



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## ODPRUŽENÍ A TLUMENÍ JÍZDNÍCH KOL

SPRINGING AND DAMPING OF BIKES

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Jan Borovička**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Ondřej Blaťák, Ph.D.**

**BRNO 2024**



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	<b>Bc. Jan Borovička</b>
Studijní program:	Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>Ing. Ondřej Blaták, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Odpružení a tlumení jízdních kol

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Použití celoodpružených kol přináší výrazné zlepšení jízdních vlastností a také jízdního komfortu jízdních kol. Zároveň u specializovaných kol umožňuje zvládnutí také extrémního terénu a skoků. Vedle provedení přední vidlice je určující také kinematika zadní vidlice a charakteristika zadní pružicí a tlumicí jednotky.

### Cíle diplomové práce:

1. Rešerše v oblasti konstrukce podvozků kol se zaměřením na systém odpružení a tlumení.
2. S využitím vhodného matematického modelu analyzovat chování jízdního kola při přejezdu různých typů nerovností.
3. Navrhnout vlastní systém odpružení a tlumení jízdního kola pro jízdu v těžším terénu.

### Seznam doporučené literatury:

DIXON, John. The Shock Absorber Handbook. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 432 s. ISBN 978-0-470-51020-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zaměřuje na tvorbu výpočtového modelu celoodpruženého jízdního kola, přičemž model byl vytvořen v softwaru MSC Adams View. V rešeršní části jsou detailně popsány tlumící jednotky a různé typy zadních přepákování, které jsou klíčové pro fungování odpružených systémů kol. Praktická část práce se věnuje popisu struktury modelu a provedení citlivostní analýzy, která zkoumá vliv různých parametrů na chování modelu. Pro validaci výsledků výpočtového modelu bylo provedeno fyzické měření, které sloužilo k ověření správnosti a přesnosti modelu. Závěr práce obsahuje vlastní návrh celoodpruženého jízdního kola, založený na získaných poznatcích a analýzách provedených během tvorby a testování modelu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Odpružení, MTB, celoodpružený, kinematika, pivot, Adams, tlumiče, simulace, multibody

## ABSTRACT

This thesis focuses on the creation of a computational model of a full-suspension bicycle, with the model developed using the MSC Adams View software. The literature review section describes damping units and various types of rear linkages, which are crucial for the functioning of suspension systems in bicycles. The practical part of the thesis details the structure of the model and the sensitivity analysis, examining the impact of different parameters on the model's behavior. To validate the results of the computational model, physical measurements were conducted to verify its accuracy and correctness. The thesis concludes with a proprietary design of a full-suspension bicycle, based on the insights and analyses carried out during the development and testing of the model.

## KEYWORDS

Suspension, MTB, full-suspension, kinematics, pivot, Adams, dampers, simulation, multibody

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BOROVÍČKA, Jan. *Odpružení a tlumení jízdních kol* [online]. Brno, 2024. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159401>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Ondřej Blaťák.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Blatáka, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 24. května 2024

.....

Bc. Jan Borovička

## PODĚKOVÁNÍ

Prvně bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřeji Blaťákovi Ph.D. za odborné vedení a spolupráci při vypracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Fojtáškovi Ph.D. za připomínky při tvorbě modelu. Nesměl bych také zapomenout na rodinu a mé nejbližší.

# OBSAH

Úvod .....	11
<b>1 Historie .....</b>	<b>12</b>
<b>2 Celoodpružená horská kola .....</b>	<b>13</b>
<b>3 Tlumicí jednotky jízdních kol.....</b>	<b>14</b>
3.1 Přední odpružení.....	15
3.1.1 Pružinové vidlice .....	16
3.1.2 Vzduchové vidlice .....	16
3.1.3 Tlumicí charakteristika vidlice .....	17
3.1.4 Charakteristika vzduchové pružiny vidlice .....	18
3.2 Zadní odpružení.....	18
3.2.1 Vzduchové tlumiče .....	18
3.2.2 Pružinové tlumiče .....	19
3.2.3 Tlumicí charakteristika tlumiče .....	20
3.2.4 Charakteristika vzduchové pružiny tlumiče .....	21
3.3 Měření tlumičů .....	21
3.3.1 Bezdemontážní měření .....	22
3.3.2 Demontážní měření.....	23
3.4 Nastavení charakteristik .....	23
3.4.1 SAG .....	23
3.4.2 Nastavení komprese.....	24
3.4.3 Nastavení odskoku.....	24
3.4.4 Nastavení pružiny .....	25
3.4.5 Tokeny .....	25
3.5 Jevy tlumičů.....	26
3.5.1 Kavítace .....	26
3.5.2 Hystereze .....	26
3.5.3 Teplotní závislost.....	26
3.5.4 Mechanické tření .....	27
<b>4 Mechanismus zadního odpružení.....</b>	<b>28</b>
4.1 Kinematika zadního odpružení.....	28
4.1.1 Okamžitý střed rotace (instant centre - ic).....	28
4.1.2 Střed křivosti (centre of curvature - cc).....	29
4.1.3 Pákový poměr (level ratio) .....	29
4.1.4 Anti-squat .....	30
4.1.5 Anti-rise .....	31
4.1.6 Dráha zadní osy .....	32
4.1.7 Zpětný ráz (pedal kickback) .....	32
4.2 Typy zadních staveb .....	33
4.2.1 Single pivot.....	33
4.2.2 Linkage single pivot .....	33
4.2.3 Horst-link.....	34
4.2.4 High pivot.....	34
4.2.5 Twin-link .....	35

<b>5</b>	<b>Fyzické měření na jízdním kole .....</b>	<b>38</b>
5.1	Měřicí technika .....	38
5.2	Nastavení měření.....	40
5.3	Výsledky měření .....	40
5.3.1	Vidlice.....	41
5.3.2	Tlumič .....	41
5.3.3	Zrychlení rámu.....	42
5.4	Zhodnocení měření .....	42
<b>6</b>	<b>Multibody model .....</b>	<b>44</b>
6.1	MSC Adams.....	44
6.2	Model jízdního kola v Adams View .....	44
6.3	Funkce modelu .....	44
6.4	Prvky modelu .....	45
6.4.1	Tělesa modelu .....	45
6.4.2	Vazby .....	46
6.4.3	Síly .....	47
6.4.4	Measures .....	48
6.4.5	Vozovky .....	48
6.5	Výstupy simulace.....	48
6.5.1	Nastavení tlaku.....	48
6.5.2	Nastavení tlumení .....	50
6.5.3	Optimální nastavení .....	54
6.6	Srovnání s měřením .....	54
6.7	Nedostatky modelu .....	56
<b>7</b>	<b>Návrh vlastního odpružení.....</b>	<b>57</b>
7.1	Volba tlumení.....	57
7.1.1	Semiaktivní systémy .....	58
7.1.2	Návrh tlumení .....	60
7.2	Návrh přepákování .....	62
7.2.1	Linkage X3.....	62
7.2.2	Volba přepákování .....	63
7.2.3	Fyzické požadavky.....	63
7.2.4	Úprava Horst-linku .....	63
7.2.5	Kinematické charakteristiky .....	65
	<b>Závěr .....</b>	<b>66</b>
	<b>Použité informační zdroje .....</b>	<b>67</b>
	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>71</b>

## ÚVOD

Jízdní kolo bylo vynalezeno zejména jako levný a rychlý dopravní prostředek. Až ve 20. století se kolo začalo používat jako sportovní náčiní. V počátku jízdou po silnicích, nebo šterkových cestách. Od 90. let minulého století se objevil pojem MTB z anglického mountain bike. První horská kola nebyla vybavena odpružením a jízda byla nepohodlná až nebezpečná. To výrobce nutilo vybavit kola odpružením, po vzoru motorek (anglicky motorcycle neboli kolo s motorem). První odpružení bylo kompromisní v mnoha faktorech. Po 30 letech vývoje se odpružení značně posunulo. Zlepšilo se tlumení, váha a cena, která přispěla k nárůstu popularity horských kol.

V kategorii horských se kola dělí na hardtraily (jen přední odpružení) a celoodpružená kola (přední i zadní odpružení). Přední odpružení obstarává odpružená vidlice a zadní odpružení představuje komplexnější systém, skládající se z tlumiče a přepákování. Koncepty přepákování se příliš nezměnily, a tedy hlavní posun odpružení lze přikládat tlumícím jednotkám.

Multibody modely jsou hojně používány pro popis jízdní dynamiky motorových vozidel. Pro popis chování jízdního kola při přejezdu nerovností se však běžně nepoužívají. V této práci byl takový multibody model vypracován. V modelu byla provedena citlivostní analýza. Výstupy modelu byly validovány s výsledky získaných během fyzické zkoušky.

V návrhu vlastního odpružení bylo využito znalostí z multibody modelu a řešeršní části. Byl navržen systém přepákování pro semiaktivní odpružení. Výstupy z modelu posloužily pro nastavení režimu takového tlumení.

# 1 HISTORIE

Horská cyklistika je relativně mladé odvětví. Její počátky můžeme datovat na začátek 90. let minulého století, kdy nastal obrovský boom, tehdy ještě horských kol s pevným rámem a brzdy typu V. Aplikace kotoučových brzd vedla k ježdění ve více náročném terénu. To nutilo konstruktéry vylepšit přední vidlice, aby se popasovaly s těžkým terénem. Avšak zadní pevná stavba neposkytovala dostatečný komfort a bezpečnost. To vedlo k vynálezu celoodpružených kol.

V roce 1992 firma Scott na *obr. 1* představila jedno z prvních celoodpružených kol, ostatní značky (Cannondale, GT, Specialized) ji následovaly. Trh byl velice rozmanitý a dalo by se říct, že koncepty byly velice odlišné a objevovaly se až v některých případech prapodivné přepákování zadních staveb. Technologie tlumičů byla v plenkách a běžná hodnota zdvihu se pohybovala okolo 80 mm. Celoodpružená kola se tehdy vyznačovala velkou hmotností, vysokou cenou, špatnou servisovatelností a přínos nevyvážil jmenovaná negativa. Sjezdové disciplíny byly první, kde se zadní odpružení masivně rozšířilo. [1]



*Obr. 1* Celoodpružené kolo značky Scott [2]

Horská cyklistika je dneska nejvíc progresivní část cyklistiky. Výrobci se snaží odlišit, a tím zaujmout zákazníka různými atypičnostmi. Třeba značka Scott schovala tlumič do rámu, kdy kolo na první pohled působí jako kolo s pevným rámem. Firma Specialized se na trhu celoodpružených kol proslavila tlumičem s názvem Brain. Brain měl (firma se od tohoto druhu tlumiče pomalu odvrací) reagovat a eliminovat pohupování zadního odpružení, způsobené šlapáním jezdce.

## 2 CELOODPRUŽENÁ HORSKÁ KOLA

Celoodpružené kolo se od hardtrailu (kolo s pevným rámem) liší konstrukcí, kdy se pevný rám spoléhá v zadní části jen na pružení obutí a absorpci materiálu rámu. Dnešní technologie materiálů (převážně rámu z uhlíkových vláken) a designu zadních horních vzpěr. Americká značka Cannondale vyvinula pevný rám se zdvihem až 30 mm bez použití tlumiče na *obr. 2*. Stavby s využitím tlumiče funguje na principu pohybu zadního kola směrem nahoru. Ramena zadní stavby převádí pohyb kola na tlumič. Tlumič vytváří tlumící sílu a vrací kolo zpět ke kontaktu s povrchem. [3]



*Obr. 2* Odpružení KingPin [3]

Segment horských kol se dnes dělí na podskupiny, které přehledně dělí a pomáhají zákazníkům při výběru jízdního kola. V následujících odstavcích jsou popsány podkategorie celoodpružených kol od nejmenšího zdvihu, až po největší. Někteří výrobci však staví kola, někde na pomezí jednotlivých kategorií. [4]

Crosscountry (XC) – kolo koncipované, aby co s nejmenším úsilím dostalo jezdce přes lehčí terén. Komponenty a odpružení jsou konstruovány, aby byly co nejlehčí a měly co největší efektivitu. XC kola pracují se zdvihem okolo 90-120 mm.

Trail – trailová kola často představují kategorii kol pro jízdu ve těžším terénu, ale ještě s ohledem na kratší přesuny po rovině a lehkost komponent a stavby. Trailová kola dosahují zdvihu okolo 120-140 mm.

Enduro – typ kola s důrazem na jízdu dolů z kopce. Geometrie, komponenty a zdvihy jsou určeny na jízdu v těžkém terénu. Zdvihy se pohybují okolo 140 až 170 mm.

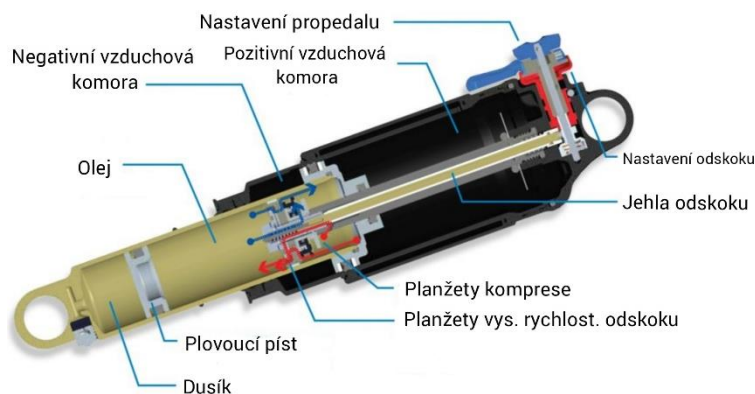
Downhill – kola výhradně určena na sjezd velmi těžkým terénem při velké rychlosti. Počítá se použitím externí (lanovka, auto) dopravy na kopec. Zdvih dosahuje až 220 mm.

### 3 TLUMICÍ JEDNOTKY JÍZDNÍCH KOL

Tlumič jízdního kola je součástí kola, která zvyšuje komfort jízdy a maximalizuje kontakt kola s terénem, Tlumicí jednotky (vidlice a tlumič) mění kinetickou energii na tepelnou energii. Přeměna je způsobena průtokem oleje pístem. Píst dělí pracovní prostor na kompresní komoru a expanzní komoru. V pracovním prostoru se ještě nachází plovoucí píst. Pod plovoucím pístem je prostor naplněn dusíkem. Funkcí plovoucího pístu je eliminace teplotní roztažnosti oleje a zmenšení prostoru, v důsledku zasouvání pístnice. [5]

Přejezd nerovností způsobí pohyb pístu v tlumiči, aby tento pohyb byl umožněn, musí olej proudit z jedné komory do druhé. Tlumicí síla je generována tlakovým spádem mezi komorami. Stlačování tlumiče se nazývá komprese (angl. compression) a zpětný pohyb je nazván odskok (angl. rebound). Rychlost těchto pohybů udává velikost tlumicí síly generovaný tlumičem. [5]

Směr toku oleje při stlačení je naznačen na *obr. 3*. modrými šipkami. Oleji je umožněn průtok dvěma způsoby. První je nízkorychlostní, který vede přes jehlové šoupátko. Polohu šoupátka je možno nastavit otočením ovladače. Maximálním zatažením jehly je tlakový spád největší, tudíž i tlumicí síla. Opačně je oleji kladen nejmenší odpor. Nastavení zasunutí jehly upravuje tlumicí sílu i při vyšších rychlostech. Při vyšších rychlostech stlačení je tlakový spád natolik velký, že překoná odpor planžet. Planžety se ohnou a s větší silou se zvětšuje průtočný obsah pístu. Konfigurací (počtem a tuhostí) planžet je dosažení požadovaných hodnot tlumicí síly. Pro změnu konfigurace planžet je nutno tlumič rozdělat. Zasouvání pístnice způsobí pohyb plovoucího pístu a zvýšení tlaku v dusíkové komoře, a tím zvýšení tlaku v celém tlumiči. Zvýšení tlaku plynu je závislé na zdvihu. [5]



Obr. 3 Vzduchový tlumič Fox [5]

Odskok nastává při roztažení tlumiče (na *obr. 3* červená cesta). Extenzí se mírně snižuje tlak v tlumiči důsledkem vysouvání pístnice. Olej může téct dvěma cestami. První přes jehlové šoupátko pro nízké rychlosti a druhá přes planžety pro vysoké rychlosti. [5]

Na *obr. 3* se nachází pozitivní a negativní vzduchová komora. Tlak vzduchu v pozitivní komoře lze nastavit pomocí autoventilku. Hodnotu tlaku určuje předpětí vzduchové pružiny, a tím pádem i statické zanoření tlumiče. Negativní slouží k překonání počáteční síly pozitivní vzduchové komory. [5]

Většina druhů zadních staveb je konstrukčně zastaralá. Základní principy jsou stejné od 90. let (DW-link-2003) a jedná se o pouhé evoluce a ne revoluce. Největší technologický pokrok

zaznamenaly tlumicí jednotky. Dnešní tlumicí jednotky se dají jednoduše přizpůsobit stylu jízdy a váze jezdce. Problémem je znát a vědět správnou charakteristiku tlumení. [4]



Obr. 4 Dvoukorunkové vidlice Fox [6]

Na komfortu jízdy se podílejí také ostatní části kol. Pláště představují druhý nejvýznamnější prvek odpružení. Fyzikálně se jedná o spojení tlumiče a pružiny. Tuhost lineárně roste s tlakem a mírně exponenciálně klesá se zatížením.

Výrobce vhodnou profilací trubek a použitím správných materiálů dokáže značně zvýšit tlumení rámu. Dnešní hardtraily disponují až 30 mm zdvihu bez použití tlumiče a komfort je srovnatelný s prvotními celoodpruženými horskými koly. [3]

Další zlepšení komfortu představuje přechod z hliníkových výpletů na karbonové výplety, nebo výměna kokpitu (sedlovka, představec, říditka) na karbonovou variantu. Nezáleží jen na velikosti vibrací, ale také na frekvenci.

### 3.1 PŘEDNÍ ODPRUŽENÍ

Bylo dokázáno, že přední odpružená vidlice na obr. 4 snížila působení vibrací o 60 % v rozsahu frekvencí 0–100 Hz. Jízda v terénu by byla nesnesitelná a nebezpečná. Přední odpružení má větší vliv na komfort a bezpečnost než zadní odpružení. Přední kolo určuje směr jízdy a zadní kopíruje jeho trajektorii. Ruce jsou více citlivé na působení vibrací než zadní partie lidského těla, kde je větší styčná plocha (sedadlo a pedály) a přirozený pružící systém v podobě svalů spodních končetin. [7]

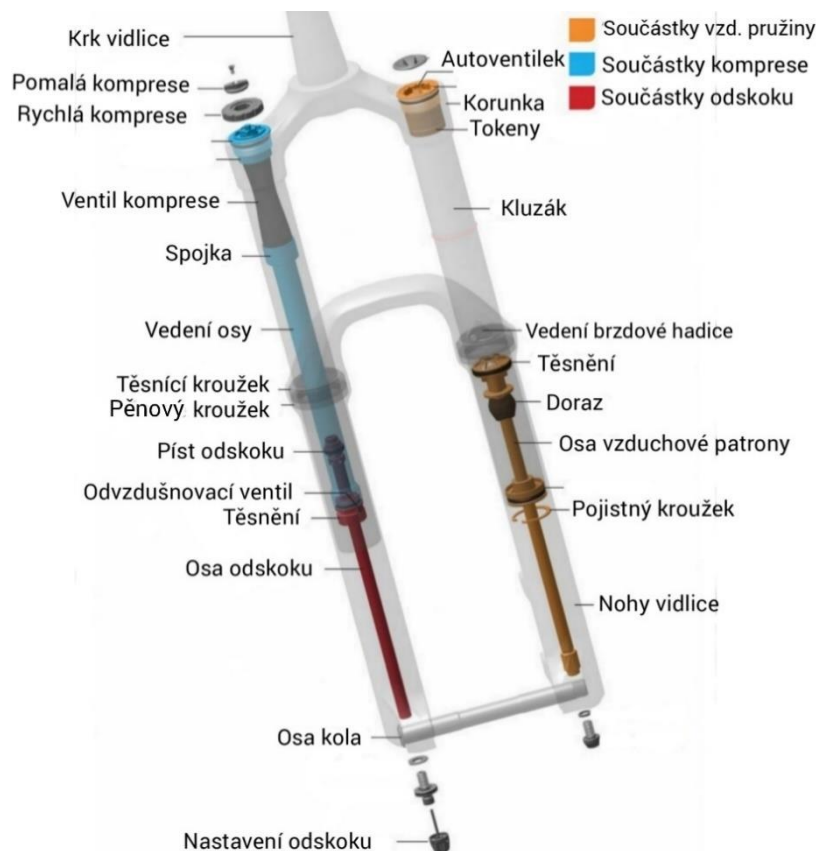
### 3.1.1 PRUŽINOVÉ VIDLICE

Pružinové vidlice se montují na levnější turistická kola. Výhodou je příznivá cena a skoro bezúdržbový provoz. Nevýhody představují nízká citlivost na menší nerovnosti a nemožnost nastavení tlumení, zejména nastavení tlaku. Výrobce musí nastavit charakteristiky na různorodé váhy populace. Váhový rozdíl představuje okolo 30 % ve prospěch vzduchové tlumicí jednotky. Avšak pro disciplíny Enduro a Downhill, kde není primární faktor cena vidlice, jsou dříve jmenované vlastnosti nepravdivé. Při použití kvalitních tlumících patron a kvalitních materiálů je odpružení více citlivé. Vzduchové pružiny používají těsnění s předpětím pro uložení vzduchu o potřebném tlaku. Vyšší tlak znamená menší citlivost. Vinuté pružiny nejsou závislé na teplotě.

Na *obr. 5* jsou popsány části vzduchové vidlice. Pružinová neobsahuje vzduchovou pružinu, ale vinutou pružinu. Její nastavení nelze změnit jinak než jen její změnou. V druhé noze vidlice se nachází systém tlumení. [8]

### 3.1.2 VZDUCHOVÉ VIDLICE

Vzduchové tlumicí jednotky tvoří většinové zastoupení trhu. Dělí se podle zdvihu a technického provedení, závisející zejména na cenovce. Zdvih vzduchových vidlic začíná na 30 mm (pro gravel) a končí na 200 mm (pro downhill). Změnou tlaku lze natavit tlumení na váhu jezdce. [5]



*Obr. 5* Řez vidlicí [9]

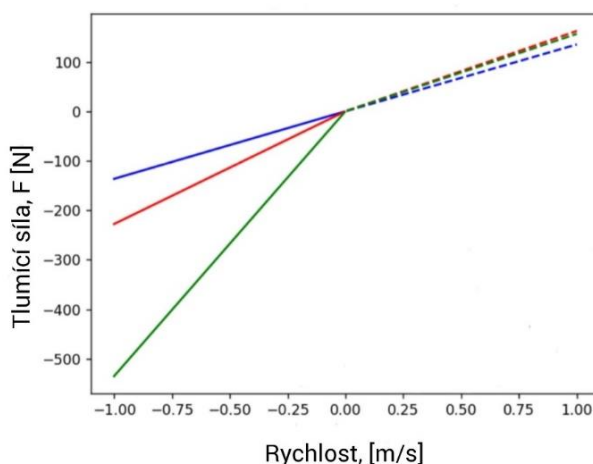
Moderní vidlice se vyrábí s uspořádáním, kde jedna noha (většinou levá strana z pohledu jezdce) obsahuje vzduchovou pružinu. Vzduchová patrona se nahustí vzduchem tlakem, který odpovídá váze jezdce na štítku na noze vidlice. Hodnota tlaku určuje statické zanoření vidlice (SAG). Statické zanoření vidlice se určí z indikátoru (většinou o kroužek) a stupnice na kluzáku vidlice. Přidáním tokenů (zmenšení objemu) se zvýší progresivita na konci komprese. Prostor pod tokeny je na spodní straně uzavřen pohyblivým pístem zalitým olejem. Pod pístem je elastomerový doraz. Pod dorazem je umístěn druhý ventil s negativní komorou, nebo pružinou. Další konstrukční řešení používá negativní ocelovou pružinku. [10]

V horní části je umístěno ovládání zamykání, komprese (rychle a pomalé). Ve spodní části často bývá nastavení odskoku (rychlé a pomalé). Kluzná pouzdra v každé vnější noze musí mít co nejmenší rozměrovou vůli, zároveň nesmí být moc těsné, aby neomezovaly chod vidlice. Olejová patrona je dole spojena s vnější nohou vidlice, aby olej musel při tlumení proudit směrem nahoru. [10]

Sloupek vidlice bývá vyroben z oceli, duralu nebo karbonu. Na vnitřní nohy vidlice je použit dural, nebo ocel s povrchovou kluznou úpravou (niklování, eloxování, teflonování). Vnitřní nohy se sloupkem spojuje kovaná duralová korunka. Vnější nohy jsou odlity z magnézia, duralu, případně vyrobeny z karbonu. V oblasti kluzných pouzder je odlitek zesílen. Vnější a vnitřní nohy jsou utěsněny olejovým těsněním. Vedle olejového těsnění bývá molitanový kroužek napuštěný olejem pro mazání vnitřních nohou. Zvenku je viditelné prachové těsnění. Pevná osa je standardem v posledních deseti letech. Nahradila rychloupínací mechanismus. Pevné osy (standarty: 15x110 mm a 200x110 mm) zvýšily tuhost vidlic, zejména kvůli použití hydraulických brzd. [10]

### 3.1.3 TLUMICÍ CHARAKTERISTIKA VIDLICE

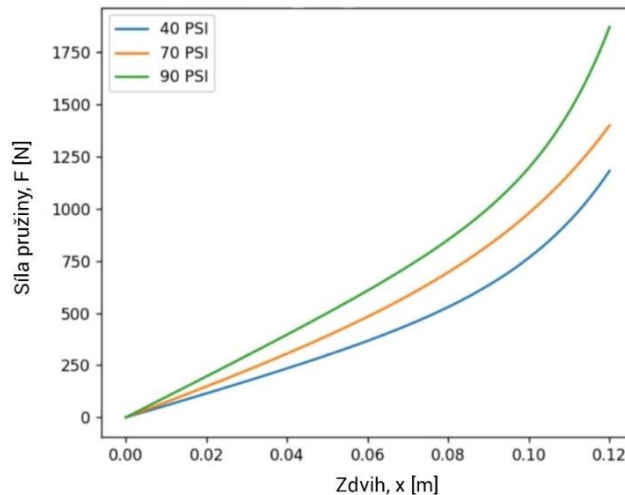
Graf znázorňuje závislost tlumicí síly na rychlosti stlačení vidlice na *obr. 6*. V kompresi (kladná rychlost) je změna vlivem škrčení malá a rozpětí je od  $135 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$  (pro modrou čárkovanou čáru) až po  $162 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$  (červená čárkovaná čára). Odskok je znázorněn plnými čarami s rozpětím od  $136 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$  do  $535 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ . Pro vidlici platí, že komprese i odskok jsou závislé na váze jezdce, a tím i tuhosti pružiny. [7]



Obr. 6 Graf tlumicí síly vidlice [7]

### 3.1.4 CHARAKTERISTIKA VZDUCHOVÉ PRUŽINY VIDLICE

Na *obr. 7* je znázorněn průběh síly pružiny na zdvihu. Jedná se o základní nastavení bez zmenšení vzduchové komory a zvýšením progresivity ke konci zdvihu. Jsou znázorněny hodnoty tlaků ve vzduchové komoře od 40 PSI (0,275 MPa) do 90 PSI (0,62 MPa). [7]



Obr. 7 Graf tuhosti pružiny vidlice [7]

## 3.2 ZADNÍ ODPRUŽENÍ

Zadní systém odpružení je podstatně složitější než přední odpružení. Skládá se ze samotné tlumicí jednotky a systému ramen a čepů. Zadní rámový trojúhelník převádí pohyb zadního kola na lineární pohyb tlumiče. Konfigurace zadní stavby určuje hlavně fyzické parametry a uživatel nemůže zasahovat do parametru chování systému. Dnešní moderní tlumiče z vyšších cenových řad jsou nastavitelné v celé řadě parametrů tlumení. Uživatel jen vhodným nastavením může posunout výkon zadního odpružení. Profesionální jezdci sjezdových disciplín vynaloží poměrně dost času a financí na naladění tlumiče.

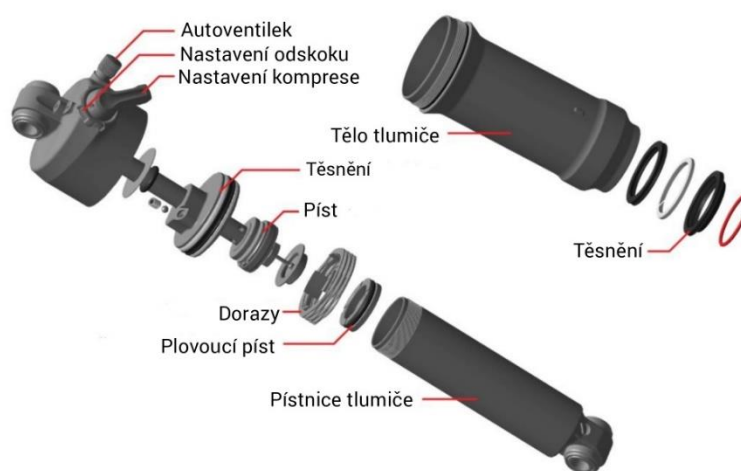
Zdvih tlumiče je zásadní parametr pro uživatele určující styl jízdy. Tlumiče pro jízdu v lehčím terénu operují se zdvihem 100 mm, až po tlumiče ve velmi těžkém terénu se zdvihem až 200 mm. Tlumiče se dělí na vzduchové a pružinové. Vzduchové tlumiče se objevují v celé řadě druhů kol a cenových kategorií. Zato pružinové se pojí s vyšší cenou kol. Vzduchové se přizpůsobují váze jezdce a stylu jízdy tlakem vzduchu. Pružinové mění své charakteristiky jen změnou pružiny, stejně jako u vidlic. Mají stejné vlastnosti, jako stálost parametrů na teplotě a vyšší citlivost. Váhový rozdíl činí okolo 0,5 kg ve prospěch vzduchového tlumiče. [10]

### 3.2.1 VZDUCHOVÉ TLUMIČE

Na *obr. 8* je sestava vzduchového tlumiče. Uvnitř pístnice tlumiče s povrchovou úpravou se pohybuje píst tvořící tlakový spád. Pod kompresní komoru je plovoucí píst. Slouží pro eliminaci změny objemu v důsledku zasouvání osy pístu. Mezi plovoucím pístem a pístem je umístěn doraz. Zde v podobě kroužkových pružin. Nad hlavním pístem je píst rozdělující tělo tlumiče

na negativní a pozitivní vzduchovou komoru. Vzduchová komora se plní vzduchem autoventilkem v horní části tlumiče. U autoventilku se nachází ovládání odskoku a komprese. Na koncích těla tlumiče se nachází těsnění pro udržení tlaku vzduchu. [5]

Dříve byly tlumiče se vzduchovou pružinou typické tvrdým odskokem. Tlumič se nevracel do původní polohy. Použitím negativní komory působící proti tlaku v pozitivní komoře se tento jev odstranil. [5]

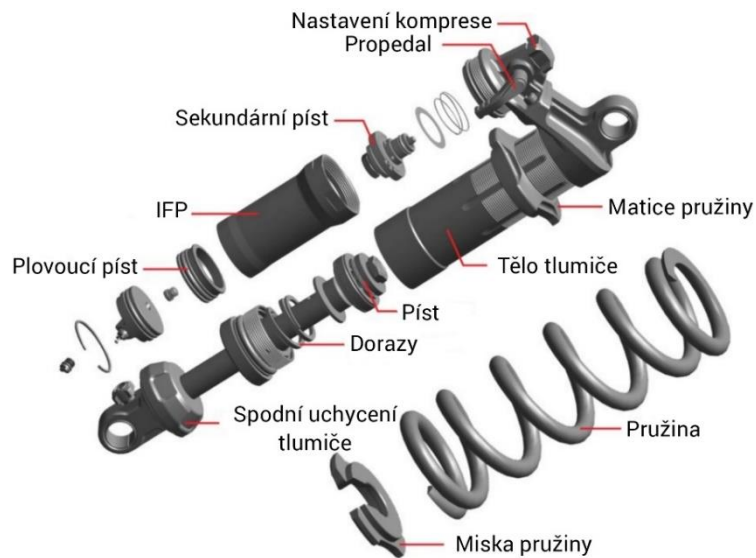


Obr. 8 Sestava vzduchového tlumiče [5]

### 3.2.2 PRUŽINOVÉ TLUMIČE

V minulosti byly tlumiče s vinutou pružinou častější pro lepší vlastnosti. Měly lineární průběh a nastavení odskoku. S vývojem vzduchových tlumičů a přidáním negativní komory se staly vzduchové dominantní na trhu. Pružinové tlumiče jsou volbou pro zkušenější jezdce, zejména v oblasti enduro ježdění. Při kompresi je energie uložena do pružiny a při možnosti roztážení pružina uloženou energii uvolní a vrátí tlumič do původní polohy. [8]

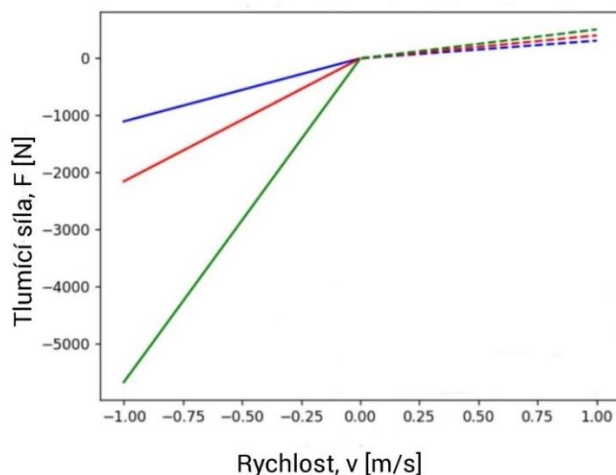
Na obr. 9 je sestava pružinového tlumiče. Vinutá pružina je uložena vně tlumiče. Oba konce jsou uloženy v miskách. Otočením spodního uložení pružiny po vnějším drážkování, se upravuje předpětí. Předpětí určuje zanoření tlumiče (sag). U pružinových tlumičů se používá externí nádobky v důsledku menšího průměru tlumiče a pro lepší uspořádání tlumících prvků. V těle tlumiče se nachází malá vinutá pružina, sloužící jako doraz a ochrana tlumiče při velkých dopadech. Nad pružinou je hlavní píst, který vytváří tlakovou ztrátu. V externím těle (tzv. hrbu) tlumiče se nachází pomocný píst. Nastavení tohoto pístu je prováděno otočnými ovladači na vrcholu. Pod sekundárním pístem je plovoucí píst, oddělující vrchní olejovou komoru od plynové. Plynová komora je plněna dusíkem. [5]



Obr. 9 Sestava pružinového tlumiče [5]

### 3.2.3 TLUMICÍ CHARAKTERISTIKA TLUMIČE

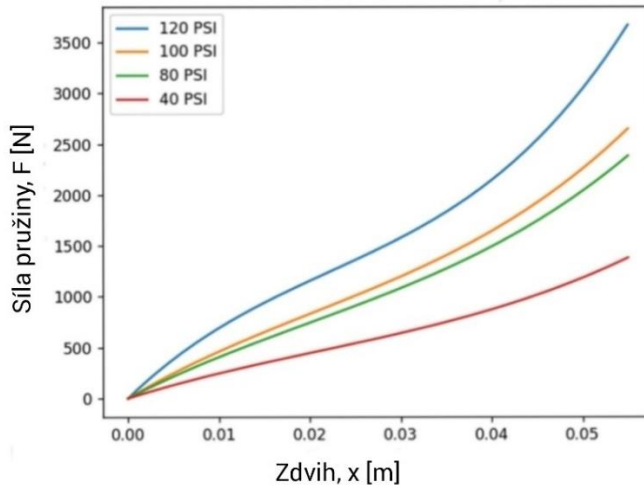
Na obr. 10 jsou vykresleny tlumicí křivky tlumiče pro různé nastavení komprese a odskoku na rychlosti. Komprese je znázorněna v kladném směru a čárkovanou čarou. Modrá čárkovaná čára je nastavení s minimálním škrčením komprese s tlumicí silou  $311 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ . Červená představuje střední škrčení a zelená čára maximální tlumení komprese o hodnotě  $507 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ . Odskok je znázorněn plnou čarou v záporné rychlosti. S hodnotami tlumení od  $1104 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$  (modrá plná čára) do  $5673 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$  (zelená plná čára). Komprese je u tlumiče ovlivněna zejména kinematikou přepákování. Odskok je závislý na síle vzduchové pružiny, a tedy na váze jezdce. Velké rozpětí tlumení je potřebné pro velký rozsah hmotnosti jezdce. [7]



Obr. 10 Graf tlumicí síly tlumiče [7]

### 3.2.4 CHARAKTERISTIKA VZDUCHOVÉ PRUŽINY TLUMIČE

Na obr. 11 je graf vzduchové pružiny tlumiče. Vzduchová komora tlumiče neprošla úpravou. V počátku zdvihu lze pozorovat vliv negativní vzduchové komory. Tuhost pružiny je dána tlakem od 40 PSI (0,275 MPa) do 120 PSI (0,8 MPa). [7]



Obr. 11 Graf tuhosti pružiny tlumiče [7]

### 3.3 MĚŘENÍ TLUMIČŮ

U tlumících jednotek jízdních kol můžeme rozlišit metody měření jako u automobilních tlumičů. Můžeme měřit nainstalovaný tlumič (bezdemontážní měření), nebo samostatný tlumič, bez vlivu dalších faktorů (demontážní měření).

### 3.3.1 BEZDEMONTÁŽNÍ MĚŘENÍ

Tento způsob měření vynalezla firma Quarq. Prodává malou krabičku pod názvem Shockwiz na obr. 12. Z jejich měření (laboratorní i praktické) bylo zjištěno, že pro analýzu funkce pružení stačí měřit změnu tlaku v reálném čase. Jednoduše řečeno, jedná se o digitální manometr, který měří tlak v hlavní vzduchové komoře stokrát za vteřinu. [11]



Obr. 12 Quarq ShockWiz [11]

Přístroj se pomocí pásek připevní na kolo. Šlahoun se připojí do autoventilku tlumiče/vidlice. Před jízdou stačí nastavit vstupní data (styl jízdy, referenční tlak) a kalibrovat přístroj. Po jízdě se v příslušné aplikaci zobrazí vhodné nastavení tlumičí jednotky. Nastavení je uživatelsky přívětivé a nevyžaduje speciální znalosti. Cena přístroje je obdobná jako špičkové tlumičí jednotky. [11]

Další variantou je měření zdvihu. S tímto principem přišla americká firma Motion Instruments. Metoda využívá data z MIPS potenciometru na obr. 13. Na začátku měření je nutné vybrat značku kola a typ pro identifikaci fyzických parametrů kola. Databáze je obsáhlá a pro vývoj prototypu lze vložit vlastní parametry rámu. Jsou snímány pohyby tlumiče a GPS data. [12]



Obr. 13 Osazený potenciometr [12]

### 3.3.2 DEMONTÁŽNÍ MĚŘENÍ

Jedná se stejný měřicí stav na *obr. 14* jako u měření tlumičů automobilů. Měří se demontovaný tlumič bez vlivu ostatních komponent zadní stavby.



*Obr. 14* Měřicí stav LABA7 [13]

Měřicí stavy se dělí na hydraulické a mechanické. Mechanické převádí rotační pohyb elektromotoru pomocí klikového mechanismu na lineární. Zdvih je určen délkou kliky. Zatížení tlumicí jednotky má sinusový průběh. Hydraulické měřicí stavy využívají hydraulický aktuátor. Zátěžný cyklus může mít libovolný průběh, například simulovat určitou trať, terén atd. Měření má vysokou opakovatelnost. Lze měřit i další veličiny, kupříkladu teplota (termokamery, termočlánky) je velmi důležitý faktor, který zásadně mění charakteristiky tlumicí jednotky. Měřicí stavy představují velmi vysokou investici, zejména hydraulické, které stojí v řádech jednotek milionů. Dynamometry vyžadují kvalifikovanou obsluhu. Využívají se při vývoji a v některých specializovaných dílnách.

## 3.4 NASTAVENÍ CHARAKTERISTIK

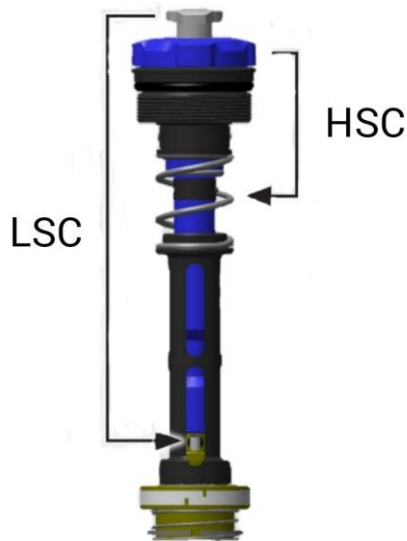
Moderní tlumicí jednotky poskytují jezdcí podrobné nastavení tlumicí síly při kompresi i odskok. Pokročilé tlumicí jednotky umožňují nastavit tlumicí síly jak při nízké, ale také vysoké rychlosti při obou kompresi/odskoku odpružení bez demontáže jednotky.

### 3.4.1 SAG

Určuje zanoření tlumiče při statickém zatížení váhou jezdce. Statické zanoření lehce mění geometrii rámu a zdvih tlumiče. U stavby typu twin-link podstatně mění kinematické charakteristiky. U vzduchových tlumičů se zanoření nastavuje tlakem v pozitivní vzduchové komoře. U pružinových předpětím vinuté pružiny. Nastavení předpětí je rozhodující a nemělo by se podcenit, protože značně ovlivňuje tlumicí síly. [9]

### 3.4.2 NASTAVENÍ KOMPRESY

Na *obr. 15* je mechanismus nastavení komprese z vidlice Rock Shox. Ovládání mechanismu obvyklé bývá umístěno na korunce vidlice. Šedým otočným tlačítkem se nastavuje úroveň tlumení při nízkých rychlostech komprese (LSC – low speed compression – nízkorychlostní komprese). Rychlost komprese nevyvine dostatečnou sílu pro ohnutí planžet. Jediný průtok oleje může nastat přes otvor jehly. Otočením se mění vysunutí jehly, a tím i nastavení LSC. LSC ovlivní tlumicí sílu i při HSC (high speed compression). Vysoké hodnoty LSC se vyznačují menší změnou zdvihu při jízdě, menší trakcí, větší stabilitou a menší citlivostí na malé nerovnosti. [9]

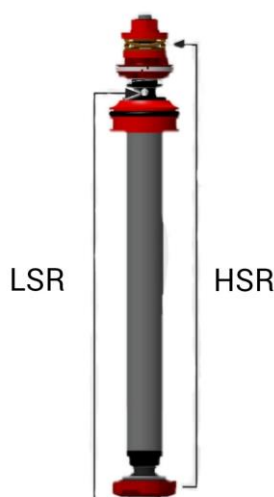


*Obr. 15* Nastavení komprese [9]

Modrým otočným ovladačem se mění předpětí pružiny, která tlačí na planžety ventilu. Větší předpětí pružiny zvyšuje tuhost planžet. Nastává vyšší tlaková ztráta na ventilu. Při demontáži lze změnou planžet (počtu a tuhosti) změnit HSC. Vysoké hodnoty HSC mají za následek menší změnu zdvihu při velkých nárazech. [9]

### 3.4.3 NASTAVENÍ ODSKOKU

Využívá stejného mechanismu jako u komprese na *obr. 16*. LSR (low speed rebound – pomalorychlostní odskok) řídí velikost tlumicí síly při nízkých rychlostech extenze. Princip tvorby tlakového spádu je podobný jako u LSC. Typickou vlastností pro velké LSR je odskakování a klidnější chod. [9]



Obr. 16 Nastavení odskoku [9]

Velké hodnoty HSR (high speed rebound – vysokorychlostní odskok) mají za následek pokles komfortu, ale odpružení zůstává ve vyšších polohách zdvihu. Pomalý odskok může způsobit příliš pomalé vrácení, což může způsobit ztrátu zdvihu. [9]

#### 3.4.4 NASTAVENÍ PRUŽINY

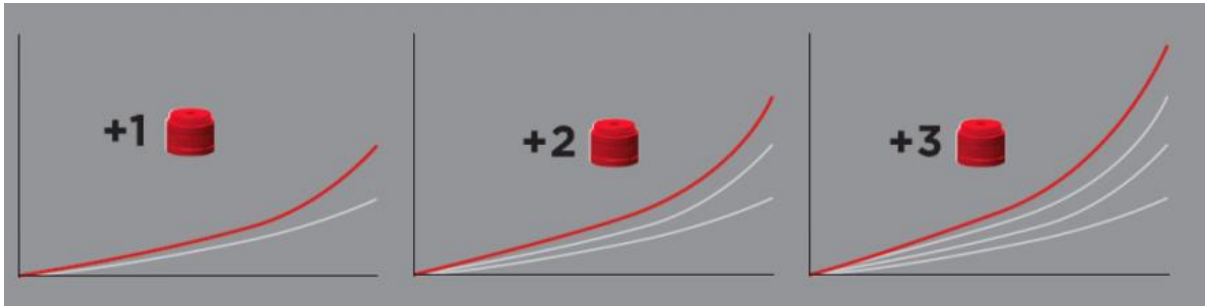
Zde je nutné rozlišit typ použité pružiny. První uživatelsky jednodušší je nastavení vzduchové pružiny. Nastavení probíhá změnou tlaku v pozitivní vzduchové komoře. K nastavení stačí odpovídající pumpa na vidlice/tlumiče. Na většině tlumících jednotek je tabulka s doporučenými tlaky, dle váhy jezdce. Tlakem se dá nastavit úroveň statického zanoření (SAG). [10]

Druhá varianta typu pružení je vinutá pružina. Statické zanoření se dá částečně nastavit předpětím pružiny, na které slouží matice. Samotná tuhost lze změnit jen výměnou pružiny. Většina vinutých pružin má lineární závislost na stlačení, tedy neměnný poměr pružiny. Avšak existují pružiny s proměnným pružinovým poměrem. [9]

SAG podstatně určuje zanoření tlumiče při statickém zatížení váhou jezdce. Statické zanoření lehce mění geometrii rámu a zdvih tlumiče. U stavby typu twin-link podstatně mění kinematické charakteristiky. [29]

#### 3.4.5 TOKENY

Princip spočívá v přidání plastové podložky (tokeny) na obr. 17 do vzduchové komory. Přidáním tokenu se zmenší objem komory. Při zmenšení objemu komory se zvýší progresivita na konci zdvihu. Tokeny umožní foukat menší tlaky a zároveň zabraňují použití dorazů tlumící jednotky. Pro instalaci tokenů musí být jednotka demontována. [14]



Obr. 17 Průběh progresivity změnou počtu tokenů [14]

### 3.5 JEVY TLUMIČŮ

Při konstrukci tlumičů je nutno počítat s celou řadou jevů, které negativně ovlivňují tlumicí sílu. Některé jevy přináší nestálost tlumení a některé mohou tlumič zničit.

#### 3.5.1 KAVITACE

Fyzikální jev způsobený prudkým poklesem tlaku. Tlak musí být menší než tlak sytých par. Tvoří se dutiny (z řeckého *cavities*) vyplněné vakuem. Po vyrovnání tlaků se dutiny rychlostí zvuku zhroutlí. Kavitace negativně ovlivňuje tlumení vlivem změny objemu oleje. Kolaps dutin vytrhává materiál z povrchů. Při vývoji se klade důraz na to, aby tlak v expanzní komoře dostatečně neklesl. Zabránit kavitaci lze změnou geometrie, zvýšením tlaku dusíku, nebo změnou pístu. Kavitace při kompresi způsobuje tvorbu dutin v expanzní komoře a zvyšuje objem oleje. Následuje zvětšení tlaku v expanzní komoře, a tím menší tlakový rozdíl na pístu. Při roztažení se navýší tlak v expanzní komoře a dochází ke kolapsu bublin a netvoří tlakovou ztrátu. [15]

#### 3.5.2 HYSTEREZE

Tlumicí síla při zrychlování pístnice je menší než při zpomalování. Hystereze je způsobena zrychlením pístu a stlačením oleje, zpožďuje náběh tlumicí síly. Velikost hystereze je závislá na zdvihu a frekvenci. Velké frekvence a malý zdvih způsobí velkou hysterezi a opačně. Stlačení oleje při zrychlení pístnice způsobuje zmenšení průtoku oleje. Stlačení oleje je závislé na množství vzduchu v oleji. Olej přirozeně obsahuje vzduch a jisté množství se dostane do tlumiče při montáži. Prostor pod plovoucím pístem je naplněn dusíkem, který se musí na počátku pohybu tlumiče stlačit, a tím se tvoří hystereze. [15]

#### 3.5.3 TEPLOTNÍ ZÁVISLOST

Teplota oleje má vliv na hodnoty dynamické viskozity a hustoty. Dynamická viskozita klesá v závislosti na teplotě nelineárně (aproximační vztah dle Vogela). Hustota se zvyšující teplotou lineárně klesá. Aditivace moderních syntetických olejů zlepšuje stálost vlastností. Tlumiče s dobrou konstrukcí mají závislost tlumicí síly velmi malou. Použitím plovoucího pístu a

konfigurací pístu se dá tento efekt eliminovat. V důsledku zahřátí se tlumič roztahuje a zvětšuje hysterezi. Teplotním působením vzduch zvětší svůj objem a zvýší se tlak v negativní a pozitivní vzduchové komoře. [16]

#### **3.5.4 MECHANICKÉ TŘENÍ**

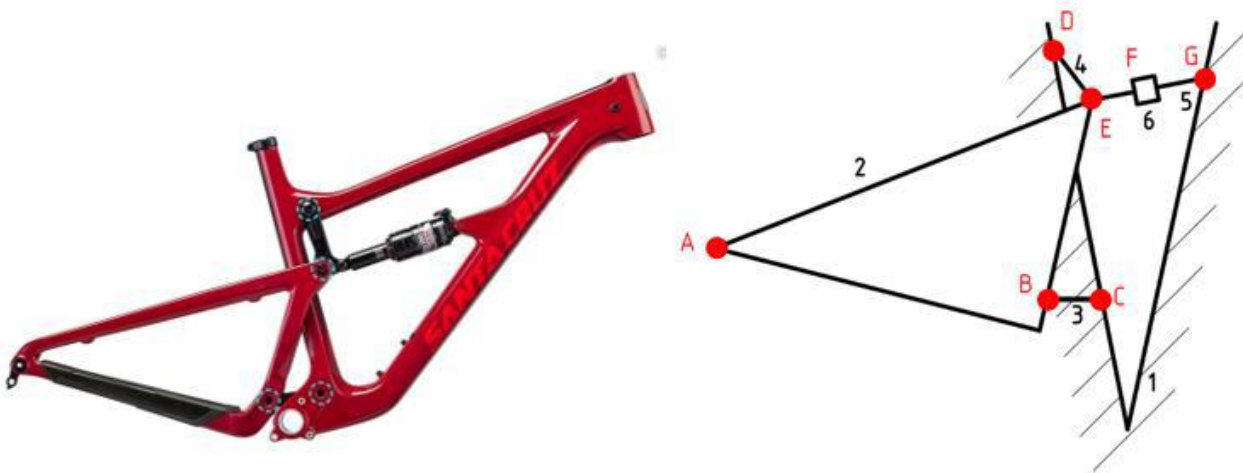
Mechanické tření je zásadní vlastností tlumiče, největší podíl na tření tlumiče má relativní pohyb pístnice a pístu s pracovním válcem. Velikost tření závisí na kluzných materiálech. Používá se povlakování pro snížení součinitele tření. Provedení kluzných ploch se projevuje na ceně vidlice a odděluje dražší tlumiče od levných. Na provedení těsnění a jeho předpětí. Předpětí závisí na tlaku v jednotlivých komorách. Vyšší tlak znamená větší tření. [15]

## 4 MECHANISMUS ZADNÍHO ODPRUŽENÍ

Provedení zadní stavby určuje kinematické charakteristiky jako pákový poměr, okamžitý střed rotace, střed křivosti a další. Charakteristiky nám pomáhají určit vlastnosti jednotlivých typů zadních staveb a jejich určení pro daný typ kola. Jen volba druhu zadního přepákování neurčuje správnou funkci, ale rozhodující je jejich provedení.

### 4.1 KINEMATIKA ZADNÍHO ODPRUŽENÍ

U celoodpružených jízdních kol se zadní systém odpružení skládá z tlumící jednotky a zadního trojúhelníku rámu. Tyto dvě části obecně spojuje rotační vazba (čepy). Cílem soustavy je přenést pohyb zadního kola na lineární pohyb tlumiče. Dle počtu členů na *obr. 18* mechanismu dělíme mechanismy zadního odpružení.



Obr. 18 Kinematické schéma mechanismu odpružení [17]

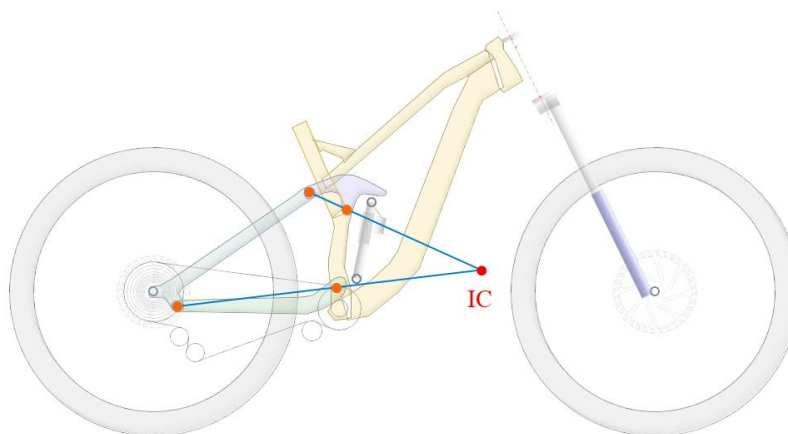
Jednočepové řešení (*Single pivot*) - se skládá z jedné vzpěry a jedné vazby

Čtyřčepové řešení (*Horst-Link*) - se skládá ze tří vzpěr a čtyř rotačních vazeb, toto různě specifikované řešení používá drtivá většina jízdních kol.

Pětiramenné řešení – používá se sedm čepů a pět ramen.

#### 4.1.1 OKAMŽITÝ STŘED ROTACE (INSTANT CENTRE - IC)

Instant centre zadní osy je střed křivosti trajektorie zadní osy v průběhu zdvihu. Většina druhů staveb má IC mimo rám na *obr. 19* (virtuální), ale u jednočepu se nachází na spojení předního a zadního trojúhelníku rámu (reálný). Instant center ovlivňuje pohupování a chování při brzdění.



Obr. 19 Instant center [18]

Určení instant centru:

1. Spojení čepů vrchní části stavby přímkou
2. Spojení čepů spodní části stavby přímkou
3. Průsečík přímek je IC

#### 4.1.2 STŘED KŘIVOSTI (CENTRE OF CURVATURE - CC)

Je to bod, okolo kterého se zadní stavba otáčí. Konfigurací ramen a čepů můžeme měnit střed křivosti v průběhu zdvihu. Tím můžeme změnit dráhu zadní osy, aby kopírovala písmeno S, nebo byla vertikální. [19]

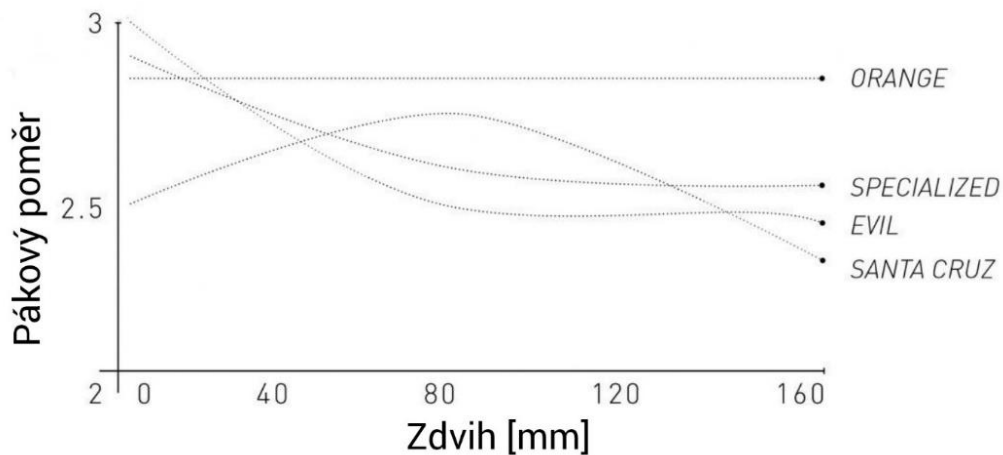
U jednočepových staveb je střed křivosti shodný s instant centre. Čtyřčepové zavěšení má pohybující se CC v průběhu zdvihu. Změna polohy CC se může měnit klidně o 20 mm. [18]

#### 4.1.3 PÁKOVÝ POMĚR (LEVEL RATIO)

Poměr zdvihů zadního kola a tlumiče na obr. 20. Podíl určuje průměrný pákový poměr. Z pohledu kinematiky není moc důležitý. Důležitá je křivka, která ukazuje průběh pákového poměru na změně zdvihu. Velký poměr znamená lehčí stlačení tlumiče, je tedy citlivější na malé nerovnosti. [21]

Existují 3 typy pákového poměru. Progresivní pákový poměr klesá s rostoucím zdvihem. Odpružení je tak zpočátku měkké a citlivé. Poté tuhne, což je výhodné pro ochranu tlumiče. Dále existuje regresivní průběh. Je opakem progresivního. Poslední lineární pákový poměr je neměnný na zdvihu. [21]

Pružinový poměr dává do poměru sílu ke stlačení tlumiče a změnu délky tlumiče. Vzduchové pružiny se vyznačují progresivním pružinovým poměrem a vinuté pružiny zase lineárním. [21]

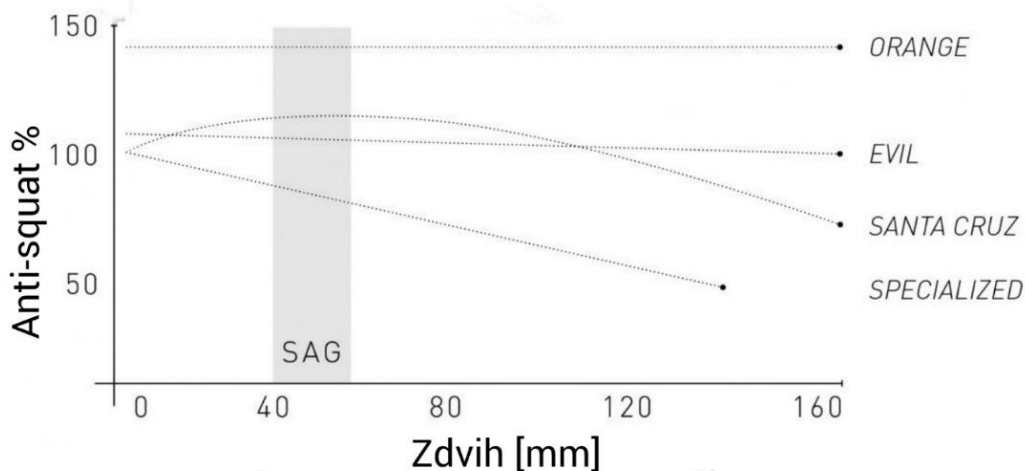


Obr. 20 Pákový poměr [22]

Santa Cruz je zástupcem Twin-link odpružení. Naopak Orange zastupuje single-pivot kola. Evil používá Linkage-driven Single-pivot a Specialized typicky používá Horst-Link.

#### 4.1.4 ANTI-SQUAT

Kinematická charakteristika spojena se setrvačnými silami způsobené akcelerací. Jezdec působí silovým působením na pedály. Tlak na pedál není konstantní. Navíc tento pohyb probíhá na opačné straně, ale je posunutý o 180 stupňů. Akcelerace posouvá jezdcovo těžiště směrem vzad a spolu se silou v pedálech vzniká stlačení tlumiče. Tomuto jevu se říká pohupování. Pohupování je nežádoucí efekt, způsobující ztrátu energie jezdce. Proti pohupování působí síla v řetězu. Hodnota anti-squat na obr. 21 (udávaná v procentech) značí míru odporu proti pohupování. [22]



Obr. 21 Graf anti-squat [22]

Hodnoty anti-squat se určí následovně:

1. Vedení přímky kolmé k rovině vozovky.
2. Spojení instant center a osy zadního kola
3. Určení přímky řetězové linky
4. Nalezení průsečíku přímek vzniklé krokem 2 a 3
5. Spojení bodů kontaktu zadního kola a průsečíku kroku 4 přímkou
6. Průsečík přímky z kroku 1 a přímkou kroku 5. Průsečík značí hodnotu anti-squat

Přímka vedená oběma kontakty kol s vozkou protíná přímku kroku v hodnotě anti-squat 0 %. Opak anti-squat 100 % je v kolizi vodorovné čáry vedenou těžištěm jezdce a přímkou kroku 1.

Hodnota 0 % anti-squat znamená nulové ovlivnění síly v řetězu na kompresi tlumiče. Výjimečně existují i záporné hodnoty. Hodnota 100 % anti-squat síla v řetězové lince zcela eliminuje pohupování. Zadní osa se v kompresi vzdaluje od středového složení. Při vysokých rychlostech se kazeta pootočí ve směru jízdy. Při nízkých, nebo zablokovaném kole se kazeta nemůže pootočit, vznikne tzv. pedal kickback (pootočení klik zpět). Hodnoty nad 100 % bez pedal kickbacku jsou možné jen u kol s high pivotem. [24]

Anti-squat je proměnný po délce zdvihu, protože instant center mění svoji polohu. Jednopřevodníkové pohony znamenají menší změnu výškové polohy řetězové linky, která také mění hodnotu anti-squat. [25]

#### 4.1.5 ANTI-RISE

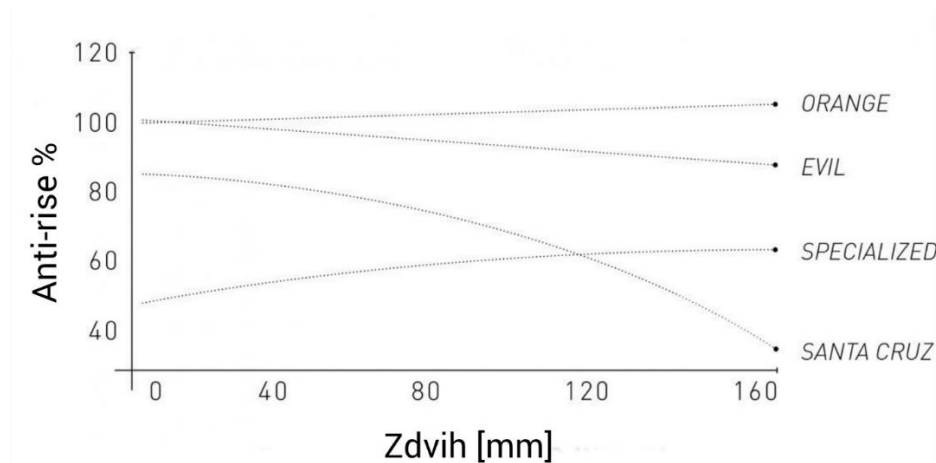
U brzdění se těžiště posouvá vpřed. Přenos způsobí odlehčení zadní stavby a tlumič má tendenci se roztáhnout. Proti tomuto pohybu působí síla od brzdového třmenu. Tato síla působí v ose tlumiče a způsobuje kompresi a nazývá se anti-rise na *obr. 22*. Jeho hodnota je vyjádřena v procentech, a čím vyšší hodnota je, tím víc brzdění stlačuje tlumič a opačně. Hodnota závisí na instant centru, který není statický. [22]

Stanovení hodnoty anti-rise:

1. Nalezení instant centru.
2. Je vedena přímka od kontaktu zadního kola se zemí přes instant centre, až nad osu předního kola.
3. Je vedena přímka vertikálně osou předního kola
4. Průnik přímek z kroku 2 a 3 a srovnání s horizontální polohou těžiště

Hodnota 100 % je ve výšce těžiště a znamená, že rozdíl sil od brzdění a setrvačných sil se rovná nule. Na tlumič nepůsobí žádné síly. Anti-rise s hodnotou 0 % je v úrovni země. Tlumení je plně aktivní i při brzdění a brzdění na něj nemá vliv. [22]

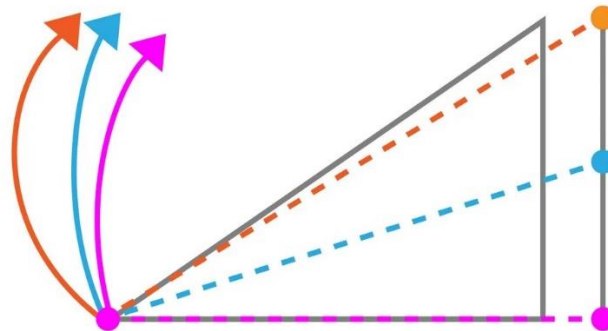
Hodnota anti-squat není závislá na řetězové lince, tím pádem na volbě převodového poměru. Oproti tomu je však u brzdění dominantní přední brzda, která způsobuje roztažení tlumiče nezávisle na hodnotě anti-rise. [22]



Obr. 22 Hodnota anti-rise [22]

#### 4.1.6 DRÁHA ZADNÍ OSY

Axle path neboli dráha zadní osy je trajektorie, kterou opisuje osa zadního kola. Tuto trajektorii definuje střed křivosti (*centre of curvature*). Tvar trajektorie určují hodnoty anti-squat a anti-rise. Na obr. 23 je znázorněna výšková poloha středu křivosti a jeho vliv na dráhu zadní osy. [23]



Obr. 23 Dráhy zadních os [23]

#### 4.1.7 ZPĚTNÝ RÁZ (PEDAL KICKBACK)

Negativní jev zadní stavby, kdy se během komprese zvětšuje vzdálenost mezi středem a osou kola. Při pomalu točícím se kole, nebo zastaveném, není kazeta schopna vyrovnat prodloužení řetězové linky pootočením. Projeví se to zpětným pohybem pedálu. [23]

Velké hodnoty anti-squat zapříčiňují zpětný ráz pedálů (pedal kickback). To je důvod, proč mají zadní stavby typu high-pivot přídavné ozubené kolo (idler pulley), které dokáže pedál kickback zcela eliminovat. [24]

## 4.2 TYPY ZADNÍCH STAVEB

V následujících podkapitolách je představen základní typ staveb zadního odpružení a jejich typické kinematické charakteristiky. Popis jednotlivého typu zadní stavby platí obecně, ale také záleží na provedení a nastavení tlumiče na váhu jezdce. Např. twin-link se dá považovat za vrchol uspořádání ramen a čepů stavby odpružení, ale špatným nastavením hodnoty SAG se rapidně mění kinematické charakteristiky. Proto čtyřčepová stavba (horst-link) je nejpopulárnějším typem pro svou jednoduchost nastavení tlumiče a konfiguraci zadní stavby. [19]

### 4.2.1 SINGLE PIVOT

Tedy jednočepové provedení zadního odpružení celoodpružených kol. Přední rámový trojúhelník) je spojen se zadním rámovým trojúhelníkem spojen pomocí jednoho čepu. Díky jednomu čepu je tento systém nejlevnější, nejjednodušší, nejlehčí a na údržbu nejméně náročný. V potaz by se měl také brát nejmenší moment setrvačnosti a nejmenší třecí moment celku. Mezi negativní vlastnosti se řadí malá citlivost na malé nerovnosti terénu. [26]

Okamžitý střed rotace a střed křivosti leží v bodě čepu po celou dráhu zdvihu. Neměnný okamžitý střed rotace má za následek, že hodnoty anti-squat a anti-rise jsou neměnné se stlačením tlumiče. Osa zadního kola (axle path) opisuje kružnici vlivem stálého středu křivosti. Stálý pákový poměr vyžaduje použití vzduchových tlumičů. Jejich progresivní pružinový poměr snižuje riziko úplného stlačení tlumiče (možnost poškození). [27]

### 4.2.2 LINKAGE SINGLE PIVOT

Linkage single pivot (přepákováný jednočep) je modifikací jednočepu na *obr. 24* Přidané rameno ležící mezi zadním trojúhelníkem a tlumičem, umožňuje změnu pákového poměru. Někdy je nazýváno faux-bar, protože počet čepů a ramen odpovídá čtyřčepu (horst-link), ale zadní osa a tlumič jsou spojeny jedním čepem. [19]



Obr. 24 Jednočepového zavěšení [27]

Hodnoty instant center a center of curvature mají stejný průběh jako klasický jednočep. Pákový poměr je nejčastěji nastaven jako progresivní. Umožňuje použití i pružinový typ tlumící jednotky. [19]

#### 4.2.3 HORST-LINK

Neboli čtyřčepové uspořádání zadní stavby kola představuje většinové zastoupení na trhu. Jeho masivní nárůst započal po vypršení platnosti patentu Specialized. Systém získal popularitu u výrobce, díky snadnému naladění délek a polohy ramen. U uživatele zase, protože doladění tlumící jednotky není tak citlivé jako například u twin-linku. Přepákování na *obr. 25* je složeno z předního rámového trojúhelníku (obsahuje vždy 2 čepy), na který navazuje spodní rameno. Spodní rameno nesmí být spojeno se zadní osou kola, aby se jednalo o čtyřčep. Jinak by se jednalo o přepákový jednočep. V případě shodnosti osy zadního kola a zadního čepu spodního ramen se jedná split pivot. Horní rameno spojuje zadní osu kola s vahadlem. Vahadlo přenáší pohyb kola na tlumič. Ramena a vahadlo dohromady tvoří paralelogram. [20]



*Obr. 25* Čtyřčepové zavěšení GT [27]

Center of curvature (CC) a Instant centre (IC) jsou proměnné během zdvihu. Vhodným umístěním ramen a jejich délek lze dobře naladit průběh IC, CC a pákového poměru. Typickou vlastností čtyřčepu je nízká hodnota anti-squat, aby se eliminoval pedal kick-back. [20]

#### 4.2.4 HIGH PIVOT

V překladu vysoký čep. Populární mezi koly kategorie enduro. Používá se design jednočepu, ale čep je posazen velmi vysoko na *obr. 26*. Uložení čepu velmi vysoko vzniká velký zpětný ráz v pedálech, proto je vhodné použít tzv. idler pulley. Vložené ozubené kolo vede řetěz nad hlavním čepem odpružení. Konfigurace způsobuje ideální trajektorii zadní osy kola (s rostoucí

kompresí se osa vzdaluje). Systém dobře reaguje na velké nerovnosti. Upravením řetězové linky (idler pulley) se téměř eliminuje pedal kickback, to vede k větší citlivosti odpružení. Při propružení se hodnota rozvoru zvětšuje a zvyšuje se stabilita kola. [30]



Obr. 26 High pivot kola GT [27]

Nevýhodou jsou složitost systému a pořizovací cena. Přidáním vloženého kola se zvýší odpor v převodovém ústrojí. Vysoká hodnota instant centru navyšuje hodnotu anti-rise a snižuje efektivitu šlapání. [30]

#### 4.2.5 TWIN-LINK

Označuje soubor (VPP a DW-link na obr. 27) odpružení fungujících na principu na první pohled totožném čtyřčepu. Odlišnost tkví v délce ramen (twin-link používá dvě krátká ramena) a zadní pevného trojúhelníku. U této koncepce velmi záleží na volbě délky, úhlů, postavení ramen. Umístění a nastavení tlumiče také může velice ovlivnit charakteristiky zadní stavby. [29]



Obr. 27 DW-link [27]

Instant center a center of curvature nabývají různých hodnot v závislosti na zdvihu (mění polohu). [29]

### DW-LINK

Základ tohoto systému je pevný zadní trojúhelník, který je spojen dvěma krátkými rameny. Ramena rotují ve stejném směru. Rozhodující je spodní rameno umístěné ve výšce řetězové linky. Umístěním ramena v této výšce se eliminuje pohupování, protože tah řetězu působí ve směru ramena. [29]

### VPP (VIRTUAL PIVOT POINT)

Typ zadní stavby patentovaný ikonickou americkou firmou Santa Cruz na *obr. 28*. Podobně jako DW-link systém používá dvě kratší ramena, ale krátká ramena rotují proti sobě (spodní rameno rotuje ve směru hodinových ručiček a horní naopak). Důsledek této rotace posouvá instant centre blíže ke středovému složení. VPP eliminuje pohupování velkou hodnotou anti-squat, čímž se zlepšuje efektivita přenosu energie jezdce. Osa zadního kola opisuje přibližně tvar písmene S, za což může výrazný pohyb středu křivosti. Odpružení je zpočátku citlivé na malé nerovnosti a osa skoro vertikální. V pozdějších fázích zdvihu se osa zadního kola vzdaluje od středového složení a pomáhá absorbovat větší nerovnosti. [19]



- Čep
- Čep tlumiče
- Instant centre

Obr. 28 VPP odpružení [27]

## 5 FYZICKÉ MĚŘENÍ NA JÍZDNÍM KOLE

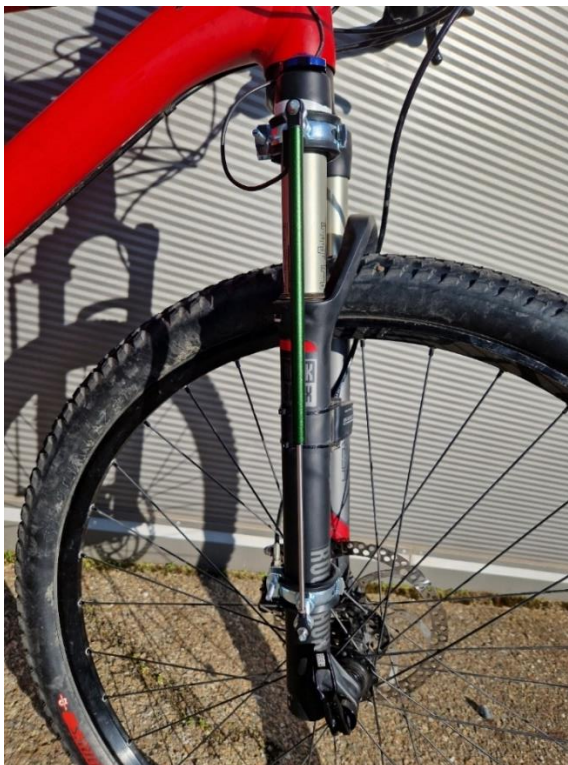
Jízdní zkouška byla provedena pro zjištění korelace mezi skutečností a modelem vytvořeným v programu MSC Adams. V případě vzájemné korelace je možné daný model používat k simulaci jízdy kola přes nerovnosti. Fyzické měření může poukázat na případná kritická místa při tvorbě modelu. V kapitole fyzické měření je popsána volba měřicí techniky a umístění na jízdním kole. Následně je popsáno vyhodnocení přejezdu nerovnosti.



Obr. 29 Osazený datalogger

### 5.1 MĚŘICÍ TECHNIKA

Pro popis jízdní zkoušky bylo nutné zvolit vhodné měřené veličiny a jejich přínos pro vyhodnocení přejezdu nerovností. Nejvýznamnější měřenou veličinou je rozhodně zrychlení odpružené hmoty, zejména důležité je zrychlení ve svislém směru, udávající komfort jízdy. Pro měření zrychlení byl namontován na řídítka kola datalogger RaceCapture Pro 2 na obr. 29. Přístroj slouží pro záznam a následnou analýzu dat jízdy. Samotný datalogger obsahuje akcelerometr pro měření zrychlení. Pro vyhodnocení úhlové rychlosti používá gyroskop. Přístroj dále obsahuje GPS čip pro snímání polohy a konektor pro připojení k sběrnici CAN. Pro měření bylo použito jen gyroskopu a akcelerometru. Data byla nahrávána na SD kartu umístěnou v dataloggeru. Zařízení bylo ukotvené kovovými objímkami, které umožňují rychlé a pevné spojení měřicího přístroje a kokpitu kola.



Obr. 30 Uložení potenciometru na přední vidlici

Dále bylo zvoleno měření délky tlumících jednotek. Pro měření délky se použilo dvojice senzoru Eurosensor ELPM 150 na obr. 30. Jedná se o lineární potenciometr o délce 150 mm využíváný v automobilovém průmyslu s příslušnou teplotní odolností (od  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), stupněm krytí IP67 a maximálním napájením o napětí 24 V. Pro potřeby měření bylo kolo opatřeno napájením v podobě baterie o kapacitě 5000 mAh a výstupním napětím 5 V. Baterie napájela datalogger a potenciometry byly zapojeny do analogových vstupů.



Obr. 31 Část zpomalovacího pruhu [33]

Jako přejezd byla zvolena překážka oblouková nerovnost o rozměrech: 490 x 410 x 60 mm. Jedná se o část nerovnosti, užíván pro nucené zpomalení automobilu v obytné oblasti na obr. 31. Pro zkoušku bylo zvoleno celoodpružené kolo Specialized Epic Comp 2014. Jedná se o

kolo kategorie cross country se zdvihy 100 mm. Přední odpružení obstarává vzduchová vidlice Rock Shox. O odpružení zadní části se stará vzduchový tlumič Fox.

## 5.2 NASTAVENÍ MĚŘENÍ

Před samotným měřením bylo nutno zkontrolovat stav kola a stanovit počáteční podmínky. Kolo prošlo servisem, ale ne repasí tlumících jednotek, avšak jednotky neprojevovaly známky zásadního opotřebení, či ztráty funkce. Vzduchová patrona vidlice byla naplněna vzduchem o tlaku 90 PSI (0,6 MPa). Vzduchová pružina tlumiče byla naplněna vzduchem o tlaku 120 PSI (0,8 MPa). Kolo bylo zatíženo jezdce o hmotnosti 84 kg včetně oblečení. Statické propružení tlumících jednotek bylo 15 %, tedy běžnému nastavení statického zanoření. Zanoření se odečítá ze stupnice na kluzácích tlumiče a vidlice. Tlak v obutí kola byl 2,2 (0,2 MPa) bar.

Tlumící jednotky byly v základní konfiguraci, tedy nebyly nijak upravovány (tokeny atd.). Byly stanoveny 3 nastavení tlumících jednotek. U vidlice bylo možné nastavit kompresi a odskok. Jedná se o základnější jednotku, tedy se nastavení není rozlišeno na pomalou a rychlou kompresi. To samé platí pro odskok. U tlumiče bylo možné nastavit pouze odskok.

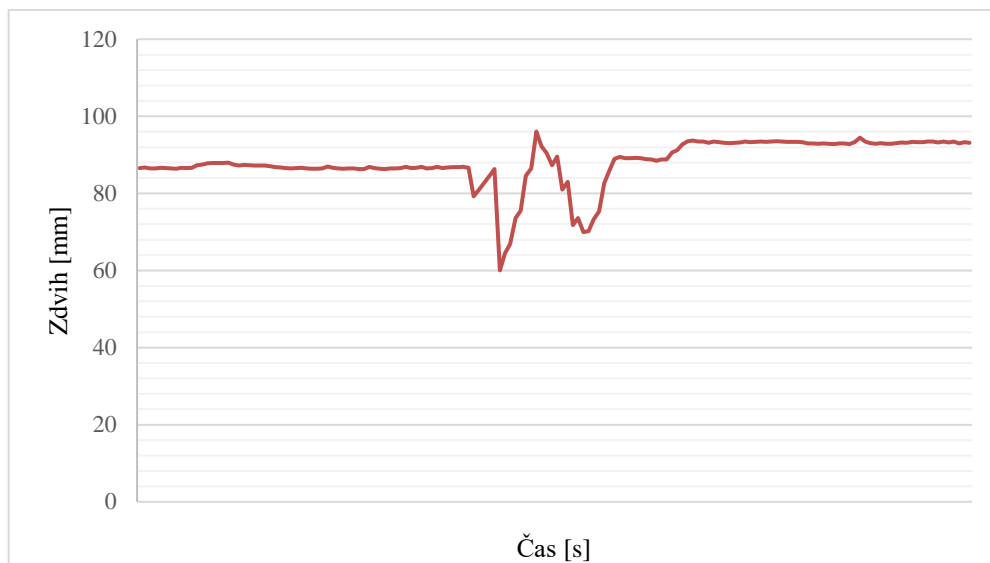
První nastavení bylo s plně otevřenými tlumícími jednotkami. Druhé nastavení představovalo střední nastavení škrcení průtoku. Třetí nastavení plně uzavřené tlumící jednotky. Pro každé nastavení bylo provedeno 5 měření.

Rychlost přejezdu byla stanovena na 20 km/h. Vyšší rychlost mohla znamenat bezpečnostní riziko během testu a nižší zase menší stlačení tlumících jednotek. Rychlost byla měřena pomocí zařízení Garmin Instinct, které spoléhá na příjem GPS signálu. Pro větší přesnost byl ještě použit Garmin Speed sensor využívající otáček kola a předem zadaného obvodu kola.

Nerovnost byla umístěna v areálu strojní fakulty VUT FSI. Teplota vzduchu v průběhu měření se pohybovala okolo 10 °C. Teplota odpovídá běžnému použití jízdního kola a výsledky měření nejsou ovlivněny citlivostí tlumících jednotek na teplotu.

## 5.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Data z měření se zaznamenávala na SD kartu v dataloggeru RaceCapture-Pro MK2. Data byla vyhodnocena v programu IMC Famos Enterprise 2024. U komprese a odskoku jsou uvedeny maximální odchylky od statické polohy. Statická hodnota se považuje 15 mm stlačená vlivem hmotnosti jezdce (SAG).



Obr. 32 Průběh zdvihu vidlice

### 5.3.1 VIDLICE

Naměřená komprese a odskok v *tab. 1* značí jistý trend potvrzující průběhy sil na *obr. 6*. Nastavení škrcení komprese má poměrně malý vliv, asi jen 10 % mezi středem a krajní polohou. V odskoku jsou změny znatelnější, asi o 30 %. U maximálního škrcení je tlumení tak velké, že nedochází k extenzi vidlice a následuje další komprese. I přes poměrně malou rychlost a nízkou výšku nerovnosti komprese vidlice byla okolo 30 mm.

Tab. 1 Výsledky fyzického měření vidlice

Stlačení vidlice [mm]	Plně otevřeno	Střední škrcení	Maximální škrcení
Komprese	33,0	30,0	27,9
Odskok	17,5	11,38	21,94*

\*hodnota v kladném směru

### 5.3.2 TLUMIČ

U tlumiče v *tab. 2* bylo naměřeno menší stlačení než u vidlice vlivem pákového poměru. Po vynásobení komprese pákovým poměrem dostáváme pohyb kola, jako u vidlice. Po přepočtení jsou změny v nastavení znatelnější a jedná se o pohyb kola, podle dráhy zadní osy. Po převodu na pohyb kola, který není jen vertikální, ale opisuje kružnici s proměnným poloměrem (dráha osy), je rozdíl v nastaveních znatelnější. Pákový převod se pohybuje v oblasti měření okolo 1,85 : 1.

Tab. 2 Výsledky fyzického měření tlumič

Stlačení tlumiče [mm]	Plně otevřeno	Střední škrcení	Plné škrcení
Komprese – tlumič	10,44	10,23	11,13
Odskok – tlumič	6,62	4,71	2,85
Komprese – kolo	19,31	19,09	20,59
Odskok – kolo	12,24	8,71	5,27

Tlumič nedisponoval nastavením komprese, ale pouze nastavením odskoku. Rozdíly jsou způsobené odchylkami měření. Změny v odskoku jsou znatelnější, stejně jako u vidlice, s asi 30% poklesem. Celkově lze pozorovat menší pohyby tlumiče než u vidlice.

### 5.3.3 ZRYCHLENÍ RÁMU

Třetí, poslední a nejspíše nejdůležitější veličinou je vertikální zrychlení. Zrychlení bylo měřeno v oblasti představce. Místo bylo zvoleno s ohledem na větší citlivosti oblasti na zrychlení a vliv naladění odpružení.

Tab. 3 Výsledky zrychlení fyzického měření

Maximální zrychlení [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]	Plně otevřeno	Střední škrcení	Plné škrcení
Vertikální zrychlení	16,9	15,6	12,6

Nejmenší možné zrychlení bylo dosaženo při maximálním tlumení odskoku v *tab. 3*. Výsledek je nejspíše dán faktem, že hmotnost soustavy (jezdec+kolo) patří spíše k horní hranici spektra. Naměřené hodnoty zrychlení lze považovat za validní. V obdobných měření se podařilo naměřit podobné hodnoty.

## 5.4 ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Při měření bylo dosaženo nejmenšího zrychlení u maximálního tlumení. Je to v souladu s teorií, že pro samostatnou nerovnost se doporučuje zpomalit odskok. Odskok je dost závislý na hmotnosti jezdce, je tedy možné, že velmi lehký jezdec (60 kg) by dosáhl jiných výsledků. Při měření bylo pozorováno, že rozložení váhy hraje zásadní roli. Měření kromě dat poskytlo i praktickou představu o tlumení při takovém přejezdu.

Měření sloužilo primárně pro validaci a nastavení modelu jízdního kola v MSC Adams View. Pro použití modelu jako vývojové aspektu by bylo nutné vylepšit měřicí techniku a vyzkoušet kolo v členitějším terénu.

## 6 MULTIBODY MODEL

Multibody modely představují rychlý a jednoduchý nástroj pro tvorbu a analýzu složitých mechanismů složených z více pevných těles. Model se skládá z pevných těles, která jsou spojena vazbami. Na systém těles působí vnější síly a vnitřní síly. Subjektem zkoumání je analýza kinematických a dynamických vlastností (poloha, rychlost, zrychlení...). Pro popis těchto vlastností se užívá matematické modelování a numerické simulace. [34]

### 6.1 MSC ADAMS

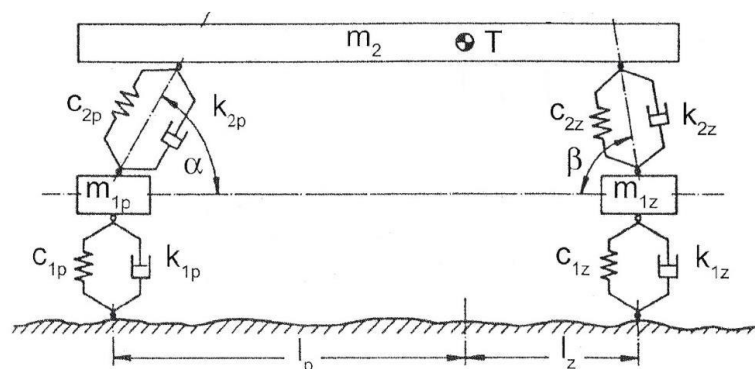
Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems zkráceně Adams je název softwaru pro tvorbu multibody modelů zkoumající dynamiku a kinematiku. Tedy reakci na síly při daných okrajových podmínkách nebo inverzní úlohy. U inverzních úloh se hledají potřebné síly pro vyvození daného pohybu. Za vývojem programu stojí firma MSC software. Adams je postaven na matematickém základu, umožňující rychlé a přesné výpočty. Softwarový balíček Adams 2022.4 obsahuje celou řadu specializovaných podprogramů (Adams Car, Driveline, Flex). Pro univerzálnost byl zvolen Adams View. [34]

### 6.2 MODEL JÍZDNÍHO KOLA V ADAMS VIEW

V modelu kola na *obr. 34* byly použité vazby takové, aby se jízdní kolo mohlo pohybovat jen v jedné rovině (rovina kolmá k vozovce a procházející oběma středy kol), tedy kolo se nemůže naklonit do stran. Pro zkoumání odpružení jsou primární síly působící vertikálně, nebo horizontálně v dané rovině. Vazby nemají vliv na odpružení. Hlavními výstupními parametry bylo zrychlení rámu a deformace tlumících jednotek. [34]

### 6.3 FUNKCE MODELU

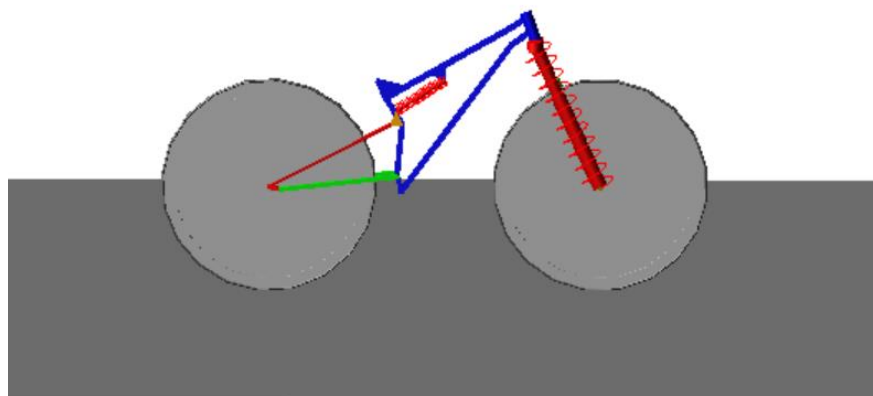
Model bicyklu je tvořen z pohledu dynamiky, jako tuhé těleso a elastickými členy, v tomto případě odpružená vidlice a tlumič. Model je rozdělen na odpruženou hmotu (rám, jezdec...) a neodpruženou hmotu (výplety, pláště, kotouče...). Model jízdního kola byl vytvořen jako 3D, ale pro potřeby přejezdu nerovností byl vhodnými vazbami omezen na pohyb v rovině XY. Model disponuje 5 stupni volnosti. První dva stupně volnosti jsou dány horizontálním a vertikálním pohybem neodpružené a třetí nakláněním. Čtvrtý stupeň je dán rotačním pohybem zadní neodpružené hmoty. Poslední pátý stupeň je dán translačním pohybem přední neodpružené hmoty. [34]



Obr. 33 Dynamický model jízdního kola [34]

Na obr. 33 je znázorněn zjednodušený model bicyklu. Hmotnost  $m_2$  představuje neodpruženou hmotu. Hmotnosti  $m_{1p}$  a  $m_{1z}$  představují přední neodpruženou hmotu, respektive zadní neodpruženou hmotu. Odpružené a neodpružené hmotnosti jsou spojeny reprezentací tlumicích jednotek, které jsou symbolizovány tuhostí  $c_{2p}$ ,  $c_{2z}$  a tlumením  $k_{2p}$ ,  $k_{2z}$ . Odpružená hmota a vozovka jsou spojeny koly s vlastní tuhostmi  $c_{1p}$ ,  $c_{1z}$  a tlumením  $k_{1p}$ ,  $k_{1z}$ . [34]

## 6.4 PRVKY MODELU



Obr. 34 Model kola v Adams View

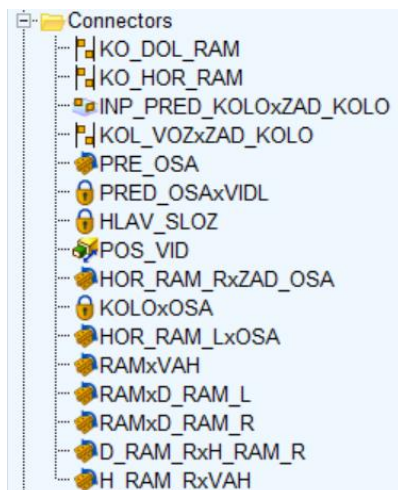
### 6.4.1 TĚLESA MODELU

- 1) **Ground (Země)** je základní prvek každého modelu v Adams View. Jedná se o nehybný prvek model, který je vytvořen automaticky. Definuje počáteční globální souřadný systém, tedy reference pro určení relativních veličin. Nedisponuje hmotností a definuje pole působnosti.

- 2) **Rám** je základní prvek modelu jízdního kola. Na prvek jsou napojeny obě tlumící jednotky a jejich vedení. Střed šlapání je umístěn v počátku souřadného systému. Těleso obsahuje přední trojúhelník rámu (horní rámová trubka, spodní rámová trubka, středové složení, hlavová trubka a sedlová trubka). V tělese je obsažena hlavní hmotnost modelu. Jedná se o váhu samotného kola (14 kg) a především váhu jezdce (84 kg). Pro lepší simulaci rozložení hmotnosti je část umístěná v hlavové trubce a část v oblasti sedlové trubky. Rozložení bylo zvoleno dle měření zatížení pod koly.
- 3) **Přední odpružení** prvek skládající se z vedení. Tvořeno posunou vazbou a dvou těles (korunka vidlice a spodní noha vidlice). Tato soustava tvoří levou nohu předního odpružení. Pravá noha je tvořena jako jeden prvků z Forces (Síla). Jedná se o Translational spring-damper (tlumení/pružení).
- 4) **Zadní odpružení** soubor těles spojen vazbami, aby vykonával rotační pohyb okolo středu otáčení. Přepákování tlumiče je tvořeno spodními a horními vzpěrami. Na horní vzpěry navazuje vahadlo. Vahadlo je pak spojeno s tlumičem kola, který je na druhé straně napojen na rám. Tlumič je jako u vidlice tvořen Translational spring-; (tlumení/pružení).
- 5) **Kola** byla vytvořena modifikací modelu pneumatiky mdi\_pac94. V modelu byly upraveny zejména rozměry kola a jeho tlumení a pružení na  $55.9 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ , respektive  $61000 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ . Kontakt s vozovkou se nemusí poté definovat.
- 6) **Vozovka** je pevně spojena s ground a simuluje reálnou vozovku včetně předem definovanými nerovnostmi.

#### 6.4.2 VAZBY

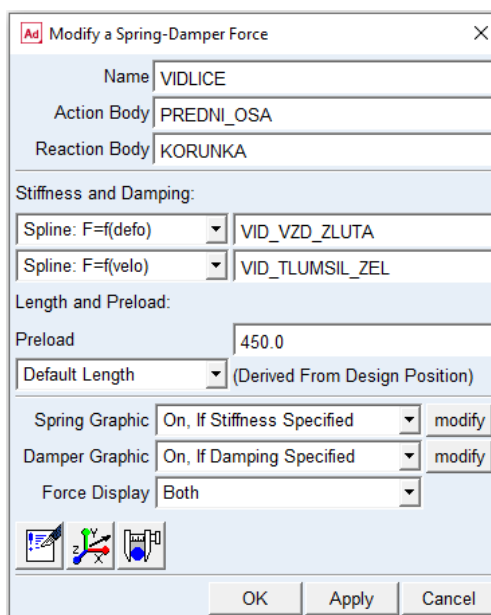
Mezi pevnými tělesy je nutné definovat vazby na *obr. 35*. Tím se určí jejich vzájemné působení a pohyb. Základ tvoří rám spojený s vidlicí Fixed joint (pevná vazba) představující hlavové složení. Samotná vidlice obsahuje Translational joint (posuvná vazba) představující kluzné plochy. Spojení vahadla, rámu a zadní stavby obsahuje několik vazeb typu Revolute joint (rotačních vazeb). Inplane joint primitive (rovinná vazba) zajišťuje, že obě kola zůstanou v podélné rovině. Parallel joint primitive (rovnoběžná vazba) má za následek kolmost kola a vozovky.



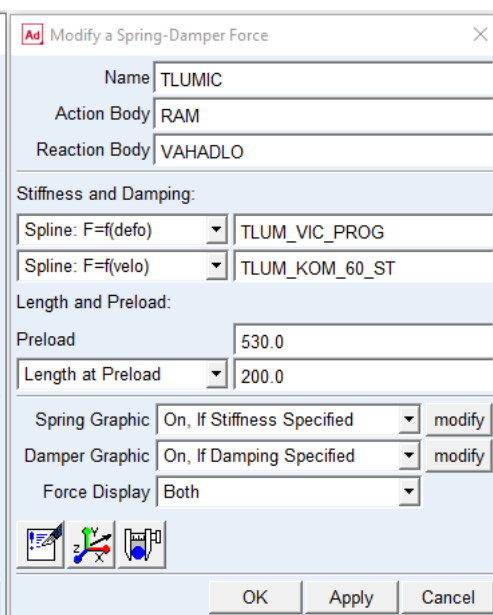
Obr. 35 Seznam vazeb

### 6.4.3 Síly

- 1) **Gravity** (Gravitace) neboli gravitační zrychlení s hodnotou  $-9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  v ose Y.
- 2) **Translational spring-damper** (tlumení/pružení) je definován na *obr. 36* pro vidlici a na *obr. 37* pro tlumič. Vahadlo a korunka byly zvolené jako reakční tělesa. Předpětí bylo zvoleno na základě statického zatížení. Tlumení a tuhost pružin bylo definováno pomocí funkce Spline.
- 3) **Point motion** představuje otáčení zadního kola při rychlosti 20 km/h.



Obr. 36 Nastavení vidlice



Obr. 37 Nastavení tlumiče

#### 6.4.4 MEASURES

Measures (měřené veličiny) byly zvolené stejně jako u fyzického měření. Vertikální zrychlení a stlačení tlumících jednotek. Navíc byly zvolené ještě rychlost stlačení a síla pod koly.

#### 6.4.5 VOZOVKY

Pro simulaci jízdy kola po nerovnostech je nutné vytvořit vozovku, která simuluje danou reálnou situaci. Pro model byly vytvořené tři různé druhy vozovky. Vozovky byly pečlivě vybrány pro komplexní otestování odpružení jízdního kola.

- 1) **Zpomalovací práh** je model vozovky byl vytvořen v programu Adams Car. V záložce Simulate se nachází Road Builder. V okně se nejprve definuje rovná vozovka o požadovaných prostorových a fyzikálních vlastnostech. Následně je možné vytvořit určitý typ nerovnosti. Bylo použito nerovnosti typu Sine s délkou 410 mm, amplitudou 60 mm a vlnovou délkou 820 mm. Vozovka částečně simuluje přejezd kořenu, ale byla použita zejména pro srovnání modelu a reálného měření.
- 2) **Stochastic uneven** simuluje lesní nerovnosti dle ISO 8608. Vozovku nebylo nutné vytvářet, je součástí knihovny Adams Car.
- 3) **Skok** je model vozovky, který vznikl úpravou modelu 2D\_ramp z knihovny MSC Adams. Jedná se o seskok z 50 cm. Výška nerovnosti byla zvolena dle klasifikace 3 a 4. Klasifikace se jenně liší v rámci trhu, ale kategorie 3 zahrnuje horská typu cross country/trail. Kola takového typu by měla vydržet dopad z výšky 50 cm, avšak se liší dopadová plocha, neboť v manuálu výrobce není přesně specifikována, proto byla zvolena varianta bez dopadové plochy, která představuje náročnější variantu.

### 6.5 VÝSTUPY SIMULACE

V prostředí Adams View byla provedena citlivostní analýza nastavení tlumících jednotek kola. V modelu bylo provedeno několik nastavení tlumení a tuhosti pružení pro každou vozovku. Délka simulace byla nastavena pro každou vozovku individuálně, ale vždy s počtem 10 000 snímků za vteřinu. Velký počet snímků je vhodný pro kvalitní a spolehlivou konvergenci simulace. Při výpočtové náročnosti neznamenal velký počet snímků zásadní prodloužení simulace. Simulace byla nastavená jako dynamická.

Jako hlavní veličina, umožňující srovnání jednotlivých nastavení odpružení, bylo zvoleno vertikální zrychlení, které nejlépe vypovídá o komfortu. Stlačení tlumících jednotek sloužilo nejen pro porovnání s měřením, ale pro kontrolu modelu a porovnání různých variant.

#### 6.5.1 NASTAVENÍ TLAKU

Pokud je kolo osazené vzduchovými jednotkami, výrobce udává orientační tlaky ve vzduchových komorách. Uživatel se dále orientuje podle hodnoty sag. Čím větší zanoření, tím

by mělo být odpružení aktivnější. [35] Jako prvotně byl nastaveno statické zanoření na rovné vozovce v nulové rychlosti. Tento postup by měl být proveden i v realitě.

V modelu bylo otestováno několik nastavení tlaku ve vidlici dle *obr. 7* a obdobně pro tlumič na *Obr. 11* *obr. 10*. Nejnižší tlaky znamenaly selhání simulace. Křivky s největší hodnotou jsou doporučené tlaky podle výrobce. Střední křivky představují mírné snížení tlaku. V *tab. 4* progresivní nastavení tlaku simuluje instalaci tokenu.

V *tab. 4* jsou výsledky simulace přejezdu zpomalovacího prahu a nejmenší zrychlení bylo dosaženo při mírně sníženém tlaku. Zvýšení tlaku na doporučenou hodnotu znamenal mírné zhoršení komfortu. Při progresivním byl komfort nejhorší.

*Tab. 4* Vliv tlaku na zrychlení zpomalovací práh

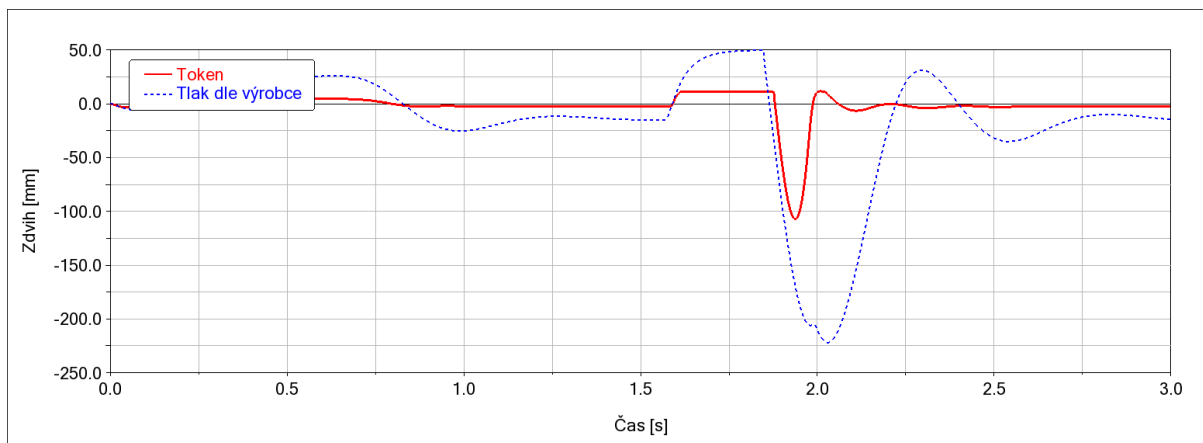
Tlak	Snížený	Doporučený	Progresivní
Zrychlení (RMS) – [m·s <sup>-2</sup> ]	4,9	5,3	5,6

V *tab. 5* jsou výstupy ze simulace na stochastic uneven v závislosti na tlaku. Doporučený tlak je při této konfiguraci nejhorší variantou nastavení. Pro komfortní jízdu je nejvhodnější progresivní, ale se ztrátou adheze. Zato snížený je nejlepší z pohledu trakce, ale na úkor komfortu.

*Tab. 5* Vliv tlaku na jízdní parametry stochastic uneven

Tlak	Snížený	Doporučený	Progresivní
Zrychlení (RMS) – [m·s <sup>-2</sup> ]	44,3	42,5	35,9
Průměrná síla pod předním kolem [N]	682	576	630
Průměrná síla pod zadním kolem [N]	437	387	418

Při dopadu z velké výšky (simulující vozovka skok) jsou setrvačné síly tak velké, že tlumící síla nedokáže pohyb natolik zpomalit a dosáhne se plného zdvihu. Tato situace představuje riziko jak pro jezdce, tak pro odpružení. Teoretické předpoklady zní, že proti tomuto jevu je účinnější zvýšení progresivity než komprese. [35]



Obr. 38 Stlačení vidlice pro různé progresse pružiny

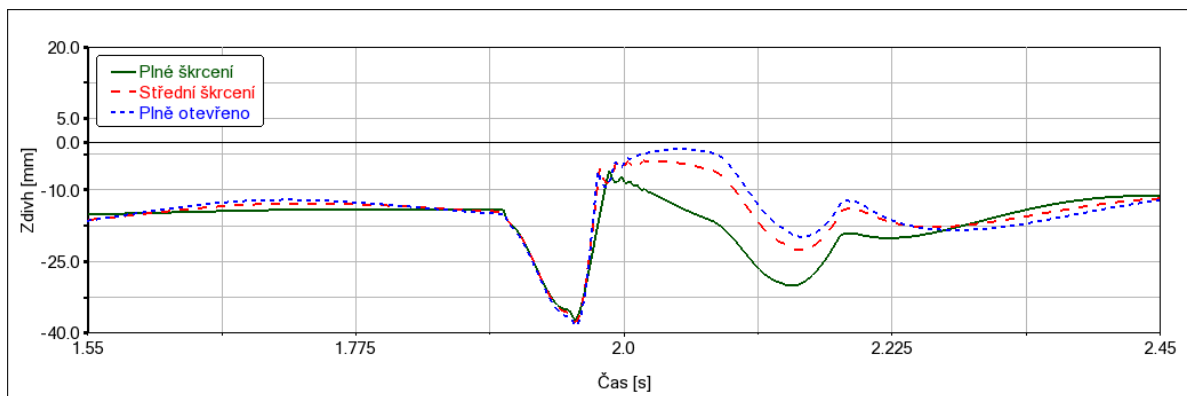
Byla provedena simulace ve vozovce skok představující extrémní případ pro tlumící jednotky. Na obr. 38. a v tab. 6 jsou hodnoty maximální stlačení vidlice při nastavení komprese a progresivity pružiny. Je patrné, že zvýšení komprese o 40 % má do 20 % snížení propružení, ale lehká změna progresivity znamená snížení stlačení na půlku. Při reálném zdvihu 100 mm, znamená větší hodnota stlačení menší míru komfortu.

Tab. 6 Maximální stlačení vidlice na vozovce skok

Stlačení vidlice [mm]	Tlak dle výrobce	Progresivní
Komprese 120 %	221	107
Komprese 160 %	205	103

### 6.5.2 NASTAVENÍ TLUMENÍ

V modelu byly odzkoušeny změny v kompresi a odskoku a byl pozorován jejich vliv na hodnoty propružení, zrychlení a síly pod jednotlivými koly.



Obr. 39 Změna odskoku na velikosti škrcení

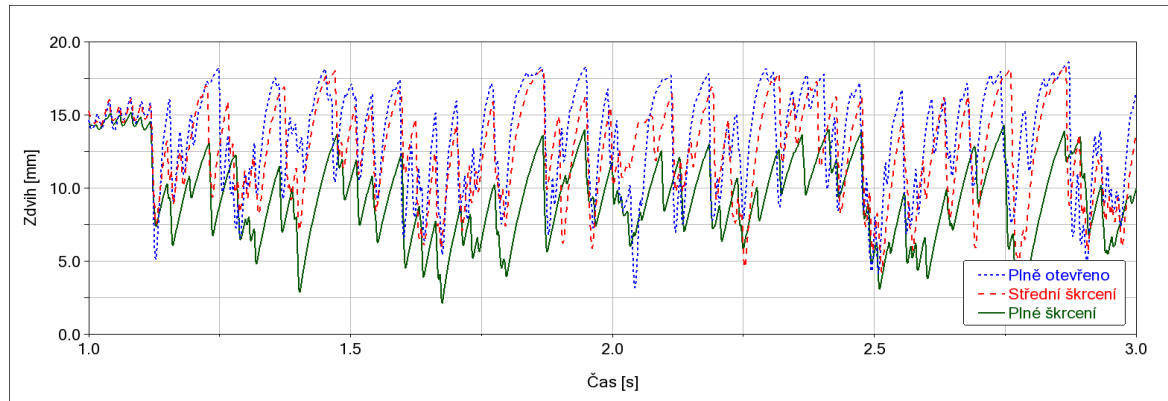
## ODSKOK

U tlumení se vycházelo z křivek na *obr. 6* a *obr. 10*, kde se značně liší tlumící síla v odskoku. Po nastavení tuhosti pružiny byly v každém nastavení tlumení v odskoku provedeny simulace pro každou vozovku. U přejezdu zpomalovací prahu v *tab. 7* bylo dosaženo nejlepšího výsledku s maximálním škrcením v odskoku. To je v souladu s teorií, že pomalý odskok zvyšuje komfort, ale při sérii nerovností se odpružení postupně propadá. Na *obr. 39* je vykreslena extenze vidlice vůči statické hodnotě při změně nastavení odskoku.

Tab. 7 Rozdíly v nastavení odskoku zpomalovací práh

	Plně otevřeno	Střední škrcení	Plně škrcení
Zrychlení (RMS) [m·s <sup>-2</sup> ]	5,8	5,4	5,3
Odskok – vidlice [mm]	13,2	11,54	7,7
Odskok – tlumič [mm]	2,3	2,1	1,1

V simulaci přejezdu lesní cesty (stochastic uneven) na *obr. 40* lze pozorovat, že při plném škrcení se tlumič více propadl, ale komprese a odskok je menší než u jiných nastaveních.



Obr. 40 Stlačení tlumiče v simulaci přejezdu

V tab. 8 jsou hodnoty zrychlení a síly pod koly. V simulaci bylo dosaženo nejmenšího zrychlení při plném škrcení. Rozdíly mezi nejhorší a nejlepší variantou není ani 10 %. Síly pod předním a zadním kolem značí míru kontaktu pláště se zemí, a tím taky trakci. U zadního kola není značný rozdíl mezi nastaveními. U předního kola se už vyskytuje větší odchylka. Pro tento typ vozovky je nejlepší střední nastavení odskoku s ohledem na trakci, ale s mírným snížením komfortu.

Tab. 8 Změna zrychlení změnou odskoku na stochastic uneven

	Plně otevřeno	Střední škrcení	Plně škrcení
Zrychlení (RMS) [m·s <sup>-2</sup> ]	35	34	33,3
Průměrná síla pod předním kolem [N]	621	588	617
Průměrná síla pod zadním kolem [N]	411	421	419

## KOMPRESSE

Komprese tlumících sil u obou tlumících jednotek je prakticky neměnná. V modelu byly použity křivky zvýšené o 20 %, 40 %, 60 % vůči původní maximální křivce tlumení v kompresi vidlice na obr. 6 a obr. 10 pro tlumič.

Změna komprese u vozovky zpomalovací práh v tab. 9 mírné zhoršení komfortu oproti nastavení v tab. 7. Další zvýšení komprese komfort dále zhoršuje.

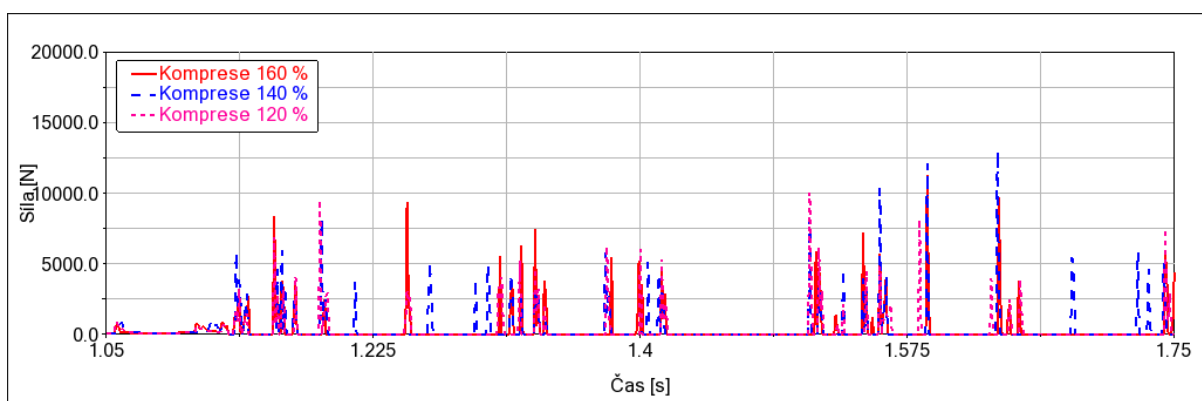
Tab. 9 Rozdíly v nastavení komprese zpomalovací práh

	Komprese 120 %	Komprese 140 %	Komprese 160 %
Zrychlení (RMS) [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]	5,9	6,2	6,3
Komprese – vidlice [mm]	23,65	22,47	21,92
Komprese – tlumič [mm]	5,3	4,1	3,99

V tab. 10 jsou výstupní data ze simulace na vozovce stochastické nerovnosti. Na této vozovce se potvrdilo to, co na zpomalovací práh. Zvýšení komprese nemá pozitivní vliv na komfort. Zvýšení komfortu zvýšilo sílu pod koly u obou tlumičích jednotek. Nejlépe dopadlo 20% zvýšení komprese. Na obr. 41 jsou průběhy sil na kompresi pod zadním kolem.

Tab. 10 Rozdíly v nastavení komprese stochastické nerovnosti

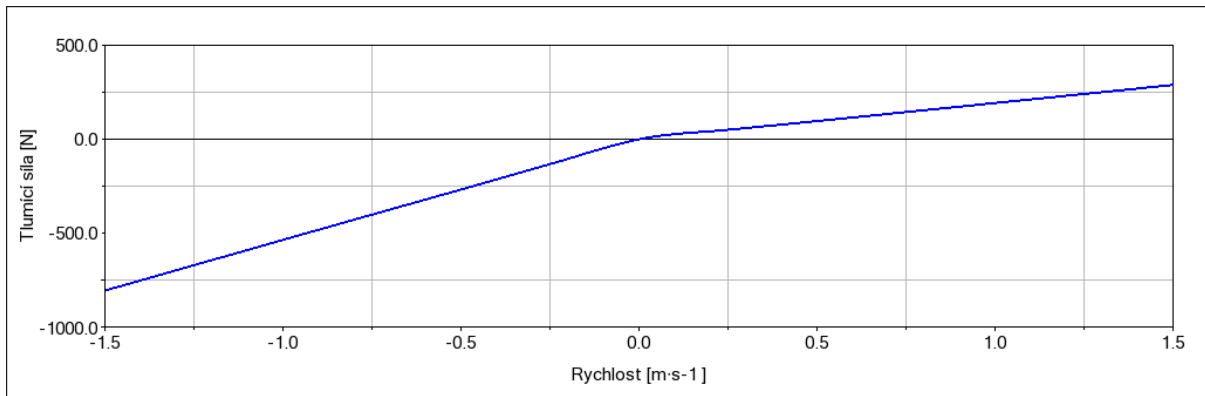
	Komprese 120 %	Komprese 140 %	Komprese 160 %
Zrychlení (RMS) [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]	35,9	37	38,4
Průměrná síla pod předním kolem [N]	630	623	623
Průměrná síla pod zadním kolem [N]	438	418	414



Obr. 41 Síla pod zadním kolem stochastické nerovnosti

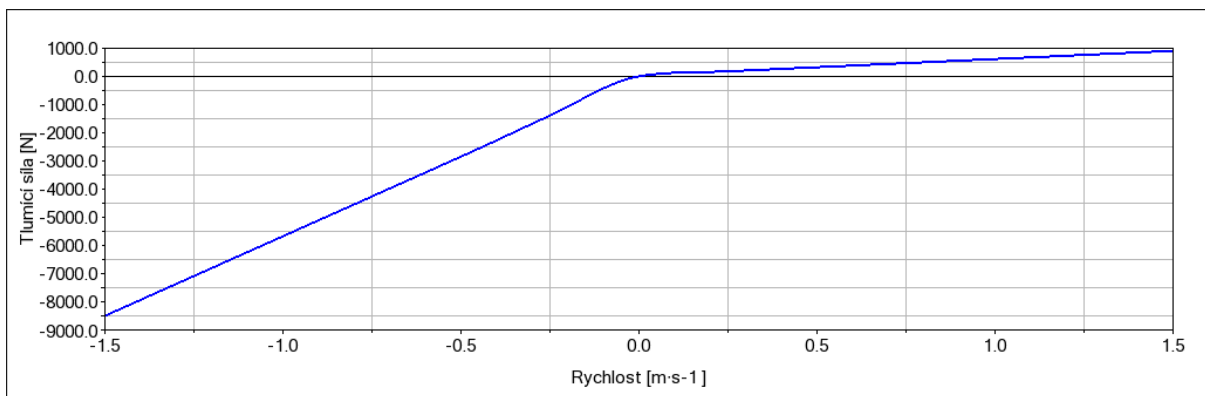
### 6.5.3 OPTIMÁLNÍ NASTAVENÍ

Ideální nastavení je závislé na typu terénu a jeho sklonu. Každý terén potřebuje jinak rychlou kompresi a jinak rychlý odskok. Graf tlumicí síly pro vidlici na *obr. 42* je určen pro jezdce váhy okolo 80 kg. Hodnoty tlumicí síly v kompresi a odskoku byly určeny na základě předchozích přejezdů v Adams View podpořené fyzických přejezdem. V odskoku nejlépe dopadla tlumicí síla s hodnotou  $535 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ . V kompresi byla zvolena tlumicí síla  $275 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ .



*Obr. 42* Tlumicí síla vidlice

Pro tlumič byly zvoleny hodnoty tlumicí síly v odskoku  $5670 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$  a kompresi  $600 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$  na *obr. 43*.



*Obr. 43* Tlumicí síla tlumič

## 6.6 SROVNÁNÍ S MĚŘENÍM

Měření sloužilo primárně pro korelaci s modelem vytvořeného v MSC Adams. Z měření jsou dostupné data o stlačení a zrychlení v *tab. 11* a *tab. 12*.

Tab. 11 Srovnání komprese vidlice měření a modelu

Komprese [mm]	Plně otevřeno	Střední škrcení	Maximální škrcení
Měření	33,0	30,0	27,9
Model	29,9	27,3	24,15
Odchylka v %	10,36	9,89	15,5

Komprese vidlice byla zvolena z důvodu předpokladu největšího rozdílu. Stlačení vidlice je větší, jak u tlumiče. V tab. 11 je znázorněno, že největší odchylka je 15,5 %, což je vzhledem absenci přesného modelu pneumatiky a znalosti přesného tlumení uspokojivý výsledek.

Tab. 12 Srovnání zrychlení měření a modelu

Maximální zrychlení [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]	Plně otevřeno	Střední škrcení	Plné škrcení
Měření	16,9	15,6	12,6
Model	95	83,5	80,9
Rozdíl v %	561	534	639

Bylo ještě provedeno měření bez přejezdu nerovností. Stejně podmínky byly nasimulovány v modelu. Bez výrazného buzení v tab. 13 vyvolaného nerovností se zrychlení téměř shoduje.

Tab. 13 Porovnání zrychlení modelu a měření rovina

	Maximální zrychlení [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]
Model	4,1
Měření	4,2

Porovnání maximálních zrychlení modelu a měření ukázalo velkou odchylku. Hodnoty zrychlení podle modelu jsou asi 6krát vyšší v *tab. 12*. Zatímco model bere rám a komponenty jako tuhá tělesa. V realitě i samotné výplety přispívají ke komfortu stejně tak představec a říditka. Jisté tlumení a nejistota může být obsažena v uchycení dataloggeru a také fakt, že datalogger není pro tento typ měření určen. Snížení zrychlení se dá přičíst modelu pneumatiky, který často vnáší nejistoty v modelech vytvořených v Adams Car/View.

## 6.7 NEDOSTATKY MODELU

I přes podobnosti výstupů modelu a měření je nutné brát model s jistou mírou odstupem. Model obsahuje jisté nedostatky buď těžko definovatelné, nebo nepopsatelné. Model v Adams View by měl sloužit pro předběžné a orientační řešení. Jako finální krok by vždy mělo následovat měření pro potvrzení modelu a pro širší odzkoušení odpružení kola. Obdobně se provádí jízdní zkoušky automobilů, pro které slouží Adams Car. Modely aut jsou více propracované a odzkoušené reálným měřením. Jízdní dynamika auta je v určitých ohledech méně proměnlivá. U osobních automobilů tvoří posádka menší procentuální zastoupení než jezdec u kola. Lehký osobní automobil může mít pohotovostní hmotnost okolo tuny a užitečné zatížení se pohybuje okolo 500 kg. To znamená, že hmotnost auta s posádkou je od 1100 kg do 1500 kg. Plně naložené auto je o skoro 30 % těžší než jen s řidičem. Zato těžké kolo váží 20 kg a lehký jezdec 50 kg. Jezdec je 2,5krát těžší než samotné kolo a tvoří zásadní část celku. Na druhé straně těžký jezdec s hmotností okolo 110 kg je 5,5krát těžší. To značí velký hmotnostní rozptyl. To znamená, že přesun jezdce během jízdy značně ovlivňuje odpružení. Tento jev byl potvrzen v modelu, kdy přesun hmoty, ovlivnil výsledky. V modelu však nelze nasimulovat přesun hmotnosti během simulace, aby odpovídal skutečnosti.

Další těžko popsatelnou složkou je obutí kola. Obutí má vlastní pružení a tlumení. Tyto faktory jsou závislé na typu obutí (galuska, bezdušový systém, kombinace pláště a duše), šířce, hodnotě TPI (počet vláken na palec). Jedná se sice o určitou nejistotu v modelu, ale odpružení by mělo fungovat při všech typech obutí.

I přes širokou paletu vozovek a možnosti tvorby vlastní vozovky je nemožné simulovat reálné cesty s velkými sklony a rozdílnou tuhostí podkladu.

## 7 NÁVRH VLASTNÍHO ODPRUŽENÍ

Vývoj vlastního systému odpružení by se dal rozdělit na dvě části. První část vývoje vlastního systému přepákování zadního kola a druhá vývoj vlastní vidlice/tlumiče. V praxi ovšem drtivá většina výrobců kol obě části nepodstupuje. Tlumící jednotky se nakupují od dodavatelů. V případě velkých výrobců je možné individuální nastavení tlumení. Výrobce tak nemusí vynakládat další finanční a lidské zdroje do vlastního vývoje tlumících jednotek. Zbavuje se reklamačních a servisních povinností. Atypičnost tlumiče může znamenat případné servisní problémy pro uživatele a může se jednat o rozhodující faktor při výběru kola. Rámové sady se často prodávají v několika verzích výbav seřazených podle ceny. Hlavní rozdíly jsou pozorovatelné ve volbě pohonu, výpletů a tlumení. Použitím dvou, tří značek tlumení v rámci jednoho modelu může výrobce zmenšit riziko výpadku dodávek. V potaz se taky musí brát preference populace na určitou značku odpružení. Vývoj vlastní jednotky je nerentabilní a z mnoha faktorů rizikový.

Vývoj vlastního rámu často trvá okolo jednoho až tří let a cena vývoje se může pohybovat okolo 10 milionů korun. Nejvíce složitá jsou pak celoodpružená kola, kde se musí navrhovat zadní stavba v důrazu na potřebné kinematické charakteristiky.

### 7.1 VOLBA TLUMENÍ

V rešeršní části byly popsány jednotlivé jevy ovlivňující tlumiče a konstrukční řešení potlačit většinu negativních důsledků. V oblasti úpravy kluzných ploch s ohledem na výrobní náklady a již použité materiály se moc velké změny nedají očekávat. Průměr noh vidlice je zvolen na základě testování, kdy malý průměr nesplňuje pevnostní požadavky a velké průměry přidávají váhu a statické tření. Konstrukční uspořádání tlumící patrony je dán dlouhým vývojem nejen v oblasti tlumení jízdních kol a umožňuje prakticky libovolnou volbu závislosti tlumící síly na rychlosti stlačení. Vzduchové patrony také plní svou funkci dostatečně a konstrukční změnou mohou být dosaženy jen malé změny. V úpravě konstrukce tlumících jednotek nelze očekávat velké změny, kterým zabráňuje zejména výrobní cena, a tím i dostupnost pro zákazníka.

Vhodnější cestu vývoje by mohlo představovat semiaktivní odpružení. Změna tlumící síly na základě vstupů umožňuje nastavit vhodnou tlumící sílu ve správný moment. Automatická úprava tlumící síly zvyšuje komfort, efektivitu a snižuje únavu jezdce. Semiaktivní systémy jsou testovány v praxi, a to na závodních tratích. Jezdec je na hodinovém závodě rychlejší o 100 sekund, díky tomuto systému. [36]

První a v praxi používaná konstrukční možnost semiaktivního odpružení je použití stávajících tlumících jednotek. Elektrické akční členy mění polohu fyzických členů upravujících např. zasunutí jehly. Situace se dá přirovnat k nastavování komprese za jízdy jezdce. To je však nebezpečné a bez vstupních dat. [37]

Druhá možnost je použití magnetorheologických tlumičů. Konstrukčně je tlumící patrona jednodušší, protože využívá kapalinu, ve které jsou částičky železa o velikosti několika mikrometrů. Tlumící síla závisí na elektrickém proudu cívky, která vytváří magnetické pole. Velikosti proudu lze regulovat tlumící sílu. Reakční doba dnešních magnetorheologických tlumičů je okolo 1,5 milisekundy. Při volbě dobrého algoritmu a konstrukce je jízda komfortní,

ale zároveň lze tlumič zcela zablokovat. Nevýhody představuje cena a energetická náročnost. [38]

Vývoj a masová výroba by mohly v budoucnu cenu snížit na přijatelnou cenovou hladinu. Spotřeba elektrické energie je v případě elektrických kol zanedbatelná vzhledem ke spotřebě pohonu.

### 7.1.1 SEMIAKTIVNÍ SYSTÉMY

V kapitole 3.4 byly popsány principy změny škrcení v kompresi a extenzi, které probíhá otočením kolečka/páky a posunutím jehly ventilu. Ovšem tyto změny nelze provádět během jízdy.

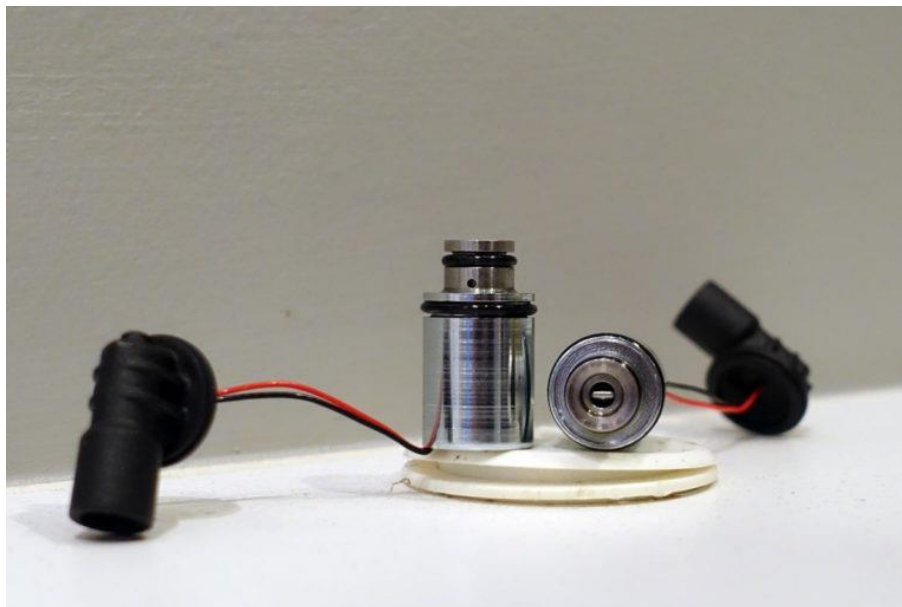
Již je to 10 let od představení prvního semiaktivního systému E:I Shock firmy RockShox na *obr. 44*. Existovaly dvě generace. První se vyznačovala značnou nespolehlivostí. Druhá generace doplatila na špatnou reputaci první generace a následník nedokázal tuto pověst změnit. Systém používal výstupní data ze dvou akcelerometrů a senzoru kadence šlapání. Jeden akcelerometr byl umístěn na řídkách a druhý na můstku vidlice. Systém následně ze vstupních dat nastavoval jen tlumič. Celý systém napájí externí baterie umístěna na rámu kola propojena kabeláží. E:I Shock byl výhradně spjat s koly výrobců Lapierre, Haibike a Ghost. [40]



*Obr. 44* Jednotlivé součásti E:I Shock [39]

V roce 2018 představila společnost Fox svůj inteligentní systém Live Valve 1.5, který vyvinula pro závodní vozidla. Systém je po konstrukční stránce velmi podobný předchozímu odpružení RockShox. Základní prvek tvoří baterie s řídicí jednotkou spojenou s periferiemi pomocí kabeláže. Systém je schopen fungovat okolo 30 hodin na jedno nabití. Kabeláž vede do dvou akcelerometrů. První se nachází na můstku vidlice a měří zrychlení neodpružené hmoty a druhý

je v blízkosti zadní osy na spodním rameni. Systém pro úpravu tlumení používá solenoidy na *obr. 45*. Live Valve přepíná jen mezi dvěma režimy Otevřeným a Zavřeným, přičemž v režimu zavřeném se nejedná o plné škrcení, aby odpružení mohlo reagovat na malé nerovnosti. Systém je primárně v režimu zavřeném a při detekci nerovnosti odpružení otevře. Fox udává, že reakční doba systému jsou 3 milisekundy. [42]



*Obr. 45* Solenoidy Fox Live Valve [42]

Koncem roku 2021 byl světu představen následovník E:I shocku jménem Flight Attendant. Systém se skládá ze dvou jednotek umístěných na tlumících jednotkách. Jednotka vidlice je umístěna na pravé noze vidlice, tedy na vrcholu tlumící komory a u tlumiče na externí nádobce (piggyback) na *obr. 46*. Systém upravuje tlumení pomocí servomotorků stejných jako v elektrické přehazovačce firmy Sram AXS, která spadá do téhož koncernu jako RockShox. Dále obsahují akcelerometr a inklinometr. Aby systém mohl reagovat na šlapání jezdce, musí znát alespoň kadenci, proto je v ose klik umístěn senzor kadence. V druhé generaci je možné použít wattmetr, který dodává navíc informace o přenášené síle. Systém není fyzicky propojen, ale bezdrátově. Každá jednotka musí mít vlastní zdroj elektrické energie. Baterie lze prohodit, případně nahradit vybitou baterii v přehazovačce, nebo vzít baterii z elektricky ovládané sedlovky. RockShox udává výdrž baterie okolo 20-30 hodin pro vidlici a 30-40 hodin pro tlumič při shodné baterii. Poslední, avšak volitelnou součástí, je páčka ovládání. Systém funguje v automatickém režimu a v manuálním. Automatický funguje zcela samostatně. V příslušné mobilní aplikaci lze nastavit automatický v 5 bodech dle preferencí. Mezi režimy lze přepínat volitelnou ovládací páčkou. Flight Attendant primárně nechává plně otevřené tlumení a poté ho přitvrzuje na základě vstupů. [36]



Obr. 46 Jednotka Flight Attendant [36]

Semiaktivní systémy se nejspíše v následujících letech rozšíří. Zatím jejich hlavní nevýhodou je cena. Cena systému se aktuálně pohybuje v ceně dobrého celoodpruženého kola, a proto se systémy spojují s nejvyššími třídami tlumičích jednotek a kol. U levných kol by se technologie příliš promítla do ceny. Dá se navíc předpokládat, že zákazník jezdící na kole více než standardní vzorek populace, investuje do kola více a vyžaduje lepší komponenty. Dobře navržený tlumič a dobře navržené přepákování je skoro až zbytečné, pokud si uživatel dobře nenastaví SAG, od kterého se vše odvíjí. Nemá smysl upravovat tlumení bez správně nastaveného statického zanoření.

### 7.1.2 NÁVRH TLUMENÍ

Všechny semiaktivní systémy upravují kompresi. Komprese není rozdělena na pomalou a rychlou. Nelze ji nastavit ani manuálně. Odskok se však nastavit manuálně dá. U vidlice je odskok závislý převážně na váze jezdce.

Důležité je zvolit kdy a za jakých podmínek bude systém upravovat tlumení a jakou charakteristiku tlumení upravuje.

Úprava tlaku ve vzduchové komoře, tedy měnit tuhost pružiny, by byla přínosná v určitých jízdnicích situacích, jako jízda z velmi prudkého kopce, kde by kompenzovala posunutí váhy jezdce dopředu. Systém by byl ovšem příliš složitý a těžký. Už systém dofukování obutí se neseťkal s úspěchem.

V oblasti tlumení se na vidlici upravují až 4 parametry. Komprese a odskok při nízkých a vysokých rychlostech. To stejné platí pro tlumič.

Odskok je u vidlice hodně závislý na tlaku, tedy váze jezdce. Proto je důležité nejprve zvolit správný SAG na základě nejen váhy ale typu také kola. Trailová/enduro kola se pohybují okolo

20-30 %. Downhill klidně na 10 % zanoření. Pomalý odskok při přejezdu více následujících nerovností znamená, že odpružení postupně propadá, až nezbude zdvih pro další nerovnost. Příliš rychlý odskok zase snižuje pohodlí a u vidlice mění úhel hlavové trubky, čímž se kolo stává přetáčivé. U tlumiče je závislost stejná, ale příliš rychlý odskok způsobuje nedotáčivost. Odskok je víc spojen s přenosem váhy. Pro prudká klesání je potřeba zpomalit odskok (větší tlumení). [35]

Komprese je u tlumiče ovlivněna kinematikou rámu, převážně pákovým poměrem. U vidlice je komprese ovlivněna jako odskok tuhostí pružiny. Pomalá komprese souvisí s pomalými pohyby, jako je šlapání a řízení kola klopením. Stabilita odpružení je získána na úkor citlivosti. Správná vysokorychlostní komprese dodává jistotu při velkých dopadech. Časté použití plného zdvihu souvisí spíše s tuhostí pružiny a její progresivitou.

Mezi senzory semiaktivního systému poskytující vstupní veličiny by měly patřit dva akcelerometry a inklinometry. Ideálně umístěné na neodpružené hmotě, ale to znamená oddělení snímače od akčního členu nastavující tlumící sílu. To zvyšuje složitost a hmotnost systému. S dnešním trendem elektrifikace řazení kolo zná, jaká rychlost je zařazena. Pak stačí znát kadenci a lze dopočítat rychlost. Pak řídicí jednotka zná rychlost. Wattmetr navíc dodává data o výkonu jezdce a odpružení se může ještě více přizpůsobit jezdci. [36]

Akční členy tvoří buď solenoidy, nebo servomotoroky. Solenoidy vynikají rychlostí a tichostí, ale jen s volbou zavřeno a otevřeno. Servomotoroky používají stejné členy, které jsou popsány v kapitole č. 3.4. Kvůli rychlosti reakce byly zvoleny solenoidy.

Semiaktivní systémy jsou aplikovány na různé typy kol. Je nutné je přizpůsobovat danému kolu a použití. To komplikuje aplikaci systémů. Při použití multibody modelu lze režimy tlumení a hodnotu tlumících sil odzkoušet nejprve v modelu, což ušetří čas a finance. Poté stačí jen nastavení odpružení vyzkoušet fyzickým měřením. Systémy primárně využívají data z akcelerometrů, což je jeden z výstupů multibody modelu. Na základě modelu podpořené měření lze specifikovat dva režimy odpružení. V *tab. 14* jsou uvedeny hodnoty tlumící síly pro dané režimy. Z modelu a měření bylo stanoveno zrychlení okolo  $7,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  je zrychlení, kdy se odpružení otevře do plně otevřeného režimu. Potom systém sleduje zrychlení a nechává odpružení otevřené, protože se dají očekávat další nerovnosti. Při detekci významné změně sklonu směrem nahoru systém přepíná do zavřeného režimu. Tento proces může být dále optimalizován pomocí dat z wattmetru, který měří jezdcovo úsilí. Když wattmetr ukazuje vysoký výkon při malém sklonu, lze předpokládat, že jezdec jede po rovině, a systém může přizpůsobit odpružení tomuto stavu. Dalším důležitým faktorem, který by měl systém sledovat, je doba jízdy. S delším časem jízdy by měl systém stále více upřednostňovat otevřený režim odpružení. Tento přístup zohledňuje únavu jezdce a potřebu většího komfortu při delší jízdě.

Tab. 14 Hodnoty tlumení

Tlumicí síla [ $\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1}$ ]	Vidlice	Tlumič
V kompresi – otevřeno	275	600
V odskoku – otevřeno	535	5670
V kompresi – zavřeno	350	780
V odskoku – zavřeno	642	7300

## 7.2 NÁVRH PŘEPÁKOVÁNÍ

Při návrhu přepákování je nutné brát v potaz aktuální a budoucí trendy. V rámci modelu se typ zadních staveb často nemění a výrobce s určitými evolucionemi drží koncepty několik let. V kategorii XC je trend zvětšování zdvihu jednotek. Z původních 100 mm se zdvihy dostaly až na 120 mm. Trend je dán snahou o větší univerzalitu kola a změnou závodních tratí. Dnešní tratě XC by se daly srovnat s tratěmi kategorie enduro před 20 lety. Na druhé straně na světovém poháru Enduro disciplíny je trend snižování zdvihů.

Kolo pro těžký terén by mělo dobře stoupat a zároveň být schopno sjet přírodní cesty s různorodým povrchem. Ze současných trendů je zjevné, že by univerzální kola trail/enduro kategorie mohly pohybovat se zdvihem okolo 140-160 mm zdvihu na obou tlumících jednotkách. Délkové rozměry rámu jsou dány volbou velikosti výpletů. Na trhu jsou zastoupeny dvě velikosti 27" a převažující 29" kola. Menší rozměr je často použit pro osoby menšího růstu. Je možné pozorovat, že velikosti XS a S se mohou nabízet s 27,5" a větší velikosti s 29". Větší rozměr je častěji používán a navrhovaný koncept bude počítat s tímto rozměrem. Délkové dimenzování rámu na 29" palcová kola znamená možné použití kola 27,5"+ takzvaného mullet. Přední kolo je 29" a zadní v rozměru 27,5"+, který má obvod blízký přednímu kolu.

Dnešní tlumící jednotky prošly více jak dvacetiletým vývojem a ve vyšších specifikacích mají málo negativních vlastností. Průměr noh vidlice je zvolen dlouhým testováním jako optimální poměr tuhosti a váhy. Materiál kluzných ploch a těsnění.

### 7.2.1 LINKAGE X3

Návrh vlastního odpružení byl vytvořen v programu Linkage X3. Jedná se o komerční program pro tvorbu 2D modelu jízdního kola. Pomocí šablon lze rychle vytvořit model rámu jízdního kola a zobrazit dané kinematické charakteristiky. V programu pak byla provedena citlivostní analýza kinematických charakteristik.

### 7.2.2 VOLBA PŘEPÁKOVÁNÍ

Na základě rešerše byl pro návrh vlastního systému odpružení zvolen systém horst Link na obr. 47. Systém je jednoduchý a snadno nastavitelný, což z volby vyřazuje systém twin-link, který je těžké navrhnout, ale změnou délky tlumiče, se podstatně mění kinematika kola. Systém high pivot představuje častou volbu pro vysokozdvihová kola často menších výrobců kol. Jedná se o relativně novější systém. Přidáním atypické kladky řetězu zvyšuje servisní náklady a také délka řetězové linky znamená použití dvou řetězů. Řetězové soustrojí obsahuje více pohyblivých členů, tím přidává váhu a odpor v pohonném ústrojí. [30]

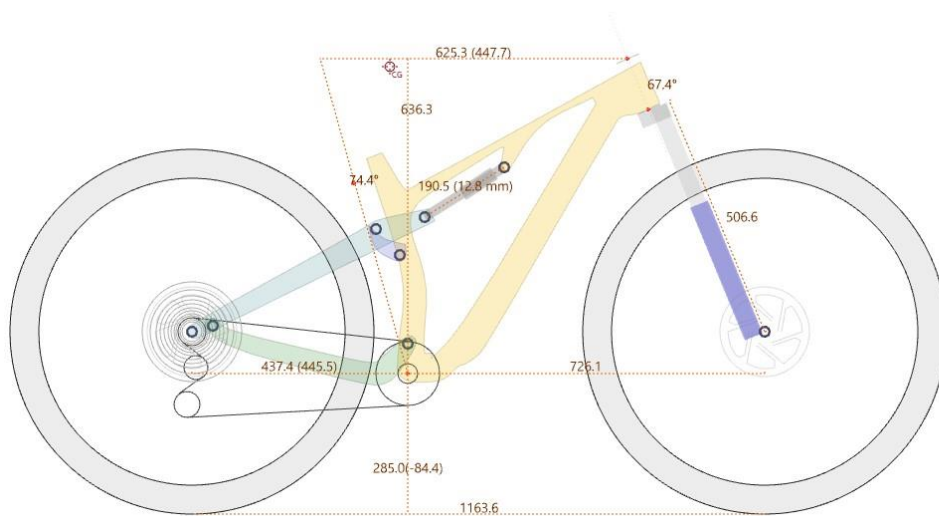
Po výběru typu zadní stavby je nutné zvolit umístění tlumiče. U zvoleného typu existují zejména 3 varianty uložení. První je vertikální umístění, tedy rovnoběžně k sedlové trubce. Výhoda je umístění váhy níže, a tím snížení váhy. Negativa jsou nemožnost montáže druhé košíku na láhev a fakt, že je tlumič více exponován nečistotám. Druhé je umístění téměř vodorovně s vozovkou (druhý čep je v přibližně v polovině spodní rámové trubky). Těžiště je v porovnání k první variantě výše, ale dovoluje použití delších tlumičů. Poslední, a výrobci v dané kategorii preferované, je umístění tlumiče podélně s horní rámovou trubkou. Konfigurace nechává volný rámový trojúhelník a přepákování je tuhé a direkteční. [41]

### 7.2.3 FYZIKÉ POŽADAVKY

Hlavní omezení při konstrukci zadní stavby odpružení je délka spodního ramene, což je délka mezi středem a osou zadního kola. Rameno musí být tak dlouhé jako poloměr vypletu s pláštěm plus prostor pro nečistoty a konstrukci stavby. Délka spodního ramene se pohybuje těsně pod 400 mm. Kratší hodnota pomáhá kolu k agilitě, ale je na úkor stability. Hodnota délky ramene je 387 mm a byla určena na základě průzkumu trhu. Kinematické charakteristiky, zejména anti-squat jsou proměnné na volbě převodu. S jednopřevodníky, které jsou drtivou volbou výrobců, tak i zákazníků, je naladění o něco jednodušší. Převody 1x11/1x12 a možná v budoucnu 1x13 s kazetami 10-55 zubů bezproblémově pokryjí rychlostní spektrum. Výrobci často ani neumožňují montáž přesmykače. To zmenšuje rozptyl, kdy u systému 3x9 s největším převodníkem 38 zubů a nejmenším 20-26 zubů, a to pouze na jednom kole, se podstatně měnila řetězová linka, a tím i kinematika. Rozsah počtu zubů převodníku se pohybuje od 28 zubů do 36 zubů s ohledem na použití kola. Trailové kolo o hmotnosti od 12 do 16 kg a pláště se šířkou až 2,4 palce a měkkou směsí, má podstatně větší jízdní odpory než cross country. U cross country kol by se dalo předpokládat, zvláště u dražších modelu se závodním použitím s velikostí převodníků okolo 38 zubů. Délka horního ramene je dána vzdáleností zadní osy a vahadla. Velikost a umístění vahadla jsou zvoleny na základě kinematických charakteristik

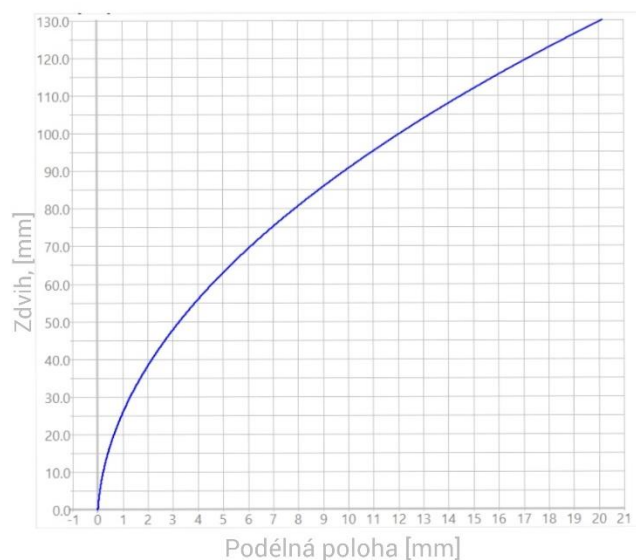
### 7.2.4 ÚPRAVA HORST-LINKU

V této kapitole jsou popsány závislosti kinematických charakteristik na změně polohy hlavních bodů zadního odpružení. Nejprve je nutné si určit základ, který tvoří počáteční bod. V tomto případě se jedná o čtyřčepový systém s horizontálním uložením tlumiče k horní rámové trubce.



Obr. 47 Navrhovaný systém odpružení

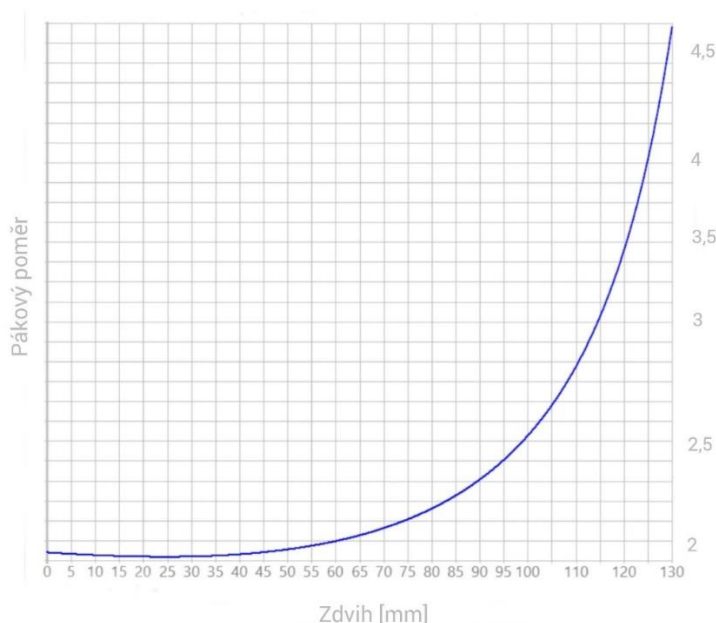
Posunem čepu spojující horní rameno zadní stavby a vahadlo směrem dolů vůči čepu tlumiče a vahadla se sníží anti-squat a o to více anti-rise. Zpětný ráz pedálů a pákový poměr zůstanou prakticky shodné. Další volba je změna výšky umístění vahadla k vůči rámu. Posunem směrem k zemi se lehce změní anti-rise a uprostřed zdvihu lehce klesne pákový poměr. Posunem hlavního čepu nad převodník se až dvojnásobně zvedne anti-squat, méně anti-rise (asi 20 %) a podstatně se zvětší zpětný ráz. To se s shoduje praxí, protože kola s High pivot odpružením jsou charakteristické velkým anti-rise a velkým zpětným rázem. Posunutím spodního čepu dolního ramene pod osu otáčení se zvýší anti-squat asi o 20 %, lehce se zvýší anti-rise. Další charakteristiky zůstaly prakticky nezměněné. [41]



Obr. 48 Dráha zadní osy

### 7.2.5 KINEMATICKÉ CHARAKTERISTIKY

Na poznatkách předchozí kapitoly vznikl návrh přepákování na *obr. 47*. S dráhou zadní osy na *obr. 48* Vzhledem k použití semi-aktivního systému odpružení je možné se pohybovat s hodnotou anti-squat okolo 80 % v závislosti na zdvihu a převodníku a dané rychlosti. S převodníkem 32 zubů (předpokládaná primární volba) se v SAGU (20 % zanoření) je anti-squat 88 % a propružením klesá až na 72 %. Odpružení s relativně nízkou hodnotou anti-squat by mělo být citlivé. Anti-rise nabývá v počátku skoro 72 % a se zdvihem stoupá na 87 %. To znamená, že odpružení by mělo být aktivní i při brzdění. Zpětný ráz nabývá maximální hodnoty 7°. To je způsobeno umístěním hlavního čepu v řetězové lince. Pákový poměr na *obr. 49* je z počátku 2,07 : 1, poté exponenciálně stoupá až k maximální hodnotě 4,53 : 1. V počátku je odpružení citlivé, uprostřed zdvihu tuhne pro stabilitu a ke konci rapidně stoupá pro zamezení dosažení dorazů.



*Obr. 49* Pákový poměr

Kolo je určeno pro trailové ježdění se zdvihy 140 mm vpředu a 130 mm vzadu. Tlumič má na základě poznatků z měření a modelu o 10 mm méně. Kinematika kola je zvolena speciálně pro semiaktivní odpružení a sleduje aktuální trendy v oblasti konstrukce kol. Je však nutné podotknout, že kinematické charakteristiky jsou vždy kompromisní a každý jedinec potřebuje jiné charakteristiky v závislosti na stylu jízdy, druhu terénu a technice jízdy. To samé platí pro druh kola v závislosti na členitosti terénu. Profesionál projede stejnou trasu na cross country kole lépe než pokročilý amatér na enduro kole.

## ZÁVĚR

V rešeršní části práce byly popsány tlumící jednotky a jejich nastavení. Poté byly popsány typy zadních staveb celoodpružených horských kol a jejich charakteristiky.

Dalším cílem práce byla tvorba validního výpočtového modelu pro analýzu chování kola při přejezdu nerovností. Model má představovat rychlý vývojový nástroj ve vývoji celoodpružených kol. Model má dát rychlou zpětnou vazbu na změnu charakteristik odpružení.

Pro validaci modelu bylo provedeno měření. Popsané celoodpružené kolo bylo osazeno příslušnou měřicí technikou. S kolem se provedly přejezdy jednotkové nerovnosti ve třech nastaveních. Stejně podmínky byly simulovány v modelu. Validace modelu s měřením ukázala dobrou korelaci ve stlačeních tlumících jednotek. Větší odchylka byla zaznamenána ve zrychlení. Pro lepší korelaci by bylo nutné lépe namodelovat vlastnosti pneumatiky a rozložení hmotnosti jezdce.

Poté byla provedena citlivostní analýza. Nejprve byla měněna tuhost pružiny a její progresivita. Poté se měnila velikost tlumící síly v kompresi a odskoku. Výstupy simulací potvrdily teoretické předpoklady v nastavení odpružení.

V poslední části byl popsán vlastní návrh systému odpružení na základě předchozích kapitol diplomové práce. Byl zvolen semiaktivní systém odpružení a čtyřčepové přepákování zadní stavby. S využitím modelu v Adams View byly nastaveny charakteristiky tlumení.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] LIN, Bruce. The First Full-Suspension Mountain Bikes: A Brief History of Full-Suspension MTBs. Online. TPC. 2019. Dostupné z: <https://www.thepros Closet.com/blogs/news/five-vintage-full-suspension-bikes>. [cit. 2024-05-22].
- [2] 1992 Scott Ultimate CST. Online. In: FLATER, Brandon. Pinterest. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/623467142140567692/>. [cit. 2024-01-16].
- [3] CANNONDALE. KingPin. Online. Cannondale. 2019. Dostupné z: <https://www.cannondalebikes.cz/o-cannondale/technologie/kingpin>. [cit. 2024-01-19].
- [4] TRNČÍK, Tino. Konstrukce celoodpružených kol. Bakalářská práce. Brno: VUT, 2022.
- [5] BENSON, Cory. Suspension Tech: Wait... What is suspension damping, again? Online. BIKERUMOR!. 2018. Dostupné z: <https://bikerumor.com/suspension-tech-wait-what-is-suspension-damping-again/>. [cit. 2024-05-19].
- [6] BODMAN, Noah. Fox 40 Float Fork. Online. BLISTER. 2017. Dostupné z: <https://blisterreview.com/gear-reviews/fox-40-float-fork>. [cit. 2024-05-19].
- [7] VAN VUUREN, Martin Janse. 10.13140/RG.2.2.35077.83689. Online. 2021, s. 71. Dostupné z: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35077.83689>. [cit. 2024-01-26].
- [8] MOUNTAIN BIKE SUSPENSION 101: Springs (Part 2 of 6). Online. Vorsprung. 2022. Dostupné z: [https://vorsprung suspension.com/blogs/learn/mountain-bike-suspension-101-springs-part-2-of-4?\\_pos=3&\\_sid=44aac21f1&\\_ss=r](https://vorsprung suspension.com/blogs/learn/mountain-bike-suspension-101-springs-part-2-of-4?_pos=3&_sid=44aac21f1&_ss=r). [cit. 2024-01-20].
- [9] SUSPENSION THEORY GUIDE. Online. S. 28. Dostupné z: <https://www.sram.com/globalassets/document-hierarchy/service-manuals/rockshox/suspension-theory-guide.pdf>. [cit. 2024-05-19].
- [10] Seříd'te si odpruženou vidlici (1. část). Online. Cykloservis. C2024. Dostupné z: <https://cykl.cz/seridte-si-odpruzenou-vidlici-1-cast>. [cit. 2024-05-20].
- [11] HÁJÍČEK, Štěpán. QUARQ ShockWiz – Revoluce v analýze odpružení!. Online. Bikeandride. 2017. Dostupné z: <https://www.bikeandride.cz/2017/02/quarq-shockwiz-revoluce-v-analyze-odpruzeni/>. [cit. 2024-01-19].
- [12] KELI. MOTION INSTRUMENTS - DOKONALE ZMĚŘÍ ODPRUŽENÍ A POMŮŽE S JEHO NASTAVENÍM. Online. 2020. Dostupné z: <https://dolekop.com/clanek/8473-motion-instruments-dokonale-zmeri-odpruzeni-a-pomuze-s-jeho-nastavenim>. [cit. 2024-05-19].
- [13] LABA7 shock dyno: unleash the performance. Online. Dostupné z: <https://laba7.com/products/shock-dyno/>. [cit. 2024-05-19].
- [14] , bimjeam. Bottomless tokeny - čo je to a na čo je to dobré? Online. MTBIKER. 2017. Dostupné z: <https://www.mtbiker.sk/clanky/9461/bottomless-tokeny-co-je-to-a-na-co-je-to-dobre.html>. [cit. 2024-01-17].

- [15] VRBA, Michal. MATEMATICKÝ MODEL TLUMIČE ODPRUŽENÍ. Diplomová práce. Brno: VUT, 2022.
- [16] PAVLOV, Nikolay. Influence of shock absorber temperature on vehicle ride comfort and road holding [online]. MATEC Web of Conferences, Sofia, Bulgaria, 2017 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: doi:10.1051/matecconf/201713302006
- [17] BIKERADAR. Santa Cruz Hightower LT150. Online. Cannondale. Dostupné z: <https://www.bikeradar.com/features/the-ultimate-guide-to-mountain-bike-rear-suspension-systems>. [cit. 2024-01-19].
- [18] ZVOZIL, Ondrej. NÁVRH RÁMU CELOODPRUŽENÉHO HORSKÉHO KOLA. Bakalářská práce. Brno: VUT FSI, 2016.
- [19] STOTT, Seb. The ultimate guide to mountain bike rear suspension systems. Online. Bikeradar. C2024. Dostupné z: <https://www.bikeradar.com/features/the-ultimate-guide-to-mountain-bike-rear-suspension-systems>. [cit. 2024-05-22].
- [20] HÁJÍČEK, Štěpán. Pod závojem odpružení – část 1. – Skutečný čtyřčep. Online. Bikeandride.cz. 2011. Dostupné z: <https://www.bikeandride.cz/2011/02/odpruzeni-skutecny-ctyrcep/>. [cit. 2024-01-16].
- [21] Understanding Leverage Curves. Online. Vorsprung. 2022. Dostupné z: [https://vorsprunguspension.com/blogs/learn/understanding-leverage-curves?\\_pos=1&\\_sid=38c5b1da9&\\_ss=r](https://vorsprunguspension.com/blogs/learn/understanding-leverage-curves?_pos=1&_sid=38c5b1da9&_ss=r). [cit. 2024-05-19].
- [22] SCULLION, Pete. How does mountain bike suspension work? | Part 1: Why do we even need Rear Suspension? Online. WIDEOPEN. 2018. Dostupné z: <https://www.wideopenmountainbike.com/2018/01/rear-suspension-for-dummies-part-1-why-do-we-want-rear-suspension>. [cit. 2024-01-17].
- [23] HUCKLE, Oscar. What is a high-pivot mountain bike? The pros and cons of high-pivot suspension designs. Online. Bikeradar. 2023. Dostupné z: <https://www.bikeradar.com/advice/buyers-guides/what-is-a-high-pivot-mountain-bike>. [cit. 2024-05-19].
- [24] HÁJÍČEK, Štěpán. Nezávislé zavěšení vs. tahání za pedály. Online. Bikeandride.cz. 2014. Dostupné z: <https://www.bikeandride.cz/2014/01/nezavisle-zaveseni-vs-tahani-za-pedaly/>. [cit. 2024-05-18].
- [25] LINDA, Jakub. Současné trendy v systémech odpružení. Online. MTBIKER. 2023. Dostupné z: <https://www.mtbiker.cz/clanky/126487/soucasne-trendy-v-systemech-odpruzeni.html>. [cit. 2024-01-16].
- [26] LINDA, Jakub. Kde sa podel jeden čap? Alebo je tvoj bicykel naozaj tuhý? Online. MTBIKER. 2021. Dostupné z: <https://www.mtbiker.sk/clanky/124644/kde-sa-podel-jeden-cap-alebo-je-tvoj-bicykel-naozaj-tuhy.html>. [cit. 2024-01-16].
- [27] PYE, Graham. Illustrated guide to Mountain Bike Suspension Design. Online. BikeBros. Dostupné z: <https://www.bikebros.ca/blogs/spoke-words/suspension-designs-explained/>. [cit. 2024-01-17].

- [28] HAJÍČEK, Štěpán. GT Force / Sensor 2019 – LTS znovu na scéně! | TECH NEWS. Online. BikeandRide. 2018. Dostupné z: <https://www.bikeandride.cz/2018/07/gt-force-sensor-2019-lts-znovu-na-scene-tech-news/>. [cit. 2024-01-17].
- [29] HAJÍČEK, Štěpán. DW-link – detailní rozbor systému odpružení. Online. Bikeandride.cz. 2015. Dostupné z: <https://www.bikeandride.cz/2015/02/dw-link-detailni-rozbor-systemu-odpruzeni/>. [cit. 2024-01-16].
- [30] High pivot - čo to je a na čo je to dobré? Online. MTBIKER. 2022. Dostupné z: <https://www.mtbiker.sk/clanky/125132/high-pivot-co-to-je-a-na-co-je-to-dobre.html>. [cit. 2024-01-16].
- [31] MOUNTAIN BIKE SUSPENSION 101: Springs (Part 2 of 6). Online. Vorsprung. 2022. Dostupné z: [https://vorsprungssuspension.com/blogs/learn/mountain-bike-suspension-101-springs-part-2-of-4?\\_pos=3&\\_sid=44aac21f1&\\_ss=r](https://vorsprungssuspension.com/blogs/learn/mountain-bike-suspension-101-springs-part-2-of-4?_pos=3&_sid=44aac21f1&_ss=r). [cit. 2024-01-20].
- [32] NIELENS, Henri a LEJEUNE, Thierry. Bicycle Shock Absorption Systems and Energy Expended by the Cyclist. Online. Sports Medicine. 2004, roč. 34, č. 2, s. 71-80. ISSN 0112-1642. Dostupné z: <https://doi.org/10.2165/00007256-200434020-00001>. [cit. 2024-01-20].
- [33] Zpomalovací práh průběžný – 10 km/h - barvený. Online. Brevia servis. Dostupné z: <https://deskovepodlahy.cz/zpomalovaci-prah-prubezny-10-kmh-barveny>. [cit. 2024-05-18].
- [34] FILKA, Tomáš. SYSTÉM ODPRUŽENÍ A TLUMENÍ MOTOCYKLU. Diplomová práce. Brno: VUT FSI, 2019.
- [35] Ultimate MTB Suspension Setup Advice with Jordi from Fox. Online. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=M0GsFtFrJvU&t=2292s>. [cit. 2024-05-21].
- [36] RockShox Flight Attendant vs Fox Live Valve 1.5 | An in-depth review of these high-tech electronic suspension systems. Online. Flow mountain bike. 2022. Dostupné z: <https://flowmountainbike.com/tests/rockshox-flight-attendant-vs-fox-live-valve-review/>. [cit. 2024-05-18].
- [37] BENEDICT, Tyler. Rockshox Flight Attendant Gets Faster than Ever for XC. Online. BIKERUMOR! 2024. Dostupné z: <https://bikerumor.com/rockshox-flight-attendant-2024/>. [cit. 2024-05-18].
- [38] Tlumič rychlejší než mrknutí oka umožní zvýšit rychlost vlaků a šetří koleje. Online. In: VUT FSI. C2024. Dostupné z: <https://www.fme.vutbr.cz/veda/uspechy/68123>. [cit. 2024-05-20].
- [39] SINGLETRACKJON. Lapierre E.I. Shock: First Ride. Online. Singletrack. 2012. Dostupné z: <https://singletrackworld.com/2012/07/lapierre-e-i-shock-first-ride/>. [cit. 2024-05-19].
- [40] SVOBODA, Jakub. Elektronické odpružení E:I Shock v otázkách a odpovědích. Online. Bikeandride.cz. 2012. Dostupné z: <https://www.bikeandride.cz/2012/07/elektronicke-odpruzeni-ei-shock-v-otazkach-a-odpovedich/>. [cit. 2024-05-19].

- [41] Horst-Link-Pivot-Placement-Analysis. Online. C2020-2024. Dostupné z: <https://www.pinkbike.com/u/PHeller/album/Horst-Link-Pivot-Placement-Analysis/>. [cit. 2024-05-19].
- [42] BENEDICT, Tyler. Patent Patrol: Fox Live Valve is about to get a lot more “Active”. Online. BIKERUMOR!. 31.1n. 1. Dostupné z: <https://bikerumor.com/patent-patrol-fox-live-valve-is-about-to-get-a-lot-more-active/>. [cit. 2024-05-19].

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CAN		Controller Area Network
CC		Center of curvature, střed křivosti
GPS		Global Positioning System, globální polohový systém
IC		Instant center, okamžitý střed rotace
HSC		High speed compression, komprese při vysoké rychlosti
LSC		Low speed compression, komprese při nízké rychlosti
HSR		High speed rebound, odskok při vysoké rychlosti
LSR		Low speed rebound, odskok při nízké rychlosti
SD		Secure data
TPI		Threads per inch,
XC		Cross-country aerial vehicle, bezpilotní letoun
VPP		Virtual pivot point
$c_{1p}$	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$	Tuhost předního kola
$c_{1z}$	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$	Tuhost zadního kola
$c_{2p}$	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$	Tuhost vidlice
$c_{2z}$	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$	Tuhost tlumiče
$k_{1p}$	$[\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}]$	Tlumení předního kola
$k_{1z}$	$[\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}]$	Tlumení zadního kola
$k_{2p}$	$[\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}]$	Tlumení vidlice
$k_{2z}$	$[\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}]$	Tlumení tlumiče
$m_{1p}$	$[\text{kg}]$	Hmotnost přední neodpružené hmoty
$m_{1z}$	$[\text{kg}]$	Hmotnost zadní neodpružené hmoty
$m_2$	$[\text{kg}]$	Hmotnost odpružené hmoty