FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE

Ústav konstruování a částí strojů

Návrh přípravku na měření geometrie kol, světlé výšky a rozložení hmotnosti vozu Formula Student

Design of Measuring Jig for Wheel Alignment, Ride Height and Weight Distribution for Formula Student Car

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2021

Bc. Martin KOVÁŘ

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Martin Dub, Ph.D.

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kovář** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **439131**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**

Studijní program: **Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh přípravku na měření geometrie kol, světlé výšky a rozložení hmotnosti vozu Formula Student

Název diplomové práce anglicky:

Design of Measuring Jig for Wheel Alignment, Ride Height and Weight Distribution for Formula Student Car

Pokyny pro vypracování:

V rámci diplomové práce zpracujte konstrukční návrh přípravku na měření geometrie kol, světlé výšky a rozložení hmotnosti vozu Formula Student. Osnova:
- Rešerše problematiky automobilových podvozků, geometrie kol, apod.
- Konstrukční návrh měřícího přípravku
- Analýza vybraných konstrukčních uzlů
- Vyhodnocení, závěry.

Seznam doporučené literatury:

ŠVEC, V.: Části a mechanismy strojů. Spoje a části spojovací. Praha: ČVUT, 2008.
Formula Student Rules 2020. Institution of Mechanical Engineers
Firemní materiály, katalogy aj.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Martin Dub, Ph.D., ústav konstruování a částí strojů FS

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

Datum zadání diplomové práce: **30.10.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **14.12.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Martin Dub, Ph.D.	Ing. František Lopot, Ph.D.	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

3. 11. 2020 _____

Datum převzetí zadání Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „Návrh přípravku na měření geometrie kol, světlé výšky a rozložení hmotnosti vozu Formula Student“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Duba, Ph.D. s použitím literatury uvedené na konci této diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze, dne …… ……..

Bc. Martin Kovář

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Martinovi Dubovi, Ph.D. za vstřícnost a ochotu v průběhu psaní diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat členům týmu CTU CarTech, především Janu Michálkovi, Tomášovi Adamcovi a Tomášovi Dusovi za podnětné rady ohledně měření parametrů náprav. Také děkuji týmovým sponzorům za podporu při výrobě měřícího přípravku, především firmě Tauchman SWS, s.r.o. za svaření hliníkové konstrukce.

Za podporu během celého studia děkuji své rodině, která mi vytvořila skvělé studijní podmínky, a v neposlední řadě také přítelkyni za podporu během magisterského studia a programu Erasmus.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Martin KOVÁŘ
Název DP:	Návrh přípravku na měření geometrie kol, světlé výšky a rozložení hmotnosti vozu Formula Student
Anglický název:	Design of Measuring Jig for Wheel Alignment, Ride Height and Weight Distribution for Formula Student Car
Rok zpracování:	2021
Studijní program:	N2301 Strojní Inženýrství
Obor studia:	2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí DP:	Ing. Martin Dub, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran: 117
	počet obrázků: 93
	počet tabulek: 5
	počet příloh: 1
Klíčová slova:	měření geometrie kol, měření sbíhavosti, měření odklonu, měření světlé výšky
Keywords:	Wheel Alignment Measuring, Toe Measuring, Camber Measuring, Ride Height Measuring

Anotace: Práce se zabývá návrhem měřícího zařízení k měření odklonu a sbíhavosti kol, měření světlé výšky a měření rozložení hmotnosti pro vůz formulového typu FS 12 týmu CTU CarTech. Při návrhu jsou provedeny potřebné analytické výpočty a MKP simulace. Nové měřící zařízení usnadní a zpřesní nastavování náprav před každým testováním a závodem.

Abstract: The thesis deals with design of measuring device for camber measurement and toe measurement, ride height measurement and weight distribution measurement for formula student car FS 12 of CTU CarTech team. Required analytical calculations and FEM simulations are performed. New measuring device makes easier and more precise suspension set up before each testing and race.

Obsah

1 Úvod ..... - 13 -

2 Pravidla Formula Student ..... - 15 -

2.1 Pravidla pro nápravy ..... - 15 -

2.2 Pravidla pro měření geometrie kol ..... - 15 -

2.3 Pravidla pro rychlozvedák ..... - 16 -

3 Popis parametrů náprav ..... - 17 -

3.1 Zavěšení kol ..... - 18 -

3.1.1 Závislé zavěšení kol – tuhá náprava ..... - 18 -

3.1.2 Nezávislé zavěšení kol – lichoběžníková náprava ..... - 19 -

3.2 Vybrané parametry geometrie kol ..... - 22 -

3.2.1 Odklon γ ..... - 22 -

3.2.2 Sbíhavost δ ..... - 23 -

3.2.3 Podélná rovina vozidla ..... - 25 -

3.2.4 Geometrická osa jízdy ..... - 25 -

3.3 Světlá výška ..... - 27 -

3.4 Rozložení hmotnosti ..... - 30 -

3.4.1 Diagonální hmotnost ..... - 32 -

3.4.2 Boční hmotnost ..... - 34 -

3.4.3 Zadní hmotnost ..... - 35 -

4 Metody měření geometrie kol, světlé výšky a rozložení hmotnosti ..... - 37 -

4.1 Měření odklonu kol ..... - 37 -

4.2 Měření sbíhavosti kol ..... - 38 -

4.3 Měření světlé výšky ..... - 40 -

4.4 Měření rozložení hmotnosti ..... - 41 -

5 Konstrukční návrh měřícího přípravku ..... - 43 -

5.1 Seznam požadavků ..... - 43 -

5.2 Schéma a princip měření ..... - 45 -

5.3 Konstrukční návrh ..... - 46 -

5.3.1 Nosná konstrukce ..... - 46 -

5.3.2 Automobilové váhy ..... - 49 -

5.4 Materiály ..... - 51 -

6 Výpočet měřícího přípravku ..... - 53 -

6.1 Analytické výpočty ..... - 53 -
6.1.1 Výpočet překlopení přípravku ..... - 53 -
6.1.2 Výpočet přejetí přípravku přes bezpečnostní ohrádku ..... - 55 -
6.1.3 Výpočet šroubového spoje ..... - 58 -
6.2 MKP analýzy ..... - 65 -
6.2.1 MKP analýza nosné konstrukce ..... - 65 -
6.2.2 MKP analýza bezpečnostní ohrádky ..... - 72 -
6.3 Výpočet finančních nákladů ..... - 77 -
7 Výroba měřícího přípravku ..... - 79 -
7.1 Výroba a montáž nosné konstrukce ..... - 79 -
7.1.1 Výroba hliníkového svařence ..... - 80 -
7.1.2 Eloxování středů kol ..... - 82 -
7.1.3 Výroba plechu pro uchycení digitálního inklinometru ..... - 83 -
7.1.4 Montáž nosné konstrukce ..... - 84 -
7.2 Výroba a montáž bezpečnostní ohrádky ..... - 85 -
7.2.1 Výroba ocelového svařence ..... - 85 -
7.2.2 Výroba středícího čepu ..... - 87 -
7.2.3 Montáž bezpečnostní ohrádky ..... - 89 -
8 Zhodnocení otestovaného měřícího přípravku ..... - 91 -
8.1 Funkční zhodnocení ..... - 91 -
8.1.1 Funkční pozitiva ..... - 92 -
8.1.2 Funkční negativa ..... - 94 -
8.2 Výrobní zhodnocení ..... - 95 -
8.2.1 Výrobní pozitiva ..... - 95 -
8.2.2 Výrobní negativa ..... - 97 -
8.3 Ekonomické zhodnocení ..... - 98 -
9 Závěr ..... - 101 -
Seznam použité literatury ..... - 103 -
Seznam obrázků ..... - 107 -
Seznam tabulek ..... - 111 -
Seznam použitých zkratek a symbolů ..... - 113 -
Seznam příloh ..... - 117 -

1 Úvod

Téma této diplomové práce je zvoleno s ohledem na potenciál zpřesnění a zrychlení měření geometrie kol, světlé výšky a rozložení hmotnosti vozu FS.12 a dalších generací vozů týmu CTU CarTech reprezentujícího Fakultu Strojní ČVUT na závodech Formula Student.

Cílem této diplomové práce je podle zadaných požadavků navrhnout měřící přípravek umožňující měřit a nastavovat výše zmíněné parametry, které patří k nejdůležitějším parametrům podvozků závodních vozidel a které mají přímý vliv na jízdní dynamiku, agilitu, přetáčivost / nedotáčivost a jízdní stabilitu vozidla. Správným nastavením parametrů podvozku lze tyto vlastnosti vozidla upravit s ohledem na typ tratě, druh disciplíny a preference pilota s cílem dosahovat stále rychlejších časů na okruhu.

Mezi hlavní požadavky na návrh nového přípravku patří vysoká přesnost měření, odstranění problému s napružením pneumatik, rychlá montáž, pohodlný přístup k jednotlivým nastavovacím prvkům, vysoká tuhost konstrukce, levná výroba a kompaktní tvar.

Měření geometrie kol pomocí přípravku s pojezdovými ložisky se stalo již standardem ve formuli 1, ovšem v rámci soutěže Formula Student v současnosti disponuje komplexním přípravkem pouze několik týmů. Cílem této diplomové práce je zařadit tým CTU CarTech mezi týmy s propracovaným měřením geometrie náprav. Odklon se aktuálně v týmu CTU CarTech měří pomocí přípravku s vestavěným digitálním sklonoměrem přikládaného k ráfkům kol, které jsou ovšem od výrobce nepřesné a vykazují axiální házení, které způsobuje nepřesnosti v měření odklonu. Sbíhavost se měří provázkovou metodou rovněž k ráfkům kol, což přináší obdobný problém. Světlá výška není v současnosti měřena žádnou přesnou metodou a pouze se kontroluje splnění 30mm hranice definované pravidly Formula Student pomocí hliníkového čtvercového profilu vloženého pod vozidlo. Rozložení hmotnosti je měřeno prostřednictvím automobilových vah s dostatečnou přesností.

V teoretické části diplomové práce jsou shrnuta pravidla soutěže Formula Student, jsou vysvětleny jednotlivé parametry náprav a je provedena rešerše současných řešení v oblasti měření parametrů náprav. V praktické části diplomové práce je popsána konstrukce navrženého měřícího přípravku a jsou uvedeny výpočty provedené během návrhu přípravku, které jsou analytické i konečně-prvkové s využitím programu ANSYS. Dále je v praktické části detailně popsána výroba přípravku, která z velké části probíhá v dílnách týmu CTU CarTech a z části u týmový sponzorů a externích firem. Po otestování přípravku je provedeno zhodnocení po funkční, výrobní i ekonomické stránce. Nejdůležitější zjištění jsou znovu shrnuta v závěru práce.

Obr. 1 Vůz FS.12 týmu CTU CarTech určený k nové metodice měření podvozku (závodní sezóna 2020)

2 Pravidla Formula Student

Pravidla soutěže slouží k vytvoření férového závodního prostředí a z velké části jsou orientována na bezpečí jezdce. Projekt Formula Student je motoristická soutěž mezi evropskými univerzitami pořádaná od roku 1998. Pravidly a požadavky je shodná s americkou soutěží Formula SAE pořádanou institucí SAE International (Society of Automotive Engineers), což umožňuje týmům účastnit se závodů nejen v Evropě, ale i po celém světě. Hlavním cílem projektu je aplikovat a rozvíjet teoretické znalosti studentů získané při studiu a připravit je na budoucí povolání.

Týmy mezi sebou závodí ve třech statických disciplínách (konstrukční návrh, analýza výrobních nákladů, prezentace podnikatelského plánu) a pěti dynamických disciplínách (akcelerace, jízda po dráze ve tvaru číslice osm, autokros – jízda po 1,5km dlouhé dráze, vytrvalost a úspornost – jízda po 22km dlouhé dráze). Statické disciplíny hodnotí technickou úroveň vozu a ekonomickou stránku projektu. Dynamické disciplíny srovnávají závodní vozy mezi sebou po stránce dynamických vlastností jako například ovladatelnost, agilita a zrychlení. [1]

2.1 Pravidla pro nápravy

Podle pravidel musí být přední a zadní náprava plně odpružená s celkovým zdvihem kola minimálně 50 mm a obě nápravy musí být osazeny tlumičem pérování. Minimální zdvih kola v kladném směru osy z (od vozovky nahoru) s řidičem uvnitř vozidla je 25 mm. Minimální světlá výška jakékoliv části vozidla kromě pneumatik s řidičem posazeným ve vozidle činí 30 mm. Všechny části zavěšení musí být zpřístupněny pro vizuální kontrolu s možností demontáže krytů. Maximální vůle v řízení je měřena na volantu a činí 7°. Rozvor náprav musí být minimálně 1525 mm. Absolutní velikost rozchodu není definována, ovšem menší rozchod kol musí činit minimálně 75 % z většího rozchodu. [1]

2.2 Pravidla pro měření geometrie kol

V pravidlech Formula Student nejsou definovaná žádná omezení pro měření geometrie kol, měření rozložení hmotnosti ani měření světlé výšky. Pravidla Formula Student tedy v žádném směru neomezují návrh měřícího přípravku a jediným limitujícím faktorem jsou požadavky od týmu CTU CarTech a další omezení jako například výrobní náklady, dostupnost materiálů a výrobních technologií.

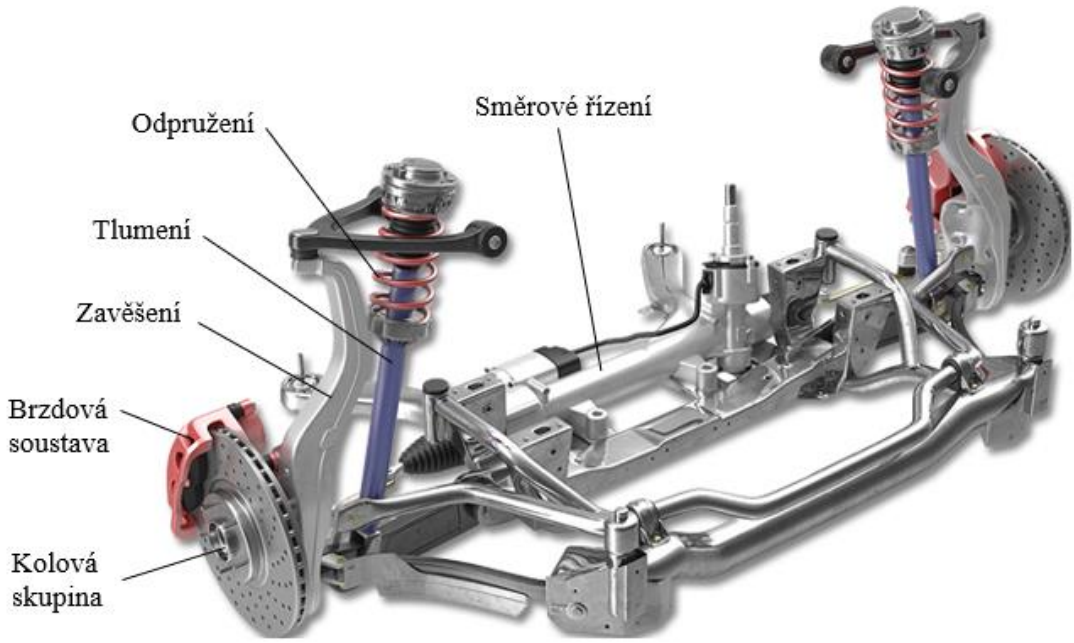
2.3 Pravidla pro rychlozvedák

Přesné a rychlé měření geometrie kol se v motorsportu neobejde bez demontáže všech kol, kterou lze nejrychleji provést vyzvednutím vozu pomocí zvedacího zařízení. Pravidla Formula Student nařizují, že každý tým musí používat ke zvedání formule tzv. rychlozvedák („quick jack“), který umožní zvednout všechna poháněná kola minimálně 100 mm nad povrch vozovky. Dále smí rychlozvedák v danou chvíli obsluhovat pouze jedna osoba a po zvednutí vozidla do konečné polohy musí rychlozvedák sám bezpečně držet formuli bez zásahu jakékoliv osoby či přídavného závaží. Rychlozvedák musí být červené barvy. V současné době se v týmu CTU CarTech navrhuje nový rychlozvedák, který bude splňovat tato pravidla, a navíc bude použitelný při měření geometrie kol, světlé výšky i rozložení hmotnosti. Tento nový rychlozvedák umožní jedním pohybem vyzvednout všechna čtyři kola dostatečně vysoko nad povrch vozovky. [1]

Obr. 2 Rychlozvedák týmu DMU Racing z roku 2018 [2]

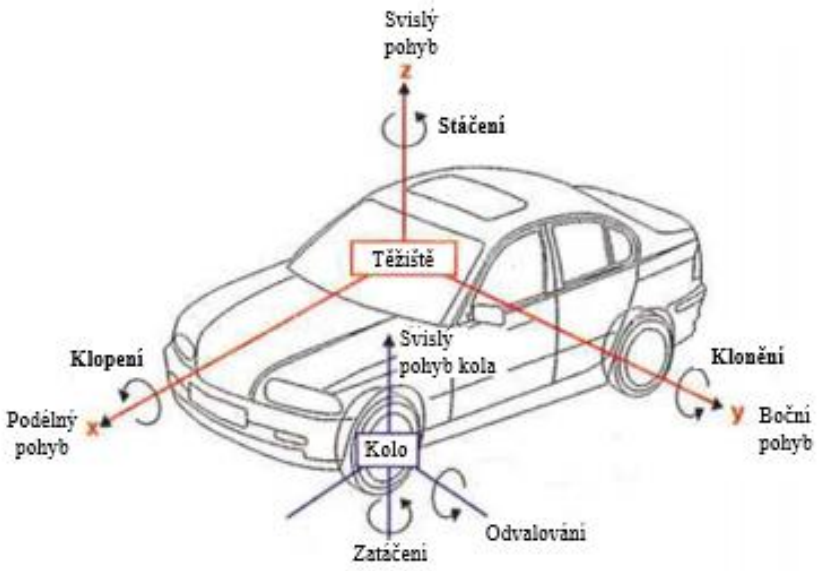
3 Popis parametrů náprav

Náprava vozidla (Obr. 3) je tvořena zavěšením kol, odpružením a tlumením, směrovým řízením nápravy, brzdovou soustavou a kolovou skupinou. Návrh a nastavení těchto jednotlivých skupin významně ovlivňuje jízdní dynamiku, jízdní bezpečnost a jízdní komfort. V následujících kapitolách jsou zavěšení kol a jeho měřitelné parametry popsány a u každého parametru je zdůrazněn jeho vliv na jízdní dynamiku, která stojí u návrhu závodního vozidla na prvním místě s ohledem na zachování jízdní bezpečnosti. Do parametrů náprav lze zařadit odklon, sbíhavost, světlou výšku i rozložení hmotnosti, které budou měřeny na voze FS.12 pomocí nového měřícího přípravku.



Obr. 3 Hlavní části nápravy znázorněné na příkladu lichoběžníkové nápravy [5]

Pro popis jízdní dynamiky je podle normy ISO 88551.3 / DIN 70000 zaveden souřadnicový systém vozidla spolu s pojmenováním jednotlivých rotací karoserie kolem os tohoto souřadnicového systému (Obr. 4). Z hlediska výpočtů jízdní dynamiky je vhodné stanovení středu souřadnicového systému přímo do těžiště vozidla. Pro popis kinematiky kol je přesunut souřadnicový sytém z těžiště vozidla do bodu dotyku kola s vozovkou. [4]



Obr. 4 Souřadnicový systém vozidla podle ISO 88551.3 / DIN 70000 pro popis jízdní dynamika [25]

3.1 Zavěšení kol

Primárním úkolem zavěšení kol je pohyblivé spojení kolové skupiny (pneumatika, disk, náboj, těhlice) s karoserií vozidla. Zavěšení kol musí být schopno přenášet při provozu závodního automobilu statické síly (tíhová síla vozidla) a dynamické síly (hnací, brzdná, boční) do karoserie. Ta by měla být dostatečně tuhá (torzně a ohybově), aby se vlivem dynamických sil přenesených od zavěšení kol příliš nedeformovala a neovlivňovala tak jízdní vlastnosti vozidla a náchylnost karoserie k poškození. [3]

Charakteristikou každého typu zavěšení je změna geometrie kol při propružení nápravy, která je u některých parametrů žádoucí a některých nežádoucí. Již při návrhu vozidla je této obsáhlé problematice věnována velká pozornost. Mezi požadavky na návrh měřícího přípravku ovšem tyto charakteristiky nepatří a tím pádem tomu nebude ani věnována pozornost v rešeršní části diplomové práce.

3.1.1 Závislé zavěšení kol – tuhá náprava

Pojem závislé zavěšení kol je pojmenovaný podle chování tohoto typu zavěšení. Při propružení je ovlivněno kolo na jedné straně vozidla pohybem kola na druhé straně vozidla. Závislé zavěšení ze své podstaty neumožňuje nezávislý pohyb kol. Nejrozšířenějším závislým zavěšením kol je tzv. tuhá náprava (Obr. 5), u které jsou obě kola napevno spojena nápravnicí. Tuhá náprava se používá nejčastěji v terénních a nákladních automobilech, pro které jsou stanoveny nízké požadavky na jízdní dynamiku a jízdní komfort. Tyto automobily využívají přednosti tuhé nápravy, mezi které se řadí robustnost, spolehlivost a nízká výrobní cena.

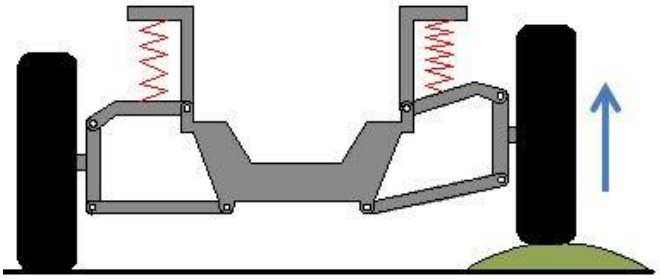
Do závodních automobilů se tuhá náprava nemontuje, protože se vyznačuje následujícími nedostatky: vysoká neodpružená hmotnost, vzájemné ovlivňování kol,

náklon karoserie při jednostranném přejetí překážky, omezené možnosti při návrhu kinematiky kola během propružení, obtížné tlumení klopení karoserie pomocí tlumičů. [4]

Obr. 5 Vlevo schéma závislého zavěšení při přejetí nerovnosti. [6] Vpravo CAD model tuhé nápravy [7]

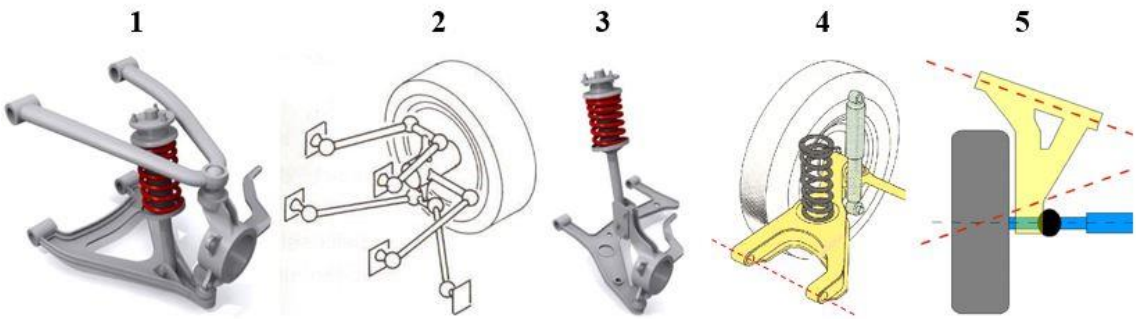
3.1.2 Nezávislé zavěšení kol – lichoběžníková náprava

Nezávislé zavěšení kol je, jak z názvu vyplývá, typ zavěšení kol, při kterém nedochází během propružení jednoho kola k pohybu druhého kola. To vede ke zlepšení jízdní dynamiky i zvýšení jízdního komfortu. Při přejetí nerovnosti, která se vyskytuje pouze na jedné straně vozidla, dojde k propružení pouze kola, která přejíždí nerovnost, a druhé kolo nepropruží.



Obr. 6 Schéma nezávislého zavěšení kol při přejetí nerovnosti [8]

Z konstrukčního hlediska pro nezávislé zavěšení kol platí, že obě strany nápravy nespojuje žádná jiná součást kromě stabilizátoru, jehož úkolem je redukovat klopení karoserie při průjezdu zatáčkou. Mezi nezávislá zavěšení kol se řadí nápravy zobrazené na obrázku níže (Obr. 7).



Obr. 7 Jednotlivá provedení nezávislého zavěšení kol
(1 – lichoběžníková náprava, 2 – víceprvková náprava, 3 – náprava McPherson,
4 – kliková náprava, 5 – kyvadlová náprava) [9] [10] [11] [12]

Závodní vůz FS.12 týmu CTU CarTech využívá přednosti lichoběžníkové nápravy pro přední i zadní nápravu. Toto zavěšení kol je pojmenováno podle toho, že při pohledu zpředu automobilu tvoří koncové body ramen vrcholy lichoběžníku, přičemž horní rameno je vždy kratší než spodní rameno. Obě ramena mají při pohledu shora na vozidlo tvar trojúhelníku, aby se zvýšila tuhost zavěšení kol ve směru jízdy vozidla. Ke karoserii je každé z ramen připojeno pomocí dvou kulových čepů.

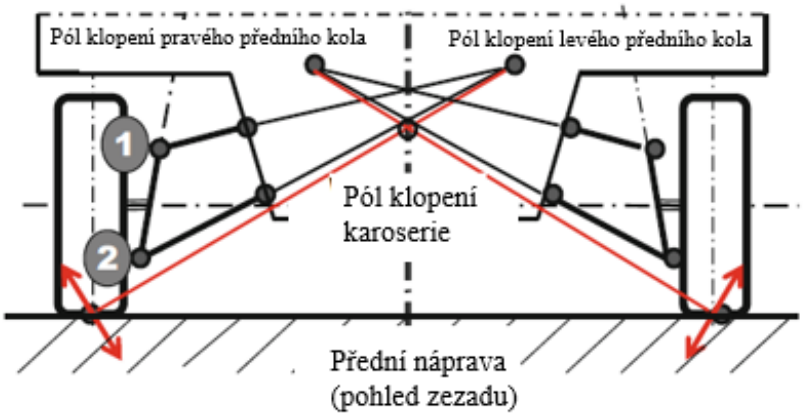
Obr. 8 Vlevo kinematické schéma lichoběžníkové nápravy při pohledu zpředu. [13]
Vpravo CAD model lichoběžníkové nápravy týmu z Padovské univerzity [14]

Lichoběžníková náprava se velmi často využívá ve sportovních a závodních automobilech z důvodu vhodných kinematických a dynamických vlastností. Protože je horní rameno kratší než spodní rameno, pohybuje se při propružení kola horní část pneumatiky směrem do vozidla a dochází tak k zvětšení negativního odklonu. Větší negativní odklon zlepšuje postavení vnějšího kola v zatáčce vůči silnici, zvětšuje styčnou plochu pneumatiky, což vede ke zvýšení přenositelné síly pneumatiky a možnosti rychlejšího průjezdu zatáčkou. Změna odklonu také přispívá k tomu, že při propružení dochází pouze k minimální změně rozchodu kol, což je žádoucí. [15]

Další výhodou lichoběžníkové nápravy je velká rozmanitost při návrhu geometrie kola, kterou lze jednoduše upravovat pomocí nastavitelných prvků na ramenech zavěšení či příchytných bodech ke karoserii. Tímto způsobem lze experimentovat s různými

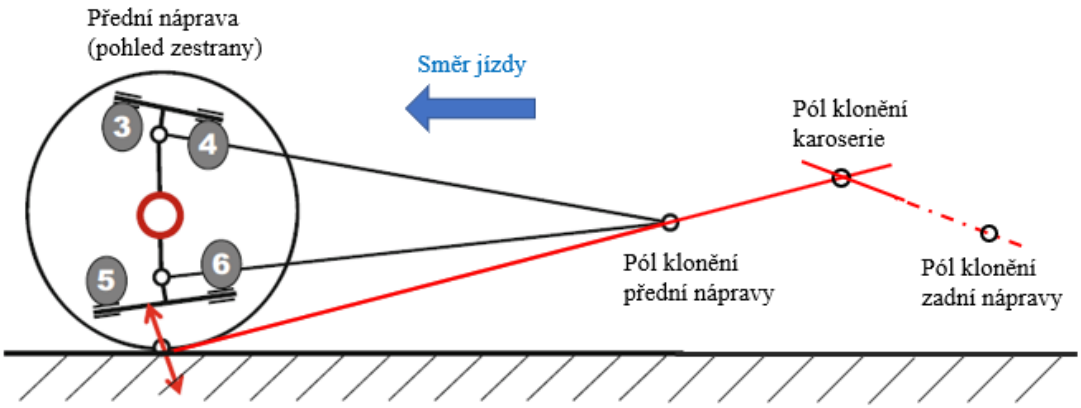
nastaveními odklonu kola nebo s polohou pólu klopení a pólu klonění karoserie, které jsou také definovány příchytnými body ramen a které významně ovlivňují jízdní dynamiku (klopení a klonění karoserie při brždění, akceleraci a průjezdu zatáčkou).

Okamžitý pól klopení kola lichoběžníkové nápravy (Obr. 9) se nachází v průsečíku prodlouženého horního a spodního ramene a kolem tohoto pólu koná kolo při propružení pohyb po kružnici. Pól klopení karoserie je bod, kolem kterého koná karoserie pohyb po kružnici (například naklopení karoserie v zatáčce) a k jeho určení jsou potřeba okamžité póly klopení levého i pravého kola. Tento bod se při propružení posouvá po ose symetrie vozidla. Čím je pól klopení karoserie více vzdálen od těžiště vozidla, tím je větší rameno, na kterém působí setrvačná odstředivá síla, a tím větší je i naklánění karoserie. [4]



Obr. 9 Pól klopení levého/pravého kola a karoserie lichoběžníkové nápravy [4]

Okamžitý pól klonění kola lichoběžníkové nápravy (Obr. 10) se zjišťuje stejně jako pól klopení, ale v tomto případě v podélné rovině vozidla. Pól klonění karoserie se určuje z okamžitého pólu klonění přední a zadní nápravy a definuje tak střed kružnice, po které se pohybuje karoserie při dynamické jízdě. Pomocí vhodně zvolené polohy ramen lze umístit pól klonění karoserie do stejné výšky jako je těžiště vozidla a díky tomu nedojde ke klonění karoserie ani při brždění, ani při zrychlení automobilu. [4]



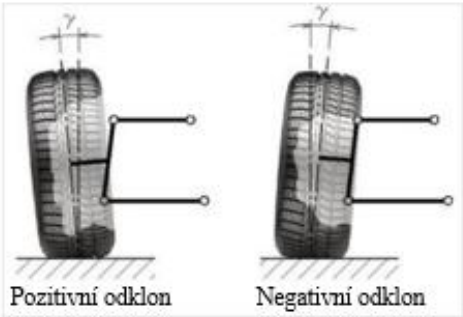
Obr. 10 Pól klonění karoserie vytvořený z pólu klonění přední a zadní lichoběžníkové nápravy [4]

3.2 Vybrané parametry geometrie kol

Geometrie náprav se zabývá postavením kola vůči vozovce. Při vývoji nápravy se jako první určí typ zavěšení kol a jakmile je koncept zavěšení schválen, začnou se řešit jednotlivé parametry geometrie kol. Tyto parametry zásadním způsobem ovlivňují jízdní vlastnosti vozidla při jízdě konstantní rychlostí, při dynamické jízdě i při jízdě v zatáčkách. Geometrii kol tvoří: odklon, sbíhavost, příklon rejdové osy, poloměr rejdu, záklon rejdové osy, závlek rejdové osy, diferenční úhel, podélná rovina vozidla a geometrická osa jízdy. Protože navrhovaný přípravek na měření geometrie kol je určen pro měření odklonu a sbíhavosti, bude věnována pozornost především těmto dvěma parametrům.

3.2.1 Odklon γ

Odklon („camber“) je úhel, který svírá střední rovina kola s rovinou kolmou k vozovce (Obr. 11). Pozitivní odklon nastává, pokud je horní část pneumatiky vytočená směrem od vozidla a negativní odklon nastává, pokud je horní část pneumatiky natočená směrem do vozidla. Velikost odklonu lze upravovat pomocí délky horního a spodního ramene lichoběžníkové nápravy či pomocí distančních podložek u držáku ramen v těhlici. Obvykle se hodnota pohybuje od 0 do 2° negativního odklonu. [3]

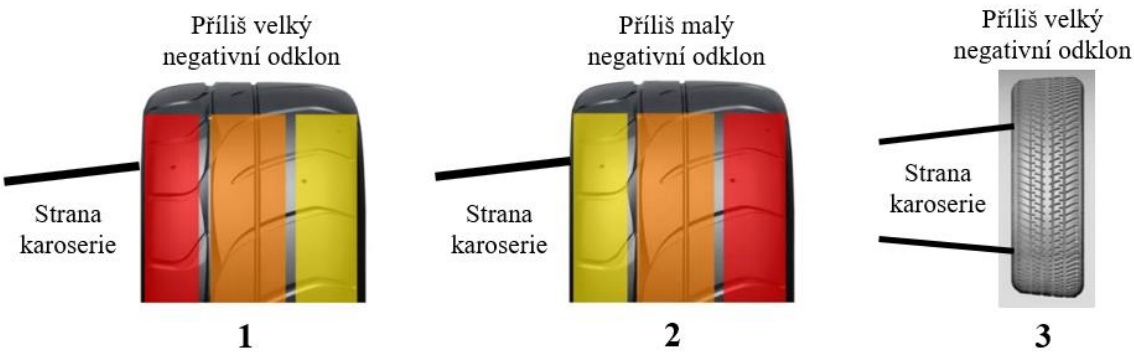


Obr. 11 Pozitivní a negativní odklon kola [16]

Pro osobní i závodní automobily se upřednostňuje negativní odklon, protože zvyšuje maximální přenositelnou sílu v zatáčkách a tím zlepšuje jízdní dynamiku a zvyšuje jízdní bezpečnost. Pro závodní automobily se navrhuje hodnota odklonu větší než pro osobní automobily. Pokud by stálo kolo kolmo k vozovce, pak by vlivem deformace pneumatiky při průjezdu zatáčkou došlo ke zmenšení styčné plochy mezi pneumatikou a vozovkou. Díky negativnímu odklonu stojí kolo při průjezdu zatáčkou kolmo k vozovce a styčná plocha pneumatiky je větší oproti styčné ploše při nulovém či pozitivním odklonu. To vede ke zvýšení přenositelné síly takto nakloněného kola. Další charakteristikou odklonu je, že se mění jeho hodnota v průběhu propružení kola. Obvykle se navrhuje kinematika tak, aby se při pohybu kola směrem do karoserie zvětšovala hodnota negativního odklonu a vnější kolo tak v zatáčce mohlo stát kolmo k povrchu vozovky, přičemž vnitřní kolo stejným efektem naopak ztrácí na přilnavosti. [4]

Pozitivní odklon kol poskytuje pouze tu výhodou, že předepíná řízení v přímém směru a nedochází tak k nechtěným pohybům řízených kol. Tato výhoda je ovšem oproti výhodám negativního odklonu nevýznamná a pozitivního odklonu se proto nevyužívá.

Správně navržený odklon lze zanalyzovat pomocí měření termokamerou (Obr. 12), kdy při optimálním nastavení odklonu je teplota rovnoměrně rozložená po šířce běhounu pneumatiky. Nesprávně nastavený odklon kola, který může nastat například vlivem rozhození geometrie při nárazu kola do překážky, lze identifikovat také nerovnoměrným sjetím pneumatiky (Obr. 12). U příliš velkých hodnot negativního odklonu se pneumatika více sjíždí na vnitřní straně běhounu, u příliš velkého pozitivního odklonu naopak na vnější straně běhounu. Protože se u závodních automobilů upřednostňuje větší přilnavost pneumatik před jejich menším opotřebením, nastavuje se pro závodní vozidla větší negativní odklon než pro osobní automobily. [17]



Obr. 12 Zpětné teplotní a vizuální zanalyzování nastaveného odklonu kola [17] [18]
(1 – zahřívání pneumatiky na vnitřní straně běhounu vlivem příliš velkého negativního odklonu)
(2 – zahřívání pneumatiky na vnější straně běhounu vlivem příliš malého negativního odklonu)
(3 – viditelné opotřebení vnitřní strany běhounu vlivem příliš velkého negativního odklonu)

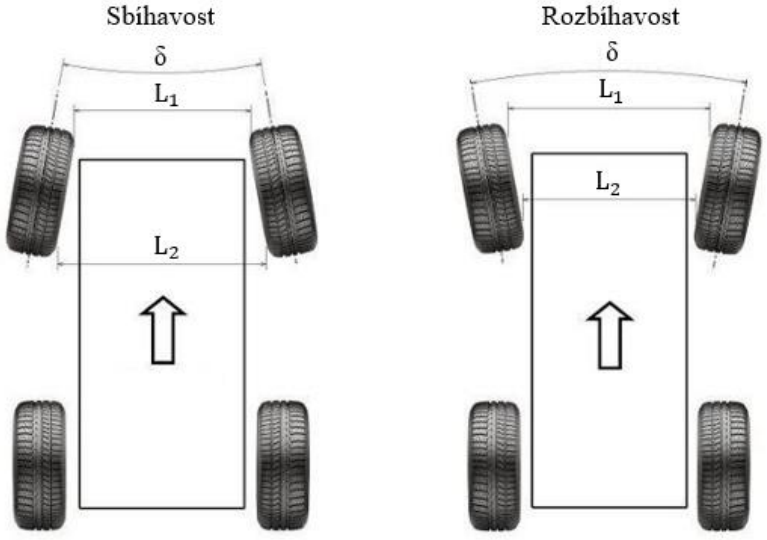
3.2.2 Sbíhavost δ

Sbíhavost („toe in“) je definována jako průmět úhlu mezi středovou rovinou kola a podélnou rovinou vozidla do roviny vozovky (Obr. 13). Pokud je přední část kola přikloněna blíže k podélné ose vozidla, pak se jedná o sbíhavost. V opačném případě se jedná o rozbíhavost („toe out“). Oba parametry mohou být udávány ve stupních nebo v mm, kde počet mm znamená rozdíl vzdáleností $L_2 - L_1$ mezi vnitřními okraji ráfků natočených do přímého směru. Jak je patrné ze vztahu (1) pro přepočet sbíhavosti z mm na stupně, výsledek závisí také na velikosti ráfku ($D_{ráfek}$).

$$\delta = arcsin\left(\frac{\frac{L_2 - L_1}{2}}{D_{ráfek}}\right) \quad (°) \qquad (1)$$

Hodnotu sbíhavosti lze nastavovat pomocí délky tyče řízení, resp. polohou kulového čepu, který je zašroubovaný do tyče řízení. Hloubkou zašroubování kulového čepu se tak ovlivňuje délka tyče řízení a tím sbíhavost kola na jedné straně. Obvykle se hodnoty sbíhavosti pohybují od -30´ do +30´, tedy od mírné rozbíhavosti do mírné

sbíhavosti. Návrh hodnoty sbíhavosti je ovlivněn tím, zda se jedná o hnací nápravu či nikoliv a zda se jedná o přední či zadní nápravu. [20]



Obr. 13 Vlevo znázorněna sbíhavost a vpravo rozbíhavost kol [19]

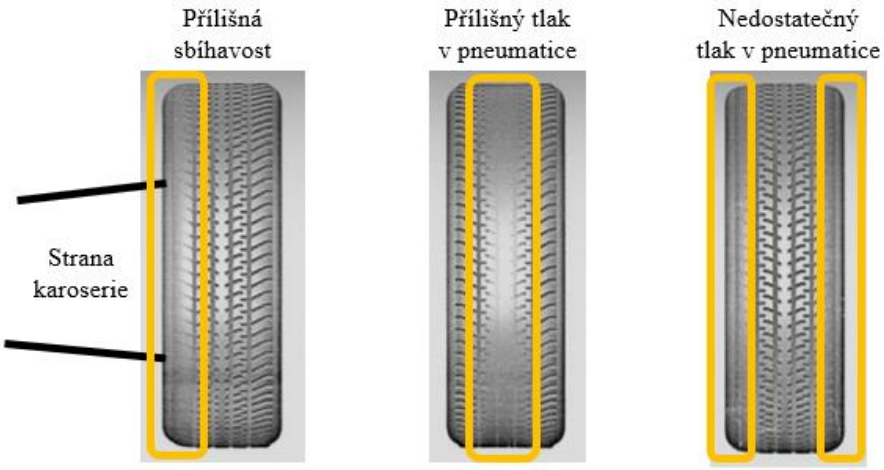
Kolo postavené paralelně ke směru jízdy (δ=0°) vykazuje nejmenší valivý odpor a nejmenší opotřebení pneumatiky. [4]

Pro přední nápravu automobilu s pohonem zadních kol se s oblibou nastavuje sbíhavost od 0° do 30´, protože boční síly vzniklé vlivem sbíhavého nastavení kol předepínají mechanismus řízení a zlepšují tak stabilitu vozidla při jízdě v přímém směru. [4]

U hnacích náprav je situace odlišná v tom, že se kola sami vlivem hnacích sil nastavují do sbíhavosti. U automobilů s pohonem předních kol se tak běžně nastavuje na předních kolech jak rozbíhavost (do -30´), tak sbíhavost (do 20´). [4]

Pro závodní automobily se často nastavuje rozbíhavost náprav až 0° sbíhavost, protože při tomto nastavení je v zatáčce vnitřní kolo nápravy více natočeno směrem ke středu zatáčky a vozidlo tak získává agilnější vlastnosti a snadněji najíždí do zatáčky. Nevýhodou rozbíhavého nastavení kol je ovšem menší stabilita vozidla při přímé jízdě. [21]

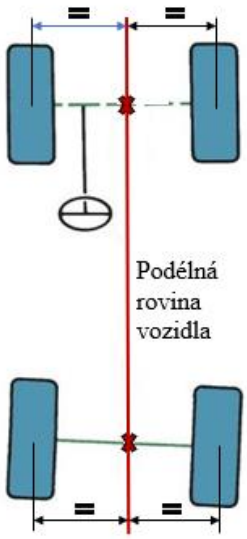
Stejně jako u odklonu lze i u sbíhavosti po delší době provozu vozidla vizuálně vyhodnotit, zda je sbíhavost nastavená správně (Obr. 14). Při přehnaném nastavení sbíhavosti se vlivem smýkání kola po vozovce více opotřebovává pneumatika na vnitřní straně běhounu. Při přílišné rozbíhavosti kol se naopak opotřebovává vnější strana běhounu. Podobné opotřebení může být také způsobeno nedostatečným tlakem v pneumatice, ovšem v tomto případě je opotřebení patrné na obou stranách běhounu (Obr. 14). [20]



Obr. 14 Vlevo analyzování nastavené sbíhavosti kol. Uprostřed a vpravo vliv tlaku v pneumatice [18]

3.2.3 Podélná rovina vozidla

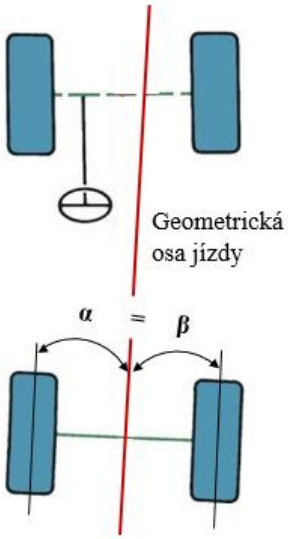
Podélná rovina vozidla („vehicle centerline“) je rovina kolmá k vozovce procházející středem rozchodu kol přední a zadní nápravy (Obr. 15). [15]



Obr. 15 Podélnou rovinu vozidla tvoří středy rozchodů kol

3.2.4 Geometrická osa jízdy

Geometrickou osu jízdy („vehicle thrustline“) tvoří osa úhlu, který svírají střední roviny kol zadní nápravy (Obr. 16). Pokud jsou střední roviny zadních kol rovnoběžné (sbíhavost $\delta = 0°$), pak určuje geometrickou osu jízdy osa pásu. Geometrická osa jízdy, jak název naznačuje, je totožná se směrem přímočarého pohybu vozidla a ovlivňuje ji nastavení sbíhavosti kol na zadní nápravě. [15]



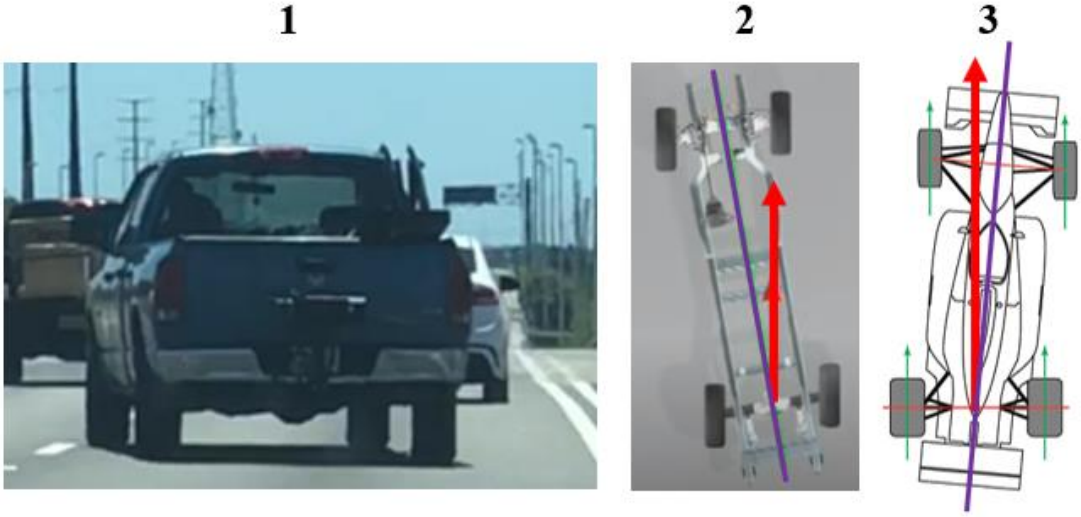
Obr. 16 Geometrickou osu jízdy tvoří osa úhlu středních rovin kol zadní nápravy

Pokud je poškozena geometrie zadní nápravy vlivem nehody či vlivem nárazu do nerovnosti na vozovce, může vypadat pozice podélné roviny vozidla a geometrické osy jízdy například jako na Obr. 17.

Obr. 17 Příklad rozhozené geometrie kol zadní nápravy [22]

Cílem při návrhu podvozku je, aby geometrická osa jízdy ležela v podélné rovině vozidla a případné deviace vzniklé při výrobě byly co nejmenší. Pokud například vlivem nesouměrné sbíhavosti jednotlivých zadních kol vnikne nenulový úhel mezi podélnou rovinou vozidla a geometrickou osou jízdy („thrust angle“), lze v případě velkého úhlu pozorovat, že je karoserie natočená mimo směr pohybu automobilu a vůz tak jede šikmo (Obr. 18). Úhel mezi geometrickou osou jízdy a podélnou rovinou vozidla v tomto případě musí být kompenzovaný řidičovým zásahem, který nasměruje přední kola tak, aby vozidlo jelo v přímém směru. Problém šikmé jízdy se častěji vyskytuje u vozidel

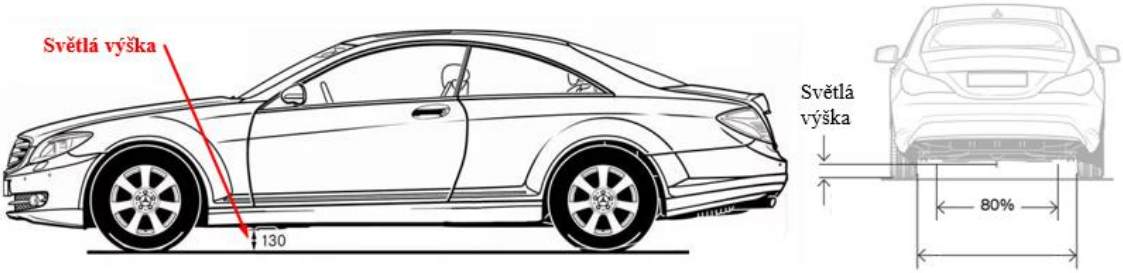
s tuhou nápravou, u kterých je ovšem přenastavení geometrie kol v některých případech nemožné a v jiných případech složitější než u náprav s nezávislým zavěšením kol. Problém šikmé jízdy je v anglické literatuře k nalezení pod pojmem „dog tracking“ a v německé literatuře jako „Dackellauf“. [3] [23]



Obr. 18 Šikmá jízda vozidla vzniklá vlivem poškozené geometrie kol
(1 – šikmá jízda pick-upu, 2 – pozitivní „thrust angle“, 3 – negativní „thrust angle“) [23]

3.3 Světlá výška

Světlá výška („ride height“, „ground clearance“) vozidla je definována jako nejmenší svislá vzdálenost pevného bodu střední části automobilu od vozovky (Obr. 19). Měření se provádí při maximální celkové hmotnosti vozidla. Při měření jsou obsazena všechna sedadla pasažéry a zavazadlový prostor je plně zatížen. Střední část automobilu (Obr. 19) je prostor, který z 80 % vyplňuje vzdálenost mezi vnitřními boky pneumatik a jehož střed leží na podélné rovině vozidla. Měření světlé výšky se provádí ve střední části automobilu z toho důvodu, aby do měření nezasahovaly části zavěšení kol a části brzdového systému. [26]



Obr. 19 Vlevo znázorněna světlá výška. [27] Vpravo definována střední část automobilu [26]

U terénních automobilů má světlá výška vliv především na průchodnost vozidla terénem, naopak u osobních automobilů ovlivňuje především jízdní dynamiku, protože světlá výška posouvá vertikální pozici těžiště. U závodních automobilů má jízdní výška

významný vliv jak polohu těžiště, tak především na aerodynamické vlastnosti vozidla. Malá světlá výška zmenšuje prostor pro průchod vzduchu pod karoserií a proud vzduchu je díky tomu urychlen. Zvýšená rychlost proudění je svázána s poklesem tlaku pod karoserií. Nad karoserií je tedy vyšší tlak než pod karoserií, což generuje u závodních vozidel přítlak, u osobních vozidel pouze zmenšuje vztlak. Tím se zlepšují aerodynamické vlastnosti vozidla, aniž by se zvyšoval jízdní odpor, což je u závodních vozidel s výhodou využíváno. S rostoucí rychlostí vozidla se také zvětšuje vliv světlé výšky na aerodynamický přítlak, s čímž je potřeba při návrhu tuhosti odpružení počítat, aby se vlivem přítlaku nevyčerpal veškerý zdvih pružiny. [28]

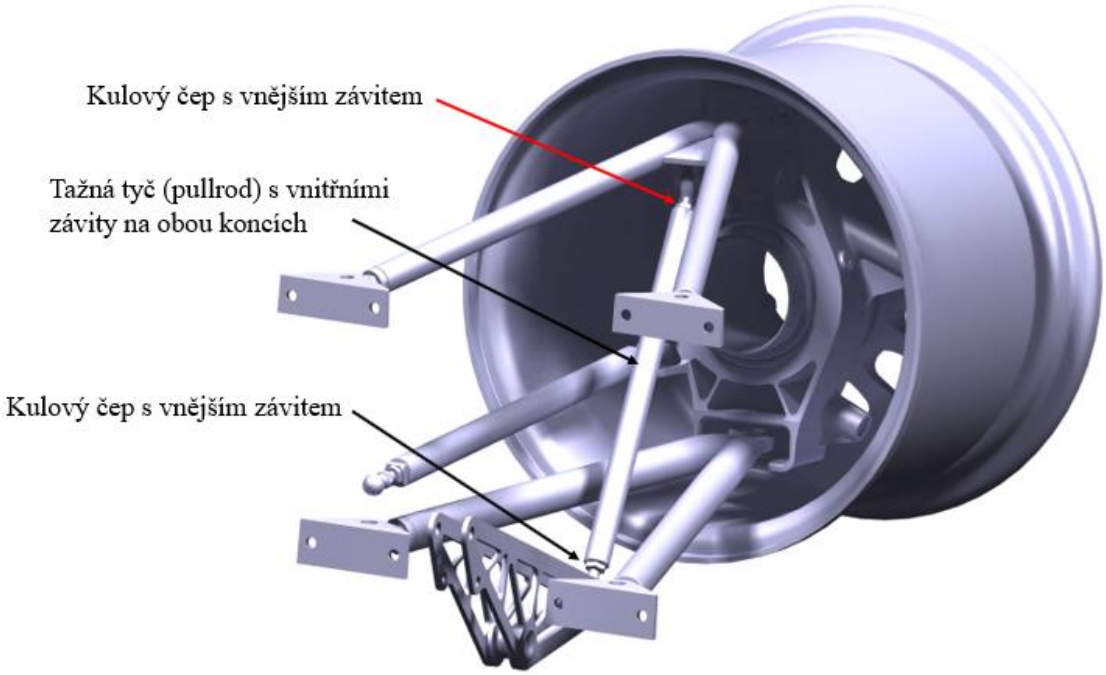
Velikost světlé výšky lze ovlivnit několika způsoby. Nejjednodušším a nejlevnějším řešením u osobních automobilů je zmenšit vnější průměr kola přechodem na nízkoprofilové pneumatiky (Obr. 20) nebo zmenšit velikost disku a pneumatiky.

Obr. 20 Snížení světlé výšky vozidla přechodem na nízkoprofilové pneumatiky

U závodních automobilů je toto řešení nedostačující, protože se tímto nastaví světlá výška na jednu hodnotu, kterou nelze upravovat. Na řadu přichází sofistikovanější způsob změny světlé výšky, a to pomocí nastavitelného odpružení. Výškově stavitelné tlumiče (Obr. 21) mohou měnit zdvih zkrácením či prodloužením délky pružiny pomocí šroubovaného konce pružiny. Tím se ovšem změní velikost předpětí pružiny, což vede ke změně tuhosti odpružení vozidla. Nejlepší a zároveň nejdražší možností je změna světlé výšky pomocí výškově a tuhostně stavitelných tlumičů (Obr. 21), které umožňují pomocí šroubovaného těla tlumiče změnu délky celé pružící jednotky. Tímto způsobem není ovlivněno ani předpětí pružiny, ani tuhost odpružení podvozku. [29]

Obr. 21 Vlevo výškově stavitelný tlumič. [30] Vpravo výškově a tuhostně stavitelný tlumič [31]

Na vozech formulového typu s lichoběžníkovou nápravou lze měnit světlou výšku změnou délky spojovací tažné tyče (pullrodu) či spojovací tlačné tyče (pushrodu) (Obr. 22). Konstrukčně je to řešené tak, že do obou konců pullrodu či pushrodu jsou zašroubovány kulové čepy a hloubkou jejich zašroubování se definuje délka sestavy pullrodu či pushrodu a tím se mění i světlá výška podvozku formule.

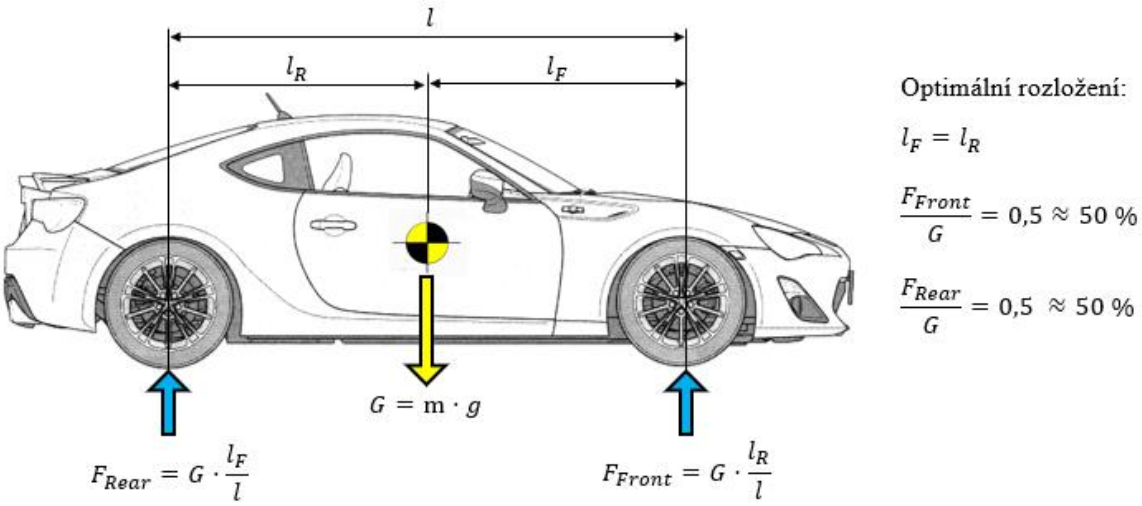


Obr. 22 Nastavení světlé výšky pomocí délky tažné tyče (pullrodu) na nápravě týmu CTU CarTech

3.4 Rozložení hmotnosti

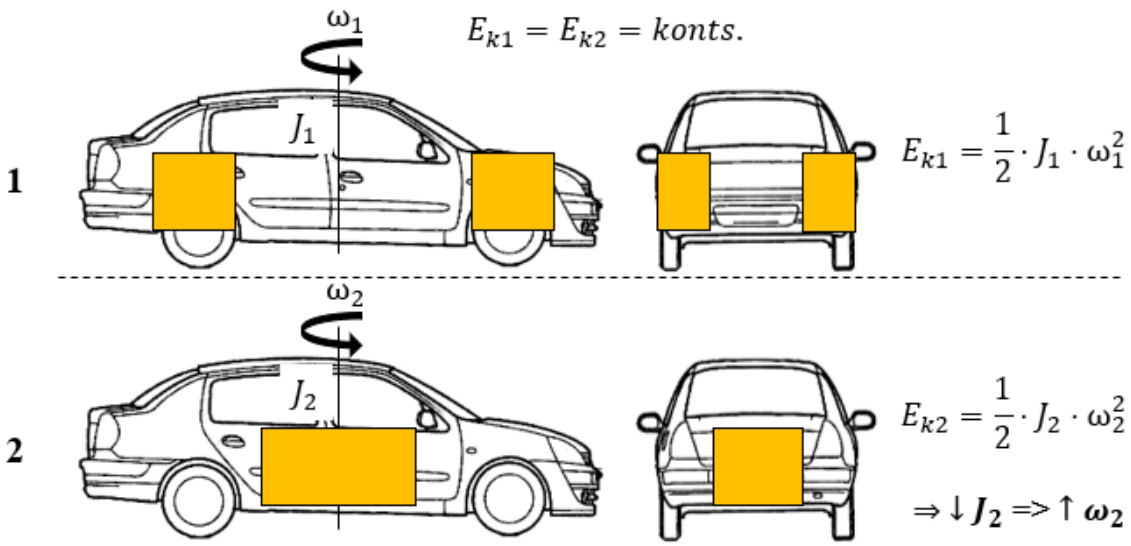
Rozložení hmotnosti („weight distribution“) udává, jak velkou normálovou silou ve směru osy z je zatížena přední a zadní náprava, případně se uvádí procentuální podíl zatížení přední ku zadní nápravě. Poměr zatížení náprav vychází z rozložení hmotnosti a je jiný pro vozidlo v klidu a jiný pro dynamicky se pohybující vozidlo, kdy je například při brždění přední náprava přitížena. Rozložení hmotnosti se měří a upravuje vždy na automobilových váhách, přičemž každé kolo vozidla stojí na vlastní váze.

Rozložení hmotnosti je určeno těžištěm automobilu (Obr. 23), jehož pozice se může u osobních vozidel pohybovat vlivem proměnného počtu pasažérů, vlivem stavu doplnění provozních kapalin a vlivem velikosti nákladu v zavazadlovém prostoru. U závodních automobilů je požadováno velmi přesné určení rozložení hmotnosti a z toho důvodu je měřeno s řidičem v sedadle a s doplněnými provozními kapalinami jako při závodech. Z pohledu jízdní dynamiky je optimální rozložení hmotnosti mezi přední a zadní nápravou 50 % na 50 %. Při tomto rozložení hmotnosti se vozidlo při průjezdu zatáčkou chová neutrálně a při konstantní rychlosti nedochází k nedotáčivému či přetáčivému chování. Preferuje-li závodník přetáčivé chování vozidla, je vhodné umístit polohu těžiště směrem k zadní části automobilu, aby byla zadní náprava více zatížena a měla v zatáčce tendenci setrvačnou silou přetáčet přední část vozidla. [4]



Obr. 23 Rozložení hmotnosti mezi přední a zadní nápravu [32]

Stejně důležitým parametrem, jako je rozložení hmotnosti, je rozmístění této hmoty po automobilu (Obr. 24). Soustředění hmoty k ose stáčení vozidla, tedy těžišti vozidla, se projeví agilnějším chováním oproti hmotě soustředěné nad nápravami. Platí zde zákon zachování kinetické energie rotačního pohybu, kdy s poklesem momentu setrvačnosti (soustředění hmoty k těžišti) vzroste úhlová rychlost tělesa (rychlost stáčení vozidla). [34] [35]



Obr. 24 Rozmístění hmoty podél a napříč vozidlem a jeho vliv na agilitu [33]

Výše zmíněné rozložení hmotnosti 50 % na přední a 50 % na zadní nápravu je sice považováno za optimální, v reálných závodních podmínkách je ale potřeba posuzovat zatížení každého kola zvlášť („corner balancing“), a nikoliv nápravu jako celek. Na řadu tak přichází další dva parametry: rozložení hmotnosti mezi levou a pravou stranou vozidla a rozložení hmotnosti mezi diagonálně postavenými koly. Všechny tři parametry pomocí procentuálního vyjádření dopředu nastíní, zda se bude závodní automobil chovat přetáčivě, nedotáčivě či neutrálně a zda se bude chovat stejně jak při levotočivé, tak při pravotočivé zatáčce. Pro závodní tým má přesné a komplexní měření velký význam, protože díky optimálně rozložené hmotnosti lze s vozidlem předvídatelně projíždět zatáčky na hraně přilnavosti pneumatik. Pro klasická osobní vozidla nemá přesné měření rozložení hmotnosti význam, protože hmotnost vozidla se neustále mění v závislosti na počtu pasažérů, stavu naplnění palivové nádrže a hmotnosti nákladu v zavazadlovém prostoru, což lze všechno u závodních automobilů předvídat. [36]

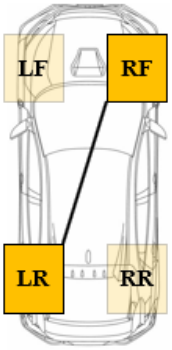
Žádné osobní ani závodní vozidlo není dokonale vyvážené, protože je konstruktér při návrhu omezen například prostorem pro uložení motoru a převodovky. Situace se navíc komplikuje tím, že je řidič většinou posazen na jedné straně vozidla, což velmi ovlivní rozložení hmotnosti, které je potřeba vyrovnat buď při návrhu vozidla nebo dodatečnými úpravami na vozidle. Z těchto důvodů není možné všechny tři parametry nastavit na optimální hodnotu 50 %. V praxi se závodní týmy snaží docílit přiblížení k hodnotě 50 %, přičemž parametru rozložení hmotnosti mezi diagonálně postavenými koly přikládají největší váhu. Pro konzistentní označování jednotlivých kol na automobilu se používají anglické zkratky (Obr. 25), kde LF („left front“) značí levé přední kolo, RF („right front“) pravé přední kolo, LR („left rear“) levé zadní kolo a RR („right rear“) pravé zadní kolo.

Obr. 25 Vlevo znázornění obvyklého označování kol na automobilových váhách. [37]
Vpravo automobilová váha COMPUTERSCALES AccuSet II [38]

3.4.1 Diagonální hmotnost

Diagonální hmotnost („cross weight“) je nejdůležitější parametr u rozložení hmotnosti a udává, jaké je diagonální rozložení hmotnosti vůči celkové hmotnosti vozidla (Obr. 26). Cílem při nastavování automobilu před závody je zachovat tento parametr co nejblíže k 50% hodnotě. V praxi tento parametr určuje, zda se vozidlo chová stejně při průjezdu jak levotočivou, tak pravotočivou zatáčkou. Z hlediska předvídatelného chování vozidla v zatáčce jsou diagonální hmotnost spolu s boční hmotností zásadními parametry podvozku. Aby se na předvídatelné chování automobilu mohl řidič spolehnout, je vhodné dodržet toleranci ± 0,5 %, maximálně ± 1 %. Pokud bude mít diagonála RF + LR výrazně větší hmotnostní zastoupení než diagonála LF + RR, bude mít vozidlo v levotočivé zatáčce tendenci k nedotáčivosti a v pravotočivé zatáčce naopak k přetáčivosti. Pokud bude mít naopak diagonála LF + RR výrazně větší hmotností zastoupení než diagonála RF + LR, bude mít vozidlo v levotočivé zatáčce tendenci k přetáčivosti a v pravotočivé zatáčce naopak k nedotáčivosti. [39] [40]

Obvykle se na automobilových váhách diagonální hmotnost zobrazuje pro kola RF + LR (Obr. 26), přičemž druhou diagonální hmotnost lze jednoduše dopočítat odečtením této hodnoty od 100 %. Diagonální hmotnost se počítá jako součet hmotností na pravém předním kole a levém zadním kole vydělený celkovou hmotností automobilu.



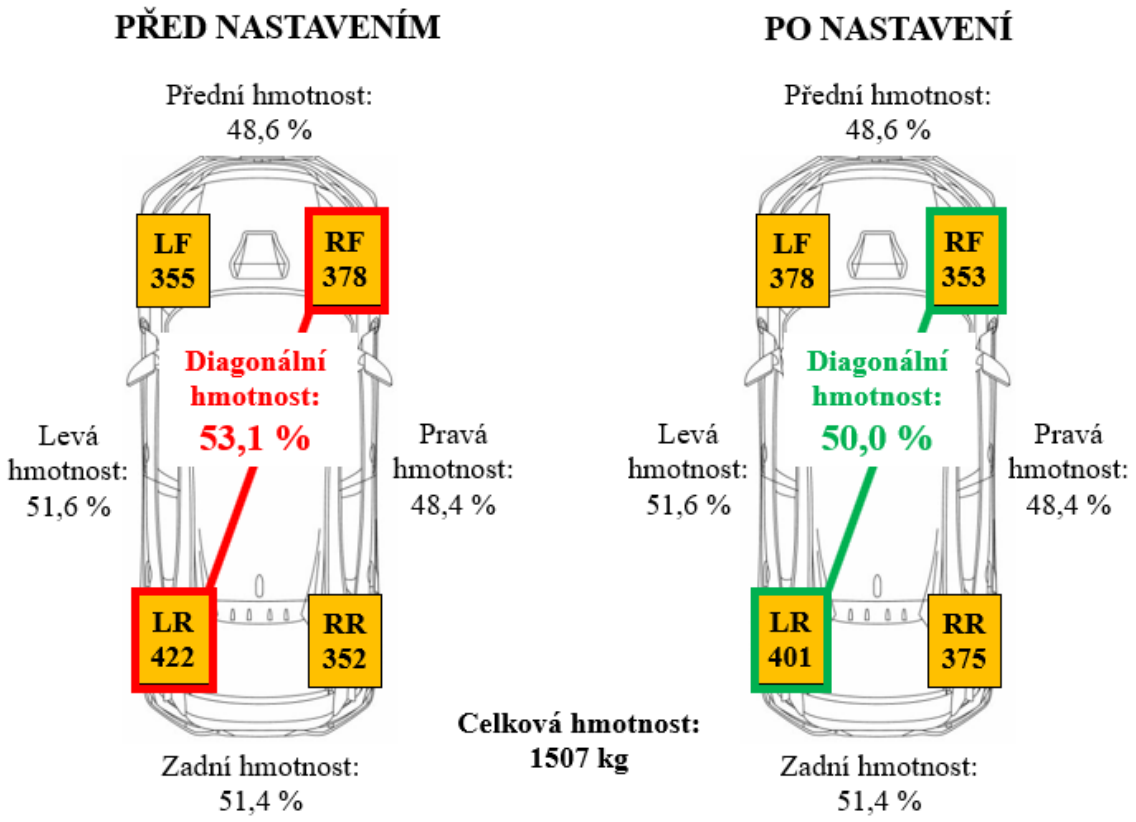
$$Diagonální\ hmotnost\ [\%] = \frac{RF + LR}{celková\ hmotnost}$$

Obr. 26 Znázornění a výpočet diagonální hmotnosti [37]

Při snaze o docílení 50% diagonálního rozložení hmotnosti (Obr. 27) je vhodné nejdříve určit konkrétní kolo, které svým zatížením nejvíce odlišuje od ostatních kol a které způsobuje odchýlení diagonální rovnováhy. Úpravu diagonálního rozložení hmotnosti nelze provést prostřednictvím přesouvání závaží či komponentů po automobilu tak jako u ostatních parametrů, nýbrž pouze úpravou světlé výšky podvozku u daného kola.

Zvětší-li se vozidlu jízdní výška u jednoho kola na diagonále (vozidlo se na tomto kole pomyslně nadzvedne), nastane zvýšení hmotnostního zatížení obou kol na této diagonále. Kolům na opačné diagonále se naopak sníží hmotnostní zatížení.

Sníží-li se vozidlu jízdní výška u jednoho kola na diagonále (vozidlo na tomto kole pomyslně poklesne), nastane snížení hmotnostního zatížení obou kol na této diagonále. Kolům na opačné diagonále se naopak zvýší hmotnostní zatížení. Příznivým faktem při nastavování diagonální hmotnosti je, že boční hmotnost (3.4.2 Boční hmotnost) a zadní hmotnost (3.4.3 Zadní hmotnost) zůstává neměnná. [40]

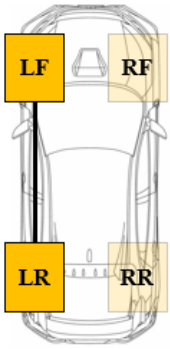


Obr. 27 Příklad nastavování diagonální hmotnosti. Snížení zatížení kol na jedné diagonále (RF+LR) vede ke zvýšení zatížení kol na druhé diagonále (LF+RR) [37]

3.4.2 Boční hmotnost

Boční hmotnost („side weight“) je téměř stejně důležitý parametr jako diagonální hmotnost a udává, jaké je rozložení hmotnosti mezi levými a pravými koly vozidla (Obr. 28). Optimální hodnotou tohoto parametru je rozložení hmotnosti 50 % mezi pravou a levou stranou automobilu, přičemž je vhodné dodržet toleranci o velikosti ideálně ± 0,5 %, maximálně ± 1 % pro předvídatelné chování vozidla. Boční hmotnost, stejně jako diagonální hmotnost, určuje, jestli se vozidlo chová stejně při průjezdu jak levotočivé, tak pravotočivé zatáčky. Při nesymetrickém rozložení boční hmotnosti dochází k tomu, že vozidlo například levotočivou zatáčkou může projet rychleji než pravotočivou a dále dochází ke zhoršení ovladatelnosti vozidla při brždění a akceleraci, protože rozdílně zatížené pneumatiky přenáší rozdílně velké brzdné a hnací síly, což generuje moment kolem svislé osy vozidla a způsobuje stáčení automobilu. [34] [40]

Obvykle se na automobilových váhách zobrazuje boční hmotnost pro levou stranu vozidla (Obr. 28), to znamená pro kola LF + LR, přičemž pravou stranu vozidla lze jednoduše dopočítat odečtením této hodnoty od 100 %. Boční hmotnost se počítá jako součet hmotností na levém předním a levém zadním kole vydělený celkovou hmotností automobilu.



$$Boční\ hmotnost\ [\%] = \frac{LF + LR}{celková\ hmotnost}$$

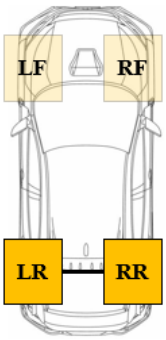
Obr. 28 Znázornění a výpočet boční hmotnosti [37]

Při nastavování rozložení hmotnosti je u některých automobilů potřeba konstrukčních úprav, aby se dosáhlo 50% rozdělení boční hmotnosti, protože automobil mohl být původně navržen například pro posádku řidiče s navigátorem a pokud s vozidlem závodí pouze samotný řidič, tak může být boční hmotnost změněna řádově o jednotky procent, což citelně ovlivní jízdní vlastnosti vozidla. V takovém případě lze boční hmotnost upravit pomocí přídavného závaží, které se umístí na méně zatíženou stranu automobilu, nebo prostřednictvím posunování již namontovaných komponent v automobilu jako například akumulátoru. Tímto postupem se může změnit i diagonální hmotnost, kterou je potřeba přiblížit k požadovaným 50 %. [40]

3.4.3 Zadní hmotnost

Zadní hmotnost („rear weight“) udává rozložení hmotnosti mezi předními a zadními koly automobilu (Obr. 29). Optimální hodnotou zadní hmotnosti je 50 %. Mnohé sportovní automobily se této hodnotě nepřibližují, protože obsahují v přední části hmotný motor s převodovkou a v zadní části prázdný úložný prostor, což způsobuje nerovnoměrné rozložení hmotnosti. Procentuální vyjádření zadní hmotnosti o automobilu vypovídá, zda bude mít tendenci k nedotáčivému, neutrálními či přetáčivému chování při jízdě v zatáčce. Největším přínosem 50 % hmotnosti na zadních kolech je neutrální chování vozidla v zatáčkách, díky kterému lze projíždět zatáčky na limitu přilnavosti pneumatik, aniž by došlo k nedotáčivému nebo přetáčivému chování vozidla. Pokud jsou více zatížena zadní kola automobilu, dochází k nechtěnému přetáčivému chování, zlepšují se brzdné vlastnosti vozidla, protože nedochází k odlehčení zadních kol a u automobilu s přední hnací nápravou se zhoršují akcelerační schopnosti, protože jsou hnací pneumatiky méně zatíženy. [34] [40]

Na automobilových váhách se pro vyjádření zatížení předních a zadních kol udává právě procentuální zatížení zadních kol (Obr. 29), tedy kol LR + RR, přičemž zatížení předních kol lze jednoduše dopočítat odečtením této hodnoty od 100 %. Zadní hmotnost se počítá jako součet hmotností na zadních kolech vydělený celkovou hmotností automobilu.



$$Zadní\ hmotnost\ [\%] = \frac{LR + RR}{celková\ hmotnost}$$

Obr. 29 Znázornění a výpočet zadní hmotnosti [37]

Pro nastavení zadní hmotnosti na optimálních 50 % platí stejná pravidla jako pro nastavení boční hmotnosti. Upravit ji lze namontováním dodatečného závaží do automobilu nebo přesouváním komponentů jako je například rezervní kolo v zavazadlovém prostoru, přičemž se může změnit diagonální hmotnost, kterou je poté potřeba opět přiblížit k 50% hodnotě. [40]

4 Metody měření geometrie kol, světlé výšky a rozložení hmotnosti

U závodních automobilů jsou kladeny jiné požadavky na měření a nastavování geometrie kol než u osobních automobilů, proto jsou měřící přístroje pro závodní automobily charakteristické jednoduchou konstrukcí s absencí složité elektroniky. Jeden z hlavních požadavků je rychlost měření, díky které může být geometrie kol přenastavena těsně před závodem i mezi jednotlivými závodními disciplínami. Důležitým faktorem je také opakovaná přesnost měření, která je udávána pomocí tolerance měřené veličiny. Dalším požadavkem je kompaktní tvar, díky kterému lze měřící přístroj převážet mezi jednotlivými závody a měřit s ním geometrii kol v malých závodních boxech vyhrazených pro jednotlivé týmy. Závodní boxy často nemají dokonale rovnou podlahu, z toho důvodu je dalším požadavkem měření geometrie kol na nerovném podkladu. V závislosti na velikosti rozpočtu konkrétního závodního týmu je častým požadavkem také nízká výrobní cena. Kvůli většině výše zmíněných požadavků není možné využít přesnou laserovou geometrii, jejíž cena se pohybuje řádově ve statisících korun a která je běžně používána v autoservisech. Z výše uvedených důvodů je rešerše aktuálně používaných metod zaměřena na metody vhodné pro závodní vozidla.

4.1 Měření odklonu kol

Principem měření odklonu kola je změřit úhel (Obr. 30), který svírá střední rovina kola s rovinou kolmou k vozovce. Nejčastěji se měří pomocí digitálního inklinometru, který lze podle instrukcí z uživatelského manuálu kdykoliv opětovně zkalibrovat. Cena digitálních inklinometrů se pohybuje od 500,- do 15 000,- Kč a jejich přesnost se vyskytuje v rozsahu $\pm 0{,}1°$ u levnějších přístrojů, $\pm 0{,}05°$ u dražších přístrojů. Sklonoměry se přikládají tříbodově na ráfek kola nebo plošně na brzdový kotouč (Obr. 30).

Předpokladem pro přesné měření je umístění kol vozidla na dokonale rovný podklad. Odklon se měří na každém kole zvlášť a velikost odklonu na konkrétní nápravě musí být totožná pro levé a pravé kolo. Kupované ráfky týmu CTU CarTech vykazují axiální házení, kvůli kterému není stávající měření na ráfcích dostatečně přesné a je vhodné navrhnout novou metodiku měření. Měření odklonu na brzdových kotoučích není na formuli FS.12 možné, protože jsou kotouče v plovoucím provedení.

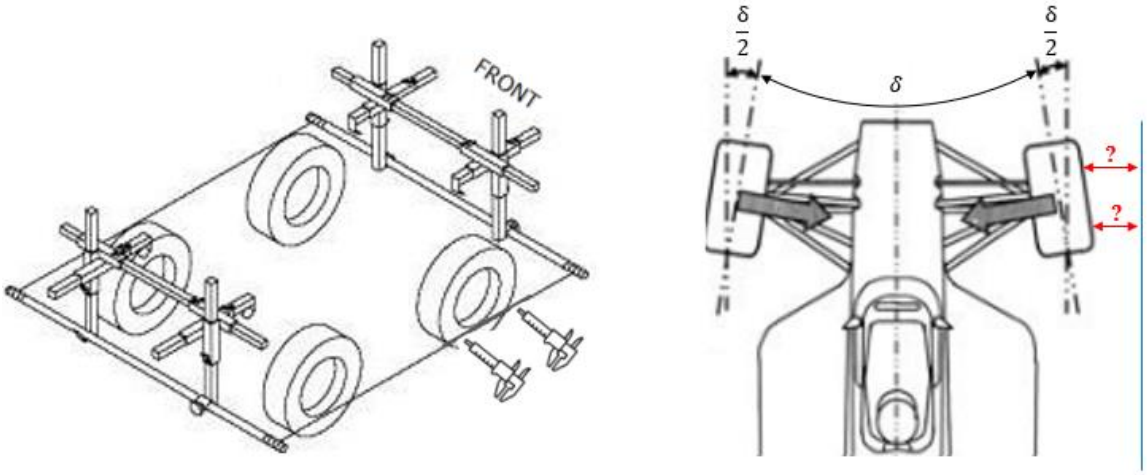
Obr. 30 Vlevo princip měření odklonu kol. [43] Uprostřed měření odklonu kola na brzdovém kotouči. [41] Vpravo měření odklonu kola na ráfku [42]

4.2 Měření sbíhavosti kol

Měření sbíhavosti kol je oproti měření odklonu náročnější na přípravu měření i na měření samotné. Důvodem je fakt, že při měření sbíhavosti je vhodné zkontrolovat, zda geometrická osa jízdy je shodná s podélnou rovinou vozidla a nedochází k šikmé jízdě vozidla, která je vysvětlena v kapitole 3.2.4 Geometrická osa jízdy. Aby bylo možné tuto kontrolu provést, je nutné měřit sbíhavost na všech čtyřech kolech najednou, což zvyšuje časovou náročnost celého procesu. Při měření sbíhavosti kol platí pravidlo, že čím přesněji jsou přípravky k měření sbíhavosti namontovány, tím přesněji budou měřeny i hodnoty sbíhavosti.

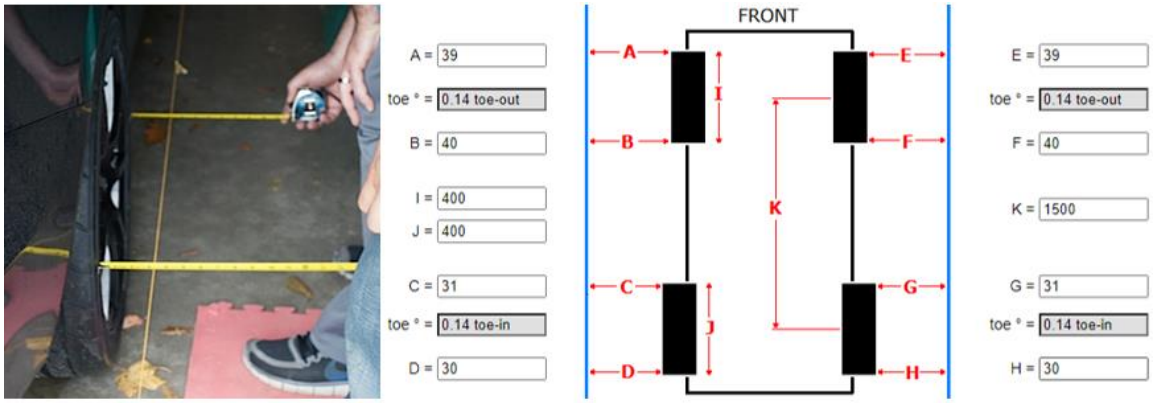
U závodních vozidel je nejefektivnější metoda pro měření sbíhavosti tzv. provázková metoda („string alignment“, Obr. 31). Protože je tato metoda rychlá, levná, nenáročná na prostor a dostatečně přesná, využívají ji závodní týmy ve studentské formuli, v Rally i ve formuli 1. Tým CTU CarTech rovněž využívá zjednodušenou provázkovou metodu.

Principem měření sbíhavosti kol pomocí provázkové metody je změřit vzdálenosti přední a zadní části ráfku od provázku, který je podle určitých pravidel natažený podél vozidla. Jakmile jsou změřeny tyto dvě vzdálenosti na všech čtyřech kolech, se znalostí průměru ráfku a se znalostí rozvoru kol lze pomocí geometrických vztahů či pomocí online kalkulátoru spočítat sbíhavost kol, rozchod kol a úhel mezi podélnou rovinou vozidla a geometrickou osou jízdy („thrust angle“, Obr. 32).



Obr. 31 Vlevo schéma provázkové metody s konstrukcí pro uchycení přípravků ke karoserii. [44]
Vpravo princip měření sbíhavosti předních kol pomocí provázkové metody [45]

Na Obr. 32 je příklad z fiktivního měření sbíhavosti kol pro vozidlo s rozvorem 1 500 mm, s průměrem ráfku 400 mm a s větším rozchodem kol vzadu než vpředu. Na předních kolech je naměřena vzdálenost ráfku od provázku 39 mm v přední a 40 mm v zadní části ráfku pro levé i pravé kolo, což odpovídá 0,14° rozbíhavosti na jednom kole, resp.0,28° rozbíhavosti pro přední nápravu. Na zadní nápravě je vypočtena naopak sbíhavost kol o velikosti 0,28°. Dále online kalkulátor uvádí, že zadní rozchod kol je o 18 mm větší než přední a úhel mezi podélnou rovinou vozidla a geometrickou osou jízdy je 0°. Z poslední zmíněné hodnoty lze usoudit, že nedochází k šikmé jízdě vozidla.



Obr. 32 Vlevo měření vzdálenosti ráfku od provázku v přední a zadní části kola. [46]
Vpravo zpracování dat z fiktivního měření sbíhavosti kol pomocí online kalkulátoru [47]

Při přípravě provázkové metody je nezbytné dodržet několik následujících pravidel, aby mohly být výsledky měření považovány za relevantní. Volant musí být aretovaný ve střední poloze. Řiditelná kola musí směřovat rovně ve směru jízdy vozidla. Pneumatiky musí být nahuštěny na stejný tlak, na který se hustí před závody. Provozní kapaliny, jako je například palivo, motorový olej či chladící kapalina, musí být doplněny na stejnou úroveň, na jakou jsou doplňovány před závody. Řidič musí být po celou dobu měření posazen ve vozidle. Plocha, na které se provádí měření, by měla být dokonale

rovná a vodorovná. Případné odchylky je nutné vyrovnat pomocí výškově stavitelných automobilových vah. Natažené provázky podél vozidla musí být navzájem rovnoběžné, čehož se docílí stejnou vzdáleností provázků před a za vozidlem. Aby osa rovnoběžnosti provázků procházela podélnou rovinou automobilu, je vhodné nastavit provázek ve stejné vzdálenosti od středu kola pro levé i pravé kolo na obou nápravách, přičemž při rozdílných rozchodech se hodnoty na přední a zadní nápravě budou lišit. Provázky musí výškově procházet středy kol a dále je vhodné provázky umístit co nejblíže ke karoserii, aby se zmenšila chyba měření. Samotné měření vzdálenosti ráfku od provázku se provádí kolmo k provázku, a nikoliv kolmo k ráfku.

Obr. 33 Příklady měření sbíhavosti kol pomocí provázkové metody
(Vlevo konstrukce pro držení provázků uchycená za karoserii automobilu Toyota GT86 [48])
(Vpravo konstrukce pro držení provázků formou kovového stojanu týmu Ferrari [49])

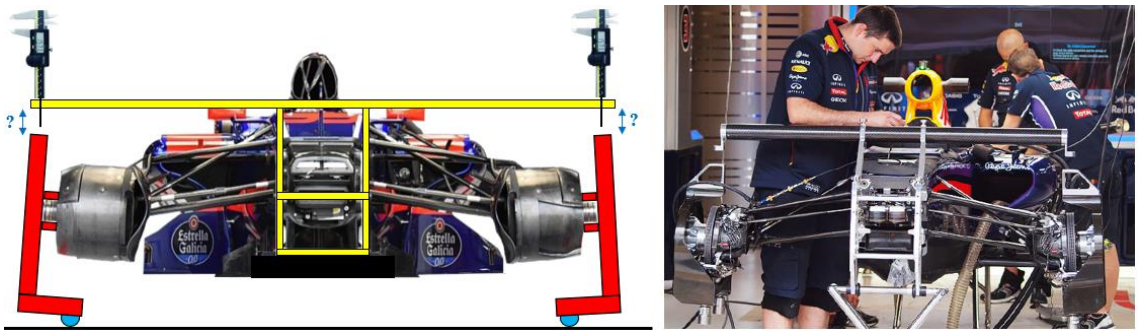
4.3 Měření světlé výšky

Cílem měření světlé výšky je zjistit nejmenší svislou vzdálenost pevného bodu střední části automobilu od povrchu vozovky. Kromě nejmenší světlé výšky je užitečné měřit také světlou výšku pod přední a zadní nápravou a hledat její optimální hodnotu z hlediska jízdní dynamiky. Ve většině případů se světlá výška měří k nějaké dobře dostupné části karoserie a protože mají závodní vozy formulového typu výrazně jinou konstrukci karoserie než závodní či osobní karosované automobily, měří se také světlá výška jiným způsobem. Z tohoto důvodu je i rešerše měření světlé výšky zaměřena na metody používané ve formuli 1.

V současné době nemá tým CTU CarTech žádnou metodiku pro přesné a rychlé měření světlé výšky. Pomocí hliníkového čtvercového profilu o rozměru 30x30 mm se pouze kontroluje, zda vůz splňuje pravidlo minimální světlé výšky podvozku o velikosti 30 mm.

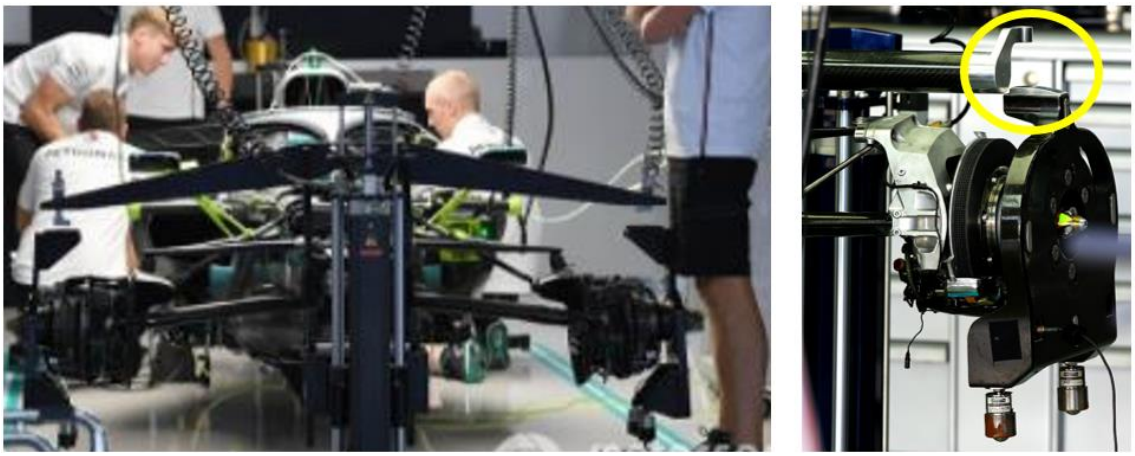
U vozů formulového typu se nejpřesněji měří světlá výška pomocí přípravků, které jsou vyrobeny unikátně pro konkrétní vůz (Obr. 34). Místo kol se na všechny náboje namontují přípravky, na kterých lze měřit světlou výšku, odklon i sbíhavost kol. Na

přípravky jsou ve spodní části namontována pojezdová ložiska, která umožňují volný pohyb po podkladu s minimálním třením. Další dva přípravky zaujímající celou šíři formule se upevní za přední a zadní část monokoku. Odměřením vzdálenosti horního přípravku od spodního pomocí digitálního posuvného měřítka a následným kinematickým přepočtem lze získat přesnou hodnotu světlé výšky pod danou nápravou. Výhodou této metody je, že v průběhu nastavování geometrie nápravy lze průběžně kontrolovat velikost světlé výšky, protože měření je velmi rychlé a nenáročné na obsluhu.



Obr. 34 Vlevo princip měření světlé výšky u vozů formulového typu. [50]
Vpravo přípravky pro měření světlé výšky týmu Red Bull Racing [51]

Každý tým ve formuli 1 vlastní unikátní přípravek pro měření světlé výšky. Princip měření je u všech týmů obdobný a je vysvětlen na obrázku výše (Obr. 34).



Obr. 35 Vlevo přípravky pro měření světlé výšky týmu Mercedes-AMG Petronas. [52]
Vpravo označená část přípravku pro odměřování vzdálenosti týmu Red Bull Racing [53]

4.4 Měření rozložení hmotnosti

Cílem měření rozložení hmotnosti je zjistit, jak velkou normálovou silou v ose z automobilu jsou zatížena jednotlivá kola, přičemž výsledky měření se obvykle udávají v jednotkách hmotnosti, tedy v kilogramech. U osobních i závodních automobilů se měření provádí pomocí automobilových vah (Obr. 36), u kterých se cena pohybuje od 20 000,- do 50 000,- Kč. Tým CTU CarTech rovněž využívá automobilové váhy,

konkrétně Computerscales AccuSet od firmy Longacre. Stejně jako u měření geometrie a měření světlé výšky, i u rozložení hmotnosti je potřeba dodržet následující pravidla.

Rozložení hmotnosti se měří s řidičem, který je posazen ve stejné pozici, ve které řídí vůz při závodech. Pneumatiky musí být nahuštěné na stejný tlak, na jaký se obvykle hustí před závody. Pokud se provede jakákoliv změna na nastavení nápravy, je vhodné s vozidlem na automobilových váhách popojet, aby se eliminovaly síly v zavěšení kola vzniklé napružením pneumatiky.

Obr. 36 Vlevo automobilové váhy Computerscales AccuSet II Basic Systém od firmy Longacre. [54]
Vpravo měření rozložení hmotnosti pomocí automobilových vah na vozidle Mazda MX-5 [39]

U technologicky pokročilých přípravků se rozložení hmotnosti měří bez použití automobilových vah. Na výše umístěném obrázku vpravo (Obr. 35) je část přípravku týmu Red Bull Racing, který pro volný pojezd používá dvě kuličkové jednotky umístěné ve spodní části přípravku. Tyto kuličkové jednotky umožňují kromě volného pohybu také měření síly pomocí zabudovaných siloměrů, přičemž finálním výstupem je rozložení hmotnosti na jednotlivá kola v kilogramech.

5 Konstrukční návrh měřícího přípravku

Před samotným konstrukčním návrhem jsou stanoveny požadavky kladené na měřící přípravek. Na základě těchto požadavků je navržena konstrukce přípravku a provedeny potřebné kontrolní výpočty. Po vyrobení a otestování funkčnosti se měřící přípravek začne používat pro měření a nastavování náprav na vozidle FS.12 a na dalších generacích vozů týmu CTU CarTech.

5.1 Seznam požadavků

Z dosavadních zkušeností týmu CTU CarTech s měřením a nastavováním geometrie kol, světlé výšky a rozložení hmotnosti jsou stanoveny následující požadavky na nový měřící přípravek.

- **Měření čtyř parametrů jedním přípravkem**

Cílem je dosud separátně měřené parametry (odklon, sbíhavost, světlá výška, rozložení hmotnosti) měřit pomocí jediného měřícího zařízení a mít možnost měřit všechny tyto parametry najednou ve stejný okamžik. Díky tomu lze pozorovat změnu jednoho parametru (např. odklonu) při nastavování jiného parametru (např. světlé výšky).

- **Vysoká přesnost měření**

Pro měření odklonu kol je určena přesnost měření ± 0,05°. Měření sbíhavosti kol musí být proveditelné s vyšší přesností a stejným nářadím jako doposud, tedy pomocí pravítek a provázků pro měření sbíhavosti kol. Měření světlé výšky je požadováno s vyšší přesností než doposud, konkrétně s přesností ± 0,1 mm. Měření rozložení hmotnosti musí být proveditelné se stejnou přesností a nářadím jako doposud, tedy pomocí automobilových vah s přesností ± 0,2 kg.

- **Odstranění napružení pneumatik**

Úkolem nového měřícího přípravku je eliminovat třecí síly, které vznikají mezi pneumatikou a automobilovou váhou při přenastavení geometrie kola. Vlivem vysokých třecích sil vzniká napružení zdeformované pneumatiky a nežádoucí předepnutí systému zavěšení kol. Odstraněním problému s napružením pneumatiky lze zpřesnit a zkrátit proces měření a nastavování náprav.

- **Kompaktní tvar**

Měření a nastavování náprav se provádí před každým testováním, závodem i mezi jednotlivými závodními disciplínami. Nový měřící přípravek musí být umístitelný do přívěsného vozíku a zároveň musí být jakýmkoliv členem týmu snadno přemístitelný.

- **Ekvivalentní hmotnost všech přípravků**

Kromě nízké hmotnosti s ohledem na manipulaci je také žádoucí, aby nový měřící přípravek působil na všechna kola stejnou tíhovou silou a nebylo tak ovlivněno měření rozložení hmotnosti. Tolerance pro odchylku hmotnosti jednotlivých přípravků je stanovena na ± 50 g.

- **Vysoká tuhost**

Měřící přípravek bude zatížen nezanedbatelně velkou tíhovou silou formule a jezdce (711 N na jeden přípravek). Pro zajištění požadované přesnosti měření je vhodné navrhnout konstrukci přípravku o vysoké tuhosti, která povolí pouze minimální deformace přípravku. Zároveň bude s vysokou tuhostí zajištěna bezpečnost konstrukce po pevnostní stránce a přípravek tak bude bezpečný pro obsluhující členy týmu.

- **Rychlá montáž a jednoduchá obsluha**

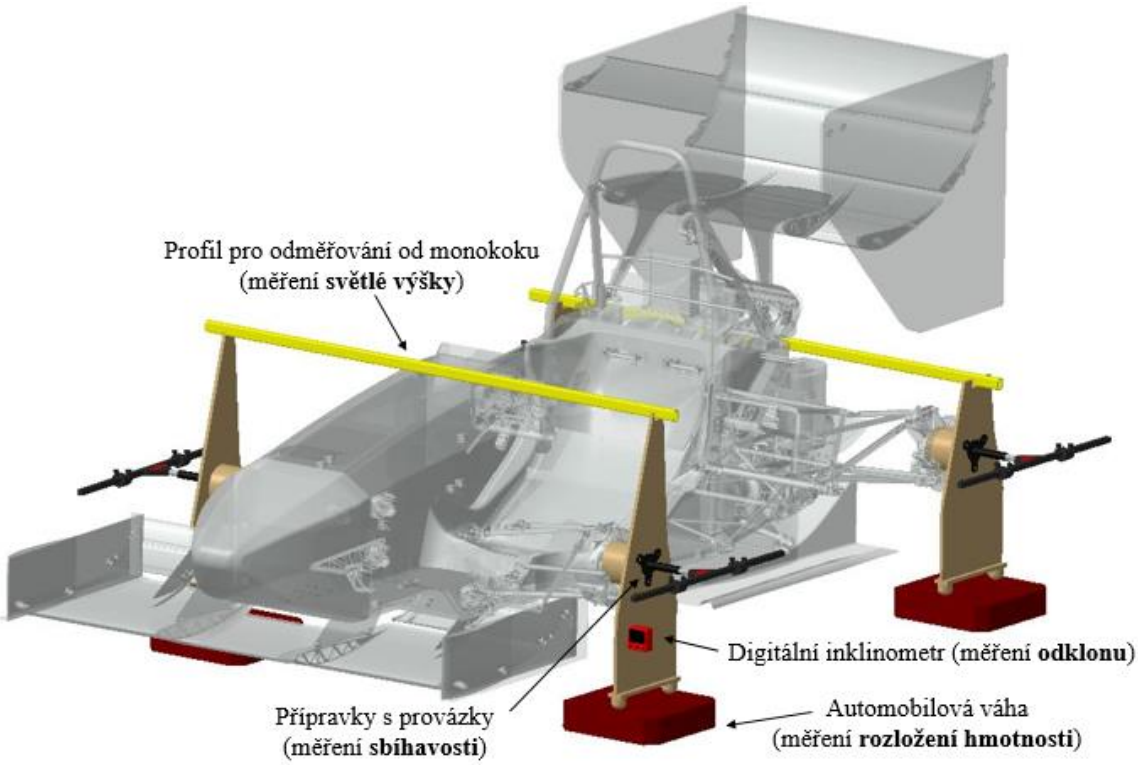
Protože se měření geometrie provádí velmi často, je požadována rychlá montáž měřícího přípravku na nápravy. Zároveň musí být nastavovací prvky zavěšení kol dobře přístupné i s ohledem na dostatek prostoru pro nářadí, nejčastěji pro stranové klíče.

- **Levná výroba v podmínkách dílny CTU CarTech**

Rozpočet na výrobu měřícího přípravku je stanoven na 15 000,- Kč s tím, že se předpokládá výroba některých dílů u týmových sponzorů. Rozpočet zahrnuje výdaje za hutní materiál, za nakupované součástky a za technologické operace prováděné u externích firem, které nesponzorují tým CTU CarTech. Při návrhu rozpočtu je přihlédnuto k vybavenosti týmové dílny, ve které se nachází konvenční soustruh TOS SV 18 RA, sloupová vrtačka PROMA E-2020F, pásová pila a svářečka FRONIUS schopná svářet technologií MIG/MAG a TIG.

5.2 Schéma a princip měření

Před návrhem měřícího přípravku je vytvořeno schéma principu měření všech požadovaných parametrů (Obr. 37). Schéma vychází z dosavadních zvyklostí a zkušeností s nastavováním náprav týmu CTU CarTech a z požadavků kladených na nový měřící přípravek.

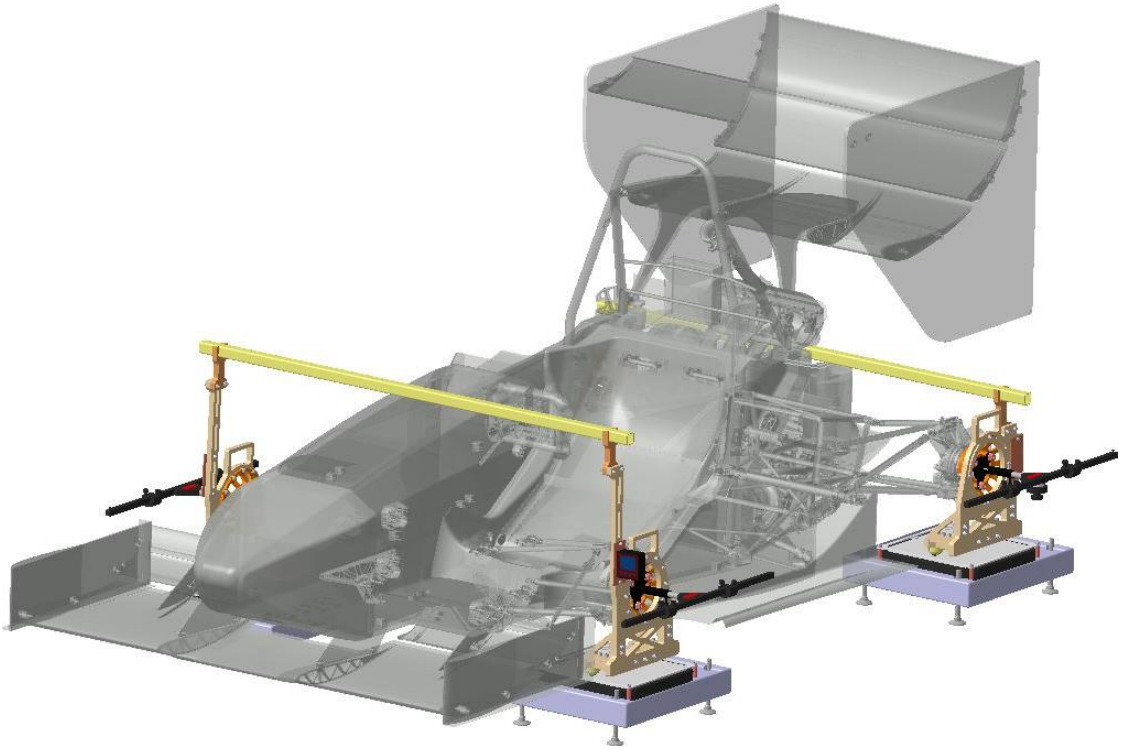


Obr. 37 Schéma sloužící jako výchozí podklad pro vývoj konstrukce přípravku

Na základě tohoto schématu je optimalizována konstrukce měřícího přípravku, jejíž finální podobna je detailně popsána v kapitole níže (5.3 Konstrukční návrh). Odklon kol je měřen pomocí digitálního inklinometru, který je magneticky uchycen na desce, která je rovnoběžná se střední rovinou kola. Princip měření je podrobněji popsán v kapitole 4.1 Měření odklonu kol. Sbíhavost kol je měřena provázkovou metodou pomocí již používaných přípravků. Provázková metoda je podrobněji popsána v kapitole 4.2 Měření sbíhavosti kol. Světlá výška je měřena nepřímo odměřováním vzdálenosti mezi monokokem a profilem, která se následně přepočte na skutečnou světlou výšku. Tato metoda je podrobněji popsána v kapitole 4.3 Měření světlé výšky. Rozložení hmotnosti se měří pomocí již používaných automobilových vah umístěných pod jednotlivými přípravky. Kontakt mezi automobilovou váhou a přípravkem zajištuje dvojice kuličkových jednotek, které přenášejí reakční sílu od tíhové síly formule a zároveň zajišťují volný pohyb s minimálním třením oproti měření s namontovanými pneumatikami. Pravidla pro správné používání automobilových vah jsou vypsána v kapitole 4.4 Měření rozložení hmotnosti.

5.3 Konstrukční návrh

Ze schématického principu měření (Obr. 37) je vytvořen finální konstrukční návrh měřícího přípravku v programu CATIA V5 (Obr. 38). Konstrukce přípravku prošla postupným vývojem od prvního koncepčního návrhu velmi podobného schématu (Obr. 37) až do finální podoby. Celkem byly provedeny čtyři konstrukční optimalizace (Obr. 43) z hlediska funkčnosti, pevnosti, hmotnosti, technologičnosti a finančních nákladů.

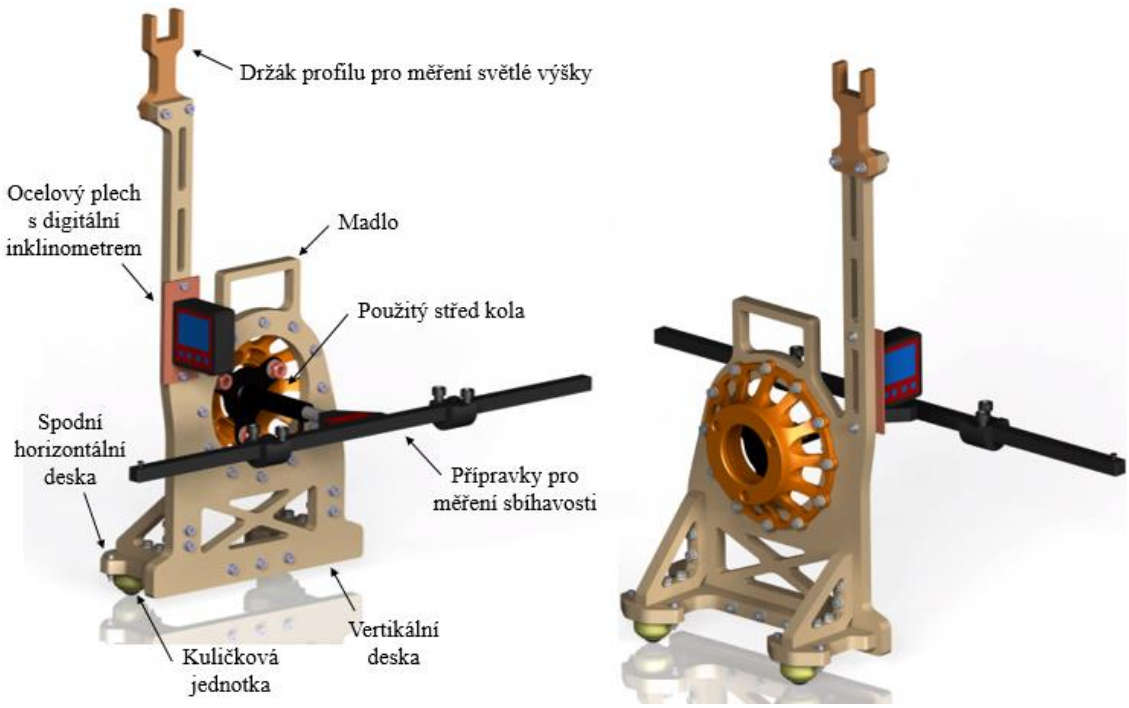


Obr. 38 Finální konstrukční návrh měřícího přípravku

Finální návrh měřícího přípravku (Obr. 38) je složen ze dvou hlavních konstrukčních sestav. První sestava je nosná konstrukce s přípravky pro měření sbíhavosti kol, s digitálním inklinometrem a s profilem pro měření světlé výšky. Druhou sestavu tvoří automobilové váhy umístěné na výškově stavitelných podstavcích. Princip měření je popsán v kapitole 5.2 Schéma a princip měření.

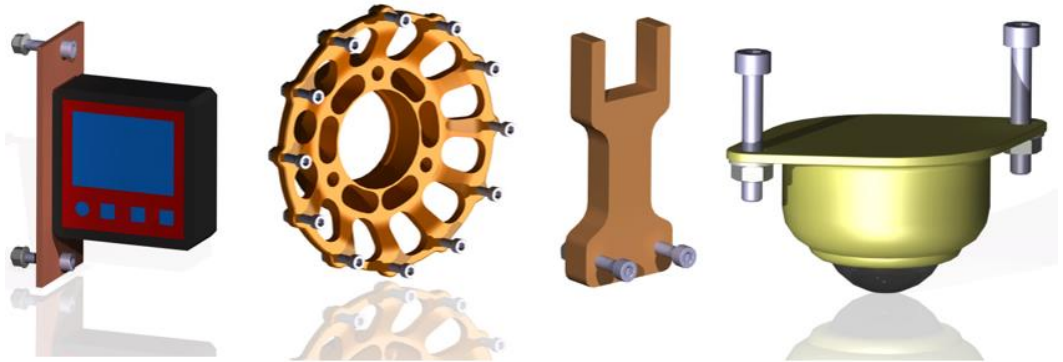
5.3.1 Nosná konstrukce

Nosná konstrukce (Obr. 39) slouží k podpírání formule zatížené tíhovou silou a k měření parametrů náprav. Hlavní část nosné konstrukce tvoří 15 mm silné hliníkové desky komplexních tvarů, které jsou k sobě přišroubovány a pro vyšší tuhost následně svařeny. K těmto deskám jsou dále připevněny další komponenty měřícího přípravku.



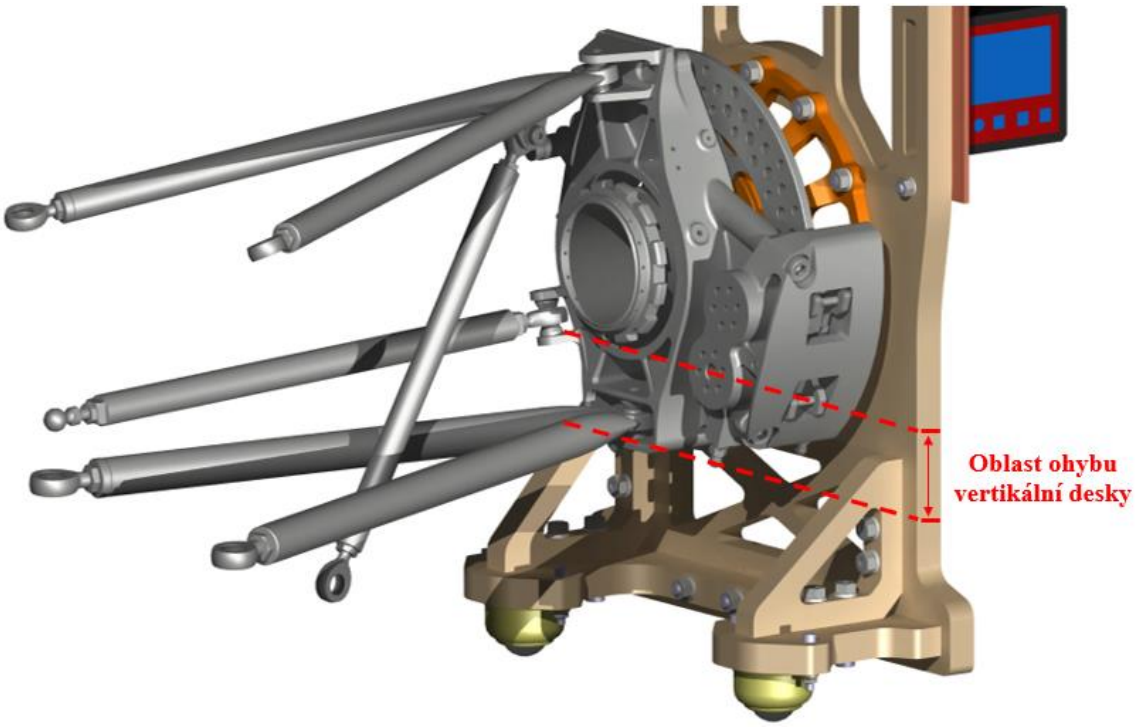
Obr. 39 Nosné konstrukce pro přední levé zavěšení s namontovanými měřícími komponenty

K vertikální hliníkové desce je přišroubován 3mm ocelový plech, na který je možné magneticky umisťovat digitální inklinometr (Obr. 40). Dále je k vertikální desce přišroubován použitý střed kola (Obr. 40) z formule FS.11, který umožňuje rychlé nasazení měřícího přípravku na náboj kola za nábojové štefty. Na konci podlouhlého ramene vertikální desky je přišroubován hliníkový držák (Obr. 40), jehož úkolem je správně pozicovat hliníkový profil, od kterého se měří vzdálenost k monokoku a následně vyhodnocuje světlá výška. V prostřední části hliníkového profilu jsou provrtané dvě díry určené pro hloubkoměr digitálního posuvného měřítka. Poslední natrvalo přišroubovaný díl je dvojice kuličkových jednotek pro plochou montáž od firmy Kola Pirkl (Obr. 40) s maximálním povoleným zatížením 55 kg na jednu kuličkovou jednotku. Tyto jednotky jsou přišroubovány ke spodní horizontální desce. Všechny výše zmíněné spoje jsou uvažovány jako trvalé a z toho důvodu jsou k jejich připevnění použity samojistné matice DIN 985, které pomocí nylonové vložky brání samovolnému povolení šroubového spoje.



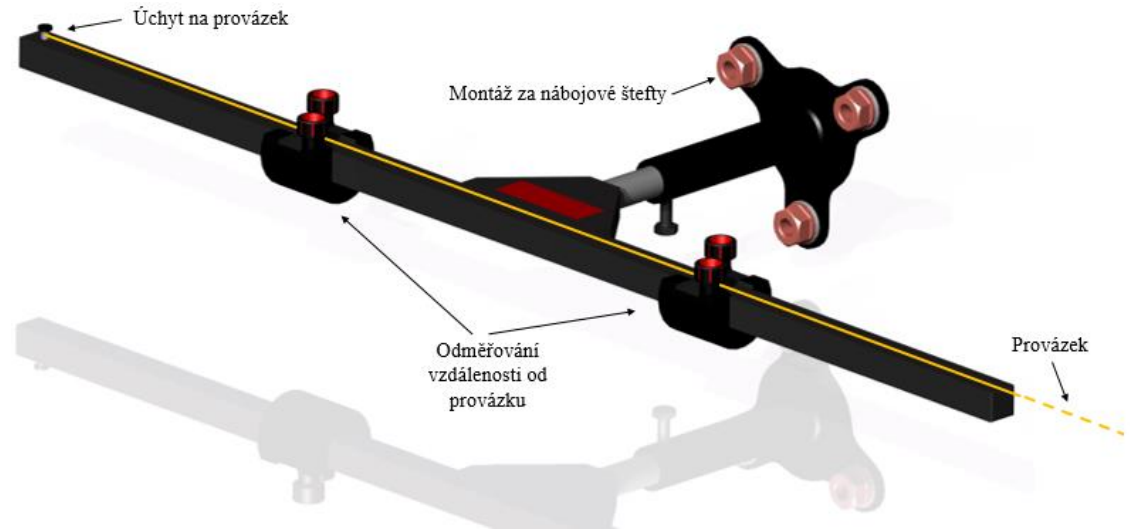
Obr. 40 Seznam komponent trvale přišroubovaných k nosné konstrukci
(zleva plech s inklinometrem, použitý střed kola, držák profilu světlé výšky, kuličková jednotka)

Pro zvýšení tuhosti konstrukce z důvodu přesného měření a pro zvýšení pevnosti konstrukce z důvodu bezpečného nastavování geometrie náprav je roh mezi vertikální deskou a spodní horizontální deskou vyztužen odlehčenými hliníkovými žebry o tloušťce 15 mm (Obr. 41). Žebra jsou umístěna vždy do středu kuličkové jednotky z důvodu přímého přenosu reakční síly od kuličkové jednotky přes žebro do vertikální desky. Žebra pokrývají celou délku spodní horizontální desky, aby nedocházelo k jejímu ohybu. Na vertikální desce jsou žebra umístěna tak, aby nevznikla kolize s brzdovým kotoučem a zároveň tak, aby žebra co nejvíce zasahovala do ohýbané oblasti desky, která se nachází u spodní části příruby středu kola. Pevnostní výpočet nosné konstrukce metodou konečných prvků je uveden dále v diplomové práci. Jedno z žeber je kvůli brzdovému třmenu vždy menší, aby vůle vůči brzdovému třmenu činila minimálně 20 mm. Všechna žebra jsou uvažována jako trvalá montáž a z toho důvodu jsou zvoleny samojistné matice DIN 985 snižující riziko samovolného povolení.



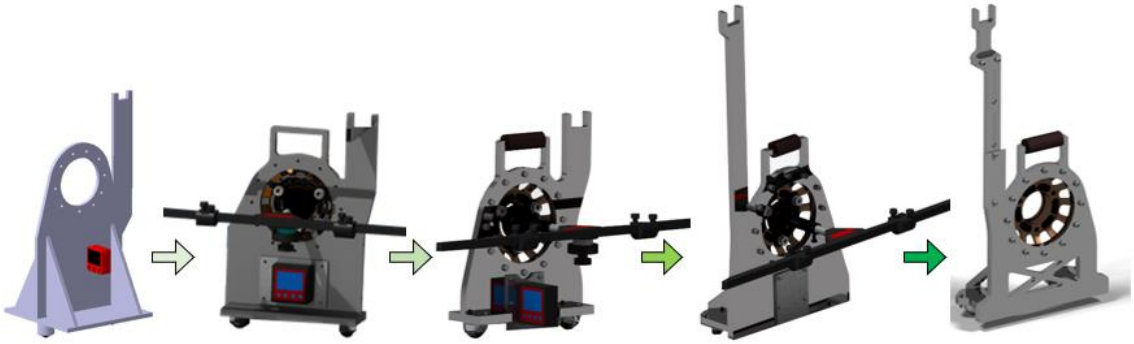
Obr. 41 Návrh velikosti žebra s ohledem na prostorové možnosti a oblast ohybu vertikální desky

Poslední podsestavu nosné konstrukce tvoří přípravky na měření sbíhavosti kol (Obr. 42), které již tým CTU CarTech pro měření sbíhavosti využívá. Tyto přípravky se montují na nosnou konstrukci až po jejím nasazení na nápravy, protože se uchycují za nábojové štefty.



Obr. 42 Popis již osvědčeného přípravku na měření sbíhavosti kol

Nosná konstrukce prošla čtyřmi zásadními konstrukčními úpravami od prvního návrhu do finální podoby. Vývoj je znázorněný na obrázku níže (Obr. 43).

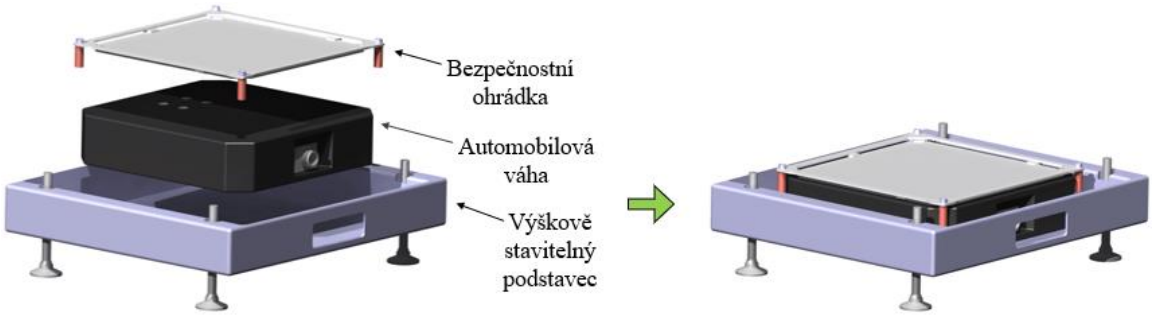


Obr. 43 Chronologický vývoj konstrukčního návrhu

5.3.2 Automobilové váhy

Druhou velkou konstrukční sestavu tvoří automobilové váhy a jejich podsestavy (Obr. 44). Úkolem automobilových vah je měření rozložení hmotnosti, zajištění vodorovného podkladu pro měřící přípravek a jištění volně pojízdného měřícího přípravku proti sjetí z automobilových vah.

Sestava automobilových vah se skládá z výškově stavitelných podstavců, automobilových vah a bezpečnostní ohrádky. Výškově stavitelné podstavce a automobilové váhy jsou týmem CTU CarTech již několik roků používány a vyznačují se vysokou přesností a spolehlivostí. Nově je tedy navržena pouze bezpečnostní ohrádka umístěná na automobilových váhách.



Obr. 44 Konstrukční návrh sestavy automobilové váhy

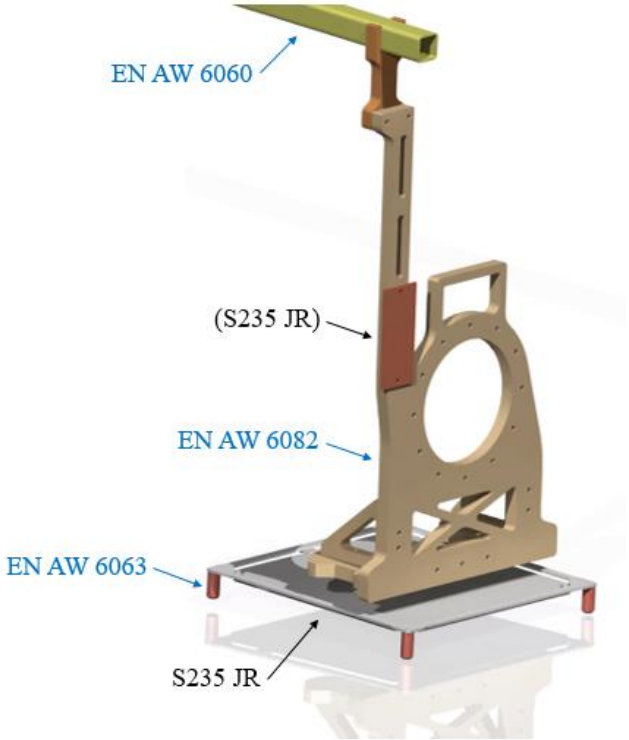
Navržená bezpečnostní ohrádka je tvořena ocelovým svařencem z plechů tloušťky 3 mm (Obr. 45). Vnitřní plech poskytuje hladkou rovinou plochu pro volný pojezd kuličkových jednotek a vnější 6 mm vysoká bariéra udržuje kuličkové jednotky uvnitř ohrádky. Výpočet potřebné výšky bezpečnostní ohrádky je uveden dále v diplomové práci.

Z důvodu častého používání je bezpečnostní ohrádka navržena tak, aby mohla být snadno nasazena na automobilové váhy bez použití nářadí. Zároveň musí pevně držet na automobilové váze a nesmí se horizontálně pohybovat ani kolem žádné osy rotovat, aby nedošlo k pádu měřícího přípravku. Pro tento účel jsou v rozích bezpečnostní ohrádky přišroubované hliníkové středící čepy (Obr. 45), které dosedají přesně na zkosené hrany automobilové váhy a definují tak přesnou polohu ohrádky na váze. Středící čep obsahuje slepou dírou se závitem velikosti M6 a hrubou roztečí 1 mm pro spolehlivé upevnění k ohrádce a zkosením 2 mm pod úhlem 45° pro snadné nasazení ohrádky na váhy.

Obr. 45 Konstrukční návrh svařované ohrádky vlevo a soustruženého středícího čepu vpravo

5.4 Materiály

Nejdůležitějšími faktory při volbě materiálů pro navrhované díly měřícího přípravku jsou pevnost, technologičnost, cena a hmotnost. Celkem jsou vybrány čtyři různé materiály pro navrhovanou část měřícího přípravku (Obr. 46).



Obr. 46 Zvolené materiály pro navrhovanou část měřícího přípravku

Pro svařenec nosné konstrukce je zvolen materiál hliník EN AW 6082 (ČSN 42 4400) ve stavu tepelného zpracování T651. V tomto stavu prošel hliník rozpouštěcím žíháním a umělým stárnutím, takže je uvolněno vnitřní pnutí materiálu. Je dobře svařitelný a jeho mechanické vlastnosti jsou podle provedených MKP výpočtů dostačující (smluvní mez kluzu v tahu $R_{p0,2}$ 240 MPa, pevnost v tahu R_m 300 MPa). Z pohledu náročnosti vrtání se hliník EN AW 6082 nachází ve skupině obrobitelnosti 12d. Skupina 12d zaručuje dobrou obrobitelnost. Tento materiál je na českém trhu ve formě rovinných desek snadno dostupný. [55] [56]

Pro držák profilu měření světlé výšky je zvolen rovněž materiál hliník EN AW 6082 ve stavu tepelného zpracování T651, protože je tento materiál objednán v relativně velkém množství (deska 0,8 m^2), což vystačí nejen na svařenec nosné konstrukce ale i na všechny čtyři držáky. Mechanické vlastnosti materiálu jsou dostatečné, protože pevnostní namáhání držáku je minimální.

Pro plech, který drží magneticky přichytitelný digitální inklinometr, je zvolen materiál konstrukční ocel S235 JR (ČSN 11 375), který disponuje minimální mezí kluzu v tahu pro tloušťku materiálu menší než 16 mm 235 MPa a mezí pevnosti v tahu pro tloušťku menší než 100 mm v rozmezí 360 – 510 MPa. Mechanické vlastnosti jsou

dostačující, protože tento díl není mechanicky namáhaný. Materiál je feromagnetický, tudíž je po vložení do magnetického pole digitálního inklinometru k inklinometru přitahován. Ocel S235 JR je zařazena do skupiny obrobitelnosti 14b a je dobře obrobitelná. Na českém trhu je materiál snadno dostupný za příznivou cenu. [57]

Pro čtvercový profil měření světlé výšky je zvolen materiál EN AW 6060 (ČSN 42 4401) ve stavu tepelného zpracování T66, protože je tento materiál ve formě čtvercového profilu snadno dostupný za příznivou cenu. Tepelné zpracování T66 značí stav po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí. Minimální mez kluzu v tahu R_e činí 160 MPa a mez pevnosti v tahu R_m 215 MPa. Profil není mechanicky namáhán a mechanické vlastnosti tohoto materiálu jsou dostačující. Obrobitelnost hliníku EN AW 6060 je dobrá. [55] [56]

Pro bezpečnostní ohrádku automobilové váhy je zvolen stejný materiál jako pro plech držící digitální inklinometr, tedy ocel S235 JR (ČSN 11 375). Z výpočtů MKP uvedených dále v diplomové práci vyplývá, že mechanické vlastnosti tohoto materiálu jsou dostačující.

Pro středící čepy bezpečnostní ohrádky je zvolen materiál EN AW 6063 (ČSN 42 4401) ve stavu tepelného zpracování T66, tedy po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí. Tento materiál je zvolen pro jeho snadnou dostupnost u dodavatelů hliníkových tyčí, dobrou obrobitelnost a výbornou eloxovatelnost. MKP výpočty uvedené dále v diplomové práci potvrzují, že jeho mechanické vlastnosti jsou dostačující. Minimální mez kluzu v tahu R_e činí 200 MPa a mez pevnosti v tahu R_m 245 MPa. [55] [56]

6 Výpočet měřícího přípravku

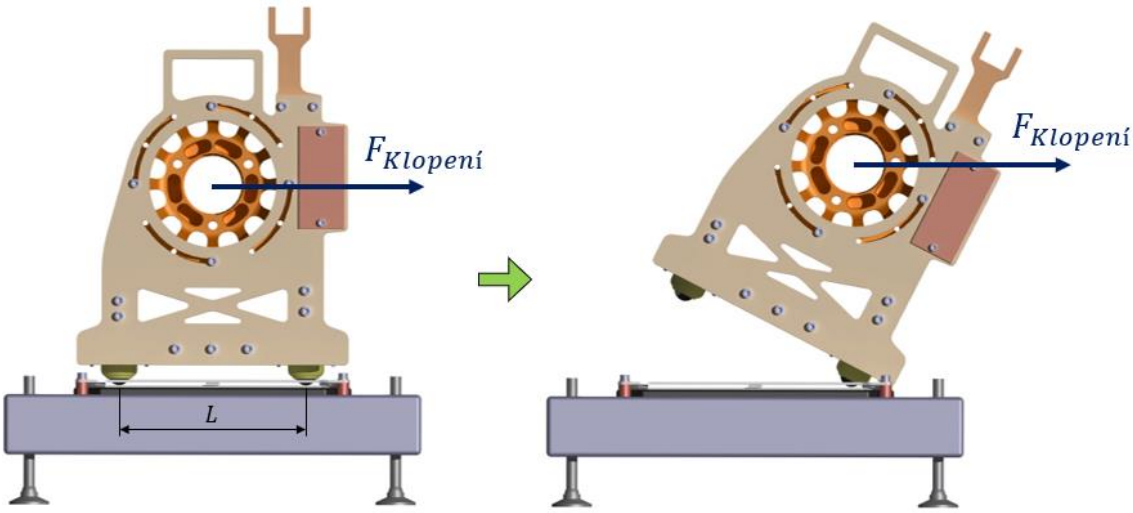
Pro ověření funkčnosti a bezpečného obsluhování měřícího přípravku jsou provedeny kontrolní výpočty jednotlivých podsestav. Výpočty zahrnují statické rozbory sil, pevnostní kontroly metodou MKP a výpočty bezpečnosti nejvíce namáhaného šroubového spoje. Pro odhad ceny měřícího přípravku je provedena kalkulace výrobních nákladů zahrnující náklady na polotovary, nakupované díly a na technologické operace prováděné u externích firem.

6.1 Analytické výpočty

Při návrhu konstrukce jsou u klíčových částí přípravku z hlediska bezpečnosti provozu provedeny níže uvedené analytické výpočty. Na základě těchto výpočtů se například minimalizuje riziko překlopení měřícího přípravku, sjetí přípravku z automobilových vah nebo povolení šroubového spoje mezi středem kola a nosnou konstrukcí.

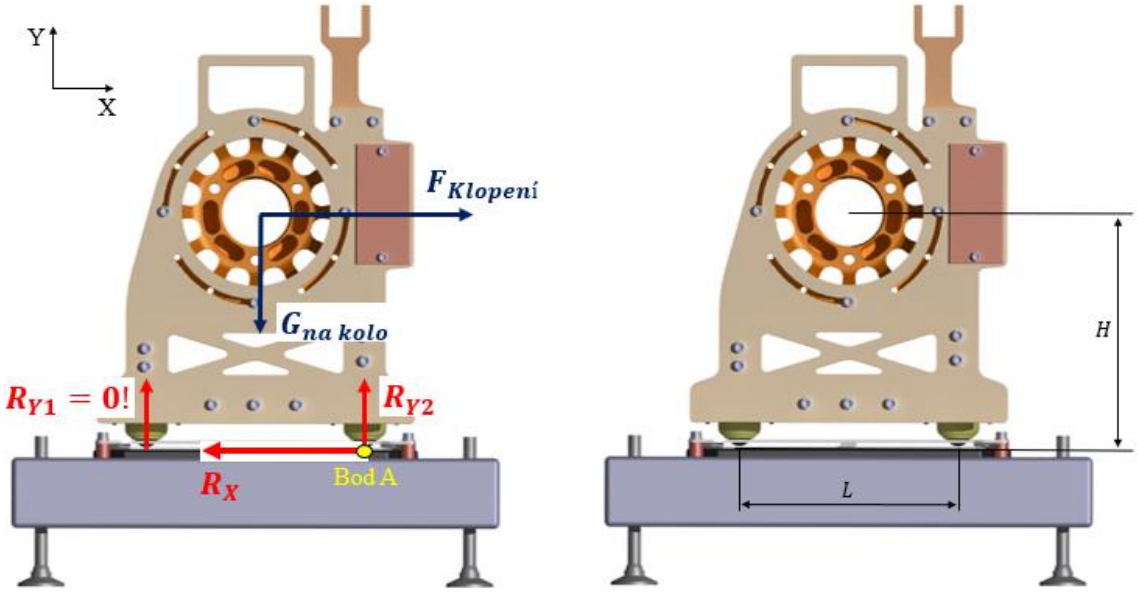
6.1.1 Výpočet překlopení přípravku

Vzdálenosti L mezi dvěma kuličkovými jednotkami ovlivňuje bezpečnost měřícího přípravku vůči překlopení (Obr. 47). Čím větší je rozchod, tím větší je síla potřebná k překlopení měřícího přípravku a tím menší je riziko překlopení. Velikost rozchodu L je ovšem limitovaná velikostí automobilových vah, resp. bezpečnostní ohrádky kolem automobilových vah, po které kuličkové jednotky pojíždí.



Obr. 47 Znázornění překlopení přípravku vlivem působení vnější síly $F_{Klopení}$

Vzorec pro výpočet síly $F_{Klopení}$ potřebné pro překlopení přípravku je odvozen z rovnic statické rovnováhy, které vychází z grafického rozboru sil na obrázku níže (Obr. 48).



Obr. 48 Vlevo grafický rozbor sil při působení klopící síly $F_{Klopení}$. Vpravo rozměry potřebné k výpočtu

Rovnice statické rovnováhy ve směru osy X a Y a momentová rovnice k bodu A jsou sepsány ve tvaru

$$\sum F_X:\ F_{Klopení} - R_X = 0 \tag{1}$$

$$\sum F_Y:\ R_{Y1} + R_{Y2} - G_{na\ kolo} = 0 \tag{2}$$

$$\sum M_A:\ G_{na\ kolo} \cdot \frac{L}{2} - F_{Klopení} \cdot H - R_{Y1} \cdot L = 0, \tag{3}$$

kde $F_{Klopení}$ je síla potřeba k překlopení přípravku, $G_{na\ kolo}$ je tíhová síla formule s řidičem uvnitř a namontovanými měřícími přípravky působící na jeden měřící přípravek, R_X je reakční síla působící ve směru osy X vyvolaná okrajem bezpečnostní ohrádky, R_{Y1} a R_{Y2} jsou reakční síly působící ve směru osy Y, L je rozchod kuličkových jednotek a H je výška osy středu kola od bezpečnostní ohrádky.

Z momentové rovnice (3) je vyjádřena síla potřebná k překlopení měřícího přípravku

$$F_{Klopení} = \frac{G_{na\ kolo} \cdot \frac{L}{2} - R_{Y1} \cdot L}{H}\ . \tag{4}$$

Matematickým předpokladem pro klopení přípravku je, že reakční síla R_{Y1} je rovna nule. Tím se rovnice (4) zjednoduší na tvar

$$F_{Klopení} = \frac{G_{na\ kolo} \cdot \frac{L}{2}}{H}\ . \tag{5}$$

Z rovnice (5) lze vyvodit, že bezpečný přípravek vůči překlopení je zatížen velkou tíhovou silou, disponuje velkým rozchodem kuličkových jednotek a střed kola je umístěn co nejníže. Všechny tyto veličiny jsou ovšem geometricky pevně dány a lze pouze vypočítat klopící sílu $F_{Klopení}$ pro hodnoty uvedené v tabulce níže (Tabulka 1).

Tabulka 1: Vstupní hodnoty pro výpočet překlopení přípravku

Popis	***Symbol***	***Hodnota***	***Jednotka***
Vertikální zatížení přípravku	$G_{na\ kolo}$	*711*	*N*
Rozchod kuličkových jednotek	*L*	*206*	*mm*
Výška středu kola od podložky	*H*	*217*	*mm*

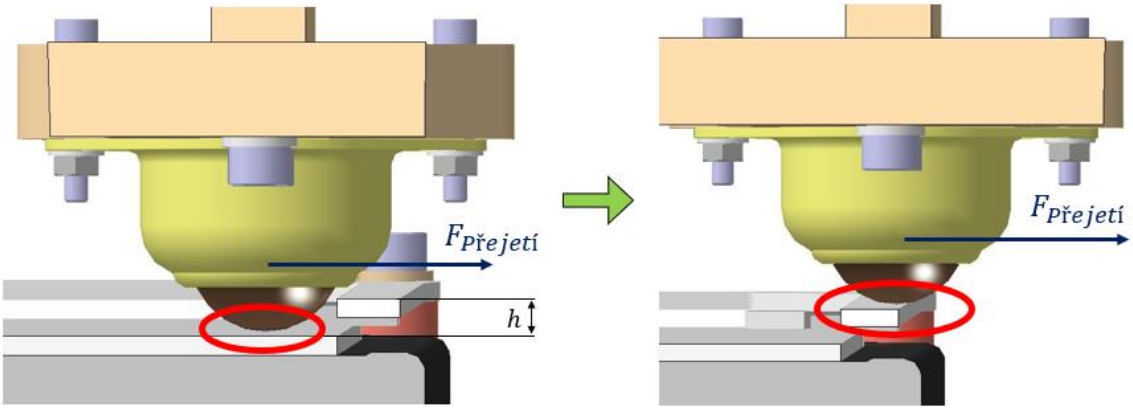
Pro zadané vstupní hodnoty je spočtena síla potřebná k překlopení měřícího přípravku

$$\boldsymbol{F_{Klopení}} = \frac{G_{na\ kolo} \cdot \frac{L}{2}}{H} = \frac{711 \cdot \frac{0{,}206}{2}}{0{,}217} = \mathbf{337\ N} \quad (N, m). \tag{6}$$

Z výpočtu (6) vyplývá, že při vyvinutí klopící síly $F_{Klopení}$ do velikosti 337 N, například vlivem nechtěného kontaktu formule s obsluhou měření, je přípravek bezpečný vůči překlopení. Při vyvinutí klopící síly větší než 337 N nastane překlopení přípravku. Vyvinout takto velkou sílu je pro člověka značně namáhavé a nechtěným postrčením formule některým členem týmu nedojde k překlopení měřícího přípravku.

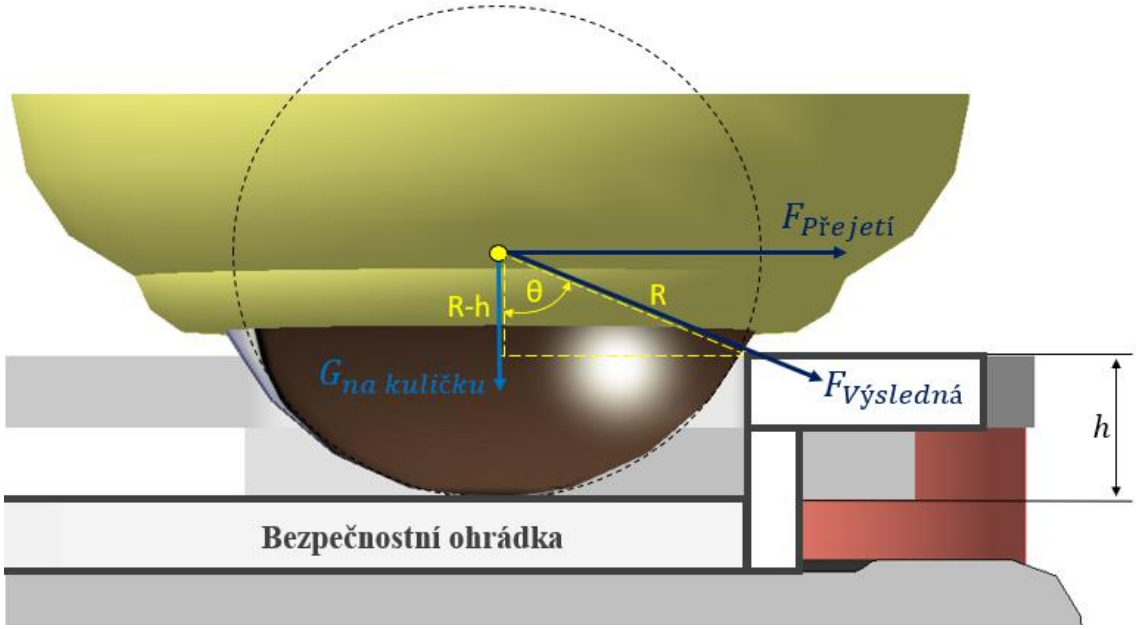
6.1.2 Výpočet přejetí přípravku přes bezpečnostní ohrádku

Výška bezpečnostní ohrádky *h* automobilových vah ovlivňuje riziko přejetí měřícího přípravku přes tuto ohrádku (Obr. 49). Čím vyšší je ohrádka, tím větší je síla potřebná k přejetí ohrádky a tím menší je riziko, že měřící přípravek nekontrolovatelně sjede z automobilových vah. Výška ohrádky *h* není ničím limitována, tudíž je odhadem zvolena a následně staticky zkontrolována podle výpočtu uvedeného níže.



Obr. 49 Znázornění přejetí přípravku přes bezpečnostní ohrádku vlivem působení vnější síly $F_{Přejetí}$

Vzorec pro výpočet síly $F_{Přejetí}$ potřebné k přejetí bezpečnostní ohrádky je odvozen z rozboru sil, který je znázorněn na obrázku níže (Obr. 50).



Obr. 50 Grafický rozbor sil při přejíždění bezpečnostní ohrádky

Z geometrie kuličky a bezpečnostní ohrádky lze vypočítat úhel θ, který svírá tíhová síla působící na jednu kuličkovou jednotku $G_{na\ kuličku}$ a výslednice sil $F_{Výsledná}$, pokud se tento systém nachází na mezi stability. Pokud je síla $F_{Přejetí}$ menší než na obrázku výše (Obr. 50), pak se úhel θ také zmenší. Výslednice sil $F_{Výsledná}$ v tomto případě směřuje pod roh bezpečnostní ohrádky a k přejetí ohrádky nedojde. V opačném případě se při větší síle $F_{Přejetí}$ zvětší i úhel θ, výslednice sil $F_{Výsledná}$ v tomto případě směřuje nad roh bezpečnostní ohrádky a dojde k přejetí ohrádky. Limitní úhel θ, při kterém je systém na mezi stability, je vyjádřen rovnicí

$$cos\,\theta = \frac{R-h}{R}\ , \tag{7}$$

kde R je poloměr kuličky a h je výška bezpečnostní ohrádky.

Z grafického rozboru sil (Obr. 50) je vyjádřena výslednice sil

$$F_{Výsledná} = \frac{G_{na\ kuličku}}{cos\,\theta}\ . \tag{8}$$

Složením sil z grafického rozboru výše (Obr. 50) je získána rovnice

$$\left(F_{Výsledná}\right)^2 = (G_{na\ kuličku})^2 + \left(F_{Přejetí}\right)^2\ . \tag{9}$$

Z rovnice (9) je odmocněním vyjádřena síla

$$F_{Přejetí} = \sqrt{\left(F_{Výsledná}\right)^2 - (G_{na\ kuličku})^2}\ . \tag{10}$$

Dosazením rovnic (7) a (8) do rovnice (10) vznikne tvar

$$F_{Přejetí} = \sqrt{\left(\frac{(G_{na\ kuličku})}{\frac{R-h}{R}}\right)^2 - (G_{na\ kuličku})^2}\ . \tag{11}$$

Z rovnice (11) je patrné, že síla potřebná pro přejetí bezpečnostní ohrádky je závislá na třech vstupních parametrech. Zatížení kuličkové jednotky $G_{na\ kuličku}$ a poloměr kuličky R jsou pevně dány a nelze je měnit. Výška ohrádky h je libovolně volitelná a je navržena tak, aby kuličková jednotka nemohla při neopatrném působení lidské síly přejet bezpečnostní ohrádku. V tabulce uvedené níže (Tabulka 2) jsou vypsána vstupní data do výpočtu.

Tabulka 2: Vstupní hodnoty pro výpočet přejetí bezpečnostní ohrádky

Popis	***Symbol***	***Hodnota***	***Jednotka***
Vertikální zatížení jedné kuličk. jednotky	$G_{na\ kuličku}$	*356*	*N*
Poloměr koule kuličkové jednotky	*R*	*12,5*	*mm*
Výška bezpečnostní ohrádky	*h*	*5*	*mm*

Dosazením vstupních hodnot do rovnice (11) je spočtena síla potřebná k přejetí bezpečnostní ohrádky

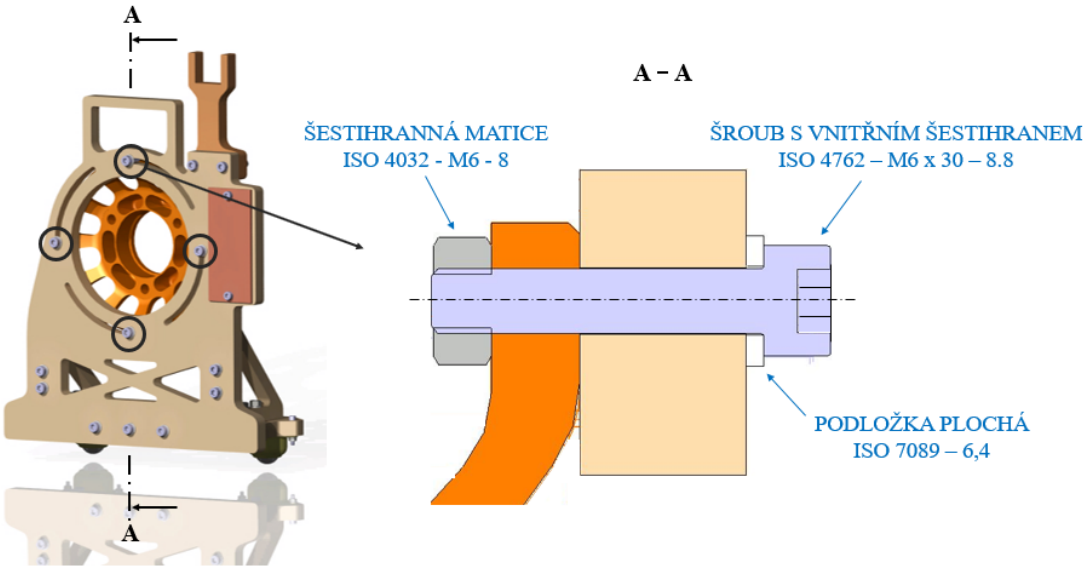
$$\boldsymbol{F_{Přejetí}} = \sqrt{\left(\frac{356}{\frac{0{,}0125-0{,}005}{0{,}0125}}\right)^2 - 356^2} = \mathbf{475\ N} \quad (N, m). \tag{12}$$

Z výše uvedeného výpočtu vyplývá, že síla potřebná k přejetí bezpečnostní ohrádky $F_{Přejetí}$ musí činit minimálně 475 N. Vyvinout takto velkou sílu je pro člověka značně namáhavé a vlivem nechtěného kontaktu formule s obsluhou měření nedojde k přejetí bezpečnostní ohrádky.

6.1.3 Výpočet šroubového spoje

Šroubový spoj na měřícím přípravku zadní nápravy mezi středem kola a vertikální deskou nosné konstrukce (Obr. 51) je jediný šroubový spoj na celé sestavě, jehož namáhání je nezanedbatelně velké a je vhodné spočítat potřebný utahovací moment zvolených šroubů a pevnostně je zkontrolovat. Zadní náprava formule je osazena samosvorným diferenciálem, kvůli kterému nelze zadní kola volně vůči sobě protáčet a z toho důvodu jsou navrženy čtvrtkruhové drážky umožňující protočení přípravku prostřednictvím povolení všech čtyř šroubů. Tento šroubový spoj přenáší tíhovou sílu formule s jezdcem na nosnou konstrukci a jeho porušením nastane pád formule z výšky přibližně 20 – 30 cm v závislosti na výškovém nastavení automobilových vah. Z tohoto důvodu je, s dostatečně velkým koeficientem bezpečnosti k, šroubový spoj analyticky zkontrolován.

Kontrolovaný šroubový spoj (Obr. 51) se skládá ze čtyř šroubů s vnitřním šestihranem ISO 4762 – M6x30 – 8.8, čtyř šestihranných matic ISO 4032 – M6 – 8 a čtyř plochých podložek ISO 7089 – 6,4. Šroubový spoj jako celek se tedy skládá ze čtyř dílčích šroubových spojů, které jsou zakroužkovány na obrázku níže.



Obr. 51 Vlevo zakroužkován kontrolovaný šroubový spoj. Vpravo popis jeho jednotlivých částí

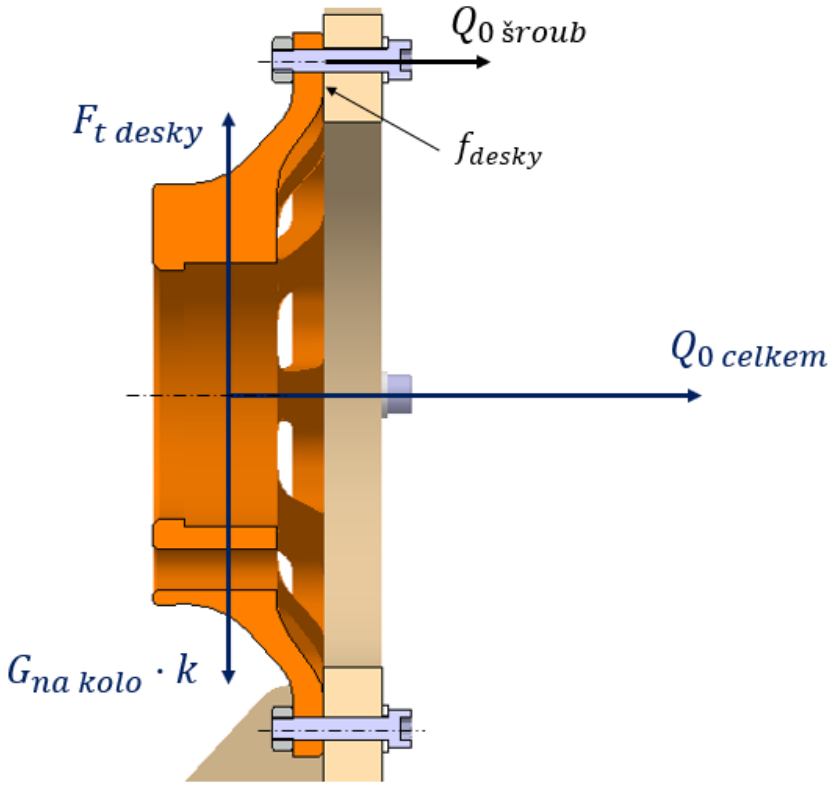
Konkrétní rozměrová a materiálová data o navrženém šroubovém spoji jsou uvedena v tabulce níže (Tabulka 3) a slouží jako vstupní parametry do kontrolního výpočtu šroubového spoje.

Tabulka 3: Vstupní parametry do výpočtu šroubového spoje

Popis	***Zkratka***	***Hodnota***	***Jednotka***
Spojované součásti			
Zatížení šroubového spoje	$G_{na\ kolo}$	*711*	*N*
Koeficient bezpečnosti pro zatížení	k	*2,5*	
Koeficient tření mezi eloxovaným středem kola z AL a komaxitovanou deskou z AL	f_{desky}	*0,15*	
Počet šroubů	$n_{šrouby}$	*4*	
Šroub M6			
Velký průměr šroubu	$d_{š}$	*6*	*mm*
Střední průměr šroubu	$d_{2š}$	*5,35*	*mm*
Malý průměr šroubu	$d_{3š}$	*4,773*	*mm*
Mez kluzu šroubu a matice	R_e	*640*	*MPa*
Mez pevnosti šroubu a matice	R_m	*800*	*MPa*
Tabulkový utahovací moment šroubu M6	$M_{utahovací\ tabulkový}$	*9,7*	*Nm [61]*
Rozteč závitu	P	*1*	*mm*
Vrcholový úhel závitu	α	*60*	°
Průměr hlavy šroubu	$d_{kš}$	*13*	*mm*
Koeficient tření pod hlavou šroubu	f_{hlava}	*0,2*	*[59]*
Koeficient tření v závitu (šroub - matice)	$f_{závit}$	*0,15*	*[59]*
Minimální koeficient bezpečnosti šroubu	$k_{šroub\ min}$	*2*	
Podložka 6,4			
Malý průměr podložky	d_{1p}	*6,4*	*mm*
Velký průměr podložky	d_{2p}	*12*	*mm*

Výpočet potřebného předpětí $Q_{0\ šroub}$

K určení velikosti utahovacího momentu šroubu M6 je vypočteno potřebné předpětí tohoto šroubu $Q_{0\ šroub}$, které zajišťuje přitlačení středu kola k vertikální desce (Obr. 52). Vlivem silového přitlačení a nenulového koeficientu tření f_{desky} mezi eloxovaným středem kola a komaxitovanou vertikální deskou vzniká mezi oběma díly třecí síla $F_{t\ desky}$, která musí být minimálně stejně velká jako zatěžující síla $G_{na\ kolo}$ zvětšená koeficientem bezpečnosti k, který zohledňuje možné dynamické účinky síly $G_{na\ kolo}$ například vlivem neopatrného položení formule na automobilové váhy. Grafický rozbor sil je znázorněn na obrázku níže.



Obr. 52 Grafický rozbor sil pro výpočet potřebného předpětí šroubu $Q_{0\ šroub}$

Velikost potřebné třecí síly $F_{t\ desky}$ je vypočtena z rovnováhy sil dle vztahu

$$F_{t\ desky} = G_{na\ kolo} \cdot k = 711 \cdot 2{,}5 = 1\,777{,}5\ N \quad (N). \tag{13}$$

Třecí síla je obecně rovna násobku normálové síly a koeficientu tření, tedy v tomto případě

$$F_{t\ desky} = Q_0\ celkem \cdot f_{desky}\ , \tag{14}$$

lze ze vztahu (14) vyjádřit celkové předpětí od všech čtyř šroubů

$$Q_{0\ celkem} = \frac{F_{t\ desky}}{f_{desky}} = \frac{1\,777{,}5}{0{,}15} = 11\,850\ N \quad (N). \tag{15}$$

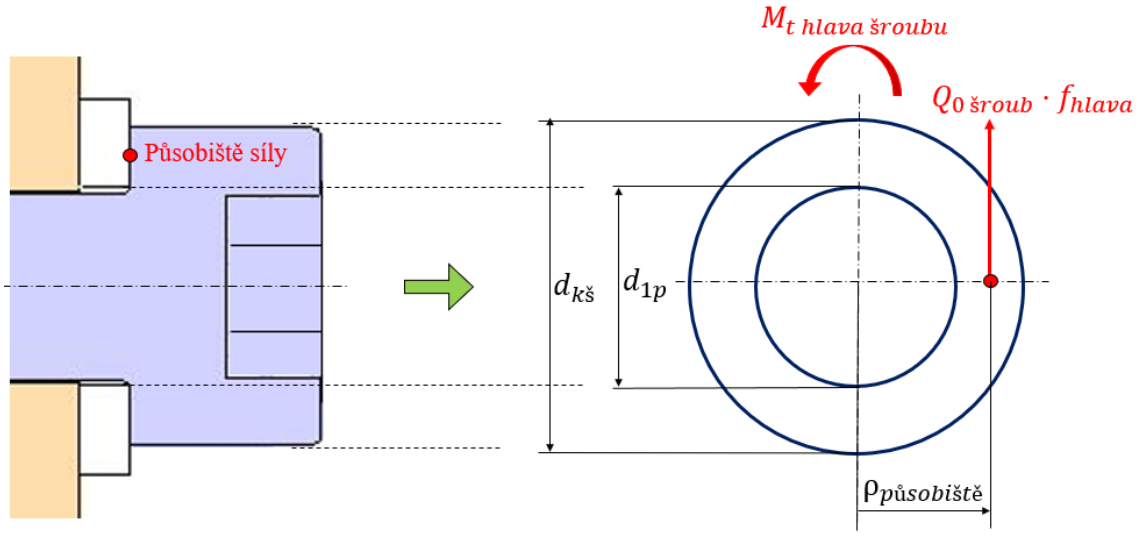
Protože je předpětí vypočtené v rovnici (15) rozložené mezi všechny čtyři šrouby, je velikost požadovaného předpětí vytvořeného od jednoho šroubu

$$\boldsymbol{Q_{0\,šroub}} = \frac{Q_{0\,celkem}}{n_{šrouby}} = \frac{11\,850}{4} = \mathbf{2\,962{,}5\,N} \quad (N). \tag{16}$$

Výpočet potřebného utahovacího momentu $M_{utahovací}$

Aby nedošlo k nebezpečnému smykovému namáhání šroubu M6 a obě součásti přenášeli sílu $G_{na\ kolo}$ prostřednictvím tření jejich dosedacích ploch, je vypočten potřebný utahovací moment tohoto šroubu $M_{utahovací}$. Utahovací moment je složen ze dvou dílčích momentů, jmenovitě z třecího momentu pod hlavou šroubu $M_{t\ hlava\ šroubu}$ a z třecího momentu v závitech $M_{t\ závit}$.

Třecí moment pod hlavou šroubu (Obr. 53) vzniká třením mezi rotující hlavou šroubu a nehybnou dosedací plochou podložky při utahování nebo povolování šroubu. Na obrázku níže je znázorněn grafický rozbor sil, ze kterého je patrné, že třecí moment $M_{t\ hlava\ šroubu}$ vzniká působením třecí síly na fiktivním rameni $\rho_{působiště}$, přičemž zmíněná třecí síla vzniká od předpětí šroubu $Q_{0\ šroub}$ a koeficientu tření pod hlavou šroubu f_{hlava}.



Obr. 53 Grafické znázornění výpočtu třecího momentu pod hlavou šroubu pomocí působiště třecí síly

Pro výpočet třecího momentu pod hlavou šroubu $M_{t\ hlava\ šroubu}$ je spočteno rameno $\rho_{působiště}$, na kterém působí třecí síla, podle vztahu

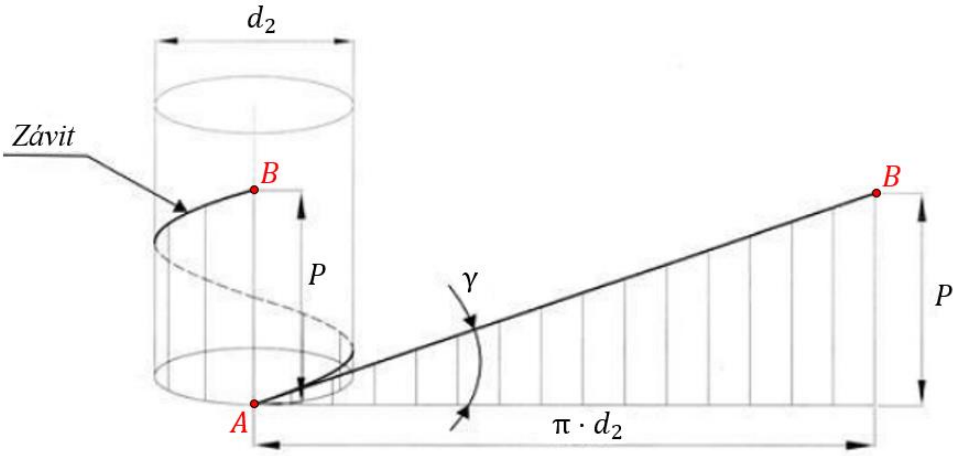
$$\rho_{působiště} = \frac{d_{1p}}{2} + \left(\frac{\frac{d_{kš}}{2} - \frac{d_{1p}}{2}}{2}\right) = \frac{6{,}4}{2} + \left(\frac{\frac{13}{2} - \frac{6{,}4}{2}}{2}\right) = 4{,}9\ mm \quad (mm). \tag{17}$$

Třecí moment pod hlavou šroubu je roven [60]

$$M_{t\ hlava\ šroubu} = Q_{0\ šroub} \cdot f_{hlava} \cdot \rho_{působiště}\ , \tag{18}$$

$$\boldsymbol{M_{t\ hlava\ šroubu}} = 2962{,}5 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}0049 = \mathbf{2{,}9\ Nm} \quad (N, m). \tag{19}$$

Třecí moment v závitech (Obr. 55) vzniká třením mezi rotujícím závitem šroubu a stojícím závitem matice při utahování nebo povolování šroubu, přičemž tento třecí moment $M_{t\ závit}$ také zahrnuje fiktivní rovnoměrné zvedání břemena o tíze rovné předpětí šroubu $Q_{0\ šroub}$ po myšlené nakloněné rovině rozvinutého závitu o středním průměru šroubu $d_{2š}$ pod úhlem γ, resp. úhlem stoupání závitu γ (Obr. 54). [60]



Obr. 54 Rozvin závitu o středním průměru šroubu d_2 mezi stejnolehlými body AB

Z výše uvedeného obrázku (Obr. 54) je odvozen vztah pro výpočet úhlu stoupání závitu [60]

$$\gamma = arctg\left(\frac{P}{\pi \cdot d_{2š}}\right) = arctg\left(\frac{1}{3{,}14 \cdot 5{,}35}\right) = 3{,}4° \quad (mm). \tag{20}$$

Dalším pomocným výpočtem je výpočet redukovaného třecího úhlu φ', který zohledňuje vliv vrcholového úhlu α na tření v závitu. Pokud by byl použit čtvercový (plochý) závit užívaný například pro pohybové šrouby, třecí úhel by byl roven [60]

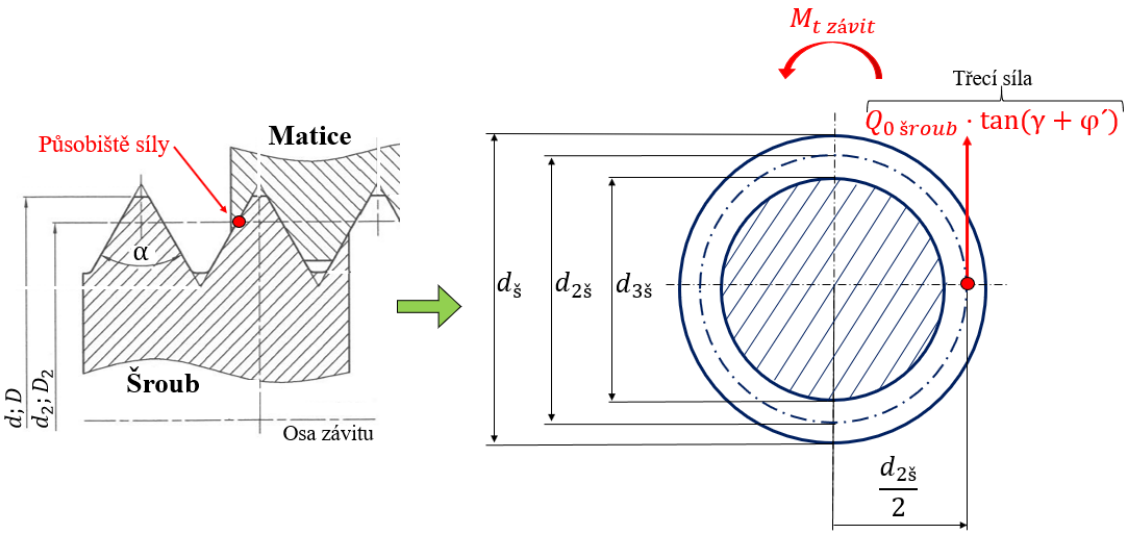
$$\varphi = arctg(f_{závit}) = arctg(0{,}15) = 8{,}5°\ . \tag{21}$$

Pro metrický závit je ovšem charakteristický vrcholový úhel α (Obr. 55) o velikosti 60°, proto je použit vztah pro tzv. redukovaný třecí úhel φ', který ve výpočtu vliv vrcholového úhlu α zohledňuje. Redukovaný třecí úhel je spočten dle vztahu [60]

$$\varphi' = arctg\left(\frac{f_{závit}}{cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right) = arctg\left(\frac{0{,}15}{cos\left(\frac{60}{2}\right)}\right) = 9{,}8° \quad (°). \tag{22}$$

Třecí moment v závitech $M_{t\ závit}$ bere v úvahu jak tření mezi závity šroubu a matice, tak pomyslné zvedání břemena o tíze $Q_{0\ šroub}$ po nakloněné rovině pod úhlem

stoupání γ. Oba dva odpory jsou na obrázku níže (Obr. 55) vyjádřeny třecí silou, jejíž působiště je na středním poloměru závitu šroubu a matice.



Obr. 55 Grafické znázornění výpočtu třecího momentu v závitech pomocí působiště třecí síly

Třecí moment v závitech šroubu a matice je roven [60]

$$M_{t\ závit} = Q_{0\ šroub} \cdot tg(\gamma + \varphi') \cdot \frac{d_{2š}}{2}\ , \tag{23}$$

$$\boldsymbol{M_{t\ závit}} = 2\,962{,}5 \cdot tg(3{,}4 + 9{,}8) \cdot \frac{0{,}00535}{2} = \mathbf{1{,}9\ Nm} \quad (N, °, m). \tag{24}$$

Celkový utahovací moment je spočten jako součet třecího momentu pod hlavou šroubu a třecího momentu v závitech šroubu a matice dle vztahu [60]

$$M_{utahovací} = M_{t\ hlava\ šroubu} + M_{t\ závit}\ , \tag{25}$$

$$\boldsymbol{M_{utahovací}} = 2{,}9 + 1{,}9 = \mathbf{4{,}8\ Nm} \quad (Nm). \tag{26}$$

Z výpočtu (11) vyplývá, že všechny čtyři šrouby M6 na měřícím přípravku je nutné utáhnout utahovacím momentem o velikosti 4,8 Nm. Tabulkový utahovací moment šroubu M6 například od firmy BRIOL s.r.o. činí 9,7 Nm. Lze tedy již před provedením pevnostní kontroly uvedené níže předpokládat, že je navržený šroubový spoj z pevnostního hlediska bezpečný. [61]

Pevnostní kontrola šroubového spoje

Šroub s vnitřním šestihranem ISO 4762 – M6x30 – 8.8 je pevnostně zkontrolován na namáhání tahem, krutem a na otlačení závitů. Z výše uvedených výpočtů vyplývá, že šroub je namáhán osovou silou $Q_{0\ šroub}$ o velikosti 2 962,5 N a kroutícím momentem $M_{t\ závit}$ o velikosti 1,9 Nm. Třecí moment pod hlavou šroubu $M_{t\ hlava\ šroubu}$ do výpočtu nevstupuje.

Tahové napětí je rovno [60]

$$\sigma_{tah} = \frac{Q_{0\,šroub}}{S_{3š}} = \frac{Q_{0\,šroub}}{\frac{\pi \cdot d_{3š}^2}{4}} = \frac{2\,962{,}5}{\frac{3{,}14\ \cdot 4{,}773^2}{4}} = 166\ MPa \quad (N, mm). \tag{27}$$

Smykové napětí je po převedení na jednotky MPa rovno [60]

$$\tau_{krut} = \frac{M_{t\,závit}}{W_{k3š}} = \frac{M_{t\,závit}}{\frac{\pi \cdot d_{3š}^3}{16}} = \frac{1{,}9}{\frac{3{,}14\ \cdot 0{,}004773^3}{16}} = 89\ MPa \quad (N, m). \tag{28}$$

Redukované napětí podle energetické HMH hypotézy činí [58]

$$\sigma_{red} = \sqrt{{\sigma_{tah}}^2 + 3 \cdot {\tau_{krut}}^2} = \sqrt{166^2 + 3 \cdot 89^2} = 227\ MPa \quad (MPa). \tag{29}$$

Z redukovaného napětí σ_{red} je spočtena bezpečnost vůči mezi kluzu šroubu [60]

$$\boldsymbol{k_{šroub}} = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{640}{227} = \mathbf{2{,}8} \ > \ k_{šroub\,min} = 2 \quad (MPa). \tag{30}$$

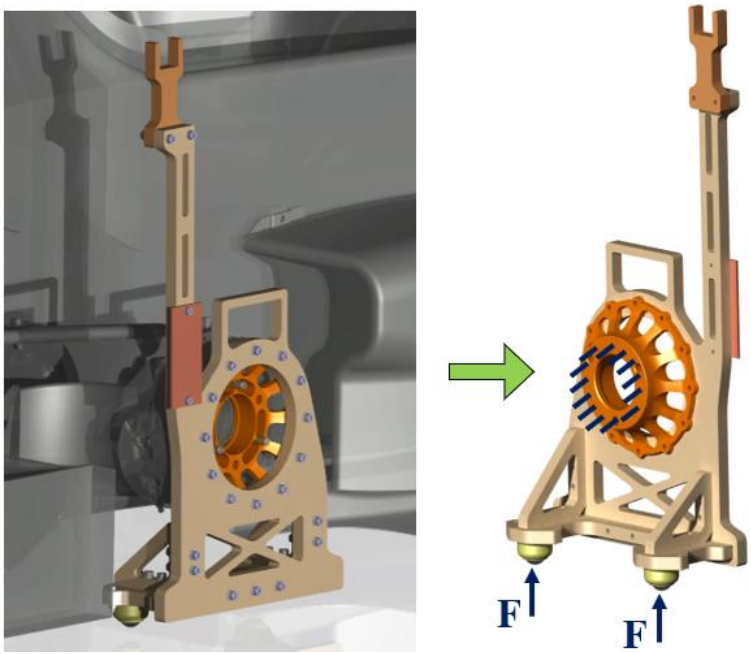
Bezpečnost 2,8 je větší než minimální doporučená bezpečnost pro šrouby $k_{šroub\,min}$, která je rovna číslu 2. Z analytického výpočtu šroubového spoje vyplývá, že všechny čtyři šrouby s vnitřním šestihranem ISO 4762 – M6x30 – 8.8 musí být utáhnuty na moment 4,8 Nm, aby nedošlo k nebezpečnému namáhání šroubů na střih a aby byla zátěžná síla zachycena prostřednictvím třecí síly na kontaktních plochách obou součástí. Zároveň je provedena pevnostní kontrola navrženého šroubového spoje, která potvrzuje jeho bezpečnost.

6.2 MKP analýzy

Pro zajištění bezpečí všech členů obsluhy a požadované přesnosti měření geometrie kol jsou pro dvě nejvíce namáhané konstrukční sestavy provedeny pevnostní analýzy metodou konečných prvků v programu ANSYS, protože analytický výpočet těchto geometricky složitých sestav by byl značně komplikovaný.

6.2.1 MKP analýza nosné konstrukce

Nosná konstrukce přenáší zatížení od tíhové síly formule s jezdcem na automobilové váhy a je nejvíce zatěžovanou částí měřícího přípravku. Zároveň na nosné konstrukci probíhá vlastní měření jednotlivých parametrů nápravy, takže je požadována její vysoká tuhost. Cílem pevnostní analýzy je zkontrolovat velikost napětí v nosné konstrukci při zatížení tíhovou silou formule s řidičem uvnitř a z posuvů stanovit vliv deformace na přesnost měření (Obr. 56).



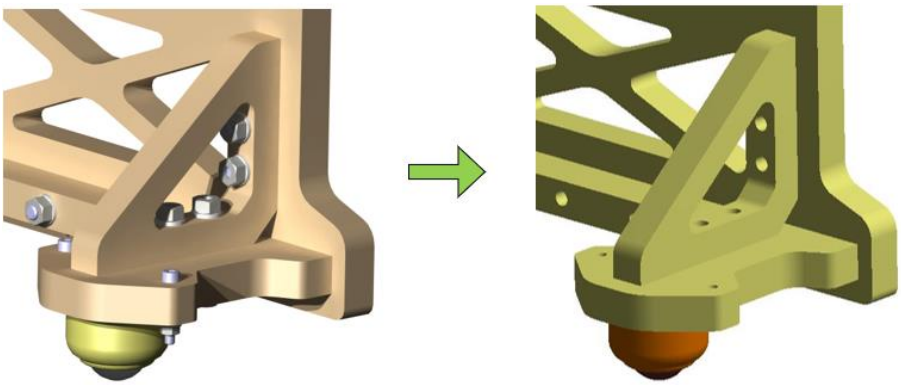
Obr. 56 Vlevo CAD model nosné konstrukce podpírající formuli.
Vpravo schématické znázornění zatížení a uchycení nosné konstrukce v MKP výpočtu

Protože jsou všechny měřící přípravky jednotlivých kol konstrukčně velmi podobné, je provedena pouze jedna MKP simulace, která pevnostně zanalyzuje měřící přípravek pro levé přední kolo, protože tento přípravek obsahuje dlouhé rameno pro měření světlé výšky, na kterém se případné deformace projeví více než na krátkém rameni u přípravku zadních kol.

Příprava CAD modelu pro MKP výpočet

Před samotným pevnostním výpočtem je nejprve upraven CAD model (Obr. 57) nosné konstrukce, protože obsahuje velké množství šroubových spojů, které nemají v tomto případě na výsledky žádný vliv a jejich odstraněním se podstatně zjednoduší nastavení výpočtu a mnohonásobně zkrátí výpočetní čas. Šroubové spoje se obvykle modelují prostřednictvím nelineárních kontaktů *Frictional* a fyzickým odstraněním šroubových spojů lze použít jednodušší lineární kontakty *Bonded*. Při použití časově úsporných lineárních kontaktů se docílí totožných výsledků napětí a deformace na nosné konstrukci jako při použití časově náročnějších nelineárních kontaktů, proto je zjednodušení přípustné. Jediným omezením je vyčítání napětí a deformací v blízkém okolí šroubového spoje, protože výsledky v této oblasti ani řádově neodpovídají skutečnosti. [62]

Dále je zanedbán vliv svarových spojů jako koncentrátorů napětí, které by se měly počítat pomocí tzv. effective notch stress method, u které se v kořeni svaru vymodeluje dutina o poloměru přibližně 1 mm, z paty či kořene svaru se odečtou hlavní napětí při různých typech namáhání, určí se jejich rozkmit napětí, který se přenese na únavovou křivku daného materiálu a zjistí se počet cyklů do lomu svaru. Zjednodušením svarového spoje lineárním kontaktem *Bonded* se výrazně zjednoduší nastavení výpočtu a mnohonásobně zkrátí výpočetní čas s tím, že v okolí svarového spoje nelze vyčítat napětí ani deformace. Přerušované svarové spoje se ve skutečnosti nachází všude mezi vertikální deskou, horizontální deskou a žebry. [63]



Obr. 57 Vlevo CAD model v CATIA V5 zjednodušený pro MKP výpočet v ANSYSu vpravo

Okrajové podmínky, zatížení, kontakty a parametry sítě

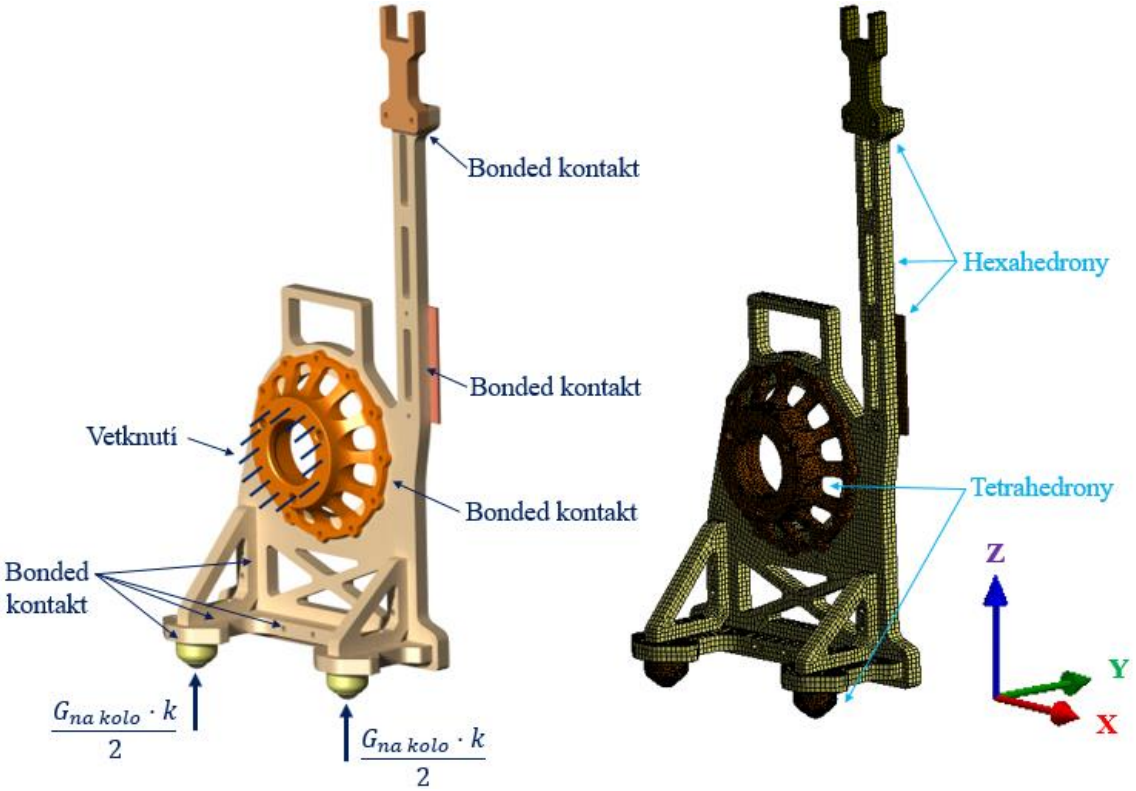
Nosná konstrukce je v MKP analýze (Obr. 58) uchycena přes dosedací plochu středu kola k fiktivnímu dokonale tuhému rámu pomocí podpory *Fixed Support*. Tato podpora reprezentuje reálné uchycení středu kola k náboji kola, které je zajištěno prostřednictvím tří nábojových šteftů. Deformace kolové skupiny a zavěšení kola není zohledněna, protože v této MKP simulaci je cílem zjistit tuhost pouze měřícího přípravku.

Zátěžná síla (Obr. 58) je uvažována stejná jako v případě analytického výpočtu šroubového spoje měřícího přípravku zadních kol. Velikost zátěžné síly působící na jednu

kuličkovou jednotku je rovna tíhové síle formule s jezdcem působící na jedno kolo formule $G_{na\ kolo}$ přenásobená koeficientem bezpečnosti k o velikosti 2,5 a to celé vydělené dvěma, protože se síla rozloží na dvě kuličkové jednotky. Po dosazení je výsledná síla působící na jednu kuličkovou jednotku rovna 889 N. Koeficient bezpečnosti k pokrývá riziko možných dynamických sil při neopatrném pokládání formule na automobilové váhy. U tohoto konkrétního zatížení je provedena pouze pevnostní kontrola mechanického napětí, tedy zda v nějakém místě konstrukce nepřesáhne redukované napětí mez kluzu daného materiálu. Deformační (tuhostní) kontrola pro zjištění vlivu deformace přípravku na přesnost měření se provede s reálným statickým namáháním bez přenásobení koeficientem bezpečnosti k, protože se předpokládá, že formule je během měření parametrů geometrie kol v klidu.

Jednotlivé dílčí součásti, které jsou na reálném měřícím přípravku přišroubovány či přivařeny, jsou spojeny pomocí lineárních *Bonded* kontaktů (Obr. 58). *Bonded* kontakty se v simulaci chovají tak, jako by byly spojované součásti na vybrané ploše k sobě s nekonečnou tuhostí připevněny či přilepeny. Nastavení kontaktů je ponecháno defaultní, tedy vše *Program Controlled*, vyjma nastavení *Pinball Radius*, který je nastaven pro všechny kontakty na 1 mm.

Velikost sítě (Obr. 58) je nastavena od 3 do 5 mm podle velikosti a tvarové složitosti dané součásti. Pro všechny hliníkové desky je vybrán jako typ elementu sítě hexahedron (šestistěn), pro tvarově složitější střed kola a kuličkové jednotky je vybrán tetrahedron (čtyřstěn).



Obr. 58 Vlevo znázornění okrajových podmínek, kontaktů a zatížení. Vpravo síť a zvolený typ elementů

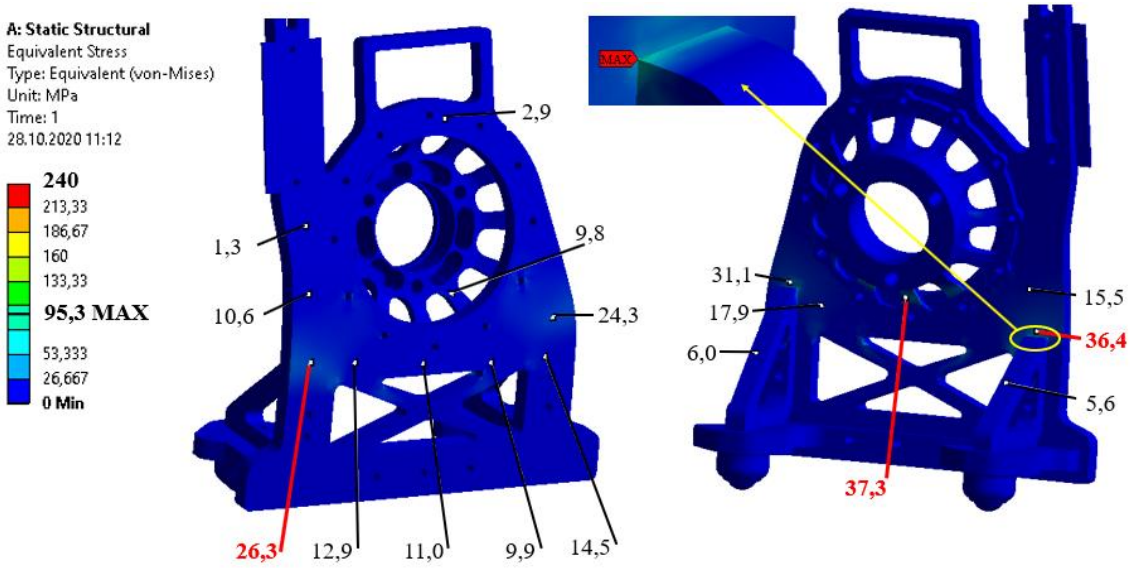
Souřadný systém měřícího přípravku v MKP simulaci je nastaven tak, aby odpovídal zavedenému souřadnému systému vozidla podle ISO 88551.3 / DIN 70000.

Výsledky napěťové kontroly

Na obrázcích níže (Obr. 59 a Obr. 60) jsou zobrazeny výsledky pevnostní analýzy pro dvě různé napěťové legendy, které se liší velikostí horní meze napětí zastoupené červenou barvou. Všechny výsledky jsou zobrazeny pro redukované napětí (napětí von Mises), které zohledňuje všechny typy namáhání.

Na následujícím obrázku (Obr. 59) odpovídá červená barva napětí 240 MPa, což je mez kluzu Re materiálu hliník EN AW 6082 (ČSN 42 4400) ve stavu tepelného zpracování T651. Z rozložení napětí po nosné konstrukci je patrné, že převládá sytě modrá barva, která reprezentuje napěťovou hladinu v rozmezí od 0 do 26,7 MPa. Většina nosné konstrukce při namáhání vykazuje relativně malá napětí v porovnání s mezí kluzu daného materiálu. Nejvyšší napětí z MKP simulace, které činí 95,3 MPa, se nachází v rohu mezi žebrem a vertikální deskou. Toto napětí lze zanedbat, protože MKP simulace zpravidla v posledních elementech v oblasti vetknutí či kontaktu dvou součástí produkuje nereálně vysoká napětí, která jsou mnohonásobně vyšší než napětí v nejbližších okolních elementech.

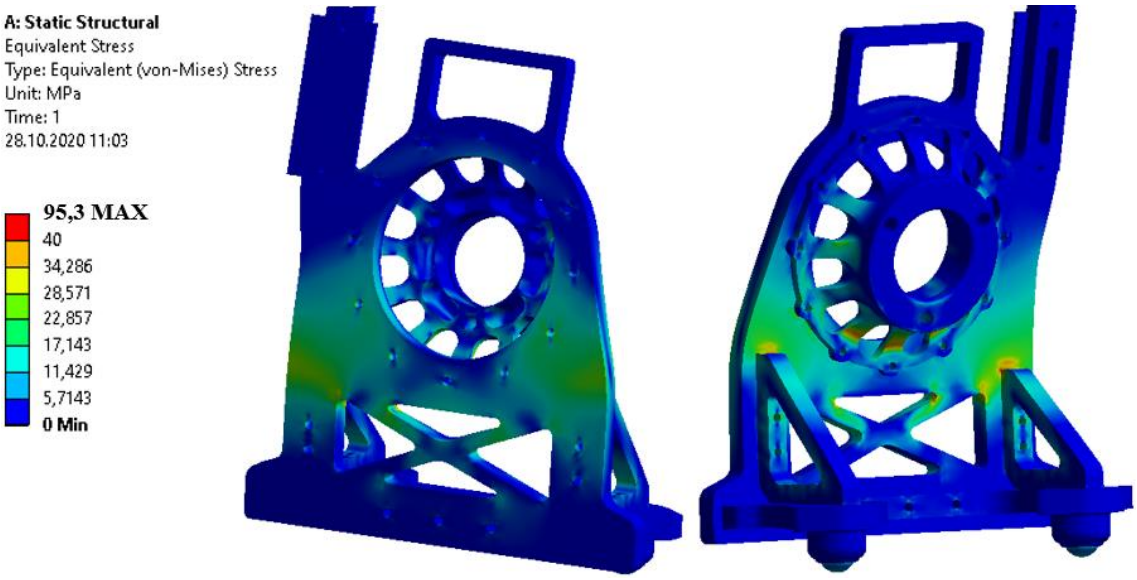
Nejvyšší napětí na nosné konstrukci, která jsou považována za relevantní a za odpovídající skutečnosti, jsou napětí v oblasti nad oběma žebry a v oblasti spodních paprsků středu kola, která činí přibližně 40 MPa. Tato napětí lze považovat za velmi nízká, protože bezpečnost vůči mezi kluzu činí přesně 6.



Obr. 59 MKP analýza nosné konstrukce [hodnoty v MPa] s horní hranicí napěťové legendy rovné mezi kluzu hliníku EN AW 6082 (240 MPa)

Na dalším obrázku (Obr. 60) je napěťová legenda nastavena tak, že červená barva odpovídá největšímu napětí v nosné konstrukci. Díky tomu jsou jasněji odlišeny

jednotlivé oblasti přípravku s odlišnými napěťovými hladinami a lze snáze vyhledat místa s vyššími a nižšími hodnotami mechanického napětí. Z obrázku níže lze usoudit, že nejvíce namáhaná část nosné konstrukce je v oblasti mezi horním rohem žeber a spodní částí středu kola, protože zde dochází ke zmenšení průřezu a průřezového modulu v ohybu vlivem ukončení žeber a ztenčení středu kola. Žlutozelené až žluté zabarvení součásti odpovídá mechanickému napětí kolem 30 MPa.

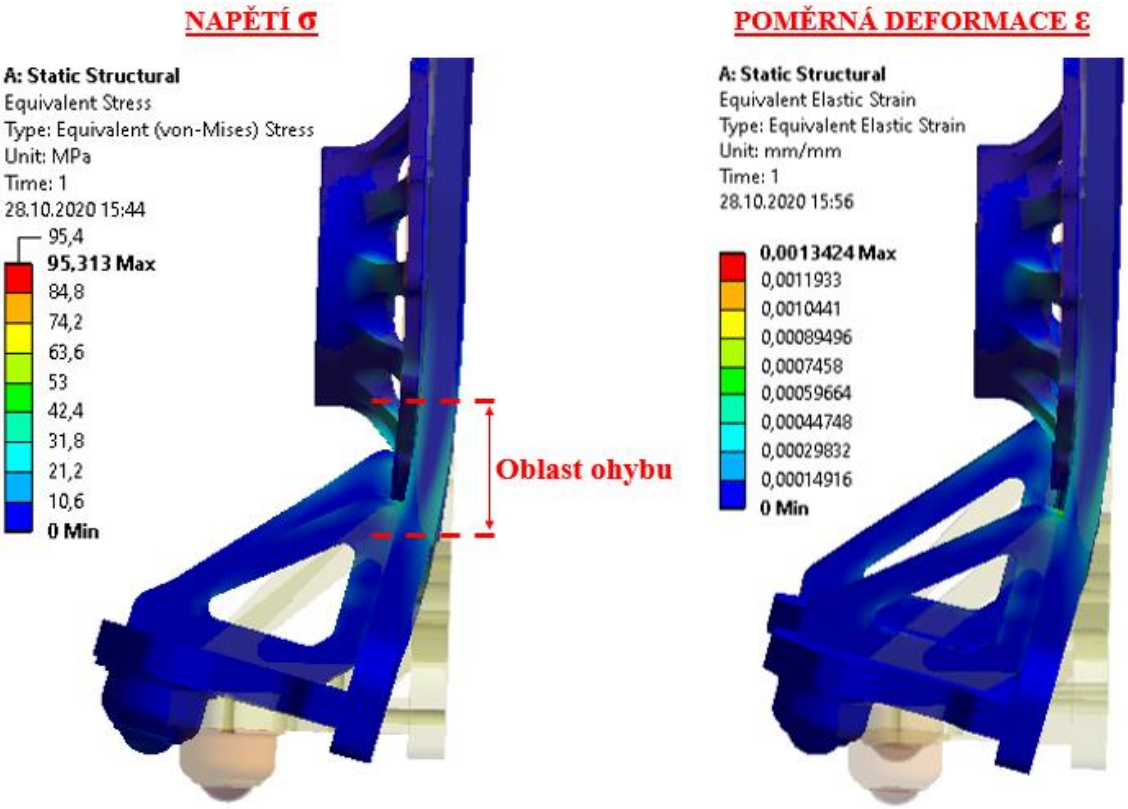


Obr. 60 MKP analýza nosné konstrukce [hodnoty v MPa] s horní hranicí napěťové legendy rovné maximálnímu napětí v součásti (95,3 MPa)

Na obrázku níže (Obr. 61) je zboku znázorněn zdeformovaný tvar měřícího přípravku s měřítkem deformace 72. Z přehnaného měřítka deformace je patrné, že v oblasti nejužšího průřezu dochází k největšímu ohybu nosné konstrukce. Oblast s největším mechanickým namáháním je zpravidla také oblastí s největší poměrnou deformací, což potvrzuje obrázek níže, na kterém lze pozorovat, že barevné mapy pro redukované napětí i poměrnou deformaci jsou totožné. Tato závislost ovšem platí pouze v oblasti platného Hookova zákona, tedy v oblasti elastické deformace, ve které dle rovnice (31) napětí σ roste lineárně s rostoucí poměrnou deformací ε. Rychlost růstu, graficky sklon křivky, je ovlivněn modulem pružnosti v tahu E daného materiálu. V případě zvyšování tuhosti bývá právě oblast s vysokým napětí, resp. vysokou poměrnou deformací cílem konstrukčních úprav pro zvýšení tuhosti a pevnosti součásti. V tomto případě z pevnostní analýzy vyplývá, že tuhost i pevnost měřícího přípravku je velmi vysoká a není potřeba konstrukci upravovat.

Výše zmíněný Hookův zákon je popsán rovnicí

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \ . \tag{31}$$



Obr. 61 Vlevo napěťová analýza [MPa] zdeformované nosné konstrukce s měřítkem deformace 72. Vpravo výsledky z poměrné deformace s maximy ve stejných místech jako maxima napětí

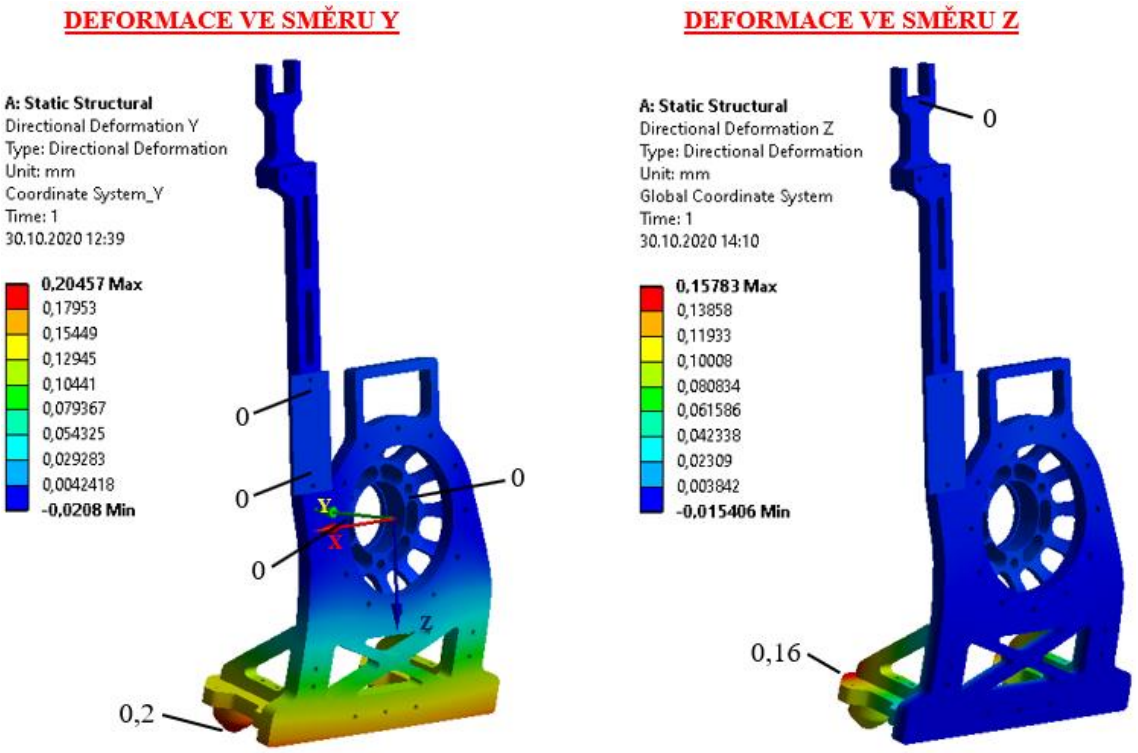
Z napěťové kontroly je vyvozen závěr, že navržená nosná konstrukce je z pevnostního hlediska bezpečná, protože napětí v žádné části měřícího přípravku nepřesáhlo mez kluzu 240 MPa materiálu hliník EN AW 6082, přičemž minimální bezpečnost vůči této mezi kluzu činí 6. Bezpečnost je počítána pro napětí 40 MPa z oblasti nad žebry, což je největší napětí, které je s ohledem na nastavení simulace relevantní. Vliv svarových a šroubových spojů není v simulaci zohledněn.

Výsledky deformační kontroly

Na obrázku níže (Obr. 62) jsou znázorněné výsledky deformace nosné konstrukce ve směru osy *y* a osy *z*, přičemž použitý souřadný systém je zobrazen uprostřed středu kola na obrázku vlevo. Analýzou těchto deformací je posouzen vliv zdeformování měřícího přípravku na přesnost měření geometrie kol, rozvážení hmotnosti a světlé výšky. Na rozdíl od napěťové analýzy, ve které je zátěžná síla $G_{na\ kolo}$ přenásobená koeficientem bezpečnosti *k* o velikosti 2,5, je deformační analýza provedena ze zátěžné síly $G_{na\ kolo}$ bez přenásobení koeficientem bezpečnosti *k*. Síla působící na jednu kuličkovou jednotku je pak rovna 356 N. Díky tomuto reálnému zatížení lze relevantněji zhodnotit tuhost nosné konstrukce a její vliv na přesnost měření, protože konstrukce je ve výpočtu zatížena přesně tak velkou silou jako ve skutečnosti.

Na obrázku níže (Obr. 62) je v levé části vykreslena deformace ve směru osy *y*. Deformace v tomto směru ovlivňuje měření odklonu kol a měření sbíhavosti kol. Ocelový plech pro uchycení digitálního inklinometru i dosedací plocha středu kola sloužící k připevnění přípravků na měření sbíhavosti kol vykazují nulové deformace ve směru osy *y*. Měření odklonu a sbíhavosti kol není ovlivněno deformací přípravku.

Na obrázku níže (Obr. 62) je v pravé části vykreslena deformace ve směru osy *z*. Deformace v tomto směru ovlivňuje měření světlé výšky a rozložení hmotnosti formule. Držák pro uchycení profilu k měření světlé výšky není ve směru osy *z* nijak zdeformován ani posunut. Znatelně posunuta je pouze spodní horizontální deska upevňující kuličkové jednotky, jejíž maximální deformace ve směru osy *z* činí 0,16 mm. Tato deformace způsobí naklopení formule na váhách přibližně o 0,01°, což nemá na měření rozložení hmotnosti žádný vliv.

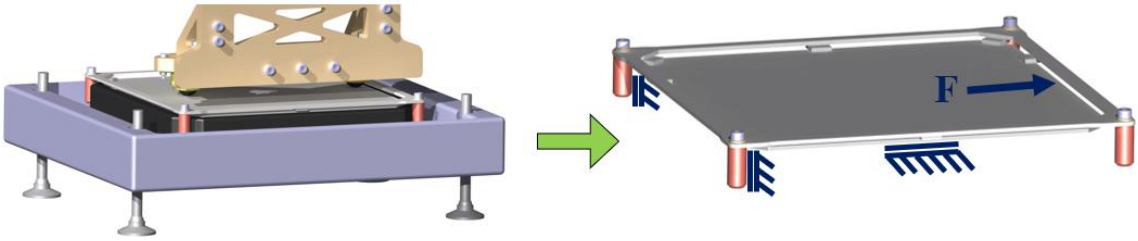


Obr. 62 Vlevo deformace nosné konstrukce [mm] ve směru osy *y*. Vpravo deformace ve směru osy *z*.

Z MKP analýzy deformací je vyvozen závěr, že deformace nosné konstrukce dosahuje tak malých hodnot ve směru osy *y* i ve směru osy *z*, že nemá žádný vliv na přesnost měření geometrie kol, světlé výšky ani rozložení hmotnosti a není potřeba provádět konstrukční úpravy pro zvýšení tuhosti konstrukce.

6.2.2 MKP analýza bezpečnostní ohrádky

Bezpečnostní ohrádka brání sjetí měřícího přípravku z automobilových vah. Aby byla tato funkce zajištěna, je provedena MKP analýza bezpečnostní ohrádky s cílem zanalyzovat napětí v nejvíce namáhaných místech bezpečnostní ohrádky při nárazu nosné konstrukce do jejího okraje (Obr. 63).



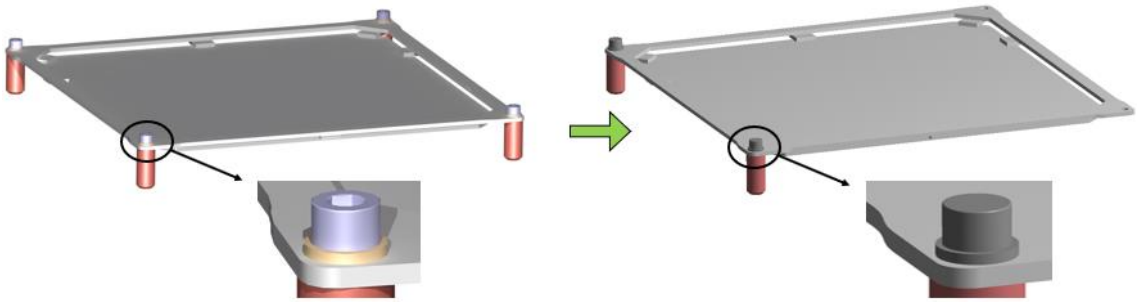
Obr. 63 Vlevo znázornění nárazu nosné konstrukce do kraje bezpečnostní ohrádky.
Vpravo schématické znázornění zatížení a uchycení bezpečnostní ohrádky v MKP výpočtu

Příprava CAD modelu pro MKP výpočet

S ohledem na zatížení bezpečnostní ohrádky je provedena úprava CAD modelu pro zjednodušení nastavení úlohy a zrychlení výpočetního času, která nemá zásadní vliv na přesnost výsledků.

První úpravou je odstranění středících čepů (Obr. 64) na téže straně bezpečnostní ohrádky jako působí zátěžná síla, protože veškerá zátěžná síla je zachycena pomocí dvou středících čepů umístěných na protilehlé straně ohrádky. Odstraněné středicí čepy přenášejí sílu pouze v případě, dojde-li k nárazu nosné konstrukce do protilehlé strany ohrádky.

Druhou úpravou je zjednodušení geometrie hlavy šroubu (Obr. 64) pro snížení nároků na kvalitu sítě a zároveň je v rámci této úpravy spojena hlava šroubu s podložkou v jedno těleso, což zmenší počet kontaktů, které je potřeba v simulaci nastavit.



Obr. 64 Vlevo CAD model v CATIA V5 zjednodušený pro MKP výpočet v ANSYSu vpravo

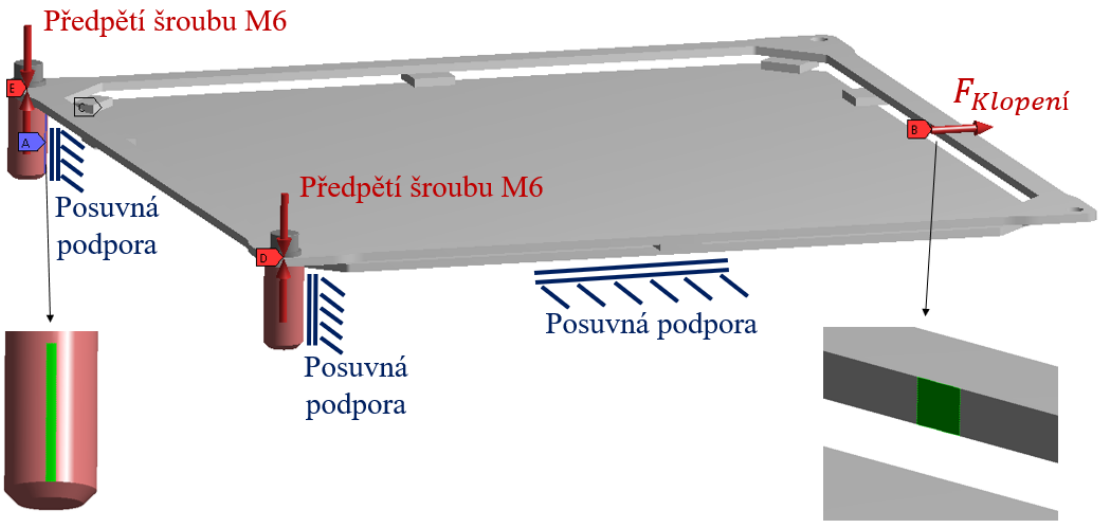
Vliv svarových spojů jako koncentrátorů napětí je pro značné zjednodušení výpočtu zanedbán s tím, že v místech svarových spojů nelze odečítat žádná relevantní napětí. Svarové spoje se ve skutečnosti nachází podél malých obdélníkových destiček spojujících vnější ohrádku s vnitřní deskou.

Okrajové podmínky a zatížení

Bezpečnostní ohrádka je v MKP analýze zatížena silou $F_{Klopení}$ o velikosti 337 N (Obr. 65), protože při vyšší síle než je $F_{Klopení}$ dojde k překlopení přípravku a vyšší silou na kraj ohrádky nelze působit. Síla $F_{Klopení}$ je vypočtena výše v kapitole 6.1.1 Výpočet překlopení přípravku. Zátěžná síla působí na vyznačenou obdélníkovou plochu, jejíž velikost je odhadnuta.

Vertikální posuvná podpora (Obr. 65) reprezentuje opření středících čepů o boky automobilové váhy a působí na vyznačenou obdélníkovou plochu, jejíž velikost je odhadnuta. Horizontální posuvná podpora reprezentuje položení vnitřní desky na horní plochu automobilové váhy a je aplikována na celou plochu vnitřní desky.

Středící čepy jsou k bezpečnostní ohrádce připevněny prostřednictvím šroubů s vnitřním šestihranem ISO 4762 – M6x30 – 8.8. Šroubový spoj je dotažen doporučeným tabulkovým utahovacím momentem o velikosti 9,7 Nm, který odpovídá osové síle v šroubu, tedy předpětí, o velikosti 8 302 N, které je v MKP simulaci zahrnuto (Obr. 65). [61]



Obr. 65 Schématické znázornění okrajových podmínek a zatížení pro MKP analýzu bezpečnostní ohrádky

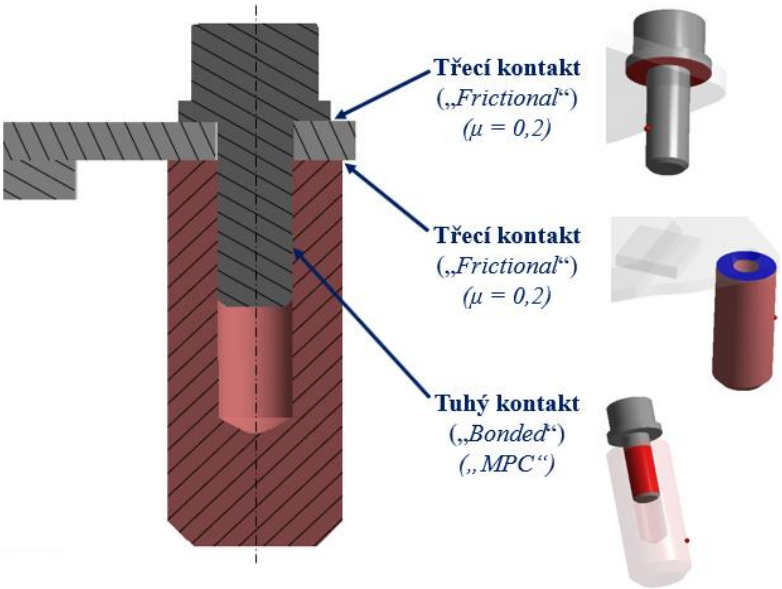
Kontakty

Svařenec, který je tvořen vnějším okrajem bezpečnostní ohrádky, spojovacími obdélníkovými destičkami a vnitřní deskou, je v simulaci nastaven tak, aby se choval jako jeden díl. To znamená, že všechny jeho plochy, které jsou v rámci svařence ve vzájemném kontaktu, jsou k sobě s nekonečnou tuhostí spojeny. Obdobné nastavení platí i pro podložku s hlavou šroubu.

Třecí kontakty („*Frictional*“, Obr. 66) jsou vytvořeny mezi dosedací plochou hlavy šroubu a bezpečnostní ohrádkou a dále mezi bezpečnostní ohrádkou a dosedací plochou středícího čepu. Pro oba třecí kontakty je nastaven bezpečný koeficient tření 0,2 a úprava kontaktní tuhosti („*Update Stiffness*“) je zakázána (vybráno „*Never*“).

V případě, že by se měnila kontaktní tuhost v průběhu výpočtu, měnila by se velikost penetrace dvou součástí do sebe, tím by se měnilo prodloužení šroubu, což by vedlo k proměnné osové síle v šroubu, tedy měnícímu se přepětí a nesprávným výsledkům. *Pinball Radius* je nastaven na 1 mm.

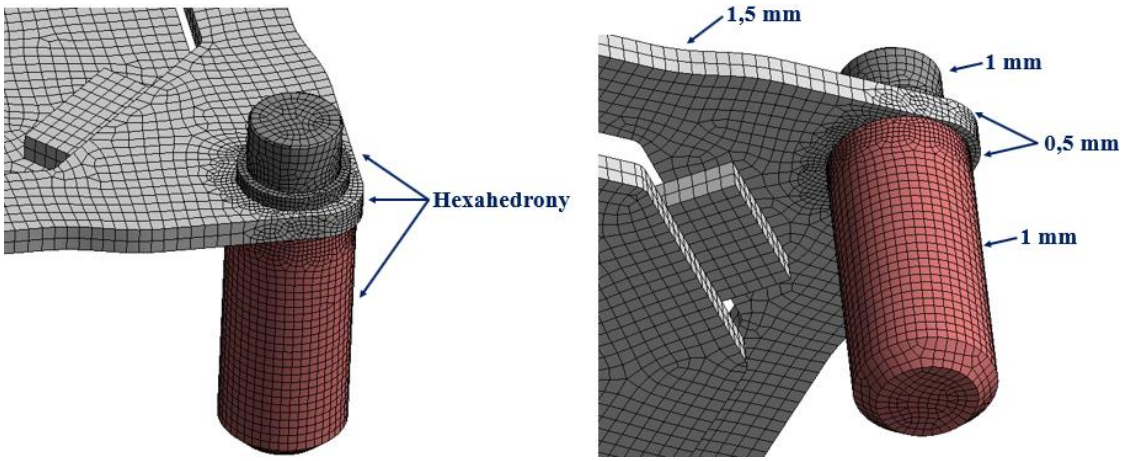
Dokonale tuhý *Bonded* kontakt (Obr. 66) je nastaven mezi závitem šroubu a závitem středícího čepu, přičemž formulace („*Formulation*“) je nastavena na kinematickou formulaci *MPC („Multipoint Constraint“)*.



Obr. 66 Schématické znázornění použitých kontaktů v MKP analýze bezpečnostní ohrádky

Parametry sítě

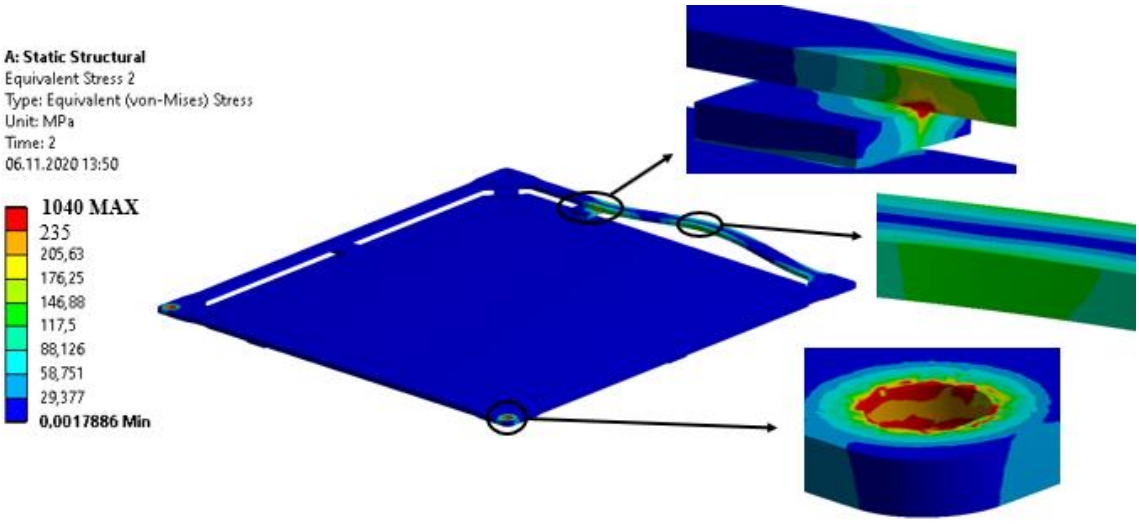
Síť bezpečnostní ohrádky je vytvořena z hexahedronů (šestistěnů) o velikosti 1,5 mm. Síť šroubů a středících čepů je vytvořena z hexahedronů o velikosti 1 mm. Síť v okolí obou dvou třecích kontaktů je pro lepší konvergenci výpočtu zjemněna na velikosti 0,5 mm.



Obr. 67 Zvolený typ a velikost sítě na jednotlivých dílech bezpečnostní ohrádky

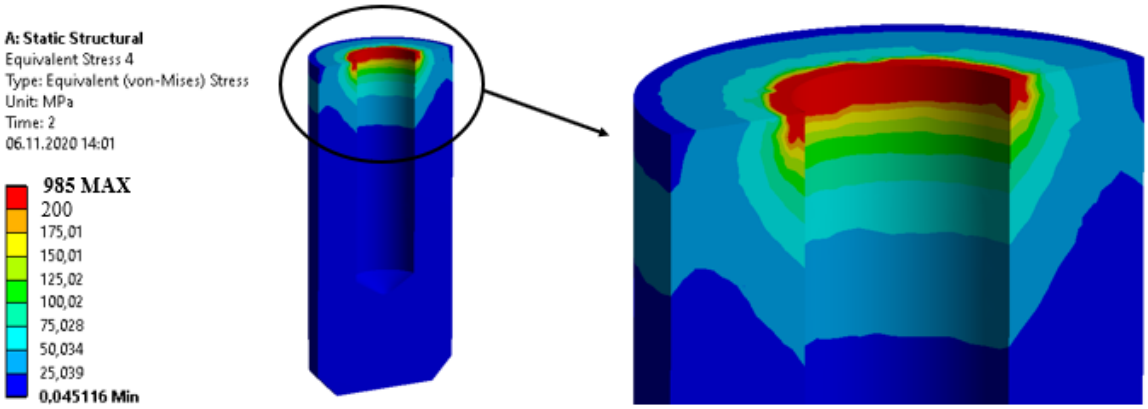
Výsledky napěťové kontroly

Z MKP analýzy bezpečnostní ohrádky (Obr. 68) vyplývá, že nejnamáhanější částí je vnější okraj. V místě největší deformace, tedy v místě působení zátěžné síly, činí napětí 133 MPa, což je výrazně menší napětí než mez kluzu oceli S235, která činí minimálně 235 MPa. Značně namáhaným místem je také spojení vnějšího okraje s obdélníkovou destičkou. V roho tohotu spojení se vyskytuje vyšší nepětí než mez kluzu, ovšem výsledky v této oblasti nejsou relevantní, protože zde není vymodelován svarový spoj, který by značně ovlivnil výsledky. Napětí přesahující mez kluzu se dále vyskytuje na okrajích děr pro šrouby. Tato napětí lze považovat za bezpečná, protože program vytváří v krajních elementech spojení nereálně vysoká napětí a pokud by se vysoké napětí na hraně díry doopravdy vyskytlo i ve skutečnosti, lze předpokládat, že dojde pouze k plastizaci (otupění) této hrany a vysoké napětí na hraně díry nebude mít vliv na celkovou pevnost díry.



Obr. 68 MKP analýza bezpečnostní ohrádky (červená barva značí napětí přesahující mez kluzu)

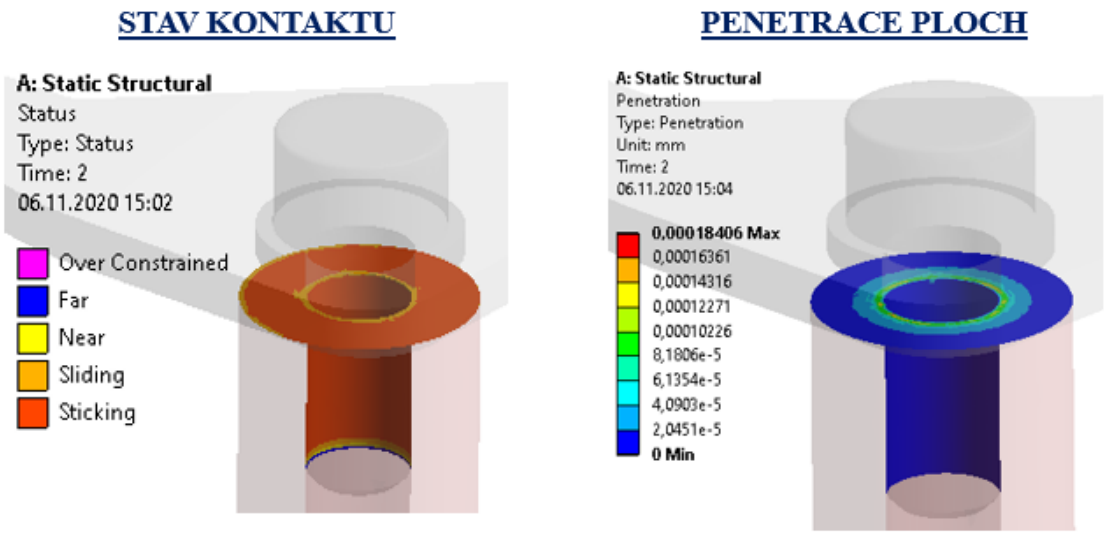
Na většině elementů středícího čepu (Obr. 69) nepřesahuje napětí 30 MPa, což symbolizuje tmavě modrá barva na přibližně 80 % součásti. V horní části čepu se vykytuje napětí kolem 50 MPa reprezentované světle modrou barvou. Tyto hodnoty jsou značně menší než mez kluzu hliníku EN AW 6063, která činí minimálně 200 MPa. Na hraně díry vznikají napětí značně přesahující mez kluzu. Tato napětí ovšem nejsou relevantní, protože se jedná o hranu spojení dvou součástí, na které se při MKP výpočtu tvoří nereálně vysoká napětí.



Obr. 69 MKP analýza středícího čepu (červená barva značí napětí přesahující mez kluzu)

Výsledky kontroly šroubového spoje

Pomocí funkce *Contact Tool* (Obr. 70) lze v programu *ANSYS* vyhodnotit chování šroubového spoje během jeho zatěžování. Z funkce *Status* lze vyčíst, že stav kontaktu je *Sticking*, tedy že se kontakt chová jako lepený spoj a kontaktní plochy se vůči sobě nepohybují. Lze tedy vyvodit závěr, že pro dané zatížení je zvolené předpětí šroubu a zvolený koeficient tření vyhovující. Z funkce *Penetration* lze vyčíst, že vnoření dvou součástí do sebe je minimální a že kontaktní tuhost je v nastavení výpočtu zvolena správně. Penetrace nepřekračuje jednu tisícinu z deformace v daném místě.



Obr. 70 Vlevo MKP výsledky pro funkci *Status*. Vpravo pro funkci *Penetration*

Z pevnostní MKP simulace bezpečnostní ohrádky je vyvozen závěr, že je ohrádka dostatečně pevná na to, aby odolala případnému nárazu nosné konstrukce do jejího okraje. Šroubový spoj spojující středící čep s bezpečnostní ohrádkou je vhodně dimenzovaný k přenosu zátěžné síly a nehrozí nebezpečné smykové namáhání šroubu.

6.3 Výpočet finančních nákladů

Pro přibližný odhad výrobní ceny měřícího přípravku jsou v tabulce níže (Tabulka 4) vypsány náklady na polotovary, výrobní operace a nakupované díly. Odhad nákladů je proveden součtem dílčích nákladů s přičtením 20 % rezervy pro pokrytí nepřesností při odhadu nákladů a pro pokrytí nepředvídatelných výdajů vyskytujících se během výroby. Do finančních nákladů vstupují pouze polotovary a díly, které jsou navrženy v rámci této diplomové práce (Obr. 71). Již používané součásti (automobilové váhy, přípravky na měření sbíhavosti, střed kola) nebo běžné dílenské vybavení (digitální posuvné měřítko, spojovací materiál) nejsou ve výpočtu finančních nákladů zahrnuty. Rovněž v odhadu ceny nejsou zahrnuty vlastnoručně prováděné výrobní operace jako soustružení, svařování a vrtání.

Obr. 71 Díly vstupující do výpočtu finančních nákladů

Odhadnuté ceny jsou v tabulce níže (Tabulka 4) rozděleny do dvou sloupců. První sloupec je příznivý odhad ceny s přihlédnutím k tomu, že tým CTU CarTech je sponzorován firmami, které se zabývají kovovýrobou či prodejem výrobků spojených s automobilovým průmyslem, a některé výrobní operace mohou být zdarma vyjednány v rámci sponzorského daru. Druhý sloupec sponzorství vůbec nezohledňuje a počítá tak s méně příznivým stavem.

Tabulka 4: Odhadové náklady na výrobu měřícího přípravku

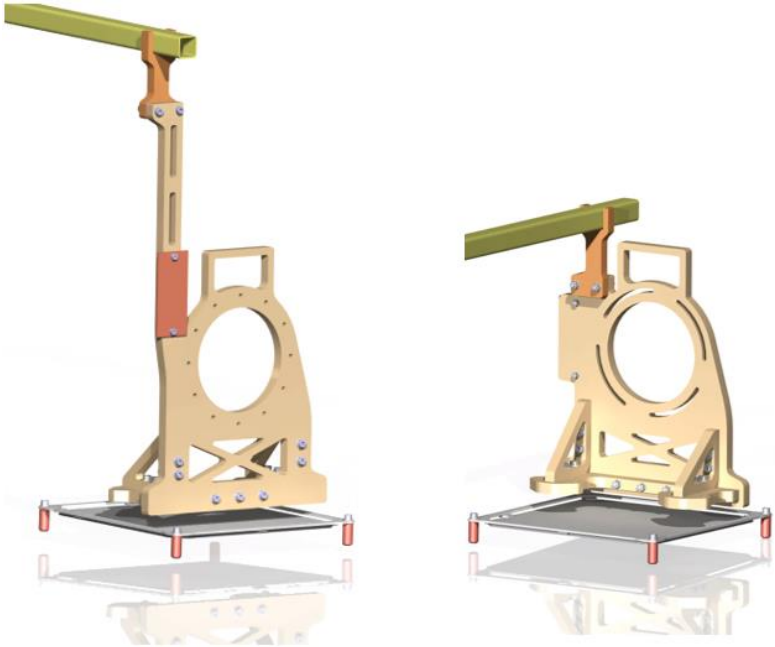
Název položky	**Cena** (s pomocí sponzorů)	**Cena** (bez pomoci sponzorů)	**Jednotka**
Polotovary			
Hliníková deska na nosnou konstrukci	4 200,-	4 200,-	Kč
Hliníkové profily na měření světlé výšky	400,-	400,-	Kč
Hliníková kruhová tyč na středící čepy	100,-	100,-	Kč
Ocelový plech na bezpečnostní ohrádku	400,-	400,-	Kč
Výrobní operace			
Řezání hliníku vodním paprskem	0,-	9 000,-	Kč
Řezání oceli laserem	0,-	700,-	Kč
Svařování hliníkové nosné konstrukce	0,-	2 000,-	Kč
Práškové lakování	0,-	500,-	Kč
Nakupované díly			
Digitální inklinometr	2 500,-	2 500,-	Kč
Kuličkové jednotky	900,-	900,-	Kč
Průběžný součet	**8 500,-**	**20 700,-**	**Kč**
Rezerva 20 %	1 700,-	4 140,-	Kč
Odhadované náklady	**10 200,-**	**24 840,-**	**Kč**

Z výše uvedené tabulky činí odhadované náklady na výrobu měřícího přípravku 10 200,- Kč s tím, že v částce nejsou zahrnuty dary od pravidelných sponzorů týmu CTU CarTech a náklady jsou tedy díky sponzorským darům nižší. Druhá varianta s náklady ve výši 24 840,- Kč již nepočítá s dary od sponzorů a je méně pravděpodobná, ovšem výstižněji představuje reálnou výrobu produktu na opravdovém finančním trhu. V obou případech se jedná o částky, které jsou ve srovnání s ročním týmovým rozpočtem minimální a tým si může investici do nového měřícího přípravku dovolit.

7 Výroba měřícího přípravku

S ohledem na nízké výrobní náklady je většina technologických operací (dělení materiálu, soustružení, vrtání, omílání, svařování, montáž) prováděna v dílně týmu CTU CarTech, případně v laboratořích jednotlivých ústavů Fakulty strojní ČVUT. Technologicky náročné operace (řezání vodním paprskem, řezání laserem, práškové lakování, eloxování) jsou prováděné v rámci sponzorského daru u týmových sponzorů nebo za finanční obnos u externích firem.

Hlavními požadavky na výrobu měřícího přípravku jsou zajištění požadované výrobní přesnosti dílů, které mají vliv na přesnost měření, a udržení nízké výrobní ceny, řádově do 15 000,- Kč, s využitím pomoci od sponzorů. Méně důležitým požadavkem je reprezentativní vzhled měřícího přípravku. Na obrázku níže (Obr. 72) jsou znázorněny všechny vyráběné díly potřebné k finální kompletaci měřícího přípravku.



Obr. 72 Grafické znázornění vyráběných dílů potřebných pro montáž měřícího přípravku (vlevo přípravek pro levé přední kolo, vpravo přípravek pro levé zadní kolo)

7.1 Výroba a montáž nosné konstrukce

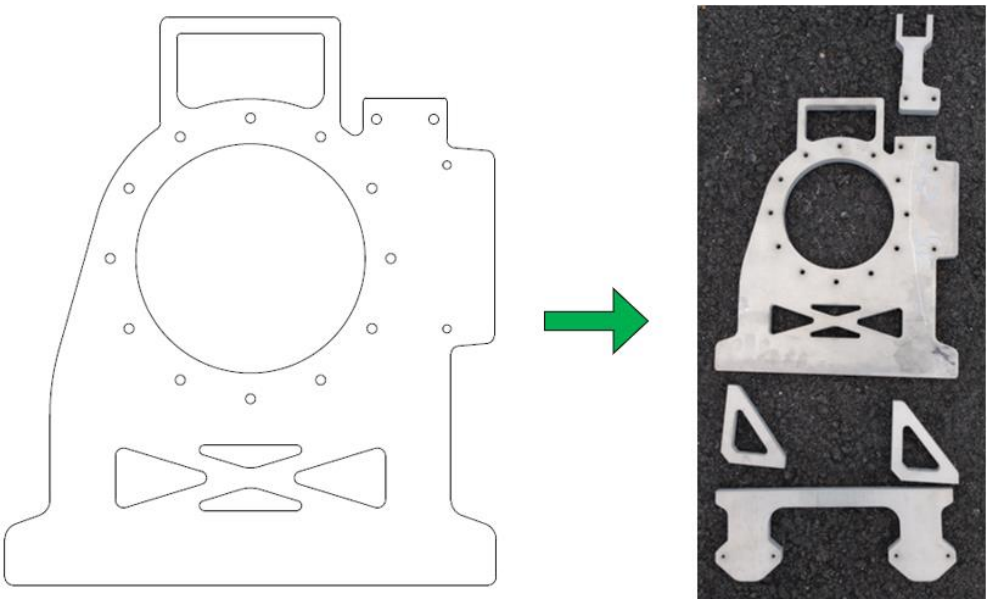
Konečné montáži nosné konstrukce předchází výroba hliníkového svařence, výroba držáku digitálního inklinometru, výroba držáku profilu pro měření světlé výšky a povrchová úprava zmíněných dílů. Výrobní přesnost všech dílů nosné konstrukce ovlivňuje v závislosti na funkci konkrétního dílu přesnost měření.

7.1.1 Výroba hliníkového svařence

Prvním krokem při výrobě hliníkového svařence nosné konstrukce je nákup hliníkového přířezu z materiálu EN AW 6082 o velikosti 0,8 x 1 m a tloušťce 15 mm od firmy A+A Pardubice, spol. s.r.o.

Ve druhém kroku je z hliníkové desky vyřezán požadovaný tvar (Obr. 73) za pomoci technologie zvané CNC řezání vodním paprskem. Tato výrobní technologie využívá k dělení materiálu úzký vodní paprsek o průměru 0,2 – 0,4 mm a tlaku od 2 000 do 6 000 Barů, přičemž vodní paprsek může být podle druhu řezaného materiálu doplněn o abraziva jako karbid křemíku či diamantový prach. Řezání vodním paprskem je provedeno v rámci sponzorského daru od firmy Stellis, s.r.o. Tato technologie dělení materiálu je zvolena kvůli přednostem, které v porovnání s řezáním laserem či kyslíko-acetylenovým plamenem nabízí. Zejména tloušťku materiálu 15 mm je pro řezání laserem hraniční. [64]

Mezi největší výhody vodního paprsku patří řezání materiálů do tloušťky až 250 mm, vysoká přesnost řezu především u slabších materiálů, minimální přívod tepla do řezaného materiálu, žádné ovlivnění mechanických či technologických vlastností materiálu v místě řezu, bezproblémové svařování řezaného materiálu a možnost řezat téměř všechny běžně používané konstrukční materiály. Nevýhodou řezání vodním paprskem je takzvané podřezání, jehož efekt se s rostoucí řeznou rychlostí zvětšuje. Podřezání je způsobené tím, že se úzký vodní paprsek tvaru válce při průchodu materiálem postupně rozšiřuje do tvaru komolého kužele a tím vzniká úhel podřezu. [64]



Obr. 73 Vlevo příklad výkresové dokumentace pro CNC řezání vodním paprskem ve formátu .DXF
Vpravo vyřezané díly vodním paprskem následně použité pro hliníkový svařenec nosné konstrukce

Ve třetím kroku jsou vyřezané hliníkové díly podrobeny povrchové úpravě za účelem odstranění ostrých hran, zbavení nečistot, odmaštění a vyleštění povrchu. Všechny tyto procesy jsou naráz provedeny vibrační kruhovou omílačkou umístěnou

v dílnách Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojní ČVUT. Doba omílání jednoho dílu je stanovena 4 hodiny.

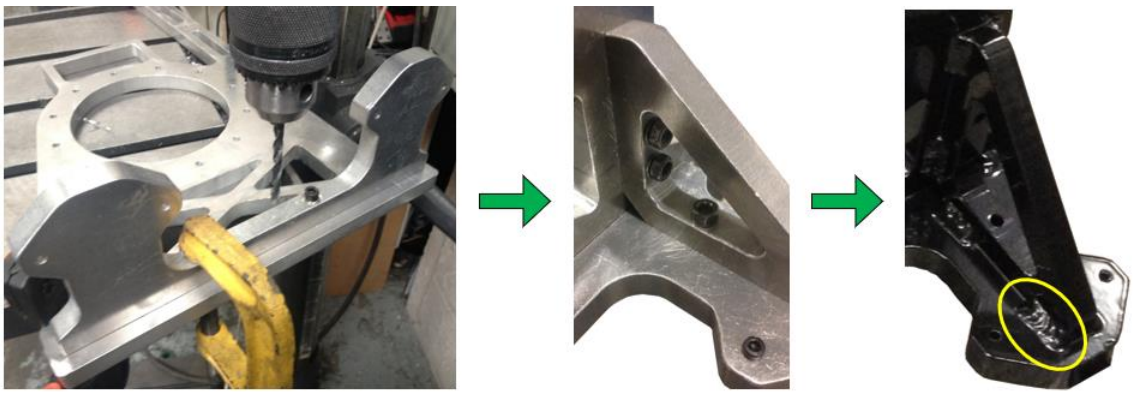
Obr. 74 Omílání jednotlivých dílů nosné konstrukce v kruhové vibrační omílačce

Ve čtvrtém kroku je provedena příprava vyřezaných a omletých dílů na svařování. Pro zachování přesné polohy jednotlivých dílů po svařování a eliminaci zkroucení hliníkového svařence vlivem velkého tepelného namáhání jsou jednotlivé díly (vertikální deska, horizontální deska, žebra) provrtány na sloupové vrtačce a přišroubovány k sobě pomocí šroubů M6 pevnosti 8.8 (Obr. 75) odpovídajícím tabulkovým utahovacím momentem o velikosti 10 Nm.

V pátém kroku jsou svařeny (Obr. 75) všechny čtyři sešroubované nosné konstrukce (levá přední, pravá přední, levá zadní, pravá zadní) v rámci sponzorského daru firmou Tauchman SWS, s.r.o., která zároveň provádí i přípravu materiálu na svařování spočívající v odmaštění povrchu a odbroušení povrchové vrstvy oxidů hliníku znemožňující správné natavení kovu. Nepříjemností při svařování hliníku je jeho velká tepelná vodivost, která způsobuje rychlé zahřátí celé součásti a následnou deformaci svařence vlivem tepla vneseného do svařované součásti při hoření elektrického oblouku. Pro eliminaci deformace svařence jsou díly nosné konstrukce před svařováním nahřáty v peci na teplotu 180 °C, aby byla teplota rovnoměrněji rozložena po celém svařenci. Následně jsou vytvořeny krátké svary, které nosnou konstrukci tepelně méně zatíží než dlouhé svary. Metoda svařování je vybrán TIG (německy WIG), tedy obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu, nejčastěji argonu, protože svary provedené metodou TIG se vyznačují velmi vysokou kvalitou a pevností. Svářeč při této metodě disponuje vysokou kontrolou nad svarovou lázní, protože si přídavný materiál do svarové lázně sám přidává podle potřeby. Svařovací proud je zvolen v rozmezí 250 – 280 A při napětí 16 – 18 V. Pro svařovaní hliníku je nastaven střídavý proud, protože při kladné polaritě proudu dochází k nezbytnému čištění svaru odstraňováním vrstvy oxidů a při záporné polaritě dochází ke svařování materiálu. Jako přídavný materiál je použit drát AlMg5 o průměru 3,2 mm,

který je složen z 95 % hliníku a 5 % hořčíku. Ochrannou atmosféru tvoří inertní plyn argon o vysoké čistotě 5.0, tedy s podílem argonu 99,999 %. [65]

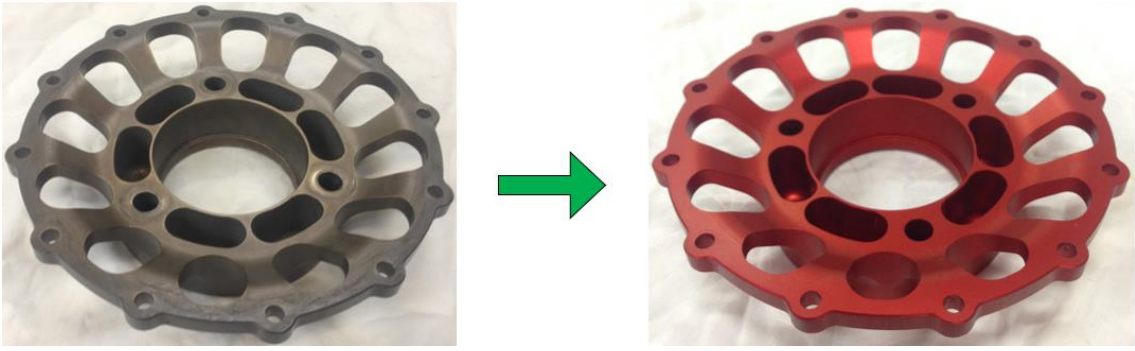
V posledním kroku je u sponzorské firmy, která si nepřeje být jmenována, podrobena nosná konstrukce práškovému lakování (komaxitu, Obr. 75). Práškové lakování je druh povrchové úpravy, při které jsou částice prášku během průchodu stříkací pistolí nabity záporným nábojem pomocí vysokonapěťového zdroje a následně přitahovány k elektricky uzemněné součásti, která je určena k lakování. Po elektrostatickém nastříkání je lak vypálen v peci při teplotě 140 – 200 °C, čímž dojde ke přilnutí laku k povrchu. Tloušťka jedné vrstvy komaxitu se pohybuje od 0,05 do 0,1 mm, což nezpůsobí žádné montážní problémy. Díky této povrchové úpravě se eliminuje riziko elektrolytické koroze nosné konstrukce, při které vlivem rozdílných elektrodových potenciálů méně ušlechtilý kov (hliníkový svařenec) zastává funkci anody a koroduje a ušlechtilejší kov (ocelový šroub) zastává funkci katody, která korozi odolává. Práškové lakování tedy uchrání hliníkový svařenec před korozí. [66]



Obr. 75 Výroba nosné konstrukce od vrtání děr (vlevo) po práškové lakování svařence (vpravo)

7.1.2 Eloxování středů kol

Pro nový měřící přípravek jsou použity středy kol ze starého modelu studentské formule týmu CTU CarTech z vozu FS.11. S ohledem na vzhled, otěruvzdornost a korozi měřícího přípravku jsou středy kol eloxovány (Obr. 76) firmou EPRONA, a.s., přičemž dva středy kol jsou eloxovány na červeno a dva na modro. Červené středy kol jsou umístěny na pravou stranu formule, na které se nachází podél celého vozidla červený polep s logy sponzorů a modré středy kol jsou umístěny na levou stranu formule, na které je umístěn naopak modrý polep s logy sponzorů.



Obr. 76 Důkladné odmaštění a následné přírodní eloxování středů kol převzatých z vozu FS.11

Přírodním eloxováním vznikne na povrchu středů kol vrstva oxidů hliníku Al_2O_3 o tloušťce v rozmezí 0,005 – 0,02 mm (5 – 20 μm), která chrání jejich povrch před korozí a zvyšuje jejich otěruvzdornost. Přírodní typ eloxování je pro středy kol zvolen pro jeho možnost volby libovolné barvy na rozdíl od tvrdého eloxování, u kterého tato volba není možná. Ochranná vrstva vytvořená tvrdým eloxováním je totiž bezbarvá, silná 0,02 – 0,08 mm (20 – 80 μm) a otěruvzdornější v porovnání s přírodním eloxováním. Vrstva přírodního eloxování nezpůsobí na středech kol žádné montážní ani funkční problémy. [67] [68]

Ochranná vrstva oxidů hliníku Al_2O_3 při eloxování vzniká ponořením dílu zapojeného jako anoda do elektrolytické lázně obsahující zředěnou kyselinu sírovou, přičemž nejprve dochází vlivem procházejícího proudu k rozpuštění hliníku do elektrolytické lázně a následnou reakcí s hydroxidovými ionty OH^- se na součásti vytváří povlak hydroxidu hlinitého $Al(OH)_3$, který zabraňuje průchodu proudu, čímž se povlak značně ohřívá, dehydratuje a mění se na oxid hlinitý Al_2O_3, který na povrchu součásti tvoří tenkou vrstvu zabraňující další korozi. [70]

7.1.3 Výroba plechu pro uchycení digitálního inklinometru

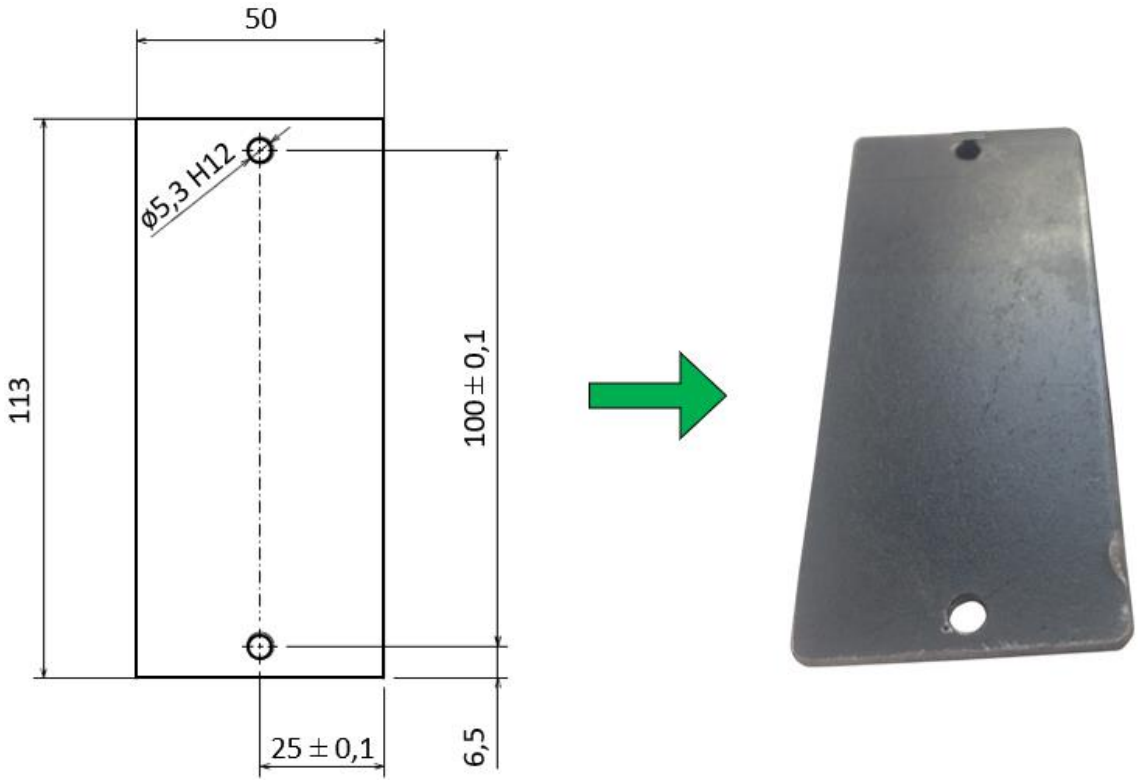
Prvním krokem výroby plechu pro upevnění digitálního inklinometru (Obr. 77) je obstarání vhodného polotovaru z oceli S235, šířky 50 mm a tloušťky 3 mm v dílně týmu CTU CarTech. Následně je polotovar odříznut pomocí pásové pily na požadovanou délku 113 mm s nízkými nárokem na přesnost v rámci všeobecných tolerancí délkových rozměrů. Středy otvorů ø5,3 H12 jsou narýsovány rýsovací jehlou, vyraženy důlčíkem a vyvrtány na sloupové vrtačce PROMA E-2020F. Ze vztahu pro výpočet řezné rychlosti

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1\,000} \tag{32}$$

jsou vyjádřeny otáčky ve tvaru

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d} = \frac{1000 \cdot 20}{\pi \cdot 5{,}3} = 1\,201\ ot/min \quad \left(\frac{m}{min}, mm\right), \tag{33}$$

kde v_c je řezná rychlost (zvolena 20 m/min pro vrták z rychlořezné oceli) a d je průměr vrtané díry. Výsledné otáčky jsou na sloupové vrtačce nastaveny na 1 200 ot/min. Vrták je průběžně mazán řezným olejem pro snížení koeficientu tření, což vede k menšímu zahřívání a opotřebení vrtáku.



Obr. 77 Vlevo výkresová dokumentace pro výrobu plechu pro uchycení digitálního inklinometru. Vpravo odjehlený a odmaštěný díl připravený na práškové lakování černou barvou

Po zabroušení ostrých hran, odjehlení otvorů a odmaštění povrchu je u jedné ze sponzorských firem provedeno práškové lakování černou barvou RAL 9005, které zamezí korozi a vylepší vzhled součásti. Princip práškového lakování je stručně vysvětlen v kapitole 7.1.1 Výroba hliníkového svařence.

7.1.4 Montáž nosné konstrukce

K nalakovanému svařenci nosné konstrukce jsou přišroubovány kuličkové jednotky, střed kola, držák profilu pro měření světlé výšky a plech pro uchycení digitálního inklinometru (Obr. 78).

Všechny šroubové spoje jsou považovány za trvalé, tedy že nebude docházet k jejich pravidelnému povolování. Z toho důvodu jsou pro zajištění všech šroubů použity samojistné matice DIN 985, které prostřednictvím nylonové vložky brání samovolnému povolení matice a nelze je opakovaně použít. Jedinou výjimku tvoří spojení středu kola s nosnou konstrukci na zadní nápravě opatřené samosvorným diferenciálem. Zde jsou použity obyčejné šestihranné matice ISO 4032, protože se u těchto matic

předpokládá pravidelné povolování, aby mohlo být umožněno prostřednictvím čtvrtkruhových drážek natáčení nosné konstrukce do svislého směru. Všechny šroubové spoje jsou rovněž předepnuty odpovídajícím tabulkovým utahovacím momentem.

Obr. 78 Montáž nosné konstrukce měřícího přípravku pro levé přední a pravé přední kolo

7.2 Výroba a montáž bezpečnostní ohrádky

Konečné montáži bezpečnostní ohrádky předchází výroba ocelového svařence bezpečnostní ohrádky a výroba středících čepů. Nepřesnosti při výrobě bezpečnostní ohrádky nemají významný vliv na přesnost měření geometrie kol, ovšem prostřednictvím požadované výrobní přesnosti je zamezeno jakémukoliv pohybu bezpečnostní ohrádky po automobilových váhách, čímž je sníženo riziko pádu měřícího přípravku.

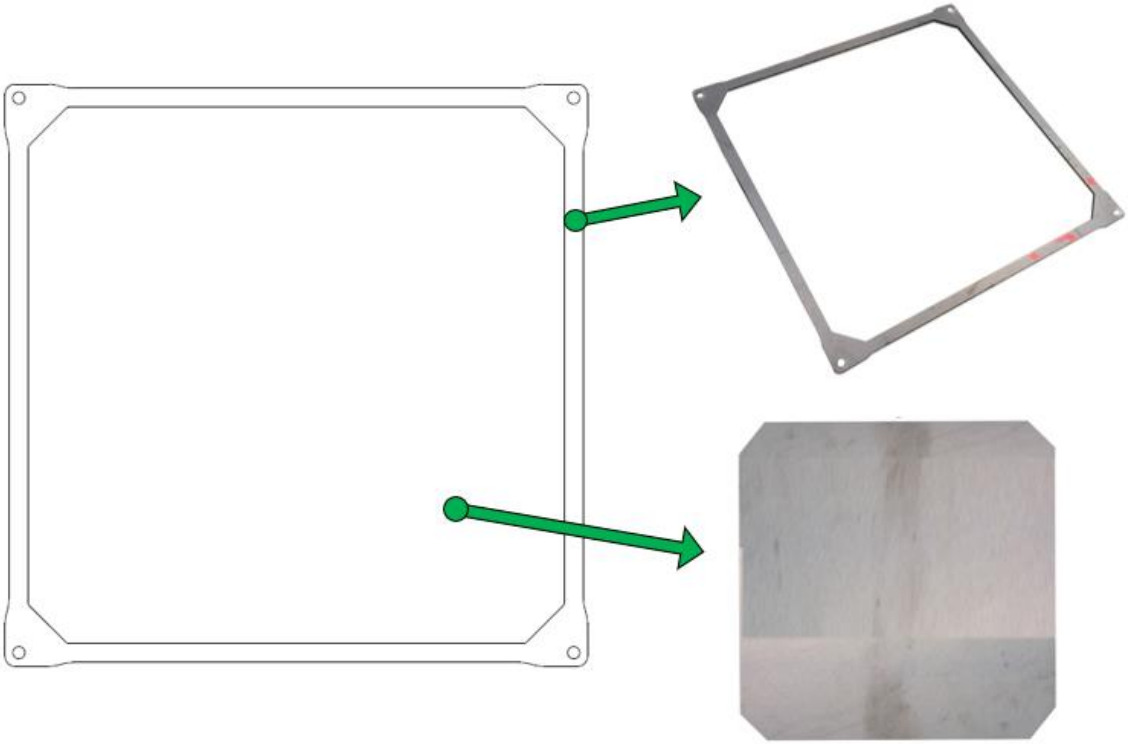
7.2.1 Výroba ocelového svařence

Prvním krokem při výrobě ocelového svařence je nákup plechu z materiálu S235 o velikosti 0,7 x 1 m a tloušťce 3 mm od firmy KONDOR, s.r.o.

Ve druhém kroku jsou z plechu vyřezány prostřednictvím CNC laseru požadované tvary (Obr. 79) firmou Eurazio Center, u které je výroba smluvena v rámci sponzorského daru. Tato výrobní technologie využívá k dělení materiálu laserový paprsek a inertní plyn, nejčastěji dusík, který svým proudem profukuje řeznou spáru

(takzvané tavné řezání) nebo je využíván laserový paprsek v kombinaci s kyslíkem, který spaluje řezaný materiál v řezné spáře (takzvané oxidační řezání). Šířka řezné spáry činí v závislosti na výkonu laseru 0,2 – 0,5 mm, což nečiní pro bezpečnostní ohrádku žádné výrobní ani montážní komplikace. [69]

Řezání laserem se stejně jako řezání vodním paprskem vyznačuje vysokou přesností řezu, možností řezat téměř všechny běžně používané konstrukční materiály a minimálními teplotními deformacemi slabších výpalků. V porovnání s řezáním vodním paprskem je charakteristické řezání laserem vyšší řeznou rychlostí a tím pádem efektivností. Nevýhodou je omezená tloušťka řezaného materiálu, která činí u méně výkonných laserů 15 mm, u výkonnější laserů 30 mm. Další nevýhodou je riziko deformace u silnějších výpalků vlivem koncentrovaného přívodu tepla a tvorba návarků v místě řezu, které znesnadňují další technologické operace jako obrábění či svařování. Bezpečnostní ohrádka je navržena z 3 mm tenkých plechů, takže problém s průchodem laserového paprsku ani problém s deformací součásti při řezání nehrozí. Protože se svary nevyskytují přímo v místě řezu laseru, nehrozí problém se svařitelností bezpečnostní ohrádky. [69]

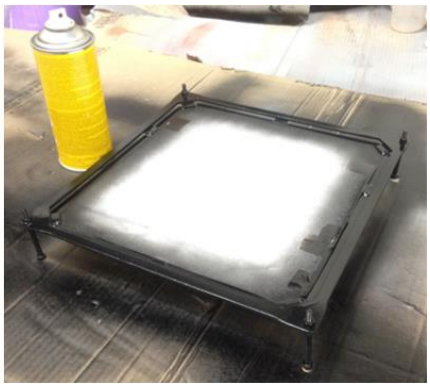


Obr. 79 Vlevo příklad výkresové dokumentace pro CNC řezání laserem ve formátu .DXF
Vpravo vyřezané díly CNC laserem následně použité pro ocelový svařenec bezpečnostní ohrádky

Ve třetím kroku je bezpečnostní ohrádka svařena (Obr. 80) v dílně týmu CTU CarTech. Svařenec bezpečnostní ohrádky je tvořen z vnitřní a vnější části výpalku (Obr. 79), mezi které jsou navařeny distanční obdélníkové podložky pro zvětšení nárazové bariéry. Metoda svařování je vybrán TIG (německy WIG), tedy svařování netavící se wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu. Tato metoda

je vybrána pro vysokou kvalitu a pevnost vytvořených svarů. Před svařováním je povrch odmaštěn acetylenem a okartáčován pomocí úhlové brusky s drátěným kotoučem. Svařovací proud je zvolen stejnosměrný o velikosti 45 A. Ochrannou atmosféru zajištuje inertní plyn argon, který zabraňuje přístupu vzduchu a tedy vzniku oxidů a pórů ve svarové housence. Protože je svařovaný materiál poměrně slabý, není do součásti vneseno tak velké množství tepla, aby hrozilo zkroucení bezpečnostní ohrádky. [71]

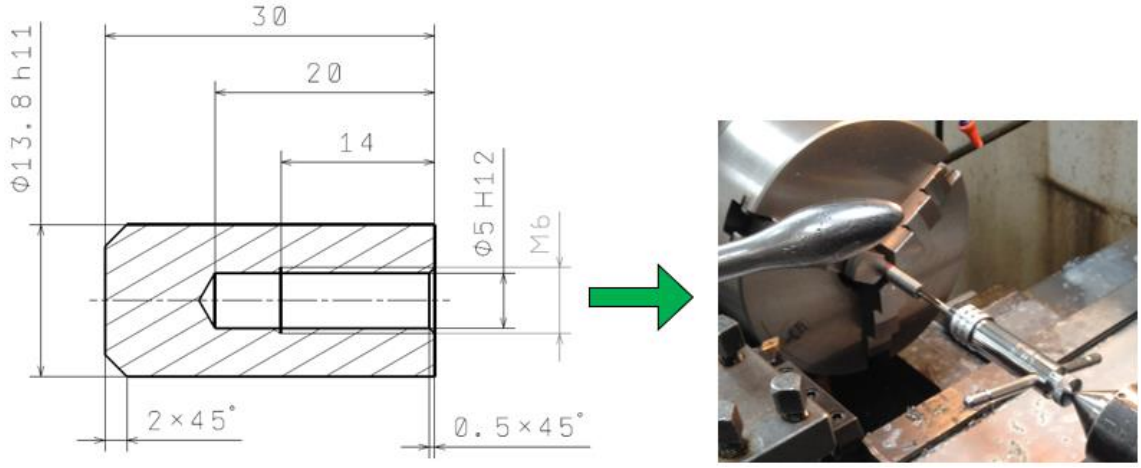
Posledním krokem je povrchová úprava bezpečnostní ohrádky (Obr. 80) pomocí spreje na kov barvy RAL 9005, který vylepší vzhled součásti a zamezí korozi materiálu. Vnitřní část ohrádky nelze povrchově upravit, protože hrozí poškození laku vlivem pojezdu kalených kuličkových jednotek. V této části ohrádky je povrch ošetřen pouze motorovým olejem.



Obr. 80 Vlevo svařování bezpečnostní ohrádky metodou TIG v dílně týmu CTU CarTech.
Vpravo povrchová úprava svařené bezpečnostní ohrádky pomocí spreje na kov barvou RAL 9005

7.2.2 Výroba středícího čepu

Prvním krokem výroby středícího čepu je objednání hliníkové kruhové tyče z materiálu EN AW 6063 o průměru 15 mm od firmy A+A Pardubice, spol. s.r.o. Rozměr 15 mm je nejbližší vyšší průměr polotovaru v nabídce výše uvedené firmy při uvažování největšího průměru finálního obrobku (Obr. 81) o velikosti 13,8 mm. Délka tyče je stanovena 1 000 mm, což je dostačující délka pro výrobu 16 středících čepů finální délky 30 mm i s uvažováním 2x100 mm přebytečné délky navíc pro upnutí polotovaru ve sklíčidle, 100 mm délky navíc pro přídavky na obrábění čela a upichování a 220 mm délky navíc pro zkouškové či zmetkové středící čepy.



Obr. 81 Vlevo výkresová dokumentace pro výrobu hliníkového středícího čepu.
Vpravo řezání závitu M6 pomocí ručního závitníku vystředěného koníkem soustruhu

Ve druhém kroku je středící čep obroben na konvenčním soustruhu TOS SV 18 RA v dílně týmu CTU CarTech. Polotovar je upnut do sklíčidla a ubíracím nožem je zarovnáno čelo pro odstranění radiálního házení. Následně je odhrubován průměr 15 mm na 14 mm s hloubkou řezu a_p o velikosti 0,5 mm, otáčkami vřetene n o velikosti 1 120 ot/min a strojním posuvem f o velikosti 0,2 mm/ot. S následným nastavením menšího posuvu f o velikosti 0,1 mm/ot je docíleno finálního průměru 13,8 mm v toleranci h11 (rozsah 13,69 mm – 13,8 mm) a hladkého povrchu přibližně Ra 0,8. Nastavené otáčky vřetene n jsou nejbližší nižší otáčky získané z výpočtu

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d} = \frac{1000 \cdot 60}{\pi \cdot 15} = 1\,273\ ot/min \quad \left(\frac{m}{min}, mm\right), \tag{34}$$

kde řezná rychlost v_c je pro nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou zvolena 60 m/min.

Díra o průměru 5 mm v toleranci H12 (rozsah 5 mm – 5,12 mm) je vyrobena vrtákem z rychlořezné oceli vsazeného do redukčního pouzdra v pinole koníku. Vrtání je doprovázeno chlazením vrtáku a otáčky vřetene n jsou ponechány 1 120 ot/min, přičemž posuv vrtáku f je ruční pomocí ovládacího kola pinoly koníku, protože výše uvedený typ soustruhu neumožňuje strojní posuv pinoly. Nastavené otáčky vřetene n jsou s ohledem na stáří převodového ústrojí soustruhu cíleně nastaveny nižší než otáčky získané z výpočtu

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot d} = \frac{1000 \cdot 40}{\pi \cdot 5} = 2\,546\ ot/min \quad \left(\frac{m}{min}, mm\right), \tag{35}$$

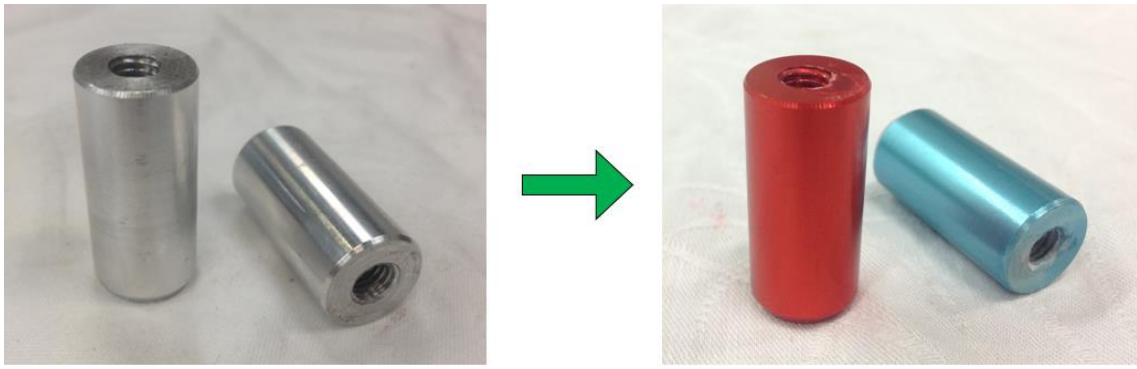
kde řezná rychlost v_c je pro vrták z rychlořezné oceli zvolena 40 m/min.

Závit M6 je vyřezán (Obr. 81) pomocí odstupňované sady ručních závitníků a ráčny pro závitníky, která je za účelem vystředění závitu podepřena hrotem pinoly koníku. Pro snížení řezné síly a menšímu opotřebování nástroje je závitník průběžně mazán řezným olejem.

Odříznutí obrobku je provedeno upichovacím nožem za pomoci chlazení, protože se vlivem velkého úběru materiálu produkuje enormní množství tepla. Otáčky vřetene *n* jsou podle obecných doporučení sníženy na 140 ot/min a posuv upichovacího nože *f* je prováděn ručně pro jemnější řízení rychlosti posuvu s ohledem na zpětnou vazbu poskytovanou od řezné síly a vzhledu vznikající třísky.

Obrobek je následně otočen o 180°, upnut do sklíčidla a ohnutým ubíracím nožem je vytvořeno sražení 2 mm x 45° při otáčkách 1 120 ot/min vycházejících z výpočtu (34).

Každý vysoustružený středící čep (Obr. 82) je podroben výstupní kontrole ověřující funkčnost závitu M6 a ověřující dosažení rozměru průměr 13,8 mm v toleranci h11.



Obr. 82 Vlevo obrobené hliníkové středící čepy na konvenčním soustruhu v dílně týmu CTU CarTech
Vpravo středící čepy po absolvování povrchové úpravy přírodním eloxováním

Posledním krokem výroby středícího čepu je jeho dokonalé odmaštění a podrobení povrchové úpravě (Obr. 82). Jako povrchová úprava je vybráno přírodní eloxování, protože je vysoce otěruvzdorné, vytvořená povrchová vrstva je silná pouze 0,005 – 0,02 mm (5 – 20 μm) a lze vybírat z libovolných barev povrchu. Eloxování je provedeno firmou EPRONA, a.s. a jeho princip je vysvětlen výše v kapitole 7.1.2 Eloxování středů kol. S ohledem na vzhled formule FS.12 a nového měřícího přípravku je 8 středících čepů eloxováno na modro a 8 středících čepů na červeno.

7.2.3 Montáž bezpečnostní ohrádky

K ocelovému svařenci (Obr. 83) jsou pomocí šroubů M6 o pevnosti 8.8 přimontovány středící čepy a předepjaty tabulkovým utahovacím momentem o velikosti 10 Nm. Pod hlavu šroubu jsou umístěny podložky pro lepší rozložení tlaku v prostoru děr pro šrouby a pro vyrovnání případných povrchových nerovností způsobených ručním lakováním ohrádky.

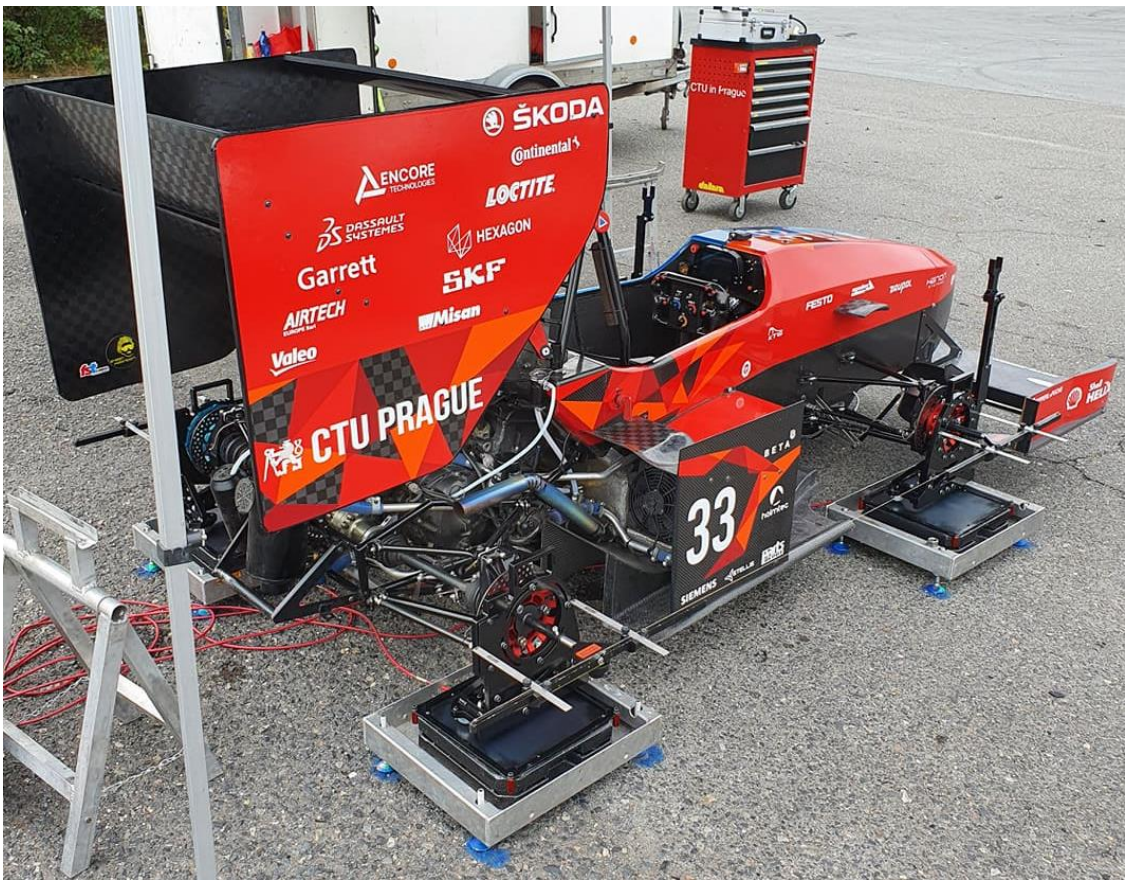
Obr. 83 Smontovaná bezpečnostní ohrádka pro pravé přední kolo

8 Zhodnocení otestovaného měřícího přípravku

Vyrobený měřící přípravek je otestován při jeho prvním měření odklonu, sbíhavosti, světlé výšky a rozložení hmotnosti. Při měření a nastavování náprav je posuzována jeho funkčnost, rychlost obsluhy a kompaktnost pro převoz na závody. Dále je diskutována konstrukce měřícího přípravku z výrobního a ekonomického hlediska. Všechny požadavky kladené na měřící přípravek jsou uvedeny v kapitole 5.1 Seznam požadavků.

8.1 Funkční zhodnocení

Při posuzování funkčnosti přípravku je kladen důraz na ověření přesnosti měření všech parametrů podvozku a na ověření přístupnosti jednotlivých nastavovacích prvků zavěšení kol. Posuzován je také odpor, s jakým se přípravek pohybuje prostřednictvím kuličkových jednotek po automobilových váhách. Dále je posuzována rychlost a jednoduchost montáže měřícího přípravku prováděná při přípravě potřebné aparatury na měření náprav. V neposlední řadě je také diskutována kompaktnost přípravku pro skladování a převoz na závody.



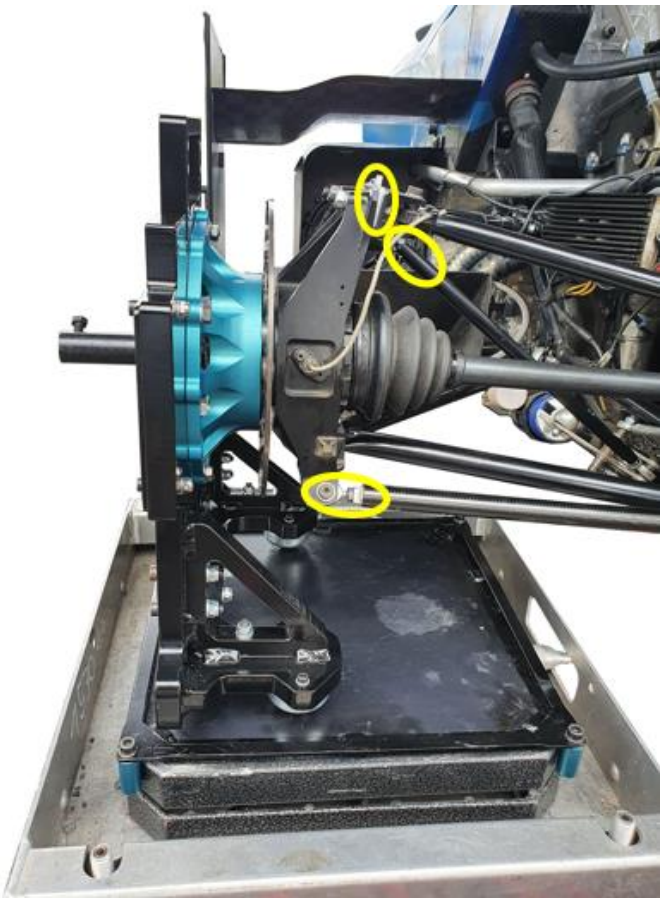
Obr. 84 První měření geometrie kol pomocí nového měřícího přípravku

8.1.1 Funkční pozitiva

Největším přínosem nového měřícího přípravku je volný pojezd kuličových jednotek (Obr. 85), který je zatížený pouze minimálním valivým odporem vznikajícím při pojezdu kalené koule po bezpečnostní ohrádce. Formule se tak při každém přenastavení odklonu a sbíhavosti kol nemusí zvedat z automobilových vah pro odstranění napružení zdeformovaných pneumatik, nýbrž lze nepřetržitě nastavovat a měřit geometrii kol, což přináší značnou časovou úsporu.

Dalším výrazným pozitivem je lepší přístup k nastavovacím prvkům pro změnu odklonu kol (Obr. 85). Díky novému přípravku se již nemusí pro výměnu distanční podložky, která se vkládá do těhlice do místa uchycení horního ramene, demontovat kolo, vyměnit distanční podložku a opět namontovat kolo, nýbrž lze distanční podložku vyměnit bez jakékoliv demontáže, což je spojeno s velkou časovou úsporou.

Přístup k nastavovacím prvkům sbíhavosti kol zadní nápravy (Obr. 85) je výrazně lepší, protože již okolí seřizovacího čtyřhranu kulového čepu tie rodu (řídící tyče) není zastavěno ráfkem kola s pneumatikou, nýbrž je přístup k seřizovacímu čtyřhranu zcela volný. Nastavování sbíhavosti kol přední nápravy je také volně přístupné, což ovšem bylo již dříve.

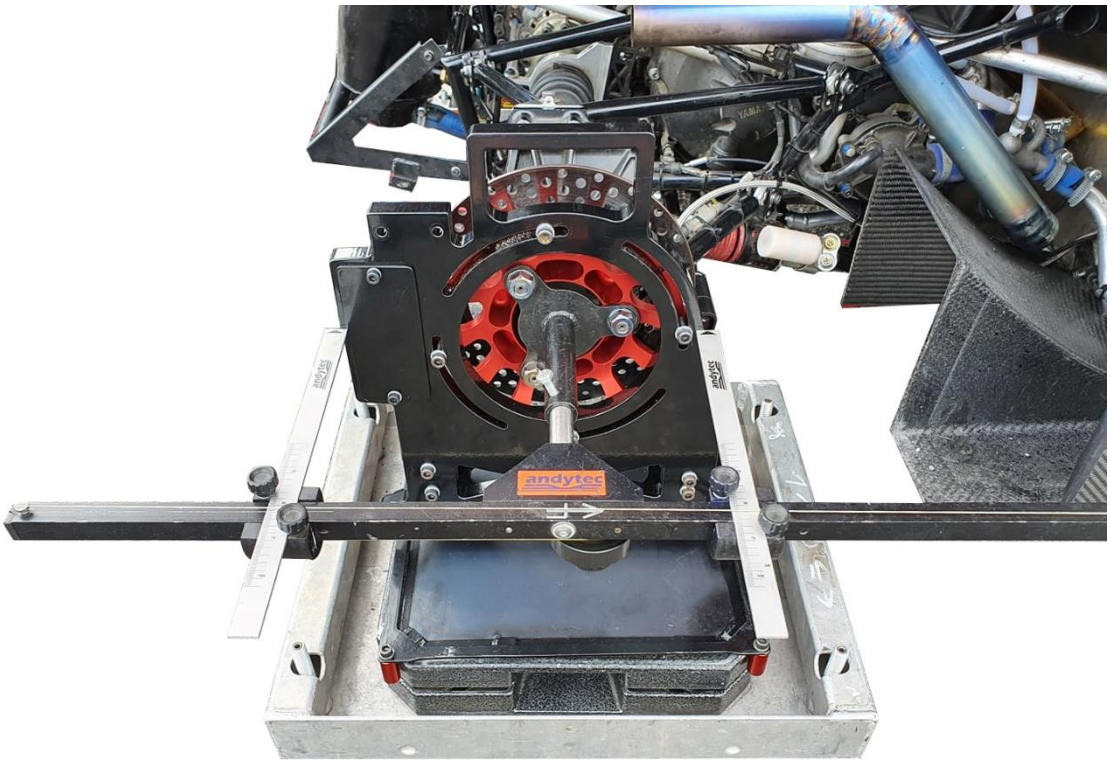


Obr. 85 Volný přístup k jednotlivým nastavovacím prvkům geometrie kol zadní nápravy (vespod nastavování sbíhavosti, uprostřed nastavování světlé výšky, nahoře nastavování odklonu)

Přesnost měření sbíhavosti kol (Obr. 86) je na novém měřícím přípravku zvýšena v porovnání s měřením sbíhavosti kol na kupovaných nepřesně vyrobených ráfcích vykazujících axiální házení.

Přesnost měření rozložení hmotnosti je díky identické váze všech přípravků zachována v toleranci ± 0,2 kg. Volný přístup k nastavovacím prvkům rozložení hmotnosti a světlé výšky je také zachován stejný jako při nastavování bez použití měřícího přípravku.

V neposlední řadě je pozitivním faktem, že nehrozí žádná kolize mezi měřícím přípravkem a formulí, přičemž nejmenší vůle se nachází mezi automobilovými váhami a bočními aerodynamickými prvky vozidla (Obr. 86). Dalším pozitivem je existence ručního úchytu, díky kterému se s přípravky pohodlně manipuluje.



Obr. 86 Měření sbíhavosti kol zadní nápravy provázkovou metodou pomocí nového měřícího přípravku

Na pomezí mezi pozitivy a negativy se nachází časová náročnost na přípravu měření. Na jednu stranu lze považovat delší přípravu na měření jako negativum, protože v porovnání s měřením bez přípravků se příprava přibližně o 5 – 10 minut prodlouží. Na druhou stranu lze považovat za pozitivum, že zmíněné prodloužení přípravy je výrazně menší než úspora času získaná díky měřícímu přípravku při následném nastavování geometrie kol. Lze konstatovat, že celkový čas potřebný na měření a nastavování geometrie náprav je s použitím nových měřících přípravků kratší, ačkoliv je příprava na měření nepatrně delší.

8.1.2 Funkční negativa

Nejvýznamnějším zjištěným negativem je reálná přesnost zakoupeného digitálního inklinometru, což ovšem není považováno za chybu konstrukce či koncepce měření, nýbrž za chybu výrobce přístroje. Digitální inklinometr DXL 360S za 2 500,- Kč neměří s přesností ± 0,05° uváděnou v technickém listě produktu. Řešením je nákup kvalitnějšího digitálního inklinometru, například přístroje TTL-90S od firmy JINGYAN s udávanou přesností dokonce ± 0,005° za 6 500,- Kč. [72] [73]

Za negativum lze pokládat nekompaktní tvar předních měřících přípravků (Obr. 87), které jsou kvůli zvolenému principu měření světlé výšky 0,65 m dlouhé a z důvodu rychlé montáže a opakovatelné přesnosti měření jsou navrženy jako nerozebíratelné. Řešením je návrh samostatného podlouhlého ramene s rychlou montáží a se zajištěním identické polohy při každém nasazení například pomocí středících čepů či lícovaných šroubů. Při současné koncepci je řešením koupě přepravních boxů s přesně vyřezanými molitanovými výplněmi, do kterých by se jednotlivé přípravky umísťovaly.

Obr. 87 Nekompaktní tvar předního měřícího přípravku

Posledním negativem je, že se z důvodu přechodu na bezkontaktní výuku nestihla otestovat funkčnost měření světlé výšky. Při prvním měření světlé výšky pomocí nového přípravku bude nutné vytvořit kalibrační křivky, pomocí kterých se při dalších měření bude převádět naměřená vzdálenost od přípravku k monokoku na skutečnou hodnotu světlé výšky. Díky této kalibraci budou probíhat všechna následující měření velmi rychle. Zavedení měření světlé výšky je v plánu na začátek závodní sezóny 2021.

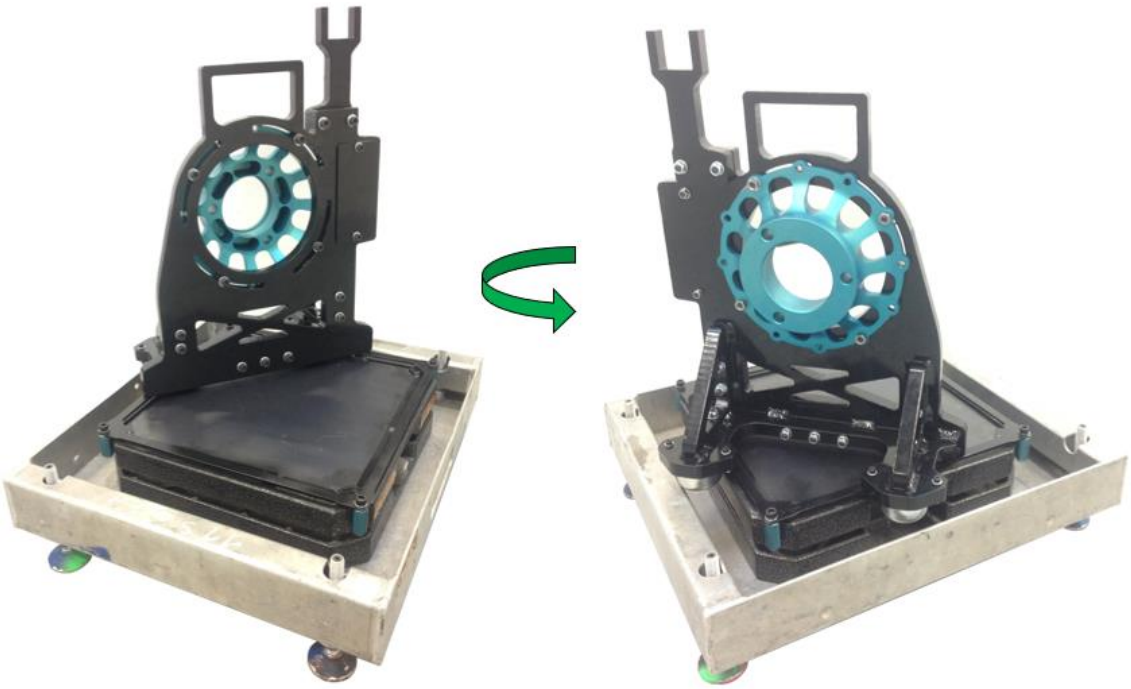
8.2 Výrobní zhodnocení

Vyrobený měřící přípravek je posouzen z technologického hlediska podle časové náročnosti na výrobu jednotlivých dílů a podle problémů vzniklých při výrobě či montáži. Navržená konstrukce je diskutována z hlediska vhodnosti pro řezání vodním paprskem, řezání laserem, svařování metodou TIG, vrtání, konvenční soustružení, eloxování, práškové lakování a jednoduchou montáž.

8.2.1 Výrobní pozitiva

CNC řezání dílů pro hliníkovou nosnou konstrukci pomocí vodního paprsku je považováno za vhodně zvolenou dělící technologii vzhledem k 15mm silnému materiálu. Výrobní přesnost vodního paprsku byla dostačující a k žádnému zkroucení řezaného polotovaru nedošlo. Demonstrujícím příkladem dostatečné přesnosti je montáž středu kola k hliníkové vertikální desce prostřednictvím 12 šroubových spojů (Obr. 87), kde nevznikl žádný montážní problém, ačkoliv je zvolena díra pro šrouby M6 menší než jemné řady, tedy pouze 6,1 mm.

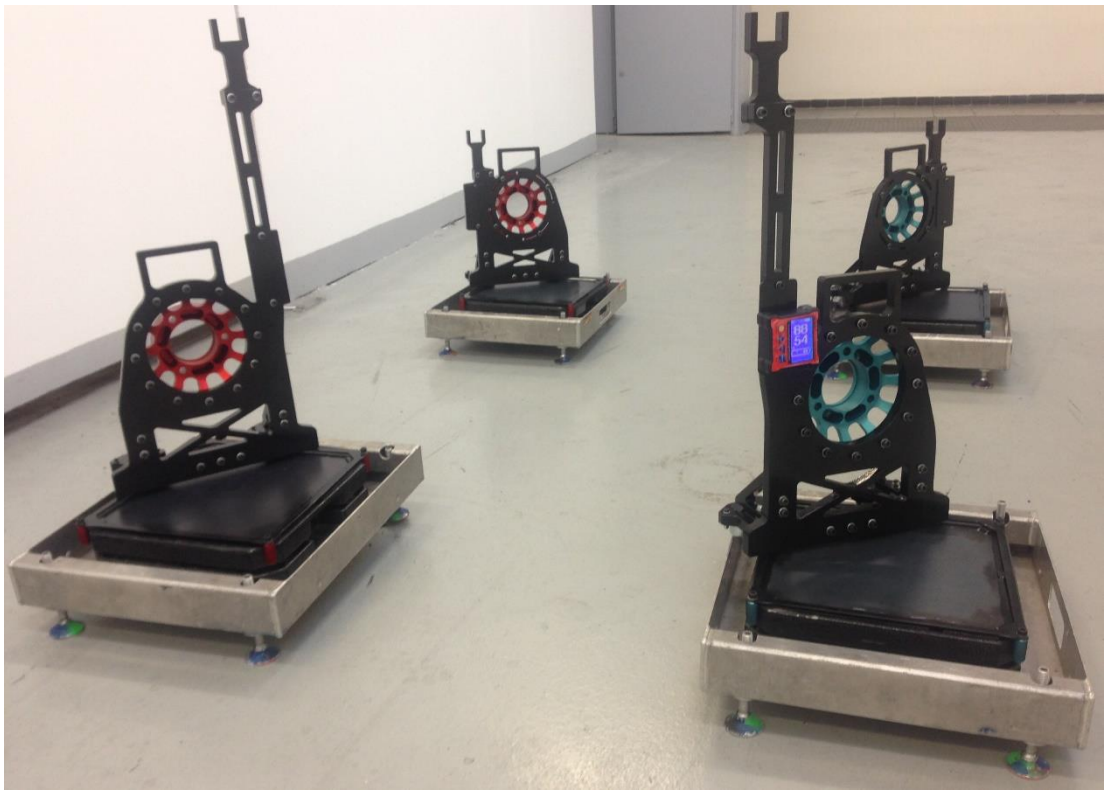
Vyřezání dílů pro ocelovou bezpečnostní ohrádku pomocí CNC laseru bylo také provedeno s dostatečnou výrobní přesností. K žádnému zkroucení řezaného polotovaru vlivem vneseného tepla nedošlo. Laserové řezání nijak neovlivnilo následující proces svařování bezpečnostní ohrádky.



Obr. 88 Samostatný měřící přípravek levého zadního kola v pohledu zepředu a zezadu

Ocelový držák digitálního inklinometru je navržen z ploché tyče pro jednoduchou výrobu realizovatelnou v dílně týmu CTU CarTech. Zkrácení polotovaru na požadovanou délku a vyvrtání děr pro šrouby bylo časově i technicky nenáročné. Výroba jednoho držáku trvala přibližně 15 minut.

Výroba hliníkových středících čepů proběhla na konvenčním soustruhu TOS SV 18 RA v dílně týmu CTU CarTech bez problémů. Časově nejnáročnější technologickou operací bylo ruční řezání závitu M6 pomocí ručního závitníku. Ostatní technologické operace proběhly značně rychleji, přičemž výrobní čas na jeden čep činil přibližně 20 minut. Výrobu středícího čepu lze považovat ze časově nenáročnou.



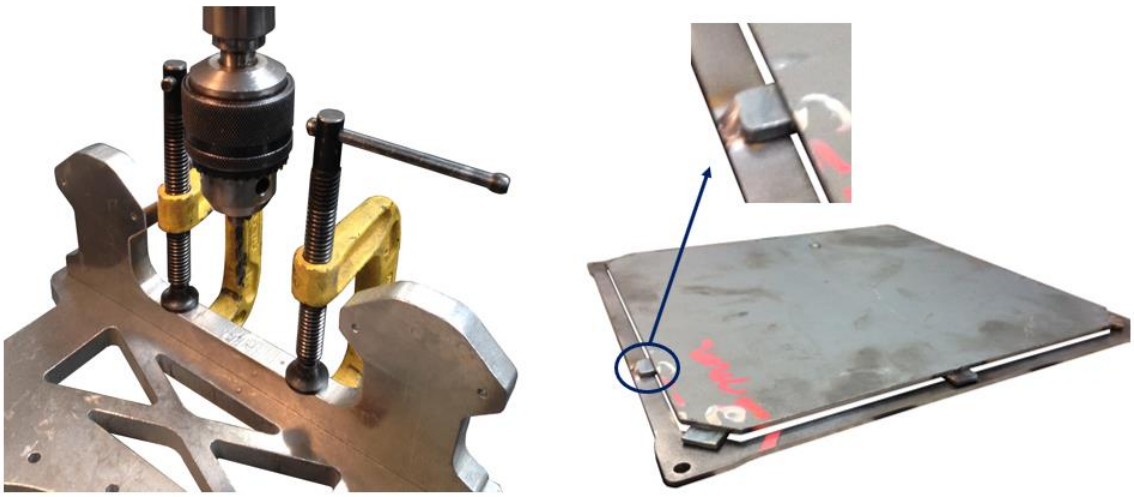
Obr. 89 Barevně sladěné přípravky pomocí povrchových úprav práškového lakování a přírodního eloxu

Z pohledu montáže a estetiky lze konstatovat, že zvolené povrchové úpravy (Obr. 89) splňují požadavky, které jsou na povrch měřícího přípravku kladeny. V průběhu montáže se nevyskytly žádné problémy způsobené 0,05 – 0,1 mm silnou vrstvou práškového laku, který efektně načernil všechna místa nosné konstrukce. Při eloxování středů kol a středících čepů nenastal žádný problém a tyto díly nevykazují žádné estetické vady, které se mohou například při eloxování svarů či poškrábaného povrchu vyskytnout.

8.2.2 Výrobní negativa

Časově nejnáročnější operací celé výroby měřícího přípravku bylo vrtání (Obr. 90) jednotlivých vyřezaných dílů hliníkové nosné konstrukce, které trvalo přibližně 20 hodin. Za konstrukční nedostatek lze v tomto případě považovat absenci pomocných technologických prvků, pomocí kterých by se jednotlivé díly nosné konstrukce před vrtáním připravily do přesné finální polohy a následně by se bez dalšího proměřování provrtaly a zajistily šroubovými spoji proti pohybu. Prvním řešením by byla úprava stávajících dílů nosné konstrukce, které by obsahovaly do sebe pasující otvory a výstupky. Druhým řešením by byl návrh dílu sloužícího jako technologický přípravek, který by zajištoval přesnou pozici všech dílů nosné konstrukce při vrtání i svařování.

Další časově náročnou operací bylo svařování bezpečnostní ohrádky, které kvůli náročné manipulaci s rozměrově malými díly (Obr. 90) trvalo téměř 3 hodiny. Za konstrukční nedostatek lze opět považovat absenci pomocných technologických prvků pro ustavení přesné pozice jednotlivých dílů před a během svařování. Řešením by byl návrh dodatečného technologického dílu, který by svým tvarem zajistil pozici jednotlivých obdélníkových distančních podložek a ostatních dílů bezpečnostní ohrádky.



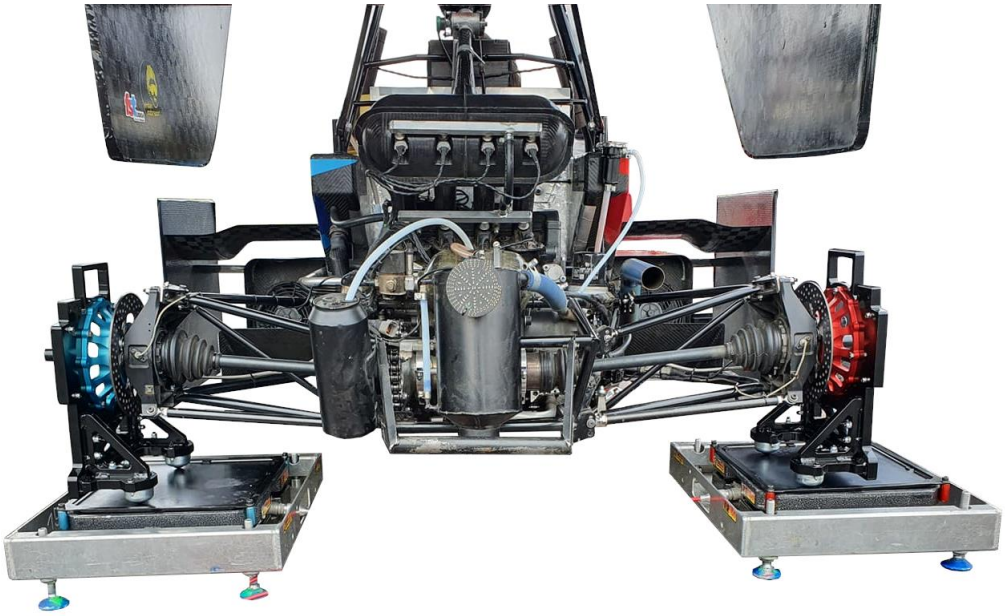
Obr. 90 Vlevo příklad časově náročného přesného upnutí dílů pomocí svěrek na sloupové vrtačce
Vpravo napozicované díly bezpečnostní ohrádky připravené na svaření metodou TIG

Za poslední výrobní nedostatek lze považovat mírné podřezání dosedacích ploch některých dílů nosné konstrukce vzniklé vlivem rozšiřování vodního paprsku při průchodu materiálem. Díky montáži za pomoci úhelníků je efekt podřezání eliminován, takže není ovlivněna přesnost měření náprav. Efektivním technologickým řešením při výrobě nového přípravku by bylo snížení řezné rychlosti při CNC řezání vodním paprskem.

8.3 Ekonomické zhodnocení

Konečné náklady spojené s výrobou měřícího přípravku jsou porovnány s odhadovanými náklady z kapitoly 6.3 Výpočet finančních nákladů. V závěru zmíněné kapitoly je uvedeno, že odhadované náklady na výrobu měřícího přípravku činí 10 200,- Kč, přičemž do odhadu nejsou započítány sponzorské dary a tato částka je nižší v porovnání s výrobou bez pomoci týmových sponzorů.

Evidované výrobní náklady na měřící přípravek činily podle tabulky uvedené níže (Tabulka 5) 10 847,- Kč, což je pouze o 6 % více než výše zmíněný odhad. Absolutní rozdíl mezi odhadovanými a skutečnými náklady činí 647,- Kč a je způsoben opomenutím dopravy polotovarů, dále opomenutím spreje na kov barvy RAL 9005 a opomenutím eloxování hliníkových dílů. Bez uvažování 20% rezervy při odhadu nákladů by byl rozdíl mezi odhadem a skutečností výrazně vyšší. Takto lze považovat původní odhad nákladů za velmi blízký skutečným evidovaným výrobním nákladům, které tým CTU CarTech vydal na výrobu měřícího přípravku.



Obr. 91 Výrobní náklady na všechny přípravky činily 10 847,- Kč (nezapočítána výroba u sponzorů)

Tabulka 5: Porovnání odhadovaných a skutečných výrobních nákladů

Název položky	**Odhad** (s pomocí sponzorů)	**Skutečnost**	**Jednotka**
Polotovary			
Hliníková deska na nosnou konstrukci	4 200,-	4 118,-	Kč
Hliníkové profily na měření světlé výšky	400,-	206,-	Kč
Hliníková kruhová tyč na středící čepy	100,-	76,-	Kč
Doprava hliníkových polotovarů přepravní firmou FOFR	Opomenuto	370,-	Kč
Ocelový plech na bezpečnostní ohrádku	400,-	518,-	Kč
Výrobní operace			
Řezání hliníku vodním paprskem	0,-	0,-	Kč
Řezání oceli laserem	0,-	0,-	Kč
Svařování hliníkové nosné konstrukce	0,-	0,-	Kč
Eloxování hliníkových dílů	Opomenuto	1 930,-	Kč
Práškové lakování	0,-	0,-	Kč
Sprej na lakování bezpečnostní ohrádky	Opomenuto	115,-	
Nakupované díly			
Digitální inklinometr	2 500,-	2 490,-	Kč
Kuličkové jednotky	900,-	1 024,-	Kč
Průběžný součet	**8 500,-**	**10 847,-**	**Kč**
Rezerva 20 %	1 700,-	0,-	Kč
Celkové náklady	**10 200,-**	**10 847,-**	**Kč**

Cena kupovaných měřících přípravků od anglické firmy B-G Racing obsahujících nosnou konstrukci a bezpečnostní ohrádku činí v přepočtu 70 000,- Kč za všechny čtyři přípravky. Zmíněné přípravky obsahují principiálně stejné díly, jaké jsou navrženy a vyrobeny pro tým CTU CarTech, tedy nosnou konstrukci a bezpečnostní ohrádku. Náklady na výrobu navržených měřících přípravků v rámci této diplomové práce jsou bez

jakékoliv sponzorské pomoci pouze 24 840,- Kč, přičemž vrtání, soustružení a svařování oceli bylo provedeno svépomocí, tedy s nulovými vloženými náklady. Se zahrnutím i těchto nákladů se výrobní cena pohybuje kolem 30 000,- Kč za všechny čtyři přípravky, což je stále méně než polovina z ceny přípravků od firmy B-G Racing. [74]

Obr. 92 Vlevo část přípravku firmy B-G Racing prodávaného za 70 000,- Kč [74]
Vpravo část přípravku navrženého pro tým CTU CarTech s odhadnutými celkovými výrobními náklady ve výši 30 000,- Kč

Protože je v případě týmu CTU CarTech návrh a výroba vlastního měřícího přípravku výrazně levnější než koupě existujícího přípravku, lze konstatovat, že se investice týmu do návrhu a výroby vyplatila. V případě výroby a prodeje dalších měřících přípravků navržených v rámci této diplomové práce by bylo vhodné do ceny promítnout také náklady na návrh přípravku, náklady na zakoupený software a připočítat marži k finální ceně výrobku.

9 Závěr

Cílem diplomové práce byl návrh měřícího přípravku, který zpřesní měření a nastavování geometrie kol, světlé výšky a rozložení hmotnosti vozu FS.12 a vozů dalších generací týmu CTU CarTech soutěžícího v závodech Formula Student. Hlavními požadavky na návrh nového měřícího přípravku byly vysoká přesnost měření (např. pro odklon ± 0,05°), odstranění problému s napružením pneumatik, rychlá montáž, pohodlný přístup k jednotlivým nastavovacím prvkům, vysoká tuhost konstrukce, levná výroba a kompaktní tvar.

V rešeršní části diplomové práce byly shrnuty pravidla soutěže Formula Student týkající se návrhu a nastavování náprav. Dále byly detailně popsány jednotlivé parametry podvozku se zaměřením na možnosti jejich nastavování a měření. Protože se přípravky na měření geometrie podvozku vyskytují u konkurenčních týmu soutěže Formula Student pouze zřídka, je rešerše stávajících řešení zaměřena na ostatní odvětví motorsportu, především na koncepčně podobnou formuli 1.

V praktické části diplomové práce byl prostřednictvím schématu nově navrženého přípravku vysvětlen princip měření. Dále byly z konstrukčního pohledu popsány jednotlivé díly měřícího přípravku a byla opodstatněna volba materiálů (EN AW 6060, 6063, 6082, S235 JR) jednotlivých dílů. Po vyrobení a otestování přípravku byla zhodnocena jeho konstrukce z funkčního pohledu, přičemž mezi nejvýznamnější pozitiva bylo zařazeno odstranění problému s napružením pneumatik, zlepšení přístupu k nastavovacím prvkům odklonu u všech kol a sbíhavosti u zadních kol, zvýšení přesnosti u měření sbíhavosti, zachování dostačující přesnosti u měření rozložení hmotnosti a pohodlná manipulace s přípravkem díky ručnímu úchytu. Jako hlavní funkční negativum byl stanoven technický stav zakoupeného digitálního inklinometru, protože jeho reálná přesnost neodpovídala údajům z technického listu. Jako další negativum byl zmíněn nekompaktní tvar podlouhlého předního přípravku a neotestování měření světlé výšky z důvodu přechodu na bezkontaktní výuku.

Pro zajištění bezpečného měření a nastavování náprav byly provedeny analytické výpočty ověřující bezpečnost přípravku vůči překlopení a bezpečnost přípravku vůči přejetí přes ohrádku automobilových vah například vlivem nechtěného kontaktu s obsluhou. Z důvodu bezpečnosti byl dále vypočten utahovací moment nejvíce namáhaného šroubového spoje (velikost M6, pevnost 8.8), který se nachází mezi středem kola a nosnou konstrukcí a který se započítáním koeficientu bezpečnosti činil 4,8 Nm. Pro ověření dostatečné pevnosti a tuhosti nosné konstrukce byl proveden MKP výpočet v programu ANSYS, který potvrdil bezpečnost konstrukce a vyvrátil nepřesnost měření způsobenou elastickou deformací přípravku. Prostřednictvím MKP výpočtu, při kterém byl simulován boční náraz kuličkových jednotek, byla zkontrolována pevnost bezpečnostní ohrádky. V neposlední řadě byla provedena analýza výrobních nákladů, které byly odhadnuty na 24 840,- Kč bez jakékoliv sponzorské pomoci a na 10 200,- Kč s uvažováním výroby některých dílů u týmových sponzorů. Evidované výrobní náklady činily 10 847,- Kč, což je pouze o 6 % více než původní odhad.

Dále byla v praktické části detailně popsána výroba měřícího přípravku i s doplňujícími podklady a fotografiemi z průběhu výroby. Jednotlivé technologické operace byly principiálně vysvětleny a byl odůvodněn jejich výběr. Pro vrtání, soustružení a svařování byla uvedena volba jednotlivých technologických parametrů a byly uvedeny technologické výpočty. Za hlavní pozitiva výroby byly považovány: volba dělení materiálu pomocí CNC vodního paprsku a CNC laseru, jednoduchost výroby některých dílů a vhodně zvolené povrchové úpravy, konkrétně práškové lakování a eloxování. Jako negativum se projevilo komplikované vrtání dílů nosné konstrukce a komplikované svařování bezpečnostní ohrádky, což by v obou případech vyřešil přídavný technologický přípravek pro přesné umístění dílů do finální pozice.

Zásadním přínosem nového měřícího přípravku pro tým CTU CarTech je přesnější, pohodlnější a rychlejší měření parametrů podvozku formule FS.12 a dalších generací vozů. Pozitivním zjištěním je, že odhadovaná výrobní cena přípravku bez účasti sponzorů a se započítáním práce provedené vlastnoručně (vrtání, soustružení, montáž) je přibližně 30 000,- Kč, což je výrazně méně než na trhu dostupný obdobný měřící přípravek firmy B-G Racing za 70 000,- Kč. Tímto se stává přesné a rychlé měření geometrie kol finančně dostupnějším i pro menší závodní týmy soutěžící v motorsportu. [74]

Následný vývoj měřícího přípravku by mohl směřovat ke zpřesnění měření světlé výšky uchycením dalšího pomocného přípravku za rám či monokok formule, vůči kterému by se světlá výška odečítala vždy ve stejném místě jako například ve formuli 1. Při návrhu nového přípravku by bylo vhodné vyřešit problém s kompaktností předního přípravku. Řešením by byl návrh oddělitelného ramene, jehož přesnou pozici by definovaly středící čepy či lícované šrouby. V neposlední řadě by bylo vhodné snížit hmotnost jednotlivých částí přípravku prostřednictvím topologické optimalizace pomocí některého z MKP softwarů.

Obr. 93 Ukázka z měření geometrie kol pomocí nového přípravku na formuli FS.12 týmu CTU CarTech

Seznam použité literatury

[1] *Formula Student Rules 2020*. Institution of Mechanical Engineers [online]. 2019 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: https://www.imeche.org/docs/default-source/1-oscar/formula-student/fs2020/rules/formulastudentrules2020.pdf?sfvrsn=2

[2] *DMU Racing* [online]. 12.6.2018 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: https://twitter.com/dmuracing/status/1006512301472735232

[3] GSCHEIDLE, Rolf, Iva MICHŇOVÁ a Zdeněk MICHŇA. *Příručka pro AUTOMECHANIKA*. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer GmbH & Co, 1999. ISBN 80-85920-76-X

[4] ERSOY, Metin a Stefan GIES. *Fahrwerkhandbuch*. 5. vydání. Springer Vieweg. ISBN 978-3-658-15467-7

[5] Podvozek vozidla. *Karl Service* [online]. 2018 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: http://www.karlservice.cz/service/mdl/info/podvozek-vozidla

[6] Dependent suspension system. *Mechanical Booster* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.mechanicalbooster.com/2017/12/suspension-system.html/dependent-suspension-system-1-2Starrachsen. *Ingenieurkurse* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.ingenieurkurse.de/fahrzeugtechnik/fahrwerk/radaufhaengung/bauformen-von-radaufhaengungen/starrachsen.html

[7] Starrachsen. *Ingenieurkurse* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.ingenieurkurse.de/fahrzeugtechnik/fahrwerk/radaufhaengung/bauformen-von-radaufhaengungen/starrachsen.html

[8] Independent suspension system. *Mechanical Booster* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.mechanicalbooster.com/2017/12/suspension-system.html/independent-suspension-system-1-2

[9] MacPherson vs Double Wishbone Suspension. *CarTreatments* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://cartreatments.com/pros-and-cons-of-macpherson-vs-double-wishbone-suspension/

[10] Einzelradaufhängungen am Auto - "Mehrlenkerachsen." *Swetzel* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: http://www.swetzel.ch/fahrztech/mehrlenker/mehrlenker.html#4

[11] Automobile Suspension Design 101 (Part II). *YouWheel* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: http://blogs.youwheel.com/2014/06/12/automobile-suspension-design-101-part-ii/

[12] Semi trailing arm. *Wikipedia* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:Axle_-_Semi_trailing-arm_23.svg

[13] Lichoběžníková náprava. *Autolexicon* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.autolexicon.net/cs/articles/lichobeznikova-naprava/

[14] Analysis of a FSAE suspension system. *Multibody* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: http://www.multibody.net/teaching/msms/students-projects-2014/analysis-of-a-fsae-suspension-system/

[15] BASTOW, Donald, Geoggrey HOWARD a John. P. WHITEHEAD. *Car Suspension and Handling*. Fourth Editon. USA: SAE International. ISBN 0-7680-0872-7

[16] Odklon kol. *Brno Racing Team 2011* [online]. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://brnoracingteam.webnode.cz/nastaveni-vozu-rbr/odklon-kol/

[17] The positives of negative camber. *APEX* [online]. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://www.apexraceparts.com/blog/the-positives-of-negative-camber/

[18] Wheel Alignment Belfast. *McCabeAutos* [online]. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: https://www.mccabeautos.co.uk/wheel-alignment.php

[19] Geometrie kol. *Autoslužby Kříž* [online]. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: http://www.autosluzbykriz.cz/index.php/geometrie-kol

[20] LIVESSEY, Andrew. *Basic Motorsport Engineering*: Units for Study at Level 2. Great Britain: Butterworth-Heinemann, 2011. ISBN 978-0-75-068909-0

[21] Toe. *Formula 1 Dictionary* [online]. [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: http://www.formula1-dictionary.net/toe.html
[22] Terms of the chassis measurement. *Dieters Rover MGF und MG TF Technik Site* [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: https://www.mgfcar.de/tracking/ebleein.htm
[23] Why Some Cars Look Like They're Driving Sideways Down The Road. *Jalopnik* [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: https://jalopnik.com/why-some-cars-look-like-theyre-driving-sideways-down-th-1828527664
[24] TIRE TECH: ALIGNMENT. *Tirerack* [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: https://www.tirerack.com/tires/tiretech/techpage.jsp?techid=4
[25] PAKKALA, John. E. *A vehicle dynamics and simulation tool for capstone projects* [online]. 2011 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://peer.asee.org/a-vehicle-dynamics-design-and-simulation-tool-for-capstone-projects.pdf. Milwaukee School of Engineering.
[26] Světlá výška vozu. *Autolexicon* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.autolexicon.net/cs/articles/svetla-vyska-vozu/
[27] What is Car Ground Clearance & Why It Matters. *Groundclearances* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://groundclearances.com/
[28] The importance of ride height. *F1Technical* [online]. 2002 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.f1technical.net/features/10682
[29] Coilover. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Coilover
[30] Kompletní výškově stavitelný podvozek KW Varianta 1 INOX pro vůz Honda Civic, CRX s uchycením tlumiče na vidlici. *Tuning Car Design* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.tuningcardesign.cz/kompletni-vyskove-stavitelny-podvozek-kw-varianta-1-inox-pro-vuz-honda-civic-crx-s-uchycenim-tlumice-na-vidlici-10-95/
[31] Sportovní výškově a tuhostně stavitelný podvozek HSD Monopro pro BMW E36 + zadní True coilover. *All4Drift* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.all4drift.cz/p/387/sportovni-vyskove-a-tuhostne-stavitelny-podvozek-hsd-monopro-pro-bmw-e36-zadni-true-coilover
[32] *PistonHeads* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://www.pistonheads.com/gassing/topic.asp?h=0&f=136&t=1277293
[33] Renault Clio Symbol. *The-Blueprints* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://www.the-blueprints.com/index.php?blueprints/cars/renault/17873/view/renault_clio_symbol/
[34] Marketing, physics and busting the 50:50 weight balance myth. *Practical MOTORING* [online]. 2016 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://practicalmotoring.com.au/voices/marketing-physics-and-busting-the-5050-weight-balance-myth/
[35] REICHL, Jaroslav. Piruety krasobruslařů a moment setrvačnosti tuhého tělesa. *Metodický portál RVP* [online]. 2010 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://clanky.rvp.cz/clanek/s/G/9257/PIRUETY-KRASOBRUSLARU-A-MOMENT-SETRVACNOSTI-TUHEHO-TELESA.html/
[36] How To Corner Balance. *Elephant Racing* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://www.elephantracing.com/tech-topics/corner-balance/
[37] Honda Civic Type-R 2017 Blueprint. *Blueprints* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://drawingdatabase.com/honda-civic-type-r-2017/
[38] EVODYNAMICS Ultimate Suspension Data Thread. *Evolutionm* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://www.evolutionm.net/forums/motor-sports/682947-evodynamics-ultimate-suspension-data-thread.html
[39] Dialing in Optimal Weight Distribution | Balancing Act. *DSPORT: Performance + Tech Magazine* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://dsportmag.com/the-tech/dialing-in-optimal-weight-distribution-balancing-act/
[40] Understanding Corner Weights. *Grassroots Motorsports* [online]. 2019 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://grassrootsmotorsports.com/articles/understanding-corner-weights/

[41] What accuracy needed to DIY alignment & what tool at ~$250? *Toyota 4Runne*r [online]. 2010 [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: https://www.toyota-4runner.org/3rd-gen-t4rs/121794-where-do-you-buy-your-tools-checking-front-camber-home-your-4runner.html
[42] S2000 Alignment. *Robrobinette* [online]. [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: https://robrobinette.com/S2000Alignment.htm
[43] Camber Angle: Basic Concepts. *Legendary motorsport* [online]. [cit. 2020-09-13]. Dostupné z: http://legendary-motorsport.e-monsite.com/pages/camber-angle-basic-concepts.html
[44] ALIGNMENTS: DIY OPTIONS, PROFESSIONAL RESULTS. *Tracktuned* [online]. 13.11. 2015 [cit. 2020-09-14]. Dostupné z: http://www.tracktuned.com/feed/2015/11/10/alignments-diy-options-professional-results
[45] Ackerman? Anti-Ackerman? Or Parallel Steering? *College of Engineering Alabama Mechanical Engineering* [online]. [cit. 2020-09-14]. Dostupné z: https://www.me.ua.edu/me364/PDF/Steering_Ackerman.pdf
[46] DIY Wheel Alignment It is easier than you think. *Speed Academy* [online]. 3.12. 2014 [cit. 2020-09-14]. Dostupné z: http://speed.academy/diy-wheel-alignment-how-to-guide-explained/2/
[47] DIY Alignment Calculator. *Robrobinette* [online]. [cit. 2020-09-14]. Dostupné z: https://robrobinette.com/DIYAlignmentCalculator.htm
[48] Ken Gushi. *Facebook* [online]. [cit. 2020-09-14]. Dostupné z: https://www.facebook.com/kengushi/photos/i-love-how-these-alignment-smart-strings-make-my-toyotausa-86-look-like-a-race-m/10156442762978222/
[49] F1 Toe measurement. *F1 Technical* [online]. 24.8. 2012 [cit. 2020-09-14]. Dostupné z: https://www.f1technical.net/forum/viewtopic.php?t=13334
[50] NOBLE, Jonathan. FIA summons Toro Rosso over 'unsafe' car. *Motorsport* [online]. 13.7. 2017 [cit. 2020-09-16]. Dostupné z: https://www.motorsport.com/f1/news/toro-rosso-investigation-british-gp-930103/930103/
[51] Red Bull Racing. *F1 Encyclopedia* [online]. [cit. 2020-09-16]. Dostupné z: https://sidepodcast.com/f1-team/red-bull
[52] BRADLEY, Charles. Russian GP: Best images from Sochi on Thursday. *Motorsport* [online]. 26.9 .2019 [cit. 2020-09-16]. Dostupné z: https://www.motorsport.com/f1/news/russian-grand-prix-best-images-sochi/4548324/#gal-4548324-p0-max-verstappen-red-bull-racing--46010115
[53] COLLINS, Sam. Red Bull RB9. *Racecar Engineering* [online]. 2013 [cit. 2020-09-16]. Dostupné z: https://www.racecar-engineering.com/cars/red-bull-rb9/
[54] Longacre Accuset II Scale Kit. *Amazon* [online]. [cit. 2020-09-17]. Dostupné z: https://www.amazon.com/Longacre-52-72593-Computer-Scales-AccuSetII/dp/B007W37QXM
[55] Popis stavu. *Alumeco* [online]. [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: https://www.alumeco.cz/technick%C3%A9-informace/%C3%BAdaje-o-hlin%C3%ADku/popis-stavu
[56] Slitiny hliníku. *Ehlinik* [online]. [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: https://www.ehlinik.cz/prilohy/zakladni-technicke-informace.pdf
[57] Ocel. *Alfun* [online]. [cit. 2020-10-02]. Dostupné z: http://www.alfun.cz/ocel
[58] *Strojnické tabulky*. 5. Úvaly: ALBRA, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4
[59] Předepjatý šroubový spoj. *MITCalc* [online]. [cit. 2020-10-22]. Dostupné z: https://www.mitcalc.cz/doc/boltcon/help/cz/boltcontxt.htm
[60] *Části a mechanismy strojů: spoje a části spojovací*. České vysoké učení technické, 2002. ISBN 9788001025338
[61] Utahovací momenty šroubů. *BRIOL spojovací materiály* [online]. [cit. 2020-10-24]. Dostupné z: https://www.briol.cz/technicke-informace/utahovaci-momenty-sroubu
[62] Contact Types and Behaviours in Ansys. *MECHEAD* [online]. 2018 [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: http://www.mechead.com/contact-types-and-behaviours-in-ansys/

[63] JOSEF, Jurenka. Přístupy predikce únavové životnosti svařovaných konstrukcí [online]. [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/DPZ/DPZ_welds_web.pdf. Fakulta strojní, ČVUT v Praze

[64] Řezání vodním paprskem. *KT MetSteel* [online]. [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: https://www.ktmetsteel.cz/rezani-vodnim-paprskem

[65] Hliník a možnosti jeho svařování. *Konstrukce* [online]. 2014 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: http://old.konstrukce.cz/clanek/hlinik-a-moznosti-jeho-svarovani/

[66] Práškové lakován. *Forman-Benes* [online]. [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: http://www.forman-benes.cz/praskove-lakovani

[67] Tvrdé eloxování. *Rosma* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: https://rosma.cz/galvanovna/tvrde-eloxovani

[68] Eloxování. *BOMEX* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: https://www.bomex.cz/technologie/eloxovani

[69] Jak pracuje laserový řezací stroj? *CHPS* [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: http://www.chps.cz/rezani-laserem/technologie

[70] REMEŠOVÁ, MICHAELA. *ANODICKÁ OXIDACE HLINÍKU A JEHO SLITIN* [online]. Brno, 2013 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65435. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. LADISLAV ČELKO, Ph.D.

[71] Svařování TIG - seznámení. *SVÁŘEČKY-ELEKTRODY* [online]. [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-39/t-120

[72] DXL360S HIGH-PRECISION DUAL AXIS DIGITAL LCD ANGLE PROTRACTOR DUAL-AXIS ANGLE LEVEL GAUGE WITH 5 SIDE MAGNETIC BASE. *Alexnld* [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: https://alexnld.com/product/dxl360s-high-precision-dual-axis-digital-lcd-angle-protractor-dual-axis-angle-level-gauge-with-5-side-magnetic-base/

[73] TLL-90S SUPER HIGH PRECISION ANGLE METER 0.005 PROFESSIONAL DIGITAL DUAL-AXIS LASER LEVEL INCLINOMETER WITH LCD DISPLAY 100-240V 50-60HZ. *Alexnld* [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: https://alexnld.com/product/tll-90s-super-high-precision-angle-meter-0-005-professional-digital-dual-axis-laser-level-inclinometer-with-lcd-display-100-240v-50-60hz/

[74] B-G RACING - HUB STANDS KIT. *B-G Racing* [online]. [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: https://www.bg-racing.co.uk/bg-racing-products/set-up-equipment-products/B-G-Racing-Hub-Stands-Kit?limit=100

Seznam obrázků

Obr. 1 Vůz FS.12 týmu CTU CarTech určený k nové metodice měření podvozku (závodní sezóna 2020) - 14 -
Obr. 2 Rychlozvedák týmu DMU Racing z roku 2018 [2] - 16 -
Obr. 3 Hlavní části nápravy znázorněné na příkladu lichoběžníkové nápravy [5] - 17 -
Obr. 4 Souřadnicový systém vozidla podle ISO 88551.3 / DIN 70000 pro popis jízdní dynamika [25] - 18 -
Obr. 5 Vlevo schéma závislého zavěšení při přejetí nerovnosti. [6] Vpravo CAD model tuhé nápravy [7] - 19 -
Obr. 6 Schéma nezávislého zavěšení kol při přejetí nerovnosti [8] - 19 -
Obr. 7 Jednotlivá provedení nezávislého zavěšení kol - 20 -
Obr. 8 Vlevo kinematické schéma lichoběžníkové nápravy při pohledu zpředu. [13] Vpravo CAD model lichoběžníkové nápravy týmu z Padovské univerzity [14] - 20 -
Obr. 9 Pól klopení levého/pravého kola a karoserie lichoběžníkové nápravy [4] - 21 -
Obr. 10 Pól klonění karoserie vytvořený z pólu klonění přední a zadní lichoběžníkové nápravy [4] - 21 -
Obr. 11 Pozitivní a negativní odklon kola [16] - 22 -
Obr. 12 Zpětné teplotní a vizuální zanalyzování nastaveného odklonu kola [17] [18] (1 – zahřívání pneumatiky na vnitřní straně běhounu vlivem příliš velkého negativního odklonu) (2 – zahřívání pneumatiky na vnější straně běhounu vlivem příliš malého negativního odklonu) (3 – viditelné opotřebení vnitřní strany běhounu vlivem příliš velkého negativního odklonu) - 23 -
Obr. 13 Vlevo znázorněna sbíhavost a vpravo rozbíhavost kol [19] - 24 -
Obr. 14 Vlevo analyzování nastavené sbíhavosti kol. Uprostřed a vpravo vliv tlaku v pneumatice [18] - 25 -
Obr. 15 Podélnou rovinu vozidla tvoří středy rozchodů kol - 25 -
Obr. 16 Geometrickou osu jízdy tvoří osa úhlu středních rovin kol zadní nápravy - 26 -
Obr. 17 Příklad rozhozené geometrie kol zadní nápravy [22] - 26 -
Obr. 18 Šikmá jízda vozidla vzniklá vlivem poškozené geometrie kol (1 – šikmá jízda pick-upu, 2 – pozitivní „thrust angle“, 3 – negativní „thrust angle“) [23] - 27 -
Obr. 19 Vlevo znázorněna světlá výška. [27] Vpravo definována střední část automobilu [26] - 27 -
Obr. 20 Snížení světlé výšky vozidla přechodem na nízkoprofilové pneumatiky - 28 -
Obr. 21 Vlevo výškově stavitelný tlumič. [30] Vpravo výškově a tuhostně stavitelný tlumič [31] - 29 -
Obr. 22 Nastavení světlé výšky pomocí délky tažné tyče (pullrodu) na nápravě týmu CTU CarTech - 29 -
Obr. 23 Rozložení hmotnosti mezi přední a zadní nápravu [32] - 30 -
Obr. 24 Rozmístění hmoty podél a napříč vozidlem a jeho vliv na agilitu [33] - 31 -
Obr. 25 Vlevo znázornění obvyklého označování kol na automobilových váhách. [37] Vpravo automobilová váha COMPUTERSCALES AccuSet II [38] - 32 -
Obr. 26 Znázornění a výpočet diagonální hmotnosti [37] - 33 -
Obr. 27 Příklad nastavování diagonální hmotnosti. Snížení zatížení kol na jedné diagonále (RF+LR) vede ke zvýšení zatížení kol na druhé diagonále (LF+RR) [37] - 34 -
Obr. 28 Znázornění a výpočet boční hmotnosti [37] - 35 -
Obr. 29 Znázornění a výpočet zadní hmotnosti [37] - 36 -
Obr. 30 Vlevo princip měření odklonu kol. [43] Uprostřed měření odklonu kola na brzdovém kotouči. [41] Vpravo měření odklonu kola na ráfku [42] - 38 -
Obr. 31 Vlevo schéma provázkové metody s konstrukcí pro uchycení přípravků ke karoserii. [44] Vpravo princip měření sbíhavosti předních kol pomocí provázkové metody [45] - 39 -
Obr. 32 Vlevo měření vzdálenosti ráfku od provázku v přední a zadní části kola. [46] Vpravo zpracování dat z fiktivního měření sbíhavosti kol pomocí online kalkulátoru [47] - 39 -
Obr. 33 Příklady měření sbíhavosti kol pomocí provázkové metody (Vlevo konstrukce pro držení provázků uchycená za karoserii automobilu Toyota GT86 [48]) (Vpravo konstrukce pro držení provázků formou kovového stojanu týmu Ferrari [49]) - 40 -

OBR. 34 VLEVO PRINCIP MĚŘENÍ SVĚTLÉ VÝŠKY U VOZŮ FORMULOVÉHO TYPU. [50] VPRAVO PŘÍPRAVKY PRO MĚŘENÍ SVĚTLÉ VÝŠKY TÝMU RED BULL RACING [51] ..... - 41 -
OBR. 35 VLEVO PŘÍPRAVKY PRO MĚŘENÍ SVĚTLÉ VÝŠKY TÝMU MERCEDES-AMG PETRONAS. [52] VPRAVO OZNAČENÁ ČÁST PŘÍPRAVKU PRO ODMĚŘOVÁNÍ VZDÁLENOSTI TÝMU RED BULL RACING [53] ..... - 41 -
OBR. 36 VLEVO AUTOMOBILOVÉ VÁHY COMPUTERSCALES ACCUSET II BASIC SYSTÉM OD FIRMY LONGACRE. [54] VPRAVO MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ HMOTNOSTI POMOCÍ AUTOMOBILOVÝCH VAH NA VOZIDLE MAZDA MX-5 [39] ..... - 42 -
OBR. 37 SCHÉMA SLOUŽÍCÍ JAKO VÝCHOZÍ PODKLAD PRO VÝVOJ KONSTRUKCE PŘÍPRAVKU ..... - 45 -
OBR. 38 FINÁLNÍ KONSTRUKČNÍ NÁVRH MĚŘÍCÍHO PŘÍPRAVKU ..... - 46 -
OBR. 39 NOSNÉ KONSTRUKCE PRO PŘEDNÍ LEVÉ ZAVĚŠENÍ S NAMONTOVANÝMI MĚŘÍCÍMI KOMPONENTY ..... - 47 -
OBR. 40 SEZNAM KOMPONENT TRVALE PŘIŠROUBOVANÝCH K NOSNÉ KONSTRUKCI (ZLEVA PLECH S INKLINOMETREM, POUŽITÝ STŘED KOLA, DRŽÁK PROFILU SVĚTLÉ VÝŠKY, KULIČKOVÁ JEDNOTKA) ..... - 47 -
OBR. 41 NÁVRH VELIKOSTI ŽEBRA S OHLEDEM NA PROSTOROVÉ MOŽNOSTI A OBLAST OHYBU VERTIKÁLNÍ DESKY ..... - 48 -
OBR. 42 POPIS JIŽ OSVĚDČENÉHO PŘÍPRAVKU NA MĚŘENÍ SBÍHAVOSTI KOL ..... - 49 -
OBR. 43 CHRONOLOGICKÝ VÝVOJ KONSTRUKČNÍHO NÁVRHU ..... - 49 -
OBR. 44 KONSTRUKČNÍ NÁVRH SESTAVY AUTOMOBILOVÉ VÁHY ..... - 50 -
OBR. 45 KONSTRUKČNÍ NÁVRH SVAŘOVANÉ OHRÁDKY VLEVO A SOUSTRUŽENÉHO STŘEDÍCÍHO ČEPU VPRAVO ..... - 50 -
OBR. 46 ZVOLENÉ MATERIÁLY PRO NAVRHOVANOU ČÁST MĚŘÍCÍHO PŘÍPRAVKU ..... - 51 -
OBR. 47 ZNÁZORNĚNÍ PŘEKLOPENÍ PŘÍPRAVKU VLIVEM PŮSOBENÍ VNĚJŠÍ SÍLY $F_{KLOPENÍ}$ ..... - 53 -
OBR. 48 VLEVO GRAFICKÝ ROZBOR SIL PŘI PŮSOBENÍ KLOPÍCÍ SÍLY $F_{KLOPENÍ}$. VPRAVO ROZMĚRY POTŘEBNÉ K VÝPOČTU ..... - 54 -
OBR. 49 ZNÁZORNĚNÍ PŘEJETÍ PŘÍPRAVKU PŘES BEZPEČNOSTNÍ OHRÁDKU VLIVEM PŮSOBENÍ VNĚJŠÍ SÍLY $F_{PŘEJETÍ}$ ..... - 56 -
OBR. 50 GRAFICKÝ ROZBOR SIL PŘI PŘEJÍŽDĚNÍ BEZPEČNOSTNÍ OHRÁDKY ..... - 56 -
OBR. 51 VLEVO ZAKROUŽKOVÁN KONTROLOVANÝ ŠROUBOVÝ SPOJ. VPRAVO POPIS JEHO JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ ..... - 58 -
OBR. 52 GRAFICKÝ ROZBOR SIL PRO VÝPOČET POTŘEBNÉHO PŘEDPĚTÍ ŠROUBU $Q_{0\,ŠROUB}$ ..... - 60 -
OBR. 53 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VÝPOČTU TŘECÍHO MOMENTU POD HLAVOU ŠROUBU POMOCÍ PŮSOBIŠTĚ TŘECÍ SÍLY ..... - 61 -
OBR. 54 ROZVIN ZÁVITU O STŘEDNÍM PRŮMĚRU ŠROUBU D_2 MEZI STEJNOLEHLÝMI BODY AB ..... - 62 -
OBR. 55 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VÝPOČTU TŘECÍHO MOMENTU V ZÁVITECH POMOCÍ PŮSOBIŠTĚ TŘECÍ SÍLY ..... - 63 -
OBR. 56 VLEVO CAD MODEL NOSNÉ KONSTRUKCE PODPÍRAJÍCÍ FORMULI. VPRAVO SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZATÍŽENÍ A UCHYCENÍ NOSNÉ KONSTRUKCE V MKP VÝPOČTU ..... - 65 -
OBR. 57 VLEVO CAD MODEL V CATIA V5 ZJEDNODUŠENÝ PRO MKP VÝPOČET V ANSYSU VPRAVO ..... - 66 -
OBR. 58 VLEVO ZNÁZORNĚNÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK, KONTAKTŮ A ZATÍŽENÍ. VPRAVO SÍŤ A ZVOLENÝ TYP ELEMENTŮ ..... - 67 -
OBR. 59 MKP ANALÝZA NOSNÉ KONSTRUKCE [HODNOTY V MPA] S HORNÍ HRANICÍ NAPĚŤOVÉ LEGENDY ROVNÉ MEZI KLUZU HLINÍKU EN AW 6082 (240 MPA) ..... - 68 -
OBR. 60 MKP ANALÝZA NOSNÉ KONSTRUKCE [HODNOTY V MPA] S HORNÍ HRANICÍ NAPĚŤOVÉ LEGENDY ROVNÉ MAXIMÁLNÍMU NAPĚTÍ V SOUČÁSTI (95,3 MPA) ..... - 69 -
OBR. 61 VLEVO NAPĚŤOVÁ ANALÝZA [MPA] ZDEFORMOVANÉ NOSNÉ KONSTRUKCE S MĚŘÍTKEM DEFORMACE 72. VPRAVO VÝSLEDKY Z POMĚRNÉ DEFORMACE S MAXIMY VE STEJNÝCH MÍSTECH JAKO MAXIMA NAPĚTÍ ..... - 70 -
OBR. 62 VLEVO DEFORMACE NOSNÉ KONSTRUKCE [MM] VE SMĚRU OSY *Y*. VPRAVO DEFORMACE VE SMĚRU OSY *Z*. ..... - 71 -
OBR. 63 VLEVO ZNÁZORNĚNÍ NÁRAZU NOSNÉ KONSTRUKCE DO KRAJE BEZPEČNOSTNÍ OHRÁDKY. VPRAVO SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZATÍŽENÍ A UCHYCENÍ BEZPEČNOSTNÍ OHRÁDKY V MKP VÝPOČTU ..... - 72 -
OBR. 64 VLEVO CAD MODEL V CATIA V5 ZJEDNODUŠENÝ PRO MKP VÝPOČET V ANSYSU VPRAVO ..... - 72 -
OBR. 65 SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK A ZATÍŽENÍ PRO MKP ANALÝZU BEZPEČNOSTNÍ OHRÁDKY ..... - 73 -
OBR. 66 SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ POUŽITÝCH KONTAKTŮ V MKP ANALÝZE BEZPEČNOSTNÍ OHRÁDKY ..... - 74 -
OBR. 67 ZVOLENÝ TYP A VELIKOST SÍTĚ NA JEDNOTLIVÝCH DÍLECH BEZPEČNOSTNÍ OHRÁDKY ..... - 74 -
OBR. 68 MKP ANALÝZA BEZPEČNOSTNÍ OHRÁDKY (ČERVENÁ BARVA ZNAČÍ NAPĚTÍ PŘESAHUJÍCÍ MEZ KLUZU) ..... - 75 -
OBR. 69 MKP ANALÝZA STŘEDÍCÍHO ČEPU (ČERVENÁ BARVA ZNAČÍ NAPĚTÍ PŘESAHUJÍCÍ MEZ KLUZU) ..... - 76 -
OBR. 70 VLEVO MKP VÝSLEDKY PRO FUNKCI *STATUS*. VPRAVO PRO FUNKCI *PENETRATION* ..... - 76 -
OBR. 71 DÍLY VSTUPUJÍCÍ DO VÝPOČTU FINANČNÍCH NÁKLADŮ ..... - 77 -

OBR. 72 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VYRÁBĚNÝCH DÍLŮ POTŘEBNÝCH PRO MONTÁŽ MĚŘÍCÍHO PŘÍPRAVKU (VLEVO PŘÍPRAVEK PRO LEVÉ PŘEDNÍ KOLO, VPRAVO PŘÍPRAVEK PRO LEVÉ ZADNÍ KOLO) ..... - 79 -
OBR. 73 VLEVO PŘÍKLAD VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE PRO CNC ŘEZÁNÍ VODNÍM PAPRSKEM VE FORMÁTU .DXF VPRAVO VYŘEZANÉ DÍLY VODNÍM PAPRSKEM NÁSLEDNĚ POUŽITÉ PRO HLINÍKOVÝ SVAŘENEC NOSNÉ KONSTRUKCE ..... - 80 -
OBR. 74 OMÍLÁNÍ JEDNOTLIVÝCH DÍLŮ NOSNÉ KONSTRUKCE V KRUHOVÉ VIBRAČNÍ OMÍLAČCE ..... - 81 -
OBR. 75 VÝROBA NOSNÉ KONSTRUKCE OD VRTÁNÍ DĚR (VLEVO) PO PRÁŠKOVÉ LAKOVÁNÍ SVAŘENCE (VPRAVO) ..... - 82 -
OBR. 76 DŮKLADNÉ ODMAŠTĚNÍ A NÁSLEDNÉ PŘÍRODNÍ ELOXOVÁNÍ STŘEDŮ KOL PŘEVZATÝCH Z VOZU FS.11 ..... - 83 -
OBR. 77 VLEVO VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE PRO VÝROBU PLECHU PRO UCHYCENÍ DIGITÁLNÍHO INKLINOMETRU. VPRAVO ODJEHLENÝ A ODMAŠTĚNÝ DÍL PŘIPRAVENÝ NA PRÁŠKOVÉ LAKOVÁNÍ ČERNOU BARVOU ..... - 84 -
OBR. 78 MONTÁŽ NOSNÉ KONSTRUKCE MĚŘÍCÍHO PŘÍPRAVKU PRO LEVÉ PŘEDNÍ A PRAVÉ PŘEDNÍ KOLO ..... - 85 -
OBR. 79 VLEVO PŘÍKLAD VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE PRO CNC ŘEZÁNÍ LASEREM VE FORMÁTU .DXF VPRAVO VYŘEZANÉ DÍLY CNC LASEREM NÁSLEDNĚ POUŽITÉ PRO OCELOVÝ SVAŘENEC BEZPEČNOSTNÍ OHRÁDKY ..... - 86 -
OBR. 80 VLEVO SVAŘOVÁNÍ BEZPEČNOSTNÍ OHRÁDKY METODOU TIG V DÍLNĚ TÝMU CTU CARTECH. VPRAVO POVRCHOVÁ ÚPRAVA SVAŘENÉ BEZPEČNOSTNÍ OHRÁDKY POMOCÍ SPREJE NA KOV BARVOU RAL 9005 ..... - 87 -
OBR. 81 VLEVO VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE PRO VÝROBU HLINÍKOVÉHO STŘEDÍCÍHO ČEPU. VPRAVO ŘEZÁNÍ ZÁVITU M6 POMOCÍ RUČNÍHO ZÁVITNÍKU VYSTŘEDĚNÉHO KONÍKEM SOUSTRUHU ..... - 88 -
OBR. 82 VLEVO OBROBENÉ HLINÍKOVÉ STŘEDÍCÍ ČEPY NA KONVENČNÍM SOUSTRUHU V DÍLNĚ TÝMU CTU CARTECH VPRAVO STŘEDÍCÍ ČEPY PO ABSOLVOVÁNÍ POVRCHOVÉ ÚPRAVY PŘÍRODNÍM ELOXOVÁNÍM ..... - 89 -
OBR. 83 SMONTOVANÁ BEZPEČNOSTNÍ OHRÁDKA PRO PRAVÉ PŘEDNÍ KOLO ..... - 90 -
OBR. 84 PRVNÍ MĚŘENÍ GEOMETRIE KOL POMOCÍ NOVÉHO MĚŘÍCÍHO PŘÍPRAVKU ..... - 91 -
OBR. 85 VOLNÝ PŘÍSTUP K JEDNOTLIVÝM NASTAVOVACÍM PRVKŮM GEOMETRIE KOL ZADNÍ NÁPRAVY (VESPOD NASTAVOVÁNÍ SBÍHAVOSTI, UPROSTŘED NASTAVOVÁNÍ SVĚTLÉ VÝŠKY, NAHOŘE NASTAVOVÁNÍ ODKLONU) ..... - 92 -
OBR. 86 MĚŘENÍ SBÍHAVOSTI KOL ZADNÍ NÁPRAVY PROVÁZKOVOU METODOU POMOCÍ NOVÉHO MĚŘÍCÍHO PŘÍPRAVKU ... - 93 -
OBR. 87 NEKOMPAKTNÍ TVAR PŘEDNÍHO MĚŘÍCÍHO PŘÍPRAVKU ..... - 94 -
OBR. 88 SAMOSTATNÝ MĚŘÍCÍ PŘÍPRAVEK LEVÉHO ZADNÍHO KOLA V POHLEDU ZEPŘEDU A ZEZADU ..... - 95 -
OBR. 89 BAREVNĚ SLADĚNÉ PŘÍPRAVKY POMOCÍ POVRCHOVÝCH ÚPRAV PRÁŠKOVÉHO LAKOVÁNÍ A PŘÍRODNÍHO ELOXU ... - 96 -
OBR. 90 VLEVO PŘÍKLAD ČASOVĚ NÁROČNÉHO PŘESNÉHO UPNUTÍ DÍLŮ POMOCÍ SVĚREK NA SLOUPOVÉ VRTAČCE VPRAVO NAPOZICOVANÉ DÍLY BEZPEČNOSTNÍ OHRÁDKY PŘIPRAVENÉ NA SVAŘENÍ METODOU TIG ..... - 97 -
OBR. 91 VÝROBNÍ NÁKLADY NA VŠECHNY PŘÍPRAVKY ČINILY 10 847,- KČ (NEZAPOČÍTÁNA VÝROBA U SPONZORŮ) ..... - 98 -
OBR. 92 VLEVO ČÁST PŘÍPRAVKU FIRMY B-G RACING PRODÁVANÉHO ZA 70 000,- KČ [74] VPRAVO ČÁST PŘÍPRAVKU NAVRŽENÉHO PRO TÝM CTU CARTECH S ODHADNUTÝMI CELKOVÝMI VÝROBNÍMI NÁKLADY VE VÝŠI 30 000,- KČ - 100 -
OBR. 93 UKÁZKA Z MĚŘENÍ GEOMETRIE KOL POMOCÍ NOVÉHO PŘÍPRAVKU NA FORMULI FS.12 TÝMU CTU CARTECH ... - 102 -

Seznam tabulek

TABULKA 1: VSTUPNÍ HODNOTY PRO VÝPOČET PŘEKLOPENÍ PŘÍPRAVKU ..... - 55 -
TABULKA 2: VSTUPNÍ HODNOTY PRO VÝPOČET PŘEJETÍ BEZPEČNOSTNÍ OHRÁDKY ..... - 57 -
TABULKA 3: VSTUPNÍ PARAMETRY DO VÝPOČTU ŠROUBOVÉHO SPOJE ..... - 59 -
TABULKA 4: ODHADOVÉ NÁKLADY NA VÝROBU MĚŘÍCÍHO PŘÍPRAVKU ..... - 78 -
TABULKA 5: POROVNÁNÍ ODHADOVANÝCH A SKUTEČNÝCH VÝROBNÍCH NÁKLADŮ ..... - 99 -

Seznam použitých zkratek a symbolů

Symboly české abecedy

Symbol	Jednotka	Popis
CAD	[-]	Computer Aided Design
CNC	[-]	Computer Numerical Control
d	[mm]	Obráběný průměr
$d_{kš}$	[mm]	Průměr hlavy šroubu
$D_{Ráfek}$	[mm]	Průměr ráfků
$d_š$	[mm]	Velký průměr šroubu
d_{1p}	[mm]	Malý průměr podložky
d_{2p}	[mm]	Velký průměr podložky
$d_{2š}$	[mm]	Střední průměr šroubu
$d_{3š}$	[mm]	Malý průměr šroubu
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
Ek_1	[J]	Kinetická energie vozidla 1
Ek_2	[J]	Kinetická energie vozidla 2
f_{desky}	[-]	Koeficient tření mezi středem kola a vertikální deskou
f_{hlava}	[-]	Koeficient tření pod hlavou šroubu
$F_{Klopení}$	[N]	Síla potřebná k překlopení přípravku
$F_{Přejetí}$	[N]	Síla potřebná k přejetí bezpečnostní ohrádky
$F_{t\ desky}$	[N]	Třecí síla mezi středem kola a vertikální deskou
$F_{Výsledná}$	[N]	Výslednice sil působících na kuličkovou jednotku
$f_{závit}$	[-]	Koeficient tření v závitu šroubu a matice
g	[m·s^{-2}]	Tíhové zrychlení
$G_{na\ kolo}$	[N]	Tíhová síla formule působící na jedno kolo
$G_{na\ kuličku}$	[N]	Tíhová síla formule působící na jednu kuličkovou jednotku
h	[mm]	Výška okraje bezpečnostní ohrádky
H	[mm]	Výška osy středu kola od bezpečnostní ohrádky
J_1	[kg·m^2]	Moment setrvačnosti vozidla 1
J_2	[kg·m^2]	Moment setrvačnosti vozidla 2
k	[-]	Koeficient bezpečnosti pro zatížení
$k_{šroub}$	[-]	Koeficient bezpečnosti šroubu
$k_{šroub\ min}$	[-]	Minimální koeficient bezpečnosti šroubu

l	*[mm]*	Rozvor kol
L	*[mm]*	Vzdálenost kuličkových jednotek
l_F	*[mm]*	Vzdálenost těžiště od přední nápravy
LF	*[-]*	Levé přední kolo
l_R	*[mm]*	Vzdálenost těžiště od zadní nápravy
LR	*[-]*	Levé zadní kolo
L_1	*[mm]*	Vzdálenost mezi vnitřními okraji ráfků vpředu
L_2	*[mm]*	Vzdálenost mezi vnitřními okraji ráfků vzadu
m	*[kg]*	Hmotnost vozidla
MAG	*[-]*	Metal Active Gas
MIG	*[-]*	Metal Inert Gas
MKP	*[-]*	Metoda konečných prvků
$M_{t\ hlava\ šroubu}$	*[Nm]*	Třecí moment v pod hlavou šroubu
$M_{t\ závit}$	*[Nm]*	Třecí moment v závitech
$M_{utahovací}$	*[Nm]*	Utahovací moment
$M_{utahovací\ tabulkový}$	*[Nm]*	Tabulkový utahovací moment
n	*[1·min^{-1}]*	Otáčky řezného nástroje nebo obrobku
$n_{šrouby}$	*[-]*	Počet šroubů středu kola
P	*[mm]*	Rozteč závitu
$Q_{0\ celkem}$	*[N]*	Předpětí od všech šroubů
$Q_{0\ šroub}$	*[N]*	Předpětí od jednoho šroubu
R	*[mm]*	Poloměr koule kuličkové jednotky
R_e	*[MPa]*	Mez kluzu daného materiálu
RF	*[-]*	Pravé přední kolo
R_m	*[MPa]*	Mez pevnosti daného materiálu
RR	*[-]*	Pravé zadní kolo
R_x	*[N]*	Reakce síly ve směru osy x
R_{y1}	*[N]*	Reakce síly ve směru osy y pro kuličkovou jednotku 1
R_{y2}	*[N]*	Reakce síly ve směru osy y pro kuličkovou jednotku 2
$S_{3š}$	*[mm^2]*	Průřez malého průměru šroubu
TIG	*[-]*	Tungsten Inert Gas
v_c	*[m·min^{-1}]*	Řezná rychlost
WIG	*[-]*	Wolfram Inert Gas
$Wk_{3š}$	*[m^3]*	Průřezový modul v krutu malého průměru šroubu

Symboly řecké abecedy

Symbol	Jednotka	Popis
α	*[°]*	Vrcholový úhel závitu
γ	*[°]*	Odklon kola
δ	*[°]*	Sbíhavost kol jedné nápravy
ε	*[-]*	Poměrná deformace
θ	*[°]*	Úhel mezi silami působícími na kuličkovou jednotku
$\rho_{působiště}$	*[mm]*	Fiktivní rameno třecí síly pod hlavou šroubu
σ_{red}	*[MPa]*	Redukované napětí v šroubu
σ_{tah}	*[MPa]*	Tahové napětí v šroubu
τ_{krut}	*[MPa]*	Smykové napětí v šroubu
φ'	*[°]*	Redukovaný třecí úhel
ω_1	*[rad·s^{-1}]*	Úhlová rychlost stáčení vozidla 1 kolem osy z
ω_2	*[rad·s^{-1}]*	Úhlová rychlost stáčení vozidla 2 kolem osy z

Seznam příloh

Příloha 1 – CD

- Text práce ve formátu .pdf
- CAD model měřícího přípravku ve formátu .stp
- Výrobní podklady pro CNC řezání ve formátu .pdf