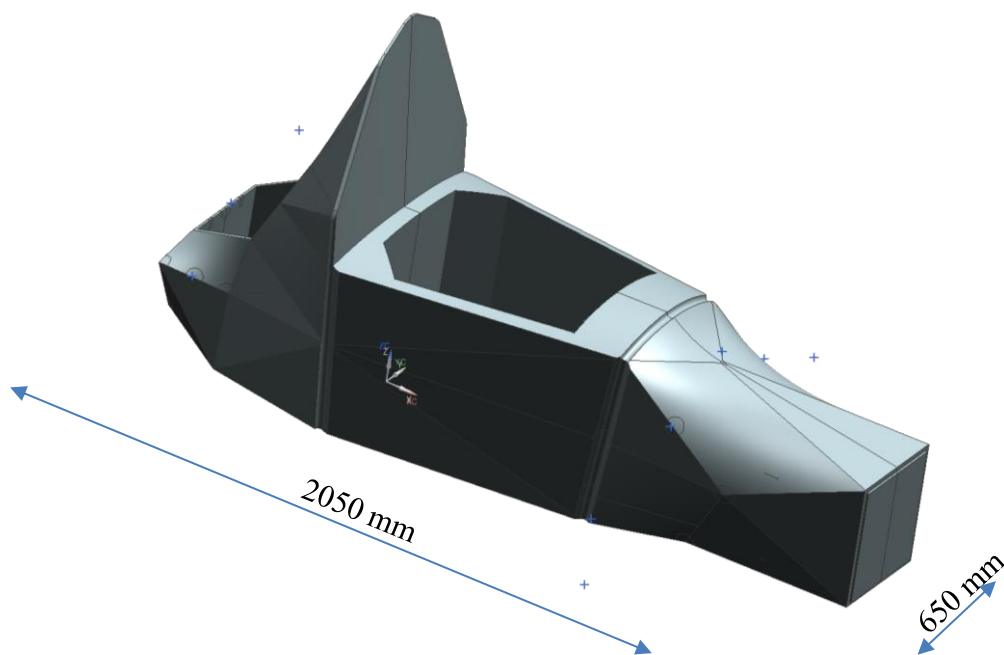
Dalším důležitým krokem při přípravě modelu je příprava ploch pro budoucí aplikování okrajových podmínek, případně ploch pro propojení modelu s jinými prvky.

6.4.2. Vytvoření výpočtové sítě

Jelikož NX Nastran „odebírá“ pouze celé elementy, je topologická optimalizace velice náročná na jejich velikost. Pokud bychom použili příliš velké elementy, bude kritický element zachován celý, i když by stačila jeho malá část. Výsledky by byly tedy značně nepřesné. Na druhou stranu přílišné zjemňování sítě vede k velice dlouhým, výpočtovým časům. Proto je vždy nutné si ujasnit požadovanou přesnost.

Při volbě velikosti sítě se vycházelo z aktuální velikosti použitých trubek (průměr = 25 mm; tloušťka stěny = 3 mm) a velikosti výpočtového modelu (hlavní rozměry: délka x šířka x výška 2050 x 650 x 480 mm). Literatura doporučuje třetinovou velikost elementu požadované maximální velikosti prvků. V tomto případě by se jednalo o velikost $\frac{1}{3} \cdot 3 \text{ mm} = 1 \text{ mm}$. Jedna iterace s takto jemnou sítí by na daném PC trvala desítky hodin (pro přesné výsledky je potřeba desítky iterací). Proto byla zvolena 3D síť s mezi-uzlem CTETRA(10) o velikosti elementu 12 mm, což odpovídá maximální velikosti prvku - 36 mm (výpočtová doba jedné iterace nepřevyšuje 10 minut).

Kvůli chybovým elementům, případně kvůli předpokládaným špičkám koncentrace deformační energie (například v místech spojení s RBE2/3 sítí), byla v některých místech síť zjemněna pomocí funkce „mesh control“.

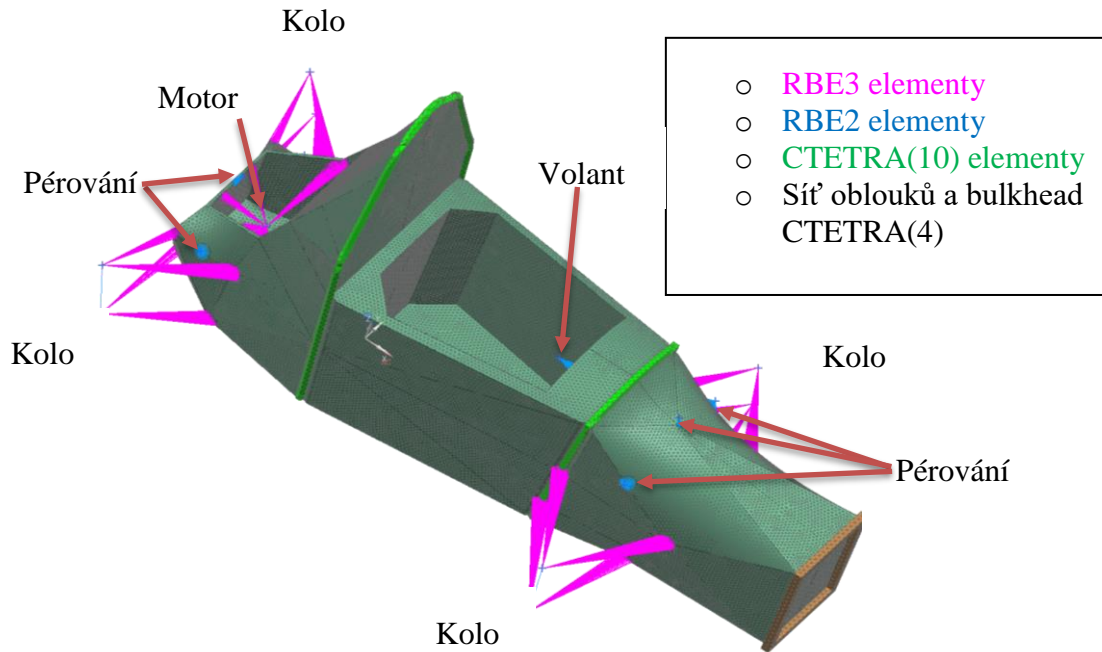


Obrázek 54 Základní rozměry výpočtového modelu (výška 480 mm)

Pro zkrácení výpočtových časů byly prvky, které nejsou pro optimalizaci stěžejní (oblouky a nárazová část), zasítovány hrubší 3D sítí bez mezi-uzlu - CTETRA(4) o velikosti elementu 24 mm.

Dále zde byla použita 0D síť CONM2, která reprezentuje hmotnost motoru (45Kg).

Jednotlivé sítě, stejně jako body definice okrajových podmínek, byly připojeny k hlavní síti pomocí elementů typu RBE2 a RBE3.

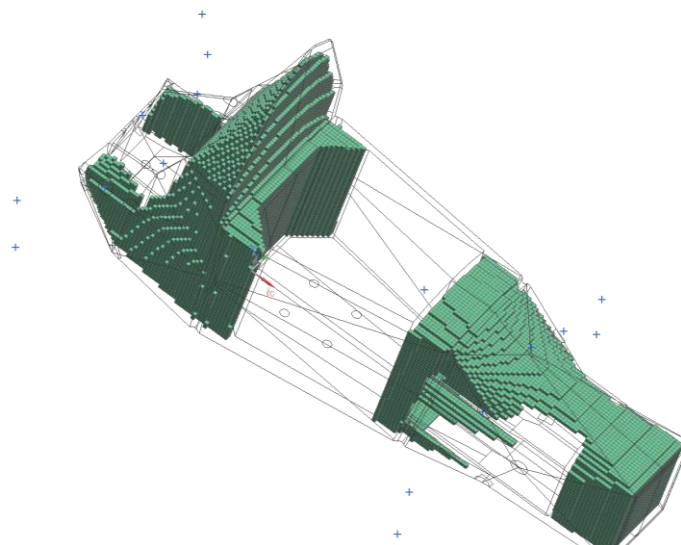


Obrázek 55 Nasít'ovaný výpočtový model

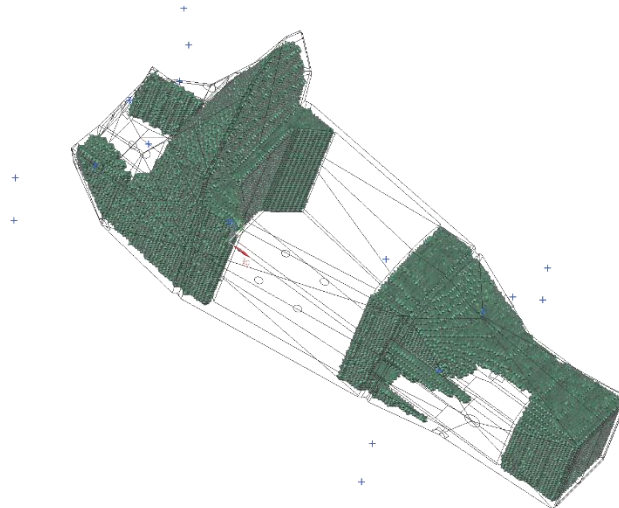
Pro tvorbu hlavní sítě byla použita funkce „hybridní sít“, která má defaultně nastavené 0% automatický růst elementů v blízkosti hran, což je pro topologickou optimalizaci žádoucí. Zároveň tato funkce rozdělí sít' na více oblastí a využije více druhů elementů.

Hybridní sít'

- | | |
|--------------------------|---|
| ○ Vnější sít' CTETRA | sít' na povrchu modelu (výška min. 2 elementy) |
| ○ Vnitřní sít' CHEXA | sít' uvnitř modelu s kvádrovitým tvarem elementu |
| ○ Přejížděcí sít' CPYRAM | sít', která kompenzuje rozdíly mezi výše uvedenými sítěmi a spojuje je. |



Obrázek 56 Vnitřní sít' CHEXA



Obrázek 57 Přejíhová síť CPYRAM

Počer elementů síť:

Typ elementu	CHEXA	CTETRA	CPYRAM	RBE2	RBE3
Počer elementů	82586	511775	27688	39	8

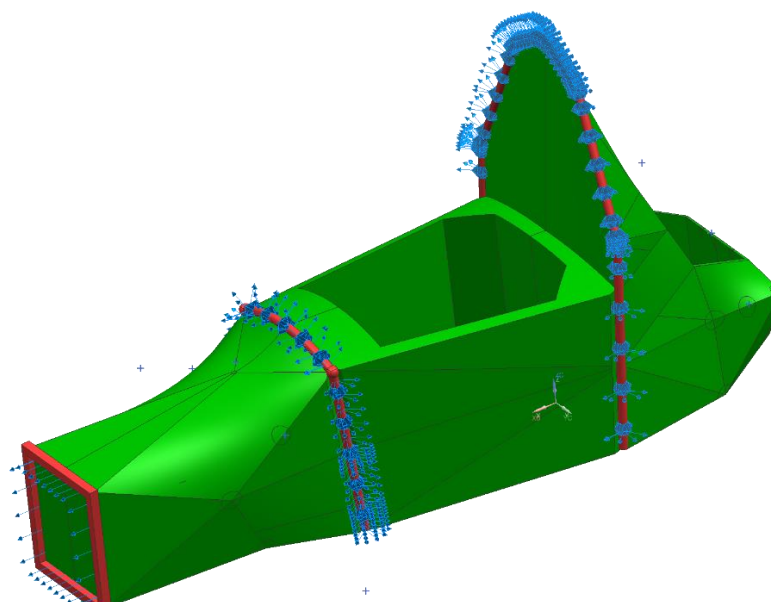
Tabulka 8 Počer jednotlivých druhů elementů

6.4.3. Parametry vlastní optimalizace rámu

Změněné parametry řešiče:

- Systém cell – PARALLEL (107) 0 => 11
Počer jader CPU, který bude řešič využívat při řešení.
- Solution parameter – AUTOMPC NO => YES
tento parametr řeší problém, kdy více elementů RBE2/3 sdílí nějaký závislý uzel.

Prvně bylo zapotřebí spojení 3D výpočtových sítí. Toho bylo docíleno za pomoci funkce „Gluing-surface to surface“



Obrázek 58 Aplikace funkce Gluing

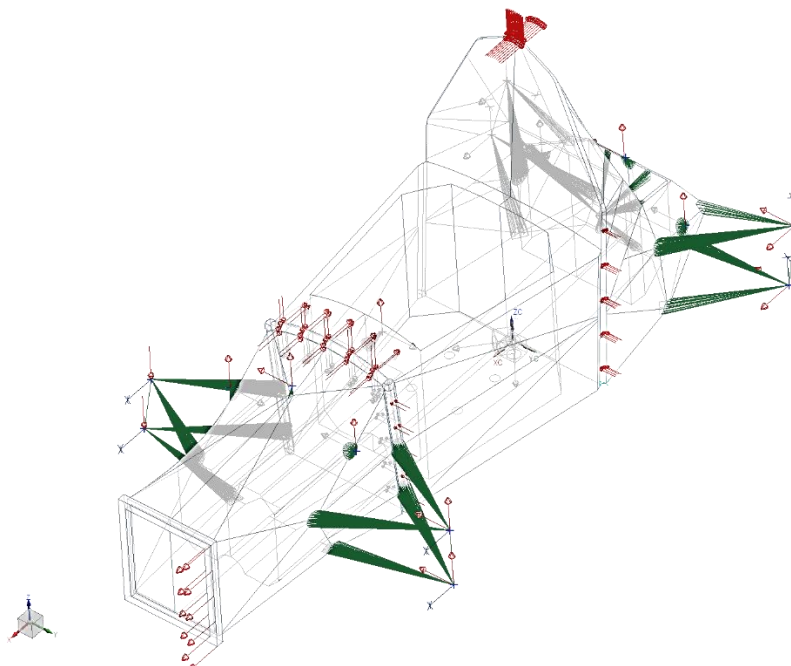
Definice okrajových podmínek:

Cílem bylo simulovat takový stav, kde by byl rám zatížen tak, jak je testován na torzní tuhost, ale zároveň, aby na něj působily síly, které na rám působí během jízdy. Dále byly aplikovány síly na bezpečnostní prvky – přední/hlavní oblouk a bulkhead a také síla od volantu vyvolaná řidičem.

Jelikož je rám symetrický, nabízelo se využít okrajových podmínek pro symetrii /antisymetrii a tím tak dosáhnout kratších výpočtových časů. Síly a okrajové podmínky však nesplňovaly kritéria pro symetrii/antisymetrii, proto nebylo možné využít těchto podmínek.

Vektor sil byl volen tak, aby jejich směr a poměr jejich vzájemných velikostí odpovídal skutečnosti.

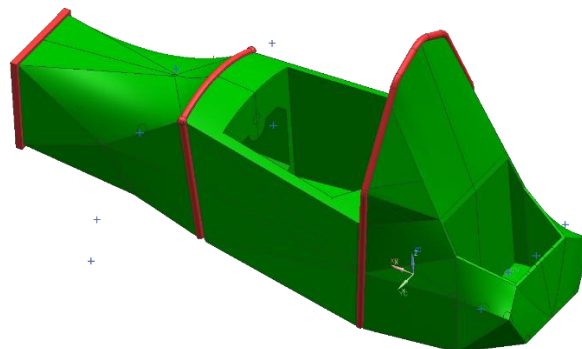
Dále byla aplikována setrvačná síla o velikost 1G ve směru jízdy a gravitační síla v opačném směru osy-Z.



Obrázek 59 Okrajové podmínky pro topologickou optimalizaci

Oblast optimalizace:

Jako oblast optimalizace byla definována síť modelu rámu a oblasti pro zachování byly zvoleny síť oblouků a bulkhead.



Obrázek 60 Oblast zachování – červená; oblast optimalizace – zelená

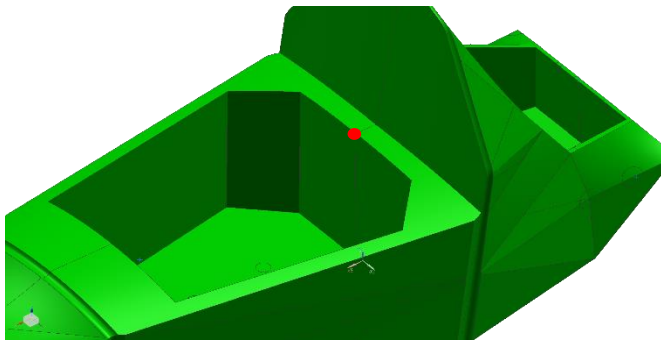
Cíl optimalizace – minimální compliance

Hranice optimalizace:

Jako hranice optimalizace byla zvolena hmotnost optimalizované oblasti. Minimální hmotnost byla definována s ohledem na aktuální hmotnost (34 kg) – 30 kg a hranice maximální hmotnosti s ohledem na velikost elementu sítě (není možné, aby při této velikosti elementu řešič navrhl duté profily) byla zvolena 100 kg.

Definice výrobních omezení:

- Byla definována rovinná symetrie pro zajištění symetrie rámu
 - Bod ve středové rovině
 - Normálový vektor totožný s osou-Y



Obrázek 61 Definice bodu symetrie

- Maximální velikost prvku: = 36 mm
- Minimální velikost prvku: = 10 mm

Parametry řešení:

- Maximální počet iterací: = 200
- Metoda penalizace: = SIMP

6.4.4. Vyhodnocení výsledků

Díky nedostatečnému prostoru pro data (397 GB), byl výpočet přerušen na 196/200 iteraci. Jak ale vyplývá z následujících dat, nedošlo by v následujících 4 iteracích k výrazným změnám, proto můžeme tento výpočet považovat za dokončený. Přesto je z výsledků patrné, že při takto jemné síti by pro tuto úlohu bylo potřeba více iterací, tedy i mnohem větší kapacita disku.

```
INDEX LOGNAME          STREAM_ID  NAME
  2 OBJSCR              00000002  c:/users/petr/appdata/local/temp/novy_sim3-solution_2.T49472_0.OBJSCR
  3 SCR1               00000003  f:/nx_scratch/scratch
  4 SCR2               00000004  f:/nx_scratch/scr300
  5 MASTER             00000005  c:/users/petr/appdata/local/temp/novy_sim3-solution_2.T49472_0.MASTER
  6 DBALL              00000006  c:/users/petr/appdata/local/temp/novy_sim3-solution_2.T49472_0.DBALL
  7 MASTERA            FFFFFFF9  c:/program files/siemens/nx 12.0/nxnastran/nxn12p01/em64tntl/SSS.MASTERA
  8 MSCOBJ             FFFFFFF8  c:/program files/siemens/nx 12.0/nxnastran/nxn12p01/em64tntl/SSS.MSCOBJ
*** SYSTEM FATAL MESSAGE 4276 (IONAST)
ERROR CODE          923 PID=      0
USER INFORMATION: THIS ERROR MAY BE CAUSED BY EXCEEDING THE CAPACITY OF A SYSTEM RESOURCE.
(E.G., ALLOCATED DISK IS FULL, OR MAXIMUM FILE SIZE HAS BEEN REACHED)
*** USER INFORMATION MESSAGE 4276 (IONAST)
TO OBTAIN A NASTRAN DUMP RESUBMIT JOB WITH DIAG 44 INSERTED IN THE EXECUTIVE CONTROL SECTION.
1 * * * * * END OF JOB * * * * *
```

Obrázek 62 Chyba výpočtu

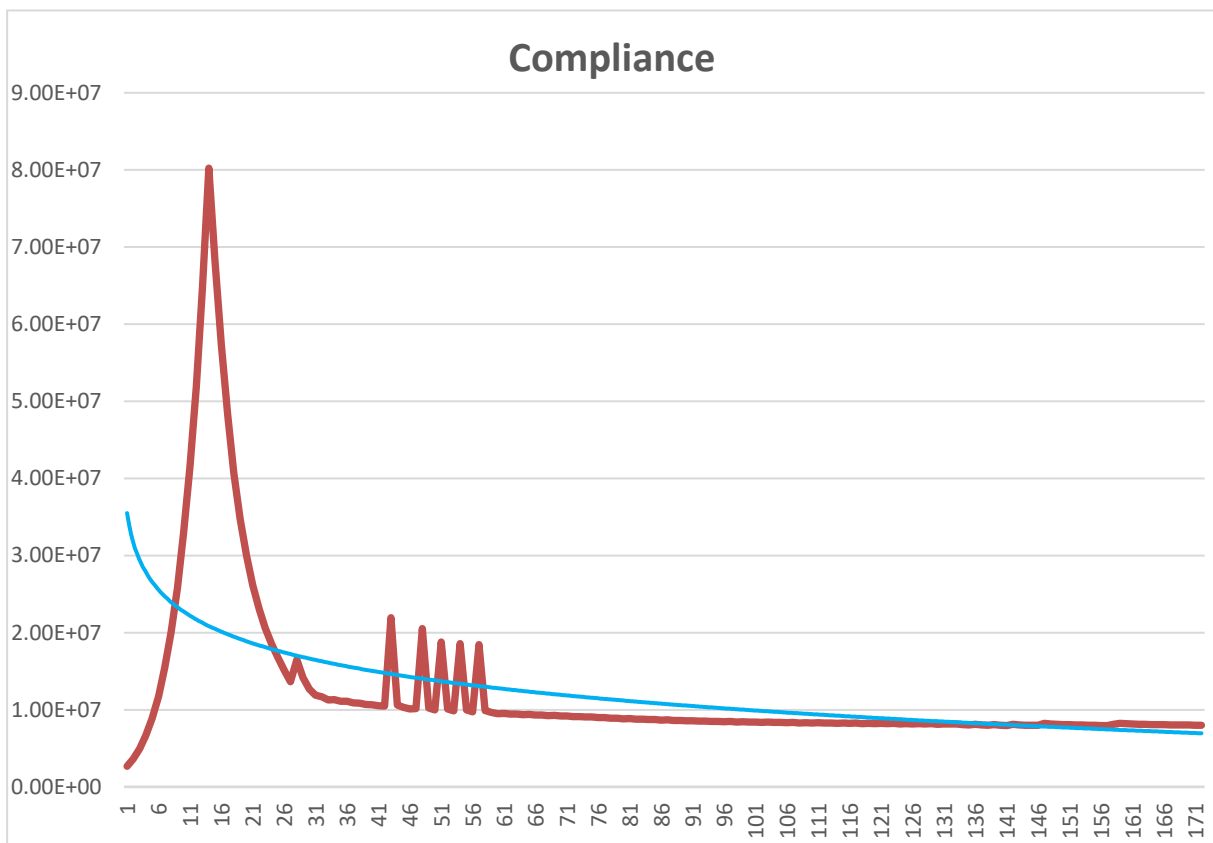
Z důvodu omezeného datového prostoru byl proveden ještě jeden výpočet, a to s hrubou sítí o velikosti elementu 50 mm. Tentokrát byl maximální počet iterací nastaven na hodnotu 500.

Výsledky modelu se sítí o velikosti elementu 12 mm. (výpočet č.1)

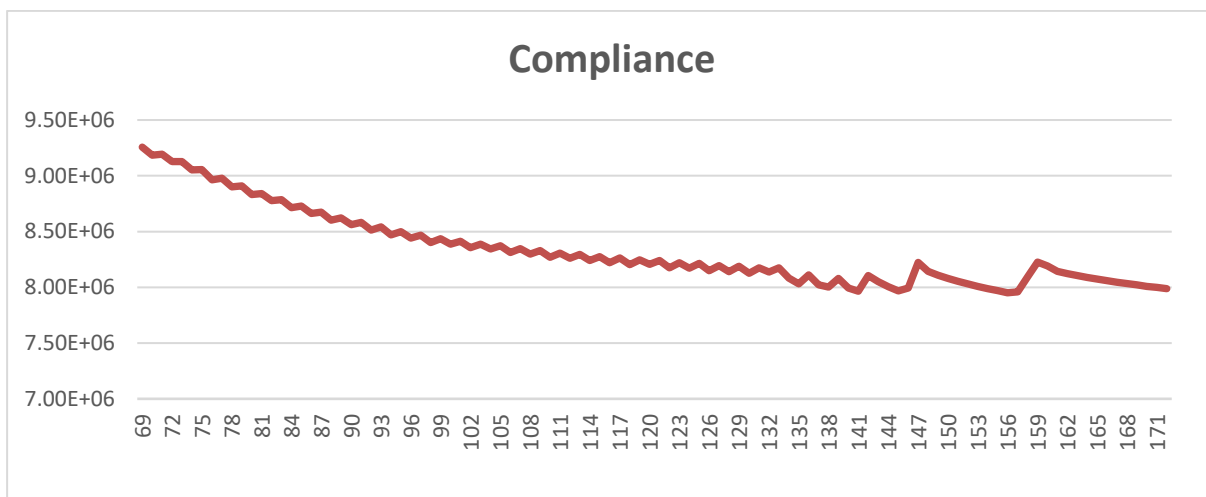
- Počet řešených rovnic jedné iterace: 2 790 000
- Počet iterací: 196
- Doba výpočtu: 34 hod.
- Nejlepší iterace: č.175

Konvergence výpočtu:

Bohužel nebyla uložena data z konce výpočtu, tedy pro iteraci 171 a vyšší, ale trend následujícího grafu se nezměnil. Proto následující grafy mají vypovídající hodnotu a můžeme říci, že výpočet úspěšně konvergoval ke konečnému výsledku.

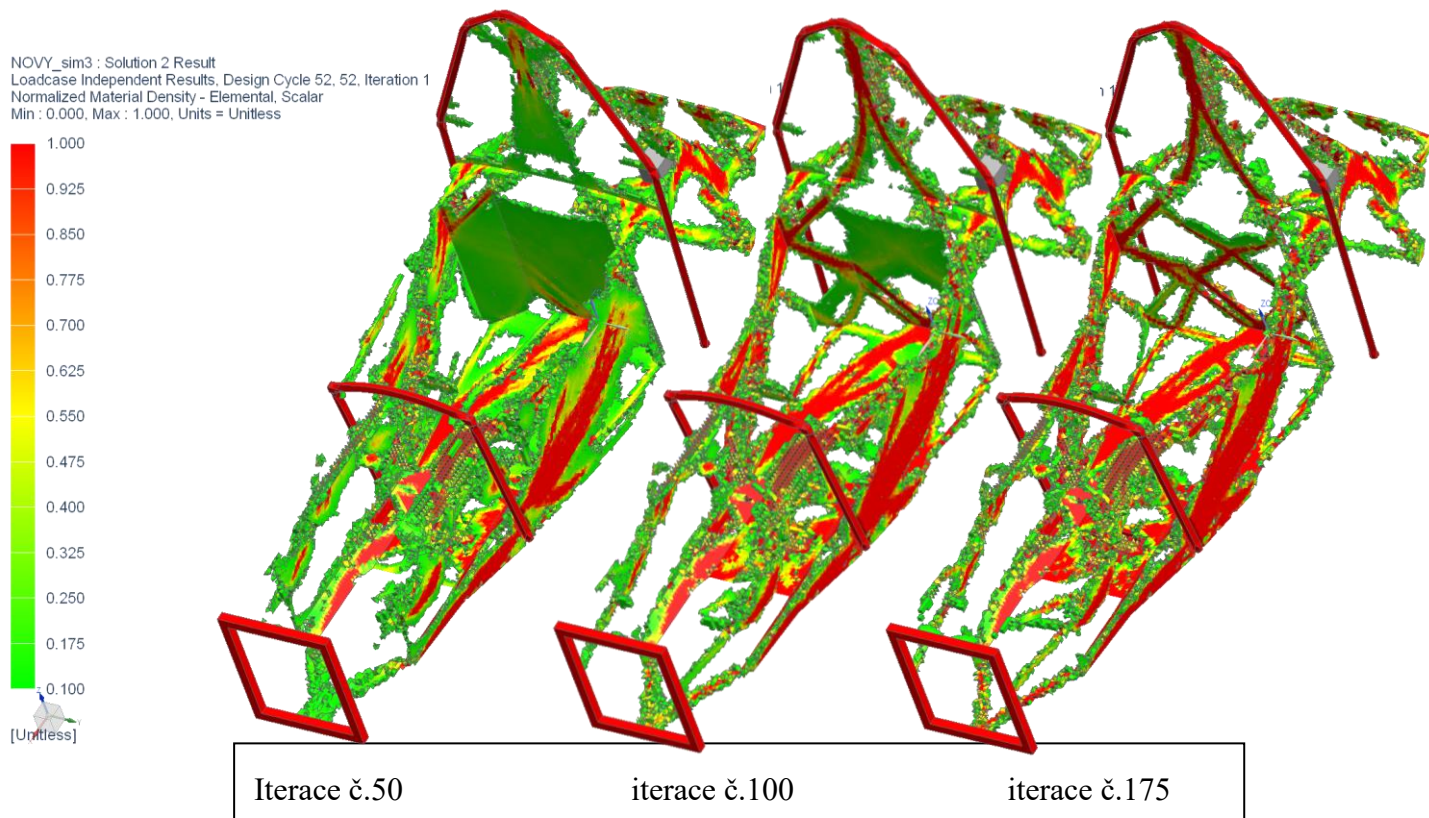


Graf 2 Změna compliance podle iterací výpočtu 1



Graf 3 Detail grafu změny compliance dle iterací výpočtu 1

Výsledky: Pseudohustota elementů



Obrázek 63 Výsledná pseudohustota elementů - výpočet č.1

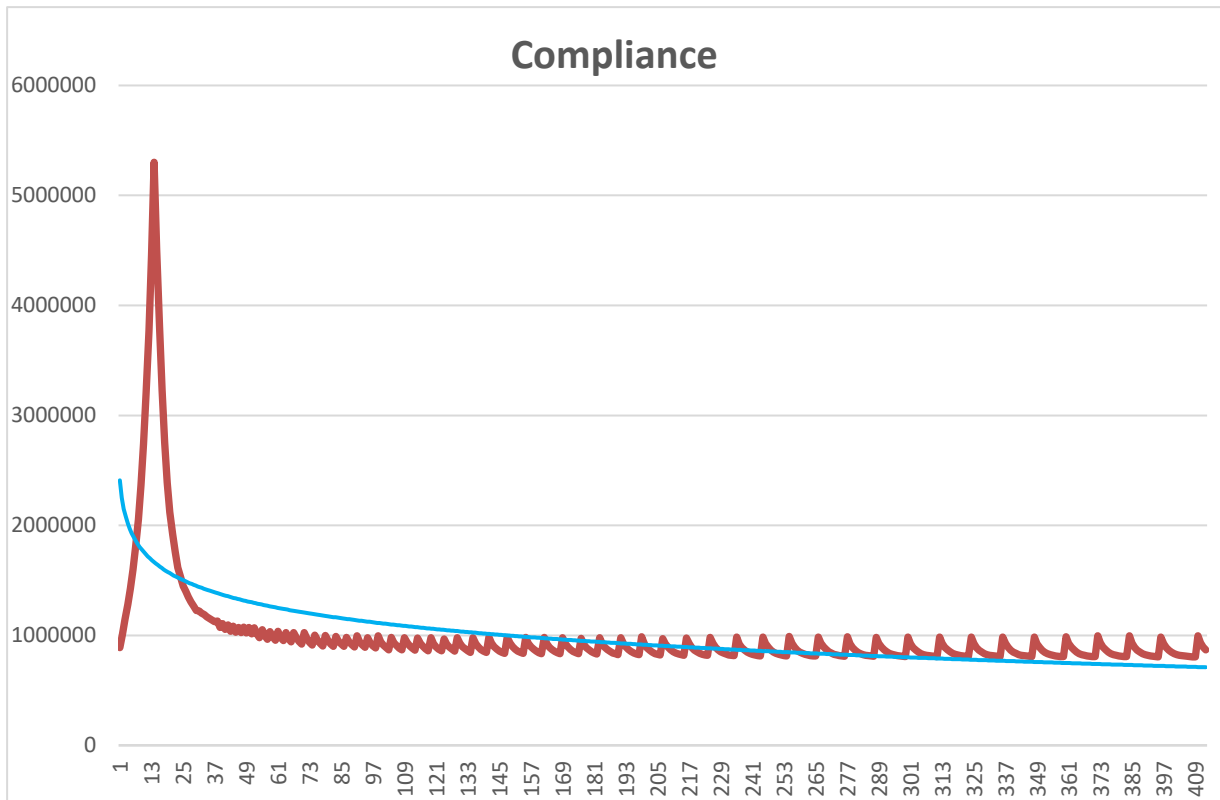
Z uvedených výsledků pseudohustoty elementů je patrné, že stále dochází k výrazným změnám a nelze tedy výpočet považovat z hlediska počtu iterací za dostatečný. Z hlediska jemnosti sítě dochází k poměrně dobré konvergenci, a tedy ke kvalitním výsledkům.

Výsledky modelu se sítí o velikosti elementu 50 mm. (výpočet č. 2)

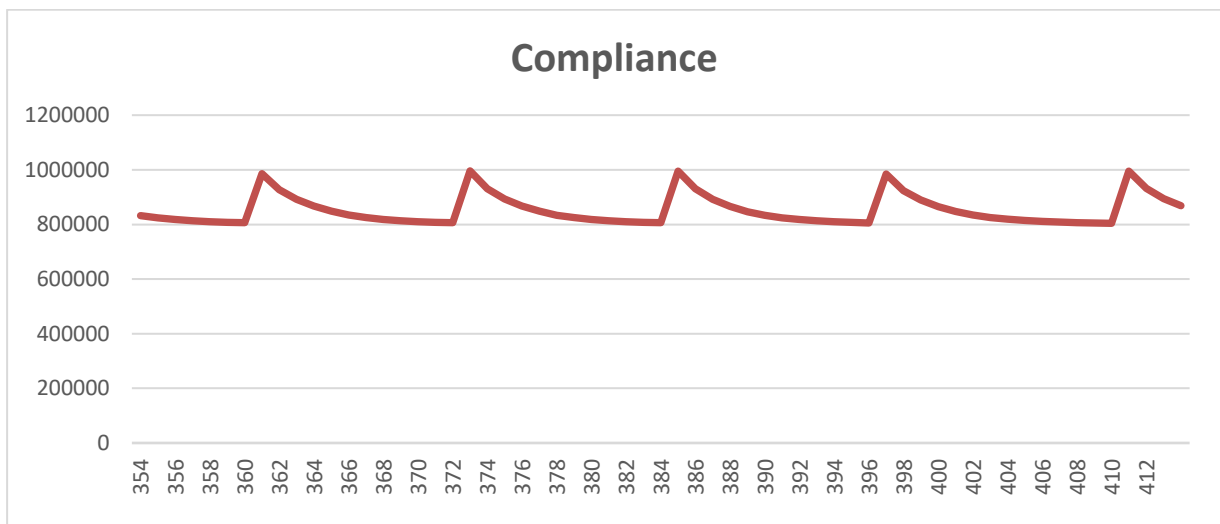
- Počet řešených rovnic jedné iterace: 144 000
- Počet iterací: 500
- Doba výpočtu: 2 hod.
- Nejlepší iterace: č.493

Konvergence výpočtu:

Bohužel nebyla uložena data z konce výpočtu, tedy pro iteraci 412 a vyšší, ale trend následujícího grafu se nezměnil. Proto následující grafy mají vypovídající hodnotu a můžeme říci, že výpočet úspěšně konvergoval ke konečnému výsledku.

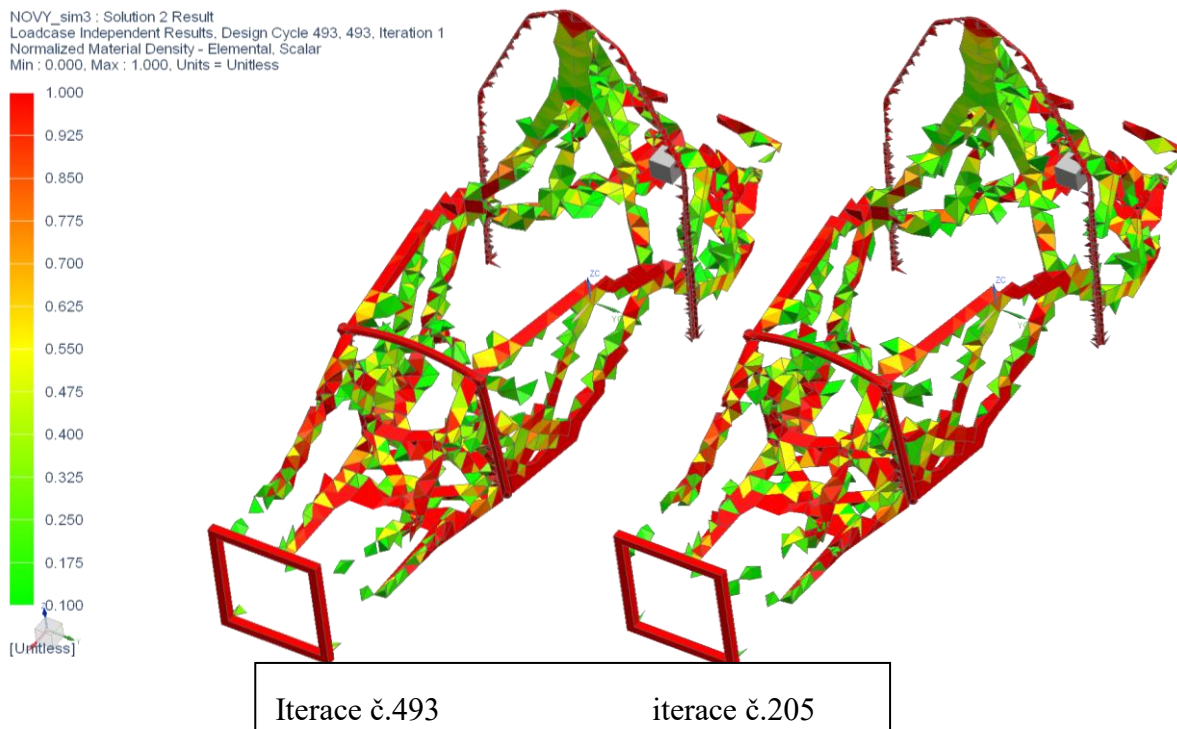
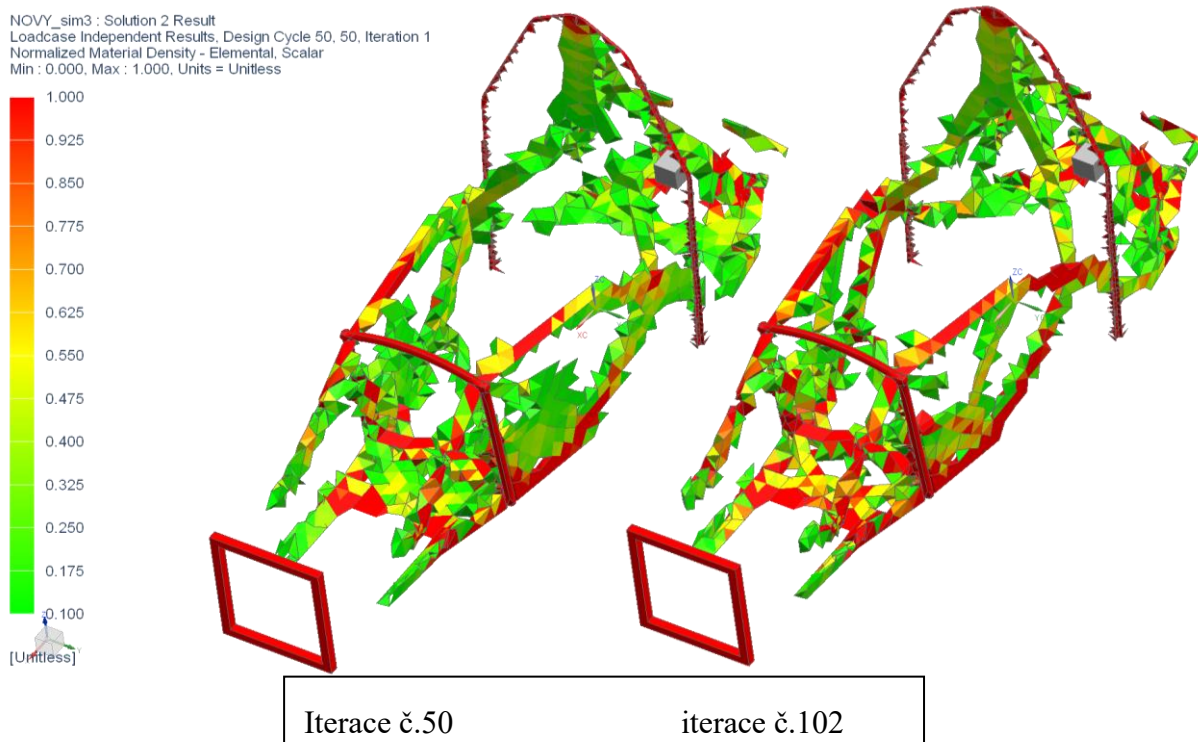


Graf 4 Změna compliance podle iterací výpočtu 2



Graf 5 Detail grafu změny compliance podle iterací výpočtu 2

Výsledky: Pseudohustota elementů



Obrázek 64 Výsledek pseudohustoty elementů - výpočet č.2

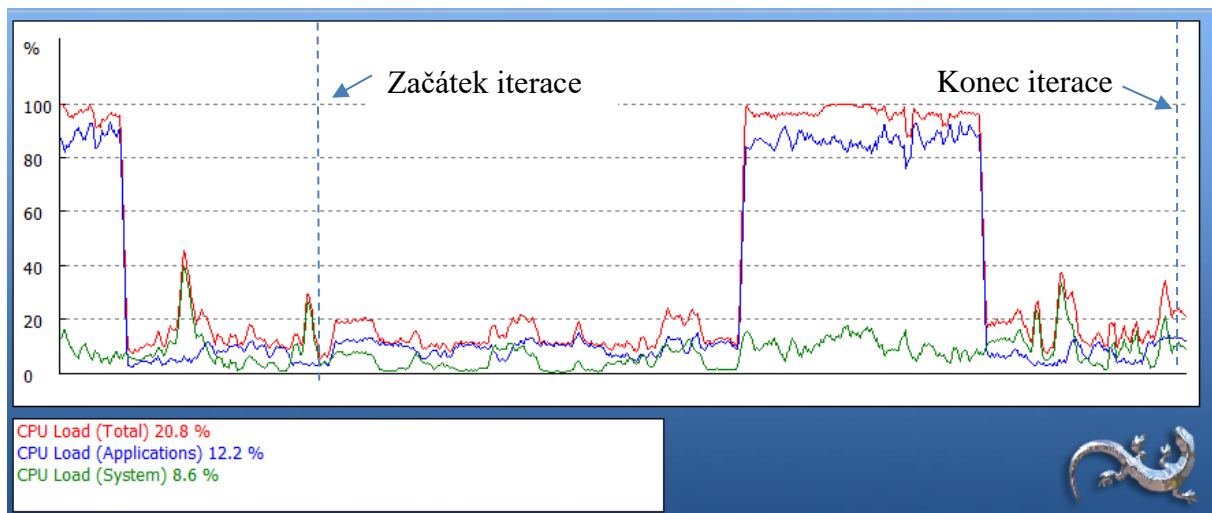
Z předchozího obrázku č.64 lze vyčíst, že již nedocházelo k výrazným změnám výsledků. Lze je tedy považovat z hlediska počtu iterací za dostatečné.

6.4.5. Zkrácení výpočtového času

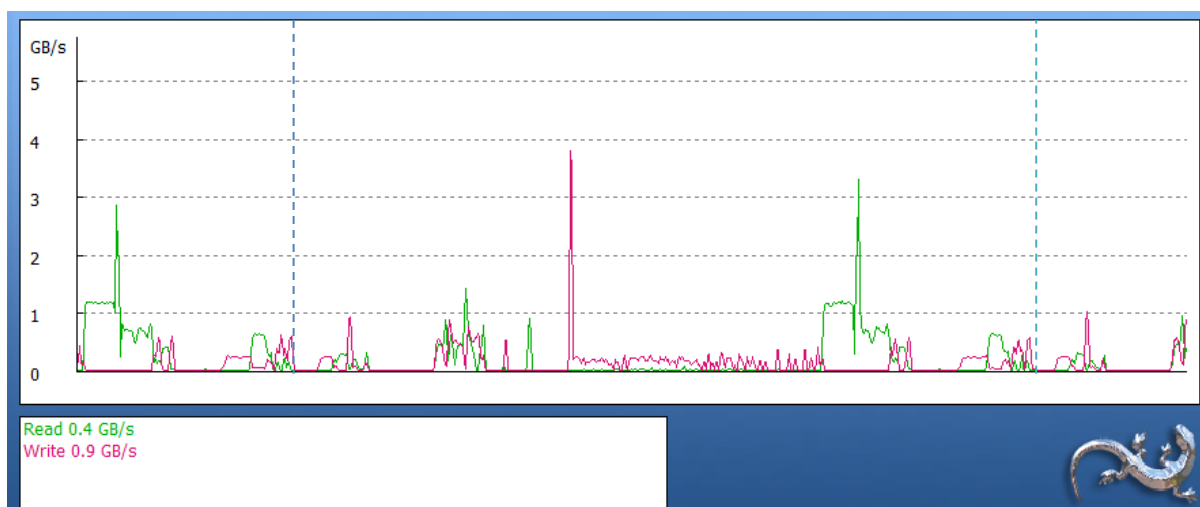
Znatelného zkrácení výpočtového času lze dosáhnout snížením počtu rovnic, čehož docílíme snížením počtu elementů. Tím se degraduje přesnost výpočtu. Další možností je použití výkonnějšího hardwaru pro výpočet.

Pro hledání slabého článku hardwaru byl s výhodou využit program Argus Monitor, který vykresluje využití jednotlivých komponent během výpočtu.

Díky tomu bylo zjištěno, že více jak 60 % celkového výpočtového času CPU nepočítá a nevyžívá všechna svá vlákna, ale pouze načítá a připravuje, nebo zapisuje data. Z toho lze usoudit, že razantního zrychlení výpočtu lze dosáhnout rychlejšími paměťmi. Jelikož je PC vybaven jedním z nejrychlejších disků na trhu, co se týče zapisování malo-objemových i velko-objemových dat, jedinou možností je navýšení kapacity RAM a následně ji využít jako scratch disk. Tento výpočet využil cca 400 GB pro dočasné soubory a z toho cca 40 GB pro každou iteraci. To je také žádoucí hodnota navýšení RAM kapacity.



Obrázek 65 Vytížení CPU během iterace (doba iterace zhruba 10 min.)



Obrázek 66 Vytížení scratch disku během iterace

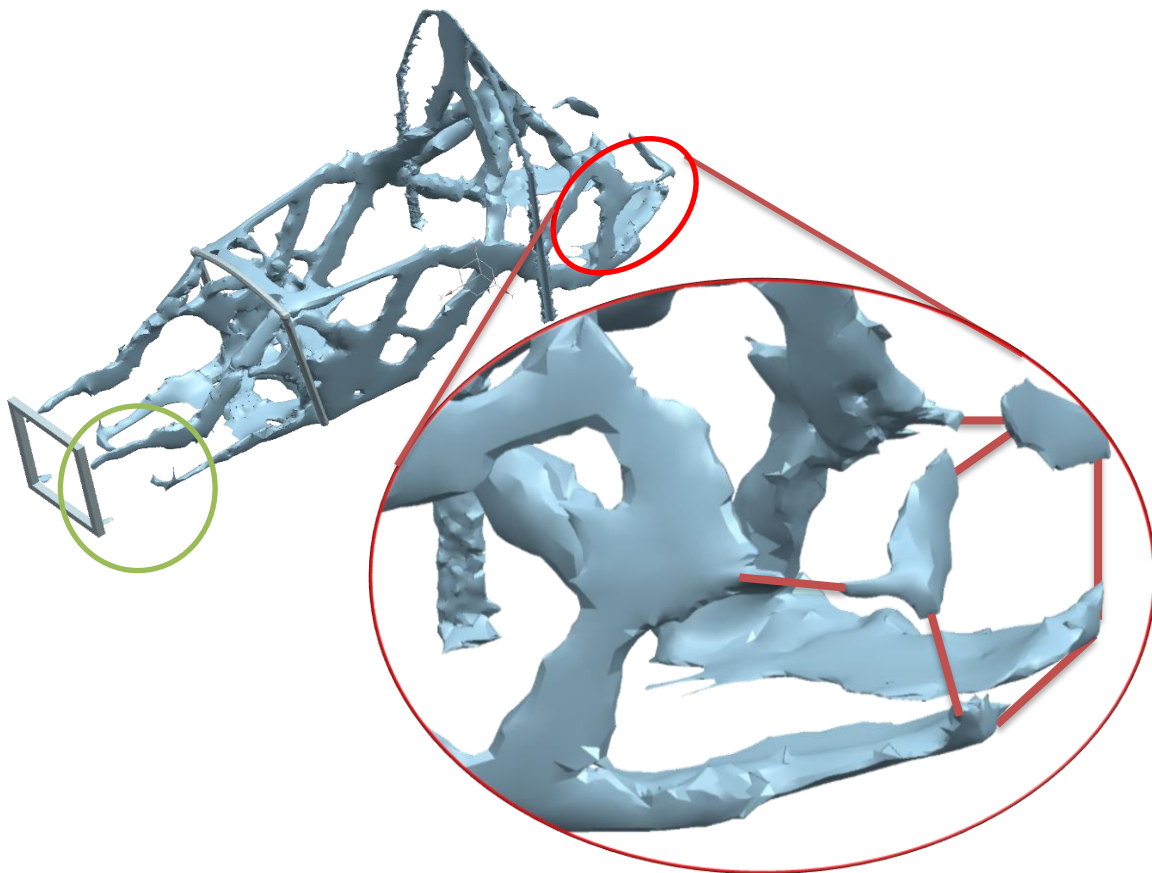
6.5. Reverzní inženýrství

Z výsledků výpočtu č.2 byl exportován model STL (Standart Tessellation Language) s hranicemi hustoty elementů 0.1-1.

- Hodnota vyhlazení při exportu: 0.3

Samotný STL model lze využít pro další výpočet nebo již pro samotný 3D tisk. Pouze je potřeba upravit některé nepřesnosti, na což lze s výhodou využít funkce NX Siemens umístěné pod kartou s názvem „Reverse Engineering“. Toto platí v případě kvalitních výsledků pocházejících z kvalitní jemné sítě. Pokud by síť nebyla dostatečně jemná, využívá se STL model pouze jako předloha.

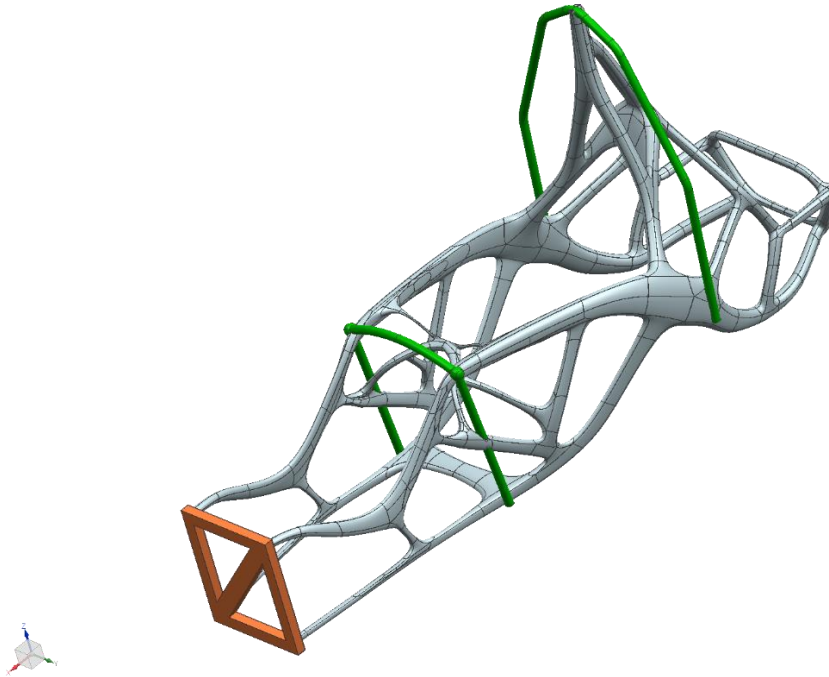
Je zřejmé, že v některých oblastech chybí, při této hranici hustoty, materiál, který by měl spojit jednotlivé části. Tento jev může být způsoben velmi malou koncentrací deformační energie v místech chybějícího materiálu (zelená oblast na obr. č.67), konkrétně zde byla velikost síly na bulkhead definována s ohledem na tuhost oblasti v malém poměru vůči ostatním silám. Nebo tento jev může být způsoben vyztužením oblasti jinou sítí (červená oblast na obr. č.67), kde byl rám vyztužen 1D sítí typu RBE3, reprezentující zavěšení vozu a uložení motoru. Nutno poznamenat, že k druhému případu, do jisté míry, dochází i u reálné sestavy. V extrému lze tedy považovat motor jako součást vyztužné struktury rámu.



Obrázek 67 Exportovaný STL model; nespojitosti v modelu

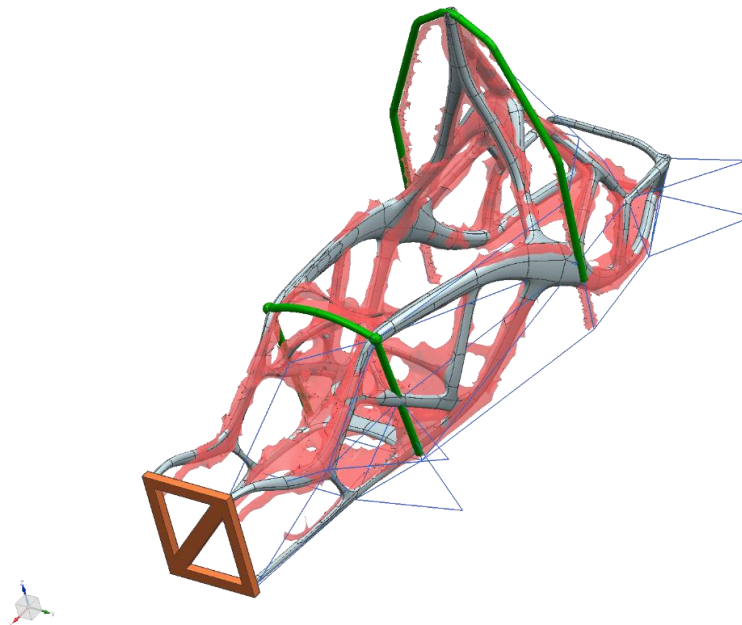
Rám byl znovu vymodelován dle předlohy, kterou byl výše zmíněný STL model. Jde o duté profily s elipsovým průřezem a různou velikostí. Síla stěny profilu je rovna 1.3 mm. Tato tloušťka byla zvolena dle tloušťky plechů, které se využívají pro samonosné karosérie automobilů (0.7-1.5 mm). Výsledná hmotnost rámu dosahuje hodnoty 27 kg (včetně zachovaných oblouků a bulkhead).

Do tohoto rámu, na rozdíl od předchůdce, byla již implementována příprava na uložení náboje volantů. Tato skutečnost lehce ovlivňuje výslednou hmotnost a pravděpodobně znatelně neovlivní torzní tuhost. Na první pohled by tento materiál pro lepší tuhost byl lépe využit v oblasti mezi předním obloukem a nárazovou částí, kde by tvořil další příčný oblouk (pouze domněnka autora).



Obrázek 68 Výsledný model

Na následujícím obrázku č.69. je znázorněno porovnání STL předlohy s výsledným modelem.



Obrázek 69 Porovnání výsledného modelu s STL předlohou

Model se zdá být velmi složitý, pokud by se měl vyrábět, může nastat problém. Ani dnes není jednoduché vyrobit takto složitý a rozměrný díl. Jednou z mála možností je se inspirovat způsobem výroby, který byl využit při výrobě rámu motocyklu Light Riders, který byl zmíněn na začátku této práce viz kapitola 2.0. – cíle. Tedy rozdělit díl na více výtisků a následně je svařit v jeden celek, s čímž výpočty nepočítají a může v okolí svarů dojít k nepředpokládaným odchylkám od výsledku výpočtů.

Vzhledem k povaze 3D tisku, kdy se materiál nanáší (tiskne) po jednotlivých vrstvách, mohou být výsledné výtisky anizotropní, mají tedy rozdílné mechanické vlastnosti v různých osách namáhání, ale existují i technologie 3D tisku, které slibují izotropní vlastnosti splňující ASTM a MPIF např. HP metal Jet, od společnosti HP, která by se měla objevit na trhu v roce 2020. [14]

Více viz: [15].

6.6. Nový návrh (verifikace výsledků)

6.6.1. Výpočtový model

Model totožný s výsledným modelem viz obr. č.68. Pouze byly naseknuté plochy pro připojení sítě reprezentující ramena zavěšení vozu.

6.6.2. Vytvoření výpočtové sítě

Byla použita síť s 3D elementy CTETRA(10) o velikosti 6 mm. Pro připojení bodů, v nichž jsou aplikovány síly, bylo využito sítí RBE2 a RBE3.

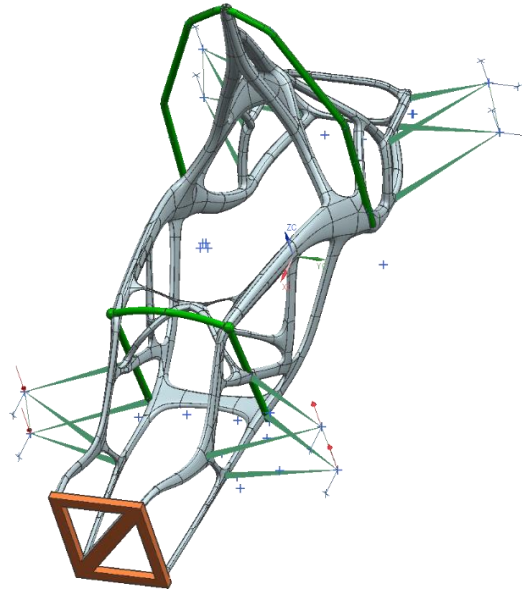
6.6.3. Definice okrajových podmínek

Okrajové podmínky pro řešení (A) – torzní tuhost

- Levé zadní kolo – odebrána možnost posuvu v ose Y a ose Z
- Pravé zadní kolo – odebrána možnost posuvu v ose Z
- Přední kola – odebrána možnost posuvu v ose X

Aplikace sil pro řešení (A) – torzní tuhost

- Levé přední kolo – 500 N ve směru osy-Z
- Pravé přední kolo – 500 N v opačném směru osy-Z



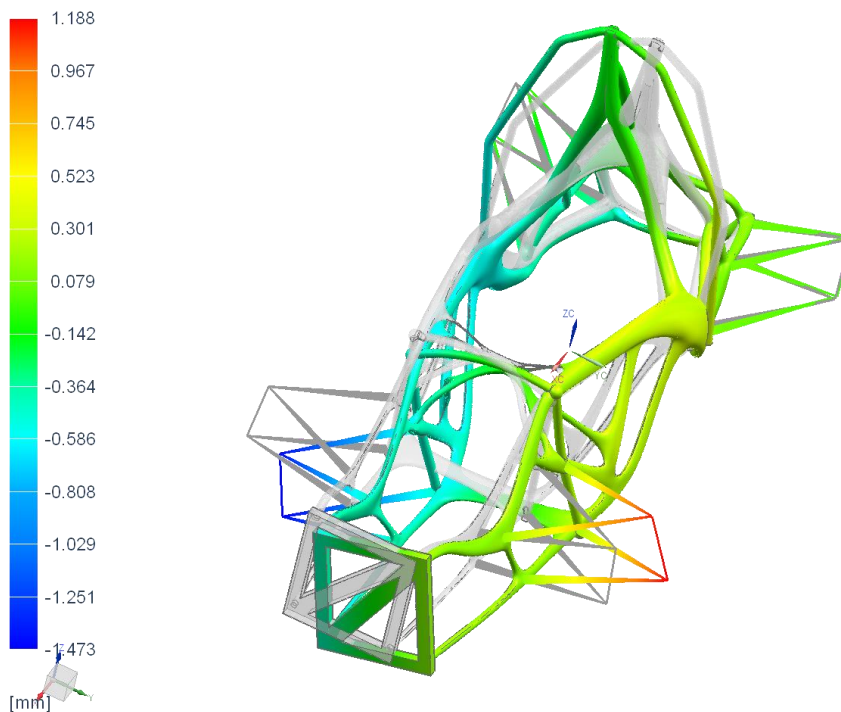
Obrázek 70 Okrajové podmínky nového návrhu pro výpočet torzní tuhosti

Okrajové podmínky pro řešení (B):

Viz kapitola 6.3.3.

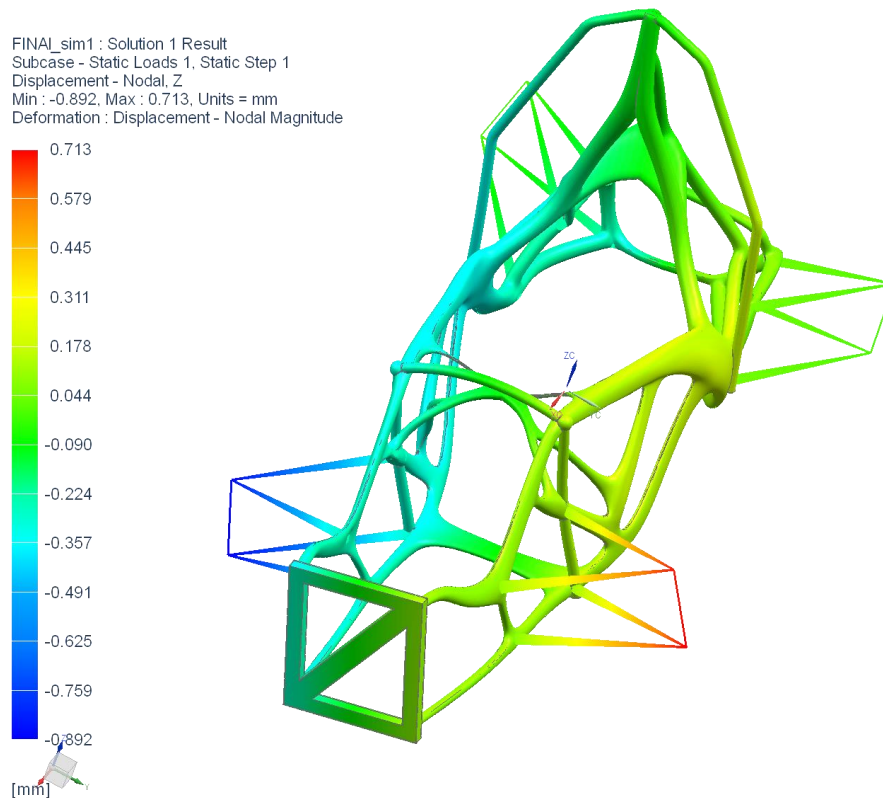
6.6.4. Torzní tuhost

FINAL_sim1 : Solution 1 Result
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1
Displacement - Nodal, Z
Min : -1.473, Max : 1.188, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Obrázek 71 Průběh posunutí v ose-Z

Jelikož výpočet ukázal výrazně nižší torzní tuhost než v původním případě, byla navýšena síla stěny na 1.8 mm, což odpovídá hmotnosti 34 kg, tedy stejné hodnotě, jakou disponoval původní rám.



Obrázek 72 Průběh posunutí v ose-Z po změně tloušťky profilů

Výsledná posunutí:

- V ose-Z max: 0.713 mm U_{z1}
- V ose-Z min: 0.892 mm U_{z2}

Výsledná torzní tuhost:

$$C = \frac{L \cdot F}{\sin^{-1}\left(\frac{U_{z1} + U_{z2}}{L}\right)}$$
$$C = \frac{0.560 \cdot (500 + 500)}{\sin^{-1}\left(\frac{0.713 + 0.892}{560}\right)}$$
$$C = 3353.3 \frac{Nm}{\circ}$$

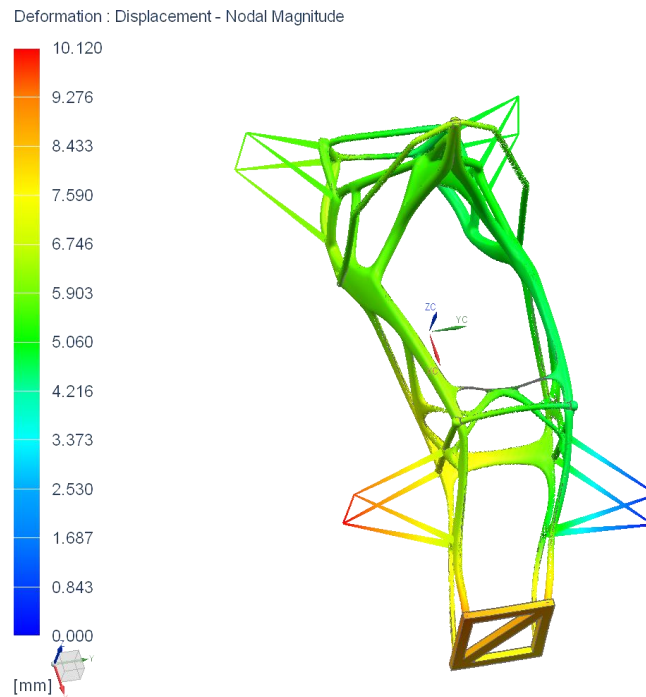
Pozn. Výsledná torzní tuhost vozu bude ve skutečnosti menší, protože se projeví deformace ramen zavěšení. V tomto výpočtu ramena zavěšení reprezentovala dokonale tuhá síť RBE3.

6.6.5. Vyhodnocení výsledků – jízda

- Počet řešených rovnic jedné iterace: 570 000
- Počet iterací: 1
- Doba výpočtu: 6 min.

Výsledná posunutí:

- Max. celková deformace: 10.12 mm



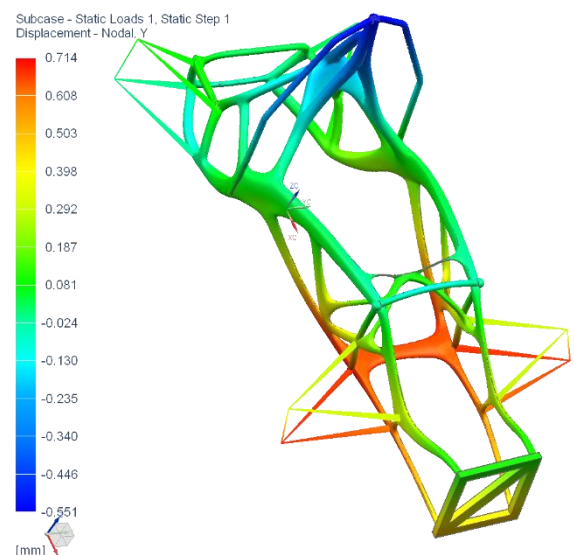
Obrázek 73 Výsledná posunutí návrhu rámu - výpočet B

Analýza průběhu deformace:

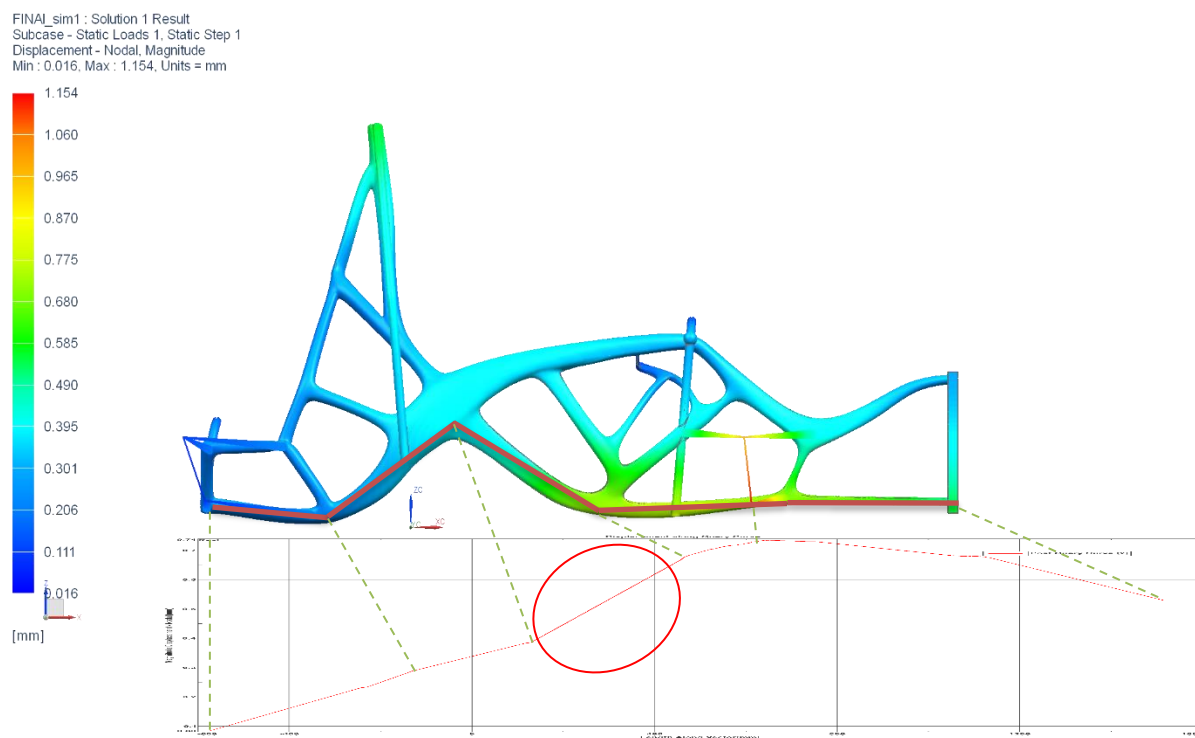
Zobrazení deformace ve směru osy-Y nám napovídá, která část rámu je jeho slabým článkem. Jedná se o spodní profil, který se při zatížení prohýbá výrazněji než ostatní části rámu.

Následující obrázek č.75 ukazuje průběh deformace podél znázorněné křivky. Tento průběh potvrzuje předchozí domněnku. Ve zvýrazněné oblasti skutečně dochází k rychlému navyšování deformace.

Z této skutečnosti vyplývá, že by bylo vhodné v této oblasti profil rozšířit ve směru osy-Y.



Obrázek 74 Posunutí rámu v ose-Y



Obrázek 75 Průběh posunutí podél křivky vozu

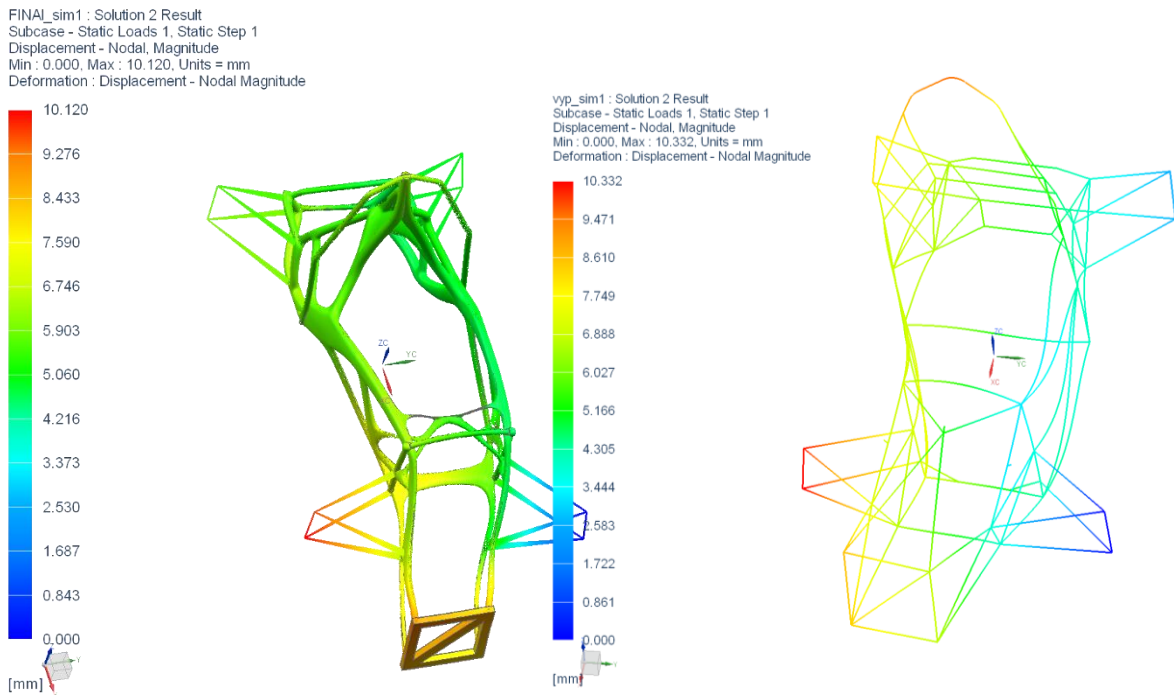
6.7. Porovnání výsledků

6.7.1. Torzní tuhost:

Návrh	Původní		Nový	
	Posuv v ose-Z	Max: 0.930	Min: 0.985	Max: 0.713
Hodnota torzní tuhosti [Nm/1°]	2886.1		3353.3 (+16 %)	
Hmotnost [kg]	34		34	

Tabulka 9 Porovnání torzních tuhostí

6.7.2. Celková tuhost



Obrázek 76 Porovnání tuhostí

Dle výše uvedeného obrázku č.76 jsou maximální posunutí podobná. Liší se však deformace ostatních částí, například hlavního oblouku, což je způsobené pozicí podpěr vůči definované síle. Při těchto okrajových podmínkách je na tom lépe rám nový, ovšem při bočním nárazu se zdá být tužší rám původní, ale to jsou pouze spekulace a pro skutečné porovnání by bylo potřeba mnohem více výpočtů při různých stavech zatížení.

Zhodnocení práce, závěr

Diplomová práce se zabývá návrhem odlehčené struktury pomocí topologické optimalizace pro daný rám. Mezi hlavní cíle práce patří přiblížit čtenáři základy a myšlenky topologické optimalizace.

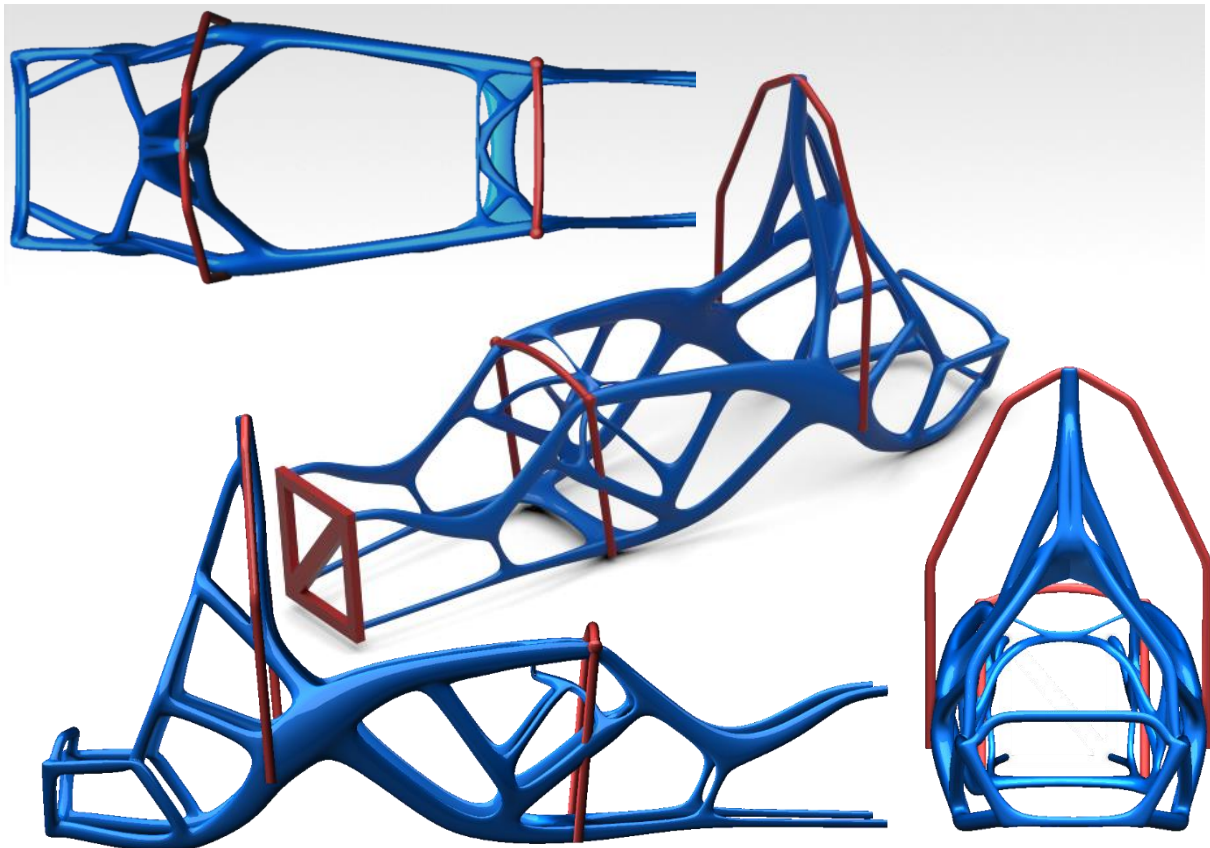
V začátku práce jsou popsány druhy a způsoby optimalizací, je zde přiblížena jejich problematika a využití. V této části je blíže popsána samotná topologická optimalizace, včetně konkrétních metod použitých v této práci.

Hlavní část práce obsahuje popis současného stavu rámu a omezení návrhu pravidly. Prvním krokem byl výpočet stávajícího rámu pro získání referenčních výsledků. Poté byl vytvořen výpočtový model samotné topologické optimalizace, zvolena výpočtová síť a proveden výpočet. Výsledkem tohoto výpočtu byl soubor elementů a jejich pseudohustot. Na základě těchto výsledků byl zhotoven nový návrh rámu a provedena jeho verifikace. Závěrem byl nový rám opět přepočítán a výsledky byly porovnány s výsledky stávajícího rámu, které ukázaly navýšení torzní tuhosti o 16 % při zachování hmotnosti.

Prostor pro optimalizaci rámu je stále značný, bylo by vhodné optimalizovat průřezy v některých částech profilů. Další možností je opakovat proces topologické optimalizace na vhodnějším hardwaru a dosáhnout tak přesnějších výsledků.

Práce také ukázala časovou náročnost topologické optimalizace a to, jak z hlediska výpočtových časů/hardwaru, tak z hlediska následné analýzy výsledků, kde je potřeba analyzovat více iterací, pro odhad konvergence výpočtu nebo pro definici hranic pseudohustoty.

Topologická optimalizace není všemocná, je to pouze nástroj, který pomáhá konstruktérům s návrhem dokonalého výrobku. Rozhodnutí o finálním tvaru je stále zatím na konstruktérovi samotném.



Použité zdroje

- [1] Cars show [online]. 3.6.2016. [Cit. 10.3.2019].
Dostupné z: <https://www.cars-show.org/motorcycles/light-rider-worlds-first-3d-printed-electric-motorcycle.html>
- [2] Wikipedia [online]. Formula SAE, 2009. [Cit.10.3.2019].
Dostupné z: https://it.wikipedia.org/wiki/Formula_SAE#/media/File:Formula_SAE.jpg
- [3] SAE International [online]. Formula SAE Rules, 2016. [Cit. 10.3.2019].
Dostupné z: http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsae_rules.pdf
- [4] Škola-auto [online]. 2017. [Cit. 15.3.2019].
Dostupné z: http://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2017/10/24_Nosne_prvky_podvozku_druhy_ramu.pdf
- [5] TecnoCurve [online]. 2017. [Cit. 17.3.2019].
Dostupné z: <https://www.tecnocurve.com/blog/2017/11/14/special-tube-processing-for-formula-sae-race-cars/>
- [6] PETRÁNY, M. Jalopnik [online]. Meet the Progenitor of The Carbon Fiber Chassis 2.5.2016. [Cit. 17.3.2019].
Dostupné z: <https://jalopnik.com/meet-the-progenitor-of-the-carbon-fiber-chassis-1774239202>
- [7] MAREŠ, T. Základy Konstrukční Optimalizace [online]. Sv. 2. Praha: Vlastním nákladem, 2006. [Cit. 12.3.2019].
Dostupné z fs.cvut.cz:
<http://users.fs.cvut.cz/tomas.mares/z/z/ZakladyKonstrukcniOptimalizace/zko.pdf>
- [8] KOPŘIVA, L. Optimalizace Žebra na Křídle Letounu [online] Brno, 2008. [Cit. 13.3.2019]. Dostupné z vutbr.cz:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=9054
- [9] CHAU, L. BM-RD [online]. Topology Optimization Overview, [cit. 20.3.2019].
Dostupné z: <http://home.bm-rd.com/topology-optimization-overview/>
- [10] Americké autodíly [online]. Plastová vana korby, [cit. 20.3.2019].
Dostupné z: <https://www.americkeautodily.cz/produkt/plastova-vana-korby/6142>
- [11] FSAE-online [online]. FSAE-Rules, 2018. [Cit. 25.3.2019].
Dostupné z: <http://fsaeonline.com/content/2017-18-FSAE-Rules-091317.pdf>
- [12] America Makes [online]. Developing Topology Optimization Tools that Enable Efficient Design of AM Cellular Structures, [cit. 25.3.2019].
Dostupné z: <https://www.americamakes.us/portfolio/4021-developing-topology-optimization-tools-enable-efficient-design-cellular-structures/>
- [13] WILLS, G. PLM-Europe [online]. Topology Optimization using NX Nastran and Simcenter, 2018. [Cit. 1.4.2019].
Dostupné z: https://www.plm-europe.org/admin/presentations/2018/2339_PLMEurope_31.10.18-08-00_GUY_WILLS_SIEMENS_PLM_SOFTWARE_topology_optimisation_with_simcenter.pdf

- [14] 3pol [online] 3D tiskárna kovu vstupuje do výroby, 2019. [Cit. 5.5.2019].
Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/bez-zarazeni/2269-3d-tiskarna-kovu-vstupuje-do-vyroby>
- [15] HP [online] HP Metal Jet technology, 2018. [Cit. 5.5.2019].
Dostupné z: <http://www8.hp.com/h20195/v2/GetPDF.aspx/4AA7-3333EEW.pdf>

Seznam obrázků

Obrázek 1 Rám motocyklu Light Riders [1]	4
Obrázek 2 Zahájení soutěže FSAE [2]	5
Obrázek 3 Obdélníkový rám	7
Obrázek 4 Páteřový rám	8
Obrázek 5 Plošinový rám	8
Obrázek 6 Obvodový rám	9
Obrázek 7 Příhradový rám	9
Obrázek 8 Příhradový rám týmu Race UP [5]	10
Obrázek 9 Karbonový monokok formule 1 [6]	11
Obrázek 10 Ukázka principu jednotlivých typů optimalizace [9]	13
Obrázek 11 Korba pickupu - ukázka využití topografické optimalizace [10]	13
Obrázek 12 Úloha ISE topologie (a) vstupní model, (b) nepřipustné řešení (c) optimální řešení [7]	15
Obrázek 13 Ukázka rozložení pseudohustoty	15
Obrázek 14 Výchozí model pro optimalizaci	15
Obrázek 15 Algoritmus procesu topologické optimalizace	16
Obrázek 16 Přední a hlavní oblouk rámu	18
Obrázek 17 Nárazová část – bulkhead	19
Obrázek 18 Triangulace dle pravidel FSAE	19
Obrázek 19 Šablona A [11]	20
Obrázek 20 Šablona B [11]	20
Obrázek 21 Šablona C [12]	21
Obrázek 22 Předepsané minimální vzdálenosti [12]	21
Obrázek 23 Proces optimalizace [12]	22
Obrázek 24 Ukázka rozložení sil akcelerace	23
Obrázek 25 Síly přenášené z kola do rámu	24
Obrázek 26 Body uložení prvků zavěšení k rámu	25
Obrázek 27 Kinematický model zavěšení kola	26
Obrázek 28 Graf – Příklad průběhu reakční síly v uložení tlumiče $F(t)$	26
Obrázek 29 Stávající stav rámu	28
Obrázek 30 Průřez nárazové části rámu	29
Obrázek 31 Nasíťovaný výpočtový model aktuálního stavu	30
Obrázek 32 Okrajové podmínky pro výpočet A	31
Obrázek 33 Deformace při výpočtu A	31

Obrázek 34 Posunutí v ose-Z výpočet B	32
Obrázek 35 Proces topologické optimalizace	33
Obrázek 36 Parametry optimalizace	34
Obrázek 37 Ukázka definice oblasti návrhu	34
Obrázek 38 Ukázka definice cíle optimalizace	34
Obrázek 39 Ukázka definice hranic optimalizace	35
Obrázek 40 Ukázka rozdílu výsledků při použití podmínky pro minimální velikost elementu [13]	36
Obrázek 41 Ukázka rozdílu výsledku při použití podmínky pro maximální velikost elementu [13]	36
Obrázek 42 Ukázka podmínky - rovinná symetrie [13]	36
Obrázek 43 Ukázka podmínky - kruhová symetrie [13]	37
Obrázek 44 Ukázka podmínky – tažení [13]	37
Obrázek 45 Výpočtový síťovaný model pro ukázkou topologické optimalizace	38
Obrázek 46 Výsledky ukázky optimalizace	38
Obrázek 47 Nastavení vykreslování/exportu hranic materiálové hustoty výsledku	40
Obrázek 48 Rozdíl vykreslování při/bez funkce vyhlazení	40
Obrázek 49 Hustota 1.0-1.0; Zkreslení výsledků funkcí vyhlazení – vlevo, bez vyhlazení – vpravo	40
Obrázek 50 Druhy výplňových mříží [14]	41
Obrázek 51 Ukázka vykreslení při použití výplňové mřížky	41
Obrázek 52 Hotové výrobky s využitím výplňové mřížky [14]	42
Obrázek 53 Výpočtový model pro topologickou optimalizaci	42
Obrázek 54 Základní rozměry výpočtového modelu (výška 480 mm)	43
Obrázek 55 Nasíťovaný výpočtový model	44
Obrázek 56 Vnitřní síť CHEXA	44
Obrázek 57 Přechodová síť CPYRAM	45
Obrázek 58 Aplikace funkce Gluing	45
Obrázek 59 Okrajové podmínky pro topologickou optimalizaci	46
Obrázek 60 Oblast zachování – červená; oblast optimalizace – zelená	46
Obrázek 61 Definice bodu symetrie	47
Obrázek 62 Chyba výpočtu	47
Obrázek 63 Výsledná pseudohustota elementů - výpočet č.1	49
Obrázek 64 Výsledek pseudohustoty elementů - výpočet č.2	51
Obrázek 65 Vytížení CPU během iterace (doba iterace zhruba 10 min.)	52
Obrázek 66 Vytížení scratch disku během iterace	52

Obrázek 67 Exportovaný STL model; nespojitosti v modelu	53
Obrázek 68 Výsledný model	54
Obrázek 69 Porovnání výsledného modelu s STL předlohou	54
Obrázek 70 Okrajové podmínky nového návrhu pro výpočet torzní tuhosti	56
Obrázek 71 Průběh posunutí v ose-Z	56
Obrázek 72 Průběh posunutí v ose-Z po změně tloušťky profilů	57
Obrázek 73 Výsledná posunutí návrhu rámu - výpočet B	58
Obrázek 74 Posunutí rámu v ose-Y	58
Obrázek 75 Průběh posunutí podél křivky vozu	59
Obrázek 76 Porovnání tuhostí	60

Seznam tabulek

Tabulka 1 Hodnocení soutěže	6
Tabulka 2 Přehled sil působících na přední těhlici	24
Tabulka 3 Přehled sil působících na zadní těhlici	25
Tabulka 4 Maximální síly v uložení	27
Tabulka 5 Průřezy trubek rámu	28
Tabulka 6 Rozdíly různých iterací a jejich hodnoty compliance	39
Tabulka 7 Ukázka rozdílů vykreslování při různých hranicích materiálové hustoty	40
Tabulka 8 Počet jednotlivých druhů elementů	45
Tabulka 9 Porovnání torzních tuhostí	59

Seznam grafů

Graf 1 Hodnota compliance při různých iteracích	39
Graf 2 Změna compliance podle iterací výpočtu 1	48
Graf 3 Detail grafu změny compliance dle iterací výpočtu 1	49
Graf 4 Změna compliance podle iterací výpočtu 2	50
Graf 5 Detail grafu změny compliance podle iterací výpočtu 2	50