

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Změna radiální tuhosti pneumatiky v závislosti na změně odklonu kola
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin Tutko**
Osobní číslo: **D18162**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Téma práce: **Změna radiální tuhosti pneumatiky v závislosti na změně odklonu kola**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Zásady pro vypracování

1. Analýza současného stavu v oblasti související se zadaným tématem práce.
2. Rozbor valení kola.
3. Síly působící na vozidlové kolo.
4. Realizace experimentálního měření.
5. Vyhodnocení výsledků.

Rozsah pracovní zprávy: **35 stran**
Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího práce**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN 63 1502
- [2] ČSN 63 1511
- [3] VLK, F.: *Dynamika motorových vozidel*. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0024-2.
- [4] KRMELA, J.: *Systémový přístup k výpočtovému modelování pneumatik I.: [System approach to computational modelling of tyres – I. part]*. Brno: Tribun EU, 2008. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-7399-365-8.
- [5] VLK, F.: *Podvozky motorových vozidel*. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0026-9.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Jilek, Ph.D.**
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: **7. února 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2022**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Jakub Vágner, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 7. února 2022

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Tato bakalářská práce byla realizována s využitím technologií Výukového a výzkumného centra v dopravě.

V Pardubicích dne 13. 5. 2022

Martin Tutko v. r.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli pomoc při tvorbě této bakalářské práce. Zejména pak panu Ing. Petru Jilkovi, Ph.D. za cenné rady a pomoc při práci na statickém adhezoru, odborné vedení a poskytnutí dílčích podkladů, které mi pomohly při tvorbě této práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Ivu Šefčíkovi, Ph.D. za rady a připomínky týkající se formálních úprav této práce. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině, která mi umožnila studium na vysoké škole a byla mi oporou po celou dobu studia.

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou změny radiální tuhosti pneumatiky v závislosti na změně odklonu kola. Teoretická část je věnována informacím o pneumatikách, valení kola a silám působícím na kolo. Praktická část se zabývá stanovením metodiky měření, realizací experimentálního měření a vyhodnocením výsledků experimentálního měření na statickém adhezoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

pneumatiky, radiální tuhost, statický adhezor, valivý odpor, odklon kola

TITLE

Change in radial tyre stiffness as a function of change in wheel camber

ANNOTATION

This bachelor thesis deals with the issue of changing the radial stiffness of the tyre depending on the change in wheel deflection. The theoretical part is devoted to information about tyres, wheel rolling and forces acting on the wheel. The practical part deals with the determination of measurement methodology, implementation of experimental measurements and evaluation of experimental measurement results on a static adhesor.

KEY WORDS

tyres, radial stiffness, static adhesor, rolling resistance, wheel deflection

Obsah

Seznam obrázků, grafů a tabulek.....	9
1 Úvod	11
2 Teoretický rozbor konstrukce pneumatiky	12
2.1 Definice pneumatiky	12
2.2 Funkce pneumatiky	12
2.3 Konstrukce pneumatiky	14
2.3.1 Výroba pneumatiky.....	14
2.3.2 Konstrukční části pneumatiky	15
2.3.3 Základní rozměry pneumatiky	19
2.3.4 Značení pneumatik.....	19
2.4 Rozdělení pneumatik.....	21
2.4.1 Podle nutnosti použít duši.....	21
2.4.2 Podle typu silničního vozidla, pro které je pneumatika určena	22
2.4.3 Podle vzorku běhounu	22
2.4.4 Podle konstrukce pláště	23
3 Rozbor valení kola a sil působících na kolo.....	25
3.1 Deformační charakteristiky pneumatiky	25
3.1.1 Radiální deformační charakteristika	25
3.1.2 Torzní a obvodová deformační charakteristika	26
3.1.3 Boční deformační charakteristika	27
3.2 Kinematika valení kola v rovině	27
3.2.1 Ideální valení kola.....	28
3.2.2 Prokluzování kola	28
3.2.3 Smýkání kola	29
3.3 Valení kola s odklonem.....	30
3.4 Síly působící na kolo v klidu a při valení v rovině	31

3.4.1	Valení pružného kola po tuhé vozovce.....	31
3.4.2	Valení tuhého kola po pružné vozovce.....	33
3.4.3	Valení pružného kola po pružné vozovce.....	34
3.4.4	Valivý odpor	35
4	Experimentální měření.....	37
4.1	Zařízení a vybavení pro realizaci experimentálního měření	37
4.2	Stanovení metodiky měření.....	40
4.3	Realizace experimentálního měření	42
4.3.1	Měření radiální tuhosti pneumatiky neodkloněného kola.....	42
4.3.2	Měření radiální tuhosti pneumatiky s odklonem kola 5°	44
4.3.3	Měření radiální tuhosti pneumatiky s odklonem kola 10°	47
5	Vyhodnocení výsledků experimentálního měření.....	50
6	Závěr	53
	Seznam použité literatury	54

Seznam obrázků, grafů a tabulek

Obr. 1: Definice pneumatiky podle různých hledisek [1].....	12
Obr. 2: Tvar a velikost stykové plochy podle nahuštění pneumatiky [5].....	14
Obr. 3: Konstrukční části pneumatiky [8]	15
Obr. 4: Patní pásek (vlevo) a patní lano (vpravo) [12]	16
Obr. 5: Běhoun pneumatiky [11].....	17
Obr. 6: Typy pláštíků podle konstrukce kostry [1]	18
Obr. 7: Základní rozměry pneumatiky [15]	19
Obr. 8: Značení pneumatik pro osobní automobily [16]	19
Obr. 9: Rozdělení pneumatik [1]	21
Obr. 10: Porovnání pneumatik při defektu [23].....	22
Obr. 11: Typy dezénu [28].....	23
Obr. 12: Chování diagonální (vlevo) a radiální pneumatiky (vpravo) při zatáčení [29]	24
Obr. 13: Úplná radiální deformační charakteristika pneumatiky pro různé tlaky huštění [30] 25	
Obr. 14: Torzní deformační charakteristika pneumatiky [30]	26
Obr. 15: Boční deformační charakteristika pneumatiky [30]	27
Obr. 16: Ideální valení kola [30].....	28
Obr. 17: Prokluzování kola [30]	29
Obr. 18: Smýkání kola [30]	29
Obr. 19: Odklon a příklon kola [32]	30
Obr. 20: Odvalování kladně odkloněných kol [3]	30
Obr. 21: Valení kola s úhlem odklonu [30]	31
Obr. 22: Situace stojícího (vlevo) a nepoháněného kola (vpravo) [30].....	32
Obr. 23: Situace hnacího (vlevo) a brzdícího kola (vpravo) [30].....	33
Obr. 24: Situace valení tuhého kola po pružné vozovce [30].....	34
Obr. 25: Situace valení pružného kola po pružné vozovce [30].....	35
Obr. 26: Moment M_{fk} a síla O_{fk} na nepoháněném kole [35].....	35
Obr. 27: Redukční podložka	37
Obr. 28: Statický adhezor	38
Obr. 29: Měřicí stanice nájezdových vah	39
Obr. 30: Vzduchová pistole s manometrem.....	39
Obr. 31: Zkoušené kolo a platforma nájezdových vah	40

Obr. 32: Kolo s nastaveným úhlem odklonu 5°	44
Obr. 33: Zatížené kolo s úhlem odklonu 10°	47
Obr. 34: Síly působící na odkloněné kolo při zatěžování	51
Graf 1: Radiální deformační charakteristika pneumatiky pro zatížení kola bez odklonu	42
Graf 2: Radiální deformační charakteristika pneumatiky pro zatížení s odklonem kola 5°	45
Graf 3: Radiální deformační charakteristika pneumatiky pro zatížení s odklonem kola 10°	48
Graf 4: Porovnání radiální deformační charakteristiky pneumatiky pro různý odklon kola	50
Graf 5: Radiální tuhost pneumatiky pro různý odklon kola	52
Tabulka 1: Hodnoty přírůstků zatížení a radiální deformace	43
Tabulka 2: Radiální tuhost pneumatiky neodkloněného kola.....	43
Tabulka 3: Hodnoty přírůstků zatížení a radiální deformace s úhlem odklonu kola 5°	45
Tabulka 4: Radiální tuhost pneumatiky s úhlem odklonu kola 5°	46
Tabulka 5: Hodnoty přírůstků zatížení a radiální deformace s úhlem odklonu kola 10°	48
Tabulka 6: Radiální tuhost pneumatiky s úhlem odklonu kola 10°	49

1 Úvod

Doba jde neustále kupředu, kdy je v dnešní společnosti hlavním měřítkem rychlost. Co nejrychleji obsloužit zákazníka, co nejrychleji se dostat z místa A do místa B. Ne nadarmo se říká, že čas jsou peníze. Vývoj ve všech různých odvětvích jde rychle kupředu a automobilový průmysl v tomto ohledu není žádnou výjimkou. Nejedná se však jen o to, aby měl automobil větší výkon a dosahoval vyšších rychlostí. Jde také o zvýšení pohodlí a bezpečnosti při jízdě, snížení hluku a emisí, a mnoha dalších faktorů. Na splnění těchto požadavků mají velký vliv pneumatiky. Ty jsou jako jediná část automobilu v kontaktu s vozovkou, popřípadě terénem, po kterém se automobil pohybuje. Aby mohla pneumatika správně plnit svou funkci, je zapotřebí znát podmínky, za jakých bude automobil v provozu. Podle provozních podmínek se zvolí vhodný materiál a typ konstrukce pneumatiky. Pneumatika má za úkol vést automobil ve směru trajektorie jízdy, nést zatížení (hmotnost automobilu), tlumit rázy, které vznikají v důsledku nerovnosti vozovky nebo terénu a přenášet síly z pneumatiky na vozovku a opačně (brzdná, trakční, boční).

Teoretická část práce se bude zabývat konstrukcí pneumatik a rozdělením pneumatik podle různých hledisek, valením vozidlového kola a silám působícím na vozidlové kolo.

V úvodu praktické části práce bude zapotřebí seznámit se s obsluhou zařízení a vybavení použitého při experimentálním měření. Následovat bude stanovení metodiky experimentálního měření, realizace experimentálního měření a vyhodnocení výsledků

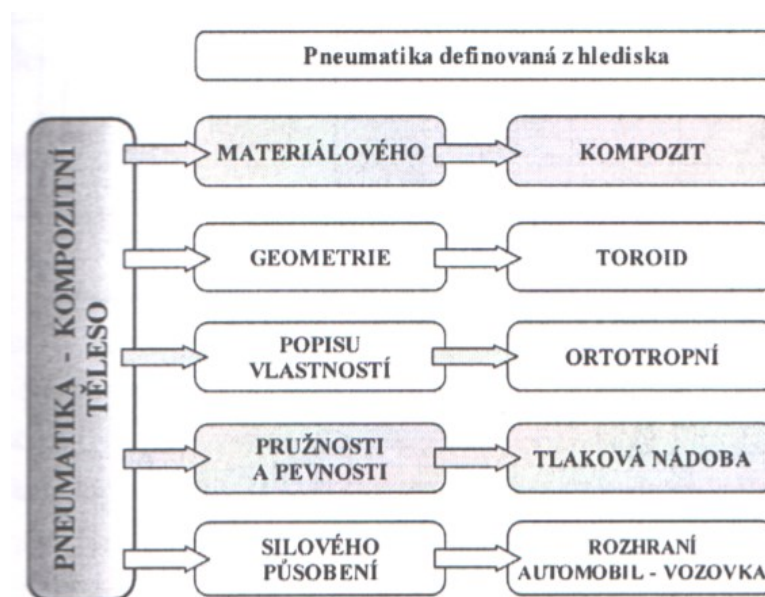
2 Teoretický rozbor konstrukce pneumatiky

2.1 Definice pneumatiky

Pneumatika je podle normy ČSN 641001 definována následovně: „*Pneumatikou rozumíme plášť, popř. s duší a vložkou, namontovaný na ráfek a naplněný tlakovým médiem.*“ [1]

Dle stejné normy ČSN 641001 lze definovat i plášť: „*Plášť je pružná vnější část pneumatiky, která zajišťuje styk s vozovkou a svou patní částí dosedá na ráfek.*“ [1]

Z pohledu geometrie vypadá pneumatika jako rotační útvar ve tvaru prstence, tzv. toroid a z pohledu mechaniky se jedná o tlakovou nádobu, jejíž stěny tvoří plášť pneumatiky. Další definice pneumatiky jsou uvedeny na Obr. 1. [2]



Obr. 1: Definice pneumatiky podle různých hledisek [1]

2.2 Funkce pneumatiky

Pneumatika společně s diskem a ráfkem tvoří vozidlové kolo, které je součástí podvozku automobilu. Vozidlové kolo je přes pneumatiku jediná část automobilu ve styku s vozovkou nebo terénem, po kterém se automobil pohybuje. Vozidlové kolo plní více funkcí – nese hmotnost samotného automobilu, posádky nebo nákladu, přenáší brzdné, boční a trakční síly mezi kolem a vozovkou a má vliv na odpružení vozidla, jelikož částečně tlumí rázy vznikající v důsledku nerovnosti vozovky. S tím úzce souvisí zvýšení komfortu a bezpečnosti při jízdě. [3]

Důležitou roli hraje také hmotnost pneumatiky. Pneumatika by měla být co možná nejlehčí, jelikož spolu s kolem patří do skupiny neodpružených hmot vozidla. [1]

Funkce, které musí pneumatika splňovat, lze shrnout v těchto bodech [2]:

- nesení zátěže, minimální hmotnost,
- tlumení rázů a přispívání k bezpečnosti a komfortu při jízdě,
- přenos brzdných a trakčních sil, výkonu,
- dobré adhezní schopnosti za různých podmínek,
- držení směru, reakce na řízení a změny směru jízdy,
- kladení minimálního odporu při jízdě,
- minimální hluk a vibrace při jízdě,
- dlouhá životnost a přijatelná cena.

Nesení zátěže

Pneumatiky musí být schopné nést hmotnost vozidla včetně posádky a nákladu. Zátěž musí nést nejen když je vozidlo v pohybu, ale i v případě, že stojí na místě a nepohybuje se. Mimo to musí být schopné snést i přesun zátěže při akceleraci a deceleraci. [3]

Tlumení rázů a přispívání k bezpečnosti a komfortu při jízdě

Aby byla pneumatika schopna tlumit rázy, musí být správně nahuštěna. Správný tlak média v pneumatice, kterým je stlačený vzduch nebo oxidy dusíku, má zásadní vliv nejen na tlumení, ale i na bezpečnost a pohodlí při jízdě. Vzduch je velice pružný a díky této vlastnosti se pneumatika přizpůsobuje nerovnostem vozovky a pohlcuje rázy při přejezdu přes překážky. Tím je zabezpečen co největší komfort posádky během jízdy a zároveň se prodlužuje celková životnost automobilu. [3]

Životnost

Všechny části automobilu se opotřebovávají a pneumatiky nejsou v tomto směru výjimkou. Na opotřebení pneumatiky má vliv mnoho faktorů: konstrukce pneumatiky, styl jízdy, terén, po kterém se vozidlo pohybuje, zatížení vozidla a tlak v pneumatikách. Pravidelná kontrola tlaku v pneumatikách je velmi důležitá. Vzduch z pneumatiky neustále uniká, i když jen v elementárním množství. Důvodem může být netěsnost ventilů nebo netěsnost v kontaktu ráfku s patkou pneumatik. Není dobré, aby byla pneumatika podhuštěná nebo přehuštěná. Tlak v pneumatice má vliv na velikost a tvar styčné plochy v místě kontaktu s povrchem a na rozložení tlaku při kontaktu se zemí. Pokud je tedy pneumatika nesprávně nahuštěna, nebude správně plnit svou funkci a rychleji dojde k jejímu opotřebení. [3], [4].

Správné hodnoty tlaku huštění jsou uvedeny v příručce vozidla nebo na webových stránkách výrobce a odvíjejí se od konstrukce vozidla, velikosti pneumatik a rozložení hmotnosti [5]. Obr. 2 ukazuje tvar a velikost stykové plochy pneumatiky s vozovkou v závislosti na tlaku v pneumatice.



Obr. 2: Tvar a velikost stykové plochy podle nahuštění pneumatiky [5]

2.3 Konstrukce pneumatiky

2.3.1 Výroba pneumatiky

Pneumatiku je tvořena 3 hlavními komponenty: pryž (80-85 %), textilní vlákna (12-15 %) a síť z umělé hmoty nebo ocelový drát (2-3 %). Nynější pneumatika je zpevněný pryžový kompozit zhotovený z polymerů, olejů, sazí, chemických a textilních látek a patkových lan. [3]

Pro výrobu pláště pneumatiky jsou zapotřebí tyto základní materiály [3]:

- Elastomery (kaučuky) – pro výrobu kaučukové směsi,
- Přísady (aditiva) – přidávané do kaučukové směsi,
- Kordy z ocelových, přírodních a chemických vláken (bavlna, polyester atd.),
- Ocelový drát – pro patní lano.

Hlavní složkou kaučukové směsi je **kaučuk**, což je polymerní materiál, jehož typickou vlastností je pružnost. Kaučuk patří mezi elastomery, je tedy schopný se po deformaci způsobené vnější silou opět vrátit do původního tvaru [6]. Kaučuk je buď přírodní nebo syntetický. **Přírodní kaučuk** se získává ze stromu kaučukovníku ve formě latexu. Pro využití při výrobě pneumatik má nevýhodné vlastnosti, je citlivý na působení olejů a špatně odolává nízkým a vysokým teplotám. Proto se při výrobě pneumatik používá **kaučuk syntetický**, jehož účelem je nahradit kaučuk přírodní, nejen kvůli svým dobrým mechanickým a fyzikálním vlastnostem, které jsou při výrobě pneumatik důležité (odolnost vůči nízkým a vysokým teplotám), ale i kvůli omezeným zdrojům přírodního kaučuku. Ze syntetických kaučuků se pro výrobu kaučukových směsí používají převážně butadienový (BR), isoprenový (IR), butadienstyrenový (SBR), ethylenpropylenový terpolymer (EPDM) a butylkaučuk (IIR). [2], [3].

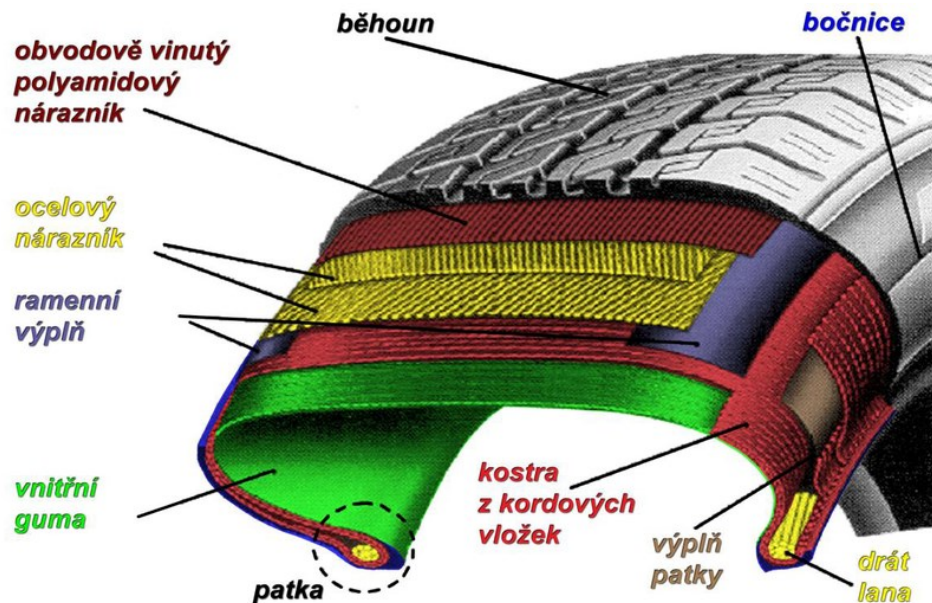
Stěžejní gumárenskou operací je plastifikace kaučuku. Ta se provádí z důvodu lepšího vmíchávání aditiv do kaučukové směsi. Mezi aditiva patří vulkanizační činidla, saze (díky nim má pneumatika svou typickou barvu), aktivátory, změkčovadla, antioxidanty a plniva. Důležité je přesné dávkování přísad, kterým se zajistí stejnorodost směsi. Homogenita směsi má velký vliv na výsledné vlastnosti pneumatiky (pevnost v tahu, odolnost proti stárnutí, dynamické vlastnosti.) [3]

Složení kaučukové směsi, která se následně použije pro výrobu pneumatik, záleží na účelu použití. Není možné z jedné směsi vyrobit celou pneumatiku, jednotlivé části pneumatiky mají jiné funkce a vlastnosti, které musí splňovat. Rozdílná směs je potřeba pro výrobu bočnic, jiná zase pro výrobu běhounu. Při výrobě některých pneumatik je potřeba více než 10 směsí, které se následně prolnou při vulkanizaci. [1]

Po přípravě směsi následuje příprava polotovarů, ze kterých se pneumatika skládá (bočnice, běhoun, textilní vrstva, ocelové kordy, patní lana apod.). Po vytvoření jednotlivých polotovarů přichází řada na složení dílů pneumatiky do sebe neboli konfekce. Po složení prvků vznikne tzv. surový plášť, který už vypadá jako pneumatika, ale nemá potřebné vlastnosti. Surový plášť je tvárný (plastický), ale není elastický. Následují procesy lisování a vulkanizace. [7]

2.3.2 Konstrukční části pneumatiky

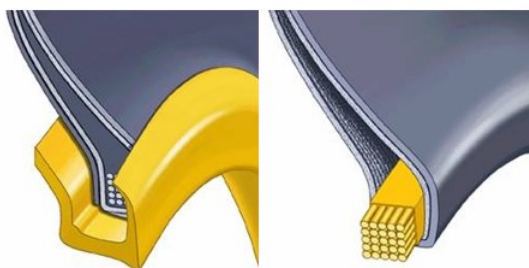
Pneumatika je složitý celek složený z mnoha jednotlivých částí, které mají různou funkci a odlišné vlastnosti. Jednotlivé části pneumatiky musí být vyrobeny s vysokou přesností, jelikož nepřesnosti by měly veliký vliv na funkci a kvalitu pneumatiky jako celku. Jednotlivé konstrukční části pneumatiky znázorňuje Obr. 3.



Obr. 3: Konstrukční části pneumatiky [8]

Vnitřní guma (vločka) se nachází na vnitřní straně pláště pneumatiky. Je to vrstva vzduchotěsné syntetické pryže, většinou vyrobené z butylu. Butyl je materiál, jež se vyznačuje vysokou nepropustností plynů. Vnitřní vločka se využívá u bezdušových pneumatik, má stejnou funkci jako duše používaná u staršího typu pneumatik. [3], [9], [10]

Patka je zesílená část pneumatiky, která přiléhá na ráfek. Patka vznikne ohnutím kostrových kordových vložek kolem patního lana. **Patní lano** vyztužuje patku, je vyrobené z vysokopevnostního ocelového lana potaženého gumou. **Jádro patky** vyplňuje prostor nad patkovým lanem. Zajišťuje postupný přechod z oblasti patky, jež se vyznačuje velkou tuhostí, do oblasti bočnice. Jádro se vyrábí ze syntetického kaučuku. Obsahuje textilní nebo ocelové kordové výztuže, které zvyšují ohybovou tuhost patky. Úkolem patky je utěsnit vzduch uvnitř pneumatiky a bezpečně přenášet síly a momenty (točivý moment motoru, brzdou sílu) z ráfku na část pneumatiky, která je ve styku s vozovkou (běhoun). Výztužný patní pásek má za úkol zpevnit přechodovou oblast mezi patkou a bočnicí. Vyroben je z pogumovaných nylonových nebo aramidových kordů. [2], [3], [10], [11]

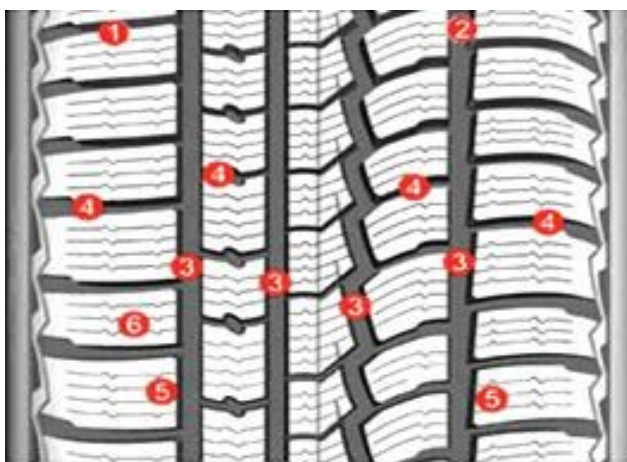


Obr. 4: Patní pásek (vlevo) a patní lano (vpravo) [12]

Běhoun je část pneumatiky opatřená vzorkem (**dezénem**), nachází se na vnější straně pneumatiky a je ve styku s vozovkou. Běhoun musí být odolný proti opotřebení, měl by se co nejméně zahřívat a musí být schopen se přichytit ke každému povrchu, po kterém se automobil pohybuje. Aby běhoun všechny tyto požadavky splňoval, je nutné použít správnou směs pro výrobu běhounu. Běhounová směs by se kromě výše uvedených vlastností měla vyznačovat také vysokou pevností v tahu, odolností proti stárnutí, mít dobré adhezní schopnosti k nárazníku, kostře a vozovce. U pneumatik pro osobní automobily by měl být běhoun co nejtenčí, a to z důvodu opotřebení a energetických ztrát, jelikož čím větší je tloušťka běhounu, tím větší vzniká valivý odpor, což vede k většímu zahřívání pneumatiky. U nákladních vozů by měl být naopak silnější, v tomto případě je běhoun konstruován pro další případné prořezání dezénu. U pneumatik pro osobní vozidla je prořezávání nepřijatelné. Při použití v praxi mohou mít pláště pneumatik dvouvrstvý běhoun. **Vnější** vrstva je velmi odolná proti opotřebení a má velice dobré adhezní schopnosti pro styk s vozovkou. **Vnitřní** vrstva běhounu chrání kostru pláště před mechanickým poškozením a snižuje valivý odpor. [1], [3], [11], [12]

Běhoun se dá rozdělit na několik zón, z nichž každá má jinou funkci. První z nich, **vnější zóna**, je nejvíce namáhána při řízení a manévrování. Tuto zónu tvoří pevné a tuhé bloky, které mají za úkol zajistit co nejlepší jízdní stabilitu vozidla a jeho bezpečné ovládání. **Vnitřní zóna**

s příčnými drážkami je navržena tak, aby byl při jízdě na mokré vozovce zaručen dostatečný odvod vody. Díky příčným drážkám má tato zóna posilující účinek při záběru na zasněžené vozovce. Třetí zónu tvoří **široké drážky po obvodu pneumatiky**, které zajišťují držení požadovaného směru jízdy. Jejich dalším důležitým úkolem je odvod vody z místa kontaktu pneumatiky s vozovkou. Už výše zmíněné **příčné drážky** mají za úkol odvádět vodu při jízdě po mokré vozovce a posilují záběr při jízdě na sněhu. Tyto drážky jsou umístěny tangenciálně ke směru jízdy. Hluk vznikající při odvalování pneumatiky je zčásti eliminován díky různé šířce bloků ve vnější i vnitřní zóně. **Husté lamelování** na jednotlivých blocích zvyšuje brzdící a záběrové schopnosti pneumatiky. Při brzdění či akceleraci dojde v místě kontaktu pneumatiky s vozovkou k rozevření těchto lamel, čímž se vytvoří množství záběrových hran. Tento jev má za následek zlepšené adhezní schopnosti pneumatiky zejména na mokré nebo zledovatělé vozovce. Při jízdě na mokré vozovce se do dutin vzniklých při rozevření lamel může dostat voda. Tím se sníží množství vody, které je nutné odvézt z místa kontaktu pneumatiky s vozovkou. Při přenosu bočních sil se do sebe lamelování na jednom bloku zaklesne do sebe, čímž vznikne tužší blok, díky kterému má pneumatika lepší boční stabilitu a dochází k menšímu opotřebení. [11]



Obr. 5: Běhoun pneumatiky [11]

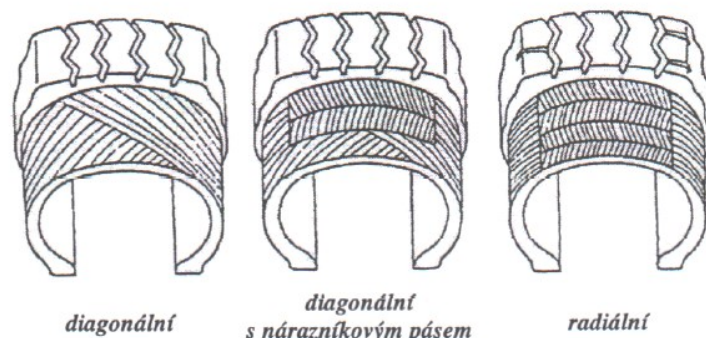
1 – Vnější zóna, 2 – Vnitřní zóna, 3 – Široké obvodové drážky, 4 – Příčné drážky, 5 – Různě široké bloky, 6 – Lamelování

Bočnice je část pneumatiky mezi ramenem a patkou. Je vyrobena z přírodního kaučuku. Jejím úkolem je chránit kostru pláště před vlivy počasí a mechanickým poškozením (např. nárazy o obrubník) a zajišťuje boční stabilitu pneumatiky. Bočnice musí vydržet namáhání tahem a ohybem, musí být odolná proti vzniku a růstu trhlin. V místě, kde se dotýká ráfku, je vyztužena. Na bočnici se nachází všechny údaje o pneumatice (rozměry, indexy, výrobce, konstrukce apod.). **Ramena** spojují běhoun a bočnice. Jsou vyrobena z tenké vrstvy pryže, díky čemuž dobře odvádí teplo vznikající při odvalování pneumatiky. Rameno ovlivňuje jízdu zatáčkou, kdy pomáhá držet stabilitu vozidla. [2], [11], [13], [14]

Nárazník tvoří přechod mezi kostrou a běhounem. Jeho úkolem je zvýšit odolnost pláště proti průrazu a zejména u radiálních pneumatik stabilizovat běhoun v obvodovém směru a přenášet obvodové síly. Jednotlivé vrstvy kordu tvořící nárazník jsou uloženy tak, že jejich

vlákna jsou mírně zkřížená. S obvodovou kružnicí svírají úhel v rozmezí 5° až 25°. U diagonálních pneumatik s nárazníkovým pásem býval nárazník vyroben z polyamidových nebo jiných kordů. Pláště čistě diagonální konstrukce nárazník nemívají. Pro radiální pneumatiky se používá nárazník vyrobený zejména z ocelových kordů. Konstrukce nárazníků má výrazný vliv na snížení valivého odporu. Pneumatiky pro nákladní vozy mají tři až čtyři nárazníkové vrstvy, pneumatiky pro osobní vozidla většinou 2 vrstvy. **Překrývací nárazník** bývá umístěn nad ocelokordovým nárazníkem. Jeho kordy vyrobené z pogumovaného polyamidu jsou uloženy ve směru odvalování (s obvodovou kružnicí svírají úhel 0°). [3], [11]

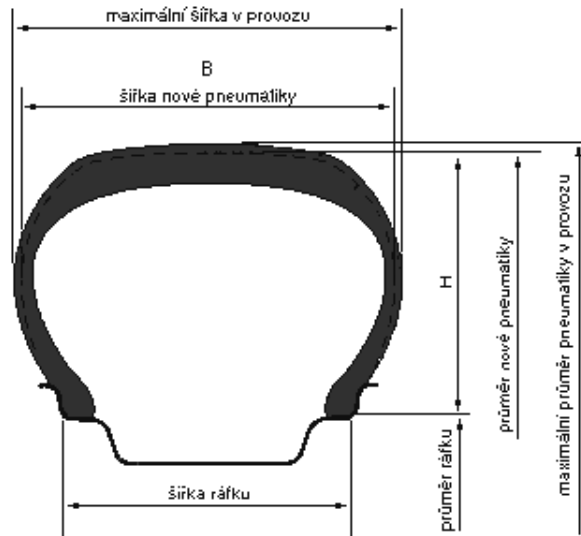
Kostra pláště určuje drtivou většinu vlastností pneumatiky, hlavně nosnost, tvar, jízdní vlastnosti apod. Kostra je tvořena vložkami z pogumovaných kordových vláken, která mohou být bavlněná, plastová, polyesterová nebo ocelová. Skladba a složení těchto vložek určují základní vlastnosti pláště. Kostra má za úkol nedovolit změnu tvaru pneumatiky a přenášet točivý moment. Podle konstrukce kostry se pláště dělí na diagonální a radiální. [3], [11]



Obr. 6: Typy pláští podle konstrukce kostry [1]

2.3.3 Základní rozměry pneumatiky

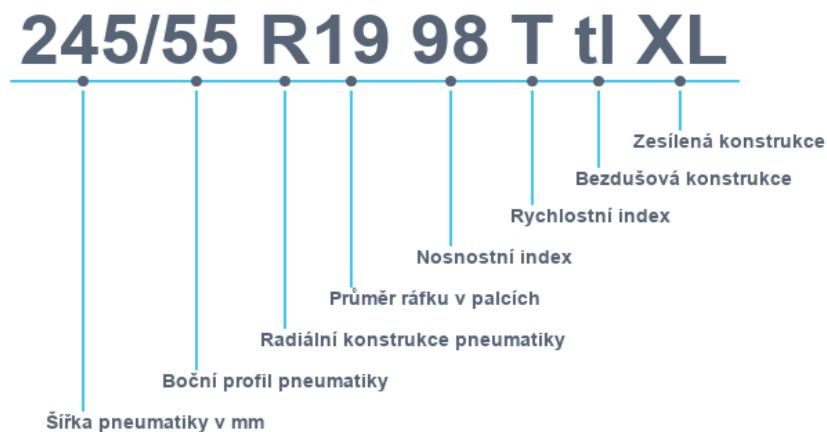
Velikost pneumatiky je určena třemi základními rozměry: výškou profilu H , šířkou profilu nezátížené nahuštěné pneumatiky B a průměrem ráfku. Tyto rozměry jsou součástí označení pneumatiky. Profilové číslo je vyjádřeno poměrem (H/B) a je vyjádřeno v procentech. [3]



Obr. 7: Základní rozměry pneumatiky [15]

2.3.4 Značení pneumatik

Značení je rozdílné pro pneumatiky používané pro osobní a nákladní automobily. V této práci se zaměřuji hlavně na pneumatiky pro osobní vozidla, tudíž i značení bude rozebráno pro tento druh pneumatik. Pneumatika má své označení na bočnici. Označení pneumatik pro osobní automobily zobrazuje následující obrázek. [3]



Obr. 8: Značení pneumatik pro osobní automobily [16]

Jednotlivá čísla a písmena na bočnici udávají [16]:

- **Konstrukce pneumatiky** – (R = radiální, "-" = diagonální); (TL = bezdušová, TT = s duší),
- **Index nosnosti (LI)** – udává maximální zatížení na jednu pneumatiku,
- **Rychlostní index (SI)** – udává nejvyšší přípustnou provozní rychlost pneumatiky,
- **XL, RF** – udává, že pneumatika má zesílenou konstrukci a zvýšenou nosnost.

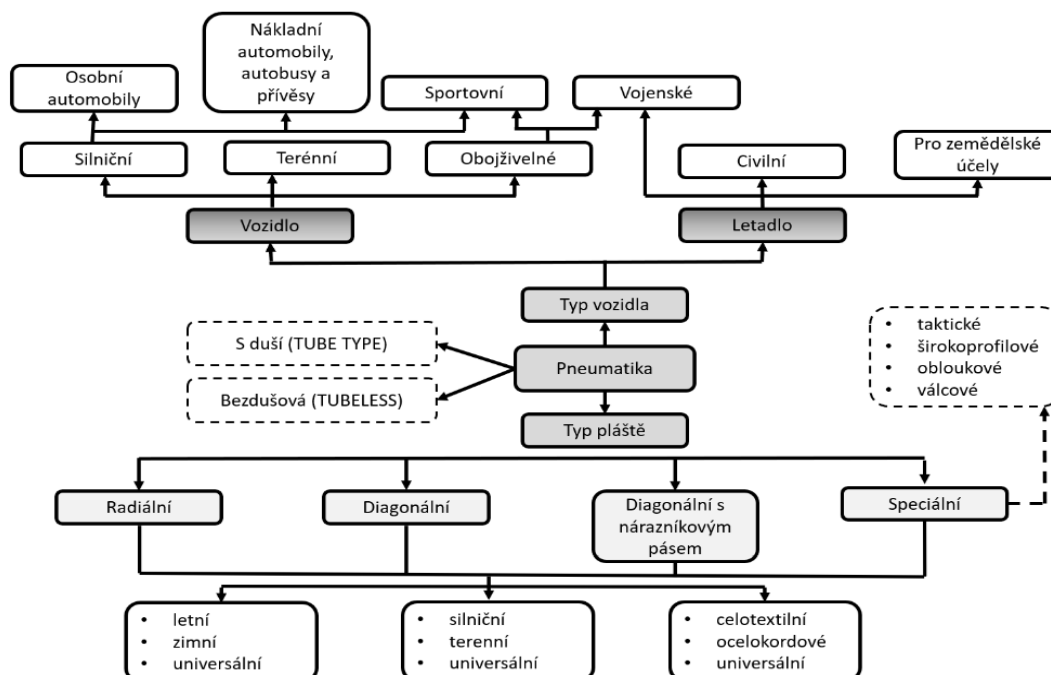
Na bočnici pneumatiky se mohou vyskytovat i další značky a nápisy, např. [3], [17], [18]:

- **Indikátor opotřebení TWI** je výstupek na dně dezénu, má předepsanou výšku a prochází napříč běhounem, určuje maximální dovolené opotřebení dezénu,
- **C** – označení pneumatik pro lehká nákladní vozidla,
- **LRR** – pneumatika se sníženým valivým odporem,
- **FR, MFS** – ochrana ráfku před poškozením,
- **M+S** – označení pro zimní pneumatiky,
- **A/S** – pneumatiky pro celoroční provoz,
- **A/T** – použití pro každý terén,
- **M/T** – použití do těžkého terénu,
- **REGROOVABLE** – plášť umožňující dodatečné prohloubení dezénu.

Na vozidle se smí používat pouze pneumatiky určené pro daný typ vozidla výrobcem pneumatik a výrobcem vozidla nebo pneumatiky uvedené v technickém průkazu vozidla. Na jedné nápravě musí být shodné pneumatiky, čímž se rozumí pneumatiky stejného rozměru, konstrukce, značky a druhu dezénu. [3]

2.4 Rozdělení pneumatik

Na úvod se dají pneumatiky rozdělit podle typu vozidel, pro která se dají pneumatiky použít, a podle typu pláště pneumatiky, jak je vidět na Obr. 9.



Obr. 9: Rozdělení pneumatik [1]

2.4.1 Podle nutnosti použít duši

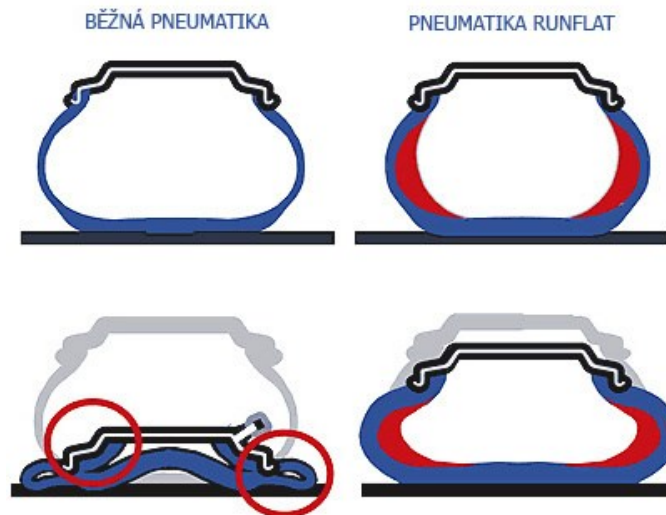
Jako první typ pneumatiky plněné vzduchem se používala **pneumatika s duší** (označení TUBETYPE; TT). Duše byla naplněna vzduchem, ale nebyla v kontaktu s vozovkou, ten zajišťoval plášť. U tohoto typu pneumatik nemusel být plášť tak silný a robustní narozdíl od pozdějších bezdušových. Nevýhodou je větší náchylnost k poškození. Při defektu dochází k rychlému úniku vzduchu. [19]

Bezdušové pneumatiky (označení TUBELESS; TL) mají robustnější a silnější plášť, který kompenzuje absenci duše. U tohoto typu pneumatik je nižší pravděpodobnost, že dojde k defektu. I při poškození je možný dojezd, jelikož vzduch z pláště uniká mnohem pomaleji než u pneumatik s duší. Záleží však na rozsahu poškození. [20]

Moderní vozy využívají systémů, které řidiče upozorní na pokles tlaku v pneumatikách. První z nich je jednodušší, tzv. nepřímý, pasivní. Využívá protiblokovacího systému brzd ABS. [3] Při poškození dojde k úniku vzduchu, což se projeví zmenšením dynamického poloměru kola. To má za následek nižší obvodovou rychlost kola, což zaznamená právě snímač otáček. Druhý systém TPMS (z angl. Tyre Pressure Monitoring System) je tzv. přímý, aktivní způsob měření tlaku v pneumatikách. Využívá snímače tlaku, který je na ventilku pneumatiky [21].

Ukazuje přesnou hodnotu tlaku v jednotlivých pneumatikách. Tento systém je choulostivý, proto je nutné dodržovat správný postup při montáži. [3], [19]

Aby bylo možné dojet nebo pokračovat v jízdě i po defektu, byly vyvinuty tzv. run-flat pneumatiky neboli dojezdové pneumatiky. Od běžných pneumatik se liší tuhostí a tloušťkou bočnic, které se vyrovnají se ztrátou tlaku a při maximální rychlosti 80 km/h je možné dojet až do vzdálenosti 80 km. Run-flat pneumatiky se dají použít pouze u automobilů, které disponují aktivním nebo pasivním systémem pro kontrolu tlaku v pneumatikách. [21] V dnešní době používají výrobci run-flat pneumatiky místo klasické rezervy [22].



Obr. 10: Porovnání pneumatik při defektu [23]

2.4.2 Podle typu silničního vozidla, pro které je pneumatika určena

Pneumatiky pro nákladní vozidla se používají nejen u klasických nákladních automobilů, autobusů, ale také u těžkých těžebních strojů. Musí splňovat stejné požadavky jako pneumatiky pro vozidla osobní, pár rozdílů ale přece jenom je. Hlavním rozdílem je vyšší odolnost a několikanásobně větší nosnost než u pneumatik osobních. Terénní (offroadové) pneumatiky se využívají u terénních vozidel, SUV a u vozidel s pohonem všech čtyř kol (4x4). Stejně jako pneumatiky nákladních vozidel mají vysokou odolnost, jsou tedy ideální pro provoz v obtížném a hůře přístupném terénu. [24]

2.4.3 Podle vzorku běhounu

Podle vzorku běhounu lze rozdělit pneumatiky na **letní** a **zimní**. Rozdíl není pouze v odlišných blocích dezénu, ale také ve složení směsi, která ovlivňuje vlastnosti pneumatiky. Směs letních pneumatik pod bodem mrazu ztvrdne a pneumatika není schopná plnit svou funkci. Zimní pneumatiky se vyrábí z měkčích směsí, aby byla zajištěna dostatečná přilnavost k vozovce i při teplotách pod bodem mrazu. Letní pneumatiky mají větší dezénové bloky a méně lamel, zatímco zimní se vyznačují menšími bloky dezénu a jemným lamelováním. Husté lamelování u zimních pneumatik zvyšuje záběr a přilnavost na zasněžených a zledovatělých vozovkách. Liší se také hloubkou dezénu. Minimální hloubka dezénu u letních

pneumatik je zákonem stanovena na 1,6 mm, u zimních jsou to 4 mm. **Univerzální** pneumatiky jsou kompromisem mezi letními a zimními. V našich klimatických podmínkách není používání univerzálních pneumatik vhodné. [1], [25], [26], [27]

Dezén na běhounu pneumatiky může být symetrický, asymetrický nebo směrový. **Symetrický** dezén se většinou používá u nejlevnějších typů pneumatik. Dezén je symetrický zprava, zleva, zepředu i zezadu, tudíž při montáži nezáleží na směru rotace a vnější či vnitřní straně. **Směrový** dezén má stejnou vnitřní i vnější stranu, ale na bočnici je šipkou a nápisem *Rotation* naznačený směr rotace. **Asymetrický** dezén je rozdělen do zón, z nichž každá plní určitou funkci. Pneumatiky s tímto typem dezénu mají na bočnicích označení *Outside* (vnější strana), a *Inside* (vnitřní strana). [3]



Obr. 11: Typy dezénu [28]

2.4.4 Podle konstrukce pláště

Diagonální pneumatiky mají kostru složenou vždy ze sudého počtu kordových vložek s orientací vláken pod úhlem 30 až 40° vzhledem k podélné rovině symetrie. Kordová vlákna sousedních vložek jsou překřížena a zasahují pod patková lana, kolem kterých jsou přehnuta. Tím pádem je každý bod kostry k patkám ukotven dvěma vlákny se shodným stoupáním. Obvodové a příčné síly jsou přenášeny přímo do patky. Při zatížení a deformaci pneumatiky se kordová vlákna neprodłużují, ale posouvají. Pryž mezi vlákny je tak namáhána stříhem, čímž vzniká teplo. [1]

Radiální pneumatiky nemají kordová vlákna zkřížena, ale vedou od patky k patce kolmo na podélnou rovinu symetrie. Tato část kostry přenáší boční a radiální síly. Obvodové síly však tato konstrukce není schopná zachytit, proto jsou radiální pneumatiky vyztužena nárazníkem po celém obvodu pláště. Podle materiálu kostry a nárazníku se radiální pláště dělí na kombinované s označením „steel“ (kostra tvořena textilními kordy, ocelový nárazník) a ocelové s označením „all steel“. Díky nárazníku mají radiální pláště výrazně větší obvodovou tuhost.

Také lépe zachycují boční síly, takže při zatížení boční silou zůstane v kontaktu s vozovkou větší styčná plocha než u diagonálních plášťů. Mezi další výhody oproti diagonálním patří menší valivý odpor, menší opotřebení a mají lepší adhezní schopnosti. Nevýhodou je jejich vyšší cena, která souvisí s náročnější a přesnější výrobou. U osobních automobilů se dnes používají výhradně radiální pneumatiky. [1], [3], [11]

Diagonální pneumatiky s nárazníkovým pásem, smíšená konstrukce (tzv. bias-belted) jsou kompromisem mezi diagonálními a radiálními pneumatikami. Kostrou připomíná diagonální plášť, kordová vlákna jsou zkřížena pod úhlem větším než 60°. Navíc je zpevněna nárazníkovým pásem. [1]



Obr. 12: Chování diagonální (vlevo) a radiální pneumatiky (vpravo) při zatáčení [29]

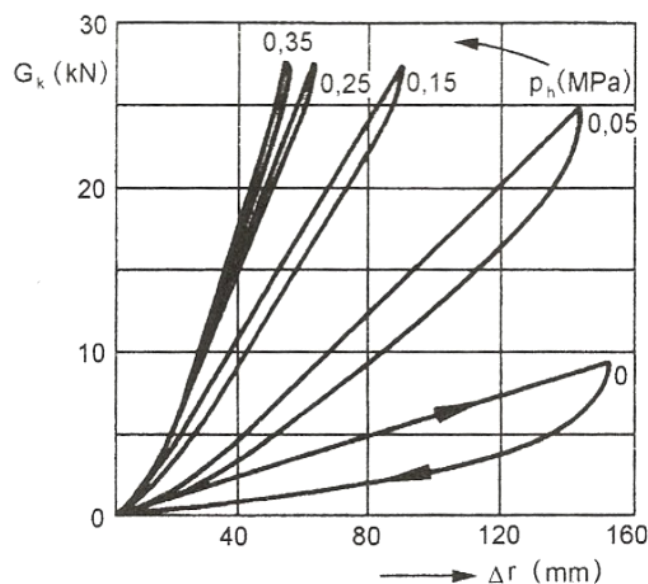
3 Rozbor valení kola a sil působících na kolo

Vozidlová kola (dále jen kola) zajišťují styk vozidla s vozovkou nebo terénem, po kterém se pohybuje. Kola musí být schopná přenášet všechny síly z vozidla na vozovku či terén i naopak. Kolo přenáší síly tečné (hnací a brzděné síly), svislé (tíhu vozidla) a boční síly, které jsou potřebné k vedení vozidla. Dále musí valením umožnit pohyb vozidla po vozovce či terénu. V neposlední řadě má vliv na odpružení vozidla. [30]

3.1 Deformační charakteristiky pneumatiky

3.1.1 Radiální deformační charakteristika

Radiální deformační charakteristika vyjadřuje závislost mezi radiálním zatížením pneumatiky a radiální deformací pneumatiky. Tato charakteristika vznikne, když je pneumatika postupně zatěžována a následně odlehčována. Výsledná radiální deformační charakteristika má tvar hysterezní smyčky, plocha ohraničená smyčkou odpovídá ztrátám v důsledku přeměny energie mechanické na energii tepelnou. Tvar radiální deformační charakteristiky je odlišný pro pneumatiku v klidu a pro valící se pneumatiku. [1]



Obr. 13: Úplná radiální deformační charakteristika pneumatiky pro různé tlaky huštění [30]

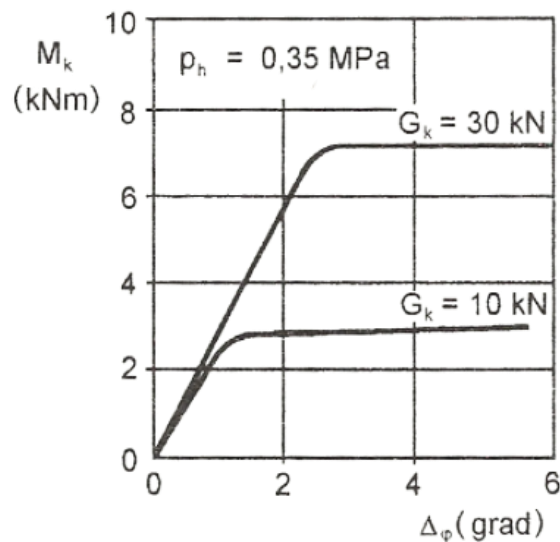
Důležitou vlastností pneumatiky související s radiální deformační charakteristikou pneumatiky je radiální tuhost pneumatiky. Má částečný vliv na odpružení vozidla. Závisí zejména na konstrukci pneumatiky a tlaku huštění. Velikost radiální tuhosti není konstantní, jelikož závislost mezi radiálním zatížením pneumatiky a její radiální deformací není lineární. Radiální tuhost pneumatiky je vlastně směrnice tečny ke křivce zatížení v radiální deformační charakteristice pneumatiky. Je vyjádřena vztahem (1): [30]

$$c_p = \frac{dG_k}{d(\Delta r)} \quad (1)$$

c_p [kN·mm⁻¹] radiální tuhost pneumatiky
 dG_k [kN] přírůstek radiálního zatížení pneumatiky
 $d(\Delta r)$ [mm] přírůstek radiální deformace pneumatiky

3.1.2 Torzní a obvodová deformační charakteristika

Aby bylo možné zjistit torzní deformační charakteristiku pneumatiky, je třeba k nepohyblivé podložce přitlačit nepohybující se kolo. Ráfek je zatěžován kroutícím momentem M_k [kNm]. Při zatěžování dojde k pootočení ráfku vůči nepohyblivé podložce o hodnotu Δ_φ [grad]. Jedná se tedy o závislost mezi zatěžujícím momentem M_k a pootočením ráfku Δ_φ . Pro menší hodnoty zatížení kola momentem M_k je torzní deformační charakteristika přibližně lineární. [1], [30]



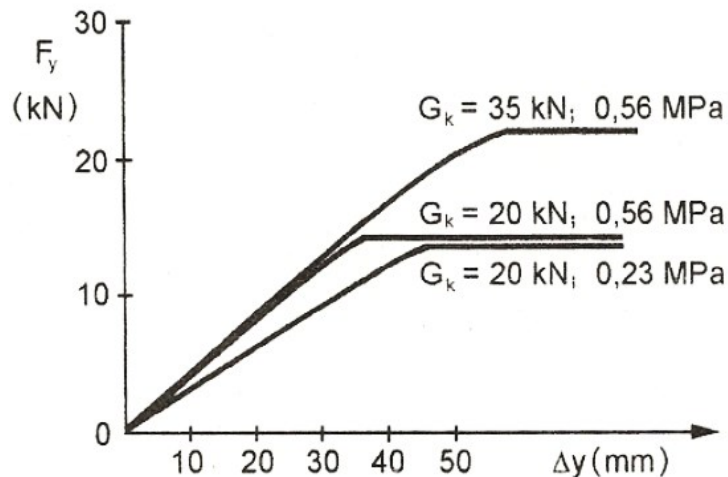
Obr. 14: Torzní deformační charakteristika pneumatiky [30]

Jednotka s názvem grad (někdy také gradián) je jednotka rovinného úhlu. Hodnota 1 gradu odpovídá přibližně 0,9° nebo $\pi/200$ radiánu. [31]

Obvodová deformační charakteristika se zjišťuje podobně jako torzní, s tím rozdílem, že na nepohybující se kolo působí pohyblivá podložka. Podložka na kolo působí silou radiální (kolmo na podložku) a tečnou. Vlastnost pneumatiky reprezentující obě deformační charakteristiky se nazývá torzní (obvodová) tuhost pneumatiky c_φ [kNm/grad]. Má vliv na životnost ložisek a ozubených kol, jelikož zmírňuje rázy v převodovém ústrojí automobilu. Způsobuje však prokluzování kol, čímž se zvyšuje opotřebení pneumatiky. [1], [30]

3.1.3 Boční deformační charakteristika

Při zatížení boční silou F_y [kN] způsobuje boční pružnost pneumatiky boční posunutí středu kola Δy [mm]. Na vybočení středu kola má vliv deformace běhounu a kostry pneumatiky a pohyb běhounu po vozovce. Boční deformační charakteristika pneumatiky je závislost mezi boční silou, která působí na pneumatiku, a maximální boční deformací, která je způsobena boční silou. Boční deformační charakteristika je reprezentována vlastností pneumatiky, jež se nazývá boční tuhost pneumatiky. Tato vlastnost je u pneumatiky nežádoucí, jelikož snižuje směrovou stabilitu a ovladatelnost vozidla. [1], [30]



Obr. 15: Boční deformační charakteristika pneumatiky [30]

3.2 Kinematika valení kola v rovině

Při valení kola je důležitým parametrem jeho poloměr. U kol se rozlišuje několik poloměrů: jmenovitý r_j , volný r_0 , statický r_s , dynamický r_d a poloměr valení r_v . Statický poloměr je poloměr nepohybujícího se kola, poloměr dynamicky je poloměr kola, které se pohybuje. Dynamický poloměr kola je důležitý pro řešení a výpočet sil a momentů, které působí na kolo. Pro stejné zatížení a tlak huštění pneumatiky vždy platí podmínka (2): [30]

$$r_s < r_d \quad (2)$$

Poloměr valení r_v je vzdálenost mezi středem kola a pólem relativního pohybu kola vůči vozovce. Tato hodnota není konstantní a závisí na typu valení kola (velikost poloměru valení r_v je odlišná pro ideální valení, prokluz kola a smýkání kola). Pokud se teoretické kolo o poloměru r_v odvaluje ideálním způsobem, má stejnou úhlovou a dopřednou rychlost jako kolo skutečné. Matematicky lze zapsat pomocí rovnice (3): [30]

$$v = r_v \cdot \omega_k$$

(3)

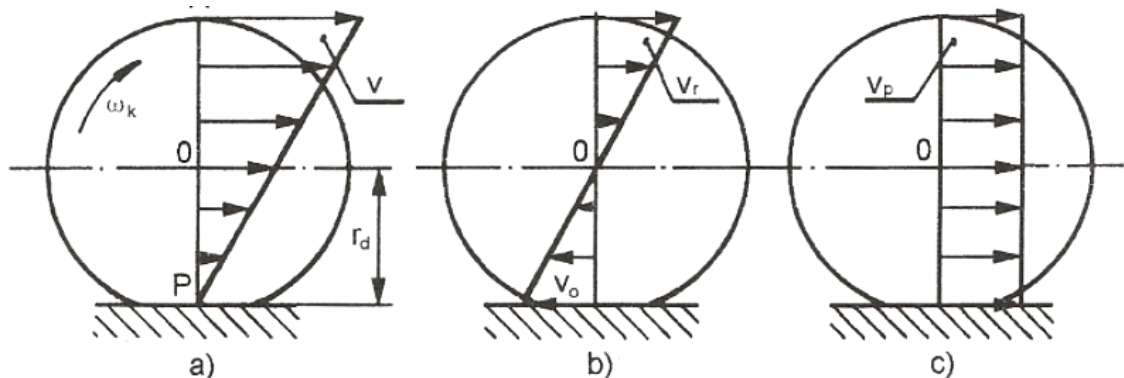
v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] dopředná rychlost kola

r_v [m] poloměr valení

ω_k [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$] úhlová rychlost kola

3.2.1 Ideální valení kola

Valení kola je pohyb složený. Tento pohyb lze rozložit na 2 pohyby: rotační (Obr. 16b) a posuvný (Obr. 16c). Pokud v místě styku kola s vozovkou nedochází ke vzájemnému pohybu, jedná se o ideální valení. Poloměr valení r_v je v tomto případě shodný s poloměrem dynamickým r_d . Bod P se nazývá pól relativního pohybu kola vůči vozovce. Při ideálním valení kola leží tento bod v místě průsečíku svislé osy kola a vozovky. Obvodová rychlost v_o rotačního pohybu je stejně velká jako rychlost posuvného pohybu v_p . [30]



Obr. 16: Ideální valení kola [30]

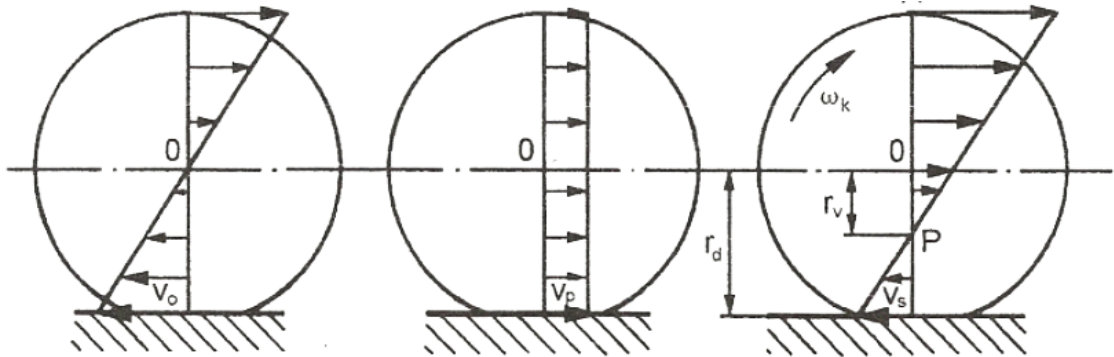
Rychlost, se kterou by se pohybovalo vozidlo při ideálním valení kol, je dána rovnicí (3). Místo poloměru valení r_v bude do rovnice dosazen poloměr dynamický r_d . Obě tyto jsou při ideálním valení stejně velké. [30]

3.2.2 Prokluzování kola

Prokluzování je další případ valení kola, ke kterému může dojít. Ve styčné ploše kola s vozovkou dochází ke vzájemnému pohybu mezi kolem a vozovkou. Vzniknuvší skluzová rychlost v_s působí proti směru pohybu vozidla. Posuvná rychlost je v tomto případě menší než rychlost obvodová. Poloměr valení r_v je menší než poloměr dynamický r_d . S tím souvisí i změna polohy pólu P. Při prokluzování kola se pól P nachází nad úrovní vozovky. Typický příklad, kdy dochází k prokluzování kola, je rozjezd vozidla. Velikost prokluzu kol vyjadřuje skluz kola $s_{h\%}$ [%]. Vyjadřuje procentuální podíl skutečné a teoreticky ujeté dráhy. Výhodnější je však vyjádření skluzu podílem poloměrů r_v a r_d , jak ukazuje rovnice (4). [30]

$$s_h\% = 100 \cdot \left(1 - \frac{r_v}{r_d}\right) \quad (4)$$

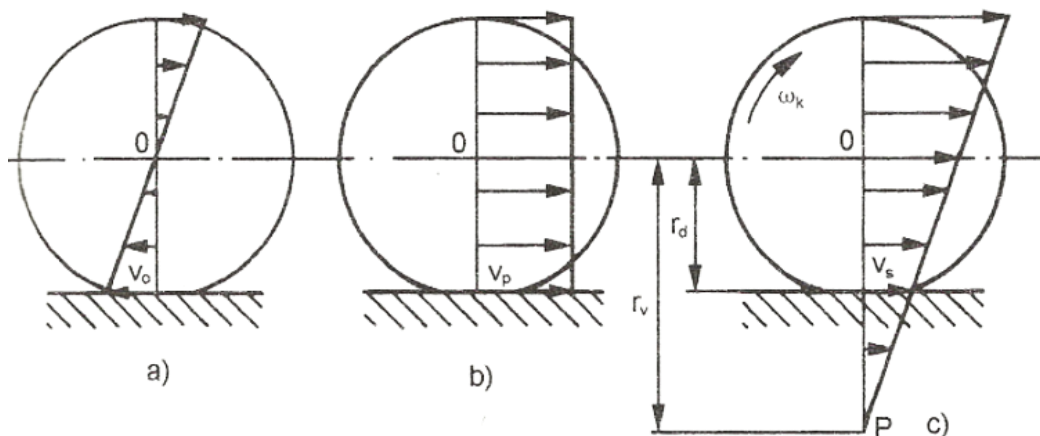
Pokud se skluz kola neudává v procentech, jedná se o tzv. relativní skluz s_h . Skluz vzniká, protože se kolo neodvaluje ideálním způsobem, ale se skluzovou rychlostí v_s v místě styku kola s vozovkou. Je nutné mít na paměti, že skluz není to samé jako smyk. [30]



Obr. 17: Prokluzování kola [30]

3.2.3 Smýkání kola

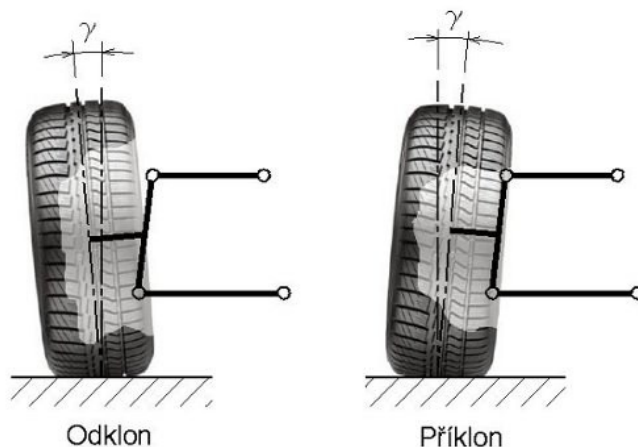
Ke smýkání kola dochází, je-li posuvná rychlost větší než rychlost obvodová. Jako typický příklad, kdy dochází ke smýkání kol, je možné uvést brzdění vozidla. V místě styku kola s vozovkou dochází ke vzájemnému pohybu se skluzovou rychlostí v_s . Narozdíl od případu prokluzování kola působí rychlost v_s ve směru pohybu vozidla. Poloměr valení je v tomto případě větší než poloměr dynamický. Tím pádem dojde k posunu pólu P pod úroveň vozovky. Při smýkání kola se skluz vyjadřuje pomocí měrného skluzu s_b . Hodnota skluzu při smýkání je podle rovnice (4) záporná. Pokud dojde ke smýkání kola, které se neotáčí, mluví se o mezním případě, kdy je hodnota měrného skluzu s_b rovna 1. [30]



Obr. 18: Smýkání kola [30]

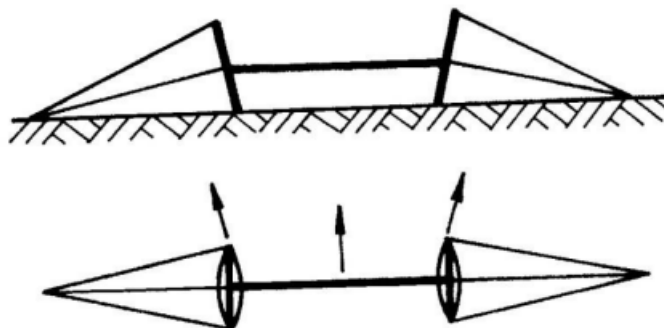
3.3 Valení kola s odklonem

Úhel odklonu kola γ je úhel, o který je kolo odkloněno od své vertikální osy. Pokud se horní část kola odklání směrem od vozidla, jedná se o pozitivní odklon. V opačném případě, kdy se horní část kola naklání směrem k vozidlu, se jedná o negativní odklon neboli příklon. U nezávislého zavěšení kol dochází při pružení ke změně úhlu odklonu γ , což má za následek vznik momentu, který má snahu naklápět karoserii. Mimoto vznikají ve stopě pneumatiky boční síly, které způsobují zvýšené opotřebení a namáhání pneumatik. Proto je při návrhu zavěšení kol požadavek na co nejmenší změny odklonu. [3]



Obr. 19: Odklon a příklon kola [32]

Kladně odkloněné kolo tvoří v místě styku s vozovkou plochu ve tvaru kužele, čímž mají kola tendenci odvalovat se po kružnici, jejíž střed je průsečíkem osy kola s vozovkou. Kola se tak odvalují směrem od sebe a snižují tak tendenci ke kmitání kol. Takto nastavená geometrie má však za následek nadměrné a nerovnoměrné opotřebení pneumatik. Příklon kola zlepšuje vedení vozidla při jízdě zatáčkou, způsobuje však větší opotřebení na vnitřní straně pneumatik při jízdě v přímém směru. Na rozdíl od kladného odklonu kol se kola se záporným úhlem odklonu odvalují směrem k sobě. [3]

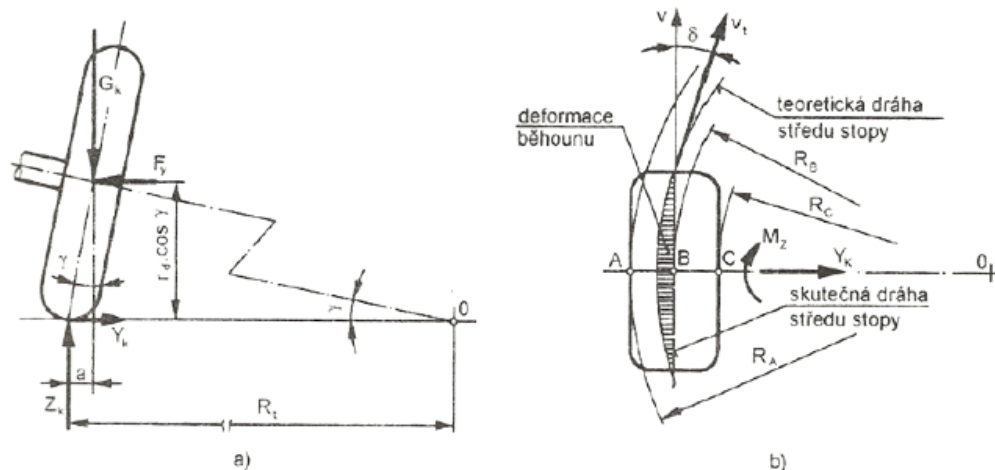


Obr. 20: Odvalování kladně odkloněných kol [3]

Úhel odklonu kola je nastaven podle hodnot, které udává výrobce. Ty jsou udávány tak, aby při různých stylech jízdy a různém zatížení byla styčná plocha pneumatiky s vozovkou vždy co největší. Při zatížení vozidla pro odvalování kol po mírně klenuté vozovce je vhodný nepatrný kladný odklon kol v rozmezí 5' až 10'. Z důvodu lepšího bočního vedení při jízdě

zátáčkou je u osobních vozidel vhodný nulový odklon, v případě zatíženého vozidla mírný příklon v rozmezí -1° až -2° . Pro nákladní vozidla může být příklon i větší. U sportovních vozidel (např. formule), kde není brán velký ohled na opotřebení pneumatik, ale spíše na jízdní vlastnosti a stabilitu při průjezdu zátáčkou, jsou kola záporně odkloněna i v nezatíženém stavu. [3], [33], [34]

Kolo odkloněné o úhel γ zatačí okolo středu O , což je průsečík osy rotace kola a vozovky na teoretickém poloměru zatačení R_t (21a). Tomuto pohybu odpovídá teoretická rychlost v_t v bodě náběhu pneumatiky do styku s vozovkou. Pokud se kolo pohybuje v jiném směru, než je směr v_t , pohybuje se ve skutečnosti s úhlem směrové úchylny δ . Tím dochází k boční deformaci běhounu, která je dána rozdílem teoretické a skutečné dráhy středu stopy. V čepu kola působí boční síla F_y , kterou je potřeba vést kolo, aby byl zaručen pohyb po požadované dráze. V případě valení kola po teoretické dráze by se bod A pohyboval větší rychlostí než bod C . Rozdíl těchto rychlostí se projeví natáčecím momentem M_z , který má snahu natáčet kolo tak, aby se teoretický a skutečný poloměr středu stopy ztotožnily. V případě na Obr. 19b natáčí kolo ve směru odklonu. [30]



Obr. 21: Valení kola s úhlem odklonu [30]

3.4 Síly působící na kolo v klidu a při valení v rovině

Na kolo působí různé síly podle toho, zda je kolo v klidu nebo se odvaluje. Při odvalování je nutné rozeznávat, zda se odvaluje tuhé nebo pružné kolo po tuhém nebo pružném terénu, nebo zda se jedná o kolo hnací, nepoháněné nebo brzdící.

3.4.1 Valení pružného kola po tuhé vozovce

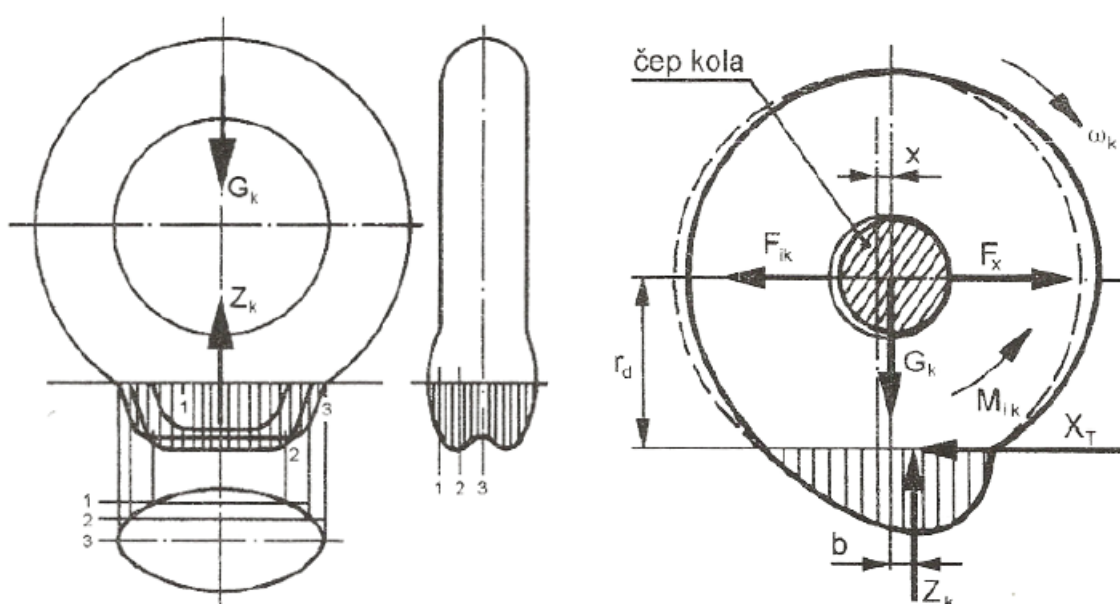
Styková plocha pneumatiky s vozovkou se nazývá stopa. Na nepohybující se kolo působí pouze radiální zatěžující síla G_k a radiální reakce vozovky Z_k . Obě tyto síly mají stejnou velikost a působí ve svislé ose kola. Měrný tlak ve stopě je rozložen symetricky, ale nerovnoměrně. V případě, že se kolo pohybuje, je radiální reakce vozovky Z_k předsunuta o hodnotu b před svislou osu kola. Síly G_k a Z_k vytvoří silovou dvojici neboli moment M_f , který působí proti smyslu otáčení kola. Výpočtový vztah pro moment M_f udává rovnice (5): [30]

$$M_f = Z_k \cdot b$$

(5)

M_f [Nm]	moment odporu valení způsobený deformací pneumatiky
Z_k [N]	radiální reakce vozovky
b [m]	rameno valivého odporu

Jedná-li se o kolo nepoháněné (vlečené), vzniká v místě styku kola s vozovkou síla X_T , která působí proti smyslu pohybu. Při zrychlování vozidla působí na nepoháněné kolo proti jeho pohybu setrvačná síla F_{ik} a proti smyslu rotace kola působí setrvačný moment M_{ik} . Čep kola působí na kolo silou F_x , která je nutná k překonání M_f , M_{ik} a F_{ik} . [30]



Obr. 22: Situace stojícího (vlevo) a nepoháněného kola (vpravo) [30]

V případě hnacího kola je na něj přiveden hnací moment M_k . Síla F_x má opačný smysl než v případě vlečeného kola, stejně jako síla X_T . Síla F_T je hnací síla vzniklá od hnacího momentu M_k na rameni r_d . Jedná se o obvodovou sílu. Je určena vztahem (6): [30]

$$F_T = \frac{M_k}{r_d}$$

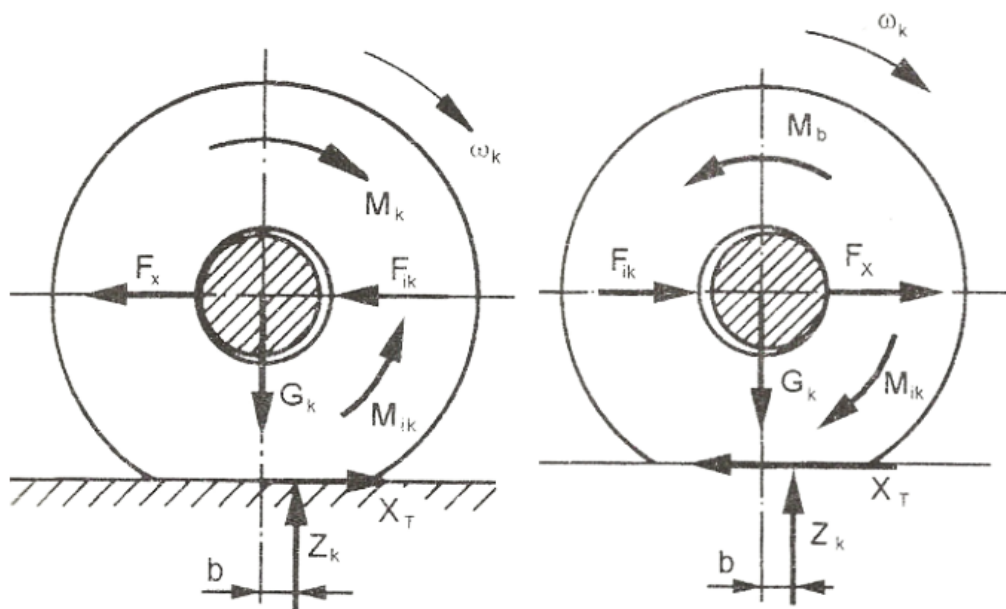
(6)

F_T [N]	hnací síla
M_k [Nm]	hnací moment
r_d [m]	dynamický poloměr kola

U brzdícího kola je situace obdobná jako u kola hnacího. Na brzdící kolo působí proti směru pohybu brzdný moment M_B . V důsledku toho se změní smysl sil F_x , F_{ik} , X_T a momentu M_{ik} oproti případu hnacího kola. Moment M_f působí pořád ve stejném smyslu. Síla X_T při brzdění zpomaluje dopředný pohyb kola. Síla F_B je brzdná síla a opět se jedná o obvodovou sílu. Síla F_B je dána vztahem (7): [30]

$$F_B = \frac{M_B}{r_d} \quad (7)$$

F_B [N] brzdná síla
 M_B [Nm] brzdný moment



Obr. 23: Situace hnacího (vlevo) a brzdícího kola (vpravo) [30]

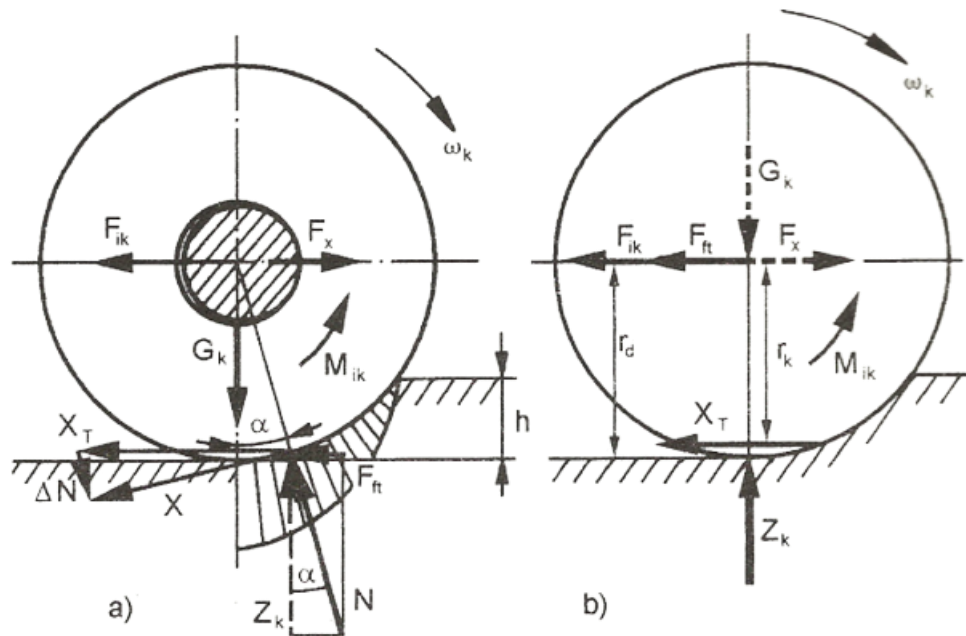
3.4.2 Valení tuhého kola po pružné vozovce

Při pohybu vlečeného tuhého kola po pružné vozovce se kolo zabořuje do vozovky do hloubky h , čímž vznikne vyjetá kolej o stejné hloubce. Pod pneumatikou dochází ke zhutňování deformované vozovky. Při pohybu nepoháněného kola konstantní rychlostí prochází výsledná reakce vozovky N středem kola, přičemž je od svislé osy kola odkloněna o úhel α . Úhel α je dán spojnicí středu kola a průsečíkem nositelky síly Z_k s rovinou vozovky. Reakci N je možné po její nositelce přesunout do středu kola a tam ji rozložit na svislou složku Z_k a vodorovnou složku F_{ft} . Velikost síly F_{ft} je dána vztahem (8): [30]

$$F_{ft} = Z_k \cdot \tan \alpha \quad (8)$$

F_{ft} [N] odpor valení v důsledku deformace vozovky

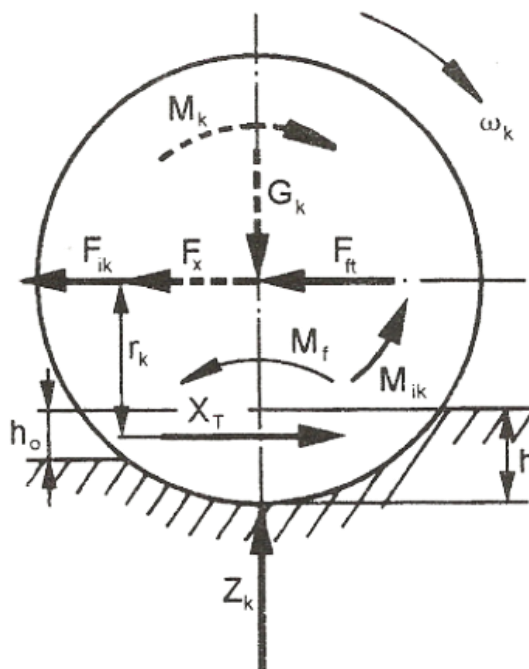
Pokud se vozidlo pohybuje s určitým zrychlením, ve středu kola vznikne síla F_{ik} a síla F_x , která je potřeba k překonání všech odporových sil působících proti pohybu kola. Proti rotaci kola působí setrvačný moment M_{ik} . V místě styku kola s vozovkou vznikne tečná síla X , kterou je možné rozložit na složku X_T působící proti směru pohybu kola, a na složku ΔN , která kolo přitěžuje. Síla X_T působí na rameni $r_k = r_d \cdot \cos \alpha$. O hodnotu složky ΔN vzroste reakce vozovky N . [30]



Obr. 24: Situace valení tuhého kola po pružné vozovce [30]

3.4.3 Valení pružného kola po pružné vozovce

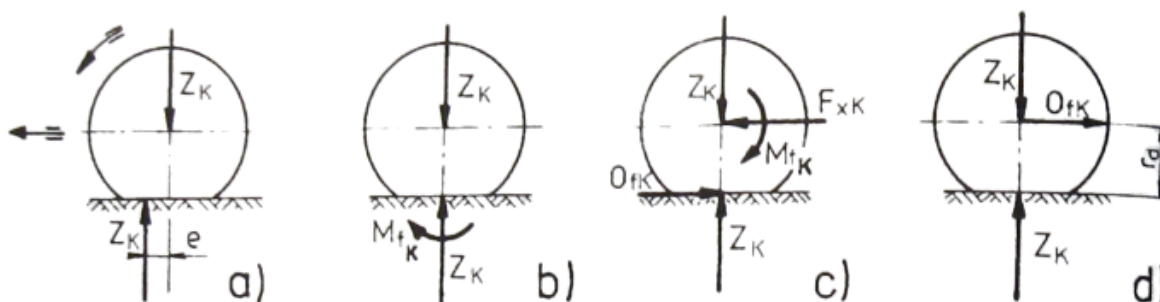
Při pohybu pružného kola po pružné vozovce dochází k deformaci pneumatiky i vozovky, po které se kolo pohybuje. Dochází k zabořování kola do hloubky h . Hloubka vyjeté koleje h_0 je menší než hloubka zaboření h . V případě kola hnacího na kolo působí hnací moment M_k , moment odporu valení v důsledku deformace pneumatiky M_f , zatížení kola G_k , radiální reakce vozovky Z_k , odpor v čepu kola F_x , odpor valení v důsledku deformace vozovky F_{ft} a reakce vozovky na kolo X_T působící na poloměru r_k . Při urychlování kola na něj působí ještě setrvačná síla F_{ik} a setrvačný moment M_{ik} . Stanovení r_k je obtížné, jelikož se v důsledku deformace pneumatiky i vozovky jeho hodnota není konstantní. Proto se bude dále uvažovat působení síly X_T na poloměru r_d . [30]



Obr. 25: Situace valení pružného kola po pružné vozovce [30]

3.4.4 Valivý odpor

Valivý odpor je způsoben deformací vozovky a pneumatiky při valení kola. V případě valení pružného kola po tuhé vozovce dochází pouze k deformaci pneumatiky. V přední části stopy ve směru valení se pneumatika po svém obvodu deformuje, v zadní části stopy se navrácí do svého původního tvaru. Síly potřebné pro deformaci pneumatiky jsou větší než síly potřebné pro navrácení pneumatiky do původního stavu, což je způsobeno přeměnou mechanické energie v tepelnou. Vyšší měrné tlaky jsou v přední části stopy, proto je radiální reakce vozovky Z_k předsunuta před svislou osu kola ve směru valení o hodnotu e (v kapitole 3.4.1 je tato hodnota označena jako b , v obou případech se jedná o stejnou veličinu, tedy rameno valivého odporu). Síla Z_k spolu s radiálním zatížením kola G_k , které má stejnou velikost jako Z_k , tvoří silovou dvojici, která vytváří moment odporu valení M_{fk} (v kapitole 3.4.1 je tento moment značen M_f) způsobený deformací pneumatiky. Moment M_{fk} vyvolává vodorovnou sílu O_{fk} , která působí proti pohybu kola. Ve středu kola proti síle O_{fk} musí působit stejně velká síla F_{xk} , aby byla vytvořena silová dvojice. [35]



Obr. 26: Moment M_{fk} a síla O_{fk} na nepoháněném kole [35]

Podle Obr. 26c lze sestavit rovnici (9), ze které lze poté vyjádřit vztah pro sílu O_{fk} (10): [35]

$$M_{fk} = Z_k \cdot e = O_{fk} \cdot r_d \quad (9)$$

$$O_{fk} = Z_k \cdot \frac{e}{r_d} = Z_k \cdot f_k, \quad (10)$$

O_{fk} [N] odpor valení způsobený deformací kola

f_k [-] součinitel valivého odporu kola

Při valení tuhého kola po pružné vozovce nedochází k deformaci pneumatiky, ale deformuje se pouze vozovka, po které se kolo pohybuje. Vlivem deformace terénu vzniká odpor valení v důsledku deformace vozovky F_{ft} , jehož velikost je dána vztahem (8).

V případě valení pružného kola po pružné vozovce dochází k deformaci pneumatiky i vozovky. Valivý odpor způsobený deformací pneumatiky i terénu (11) je dán součtem valivého odporu v důsledku deformace kola (10) a valivého odporu v důsledku deformace vozovky (8): [30]

$$F_f = Z_k \cdot \left(\frac{e}{r_d} + \tan \alpha \right) = Z_k \cdot f \quad (11)$$

F_f [N] valivý odpor způsobený deformací pneumatiky i terénu

f [-] součinitel odporu valení

Valivý odpor celého vozidla je dán součtem valivých odporů na jednotlivých kolech vozidla. Při řešení většiny úloh je valivý odpor reprezentován jako jediná síla působící na vozidle v čepu kol jedné z náprav vozidla. [30]

Na velikost součinitele f má vliv povrch vozovky, deformace pneumatiky, konstrukce pneumatiky a rychlost pohybu kola. Při jízdě po pevném terénu se na vzniku valivého odporu podílí zejména deformace pneumatiky. Při jízdě po měkkém terénu je valivý odpor způsoben zejména deformací terénu a částečně také deformací pneumatiky. [30, 35]

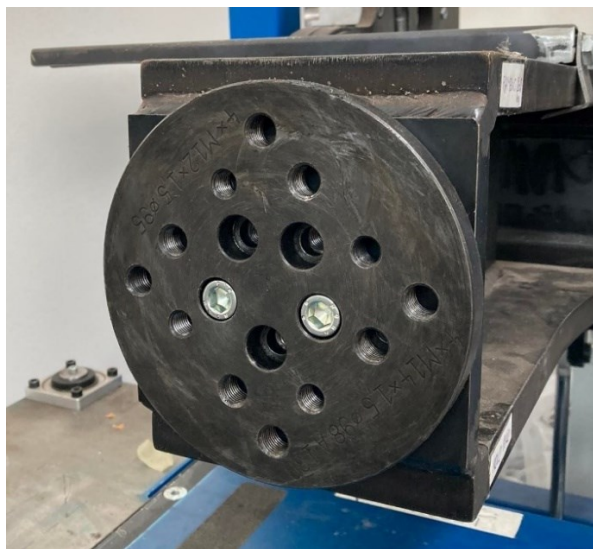
4 Experimentální měření

Předchozí kapitoly byly zaměřeny na teoretickou část týkající se konstrukce pneumatik a rozboru valení kola automobilu a na něj působících sil. Praktická část této práce zkoumá, jak se změní radiální tuhost pneumatiky při změně odklonu kola. Nejprve budou představena zařízení a pomůcky potřebné pro měření, následně se stanoví metodika měření, a nakonec průběh samotného měření.

4.1 Zařízení a vybavení pro realizaci experimentálního měření

Statický adhezor

Statický adhezor je uzpůsoben pro použití pneumatik rozměru R13–R17, může vyvinout maximální přítláčnou sílu 1200 kg a umožňuje odklon a natočení pneumatiky. Z konstrukčního hlediska se statický adhezor složen z několika částí: rám, rameno, stůl a hydraulický okruh. **Rám** je navržen tak, aby při zatěžování pneumatiky nedošlo k jeho deformaci, která by měla vliv na přesnost měření. Pomocí svislého vedení je s rámem spojeno **rameno**. Svislé vedení umožňuje pohyb ramene ve svislé ose v rozmezí 0–240 mm. Rameno je možné polohovat ve vodorovném směru v rozmezí $\pm 30^\circ$ a ve svislém směru v rozmezí $\pm 15^\circ$. Na konci ramene se nachází redukční podložka, pomocí které je k rameni uchyceno kolo. Redukčních podložek je více variant pro možnost upnutí ráfků s rozdílnou roztečí a počtem šroubů. **Stůl** se skládá z konzole a desky. Konzole umožňuje pohyb stolu. S deskou je v kontaktu pneumatika. **Hydraulický okruh** se skládá z dvojitinného hydraulického válce, ruční hydraulické pumpy a ruční ovládací páky. Ovládací páka má 3 ovládací polohy. Pokud je páka v horní poloze, jejím pohybem směrem dolů dochází k postupnému zatěžování kola až do hodnoty cca 270 kg. Další polohou páky je mezipoloha, při které nedochází k zatěžování. Pokud je ovládací páka přesunuta do dolní polohy, dochází k dalšímu zatěžování kola prostřednictvím hydraulické pumpy. Tento systém je schopen vyvodit maximální přítláčnou sílu zhruba 11800 N (odpovídá asi 1200 kg). Statický adhezor je rovněž vybaven různými snímači, ty však nejsou pro potřeby této práce důležité. [36]



Obr. 27: Redukční podložka



Obr. 28: Statický adhezor

Váhy

Váhy použité pro měření se skládají ze 4 nájezdových platform a měřící stanice. Při měření je použita pouze 1 platforma. Platforma se umístí na desku stolu pod kolo připevněné k ramenu statického adhezoru. Při zatěžování kola se podle hodnoty, kterou měřící stanice vah ukazuje, stanoví zatížení působící na kolo. Je nutné počítat s určitou přesností vah (± 2 kg). Tato přesnost platí pouze v případě, že jsou k měřící stanici pomocí kabelů připojeny všechny 4 platformy. Pokud by byla zapojena pouze platforma použitá pro měření a zbylé by připojeny nebyly, hodnoty zatížení udávané měřící stanicí by byly zaokrouhleny na desítky kilogramů. Měřící stanice vah udává zatížení [kg], pro vyhodnocení je ale potřeba mít zatěžující sílu [N]. Přepočet se provede podle vztahu (12):

$$G_k = m_k \cdot g \quad (12)$$

G_k [N]	radiální zatěžující síla
m_k [kg]	zatížení pneumatiky
g [9,81 m·s ⁻²]	tíhové zrychlení



Obr. 29: Měřicí stanice nájezdových vah

Snímač tlaku vzduchu v pneumatice (manometr)

Manometr slouží ke stanovení tlaku vzduchu v pneumatice. Manometr je součástí vzduchové pistole, kterou se bude pneumatika hustit na požadovaný tlak. Na ventilek pneumatiky se nasadí hadička a ručně ovládanou páčkou se pneumatika nahustí na požadovaný tlak. Stupnice manometru je udávána v barech a MPa. Měřící rozsah manometru je 0–12 barů.



Obr. 30: Vzduchová pistole s manometrem

Zkoušené kolo

Pro měření je vybrána pneumatika s označením 165/70 R 14 81T od výrobce Semperit. Podle značení na bočnici pneumatiky se jedná o radiální bezdušovou pneumatiku. Alpský symbol značí pneumatiku vhodnou pro celoroční provoz. Dezén pneumatiky je směrový, šipka na bočnici ukazuje správný směr rotace. Vzorek pneumatiky je sjetý. Pro používání při provozu

vozidla je tato pneumatika nevyhovující, potřebám experimentálního měření však vyhovuje. Pneumatika tohoto rozměru je typicky použita například u vozu Škoda Fabia.



Obr. 31: Zkoušené kolo a platforma nájezdových vah

4.2 Stanovení metodiky měření

- 1) Nejprve je třeba zkontrolovat, zda potřebné vybavení a měřicí pomůcky (statický adhezor, výškoměr, váhy, manometr) nejsou poškozené, v důsledku čehož by mohla být ovlivněna přesnost a správnost měření.
- 2) Zkontroluje se vozidlové kolo zvolené pro měření, tj. ráfek i pneumatika. Ráfek nesmí být deformován, aby na něj pneumatika správně dosedala a nedocházelo tak k úniku vzduchu. Pneumatika rovněž nesmí být nijak závažně poškozena, nesmí z ní unikat vzduch.
- 3) Po kontrole je potřeba pneumatiku nahustit. Jako médium pro huštění je použit vzduch. Pneumatika se nahustí na hodnotu 2 bary (0,2 MPa). Tato hodnota je zvolena pro potřeby měření, není převzata z manuálu od výrobce.
- 4) Na desku stolu statického adhezoru se umístí jedna platforma nájezdových vah. Pro přesnost měření je však nutné, aby byly k měřicí stanici pomocí kabelů připojeny všechny 4 platformy.
- 5) Jako první se provádí měření radiální tuhosti neodkloněné pneumatiky. Rameno statického adhezoru se vyrovná tak, aby svislá osa kola byla kolmá na desku stolu (úhel odklonu kola je 0°). Hodnota úhlu odklonu se zkontroluje pomocí stupnice na statickém adhezoru. Druhý způsob změření úhlu odklonu se provede pomocí aplikace v mobilním telefonu.
- 6) Za použití ruční pumpy hydraulického okruhu je rameno pomocí svislého vedení vyzvednuto, aby bylo možné k němu připevnit kolo.

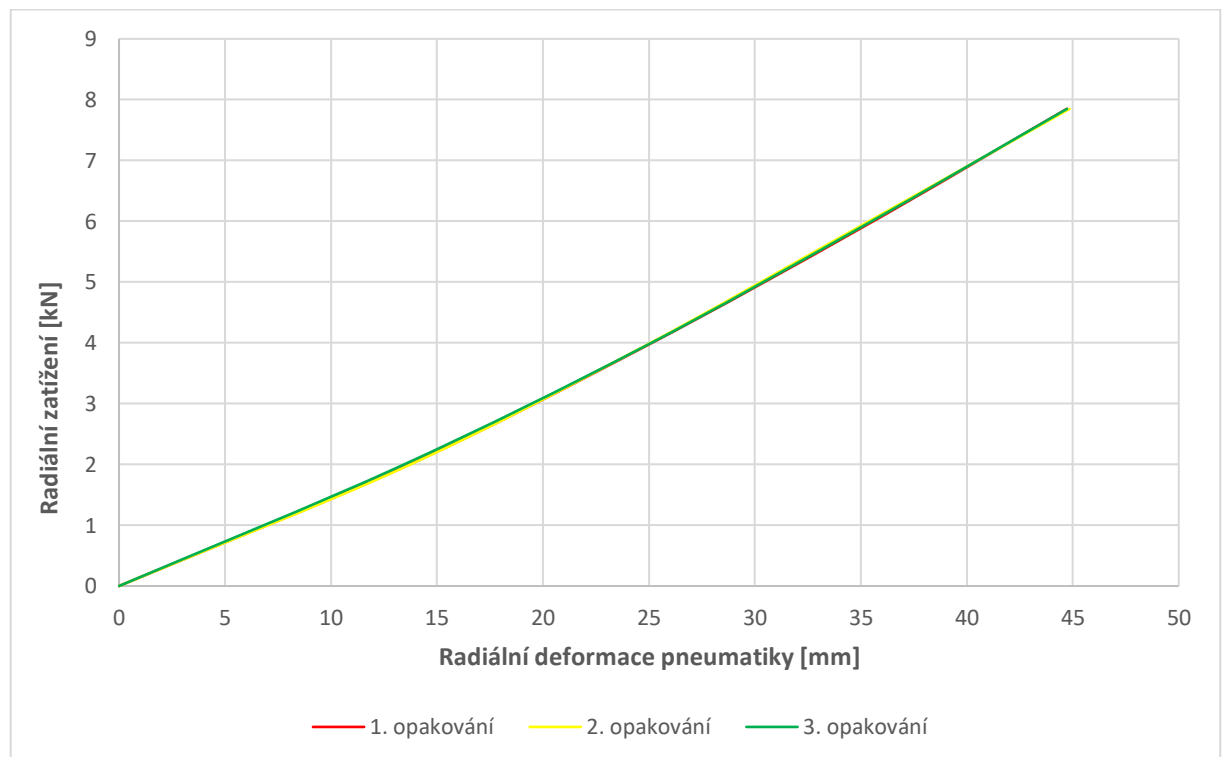
- 7) Kolo se upne k rameni statického adhezoru pomocí redukční podložky na konci ramene. Kolo je k rameni připevněno 2 šrouby. Připevněné kolo nesmí být v kontaktu s platformou nájezdových vah.
- 8) Na platformu vah se umístí výškoměr. Poté je nutné vynulovat hodnotu na měřicí stanici vah (výškoměr samotný váží asi 4 kg). Hrot unašeče se nastaví tak, aby byl v kontaktu s ramenem. Rameno se pomocí ruční páky hydraulického okruhu pomalu spouští. Společně s ramenem se směrem dolů pohybuje i hrot unašeče výškoměru. Kolo se spouští do chvíle, kdy dosedne na platformu vah. Při dosednutí je nutné, aby měřicí stanice vzhledem k přesnosti vah ± 2 kg ukazovala zatížení 2 kg. V tomto momentě se pneumatika považuje za nezatíženou.
- 9) Tlačítkem ZERO/ABS na výškoměru se nastaví nulová hladina, od které se bude měřit deformace pneumatiky.
- 10) Po vynulování výškoměru se kolo postupně zatěžuje. Za pomocí ruční páky hydraulického okruhu je pneumatika postupně přitlačována k platformě vah. Tím je pneumatika deformována a hodnotu deformace je možné odečíst na displeji výškoměru.
- 11) Celkem se během zatěžování pneumatiky odečtou 4 hodnoty zatížení z vah (200 kg, 400 kg, 600 kg a 800 kg) a k tomu odpovídající 4 hodnoty deformace pneumatiky z výškoměru. Hodnota naměřená výškoměrem je odečtena bezprostředně po dosažení potřebného zatížení, jelikož pneumatika kvůli svým elastickým vlastnostem a zejména relaxaci pryže má snahu vrátit se do původního stavu. Naměřené hodnoty se zaznamenají na papír, aby mohly být později zpracovány.
- 12) Měření je nutné opakovat, aby mělo určitou vypovídající hodnotu. Ze statistického hlediska by bylo nutné měření provést alespoň sedmkrát, pro potřeby této práce jsou postačující 3 provedení měření.
- 13) Po provedení měření s nulovým odklonem kola následuje měření odkloněného kola. Statický adhezor umožňuje nastavení úhlu odklonu kola v rozmezí $\pm 15^\circ$. Pomocí šroubů, které umožňují natočení ramene se nejdříve nastaví úhel odklonu kola 5° . Horní část pneumatiky se odklání směrem od ramene, jedná se tedy o pozitivní odklon. Velikost úhlu odklonu kola se zkontroluje pomocí mobilní aplikace i stupnice na statickém adhezoru.
- 14) Po nastavení úhlu odklonu kola 5° se měření provádí stejně jako v případě neodkloněného kola. Měření se opět provádí celkem třikrát.
- 15) Aby bylo možné dojít k vyhodnocení, provede se měření s odklonem kola ještě s jinou hodnotou úhlu odklonu, v tomto případě 10° . Měření se opět provede celkem třikrát.
- 16) Po provedení všech měření se naměřené hodnoty přepíší do aplikace Excel. Z těchto hodnot se následně vytvoří graf znázorňující radiální deformační charakteristiku pneumatiky pouze pro zatěžování.
- 17) Podle vzorce (1) se pro všechna měření stanoví radiální tuhost pneumatiky. Přírůstek zatížení je ve všech případech stejný (200 kg, respektive 1962 N).

4.3 Realizace experimentálního měření

Před samotným měřením je nejdříve zapotřebí se pečlivě seznámit s funkcí všech zařízení a vybavení potřebného pro experimentální měření. U statického adhezoru je vhodné si jeho obsluhu před experimentálním měřením pečlivě vyzkoušet. Ovládací páky u hydraulického obvodu sloužící k zatěžování a odlehčování kola jsou velmi citlivé, proto je třeba citlivého zacházení. Hlavně z toho důvodu, aby při zatěžování pneumatiky nedošlo k překročení požadovaného zatížení a dodatečné odlehčení a následné zatížení by mělo vliv na přesnost měření, jelikož pneumatika má díky svým elastickým vlastnostem a relaxací pryže snahu vracet se do původního stavu.

4.3.1 Měření radiální tuhosti pneumatiky neodkloněného kola

Po důkladném seznámení se s obsluhou a přípravou veškerého vybavení a zařízení se může přejít k prvnímu měření. Jedná se o měření radiální tuhosti pneumatiky neodkloněného kola. Zkoušená pneumatika je nahuštěna na hodnotu 2 bary. Podle výše stanoveného postupu je hodnota deformace pneumatiky odečtena celkem čtyřikrát (pro hodnoty zatížení 200, 400, 600 a 800 kilogramů, tyto hodnoty zatížení poté převedeny na zatížení v kN). Aby se jednalo o kompletní radiální deformační charakteristiku pneumatiky, bylo by zapotřebí kromě zatěžování pneumatiky provést i její odlehčování. Výsledná charakteristika by měla tvar hysterezní smyčky (viz Obr. 13). Pro potřeby této práce je však postačující pouze zatěžování pneumatiky. Měření se opakuje celkem třikrát. *Graf 1* zobrazuje radiální deformační charakteristiku pneumatiky neodkloněného kola při zatěžování.



Graf 1: Radiální deformační charakteristika pneumatiky pro zatížení kola bez odklonu

Graf 1 zobrazuje 3 křivky, z nichž každá zvlášť zobrazuje jeden cyklus zatěžování. Žádná z naměřených hodnot není výrazně odchylena od ostatních, což je patrné téměř dokonalým překrytím všech křivek. Pro potřeby práce lze měření prohlásit za dostatečně přesné.

Podle vzorce (1) je stanovena radiální tuhost pneumatiky. Přírůstek zatížení se nemění, vždy se jedná o přírůstek 200 kg, respektive 1962 N. V *Tabulce 1* jsou uvedeny přírůstky zatížení a k nim odpovídající hodnoty přírůstku radiálních deformací pneumatiky. *Tabulka 2* zobrazuje hodnoty radiální tuhosti pneumatiky pro neodkloněné kolo. Jelikož je měření prováděno třikrát, obsahují tabulky 3 sloupce hodnot radiální deformace, respektive radiální tuhosti pneumatiky.

Tabulka 1: Hodnoty přírůstků zatížení a radiální deformace

ΔGk [kN]	$\Delta r1$ [mm]	$\Delta r2$ [mm]	$\Delta r3$ [mm]
1,962	13,47	13,51	13,21
1,962	11,26	11,16	11,49
1,962	10,28	10,13	10,23
1,962	9,71	10,05	9,80

Tabulka 2: Radiální tuhost pneumatiky neodkloněného kola

$cp1$ [kN/mm]	$cp2$ [kN/mm]	$cp3$ [kN/mm]
0,146	0,145	0,149
0,174	0,176	0,171
0,191	0,194	0,192
0,202	0,195	0,200

Při stejném přírůstku zatížení dochází k postupnému snižování přírůstku deformace pneumatiky, jak je patrné z *Tabulky 1*. Podle vzorce (1) je při stejném přírůstku zatížení a snižujícím se přírůstku radiální deformace jasné, že se radiální tuhost pneumatiky musí zvyšovat, což dokazují hodnoty v *Tabulce 2*.

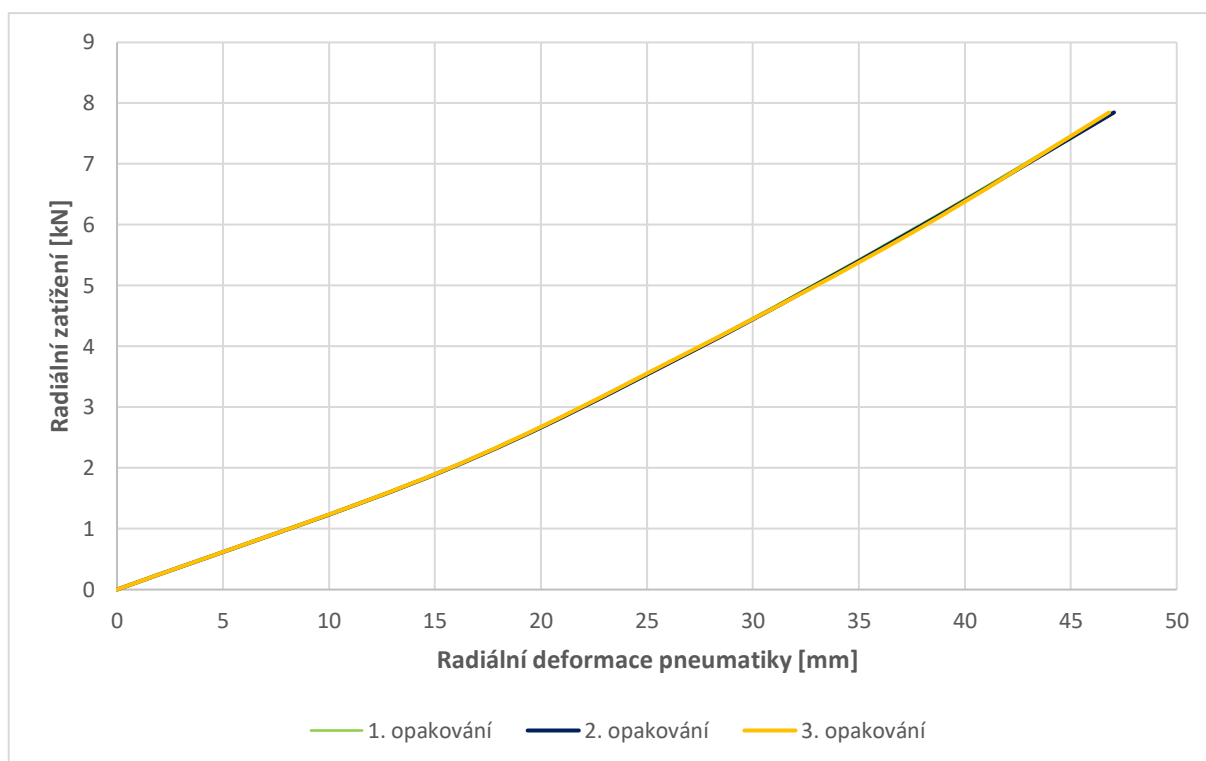
4.3.2 Měření radiální tuhosti pneumatiky s odklonem kola 5°

Měření radiální tuhosti pneumatiky s odklonem kola probíhá obdobně jako měření radiální tuhosti pneumatiky kola neodkloněného. V tomto případě je však před zahájením měření nutné nastavit odklon kola na hodnotu 5°. Úhel odklonu kola je umožněn naklopením ramene statického adhezoru prostřednictvím 4 šroubů (2 nahoře a 2 dole). Šrouby se svým dříkem opírají o kontaktní plochy na rameni. Horní část kola je odkloněna směrem ven (od ramene), horní šrouby je proto nutné povolit a spodní dvojici šroubů je nutné dotáhnout. Hodnota úhlu odklonu kola se zkontroluje pomocí stupnice na statickém adhezoru, kvůli špatné přístupnosti ke stupnici je použit nástroj Vodováha v mobilním telefonu, který je položen na horní ploše ramene. Po nastavení úhlu odklonu je možné zahájit měření.



Obr. 32: Kolo s nastaveným úhlem odklonu 5°

Měřicí postup je obdobný jako v předchozím případě u neodkloněného kola. Z naměřených hodnot je v Excelu opět vytvořen graf zobrazující radiální deformační charakteristiku pneumatiky pouze pro zatěžování, tentokrát pro kolo s úhlem odklonu 5°.



Graf 2: Radiální deformační charakteristika pneumatiky pro zatížení s odklonem kola 5°

Předpoklad je takový, že při stejném zatížení by měla být naměřená deformace pneumatiky větší než v případě neodkloněného kola. Jedná se o vlastnost, která je ovlivněna konstrukcí pneumatiky. Pneumatika jako celek je z kompozitního materiálu (jednotlivé konstrukční části pneumatiky mají rozdílné vlastnosti a jsou z odlišného materiálu), současně zde hraje vliv také konstrukční provedení bočnice pneumatiky.

Měření je provedeno celkem třikrát. Opět je patrné téměř dokonalé překrytí křivek jednotlivých měření. Lze prohlásit, že měření bylo provedeno pro potřeby práce dostatečně přesně. Je možné si všimnout, že při stejných hodnotách radiálního zatížení dochází u kola s odklonem 5° k větší radiální deformaci pneumatiky než v případě kola neodkloněného. *Tabulka 3* ukazuje hodnoty přírůstků radiálního zatížení a k nim odpovídající hodnoty přírůstků radiální deformace pneumatiky. *Tabulka 4* zobrazuje hodnoty radiální tuhosti pneumatiky pro kolo s úhlem odklonu 5°.

Tabulka 3: Hodnoty přírůstku zatížení a radiální deformace s úhlem odklonu kola 5°

ΔG_k [kN]	Δr_1 [mm]	Δr_2 [mm]	Δr_3 [mm]
1,962	15,39	15,48	15,44
1,962	11,66	11,68	11,63
1,962	10,27	10,29	10,52
1,962	9,57	9,59	9,22

Tabulka 4: Radiální tuhost pneumatiky s úhlem odklonu kola 5°

cp1 [kN/mm]	cp2 [kN/mm]	cp3 [kN/mm]
0,127	0,127	0,127
0,168	0,168	0,169
0,191	0,191	0,187
0,205	0,205	0,213

Při stejném přírůstku zatížení opět dochází k postupnému snižování přírůstku radiální deformace pneumatiky jako v případě neodkloněného kola. Maximální deformace při stejné hodnotě maximálního zatížení je však oproti neodkloněnému kolu větší. Analogicky k případu neodkloněného kola dochází při měření také k postupnému zvyšování radiální tuhosti pneumatiky.

Pokud jsou ovšem porovnávány hodnoty radiální tuhosti pneumatiky mezi kolem neodkloněným a kolem s úhlem odklonu 5°, při postupném zatěžování do 600 kg je radiální tuhost kola s úhlem odklonu 5° nižší než v případě kola neodkloněného. Ovšem při hodnotách zatížení mezi 600 a 800 kg (respektive mezi 5886 a 7848 N) je patrné, že se radiální tuhost pneumatiky u kola s úhlem odklonu 5° oproti kolu neodkloněnému zvýšila.

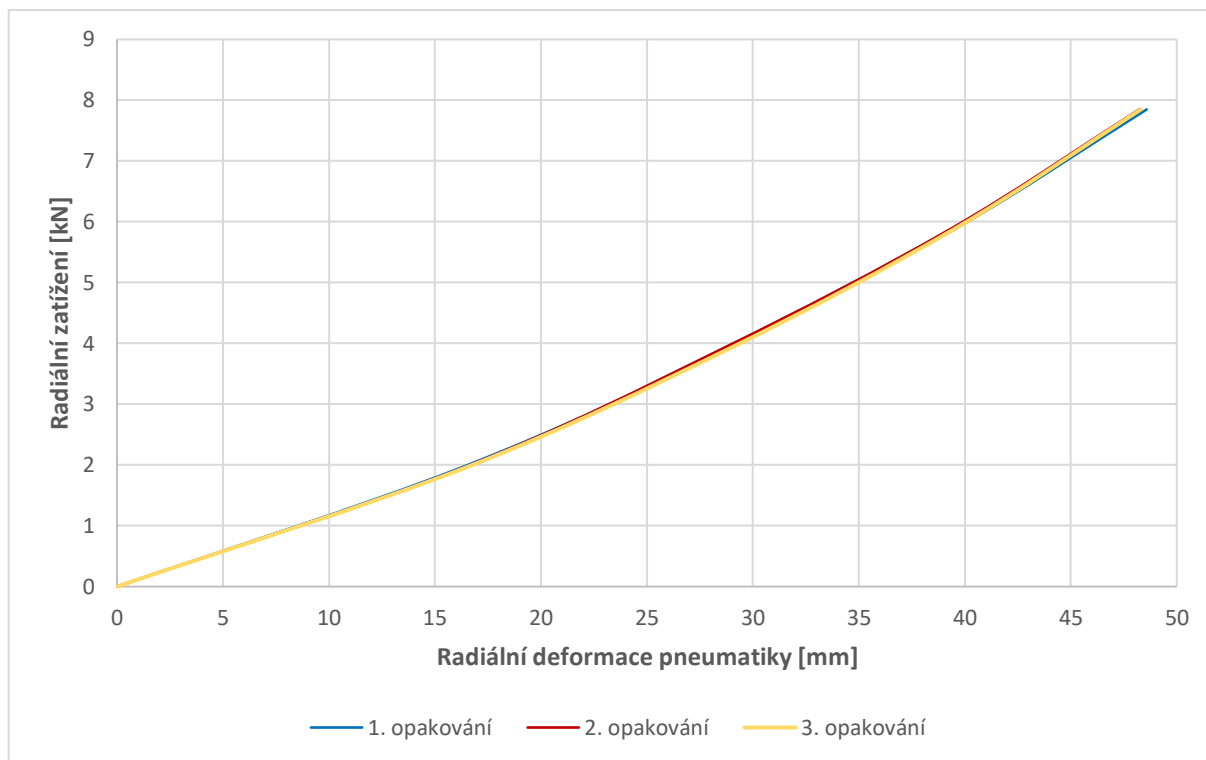
4.3.3 Měření radiální tuhosti pneumatiky s odklonem kola 10°

Při posledním měření je kolo také odkloněno, v tomto případě o 10°. Úhel odklonu ramene se opět nastaví pomocí 4 šroubů (2 nahoře a 2 dole). Kontrola velikosti úhlu odklonu se provede na stupnici statického adhezoru i pomocí nástroje Vodováha ve smartphonu.



Obr. 33: Zatížené kolo s úhlem odklonu 10°

Po nastavení úhlu odklonu kola 10° je zahájeno měření. Měřicí postup je stejný jako v předchozích případech. Z naměřených hodnot se v Excelu stanoví graf zobrazující radiální deformační charakteristiku pneumatiky pouze pro zatěžování pro kolo s úhlem odklonu 10°.



Graf 3: Radiální deformační charakteristika pneumatiky pro zatížení s odklonem kola 10°

U křivky zobrazující 1. opakování (vyznačena modře) je patrné drobné vychýlení od ostatních naměřených hodnot na konci zatěžování. Vzhledem k tomu, že u následujících měření se žádná výraznější odchylka nevyskytuje, je tato odchylka pravděpodobně způsobena nepřesností při zatěžování, kdy došlo k zatížení vyššímu než stanovených 800 kg, respektive 7884 N. Kromě této odchylky se křivky opět téměř překrývají a měření lze prohlásit pro potřeby práce za dostatečně přesné. *Tabulka 5* zobrazuje hodnoty přírůstku radiálního zatížení a radiální deformace pneumatiky. V *Tabulce 6* jsou hodnoty radiální tuhosti pneumatiky. Měření bylo opět provedeno třikrát, proto tabulky obsahují 3 sloupce hodnot přírůstku radiální deformace i radiální tuhosti pneumatiky.

Tabulka 5: Hodnoty přírůstku zatížení a radiální deformace s úhlem odklonu kola 10°

ΔG_k [kN]	Δr_1 [mm]	Δr_2 [mm]	Δr_3 [mm]
1,962	16,27	16,39	16,48
1,962	12,55	12,23	12,46
1,962	10,74	10,72	10,58
1,962	9,02	8,89	8,78

Přírůstek zatížení je konstantní (200 kg, respektive 1962 N). Při postupném zatěžování se přírůstek radiální deformace pneumatiky postupně zmenšuje.

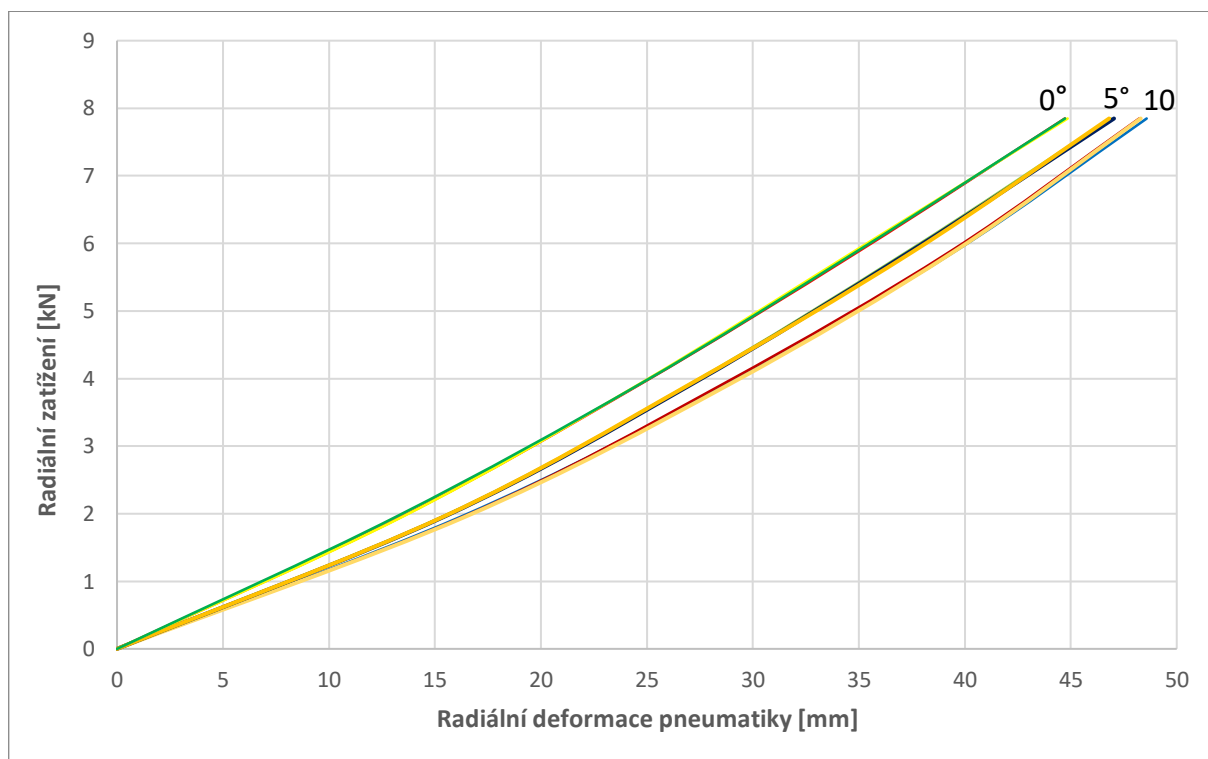
Tabulka 6: Radiální tuhost pneumatiky s úhlem odklonu kola 10°

<i>cp1</i> [kN/mm]	<i>cp2</i> [kN/mm]	<i>cp3</i> [kN/mm]
0,121	0,120	0,119
0,156	0,160	0,157
0,183	0,183	0,185
0,218	0,221	0,223

Jako u předchozích měření dochází v rámci jednoho měření k postupnému zvyšování radiální tuhosti pneumatiky. Porovnání mezi měřeními kola s úhlem odklonu 5° a kola s úhlem odklonu 10° ukazuje, že u kola s úhlem odklonu 10° je radiální tuhost pneumatiky při zatížení do 600 kg nižší než v případě kola s úhlem odklonu 5°. Pokud je ovšem kolo zatíženo v rozmezí 600 a 800 kg, dojde ke zvýšení radiální tuhosti oproti předchozímu případu odkloněného kola.

5 Vyhodnocení výsledků experimentálního měření

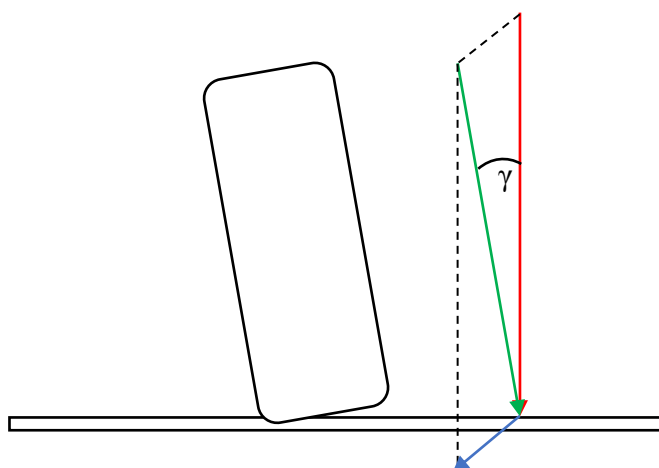
Cílem této práce je zjistit, zda se při změně úhlu odklonu kola změní radiální tuhost pneumatiky. V kapitole 4.3 jsou rozebrána jednotlivá měření pro kolo neodkloněné, kolo s úhlem odklonu 5° a kolo s úhlem odklonu 10° . Rovněž jsou stanoveny grafy radiální tuhosti pneumatiky pro jednotlivá měření. Následující *Graf 4* zobrazuje křivky radiální deformační charakteristiky pneumatiky pro zatížení. V grafu je zobrazeno všech 9 měření, která byla provedena, tedy pro úhel odklonu kola 0° , 5° a 10° .



Graf 4: Porovnání radiální deformační charakteristiky pneumatiky pro různý odklon kola

Z *Grafu 4* je patrné, že se zvyšujícím se odklonem kola při stejném zatížení dochází k postupnému nárůstu radiální deformace pneumatiky. Rozdíl mezi maximální deformací pro neodkloněné kolo a kolem odkloněným o 10° činí téměř 5 mm. Radiální deformační charakteristika pro zatížení se při změně odklonu kola zplošťuje směrem k ose x. Při stejném zatížení tedy dochází k větší deformaci pneumatiky.

Předpoklad před samotným měřením byl takový, že při stejném zatížení a zvětšujícím se úhlem odklonu kola bude docházet k větší radiální deformaci pneumatiky. V případě kola odkloněného i neodkloněného působí zatěžující radiální síla ve směru kolmém na podložku, respektive na platformu vah. U kola neodkloněného pneumatika dosedá na platformu vah po celé šířce běhounu a při zatěžování je tlak v kontaktní ploše rozložen rovnoměrně. Kolo je zatěžováno pouze radiální silou. Radiální zatěžovací síla je přenášena prostřednictvím kostry pneumatiky a tlaku vzduchu v pneumatice.



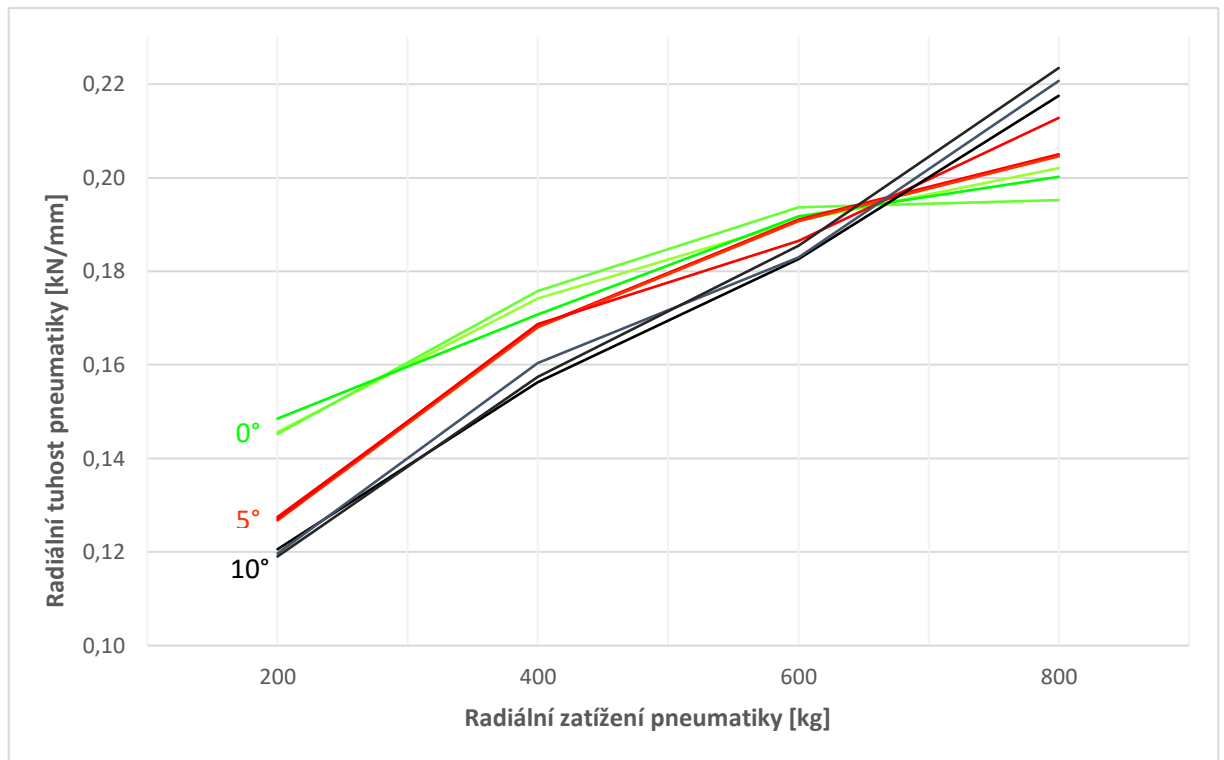
Obr. 34: Síly působící na odkloněné kolo při zatěžování

V případě kola odkloněného o úhel odklonu γ nezatěžuje kolo pouze radiální síla kolmá na platformu vah (červeně). Kromě této síly kolo přitěžuje také boční síla (modře), která vznikla právě v důsledku odklonu kola o úhel γ .

Zkušební pneumatika má označení 165/70 R 14 81T. Index nosnosti (LI), v tomto případě číslo 81 udává, že maximální dovolené zatížení této pneumatiky je 462 kg. Při měření odpovídalo maximální zatížení pneumatiky hodnotě 800 kg, tedy téměř dvojnásobek maximálního dovoleného zatížení. Při provozu vozidla by této maximální dovolené hodnoty zatížení nemělo být nikdy dosaženo. [37]

Původně bylo plánované maximální zatížení pneumatiky při experimentálním měření 1000 kg, tedy více než dvojnásobek maximálního dovoleného zatížení. Při zatěžování kola s úhlem odklonu 10° však při hodnotě zatížení 1000 kg došlo k výrazné deformaci bočnice. Okamžitě po dosažení této hodnoty zatížení došlo k odlehčení kola, aby se předešlo případnému poškození pneumatiky. Jako maximální hodnota zatížení pro potřeby měření byla následně stanovena hodnota 800 kg.

Z hodnot v *Tabulce 2*, *Tabulce 4* a *Tabulce 6* vyčíst, že při jednotlivých měřeních se radiální tuhost pneumatiky postupně zvyšuje. Nezáleží na tom, zda je kolo bez odklonu nebo s odklonem 5° , respektive 10° . Názornější představu nabízí *Graf 5*, který zobrazuje křivky průběh radiální tuhosti pneumatiky v závislosti na zatížení. Jednotlivé skupiny křivek radiální tuhosti (pro úhel odklonu kola 0° , 5° a 10°) jsou od sebe barevně odlišeny.



Graf 5: Radiální tuhost pneumatiky pro různý odklon kola

Z Grafu 5 je patrné, že při větším úhlu odklonu kola je radiální tuhost pneumatiky zpočátku nižší. Tato skutečnost ovšem platí jen do určité hodnoty zatížení pneumatiky. Mezi hodnotami zatížení 600 kg a 800 kg, při kterých došlo k zapsání naměřených hodnot radiální deformace pneumatiky, dochází ke zvýšení radiální tuhosti pneumatiky u odkloněného kola než u kola neodkloněného. Hodnota zatížení, při které se radiální tuhost oproti předchozímu případu s menším nebo žádným odklonem kola zvýší, podle Grafu 5 odpovídá zhruba zatížení 650 kg.

Tento jev pravděpodobně souvisí s konstrukcí pneumatiky. Pneumatika jako celek je složena z mnoha různých konstrukčních částí s různými materiálovými vlastnostmi (ocelový nárazník, ocelové nebo textilní kordy tvořící kostru, pryž). Každý z těchto materiálů reaguje na zatížení jinak. Se zvětšujícím se úhlem odklonu kola je zpočátku radiální tuhost pneumatiky nižší než v případě kola neodkloněného či odkloněného o menší úhel. Při určitém zatížení pneumatiky však dojde k jevu, který by se dal nazvat ztuhnutím pneumatiky. Od tohoto momentu se radiální tuhost pneumatiky se zvětšujícím se úhlem odklonu kola zvyšuje. Pokud by byla pneumatika vyrobena z jednoho homogenního materiálu, dalo by se předpokládat, že se zvětšujícím se úhlem odklonu kola by docházelo buď ke snižování nebo zvyšování radiální tuhosti pneumatiky.

6 Závěr

Při realizaci experimentálního měření se zkoumá změna radiální tuhosti pneumatiky pouze při zatěžování, což je vzhledem k zadání práce dostačující a změna radiální tuhosti při odlehčování pneumatiky nebyla zkoumána. Změna úplné radiální deformační charakteristiky pneumatiky vzhledem ke změně úhlu odklonu kola by mohlo být cílem jiné bakalářské práce, případně by se dalo téma doplnit ještě změnou tlaku huštění.

Po celou dobu průběhu měření nebylo s kolem otáčeno, veškerá naměřená data se vztahují k jedné výchozí poloze, ve které bylo kolo upnuto k ramenu statického adhezoru. Vzhledem k zadání práce nebylo nutné s kolem otáčet či jinak manipulovat, aby bylo možné zjistit vliv otáčení kola na změnu radiální tuhosti pneumatiky.

Vzhledem k tomu, že při provozu vozidla se odklon kola pohybuje v rozmezí jednotek stupňů, je rozsah měření v rozmezí 0° až 10° zvolen tak, aby bylo možné z naměřených hodnot a následných výsledků stanovit závěr.

Po realizaci měření s odkláněním horní části kola směrem od ramene statického adhezoru bylo plánováno i měření s odklonem horní části kola směrem k rameni adhezoru, jednalo by se tedy o negativní odklon neboli příklon kola. Konstrukce statického adhezoru, respektive ramene, však neumožňuje provedení měření. Kontaktní plochy na rameni statického adhezoru, o které se opírají šrouby sloužící k nastavení odklonu ramene, nejsou dostatečně velké a při nastavení úhlu odklonu větším než 3° už se šrouby dále nemají o co opírat, což znemožňuje realizaci měření. Problém by bylo možné vyřešit opačným upnutím kola a měření provést podle stanoveného postupu.

Tato práce může sloužit jako základ pro další experimentální měření. Z výsledků dosažených při experimentálním měření lze stanovit závěr, že změna úhlu odklonu kola má vliv na změnu radiální tuhosti pneumatiky. Pro úplnou jistotu tohoto závěru by bylo potřeba, aby jednotlivá měření byla provedena vícekrát. Zda má na změnu radiální tuhosti kola vliv i konstrukce pneumatiky, bylo by vhodné, aby se experimentální měření provedlo například i s diagonální pneumatikou. Dalším parametrem, který má vliv na radiální tuhost pneumatiky, je tlak huštění. Proto by se další případné experimenty mohli zabývat otázkou změny radiální tuhosti pneumatiky v závislosti na změně úhlu odklonu kola a tlaku huštění.

Seznam použité literatury

- [1] KRMELA, Jan. *Systémový přístup k výpočtovému modelování pneumatik I.: [System approach to computational modelling of tyres - I. part]*. Brno: Tribun EU, 2008. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-7399-365-8.
- [2] MARCÍN, Jiří a Petr ZÍTEK. *Pneumatiky*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985. Gumárenské výroby.
- [3] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel*. 3., přeprac., rozš. a aktualiz. vyd. Brno: František Vlk, 2006. ISBN 80-239-6464-X.
- [4] Značení pneumatik. In: *PNEUBOSS.cz* [online]. 11. 10. 2021 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.pneuboss.cz/poradna/jak-zpomalit-starnuti-pneumatik>
- [5] Mají vaše pneumatiky správný tlak?. In: *PNEUMATIKY.cz* [online]. 3. 10. 2013 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.pneumatiky.cz/maji-vase-pneumatiky-spravny-tlak-t4>
- [6] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [7] Víte, jak se vyrábí pneumatiky?. *Auto-mania.cz* [online]. 4. 6. 2019 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://auto-mania.cz/vite-jak-se-vyrabi-pneumatiky/>
- [8] Pneumatikový rádce aneb vše o pneumatikách. *iBZ.cz* [online]. [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://www.ibz.cz/zakladni-informace#>
- [9] Pryž (guma). *Strand* [online]. [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://strand.cz/dokumenty/pryz/>
- [10] [Konstrukce]. In: *Hankook* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <http://www.hankookpneu.cz/technologie/konstrukce/>
- [11] Konstrukce, funkce a výroba pneumatiky. *Pneu-asistent.cz* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://www.pneu-asistent.cz/Konstrukce_funkce_a_vyroba_pneumatiky.html
- [12] Konstrukce pneumatiky. In: *Autolexicon.net: ... S námi uvidíte pod kapotu* [online]. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/konstrukce-pneumatiky/>

- [13] KORYNT, Jiří. Konstrukce pneumatiky. In: *Pneu Poradna* [online]. 18. 12. 2015 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://pneuporadna.cz/vse-o-pneu/konstrukce-pneumatiky>
- [14] Struktura pneumatik. In: *Hankook* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.hankooktire.com/cz/services-tips/tire-guide/structure.html>
- [15] Základní rozměry pneumatik. *PNEUMATICO INTERNATIONAL* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.pneumatico.cz/zakladni-rozmary-pneumatik.html>
- [16] Co znamenají písmena a čísla na pneumatikách?. *ipneu.cz* [online]. [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.ipneu.cz/cms/co-znamenaji-pismena-a-cisla-na-pneumatikach-24>
- [17] KRÁL, Jiří. Značení pneumatik. In: *PNEUMATIKY.cz* [online]. 3. 7. 2017 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.pneumatiky.cz/znaceni-pneumatik-t4>
- [18] Značení pneumatik. *AUTOCENTRUM-MALÝ* [online]. [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.autocentrumrk.cz/content/5-znaceni-pneumatik>
- [19] DUSIL, Tomáš. Bezdušová pneumatika zlepšila pohodlí i jízdní vlastnosti. A kdo měl první runflety?. In: *AUTO.cz* [online]. 14. 12. 2018 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/bezdusova-pneumatika-zlepsila-pohodli-i-jizdni-vlastnosti-a-kdo-mel-prvni-runflety-126440>
- [20] HÁLA, Patrik. Bezdušová pneumatika – její stručná historie a přínos. In: *GARÁŽ.CZ* [online]. 22. 9. 2018 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.garaz.cz/clanek/bezdusova-pneumatika-strucna-historie-a-jeji-prinos-21000137>
- [21] KRÁL, Jiří. Dojezdové pneumatiky (Run-flat pneu). In: *PNEUMATIKY.cz* [online]. 19. 6. 2017 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.pneumatiky.cz/dojezdove-runflat-pneumatiky-t4>
- [22] ŘEZNÍČEK, Jan. *Průvodce RunFlat pneumatikami* [online]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <http://www.runflatpneu.cz/>
- [23] SAJDL, Jan. Pneumatiky Runflat. In: *Autolexicon.net: ... S námi uvidíte pod kapotu* [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/pneumatiky-runflat/>

- [24] Základní dělení pneumatik. *AUTOCENTRUM-MALÝ* [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.autocentrumrk.cz/content/8-deleni-pneu>
- [25] Dělení pneumatik na osobní automobily. *AUTOCENTRUM-MALÝ* [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.autocentrumrk.cz/content/7-osobni-pneu>
- [26] Co jsou letní pneumatiky a lze je používat po celý rok?. In: *Barum* [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.barum.cz/osobni/rada-odborn%C3%ADka/znalost-pneumatik/co-jsou-letni-pneumatiky>
- [27] DRDLÍČEK, Josef. Minimální hloubka dezénu. In: *PNEUMATIKY.cz* [online]. 3. 3. 2018 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.pneumatiky.cz/minimalni-hloubka-dezenu-t4>
- [28] Jaký je v nich rozdíl? Asymetrické, symetrické nebo směrové pneumatiky. In: *PNEUMATIKY.cz* [online]. 17. 6. 2014 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.pneumatiky.cz/jaky-je-v-nich-rozdil-asymetricke-symetricke-nebo-smerove-pneumatiky-t4>
- [29] Typy pneumatik. In: *Hankook* [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.hankooktire.com/cz/services-tips/tire-guide/types-of-tires/by-structure.html>
- [30] VALA, Miroslav a Miroslav TESAŘ. *Teorie a konstrukce silničních vozidel I*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003. ISBN 80-7194-503-X.
- [31] Grad. *JEDNOTKY.CZ: CHYTRÉ PŘEVODY JEDNOTEK* [online]. [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.jednotky.cz/rovinsky-uhel/grad>
- [32] Geometrie zavěšení kol. In: *AutoZnalosti: Víme, co je pod kapotou* [online]. 29. březen 2012 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <http://www.autoznalosti.cz/index.php/podvozek-a-kola/40-geometriezavesenikol.html>
- [33] Kolik vás stojí špatná geometrie vozidla?. In: *AZ Pneu: Pneumatiky od A do Z* [online]. [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.az-pneu.cz/clanky/kolik-vas.stoji-spatna-geometrie-vozidla>

- [34] VOJTĚŠEK, Aleš. *Měření odklonu kola během jízdy* [online]. Brno, 2015 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=104478. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Petr Porteš.
- [35] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení, řízení, ovladatelnost, stabilita*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000. ISBN 80-238-5273-6.
- [36] VOJTĚCH, Dytrych. *Stanovení metodiky pro měření na statickém a dynamickém adhezoru* [online]. Pardubice, 2019 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://dk.upce.cz/handle/10195/73725>. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Petr Jilek.
- [37] Technické info. *Pro-pneu.cz* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.pro-pneu.cz/technicke-info.html>

