

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra materiálu a strojírenské technologie**



**Diplomová práce**

**Materiálový návrh prvků zavěšení kol na studentské  
formuli týmu CULS Prague Formula Racing**

**Autor:** Bc. Radek Drda

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

© 2020 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Radek Drda

Technika a technologie v dopravě a spojích

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

**Materiálový návrh prvků zavěšení kol na studentské formuli týmu CULS Prague Formula Racing**

Název anglicky

**Material design of wheel suspension elements at student formula of team CULS Prague Formula Racing**

---

### Cíle práce

Diplomová práce se zaměřuje na materiálové zlepšení prvků zavěšení kol na studentské formuli pro tým CULS Prague Formula Racing. Cílem diplomové práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o problematice využití materiálů v oblasti zavěšení kol implementované v oblasti konstrukce studentské formule, tj. zlepšit stávající prvky zavěšení, a to především za použití perspektivních materiálů, aby bylo docíleno snížení hmotnosti a lepší konstrukční aspekty těchto prvků.

### Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíl práce a metody jejího zpracování.

Řešení podstaty dané problematiky.

Přínos a závěry práce.

## Doporučený rozsah práce

cca 60 stran

## Klíčová slova

Perspektivní konstrukční materiály, kompozity, konstrukce, optimalizace

---

## Doporučené zdroje informací

- ÅSTRÖM, B. T.: Manufacturing of Polymer Composites. London: Chapman & Hall, 1997.  
Časopis: International Journal of Adhesion and Adhesives, Composite structures, Research in Agricultural Engineering, International Journal of Solids and Structures, Journal of Materials Processing Technology, Surface and Coating Technology, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Strojírenská technologie, The journal of adhesion, Journal of material science, The Journal of Physical Chemistry, International Journal of Fatigue, Journal of materials processing technology, Polymer Degradation and Stability, Manufacturing technology  
HABENICHT, G.: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendung. Berlin: Springer 2002.  
JANČÁR, J.: Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. 1.vydání. Brno: VUT – Brno, 2003.  
LAŠ, V.: Mechanika kompozitních materiálů. 1.vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004.  
MACHEK, V., SODOMKA, J.: Polymery a kompozity s polymerní matricí. 1.vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008.  
MESSLER, R. W. Joining of materials and structures: from pragmatic process to enabling technology. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2004.  
Normy, sborníky z konferencí, firemní literatura  
SKRBEK, B.: Materiály pro konstrukční aplikace. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009.  
VOJTĚCH, D., ŠERÁK, J., STOLAŘ, P. Kovové konstrukční materiály II. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999.

---

## Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

## Vedoucí práce

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 12. 1. 2019

**prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 11. 02. 2020

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Materiálový návrh prvků zavěšení kol na studentské formuli týmu CULS Prague Formula Racing vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne: 20.4.2020

.....

Podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu této diplomové práce prof. Ing. Miroslavu Müllerovi, Ph.D. za jeho spolupráci při její tvorbě. Dále bych chtěl poděkovat za udělení grantu IGA na financování nákupu polotovarů a firmě ENVI-PUR s.r.o. pro jejich technickou podporu a poskytnutí strojního vybavení. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat týmu CULS Prague Formula Racing za jejich spolupráci.

## **Abstrakt**

Závodní soutěž Formule Student je konstrukční soutěž pro studenty vysokých škol, kteří se snaží zkonstruovat závodní vůz za použití inovativních technologií. Cílem této diplomové práce je materiálové zlepšení prvků zavěšení kol na studentské formuli pro team CULS Prague Formula Racing, jelikož stávající řešení z oceli bylo nedostačující. Pomocí současných poznatků, vlastních materiálových zkoušek, pevnostních simulací a 3D modelování byl navržen systém zavěšení kol z uhlíkových vláken a slitin hliníku. Finální návrh představuje materiálovou optimalizaci a hmotnostní úsporu o 30,7 % oproti stávající konstrukci. Podle zadání počítá nové řešení s dlouhou životností dané konstrukce, bylo proto navrženo na vyšší zatížení, a nabízí tak možnosti pro další odlehčování pro budoucí závodní vozy týmu.

**Klíčová slova:** Perspektivní konstrukční materiály, kompozity, konstrukce, optimalizace

## **Summary:**

Formula Student Racing Competition is a technical competition for university students who design and race their own racing car using innovative technologies. The aim of the diploma thesis is the material improvement of suspension elements on the student formula of CULS Prague Formula Racing team because the existing solution is insufficient and requires a replacement. Based on the current literature review, material tests, strength simulations and 3D modeling, a solution for a new suspension system was created using carbon fibers and aluminum alloys. The final design represents material optimization and weight savings of 30,7 % compared to the previous design. In accordance with the team's requirements, the new solution was designed for higher construction loading, therefore it offers possibilities for further improvements of the future racing car design.

**Keywords:** Perspective construction materials, composites, construction, optimization

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce .....	2
3	Metodika práce.....	3
4	Teoretická část.....	4
4.1	Formule SAE/Student .....	4
4.1.1	Zadání soutěže a její disciplíny .....	4
4.1.2	Koncepce a stavba vozu.....	5
4.2	Závodní monopost týmu CULS.....	7
4.2.1	Současný stav .....	8
4.2.2	Možnosti nového návrhu.....	9
4.3	Zkoušky materiálů .....	12
4.3.1	Zkouška tahem .....	12
4.3.2	Napěťové charakteristiky .....	14
4.3.3	Deformační charakteristiky.....	19
5	Praktická část práce.....	20
5.1	Výpočet maximální síly .....	20
5.2	Tahová zkouška .....	22
5.2.1	Postup práce při tahové zkoušce .....	27
5.3	Pevnostní simulace a 3D model zavěšení kol .....	29
6	Výsledky a diskuze.....	31
6.1	Výpočet maximální síly – výsledky.....	31
6.2	Výsledky měření zkoušky tahem.....	32
6.3	Vlastní návrh nového provedení .....	36
6.3.1	Přední náprava.....	36
6.3.2	Zadní náprava.....	38

6.4	Konstrukční návrh.....	40
6.5	Řešení konstrukčního návrhu.....	41
6.6	Porovnání hmotnosti starého a nového řešení .....	48
6.7	Finanční analýza .....	50
7	Závěr.....	51
8	Seznam literatury.....	53
	Seznam obrázků.....	54
	Seznam tabulek.....	56
	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	57



# 1 Úvod

Závodní soutěž Formule Student je konstrukční soutěž, které se zúčastní jen studenti vysokých škol. Jejich cílem je pomocí poznatků a moderních technologií postavit a představit svůj závodní monopost podle platných pravidel soutěže a v neposlední řadě s ním zajet nejlepší výsledek v soutěžních kategoriích.

Diplomová práce se zabývá pouze jednou konstrukční částí závodního monopostu týmu CULS Prague Formula Racing, který je složen ze studentů ČZU v Praze. Zadáním týmu a cílem této práce je vytvořit inovativní konstrukční návrh zavěšení podvozku, který umožní vylepšení jízdních vlastností pomocí odlehčení neodpružených částí vozu. Řešení této diplomové práce má nahradit stávající řešení z oceli použitím nového materiálu, který bude lehký a zároveň si zachová dobré pevnostní vlastnosti. Práce shrnuje poznatky a trendy v použitých materiálech a konstrukčních řešení uplatňovaných v soutěži FSAE se zaměřením na současné řešení monopostu týmu CULS. Z různých druhů materiálů, které jsou v tomto odvětví používané, byly pro porovnání vybrány dva materiály, a to kompozity z uhlíkových vláken a slitiny hliníku. Pro stanovení materiálových vlastností vybraných materiálů bylo zapotřebí provést vlastní měření, a to pomocí tahové zkoušky. Výsledky tahové zkoušky sloužily jako vstupní hodnoty pro vytvoření 3D modelu návrhu řešení. Počítačový 3D model byl vytvořen pomocí softwaru Autodesk Inventor, ve kterém byly provedeny pevnostní simulace. Nejprve byly nadefinovány různé profily na zjednodušeném čárovém modelu, který pak sloužil k návrhu finální dimenze použitých profilů. Pro zadání vstupních hodnot bylo nutné nejprve spočítat maximální zatížení na jednotlivá kola, což bylo provedeno pomocí čtyř případových modelových situací, ze kterých byly poté definovány maximální síly působící na podvozek. Na základě těchto simulací a maximálního dovoleného napětí materiálu byl vybrán nejvhodnější materiál a dimenze profilů. Z tohoto návrhu byl vytvořen finální detailní 3D model, na kterém byly znovu ověřeny pevnostní simulace a vhodnost zvoleného řešení. Simulace byly provedeny jak pro dílčí sestavy zavěšení, tak pro celou sestavu zavěšení jednotlivých kol. Během této simulace bylo nutné ještě provést závěrečné opravy a odstranění přebytečného materiálu pro docílení nejnížší možné hmotnosti. Dále byly pro řešení vytipovány nakupované díly a sestavena technologie výroby. V závěru práce je popsána procentuální úspora hmotnosti nového řešení, dále je vyčíslena cena finálního řešení a poskytnuto doporučení pro budoucí vývoj a další řešení.

## **2 Cíl práce**

Diplomová práce se zaměřuje na materiálové zlepšení prvků zavěšení kol na studentské formuli pro tým CULS Prague Formula Racing. Cílem diplomové práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o problematice využití materiálů v oblasti zavěšení kol a jejich implementace pro konstrukce studentské formule. Dále pak na základě 3D modelových simulací vytvořit inovativní řešení zavěšení kol za použití perspektivních materiálů tak, aby při zachování vysoké pevnosti a životnosti bylo docíleno snížení hmotnosti a lepších konstrukčních aspektů těchto prvků.

### 3 Metodika práce

V první části diplomové práce jsou shrnuty poznatky o soutěži studentské formule FSAE, dále je uvedeno konstrukční řešení prvků zavěšení monopostu závodního teamu CULS Prague Formula student. Pro nový návrh jsou zde shrnuty aktuální poznatky z perspektivních konstrukčních a materiálových možností zaměřené na prvky zavěšení v oblasti studentské formule.

Dále je popsána zkouška tahem na univerzálním tahovém stroji LabTest 5.50 ST, protože pro nový návrh musely být stanoveny materiálové hodnoty potřebné pro dimenzování prvků podvozku. Pro zjištění výchozích podmínek jsou dále provedeny pevnostní simulace, nejprve na čárový model, který má na čáry definované profily ze stávajícího zavěšení podvozku monopostu týmu CULS Prague Formula Racing. Na tomto modelu jsou odzkoušeny i jiné dimenze profilů, aby byl vybrán nejvhodnější profil. Po výběru vhodného profilu a zvolení použitého materiálu pro finální řešení, byl vytvořen 3D model, který vychází z čárového modelu, ale je osazen profily, tak aby odpovídal předloze pro reálný produkt. Tento model byl ověřen pomocí pevnostních simulací, nejprve každý prvek zavěšení zvlášť jak pro přední nápravu, tak pro zadní nápravu. Následně je provedena pevnostní simulace pro přední, resp. zadní nápravu jako celek. Po ověření výsledku byly provedeny finální úpravy pro snížení hmotnosti.

V závěru práce je porovnání hmotností jednotlivých dílů nového řešení a porovnání se starým řešením. Byla provedena procentuální úspora nového řešení. Dále je zde doporučení pro další vývoj těchto prvků zavěšení.

## 4 Teoretická část

### 4.1 Formule SAE/Student

Formule SAE je motoristická soutěž univerzitních týmů. Tato soutěž byla poprvé pořádána roku 1981 v USA, v Evropě se tato soutěž nazývá Formule student a jezdí se zde od roku 1998. Dnes se tyto závody konají i na ostatních kontinentech, a to v zemích jako je Brazílie, Indie, Japonsko nebo Austrálie. Celkově se závodů zúčastní přes 800 týmů z celého světa. Členové závodních týmů musejí být studenti bakalářského nebo magisterského studia. Aby mohli absolvovat soutěže a poměřit síly s ostatními týmy, musí postavit vlastní jednomístný závodní vůz, který je ovladatelný, výkonný, spolehlivý a bezpečný. Soutěžící si poměřují síly za pomoci bodového ohodnocení, které nasbírají během statických a dynamických disciplín. Týmy se mohou rozhodnout, zda budou soutěžit s konvenčním spalovacím motorem nebo s elektromotorem. Ve své práci se dále budu zabývat jen variantou se spalovacím motorem, protože team CULS Prague Formula Racing disponuje monopostem právě se spalovacím motorem. [1][2]

#### 4.1.1 Zadání soutěže a její disciplíny

Závodní disciplíny jsou:

- Static Events (Statické disciplíny)
  - Design (150 bodů) – porota hodnotí technickou kvalitu a konstrukční řešení vozu
  - Price (100 bodů) – hodnocení analýzy nákladů, kde team dokládá detailní kalkulaci výrobních nákladů
  - Presentation (Prezentace - 75 bodů) – prezentuje se marketingový plán a schopnost týmu prodat svůj výrobek

- Dynamic Events (Dynamické disciplíny)
  - Skid-Pad (75 bodů) – jízda na trati ve tvaru osmičky, kde se hodnotí čas průjezdu pro zhodnocení kvality podvozku
  - Autocross (125 bodů) – vytyčená dráha z kuželek, na které se ukáže především ovladatelnost vozu
  - Acceleration (100 bodů) – zrychlení z nulové rychlosti a měření času zrychlení na 75 m přímé dráze
  - Endurance & Fuel Economy (275 + 100 bodů) – okruhový závod na 22 km dlouhé trati s povinnou výměnou jezdců, kde se ověřují všechny systémy vozu na výdrž a jeho spotřeba

Celkem je možno nasbírat 1000 bodů.

Tým nejprve musí projít statickou disciplínou, kde prezentuje, jak postupoval při návrhu, a obhájí své řešení pomocí PC simulací a výpočtů s odkazováním na platná pravidla soutěže. Dále obhájí cenovou kalkulaci, kde získal finanční prostředky a na závěr se snaží svůj vůz prodat hodnotící porotě, protože podle pravidel této soutěže by výsledkem měl být produkt, který se bude vyrábět pro zákazníka, tedy neprofesionálního závodníka autokrosu nebo sprintu. Předpokládá se výroba 1000 takovýchto vozů ročně. [1][2]

Po absolvování statických disciplín se ještě před dynamickými disciplínami ověřuje bezpečnost celého vozu. To se provádí nejprve technickou přejímkou, kde se ověřuje bezpečnost a technický stav vozu. Následuje náklonová zkouška, kdy se vůz s pilotem nakloní na plošině pod úhlem 30° na bok a poté až na úhel 60°, čemuž odpovídá přetížení 1,7 G. Během náklonu se vůz nesmí převrátit a ani z něho nic vytéct nebo vypadnout. Pokud vůz projde těmito zkouškami, může nastoupit do dynamických disciplín a poměřit dovednosti s ostatními týmy na závodní trati.[1][2]

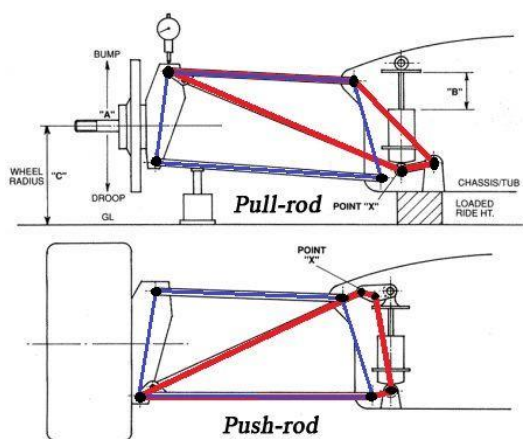
#### **4.1.2 Koncepce a stavba vozu**

Koncepce vozu se velmi podobá prestižním závodním vozům F1, jelikož studenti se převážně nechávají inspirovat těmito vozy. Jedná se tedy o dvoustopá vozidla s otevřeným kokpitem, poháněná spalovacím motorem nebo pomocí elektromotoru.

Spalovací motor musí být čtyřdobý a pravidly je omezen objem na 610 ccm. Týmy mají různé názory na koncepci vozu, a proto lze vidět malé jednoválcové motory až po větší čtyřválcové. Používají se převážně motocyklové motory různých značek. Pravidla výkon motoru omezují především zmenšením průměrů v sání, a to pomocí restriktoru o průměru 20 mm a předepsaným palivem Natural N98, popřípadě u paliva Ethanol E85, kde je však předepsaný restriktor o průměru 19 mm. [2][3]

Rám monopostu si tým může zvolit ze dvou různých možností. První je prostorový svařovaný rám z konstrukční oceli nebo tzv. „monokok“, který je tvořen jako skořepina z uhlíkových vláken. Popřípadě jejich kombinace, tedy přední část a kokpit je tvořen skořepinou a zadní část pro prostor motoru je svařovaný rám. Rám vozu slouží především jako bezpečnostní rám pro řidiče a přichytávají se k němu všechny důležité části vozu. Od držáků pro motor, přes podvozek až po nárazový prvek, který je v přední části vozu. [2][3]

Podvozek je konstruován nejčastěji jako lichoběžníkové zavěšení a každé kolo je nezávisle zavěšeno pro dosažení nejlepších dynamických vlastností vozu. K odpružení vozu se používají plně nastavitelné cyklistické tlumiče a pružiny, které si každý tým navrhuje sám podle potřebné tuhosti. Celý pružicí systém je řešen různými tvary a typy přepákování, nejčastěji je však používán systém Pull-rod nebo Push-rod (Obr. 1). Točivý moment motoru je přenášen pomocí sekundární převodovky a samosvorného diferenciálu na zadní kola. Tento převod bývá nejčastěji řetězový. Všechna kola jsou vybavena kotoučovými brzdami, a to především kvůli jejich spolehlivosti. Jsou však také nezbytné kvůli pravidlům, protože autu se při brždění musí zablokovat všechna kola. [2][3]



Obr. 1 - Rozdíl mezi Pull-rod a Push-rod [2]

Některé závodní monoposty jsou takřka na vrcholu strojírenského průmyslu. Používají se nejrůznější materiály, jako jsou pevné slitiny hliníku, hořčíku a titanu. Používají se metody 3D tisku z kovových i nekovových materiálů, obrábění pomocí 5-osých CNC center, odlévání lehkých slitin kovů a komponenty z uhlíkových vláken. Pro vstupní data pro návrh se používá 3D skenování, které ulehčuje práci konstruktérů. [2][3]

Při stavbě závodního vozu si musí tým sehnat veškeré potřebné prostředky, jako jsou finanční prostředky, materiálové prostředky, členy, know-how, apod. Studenti si musí celý vůz nejprve navrhnut dle platných pravidel soutěže, k čemuž je používán software Solidworks popřípadě Autodesk Inventor. Navrhnuté díly musí být řádně spočítány a pomocí softwaru pak provedena simulace buď pevnostní nebo aerodynamická. K simulaci lze použít již zmíněný software, popřípadě speciálně určený, jako je například Ansys nebo Lotus suspension. Díly si tým může vyrobit sám, zadat externí firmě, nebo je nakoupit jako hotové díly. Poté se díl namontuje na vůz. Díly související přímo s bezpečností musejí mít certifikaci FIA, aby mohly být použity. Jedná se například o bezpečnostní pásy, nárazový prvek apod. Pro trubkový rám, mimo ostatních podmínek pravidel, musejí být dále vyhotoveny pevnostní simulace a kontrolní svařenec z trubek ve tvaru T, pro kontrolu svarů. [2][3][4]

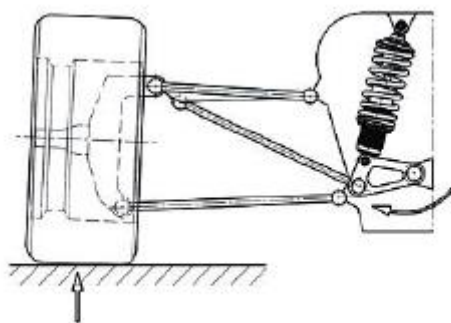
## **4.2 Závodní monopost týmu CULS**

Studentský tým CULS již postavil 5 monopostů První monopost vznikl v roce 2013 a během nasbíraných zkušeností se podařilo závodnímu týmu v roce 2018 vyjet 3. místo v disciplíně Skid-pad v České republice a 5. místo v disciplíně Endurance v Itálii. Nyní se zabývá vývojem nového monopostu, kde se především soustředí na vylepšení stávajících řešení a zároveň vývojem nových komponentů, které vychází z předchozích zkušeností a poznatků.

## 4.2.1 Současný stav

Na současném vozu s označením FS5 jsou ramena zavěšení řešena kruhovou trubkou o průměru 18 mm a tloušťkou stěny 1,5 mm z materiálu legované slitiny oceli 25CrMo4. Tento materiál je velmi pevný, zároveň i lehký a je z něj dělaný celý rám vozu, proto se zdá být logické, že předchozí členové týmu použili tento materiál i na prvky zavěšení. Tento druh oceli se vyznačuje střední prokalitelností a obtížnou svařitelností.

Geometrie vozu je řešena lichoběžníkovým zavěšením. Zavěšení je řešeno na principu Pull-rod, kdy je spojovací tyč namáhána při zdvihu kola tahem. Výhodou je příznivé ovlivnění těžiště vozu, protože celá sestava tlumiče a vahadlo jsou umístěny v blízkosti vozovky (Obr. 2). U FS5 je celá tato sestava v podlaze vozu. Další výhodou je patrná z názvu Pull-rod a spočívá v tom, že namáhání tyče je tahem, což je nejpříznivější namáháním vůbec. Nevýhodou řešení Pull-rod je menší převodový poměr na vahadlu z důvodu omezeného prostoru mezi horním ramenem a světlou výškou vozu, tzn. horší kinematické poměry, které vycházejí z rozkladu sil. I přes tuto nevýhodu je toto řešení použito na přední nápravě už u pěti generací vozu týmu CULS a na zadní nápravě se na typ pull-rod přešlo hned od druhé generace vozu. [2]



Obr. 2 - Způsob přenosu zdvihu kola na tlumič – tahová tyč s vahadlem



## 4.2.2 Možnosti nového návrhu

Nový závodní vůz, který konstruuje tým CULS Prague Formula Racing s označením FS6, vychází z předchozího modelu FS5. U nového vozu je hlavním cílem snížení hmotnosti a vývoj nových zlepšených řešení různých dílů a sestav. Můj přínos spočívá ve zlepšení řešení podvozku vozu, především odlehčení neodpružených částí použitím lehčích a pevnějších materiálů. Co se týče tvaru podvozku vozu, bylo rozhodnuto, že stávající nastavení je vyhovující, tedy že geometrie zůstane zachována, tzn. bude znovu použit lichoběžníkový tvar zavěšení s typem Pull-rod.

Když se podíváme na řešení ostatních týmů Formule student, můžeme pozorovat různé použití materiálů, jako jsou například slitiny ocelí, hliníků a kompozitní materiály z uhlíkových vláken. Jsou použity i různé tvary, jako kruhové trubky, obdélníkové tyče a trubky, nebo i specifické tvary, jako jsou například hliníková ramena nebo speciální tvar ramen z uhlíkových vláken zobrazených na Obr. 3 a Obr. 4.[4]



*Obr. 3 - Hliníková ramena [5]*



*Obr. 4 - Speciální tvar ramen z uhlíkových vláken [6]*

Pro nový návrh je však důležité zahrnout možnosti týmu CULS Prague Formula Racing. Cílem je tedy udělat takové řešení, které nebude finančně, a hlavně servisně náročné.

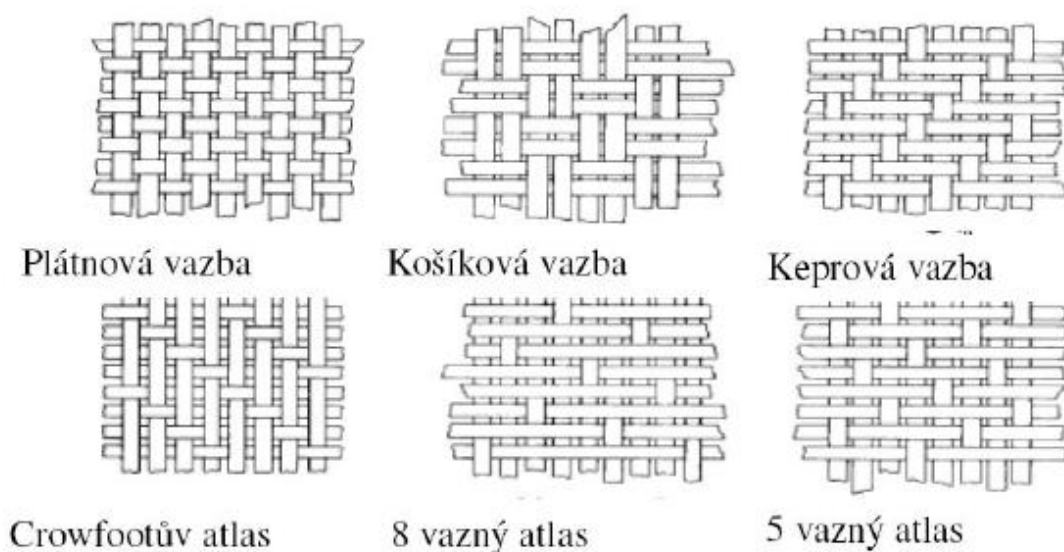
Pro nové řešení byly vybrány dva rozdílné materiály, které se používají a v historii týmu ještě nebyly pro tento účel vyzkoušeny. První je kompozit z uhlíkových vláken a druhý ze slitiny hliníku.

#### **4.2.2.1 Uhlíková vlákna**

Základem uhlíkových vláken je uhlík, který je nedílnou součástí živých organismů, a jeho sloučeniny jsou důležitým energetickým zdrojem lidstva. Takovými sloučeninami jsou například fosilní paliva, zemní plyn a uhlí. Pro výrobu uhlíkových vláken se používají smoly, které vznikají jako zbytky po destilaci černého uhlí a ropy. Tzv. mezofázové smoly jsou vysoce pevná a tuhá vlákna. Za vynálezce uhlíkových vláken je označován T. A. Edison, který již roku 1879 zveřejnil svůj vynález žárovky s karbonizovaným bambusovým vláknem, avšak jejich průmyslová výroba začala až od 50. let 20. století. Dnes se uhlíková vlákna vyrábějí převážně z vláken polyakrylonitrilových (PAN) a nejnověji z vláken novoloidu – vláken fenol – aldehydových. Tato vlákna mají široké spektrum mechanických vlastností a díky pevným kovalentním vazbám orientovaným do podélné osy jsou vlákna velmi pevná v tahu. Proto jsou

komponenty z uhlíkových vláken navrhovány tak, aby vlákno bylo namáháno na tah. Lze ale skládat soubory vláken pod úhlem, aby odolala vícesměrnému zatížení. Nevýhodou tohoto materiálu je jeho křehkost. Přetržení nastává již při 2 % poměrného prodloužení. Hustota je od 1400 do 2000 kg/m<sup>3</sup>. I přes vysokou hustotu je materiál velmi lehký. U běžně dostupných vláken dosahuje pevnost v tahu 1000 MPa a modul pružnosti v tahu < 100 GPa. U vláken s vysokými mechanickými parametry lze dosazovat pevnosti v tahu 3,5 – 7 GPa a modul pružnosti 230 – 930 GPa. [7][8]

Výrobky z uhlíkových vláken se vyrábějí jako kompozitní materiály, které jsou složeny ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně rozdílných složek. Pevnější, tvrdší a tužší složka se nazývá výztuž (např. uhlíkové vlákno), spojitá a poddajnější složka, která plní funkci pojiva, se nazývá matrice (nejpoužívanější jsou nenasycené polyestery, vinylestery, epoxidy a fenolické pryskyřice). Uhlíková vlákna se vyrábějí ve sdružených pramenech několika tisíců vláken, tzv. roving. Ten se následně zpracovává do různých druhů pláten (Obr. 5), nejčastěji do plátňové vazby. [8]



Obr. 5 - Ukázka druhu tkanin [9]

Výroba vláken a posléze i cena výrobku je dosti vysoká. Tento materiál se používá v leteckém, kosmickém a automobilovém průmyslu a v závodních speciálech, kde je upřednostňován pro svou pevnost a nízkou hmotnost. Vytváří se subtilní, zpravidla skořepinové konstrukce, kdy díky mechanickým vlastnostem materiálu, může být skořepina tenčí a tím pádem lehčí oproti koncepčním ocelovým konstrukcím.[8]

#### 4.2.2.2 Slitiny hliníku

Slitiny hliníku patří spolu s ocelí k hojně používaným kovovým konstrukčním materiálům. Čistý hliník se v praxi nepoužívá z důvodu nízké pevnosti, proto jsou přidávány různé legující prvky. Výroba hliníku se datuje od roku 1886 a roku 1906 byla vyvinuta první slitina hliníku známá jako dural (AlCu4Mg). Tato slitina znamenala převrat v průmyslu, začala se hojně používat při stavbě vzducholodí a letadel, dnes se hojně používá i v automobilovém průmyslu. Hlavními výhodami slitin hliníku jsou nízká měrná hmotnost a poměrně dobrá pevnost, která je srovnatelná nebo lepší než u řady ocelí.[10]

### 4.3 Zkoušky materiálů

Pro charakteristiku materiálu z hlediska pevnosti je potřeba provést zkoušku tahem, pro zjištění materiálových hodnot jako je především mez pevnosti a modul pružnosti. Tyto charakteristiky musejí být stanoveny především pro kompozitní materiály uhlíkových vláken a z důvodu absence těchto hodnot od prodejce, popřípadě od výrobce.

#### 4.3.1 Zkouška tahem

Tato zkouška je základní mechanickou zkouškou s jednoosým tahem, díky svému jednoduchému a účelnému principu se jedná o nejrozšířenější zkušební metodu pro zjištění především meze kluzu  $R_{eh}$ ,  $R_{eL}$ ,  $R_{p0,2}$ , meze pevnosti  $R_m$ , tažnosti  $A$  a kontrakce  $Z$ . Z těchto hodnot lze dále stanovit modul pružnosti  $E$ , mez pružnosti  $R_{px}$ , nebo koeficient  $k$  deformačního zpevnění. [11][12]

Principem zkoušky je deformace zkušební tělesa jednoosým tahem a následné přetržení. Zkušební těleso má předepsané rozměry dle zkušební normy. V normě bývají popsány i rychlost zatěžování. Zkouška se provádí za normálních teplot okolního prostředí, tedy od 10 °C do 35 °C. Ve speciálních případech lze zkoušky provádět i za zvýšených teplot. Zkušební těleso se upne do dvou upínacích hlav. Tvary upínacích hlav se liší podle zkušební

tělesa, mohou být pro rovinné, nebo kruhové plné či duté profily, popřípadě jiné speciální tvary. Zkušební tělesa mohou být obrobena, nicméně základní polotovary, jako například dráty, tyče a podobně se obrábět nemusí. [11][12]

Při provádění zkoušky se upne zkušební těleso do upevňovacích čelistí obou hlav a poté se pomocí zkušebního stroje zatěžuje těleso tahovou silou  $F$ , jejíž síla se měří pomocí siloměru na jedné z upevňovacích hlav. Dále se měří prodloužení zkušebního tělesa  $\Delta L$ . Tyto hodnoty se zaznamenávají až do porušení zkušebního tělesa. Výstupem zkoušky bývá tahový diagram uvádějící výsledky v jedněch z následujících hodnot.

- v absolutních hodnotách  $F - \Delta L$
- v poměrných hodnotách konvenčních veličin  $\sigma - \varepsilon$
- v poměrných hodnotách skutečných veličin  $\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}$
- v poměrných hodnotách skutečných veličin  $\bar{\sigma} - \bar{\psi}$

Nejčastěji se používá diagram zaznamenaný v poměrných hodnotách konvenčních veličin, tento diagram je však shodný s diagramem zaznamenaným v absolutních hodnotách. [11][12]

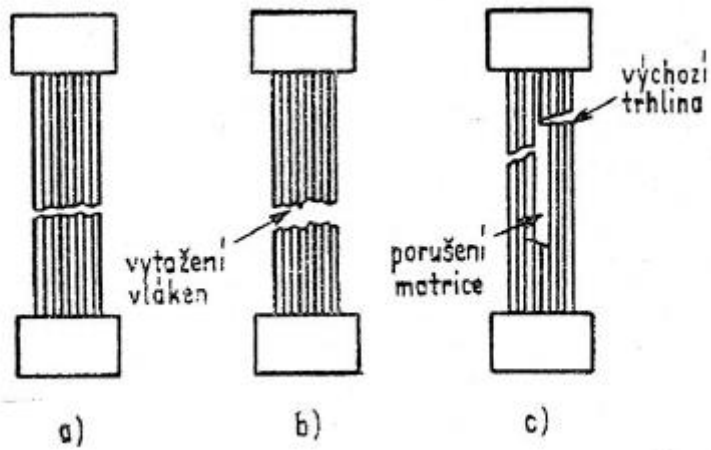
U kovových materiálů může dojít ke čtyřem základním typům lomů [11]:

- tvárný – lom má tvar charakteristické plochy pro většinu tvárných a houževnatých materiálů
- křehký – vzniká v rovině maximálního normálového napětí, lomová plocha je rovinná, vzniká v křehkých materiálech
- smykový – v rovinách s největším smykovým napětím – plochy svírají se směrem zatěžující síly úhel  $45^\circ$
- bodový – kontrakce dosahuje téměř hodnoty 100 % a k lomu dochází tedy na velmi malé ploše – bodové, toto nastává u vysoce plastických materiálů

U kompozitních materiálů při tahovém podélném namáhání dochází ke třem základním mechanismům porušení, které závisí na mechanických vlastnostech komponent a technologii kompozitu.

- a) křehký porušení
- b) křehké porušení s vytažením vláken
- c) křehké porušení s oddělením složek, nebo porušením matrice

Vytažení vláken z matrice závisí na pevnosti vlákna a na přenosu zatížení mezi matricí a vláknem. Uvedení příklady porušení jsou znázorněny na Obr. 6 [13].



Obr. 6 - Základní mechanismy porušení dlouhvláknového kompozitu [13]

#### 4.3.2 Napěťové charakteristiky

U zkoušek s jednoosým napětím tahem se určuje modul pružnosti v tahu  $E$ , mez pružnosti v tahu, mez úměrnosti, mez kluzu a mez pevnosti.

### 4.3.2.1 Modul pružnosti

Modul pružnosti neboli také Yongův modul vyjadřuje poměr napětí a jím vyvolané deformace. Zjišťuje se z lineární části tahového diagramu a závisí na atomovém objemu. Se zmenšujícím se poloměrem atomu narůstá měrná váha a modul pružnosti. Modul pružnosti se odvíjí od toho, jakým napětím se zjišťuje, tedy modul pružnosti v tahu, nebo modul pružnosti ve smyku. Pro tahovou zkoušku se určuje modul pružnosti v tahu. Tento modul se vyjadřuje následujícím vzorcem. [12]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [GPa] \quad (1)$$

### 4.3.2.2 Mez pružnosti

Mez pružnosti je charakterizována jako maximální hodnota, kdy při dosažení normálového napětí dochází k pružné deformaci, při překročení této hodnoty zůstane toto těleso deformováno trvale. Maximální hodnota se zjišťuje z tahového diagramu  $F - \Delta L$ . Lze ji také vyjádřit jako poměr maximální normálové síly, kdy dochází k pružné deformaci a průřezu počáteční plochy kolmé k síle. Maximální hodnota je na Obr. 7 značena bodem E [12]:

$$\sigma = \frac{F_{E_{max}}}{S_0} [MPa] \quad (2)$$

### 4.3.2.3 Mez úměrnosti

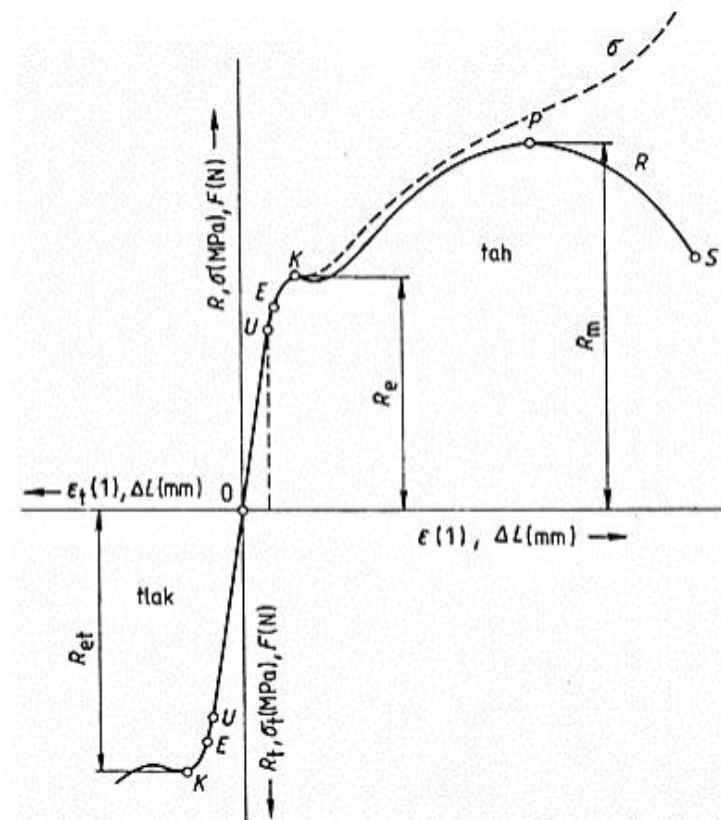
Mez úměrnosti je charakterizována jako největší napětí, při kterém ještě platí Hookův zákon. Je to maximální hodnota, která značí na tahovém diagramu  $F - \Delta L$  odklon od lineárního průběhu. Na Obr. 7 tuto hodnotu značí bod U. Základní jednotka této hodnoty je Pa, respektive MPa. Hodnota pro ocel je  $E=210\,000$  MPa, mosaz má  $E=90\,000$  MPa. [12]

### 4.3.2.4 Mez kluzu

Mez kluzu charakterizuje přechod mezi elastickou a elasticko-plastickou deformací. Jedná se o napětí, při kterém začíná docházet v materiálu k plastickým deformacím. Charakter tohoto přechodu závisí na materiálu. Z tahového diagramu se mez kluzu projevuje dvěma způsoby, první je s výraznou mezí kluzu a druhý pak bez výrazné meze kluzu. Výrazná mez kluzu je definována jako napětí, při kterém se zkušební těleso trvale deformuje bez výrazného zvýšení tahového zatížení, a lze ji určit z tahového diagramu. U slitin kovů s nízkým obsahem přísad vzniká výrazná mez kluzu, která se projevuje diskontinuálním průběhem a u které můžeme popsat horní a dolní mez kluzu. Horní mez kluzu je maximální hodnota napětí  $R_e$ , která předchází prvnímu poklesu tahové síly, a lze ji vyčíst z tahového diagramu, na Obr. 7 je to bod K. Dolní mez kluzu je definována jako nejnižší hodnota napětí při plastickém kluzu. U určitých materiálů se neprojevuje výrazná mez kluzu, ale projevuje se nevýrazná nebo plynulá mez. Tato mez je charakterizována plynulým přechodem mezi elastickou a elasticko-plastickou oblastí deformace. Z tahového diagramu, kde se neprojevuje výrazná mez kluzu, hodnotu meze kluzu  $R_e$  musíme vyjádřit smluvně. Smluvní prodloužení se dá vyjádřit pomocí plastického prodloužení  $R_p$  nebo celkového prodloužení  $R_t$  určeného pomocí průtahoměru. Smluvní mez kluzu  $R_p$  se určuje ze závislosti napětí – deformace přepočítané ze závislosti zatížení, prodloužení změřeného průtahoměrem a vynesení rovnoběžky s přímkovou částí tahové charakteristiky posunutě o vzdálenost odpovídající předepsanému plastickému prodloužení v procentech měřenému průtahoměrem, např. 0,2 %  $L_0$ , tedy  $\epsilon = 0,002$ . Bod, kde se protíná rovnoběžka s tahovou křivkou diagramu, udává zatížení odpovídající smluvní mezi kluzu určené z trvalé deformace pod zatížením. Druhá možnost určení smluvní meze kluzu  $R_t$ , který se určuje ze závislosti napětí – deformace přepočítané ze závislosti zatížení, prodloužení



měřeného průtahoměrem a vynesení rovnoběžky s osou zatížení posunutou o vzdálenost předepsanou procentuálním poměrem celkového prodloužení měřenou průtahoměrem, např. 0,5 %  $L_0$ , tedy  $\epsilon = 0,005$ . Bod, kde se protíná rovnoběžka s tahovou křivkou diagramu, udává zatížení odpovídající smluvní mez kluzu určenou z celkové deformace při zatížení. [12]



Obr. 7 - Tahový diagram s výraznou mezí kluzu [12]

#### 4.3.2.5 Mez pevnosti

Mez pevnosti je definována jako napětí, které odpovídá největšímu zatížení  $F_{max}$ , kdy při překročení tohoto zatížení dochází k poruše zkušebního tělesa. Na Obr. 7 je maximální napětí dáno bodem P. Mez pevnosti je důležitou hodnotou pro charakteristiku materiálů. Je ovlivněna chemickým složením a vnitřní strukturou materiálu. Pevnost v tahu pro homogenní materiál se dá vyjádřit dle vzorce (3):

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} [MPa] \quad (3)$$

Mez pevnosti kompozitních materiálů, záleží na množství, rozložení a orientaci vláken, resp. druhu výztuže a na vlastnostech matrice. Výpočet vychází z uspořádání Voigtova modelu, který popisuje mechanické chování pevných viskoelastických těles, všechna vlákna mají stejný průřez, stejnou pevnost v tahu, jsou rovnoběžná, natažena, rovnoměrně rozdělena po průřezu a známe meze pevnosti v tahu i deformaci při lomu matrice i disperze. Model je nutno rozlišit podle poměru deformací matrice a disperze při lomu kompozitu. Při tahové zkoušce mohou nastat tyto varianty: [12]

- Tažnější matrice a méně tažná vlákna. Nejprve dojde k maximální deformaci ve vláknech, poruší se, poklesne napětí v kompozitu a dále roste napětí v matrici, než dojde úplnému přerušování. Mez pevnosti závisí na druhu matrice.
- Tažnější vlákna a méně tažná matrice. Při tahu se nejprve deformuje matrice a napětí přechází jen na vlákna. Matrice se může přerušovat opakovaně, napětí tedy roste až na mez pevnosti vláken. Tedy mez pevnosti je určena pouze množstvím a pevností vláken.

### 4.3.3 Deformační charakteristiky

Deformační charakteristiky udávají, jak je materiál tvárný, tento aspekt nám především udává tažnost  $A$  a kontrakce  $Z$ . K lokalizaci sklonu plastické deformace (ostrost krčku) se určí z podílu veličin  $Z/A$ . [12]

#### 4.3.3.1 Tažnost

Definice tažnosti se udává jako procentuální vyjádření poměrného podélného trvalého prodloužení zkušebního tělesa po přetržení ku počáteční délce.  $A$  je dána vztahem (4). [12]

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100 = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 [\%] \quad (4)$$

#### 4.3.3.2 Kontrakce

Definice tažnosti se udává jako procentuální vyjádření poměrného trvalého zúžení zkušebního tělesa (krčku průřezu) po přetržení ku počáteční šířce.  $A$  je dána vztahem (5). [12]

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100 = \frac{\Delta S}{S_0} \times 100 [\%] \quad (5)$$

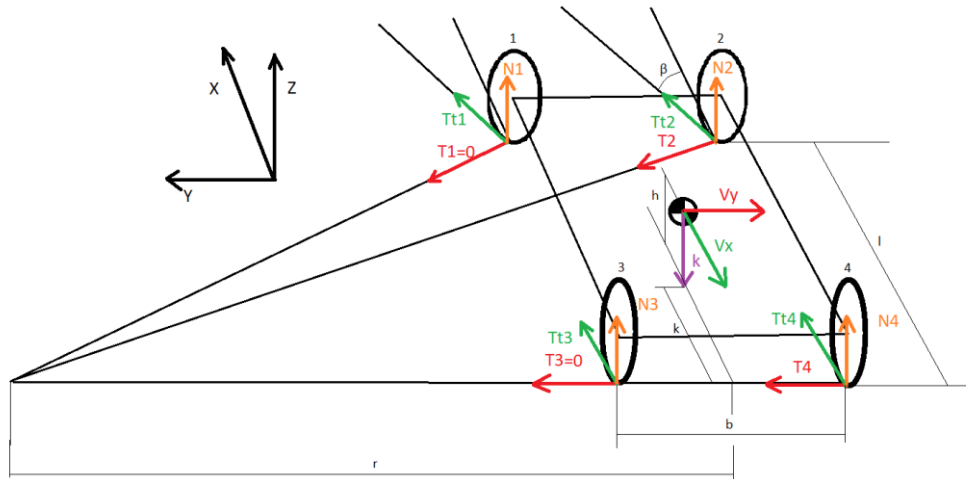
Není dáno, že kontrakce závisí na geometrii vzorku, a platí, že čím větší pevnost, tím menší je kontrakce. Se zvyšujícím se obsahem nečistot a příměsí v materiálu se velikost kontrakce rovněž snižuje. [12]

## 5 Praktická část práce

Na počátku přicházeli v úvahu dvě možnosti, jak postupovat při vlastním návrhu. Jelikož se nikdy nestalo, že by nějaká část podvozku na FS5 byla porušena, mohl být podvozek navržen na stejnou pevnost. To by však nemusela být správná volba z důvodu předdimenzování předchozího konstruktéra, proto nový návrh vycházel z identifikace maximálních sil, které na podvozek působí. Dále byla provedena tahová zkouška pro určení materiálových vlastností. Tyto parametry pak byly použity pro softwarovou simulaci v programu Autodesk Inventor s nástavbou pro pevnostní simulace Nastran a pro výsledný návrh a jeho presentaci prostřednictvím 3D modelu.

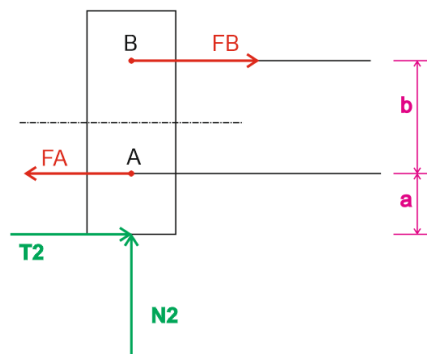
### 5.1 Výpočet maximální síly

Pro výpočet byly zvoleny čtyři případové modelové situace, které by během jízdy mohly nastat. Těmito modelovými situacemi jsou akcelerace, decelerace, zatáčení a současná akcelerace a zatáčení a současná decelerace. Výpočet byl proveden dle výpočtů uvedených v publikaci Race Car Design [14], kde jsou popsány tyto 4 modelové situace a k nim postupný výpočet. Tyto výpočty jsou velmi rozsáhlé, a proto se na nich podílelo více členů týmu. Dále je zde uveden postup přepočtu na dané body zavěšení. Síly působící na podvozek jsou znázorněny na Obr. 8, který je nakreslen ve stavu zatáčení, protože v tomto stavu na kola působí nejvíce sil. Pokud auto akceleruje nebo deceleruje, jsou zatížena zadní, resp. přední kola a přední, resp. zadní kola se zanedbávají, protože na ně působí téměř nulové síly. Při průjezdu zatáčkou většina laterálních sil působí na vnější kola a pro zjednodušení výpočtu se laterální síly na vnitřní kola rovnají nule, musí však být splněna podmínka, že u vnějších kol nedochází k prokluzu. Síly s označením  $T$  vyjadřují laterální síly,  $N$  označují normálové síly od podložky, resp. vozovky a  $Tt$  vyjadřují tečné dopředné síly. Složky  $V$  vyjadřují vektory odstředivých sil,  $k$  značí tíhovou sílu a  $h$  vyjadřuje vzdálenost těžiště od vozovky, ostatní rozměry vyjadřují velikost monopostu.

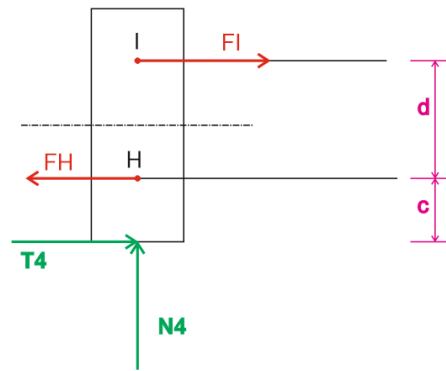


Obr. 8 - Síly působící na kola formule [vlastní]

Pro přepočet sil na body zavěšení přední a zadní nápravy se náčrt zjednodušuje do 2D skici, kdy se pomocí statické rovnováhy sil přepočítají síly na body. Na Obr. 9 a Obr. 10 je schématický náčrt směru a působení sil. Rozměry jsou dány z geometrie podvozku. Působící síly na podvozek T a N vycházejí z předchozí výpočtu.



Obr. 9 - Přepočet na body zavěšení přední nápravy [vlastní]



Obr. 10 - Přepočet na body zavěšení zadní nápravy [vlastní]

## 5.2 Tahová zkouška

Pro svůj návrh jsem se rozhodl použít kompozitní materiál z uhlíkového vlákna a slitiny hliníku. Při samotném navrhování jsem však nenašel materiálové listy pro kompozitní materiály z uhlíkových vláken. Byla tedy použita tahová zkouška pro získání materiálových hodnot. Pro test jsem zvolil desku z uhlíkových vláken o tloušťce 2 mm a 3 mm, dvě tloušťky jsem zvolil z důvodu porovnání. U uhlíkových vláken záleží na skladbě vláken, proto u desky tloušťky 2 mm byly provedeny dva typy, jeden, kdy tahová síla působí v ose vlákna, a druhý, kdy tahová síla působí pod úhlem  $45^\circ$  s osou vlákna. Kompozit z uhlíkových vláken jsem zvolil především pro svou exkluzivitu, jeho velkou pevnost v tahu a u hodnotící komise se díky tomuto materiálu dostávají bonusové body do celkového hodnocení soutěže. Dále byly zvoleny dva druhy slitin hliníku, první s označením EN AW 2024 (ČSN 42 4203) s chemickým složením AlCu4Mg neboli tzv. Dural. Tento materiál byl použit především pro jeho dostupnost, použitelnost a pro svou vyšší pevnost v tahu. Druhá slitina hliníku s označením EN AW 7075 má chemické složení AlZn5,5MgCu. Tento materiál jsem zvolil z důvodu vysoké pevnosti v tahu, avšak jeho velká nevýhoda je snížená odolnost proti korozi, což se projevilo už na zkušebním tělese, na kterém díky řezání pomocí vodního paprsku vznikla do druhého dne oxidace na povrchu. Materiálové hodnoty slitin hliníku, které jsem vybral, udává prodejce ehliník.cz a jsou vypsány v Tab. 3:

Označení dle EN AW	Označení dle ČSN	Označení dle chem. složení	Pevnost v tahu Rm [MPa]	Mez kluzu min Rp [MPa]	Tažnost A [%]
2024	424 203	AlCu4Mg	Min. 400	270	8
7075	-	AlZn5,5MgCu	Min. 470	400	6

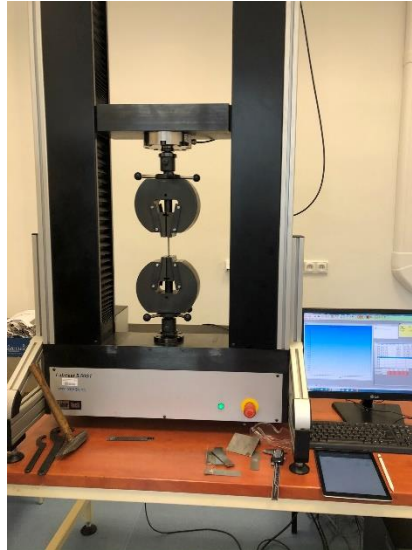
Tab. 1 - Materiálové hodnoty udávané prodejcem ehlinik.cz [14]

Tahová zkouška byla provedena na univerzálním zkušebním stroji LabTest 5.50ST pro tahové a tlakové zkoušky, který vlastní ČZU v Praze. Na Obr. 11 jsou popsána základní technická data pro tento stroj. Celé pracoviště je zobrazeno na Obr. 12.

#### Základní technická data stroje LabTest 5.50ST

Maximální zkušební síla	50kN
Výška pracovního prostoru	1181 mm
Šířka pracovního prostoru	400 mm
Minimální zkušební testovací rychlost	0.001 mm/min
Maximální zkušební testovací rychlost	600 mm/min
Rozlišení polohy příčnicku	1μm
Opakovatelnost změny polohy	2μm
Přesnost řízení rychlosti	± 0.5%
Barečná úprava	RAL 9005, elox
Teplota pracovního prostředí	10-35°C
Vlhkost pracovního prostředí	20-70%
Hmotnost zkušebního zařízení	368Kg
Tuhost příčnicku	2.3x10 <sup>-6</sup> N/mm
Možnost řízení stroje v silové a poziční smyčce (FULL STEP)	
Rozměry stroje výška x šířka x hloubka	1683x860x760 mm
Elektrické napájení	
Napájení stroje	230V 50/60 Hz
Příkon	1200 VA
Připojovací konektor	230V

Obr. 11 - Základní technická data stroje LabTest 5.50ST

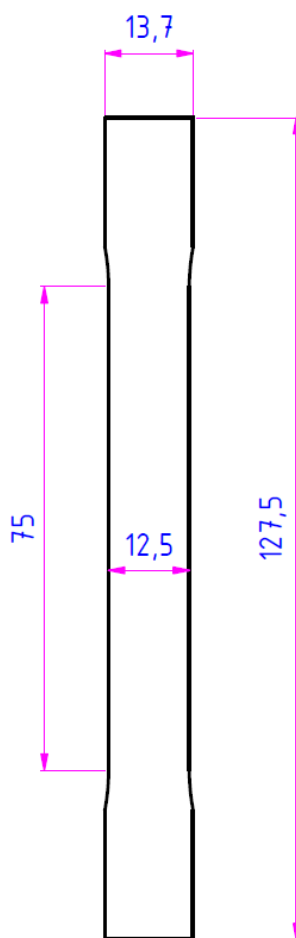


*Obr. 12 - Pracoviště tahové zkoušky na stroji LabTest 5.50ST [vlastní]*

Stroj je osazen silovým snímačem KAF–50kN–AST s měřícím rozsahem 200 N–50 kN a klánovými samosvornými čelistmi. Pro řízení stroje a zápis výsledků byl použit software Test&Motion. Následná data byla zpracována v softwaru Microsoft Excel.

Pro testování byly použity vzorky a metoda měření podle normy ČSN EN ISO 6892-1 – Kovové materiály – zkouška tahem, tato norma pojednává o zkoušení kovových materiálů. Po dohodě s vedoucím diplomové práce je tato metoda použita i pro kompozitní materiály, aby bylo možné výsledky porovnat mezi sebou. Tato norma předepisuje zkušební vzorek o rozměrech uvedených na Obr. 13. Tento vzorek byl použit pro všechny vybrané materiály.





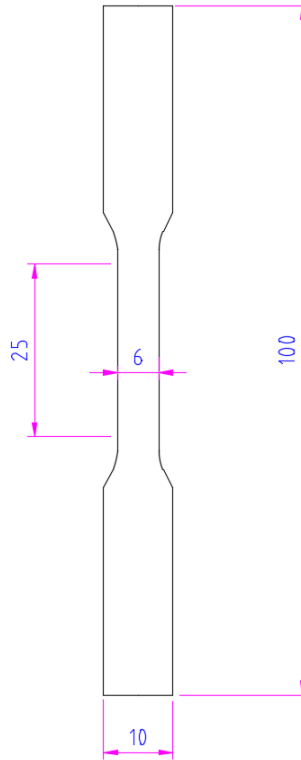
Obr. 13 - Zkušební těleso pro zkoušku tahem [vlastní][15]

Základní materiál pro vzorky byl pořízen z grantu IGA. Vzorek byl vyříznut na vodním paprsku firmou ENVI-PUR, s.r.o. dle požadovaného výkresu. Na Obr. 14 lze vidět, že kvůli malým rozměrům zkušebního tělesa se muselo kvůli řezání a následnému vyndání těles udělat přemostění mezi zkušebním tělesem a základním materiálem, jinak by došlo k propadnutí těles do záchytné vany. Tento můstek sice zůstává na tělese, to však ničemu nevadí, protože je umístěn v upevňovací části zkušebního tělesa.



*Obr. 14 - Ukázka vyříznutých vzorků pro tahovou zkoušku [vlastní]*

Dále byla ještě použita zkušební tělesa dle normy ASTM E8, kdy se jedná o americkou normu. V různých odborných publikacích se vzorky podle této normy používají nejčastěji pro kompozitní materiály z uhlíkových vláken [16]. Pro tento typ vzorků se však používá jiný zkušební postup, ale z důvodu porovnání výsledků byla zkouška provedena dle normy ČSN EN ISO 6892-1 jako předchozí vzorky. Výkres vzorku je na Obr. 15 a je z něj patrné, že tento vzorek je oproti české normě menší, má však větší úchytové konce, proto se zdá, že tento vzorek bude vhodnější pro kompozitní materiály.

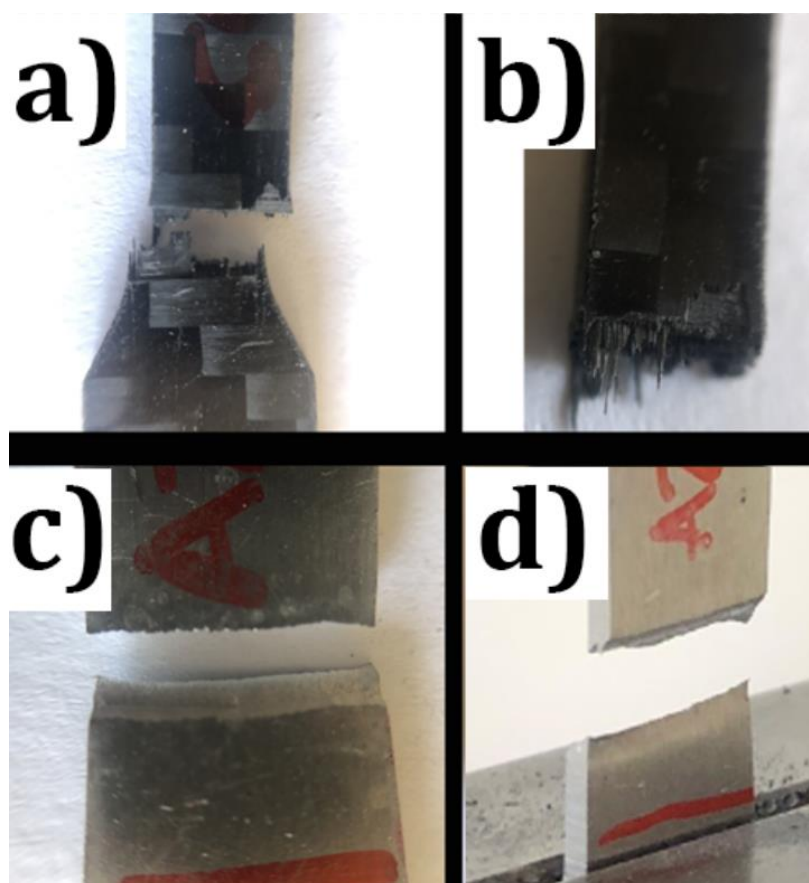


Obr. 15 - Zkušební vzorek dle ASTM E8 [vlastní][17]

### 5.2.1 Postup práce při tahové zkoušce

Tahová zkouška byla prováděna na univerzálním zkušebním stroji LabTest 5.50ST. V řídicím softwaru jsem nastavil tahovou rychlost 4 mm/s, tato rychlost je předepsána normou pro tyto zkušební tělesa. Pro vyhodnocení výsledků jsem nastavil do softwaru, aby zapisoval tyto parametry: čas zkoušky  $t$ , dráhu posunu čelistí  $s$ , zatěžující sílu  $F$  a celkové protažení. Dále jsem roztrídil zkušební tělesa podle materiálů a označil je pro jejich další identifikaci, označení je uvedeno v Tab. 2. Bylo vybráno šest kusů zkušebních těles od každého druhu tělesa a materiálu. Před provedením zkoušky jsem u tělesa změřil jeho šířku a tloušťku a zapsal je pro pozdější vyhodnocení. Těleso jsem umístil mezi čelisti a utáhl, aby těleso bylo pevně zachyceno v čelistech. Poté jsem spustil software pro měření. Stroj začal roztahovat čelisti od sebe a zapisovat měřená data. Po přetržení zkušebního tělesa došlo k zastavení zkoušky a data se zapsala do Excelu. Po vyndání roztrženého tělesa jsem pomocí ovládacího softwaru vrátil stroj do výchozí polohy a vynuloval uložená data. Postup jsem následně opakoval pro ostatní tělesa.

Po ukončení měření jsem zpracoval výsledky. Z naměřených dat byla vypočítána mez pevnosti, modul pružnosti, dále byla stanovena mez pružnosti. Na Obr. 16 lze vidět ukázkou lomů vzorků po ukončení zkoušky tahem. Vzorek a) je kompozit z uhlíkového vlákna o tloušťce materiálu 2 mm, na tomto vzorku lze vidět křehké porušení s vytažením vláken, to značí křehkost materiálu a větší pevnost vláken než základní matrice. Na vzorku b) můžeme vidět taky kompozit z uhlíkového vlákna o tloušťce 2 mm i u tohoto vzorku došlo ke křehkému lomu s vytažením vláken. Na vzorku c) a d) jsou zobrazen lomy u slitiny hliníku, na obou vzorcích je vidět křehký až smykový lom.



*Obr. 16 – Ukázka lomu vzorků po zkoušce [vlastní]*

Popis vzorku	Polotovar	Tloušťka \ úhel vláken	Norma vzorku
<b>C3</b>	Deska z uhlíkových vláken	3	ČSN EN ISO 6892-1
<b>C20</b>	Deska z uhlíkových vláken	2\0	ČSN EN ISO 6892-1
<b>C25</b>	Deska z uhlíkových vláken	2\45	ČSN EN ISO 6892-1
<b>A2</b>	Plech EN AW 7075	2	ČSN EN ISO 6892-1
<b>D2</b>	Plech EN AW 2024	2	ČSN EN ISO 6892-1
<b>CX1.5</b>	Deska z uhlíkových vláken	2\45	ČSN EN ISO 6892-1
<b>AC3</b>	Deska z uhlíkových vláken	3\0	ASTM E8
<b>AC2</b>	Deska z uhlíkových vláken	2\45	ASTM E8
<b>AA2</b>	Plech EN AW 7075	2	ASTM E8
<b>AD2</b>	Plech EN AW 2024	2	ASTM E8

Tab. 2 - Vysvětlivky popisků vzorků

### 5.3 Pevnostní simulace a 3D model zavěšení kol

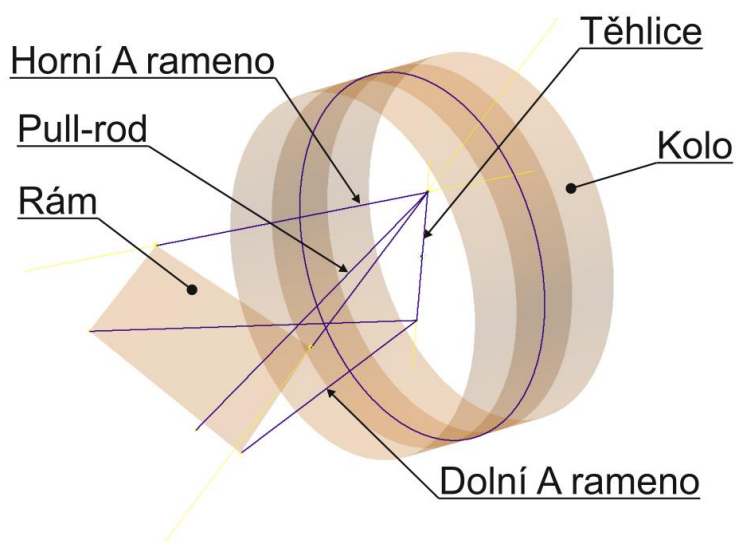
Pro pevnostní simulace musel být vytvořen 3D model. Model byl vytvořen v programu Autodesk Inventor a pro pevnostní simulace byli použity nastavby Pevnostní simulace a Nastran. Pevnostní simulace se hodí více na hotový 3D model a nastavba Nastran pro čárový model, kde se na čáry definuje polotovar. Ze známých bodů, které vychází z monopostu FS5, byl vytvořen nejprve čárový model jak předního zavěšení (Obr. 17), tak i zadního. Čáry určují program geometrii a body uchycení, na ně lze poté libovolně volit různé polotovary. Tento model slouží pro rychlou analýzu složité sestavy a usnadňuje následnou volbu vhodného řešení. Po spuštění simulace, lze z výsledků vyčíst maximální von Mises napětí, maximální protažení a koeficient bezpečnosti. Pokud však není zvolen materiál, výsledkem simulace je jen maximální napětí von Mises.

Napětí von Mises je založeno na teorii Mises-Hencky, známe také jako teorie smykové energie nebo teorie maximálního zkreslení. Podle této teorie se začínají ohebné materiály roztahovat, když se napětí von Mises začíná rovnat mezi napětí. Ve většině případů je mez

kluzu použita jako mez napětí. Software nicméně umožňuje použít pevnost tahu nebo nastavit vlastní mez napětí. [18]

Pro provedení simulace jsou důležitá vstupní data, především zatěžující síla, která byla vypočítána z modelových situací, a pro ověření výsledku návrhu i pevnostní parametry vybraných materiálů, které byly získány pomocí tahové zkoušky materiálu.

Posledním krokem pevnostní simulace je provedení simulace na hotový 3D model se všemi detaily. Pokud je model příliš složitý, z důvodu úspory času a výpočetní kapacity lze simulaci provést na zjednodušeném modelu. Na simulaci kompletního modelu se ukáží kritická místa s velkou koncentrací napětí. Tyto místa lze následně optimalizovat.



Obr. 17 - Čárový model předního zavěšení [vlastní]

## 6 Výsledky a diskuze

### 6.1 Výpočet maximální síly – výsledky

Výsledné hodnoty maximálního zatížení pro všechny modelové situace jsou vypsány v Tab. 3. Největší napětí vychází v modelu 3, kdy dochází k současnému zatáčení a akceleraci. Tato situace je na závodní dráze nejčastější, proto veškeré návrhy konstrukcí jsou dimenzovány na tyto maximální síly. Pro další výpočet byly použity maximální hodnoty laterálních a normálových sil na přední a zadní kola.

	T2	T4	N1	N2	N3	N4
<b>Model 1</b>	0 N	0 N	0 N	0 N	1 238 N	1 238 N
<b>Model 2</b>	0 N	0 N	1 700 N	1 700 N	324 N	324 N
<b>Model 3</b>	2 848 N	2 807 N	226 N	1 695 N	1 432 N	1 966 N
<b>Model 4</b>	2 801 N	2 735 N	1 521 N	1 925 N	215 N	1 622 N

*Tab. 3 - Maximální působící síly na kola*

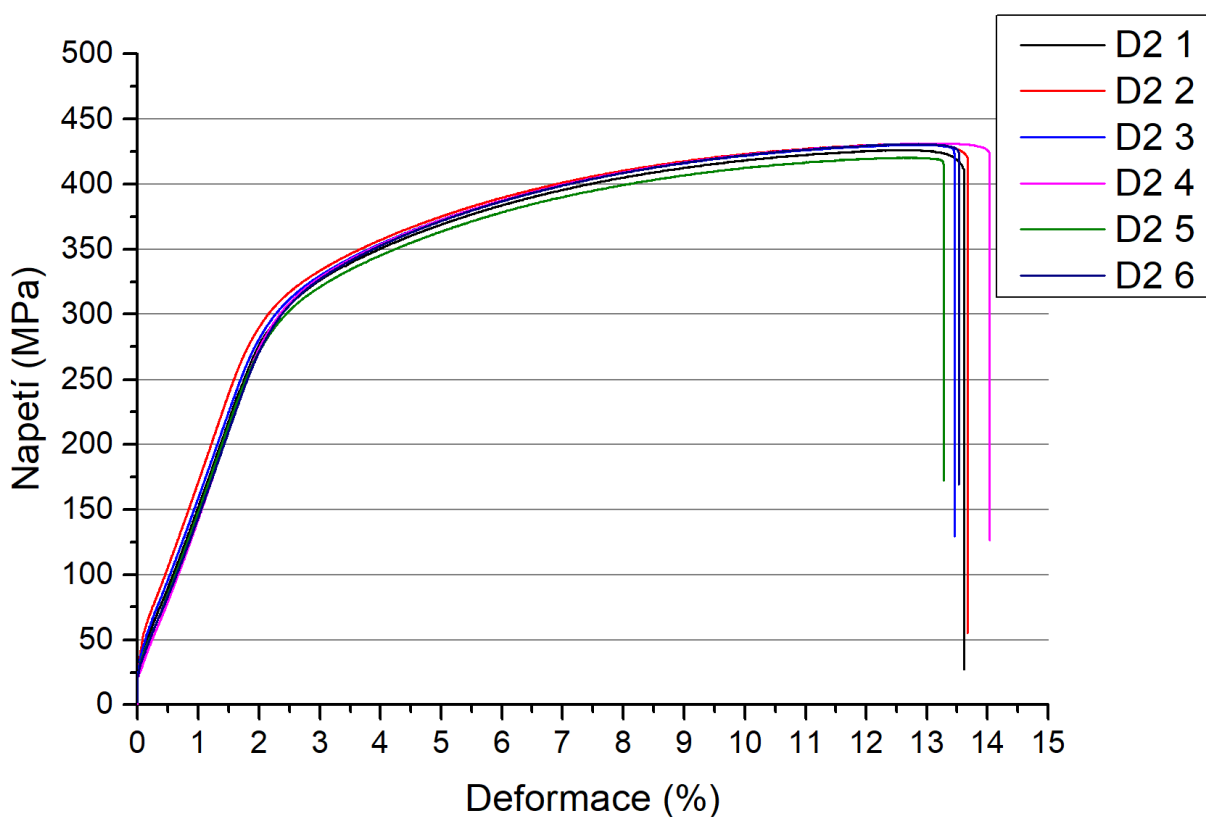
Pro přepočet sil na body zavěšení přední a zadní nápravy se náčrt zjednodušuje do 2D skici, kdy se pomocí statické rovnováhy sil přepočítají síly na body. Na Obr. 9 a Obr. 10 je schématický náčrt směru a působení sil. Výsledné hodnoty jsou v Tab. 4, velikost normálových sil je stejná jako v Tab. 3, jen se dělí do bodu A a B, resp. H a I. Tyto síly byly následně použity do výpočtu simulací zavěšení kol.

<b>FA</b>	4 070 N
<b>FB</b>	1 223 N
<b>FH</b>	4 920 N
<b>FI</b>	2 113 N

*Tab. 4 - Maximální síly v bodech zavěšení*

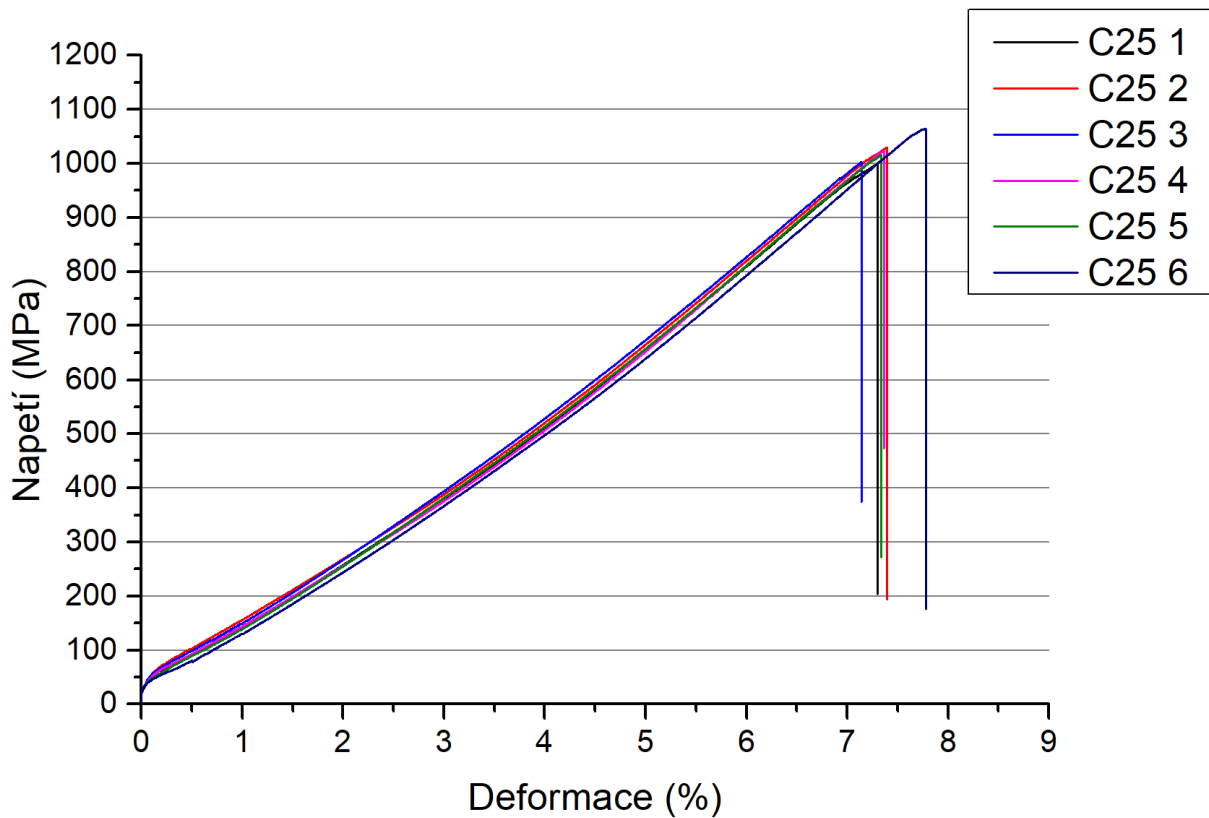
## 6.2 Výsledky měření zkoušky tahem

Z výsledků tahové zkoušky byly vytvořeny tahové diagramy. Jsou zde uvedeny dva ukázkové tahové diagramy. Graf 1 znázorňuje průběh závislosti napětí na protažení slitin hliníku u všech šesti zkušných vzorků. U tahových diagramů obou slitin hliníku lze pozorovat nevýraznou mez kluzu, proto u těchto materiálů byla mez kluzu stanovena jako  $R_{p0,2}$ , tedy pomocí Hookova zákona, kdy byla dána hodnota  $\epsilon = 0,2 \% L_0$ . Z meze kluzu  $R_{p0,2}$  a zvoleného koeficientu bezpečnosti bylo stanoveno dovolené napětí pro navrhování  $\sigma_D$ . Výsledné materiálové hodnoty pro zvolené slitiny hliníku jsou uvedeny v Tab. 5. Graf 2 znázorňuje průběh závislosti napětí na protažení kompozitu uhlíkových vláken šesti zkušných vzorků. U těchto materiálů není žádná mez kluzu, což značí, že je materiál křehký. Volba dovoleného napětí  $\sigma_D$  pro navrhování byla stanovena z maximálního napětí a koeficientu bezpečnosti. Výsledné materiálové hodnoty pro kompozity z uhlíkových vláken jsou uvedeny v Tab. 6.



Graf 1 - Tahový diagram materiálu EN AW 2024





Graf 2 - Tahový diagram materiálu z uhlíkových vláken

Popis veličiny	Veličina	Materiál			
		A2	AA2	D2	AD2
Šírka zk. tělesa	b	12.01 mm	6.15 mm	11.98 mm	5.98 mm
Tloušťka zk. tělesa	tl	1.96 mm	2.00 mm	1.99 mm	2.04 mm
Obsah zk. Tělesa	S	23.56 mm <sup>2</sup>	12.26 mm <sup>2</sup>	23.86 mm <sup>2</sup>	12.20 mm <sup>2</sup>
Max naměřená síla tahu	Fmax	13 927.63 N	6 871.20 N	10 220.12 N	5 018.86 N
Mez pevnosti	$\sigma_{max}$	591.10 MPa	562.41 MPa	428.35 MPa	411.30 MPa
Smluvní mez kluzu	Rp0.2	540.00 MPa	540.00 MPa	320.00 MPa	320.00 MPa
Max potažení	$\Delta l$	11.41 mm	5.26 mm	16.35 mm	7.01 mm
Puvodní délka vzorku	l0	127.50 mm	100.00 mm	127.50 mm	100.00 mm
Koncová délka vzorku	l	138.91 mm	105.26 mm	143.85 mm	107.01 mm
Koeficient bezpečnosti	k	1.30	1.30	1.30	1.30
Sigma dovolená	$\sigma_D$	415.38 MPa	415.38 MPa	246.15 MPa	246.15 MPa
Poměrná deformace	$\epsilon$	0.09	0.05	0.13	0.07
Modul pružnosti v tahu	E	6.60 GPa	10.70 GPa	3.34 GPa	5.87 GPa

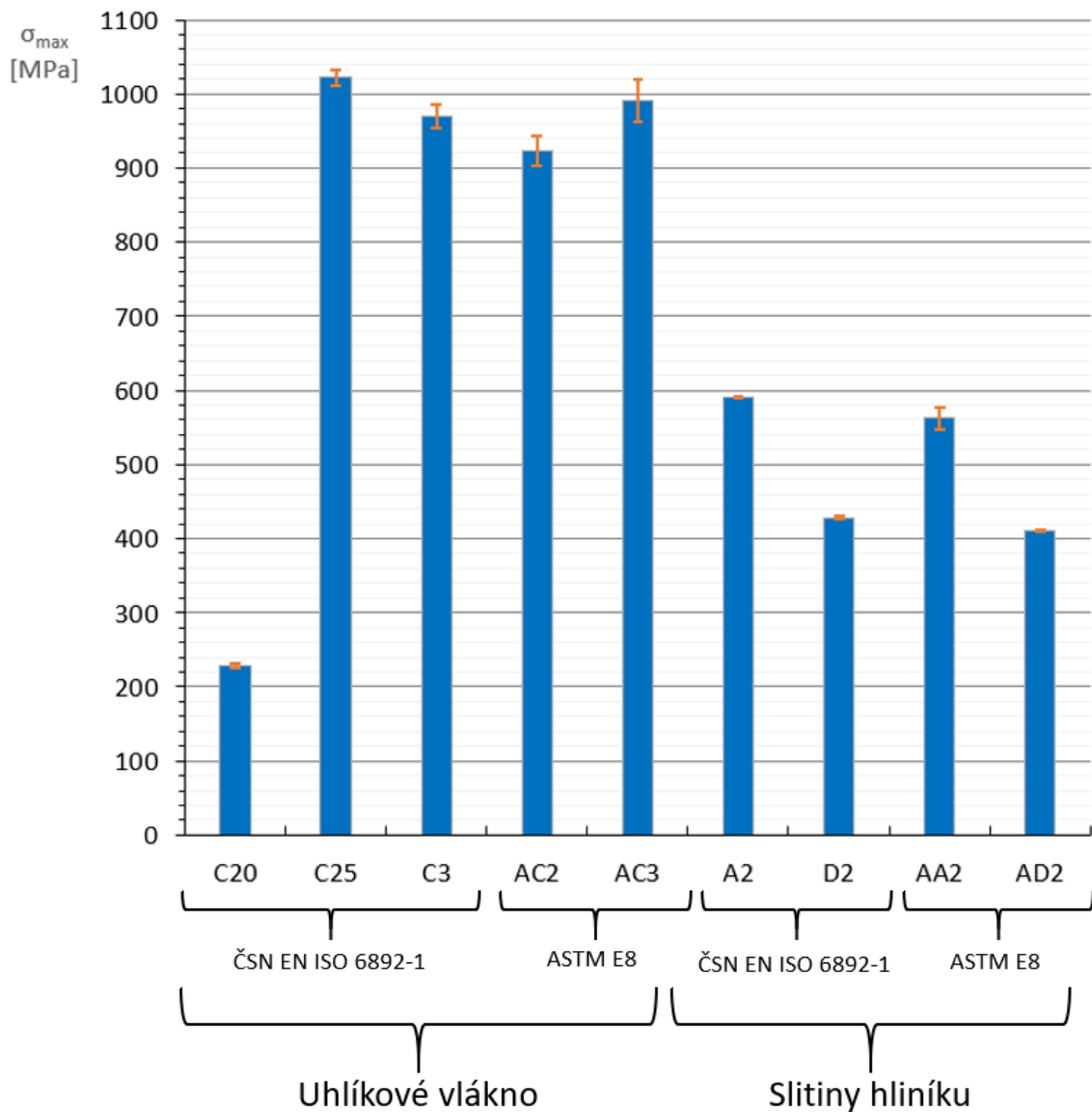
Tab. 5 - Výsledné hodnoty pro slitiny hliníku

Popis veličiny	Veličina	Materiál				
		C20	C25	AC2	C3	AC3
Šírka zk. tělesa	b	12.29 mm	12.26 mm	5.88 mm	12.25 mm	5.84 mm
Tloušťka zk. tělesa	tl	1.94 mm	1.92 mm	1.89 mm	3.02 mm	2.96 mm
Obsah zk. Tělesa	S	23.87 mm <sup>2</sup>	23.53 mm <sup>2</sup>	11.13 mm <sup>2</sup>	37.03 mm <sup>2</sup>	17.29 mm <sup>2</sup>
Max naměřená síla tahu	Fmax	5 455.03 N	24 044.52 N	10 276.72 N	35 906.74 N	17 125.88 N
Mez pevnosti	$\sigma_{max}$	228.56 MPa	1 022.03 MPa	923.16 MPa	969.68 MPa	990.78 MPa
Smluvní mez kluzu	Rp0.2	- MPa	- MPa	- MPa	- MPa	- MPa
Max potažení	$\Delta l$	17.87 mm	9.41 mm	5.09 mm	12.40 mm	7.03 mm
Puvodní délka vzorku	l0	127.50 mm	127.50 mm	100.00 mm	127.50 mm	100.00 mm
Koncová délka vzorku	l	145.37 mm	136.91 mm	105.09 mm	139.90 mm	107.03 mm
Koeficient bezpečnosti	k	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Sigma dovolená	$\sigma_D$	114.28 MPa	511.02 MPa	461.58 MPa	484.84 MPa	495.39 MPa
Poměrná deformace	$\epsilon$	0.14	0.07	0.05	0.10	0.07
Modul pružnosti v tahu	E	1.63 GPa	13.84 GPa	18.13 GPa	9.97 GPa	14.09 GPa

Tab. 6 - Výsledné hodnoty pro kompozity z uhlíkových vláken

Výsledkem tahové zkoušky byla maximální síla potřebná k přetržení materiálu. Z maximální síly byla vypočtena mez pevnosti pomocí průřezu zkušebního tělesa. Dále byly vypočteny ostatní materiálové hodnoty jako maximální protažení, poměrná deformace, modul pružnosti v tahu a pro konstruování byla stanovena dovolená mez napětí. Meze pevnosti pro vybrané materiály jsou vyneseny v Graf 3. Na grafu je vynesena maximální mez pevnosti a směrodatná odchylka. Nejnižší pevnost měl vzorek C20, což je kompozit z uhlíkových vláken s tloušťkou 2 mm, kdy zatěžující síla byla tzv. ve směru vláken. Vidíme, že takto namáhaný díl je oproti ostatním nejslabší a pro další postup musí být zajištěno, aby díl měl skladbu vláken zatěžující pod úhlem od osy zatěžující síly. Další vzorky z kompozitu z uhlíkových vláken C25, AC2 s tloušťkami materiálu 2 mm a C3 a AC3 s tloušťkami materiálu 3 mm vyšly s mezí pevnosti nad 900 MPa. U těchto vzorků byla vlákna tkaniny pod úhlem od osy zatěžující síly. Pokud se podíváme na mez pevnosti slitin hliníku, vidíme že hodnota pro materiál EN AW 7075 vyšla nad hodnotu 500 MPa. Byly tedy splněny hodnoty, které udává prodejce ehlinik.cz, tedy minimální hodnota meze pevnosti 470 MPa. U „duralu“ je tato hodnota nad 400 MPa a prodejce udává taky minimální hodnotu 400 MPa. Pokud porovnáme naměřené hodnoty v rámci zkušebních těles a tvaru podle rozdílných norem, tedy dle ČSN EN ISO 6892-1 a dle ASTM E8 jsou meze pevnosti téměř stejné, lze tedy prezentovat oba výsledky. U slitin hliníku se rozdílnost mezí pevnosti u vzorků podle různých norem nijak neprojevila. U těles z uhlíkových vláken během zkoušky byly dle mého názoru lepší vzorky dle normy ASTM E8, a to z důvodu větší uchycovací části tělesa. U těles dle normy ČSN EN ISO 6892-1 je tato část menší a během testu se stávalo, že vzorek byl vytržen z čelistí stroje, nedošlo tedy k přetržení vzorku a získání maximální síly pro přetržení. Větší rozdílnost v mezích pevnosti vzorků C25 a AC2 může být způsobena odlišností základního polotovaru. Desky byly od stejného výrobce,

ale měli rozdílnou šarži výroby, což znamená, že desky nebyly z jednoho polotovaru. Z výsledků je patrná nevýhoda těchto kompozitních materiálů z uhlíkových vláken, protože pevnost může být ovlivněná technologickým postupem výroby, nebo i dělením materiálu



Graf 3 - Mez pevnosti zvolených materiálů

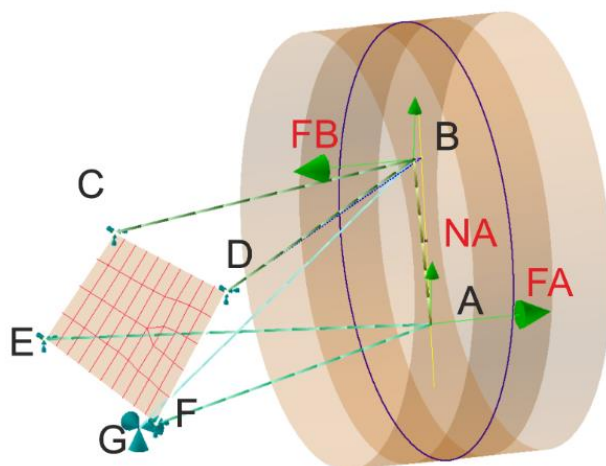
## 6.3 Vlastní návrh nového provedení

Pro navrhnutí nového řešení pro prvky zavěšení jsem nejdříve vytvořil čárový model, který přesně vyznačuje geometrii zavěšení. Díky tomuto modelu bylo možné zjistit napětí v jednotlivých částech zavěšení. Simulace byla rozdělena na jednu polovinu přední nápravy a jednu polovinu zadní nápravy. Nápravy jsou symetrické, proto se dělala simulace jen jedné poloviny zavěšení. Na ramena zavěšení byla zvolena trubka kruhová 18 x 2 mm a na táhlo Pull-rod byla použita trubka kruhová 15 x 2 mm. Tyto polotovary byly zvoleny jako výchozí parametry z důvodu ověření původního řešení. Materiál pro simulace nebyl zvolen, protože pro návrh bylo zapotřebí zjistit maximální napětí, kdy pro tento výpočet nejsou materiálové hodnoty potřeba. Ze simulace není však možné vyčíst posunutí ani koeficient bezpečnosti. Pro tyto parametry by bylo nutné zadat materiálové hodnoty.

### 6.3.1 Přední náprava

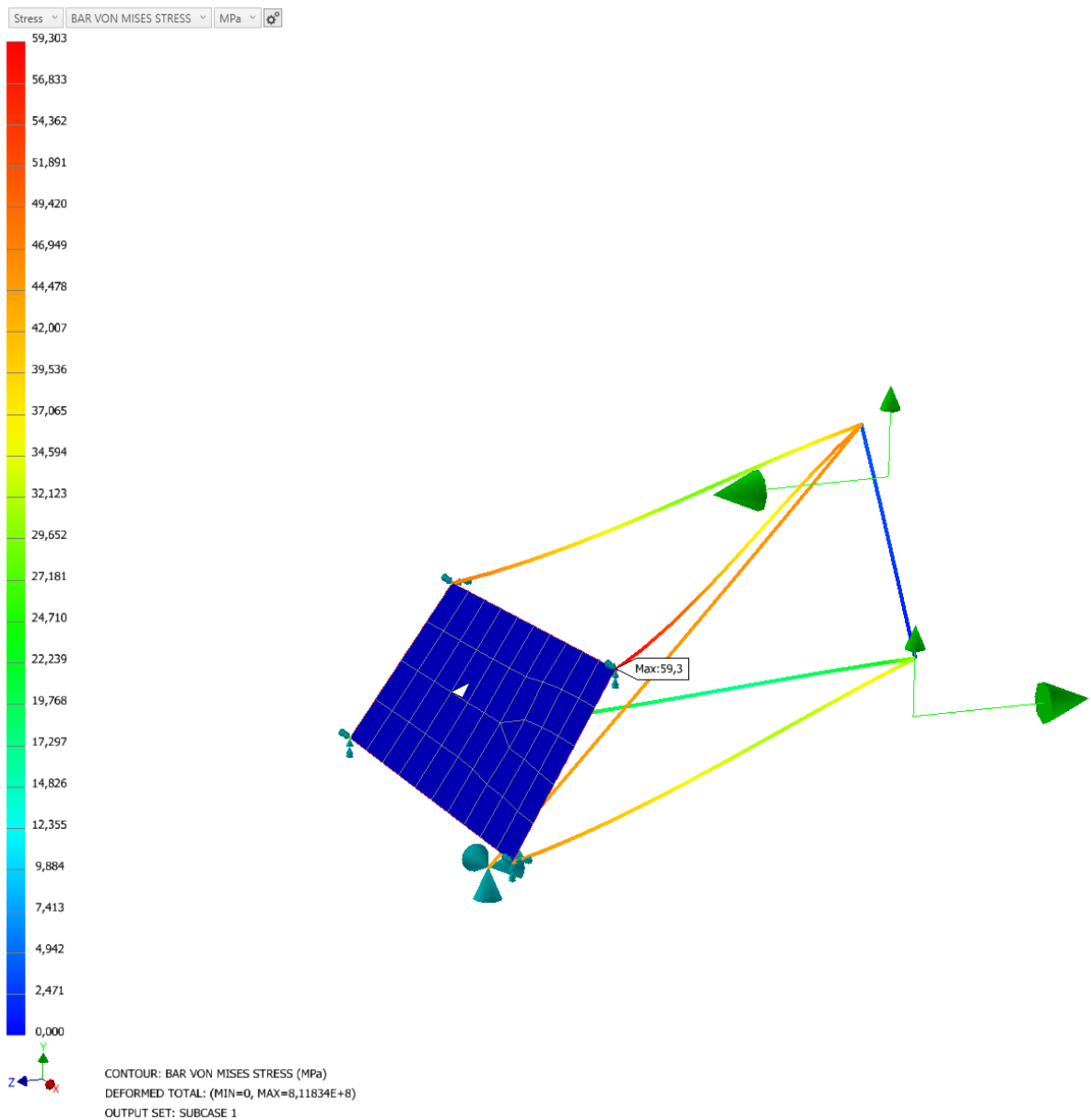
Pro přední nápravu byl vytvořen model propojením bodů zavěšení (Obr. 18). Na vynesené čáry byly pomocí Autodesk Inventor Nastran navoleny profily a pro body byly navoleny následující podmínky, mezi body B a A byl zvolen tuhý prvek, protože pevnost těhlice není předmětem této práce. Plocha mezi body C, D, E, F znázorňuje část rámu a tyto body jsou

přichyceny pomocí sférické vazby. Bod G značí připojení pákového mechanismu k tlumiči. Tento bod byl zvolen jako pevný. Zvolené síly FA, FB, NA vycházejí z výpočtů v kapitole 6.1.



*Obr. 18 - Čárový model předního zavěšení se zadanými silami [vlastní]*

Výsledkem simulace bylo grafické znázornění napětí v prvcích zavěšení. Výsledný obrazec je zobrazen na Obr. 19. Maximální napětí von Mises je téměř 60 MPa. Toto maximum se nachází poblíž rámu v horním ramenu. Z Obr. 19 je vidět velké napětí v táhle k pákovému systému tlumiče, tzv. Pull-rod, proto je důležité nezanedbat bod připojení tohoto táhla při návrhu.

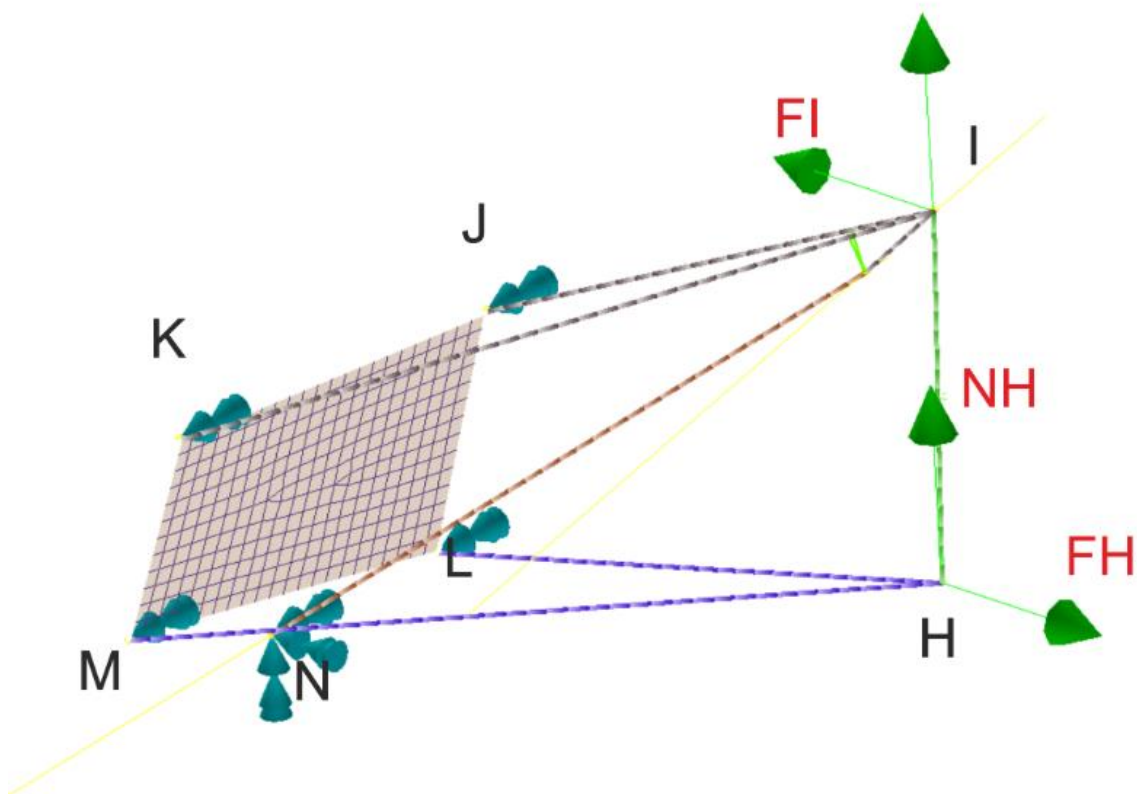


*Obr. 19 - Výsledné napětí na čárovém modelu předního zavěšení [vlastní]*

### 6.3.2 Zadní náprava

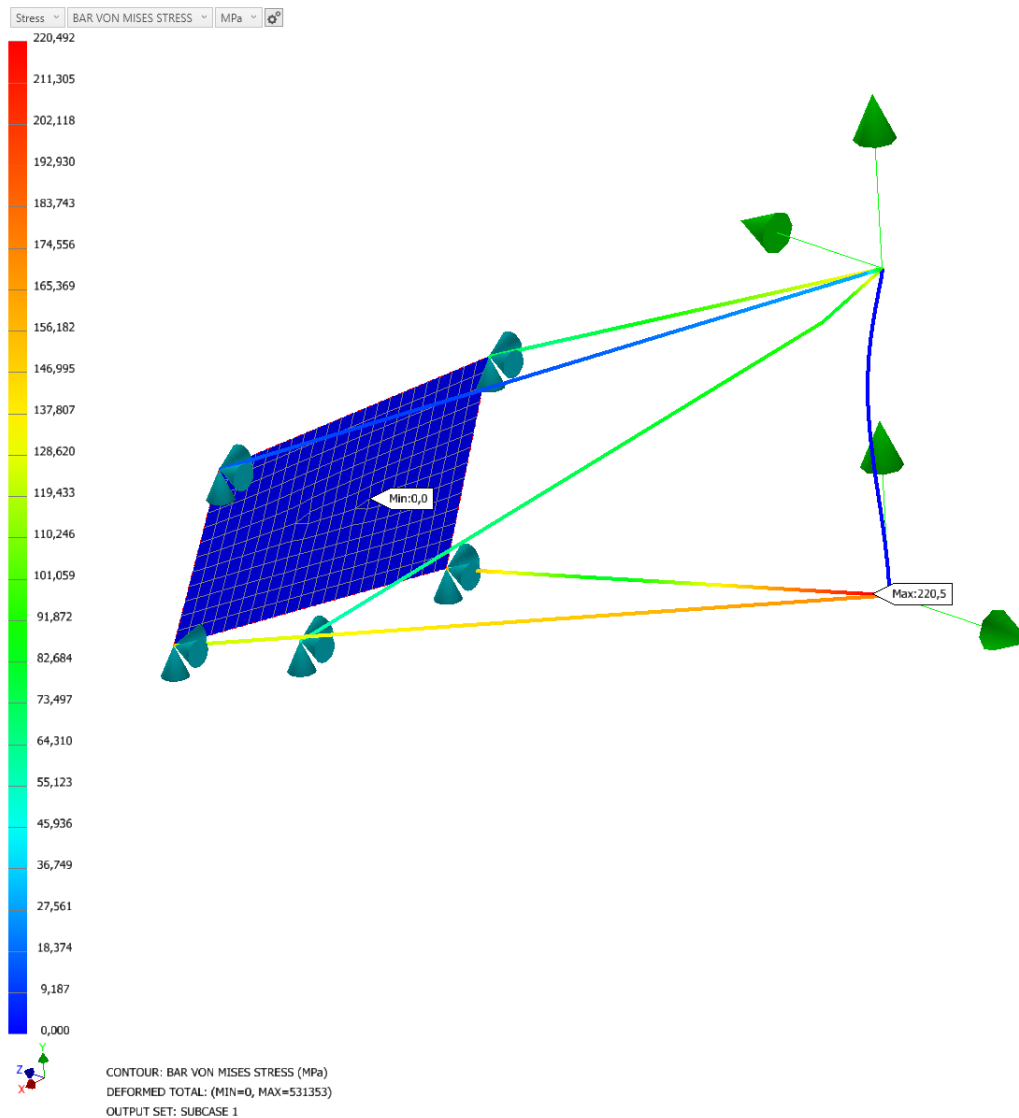
Simulace zadní nápravy byla dělána obdobně jako přední, tedy pomocí Autodesk Inventor Nastran byly na čárový model přidány potřebné parametry. Mezi body I a H, kde se nachází těhlice, byl přidán tuhý prvek, body J, K, L a M tvoří část rámu a prvky ramen jsou zde

připevněny sférickou vazbou. Bod N značí připojení k pákovému mechanismu k tlumiči. Zvolené síly FI, FH, NH vycházejí z výpočtů v kapitole 6.1.



Obr. 20 - Čárový model zadního zavěšení se zadanými silami [vlastní]

Výsledné grafické zobrazení napětí von Mises zobrazuje, jak jsou zadní ramena namáhána. Maximální napětí se pohybuje těsně nad hodnotou 220 MPa. Na Obr. 21 lze vidět, že v tomto případě se maximum nachází v blízkosti těhlice. Je to dáno jinou geometrií oproti přednímu zavěšení, a to především větším vychýlením kola dozadu za uchycení ramen k rámu.



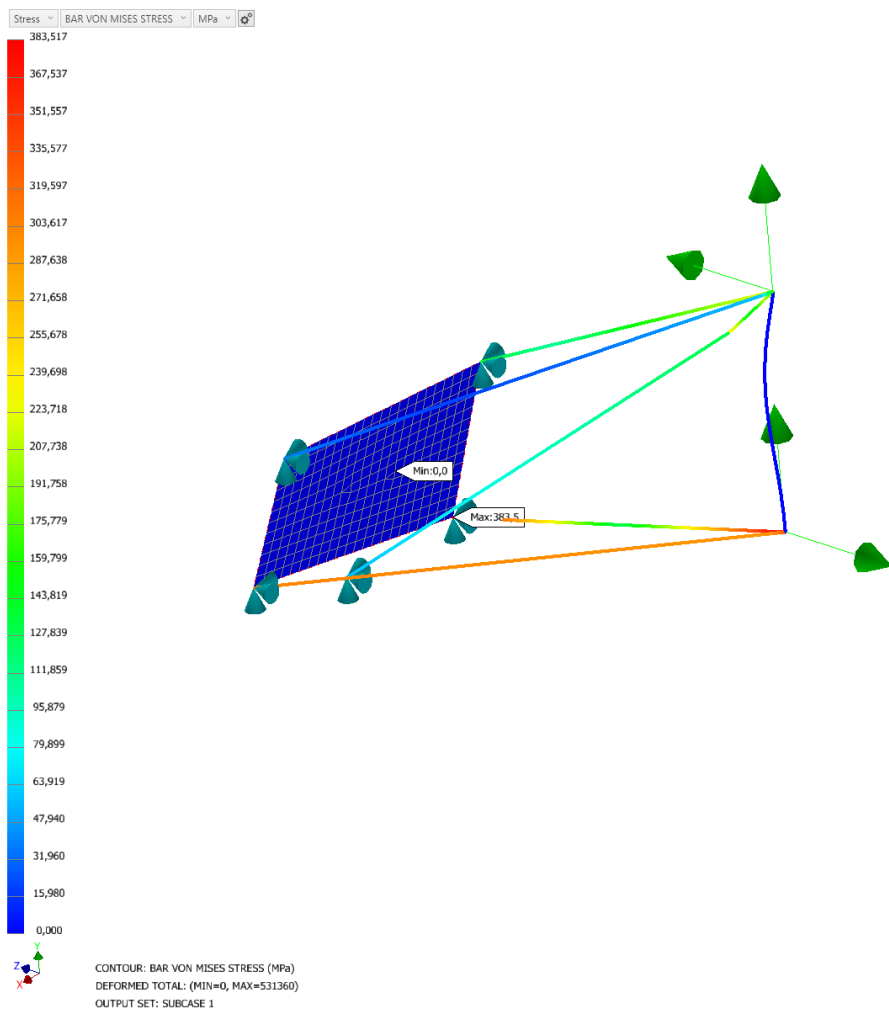
Obr. 21 - Výsledné napětí na čarovém modelu zadního zavěšení [vlastní]

## 6.4 Konstrukční návrh

Z předchozí simulace vyšlo maximální napětí von Mises 220,5 MPa pro polotovar kruhové trubky 18x2 mm. Toto napětí je menší než dovolené napětí pro vybrané materiály, lze tedy tyto materiály použít. Protože simulace byla provedena pro polotovar kruhových trubek o velikosti 18 x 2 mm a maximální napětí pro tento polotovar vyšel poměrně malý, lze použít i menší průřez. Jelikož na zadní nápravě vyšlo větší napětí, provedl jsem simulaci pro ověření menšího průřezu, tedy pro trubku kruhovou o velikosti 12 x 2 mm. Z Obr. 22 lze vyčíst, že



maximální napětí von Mises je téměř 360 MPa, Tato hodnota je stále pod dovolenou mezí napětí. Při použití trubek z uhlíkových vláken lze použít tento menší průřez.



Obr. 22 - Simulace pro trubky kruhové 12x2 mm [vlastní]

## 6.5 Řešení konstrukčního návrhu

Různé týmy řeší prvky ramen zavěšení různě. Já jsem se pro svůj návrh rozhodl použít materiál z uhlíkových vláken, především pro jeho vysokou pevnost, navíc tento materiál velmi kladně hodnotí komise. Rozhodl jsem se tedy použít jako hlavní nosný profil trubku kruhovou 18 x 2 mm, která je opatřena koncovkami z oceli 25CrMo4, které slouží k přichycení ložiska (Obr. 23). Tento materiál jsem vybral pro jeho vysokou pevnost, nízkou hmotnost a dobrou svařitelnost. Dimenzi trubky jsem také zanechal 18 x 2 mm, protože hlavním zadáním týmu

bylo, aby ramena měla nízkou hmotnost, vysokou pevnost a dlouhou životnost (musí vydržet celý závodní seriál).

Pro Pull-rod jsem zvolil trubku kruhovou 10 x 2 mm z uhlíkových vláken opatřenou inserty z 25CrMo4 a sférickými kloubky (Obr. 24), tento profil jsem si dovilil zmenšit oproti původnímu řešení z důvodu větší pevnosti v tahu uhlíkových vláken zjištěné při tahové zkoušce.

Při návrhu tedy bylo důležité nepřekročit dovolené napětí pro tyto materiály. Dovolené napětí zahrnuje už koeficient bezpečnosti. Přehled hodnot je popsán v Tab. 7. Ukázkou koncepce řešení lze vidět na Obr. 23. Toto řešení by mělo být snadno vyměnitelné při případné nehodě, kdy dojde k prasknutí trubky z uhlíkového vlákna. Trubka by měla být v náhradních dílech v jedné univerzální velikosti a při výměně se uřízne na požadovaný rozměr a bude vyměněna. Není tedy nutné sebou na závody vozit přesně nařezané trubky, lze tedy díky tomuto řešení vést jen menší počet náhradních dílů.

Popis veličiny	Veličina	Materiál			
		Uhlíkové vlákno		25CrMo4	
Mez pevnosti	$\sigma_{max}$	980	MPa	830	MPa
Mez kluzu	$R_{p0.2}$	-	MPa	600	MPa
Sigma dovolená	$\sigma_D$	490	MPa	400	MPa

Tab. 7 - Přehled dovoleného napětí pro použité materiály



*Obr. 23 – Ukázka koncepce provedení nového řešení zavěšení ramen [vlastní]*



*Obr. 24 - Ukázka provedení nového řešení Pull-rodu [vlastní]*

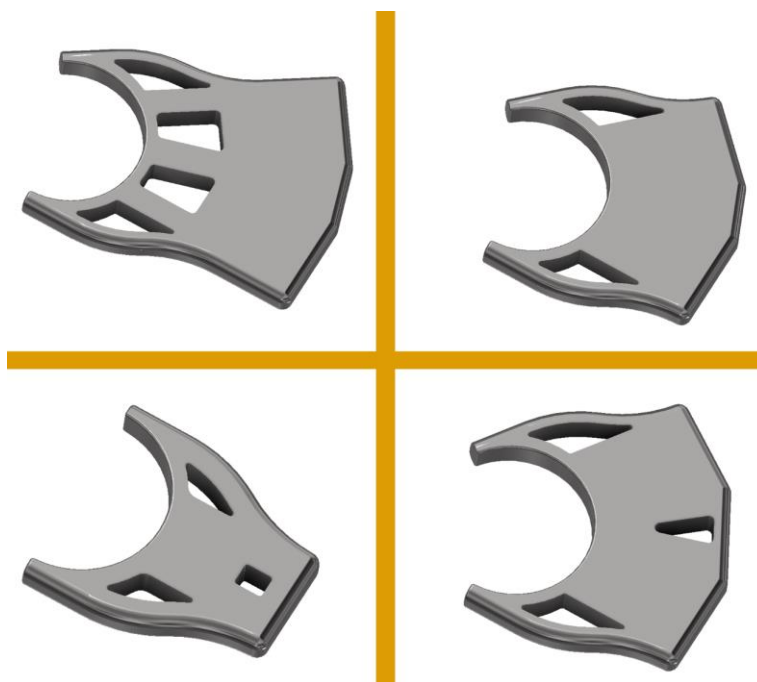
Inserty (Obr. 25) jsou řešeny pomocí trubky, která má na jednom konci vybrání pro plech (Obr. 26), který slouží k uchycení pouzdra pro ložisko. Insert je osazen přírubou pro zamezení posunu trubky z uhlíkových vláken. Na části, která se zasunuje do trubky z uhlíkových vláken, je udělané drážkování pro použité lepidlo, které ze spoje udělá pevný spoj. Druh lepidla, který pro tento spoj bude použito, bude předmětem další studie. Nejspíše se bude jednat o vysokopevnostní a vysoce odolné dvousložkové epoxidové lepidlo Bison epoxi metal, které je zároveň odolné vibracím. Další alternativou jsou lepidla Betamate, které mají podobné

vlastnosti jako Bison. Lepidla Betamate se používají již nyní v automobilovém průmyslu, a tak bude možné dohledat praktické zkušenosti.



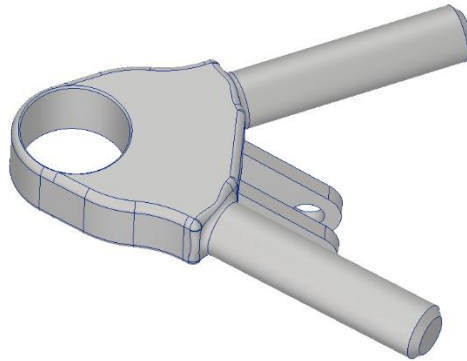
*Obr. 25 - Insert pro trubku z uhlíkových vláken [vlastní]*

Plechý, které slouží jako přechod mezi insertem a pouzdem pro ložisko, jsou z vysokopevnostní oceli, jejich tloušťka je 6 mm. Tento díl je masivnější z důvodu změny průřezu profilu a koncentrace sil a namáhání. Je však v méně namáhaných místech odlehčen, aby bylo docíleno nízké hmotnosti. Na Obr. 26 jsou ukázány všechny druhy použité na zavěšení. Jsou různé z důvodu různé geometrie upevňovacích bodů.



*Obr. 26 - Plechy pro upevnění pouzdra pro ložisko [vlastní]*

Bylo by možné tento uzel, od uchycení ložiska až po insert trubky z uhlíkového vlákna, řešit jako jeden kus, který by byl vyfrézován. Popřípadě by u tohoto dílu mohl být využit generativní design a následně být vytištěn na 3D tiskárně. Pro tento díl by šlo použít i jiný materiál, například slitinu hliníku. Toto řešení však bylo prozatím zavrhnuto z důvodu možností týmu, kdy by se tento díl musel dávat do kooperace a bylo by to jak časově, tak finančně náročnější.

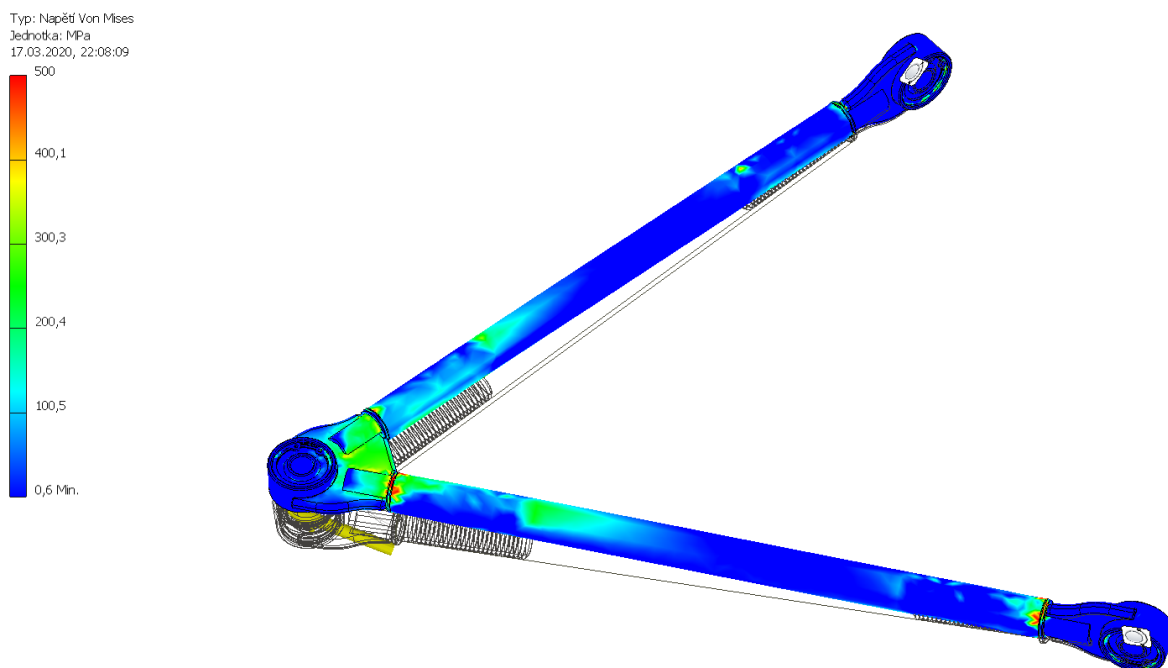


*Obr. 27 - Frézovaný uzel uchycení ložiska [vlastní]*

Do ložiskových pouzder přijde ložisko od firmy Fluro s označením GLXS s dimenzí 10 mm. Tento druh ložiska byl použit už na FS5 a proto bude použito i na nové řešení, především z důvodu již zakoupených ložisek jako na náhradní díly. Výrobce udává statickou únosnost tohoto ložiska  $C_0=60\ 000\ \text{N}$  a dynamickou  $C=10\ 000\ \text{N}$ . Takto vysokých hodnot během jízdy monopost nedosahuje, proto při správné údržbě předpokládáme dlouhou životnost. Všechny přípojné body budou uchyceny lícovaným šroubem ISO 7379 M8, tyto šrouby vychází také z ověřeného řešení na FS5.

Dále jsem provedl pevnostní simulaci na hotovou sestavu. Simulace byla provedena v softwaru Autodesk Inventor pomocí nástavby Pevnostní simulace. Výsledný napěťový obrazec je na Obr. 28. Lze vidět napěťové píky, které dosahují hodnot 500 MPa, ty však lze zanedbat, jsou dány důsledkem opření trubky z uhlíkových vláken o přírubu, kde kvůli zamezení pohybu vzniká větší napětí. V praxi tomuto posunutí zamezí lepená plocha, se kterou simulace nepočítá. Dále lze tedy vyčíst, že největší napětí vznikne na plechu spojujícím inserty s pouzdem na ložiska, proto je tento díl tak masivní. Hodnota napětí v tomto místě se pohybuje v okolí hodnoty 250 MPa. Tato vyšší hodnota je dána absencí omezujících podmínek, které by

simulovaly celou sestavu zavěšení jako jsou těhlice a druhá část ramen. Maximální hodnota tohoto napětí je však stále pod hodnotou dovoleného napětí pro dané materiály.

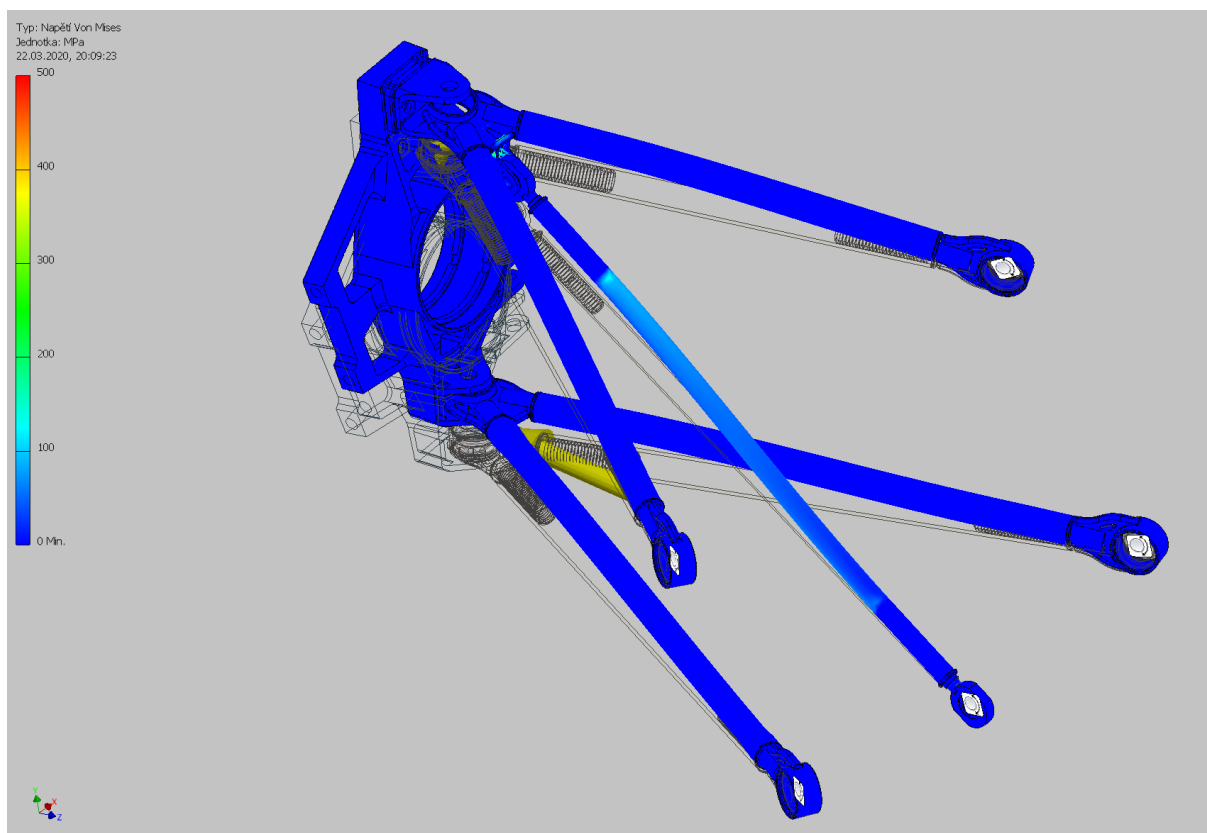


*Obr. 28 - Pevnostní simulace samostatné sestavy zavěšení ramene [vlastní]*

Po ověření každého ramena zvlášť byla provedena simulace na celou sestavu zavěšení pro ověření správnosti výsledků, a především pro ověření zvoleného řešení. Tato simulace byla časově náročnější, protože se jedná o větší počet dílů. Do simulace byla přidána i těhlice, kterou navrhuje kolega z týmu a provádí simulaci v softwaru Solidworks. Sestava tedy byla ověřena pomocí dvou softwarů. Výsledky jsou stejné.

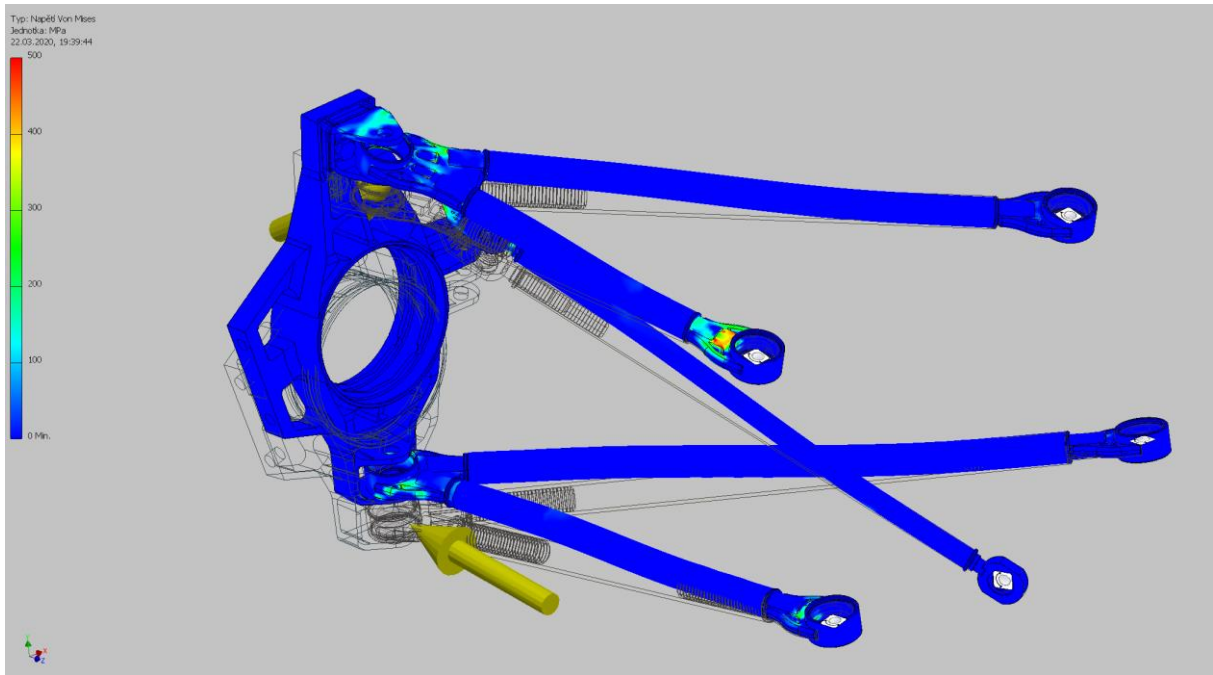
V simulaci pro přední zavěšení byly zadány působící síly z kapitoly 6.1 a do bodů upevněných na rámu byla přidána sférická vazba simulující kloubové ložisko. Byl přidán materiál podle návrhu. Na Obr. 29 je napěťový von Mises obrazec. Barevná škála je omezena na hodnotě 0-500 MPa, kdy tato hodnota představuje maximální překročení dovoleného napětí, červená barva se nesmí tedy na obrazci zobrazit. Na obrazci však vidíme převažující modrou barvu, která značí, že napětí nepřekračuje 100 MPa, pouze v Pull-rodu se barva mění. Díky tomu můžeme předpokládat, že výsledek je správný, protože Pull-rod přenáší největší tahové

napětí. Z obrazce lze však soudit, že dané řešení je značně předdimenzované. To jsme však předpokládali už při simulaci čárového modelu, protože cílem bylo, aby tyto ramena vydržela celou závodní sezónu, proto tuto větší dimenzi zachováme.



*Obr. 29 - Simulace celé sestavy předního zavěšení [vlastní]*

Pro simulaci zadní nápravy byly taktéž použity vstupní podmínky zatěžující síly z kapitoly 6.1. Pro uchycení bodů na rámu byly použity sférické vazby. Na napětovém von Mises obrazci pro zadní zavěšení vidíme větší nárůst napětí na jiných částech nežli na Pull-rodu, to je dáno geometrií zavěšení. Vidíme, že největší koncentrace napětí je u ložiska na rámu, tato hodnota však nepřekračuje dovolené napětí pro materiál. Ostatní díly převažují modrou barvou, tedy napětím pod 100 MPa. Proto při dalším návrhu by bylo vhodné se zaměřit na geometrii celého zavěšení, aby nebylo napětí koncentrované na jedno rameno. A tudíž by celé zavěšení mohlo být z menšího průřezu.



*Obr. 30 - Simulace celé sestavy zadního zavěšení [vlastní]*

## 6.6 Porovnání hmotnosti starého a nového řešení

Cílem řešení bylo snížení hmotnosti při zachování vysoké pevnosti a dlouhé životnosti. Pro porovnání hmotnosti byly využity modely a vlastnosti materiálů z Autodesk Inventor, toto bylo využito pro obě řešení, jak starý typ z materiálu 25CrMo4, tak nové řešení z kombinace materiálu z uhlíkových vláken a 25CrMo4. Rozpis původních ramen zavěšení je uveden v Tab. 8, celková hmotnost na celý monopost FS5 je tedy 4 820 g. Pro nové řešení (Tab. 9) vychází celková hmotnost na 4 080 g. Nové řešení je tedy lehčí, díky provedeným opatřením byla celková uspořená hmotnost 740 g, což činí o 30,71 % nižší hmotnost oproti celoocelovému řešení na monopostu FS5. Rozpis uspořené hmotnosti je rozepsán v Tab. 10 i s procentuálním vyjádřením jednotlivých prvků zavěšení.



Původní váhy			
Přední	Horní A	518	g
	Dolní A	573	g
	Pull-rod	197	g
Zadní	Horní A	462	g
	Dolní A	479	g
	Pull-rod	181	g
Celková váha		4 820	g

Tab. 8 – Hmotnost zavěšení ramen z FS5 (hmotnosti z Autodesk Inventor)

Nové řešení			
Přední	Horní A	454	g
	Dolní A	461	g
	Pull-rod	122	g
Zadní	Horní A	454	g
	Dolní A	431	g
	Pull-rod	118	g
Celková váha		4 080	g

Tab. 9 – Hmotnost zavěšení ramen nového řešení (hmotnosti z Autodesk Inventor)

Úspora hmotnosti				
Přední	Horní A	64	g	12.36 %
	Dolní A	112	g	19.55 %
	Pull-rod	75	g	38.07 %
Zadní	Horní A	8	g	1.73 %
	Dolní A	48	g	10.02 %
	Pull-rod	63	g	34.81 %
Celková úspora		740	g	30.71 %

Tab. 10 - Úspora hmotnosti z FS5 a nového řešení a celková úspora hmotnosti na celém monopostu FS6

## 6.7 Finanční analýza

Render finálního návrhu je na Obr. 31. Výroba toho řešení bude prováděna v prostorách Technické fakulty ČZU. Nákup materiálu je zajištěn z grantu IGA. Předběžná cena použitých karbonových trubek činí 23 100,- Kč, cena ocelových dílů z 25CrMo4 je 2 300,- Kč, cena všech použitých ložisek Fluro GLXS 10 je 6 420,- Kč. Celková cena všech použitých dílů i spojovacích dílů na všechna ramena zavěšení činí tedy 39 000,- Kč. V ceně jsou započítány i díly použité na náhradní díly.



*Obr. 31 – Render finálního návrhu řešení zavěšení [vlastní]*

Ze simulací vychází, že prvky zavěšení jsou značně předdimenzované. Bylo tedy vedení týmu navrženo, aby po odjetí jedné sezony na tomto řešení zavěšení, tedy pro budoucí monopost, slevilo ze svých nároků na výdrž ramen, navýšilo rozpočet a udělalo menší průřezy trubek. Ty by se však po každých závodech měnily za nové, aby byla zajištěna bezpečná životnost na celý závod. Došlo by tak k dalšímu snížení neodpružených částí závodního speciálu, což by mělo příznivý vliv na ovladatelnost vozu. Toto však záleží na možnostech týmu, a především na finančních schopnostech.

## 7 Závěr

Soutěž Formule student je komplexní soutěž s velkým množstvím výzev, a to především konstruktérských. Napříč závodním polem můžeme vidět, jak každý tým používá jiná inovativní řešení na svém monopostu a každý monopost je vrcholem konstruktérského umu. Studentské týmy rovnají své síly v mnoha disciplínách, jak závodních, tak i v konstruktérských nebo finančních. Studenti se v této soutěži mnoho naučí a nabyté zkušenosti pak hravě využijí v praxi.

Cílem diplomové práce bylo zaměření se na návrh ramen zavěšení kol, a to především za použití inovativních materiálů, které jsou popsány v úvodu této práce. Byla zde však překážka, kdy materiálové hodnoty, především pro uhlíková vlákna, nejsou přesně specifikována z důvodu rozdílnosti technologické výroby vláken a jejich následné spojování do konstrukčních celků. Byla proto provedena tahová zkouška pro zjištění pevnostních hodnot materiálu. Během zkoušky byly použity dvojce zkušební tělesa, první byla dle normy ČSN EN ISO 6892-1, podle které byla prováděna i tahová zkouška, druhá byla podle zahraniční normy ASTM E8. U této normy se projevila delší úchyťová část jako vhodnější řešení pro zkušební tělesa z uhlíkových vláken. Během jejich testu nedošlo ani jednou k prokluzu vzorku v čelistech univerzálního stroje. Výsledky u slitin hliníku byly shodné s materiálovými parametry udávanými prodejcem. U uhlíkových vláken byla prokázána rozdílnost mezi skladbou, kdy jedny vzorky byly natahovány po vlákně a druhé měly vlákna pod úhlem  $45^\circ$  ve směru tahové síly. Vlákna, která byla pod úhlem  $45^\circ$ , byla několikanásobně pevnější. Proto u finálního polotovaru musí být zaručena přesná skladba vláken. Dále byly porovnány výsledky vzorků podle různých norem. Finální výsledky byly téměř totožné. Největší rozdíl byl u vzorků z uhlíkových vláken o tloušťce 2 mm, tento rozdíl byl dán růzností šarže základního polotovaru desky, ze které byly řezány zkušební vzorky. Tento rozdíl byl zohledněn při volení dovoleného napětí toho materiálu.

Z předchozí rešerše o inovativních možnostech v oblasti zavěšení kol jsem zvolil spíše konvenční řešení pomocí trubek. Tento model jsem si nejprve vytvořil jako zjednodušený čárový model pro zjištění největšího napětí a zvolení vhodné dimenze s ohledem na cíl práce a požadavky týmu. Po zvolení koncepce a vhodné dimenze jsem zvolil materiálové provedení, kde se kombinují trubky z uhlíkových vláken a pro úchyťové části je zvolena ocel 25CrMo4. Kompletní 3D model byl v závěru práce ověřen pevnostní simulací, ve kterém jsou viditelná

kritická místa řešení, která jsou však svou hodnotou pod mezí dovoleného napětí pro dané materiály. Díky tomuto řešení se uspořila hmotnost neodpružených hmot na ramenech podvozku o 740 g, což činí úsporu hmotnosti oproti stávajícímu řešení ocele 25CrMo4 o 30,71 %. Celková cena materiálu a dílů činí 39 000,-, v ceně jsou zahrnuty i náhradní díly. V závěru práce je dáno doporučení pro budoucí návrh, že pokud si tým nebude klást takové nároky na životnost těchto dílů, které jsou tedy značně předimenzované, lze zvolit menší dimenzi trubek z uhlíkových vláken, čímž by se docílilo ještě větší úspore hmotnosti. Tým by však musel v rámci bezpečnosti měnit tyto trubky po každém závodě. K tomu je však zapotřebí větší skladová zásoba těchto dílů, což má neblahý účinek na finance celého týmu.

## 8 Seznam literatury

- [1] *Formula Student | tubnracing.cz* [online]. [vid. 2020-02-13]. Dostupné z: <https://tubnracing.cz/o-nas/formula-student/>
- [2] *CULS Prague formula racing* [online]. [vid. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://culsracing.czu.cz/cs/>
- [3] *The 2020 Formula SAE Rules Version 1.0 are now published online under the Series Resources* [online]. [vid. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/app/NewsItem.aspx?NewsItemID=2c1ab552-40c3-4b97-a258-582dca0ea505>
- [4] SAURABH, Y. Samant, Santosh KUMAR, Kaushal Kamal JAIN, Sudhanshu Kumar BEHERA, Dhiraj GANDHI, Sivapuram RAGHAVENDRA a Karuna KALITA. Design of Suspension System for Formula Student Race Car. In: *Procedia Engineering* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, 2016, s. 1138–1149. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2016.05.081
- [5] *FSG: Some of the Issues a Team Faces When Designing for FSG.* [online]. [vid. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/pr/news/details/article/some-of-the-issues-a-team-faces-when-designing-for-fsg/>
- [6] *Folded Honeycomb Construction - FSAE/GRM Constructions-Page 2| Grassroots Motorsports forum* [online]. [vid. 2020-02-25]. Dostupné z: <https://grassrootsmotorsports.com/forum/grm/folded-honeycomb-construction-fsaegrm-construction/151543/page2/>
- [7] CHUNG, Deborah D.L. *Carbon Fiber Composites* [online]. B.m.: Elsevier Inc., 2012. ISBN 0750691697. Dostupné z: doi:10.1016/C2009-0-26078-8
- [8] CHEN, Jonathan Y. *Activated Carbon Fiber and Textiles* [online]. B.m.: Elsevier Inc., 2016. ISBN 9780081006788. Dostupné z: doi:10.1016/c2014-0-03521-6
- [9] KOŘÍNEK, Z. *Počítačová podpora, Kompozity* [online]. 2009. Dostupné z: [www.volny.cz/zkorinek/](http://www.volny.cz/zkorinek/)

- [10] VLK, František. *Stavba motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-238-8757-2.
- [11] JAREŠ, Vojtěch. *Základní zkoušky kovů a jejich teorie*. 1. vyd. Praha: Academia, 1966.
- [12] DOKOUPIL, Jiří. *Zkouška tahem : Zkouška tahem za okolní teploty*. 1994.
- [13] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně Brno*. 2008, 1–94.
- [14] SEWARD, Derek. *Race Car Design*. B.m.: Red Globe Press, nedatováno.
- [15] *ČSN ISO 6892-1a. Kovové materiály: zkoušení tahem: část 1: zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [16] SHASHIKALA, A P a Thekke PURAKKAL SOMASUNDARAN. Behaviour of carbon fiber reinforced polymer strengthened tubular joints. *Steel and Composite Structures* [online]. 2017, **24**(4), 383–390 [vid. 2020-04-08]. ISSN 1598-6233. Dostupné z: doi:10.12989/scs.2017.24.4.383
- [17] *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Book of Standards Volume: 03.01. ASTM E8-13a*
- [18] *2011 Návod pro SOLIDWORKS - Maximální napětí von Mises* [online]. [vid. 2020-04-08]. Dostupné z: [http://help.solidworks.com/2011/Czech/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Checking\\_stresses/prot\\_vonm.html](http://help.solidworks.com/2011/Czech/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Checking_stresses/prot_vonm.html)

## Seznam obrázků

Obr. 1 - Rozdíl mezi Pull-rod a Push-rod [2] .....	6
Obr. 2 - Způsob přenosu zdvihu kola na tlumič – tahová tyč s vahadlem.....	8
Obr. 3 - Hliníková ramena [5] .....	9

Obr. 4 - Speciální tvar ramen z uhlíkových vláken [6].....	10
Obr. 5 - Ukázka druhu tkanin [9].....	11
Obr. 6 - Základní mechanismy porušení dlouhovláknového kompozitu [13].....	14
Obr. 7 - Tahový diagram s výraznou mezí kluzu [12].....	17
Obr. 8 - Síly působící na kola formule [vlastní] .....	21
Obr. 9 - Přepoččet na body zavěšení přední nápravy [vlastní].....	21
Obr. 10 - Přepoččet na body zavěšení zadní nápravy [vlastní] .....	22
Obr. 11 - Základní technická data stroje LabTest 5.50ST.....	23
Obr. 12 - Pracoviště tahové zkoušky na stroji LabTest 5.50ST [vlastní] .....	24
Obr. 13 - Zkušební těleso pro zkoušku tahem [vlastní][15] .....	25
Obr. 14 - Ukázka vyříznutých vzorků pro tahovou zkoušku [vlastní] .....	26
Obr. 15 - Zkušební vzorek dle ASTM E8 [vlastní][17].....	27
Obr. 16 – Ukázka lomu vzorků po zkoušce [vlastní] .....	28
Obr. 17 - Čárový model předního zavěšení [vlastní].....	30
Obr. 18 - Čárový model předního zavěšení se zadanými silami [vlastní] .....	37
Obr. 19 - Výsledné napětí na čarovém modelu předního zavěšení [vlastní].....	38
Obr. 20 - Čárový model zadního zavěšení se zadanými silami [vlastní].....	39
Obr. 21 - Výsledné napětí na čarovém modelu zadního zavěšení [vlastní].....	40
Obr. 22 - Simulace pro trubky kruhové 12x2 mm [vlastní] .....	41
Obr. 23 – Ukázka koncepce provedení nového řešení zavěšení ramen [vlastní] .....	43
Obr. 24 - Ukázka provedení nového řešení Pull-rodu [vlastní].....	43
Obr. 25 - Insert pro trubku z uhlíkových vláken [vlastní] .....	44
Obr. 26 - Plechy pro upevnění pouzdra pro ložisko [vlastní].....	44
Obr. 27 - Frézovaný uzel uchycení ložiska [vlastní] .....	45
Obr. 28 - Pevnostní simulace samostatné sestavy zavěšení ramene [vlastní] .....	46
Obr. 29 - Simulace celé sestavy předního zavěšení [vlastní] .....	47

Obr. 30 - Simulace celé sestavy zadního zavěšení [vlastní] .....	48
Obr. 31 – Render finálního návrhu řešení zavěšení [vlastní] .....	50

## Seznam tabulek

Tab. 1 - Materiálové hodnoty udávané prodejcem ehliník.cz [14] .....	23
Tab. 2 - Vysvětlivky popisků vzorků .....	29
Tab. 3 - Maximální působící síly na kola .....	31
Tab. 4 - Maximální síly v bodech zavěšení .....	31
Tab. 5 - Výsledné hodnoty pro slitiny hliníku .....	33
Tab. 6 - Výsledné hodnoty pro kompozity z uhlíkových vláken .....	34
Tab. 7 - Přehled dovoleného napětí pro použité materiály .....	42
Tab. 8 – Hmotnost zavěšení ramen z FS5 (hmotnosti z Autodesk Inventor) .....	49
Tab. 9 – Hmotnost zavěšení ramen nového řešení (hmotnosti z Autodesk Inventor) ..	49
Tab. 10 - Úspora hmotnosti z FS5 a nového řešení a celková úspora hmotnosti na celém monopostu FS6 .....	49



## Seznam použitých symbolů a zkratek

a	[mm]	Vzdálenost od silnice ke spodnímu bodu připojení těhlice
b	[mm]	Vzdálenost mezi přípojnými body těhlice
c	[mm]	Vzdálenost od silnice ke spodnímu bodu připojení těhlice
d	[mm]	Vzdálenost mezi přípojnými body těhlice
S <sub>0</sub>	[mm]	Plocha průřezu
Lu	[mm]	Poměrné podélné trvalé prodloužení
L <sub>0</sub>	[mm]	Počáteční délka
Su	[mm]	Poměrné trvalé zúžení
k	[mm]	Poloha těžiště od zadní nápravy
h	[mm]	Výška těžiště od silnice
b	[mm]	Rozchod kol
r	[mm]	Poloměr zatáčení
l	[mm]	Rozvor kol
ε	[-]	poměrná deformace
A	[%]	Tažnost
V <sub>x</sub>	[m/s]	Rychlost v ose X
V <sub>y</sub>	[m/s]	Rychlost v ose Y
G	[N]	Gravitační tíha
F	[N]	Síla
T <sub>1</sub>	[N]	Tečná síla předního levého kola
T <sub>2</sub>	[N]	Tečná síla předního pravého kola
T <sub>3</sub>	[N]	Tečná síla zadního levého kola
T <sub>4</sub>	[N]	Tečná síla zadního pravého kola
N <sub>1</sub>	[N]	Normálová síla předního levého kola
N <sub>2</sub>	[N]	Normálová síla předního pravého kola
N <sub>3</sub>	[N]	Normálová síla zadního levého kola
N <sub>4</sub>	[N]	Normálová síla zadního pravého kola
T <sub>t1</sub>	[N]	Tečné dopředné síly předního levého kola
T <sub>t2</sub>	[N]	Tečné dopředné síly předního pravého kola
T <sub>t3</sub>	[N]	Tečné dopředné síly zadního levého kola
T <sub>t4</sub>	[N]	Tečné dopředné síly zadního pravého kola
C <sub>0</sub>	[N]	Statická únosnost ložiska
C	[N]	Dynamická únosnost ložiska
E	[Pa]	Youngův modul pružnosti
σ	[Pa]	Mez pružnosti
σ <sub>D</sub>	[Pa]	Dovolená mez pružnosti
R <sub>m</sub>	[Pa]	Mez pevnosti