



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Fyzický 3D model zavěšení kola automobilu –
návrh koncepce

Physical 3D model of Wheel Suspension –
Design concept

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2023**

Stanislav ČERNÝ

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový
Vedoucí práce: Ing Michal Jasný

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Černý** Jméno: **Stanislav** Osobní číslo: **491254**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Fyzický 3D model zavěšení automobilu - návrh koncepce

Název bakalářské práce anglicky:

Physical 3D Model of Wheel Suspension - Design Concept

Pokyny pro vypracování:

Téma je součástí snahy o vytvoření zmenšených fyzických 3D modelů zavěšení kol nejčastěji používaných v automobilovém průmyslu - pro výukové účely.

Je nutné provést koncepční úvahu pro tvorbu takových modelů (měřítko, výrobní technologie (3D tisk, sériové díly - např. pružiny, ...), míra a zajištění pohyblivosti apod.).

Návrh koncepce musí vycházet z rešerše základních používaných typů zavěšení (MacPherson, lichoběžník, tuhá náprava, ...)

Následně je možné pokračovat tvorbou vlastního 3D modelu vybraného typu zavěšení podle stanovené koncepce.

Seznam doporučené literatury:

Vlk, F.: Podvozky motorových vozidel

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Michal Jasný ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **12.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.09.2023**

Ing. Michal Jasný
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Anotační záznam

Jméno autora: Stanislav Černý

Název práce: Fyzický 3D model zavěšení kola automobilu – návrh koncepce

Anglický název: Physical 3D Model of Wheel Suspension – Design Concept

Rozsah práce:

49 stran

48 obrázků

11 tabulek

Akademický rok: 2022/2023

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Vedoucí práce: Ing Michal Jasný

Klíčová slova: Zavěšení kol automobilu, 3D tisk, těhlice, ložiska, vinutá pružina, tlumič, příčné trojúhelníkové rameno, manžeta, ráfek kola, poloosa, tyč řízení

Key words: Car wheel suspension, 3D printing, Steering knuckle, Bearings, Coil Spring, Shock absorber, Lower Control Arm, Dust boot, Wheel rim, Driveshaft, Tie rod



Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem koncepce pro tvorbu zmenšených fyzických 3D modelů zavěšení kol automobilů. Tyto modely slouží pro výukové účely, konkrétně za účelem seznámení se samotnými konstrukčními prvky důležitých pro vedení a pružení kola automobilu. Tento model také znázorňuje celkovou kinematiku při pružení vozidla s jistými geometrickými zásadami zmíněnými v rešerši. Kromě již zmíněné geometrie zavěšení jsou v teoretické části práce obsaženy nezávislé i závislé zavěšení kol automobilů pro bližší seznámení s touto problematikou. Praktická část se zaměřuje na tvorbu zmenšeného CAD modelu zavěšení McPherson s následným návrhem koncepce jednotlivých dílů. Podle tohoto modelu poté určíme návrh koncepce zavěšení kol víceprvkové a lichoběžníkové nápravy.

Abstract

This bachelor's thesis deals with the concept design for creating scaled-down physical 3D models of suspensions. These models serve educational purposes, specifically to familiarize students with the structural components important for the handling and suspension of car wheels. The model also illustrates the overall kinematics during vehicle suspension, adhering to certain geometric principles mentioned in the research. In addition to the mentioned suspension geometry, the theoretical part of the thesis covers both independent and dependent car wheel suspensions to provide further insight into this matter. The practical part focuses on creating a virtual scaled-down CAD model of a McPherson suspension, followed by the design concept for individual components. Based on this model, we will then determine the design concept of the Multi-link and Double Wishbone Suspension.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: “Fyzický 3D model zavěšení kola automobilu – návrh koncepce” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne:

.....

(podpis autora)



Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval mému vedoucímu práce Ing. Michalu Jasnému za věcné rady, přátelskou spolupráci a ochotu pomoci při vypracování této práce. Také jsem vděčný Ing. Lukáši Kazdovi a Ing. Davidu Světlíkovi za jejich užitečné rady v oblasti 3D tisku. Nakonec bych chtěl také poděkovat mé rodině a přátelům za jejich podporu nejen při tvorbě bakalářské práce, ale i během celého studia.



Obsah

1 Úvod.....	8
2 Zavěšení kol automobilů.....	9
2.1 Zavěšení kol se dvěma příčnými rameny (lichoběžníková náprava)	9
2.2 Zavěšení kol s pružící jednotkou a příčným ramenem (náprava McPherson)	10
2.3 Zavěšení kol víceprvkové nápravy	11
2.4 Zavěšení kol tuhé nápravy	12
2.5 Kinematika a geometrie zavěšení.....	12
2.5.1 Úhel odklonu kola.....	12
2.5.2 Příklon rejdové osy	13
2.5.3 Poloměr rejdu	13
2.5.4 Záklon rejdové osy.....	14
3 Návrh koncepce 3D modelů zavěšení kola	15
3.1 Zásady technologie 3D tisku	15
3.2 Porovnání 3D tisku s konvenčními metodami obrábění	16
3.3 Návrh koncepce zavěšení kola nápravy McPherson včetně 3D modelu.....	16
3.3.1 Návrh možné výroby jednotlivých dílů	18
3.3.2 Kupované díly	35
3.3.3 Svařovaná ocelová konstrukce	40
3.3.4 Postup montáže.....	41
3.3.5 Rozdíly mezi modelem a reálným provedením zavěšení kol automobilu.....	44
3.3.6 Možná pozdější vylepšení a doplnění modelu zavěšení kola nápravy McPherson....	44
3.4 Návrh koncepce zavěšení kola se dvěma příčnými rameny (lichoběžníková náprava)	45
3.5 Návrh koncepce zavěšení kola víceprvkové nápravy	45
4 Závěr	46
5 Seznam obrázků.....	47
6 Seznam tabulek.....	48
7 Použitá literatura	48



1 Úvod

Tato práce se zabývá problematikou zavěšení automobilů s následným návrhem koncepce pro tvorbu fyzických 3D modelů, jakožto výukových předmětů. Obsahem tedy bude volba technologie a měřítko jednotlivých dílů a jejich vzájemnou funkčnost. Například některé díly budou tištěné na 3D tiskárně. U složitějších dílů, které nemohou být tištěny můžeme zvolit třeba možnost nákupu. Díly, u kterých je požadována patřičná tuhost budou potažmo svařovány z ocelových částí.

Pokud při řešení této bakalářské práce nastane problém, kdy nebude možné přímo napodobit určitou část reálné konstrukce zavěšení, tak je možné zvolit alternativu, která bude co nejlépe podobná originálu.



2 Zavěšení kol automobilů

Zavěšení spojuje kola s rámem či karosérií auta a definuje kinematiku pohybu kola. Umožňuje svislý relativní pohyb kola vzhledem k rámu vozidla, který je důležitý pro propružení a snižuje nežádoucí pohyby kola jako je boční posuv nebo naklápění na přijatelné hodnoty. Zavěšení musí také přenášet různé síly a momenty způsobené vlivem zrychlení, brždění, nebo zatáčení vozidla. Jedním z dalších nezanedbatelných úkolů zavěšení je trvalý kontakt všech kol s vozovkou za všech okolností, který je nutný pro stabilitu a pohodlí jízdy. [1]

Zavěšení se rozděluje do dvou druhů, a to sice na závislé a nezávislé.

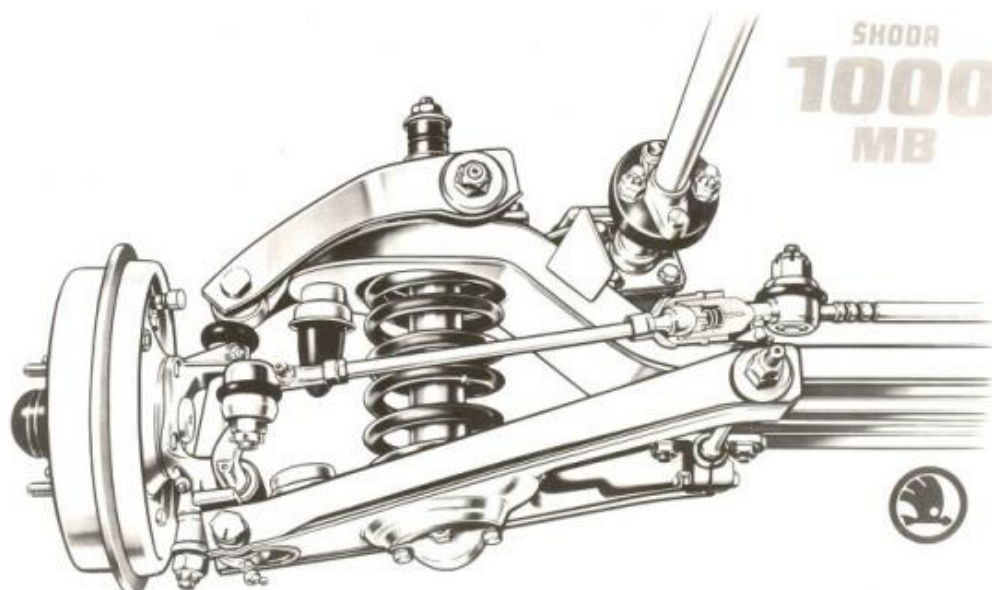
U závislého zavěšení jsou obě kola uložena na stejném nosníku náprav, takže při svislém propružení se kola navzájem ovlivňují. Závislé zavěšení se často používá jako zadní hnací náprava u užitkových či terénních vozidel. [2]

U nezávislého zavěšení je každé kolo zavěšeno ke karosérii samostatně, tudíž při propružení jednoho kolo neovlivňuje to druhé. [1]

2.1 Zavěšení kol se dvěma příčnými rameny (lichoběžníková náprava)

Zavěšení zobrazené na (Obr. 1) se skládá ze dvou nad sebou umístěných ramen, která jsou spojena kulovými čepy k těhlici. Horní rameno bývá kratší než to spodní. Délka ramen má vliv na odklon a sbíhavost při propružení. Při pružení u lichoběžníkové koncepce dochází k negativnímu odklonu a malé změně sbíhavosti, a díky tomu se zlepšuje stabilita v zatáčkách. [2] Tvar ramen bývá většinou trojúhelníkového tvaru pro lepší tuhost. Pružina je obvykle připevněna k dolnímu robustnějšímu ramenu, které nese většinu svislého zatížení. [1]

Na rozdíl od nápravy McPherson zabírá tato koncepce méně místa, a umožňuje lepší stabilitu a ovladatelnost ve vysokých rychlostech. Je ale složitější a tím pádem také dražší. [1]

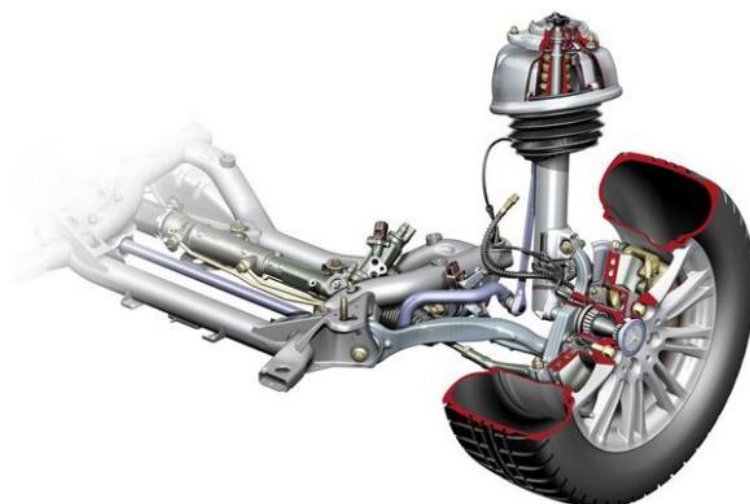


Obr. 1 – Lichoběžníková náprava automobilu Škoda 1000 MB [3]

2.2 Zavěšení kol s pružicí jednotkou a příčným ramenem (náprava McPherson)

Tato náprava (Obr. 2) je odvozená od té lichoběžníkové, s tím rozdílem, že u této nápravy je místo horního ramene posuvné vedení s pružicími členy. Díky této modifikaci vznikne více prostoru například pro motor nebo zavazadlový prostor.

Toto zavěšení se používá u předních ale i u zadních náprav, která mohou být i hnací. Pro případ že by toto zavěšení bylo použito u řízené nápravy, tak jsou pružicí a posuvné členy vedení uloženy v axiálním pryžovém ložisku sloužící pro natáčení kol. [1]

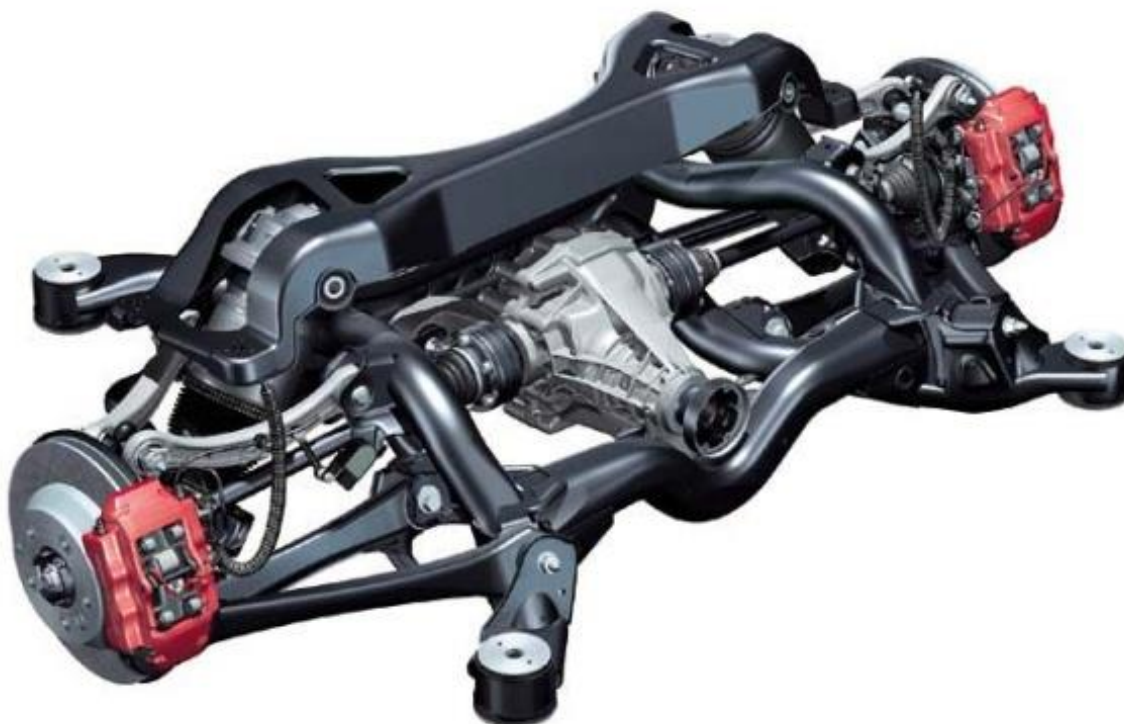


Obr. 2 – Náprava McPherson automobilu Mercedes-Benz E-Class [4]



2.3 Zavěšení kol víceprvkové nápravy

Víceprvková náprava (Obr. 3) je vlastně upravená lichoběžníková náprava s vyšším počtem ramen a tyčí, které mají ještě lepší vliv na optimální kinematiku a velice přesné vedení kola. Další předností této nápravy je příznivý vliv na potlačení hluku a vibrací od vozovky, a tedy docílení vyšší kvality a pohodlí jízdy. S těmito přednostmi přichází logicky i nějaké nevýhody jakými jsou například složitá konstrukce uchycení ramen ke karosérii, jejíž tuhost v těchto místech uchycení je také velmi důležitá. Kvůli této složitosti narůstají také náklady na výrobu, proto se tato náprava používá spíše u dražších automobilů. [1] [5]



Obr. 3 – Zadní víceprvková náprava Porsche Cayenne [6]

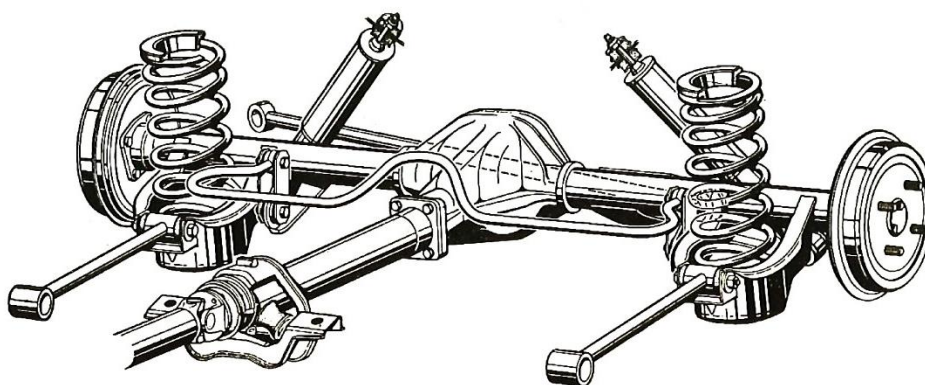


2.4 Zavěšení kol tuhé nápravy

Toto zavěšení, jak už samotný název napovídá je závislé. Je to kvůli tomu, že obě kola nápravy jsou k sobě pevně spojeny nápravnicí (Obr. 4), tudíž při pružení jednoho kola je automaticky ovlivňováno i kolo druhé.

Tento typ zavěšení se převážně používá jako zadní náprava. Ovšem může být i jako přední hnací náprava. Tato koncepce se využívá nejčastěji u nákladních automobilů či autobusů. [1]

Výhodou zadní tuhé nápravy je především její jednoduchost, a tudíž i nižší cena. Naopak její nevýhodou je velká neodpružená hmota. Tuhé nápravy mají oproti nezávislému zavěšení o mnoho horší vedení kola a vyšší těžiště kvůli velkému prostoru k propružení. To má za následek horší stabilitu jízdy. [7]



Obr. 4 – Tuhá zadní poháněná náprava Opel Record E [7]

2.5 Kinematika a geometrie zavěšení

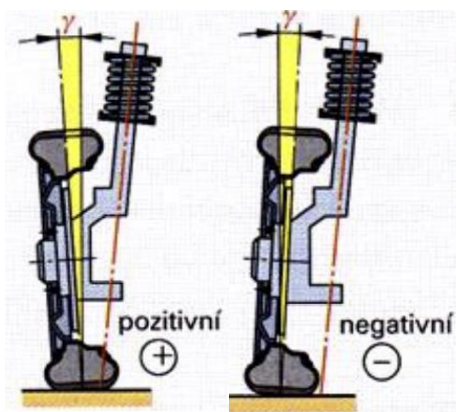
Za účelem lepšího vedení kol po rovné vozovce i v zatáčkách jsou osy kol a rejdové osy odchýleny od svislé polohy o určitý úhel. [1]

2.5.1 Úhel odklonu kola

Tento úhel se svírá mezi rovinou kola a kolmou rovinou k vozovce (Obr. 5). Hodnota úhlu odklonu se u řízených předních kolech pohybuje od $-60'$ do $+30'$ a u zadních kol se uplatňuje negativní odklon hodnot od $-30'$ do -2° .

Při pozitivním odklonu se zmenšuje poloměr rejdu, zlepšuje se směrová stabilita a snižují se boční síly při průjezdu zatáčkou.

Negativní odklon zkvalitňuje boční vedení při jízdě zatáčkou, ale dochází k většímu opotřebení pneumatik. [2]

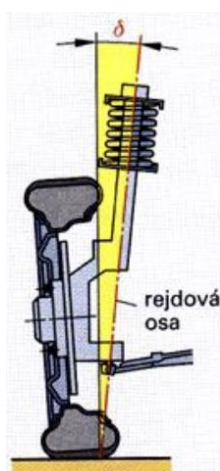


Obr. 5 – Pozitivní a negativní odklon kola [2]

2.5.2 Příklon rejdové osy

Úhel příklonu rejdové osy bývá přibližně 5-10° a vytyčuje se mezi rejdovou osou a podélnou rovinou automobilu kolmé k vozovce (Obr. 6). [2]

Při natáčení kol dochází vlivem příklonu k nadzvedávání přední části vozidla, kvůli tomu je zapotřebí větší síly řidiče pro vytočení kol do rejdu. Díky váze vozidla po uvolnění volantu vzniká vratný moment, který samovolně natáčí kola do přímého směru a tím zlepšuje stabilitu vozidla. [1]



Obr. 6 – Příklon rejdové osy [2]

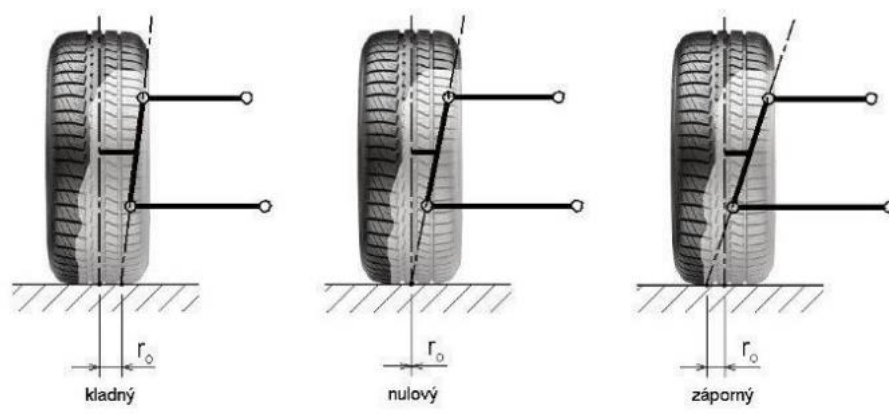
2.5.3 Poloměr rejdu

Poloměr rejdu je vzdálenost mezi bodem kde osa rejdu protíná vozovku a bodem kde vozovku protíná střed pneumatiky (Obr. 7).

Pozitivní poloměr rejdu při průjezdu zatáčkou zvětšuje její poloměr a při brždění vyvolává vybočení kola.

Negativní poloměr rejdu má za následek vybočení kola do sbíhavosti.

Nulový poloměr rejdu zmenšuje míru nepříznivých sil působících do řízení. [2]



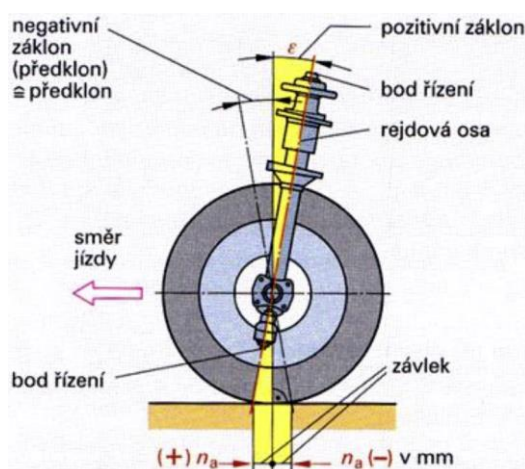
Obr. 7 – Poloměr rejdou kola [8]

2.5.4 Zákulon rejdové osy

Z (Obr. 8) vyplývá, že úhel záklonu je vytyčen mezi svislicí kola k vozovce a polohou rejdové osy v podélné ose auta. [2] Způsobuje závlek kola, který napomáhá k vrácení kol do přímého směru. [1]

V dnešní době se u většiny moderních vozidel uplatňuje pozitivní úhel záklonu rejdové osy. Mírný negativní nebo nulový zákulon se dříve používal u předních nápravách kvůli snazšímu ovládní řízení oproti pozitivnímu záklonu. Ovšem s příchodem posilovače se staly tyto výhody zanedbatelné a spíše převládaly nevýhody jako například špatná trakce a stabilita vozidla. [9]

Hodnoty úhlu pozitivního záklonu rejdové osy u moderních automobilů se pohybují od 2° do 8°. [10]



Obr. 8 – Zákulon rejdové osy [2]



3 Návrh koncepce 3D modelů zavěšení kola

Nejprve bychom si měli definovat účel těchto výukových modelů a podle toho určit v jakých částech bychom se měli co nejvíce držet předlohy reálného modelu zavěšení, a naopak v jakých ohledech můžeme model zjednodušit pro snazší výrobu. Tímto účelem zmenšených 3D modelů je vytvoření většího povědomí o samotných konstrukčních prvcích důležitých pro vedení a pružení kola automobilu, a také ukázka celkové kinematiky při pružení vozidla s jistými geometrickými zásadami. To znamená, že například systém brždění a pohonu kol může být zjednodušen, jelikož to není hlavní funkcí modelu.

Samotné propružení může být demonstrováno pouhým pohybem ruky s jedním ze vhodných členů. Takovým členem může být třeba příčné rameno nebo ráfek kola.

Dále je tu samotná rozvaha nad návrhem koncepce výroby jednotlivých dílů. Při které zohledňujeme časovou náročnost, cenu a proveditelnost při různých technologiích. Neméně důležitá je také volba materiálu, jelikož chceme, aby byl celý model co nejlehčí a snadno přenositelný. Ovšem u některých částí je potřeba patřičná tuhost, jako u rámu, na kterém bude celý model připevněn.

3.1 Zásady technologie 3D tisku

Výroba všech dílů by měla být co nejméně náročná a časově ekonomická, jelikož ne vždy se nám povede vytisknout díl napoprvé. S tím souvisí třeba spojování součástí, kdy se snažíme omezit spoje pomocí závitů, jelikož jejich výroba je náročnější.

Omezení počtu závitů docílíme tím, že použijeme průchozí díry, kde spojujeme tištěné části pouze pomocí normalizovaných spojovacích součástí. Pokud ovšem tato varianta není možná, tak jsme nuceni k jistým alternativám. Jedním z řešení vnitřních závitů je v praxi běžně používané vložení normalizované matky do tištěného otvoru s následným zatavením. Bohužel u vnějších závitů to tak snadné není. Jedním ze způsobů může být tvorba šroubovice v CADu, kde se v zásadě volí průměr o 0,1-0,5 mm větší pro následné opracování závitovým očkem. Další variantou by mohlo být vložení normalizované šroubu do připravené drážky, kde by se poté tento šroub zajistil dalším dílem, který by se do této drážky vlepil.

Další možností rozebíratelných spojů mohou být „zacvakávací“ spoje, kde je vlivem síly a deformace změněna geometrie, která se v určité části opět vrátí do původní polohy a tím vytvoří spoj.

U nerozebíratelných spojů je vhodné použít lepený spoj, který je často doplněn ještě tvarovým spojem pro vymezení správné polohy. Kromě spojování dvou různých dílů se lepené spoje také používají ke spojení dvou nebo více částí jednoho dílu. Díly se lepí z více



částí, když je tištěný díl příliš velký vzhledem k pracovnímu prostoru tiskárny, nebo by jeho geometrie vytvářela příliš mnoho podpor a tím i prodlužovala dobu tisku.

3.2 Porovnání 3D tisku s konvenčními metodami obrábění

Mnoho dílů by se mohlo obrábět konvenčními způsoby jakými jsou například frézování, soustružení, vrtání a celkově obrábění na CNC strojích. Pro co nejmenší hmotnost bychom použili hliníkové materiály. Cena hliníku za jeden kilogram je sice o mnoho levnější než u plastového filamentu, ale cena samotného obrábění bude větší. Třískové obrábění má také větší odpad než 3D tisk, kde je odpad tvořen pouze podporami, které jdou zredukovat například změnou geometrie. Hliníkové díly obráběné na CNC strojích jsou samozřejmě mnohem přesnější než tištěné díly, ale pro náš model je tato přesnost dostačující. S touto přesností nebo spíše nepřesností je při návrhu tištěných dílů nutno počítat, jelikož tyto hodnoty tolerancí se pohybují okolo desetin milimetru, což rozhodně není zanedbatelná hodnota.

Kvůli svým výhodám se přikláním spíše k variantě 3D tisku

3.3 Návrh koncepce zavěšení kola nápravy McPherson včetně 3D modelu

Zpočátku si musíme určit měřítko, ve kterém bude zhotoven celý model. Vybereme tedy největší součást modelu, kterou jsme schopni vytisknout na 3D tiskárně, tedy konkrétně na Prusa i3 MK3S s pracovním prostorem 250×210×210 (X×Y×Z). Touto součástí je ráfek kola s rozměrem 6,5 X 15 pro pneumatiku 195/65 R15, jehož rozměry jsou zobrazeny v (Tab. 1).

	REÁLNÉ HODNOTY (1:1)	HODNOTY V MĚŘÍTKU 1:2
ŠÍŘKA RÁFKU	6,5" = 165 mm	165/2 = 82,5 mm
PRŮMĚR RÁFKU KOLA	15" = 381 mm	381/2 = 190,5 mm
ŠÍŘKA PATKY (ZVOLENÉ)	10 mm	10/2 = 5 mm
CELKOVÁ ŠÍŘKA	165+2*10 = 185 mm	185/2 = 92,5 mm

Tab. 1 – Parametry skutečného ráfku kola a ráfku v měřítku 1:2

Při volbě měřítka **1:2** můžeme dle získaných hodnot konstatovat, že celý díl lze vytisknout na 3D tiskárně, kterou máme k dispozici.

K ráfku kola náleží i příslušná pneumatika s rozměrem 195/65 R15 s parametry v (Tab. 2)

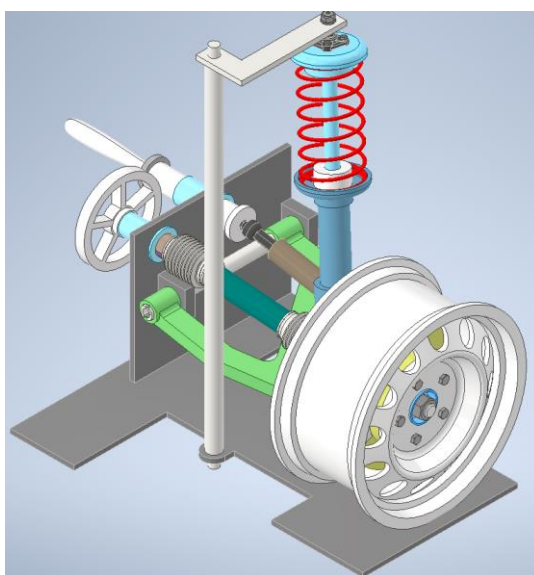
	REÁLNÉ HODNOTY (1:1)	HODNOTY V MĚŘÍTKU 1:2
PRŮMĚR RÁFKU KOLA	15" = 381 mm	381/2 = 190,5 mm
ŠÍŘKA PNEUMATIKY	195 mm	195/2 = 97,5 mm
BOČNÍ PROFIL PNEUMATIKY	195*0,65 = 126,75 mm	126,75/2 = 63,375 mm
CELKOVÝ PRŮMĚR PNEUMATIKY	381+2*126,75 = 634,5 mm	634,5/2 = 317,25 mm

Tab. 2 – Parametry skutečné pneumatiky kola a pneumatiky v měřítku 1:2

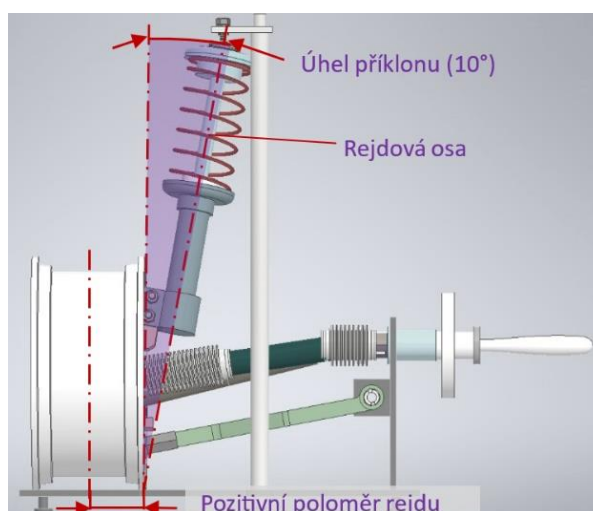


Největší průměr pneumatiky v měřítku **1:2** má rozměr 317,25 mm, ale náš pracovní prostor tiskárny má nejdelší stranu pouze 250 mm. Jsme tedy nuceni tisknout tento díl z více částí, což je i vhodné pro následnou montáž na ráfek.

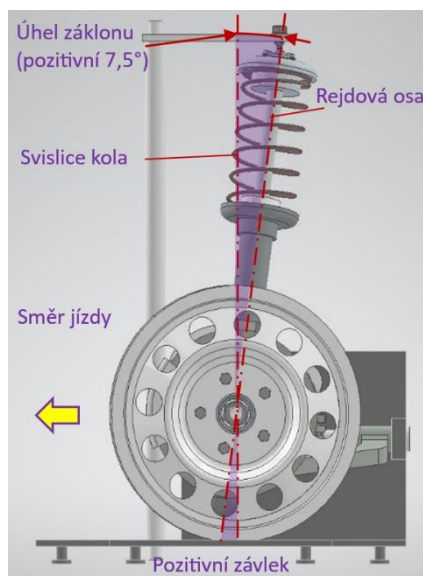
Po volbě polovičního měřítka již můžeme vytvořit celý model zavěšení kola přední hnací řízené nápravy McPherson. Model na (Obr. 9) byl vytvořen v programu Autodesk Inventor 2023. Následně byla vybrána vhodná geometrie zavěšení kola na základě provedených rešerší. Příklon rejdové osy (Obr. 10) jsem zvolil 10° , při kterém poloměr rejdu vychází kladný. Pak jsem určil také pozitivní záklon (Obr. 11) $7,5^\circ$ ve směru jízdy doleva. Jelikož hodnota úhlu odklonu kola u předních řízených náprav se pohybuje od $-60'$ do $+30'$, tak tato poměrně malá hodnota by byla těžce pozorována na našem modelu, tudíž jsem se rozhodl ji v modelu nepoužít.



Obr. 9 – Model zavěšení kola přední hnací řízené nápravy McPherson



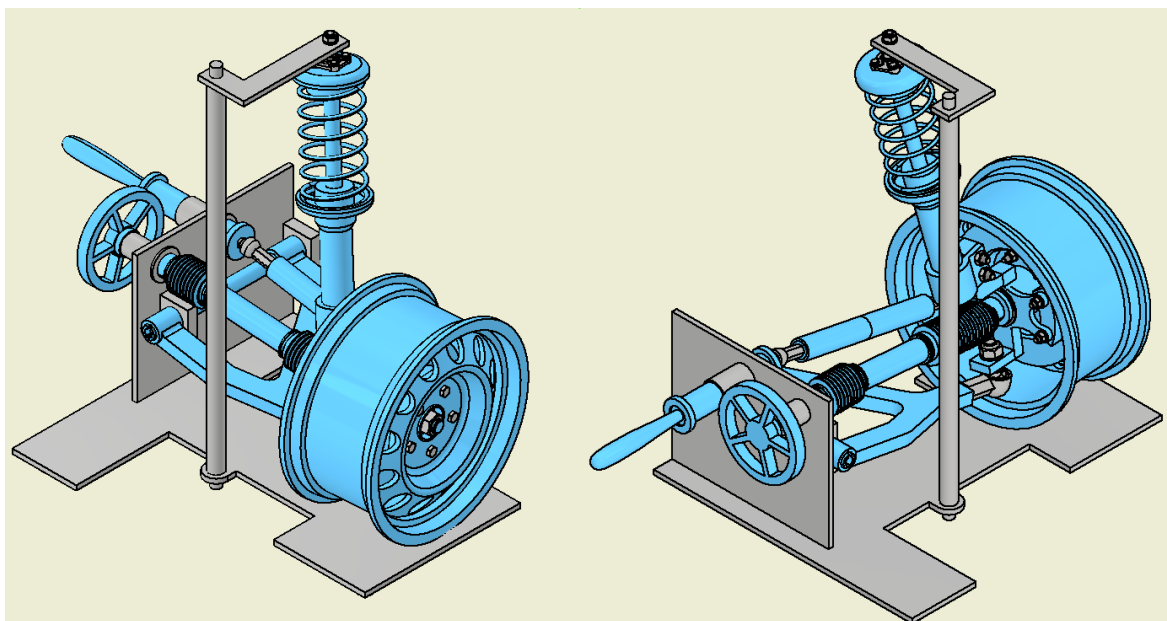
Obr. 10 – Příklon rejdové osy a poloměr rejdu modelu



Obr. 11 – Záklon rejdivé osy modelu

3.3.1 Návrh možné výroby jednotlivých dílů

V této kapitole je pouze naznačeno, jak by se konkrétní díly mohly vyrábět, nikoliv jak se budou vyrábět. Skutečná výroba probíhá prototypováním různých konstrukčních variant. Tudíž od reálné výroby tištěného dílu se použité konstrukční prvky mohou samozřejmě lišit. Pro vizualizaci možného postupu tisku jsem použil prostředí programu PrusaSlicer. Pokud na jednom obrázku z tohoto programu bude zobrazeno více součástí, nemusí to nutně znamenat, že se tyto díly budou tisknout všechny najednou, nýbrž to bude pouze kvůli zobrazení všech důležitých prvků jedné sestavy, nebo za účelem porovnání vytvořených konstrukčních změn na modelu. Vyráběnými díly zobrazených na (Obr. 12) jsou: ráfek kola, těhlice, brzdič, náboj kola, brzdový kotouč kola, dolní část tlumiče, horní část tlumiče s víčkem, pružina, trojúhelníkové příčné rameno, tyč uložení příčného ramena, koncová část poloosy, dělená část poloosy, kardanový kloub, posuvná vnitřní část poloosy, vnější část poloosy, manipulační kolo poloosy, řídicí tyč a manipulační část řídicí tyče s víčkem.



Obr. 12 – Vyráběné díly zavěšení kola nápravy McPherson

Ráfek kola a pneumatika

Ráfek kola se může vyrábět 3D tiskem, a však tisk takto rozměrného a složitého dílu bude trvat velmi dlouhou dobu. Čas tisku nepříznivě ovlivňuje tvorba podpor a celkové náročnost jednotlivých součástí. Při správném nastavení tisku, konkrétně třeba profilu a hustoty výplně lze ušetřit nějaký čas.

Kubický podepíraný vzor výplně má nejnižší spotřebu materiálu, a tudíž tisk s použitím tohoto vzoru je nerychlejší. [11]

S pomocí programu PrusaSlicer zjistíme odhadovaný čas tisku ráfku kola. Z (Tab. 3) plyne, že nejrychleji dokážeme tisknout ráfek kola za 17 hodin a 50 minut.

	VÝŠKA VRSTVY	HUSTOTA VÝPLNĚ	VZOR VÝPLNĚ	ČAS TISKU	FILAMENT	
					g	m
V1	0,15 mm QUALITY	15 %	Gyroid	29h 22m	258,58	80,83
V2	0,15 mm SPEED	20 %	Gyroid	27h 54m	269,67	84,3
V3	0,15 mm SPEED	15 %	Gyroid	25h 33m	258,58	80,83
V4	0,15 mm SPEED	15 %	Přímočarý	24h 1m	262,88	82,18
V5	0,15 mm SPEED	15 %	Kubický podepíraný	23h 6m	239,91	75
V6	0,20 mm QUALITY	15 %	Kubický podepíraný	20h 39m	235,75	73,69
V7	0,20 mm SPEED	20 %	Kubický podepíraný	18h 22m	241,33	75,44
V8	0,20 mm SPEED	15 %	Kubický podepíraný	17h 50m	235,75	73,69

Tab. 3 – Odhadovaná doba tisku ráfku kola vypočtená z programu PrusaSlicer



Dále ještě můžeme určit časovou náročnost tisku pneumatiky. Kde se celá pneumatika skládá ze 4 částí, aby jednotlivé části bylo vůbec možné vytisknout v našem pracovním prostoru, a také kvůli následné montáži na ráfek. Z (Tab. 4Tab. 4– Odhadovaná doba tisku pneumatiky vypočtená z programu PrusaSlicer) vyplývá, že čas tisku ¼ pneumatiky trvá 8 hodin a 41 minut, a tedy tisk všech 4 částí pneumatiky činí přibližně 35 hodin.

	VÝCHOZÍ TISKOVÝ PROFIL	HUSTOTA VÝPLNĚ	VZOR VÝPLNĚ	ČAS TISKU	FILAMENT	
					g	m
V1	0,15 mm QUALITY	15 %	Gyroid	15h 40m	162,89	50,92
V2	0,15 mm SPEED	20 %	Mřížka	13h 9m	177,67	55,54
V3	0,15 mm SPEED	15 %	Mřížka	11h 46m	164,09	51,29
V4	0,15 mm SPEED	15 %	Přímočarý	11h 42m	166,27	51,97
V5	0,15 mm SPEED	15 %	Kubický podepíraný	10h 44m	141,17	44,13
V6	0,20 mm QUALITY	15 %	Kubický podepíraný	10h 7m	140,05	43,78
V7	0,20 mm SPEED	20 %	Kubický podepíraný	8h 59m	146,56	45,81
V8	0,20 mm SPEED	15 %	Kubický podepíraný	8h 41m	140,05	43,78

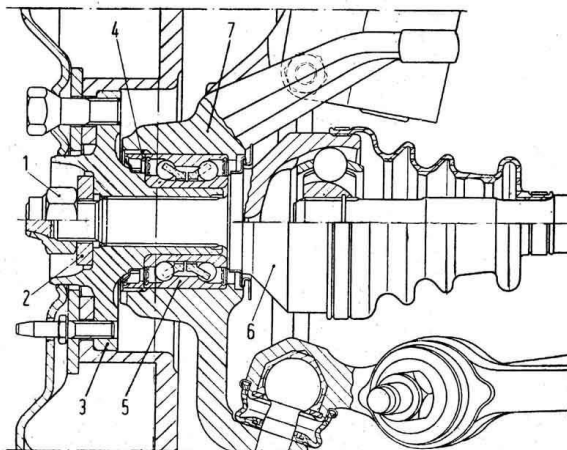
Tab. 4– Odhadovaná doba tisku pneumatiky vypočtená z programu PrusaSlicer

Kvůli vysoké časové náročnosti tisku pneumatiky kola a faktu, že se tím názornost a pochopení dané problematiky zavěšení kol automobilu nemění, jsem se rozhodl ji nezahrnout do modelu.

Vystává otázka, jestli totéž neprovést s ráfkem kola a ušetřit tím 17 hodin a 50 minut potřebných pro jeho tisk. Avšak pro znázornění měřítka, podle kterého byl zhotoven celý model, jsem se rozhodl tento díl ponechat.

Těhlice

Těhlice je poměrně komplikovaný díl (Obr. 14), na kterém je připojeno hned několik součástí jako například dolní část tlumiče, dolní příčné rameno, třmen brzdy a je v něm uložena i poloosa prostřednictvím náboje kola. Na (Obr. 13) můžeme vidět řez s vyznačenými díly reálné nápravy McPherson, kterými jsou: 1 - matice náboje; 2 - podložka; 3 – náboj kola; 4 - záseková matice ložiska kola; 5 – ložiska; 6 - stejnoběžný kloub; 7 - těhlice;

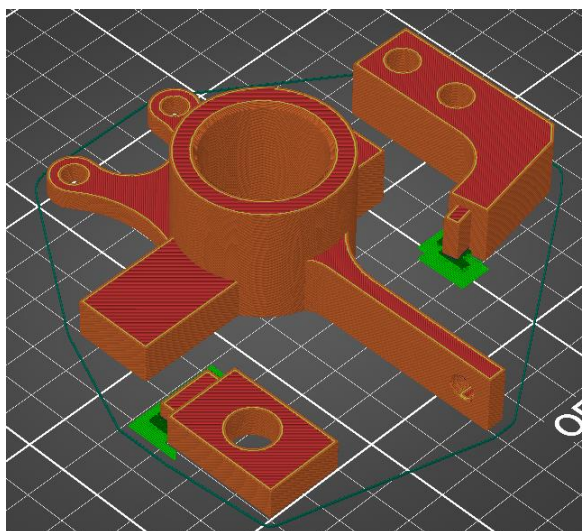


Obr. 13 – Řez náboje předního kola u zavěšení McPherson [12]

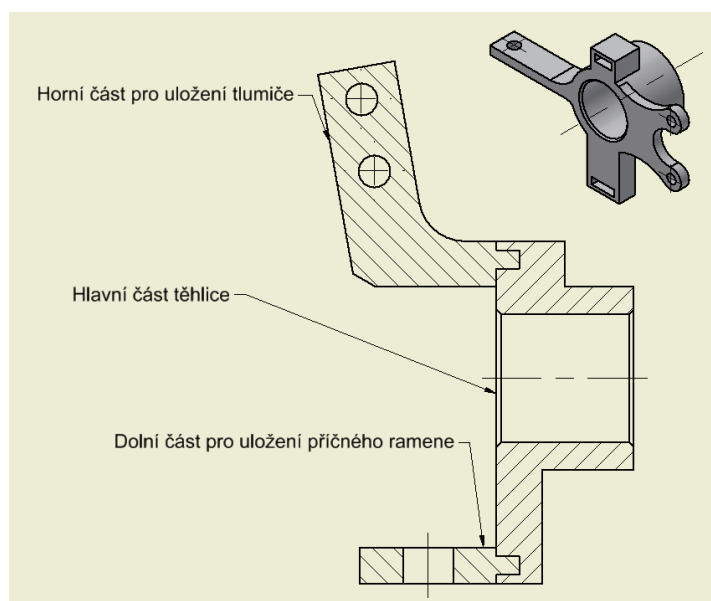


Obr. 14 – Levá přední těhlice včetně náboje od firmy Britpart [13]

Model těhlice je poměrně komplikovaný, kde tisk takovéto součásti by zahrnoval velké množství podpor, a tudíž by to bylo i časově nevýhodné. Proto je vhodné těhlici rozdělit do tří částí (Obr. 16), které se následně slepí. Pro vymezení správné polohy jsem použil obdélníkové čepy a obdélníkové díry v protikusu. Při tisku (Obr. 15) hlavní části těhlice musíme opět dbát na to, aby nevznikl defekt v horní části horizontální díry.



Obr. 15 – Rozložení tištěných dílů těhlice na tiskové ploše v prostředí programu PrusaSlicer

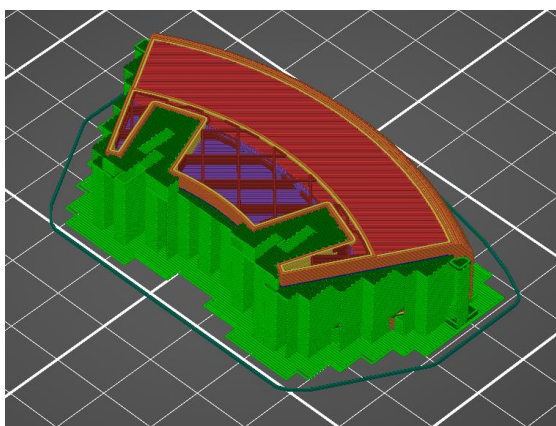


Obr. 16 – Náskres sestavení těhlice

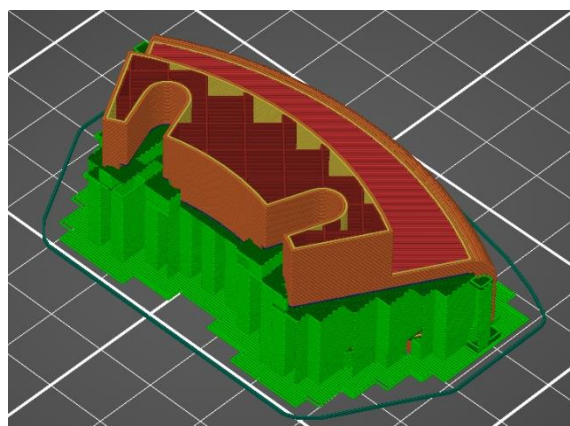
Brzdič

Pro účel modelu je brzdič nepodstatný, takže je zde obsažen pouze pro úplnost.

Kvůli svému složitému tvaru se při tisku vytváří poměrně velké množství podpor, které ovšem neodstraníme změnou orientace k tiskové ploše ani rozdělením na více spojovaných částí. Jelikož bude brzdič spojen s těhlicí normalizovanými šrouby, je zapotřebí vytvořit drážky pro jejich fixaci. Šrouby se šestihrannou hlavou se pouze vloží ze strany do obdélníkové drážky (Obr. 17) a opřou se o zmenšenou kruhovou část (Obr. 18). Poté se spojí s těhlicí pomocí podložek a matic.



Obr. 17 – Náhled tisku obdélníkových drážek



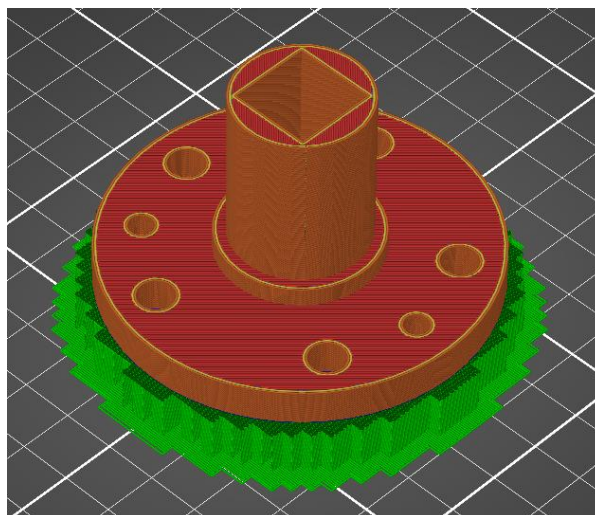
Obr. 18 – Náhled tisku kruhové části drážek



Náboj kola

Tato součást se bude tisknout z jednoho dílu (Obr. 19), ale kvůli odsazení největšího průměru od základny tiskové plochy je nutná tvorba podpor. Plocha po odstranění podpor má obecně horší kvalitu povrchu, což v našem případě nevádí, jelikož tato plocha spojuje náboj kola s brzdovým kotoučem, a tak nepůjde vidět.

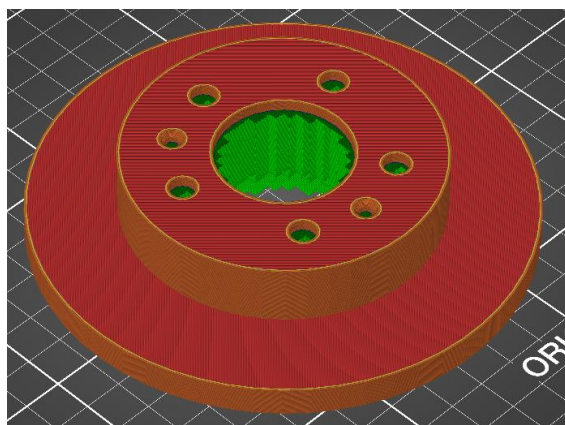
Další možností výroby tohoto dílu by mohlo být soustružení z hliníkového dílu. Hliník je přibližně dvakrát těžší než plast. Například tento díl by vážil přibližně 90 gramů z plastu a 220 gramů z hliníku. Tento váhový rozdíl je pro jeden díl nepodstatný, ale kdybychom se rozhodli použít více dílů z hliníku, tak by celková váha mohla být uživatelsky nepříznivá. Další nevýhodou volby soustružení z hliníku je tvorba čtvercové díry, která je poměrně náročná.



Obr. 19 – Náhled tisku náboje kola v prostředí programu PrusaSlicer

Brzdový kotouč

U tisku brzdového kotouče kola jsou opět nutné podpory pro tvorbu vnitřní dutiny (Obr. 20). Opracovaná plocha dosedá na opracovanou plochu náboje kola.



Obr. 20 – Náhled tisku brzdového kotouče kola v prostředí programu PrusaSlicer

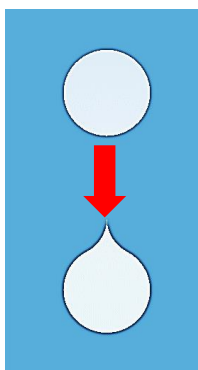


Dolní část tlumiče

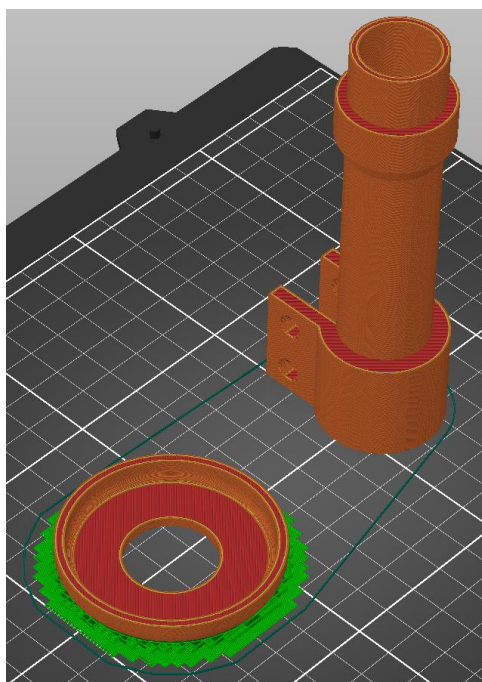
Nemusí přenášet sílu, takže slouží pouze pro názornost a úplnost celého modelu jako brzdič.

Tento model se bude tisknout ze dvou slepovaných dílů kvůli omezení množství podpor (Obr. 22). Dolní část tlumiče bude vhodné tisknout ve vertikálním směru, ovšem díry jsou v horizontálním směru, takže musíme dávat pozor na vznik převisu v horní části. Převisy ale vznikají u větších děr s průměrem okolo 10 mm, ovšem může se stát, že vznikne defekt i pro náš případ 7 mm děr. Pro odstranění převisu se může použít úprava geometrie otvoru. Takovou úpravou může být například odebrání části materiálu ve vrcholu této díry viz. (Obr. 21).

Kompletaci provedeme tak, že nejprve nasuneme misku tlumiče na vrchní část, kde se opře o kruhové osazení a následně se slepí.



Obr. 21 – Úprava geometrie pro odstranění převisu



Obr. 22 – Náhled tisku misky tlumiče a dolní částí tlumiče.

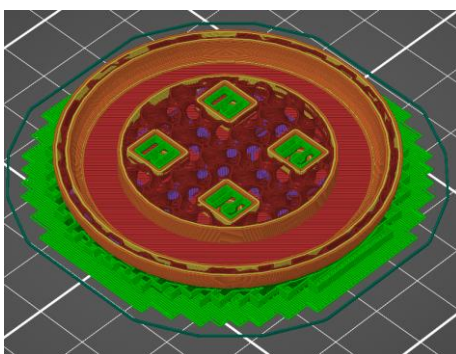


Horní část tlumiče a víčko

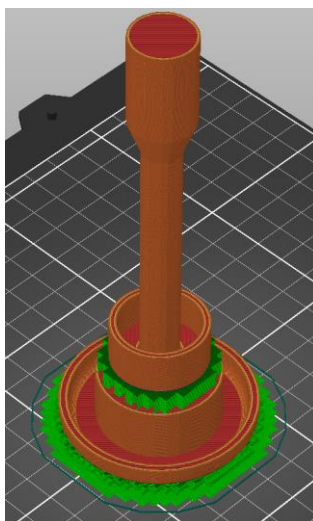
Zpočátku se nabízí tvorba součásti soustružením hliníkového polotovaru, ovšem takovéto soustružení by bylo poměrně náročné, protože bychom museli zároveň soustružit víčko.

Oproti tomu 3D tiskem po určitých úpravách bychom mohly dosáhnout tíženého výsledku. Jednou z těchto úprav jsou obdélníkové drážky (Obr. 23) pro následné uložení a zatavení matic, které s pomocí šroubů budou spojovat horní část tlumiče s kulovým uložením v rámu.

Některé díly a spoje nejdou vytvořit jinak než tisknutím více dílů najednou, jako je tomu právě u horní části tlumiče s víčkem, kde pro aretaci polohy je nutné použít víčko, které se nalepí na dolní část tlumiče, a tím vytvoří doraz pohybu tlumiče. Kromě vytvoření dorazu je vhodné použít víčko za účelem větší stability polohy, jelikož tištěné díly mají zpravidla nepřesné rozměry. Proto je vhodné používat, pokud možno co nejdelší vodící plochy v posuvných a rotačních vazbách. Na (Obr. 24) je vidět, že mezi plochou tlumiče a víčkem jsou umístěny podpory, které jsou zobrazeny zelenou barvou. Ve vrchní části (Obr. 24) jsou také vidět již zmíněné delší vodící plochy a převis v části změny průměru, který je geometricky upraven, aby zde nevznikaly nežádoucí podpory.



Obr. 23 – Náhled tisku horní části tlumiče se zobrazenými drážkami pro zatavení matic



Obr. 24 – Náhled tisku horní části tlumiče společně s víčkem



Pružina

Původně byla snaha použít vyráběnou ocelovou pružinu s rozměry korespondující s naším měřítkem (1:2), avšak většina prodejců nabízí vinuté pružiny s příliš velkou tuhostí. Podle (Tab. 5) nejlépe vychází pružina od výrobce Sodeman s tuhostí 160,89 [N], což je ale stále vysoká a uživatelsky nepřijatelná hodnota. Velká tuhost pružiny by mohla také nepříznivě ovlivnit plastová ramena, která by se mohla prohnut a v nejhorším případě i prasknout. Taktéž uživatel tohoto modelu by byl nucen vynaložit velké úsilí, aby došlo k propružení.

Rozměry pružiny automobilu 1:1 (L0=200-300; Dm=90-120)

Rozměry pružiny v měřítku 1:2 pro náš model (L0=100-150; Dm=45-60)

VÝROBCE	PRŮMĚR DRÁTU D [MM]	STŘEDNÍ PRŮMĚR DM [MM]	DÉLKA BEZ ZATÍŽENÍ LO [MM]	MAX. DÉLKA PŘI ZATÍŽENÍ LN [MM]	MAXIMÁLNÍ ZATÍŽENÍ PŘI LN, FN [N]
SODEMAN (NEREZOVÁ OCEL 302)	3,76	45,44	139,70	74,37	160,89
ALCOMEX (PRUŽINOVÁ OCEL)	3,6 4	45 50	137,5 150,0	34,0 38,6	353,20 426,59
ALCOMEX (NEREZOVÁ PRUŽINOVÁ OCEL)	3,6 4	45 50	137,5 150,0	34,0 38,6	294,20 355,35
MATEZA	3,6 4	45 50	137,5 150,0	34,0 38,6	353,20 426,59
FEVOS	4	50	130	47,8	260,00

Tab. 5 – Výrobci tlačných vinutých ocelových pružin

Pružina je jednou z nejsložitějších součástí k tisku, ale ne nemožných. Jelikož pružina v našem modelu nemusí být velmi tuhá, tak ji můžeme tisknout z plastu. Ale při tvorbě tištěné pružiny musíme dbát na to, aby nedošlo k prasknutí při propružení. Příklad takové vytištěné opracované pružiny bez podpor je na (Obr. 25). Tuto pružinu tisknul pan Ing. Lukáš Kazda z materiálu PLA.

Další možností je navinutí pružiny z ocelového drátu malého průměru, aby měla pružina, pokud možno co nejmenší tuhost.

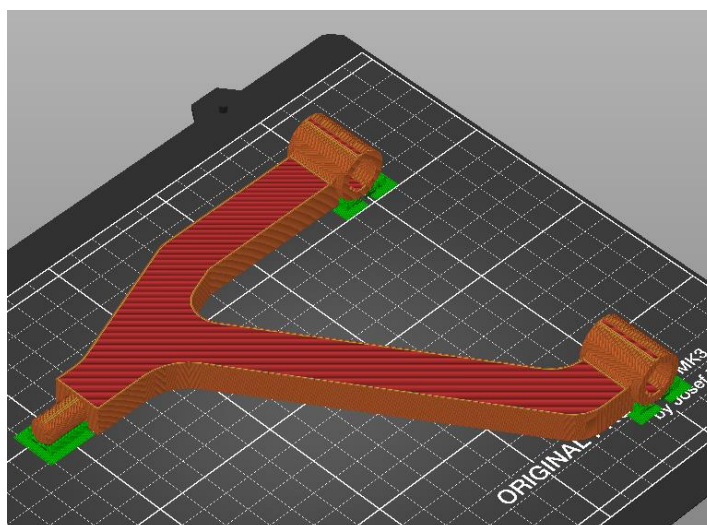


Obr. 25 – Vytištěná pružina od Ing. Lukáše Kazdy z materiálu PLA

Trojúhelníkové příčné rameno

Trojúhelníkové příčné rameno spojuje těhlici s rámem. Rameno je spojeno s těhlicí pomocí kulového čepu a s rámem rotační vazbou.

Jak je zřejmé z (Obr. 26) příčné rameno se vejde do tiskového prostoru, tudíž je možné ho tisknout z jednoho dílu. Vzhledem k tomu, že horizontální díry mají průměr 13 mm dá se očekávat, že bude docházet k převisu. Tomu lze předejít opět úpravou geometrie, jako tomu bylo u dolní části tlumiče. Další komplikací je tvorba závitu pro následné uložení kulového kloubu. Tisk horizontálního vnějšího závitu je velmi náročný, protože pro jeho vznik je nutná tvorba podpor, která znehodnocuje povrch závitu. Kvůli tomu se dělá závit o 0,1 mm větší a následně se upraví závitovým očkem na požadovanou hodnotu. Abychom zlepšili povrch závitu, můžeme seříznout válcovou plochu tak, aby byla na základní tiskové ploše a tím by nevznikaly podpory.

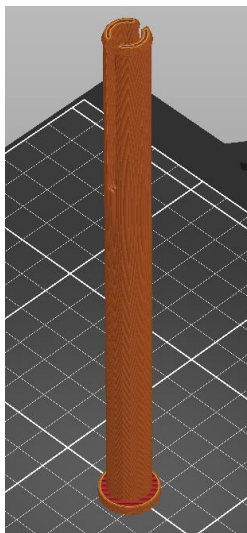


Obr. 26 – Náhled tisku příčného ramena v prostředí programu PrusaSlicer



Tyč uložení příčného ramena

Tato dutá tyč spojuje svařovaný rám s příčným ramenem. Zpočátku byla představa použití dvou těchto tyčí, ale to by nebyla zaručena dostatečná vodící plocha a stabilita polohy. Tyč (Obr. 27) je na jedné straně osazena a na druhé straně je podélně rozříznuta pro stlačení a zmenšení průměru, aby vznikl „zacvakávací“ spoj.

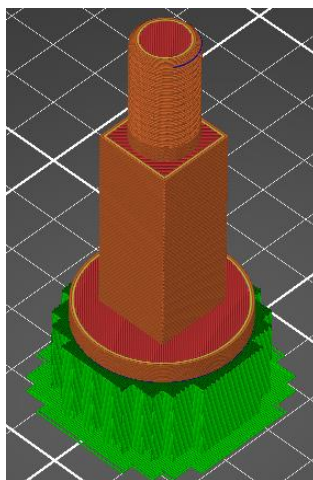


Obr. 27 – Náhled tisku tyče uložení příčného ramena v prostředí programu PrusaSlicer

Koncová část poloosy

Poloosa přenáší moment na náboj kola pomocí tvarového spoje, konkrétně čtvercového. Takto řešený spoj je i na druhé straně z (Obr. 28) na straně zelných podpor, kde se spojuje s dělenou částí poloosy. Pro vymezení polohy slouží závitový konec, na který se následně našroubuje normalizovaná matice. Tento závit má větší průměr o 0,05 mm pro pozdější dokončování závitovým očkem.

Je možné vyrobit tento díl soustružením či frézováním z hliníku na CNC stroji.

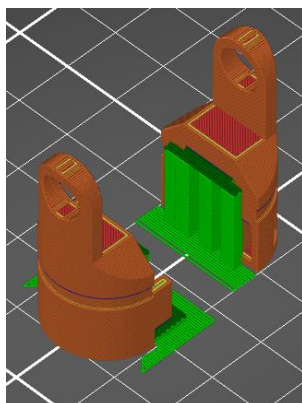


Obr. 28 – Náhled tisku koncové části poloosy



Dělená část poloosy

Dělená část poloosy spojuje koncovou část poloosy s kardanovým kloubem, a také manipulační kolo s kardanovým kloubem. Z (Obr. 29) na straně zelených podpor se nachází kapsa čtvercového průřezu pro spojení s koncovou poloosou. Pro uložení kardanového kloubu bylo nutné rozdělit tento díl na dvě části, které se následně budou lepit k sobě. Ke spojení budou také napomáhat dva obdélníkové čepy a k tomu náležitě průchozí díry pro správnou vzájemnou polohu obou částí. Obě části dílu také mají na svém obvodu drážku pro zajištění manžety.

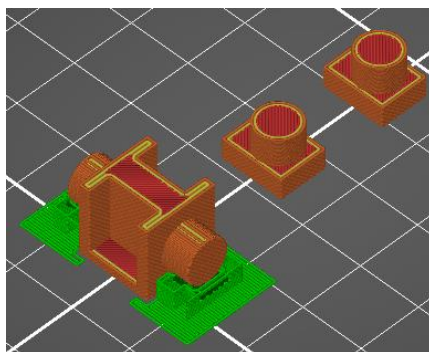


Obr. 29 – Náhled tisku dělené části poloosy

Kardanový kloub

Poháněná poloosa automobilu má homokinetický kloub, který převádí konstantní otáčky od hnací jednotky na kola. Ovšem pro naše účely stačí použít místo homokinetického kloubu kloub křížový kardanový, který sice při největším propružení nepřenáší konstantní otáčky, ale pro naše účely je to naprosto dostačující. [14]

Kardanový kloub spojuje dělenou a posuvnou část poloosy, a také dělenou a vnější část poloosy. Skládá se z hlavního kusu, kam se vkládají a lepí dva další čepy (Obr. 30). Montáž a lepení probíhá v určitém pořadí společně s ostatními díly viz. kapitola o postupu montáže.

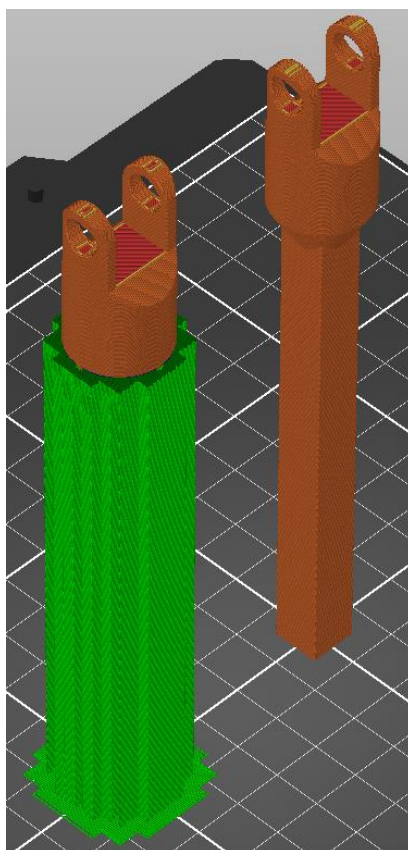


Obr. 30 – Náhled tisku čepů kardanového kloubu a jeho hlavní části



Posuvná vnitřní část poloosy

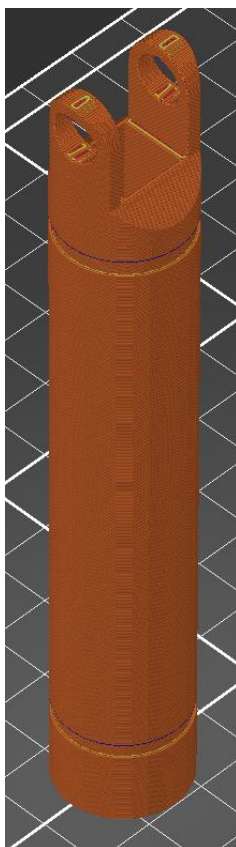
Tento díl je připojen v horních otvorech ke kardanovému kloubu a v dolní části vytváří posuvnou vazbu s vnější poloosou. Pro tvorbu převisu při tomto vertikálním tisku jsou zapotřebí podpory, které opět zhoršují kvalitu povrchu. Jedním ze způsobů odstranění podpor by mohlo být tisk ze dvou částí, které by se následně slepily. Další možností může být třeba úprava geometrie převisu, kde se mohou přidat podpěrná žebra, nebo se změní úhel převisu, který svírá se základnou jako je tomu na pravé části (Obr. 31).



Obr. 31 – Náhled a porovnání tisku dvou odlišných geometrií převisu posuvné části poloosy

Vnější část poloosy

Vnější část poloosy je spojena v horních otvorech s druhým kardanovým kloubem a vnitřní čtvercová díra vytváří posuvnou vazbu s posuvnou poloosou. Tisk je poměrně jednoduchý, protože zde nevznikají téměř žádné podpory (Obr. 32), které by znehodnocovaly povrch a musely by být následně odstraňovány. Je to kvůli tomu že čtvercová díra je skrze celý díl, a tak nevzniká žádná horizontální plocha, která by musela být podepírána. Tento díl má také jako dělená část poloosy drážky pro zajištění polohy manžety.

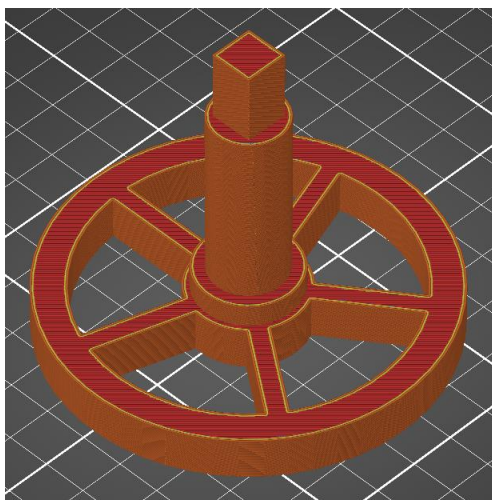


Obr. 32 – Náhled tisku vnější části poloosy

Manipulační kolo poloosy

Manipulační kolo má kromě svého hlavního účelu tedy otáčet s ráfkem kola i svůj další neméně podstatný úkol, a to sice uložení samotného hřídele v rámu.

Samotný tisk je opět poměrně bezproblémový, jelikož zde nevznikají žádné podpory (Obr. 33), které by prodlužovaly tisk a znehodnocovaly povrch součásti.



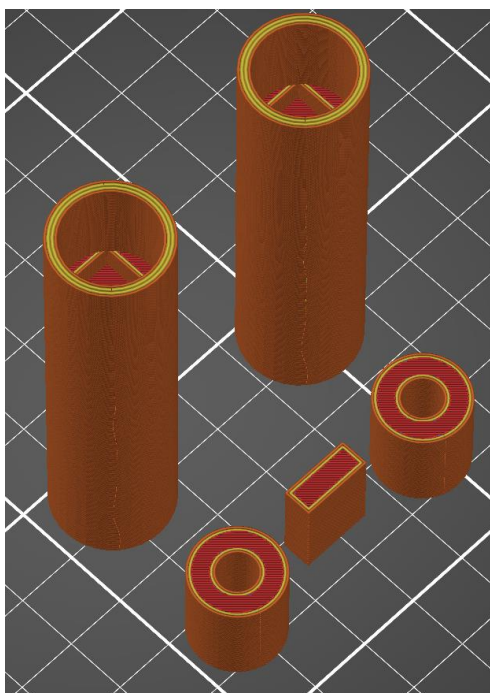
Obr. 33 – Náhled tisku manipulačního kola



Řídící tyč

Tyč řízení je spojena s těhlicí kulovým kloubem a slouží, buď k natáčení kol u řízené nápravy, nebo v případě neřízené zadní nápravy k fixaci kola v přímém směru. Tato tyč může být koupená i zhotovena 3D tiskem. Jedinou podmínkou je, aby měla na každé straně závit pro našroubování kupovaných plastových dílů kulových uložení od firmy Igus, které jsou umístěny na těhlici a v uložení do rámu.

Tisk tyčoviny s vnějšími závity na obou stranách by byl velmi náročný, proto jsem se rozhodl pro variantu, kde se do obdélníkové drážky (Obr. 34) vloží šroub se šestihrannou hlavou, který se následně zajistí zalepením záslepkou. Pro lepší povrch dosedací plochy se šroubem bez nutnosti odstranění podpor jsem zvolil tisk ze dvou částí, které se poté spojí pomocí zvlášť tištěného obdélníkového kolíku.



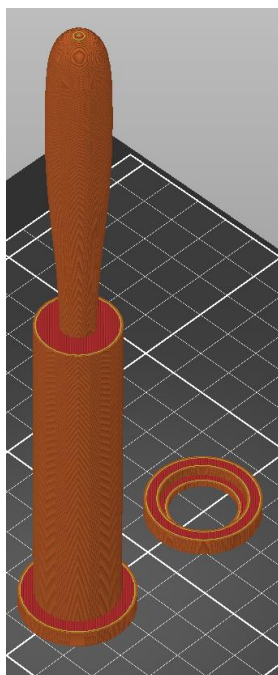
Obr. 34 – Náhled tisku rozdělené části řídicí tyče včetně dvou záslepek a obdélníkového kolíku

Manipulační část řídicí tyče

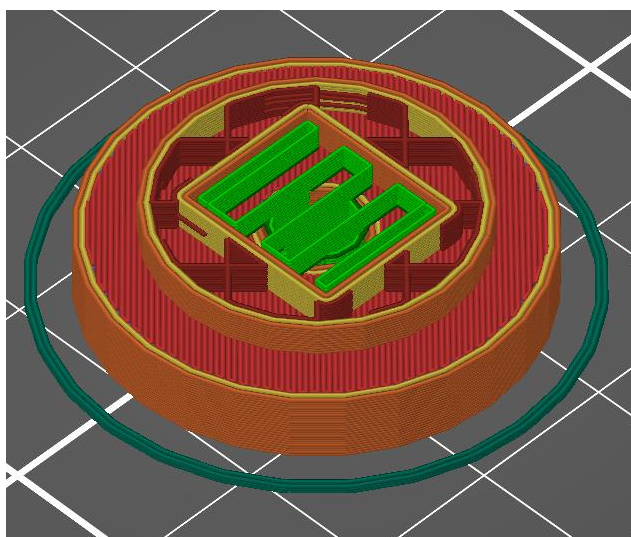
Manipulační část řídicí tyče propojuje řídicí tyč s rámem celého modelu.

Díl se musí tisknout ze dvou částí (Obr. 35), protože je nutné vytvořit doraz celkového posuvného pohybu. Tímto dorazem je víčko, které se po vložení do vodící příruby nalepí na manipulační část ze strany držadla.

Za účelem spojení s řídicí tyčí je nutná tvorba vnitřního závitu, který jsem nahradil zatavením matky do předem připravené drážky obdélníkového profilu (Obr. 36).



Obr. 35 – Náhled tisku manipulační části řídicí tyče včetně víčka



Obr. 36 – Náhled tisku drážky pro zatavení matice v manipulační části

Odhad doby tisku a spotřeby materiálu jednotlivých dílů

Odhadovaná doba tisku a spotřeba materiálu byla vypočítána pomocí již zmíněného programu PrusaSlicer. Při výpočtu jsem nastavil hustotu výplně na 15 % se vzorem kubickým podepíraným.

Odhad tisku je uskutečněn pro náš dostupný materiál filamentu PETG. Většina dílů může být tištěna z PETG, ovšem u pružiny si musíme dát pozor, aby nepraskala. Pokud by se toto dělo museli bychom použít vhodnější pružnější materiál k tomu určený. Dále pro tisk dílů se závitem je spíše vhodnější tisk z materiálu PLA.



Z (Tab. 6) vyplývá, že tisk všech 35 dílů modelu zavěšení kola nápravy McPherson bude trvat přibližně 65 hodin a 32 minut, a bude při něm spotřebováno 712,98 gramů neboli 223,64 metrů filamentu. Pokud všechny díly budou tištěny z materiálu PETG, tak celková spotřeba materiálu i s ohledem na zmetkovitost je jedna cívka, tedy jeden kilogram tohoto filamentu. Cena takovéto cívky se pohybuje okolo 699 Kč.

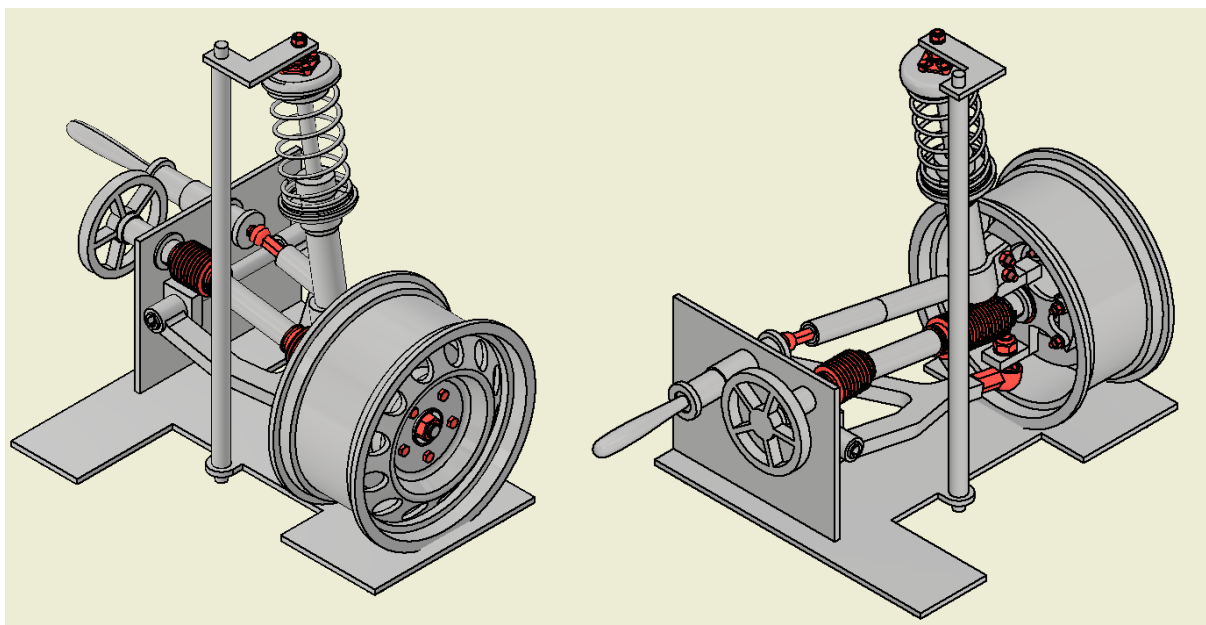
	ODHADOVANÁ DOBA TISKU	SPOTŘEBA FILAMENTU V [g]; [m]	Z KOLIKA SOUČÁSTÍ SE DÍL SKLÁDÁ
RÁFEK KOLA	17h 50m	235,75; 73,69	1
TĚHLICE	2h 29m	33,72; 10,54	3
BRZDIČ	1h 25m	19,01; 5,94	1
NÁBOJ KOLA	2h 39m	33,56; 10,49	1
BRZDOVÝ KOTOUČ	4h 23m	72,07; 22,53	1
DOLNÍ ČÁST TLUMIČE	4h 1m	44,96; 14,05	2
HORNÍ ČÁST TLUMIČE	4h 51m	36,30; 11,35	2
PRUŽINA	5h 26m	38,97; 12,96	1
PŘÍČNÉ RAMENO	2h 51m	44,72; 13,98	1
TYČ ULOŽENÍ PŘÍČNÉHO RAMENA	2h 52m	15,53; 4,85	1
KONCOVÁ ČÁST POLOOSY	1h 38m	12,64; 3,95	1
DĚLENÁ ČÁST POLOOSY (2x)	1h 30m	11,92; 3,72	4
KARDANOVÝ KLOUB (2x)	38m	5,56; 1,74	6
VNITŘNÍ POSUVNÁ ČÁST POLOOSY	1h 57m	10,74; 3,36	1
VNĚJŠÍ ČÁST POLOOSY	2h 42m	19,07; 5,96	1
MANIPULAČNÍ KOLO	2h 24m	25,65; 8,02	1
ŘÍDÍCÍ TYČ	2h 15m	26,03; 8,14	5
MANIPULAČNÍ ČÁST ŘÍDÍCÍ TYČE+VÍČKO	3h 41m	26,78; 8,37	2
Σ	65h 32m	712,98; 223,64	35

Tab. 6 – Odhadovaná doba tisku a spotřeby materiálu jednotlivých dílů



3.3.2 Kupované díly

Některé díly jsou pro výrobu 3D tiskem nevhodné, a proto jsme nuceni zvolit alternativu ve formě koupě některých dílů (Obr. 37). Takovými díly jsou například spojovací součásti jako šrouby, podložky a matice, nebo kulová uložení od firmy Icus.



Obr. 37 – Kupované díly zavěšení kola nápravy McPherson

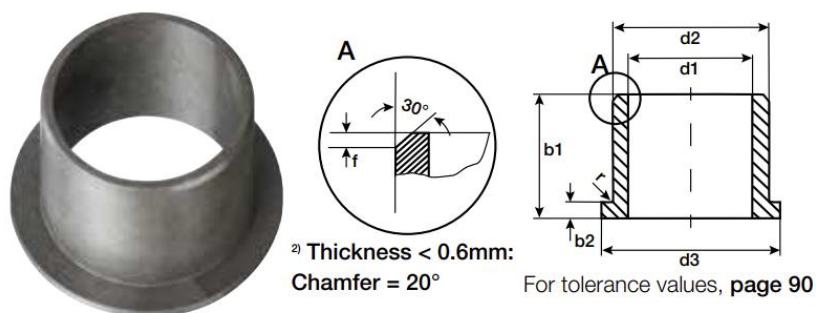
Normalizované spojovací součásti

Jako při reálném zavěšení i u modelu použijeme pro spojení odnímatelných částí normalizované šrouby, matice a podložky, ovšem namísto kolových šroubů s kuželovou nebo kulovou dosedací plochou, jsme použili standardní šrouby se šestihrannou hlavou. Normy a rozměry konkrétních použitých dílů jsou zobrazeny v kapitole o postupu montáže.

U spojů s průchozími dírami je použití normalizovaných součástí bezproblémové, avšak u některých dílů je potřeba vkládat matky nebo šrouby do tištěných dílů, které se budou buď zatavovat nebo zalepovat dalšími díly.

Ložiska

U zavěšení kol automobilu se používají výhradně valivá ložiska, ale pro náš případ budou stačit pouze kluzná ložiska uložená v těhlici. Výhodou kluzných ložisek oproti kuličkovým je, že zaujmají menší prostor, tudíž těhlice může být menší. V našem případě také plní ložiska funkci dorazu pro vymezení polohy v axiálním směru. Můžeme použít kupované díly od firmy Icus. Konkrétně v našem modelu jsou použita dvě kluzná ložiska s označením GFM-2528-11 (Obr. 38) s parametry uvedených v (Tab. 7).



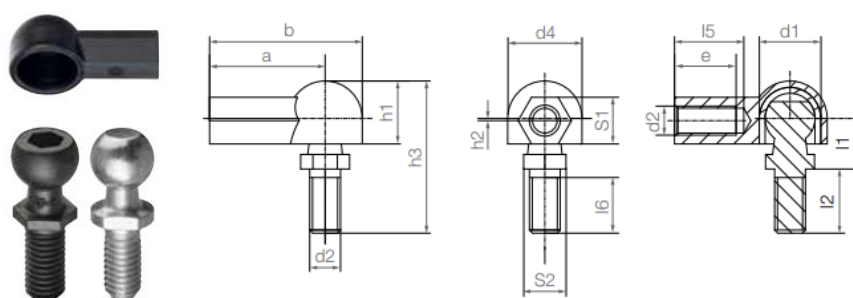
Obr. 38 – Plastové kluzné ložisko od firmy Igus včetně schéma ložiska [15]

	d1	d2	d3 (d13)	b1 (h13)	b2 (-0,14)
GFM-2528-11	25,0	28,0	35,0	11,5	1,50

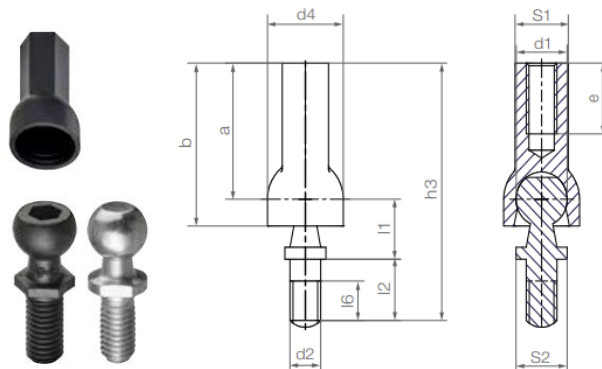
Tab. 7 – Kluzné ložisko firmy Igus – parametry v [mm] včetně tolerancí [15]

Kulové čepy

Kulové čepy u zavěšení McPherson slouží ke spojení dolního ramena s těhlicí, nebo také ke spojení řídicí tyče s těhlicí. U těchto dílů se klade důraz především na funkčnost. Proto upřednostňuji kupované kulové čepy před těmi tisknutelnými, jelikož tisk takovýchto dílů je náročný na výrobu, a ne příliš přesný. Nabízí se možnost koupení dílů od již zmíněné firmy Igus. Pro spojení příčného ramena s těhlicí jsem zvolil pravoúhlý kulový kloub (Obr. 39) s označením WGRM-10 LC a pro spojení s řídicí tyčí WGRM-06 LC, jejichž parametry jsou zobrazeny v (Tab. 8). Ke spojení řídicí tyče s její manipulační částí je zase vhodnější použít přímý kulový kloub (Obr. 40) s označením AGRM-06 LC a parametry viz. (Tab. 9).



Obr. 39 – Pravoúhlý kulový kloub firmy Igus včetně schématu [16]



Obr. 40 – Přímý kulový kloub firmy Iigus včetně schématu [16]

	WGRM-06 LC	WGRM-10 LC
d1 ($\pm 0,1$)	10	16
d2	M6	M10
d4 ($\pm 0,5$)	14,8	24,0
l1 ($\pm 0,2$)	11	16
l2 ($\pm 0,3$)	12,5	20,0
l5	16	20
l6 (Min.)	10,5	16,0
h1 ($\pm 0,4$)	12,3	20,0
h2 ($\pm 0,5$)	0,70	1,15
h3 ($\pm 0,5$)	30,9	47,0
a ($\pm 0,3$)	25	35
b ($\pm 0,5$)	32,4	47,0
e ($\pm 1,0$)	13	18
S1	9	14
S2	8	13
MAXIMÁLNÍ ÚHEL NATOČENÍ	25°	25°

Tab. 8 – Parametry pravouhlých kulových kloubů včetně tolerancí uvedených v [mm] [16]

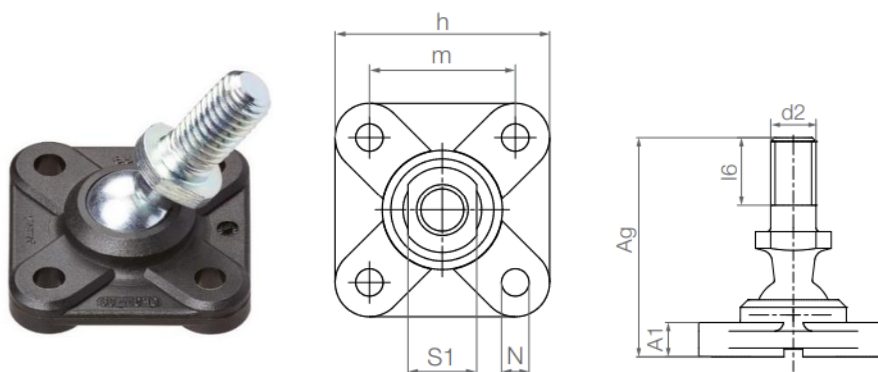


	AGRM-06 LC
d1 ($\pm 0,1$)	10
d2	M6
d4 ($\pm 0,5$)	14,8
I1 ($\pm 0,2$)	11
I2 ($\pm 0,3$)	11,25
I6 (Min.)	7,25
h3 ($\pm 0,5$)	47,25
S1	9
S2	10
a ($\pm 0,3$)	25
b ($\pm 0,5$)	29,9
e (Min)	13
DOPORUČENÝ MAXIMÁLNÍ ÚHEL NATOČENÍ	18°
MAXIMÁLNÍ ÚHEL NATOČENÍ	25°

Tab. 9 – Parametry přímého kulového kloubu včetně tolerancí uvedených v [mm] [16]

Uložení horní části tlumiče

U zavěšení McPherson je v horní části těhlice připojen tlumič, který přenáší všechny síly do rámu auta. Tento typ zavěšení se často používá u předních řízených nápravách, a proto je tlumič uložen v axiálním ložisku pro natáčení kol. Místo axiálního ložiska můžeme použít kulovou vazbu. Dobrou volbou je opět díl od firmy Igus. Volba všech dílů od této firmy je také výhodná z hlediska sestavování našeho 3D modelu, jelikož mají databázi volně stahovatelných CAD modelů. Konkrétním dílem obsaženým v našem modelu je kulový spoj s plastovým přírubovým uchycením a nerezovým šroubem (Obr. 41), který má označení GFSM-06-AG, a jehož parametry jsou zobrazeny v (Tab. 10).



Obr. 41 – Kulové přírubové uložení od firmy Iigus včetně schématu [16]

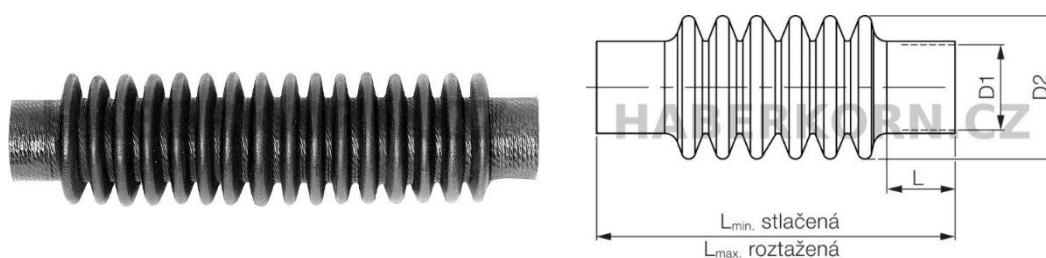
	d2	m	h	Ag	A1	I6	N	S1	MAXIMÁLNÍ ÚHEL OTÁČENÍ
GF5M-06-AG	M6	17.0	25.0	29.0	4.5	10.5	3.2	8	32°

Tab. 10 – Parametry kulového uložení od firmy Iigus v [mm] [16]

Manžeta (prachovka)

Nejvýhodnější variantou je možnost koupě prachovky pro kloubové výsuvné hřídele od firmy Haberkorn (Obr. 42). Konkrétně pro náš model prachovka s kódovým označením T64179 a parametry (Tab. 11).

Další alternativou může být možnost výroby 3D tiskem ze speciálního pružného materiálu, což je ovšem poměrně náročné.



Obr. 42 – Prachovka firmy Haberkorn pro kloubové výsuvné hřídele včetně schématu [17]

	D1	D2	L	L _{min.}	L _{max.}	POČET ZÁHYBŮ	HMOTNOST [kg/ks]	MATERIÁL
T64179	20	35	21	62	122	6	0,01	kůže

Tab. 11 – Parametry prachovky firmy Haberkorn v [mm] [17]



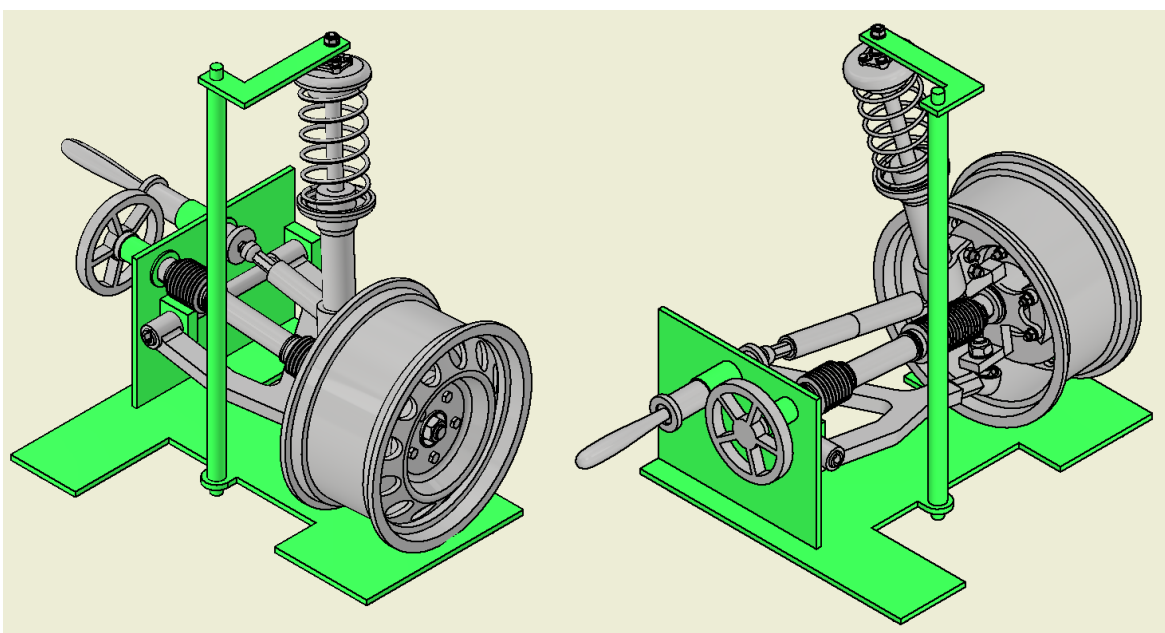
3.3.3 Svařovaná ocelová konstrukce

Hlavním požadavkem na svařovanou konstrukci a rám je dostatečná tuhost, která je potřebná pro uložení všech dílů modelu. Protože se však jedná o plastové díly malé hmotnosti, tak můžeme považovat za dostačující použití nerezových plechů s tloušťkou 5 mm.

Celá svařovaná konstrukce (Obr. 43) se skládá z nerezových plechů, nerezové tyče, vodících přírub, podstavců a dvou úchytů.

Nejprve začneme svařovat základní desku z nerezového plechu s podstavci, poté desku svaříme se svislým nerezovým plechem. Svislý plech je osazen dvěma přírubami pro lepší vedení manipulačních tištěných součástí. Dále jsou k němu přivařeny dva úchyty pro uložení příčného ramena. Horní uložení tlumiče je přišroubováno s nerezovým plechem, který je spojen se základní deskou pomocí nerezové tyče. Nerezová tyč je k těmto dílům přivařena pomocí koutových svarů.

Volba technologie svařování závisí na vybavení laboratoří ČVUT Fakulty strojní. Může to být metoda TIG (Tungsten Inert Gas), nebo Metoda MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas), které se mohou použít pro svařování nerezových materiálů.



Obr. 43 – Svařované díly rámu zavěšení kola nápravy McPherson



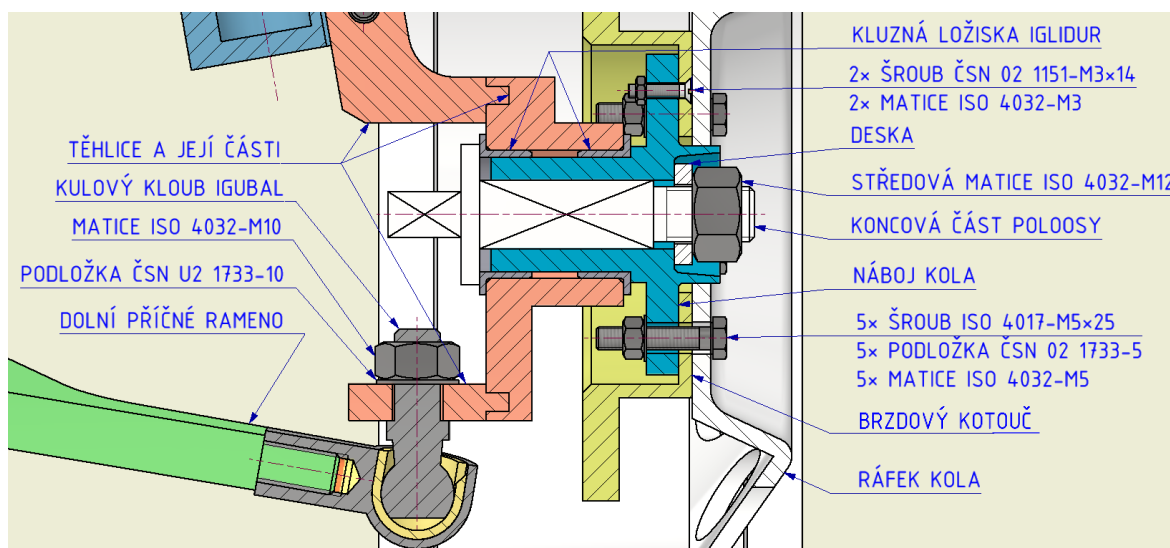
3.3.4 Postup montáže

V této části je popsán nejen postup sestavení modelu, ale také zobrazení jednotlivých konstrukčních celků pro jednoznačné znázornění provedení modelu.

Uložení kola

Na (Obr. 44) je zobrazeno uložení kola v těhlici a také umístění kulového kloubu, který je připevněn k příčnému rameni.

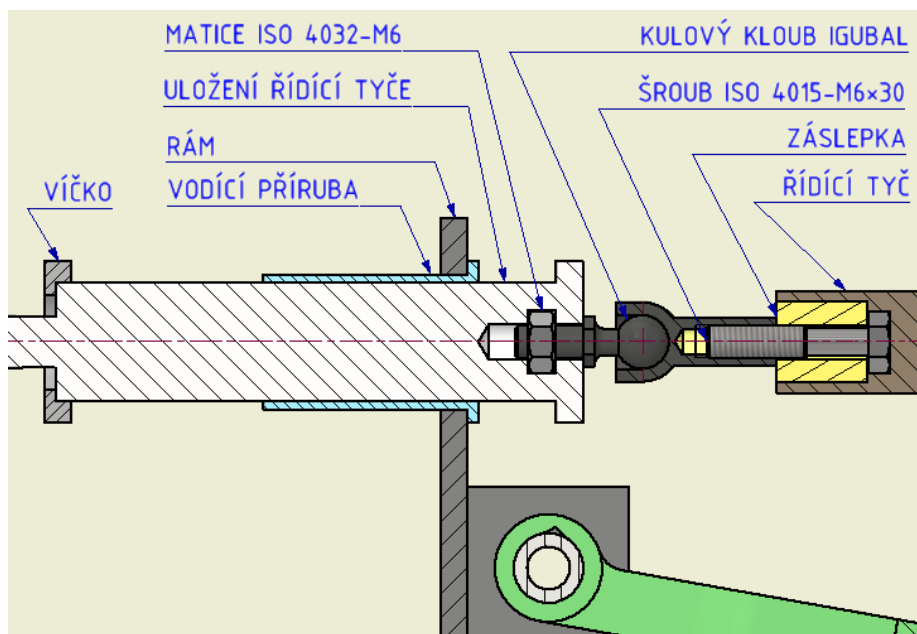
Při sestavení nejprve sešroubujeme brzdový kotouč a náboj kola s ráfkem, kde tyto díly vložíme do těhlice, která je z obou stran osazená kluznými ložisky. Poté vložíme koncovou část poloosy do náboje kola. Tato část zajišťuje kolo v axiálním směru, tím že se opírá na straně osazení o kluzné ložisko a na druhé straně je zajištěno podložkou a maticí.



Obr. 44 – Uložení kola

Uložení řídicí tyče a sestavení řídicí tyče

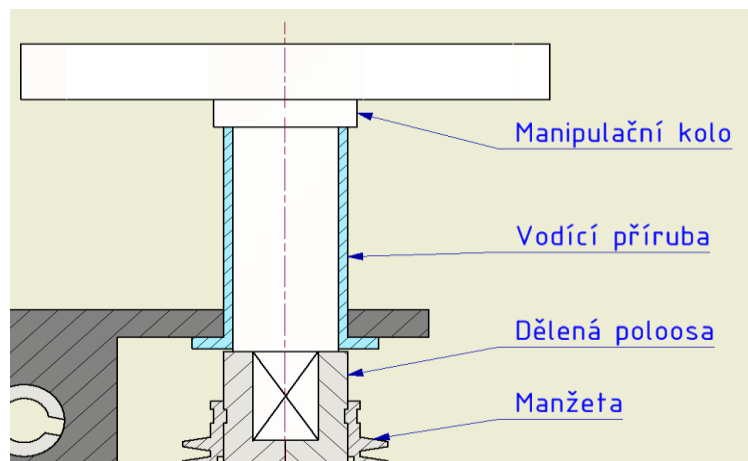
Nejprve vložíme uložení řídicí tyče (Obr. 45) do vodící příruby a následně zalepíme víčkem, které slouží jako doraz pohybu. Poté zkompletujeme řídicí tyč, kde je zapotřebí vložení normalizovaných šroubů a zalepení záslepkou. A nakonec spojíme tyto dvě části pomocí kulového spoje.



Obr. 45 – Uložení řídicí tyče ve vodící přírubě rámu

Sestavení dělené části poloosy s manipulačním kolem

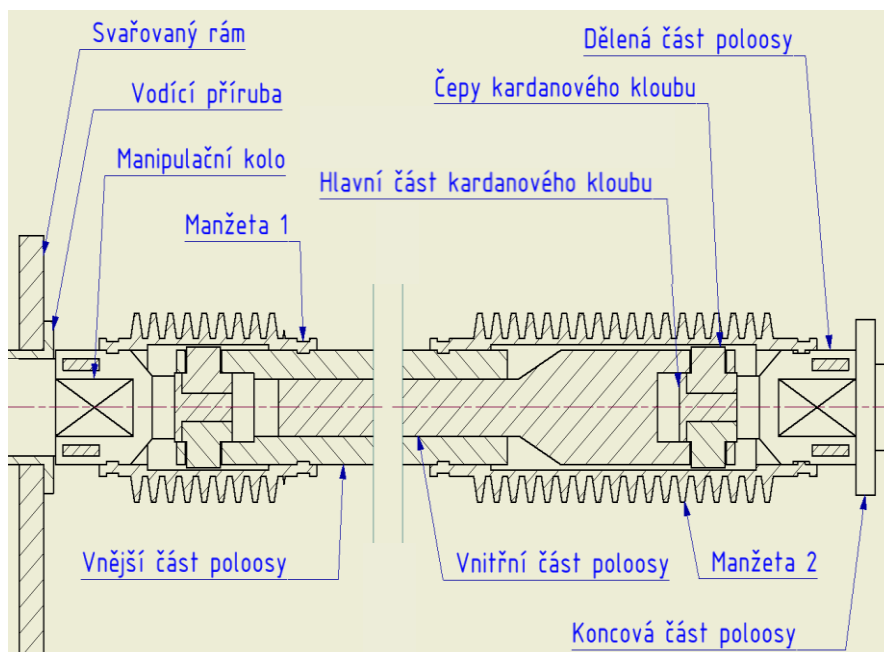
Montáž u tohoto konstrukčního celku je velmi jednoduchá a to tak, že se pouze vloží manipulační kolo (Obr. 46) do vodící příruby a pak se připojí lepením s dělenou částí poloosy. Poloha je zajištěna osazením kola a dělenou poloosou.



Obr. 46 – Sestavení dělené poloosy a manipulačního kola

Sestavení poloosy

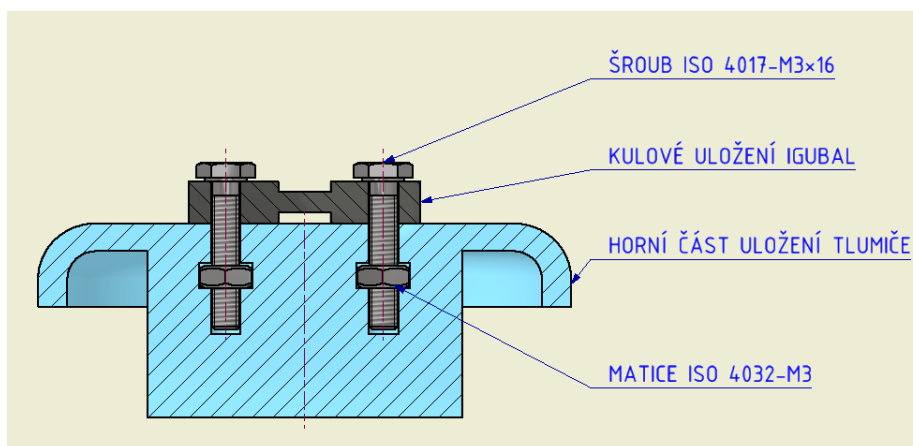
Nejprve začneme tím, že do nedělených částí, jakými jsou vnější a vnitřní část poloosy (Obr. 47) vložíme čepy kardanového kloubu, které slepíme s hlavní částí kardanového kloubu. Na hlavní části kardanu již můžeme umístit dělenou poloosu, kterou také slepíme k sobě. Teď už stačí pouze spojit vnitřní s vnější částí poloosy, a následně první dělenou poloosu s koncovou poloosou a druhou s manipulačním kolem.



Obr. 47 – Sestavení celé poloosy a její připojení k manipulačnímu kolu

Spojení horní části tlumiče s kulovým uložením

Kulové uložení (Obr. 48) je připevněno s horní částí tlumiče normalizovanými šrouby a zatavenými matkami v materiálu tlumiče.



Obr. 48 – Spojení horní části tlumiče s kulovým uložením firmy Igus



3.3.5 Rozdíly mezi modelem a reálným provedením zavěšení kol automobilu

Všechny tyto změny byly učiněny za účelem zjednodušení a proveditelnosti výroby jednotlivých dílů zavěšení.

Jedním z rozdílů mezi reálným zavěšením a naším modelem je provedení poloosy, která je ve skutečnosti uložena pomocí drážkování a úhlový převod je zprostředkováván pomocí homokinetického kloubu. Kdežto v našem modelu je použit tvarový čtvercový převod a hřídel s kardanovými klouby. Dalším rozdílem je použití kolových šroubů bez kuželové nebo kulové dosedací plochy a také použití kluzných ložisek na místo kuličkových. Některé prvky pro svou nadbytečnost byly úplně odstraněny, jako třeba pryžová lůžka v uložení příčného ramena. Další součásti nezahrnuté v modelu jsou také stabilizátor a pneumatika kola.

3.3.6 Možná pozdější vylepšení a doplnění modelu zavěšení kola nápravy McPherson

V této kapitole jsou naznačena možná vylepšení modelu zavěšení kola nápravy McPherson, pro která během vypracování práce nezbyl čas, nebo byla příliš složitá.

Jedním z vylepšení by mohlo být zahrnutí stabilizátoru do našeho modelu. Zpočátku byla úvaha nepoužít stabilizátor, protože pro náš poloviční model nezávislého zavěšení kola nám přišel nevhodný, jelikož aby správně fungoval, musel by být kompletní. Nakonec jsme však usoudili, že by bylo vhodné jej zahrnout pro edukační účely, byť by byl v nefunkčním stavu.

Dalším vylepšením by mohla být změna konstrukce svařovaného rámu pro lepší a jednodušší demonstraci propružení, kde by tato konstrukce byla připevněna na svislou stěnu s možností nastavení výšky. Při této variantě by se teoreticky ani nemusel tisknout model ráfku kola, a tudíž bychom mohli propružení simulovat pouhým pohybem ruky s brzdovým kotoučem, a zároveň by se ušetřilo spoustu času spotřebovaného na tisk ráfku kola.



3.4 Návrh koncepce zavěšení kola se dvěma příčnými rameny (lichoběžníková náprava)

Tato náprava je lehčí oproti zavěšení kola nápravy McPherson, jelikož nemusíme řešit otočné uložení tlumiče do rámu. Při této koncepci nám přibude horní rameno, a tudíž i další kulový spoj s těhlicí. S tím souvisí i tvar těhlice, která teď nebude napevno připevněna v horní části k tlumiči. Dolní rameno musí být modifikováno pro uložení pružiny a tlumiče, které jsou spojeny s rámem. Rám bude také jiný, protože zde bude uloženo dvou ramen. Části, které však můžeme ponechat jsou poloosa, řídicí tyč, tyč uložení ramen, náboj kola, brzdový kotouč, brzdíč a ráfek kola. Teoreticky můžeme ponechat také jedno z příčných trojúhelníkových ramen a doplnit ho druhým delším, respektive kratším ramenem.

3.5 Návrh koncepce zavěšení kola víceprvkové nápravy

U této koncepce je největší změnou rám a prvky na něm uložené, jelikož příčná ramena jsou dělená, tak jejich uložení do rámu bude složitější. Geometrie těhlice bude teď mnohem členitější, takže i náročnější na tisk. Součásti, které se nemění při víceprvkové koncepci jsou například: ráfek kola, náboj kola, brzdový kotouč, brzdíč, poloosa a tyč řízení. Stejně jako u lichoběžníkového zavěšení kola zde můžeme ponechat kupované díly kulových kloubů, spojovacích součástí nebo manžet a pouze je doplnit o další díly.



4 Závěr

Výsledkem této práce je návrh koncepce na základě rešerší nejčastěji používaných typů zavěšení kol. Nejprve jsme si určili měřítko a poté podle něj vytvořili 3D model zavěšení kola nápravy McPherson s jehož pomocí jsme stanovili možnou výrobu všech obsažených dílů. Některé z nich jsou vytvořeny aditivní technologií 3D tisku u jiných složitějších dílů jsme zvolili normalizované či kupované díly. A díly s požadovanou tuhostí, které jsou součástí nosné konstrukce jsou svařovány z nerezových plechů a tyčí.

Funkcí modelu je především seznámit o samotných konstrukčních prvcích důležitých pro vedení a pružení kola automobilu, a také ukázka celkové kinematiky při pružení vozidla s jistými geometrickými zásadami. Propružení je demonstrováno pouhým pohybem ruky s příčným ramenem nebo samotným ráfkem kola.

Model zavěšení kola se v určitých částech liší od skutečného zavěšení. Tyto nepřesnosti vznikly za účelem zjednodušení výroby jednotlivých součástí, a jelikož se jedná o úpravy, které nemají vliv na funkci modelu můžeme to považovat za přijatelné.

Během vytváření této práce jsem se blíže seznámil s koncepcemi zavěšení, a také s 3D tiskem konkrétně s prostředím programu PrusaSlicer, ve kterém jsem pochopil mnoho zásad a návyků při tvorbě dílů z této technologie včetně jejich výhod a nevýhod.



5 Seznam obrázků

Obr. 1 – Lichoběžníková náprava automobilu Škoda 1000 MB [3]	10
Obr. 2 – Náprava McPherson automobilu Mercedes-Benz E-Class [4].....	10
Obr. 3 – Zadní víceprvková náprava Porsche Cayenne [6]	11
Obr. 4 – Tuhá zadní poháněná náprava Opel Record E [7].....	12
Obr. 5 – Pozitivní a negativní odklon kola [2]	13
Obr. 6 – Příklon rejdové osy [2]	13
Obr. 7 – Poloměr rejdu kola [8]	14
Obr. 8 – Záklon rejdové osy [2].....	14
Obr. 9 – Model zavěšení kola přední hnací řízené nápravy McPherson.....	17
Obr. 10 – Příklon rejdové osy a poloměr rejdu modelu	17
Obr. 11 – Záklon rejdové osy modelu.....	18
Obr. 12 – Vyráběné díly zavěšení kola nápravy McPherson.....	19
Obr. 13 – Řez náboje předního kola u zavěšení McPherson [12]	21
Obr. 14 – Levá přední těhlice včetně náboje od firmy Britpart [13].....	21
Obr. 15 – Rozložení tištěných dílů těhlice na tiskové ploše v prostředí programu PrusaSlicer	21
Obr. 16 – Náskres sestavení těhlice	22
Obr. 17 – Náhled tisku obdélníkových drážek	22
Obr. 18 – Náhled tisku kruhové části drážek.....	22
Obr. 19 – Náhled tisku náboje kola v prostředí programu PrusaSlicer.....	23
Obr. 20 – Náhled tisku brzdového kotouče kola v prostředí programu PrusaSlicer	23
Obr. 21 – Úprava geometrie pro odstranění převisu	24
Obr. 22 – Náhled tisku misky tlumiče a dolní částí tlumiče.	24
Obr. 23 – Náhled tisku horní části tlumiče se zobrazenými drážkami pro zatavení matic	25
Obr. 24 – Náhled tisku horní části tlumiče společně s víčkem	25
Obr. 25 – Vytíštěná pružina od Ing. Lukáše Kazdy z materiálu PLA	27
Obr. 26 – Náhled tisku příčného ramena v prostředí programu PrusaSlicer.....	27
Obr. 27 – Náhled tisku tyče uložení příčného ramena v prostředí programu PrusaSlicer	28
Obr. 28 – Náhled tisku koncové části poloosy.....	28
Obr. 29 – Náhled tisku dělené části poloosy	29
Obr. 30 – Náhled tisku čepů kardanového kloubu a jeho hlavní části.....	29
Obr. 31 – Náhled a porovnání tisku dvou odlišných geometrií převisu posuvné části poloosy	30
Obr. 32 – Náhled tisku vnější části poloosy	31
Obr. 33 – Náhled tisku manipulačního kola.....	31
Obr. 34 – Náhled tisku rozdělené části řídicí tyče včetně dvou záslepek a obdélníkového kolíku	32
Obr. 35 – Náhled tisku manipulační části řídicí tyče včetně víčka	33
Obr. 36 – Náhled tisku drážky pro zatavení matice v manipulační části	33
Obr. 37 – Kupované díly zavěšení kola nápravy McPherson	35
Obr. 38 – Plastové kluzné ložisko od firmy Igus včetně schéma ložiska [15].....	36
Obr. 39 – Pravoúhlý kulový kloub firmy Igus včetně schématu [16]	36
Obr. 40 – Přímý kulový kloub firmy Igus včetně schématu [16]	37
Obr. 41 – Kulové přírubové uložení od firmy Igus včetně schématu [16]	39
Obr. 42 – Prachovka firmy Haberkorn pro kloubové výsuvné hřídele včetně schématu [17]	39
Obr. 43 – Svařované díly rámu zavěšení kola nápravy McPherson	40
Obr. 44 – Uložení kola	41
Obr. 45 – Uložení řídicí tyče ve vodící přírubě rámu	42
Obr. 46 – Sestavení dělené poloosy a manipulačního kola	42
Obr. 47 – Sestavení celé poloosy a její připojení k manipulačnímu kolu.....	43
Obr. 48 – Spojení horní části tlumiče s kulovým uložením firmy Igus	43



6 Seznam tabulek

Tab. 1 – Parametry skutečného ráfku kola a ráfku v měřítku 1:2.....	16
Tab. 2 – Parametry skutečné pneumatiky a pneumatiky v měřítku 1:2.....	16
Tab. 3 – Odhadovaná doba tisku ráfku kola vypočtená z programu PrusaSlicer.....	19
Tab. 4 – Odhadovaná doba tisku pneumatiky vypočtená z programu PrusaSlicer.....	20
Tab. 5 – Výrobci tlačných vinutých ocelových pružin.....	26
Tab. 6 – Odhadovaná doba tisku a spotřeby materiálu jednotlivých dílů.....	34
Tab. 7 – Kluzné ložisko firmy Igus – parametry v [mm] včetně tolerancí [15].....	36
Tab. 8 – Parametry pravoúhlých kulových kloubů včetně tolerancí uvedených v [mm] [16].....	37
Tab. 9 – Parametry přímého kulového kloubu včetně tolerancí uvedených v [mm] [16].....	38
Tab. 10 – Parametry kulového uložení od firmy Igus v [mm] [16].....	39
Tab. 11 – Parametry prachovky firmy Haberkorn v [mm] [17].....	39

7 Použitá literatura

- [1] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. 3. přeprac., rozš. a aktualiz. vyd. Brno: VLK, 2006, . Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/BzvZ7mtl>
- [2] GSCHIEDLE, Rolf. *Příručka pro automechanika*. 3. přeprac. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2007. Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/Y85WMr6d>
- [3] SAJDL, Jan. *Lichoběžníková náprava* [online]. 2011 [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/lichobeznikova-naprava/>
- [4] SAJDL, Jan. *Náprava MacPherson (McPherson)* [online]. 2011 [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/naprava-macpherson-mcpherson/>
- [5] JAN, Zdeněk, Bronislav ŽDÁNSKÝ a Jiří ČUPERA. *Automobily*. 5. vydání. Brno: Avid, spol. s r.o., 2016. ISBN 978-80-87143-36-0.
- [6] SAJDL, Jan. *Víceprvková náprava* [online]. 2015 [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/viceprvkova-naprava/>
- [7] SAJDL, Jan. Tuhá náprava. In: *Autolexicon.net* [online]. 2011 [cit. 2023-07-05]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/tuha-naprava/>
- [8] *Geometrie zavěšení kol* [online]. 2012 [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <http://www.autoznanosti.cz/index.php/podvozek-a-kola/40-geometriezavesenikol.html>
- [9] MANN, Adam. What is Caster Angle? Positive, Negative & Zero Caster Explained [online]. 2022 [cit. 2023-07-12]. Dostupné z: <https://low-offset.com/workshop/what-is-caster-angle/>
- [10] *What Is Caster Angle In Car Suspension?* [online]. CarBikeTech Team, 2019 [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://carbiketech.com/caster-angle/>



- [11] *Vzory výplně* [online]. 2023 [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/vzory-vyplne_177130#typy-horni-spodni-vrstvy-vyplne
- [12] *Nápravy* [online]. [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: http://kotamuda.humlak.cz/navody_manualy/127/HTM/napravy.htm
- [13] *LITEP4X4* [online]. [cit. 2023-07-07]. Dostupné z: <https://www.litep4x4.cz/da1214-leva-predni-tehlice/>
- [14] ACHTENOVÁ, Gabriela. *Převodná ústrojí motorových vozidel*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN isbn978-80-01-05129-0.
- [15] *Iglide bearings 2021 catalog* [online]. 2021 [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: https://toolbox.igus.com/product-catalogs/iglide-bearings-2021-catalog?_ga=2.38334243.1681655914.1689023036-1821577645.1689023036
- [16] *Igubal spherical bearings 2021 catalog* [online]. 2021 [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: https://toolbox.igus.com/product-catalogs/igubal-spherical-bearings-2021-catalog?_ga=2.38334243.1681655914.1689023036-1821577645.1689023036
- [17] *HABERKORN: Prachovka pro kloubovou hřídel výsuvnou* [online]. [cit. 2023-07-10]. Dostupné z: <https://eshop.haberkorn.cz/prachovka-prachovka-1-17.html>