

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Diplomová práce

**Konstrukce a nastavení podvozku vozidla Formula
Student**

Bc. Štěpán Jasenovský

© 2024 ČZU v Praze

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Štěpán Jasenovský

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Konstrukce a nastavení podvozku vozidla Formula Student

Název anglicky

Formula Student vehicle chassis design and setup

Cíle práce

Cílem práce je popis konstrukčních prvků a analyzovat různá nastavení podvozku vozidla Formula Student.

Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Metodika práce
4. Přehled řešené problematiky
5. Vlastní zpracování
6. Výsledky a diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů
9. Přílohy

Doporučený rozsah práce

50 stran včetně obrázků a tabulek

Klíčová slova

tlumič, geometrie, odpružení

Doporučené zdroje informací

CROLLA, David A. *Automotive engineering : powertrain, chassis system and vehicle body*. Oxford: Elsevier, 2009. ISBN 978-1-85617-577-7.

HALDERMAN, James D. *Automotive chassis systems*. Seventh edition. Boston: Pearson, [2017]. ISBN 978-0134064451.

VLK, František. *Zkoušení a diagnostika motorových vozidel : výkon vozidla, brzdné vlastnosti, převodová ústrojí, řízení, geometrie kol, tlumiče a pružiny, řiditelnost a ovladatelnost, životnostní zkoušky, motor, zapalování, elektronické systémy*. Brno: Vlk, 2001. ISBN 80-238-6573-0.

Zdeněk Jan, Aleš Vémola, Bronislav Ždánský *Automobily. I, Podvozek a převodná ústrojí*, Brno : CERM, 2003, ISBN 80-7204-262-9

Předběžný termín obhajoby

2023/2024 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Jakub Mařík, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 8. 3. 2023

doc. Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 29. 3. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 25. 01. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Konstrukce a nastavení podvozku vozidla Formula Student" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 30. 3. 2024

.....

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Jakobovi Maříkovi, Ph.D. za odborné vedení práce, vstřícnost při konzultacích a užitečné rady při psaní práce. Dále bych rád poděkoval týmu CULS Prague Formula Racing za možnost podílet se na stavbě nového monopostu Formule Student.

Konstrukce a nastavení podvozku vozidla Formula Student

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá popisem konstrukce a nastavení podvozku vozidla Formula Student. V práci je popsán princip soutěže a funkce týmu CULS Prague Formula Racing. Dále se v práci nachází popis konstrukce podvozku monopostu FS.08. Ten je členěn do funkčních celků s následným popisem jednotlivých komponent. U každé komponenty je vždy popsán účel, funkce a její samotná konstrukce. Praktická část práce se skládá z návrhu nastavení podvozku, konkrétně odpružení a geometrie kol. U návrhu nastavení je čtenář proveden autorovým postupem a obeznámen s praktickým nastavením parametrů na monopostu. Klíčovou částí práce je následně ověření funkce provedených nastavení. To bylo realizováno testováním a následným vyhodnocením nasbíraných dat a poznatků. Naměřené hodnoty a poznatky jsou v práci vyhodnoceny a byl učiněn návrh úpravy nastavení.

Klíčová slova: Podvozek, Tlumič, Geometrie, Pneumatika, Zavěšení, Odpružení, Testování

Formula Student vehicle chassis design and setup

Abstract

This master's thesis deals with the description of the construction and setup of the Formula Student vehicle chassis. The thesis outlines the competition's principles and the functions of the CULS Prague Formula Racing team. Furthermore, the thesis includes a description of the chassis construction of the FS.08 single-seater. This description is divided into functional units with subsequent detailing of individual components. For each component, its purpose, function, and construction are provided. The practical part of the thesis consists of proposing chassis settings, specifically suspension and wheel geometry. The reader is guided through the author's approach to setting parameters on the single-seater and acquainted with practical adjustments. Subsequently, the thesis focuses on verifying the functionality of the implemented settings. This was achieved through testing and subsequent evaluation of collected data and observations. The measured values and findings are analyzed in the thesis, and a proposal for adjustment settings is made.

Keywords: Chassis, Damper, Geometry, Tire, Suspension, Damping, Testing

Obsah

1 Úvod	1
2 Cíl práce	2
3 Metodika práce	3
4 Přehled řešené problematiky	4
4.1 Formula student.....	4
4.1.1 Statické disciplíny	4
4.1.2 Hodnocení disciplín	6
4.2 Účel podvozku	6
4.3 Základní části podvozku.....	6
4.3.1 Rám	7
4.3.2 Zadní subframe	9
4.3.3 Přední zavěšení kol	9
4.3.4 Zadní zavěšení kol	13
4.3.5 Přední odpružení	15
4.3.6 Zadní odpružení	18
4.3.7 Stabilizátory	21
4.3.8 Řízení.....	23
4.3.9 Pojmy nastavení geometrie náprav	26
5 Vlastní zpracování	30
5.1 Základní parametry	30
5.2 Poloha těžiště vozu.....	31
5.3 Zatížení jednotlivých kol.....	31
5.3.1 Celkové zatížení kol při jízdě	32
5.4 Nastavení vzduchových tlumičů	34
5.4.1 Základní nastavení předních tlumičů Marzocchi.....	35
5.4.2 Základní nastavení zadních tlumičů Fox.....	36
5.5 Nastavení světlé výšky vozu.....	37
5.5.1 Nastavení světlé výšky na vozidle	38
5.6 Nastavení geometrie přední a zadní nápravy	38
5.6.1 Kinematika přední nápravy	39
5.6.2 Kinematika zadní nápravy	42
5.6.3 Volba úhlu sbíhavosti kol.....	43
5.6.4 Nastavení geometrie podvozku na vozidle.....	44
5.6.5 Pneumatiky	46
5.7 Testování nastavení podvozku.....	48
5.8 Vyhodnocení testování	49
5.8.1 Zpětná vazba pilota	50

5.8.2	Porovnání časů	53
5.8.3	Hodnocení nastavení geometrie kol v závislosti na teplotě pneumatik	53
5.8.4	Hodnocení geometrie v závislosti na opotřebenění pneumatik.....	55
5.8.5	Porovnání pneumatik Avon a Goodyear	56
5.8.6	Hodnocení jízdy bez aerodynamických prvků	57
6	Výsledky a diskuse	59
6.1	Nastavení odpružení	59
6.2	Nastavení geometrie kol	59
6.3	Volba pneumatik	59
6.4	Návrh úprav nastavení	60
6.5	Diskuze	60
7	Závěr	62
8	Seznam použitých zdrojů	63
9	Příloha	65

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Model podvozku monopostu (bez rámu) FS.08.....	7
Obrázek 2 - Model rámu FS.08.....	8
Obrázek 3 - Zadní subframe	9
Obrázek 4 - Model předního zavěšení.....	10
Obrázek 5 - Model přední těhlice.....	11
Obrázek 6 - Model předního náboje.....	11
Obrázek 7 - Model předního Track rodu	12
Obrázek 8 - Model zadního zavěšení	13
Obrázek 9 - Model zadního náboje	15
Obrázek 10 - Model předního odpružení.....	16
Obrázek 11 - Bočnice a čep vahadla přepákování	18
Obrázek 12 - Model předního stabilizátoru	22
Obrázek 13 - Model zadního stabilizátoru.....	23
Obrázek 14 - Model sestavy řízení.....	24
Obrázek 15 - Porovnání negativní a pozitivní sbíhavosti kol při zatočení vlevo	27
Obrázek 16 - Znázornění pozitivního a negativního odklonu	28
Obrázek 17 - Ackermannova podmínka [16]	29
Obrázek 18 - Podložky pro změnu rozchodu kol.....	29
Obrázek 19 - Znázornění polohy těžiště vozu	31
Obrázek 20 - Nastavení odskoku tlumiče.....	36
Obrázek 21 - Postup nastavení pravého zadního tlumiče.....	37
Obrázek 22 - Princip nastavení světlé výšky	38
Obrázek 23 - Grafické znázornění průjezdu pravé zatáčky $R=3,2$ m při nulovém statickém odklonu	41
Obrázek 24 - Uzpůsobení těhlice pro nastavení odklonu kola	45
Obrázek 25 - Princip nastavení sbíhavosti předních kol vytočením sférického kloubku	46
Obrázek 26 - Princip nastavení sbíhavosti zadních kol.....	46
Obrázek 27 - Trať pro testování.....	49
Obrázek 28 - Detail opotřebení levé přední pneumatiky.....	56
Obrázek 29 - Detail dezénu levé zadní pneumatiky.....	56

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Minimální parametry trubek rámu.....	8
Tabulka 2 - Základní parametry monopostu FS.08.....	30
Tabulka 3 - Výsledky zatížení jednotlivých kol	32
Tabulka 4 - Doporučené nastavení tlumičů výrobcem [17]	35
Tabulka 5 - Výsledek simulace v programu Lotus (přední náprava).....	39
Tabulka 6 - Změna odklonu přední nápravy při průjezdu zatáčkou $R=3,2$ m a $R=10,6$ m. 41	
Tabulka 7 - Výsledek simulace v programu Lotus (zadní náprava)	42
Tabulka 8 - Změna odklonu přední nápravy při průjezdu zatáčkou $R=3,2$ m a $R=10,6$ m. 43	
Tabulka 9 - Vliv sbíhavosti kol na chování vozu [21]	44
Tabulka 10 - Hodnoty geometrie náprav pro nastavení	45
Tabulka 11 - Časy jednotlivých rozjížděk	53
Tabulka 12 - Jev a příčina naměřené teploty pneumatik.....	54
Tabulka 13 - Průměrná teplota jednotlivých pásem pneumatiky.....	54
Tabulka 14 - Porovnání pneumatik dle časů.....	57
Tabulka 15 - Časy kol bez aerodynamických prvků.....	58

1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá konstrukcí a nastavením podvozku vozu FS.08, který je produktem závodního týmu CULS Prague Formula Racing. Tento tým funguje jako projekt Technické fakulty České zemědělské univerzity. Cílem týmu je navrhnout a zkonstruovat monopost dle přísných pravidel soutěže. Vrcholem sezóny je obstát na závodech, které se konají jak v České republice, tak i v zahraničí. Každá generace vozu prochází vývojem, který představuje použití nových materiálů a technologií výroby. Dlouhodobým trendem u závodních vozů je snižování hmotnosti, to vede k použití drahých materiálů jako jsou kompozity, nebo lehké slitiny.

Podvozek je klíčovou částí vozu, jelikož zajišťuje dynamické vlastnosti vozu. Je zcela žádoucí, aby konstrukce podvozku zajišťovala neustálý styk pneumatiky s vozovkou a tím umožnila bezpečné, pokud možno optimální ovládání vozidla v požadovaných rychlostech i při velkém přetížení. Základním předpokladem pro nastavení podvozku každého vozu je znalost jeho konstrukce v kombinaci s ostatními proměnnými, které funkci ovlivňují. V případě této práce je princip nastavení poněkud odlišný od běžných automobilů, jelikož se jedná o závodní monopost. Celkové nastavení podvozku je tedy směřováno k jedinému cíli, kterým je minimalizace časů v jednotlivých disciplínách.

Práce je primárně rozdělena na dvě části. V té první je popsána konstrukce jednotlivých částí podvozků, jejich funkce a účel. Jednotlivé části jsou sepsány do kapitol pro funkční celky, kterým náleží. Tato část práce slouží jako teoretický základ pro druhou část, jelikož při nastavení je nutné vycházet právě ze znalosti konstrukce a možností nastavení, které jednotlivé součásti umožňují.

Část druhá se následně zabývá samotným nastavením jednotlivých funkčních celků a součástí s cílem optimalizace funkce podvozku jako celku. Konkrétně se práce zabývá návrhem vhodného nastavení odpružení, geometrie kol a volbou pneumatik. Funkce podvozku byla následně ověřena pomocí sběru dat a poznatků z testování monopostu.

2 Cíl práce

Cílem práce je čtenáři přiblížit projekt Formula Student, konkrétně monopost FS.08, který je produktem závodního týmu CULS Prague Formula Racing. Jelikož se práce zabývá podvozkem monopostu, čtenář je v práci proveden teoretickým popisem podvozku rozčleněným na funkční celky. U každého funkčního celku jsou uvedeny jednotlivé komponenty s potřebnými informacemi. Cílem této části práce je přiblížit konstrukci čtenáři, a poskytnout mu teoretický základ pro praktickou část práce. Po přečtení teoretické části by měl mít čtenář přehled o souvislostech mezi jednotlivými díly a také jejich funkci. Cílem praktické části práce je návrh nastavení pro odpružení vozu a geometrii kol. Cílem je nalézt optimální nastavení pro oba celky, tedy odpružení i zavěšení kol díky systematickému postupu vycházejícímu ze silového zatížení kol a kinematických vlastností zavěšení. Následně je čtenář proveden fyzickým nastavením součástí na monopostu. Zde je vždy popsán princip změny parametru dle konstrukce jednotlivých prvků. Pro tyto nastavené parametry je nutné provést ověření funkčnosti reálným provozem monopostu. Proto bylo dílčím cílem praktické části testování podvozku, které bylo zaměřeno na funkci odpružení, geometrie kol ale také volbu pneumatik. Výsledkem testování jsou data a poznatky, které mají za úkol ověřit funkci podvozku a posloužit jako informace na jejichž základě lze v případě zjištění negativních jevů navrhnout úpravu nastavení.

3 Metodika práce

Tato kapitola se zaměřuje na strukturalizaci práce a použité metody pro volbu nastavení či následné vyhodnocení naměřených parametrů a získaných poznatků o povaze chování vozu na závodním okruhu.

Pro teoretickou část práce byla práce rozčleněna na funkční celky a formou literární rešerše byla popsána jejich funkce a účel. Celky byly následně rozděleny podrobně na jednotlivé komponenty. U jednotlivých komponent byl vždy popsán účel, funkce, materiál a metoda výroby. Tyto informace jsou zpracovány na základě údajů získaných při vývoji a následné výrobě a kompletaci monopostu, nebo formou literární rešerše prací na téma vývoje dané komponenty. Struktura práce tvoří ucelený pohled na podvozek monopostu FS.08 a díky grafickým modelům a obrázkům tvoří průvodce konstrukcí podvozku pro čtenáře.

V praktické části se nachází postup nastavení podvozku monopostu a následné vyhodnocení na základě reálného testování vozu. Jako podklad pro nastavení tlumičů slouží stanovení síly působící na kola monopostu. Její statická složka byla stanovena dle vážení monopostu. Druhá složka, kterou je přítláčná síla byla stanovena početně. Pro nastavení odklonu kol byla jako základní studnice informací využita simulace z programu Lotus Suspension analysis, která stanovuje změnu odklonu při průjezdu zatáčkou. Na základě silového výpočtu a analýze kinematických vlastností zavěšení byly stanoveny parametry pro nastavení podvozku vozu. Následovalo testování pro ověření funkce podvozku s cílem sběru dat a poznatků o povaze chování. Konkrétně se jednalo o měření teplot pneumatik ve třech pásmech dezénu, zaznamenání zpětné vazby pilota a měření časů kola okruhu.

Výsledky jsou následně uvedeny v práci a interpretovány pomocí tabulek a grafů. Na základě těchto podkladů je zpracováno vyhodnocení pro nastavení odpružení, geometrie kol a volbu pneumatik. Pro negativní jevy je následně navržena úprava nastavení.

4 Přehled řešené problematiky

4.1 Formula student

Jedná se o prestižní konstruktérskou soutěž závodních monopostů na mezinárodní úrovni, která vznikla roku 1980 ve spojených státech, konkrétně na Texaské univerzitě v Austinu. Hlavní myšlenkou soutěže je přiblížení chodu závodních týmů studentů tím, že si sami projdou reálným procesem. Každý rok tým navrhne, zkonstruuje a následně představí nový monopost podobně jako je tomu v seriálu F1. Účelem soutěže je přeměna teoretických znalostí získaných při studiu do praktické podoby, ať už v podobě konstruování vozu, komunikace se sponzory, či tvorbu propagace. Benefitem pro absolventy se zkušenostmi s tímto projektem jsou potenciální pracovní nabídky v oboru. [1]

V samotném závodě si týmy konkurují nejen v nejlepších závodních časech, ale i ve statických disciplínách, které spočívají v prezentaci a obhajobě vývoje, business plánu, a finančního hospodaření týmu. Před samotným závodem musí týmy projít technickou přejímkou, která zajistí schopnost vozu absolvovat i samotné dynamické disciplíny. [1]

4.1.1 Statické disciplíny

Statické disciplíny slouží k prezentaci chodu týmu ve třech odvětvích, konstruktérském, marketingovém a finančním. V konstruktérském odvětví tým obhájí konstrukci vozu, použité technologie výroby a parametry jaké vůz díky konstrukci má. Marketingové odvětví představuje obchodní model týmu a jeho vizi do budoucna, která by měla oslovit potenciální investory. Finanční odvětví představuje plánování financí pro chod týmu a samotnou výrobu monopostu. [1]

Cost Report

Hodnotí se cenový report všech dílů monopostu, materiál, výroba i závěrečné úpravy, jako je například lakování. [1]

Engineering Design

V této disciplíně studenti obhájí konstrukci vozu a své znalosti dané problematiky. Komise pokládá dotazy a doptává se na parametry a zásadní body návrhu a výroby. [1]

Business Presentation

Business plán představí studenti před odbornou komisí, která ohodnotí jeho potenciál.

Dynamické disciplíny

V dynamických disciplínách následně monopost prokáže svou konkurenceschopnost vůči monopostům ostatních týmů v podobě závodních časů. Součástí dynamických disciplín je kontrola komisařem po jízdě. Ta je krizovým okamžikem, protože v případě shledání závady na monopostu může tým ze soutěže diskvalifikovat.

Acceleration

Monopost akceleruje na 75 m dlouhé dráze ze zastaveného stavu. Monoposty na předních příčkách se pohybují v časech pod 3 sekundy.

Skid pad

Trať ve tvaru číslice osm, na které monopost objede dvě kola, tedy dvě levé zatáčky a dvě pravé. Čas je měřen při druhém kole. Tato disciplína je zkouškou nastavení podvozku a vlastností pneumatik. [1]

Autocross

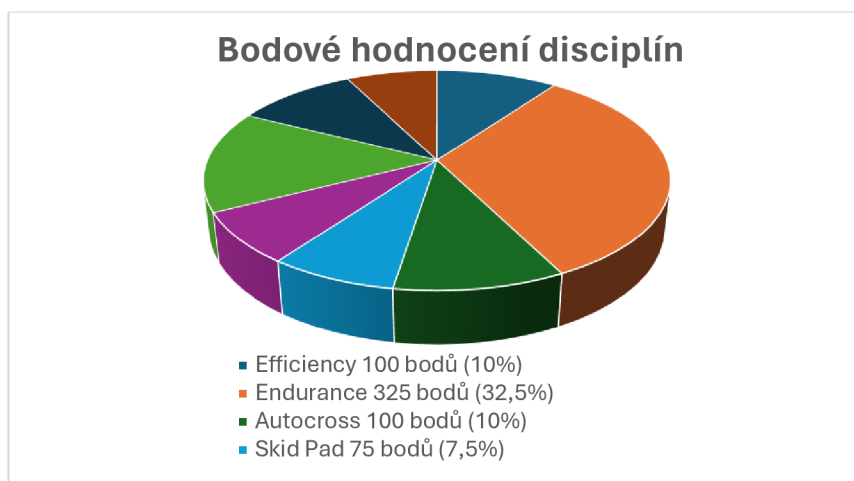
Disciplína se odehrává na kilometrové trati. Trať je vyznačená kužely a bývá složitá pro piloty, jelikož zatáčky jsou úzké. To je náročné zejména na volbu vhodného okamžiku brzdění a včasného okamžiku změny směru. Tato disciplína zároveň slouží jako kvalifikace pro hlavní disciplínu endurance, výsledné časy určí startovní pořadí.

Endurance

Hlavní disciplína endurance se koná na 22 kilometrů dlouhé trati. V závodě je nutná zastávka v polovině závodu pro vystřídání pilotů, její podmínkou je vypnutí motoru a následné nastartování pomocí vlastního zdroje monopostu. Každý pilot ujede zhruba 11 kilometrů. Monopost musí být navržen tak, aby závod zvládl vykonat bez tankování. Součástí závodu je i hodnocení spotřeby paliva.

4.1.2 Hodnocení disciplín

Maximální počet bodů, který tým může v závodě získat je 1000 bodů. Každá disciplína má své bodové maximum. Nejvíce bodů lze získat za disciplínu endurance, bodové maximum pro tuto disciplínu je 325. Rozpis bodování jednotlivých disciplín je znázorněn níže (viz Graf 1).



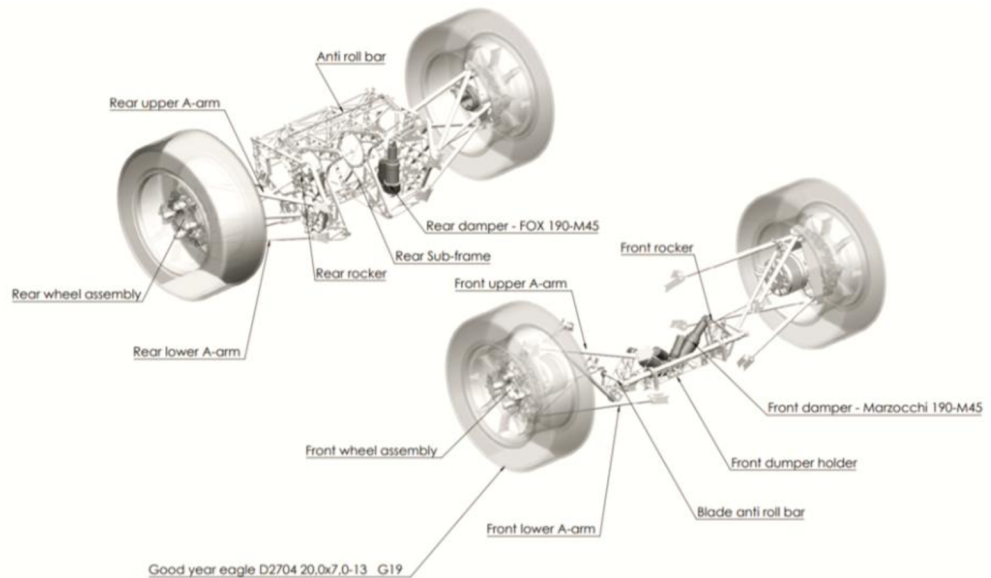
Graf 1 - Bodové hodnocení disciplín

4.2 Účel podvozku

Podvozek je funkčním celkem, který tvoří základní nosnou část každého vozidla. Jeho účelem je trvalé spojení vozidla s vozovkou, zajištění ovladatelnosti vozu v podobě změn směru jízdy, akcelerace a decelerace vozidla. Optimálním chováním podvozku pro maximální ovladatelnost vozidla je neustálý styk všech kol s obrusnou vrstvou vozovky. Podvozek současně slouží k upevnění hnacího a převodového ústrojí a karoserie. Musí také současně sloužit jako prvek aktivní i pasivní bezpečnosti, která je především v motorsportu zásadní. Konstrukce podvozku musí být spolehlivá, jelikož jakákoliv závada znamená zhoršení jízdních vlastností vozu nebo dokonce úplnou neovladatelnost vozu. [2; 3]

4.3 Základní části podvozku

U monopostu FS.08 se podvozek skládá z rámu, předního a zadního zavěšení kol, řízení, odpružení, brzdového systému, zadního pomocného rámu a elektromotorů hybridního pohonu. Konstrukce podvozku je znázorněna na obrázku níže (viz Obr. 1).



Obrázek 1 - Model podvozku monopostu (bez rámu) FS.08 [archiv autora]

4.3.1 Rám

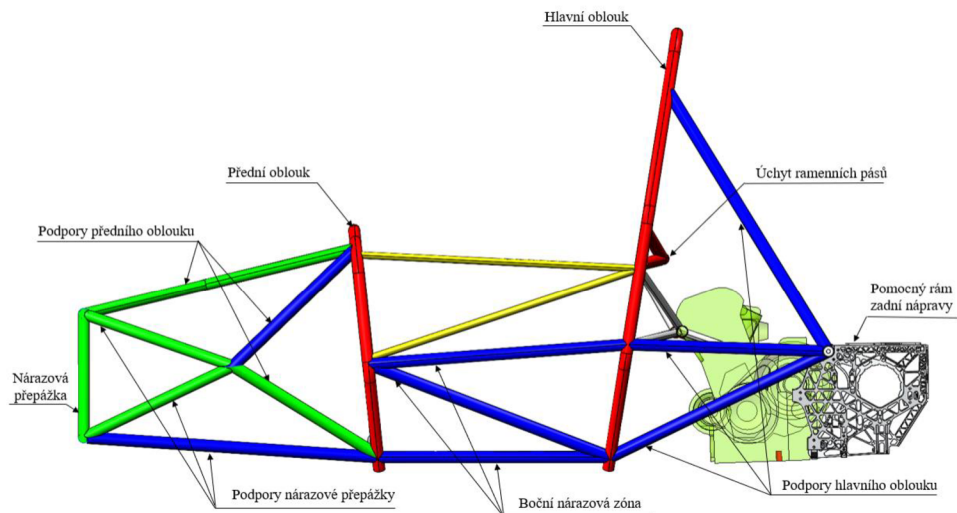
Konstrukce rámu se nazývá prostorový trubkový rám. Svařený je z ocelových trubek (nízkolegovaná chrom-molybdenová ocel) 25CrMo4 (ČSN 15 130). Jedná se o nosný prvek předního i zadního zavěšení kol, karoserie, kokpitu pro pilota a společně se zadním subfrámem (pomocným rámem) slouží k uložení pohonné spalovací jednotky a převodovky. Nedílnou součástí rámu jsou bezpečnostní deformační zóny, a to deformační zóna pro čelní náraz a zóna, která slouží k ochraně pilota při případném převrácení monopostu. K připevnění všech komponentů je rám opatřen úchyty, které jsou přivařeny k rámu na přesné pozici a pomocí šroubového spoje je následně připevněn navazující díl. Rám včetně popisu je znázorněn na obrázku 2 (viz Obr. 2).

Unikátní záležitostí je výroba rámu a konkrétně pozicování trubek. To je uskutečněno pomocí dřevěných desek, do kterých jsou dle 3D modelu vyhotoveny otvory daného průměru. Desky se následně složí pomocí zámků do pevného celku. Trubky musí být před vložením do dřevěného přípravku obrobena v místě budoucích svarů. Následně se trubky vloží do přípravku a svaří. Tato metoda pozicování se ukázala jako velmi přesná a maximální eliminací chyb v pozicích trubek. [4]

Požadavky na rám jsou pro soutěž Formula student především bezpečnostního charakteru. Základními částmi rámu jsou přední oblouk s podporami, hlavní oblouk s podporami, přední deformační zóna s přepážkou a boční nárazové zóny s uchycením pásů.

Tyto požadavky platí i pro použití kompozitního monokoku, jako hlavního nosného prvku. Požadavky jsou kladeny i na samotné pozicování trubek, protože trubky musí při bočním kolmém pohledu tvořit trojúhelník. [4]

Pro budoucí generace vozu je plánovaný přechod z trubkového prostorového rámu na kompozitní monokok. Touto změnou základního nosného prvku by mělo dojít ke snížení hmotnosti vozu a také zvýšení tuhosti zejména v krutu.



Obrázek 2 - Model rámu FS.08 [archiv autora]

Pro volbu jednotlivých trubek jsou dány minimální hodnoty tloušťky trubky a průřezu (viz Tab. 1).

Tabulka 1 - Minimální parametry trubek rámu

Části primární struktury	Minimální tloušťka trubky [mm]	Minimální průřez trubky [mm ²]
Hlavní oblouk	2.0 mm	175 mm ²
Přední oblouk		
Uchycení ramenních pásů		
Boční nárazová zóna	1.2 mm	119 mm ²
Podpory hlavního oblouku		
Středová podpora předního oblouku		
Horní podpora předního oblouku		
Dolní podpora předního oblouku		
Nárazová přepážka	1.2 mm	91 mm ²
Podpory nárazové přepážky		

4.3.2 Zadní subframe

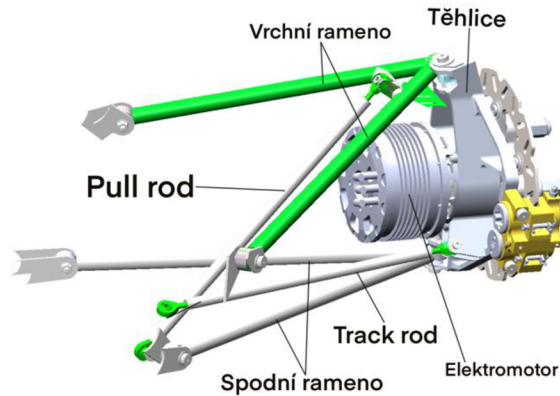
Jedná se o pomocný rám, který slouží k uchycení zadních ramen, přepákování tlumičů, stabilizátorů a diferenciálu. Rám se skládá z bočních desek o tloušťce 15 mm, ke kterým jsou připevněna ramena zadního zavěšení, vnitřních desek s tloušťkou 10 mm, které slouží jako uchycení diferenciálu a tři desky o tloušťce 5 mm, které slouží jako podpora pro celistvost celku (tzv. zavětrování). Všechny desky jsou obrobena frézováním pro maximální redukci hmotnosti a uchycení komponent. Konstrukce je spojena šroubovými spoji konkrétně lícovanými šrouby o průměru 6 mm a 5 mm dle ISO 7374 a tvarovými spoji. Vnitřní desky jsou připevněny k držáku motoru, ty vnější jsou připevněny k rámu pomocí pevnostních šroubů M6. Desky pomocného rámu jsou vyrobeny z hliníkové slitiny 7075 T6. Pomocný rám je znázorněn na obrázku níže (viz Obr. 3). [5]



Obrázek 3 - Zadní subframe [archiv autora]

4.3.3 Přední zavěšení kol

Přední zavěšení kol se skládá z dvojice ramen ve tvaru A s různou délkou, těhlice, track rodu (spojovací tyč řízení) a pull rodu, který zjišťuje přenos síly na přepákování tlumiče. Aby bylo umožněno vzájemného pohybu ve spojích jednotlivých komponent, mezičlánkem mezi rameny, těhlicí a rámem jsou sférické klouby, které umožňují rotační pohyb. Přední zavěšení je nezávislé, lichoběžníkové konstrukce (viz Obr. 4).

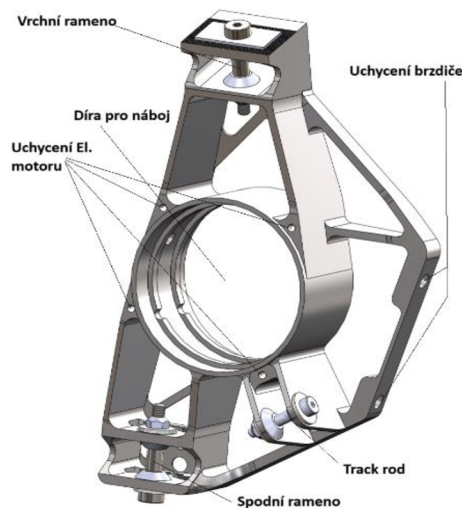


Obrázek 4 - Model předního zavěšení [archiv autora]

Přední těhlice

Mezi těhlicemi pro běžné automobily a těhlicemi pro závodní vozidla je značný rozdíl. U osobních automobilů není kladen důraz na minimalizaci neodpružené hmotnosti, proto se těhlice zpravidla vyrábí jako odlitky z šedé litiny, případně hliníkových slitin a jsou často zaměnitelným dílem pro více modelů vozů. S tím souvisí i nároky na bezpečnost. V případě použití jedné těhlice jako unifikovaného dílu pro více modelů musí díl vyhovovat požadavkům pro všechny modely a není tedy dimenzován přímo na konkrétní model. Často tak dochází k předdimenzování dílu a tím je hmotnost dílu vyšší, než je nutné. Těhlice pro závodní speciály jsou navrhovány pro jiné provozní podmínky, zejména doba provozu se pohybuje v řádech desítek motohodin. Proto se těhlice závodních speciálů navrhují pro maximální výkon při minimální hmotnosti i na úkor životnosti dílu. Ta je zpravidla kratší než u běžných osobních automobilů. Pro výrobu se v současné době používají metody jako je frézování, svařování, aditivní technologie (3D tisk kovů). Materiály pro výrobu jsou lehké slitiny či kompozitní materiály. [6]

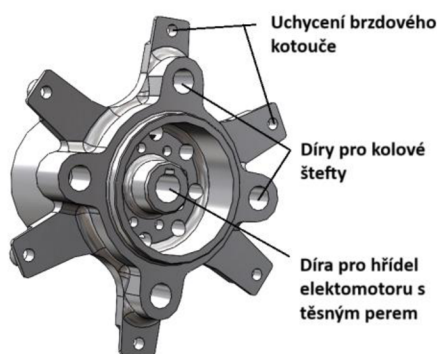
Těhlice vozu FS.08 (viz Obr. 5) je vyrobena z hliníkové slitiny 7075 T6. Jelikož cílem je redukce hmotnosti při požadovaných mechanických vlastnostech dílu, je frézována z monobloku. Konstrukce těhlice musí umožňovat uchycení následujících komponent: brzdiče, spodního a vrchního ramene, track rodu, náboje s ložiskem a elektromotoru, jelikož monopost FS.08 je hybridní konstrukce. Pro nastavení odklonu a sbíhavosti kol je uložení horního ramene v těhlici realizováno pomocí tzv. plovoucí díry, která umožňuje nastavení odklonu kola. Sbíhavost kola lze nastavit pomocí sférického kloubu se závitovým výstupem, uloženého do závitového insertu v track rodu.



Obrázek 5 - Model přední těhlice [archiv autora]

Náboj kola s ložiskem

Přední náboj je vyroben z hliníkové slitiny EN AW 7075 T6 pomocí strojního třískového obrábění, kdy je náboj vyfrézován z bloku materiálu. Náboj slouží ke spojení kola s těhlicí a zajištění rotačního pohybu pomocí ložisek. V tomto případě se jedná o pár kuličkových ložisek (SKF 71814) s kosouhlým stykem. Ložiska jsou vložena do těhlice z přední i zadní strany a následně je náboj vložen do těhlice a ze zadní strany zajištěn maticí. Jelikož je monopost FS.08 s hybridním pohonem, je právě přední náprava osazena dvěma elektromotory. Pro přenos točivého momentu od elektromotoru na kolo má těhlice osazení v podobě díry s drážkou pro těsné pero, do které se vkládá hřídel elektromotoru. Pro připevnění kola na náboj jsou použity 4 kolové štefty s roztečí 4x100 a jsou umístěny do těhlice. Dalším dílem, který musí být připevněn k těhlici je brzdový kotouč, ten je připevněn pomocí šesti šroubů po obvodu náboje (viz Obr. 6).



Obrázek 6 - Model předního náboje [archiv autora]

Přední ramena

Ramena jsou vyrobena z ocelových trubek, konkrétně nízkolegované oceli 25CrMo4. Rameno je svařeno na straně těhlice ze dvou trubek o průměru vnějším průměru 18 mm. Jak je již výše zmíněno, mají tvar A. Jeden bod je uložen pomocí sférického kloubu v těhlici a dva body jsou připevněny šroubovými spoji k držákům rámu rovněž pomocí sférických kloubů. Sférické klouby jsou do ramen uloženy s přesahem, tedy nalisovány.

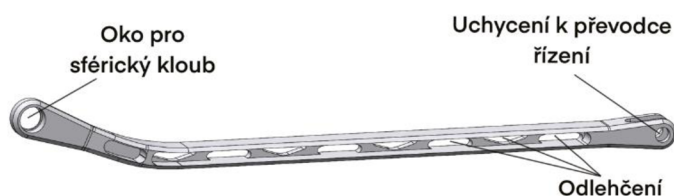
Pull rod

Pro přenosu sil k tlumiči je zapotřebí díl, který spojí pohyblivé rameno a přepákování, které následně přenáší sílu na tlumič. V případě vozu FS.08 se jedná o tzv. tažnou nebo tlačnou tyč. Zda se jedná o tlačnou (push rod) nebo tažnou (pull rod) tyč záleží na konstrukci přepákování odpružení. V případě že při pohybu kola směrem nahoru tyč tahá za vahadlo přepákování, jedná se o tažnou tyč, v případě opačném o tlačnou.

Na přední nápravě je konstrukce přepákování pro typ tyče tažné. Uchycena je na vrchním rameni zavěšení a v přepákování odpružení. Jelikož vykonává pohyb jak v rameni, tak v přepákování, je uložena na obou stranách ve sférických kloubech. [7]

Track rod

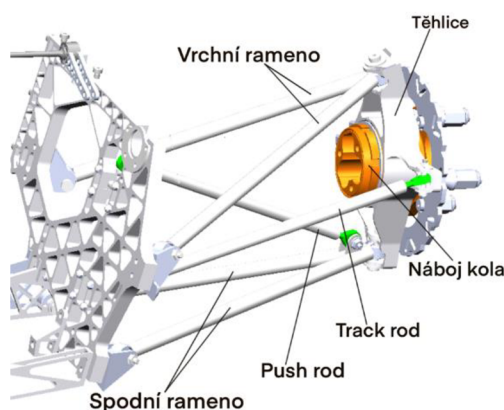
Jedná se o spojovací tyčku řízení (viz Obr. 7), jejímž účelem je převod síly od převodky řízení na těhlici, což zajišťuje ovládání směru jízdy vozu. Při zatočení volantu se přestaví převodka řízení, která zatlačí na track rod. Ten následně nastaví úhel těhlice a tím i úhel kola. Součást je vyrobena z hliníkové slitiny EW AN 7075 T6, pro redukci hmotnosti je součást třískově obrobena frézováním. [7]



Obrázek 7 - Model předního Track rodu [archiv autora]

4.3.4 Zadní zavěšení kol

Zadní zavěšení kol je stejné konstrukce jako zavěšení přední. Jedná se tedy o konstrukci lichoběžníkovou s rameny ve tvaru A (viz Obr. 8). Rozdílné je však uchycení k nosnému prvku. Ramena jsou připevněna ve dvou bodech k zadnímu subframu (pomocnému rámu) pomocí šroubových spojů. Na straně kola se ramena sbíhají do jednoho bodu a zakončena jsou sférickým kloubem, který je uložen s přesahem. Součástí zadního zavěšení jsou tedy ramena, těhlice, push rod, track rod. Jelikož zadní náprava není řízená, track rod zde slouží pouze jako prvek pro nastavení sbíhavosti kol.



Obrázek 8 - Model zadního zavěšení [archiv autora]

Zadní těhlice

Těhlice zadního zavěšení je stejně jako přední vyrobena z hliníkové slitiny 7075 T6, pomocí strojního třískového obrábění, konkrétně frézování. Konstrukce je uzpůsobena pro uchycení ramene spodního i horního, track rodu, push rodu, brzdiče, a především ložiska s nábojem kola. Jelikož je zadní náprava poháněna spalovacím motorem, je těhlice uzpůsobena pro vedení poloosy skrz. Stejně jako na přední nápravě je žádoucí maximální redukce hmotnosti, konkrétně těhlice bývá jedním z prvků, na kterém lze neodpruženou hmotnost zavěšení snížit. V případě vozu FS.08 se jedná o vyfrézování žebířů a snížení tloušťky stěn materiálu. Díl je navrhován s určitým koeficientem bezpečnosti (1,2). Následně se provádí počítačová simulace, která určí slabá místa dílu, případně místa, která jsou předimenzována.

Zadní ramena

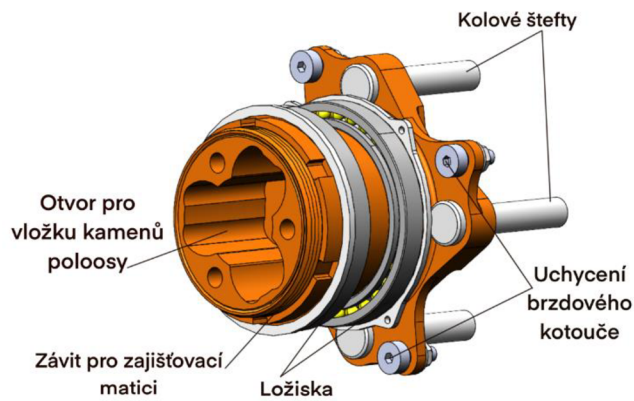
Svou konstrukcí jsou podobná ramenům předním. Jedná se o stejný typ ramen, tedy rameno ve tvaru A spojené na straně těhlice a uchyceno ve dvou bodech k nosnému prvku. Jako

u ramen předních jsou na koncích nalisovány sférické kloubky kvůli zajištění pohybu ramen a tím umožnění odpružení vozu. Rozdílem oproti ramenům předním je jejich nosný prvek, kterým není rám vozu, ale zadní pomocný rám. Materiál ramen je nízkolegovaná ocel 25CrMo4.

Náboj s ložiskem

Jedná se o součást, která mezi jednotlivými generacemi monopostů prošla značným vývojem. U sedmé generace monopostu došlo k přechodu na náboj s integrovanou vložkou pro tripoidní kloub poloosy. Konstrukce nábojů pro běžné automobily spočívá v použití náboje s drážkovaným otvorem, do kterého se následně vkládá kloub poloosy s protikusem, který je opatřen závitem. Tím se poloosa zajišťuje v náboji. [8]

Tato koncepce není pro závodní účely vhodná zejména kvůli vysoké hmotnosti. Tento problém vyřešili konstruktéři monopostu sjednocením kloubu, náboje a poloosy do jednoho celku. Samotný náboj se tedy skládá ze dvou částí - těla náboje a vložky pro tripoidní kloub. Vložka v náboji slouží jako díl, který podléhá opotřebení, konkrétně změně tvaru vymačkáním kameny kloubu vlivem přenosu točivého momentu na kola. Vložka je vyrobena z hliníku EN AW 7075 T6 a povrchově upravena vrstvou tvrdého eloxu. Jelikož podléhá opotřebení, je nutné umožnit její výměnu. To je poměrně problematické, protože je nalisována ve slepé díře. Tento problém se podařilo vyřešit pomocí děr s vnitřními závity, pomocí kterých lze vložku demontovat z těla náboje. Tělo náboje je frézováno z hliníkové slitiny. Jeho hlavním účelem je uchycení kola, umožnění rotačního pohybu kola, uchycení brzdového kotouče a u poháněné nápravy přenos točivého momentu od poloosy na kola. Monopost FS.08 využívá kola se čtyřmi dírami, tudíž náboj musí umožňovat jeho uchycení. Konkrétně se jedná o kolové štefty, které slouží k utažení kola k náboji. Náboj musí být opatřen osazením ve stejném rozměru jako je středová díra kola, protože kolové štefty neslouží k přenosu radiální síly, ale pouze axiální. Dále se na náboji nachází díry pro uchycení brzdového kotouče, ty jsou po obvodu náboje čtyři a jsou pootočené oproti dírám pro kolové štefty. Pro zajištění otáčení náboje v těhlici je nutné použití ložisek. Ta musí přenášet jak axiální, tak radiální síly a jsou vysoce namáhanou součástí každého vozidla. Náboj kola je uložen ve dvou kuličových ložiskách (SKF 71814) s kosoúhlým stykem. Jejich výhodou jsou především kompaktní rozměry pro zástavbu. Vzdálenost mezi ložisky je 30 mm a to zejména kvůli silovému rozložení. Ložisko, které se nachází blíže ke kolu se opírá o tělo náboje, druhé ložisko je zajištěno maticí, která současně slouží k zajištění náboje v těhlici. Sestava zadního náboje je zobrazena na obrázku níže (viz Obr. 9). [5]

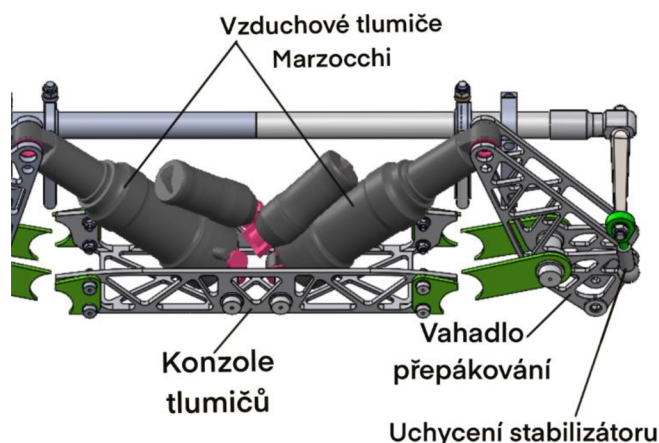


Obrázek 9 - Model zadního náboje [archiv autora]

4.3.5 Přední odpružení

Primárním účelem odpružení u závodních speciálů je zajištění neustálého kontaktu všech kol s jízdnicí, což je hlavním předpokladem ovladatelnosti vozu. V případě, že tato podmínka není dodržena, u řídicí nápravy dojde ke zhoršení ovladatelnosti směru jízdy, v krajním případě se vozidlo stane zcela neovladatelným. U nápravy poháněné nedojde k přenosu obvodových sil a tím při akceleraci dojde k prokluzu kola. Odpružení vozu má také vliv na životnost a namáhání ostatních dílů vozu. Při špatné konstrukci, či nastavení odpružení může docházet ke zvýšenému namáhání rámu zejména na krut nebo opotřebení ostatních dílů podvozku zvýšenými vibracemi či rázy. [9]

Přední odpružení vozu FS.08 je funkčním celkem, který se skládá z konzole pro uložení tlumičů, samotných tlumičů a vahadla přepákování (viz Obr. 10). Pro monoposty soutěže Formula Student je nejčastějším konstrukčním řešením použití tlumičů pro horská kola, jelikož mají kompaktní rozměry, nízkou hmotnost a disponují širokou škálou nastavení, což je pro motorsport více než žádoucí. Tato konstrukce sjednocuje do jednoho těla dílu jak tlumič, tak pružinu. V současné době se používají dva typy tlumičů. Vzduchové a pružinové, kdy oba typy mají v těle dílu zabudovanou olejovou část. Ta slouží k tlumení a regulaci tzv. odskoku pístnice (rychlosti pohybu) při návratu do statické polohy.



Obrázek 10 - Model předního odpružení [archiv autora]

Konzole pro uložení tlumičů v rámu

Jedná se o součást, jejímž účelem je uložení tlumičů přední nápravy a připevnění k rámu vozidla. Protože tlumič vykonává pohyb při své funkci, musí být zajištěno, aby nedocházelo ke kolizi například s konstrukcí rámu. Proto je do přední části rámu, konkrétně spodní podpory nárazové přepážky, vložena tato součást, která má za účel stanovit ideální polohu uložení tlumiče vůči rámu a přepákování. Tento díl je sružený pro obě strany. Umístěn je kolmo ke směru jízdy a připevněn je pomocí šroubových spojů právě k předním rámovým podporám. Vyroben je pomocí strojního třískového obrábění z hliníkové slitiny EN AW 7075 T6 a následně povrchově upraven eloxováním. Funkce tlumičů a upevnění k rámu nejsou jedinými požadavky na konzoli, jelikož dle pravidel soutěže nesmí žádná součást měnit tvar prostoru pro řidiče. Prostor je dán šablonou a zejména tvar prostoru pro nohy pilota je striktně daný. To zhoršuje prostorové podmínky a možnosti uložení právě konzole. [10]

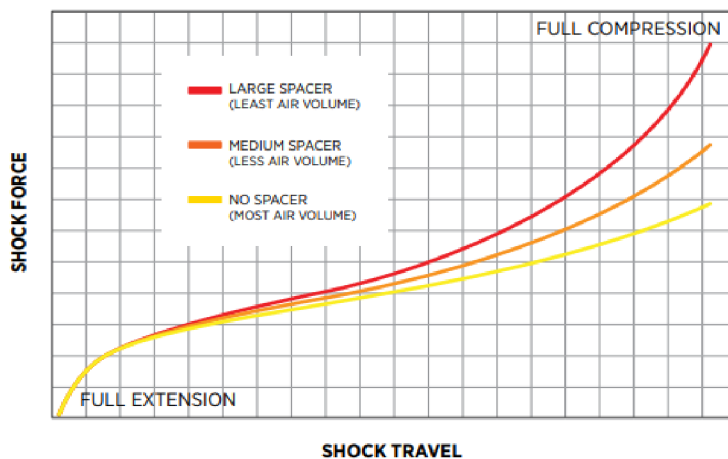
Přední vzduchové tlumiče

Při volbě předních tlumičů došlo k problémům s uspořádáním v konzoli, jelikož pro konzoli nebylo možné použití tlumičů Fox jako na zadní nápravě z důvodu kolizi expanzních nádobek olejové části tlumičů. Alternativní možností bylo použití tlumičů bez expanzní nádoby. Tyto tlumiče však trpí přehříváním olejové části. Řešením bylo pro konstruktéry uspořádání tlumiče Marzocchi Bomber Air, který má expanzní nádobku natočenou do strany. To umožňuje pohyb tlumičů v konzoli bez kolizi a volba tlumiče pro přední nápravu byla tedy

zřejmá. Výhodou je fakt, že výrobce Marzocchi je nyní dceřinou firmou již zmíněného výrobce Fox, což dává možnosti pro zaměnitelnost a dostupnost náhradních dílů.

Jak již bylo zmíněno výše, jedná se o vzduchové tlumiče Marzocchi Bomber Air s rozměrem 190x45. Číslo značí vzdálenost mezi středy pouzder pro uložení 190 mm a délka zdvihu pístnice činí 45 mm. Tento tlumič umožňuje variabilní nastavení pružící i tlumící části. Část pružící, tedy vzduchová, zajišťuje odpor tlumiče vůči chodu do zdvihu. Jedná se o základní charakteristiku pružiny. Charakteristika vychází ze závislosti síly na zdvihu tlumiče. Základní charakteristiku pružiny lze měnit. U vzduchových tlumičů je zapotřebí zmenšit vzduchovou komoru pomocí vložek (volume spacers). Tlumící část umožňuje nastavení nízkorychlostní komprese a odskoku tlumiče. Nízkorychlostní komprese stanovuje rychlost, jakou se bude pístnice pohybovat do zdvihu tlumiče. Naopak odskok je rychlost návratu pístnice do statické polohy. [11; 12]

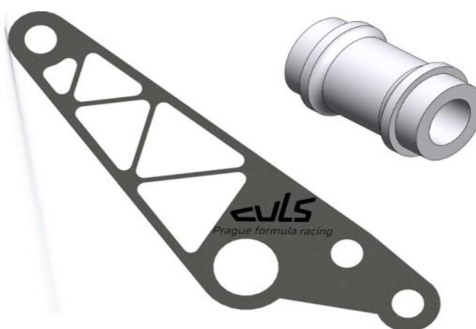
Samotné nastavení vzduchové části probíhá nastavením základního tlaku, který udává výrobce dle síly, která působí na tlumič. Komora tlumiče se nafoukne speciální pumpou s manometrem na požadovaný tlak. Základní hodnotou není konkrétní hodnota tlaku, ale procentuální ponoření tlumiče ve statické poloze tzv. Sag. Ten se pohybuje kolem 30 %, tedy tlumič by měl být ve statické poloze ponořen v 1/3 zdvihu. V případě, že charakteristika pružiny je příliš lineární, nebo požadujeme větší progresivitu, je nutné zmenšit objem komory pomocí vložky, tím se změní charakteristika dle grafu 2 níže (viz Graf 2). [12]



Graf 2 - Graf progresivity vzduchového tlumiče [13]

Přední přepákování odpružení

Účelem přepákování odpružení je přenos sil od kola na tlumič. Zpravidla se jedná o síly snížené dle převodového poměru vahadla, který činí 1,2 (chod kola ku zdvihu tlumiče). Vahadlo přepákování je uloženo v jednom bodě k rámu, ten dělá střed otáčení vahadla. K vahadlu jsou v dalších dvou bodech připojeny spodní oko tlumiče a push/pull rod, který přenáší sílu od kola. Konkrétně u monopostu FS.08 slouží vahadlo i k přenosu sil na stabilizátor. Konstrukce této součásti se skládá ze tří dílů. Jedná se o dvě bočnice a spojovací čep. Bočnice jsou na čep nalisovány a tvoří tak jeden díl, který je uložen v rámové konstrukci pomocí šroubového spoje, který prochází právě čepem (viz Obr. 11). Hlavní díra pro nalisování čepu má průměr 16 mm ostatní díry, pro pull rod, stabilizátor a oko tlumiče mají průměr 8 mm. Bočnice vahadla jsou vyfrézovány z titanové slitiny Ti-6Al-4V (Titan Grade 5). Ze stejného materiálu je vyroben i čep. Díl prošel simulací, která prokázala jeho vlastnosti při definovaném zatížení 1 kN - těmi je koeficient bezpečnosti 2,42 a maximální napětí 208,35 MPa. [10]



Obrázek 11 - Bočnice a čep vahadla přepákování [archiv autora]

4.3.6 Zadní odpružení

Zadní odpružení má oproti přednímu odlišnou konstrukci, ta je z konstrukčního hlediska o poznání jednodušší. Důvodem je více prostoru a možností, jak tlumiče a ostatní komponenty umístit do konstrukce. Nosným prvkem tohoto funkčního celku je zadní pomocný rám, ve kterém je uložen tlumič a vahadlo přepákování. Tlumič je v pomocném rámu uchycen pomocí dvou klem. Následně je k oku tlumiče připevněno vahadlo přepákování, které je uloženo otočně v pomocném rámu. Pro přenos sil od kola na tlumič slouží v případě zadní nápravy push rod (tlačná tyč).

Uchycení zadního tlumiče

Uchycení zadního tlumiče se skládá ze dvou klem, které mají za úkol stanovit tlumiči přesnou polohu. Vyrobeny jsou pomocí strojního třískového obrábění z materiálu EN AW 7075 T6. Klemy jsou připevněny pomocí lícovaných šroubů ISO 7379 M6 k deskám zadního pomocného rámu. Spojení klem a tlumiče následně zajišťuje lícovaný šroub ISO 7379 M8, který prochází okem tlumiče a umožňuje rotační pohyb tlumiče. Pro konstrukci a volbu materiálu vycházeli konstruktéři z hodnoty zatížení 1 kN. [10]

Zadní vzduchové tlumiče

Stejně jako u přední nápravy, i zadní náprava je odpružena pomocí vzduchových tlumičů pro horská kola. V tomto případě se jedná o tlumiče Fox Float X s expanzní nádobkou olejové tlumící části. Tlumiče pro horská kola mají několik standardů uložení, v současné době je trendem výrobců kol využívat tzv. trunnion uložení, kde je pístnice tlumiče opatřena okem. Naopak hlava tlumiče jako takové nemá a k uchycení slouží závity přímo v hlavě tlumiče. Toto uložení však není vhodné pro konstrukci monopostu FS.08, proto byla zvolena klasická varianta uložení se dvěma oky. Výhodnější je pro konstruktéry zejména kvůli nárokům na konstrukci vahadla, jelikož v oku tlumiče se nachází kluzné pouzdro, naopak u verze trunnion je nutné vybavit vahadlo na obou stranách ložisky.

Rozeř tlumiče je stejný jako na nápravě přední, tedy vzdálenost středů uložení 190 mm a chod pístnice do zdvihu 45 mm. Jak již bylo zmíněno v kapitole Přední vzduchové tlumiče, expanzní nádobka tlumící části je umístěna rovnoběžně s osou pístnice. Jelikož jsou na zadní nápravě lepší prostorové možnosti, konstrukce nevyžadovala použití tlumičů Marzocchi s odkloněnou nádobkou. Výhodou tlumičů Fox je povrchová úprava pístnice (Kashima coating), která má nižší součinitel tření, což znamená lepší chod tlumičů. Povrchová úprava dále do jisté míry eliminuje poškození kluzné plochy.

Stejně jakou tlumičů předních je i u tlumičů zadních pružení zajištěno tlakem vzduchu. Rychlost chodu pístnice do zdvihu a zpět do statické polohy zajišťuje olejová tlumící část. Možnosti nastavení jsou stejné jako na nápravě přední. Jediným nastavením, které zadní tlumiče umožňují navíc oproti předním je zamknutí chodu tlumiče pomocí dvoupolohové páčky. Tato možnost uzamknutí však není využívána.

Princip funkce tlumičů pro horská kola vychází z použití vzduchu jako pružiny. Jak již bylo zmíněno, tlumič má pružící a tlumící část. Část pružící, tedy vzduchová se skládá z pístnice, těla tlumiče, které slouží jako vzduchová komora. Pístnice je zakončena hlavním pístem, který je opatřen těsněním pro udržení tlaku vzduchu. Vzduchová komora je rozdělena na dvě části, pozitivní a negativní. Pro funkci tlumiče musí být o obou komorách vzduch, jinak by v jedné komoře byl při chodu tlumiče podtlak a tlumič by neumožňoval požadovaný chod. Proto se nachází v části komory přepouštěcí kanálek, který zajišťuje vyrovnávání tlaku komor. U starších tlumičů bylo možné konstrukční řešení, kdy byly pozitivní i negativní komory odděleny a každá část se musela nafouknout samostatně.

Olejevá část tlumiče se skládá z expanzní nádoby tlumící části, hlavy tlumiče, ve které je umístěn mechanismus tlumení komprese a odskoku tlumiče. Mechanismus spočívá ve škrcení průtoku oleje, který je tlumícím médiem. Při pohybu tlumiče směrem do komprese olej protéká přes škrtící ventil komprese, ventil odskoku je zavřen a nepropouští olej. Naopak při návratu tlumiče do statické polohy je kompresní ventil uzavřen a olej protéká skrz ventil odskoku. Regulace rychlosti pohybu pístnice je tedy dána průtokem jednotlivých škrtících ventilů. Nastavuje se zatočením regulačních šroubů, které zmenší průtok. Poslední částí je expanzní nádobka s pístem, ve které se nachází vzduch. Ta slouží jako olejový nárazník pro plynulejší chod tlumiče. Vzduch, nebo jiný plyn (dusík) se nachází nad pístem a při kompresi tlumiče olej tlačí na píst, který stlačuje plyn v nádobce. [13]

Zadní přepákování odpružení

Stejně jako u odpružení předního i odpružení zadní musí projít redukcí sil působících na tlumič. Konstrukce vahadla přepákování je podobná jako u přední nápravy. Uložena je v jednom bodě k zadnímu pomocnému rámu. Dále se na vahadle nachází díry pro připevnění tlumiče, push rodu a stabilizátoru. Vahadlo je vyrobeno z hliníkové slitiny EN AW 7075 T6. Díky konstrukčnímu uspořádání zadního odpružení bylo možné realizovat vahadlo s kompaktnějšími rozměry oproti vahadlu přednímu. Umožnilo to především zmenšení vzdálenosti středu otáčení a uložení tlumiče. Následné geometrické postavení bodů bylo výhodné a rozměry tedy mohou být menší. Váha dílu přepákování činí 27 g. Pro další generaci vozu je zamýšlena změna materiálu tohoto dílu z důvodu redukce hmotnosti. Převodový poměr vahadla činí 1,16. Díl prošel simulací jejímž výsledkem byl bezpečnostní koeficient 3,59 a maximální napětí 142,62 MPa při zatížení 1 kN. [10]

4.3.7 Stabilizátory

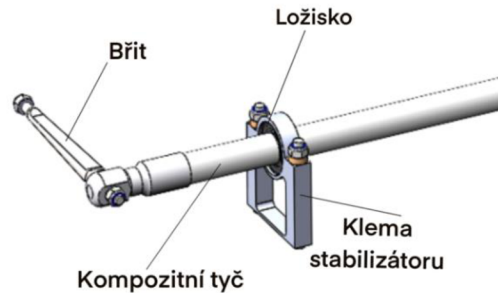
Účelem stabilizátoru je spojení obou kol na nápravě, a to z důvodu eliminace nadměrného naklápění vozidla. Zejména v motorsportu se jedná o klíčový prvek ovlivňující charakteristiku dynamiky podvozku. Stabilizátory se realizují pomocí zkrutného elementu, který spojuje obě strany neodpružených hmot nápravy, tedy pravou část a levou. U běžných automobilů není použití stabilizátorů na obou nápravách podmínkou, jelikož častou konstrukcí bývá zadní kliková spřažená náprava, která zastupuje funkci stabilizátoru. Stabilizátory je tedy nutné použít u nezávislého zavěšení kol. To je nejčastějším typem náprav u závodních speciálů a ani monopost FS.08 není výjimkou. Standardním konstrukčním řešením stabilizátorů je uložení zkrutné tyče otočně ve dvou bodech ke karoserii či nápravnici vozidla a konce zkrutné tyče jsou spojeny s neodpruženou částí podvozku nejčastěji rameny náprav. Jako prostředník pro spojení slouží tzv. stabilizační tyčky. K uložení zkrutné tyče jsou využívána pryžová pouzdra. [2]

Tím že jsou kola spojena zkrutnou tyčí, při překonání nerovnosti jednoho kola se pohyb ramene přenesse pomocí stabilizační tyčky do zkrutné tyče, která je uložena v pouzdrech s možností otáčení. Tím dojde k přenosu síly na druhé kolo a pohybu obou kol stejným směrem do zdvihu tlumiče. Tímto způsobem dojde k eliminaci nadměrného naklápění vozidla. V případě, že by náprava stabilizátor neměla, byl by rozdíl výšek jednotlivých stran příliš velký a docházelo by tak ke zmíněnému nežádoucímu jevu. [2]

Přední stabilizátor

Přední stabilizátor (viz Obr. 12) využívá břitové konstrukce, jejíž výhodou je možnost nastavení tuhosti stabilizátoru. Konstrukce se skládá z táhla osazeného sférickými klouby, břítu, náboje ložiska a spojovací tyče. Táhlo slouží k přenosu síly na stabilizátor. Sférické klouby táhla zajišťují plynulý chod vahadla přepákování, jelikož bod, ve kterém je táhlo připevněno koná obecný rovinný pohyb. Následně je síla převedena na břit. Jeho ohybová tuhost je dána úhlem natočení vůči směru působící síly. Pro funkci stabilizátoru je nutné spojit obě strany nápravy. To je zajištěno tyčí z uhlíkových vláken a dvěma frézovanými náboji, které jsou mezikusem pro spojení titanových nožů a kompozitní tyče. Důležitým prvkem je zajištění polohy stabilizátoru vůči nosnému prvku, tedy rámu. To je zajištěno dvěma ložisky, které svírají klemy k rámu. Pro spojení břítu s nábojem je břit opatřen závitem M6, stejné spojení se nachází i na druhé straně břítu, kde je skutečně spojení s táhlem. [25]

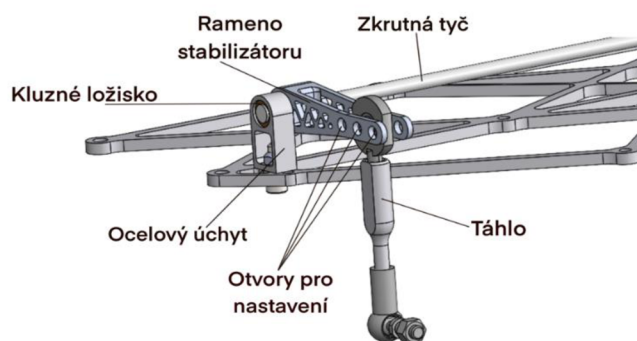
U této konstrukce stabilizátorů není tuhost dána zkrutnými vlastnostmi tyče. Tyč zde slouží pouze pro spojení a přenos sil levé a pravé strany vozu. Tyč sice není ideálně tuhá, což znamená, že dochází k minimálnímu zkrutu, ten je však zanedbatelný. Prvkem, který zajišťuje parametry tuhosti stabilizátoru je právě břit a jeho úhel natočení. Zajímavostí břitových stabilizátorů je možnost nastavení tuhosti přímo při jízdě pilotem pomocí táhla z kokpitu.



Obrázek 12 - Model předního stabilizátoru [archiv autora]

Zadní stabilizátor

Zadní stabilizátor (viz Obr. 13) je klasické koncepce využívané na osobních automobilech. Jedná se tedy o využití zkrutné tyče jako prvku, který udává tuhost stabilizátoru. Přenos sil od vahadla přepákování je zajištěn stejně jako na nápravě přední pomocí táhla osazeného párem sférických kloubů. Samotný stabilizátor se skládá ze dvou ramen a zkrutné tyče. Rameno stabilizátoru je frézované pro snížení hmotnosti a je opatřeno třemi dírami právě pro spojení s táhlem. Podle umístění kloubu do jednotlivého otvoru se mění délka ramene a tím i moment přenášený na zkrutnou tyč. Spojení tyče a ramen je zajištěno tvarovým spojem (čtyřhranné osazení), kde je tyč zalisována do ramene. Uložení k nosnému prvku je zajištěno kluzným ložiskem, které se nachází v pouzdru a následně je pomocí ocelových úchytů připevněno k zadnímu pomocnému rámu.



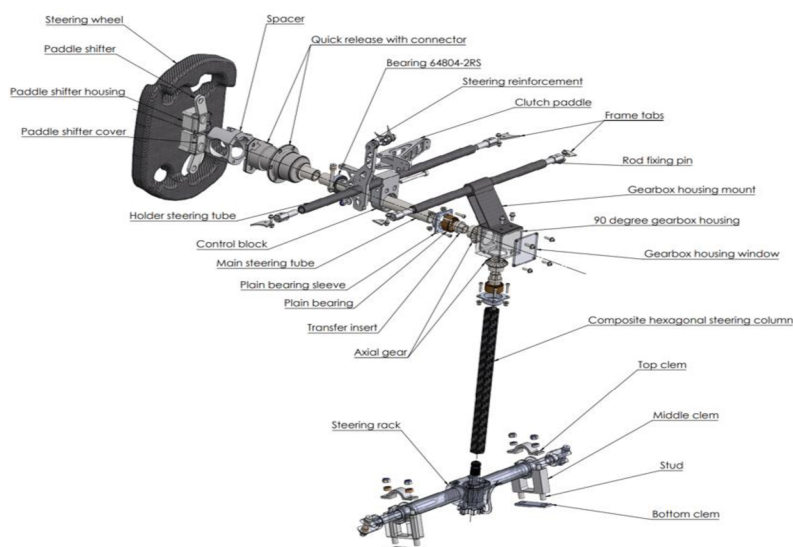
Obrázek 13 - Model zadního stabilizátoru [archív autora]

4.3.8 Řízení

Řízení je funkčním celkem, který zajišťuje směrové ovládání vozu. Pomocí vychýlení kol lze změnit směr jízdy do strany. Účelem celku je přenos síly od volantu, který je ovládacím prvkem až na samotná kola. Nejčastějším řešením pro osobní automobily je řízení předních kol. Řízení musí zajišťovat stabilitu vozu v zatáčkách všech poloměrů, jeho funkce musí být spolehlivá a jeho chování musí umožňovat snadný návrat do přímého směru. Negativní jevy, které nesmí řízení vykazovat je samovolné zatáčení nebo smýkání kol při průjezdu zatáčkou. [2]

Jakožto jeden z hlavních mechanismů, zajišťujících ovladatelnost vozu, je jeho konstrukce omezena pravidly. V konstrukci nesmí být využito řemenového nebo lanového převodu. V konstrukci musí být mechanické spojení se základní nosnou konstrukcí. Umístění sloupku řízení je prostorově omezeno a jeho umístění je dáno šablonou s vyznačeným prostorem, kde se sloupek může nacházet. Vůle v řízení může dosahovat maximální hodnoty sedm stupňů, měření probíhá na volantu při zajištění předních kol. Dále je omezeno umístění volantu, ten se musí nacházet pod úrovní předního oblouku rámu a v maximální vzdálenosti 250 mm od oblouku. [14]

Konstrukce řízení monopostu FS.08 se liší od konstrukce známé z běžných automobilů, jelikož sportovní vozy mají odlišné požadavky. Primární rozdíl je v kladení důrazu na přesnost řízení a převodový poměr mezi volantem a koly, standardem osobních automobilů je také posilovač řízení, který u monopostu není využit, jelikož se jedná o lehké vozidlo a ovládací síly není nutné zvětšovat. Konkrétně se řízení skládá z volantové části, hlavní tyče řízení a jejího uložení, převodovky řízení, kompozitního sloupku a převodky řízení s příslušenstvím (viz Obr. 14).



Obrázek 14 - Model sestavy řízení [archiv autora]

Volantová část

Volantová část se skládá ze samotného volantu, pádel pro řazení, bloku odsazení volantu a rychloupínacího mechanismu. Volant u závodních speciálů není jen ovládacím prvkem směru, jedná se totiž o prvek, se kterým je pilot neustále v kontaktu. Proto je účelné vhodné rozmístění nezbytných ovládacích prvků právě na volant, se snahou maximálně eliminovat situace, kdy by pilot musel pro využití ovladačů pustit ruce z volantu. Příkladem jsou ovládací prvky pro řazení tzv. pádla. Ta se nacházejí z druhé strany volantu a slouží k volbě převodového stupně. Dále se ve volantové části nachází distanční blok, který stanovuje polohu volantu, tedy vzdálenost od pilota a rámu vozidla. Běžnou součástí řízení závodních speciálů je rychloupínací mechanismus volantu, ten je důležitým prvkem, jelikož je sedačka v kokpitu vozu pevně připevněna a nástup i výstup pilota je obtížný zejména kvůli prostorovým podmínkám. Volant je tedy nutné při nástupu i výstupu vyjmout z vozidla a k tomu slouží právě rychloupínací náboj. Samotné tělo volantu je vyrobeno z uhlíkových vláken a důraz při vývoji je kladen především na ergonomický tvar. Cílem je umístit ovládací prvky a přizpůsobit tvar tak, aby pilot přirozeně mohl ovládat jednotlivé prvky bez ztráty koncentrace na řízení. Tělo volantu je vyrobenou ze dvou částí přední a zadní, tyto části jsou následně slepeny dohromady.

Hlavní tyč řízení

Hlavní tyč řízení primárně slouží k přenosu točivého momentu z volantu do převodovky řízení. Jejím druhotným účelem je uchycení komponentů. V tomto případě se jedná o spojkové pádlo, které slouží k rozjezdu vozidla. Hlavní volantová tyč je uchycena v uložení s ložiskem.

To je připevněno k rámu pomocí příčnicku a vertikální vzpěry. Blok uložení slouží současně k chycení spojkového pádla. Pro umožnění rotačního pohybu tyče jsou do bloku uloženy integrována ložiska. Kvůli dodržení pravidel soutěže a zachování požadované pozice volantu je nutné, aby volant nebyl uložen ve vodorovné poloze, nýbrž pod určitým úhlem. Toto kritérium zásadně ovlivňuje následný převod do sloupku řízení. [14]

Převodovka řízení

Jelikož je hlavní tyč řízení uložena ve vozidle téměř v horizontální poloze a převodka řízení je situována pro téměř vertikální směr napojení sloupku řízení, je nutné využít součást s převodem točivého momentu mezi jednotlivými komponenty. Tento účel plní v případě monopostu FS.08 převodovka řízení. Převodovka řízení se skládá z dvojice kuželových ozubených kol s šikmým ozubením, bloku převodovky, kluzných ložisek, hřídelí a frézovaného uchycení, které slouží jako nosný prvek. Blok převodovky slouží k uložení všech komponentů sestavy a je vyroben z pěti částí. Hlavní částí je tzv. kostra, jejím účelem je především uložení kluzných ložisek a zajištění přesného styku ozubených kol. Do kostry jsou vyvrtány díry s vnitřními závity pro montáž přírub hřídelí, zadního a bočního víčka. Příruby jsou prvkem, který umožňuje montáž a demontáž kluzných ložisek, jelikož se jedná o díl, který podléhá opotřebení a v případě zvětšené provozní vůle je nutné ložiska vyměnit. Boční a zadní víčko pak slouží pro montáž celku a případnou kontrolu stavu ozubení či doplnění maziva. Ozubené soukolí přenáší točivý moment převodovým poměrem 1:1. Převodovka je připevněna k rámu pomocí frézovaného uchycení. Spojení s rámem je provedeno pomocí šroubových spojů. [14]

Kompozitní sloupek

Kompozitní sloupek řízení je další součástí, která v posloupnosti systému přenáší točivý moment dále v systému. Zajímavostí této součásti je její výroba, která proběhla na univerzitě svépomocí. Jedná se o šestihrannou tyč vyrobenou z uhlíkových vláken metodou navíjení na předem naseparovanou šestihrannou formu. Problémovou fází výroby bylo vyjmutí dílu z formy, kdy pro vyjmutí bylo nutné vyvinout potřebnou sílu a současně tyč zajistit proti pohybu. Následně prošla součást testem na maximální krut, jehož výsledkem byla hodnota 270 Nm. Sloupek je uložen na hřídeli převodky řízení ve spodní části pomocí insertu, který je mezikusem pro tvarový spoj převodky řízení. Pro spojení s převodovkou řízení je využito stejně jako ve spodní části insertu, který je mezikusem pro spojení s hřídelí převodovky řízení. Oba inserty jsou vlepeny do konstrukce sloupku.

Převodka řízení

Tato součást je nezbytným dílem pro řízení kolových automobilů. V dnešní době je většina osobních automobilů vybavena hřebenovou převodkou řízení. Jedná se o typ konstrukce, který používá i monopost FS.08. Důvodem pro využití právě tohoto typu převodky jsou především její zástavbové rozměry, možnost snížení hmotnosti a konstrukční jednoduchost. Hlavními částmi konstrukce jsou ozubená hlavní tyč, pastorek a blok převodky. Pastorek přenáší sílu pomocí ozubení na tyč řízení a mění tak otáčivý pohyb na pohyb posuvný, který vykonává hlavní tyč. Následně je tyč spojena pomocí spojovací tyčky řízení s těhlicí vozidel. Převodový poměr převodky řízení je dán počtem zubů tyče i pastorku a průměrem pastorku. [15; 23]

U monopostu je použita hřebenová převodka řízení vyrobená na požadované parametry s požadavkem zejména na redukci hmotnosti a zástavbové rozměry. Převodový poměr je stanoven průměrem pastorku (30 mm) počtem zubů pastorku (17). Tyč má následně 18 zubů a umožňuje posun o 80 mm za otáčku volantu, kterou je poloha pro směr jízdy přímo. Uchycena je k rámu vozidla pomocí dvou klem. Ty jsou s rámem spojeny pomocí šroubových spojů. Klemy se skládají ze dvou částí. Spodní část slouží k stanovení polohy hřebene vůči nosnému prvku. Vrchní část klemy slouží ke stažení těla hřebene a tím zamezení pohybu.

4.3.9 Pojmy nastavení geometrie náprav

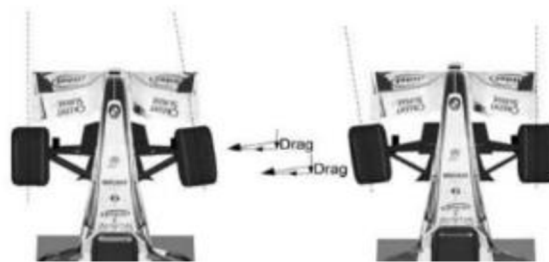
V této kapitole se nachází jednotlivé pojmy, které je nutné znát pro nastavení geometrie podvozku monopostu FS.08. Konstrukce podvozku umožňuje nastavení odklonu kola a sbíhavosti kol. Nastavení se liší dle přední nebo zadní nápravy. U nápravy přední, která je řízená je důležitým aspektem přiblížení se k Ackermannově podmínce. Tím zajistíme základní předpoklad pro optimální průjezdy zatáčkou. Nastavení, které je v motorsportu hojně využíváno je úprava rozchodu kol. Dle pravidel soutěže je stanoven limit maximálního rozchodu. Toho lze případně dosáhnout použitím podložek pod kola.

Sbíhavost kol

Sbíhavost kol je úhel středních rovin kol jedné nápravy. Pokud roviny prodloužíme přímkami, dostaneme průsečík přímek. V případě že se přímkami neprotnou, jedná se o nulovou sbíhavost kol a přímkami jsou rovnoběžné. Zpravidla se přímkami protnou, za nápravou, nebo před

nápravou ve směru jízdy. V případě průsečíku ležícího před nápravou se jedná o sbíhavost pozitivní. Při průsečíku za nápravou se jedná o sbíhavost negativní.

Pozitivní odklon zpravidla zvyšuje jízdní stabilitu při přímém směru jízdy, naopak negativní odklon zlepšuje ovladatelnost vozu při průjezdu zatáčkou. Tento fakt vyplývá z obrázku níže (viz Obr. 15), kde jsou znázorněny dva stejné vozy, jeden s pozitivní sbíhavostí vlevo a negativní vpravo, kdy oba vozy zatáčí doleva. Vůz s pozitivní sbíhavostí se při stejném úhlu natočení volantu dostal levým kolem na rovnoběžný směr a pravé kolo svírá přední část vozu, což způsobuje vznik boční síly, která vytváří negativní jev z hlediska chování vozidla. [7]



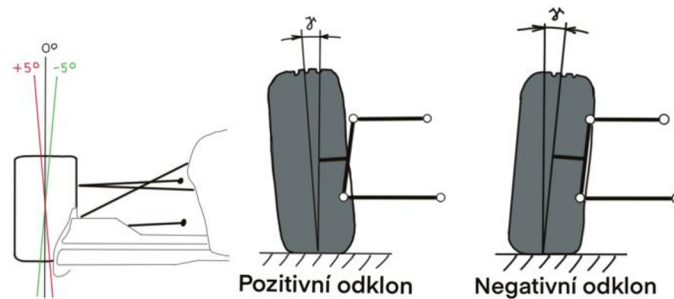
Obrázek 15 - Porovnání negativní a pozitivní sbíhavosti kol při zatočení vlevo

Odklon kola

Odklon kola je parametr, který nám říká úhel mezi svislou rovinou kola a kolmicí na vozovku tedy vertikální osou. Pokud je kolo nakloněno vrchní částí směrem do karoserie, jedná se o odklon záporný. V případě opačném se jedná o odklon kola kladný (viz Obr. 16). V automobilovém průmyslu se lze setkat se dvěma případy konstrukčních řešení pro odklon kola. V dnešní době je ve většině případů odklon pevně daný konstrukcí podvozku. Spíše u sportovních automobilů je běžná variabilita tohoto nastavení, ať už nastavením pomocí excentrických šroubů ramen nebo posuvným horním uložením tlumičů v případě nápravy Mc Pherson. [24]

U osobních automobilů a dodávek, kde se předpokládá přeprava více osob nebo nákladu vysoké hmotnosti je účelné, aby odklon kola byl nastaven na pozitivní hodnoty, jelikož při zatížení vozu dojde k pro pružení nápravy a vzpřímení kola. Při vzpřímeném kole je zajištěno rovnoměrné opotřebení pneumatiky a ideální odvalování kola. Pro sportovní a závodní účely je však standardním nastavením záporný odklon. Důvodem je odstředivá boční síla, která vzniká

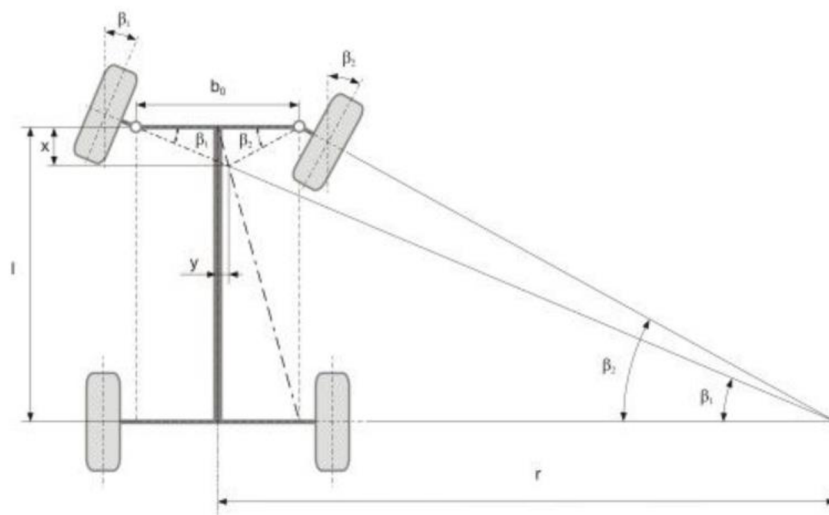
při průjezdu zatáčkou. Tato síla úhel odklonu zmenšuje a při negativním odklonu tak dosáhneme maximálního styku pneumatiky s vozovkou, jelikož se kolo vzpřímí. [8]



Obrázek 16 - Znázornění pozitivního a negativního odklonu [archiv autora]

Ackermannova podmínka

V případě, kdy by obě kola řízené nápravy byla natočena při průjezdu zatáčkou o stejný úhel, docházelo by k nežádoucímu smýkání. V ideálním případě je geometrie řízení taková, aby ke smýkání nedošlo a kola se pouze odvalovala. Ackermannova podmínka říká, že střed otáčení musí ležet na ose zadních kol, která je prodloužena (viz Obr. 17). Tato podmínka je však ideálním stavem, kterého je velmi obtížné dosáhnout. V praxi je geometrie řízení realizovaná tzv. lichoběžníkem řízení. Jeho konstrukce má za úkol svým uspořádáním přiblížit geometrii řízení co nejlépe Ackermannově podmínce. Jelikož se jedná o ideální stav, jsou pneumatiky považovány za dokonale tuhé. Reálný stav je odlišný, jelikož pneumatiky jsou poddajné a vlivem odstředivé síly se tvoří odchylky, které posunou střed otáčení mimo zadní osu. [16]



Obrázek 17 - Ackermannova podmínka [16]

Rozchod kol

Rozchod kol je vzdálenost mezi středy kol jedné nápravy. Jedná se o základní parametr každého vozidla. Tento parametr je během jízdy mírně proměnný, jelikož zavěšení kol koná pohyb po určité trajektorii. Hodnota je tedy měřena ve statické poloze vozu. Běžnou praxí změny rozchodu kol je použití podložek pod kola, která nápravu rozšíří a tím se změní rozchod kol. Požívají se tři typy podložek (viz Obr. 18), s integrovanými kolovými štefty, s dírami pro šrouby a s dírami pro kolové štefty. V případě použití podložek je důležité změnit délku šroubů a kolových šteftů, toto pravidlo neplatí pro podložky s integrovanými kolovými štefty.



Obrázek 18 - Podložky pro změnu rozchodu kol [archiv autora]

5 Vlastní zpracování

V této části práce je řešeno praktické nastavení podvozku monopostu FS.08, které vychází ze základních parametrů vozu. Nastavení, kterými se práce zabývá jsou nastavení odpružení a nastavení geometrie předního i zadního zavěšení kol. Hlavními aspekty pro nastavení odpružení je působení sil na jednotlivá kola ve statické poloze i za jízdy, kdy je vozidlo zatíženo přitlačnou silou aerodynamických prvků, kterou tvoří především přední křídlo, zadní křídlo a podlaha monopostu. U nastavení geometrie zavěšení je nutné brát v potaz závislost nastavení na tlaku pneumatik. V případě špatné kombinace nastavení parametrů zavěšení a tlaku pneumatik dojde nejen k neoptimální ovladatelnosti vozu, ale také k neoptimálnímu opotřebením pneumatik. Právě opotřebením pneumatik a teplotu pneumatik lze využít k hodnocení nastavení geometrie. Neméně důležitou informací pro optimální nastavení je zpětná vazba od pilota. Ta musí poskytnout informace o chování vozu při jízdě. Následné nastavení podvozku pak probíhá pomocí kooperace sjednocených kvantitativních informací a subjektivnímu pocitu pilota z jízdy. Cílem je nalézt optimální nastavení jak pro funkci vozu, tak pro preference pilota.

5.1 Základní parametry

Pro nastavení jednotlivých komponentů je nutné vycházet ze základních parametrů vozidla. Těmi jsou bezesporu pohotovostní hmotnost vozu s pilotem, rozvor kol, rozchod kol, poloha těžiště vozu a přitlačná síla při dané rychlosti. Mezi základní parametry, jak je již v práci zmíněno, patří i rozchod kol, který lze měnit pomocí rozšiřovacích podložek. V případě monopostu FS.08 však budeme uvažovat rozchod kol pevný a podložky nebudou použity. Základní parametry jsou uvedeny v tabulce níže (viz Tab.2), která vychází z parametrů při návrhu monopostu, tudíž se reálné hodnoty mohou nepatrně lišit, zejména parametry hmotnosti.

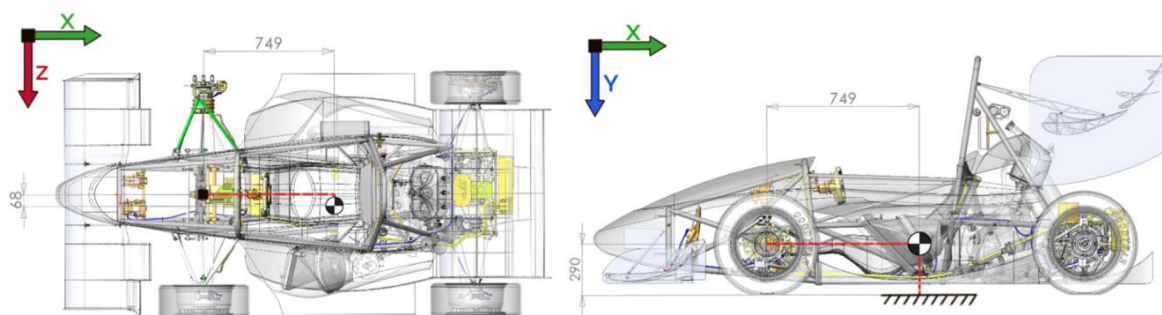
Tabulka 2 - Základní parametry monopostu FS.08

Základní parametry monopostu FS.08					
Celková délka	2834	mm	Rozvor kol	1560	mm
Celková šířka	1420	mm	Rozchod přední	1230	mm
Celková výška	1216	mm	Rozchod zadní	1220	mm
Celková váha	225	kg	Zatížení přední nápravy	107	kg
			Zatížení zadní nápravy	118	kg

5.2 Poloha těžiště vozu

Poloha těžiště je u závodních speciálů důležitým parametrem, protože je hlavním předpokladem pro vhodné váhové podíly vozu a velikosti sil, které se přenáší na nosný prvek, a právě na komponenty podvozku. Obecně platí pravidlo, že je snaha konstruktérů o posunutí těžiště co nejnižší.

U monopostu FS.08 byla poloha těžiště stanovena pomocí softwaru Solidworks. Podmínkou pro určení tohoto parametru je určení polohy těžiště každé součásti vozidla (mimo spojovacího materiálu (šroubů)). To znamená, že při návrhu dílu musí být zadán parametr hustoty materiálu nebo musí být přímo zadán materiál, jelikož program Solidworks disponuje vlastní knihovnou materiálů. Pro interpretaci výsledků je nutné stanovení os a počátečního bodu, od kterého je poloha měřena. Počátečním bodem pro stanovení polohy těžiště je střed osy přední nápravy pro osy Z a X. Stanovení výšky těžiště je znázorněno po vertikální ose Y od podložky, na které vozidlo stojí. Poloha těžiště se tedy nachází na souřadnicích $X = 749$ mm, $Z = 68$ mm, $Y = 290$ mm. U Hodnoty osy Z byl předpokládán posun k levé straně vozidla, jelikož se na této straně nachází více komponentů, jako například chladič s ventilátorem, olejová nádrž a řetězový převod pohonného ústrojí. Poloha těžiště je znázorněna na obrázku níže (viz Obr. 19).



Obrázek 19 - Znázornění polohy těžiště vozu [archiv autora]

5.3 Zatížení jednotlivých kol

Zatížení jednotlivých kol je nutné znát primárně pro nastavení odpružení, protože je nutné nastavit odpovídající tlak pro daný tlumič dle síly, která na něj působí. V ideálním případě se zatížení jednotlivých kol dá změřit ve větrném tunelu, pomocí vážení vozu i s pilotem a

simulací reálných podmínek, kdy na podvozek působí přítláčná síla aerodynamických prvků. Problémem je však zajištění měření, jelikož měření ve větrném tunelu je nákladné a dostupnost tunelů je minimální. V tomto případě je použito statické vážení pomocí čtyř vah. Reálnou sílu jízdy monopostu je tedy nutné dopočítat dle výsledků simulace aerodynamických prvků.

Pro stanovení sil působících na kola proběhla montáž všech komponent, dolití provozních kapalin a dotankování paliva. Samotné měření je poté uskutečněno pomocí sestavy čtyř vah napojených na jednotku s ovládacím panelem. Podmínkou pro přesnost měření je především vodorovná podlaha, jelikož jakýkoliv náklon vozidla by ovlivňoval výsledky. Následovalo umístění vozidla na váhy. Uskutečnila se dvě měření, pouze vozidla a následně vozidla s pilotem. Váha pilota byla 74 kg. Při druhém měření je zásadním usazení pilota ve voze, jelikož jeho pohyb nebo pozice ovlivňuje vážení. Pro eliminaci chyby měření bylo vážení opakováno a následně byl stanoven průměr z hodnot. Výsledky vážení jsou zobrazeny v tabulce níže (viz Tab. 3)

Tabulka 3 - Výsledky zatížení jednotlivých kol

Zatížení jednotlivých kol bez pilota			Zatížení jednotlivých kol s pilotem (74 kg)		
Levé přední	Pravé přední		Levé přední	Pravé přední	
52,4	51,3	kg	74,2	75,2	kg
Levé zadní	Pravé zadní		Levé zadní	Pravé zadní	
59,1	60	kg	74,7	72,7	kg
Celkové zatížení			Celkové zatížení		
222,8		kg	296,8		kg

5.3.1 Celkové zatížení kol při jízdě

Dynamické zatížení kol vyplývá ze síly, kterou působí aerodynamické prvky na konstrukci formule, jelikož síla je přenášena na kola. Při jízdě určitou rychlostí vytváří tyto prvky přítláčnou sílu, která má za úkol zlepšit přilnavost pneumatik a tím i ovládání vozu při jízdě po závodním okruhu. Celkové zatížení kol je následně součtem sil, které tvoří hmotnost vozu a sil generovaných funkcí aerodynamických prvků. Aerodynamické prvky jsou navrženy pro rychlost jízdy 16 m/s (57 km/h), kdy sestava prvků tvoří celkovou přítláčnou sílu 432 N. Poměr přítláčné síly mezi přední a zadní nápravou činí 40/60 %.

Výpočet celkového zatížení jednotlivých kol

Pro stanovení síly je nutné přepočítat zatížení na sílu, kterou působí konstrukce vozu na kolo, které sílu přenesne na pneumatiku. V tomto kroku se jedná pouze o statické zatížení s pilotem.

$$F_{sPP} = m_{PP} \times g \qquad F_{sPP} = 75,2 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 737,7 \text{ N} \quad (1)$$

$$F_{sLP} = m_{LP} \times g \qquad F_{sLP} = 74,2 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 727,9 \text{ N} \quad (2)$$

$$F_{sPZ} = m_{PZ} \times g \qquad F_{sPZ} = 72,7 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 713,2 \text{ N} \quad (3)$$

$$F_{sLZ} = m_{LZ} \times g \qquad F_{sLZ} = 74,7 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 732,8 \text{ N} \quad (4)$$

Jelikož známe celkovou přitlačnou sílu aerodynamických prvků a potřebujeme vědět, jakou silou působí na jednotlivá kola, postup vychází z poměru mezi přední a zadní nápravou, který činí 40/60 %. Celková přitlačná síla činí 432 N. Uvažujeme sílu při rychlosti 16 m/s, pro kterou je aeropaket navržen.

Přítlačná síla působící na přední nápravu

$$F_{pPřední} = F_{pCelk} \times 0,4 \qquad F_{pPřední} = 432 \text{ N} \times 0,4 = 172,8 \text{ N} \quad (5)$$

Přítlačná síla působící na zadní nápravu

$$F_{pZadní} = F_{pCelk} \times 0,6 \qquad F_{pZadní} = 432 \text{ N} \times 0,6 = 259,2 \text{ N} \quad (6)$$

Následně je nutné sílu rozdělit na jednotlivá kola nápravy tedy pravé a levé kolo. V tomto kroku je vycházeno z předpokladu, že je aeropaket navržen pro symetrickou funkci a sílu působící na nápravu lze tedy rozdělit na polovinu. Tento předpoklad byl ověřen pomocí simulace v programu Ansys Fluent.

Přítlačná síla působící na kolo

$$F_{pkPřední} = \frac{F_{pPřední}}{2} \qquad F_{pkPřední} = \frac{172,8 \text{ N}}{2} = 86,4 \text{ N} \quad (7)$$

$$F_{pkZadní} = \frac{F_{pZadní}}{2} \qquad F_{pkZadní} = \frac{259,2 \text{ N}}{2} = 129,6 \text{ N} \quad (8)$$

Posledním krokem pro stanovení celkové síly působící na kolo je součet síly tvořené hmotností vozu a přitlačné síly aerodynamických prvků pro každé kolo.

Celková síla působící na kolo

$$F_{dPP} = F_{sPP} + F_{pkPřední} \quad F_{dPP} = 737,7 \text{ N} + 86,4 \text{ N} = 824,1 \text{ N} \quad (9)$$

$$F_{dLP} = F_{sLP} + F_{pkPřední} \quad F_{dLP} = 727,9 \text{ N} + 86,4 \text{ N} = 814,3 \text{ N} \quad (10)$$

$$F_{dPZ} = F_{sPZ} + F_{pkZadní} \quad F_{dPZ} = 713,2 \text{ N} + 129,6 \text{ N} = 842,8 \text{ N} \quad (11)$$

$$F_{dLZ} = F_{sLZ} + F_{pkZadní} \quad F_{dLZ} = 732,8 \text{ N} + 129,6 \text{ N} = 862,4 \text{ N} \quad (12)$$

5.4 Nastavení vzduchových tlumičů

Nastavení vzduchových tlumičů lze rozdělit do tří částí: nastavení tlaku komory, nastavení tlumící části a úprava progresivity vzduchové pružiny. Prvotní nastavení proběhlo dle doporučených parametrů výrobce tlumiče, kde jsou přibližné hodnoty, které by měly odpovídat zatížení tlumiče. Výrobce doporučuje hodnoty při základním objemu vzduchové pozitivní komory, při úpravě je nutné provést korekce jak tlaku vzduchu, tak tlumící části v podobě nastavení komprese a odskoku tlumiče. Po prvotním nastavení proběhlo testování, kde bylo sledováno chování vozu na trati a dle zpětné vazby pilota proběhla úprava nastavení pro zlepšení vlastností odpružení.

Při nastavení tlaku komory je důležitým parametrem právě zatížení tlumiče, které je popsáno v kapitole Celkové zatížení kol. Pro volbu tlaku dle výrobce je prvotně nutné přepočítat celkovou sílu, která působí na kolo na jednotku hmotnosti, jelikož tabulka tlaků je upravena pro nastavení dle hmotností. Při samotném nastavení tlaku komory je základním úkolem upravit tlak výrobce, aby byl dodržen předpoklad konstruktérů, kdy ve statické poloze má být tlumič zanořen v jedné třetině svého zdvihu.

Pro nastavení tlumící části bylo vycházeno opět z doporučeného nastavení výrobce, kdy následovala kontrola pomocí vysokorychlostní kamery. Náprava vozu byla zdvižena do výšky 50 cm a puštěna volným pádem. Sledována byla rychlost zanoření tlumiče do zdvihu a následná

rychlost návratu do statické polohy. Cílem bylo zamezit odskakování kola při přejetí nerovnosti.

Úprava objemu vzduchové komory při nastavení neproběhla, protože se vycházelo z nastavení dle výrobce. Tudiž se nacházela ve vzduchové komoře základní vložka (volume spacer).

Tabulka 4 - Doporučené nastavení tlumičů výrobcem [17]

Hmotnost jezdce (kg)	Tlak vzduchu (psi)	LSC	LSR
55	148	8	8
60	159	7	8
65	169	6	7
70	180	5	7
75	190	5	6
80	201	4	5
85	211	4	5
90	222	3	4
95	232	3	4
100	243	2	3
105	253	2	3
110	263	1	2

5.4.1 Základní nastavení předních tlumičů Marzocchi

Prvním krokem byl přepočítání síly na jednotku hmotnosti pro volbu hodnoty dle výrobce. Přepočítání bylo provedeno pro levé i pravé kolo, jelikož zatížení jsou rozdílná.

$$m_{PP} = \frac{F_{dPP}}{g} \quad m_{PP} = \frac{824,1 \text{ N}}{9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}} = 84 \text{ kg} \quad (13)$$

$$m_{LP} = \frac{F_{dLP}}{g} \quad m_{LP} = \frac{814,3 \text{ N}}{9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}} = 83 \text{ kg} \quad (14)$$

Dle tabulky tlaků pro daný tlumič byla vybrána hodnota tlaku pro nafouknutí komory dle tabulky 4 (viz Tab. 4). Komora se nafukuje speciální pumpou s digitálním manometrem. Pro levý tlumič byla zvolena hodnota tlaku 205 psi, pro pravý tlumič hodnota tlaku 209 psi. Toto nastavení tlaku odpovídalo 25% hodnoty Sag, ta znázorňuje ponoření tlumiče při statické poloze namontovaného a zatíženého tlumiče. V případě monopostu FS.08 zatížení hmotností vozu s pilotem. Ponoření tlumiče levého činilo 11 mm, ponoření tlumiče pravého 11,4 mm. Přestože je podvozek navržen na statickou polohu ponoření tlumičů v jedné třetině zdvihu, při

měření vozidlo nebylo v pohybu, a tudíž nebyly tlumiče zatíženy silou, kterou generují aerodynamické prvky, proto je ponoření přibližně 25 % zdvihu vyhovující hodnotou.

Nastavení komprese a odskoku tlumičů proběhlo dle tabulky 4 s rozdílem nastavení komprese, která prozatím zůstala nastavena na plný průtok oleje. U nastavení odskoku se vychází z polohy plně sníženého průtoku oleje. Nejprve bylo tedy nutné nastavit polohovací kolečko na polohu 12/12 a následně kolečko nastavit o pět pozic zpět ve směru zvýšení průtoku (Fast) (viz Obr. 20). [17]



Obrázek 20 - Nastavení odskoku tlumiče [archiv autora]

Při takto nastavené tlumící části proběhl orientační test s vysokorychlostní kamerou, kdy byla náprava vozu i s pilotem zdvižena do výšky 40 cm a následně proběhl volný pád na podložku. Cílem bylo odhalit, zda odskok tlumiče není nastaven na příliš vysoký průtok oleje a při návratu do statické polohy nedojde k odskočení (příliš rychlému chodu).

5.4.2 Základní nastavení zadních tlumičů Fox

Stejně jako u odpružení předního byl prvním krokem přepočítání síly na jednotku hmotnosti, a to pro možnost využití údajů z tabulky 4 (viz Tab. 4).

$$m_{PZ} = \frac{F_{dPZ}}{g} \qquad m_{PZ} = \frac{842,8 \text{ N}}{9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}} = 86 \text{ kg} \qquad (15)$$

$$m_{LZ} = \frac{F_{dLZ}}{g} \qquad m_{LZ} = \frac{862,4 \text{ N}}{9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}} = 88 \text{ kg} \qquad (16)$$

Dle zatížení tlumičů byla zvolena hodnota tlaku pro daný tlumič dle tabulky 4 (viz Tab. 4). Tedy pro pravý zadní tlumič při zatížení 86 kg hodnota 213 psi a pro levý zadní tlumič při zatížení 88 kg hodnota 219 psi. Následně bylo vozidlo postaveno na kola i s pilotem a zjištěna

hodnota Sag. Na pravém tlumiči byla změřena hodnota ponoření 11,4 mm, na levém tlumiči hodnota ponoření 11,1 mm. Tyto hodnoty jsou považovány za vyhovující.

Dle Tabulky 3 (viz Tab. 3) následně proběhlo nastavení komprese a odskoku, kde nastavení komprese zůstalo na maximální poloze a odskok tlumiče byl nastaven na polohu 7/12, tedy 5 poloh od polohy maximální (tedy 12/12). Následoval test nastavení pomocí vysokorychlostní kamery, který prokázal dle subjektivního hodnocení pomalý chod tlumiče zpět do statické polohy, proto bylo následně změněno nastavení na polohu 6/12 pro zvýšení průtoku oleje. U nastavení komprese tlumiče, tedy rychlosti chodu do zdvihu, byl chod vyhodnocen jako příliš rychlý, proto byl tlumič nastaven do polohy 4 (dle Tabulky 3) a následně byl test opakován. Výsledkem testu byla změna nastavení tlumící části na polohu 3/10 pro chod komprese tlumiče a polohu 6/12 pro nastavení odskoku tlumiče. Celý postup základního nastavení tlumiče fox je znázorněn na obrázku 21 níže (viz Obr. 21) [17]



Obrázek 21 - Postup nastavení pravého zadního tlumiče [archiv autora]

5.5 Nastavení světlé výšky vozu

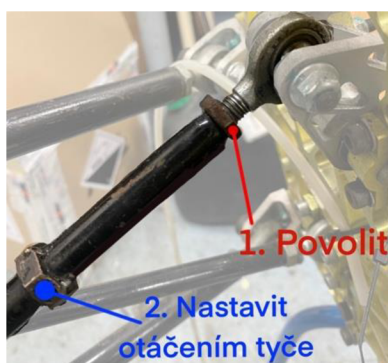
Světlá výška vozu je definována jako vzdálenost ve vertikálním směru od vozovky (podložky) k nejnižšímu bodu vozidla s výjimkou pneumatik. Dle pravidel soutěže Formula student je minimální hodnotou světlé výšky 30 mm. V případě aktivního odpružení s variabilní výškou je brána minimální pozice výšky podvozku. Světlá výška vozu je měřena i s pilotem. [18]

Monopost FS.08 je navržen pro světlu výšku 38 mm. Jedná se o důležitý parametr hned v několika ohledech. Světla výška zásadně ovlivňuje polohu těžiště vozu, vlastnosti aerodynamických prvků ovladatelnost a stabilitu vozidla. [19]

5.5.1 Nastavení světlé výšky na vozidle

Nastavení světlé výšky na vozidle spočívá ve změně délky tažné a tlačné tyče (pull/push rod). To je umožněno pomocí sférických kloubků se závitovým dřikem. Zatočením na požadovanou stranu docílíme prodloužení nebo zkrácení celkové vzdálenosti středů kloubků (viz Obr. 22). Postup nastavení pro přední a zadní odpružení se neliší. Nejnižším bodem monopostu jsou výstupky rámu. Tyto výstupky jsou zakončením hlavního rámového oblouku a předního rámového oblouku.

Postup se opakoval pro každou tyč odpružení. Přičemž bylo nutné neustálé přeměřování dle stanovených bodů, jelikož nastavení každého jednoho prvku ovlivní světlu výšku. Posledním krokem byla finální kontrola, zda je světla výška ve všech stanovených bodech stejná. Nastavení probíhalo s pilotem v kokpitu monopostu.



Obrázek 22 - Princip nastavení světlé výšky [archiv autora]

5.6 Nastavení geometrie přední a zadní nápravy

Nastavení geometrie podvozku je poměrně obtížnou záležitostí, protože volba vhodných nastavení je závislá na velkém počtu proměnných parametrů. Základní informací pro nastavení geometrie je kinematický pohyb kola ve vertikální a horizontální ose. Ve vertikální ose se při jízdě dynamicky mění úhel odklonu kola, v ose horizontální úhel sbíhavosti kol. V případě znalosti závislosti pohybu os kola na chodu ramen při odpružení, zatáčení a náklonu vozidla lze stanovit limity změn parametrů. Následně je možné navrhnout vhodné hodnoty pro úpravu

nastavení přímo na vozidle. Při návrhu nastavení je nutné brát v potaz chování pneumatik. Zejména teplota a tlak pneumatiky zásadně ovlivňují funkci podvozku. Například v případě příliš agresivního nastavení geometrie podvozku může dojít k přehřívání pneumatik či nadměrnému opotřebení. Posledním faktorem je bezesporu pilot. Každý pilot má své preference na chování vozidla a jeho zpětná vazba či popis chování je nedílnou součástí nastavení. Kooperace s pilotem spočívá v popisu chování vozu při testování a stanovení požadavků na úpravu, například v případě nedotáčivosti, přetáčivosti a stability vozu. Nutné je brát v potaz, že každá trať je jiná a v ideálním případě je vhodné provést optimální nastavení pro daný okruh. To je možné pouze při znalosti tratě a dostatečného prostoru pro testování, které je nutné pro ověření funkce nastavení. [7]

5.6.1 Kinematika přední nápravy

Pro zjištění kinematických parametrů nápravy bylo využito simulací z programu Lotus Suspension Analysis, který je určen právě pro návrh a simulace podvozku. Cílem této kapitoly je zjistit, jak se mění při jízdě vozidla parametr odklonu předního kola.

Tabulka 5 - Výsledek simulace v programu Lotus (přední náprava)

Kinematika přední nápravy						
Náklon rámu	Odklon	Propružení	Odklon	Chod řízení	Poloměr zatáčky	Odklon kola
		mm		mm	m	
1,8	-0,607	24	-1,55	30	3,2	-1,24
1,5	-0,503	20	-1,28	25	4	-1,09
1,2	-0,4	16	-1,02	20	5,1	-0,92
0,9	-0,298	12	-0,76	15	7	-0,72
0,6	-0,197	8	-0,51	10	10,6	-0,5
0,3	-0,098	4	-0,25	5	21,4	-0,26
0	0	0	0	0	0	0
-0,3	0,07	-4	0,25	-5	21,4	0,28
-0,6	0,192	-8	0,5	-10	10,6	0,59
-0,9	0,286	-12	0,75	-15	7	0,93
-1,2	0,378	-16	0,99	-20	5,1	1,3
-1,5	0,469	-20	1,24	-25	4	1,7
-1,8	0,559	-24	1,48	-30	3,2	2,15

V tabulce 5 (viz Tab. 5) jsou zobrazeny změny odklonu kola pro jednotlivé kinematické jevy, které vznikají při jízdě vozidla. Dle simulace lze vyhodnotit, jak se odklon mění celkově, protože jevy jsou v simulaci provázané a při znalosti jejich směru lze změny odklonu sečíst. Tím získáme celkovou změnu odklonu při dané situaci.

Pro stanovení chování vozu byly vybrány dva poloměry zatáčky. Limitní poloměr zatáčky 3,2 m a poloměr zatáčky 10,6 m, který odpovídá rychlé zatáčce závodních okruhů. Pomocí znalosti změny odklonu v limitním poloměru zatáčky bude určena maximální hodnota

změny odklonu kola oproti nulové pozici. Na základě této hodnoty bude následně možné určit nastavení odklonu kola pro statickou polohu, tedy nastavení prvního ze dvou volitelných parametrů předního zavěšení.

Důležitým předpokladem pro pochopení postupu je fakt že při průjezdu například levé zatáčky je zatíženo primárně pravé přední kolo. Podíl přenosu váhy na pravé kolo se odvíjí od poloměru zatáčky, kdy s klesajícím poloměrem zatáčky při průjezdu konstantní rychlostí roste zatížení kola. Potřebnou informací je tedy úhel odklonu právě pravého předního kola (vnějšího). Opomenut nesmí být ale ani úhel odklonu vnitřního kola, protože i vnitřní kolo působí zatížení a zajišťuje tak stabilitu vozu při průjezdu zatáčkou.

Změny odklonu dle kinematiky přední nápravy

Tato kapitola popisuje postup při stanovení změny odklonu kol, tedy kola vnitřního i vnějšího. Cílem je navrhnout takové nastavení statického odklonu, které bude vyhovovat změně odklonu oběma kolům při stanovených poloměrech zatáčky. Simulace vychází z předpokladu, že je vozidlo symetrické, a proto je změna odklonu při průjezdu levou i pravou zatáčkou o jednom poloměru stejná.

Při průjezdu levou nebo pravou zatáčkou o poloměru 3,2 m se rám vozidla nahne o $1,8^\circ$, tím se změní odklon vnějšího kola o $0,559^\circ$ do pozitivního směru odklonu. Současně dojde k pro pružení zavěšení o 12 mm to způsobí změnu odklonu $0,76^\circ$ do negativního směru odklonu. Poslední složkou je vliv polohy řízení, kdy se převodka řízení přestaví o 30 mm, to způsobí změnu odklonu kola $1,24^\circ$ do negativního směru.

Při průjezdu zatáčkou při stejných podmínkách se pak odklon vnitřního kola bude chovat následovně: rám vozu se nakloní o $1,8^\circ$, tím se změní odklon o $0,607^\circ$ do negativního směru. Ramena zavěšení se vlivem nadlehčení vnitřního kola přestaví do záporné pozice 12 mm, to způsobí odklon pozitivní o $0,75^\circ$ a řízení při přestavení převodky na hodnotu 30 mm způsobí změnu odklonu $2,15^\circ$ v pozitivním směru.

Při následném sečtení změn odklonu kol je nutné brát v potaz vůli v podvozku, která činí $0,5^\circ$ a působí vždy proti směru odklonu kola. Tedy negativní i pozitivní odklon vždy zmenšuje. [20]

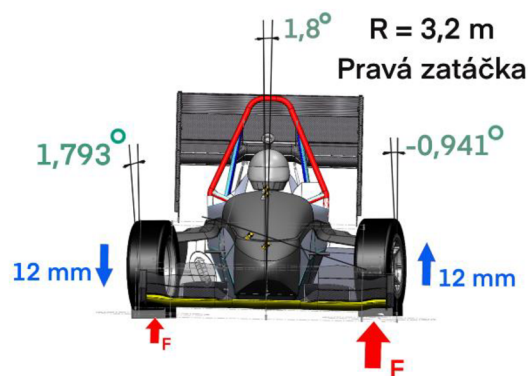
Tento postup se opakoval i pro stanovení změny s rozdílem poloměru zatáčky, který činil 10,6 m. Výsledky jsou znázorněny v tabulce 6 (viz Tab.6).

Tabulka 6 - Změna odklonu přední nápravy při průjezdu zatáčkou $R=3,2$ m a $R=10,6$ m

Zatáčka $R=3,2$ m	Vnější kolo	Vnitřní kolo	Zatáčka $R=10,6$ m	Vnější kolo	Vnitřní kolo
	Změna odklonu	Změna odklonu		Změna odklonu	Změna odklonu
Náklon vozu	0,559	-0,607 °	Náklon vozu	0,192	-0,197 °
Chod odpružení	-0,76	0,75 °	Chod odpružení	-0,25	0,25 °
Řízení	-1,24	2,15 °	Řízení	-0,5	0,59 °
Vůle podvozku	0,5	0,5 °	Vůle podvozku	0,5	0,5 °
Celková změna	-0,941	1,793 °	Celková změna	-0,058	0,143 °

Dle tabulky 6 (viz Tab.6) je patrné, jak se mění odklon kola vnitřního i vnějšího při průjezdu zatáček o vybraných poloměrech. Následujícím krokem je stanovení statického odklonu, který bude nastaven na vozidle. Při volbě je nutné brát v potaz obě podmínky poloměru zatáček a stanovit kompromis vzhledem k změně odklonu vnitřního i vnějšího kola. Při volbě příliš velkého odklonu by došlo k nadměrnému zahřívání a nežádoucímu opotřebení pneumatiky vlivem nerovnoměrného zatížení. V případě, že by se podmínky pro závodní týmy při závodech zlepšily v podobě možnosti tréninkových či testovacích jízd, bylo by možné upravovat nastavení dle typu tratě, tedy v závislosti na počtu zatáček s danými poloměry. V současnosti však týmy tuto možnost nemají, proto ve většině případů pracují pouze s jedním nastavením odklonu. [7]

Volba pro nastavení statického odklonu přední nápravy je -1° , tedy negativní odklon. Toto nastavení odpovídá kompromisu opotřebení pneumatik a je vhodné spíše pro tratě s větším množstvím zatáček o poloměru menším než 7 m. Změna parametrů odklonu kol je graficky znázorněna na obrázku 23 níže (viz Obr. 23).



Obrázek 23 - Grafické znázornění průjezdu pravé zatáčky $R=3,2$ m při nulovém statickém odklonu [archiv autora]

5.6.2 Kinematika zadní nápravy

Stejně jako u přední nápravy, i tato kapitola vychází ze simulace zpracované v programu Lotus Suspension Analysis. Jedná se o analýzu chování odklonu kola při průjezdu zatáčkou o poloměrech 3,2 m a 10,6 m.

Tabulka 7 - Výsledek simulace v programu Lotus (zadní náprava)

Kinematika Zadní nápravy				
Náklon rámu	Odklon	Propružení	Odklon	Poloměr zatáčky
°	°	mm	°	m
1,8	0,01	24	-1,22	3,2
1,5	0,18	20	-0,91	4
1,2	0,27	16	-0,6	5,1
0,9	0,35	12	-0,3	7
0,6	0,42	8	-0,01	10,6
0,3	0,5	4	0,28	21,4
0	0,57	0	0,57	0
-0,3	0,64	-4	0,86	21,4
-0,6	0,71	-8	1,14	10,6
-0,9	0,78	-12	1,69	7
-1,2	0,84	-16	1,96	5,1
-1,5	0,9	-20	2,23	4
-1,8	0,96	-24	2,49	3,2

Při porovnání tabulek kinematiky pro přední (viz Tab. 5) a zadní nápravu (viz Tab. 7) je patrný rozdíl mezi odklony v nulových hodnotách simulací, tedy při nulovém náklonu rámu a nulového postavení ramen zavěšení. Zatímco při nulových hodnotách přední nápravy jsou hodnoty odklonu kola rovné nule, náprava zadní má při těchto parametrech již kladný odklon $0,57^\circ$. To zajistí ovlivní nastavení statického odklonu zadního kola. Postup je obdobný jako u nápravy přední, kdy cílem je ze simulace vyjádřit celkovou změnu odklonu oproti nulové poloze. Dle celkové změny odklonu kola bude následně stanovena hodnota statického odklonu pro nastavení podvozku.

Změny odklonu dle kinematiky zadní nápravy

Při zpracování jednotlivých změn odklonu pro vnitřní a vnější kolo při průjezdu zatáčkou je nutné zmínit změnu velikosti propružení a vyvěšení kola. Při poloměru zatáčky 3,2 m dojde k chodu ramen zavěšení vnějšího kola o 8 mm. Způsobené je to silou, která je při průjezdu zatáčkou přenesena více na přední nápravu, konkrétně na přední vnější kolo.

Při průjezdu zatáčky s výše zmíněným poloměrem tedy dojde k nahnutí rámu o $1,8^\circ$. Tím se změní odklon kola vnějšího na hodnotu $0,96^\circ$ kladného odklonu. Odklon kola vnitřního se změní na hodnotu $0,01^\circ$. Druhým parametrem, pro stanovení celkového odklonu, je změna

odklonu při pro pružení zavěšení, kdy dojde k chodu ramen vnějšího i vnitřního kola o 8 mm. Následkem jsou hodnoty odklonu pro vnější kolo $-0,1^\circ$ a pro vnitřní kolo hodnota $1,14^\circ$ pozitivního odklonu. Tyto hodnoty se sečtou a následně musí být zohledněna celková vůle podvozku $0,5^\circ$, která působí vždy proti směru odklonu, tudíž se odečte od součtu dvou hodnot úhlu ze simulace. [20]

Tento postup se opakoval i pro stanovení změny s rozdílem poloměru zatáčky, který činil 10,6 m. Výsledky jsou znázorněny v tabulce 8 (viz Tab.8).

Tabulka 8 - Změna odklonu přední nápravy při průjezdu zatáčkou $R=3,2$ m a $R=10,6$ m

Zatáčka $R=3,2$ m			Zatáčka $R=10,6$ m		
	Vnější kolo	Vnitřní kolo		Vnější kolo	Vnitřní kolo
	Změna odklonu	Změna odklonu		Změna odklonu	Změna odklonu
Náklon vozu	0,96	0,01	Náklon vozu	0,71	0,42
Chod odpružení	-0,01	1,14	Chod odpružení	0,28	0,86
Vůle podvozku	0,5	0,5	Vůle podvozku	0,5	0,5
Celková změna	0,45	0,65	Celková změna	0,49	0,78

Dle tabulky 8 (viz Tab. 8) jsou patrné změny odklonu, pomocí kterých lze stanovit hodnotu statického odklonu, která bude na voze nastavena. Při nastavení však musí být brána na vědomí hodnota při statické poloze, jelikož není nulová. Proto změna nastavení vychází z hodnoty $0,57^\circ$ pozitivního odklonu. Pro nastavení statického odklonu kol zadní nápravy je zvolena hodnota $-0,5^\circ$. Při nastavení na vozidle to znamená změnu nastavení úhlu o přibližně $-1,1^\circ$ negativního odklonu. Toto nastavení je zvoleno s ohledem na stabilitu vozu při jízdě v přímém směru, aby vlivem nastavení nedocházelo k pocitu pilota, že vozidlo neudrží přímý směr. Zároveň je tato hodnota statického odklonu přívětivou pro opotřebení a přehřívání pneumatik.

5.6.3 Volba úhlu sbíhavosti kol

V této kapitole je v první řadě nutné popsat, jak se nastavení odklonu promítne do jízdnicích vlastností vozu a jak následně ovlivní pneumatiky. Při tomto nastavení je vycházeno ze zkušeností nasbíraných v minulých letech a preferencí pilota. U předešlých monopostů byl vznesen požadavek na zmírnění přetáčivé povahy vozu, proto byla hodnota vždy nastavena na pozitivní sbíhavost obou náprav. Pozitivní sbíhavost přední nápravy má za následek zvýšení stability vozu zejména při brždění a nájezdu do zatáčky, což umožňuje pilotovi zvolit optimální stopu pro následný průjezd zatáčkou. Pozitivní sbíhavost zadní nápravy zvyšuje stabilitu zejména ve středu zatáčky, kdy sbíhavost kol zajišťuje následování přední nápravy (viz Tab. 9), při současné eliminaci přetáčivosti vozu. Například vozy Formule 1 využívají pro nastavení

přední nápravy mírně rozbíhavý úhel, jelikož oproti monopostům Formula student mají větší rozměry a také více než dvojnásobnou hmotnost. Cílem rozbíhavého nastavení vozů Formule 1 je zajištění agility vozu při průjezdu zatáčkou. Při hmotnosti a rozměrech jako má monopost FS.08 je problémem spíše stabilita než agilita vozu. [21]

Tabulka 9 - Vliv sbíhavosti kol na chování vozu [21]

Sbíhavost kol	Změna	Přední n.		Zadní n.		Největší vliv			
		GRIP	Stabilita	GRIP	Stabilita	Brzdění	Nájezd	Střed	Výjezd
Přední k.	Více+					*	*		
	Méne-					*	*		
Zadní k.	Více+						*	*	*
	Méne-						*	*	*

Pozitivní
Negativní
Malý vliv
Největší vliv

Dle požadovaného charakteru chování vozu byly vybrány následující parametry sbíhavosti kol. Pro přední nápravu sbíhavost kol $0^{\circ}10'$. Pro nápravu zadní byla zvolena taktéž sbíhavost kol s hodnotou $0^{\circ}12'$. Pro nastavení je nutné dodržet stranovou souosost. V případě nastavení hodnot při jiné, než nulové poloze volantu, by docházelo k negativnímu jízdnímu chování vozu.

5.6.4 Nastavení geometrie podvozku na vozidle

Fyzické nastavení geometrie náprav proběhlo ve školních dílnách univerzity. Zde je k dispozici klíčové vybavení v podobě zařízení pro nastavení geometrie odklonu a sbíhavosti kol (Geotest 60 plus). Postup nastavení je možný až po nastavení tlumičů a světlé výšky, protože světlá výška mění polohu ramen zavěšení, tím se mění poloha těhlice.

Prvním krokem nastavení bylo umístění vozidla na stanoviště měření geometrie, které je realizováno čtyřsloupovým zvedákem. Podmínkou tohoto stanoviště pro správnou funkci je vodorovná poloha ploch pro stání vozidla. V případě jiné polohy by mohlo dojít ke zkreslení měření a následného nastavení. Nastavení probíhalo s pilotem posazeným v monopostu pro maximalizaci přesnosti výsledných hodnot. Krokem druhým pak bylo zablokování polohy volantu v nulové poloze pomocí přípravku ze sady měřícího zařízení.

V tabulce 10 (viz Tab. 10) jsou znázorněny hodnoty nastavení geometrie přední a zadní nápravy.

Tabulka 10 - Hodnoty geometrie náprav pro nastavení

Hodnoty pro nastavení geometrie náprav			
	Přední kola	Zadní kola	
Odklon	-1	-0,5	°
Sbíhavost	0,17	0,2	°

Jako první z výše zmíněných nastavení proběhlo nastavení odklonu kol. To je realizováno pomocí konstrukce těhlice, kdy je zakončení vrchního ramene vloženo do vrchní části těla těhlice. V těhlici je pro upevnění ramene vyfrézována plovoucí díra, která umožňuje posuv šroubu v povoleném stavu do stran (viz Obr. 24). Nastavení sbíhavosti tedy proběhne povolením šroubu vrchního ramene a posunutím těhlice do požadované polohy. Hodnoty odklonu jsou zobrazené na monitoru zařízení a snímány jsou pomocí čtyř měřících hlav. Následně je nutné šroub těhlice utáhnout na předepsaný utahovací moment a zajistit pomocí lepidla na závity. Tento postup se opakuje pro každé kolo. Úhel odklonu pro přední kola byl nastaven na hodnotu -1° , pro kola zadní byl nastaven úhel $-0,5^\circ$.



Obrázek 24 - Uzpůsobení těhlice pro nastavení odklonu kola [archiv autora]

Po nastavení odklonu kol následovalo nastavení sbíhavosti kol přední a zadní nápravy. Konstrukčně je možnost nastavení řešena podobně jako u nastavení světlé výšky. Tedy pomocí nastavení délky spojovací tyče řízení (track rodu), lépe řečeno vzdálenosti bodu uložení tyče do těhlice a na druhé straně bodu uložení k pomocnému rámu nebo vzdálenost k hřebeni převodky řízení.

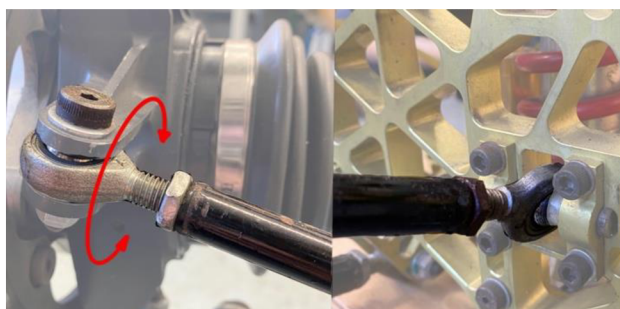
Rozlišná je však konstrukce spojovacích tyčí řízení, kdy přední spojovací tyče jsou vyfrézované a tvarované kvůli elektromotorům, aby nedocházelo při natočení těhlice ke kolizi. Nastavení je v tomto případě uskutečněno sférickým kloubkem, který je našroubován do hřebene převodky řízení a zajištěn maticí. Sbíhavost je následně nastavována pomocí vytočení

nebo zatočení kloubku do hřebene. Tím se mění vzdálenost bodu těhlice od hřebene řízení a zároveň i statická poloha sbíhavosti předních kol (viz Obr. 25).



Obrázek 25 - Princip nastavení sbíhavosti předních kol vytočením sférického kloubku [archiv autora]

Konstrukční řešení zadní spojovací tyče je uskutečněno pomocí tyče kruhového průřezu, která je na obou stranách opatřena vnitřním závitem pro montáž sférických kloubků se závitovým dřikem. Samotný princip nastavení sbíhavosti je pak obdobný jako u kol předních, kdy vytočení nebo zatočení kloubku určuje polohu těhlice pomocí změny vzdálenosti dvou bodů, tedy bodu uložení v těhlici a připevnění k zadnímu pomocnému rámu (viz Obr. 26).



Obrázek 26 - Princip nastavení sbíhavosti zadních kol [archiv autora]

Hodnoty sbíhavosti byly znázorněny na monitoru zařízení měření geometrie a snímány byly pomocí měřících hlav, stejně jako u nastavení odklonu kol. Pro zadní nápravu byla nastavena hodnota sbíhavosti kol $0^{\circ}12'$ ($0,2^{\circ}$) a pro nápravu přední sbíhavost kol $0^{\circ}10'$ ($0,17^{\circ}$).

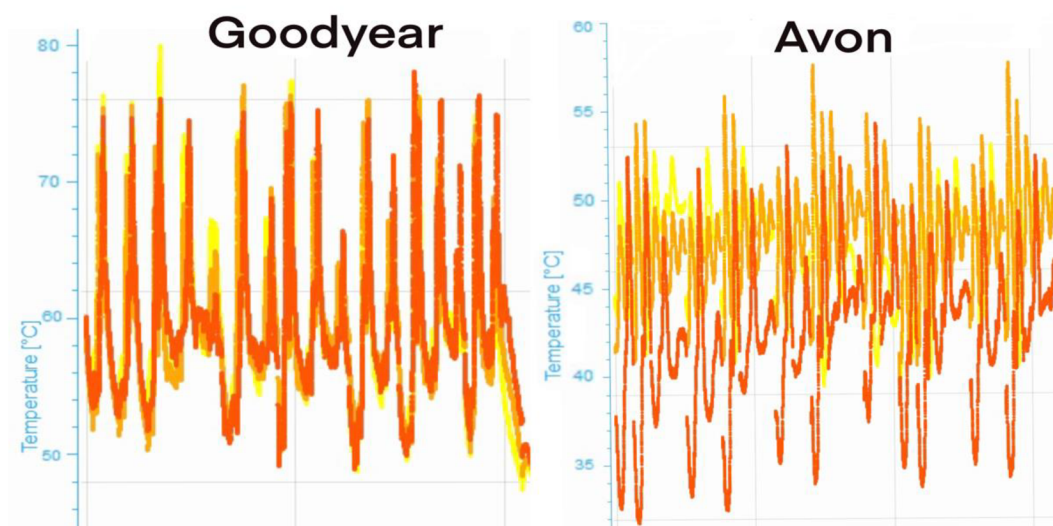
5.6.5 Pneumatiky

Jedním z klíčových aspektů pro funkci podvozku je volba pneumatik. Tým se v minulém roce rozhodl pro změnu výrobce pneumatik, a to zejména s ohledem na hmotnost pneumatiky. V minulých letech byly monoposty osazeny pneumatikami Avon s označením A92. Pro osmou generaci vozu byl zvolen přechod na pneumatiky Goodyear Eagle G19 určené speciálně pro monoposty Formula student.

Hlavním impulsem pro změnu pneumatik byla především jejich hmotnost, kdy hmotnost pneumatiky Avon A92 činí při používaném rozměru (7.2/20.0-13) 5,7 kg. Naopak pneumatika Goodyear Eagle G19 při rozměru (20.0x7.0-13) disponuje hmotností pouze 4 kg. Tato úspora hmotnosti byla klíčová k zachování hodnoty neodpružené hmotnosti, jelikož mezi sedmou a osmou generací vozu došlo ke změně koncepce pohonu na hybridní. To znamenalo umístění elektromotorů do sestavy předního zavěšení a tím i navýšení neodpružené hmotnosti, které bylo následně eliminováno úsporou hmotnosti právě volbou pneumatik. [22]

Pro správnou funkci a teplotu pneumatik je hlavním parametrem nastavení tlaku v pneumatice. To uvádí výrobce v technickém listu. Pro pneumatiku výrobce Goodyear jsou hodnoty tlaku 10 psi (0,7 bar) v nezahřátém stavu a 12 psi (0,83 bar) pro pracovní teplotu, tedy zahřátý stav. Hodnoty tlaku mohou být nižší o 2 psi pro lehká vozidla, např. monoposty FSAE. Rozsah teplot pro správnou funkci pneumatiky je 48-80 °C.

V této kapitole je nutné zmínit rozdíly mezi původními a současnými pneumatikami. Zřejmě největším rozdílem (vyjma hmotnosti pneumatiky) je rozsah pracovních teplot. Pneumatika Avon disponuje pracovní teplotou v rozsahu 35-55 °C. To je na stupnici teploty o poznání níže než současné pneumatiky Goodyear. Rozsah původních pneumatik byl považován za jejich výhodu, jelikož podmínky závodů Formula student neumožňují použití zahřívacích pytlů na kola ani zahřátí pneumatik při příjezdu vozidla na start disciplíny. Jejich nižší pracovní teplota tedy umožňovala agresivnější jízdu i bez velkého zahřívání. To bylo znatelné zejména při chladných povětrnostních podmínkách. Rozsahy pracovních teplot pro oba typy pneumatik jsou znázorněny v porovnání grafů níže (viz Graf 3).



Graf 3 - Porovnání pracovních teplot pneumatik Goodyear a Avon

5.7 Testování nastavení podvozku

Součástí nastavení podvozku závodních monopostů je testování. Cílem je zjistit, zda výsledné chování vozu při jízdě odpovídá předpokladům pro nastavené parametry. Současně testování slouží k odhalení nedostatků funkce vozu, kdy při jejich objevení je nutné problém vyřešit v co nejkratším termínu, aby bylo vozidlo připraveno na závody s ideálním nastavením a co nejvíce konkurenceschopné.

Testování podvozku monopostu FS.08 proběhlo na polygonu v Panenském Týnci. Jednalo se o sdružené testování pro podvozek a aerodynamické prvky. Kromě funkce podvozku tedy bylo zkoumáno i obtékání vzduchu jednotlivých prvků předního a zadního křídla. Cílem testování pro podvozek byla analýza funkce celku a odhalení nedostatků. Konkrétně se testování skládalo z analýzy teplot pneumatik, analýzy opotřebení pneumatik a porovnání funkce pneumatik Goodyear a Avon pomocí měření časů kola při použití obou typů pneumatik. V závěru testování byla provedena zkouška jízdy bez aeropaketu, který byl demontován.

Pro testování byl pomocí kuželů vytyčen okruh, který byl ekvivalentem běžné závodní trati, na které probíhá disciplína endurance a autocross v závodní sezóně. Skládal se ze sedmi pravotočivých a pěti levotočivých zatáček. Většina zatáček byla charakteristická pro pomalou trať, protože jejich poloměr byl menší než 7 m. Trať je znázorněna na obrázku níže (viz Obr. 27).



Obrázek 27 - Trať pro testování [archiv autora]

První část testování náležela testování aerodynamických prvků, část druhá následně nastavení podvozku. Postup pro testování podvozku spočíval v ujetí určitého počtu kol a bezprostředně po zastavení vozu následovalo měření teplot pneumatik pomocí termokamery Flir E5. Měření teploty proběhlo vždy ve třech bodech pneumatiky, aby byla zajištěna teplota vnějšího kraje dezénu, středu dezénu a vnitřního kraje dezénu. Toto měření bylo opakováno třikrát, vždy po zastavení vozu. Specifikace pro polohu bodů měření teploty pneumatiky byla stanovena na 3 cm od vnitřního okraje, přibližný střed pneumatiky a 3 cm od vnějšího okraje pneumatiky. Pro sledování chování vozu byla na hlavní rámový oblouk umístěna kamera, která snímala polohu předních kol. Vždy během měření pneumatik pilot stručně sdělil informace o chování vozu. Pro porovnání pneumatik bylo každé kolo měřeno, aby bylo možné následně analyzovat časy. Po naměření všech tří jízd následovala výměna kol za kola osazená pneumatikami Avon A92. Poté byl ujetý větší počet kol pro naměření časů. Posledním úkonem pro testování byla demontáž předního a zadního křídla. Tento počín byl spíše experimentálního charakteru, protože byla často kladena otázka, jak se monopost bude chovat bez aerodynamických prvků a jaký bude rozdíl jízdních vlastností. Důležitou součástí testování je zaznamenání měřených hodnot, to proběhlo pomocí zápisu hodnot do předem připraveného testovacího formuláře.

5.8 Vyhodnocení testování

V následujících kapitolách jsou znázorněny výsledky testování. Skládají se ze zpětné vazby pilota, kamerového záznamu, naměřených teplot pneumatik, porovnání časů a následného zhodnocení opotřebení pneumatik. V jednotlivých rozjížděkách testování byl pilot vyzván k úpravě jízdního stylu. Při rozjížděce první byl kladen důraz na plynulou jízdu s důrazem na volbu „čisté“ stopy. Pro rozjížděčku druhou byla volba jízdního stylu ponechána

na volbě pilota a v rozjížděči třetí byl kladen důraz na agresivní jízdu co nejbližší závodnímu tempu.

5.8.1 Zpětná vazba pilota

Zpětná vazba pilota je hlavním stavebním kamenem nejen hodnocení nastavení podvozku, ale celkové funkce monopostu. Pro systematické zpracování poznatků je tato kapitola sepsána dle jednotlivých funkčních celků, které pilot hodnotil separátně. Tento způsob hodnocení pilotem má za cíl objevit souvislosti v případě nejasného původu některého z negativních jevů. Pozitivem volby pilota pro testování je jeho působení ve vývojové sekci podvozku, to znamená znalost konstrukce a funkce jednotlivých částí. Jeho zpětná vazba tudíž poskytovala přesné informace a konkretizaci funkce jednotlivých prvků.

Hodnocení je rozděleno do následujících celků:

- Odpružení
- Nastavení geometrie
- Pneumatiky
- Celkové hodnocení a pocit z jízdy

Zpětná vazba pilota – odpružení

Dle pilota odpružení vykazovalo přiměřenou rychlost chodu jak do zdvihu, tak do statické polohy. Negativní odskakování nebylo zaznamenáno u žádného z kol monopostu. Co však pilot popsal jako negativum, na které bylo potřeba se zaměřit, je poměrně lineární chod odpružení, tedy chod pístitnice v celém rozsahu při pocitově lineárně rostoucí síle. Dle pilota by bylo vhodné nastavit chod tlumičů progresivnější. Pro testovací okruh sice lineární chod nepředstavoval negativní chování vozu, ale při závodech na okruhu s převýšením nebo většími nerovnostmi by mohlo docházet k chodu tlumičů na doraz. Zároveň pilot preferuje progresivní charakteristiku odpružení. Celkový pocit z odpružení pilot popsal jako optimální nastavení rychlostí chodu a dobré pohlcování drobných nerovností. U nerovností výraznějších, jako například zvlnění povrchu v brzdných sekcích trati, je již odpružení málo tuhé, tudíž pilot navrhuje úpravu progresivity chodu.

Zpětná vazba pilota – geometrie kol

Dle pilota se vozidlo chová klidně při nájezdu do zatáčky, což mu umožňuje požadovanou volbu stopy. Předpoklad pro eliminaci přetáčivého chování se podařilo naplnit, kdy chování v zatáčce oproti předchozí generaci umožňuje agresivnější řízení směru bez nežádoucího pohybu zadní nápravy. To bylo znatelné zejména při průjezdu zatáček se zmenšujícím se poloměrem. Moment, kdy se však projevilo negativní chování vozu (v podobě ztráty přilnavosti zadních kol) byl výjezd ze zatáčky. Dle pilota se ale jednalo spíše o reakci motoru na polohu plynového pedálu. Na výjezdech ze zatáčky si tedy musel hlídat načasování a polohu sešlápnutí plynového pedálu.

Zpětná vazba pilota – pneumatiky

V této kapitole je popsáno hodnocení pilota, pro chování primárně pneumatik Goodyear G19 zvolených pro následující sezónu, dále je popsáno porovnání obou typů pneumatik dle pilota.

Dle pilota byla u pneumatik Goodyear G19 znatelná vyšší pracovní teplota a první kola jízdy vždy vykazovala neoptimální přilnavost pneumatik. Přibližně po ujetí dvou kol na testovacím okruhu pneumatiky začaly plnit svou funkci přilnavosti. Přilnavost pneumatik se s počtem ujetých kol vždy zlepšovala a s přibývajícemi koly mohla růst agrese při ovládnutí vozu. Pilot popsal chování pneumatik v čase. Při prvních kolech musel předvídat ztrátu přilnavosti a pohotově reagovat. S postupným zahříváním se však pneumatiky stávaly daleko čitelnější. Jako pozitivum popsal i zpětnou vazbu pneumatik, kdy neměl problém s identifikací míry přilnavosti a předvídní mu tudíž nečinilo problém. Jako nejprůkaznější pro funkci pneumatik klasifikoval pilot třetí rozjížděku, kdy byl vyzván k agresivnímu stylu jízdy. Monopost vykazoval přesné a předvídatelné chování s velkou mírou přilnavosti na obou nápravách vozu. Dle jeho slov byl překvapen funkcí pneumatik při míře agrese, s jakou monopost řídil.

Pneumatiky Avon v porovnání s Goodyear, naopak dle pilota nebylo skoro potřeba zahřívát, od prvních kol měly větší míru přilnavosti. Ta rostla zhruba v průběhu čtyř kol a následně se ustálila. V zahřátém stavu však pneumatika nevykazovala takovou čitelnost a pro pilota tak bylo obtížnější předvídat limit přilnavosti. V celkovém shrnutí pilot popsal pneumatiku Avon jako vhodnou pro disciplíny s krátkou tratí, jelikož vlastnosti pneumatiky jsou zajištěny téměř okamžitě, naopak pro disciplíny s větším nájezdem kol jsou lepší volbou

pneumatiky Goodyear, jelikož s časem stráveným na trati se zvyšuje přilnavost, která dle pilota převyšuje vlastnosti pneumatik Avon.

Celkové hodnocení a pocit z jízdy pilota

V celkové sumarizaci pilot zhodnotil chování monopostu těmito slovy: „Nezaznamenal jsem žádné větší nedostatky v konstrukci, nastavení ani povaze chování vozu. Poměrně obtížná pro mě byla práce s plynovým pedálem, protože motor má okamžitou odezvu. Co se týká odpružení, zvážil bych volbu progresivnějšího nastavení. Aby byla zachována vlastnost eliminovat menší nerovnosti, ale nenastal v budoucnu problém s chodem tlumičů na maximální polohu. Pneumatiky Goodyear mě poměrně překvapily v podobě čitelnosti, kolik přilnavosti mi v daném okamžiku pneumatika poskytne. Poměrně spolehlivě jsem byl schopen najít limit a předvídat jeho překročení. Dle mého názoru je současný monopost méně přetáčivý, tedy na zahřátých pneumatikách. Než se pneumatiky zahřejí, pociťoval jsem jak přetáčivé, tak nedotáčivé chování. Celkově jsem si však na monopost s tímto nastavením nemusel příliš zvykat a během pár kol jsem cítil jistotu při jízdě a možnost zrychlovat.“

5.8.2 Porovnání časů

Časy jednotlivých rozjížděk jsou zobrazeny v tabulce 11 níže (viz Tab. 11).

Tabulka 11 - Časy jednotlivých rozjížděk

1. rozjíždka		2. rozjíždka		3. rozjíždka	
Čas kola		Čas kola		Čas kola	
1.	53,05	1.	52,60	1.	53,19
2.	52,80	2.	50,98	2.	51,88
3.	51,35	3.	52,99	3.	50,60
4.	51,56	4.	52,09	4.	51,33
5.	51,70	5.	50,92	5.	52,10
Průměr	52,09	Průměr	51,92	Průměr	51,82
Nejlepší	51,35	Nejlepší	50,92	Nejlepší	50,60

Dle průměrných časů jednotlivých rozjížděk je patrná klesající tendence časů na kolo, pilot tedy postupem času zrychloval. V rozjíždce první byl kladen důraz na čistou jízdní stopu a plynulou jízdu. To v důsledku vedlo ke snížení a ustálení časů kolem 51 sekund. Průměrný čas rozjíždky činil 52,09 sekund. Nejrychlejší kolo bylo kolo třetí s časem 51,35 sekund. V rozjíždce druhé byla volba jízdního stylu ponechána na pilotovi. Průměrný čas byl 51,92 sekund. Nejrychlejším kolem bylo kolo páté s časem 50,92 sekund. Pro poslední tedy třetí rozjíždku byl pilot vyzván k agresivnímu stylu jízdy. Průměrný čas byl snížen na hodnotu 51,82 sekund. Čas nejrychlejšího kola tedy třetího čítal 50,6 sekund. Jednalo se tedy o nejrychlejší rozjíždku testování a současně i nejrychlejší čas kola za celé testování. Hodnota časů vypovídá o postupném zahřívání pneumatik, a především o postupném sžívání pilota jak s tratí, tak monopostem.

5.8.3 Hodnocení nastavení geometrie kol v závislosti na teplotě pneumatik

Měření teplot proběhlo pomocí termokamery Flir E5, jak již bylo popsáno výše. Pro hodnocení nastavení geometrie kol v závislosti na teplotě byla použita Tabulka 12 (viz Tab 12), která popisuje rozdíl teplot pneumatik v závislosti na úhlu sbíhavosti kol a úhlu odklonu kol. V levé části tabulky se nachází jev, v pravé části se nachází příčina plynoucí z nastavení podvozku.

Tabulka 12 - Jev a příčina naměřené teploty pneumatik

Jev	Příčina
Vnitřní kraj teplejší o více než 5°C oproti vnějšímu	Nadměrný negativní odklon
Vnitřní kraj teplejší o méně než 5°C oproti vnějšímu	Nedostatečný negativní odklon
Střed dezénu teplejší než vnitřní kraj	Vysoký tlak v pneumatice
Střed dezénu chladnější než kraje	Nízký tlak v pneumatice
Přední pneumatiky teplejší než zadní	Nedotáčivé chování
Zadní pneumatiky teplejší než přední	Přetáčivé chování

Pro hodnocení nastavení geometrie kol byla využita průměrná teplota pneumatik za celé testování, která je znázorněna v tabulce 13 (viz Tab. 13). Průměr byl stanoven ze všech tří rozjížděk testování. Celkové měření teplot pneumatik se nachází v příloze 1 – Data z testování. Zkratka O (outside) znamená vnější kraj pneumatiky, C (center) znamená střed pneumatiky a I (inside) znamená vnitřní kraj pneumatiky. Zkratka LP znamená levé přední kolo, PP znamená pravé přední kolo, LZ znamená levé zadní kolo a PZ znamená pravé zadní kolo. Využití této tabulky jako nástroje pro hodnocení je spíše informativního charakteru.

Tabulka 13 - Průměrná teplota jednotlivých pásem pneumatiky

Goodyear			Průměrná teplota		
Eagle G19					
LP			PP		
O	C	I	I	C	O
°C	°C	°C	°C	°C	°C
50,00	53,67	50,00	51,33	54,33	47,00
LZ			PZ		
O	C	I	I	C	O
°C	°C	°C	°C	°C	°C
52,33	62,00	53,33	59,00	62,33	53,67

Zhodnocení je členěno na posouzení jevů jednotlivých kol a následné posouzení jevů přední a zadní nápravy.

Levé přední kolo-Teplota krajů pneumatik je v průměru stejná, to indikuje nedostatečný negativní odklon. Střed pneumatiky má vyšší průměrnou teplotu než kraje, to indikuje vysoký tlak v pneumatice.

Pravé přední kolo-Vnitřní okraj pneumatiky má o 4,3 °C vyšší teplotu než vnější, to indikuje dobré nastavení odklonu. Střed pneumatiky je teplejší než kraje, to indikuje vysoký tlak v pneumatice.

Levé zadní kolo-Teplota vnitřního kraje pneumatiky je vyšší o méně než 5 °C oproti vnějšímu okraji, to indikuje nedostatečný negativní odklon. Střed pneumatiky má vyšší průměrnou teplotu než kraje, to indikuje vysoký tlak v pneumatice.

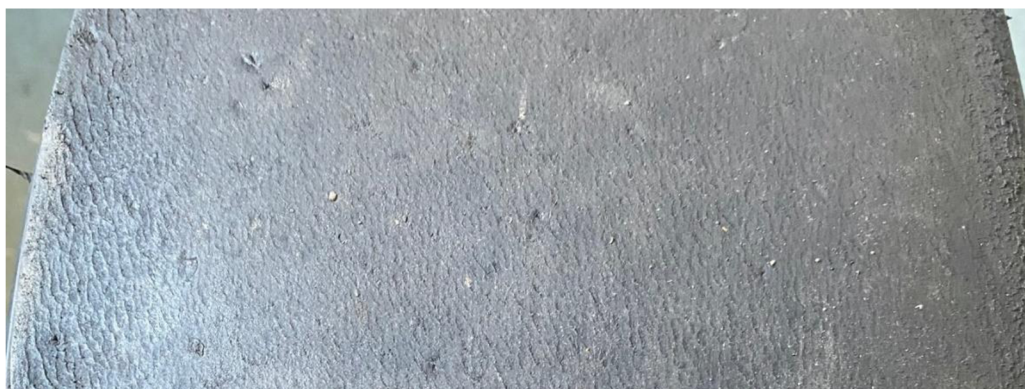
Pravé zadní kolo-Jelikož je vnitřní část pneumatiky v průměru teplejší než vnější o přibližně 5 °C, nastavení je vyhovující. Střed pneumatiky má vyšší průměrnou teplotu než kraje, to indikuje vysoký tlak v pneumatice.

Jelikož je průměrná teplota všech pásem zadních pneumatik vyšší než průměrná teplota pneumatik předních, mohl by monopost jevit známky přetáčivého chování.

5.8.4 Hodnocení geometrie v závislosti na opotřebením pneumatik

Hodnocení geometrie v závislosti na opotřebením pneumatik bylo provedeno pouze na sadě Avon A92. Důvodem je ujetý nízký počet kol na sadě pneumatik Goodyear. Hodnocení pneumatik, které byly použity pouze pro jedno testování, které čítalo pro tuto sadu dvacet kol na poměrně krátkém okruhu nelze brát jako relevantní, protože opotřebením pneumatiky není dostatečné. Obecně lze říci, že pneumatiky Avon oproti pneumatikám Goodyear nemají takovou životnost. To vyplývá z různé tvrdosti směsi pneumatiky, kdy pneumatika Avon je o poznání měkčí než druhý typ Goodyear.

Přední pneumatiky vykazovaly po testování známky grainingu (hrudkovatění) v celém rozsahu pneumatiky s výraznějším projevem na vnějším kraji pneumatiky. Dezén pneumatiky byl vhodně srolován do vnitřní části pneumatiky (viz Obr. 28). Jiná poškození způsobená například přehřátím pneumatiky nebyly pozorována.



Obrázek 28 - Detail opotřebení levé přední pneumatiky [archiv autora]

Zadní pneumatiky vykazovaly graining (hrudkovatění) v optimální míře. Větší opotřebení se nacházelo na vnějším kraji dezénu. I na zadních pneumatikách bylo patrné lehké srolování pneumatiky k vnitřnímu kraji (viz Obr. 29). To způsobuje laterální síla při průjezdu monopostu zatáčkou.



Obrázek 29 - Detail dezénu levé zadní pneumatiky [archiv autora]

5.8.5 Porovnání pneumatik Avon a Goodyear

Porovnání obou typů pneumatik vyplývá z časů kol testování. Časy jednotlivých kol jsou uvedeny v příloze 1. (viz Příloha 1). Rozdíl pneumatik dle hodnocení pilota je již popsán v kapitole výše (viz Zpětná vazba pilota).

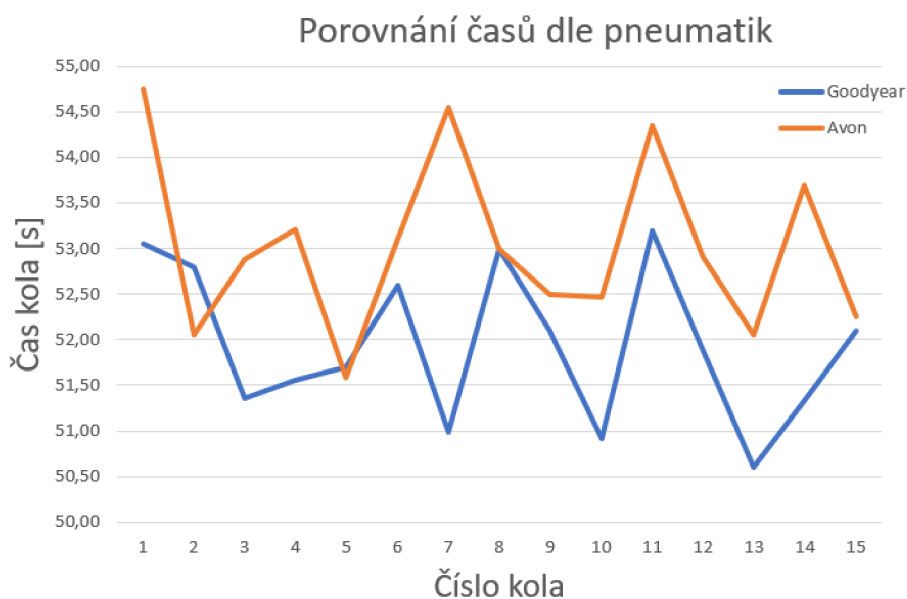
Monopost absolvoval patnáct měřených kol s každým typem pneumatik. Při použití pneumatik Goodyear G19 dosáhl nejnižšího času 50,6 s ve třetím kole poslední (třetí) rozjížd'ky. V celkovém počtu měřených kol se jednalo o kolo třinácté. Průměrný čas kola za všechna měřená kola činil 51,94 s. Druhá sada pneumatik, tedy Avon A92 při patnácti měřených kolech dosáhla nejrychlejšího kola s časem 51,59 s v pátém měřeném kole. Průměrný

čas při využití této sady pneumatiky činil 53,02 s. V konečném porovnání časů tedy pneumatiky Goodyear zaznamenaly o 0,99 s rychlejší čas při porovnání nejrychlejšího kola a průměrný čas na kolo o 1,08 s rychlejší než sada Avon A92 (viz Tab. 14)

Tabulka 14 - Porovnání pneumatik dle časů

Goodyear G19		Avon A92	
Nejrychlejší kolo	50,60	Nejrychlejší kolo	51,59
Rozdíl nejlepších časů	-0,99	Rozdíl nejlepších časů	0,99
Průměrný čas	51,94	Průměrný čas	53,02
Rozdíl průměrných časů	-1,08	Rozdíl průměrných časů	1,08

Pro porovnání jsou všechny měřené časy kol zaznamenány do grafu 4 (viz Graf 4). Oranžová barva znázorňuje vývoj časů pneumatik Avon. Modrá spojnice znázorňuje časy pneumatik Goodyear.



Graf 4 - Porovnání pneumatik dle časů kol

5.8.6 Hodnocení jízdy bez aerodynamických prvků

Dle pilota monopost vykazoval odlišné chování oproti běžnému osazení aeroprvky. Konkrétně se absence podepsala na tuhosti tlumičů, jízdě stabilitě v podélném směru a především změně schopnosti pneumatik přenášet trakci. Jako pozitivum pilot považuje

manévrovatelnost monopostu v zatáčkách s minimálním poloměrem. Ta se však zhoršovala s rostoucí rychlostí.

Pro porovnání byly naměřeny časy tří kol v tomto osazení monopostu na pneumatikách Avon s nejlepším časem 53,19 s (viz Tab. 15).

Tabulka 15 - Časy kol bez aerodynamických prvků

Čas kola bez Aerodynamických prvků	
1.	53,64
2.	54,06
3.	53,19

6 Výsledky a diskuse

6.1 Nastavení odpružení

Nastavení odpružení vykazovalo při testování optimální funkci, bez známek jakékoliv závady či negativního chování. Dle zpětné vazby pilota by bylo vhodné zvážit úpravu progresivity pružící části tlumiče, zejména kvůli hrozbě chodu tlumiče do maximální polohy v případě extrémnějšího reliéfu tratě či výskytu větších nerovností, než se vyskytovaly na testovacím okruhu.

6.2 Nastavení geometrie kol

Dle zpětné vazby pilota nebylo sledováno negativní chování způsobené nastavení geometrie kol. Naopak v kombinaci s pneumatikami Goodyear byla zpětná vazba na nastavení podvozku pozitivní a mezigenerační záměr pro úpravu nastavení se povedlo naplnit.

Dle teploty pneumatik měřené ve třech pásmech dezénu byly sledovány nejčastěji dva nedostatky. Prvním byl nastavený nedostatečný odklon kola, jehož indikátorem byl rozdíl teplot mezi vnitřním a vnějším krajem pneumatiky o méně než 5 °C, kdy vnější kraj má být o 5 °C chladnější než vnitřní. Nedostatek, který se vyskytl u všech čtyř kol bylo přílišné nahuštění, tedy příliš vysoký tlak v pneumatice. Indikátorem byla teplota středu dezénu vyšší než teplota krajů. Hodnocení teplot mezi nápravami monopostu upozornilo na možnost přetáčivé povahy vozu, jelikož teploty zadních kol dosahovaly v každém měření vyšší hodnoty než kola přední.

6.3 Volba pneumatik

Přechod na pneumatiky Goodyear G19 se prokázal jako správná volba především z hlediska měřených časů testování, protože v porovnání s pneumatikami používanými u předchozí generaci monopostu (FS.07) vykazují téměř o sekundu rychlejší čas v nejrychlejších kole a taktéž rychlejší průměrný čas kola. Opomenuta nesmí být ani poměrně razantní úspora neodpružené hmotnosti při použití právě tohoto typu pneumatiky. Negativum pro tento typ pneumatiky je pracovní teplota, jejíž rozsah se pohybuje oproti Avon A92 ve vyšších hodnotách. Tedy pneumatika nabývá svých adhezních vlastností při dosažení teploty 48 °C. Dále je nutné zmínit že dle hodnocení teplot pneumatik byl zjištěn příliš vysoký tlak v pneumatikách.

6.4 Návrh úprav nastavení

V této kapitole je vycházeno z vyhodnocení testování podvozku. Cílem je navrhnout úpravu stávajícího nastavení pro eliminaci negativních jevů, které testování a následné vyhodnocení odhalilo.

Pilot upozornil na nízkou progresivitu chodu pružící části tlumičů. Ta je dána nikoliv tlakem vzduchu v komoře tlumiče ale objemem samotné vzduchové komory. Charakteristika progresivity je znázorněna v teoretické části práce a z grafu je patrné, jak ovlivňuje progresivitu změna právě objemu vzduchové komory. Nastavení tlumičů vychází ze sériového objemu komory, tedy při použití výrobcem namontované vložky o daném objemu. Úprava progresivity tedy bude uskutečněna pomocí montáže vložky o větším objemu. Vložky (volume spacers) jsou odlišeny dle velikosti pomocí barevného provedení. Pro zvýšení progresivity vzduchové pružiny tedy bude do vzduchové komory namontována fialová vložka, což je vložka s největším možným objemem. Tím se změní závislost chodu tlumiče na síle působící na tlumič a potřebná síla pro chod tlumiče do maximální polohy bude vyšší než ta současná při zachování citlivosti pružiny pro eliminaci drobných nerovností.

Dle vyhodnocení nastavení odklonu kol, vycházejícího z teplot pásem dezénu pneumatiky, byl zjištěn nedostatek v podobě příliš nízkých hodnot nastavení negativního odklonu kol. Reálný pocit z jízdy byl dle pilota naprosto v pořádku. Proto byla navržena pouze drobná úprava úhlu statického odklonu, a to s hodnotou negativního odklonu $-1,2^\circ$ pro přední kola a hodnotou $-0,7^\circ$ pro kola zadní. Změny úhlu jsou sice malé, ale jsou navrženy s důrazem na zachování současných jízdních vlastností vozu, které nevykazovaly žádné negativní jevy.

Při hodnocení teplot pneumatik byl detekován negativní jev týkající se tlaku pneumatik. Pneumatiky byly dle vyhodnocení teplot nastaveny na příliš velký tlak. Pro eliminaci tohoto jevu navrhuji snížit hodnotu nastaveného tlaku v pneumatice pro nezahřátý stav na hodnotu 0,6 bar.

6.5 Diskuze

Úvodem této kapitoly je potřeba zmínit, že nastavení podvozku je skutečně složitou záležitostí, která vyžaduje dokonalou znalost konstrukce vozidla a zejména zkušenosti v této činnosti. Neexistuje žádné konkrétní nastavení podvozku, které by bylo aplikovatelné na všechny monoposty kategorie Formula Student. Důvodem je unikátní konstrukce podvozku

každého týmu, který si konstrukci vyvíjí a vyrábí svépomocí nebo u externích firem. Další proměnnou, která vstupuje do volby nastavení je bezesporu pilot. Každý pilot má odlišné preference a nastavení podvozku by tedy mělo být navrženo na míru právě jemu. Běžnou praxí v motorsportu je také individuální nastavení podvozku dle závodního okruhu. Závodní týmy tedy aplikují nová nastavení přímo v depu mezi tréninkovými jízdami. Soutěž Formula Student je však poměrně unikátní, protože se jedná spíše o konstruktérské porovnání týmů. Dynamickou část závodů nelze srovnávat s běžně chápaným pojmem motorsport, to zejména dle času, který monopost stráví na závodní trati. Na závodech jsou zakázány jakékoliv tréninkové jízdy a možnost testování nastavení. Do jednotlivých disciplín startují monoposty se studenými pneumatikami, protože pravidla zakazují předehřev. Tyto fakty považuji za hlavní nedostatky soutěže.

V obecné rovině platí že pro nastavení jakéhokoliv funkčního celku na vozidle je nutné vycházet z naměřených dat a zkušeností. Základním stavebním kamenem každého týmu by měla být databáze naměřených hodnot, zaznamenaných parametrů nastavení a vědomostí, na základě které lze následně provést úpravu nastavení. Ideálním stavem je tedy obsáhlá studnice informací s porovnáním změn při použití určitého nastavení. Ověření funkce nastavení vždy probíhá formou virtuálních simulací, nebo testováním v reálných podmínkách. Osobně se přikláním k reálnému testování, protože každé testování monopostu může odhalit jakoukoliv závadu, která se ani nemusí týkat právě zkoumané části vozu. Navíc čas strávený v kokpitu monopostu pomůže zejména pilotovi k rychlejšímu sžití s vozem a roste tak šance na úspěch v podobě pódiového umístění v dynamických disciplínách. Dále bych rád zmínil, že s vyšší četností testovacích dní roste šance na lepší optimalizaci nastavení.

7 Závěr

Tato diplomová práce tvoří přehled o nastavení podvozku monopostu FS.08, tedy osmé generaci monopostu týmu CULS Prague Formula Racing. Jelikož je cílem týmu zkonstruovat každým rokem nový monopost, informace a postupy popsané v této práci budou v následujících sezónách jistě opakovány. Proto tato práce může posloužit budoucím členům týmu jako zdroj informací. Číselné hodnoty, které práce obsahuje pro další generace sice nebudou odpovídající, ale z postupu nastavení a zejména z postupu návrhu parametrů pro nastavení mohou členové týmu čerpat. Za dobu studia jsem přihlížel, jak monoposty každou generací procházejí vývojem, použití nových materiálů, metod sběru dat, technologií výroby, ale i změna koncepce monopostu na hybridní pohon předurčují směr, jakým se tým ubírá. To platí i o podvozku monopostu. Proto bych do budoucna zvážil využití telemetrie pro jednodušší sběr přesných dat zejména s důrazem na rychlosti chodu ramen zavěšení, bočních zrychlení přední a zadní nápravy vozu a především implementaci teplotních čidel pro pneumatiky právě do soustavy telemetrie. Tyto informace poslouží k jednodušší analýze dynamického chování podvozku monopostu. Dále bych rád zmínil četnost testování. Pro další generaci by bylo vhodné navýšit celkový počet testovacích dní zejména kvůli ověření celkové funkce vozu a optimálnímu nastavení podvozku. Výhodou navýšení počtu testování není jen optimalizace, ale i možnost včasného odhalení drobných nedostatků vozu, které ve výsledných časech disciplín často rozhodují o umístění.

Výsledkem práce je tedy návrh nastavení odpružení a geometrie kol. Navržené parametry byly nastaveny a následně bylo provedeno testování monopostu. Dle vyhodnocení byly nalezeny drobné nedostatky, v podobě nevhodné progresivity tlumičů a nízké hodnoty nastavení úhlu negativního odklonu kol. Proto byla následně navržena úprava pro tyto problematické jevy.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] FS czech. FSCZECH. Formula Student Czech Republic [online]. 2013 [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: <https://fsczech.cz/formula-student/>
- [2] JAN, ZDENĚK, ŽDÁNSKÝ, BRONISLAVČUPERA, JIŘÍ *Automobily. (1), Podvozky*. 6. vydání. Brno: Avid, spol. s r.o. Brno, 2018. ISBN 9788087143407.
- [3] BUREŠ, OLDŘICHŠENK, JIŘÍ *Traktory a automobily : Učebnice pro stř. zeměd. školy*. 3., přeprac. vyd. Praha: SZN Praha, 1986.
- [4] FLAJŠMAN, TOMÁŠ. *Návrh rámu pro monopost Formula student*. Diplomová práce. PETR JINDRA (vedoucí práce). Praha: Česká zemědělská univerzita, Fakulta technická. 2023.
- [5] POKORNÝ, JAN. *Návrh pohonného ústrojí Formule Student*. Diplomová práce. PETR JINDRA (vedoucí práce). Praha: Česká zemědělská univerzita, Fakulta technická. 2022.
- [6] FLAJŠMAN, TOMÁŠ. *Návrh téhlice s možností rychlého nastavení odklonu kol na studentské formuli*. Bakalářská práce. VLADIMÍŘ ŠLEGER (vedoucí práce). Praha: Česká zemědělská univerzita, Fakulta technická. 2021.
- [7] SEWARD, DEREK *Race car design*. London: Palgrave London, 2014. ISBN 9781137030146.
- [8] REIMPELL, JÖRNSSEN, STOLL, HELMUT, BETZLER, JÜRGEN W. SOCIETY OF AUTOMOTIVE, ENGINEERS *The automotive chassis : engineering principles*. 2nd ed. Oxford, Warrendale, PA: Butterworth-Heinemann ; Society of Automotive Engineers Oxford, Warrendale, PA, 2001. ISBN 0750650540.
- [9] VLK, FRANTIŠEK *Podvozky motorových vozidel*. 3., přeprac., rozš. a aktualiz. vyd. Brno: František Vlk Brno, 2006. ISBN 9788023964646.
- [10] TYPLT, LUBOŠ. *Návrh odpružení Formule Student*. Bakalářská práce. PETR JINDRA (vedoucí práce). Praha: Česká zemědělská univerzita, Fakulta technická. 2022.
- [11] EVO bikes suspension. EVO BIKES. How Mountain Bike Suspension Works. Evo.com [online]. 2023 [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: <https://www.evo.com/guides/how-mountain-bike-suspension-works#Shocks>.
- [12] Marzocchi tlumič. Marzocchi Bomber Air customer's guide [online]. 2021, 48 [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0252/8700/0144/files/605-00-269_REV_A_2022Marzocchi_Bomber_Air_Shock_Owners_Guide_Rev_A_FINAL.pdf?v=1659473086
- [13] Fox Float X tuning guide [PDF]. Scotts Valley USA. 2020.

- [14] POŠÍK, VOJTĚCH. *Návrh sloupku řízení pro vůz typu Formula Student*. Bakalářská práce. ALEŠ SEDLÁČEK (vedoucí práce). Praha: Česká zemědělská univerzita, Fakulta technická. 2023.
- [15] PILÁRIK, MILANPABST, JIŘÍ *Automobily : pro obor vzdělání Automechanik*. 3., přeprac. vyd. Praha: Informatorium Praha, 2014. ISBN 9788073331009.
- [16] SAIDL PH.D., Ing. Jan. Ackermannova Podmínka [online]. 1 [cit. 2024-03-17]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/ackermannova-podminka/>
- [17] RAAW MOUNTAIN BIKES. FOX Float X - Jibb Setup Guide [online]. 8.2023n. 1., 8.2023 [cit. 2024-03-17]. Dostupné z: <https://support.raawmtb.com/article/173-fox-float-x-jibb-setup-guide>
- [18] FS Rules 2023. Online. 2022, roč. 2022. Formula Student Germany, 2022. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>. [cit. 2023-03-17].
- [19] MILLIKEN, WILLIAM F. MILLIKEN, DOUGLAS L. *Race car vehicle dynamics*. Warrendale, PA, U.S.A.: SAE International, 1995. 890 p. ISBN 1560915269.
- [20] Rouelle, C. (2024). *Advanced Vehicle Dynamics Applied to Race Car Design & Development*.
- [21] WADDELL, Barry a Dale EARNHARDT JR. *Racing Car Setup Guide*. 2020. 2020.
- [22] Goodyear Eagle FSAE Technical information. Goodyear tires. 2019.
- [23] HARRER, MANFREDPFEFFER, PETER E. *Steering Handbook*. 1. edice. Cham: Springer International Publishing : Imprint : Springer, 2017. ISBN 9783319054483.
- [24] PAUER, VÁCLAV. *Vývoj konstrukce závodních vozů : vše podstatné z historie techniky formulových vozů*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011. ISBN 9788024730158.
- [25] TRZESNIEWSKI, MICHAEL *Rennwagentechnik*. 2014. ISBN 9783658049188.

9 Příloha - Data z testování podvozku

1. Jízda

Poznámka Klidná jízda s čistou stopou bez agrese

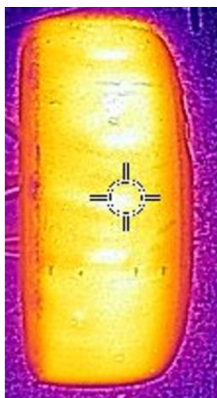
Goodyear
Eagle G19

LP			PP		
O	C	I	I	C	O
°C	°C	°C	°C	°C	°C
41	46	43	39	41	35
LZ			PZ		
O	C	I	I	C	O
°C	°C	°C	°C	°C	°C
48	52	45	47	51	43

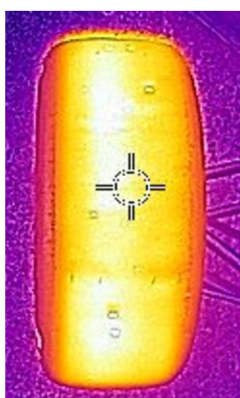
Povrch	13,2	°C
Tlak	0,7 -0,8	bar

Čas kola	
1.	53,05
2.	52,80
3.	51,35
4.	51,56
5.	51,70

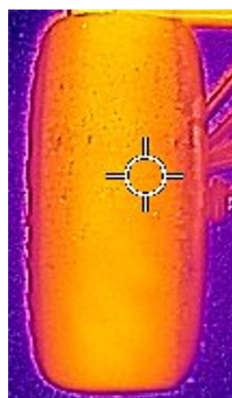
LP



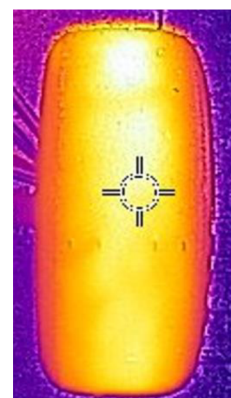
PP



LZ



PZ



2. Jízda

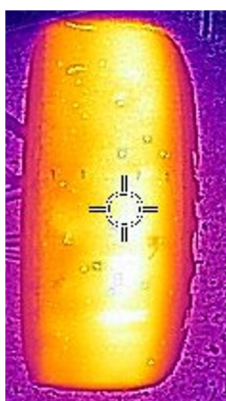
Goodyear
Eagle G19

LP			PP		
O	C	I	I	C	O
°C	°C	°C	°C	°C	°C
49	53	43	51	56	47
LZ			PZ		
O	C	I	I	C	O
°C	°C	°C	°C	°C	°C
47	67	51	61	69	55

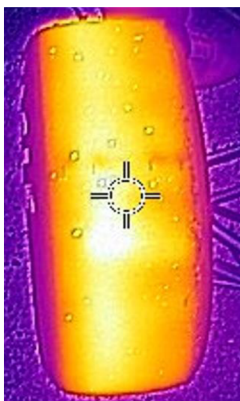
Povrch	12,8	°C
Tlak	0,8-0,9	bar

Čas kola	
1.	52,60
2.	50,98
3.	52,99
4.	52,09
5.	50,92

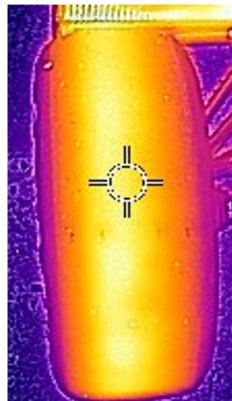
LP



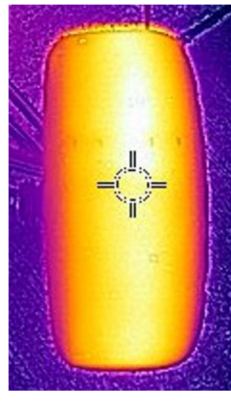
PP



LZ



PZ



3. Jízda

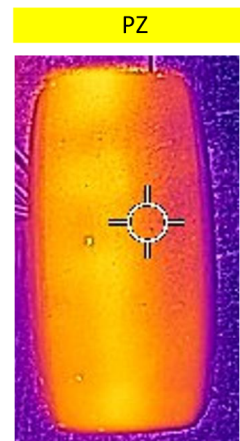
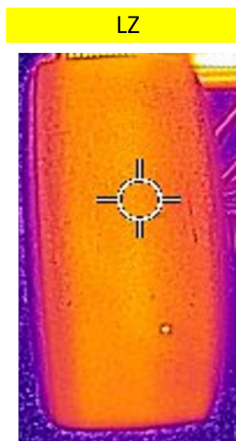
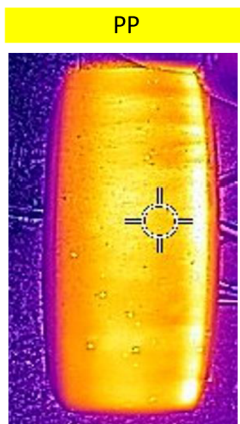
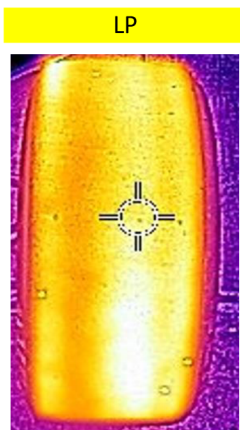
Poznámka Agresivní jízda

Goodyear
Eagle G19

Povrch	12	°C
Tlak	0,7-0,8	bar

LP			PP		
O	C	I	I	C	O
°C	°C	°C	°C	°C	°C
60	62	64	64	66	59
LZ			PZ		
O	C	I	I	C	O
°C	°C	°C	°C	°C	°C
62	67	64	69	67	63

Čas kola	
1.	53,19
2.	51,88
3.	50,60
4.	51,33
5.	52,10



Porovnání časů Goodyear G19/Avon A92

G19				A92			
1.	53,05	Nejlepší	50,60	1.	54,75	Nejlepší	51,59
2.	52,8	Rozdíl	-0,99	2.	52,05	Rozdíl	0,99
3.	51,35	Průměr	51,94	3.	52,88	Průměr	53,02
4.	51,56	Rozdíl	-1,08	4.	53,21	Rozdíl	1,08
5.	51,7			5.	51,59		
6.	52,6			6.	53,11		
7.	50,98			7.	54,55		
8.	52,99			8.	52,99		
9.	52,09			9.	52,5		
10.	50,92			10.	52,46		
11.	53,19			11.	54,34		
12.	51,88			12.	52,91		
13.	50,6			13.	52,06		
14.	51,33			14.	53,69		
15.	52,1			15.	52,26		

