VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MĚŘENÍ TVARU ZATÍŽENÉ PNEUMATIKY

SHAPE MEASUREMENT OF LOADED TYRE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. JIŘÍ HLAVATÝ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. ONDŘEJ BLAŤÁK, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jiří Hlavatý

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

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:

Měření tvaru zatížené pneumatiky

v anglickém jazyce:

Shape Measurement of Loaded Tyre

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S využitím optických skenerů dostupných na ÚADI proveďte měření kompletního tvaru zatížené pneumatiky.

Cíle diplomové práce:

1. Proveďte rešerši v oblasti měření deformací a tvaru pneumatik.
2. Proveďte konstrukční návrh zařízení, které umožňí zatěžování pneumatik včetně možnosti nastavení odklonu kola.
3. Proveďte měření tvaru nedeformované pneumatiky pro různé tlaky vzduchu uvnitř pneumatiky.
4. Proveďte měření tvaru deformované pneumatiky pro různé hodnoty zatížení a tlaku vzduchu v pneumatice.

Seznam odborné literatury:

HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road Vehicles. 4 ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998, 918 s. ISBN 0-7680-0029-7.
HANEY, P. The Racing & High-Performance Tire. 1st edition. Warrendale: TV Motor-sports and SAE, 2003. 286 s. ISBN 0-9646414-2-9.

Vedoucí diplomové práce:Ing. Ondřej Blaťák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 27.10.2014

L.S.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ DĚKANÁT

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na měření tvaru převážně zatížené pneumatiky a hledání závislostí mezi tlakem uvnitř pneumatiky, zatížením a vlivem těchto parametrů na výsledný tvar pneumatiky. Data pro tyto závislosti byla získána za pomoci navrženého měřícího stanoviště a 3D optické techniky. Nalezené závislosti popisují změnu tvaru pneumatiky v konkrétních funkcích a posloužili k tvorbě parametrického modelu pneumatiky. Hlavním zjištěním této práce je, že pneumatika se skutečně chová podle závislostí popsaných různým stupněm polynomické funkce.

KLÍČOVÁ SLOVA

pneumatika, tvar, zatížená pneumatika, 3D skener, parametrický model

ABSTRACT

This thesis is focused on measuring the shape of loaded tire and finding dependencies between inner tire pressure, load and the influence of these parameters on the resulting shape of the tire. Data for these dependencies were obtained by using a constructed measuring stand and 3D optical technology. Found dependencies describe the change in shape of the tire in specific mathematical functions, and served the creation of a parametric model of the tire. The main finding of this thesis is that the tire is actually behaves according to dependencies described by varying degrees of polynomial function.

KEYWORDS

Tire, design, tire load, 3D scanner ,parametric model

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HLAVATÝ, J. *Měření zatížené pneumatiky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Blaťák, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Blaťáka Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 22. května 2015 …….……..……..

Jiří Hlavatý

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval všem, kteří mi pomohli při tvorbě této práce, především bych chtěl poděkoval Ing. Ondřeji Blaťákovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a cenné rady.

OBSAH

Úvod 11
1 Základní informace 12
1.1 Historie pneumatik 12
1.2 Výroba pneumatik 13
1.2.1 Výroba pryžových směsí 13
1.2.2 Pogumování kordu 13
1.2.3 Běhoun a bočnice 14
1.2.4 Nárazník 14
1.2.5 Patní lana 14
1.2.6 Kopletace (konfekce) 14
1.2.7 Vulkanizace 14
1.2.8 Kontrola 15
1.3 Stavba pneumatiky 15
1.3.1 Běhoun 16
1.3.2 Nárazník 16
1.3.3 Kostra 16
1.3.4 Bočnice 16
1.3.5 Vnitřní gumová vrstva 17
1.3.6 Patka 17
1.3.7 Patní lanko 17
1.4 Funkce pneumatiky 17
1.5 Základní rozměry pneumatik 18
1.6 Označování pneumatik 19
1.7 Dělení pneumatik 20
1.7.1 Podle dezénu 20
1.7.2 Podle struktury 22
1.8 Pneumatiky a hlučnost 24
2 Vliv pneumatiky na aerodynamiku automobilu 25
2.1 Aerodynamika pneumatiky 26
2.1.1 Vliv konstrukce podběhu 26
2.1.2 Tlak v pneumatikách 26
2.1.3 Šířka pneumatiky 27
2.1.4 Rychlost jízdy 27
2.1.5 Značení pneumatiky 28
2.1.6 Rameno pneumatiky 28

3 Měření deformace pneumatiky 29
3.1 Měření pomocí optických 3D skenerů 29
3.2 Měření pomocí 3D laserových skenerů 30
4 Návrh měřícího stanoviště 32
4.1 Zadání a požadavky 32
4.1.1 Odklon kola 33
4.1.2 Tlak v pneumatice 34
4.2 Použití zařízení – průběh měření 35
4.3 Pevnostní kontrola v programu Ansys 37
4.3.1 Rameno 37
4.3.2 Zatěžovací deska 40
5 Analýza změřených dat 42
5.1 Tvorba řezů 43
5.2 Nezatížená pneumatika 44
5.3 Zatížená pneumatika 46
5.3.1 Stejný tlak 46
Stejné zatížení – různý tlak 50
6 Tvorba parametrického modelu 53
Závěr 57

ÚVOD

Pneumatika, jediné spojení mezi vozovkou a hnacím ústrojím motoru, je jednou z nejdůležitějších částí celého automobilu. Podoba, v jaké známe pneumatiku dnes, existuje na světě zhruba sto let. Po celou dobu se pneumatiky neustále vyvíjejí, zdokonalují, zvyšuje se odolnost a zlepšují se jízdní vlastnosti na mokré i suché vozovce. Poslední dobou se stále více zohledňuje i vliv na životní prostředí, a tak vznikají pneumatiky šetřící palivo. Pneumatiky se značným způsobem podílí i na aerodynamice vozidla, což je jedním z důvodů vzniku této práce.

Motivací k výběru tématu této diplomové práce bylo hned několik. Na jedné straně je velmi zajímavá nejen problematika deformace pneumatiky, která vůči jiným částem automobilu ještě nebyla úplně dopodrobna odhalena a prozkoumána, ale také jakým způsobem tato deformace ovlivní aerodynamický odpor vozidla. Dalším důvodem bylo vyzkoušení si návrhu měřícího stanoviště a jeho následné využití při měřeních. V neposlední řadě to byla možnost práce s nejmodernějšími měřicími přístroji ústavu Automobilního a dopravního inženýrství od firmy GOM.

Má práce je rozdělena do několika částí. Na začátku se pokusím podat ucelený přehled o pneumatikách, zmíním některé historické fakty, které stály u zrodu pneumatiky, tak jak ji známe dnes. Pokusím se ve stručnosti popsat výrobu, konstrukci pneumatiky a nakonec základní funkce pneumatik a jejich značení. K počátečnímu přehledu je třeba přidat informace, proč jsou měření tohoto typu užitečná. Je to z důvodu zlepšování jízdních odporů – v tomto případě aerodynamiky vozidel a jejího celkového vlivu na spotřebu a emise, kde hraje tvar zatížené pneumatiky nezanedbatelnou roli. V další části popíšu, jaký má pneumatika a její části vliv na aerodynamiku vozidla a jaká modifikace ovlivní aerodynamický odpor nejvíce. Pro provedení takovýchto měření je potřeba navrhnout zařízení, na kterém bude možné ho provádět, čemuž se věnuji v další části práce. Výsledná data z měření se pokusím co nejlépe zanalyzovat za pomoci počítačového software firmy GOM a vyvodit z nich podstatné závěry.

Cílem této práce by mělo být nalezení závislostí, podle kterých se pneumatika deformuje, ať už při změně tlaku uvnitř pneumatiky, nebo zatížení, a na základě těchto závislostí vytvořit parametrický model v programu Creo Parametric 3.0, který by věrně napodobil změnu tvaru bočnice reálné pneumatiky při změně zatížení. Věřím, že tento model by pak mohl mít přínos například pro zpřesnění aerodynamických CFD výpočtů.

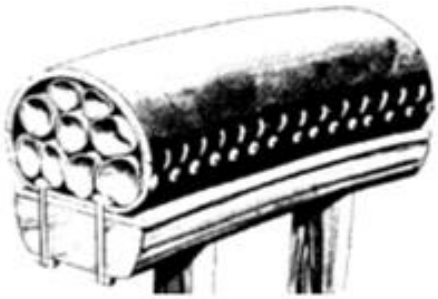
1 ZÁKLADNÍ INFORMACE

Pro pochopení problematiky pneumatik je dobré znát základy historie, výroby, konstrukce a jejich rozdělení. V následujících kapitolách jsou shrnuty nejdůležitější informace.

1.1 HISTORIE PNEUMATIK

V současné době jsou pro nás pneumatiky samozřejmou součástí dopravních prostředků. Vývoj technologií pneumatik má však více než dvěstěletou historii.

Jako první si nechal patentovat gumové pneumatiky Robert William Thomson v roce 1845. První patent pneumatiky používá řešení pomocí tenkých nafouknutých trubek. Tato pneu konstrukce měla své výhody, dokázala odolávat i několika defektům pneumatiky a umožňovala jízdu za různých podmínek. Výroba pneumatiky však byla nejen složitá, ale i nákladná. Thomson svým patentem doslova předběhl dobu, neboť jízdní prostředky nebyly natolik rozšířené, aby jeho vynález získal praktické uplatnění. Proto Thomsonův patent postupně upadl v zapomnění. [4]



Obrázek 1: Pneumatika z roku 1845 [4]

V roce 1888 vynalezl skotský veterinář John Boyd Dunlop první pneumatiku plněnou vzduchem. Nasadil gumové hadice na dřevěná kola a spojová místa překryl silným plátnem. Tyto první pneumatiky připojil k tříkolce a provedl testovací jízdu. Neobjevily se žádné problémy. Dunlop proto pokračoval ve svém pokusu a k plátnu připevnil gumové částečky, aby předešel prokluzování a smyku. Takto vylepšené pneumatiky vyzkoušel na bicyklu. Test se povedl a od té doby se začíná psát historie vzduchem plněných pneumatik. [4] [5]

V roce 1891 bratři Michelinové patentovali pneumatiky, které mohou být namontované i demontované ručně. V roce 1904 vyvinula společnost Firestone and Goodyear Tire Company patní lano se čtvercovým průřezem a téměř všichni výrobci pneumatik ve Spojených státech do roku 1908 převzali jejich výrobní techniky. [4] [5]

Vývoj materiálů a výrobních technologií spolu s rozvojem automobilového průmyslu vedly k zdokonalování dynamických schopností pneumatik. K vývojovému posunu přispěly i obě světové války, neboť motorizace vojsk byla velkou prioritou. Pneumatiky osobních aut byly navrhované tak, aby splnily nároky na vysokou rychlost, řízení a bezpečnost. Začaly se vyvíjet nové, ekonomické a vysoce výkonné pneumatiky. Stejně jako auta, tak i pneumatiky prošly velkým vývojem. Dnešní pneumatiky se specializují pro různé povrchy, poskytují komfortní a bezpečnou jízdu, dostatečnou odolnost i životnost.

1.2 VÝROBA PNEUMATIK

Výrobu pneumatiky je možné rozdělit na několik technologických, souběžně probíhajících operací, které se potkávají až při takzvané konfekci. Je to vlastní příprava kaučukových směsí, pogumovaného kordu, výroba běhounu a bočnic, patních lan a nárazníků. Při konfekci jsou pak všechny komponenty zkompletovány a jako produkt konfekce vzniká surový plášť, ze kterého se vytvoří hotový produkt zvulkanizováním v lisu.

1.2.1 VÝROBA PRYŽOVÝCH SMĚSÍ

U výroby pryžových směsí je konečný produkt kompromisem mezi všemi požadavky, jako jsou valivý odpor, hluk, životnost, odolnost vysokým či nízkým teplotám, nebo se upřednostňují ty vlastnosti, které jsou pro danou pneumatiku důležité. Základním materiálem pro výrobu pryže jsou kaučuky.

Kaučuky pro výrobu pneumatik mohou být buď přírodní, nebo syntetické. Přírodní kaučuk je elastomer, který se získává z kaučukodárných rostlin především pak z kaučukovníků. Je tvořený dlouhými řetězci polymeru s velmi dobrými mechanickými vlastnosti. V dnešní době je produkce přírodního kaučuku nedostatečná, a proto se využívá kaučuk syntetický, který nahrazuje použití kaučuku přírodního. Syntetické kaučuky se získávají z ropy, existuje jich celá řada a každý z nich má své speciální vlastnosti podle účelu použití (např. pružnost při nižších teplotách, odolnost proti olejům). [7] [8]

Komponenty pro výrobu gumové směsi pneumatik můžeme klasifikovat následujícím způsobem: [7] [8]

1. Pryž – jeden polymer nebo směs polymerů s vysokou molekulovou hmotností
2. Rozpínavé silice
3. Plnivo – směs uhlíkových sazí, křemene a jiných vyplňovacích materiálů
4. Procesní přísady jako změkčovadla, plasticizéry či recyklovaná guma
5. Akcelerátory reakce – síra a oxid zinku
6. Aditiva jako např. antioxidanty, antiozonanty apod.

V podstatě veškerá plniva, která se do pneumatik přidávají, se podílejí na zvýšení tvrdosti. Saze navíc zvyšují tahovou pevnost, čímž je sníženo riziko vzniku vad a trhlin ve směsi a velmi kladně je ovlivněna životnost pneumatiky. Použití křemene jako plniva zmenšuje valivý odpor pneumatiky a rozšiřuje rozsah provozních teplot nad teplotu skelného přechodu dané směsi. Vhodnými poměry množství sazí a množství křemene se dosáhne zlepšení přilnavosti za mokra a zlepšení trvanlivosti pneumatiky. [7] [8]

1.2.2 POGUMOVÁNÍ KORDU

Z hlediska pevnosti a celkových vlastností pneumatiky je nejdůležitější její kostra. Ta se skládá z kordových vláken, která se vyrábí z oceli, hedvábí, polyesteru, polyamidu nebo kevlaru. Vlákna se vzájemně nesmějí dotýkat, aby nedošlo k narušení jejich struktury a následnému přetržení a snížení tuhosti pneumatiky. Tomu brání pryžová směs, která odděluje jednotlivá vlákna od sebe. [8]

Pogumování probíhá na speciálních strojích, které nanáší na látkové nebo ocelové kordy pryž. Podle typu pneumatiky se pak až 1,5 m pláty řežou a skládají na sebe v požadovaném úhlu. [8]

1.2.3 BĚHOUN A BOČNICE

Běhouny se skládají z několika typů pryže. Svrchní část se vyrábí tak, aby byla co nejtvrdší a odolala působení třecích sil při jízdě. Spodní část běhounu, též nazývána základní, je tenká vrstva, obsahující saze. [7] [8]

Bočnice se vyrábí taktéž ze dvou druhů směsi. Vnější část je pružnější, zatímco vnitřní část je velmi tuhá, aby lépe chránila kostru. [7] [8]

Pryže jsou skládány tak, aby nedocházelo k ostrým změnám vlastností, ale aby změny byly plynulé a pozvolné.

1.2.4 NÁRAZNÍK

Nárazník se vyrábí vzájemným překřižováním pogumovaných ocelových kordů pod daným úhlem, který závisí na typu pneumatiky. U vysokovýkonných pneumatik se používá další nárazníková vrstva vytvořena spirálovitým namotáváním polyamidového kordu na prstenec ocelového kordu. Vzniká tak nárazníková vrstva bez spoje. [8]

1.2.5 PATNÍ LANA

Vytváří se prstenec se čtyřmi pogumovanými ocelovými lanky vedle sebe. Tento prstenec se následně rozdělí na čtyři jednotlivá lana. Současně se tak vyrábějí čtyři patní lanka vždy pro dva pláště. [8]

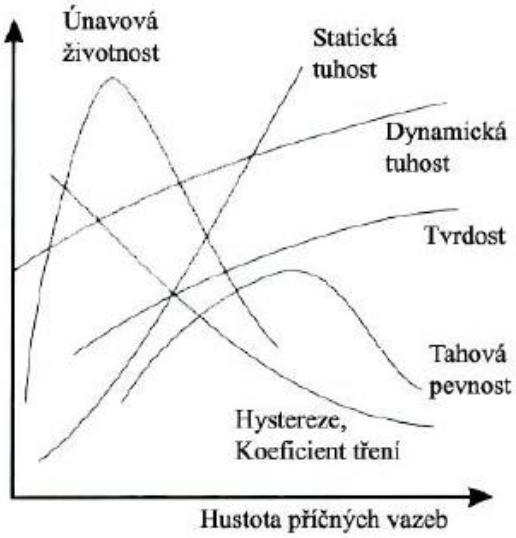
1.2.6 KOPLETACE (KONFEKCE)

Kompletování pneumatiky je rozděleno do dvou částí. V prví části se na vnitřní gumovou část nalepí kordová vložka, z boku se narazí patní lana a kordová vložka se přehne přes lano a vše se přikryje bočnicí. Ve druhé části se na vrstvu ocelového kordu kostry položí polyamidový nárazník a běhoun. Obě části se spojí dohromady a válením se spojí – vznikne surový plášť. [8]

1.2.7 VULKANIZACE

Svou finální podobu a fyzikální vlastnosti získá plášť při vulkanizaci. Je to proces, při kterém se za působení teploty, tlaku a vulkanizačního činidla mění struktura kaučukové směsi. Při vulkanizaci se zvyšuje pevnost v tahu a strukturní pevnost (odolnost proti šíření trhliny), odolnost proti oděru i pružnost. Vulkanizovaný kaučuk je zároveň méně citlivý na změny teplot a zachovává si ohebnost i tuhost v značném teplotním rozsahu. [8]

Samotný proces vulkanizace probíhá tak, že se surový plášť vloží do připravené lisovací formy, která odpovídá vzhledu budoucího pláště – má na sobě dezén i veškerý popis. Vedle dezénových drážek jsou na formě ještě odvzdušňovací trysky. Těmito tenkými kapilárami jsou odváděny plynné vulkanizační zplodiny z vnitřních částí pláště tak, aby nedocházelo k uzavření vzduchu, a následně k separacím materiálu. Konstrukce vulkanizační formy je vedle složení a vlastností směsi, přesných polotovarů a správně provedené konfekce jedním z nejdůležitějších faktorů při výrobě kvalitních pneumatik. Působením horké páry se polotovar tvaruje a pomocí vulkanizačního činidla se kaučuk vulkanizuje – vytvářejí se dříve zmiňované příčné vazby mezi molekulami polymeru pryže s příměsovými částicemi. Obě části probíhají v jedné operaci. Průměrně je doba vulkanizace 50 až 60 minut při 145 °C. [2] [8]



Obrázek 2: Vliv vulkanizace na vlastnosti materiálu [2]

1.2.8 KONTROLA

Jakmile je proces vulkanizace dokončen, je možné pneumatiku vyjmout z formy. Po vychladnutí a stabilizaci se pneumatika podrobuje výstupní kontrole. Nejprve se provádí vizuální kontrola a u pneumatik pro osobní a nákladní automobily se ještě provádí rentgenová kontrola, při níž je možné objevit defekty, které nejsou pouhým okem viditelné – například mikroseparace nebo jiné drobnější vady uvnitř pláště. [7] [8]

1.3 STAVBA PNEUMATIKY

Stavba pneumatiky je podřízena jejím hlavním úkolům. Těmi jsou přenášení sil, ať už brzdných nebo hnacích, a nesení zátěže. Dále musí pneumatika tlumit nerovnosti a zajistit bezpečnou jízdu na hladké vozovce, což jsou protichůdné požadavky. Na jednu stranu má být pneumatika měkká pro tlumení, ale na druhou stranu tuhá pro klidnou jízdu po hladkém povrchu, proto se dnešní pneumatika skládá z několika částí, popsaných níže.

1.3.1 BĚHOUN

Běhoun je část pláště, ve které je vlisován dezén, zajišťuje styk kola s vozovkou a jeho tloušťka má vliv na zahřívání pneumatiky. Z důvodu energetických ztrát a opotřebení by měl být co nejtenčí. To však neplatí u plášťů pro nákladní vozidla, u nichž je většinou běhoun konstruován pro možnost dalšího prořezání dezénu. U osobních aut je toto zakázáno. Běhoun dále chrání kostru před poškozením a musí mít maximální přilnavost k vozovce za všech klimatických podmínek a co nejvyšší životnost proti oděru. [9] [10]

Obrázek 3: Běhoun [9]

Obrázek 4: Nárazník [9]

1.3.2 NÁRAZNÍK

Nárazník tvoří přechodovou vrstvu mezi kostrou pláště a běhounem. Hlavním úkolem nárazníku je stabilizovat běhoun v obvodovém směru a bránit proražení pneumatiky. Osobní automobily mají většinou dvě nárazníkové vrstvy z ocelového kordu. [9] [10]

1.3.3 KOSTRA

Kostra neboli radiální kordová vrstva je základní část pláště. Je tvořena kordovými vložkami, jejichž stavba a uspořádání určuje hlavní vlastnosti pneumatiky. Podle složení kostry a vzájemné pozice kordových vláken rozlišujeme pneumatiky na diagonální a radiální. [9] [10]

Obrázek 6: Kostra [9]

Obrázek 5: Bočnice [9]

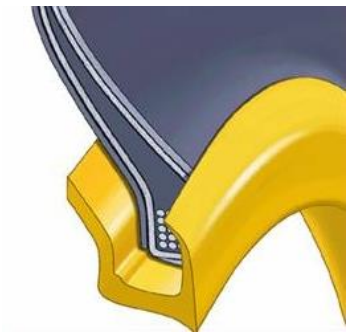
1.3.4 BOČNICE

Hlavní úkol bočnic je chránit pneumatiku před poškozením a všemi vnějšími vlivy. Vyrábí se z kaučuku, aby vydržela několikanásobné ohýbání. Nese popisky pneumatiky [9] [10]

1.3.5 VNITŘNÍ GUMOVÁ VRSTVA

V době, kdy se používají bezdušové pneumatiky, je tahle vrstva vyrobena z neprodyšného materiálu a zabraňuje úniku vzduchu. [9] [10]

Obrázek 8: Vnitřní gumová vrstva [9]



Obrázek 9: Patka [9]

Obrázek 7: Patní lanko [9]

1.3.6 PATKA

Patka je zesílená část pláště dosedající na ocelový ráfek. Je to část pneumatiky, která přenáší točivý moment z disku na zbytek pneumatiky. Její dobré uchycení je tedy stěžejní a stará se o něj patní lanko. [9] [10]

1.3.7 PATNÍ LANKO

Patní lanko se vyrábí z vysoko pevnostního ocelového lana a zajišťuje správné dosednutí patky pneumatiky na ráfek. [9] [10]

1.4 FUNKCE PNEUMATIKY

Pro správné fungování by měla pneumatika splňovat celou řadu funkcí, na které je bezpochyby brán zřetel při jejím návrhu a výrobě:

1. nesení určité zátěže
2. tlumení nárazů
3. přenášení brzdné a hnací síly
4. přenos bočních sil
5. vhodná adheze vůči vozovce za různých podmínek
6. stabilita
7. nízký valivý odpor
8. nízký hluk a vibrace
9. symetrie sil a momentů
10. dobrá životnost
11. bezpečnost při provozu na vozovce
12. co nejmenší hmotnost

Mezi šest hlavních požadavků na pneumatiku, které zaručují bezpečnost, komfort a hospodárnost, patří:

- Vedení směru

Stabilita vozidla záleží na tom, jak pneumatiky dokáží držet stopu bez ohledu na stav povrchu nebo klimatické podmínky. Pneumatika musí udržet příčné síly, aniž by vozidlo opustilo svoji

trajektorii. Ve většině případů má automobil na každé nápravě v pneumatikách jiný tlak. Dodržením správného tlaku na přední a zadní nápravě je dosáhnuto ideální směrové stability vozidla. [14]

- Přenos výkonu a zatěžování

Pneumatiky podpírají vozidlo při stání v klidu, přenášejí výkon motoru a síly při akceleraci a brzdění. Účinnost tohoto přenosu je dána kvalitou dotykové plochy s vozovkou. [14]

- Valivý pohyb

Rovnoměrnost odvalování a valivý odpor mají velký vliv na komfort řidiče a spotřebu paliva. [14]

- Tlumení

Pneumatiky pohlcují nárazy při přejezdu přes překážky a chrání vozidlo před nerovnostmi na vozovce. Zajišťují řidiči i cestujícím pohodlí a mají vliv na celkovou životnost vozidla. Důležitou vlastností pneumatiky je především vertikální pružnost. Díky elastičnosti vzduchu (popřípadě dusíku), jímž je naplněna, se může pneumatika přizpůsobovat překážkám a nerovnostem terénu. Správný tlak v pneumatice zaručuje vysokou úroveň komfortu při zachování dobrých řídících vlastností. [14]

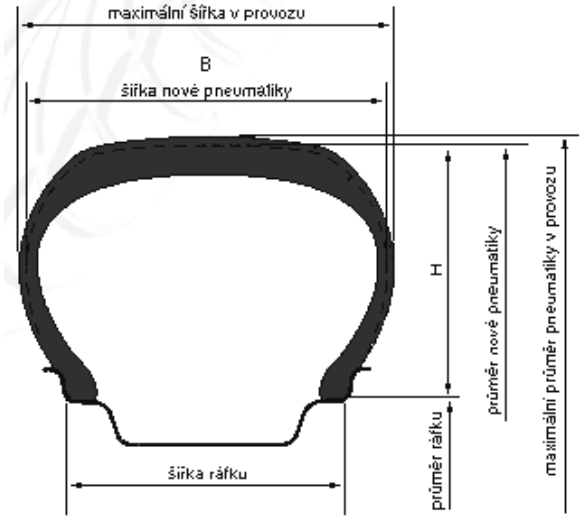
- Životnost

Pneumatiky si i po miliónech otáček kola zachovávají dostatečný výkon. Opotřebení samozřejmě závisí na podmínkách použití (zátěž, rychlost, stav povrchu vozovky, stav vozidla, způsob jízdy, atd.), ale z velké části také na kvalitě kontaktu se zemí. Důležitou roli proto hraje tlak v pneumatice. [14]

1.5 ZÁKLADNÍ ROZMĚRY PNEUMATIK

- Maximální šířka

Je to vzdálenost, která je v provozu mezi rovinami kolmými na osu rotace a které se zároveň dotýkají zatížené pneumatiky v nejširších místech.



Obrázek 10: Základní rozměry pneumatiky [15]

- Šířka nové pneumatiky

Vzdálenost mezi dvěma rovinami, které jsou kolmé na osu rotace a dotýkají se vnější části nezatížené pneumatiky.

- Výška profilu pneumatiky H

Je polovina rozdílu mezi průměrem vnitřním a celkovým průměrem pneumatiky.

- Průměr nové pneumatiky

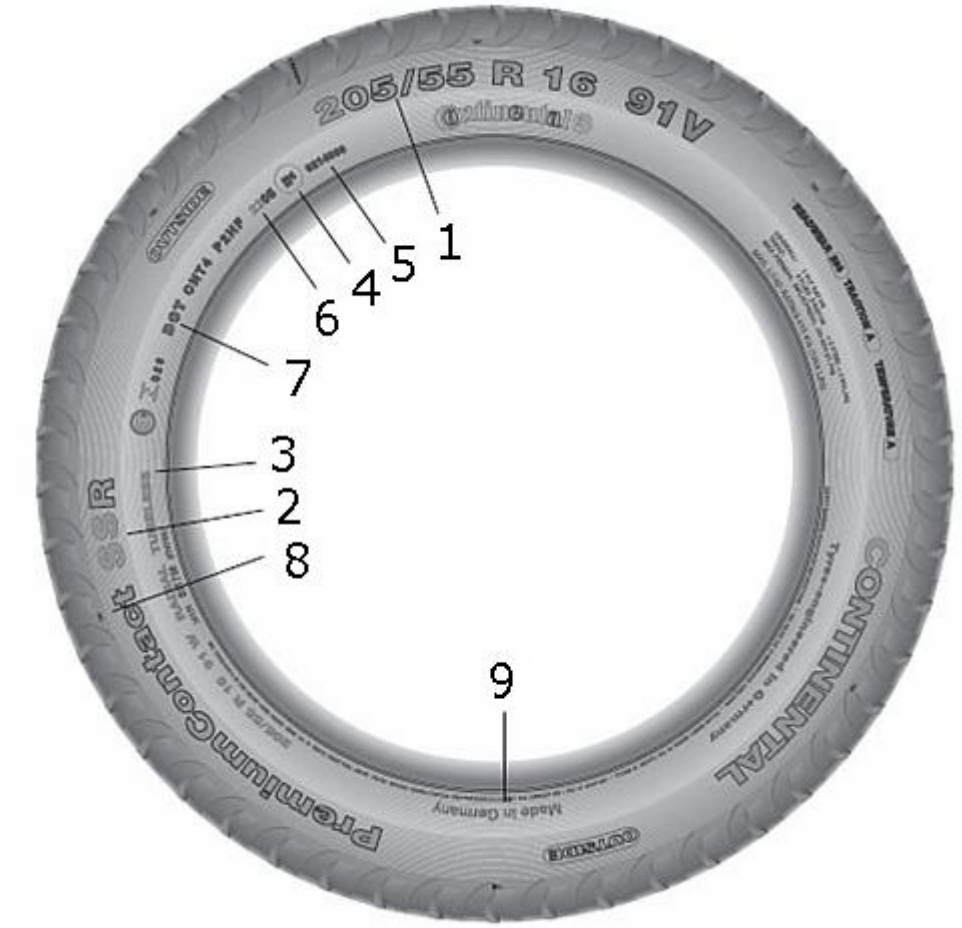
Celkový průměr pneumatiky bez zatížení.

- Maximální průměr pneumatiky

Celkový průměr pneumatiky se zatížením.

1.6 OZNAČOVÁNÍ PNEUMATIK

Na pneumatice je už od vulkanizace v lisovací formě vyraženo spoustu informací udávající rozměry, hmotnostní a rychlostní indexy, datum výroby a další informace, které specifikují použití pneumatiky nebo další speciální vlastnosti.



Obrázek 11: Značení pneumatiky

1.	205	šířka pneumatiky v milimetrech
	55	výška pneumatiky v procentech k její šířce
	R	radiální konstrukce
	16	velikost disku v palcích
	91	index nosnosti
	V	index rychlosti
2.	SSR	speciální označení pro pneumatiky schopné jet s defektem
3.	TUBELESS	bezdušové pneumatiky
4.	ECE norma	znak a číslo splněné ECE normy (stejné u 5.)
6.	DOT kód	informace o závodě, kde a kdy byla pneu vyrobena (stejné u 7.)
8.	TWI dezénu	Tread Wear Indicator – slouží pro rychlé posouzení hloubky
9.	Země původu	

Další možná označení

M+S	Mud and Snow – pneu určené do sněhu a bláta – nejsou zimní
RF; XL	Reinforced – zesílená kostra pneumatiky
FR	Flange Rib – ochrana ráfku před poškozením o obrubník
Rotation	Směr rotace pneumatiky [10]

1.7 DĚLENÍ PNEUMATIK

Pneumatiky můžeme dělit podle různých kritérií. Podle ročního období na letní a zimní, které se liší hlavně provozními teplotami i strukturou vzorku. Dále se dají pneumatiky dělit podle způsobu použití nebo zatížení. Jedním z hlavních kritérií je dělení podle dezénu a podle struktury.

1.7.1 PODLE DEZÉNU

Dezén je základní rozlišovací parametr pneumatik. Samotná přilnavost je právě určena velikostí profilování pneumatiky. Například závodní pneumatiky bez jakéhokoliv vzorku mají nejlepší přilnavost za sucha díky nepřerušované stykové ploše, zároveň zajišťují nejlepší přenos akceleračních a brzdných sil z hnacího ústrojí směrem na vozovku. I sebemenší vzorek pneumatiky výrazně snižuje stykovou plochu a adhezní vlastnosti pneumatik.

U přilnavosti za mokrých podmínek je tomu přesně naopak. Je třeba mít profilovaný dezén z důvodu odvodu vody zpod pneumatiky a zabránění tak vzniku aquaplaningu. Snížením kontaktní plochy pneumatiky se zvyšuje tlak, kterým působí na vozovku a voda pod pneumatikou je vymačkáváním odváděna drážkami pryč. Za deště by proto měla za pneumatikou s dostatečným vzorkem zůstat poměrně suchá stopa. Čím dříve se poté stopa opět zalije okolní vodou, tím horší je vzorek. Nejde o žádné přesně měření životnosti, ale pro rychlou kontrolu ve zpětném zrcátku za deště je to účelné řešení.

Podle rozmístění drážek v dezénu rozlišujeme čtyři základní tvary dezénu:

SYMETRICKÝ DEZÉN

Symetrický dezén mají zpravidla nejlevnější typy univerzálních pneumatik a protektory. V běhounu mají symetrické drážky, a tudíž nezáleží na směru rotace pneumatiky, lze ji tedy libovolně namontovat na kolo kteroukoliv stranou. Nespornou výhodou symetrického dezénu jsou jeho vyvážené vlastnosti a vysoká brzdná účinnost na mokré i suché vozovce. [11]

Obrázek 12: Symetrický dezén [12]

Obrázek 13: Směrový dezén [12]

SMĚROVÝ DEZÉN

Směrový dezén je používán místo symetrického dezénu, jelikož šípovitý dezén výborně odvádí vodu a zajišťuje snazší a bezpečnější vedení a výbornou trakci na zasněžené vozovce. Malou nevýhodou tohoto typu dezénu je o něco větší hlučnost a nižší kilometrový proběh. Směr odvalování šípovitého dezénu je pak dán ukazatelem na boku pneumatiky - šipka s nápisem Rotation. [11]

ASYMETRICKÝ DEZÉN

Asymetrický dezén bývá u dražších pneumatik. Běhoun je rozdělen na několik zón, kde každá zóna plní jinou funkci. Na vnější straně běhounu jsou velké tuhé bloky pro zvýšení pevnosti bočnice, snížení hluku, lepší odvalování pneumatiky a zvýšení stability při jízdě v zatáčce. Podélné drážky a středové žebrování slouží pro lepší trakci. Na vnitřní straně běhounu jsou segmenty více prořezané a obsahují vodící drážky. Mají za úkol především odvádět sníh a vodu a chránit tak vozidlo před vznikem aquaplaningu. Na boku je označení pro vnější a vnitřní část, aby byla pneumatika namontována ve správném směru odvalování. [11]

Obrázek 15: Asymetrický dezén [12]

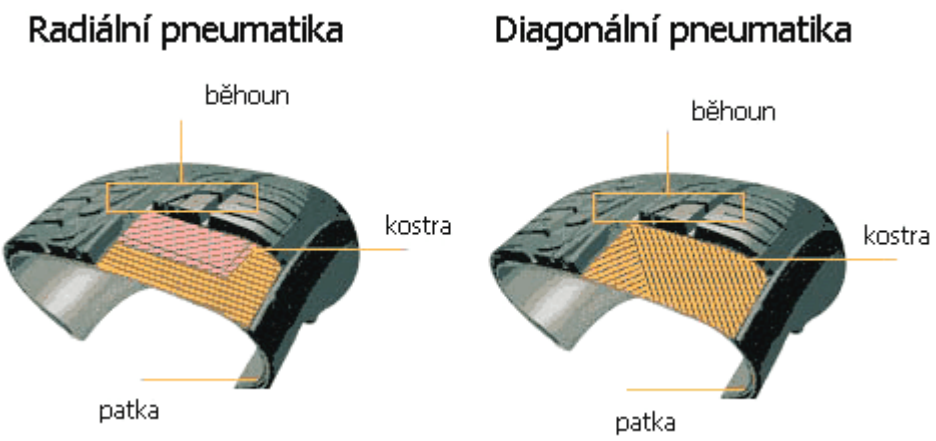
Obrázek 14: Směrový asymetrický dezén [13]

ASYMETRICKÝ SMĚROVÝ DEZÉN

Asymetrický směrový typ dezénu se v dnešní době pro běžný provoz už nedělá. Význam má pouze pro automobilové závody (např. Formule 1, rallye atd.). Podle dezénu pak dělíme pneumatiku na pravou a levou, neboť je určen směr otáčení. [11]

1.7.2 PODLE STRUKTURY

Z hlediska struktury dělíme pneumatiky na radiální a diagonální. Diagonální pneumatiky jsou dnes na ústupu, přesto se s nimi setkáváme například u zemědělských strojů. U osobních automobilů můžeme říci, že majoritní většina jsou pneumatiky radiální.

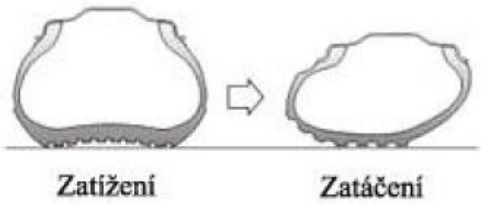


Obrázek 16: Rozdíl mezi stavbou diagonální a radiální pneumatiky [10]

DIAGONÁLNÍ PNEUMATIKA

Diagonální pneumatika je tvořena textilními vrstvami šikmo od jednoho patkového lana k druhému, většinou pod úhlem 30 °- 40 °. Počet vrstev se odvíjí od nosnosti a rozměrů pneumatiky. Materiálem pro výrobu těchto pláten je rayon, nylon nebo ocel a jeho volba je podmíněna požadavky na tuhost a pevnost pneumatiky. Konce pláten jsou na obou koncích přehnuty přes jádro patky, které je tvořeno prstenci z ocelových drátů. Patka představuje třecí spojení pneumatiky s diskem, na kterém je obuta. Patka tedy musí zajišťovat permanentní oporu a tím přenos akceleračního a brzdícího momentu mezi diskem a pneumatikou. U bezdušových pneumatik musí rovněž zajišťovat vzduchotěsnost. [10]

Při rotaci kola vzniká podélný trakční pohyb, který nutí diagonálně uložené vrstvy se neopatrně rozšiřovat a zužovat v závislosti na namáhání. Tření, které vzniká těmito mikropohyby, se značně podílí na energetických ztrátách a zahřívání celé pneumatiky, což v delším časovém horizontu znamená zhoršení kvality pneumatiky a snížení její životnosti. [10]



Obrázek 17: Vliv zatížení a zatáčení na diagonální pneumatiku [19]

V nezatíženém stavu není navíc pneumatika kulatá, ale mírně elipsovitá. Při zatížení se zplošťuje, a čím je zatížení větší, jsou strany běhounu více tlačeny k zemi, zatímco střed se od země zvedá. Tato skutečnost má za následek nerovnoměrnou přilnavost. Vlivem bočních sil nesedí diagonální pneumatika kvůli nepružnosti bočnic na zemi celou plochou – jeden okraj je deformovaný a druhý má tendenci se odlepovat od země. Výsledkem je značná ztráta původního směru. [10]

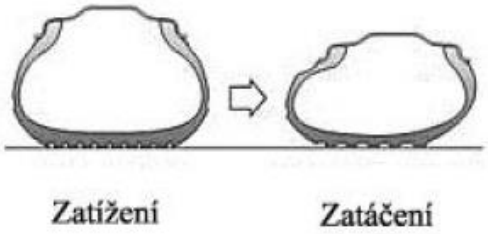
Všechny tyto negativa vedli k naprosté dominanci používání radiálních pneumatik u osobních automobilů.

RADIÁLNÍ PNEUMATIKA

Radiální struktura se skládá z vrstvy proužků textilu, kdy každý proužek je uložen kolmo ke směru pohybu pneumatiky. Na koruně pneumatiky je tato kordová tkanina zakončená pásem koruny, vytvořeným z několika vrstev vyztužených ocelovými nárazníky. Tyto korunní vrstvy jsou položeny na sebe tak, aby se překrývaly v různých úhlech. Jednotlivé vrstvy jsou pokládány odlišným způsobem i na bočnicích, takže každá část pneumatiky je speciálně řešena k výkonu své funkce.[10]

Vyztužení bočnic je tvořeno jednou tenkou textilní vrstvou a jednou tenkou vrstvou pryže. Směrem dovnitř pneumatiky je na koruně textilní výztuha, pokryta pásem ocelového nárazníku. Takto zkonstruovaná pneumatika umožňuje pružnost bočnic a tuhost koruny. [10]

V bočnicích je smykové napětí mezi paralelními vlákny slabé a pryž je relativně tenká. Díky tomu nevzniká příliš velké tření ani teplo. Koruna si zachovává svůj tvar téměř beze změny a struktura je tedy neustále stabilní a při jízdě zůstává přitisknuta k povrchu. Díky těmto minimálním deformacím se prodlužuje životnost pneumatiky. [10]



Obrázek 18 : Vliv zatížení a zatáčení na radiální pneumatiku [19]

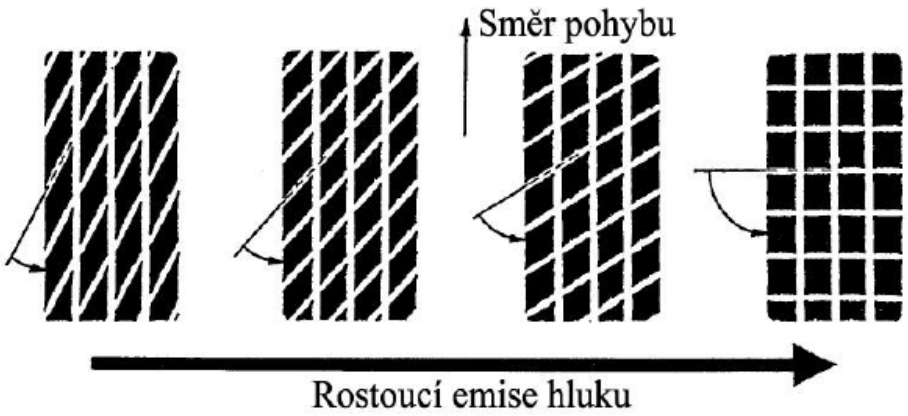
Pneumatika se dotýká téměř celou plochou vozovky i bez zatížení. Po zatížení se styčná plocha ještě zvětší, hlavně v podélném směru. Bloky běhounu jsou přitisknuty celou plochou a poskytují maximální přilnavost. Díky pružnosti bočnic je pneumatika nejen schopna pohltit nerovnosti vozovky, ale fungují téměř jako kloubový závěs mezi kolem a běhounem, takže pneumatika může zůstat celou plochou běhounu ve styku s vozovkou a udržovat žádoucí směr jízdy. Nevýhodou radiálních pneumatik je, že tuhý vyztužený pás způsobuje podélné oscilace pneumatiky, které je třeba náležitě odtlumit vozidlovými tlumiči, jinak by docházelo k nežádoucímu hluku a vibracím karoserie při jízdě po dlažebních kostkách nebo horším povrchu. [10]

Jedinou nevýhodou radiálních pneumatik ve srovnání s diagonálními je větší choulostivost tenkých bočnic. Dále již převažuji pouze výhody:

- výrazně vyšší životnost
- vyšší zatížitelnost při nižší váze pneumatiky
- menší valivý odpor
- lepši chování na mokru a odolnost vůči aquaplaningu
- schopnost přenést větší příčné síly za stejných hodnot tlaku v pneumatice.

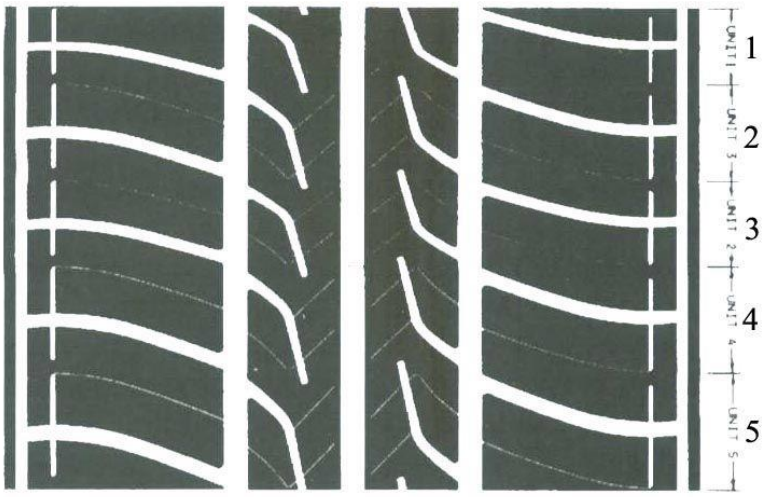
1.8 PNEUMATIKY A HLUČNOST

V dnešní době je hluk automobilů důležité téma. Staví se protihlukové bariéry, omezuje maximální rychlost a mnoho dalších opatření. Velkou měrou se na celkových hlukových emisích automobilu podílí samotné pneumatiky. Ve snaze zajistit tyto emise co nejmenší, jsou nuceni výrobci pneumatik dělat určité kompromisy, protože jedním z nejvíce ovlivňujících faktorů je natočení drážek vůči směru jízdy. Čím jsou kratší, tím lépe odvádí vodu, ale čím jsou více natočeny kolmo na směr jízdy, produkují více hluku.



Obrázek 19: Vliv dezénu na hlukové emise automobilu [3]

Společnosti zabývající se výrobou pneumatik objevily řešení. Pokud bloky na pneumatice nejsou všechny stejně velké, ale mění se jejich velikost, nevydávají monotónní zvuk, ale takzvaný šedý šum. Ten je pro lidské ucho příjemnější a méně slyšitelný, i když je hodnota hlasitosti vydávaného hluku beze změny. [2]

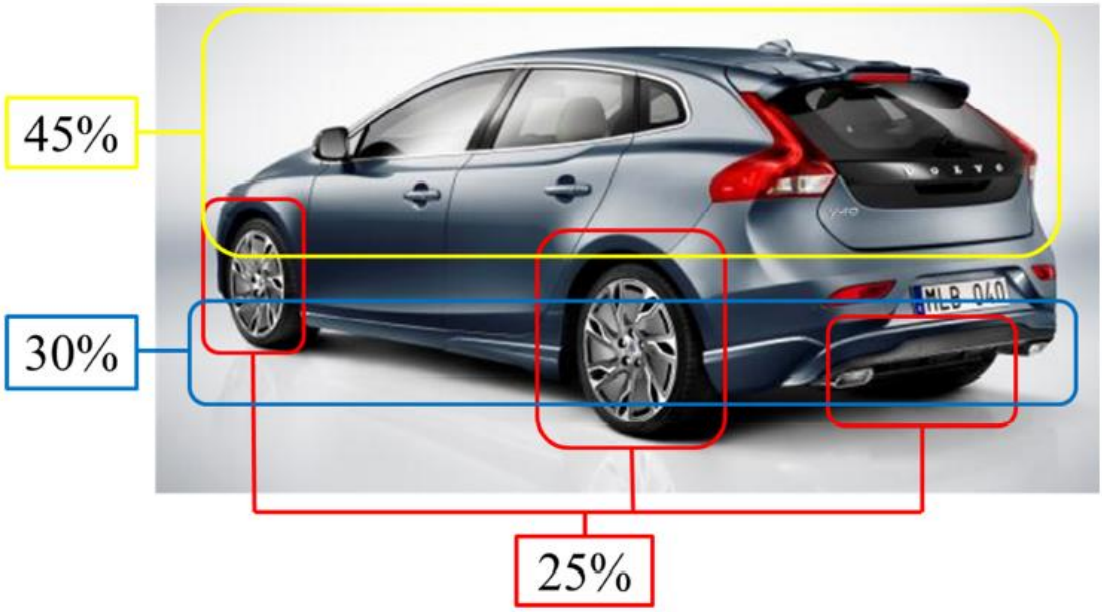


Obrázek 20 Rozdíl vzdálenosti drážek [2]

2 VLIV PNEUMATIKY NA AERODYNAMIKU AUTOMOBILU

Poslední dobou se stále více zpřísňují ekologické normy pro automobily, stejně tak se stále zvyšují ceny pohonných hmot. Na automobilový trh je tak vyvíjen tlak, co nejvíce snížit spotřebu paliva osobních vozidel. Toho se dá dosáhnout různými způsoby – automobilky samotné se snaží maximálně snížit ztráty ve svých pohonných jednotkách, ať už to jsou ztráty třecí, mechanické, nebo chemické, dalším způsobem je přidávání elektromotorů a tvorba hybridních automobilů, gumárenské společnosti vytváří pneumatiky šetřící palivo, které mají trochu jiný tvar, ale hlavně dosahují minimálních hodnot valivého odporu. Jedním z nejspolehlivějších faktorů, kterým se dá dosáhnout velmi významného snížení ztrát, je zlepšení aerodynamických prvků automobilu. Ještě výrazněji se tento jev promítne, pokud automobil jezdí často po rychlostních silnicích a dálnicích, protože aerodynamický odpor roste s druhou mocninou rychlosti automobilu. Vozidlo s lepší aerodynamikou nejen že spotřebuje méně paliva, ale má lepší akcelerační schopnosti, vyšší maximální rychlost a větší maximální dojezd, což je jeden z největších problémů elektrických automobilů. Automobil s vynikající aerodynamikou ale nemusí vždy úplně nejhezčí, což platí i obráceně. Proto je výsledný tvar auta většinou kompromisem obou odvětví. [16]

Nejvíce se o aerodynamice mluví v souvislosti s karoserií. Existují ale i další partie automobilu ovlivňující odpor vzduchu, kterým taková pozornost věnována není. Na obrázku 22 je vidět, že jednou z těchto partií jsou pneumatiky. Karoserie automobilu se na aerodynamický ztrátách



Obrázek 21: Rozdělení aerodynamických odporů [16]

podílí méně než 50 %. Samotné pneumatiky a podběhy se podílí jednou čtvrtinou celkového aerodynamického odporu a dohromady s podvozkem je to více než polovina celkových ztát. Je tu tedy velký prostor pro zlepšení.

2.1 AERODYNAMIKA PNEUMATIKY

Velikost aerodynamického odporu je charakterizována pomocí součinitele aerodynamického odporu vzduchu c_x. Snahou všech je dosáhnout co nejmenších hodnot c_x, protože hodnota tohoto součinitele je měřítkem kvality tvarů vozu z hlediska obtékání jeho karoserie vzduchem. U moderních automobilů se tato hodnota pohybuje kolem 0,3. Je to velice puntičkářská práce, protože na hodnotu c_x má vliv sebemenší detail.

$$c_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \tag{1}$$

Fx …*odporová síla* $[N]$

ρ…*hustota vzduchu* $[kg \cdot m^{-3}]$

V…*relativní rychlost proudu vzduchu* $[m \cdot s^{-1}]$

A…*čelní plocha vozidla* $[m^2]$

Při testování automobilů v aerodynamickém tunelu na obtékání vzduchu, je možné zviditelnit proudící vzduch, aby zaměstnanci aerodynamického tunelu mohli vidět, jakým způsobem vzduch vozidlo nebo v tomto případě pneumatiku obtéká, kde je proudění laminární a kde naopak turbulentní. Jak už bylo zmíněno výše, pneumatiky se podílí na aerodynamickém odporu hodnotou okolo 25 %. Jejich odpor je ovlivňován tvarem a dalšími vlastnostmi a jejich změnou v závislosti na rychlosti nebo zatížení.

2.1.1 VLIV KONSTRUKCE PODBĚHU

Automobil ovlivňuje tvar pneumatiky hlavně tím, že ji zatěžuje. Čím více je pneumatika zatížená, tím se zvětšuje kontaktní plocha pneumatiky (pokud se nemění tlak). Kompletní váha vozidla spočívá na disku kola a přes bočnice je odváděna do pneumatiky a do kontaktní plochy. Disk je v podstatě zavěšen za bočnice a tím dochází k zatížení kordů tahem v horní části pneumatiky a tlakem v oblasti kolem kontaktní plochy.

Záleží také na tvaru podběhů, a jak jsou řešené otvory pro proudění vzduchu od přední části automobilu. Dá se říct, že u vozidla typu SUV bude mít pneumatika větší podíl na celkovém odporu automobilu, než u supersportu s velmi nízkou světlou výškou. Další vlivy jsou nastavení geometrie nápravy, jako je například odklon. Nicméně vliv těchto nastavení je minimální. [17]

2.1.2 TLAK V PNEUMATIKÁCH

Nahuštění pneumatiky jde ruku v ruce se zatížením automobilu, je to vlastně opora, která drží váhu celého vozidla. Pří působení vertikální síly na pneumatiku tlak uvnitř pneumatiky odolává této síle tak, že vytváří kontaktní plochu úměrnou velikosti síly.

Při dostatečném tlaku v pneumatice je schopna zatížení správně přenášet a bezpečně plnit jí příslušené funkce. Při velkém zatížení se neúměrně zvyšuje kontaktní plocha, a protože šířka stopy se mění minimálně – je dána konstrukcí pneumatiky – natahuje se hlavně do délky. Tomu

se dá předejít zvýšením tlaku. Naopak při nízkém zatížení je vhodné snížit i tlak, z důvodu zvýšení kontaktní plochy a správného sjíždění pneumatiky. [17]

Při rozjezdu a brždění dochází v bočnicích pneumatiky k velkým změnám silových působení ve vláknech. Vlákna pneumatiky jsou pevnější na tah než na tlak, což je dáno jejich konstrukcí a tak jsou nezbytné minimálně dvě vrstvy na zachycení těchto sil. Pokud jsou pneumatiky řádně nahuštěné, zajišťuje to správné napětí v bočnicích a ty pak mohou správně fungovat a odolávat těmto dynamickým změnám.

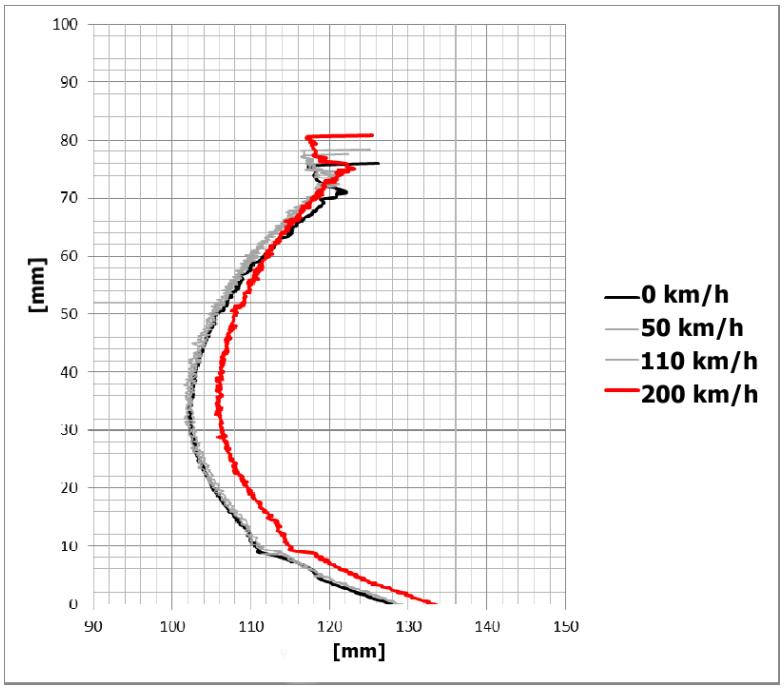
Podle studie [17] tlak v pneumatice ovlivňuje aerodynamiku zásadním způsobem. Při tlaku 1,5 bar se značným způsobem zvětšuje šířka pneumatiky a koeficient c_x je oproti základním 2,5 bar zvýšen o 0,004. Opačným způsobem ovlivňuje šířku přefouknutí pneumatiky – šířka se snižuje a zvětšuje se poloměr. Koeficient odporu c_x se poté změní o -0,003.

2.1.3 ŠÍŘKA PNEUMATIKY

Stejně jako tlak v pneumatice, také její šířka je důležitý parametr pro koeficient aerodynamického odporu c_x. Oproti referenční pneumatice 205/55 R16 byl u pneumatiky širší (225/50 R16) i užší (195/60 R16) pozorován značný rozdíl v aerodynamickém odporu. Vyjádřeno v absolutních číslech Δc_x největší a nejmenší pneumatiky bylo 0,008. V porovnání s referenční pneumatikou byl Δc_x = 0,005 pro širší a Δc_x = -0,003 pro pneumatiku užší. [17]

2.1.4 RYCHLOST JÍZDY

Dalším parametrem, který ovlivňuje tvar pneumatiky je rychlost jízdy. S rychlostí jízdy vznikají odstředivé síly, které mění tvar pneumatiky a zvedají celý automobil. Je třeba ale vzít v úvahu rychlost, kterou je potřeba jet, aby byl tento vliv znatelný. Do 110 km/h je tento efekt zanedbatelný a opravdu projevovat se začne až v rychlostech nad 200 km/h. Rozdíl v šířce



Obrázek 22: Vliv rychlosti na tvar pneumatiky [17]

pneumatiky vzniklý rychlostí vozidla může činit mezi 80 a 200 km/h až 8 mm, což se projeví na hodnotě odporu změnou o 0,003 až 0,008. [17]

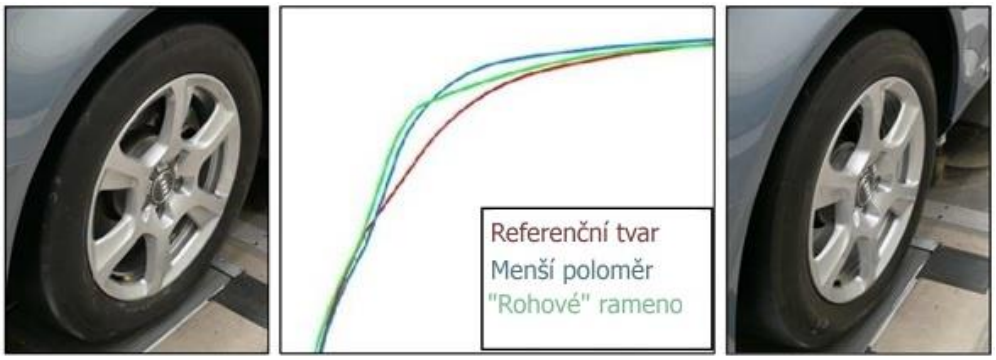
Na obrázku 23 je vidět, že do rychlosti okolo 100km/h se s tvarem pneumatiky neděje oproti statickému tvaru téměř nic a až zmíněná rychlost přibližně 200 km/h se na tvaru projeví.

2.1.5 ZNAČENÍ PNEUMATIKY

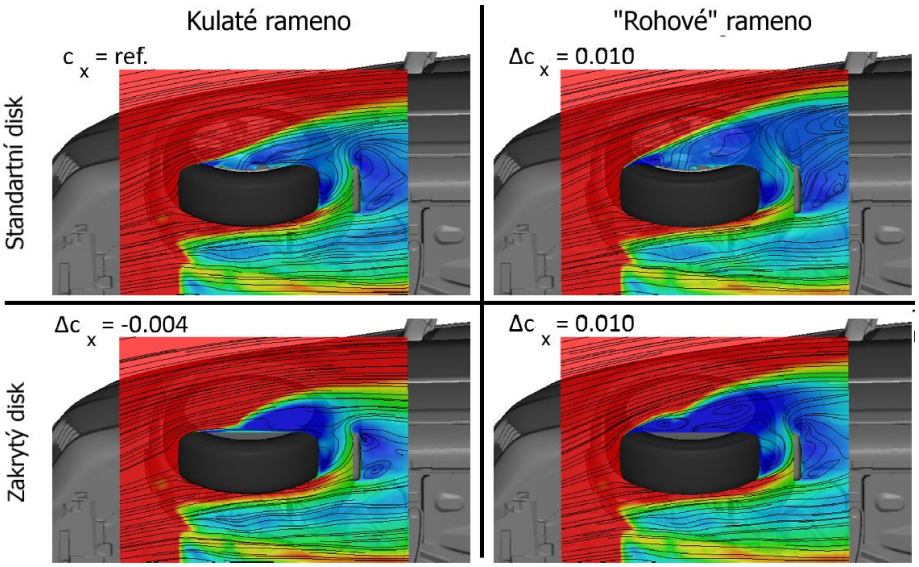
I když se to může zdát přehnané, aerodynamický odpor výrazně zvyšuje i značení pneumatiky. V aerodynamickém tunelu byly porovnávány pneumatiky Michellin Energy Saver ve dvou verzích, z nichž jedna byla upravena tak, že neměla na sobě žádné značení. Takto upravená pneumatika dosáhla o 0,004 lepší hodnoty koeficientu aerodynamického odporu. Po dalším zkoumání se došlo k závěru, že nejlepší řešení je zapuštěné značení, u kterého není téměř žádný rozdíl oproti pneumatice bez popisu. [17]

2.1.6 RAMENO PNEUMATIKY

Velkou měrou se na aerodynamickém odporu podílí také rameno pneumatiky. Je to část, kde přechází běhoun do bočnice. Rozdíl mezi kulatým ramenem pneumatik na obrázku 24 vlevo a ramenem pneumatiky vpravo je 0,006. Z toho lze vyvodit, že Energy Saver pneumatika by měla jednoznačně mít co největší možný poloměr. Takto významný rozdíl je způsobený obtékajícím vzduchem, který pokud je rameno kulaté, proudí těsně kolem pneumatiky, kdežto pokud je na rameni znatelný „roh“ proud vzduchu se oddělí od pneumatiky a vzniká výsledný odpor. Ještě lepších výsledků je možné dosáhnout zakrytím disku a vytvořením jednolité plochy. Tyto jevy jdou vidět na CFD simulacích na obrázku 25 [17]



Obrázek 23: Rozdíl mezi "rohovým" a kulatým ramenem pneumatiky [17]



Obrázek 24: CFD simulace proudícího vzduchu kolem kulatého a "rohového" ramene

3 MĚŘENÍ DEFORMACE PNEUMATIKY

Jak bylo napsáno v úvodu, tato diplomová práce se zabývá měřením zatížené pneumatiky. Nejrozšířenější způsoby měření pneumatiky jsou pomocí optických nebo laserových skenerů. Vzhledem k pozdějšímu zpracování a měřícím systémům, kterými disponuje Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, byla zvolena možnost měření pomocí 3D optických skenerů.

3.1 MĚŘENÍ POMOCÍ OPTICKÝCH 3D SKENERŮ

Optické měřicí systémy se ve strojírenství začaly ve velké míře využívat teprve na sklonku 90. let. Poslední roky vývoje, kdy počet jejich aplikací zejména v automobilovém průmyslu neustále roste, dávají plně za pravdu těm, kteří od počátku sázeli na jejich výhody. Práce na měření součásti je zejména u tvarových ploch nesrovnatelně rychlejší. Oproti bodovým dotykovým systémům snímá optický skener naráz celou plochu a umožňuje sejmutá data ukládat do různých formátů. Moderní systémy dnes umožňují získat z oskenovaných dat řezy nebo obrysové a kontrastní křivky pomocí mraku bodů, tvarové plochy součásti exportovat do formátu STL, vyhodnotit odchylky v souřadnicově zadaných bodech nebo přímo generovat barevnou mapu odchylek od CAD dat. [21]

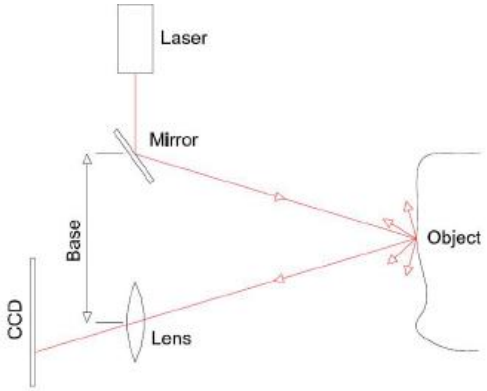
Tyto skenery snímají skenovaný objekt pomocí několika kamer umístěných v různých úhlech. Při skenování optickými skenery je nejlepší použít otočný stůl, na který se umístí skenovaný předmět, a po každém snímku se stůl pootočí. Projektor osvěcuje povrch dílu přes vestavěný rastr kontrastními světelnými proužky, jejichž tvar na povrchu součásti je snímán dvěma kamerami. Pomocí optických zobrazovacích rovnic jsou z nich automaticky vypočítány přesné 3D souřadnice jako mrak bodů, který může obsahovat až 4 miliony bodů z jednoho záběru. Po získání snímků ze všech úhlů se přejde na zpracování dat a vytvoří se digitalizovaný 3D model. Před začátkem skenování je třeba na skenovaný objekt umístit měřící body, podle kterých se optický skener orientuje v prostoru a ví, kde se zrovna na dané součásti nachází, díky unikátní vzdálenosti bodů od sebe. Podle velikosti tělesa se používají body o průměru 1,5 ale také třeba 5 mm. Pro měření v této práci byly používány body o průměru 3 mm. Pro přesné měření je potřeba mít na každém snímku minimálně 3 body ze snímku předchozího. Čím je jich více, tím je měření přesnější, neboť pokud je bodů méně, snímek není možné správně spojit s již naskenovanými snímky.

Pro měření popisované v této práci byl použit digitální skener ATOS firmy GOM. Ten je založen na principu triangulace, k čemuž využívá stereoefektu dvou snímacích kamer.

Obrázek 25: Atos Compact Scan[25]

3.2 MĚŘENÍ POMOCÍ 3D LASEROVÝCH SKENERŮ

Další možností jak zachytit tvar pneumatiky je za pomoci 3D laserových skenerů. Laserové skenovací systémy umožňují bezkontaktní určování prostorových souřadnic, 3D modelování, vizualizaci složitých staveb a konstrukcí, interiérů, podzemních prostor, libovolných terénů atp. s mimořádnou rychlostí, přesností, komplexností a bezpečností. Nasnímaný objekt může být pomocí softwaru zobrazen ve formě mračen bodů, na jejichž základě může být vytvořen model objektu, který lze přenést do CAD systému



Obrázek 26: Schéma funkce laserového skeneru

Princip laserových skenerů je založen na projekci laserového paprsku („spot“, „line“) na povrch skenovaného objektu, který se odráží zpět, a je snímán pomocí CCD/CMOS snímače, kde se například pomocí fázového posunu určí doba odrazu, a následně vzdálenost od povrchu objektu. Podle uspořádání snímacího zařízení jednotlivých typů se pro vyhodnocení prostorových souřadnic (pozic) nasnímaných bodů využívá metody triangulace nebo TOF (time of flight). [21]

Tímto způsobem se získá informace o geometrii povrchu. Pokud je požadováno také skenování textury povrchu je nutno přidat další CCD/CMOS snímač, jenž snímá barvu povrchu, která se ve výsledku propojí se vzniklým 3D tělesem. Podle uspořádání lze integrovat odměřovací i texturovací funkci do jednoho snímače, ovšem na úkor přesnosti, složitosti výroby a v neposlední řadě i ceny.

Obrázek 27: Laserový skener v praxi[17]

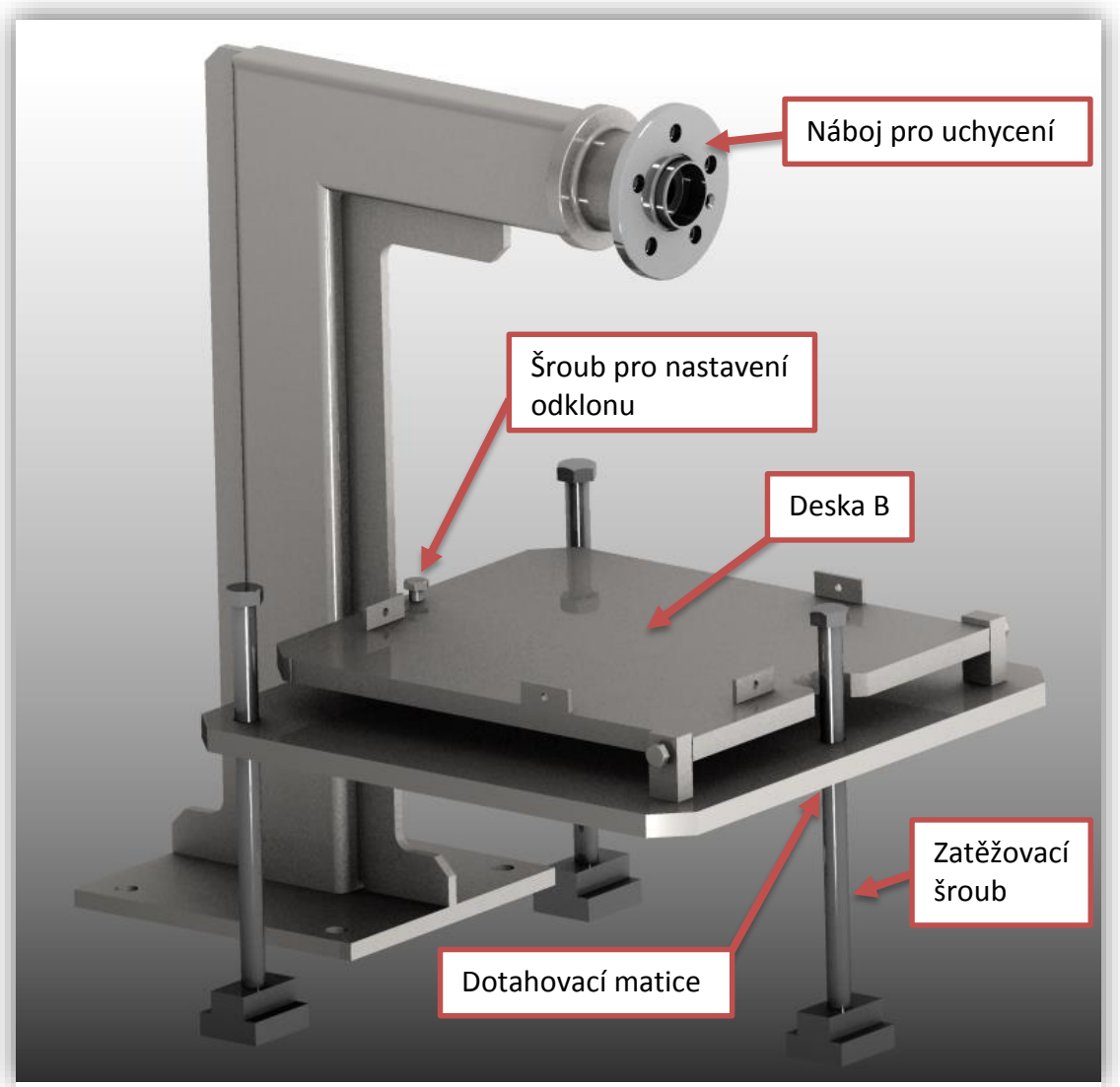
Rychlost snímání je určena především rychlostí načítání dat z CCD/CMOS snímačů vedoucích k dalšímu zpracování. Podle různé konstrukce snímače a světelném výkonu laseru se tato doba pohybuje od 10ms do 100ms.[21]

Z principu je zřejmá vysoká rychlost nasnímaných bodů za jednotku času (řádově 10 000 až 100 000 bodů/s), které lze v reálném čase zpracovávat do polygonálních sítí. Výsledky lze exportovat do všech běžných formátů např. STL nebo IGES.[21]

Nespornou výhodou takovýchto skenerů je, že dokáží měřit i špatně přístupné plochy a prostory, jako jsou například neprůchozí díry. S touto metodou je možné například u pneumatik postihnout i tvar při otáčení a získat tak data i z dynamického zatěžování.

4 NÁVRH MĚŘÍCÍHO STANOVIŠTĚ

Pro zvolení metody, jakou bude měření tvaru pneumatiky prováděno, je potřeba vzít v úvahu její možnosti a limity. Optický skener musí mít „dobrý výhled“ na měřenou součást a zároveň musí být možné pneumatiku vystavit stálému zatížení. Aby bylo pneumatiku možné zatížit, je potřeba ji nejdříve uchytit a vystavit podmínkám, které na ni působí v reálném prostředí na vozidle. Přímo na automobilu není možné měření tvaru pneumatiky provést, proto bylo třeba navrhnout zařízení – měřící stanoviště, na kterém by mohla být pneumatika namontována a zatěžována.



Obrázek 28: Měřící stanoviště

4.1 ZADÁNÍ A POŽADAVKY

Aby byla měření spolehlivá a měla dobrou vypovídající hodnotu, bylo třeba brát v úvahu několik podmínek a požadavků, které musela splnit.

- Možnost pevného zajištění kola
- Zatížení 500 kg
- Deformace v ose zatížení maximálně 2 mm

- Možnost změny odklonu
- Jednoduchost + co nejvyšší možná tuhost

Pneumatiku na disku bylo třeba dobře zajistit, aby se zamezilo jejímu pohybu v průběhu měření. Proto byl použit náboj kola z vozu Škoda Fabia. Disk se zajistil pěticí šroubů a po zatížení už s ním není možné hýbat.

Vzhledem k průměrné váze osobního vozidla 1,6 tuny [23], byla uvažována přiměřená rezerva a bylo dohodnuto, že stanoviště musí unést zatížení odpovídající 500 kg hmotnosti, což odpovídá vozidlu s hmotností 2 tuny. Zároveň bylo stanoveno a upřesněno, co znamená „musí unést“. Číselně vyjádřeno – aby vypovídající hodnota měření byla na akceptovatelné úrovni, stanoviště se nesmělo zdeformovat o více jak 2 mm v ose zatížení. Pokud by se deformovalo více, měnil by se odklon kola a zatížení pneumatiky a měření by bylo znehodnoceno.

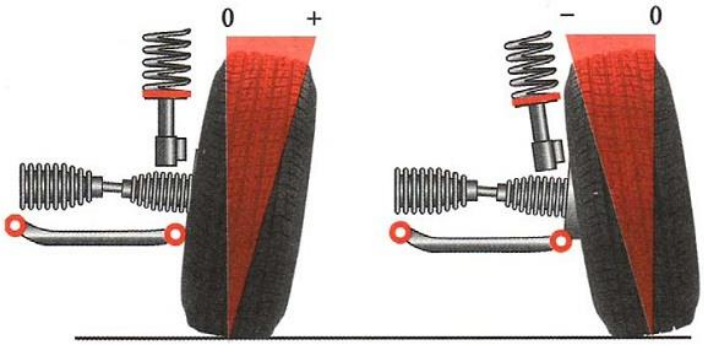
Aby mohlo měření opravdu reflektovat reálné podmínky, bylo třeba zatěžovací část zařízení navrhnout tak, aby se dal měnit odklon kola. Právě odklon a možnost ho měnit byla další konstrukční podmínkou. Proč je odklon kola důležitý, je popsáno v následující podkapitole.

Poslední podmínkou byla jednoduchost celého zařízení a systému zatěžování, aby nedocházelo ke zbytečným komplikacím a nesnižovala se tuhost.

Zařízení bylo zkonstruováno s úmyslem používat ho pouze v laboratořích UADI, proto bylo při návrhu využito stávající vybavení.

4.1.1 ODKLON KOLA

Odklon kola je úhel mezi svislou osou kola a svislou osou vozidla, díváme-li se zepředu nebo zezadu. Využívá se při návrhu řízení nebo nápravy. Je-li horní část kola vně dolní části (dále od vozidla), říká se tomu kladný odklon, je-li dále od vozidla dolní část, jde o záporný odklon. Měří se ve stupních a minutách.



Obrázek 29: Odklon vs příklon na pneumatice [27]

Z hlediska zrychlení v přímém směru nám bude nejvíce vyhovovat nulový odklon, kde je pneumatika kolmo k vozovce. Při průjezdu zatáčkou je karoserie vlivem odstředivých sil nakláněna vně zatáčky. Z tohoto důvodu je pro zatíženější vnější kola výhodnější příklon, protože nastavuje kolo do lepší pozice. Na druhou stranu pro vnitřní kolo by byl lepší odklon.

U nezávislého zavěšení kol dochází při pružení ke změně odklonu, což budí boční síly působící opotřebení pneumatik a zvýšené namáhání zavěšení kola. Kolo se naklápí a setrvačnými silami vzniká moment, který má snahu naklápět karoserii. Kromě toho vzniká gyroskopický moment

k ose rejdu, který působí na řízení. To vše jsou důvody, proč je snaha při návrhu zavěšení, aby se při pohybu kola odklon měnil co nejméně.

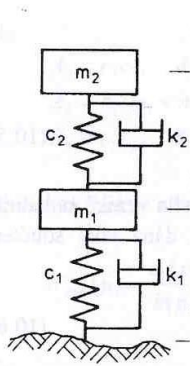
Pneumatika s nenulovým odklonem vytváří boční sílu ve směru odklonu. Pokud se tato síla vyskytuje při nenulovém smykovém úhlu (tj. když se pneumatika nepohybuje přímo ve směru své centrální roviny), nazývá se „tah odklonu“ (camber thrust). Síla způsobená odklonem kola závisí např. na konstrukci, tvaru, typu pneumatiky, tlaku v pneumatice, úhlu odklonu či úhlu smyku. Experimentálně bylo zjištěno, že tah odklonu vzniká boční deformací stopy pneumatiky. Pokud je stojící pneumatika s nenulovým odklonem zatížena, centrální rovina stopy je zakřivena. Pokud se však pneumatika odvaluje, jsou body vstupující do kontaktní plochy vozovkou nuceny pohybovat se stopou po přímé trajektorii, danou směrem pohybu pneumatiky. Vozovka působí na pneumatiku silami, které se snaží odstranit zakřivení trajektorie stojící pneumatiky. Suma těchto sil je právě tah odklonu. [24]

Vlivem nenulového odklonu tvoři kolo ve styku s vozovkou kuželovou plochu a má snahu se odvalovat po kružnici, jejíž střed leží v průsečíku osy kola s rovinou vozovky. Kola se přitom odvaluji směrem k sobě či od sebe (při negativním nebo pozitivním odklonu), což snižuje sklon ke kmitání a odklon kola tak má vliv na stabilitu vozidla v přímém směru. [24]

4.1.2 TLAK V PNEUMATICE

Při měření tvaru pneumatiky, kterému se budu věnovat v jedné z následujících kapitol, se budou měnit dvě veličiny – tlak v pneumatice a její zatížení. Právě tlak, kterým je pneumatika nahuštěná, ovlivňuje dvě hlavní funkce pneumatiky – radiální a boční tuhost pneumatiky.

Pneumatika se výrazně podílí na odpružení automobilu, což se dá ukázat na částečném modelu automobilu na obrázku 34, kde hmotnost m_2 zastupuje hmotnost odpružených hmot, připadajících na jednu nápravu a hmotnost m_1 reprezentuje hmotnost kol nápravy a jiných dílů, které nejsou odpruženy. Modelová pružina c_2 zastupuje obě automobilové pružiny jedné nápravy, zatímco tlumič k_2 je součinitel tlumení obou tlumičů. Radiální tuhost pneumatiky je vyjádřena pružinou c_1 a tlumič k_1 představuje koeficient tlumení pneumatiky. [18]

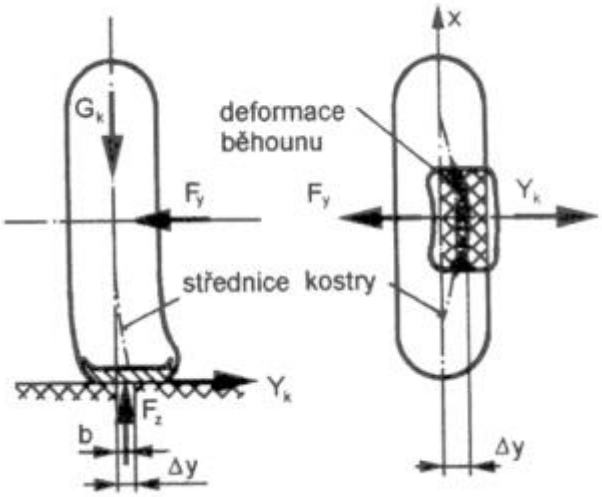


Obrázek 30: Částečný model automobilu [18]

Pokud zkoušíme různé tlaky v pneumatice a sledujeme její zatížený tvar, a jak se se změnou zatížení mění, je nutné si uvědomit, že změna tlaku neovlivňuje pouze tvar, ale také celkový jízdní komfort automobilu a jeho jízdní vlastnosti. Radiální tuhost, která způsobuje pružnost v rovině kolmé na vozovku, je možné vypočítat jako poměr radiálního zatížení kola vůči radiální deformaci kola. Radiální tuhost pneumatiky roste mírně progresivně s tlakem uvnitř pneumatiky a zvyšuje tuhost pružiny c_1 z obrázku 34. Takže čím vyšší je nahuštění pneumatik,

tím se snižuje možnost pneumatiky tlumit nerovnosti vozovky a snižuje se jízdní komfort. Pro komfortní jízdu a utlumení vibrací je tedy vhodné mít v pneumatikách nižší tlak.

Boční tuhost, při které může dojít například při jízdě zatáčkou k posunutí středu kola, ovlivňuje hlavně jízdní vlastnosti vozu a směrovou stabilitu pneumatiky. Vybočování středu kola je způsobeno deformací kostry pláště a deformací běhounu. Boční tuhost pneumatiky je kromě konstrukce pneumatiky závislá také na jejím nahuštění. Se zvyšujícím se tlakem uvnitř



Obrázek 31: Boční tuhost pneumatiky [18]

pneumatiky se zvyšuje její boční tuhost. Pružnost pneumatiky v bočním směru je nežádoucí, protože jejím důsledkem dochází k vybočování vozidla ze směru určeném natočením kol, a tím zhoršuje směrovou stabilitu a řiditelnost vozidla. Pro správnou boční tuhost pneumatiky je tedy vhodné mít pneumatiky nahuštěné optimálním tlakem doporučeným výrobcem automobilu. [18][20]

Není tedy vhodné tlak v pneumatice určovat pouze podle nejvhodnějšího tvaru při zatížení, protože nahuštění pneumatiky je proměnná, která dokáže změnit kompletní vlastností pneumatiky.

4.2 POUŽITÍ ZAŘÍZENÍ – PRŮBĚH MĚŘENÍ

Použití zařízení spočívá v přišroubování obou dílů do kostek v upínací desce podlahy laboratoře UADI v budově C1 areálu Strojní fakulty VUT. Poté co se pneumatika nazuje na klasický plechový disk, je třeba změnit barvu jejího povrchu. Většina 3D optických měřících senzorů pracuje pouze s bílým, nebo alespoň matným povrchem, takže byla nastříkána šedou barvou. Jakmile je pneumatika připravena barevně, polepila se měřícími body tak, aby byly rozmístěny přibližně rovnoměrně, ale ne pravidelně. Na pneumatiku velikosti 16‘‘ bylo použito okolo 150 bodů.

Obrázek 32: Váha Computerscales® AccuSet II™ Basic Systém [28]

Po přípravě stanoviště i pneumatiky, bylo třeba nachystat „zátěžný stav“. Pneumatika byla přišroubována na náboj a dotažena utahovacím AKU šroubovákem. Na zatěžovací desku se umístila váha Computerscales® AccuSet II™ Basic System a hydraulickým heverem proběhlo zatížení na přibližnou hodnotu požadované hmotnosti. Po dotažení matek na dotahovacích šroubech se deska zafixovala na daném místě. Pak se už postupným dotahováním matek nastavila přesná hmotnost a za pomoci úhloměru požadovaný odklon. Takto připravený „zátěžný stav“ se zaznačí (výška utažení matic) na šrouby pomocí izolační pásky. Poté bylo zatížení uvolněno a mohlo se přejít k přípravě odlévací hmoty.

Odlévací hmota Lukopren se prodává jako bezbarvá tekutina. Bylo třeba před každým měřením namíchat jednu dávku společně s bílým barvivem a poté s dodaným katalyzátorem, který způsobil ztuhnutí hmoty. Míchání muselo probíhat v naprosto přesných poměrech, jinak hmota tuhla už v přípravné lahvi, nebo naopak netuhla téměř vůbec. Dávka takto namíchaného Lukoprenu byla nalita do odlévací formy a položena na váhu pod pneumatiku. Pak muselo proběhnout znovu zatížení pneumatiky – tentokrát rychleji, aby hmota byla měkká, když se do ní ponořovala pneumatika. Proto bylo nutné udělat přípravné zatížení. Odlévání stopy probíhalo na dvě etapy, z důvodu přesného otisku. Při zalití po zatížení se Lukopren nedostal do všech drážek dezénu a měření bylo znehodnoceno a nepoužitelné.

Jakmile je pneumatika zatížena už s Lukoprenem pod běhounem, byl na řadě 3D optický skener ATOS a software od firmy GOM Atos Professional. Vytvořilo se asi 150 – 200 snímků pneumatiky ze všech úhlů a stran. Na rozdíl od obvyklého měření na tomto skeneru se neotáčí skenovaný objekt, ale po každém snímku bylo třeba nastavit skener do nové polohy pro zachycení správného pohledu a úhlu. Takto vysoký počet snímků u relativně malého objektu byl potřebný z důvodu velkého počtu malých drážek dezénu a požadavku jejich přesného zachycení.

Po dokončení měření pneumatiky na stanovišti, se připravily další dvě až tři dávky odlévací hmoty a byly nality okolo pneumatiky. Vše se nechalo zatuhnout. Po zatuhnutí Lukoprenu se nalepilo zhruba 10 bodů a bylo uděláno dalších v průměru deset snímků, pro spojení nových bodů s těmi, které už byly zaevidovány z předchozích snímků. Poté se povolilo zatížení s maximální obezřetností, aby nebyl poškozen odlitek stopy. Takto připravený odlitek se přenesl na rovné místo a vnitřek stopy byl polepen menším množstvím bodů. Posléze bylo vyfoceno okolo dvaceti snímků stopy, které se spojily s dříve vyfocenými snímky, a vznikl tak kompletní obraz celé pneumatiky. Na závěr proběhlo spolygonyzování modelu a export do souboru s příponou *.STL, který byl dále zpracováván.

4.3 PEVNOSTNÍ KONTROLA V PROGRAMU ANSYS

Vzhledem k podstatě stanoviště bylo třeba provést kontrolu návrhu v programu Ansys Workbench 14.5, jestli vůbec vydrží maximální zatížení a zda splní požadavky popsané výše. Pro návrh byly důležité hlavně hodnoty napětí v kritických místech ramena a namáhání šroubů u zatěžovací desky, které se bude počítat podle empirických vztahů.

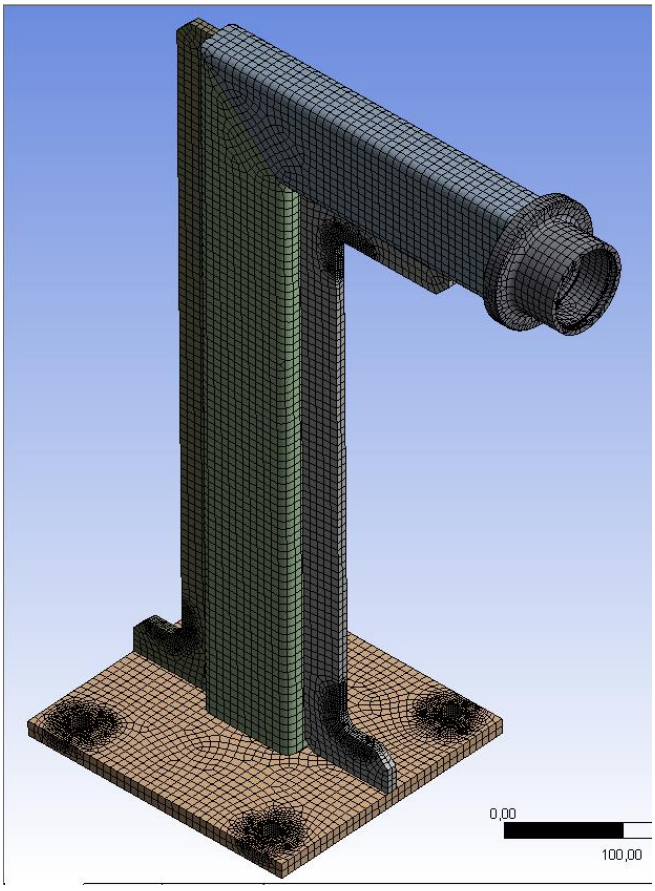
4.3.1 RAMENO

Simulace zatížení hlavní části celého stanoviště byla prováděna naimportováním modelu ve formátu *.stp a zvolením vhodných materiálových vlastností, sítě a okrajových podmínek.

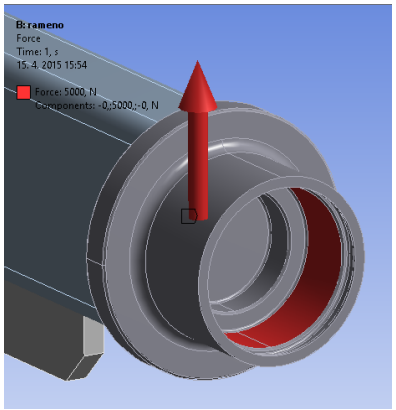
Před načtením modelu byly zadány následující materiálové vlastnosti:

- Modul pružnosti $E = 2{,}1 \cdot 105\ MPa$
- Hustota $\rho = 7850\ k \cdot gm^{-3}$

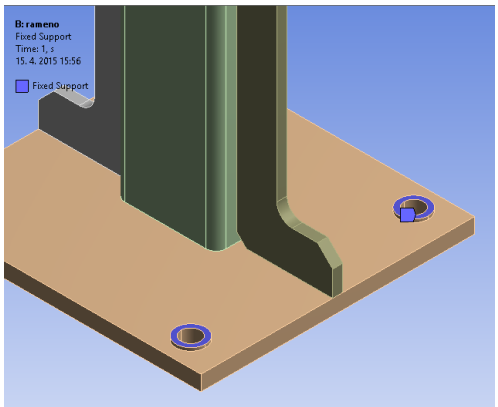
Síť byla nejdříve vytvořena automatickým meshovacím programem, ale z důvodu nesprávné velikosti elementů a metody byla nakonec vytvářena manuálně. Jako meshovací metoda byla zvolena „Hex-dominan“, jelikož měla poskytnout lepší výsledky než metoda tetrahedrons, kterou používá automatický program. Velikost prvků na velkých plochách, které nejsou významně zatěžovány, byla zvolena 20 mm. V kritických místech byla síť zmenšena na element velikosti 2 mm pomocí funkce „body sizing“, konkrétně metodou „sphere of influence“ s poloměrem 30 a 35 mm.



Obrázek 33: Ukázka vysíťovaného modelu

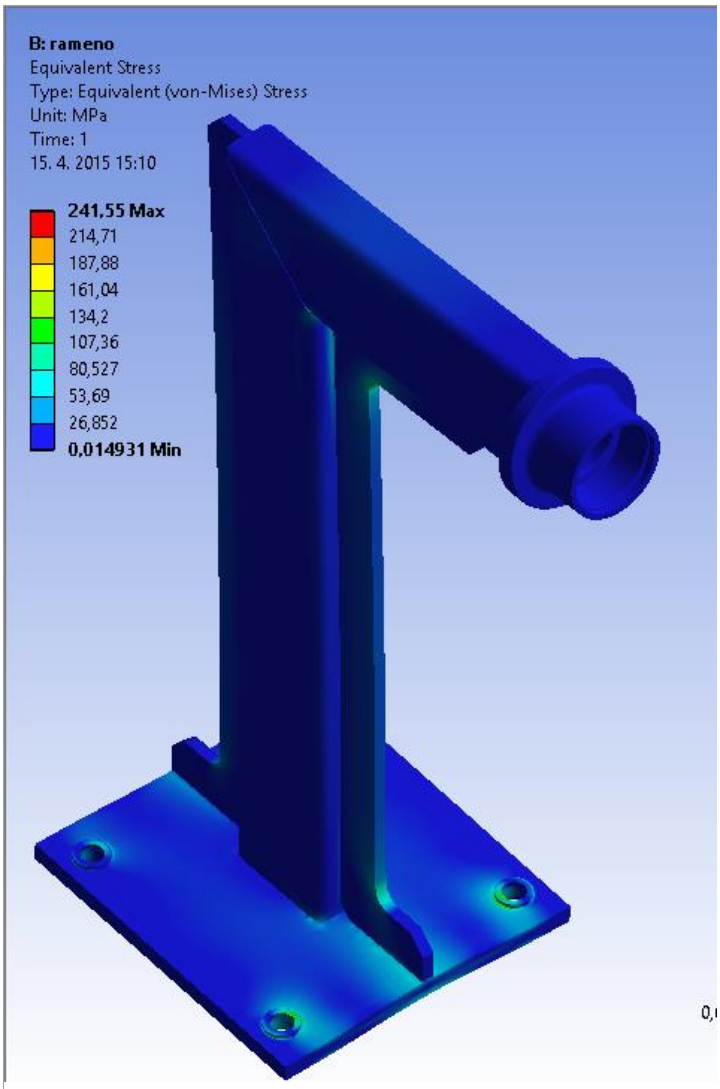


Obrázek 36: Síla a její působiště



Obrázek 35: Uchycení sestavy

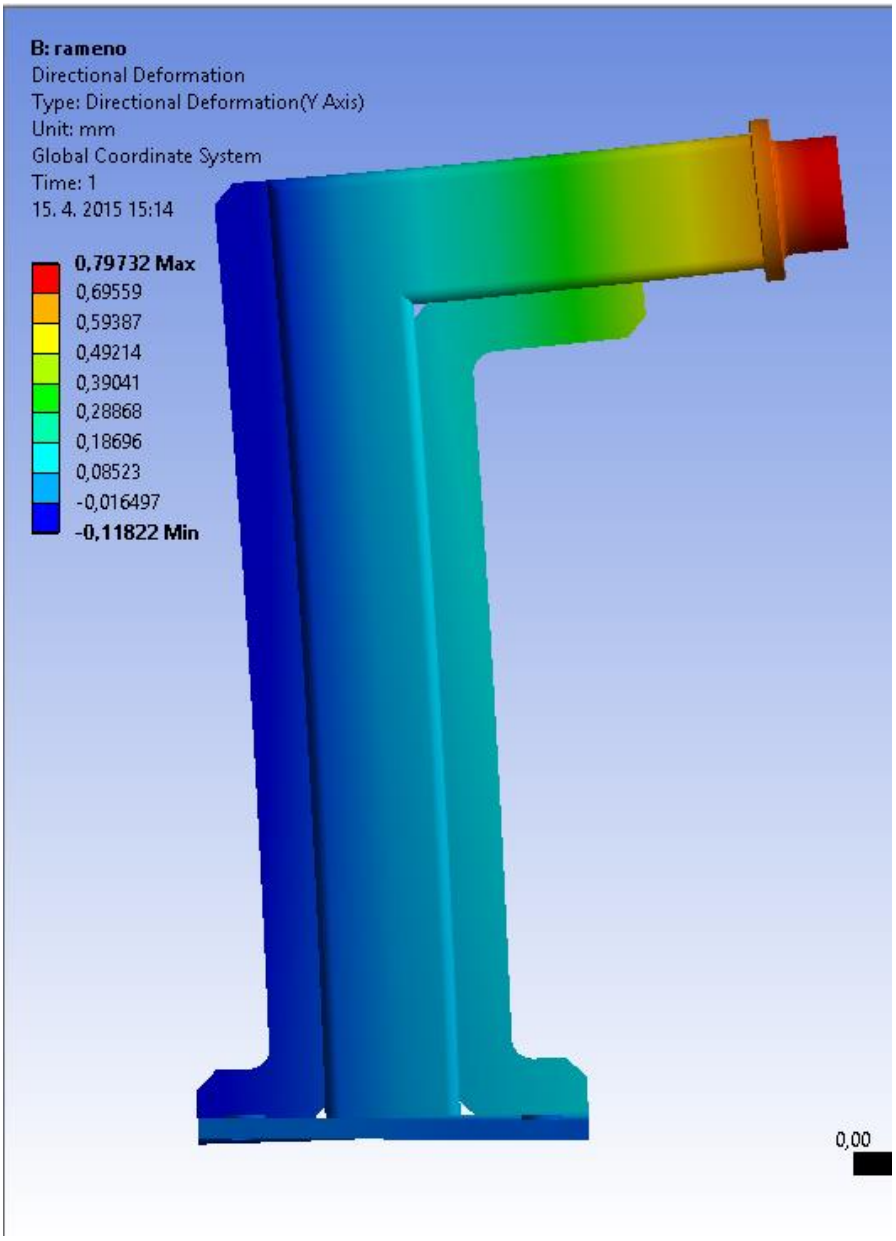
Zavazbení sestavy proběhlo pomocí funkce „fixed support“, která nejlépe simuluje uchycení v upínací desce. Pro přesnou simulaci byl model upraven a byly přidány „podložky“ na základnu, přes které se vazba přenáší i ve skutečnosti. Jako působící síla byla použita funkce „force“ s působištěm v uložení ložiska a maximální síla byla zvolena 5000 N, což odpovídá 500 kg.



Obrázek 34: Výsledné napětí

I když ANSYS počítá spíše konzervativněji, podle provedené analýzy a výsledných napětí bylo zřejmé, že na důležité části – hlavně přední výztuhu – je třeba použít materiál s vyšší třídou pevnosti. Pro uložení ložiska a obdélníkové profily byl zvolen materiál S235JRG2 s mezí kluzu 225 MPa. Tato ocel byla vybrána i z důvodu velmi dobré svařitelnosti. Pro výztuhy a základnu byl zvolen materiál ČSN 11 423 s mezí kluzu okolo 270 MPa. Materiál by tedy měl vydržet vypočtené statické namáhání.

Jak bylo uvedeno výše, v konstrukčních podmínkách byla zadaná maximální deformace v ose zatížení 1-2 mm. Toho bylo docíleno jednak použitím obdélníkového průřezu hlavních součástí z důvodu dosažení co největšího kvadratického momentu a jednak použitím dlouhých výztuh po celé délce svislé části ramene. V původních návrzích byly uvažovány výztuhy pouze v rozích, a i když na ně ve středu nepůsobí významné napětí, tak snížily směrovou deformaci o více jak půl milimetru.



Obrázek 37: Výsledná maximální deformace v ose zatížení

4.3.2 ZATĚŽOVACÍ DESKA

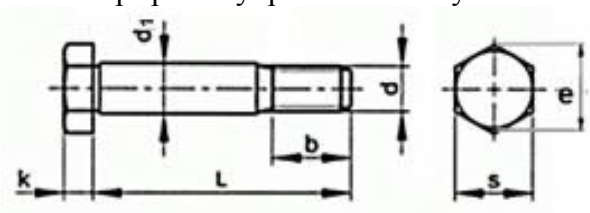
U zatěžovací části měřícího stanoviště nebylo potřeba dělat speciální simulace, protože síla, působící na „Deska B“ se rozkládá na velmi velký prostor a současně byla zvolena dostatečná šířka materiálu. Obě desky byly vyřezávány z polotovaru 2000x1000 mm, aby bylo co nejméně odpadního materiálu. Nejvíce namáhaným dílem zatěžovací části jsou dva lícované šrouby, na kterých drží „Deska B“.

KONTROLA LÍCOVANÝCH ŠROUBŮ V ZATĚŽOVACÍ DESCE

Jak bylo uvedeno výše, celé stanoviště je dimenzováno na maximální sílu 500 kg, takže tento údaj budu brát v potaz i u kontroly šroubů na střih a otlačení.

KONTROLA NA STŘIH

V tomto případě byl použit lícovaný šroub M12x45 pevnostní třídy 8.8.



Obrázek 38: Lícovaný šroub M12x45

Vztah pro výpočet střihového napětí je definován:

$$\tau_{\max} = \frac{4 \cdot F_{\max}}{\pi \cdot d_S^2} \tag{2}$$

kde d_s je průměr střižné plochy, d_s = 12 mm.

$$\tau_s = \frac{4 \cdot 500 \cdot 9,81}{\pi \cdot (0,012)^2} = \frac{19620}{0,000452} \tag{3}$$

$$\tau_s = 36,95\text{MPa} \tag{4}$$

Maximální střihové napětí při použití dvou lícovaných šroubů M12

$$\tau_{s2} = \frac{\tau_{\max}}{2} = \frac{36,95}{2} \tag{5}$$

$$\tau_{s2} = 18,475 MPa \tag{6}$$

Smluvní mez kluzu pro šroub M12 pevnostní třídy 8.8 je $R_{p0,2} = 640\ MPa$, dovolené napětí tedy je [26]

$$\tau_D = 0,3 \cdot 640 = 192\ MPa \tag{7}$$

$$\tau_D > \tau_s \tag{8}$$

KONTROLA LÍCOVANÝCH ŠROUBŮ NA OTLAČENÍ

Vzhledem k trojici zatěžovacích šroubů bude na jeden šroub působit maximální síla 1667 N

Vztah pro výpočet otlačení je definován:

$$p = \frac{F_{\max}}{s_{\min} \cdot d_s} \tag{9}$$

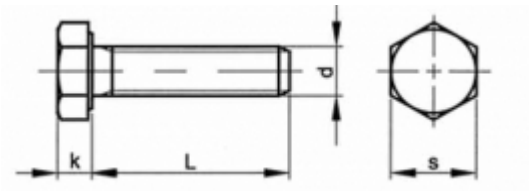
kde s_{min} je vzdálenost výběhu zavitu od spoje, bylo zvoleno s_{min} = 10 mm.

$$p = \frac{500 \cdot 9{,}81}{10 \cdot 12} = 40MPa \tag{10}$$

Dovolený tlak ve stykových plochách pro materiál S235JRG2 je dle 85-250 MPa.

KONTROLA UTAHOVACÍCH ŠROUBŮ NA VZPĚR

Vzhledem k upínací desce v laboratořích UADI byl zvolen šroub velikosti M20 s délkou 340 mm pro velký rozsah možného zatížení při použití různých velikostí pneumatik.



Obrázek 39: Šroub šestihranný celý závit [33]

Vztah pro kontrolu šroubů na vzpěr je podle Eulera definován

$$\boldsymbol{F_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{l_{red}^2}} \tag{11}$$

kde E je modul pružnosti v tahu a tlaku, J_{min} je kvadratický průřez kruhu a l_{red} je redukovaná délka závislá na uložení obou konců, v tomto případě je to

$$\boldsymbol{l_{red} = l \cdot \mu} \tag{12}$$

kde μ je v tomto případě 0,7.

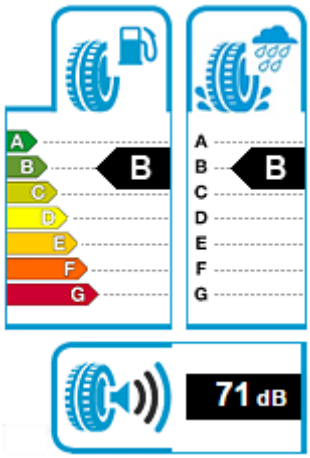
$$F_{kr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \frac{\pi \cdot d^4}{64}}{l_{red}^2} \tag{13}$$

$$F_{kr} = 137{,}209\ kN \tag{14}$$

Pokud budeme uvažovat bezpečnost pro ocelové šrouby $k = 3$ vychází bezpečné napětí asi 45 kN. Na jeden z těchto tří šroubů vychází napětí asi 1,7 kN.

5 ANALÝZA ZMĚŘENÝCH DAT

Pro měření byla použita pneumatika Continental ContiEcoContact 5 215/60 R16 95 V. Pneumatika má maximální povolený vnitřní tlak 3,5 bar a maximální zatížení 690 kg.



Obrázek 40: Energetická tabulka pneumatiky [31] *Obrázek 41: Použitá pneumatika Continental [32]*

Praktická měření byla prováděna pro tyto zatížení a vnitřní tlaky:

Tabulka 1 Soubor měřených tlaků a zatížení

	1,4 bar	2,2 bar	3,0 bar
0 N	☑	☑	☑
1200 N		☑	
2400 N		☑	
3000 N		☑	
4800 N	☑	☑	☑

Pro analyzování dat jsem použil software GOM Inspect V7,5 a V8, který je přímo od firmy GOM a je ve verzi freeware ke stažení ze stránek www.gom.com. Prostředí programu je intuitivní, ale některé nabídky jsou mírně schované. Pneumatika naskenovaná 3D skenerem Atos Compact, který jsem používal pro měření je nasnímána do nejmenšího detailu a dají se na 3D skenu přečíst veškeré informace jako na reálné pneumatice. Proto veškeré řezy, které se při analýze vytvořily, bylo schopné v prostředí Gom Inspectu změřit s přesností na tři desetiny milimetru.

Po naskenovaní software spojil jednotlivé snímky a vytvořil z nich modely pneumatik, které poté byly načteny v zmíněném programu ve formátu *.STL. Pneumatiky bylo třeba rozdělit do skupin, ve kterých je možnost vůči sobě sledovat nějaké změny a získat závislosti, podle nichž tyto změny vznikají.

Jako nejlepší varianta se jeví rozdělit si změřené stavy do dvou hlavních skupin „Stejný tlak“, „Stejné zatížení“, tím vznikly tři hlavní skupiny, ve kterých je třeba sledovat změny rozměrů vlastní pneumatiky a stejně tak stopy, kterou působí na podložku.

5.1 TVORBA ŘEZŮ

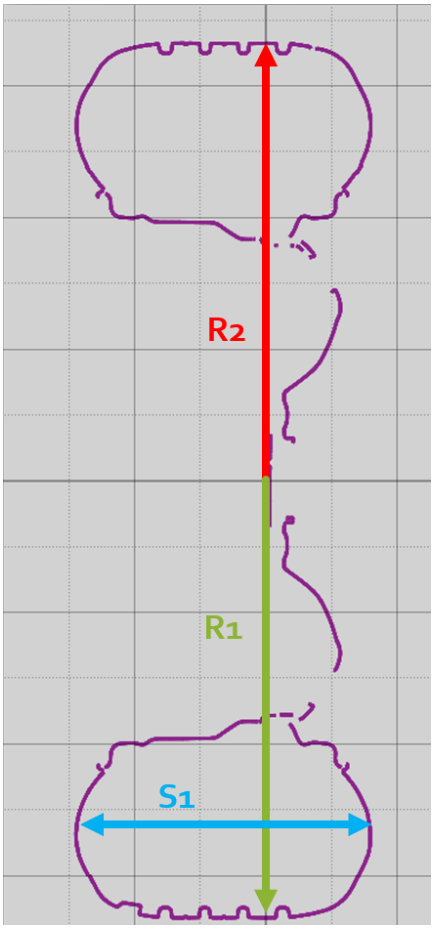
Pro objektivní porovnání pneumatik, bylo třeba je nejdříve uchytit v souřadném systému tak, aby všechny byly postavené stejně a aby se na řezech vyskytovaly stejné části pneumatiky. Při skenování se souřadný systém určuje prvním snímkem, a je tak téměř nemožné mít ho na všech zátěžných stavech stejný, právě proto bylo třeba před analyzováním naměřených dat ještě pneumatiky „ustavit“.

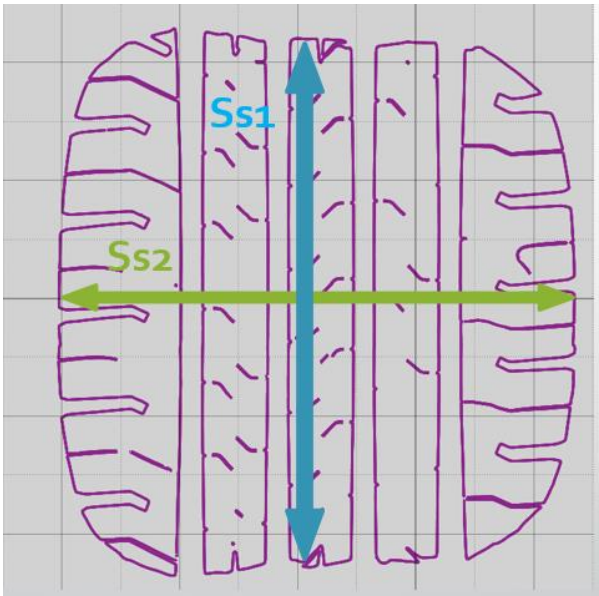
Ustavení bylo rozděleno do dvou fází. V první fázi se jedna pneumatika ve formátu *.STL naimportovala do Gom Inspectu. Aby bylo možné pneumatiku otočit do správného souřadného systému pomocí funkce „Main Aligment“ a „By Geometric Elements“, je třeba mít tři roviny, pomocí kterých se bude rotovat. První rovina byla vytvořena funkcí „fiting plane“ po výběru části dosedací plochy. Dále byl vytvořen válec v oblasti náboje funkcí „fitting cylinder“ – opět po vybrání části náležité plochy. Na začátku a konci tohoto válce na jeho ose byl vytvořen bod 1 a bod 2 příkazem „Point From Line …“. Z bodu 1, bodu 2, a roviny dosedací plochy byla vytvořena nová kolmá rovina funkcí „Perpendicular Plane. Nakonec v rovině vozovky byla získána poslední rovina funkcí „3-Point-Plane“ a posunuta do výšky osy válce. Takto vytvořené tři roviny se již zmíněnou funkcí otočí do správného souřadného systému.

Aby nebylo nutné takto složitým způsobem ustavovat každé kolo, byly stanoveny tři body na disku pneumatiky, které jsou vždy na stejné pozici, jako referenční. Vybrané body se exportovaly do formátu *.IGES. Tyto body byly vždy naimportovány s každou další pneumatikou a ustavení probíhalo zarovnáním stejných bodů na nové pneumatice s body načtenými.

Jakmile byly pneumatiky ustaveny, mohly se vytvořit řezy, které je třeba mezi sebou porovnat. Tyto řezy pneumatiky se tvořili za pomocí geometrických prvků – Bod („Point“) a z těchto bodů vytvořených rovin („3 Point Plane“). Nejprve se na každém skenu našli tři body na ose Y, poté těmito body proložena rovina, kterou byl následně veden řez („Section“). Stejná situace byla i u řezu stopy. Tentokrát byly body vytvořeny na rovné ploše, kterou pneumatika působí na podložku. Tutu rovinou se potom vedl řez 1-3 mm do pneumatiky, v závislosti na její deformaci.

Zkoumané rozměry jsou vidět na obrázcích 43 a 44. Ve vertikálním řezu pneumatiky jsou nejzajímavější rozměry R1, R2 a S1. Předpokladem bylo, že největší změna se bude zaznamenávat u poloměru R1 a šířky S1. Rozměr R2 je doplněn pro informaci o tom, jak se deformace skrz vnitřní tlak přenáší do horní části pneumatiky. U stopy jsou pouze dva rozměry, oba jsou zahrnuty do analýzy. U rozměrů stopy byla předpokládána největší změna v délce stopy Ss1. Šířka Ss2 se s největší pravděpodobností bude měnit také, nicméně ne v takovém rozsahu.



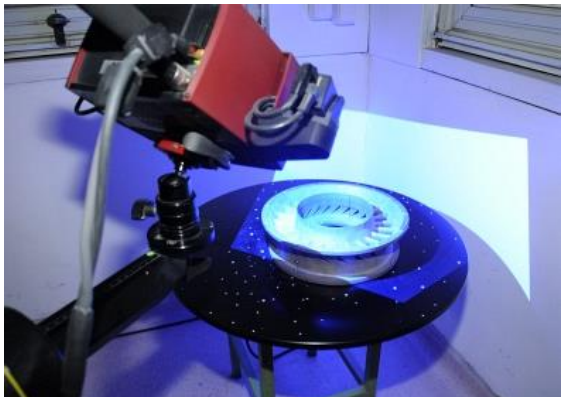


Obrázek 42: zkoumané rozměry stopy

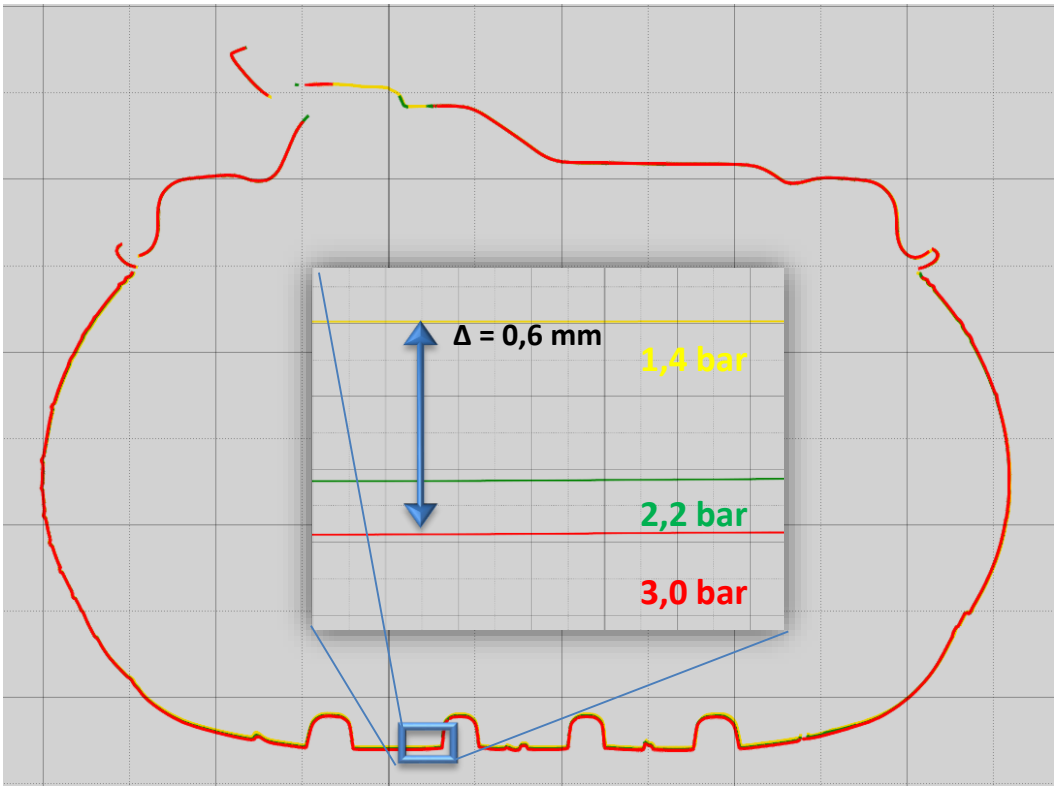
Obrázek 43: Zkoumané rozměry ve vertinálním řezu

5.2 NEZATÍŽENÁ PNEUMATIKA

Měření nezatížené pneumatiky probíhalo trochu odlišně od měření popsaného v kapitole 4.2. Vzhledem k tomu, že není třeba žádné zatížení, pneumatika nemusí být měřena na zkounstruovaném měřícím stanovišti, ale měřila se klasickým postupem 3D skenerů – na rotačním stole (obr. 44). Pneumatika se umístila tak, aby se žádná stěna nedotýkala rotačního stolu, což by mohlo ovlivnit výsledky, poté se nastavil správný úhel skeneru a po každém snímku se stůl pootočil o předem nastavený úhel. Pro opravdu kvalitní sken bylo třeba měnit několikrát nastavení úhlu pohledu skeneru, aby výsledný model obsahoval veškeré drážky dezénu. Jakmile byla naskenována jedna strana, pneumatika se otočila a nasnímala se i vnitřní část.

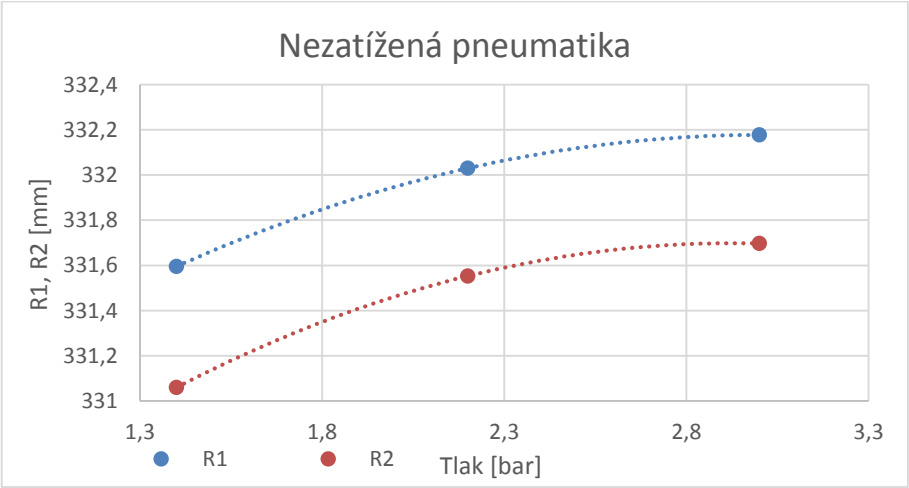


Obrázek 44: Skenování na rotačním stole [30]



Obrázek 45: Nezatížená pneumatika

Na obrázku číslo 45 je vidět, že pokud není pneumatika zatížená, rozdíl tvaru u 1,4; 2,2 a 3,0 bar je téměř neznatelný. Až po velmi výrazném přiblížení je možné vidět rozdíl na poloměru pneumatiky, který v případě těchto tlaků činí 0,6 mm. V případě šířky S1 je změna velikosti dokonce pouze 0,28 mm mezi nejvyšším a nejnižším tlakem. Dá se tedy konstatovat, že tlak na tvar nezatížené pneumatiky nemá v podstatě žádný vliv. Rovnice nejsou shodné, i když je pneumatika bez zatížení. Možným důvodem posunutí (obr- 46) v ose Y o pul milimetru je nepřesnost při tvorbě rovin.



Obrázek 46: Graf nezatížené pneumatiky

Když hodnoty vyčtené z Gom Inspectu vyneseme do grafu (obr. 47), zjistíme, že se dají proložit polynomickou funkcí druhého řádu a výsledné rovnice závislostí poté jsou:

$$y_{r1} = -0,2242x^2 + 1,3509x + 330,14 \tag{15}$$

$$y_{r2} = -0,2734x^2 + 1,6019x + 329,35 \tag{16}$$

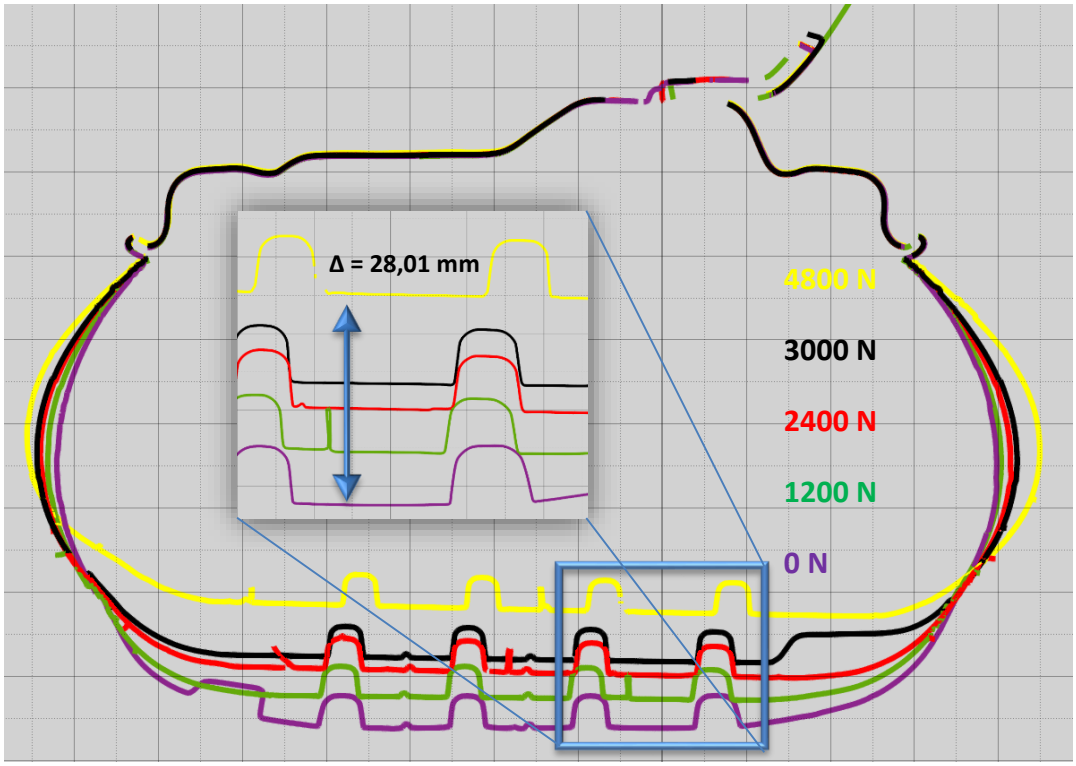
5.3 ZATÍŽENÁ PNEUMATIKA

U zatížené pneumatiky jsou změny na tvaru znatelně výraznější. Mění se hlavně poloměr R1, jisté změny dosahují i poloměry R2 a relativně vysokých hodnot dosahuje změna šířky S1. Stopy se rozšiřují do délky i šířky o nezanedbatelné hodnoty, hlavně v případech kdy zatížení neodpovídá nahuštění.

5.3.1 STEJNÝ TLAK

SVISLÝ ŘEZ

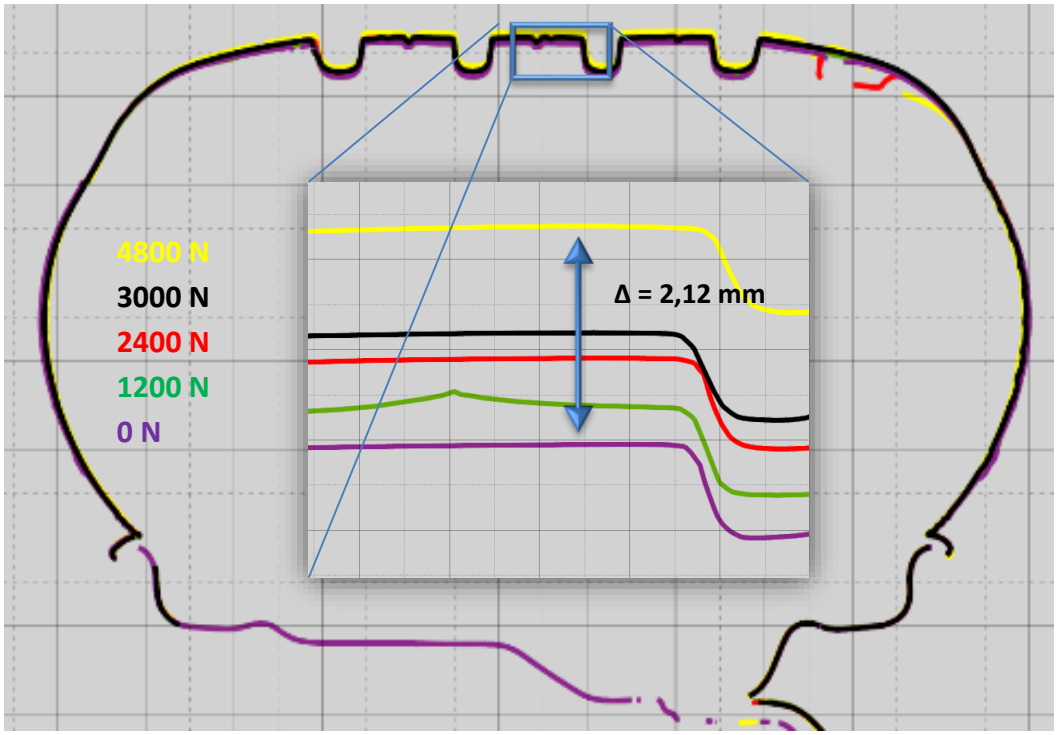
Pro přesnější představu měřených zatížení – dnešní normální hodnota, předepsaná automobilkami, pro nahuštění pneumatik nezatíženého automobilu je kolem 2,2 bar. Proto bylo pro tento tlak provedeno nejvíce měření. Pokud budeme uvažovat dříve zmíněnou hodnotu průměrné hmotnosti – 1,6 tuny, vychází na jedno kolo síla okolo 3900 N. Škoda Octavia jako typický zástupce automobilů obouvajících pneumatiky s tímto rozměrem má 1280 kilogramů (hmotnost včetně řidiče vážícího 75kg) [29] – což odpovídá zátěži na jedno kolo 320 kilogramu nebo něco málo přes 3000 N.



Obrázek 47: Pneumatika zatížená, tlak 2,2 bar, rozměr R1

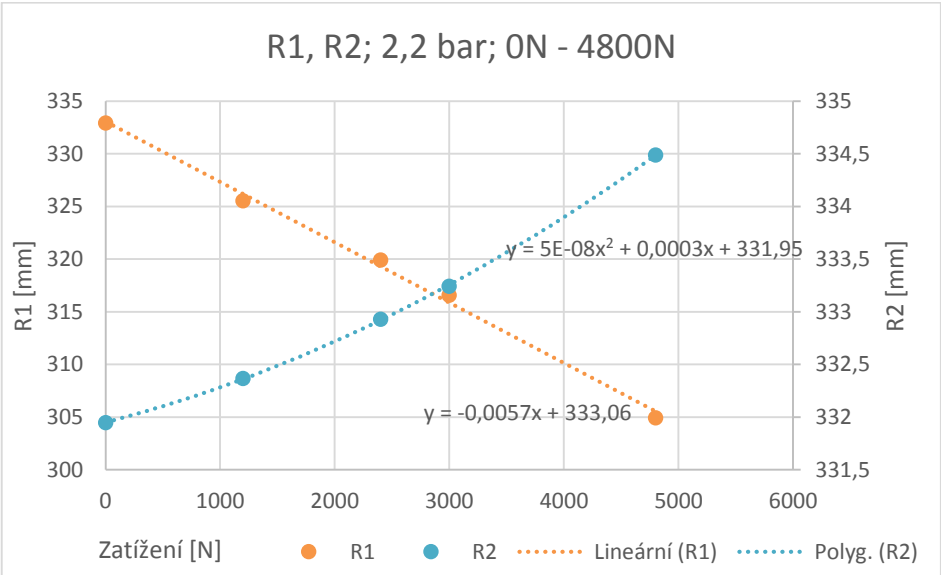
Z řezů pneumatik, nahuštěných právě na 2,2bar a zatížených pěti různými zátěžnými stavy, které jsou na obrázku 47 je vidět, že pneumatika má velmi předvídatelné chování deformace. Z přiložených grafů (obr. 49) je možné si všimnout, že závislost v tomto případě se dá považovat téměř za lineární. Důvod, proč jsou řezy od sebe různě vzdáleny, je ten, že změna

zatížení nebyla rovnoměrná. Lineární deformace je zde nejspíše z důvodu správného tlaku uvnitř pneumatiky a také z důvodu, že zátěž, které byla pneumatika vystavena, nepřekročila ani 75 % maximálního možného zatížení. Pokud by byla pneumatika zatížena více, je možné, že by se postupně měnila charakteristika z lineární na polynomickou druhého až třetího řádu.



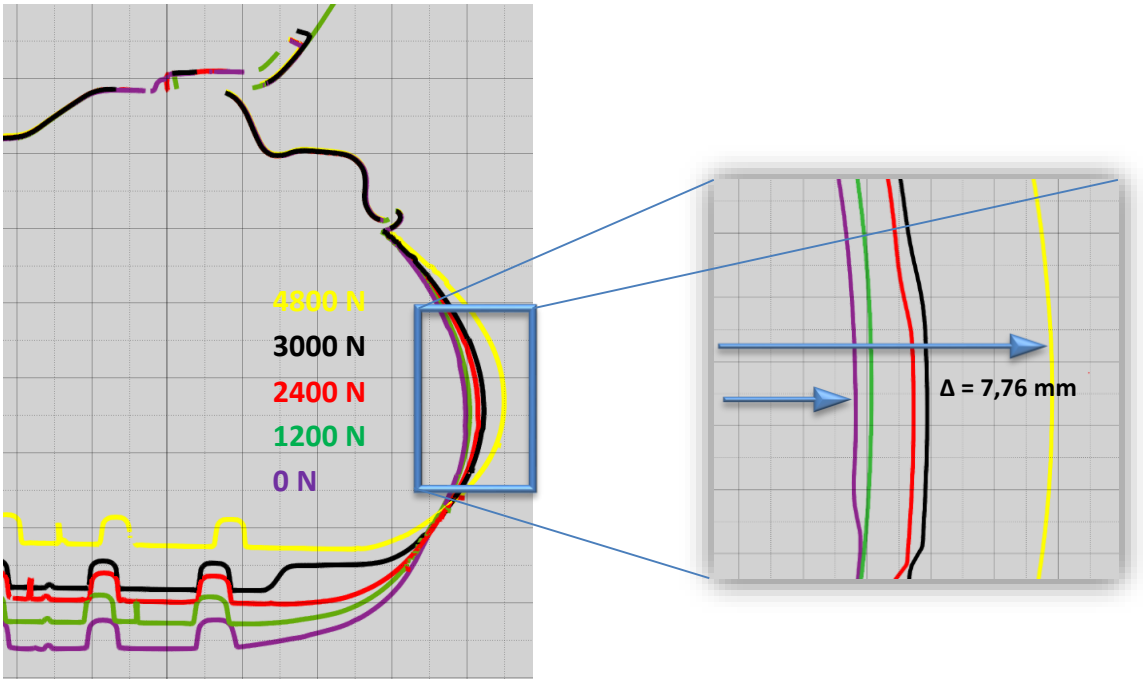
Obrázek 48: Pneumatika zatížená, tlak 2,2 bar, rozměr R2

Zatímco rozměr R1 dosahuje změny téměř 30 milimetrů, při stejných zatíženích je poloměr R2 zvětšen pouze o hodnotu lehce přesahující 2 milimetry, což odpovídá hodnotě okolo 7 % změny R1.



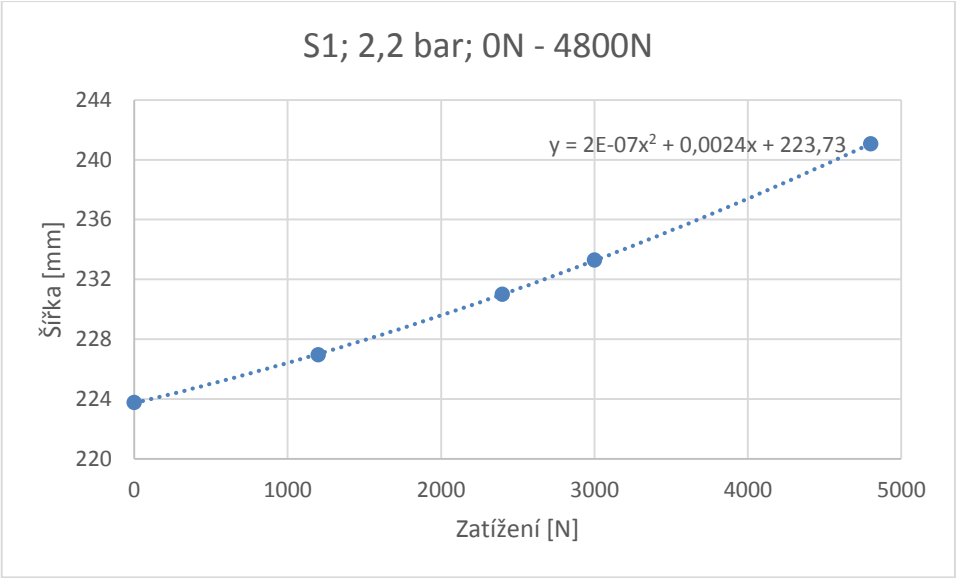
Obrázek 49: Graf závislosti rozměru R1 a R2 na zatížení

Šířka pneumatiky S1, v tomto měření, se chovala obdobně jako rozměr R1 - mírně polynomická až lineární funkce. Změna rozměru, který velmi výrazně ovlivňuje aerodynamiku vozu, téměř o 8 milimetrů, se dá považovat za zajímavý poznatek.



Obrázek 50: Pneumatika zatížená, tlak 2,2 bar, rozměr S1

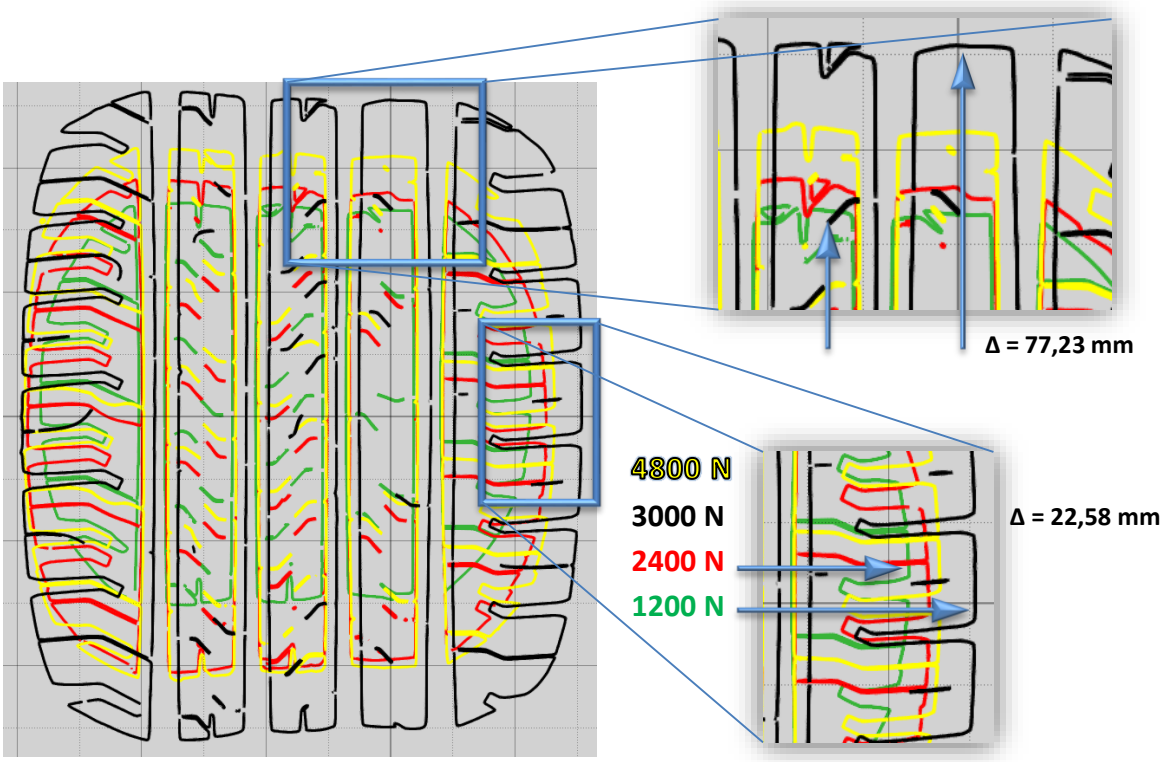
Z grafu hodnot proložených funkcí (obr. 51) je opět zřejmá velmi mírná parabola polynomické funkce druhého řádu.



Obrázek 51: Graf závislosti šířky S1 na zatížení

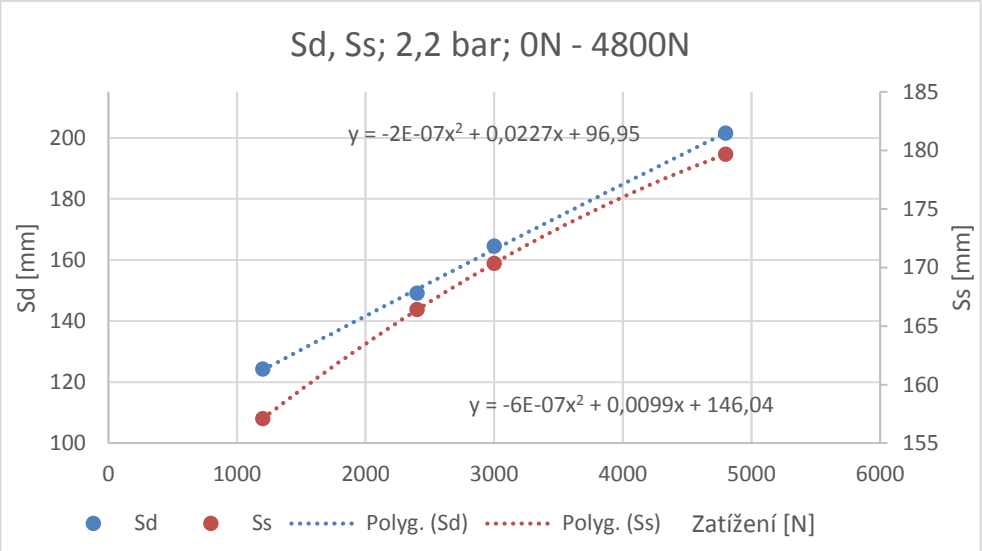
ŘEZ STOPY

Při analýze měření je důležitým aspektem i otisk, kterým pneumatika působí na podložku. Zvětšovala se nejen délka stopy, ale znatelně se zvětšovala i šířka stopy. Na obrázku 53, kde jsou kompletní řezy, vidíme větší čí menší rozměrové změny. Pokud porovnáváme nejmenší a největší tlak, rozdíl do délky stopy činí 77,23 milimetrů a do šířky 22,58, což v reálném provozu může například ovlivňovat jízdní vlastnosti na mokré vozovce. Další zajímavostí je, že se stopa pneumatiky rozšiřuje hlavně do jednoho směru, což může být zapříčiněno buď nastaveným záporným odklonem 0°40‘, nebo stavbou pneumatiky, která se má rozšiřovat pouze na vnější stranu. Jako poslední možností přichází v úvahu nepřesnost měření. Pokud si prohlédneme pozorně výřez obrázku 52, vidíme, že zatížení 1200 N, 2400 N a 3000 N se rozšiřují pouze minimálně a rovnoměrně. Na vnější stranu se pneumatika deformuje pouze u nejvyššího zatížení 4800 N, což bylo při tlaku 2,2 bar měřeno jako úplně první zátěžný stav, a tudíž ještě nebyl úplně dokonalý postup měření a může tím být výsledek nepatrně znehodnocen.



Obrázek 52: Pneumatika zatížená, tlak 2,2 bar, rozměr Ss a Sd

Pokud změna poloměrů byla téměř lineární, tento trend pokračuje i u rozměrů stopy. V případě délky (parametr Ss) je sice polynomická funkce o něco výraznější, stále ale pouze nepatrně a koeficient a je v tomto případě $2E-07$, což se opět dá označit za téměř lineární závislost. U šířky se už závislost dá považovat za skutečně polynomickou a v grafu (obr. 53) je vidět mírné prohnutí paraboly. Maximální změna délky stopy pneumatiky dosahuje 77,23 mm. U šířky je tato hodnota 22,58 mm.

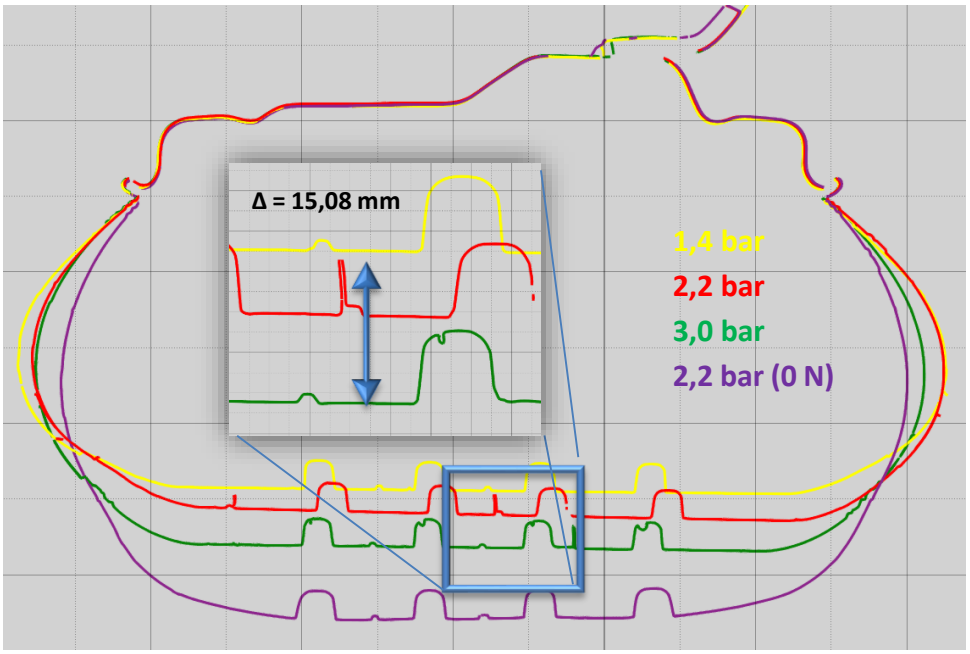


Obrázek 53: Graf závislosti rozměrů Sd a SS v závislosti na změně zatížení

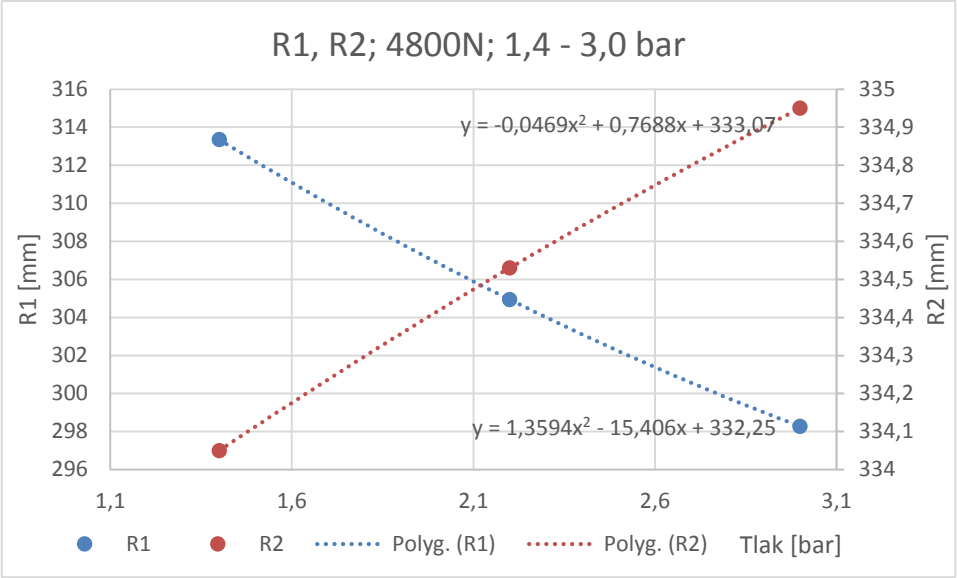
STEJNÉ ZATÍŽENÍ – RŮZNÝ TLAK

Neméně zajímavé je posoudit, jak se pneumatika chová při maximálním zatížení s různými tlaky a jak tlak v pneumatice ovlivňuje její tvar.

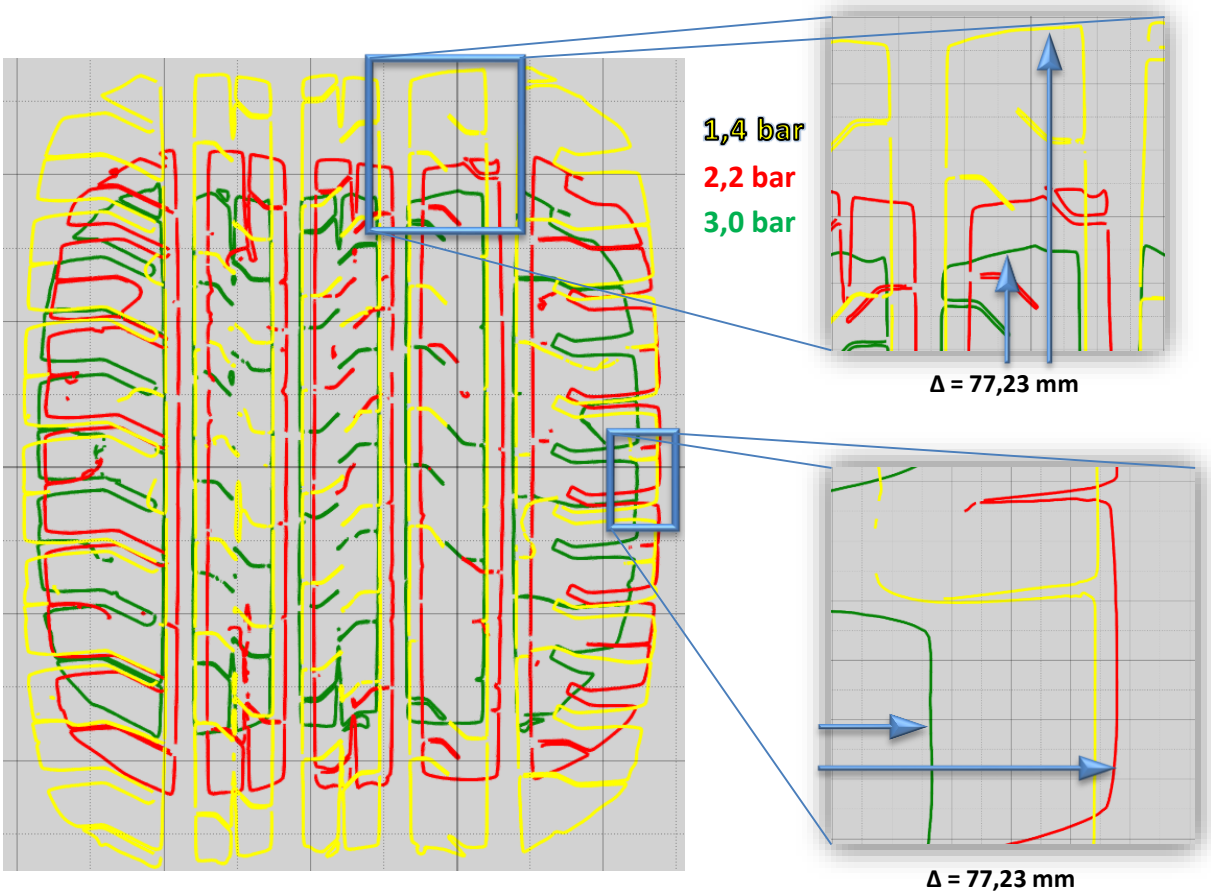
U řezů těchto zátěžných stavů je nutné si uvědomit, že při neměnícím se zatížení pneumatiky je nejvíce zdeformovaná pneumatika nahuštěna nejmenším tlakem a naopak. U parametru R1 se pneumatika deformuje rovnoměrně, vzhledem ke změně tlaku vždy o 0,8 bar. Výrazněji se mění velikost stopy. Jak je z obrázků 56 vidět, pokud má pneumatika správný tlak odpovídající jejímu zatížení, tvar její stopy je dost podobný. Pokud je pneumatika výrazně podhuštěná, což se dá s určitostí říci u tlaku 1,4 bar, její stopa se enormně natahuje, to se opět bude projevovat v opotřebení pneumatiky a horších jízdních vlastnostech. Na obrázku 54 je pro ilustraci řez i nezatíženou pneumatikou, aby byl vidět rozdíl tvaru nezatížené a nejvíce zdeformované pneumatiky, který je v tomto případě 33,28 milimetrů.



Obrázek 54: Pneumatika zatížená 4800N, rozměr R1

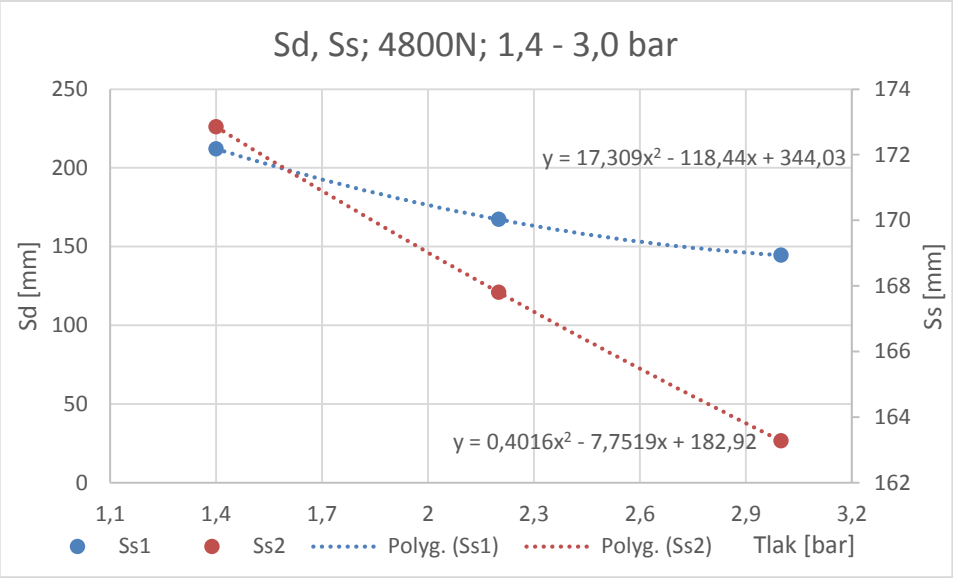


Obrázek 55: Graf závislosti rozměrů R1 a R2 na změně tlaku



Obrázek 56: Pneumatika zatížená 4800N, rozměr Sd a Ss

Na obrázku 56 je stopa od pneumatiky zatížené 2,2 bar na jedné straně dokonce širší, než stopa od zatížení 1,4 bar. S největší pravděpodobností je to opět způsobeno nedokonalostmi prvního měření, vzhledem k celkově posunutému otisku směrem k levému okraji.



Obrázek 57: Graf závislosti rozměrů Sd a SS v závislosti na změně tlaku

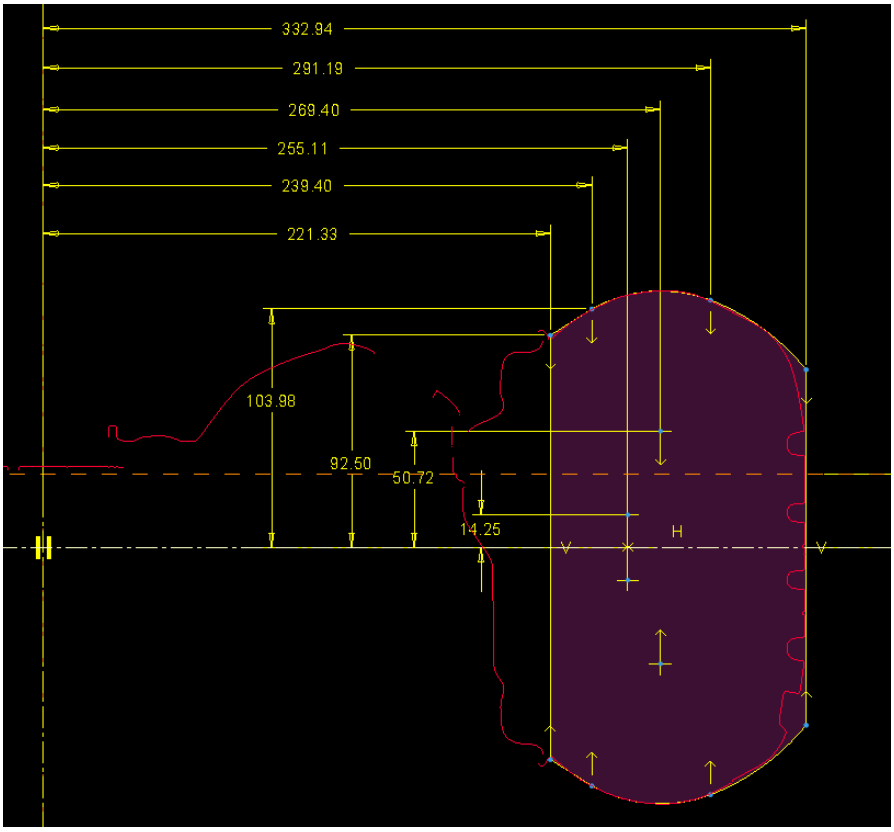
6 TVORBA PARAMETRICKÉHO MODELU

Měření tvaru pneumatiky, provedená pro tuto práci, měla za cíl větší porozumění deformaci pneumatik a jejím změnám a také aby díky modelům, vytvořených 3D skenery bylo možné zlepšit a zpřesnit výpočty v programech typu CFD. Pro jednu danou konkrétní pneumatiku a tlak je možné bez problémů změřit její koeficient odporu přímo ve větrném tunelu. Pokud je třeba změnit zatížení například o pár newtonů, je velmi náročné provádět celé měření znovu, a v tuto chvíli je vhodné mít parametrický model, který sice nebude tak přesný jako reálné měření, ale poskytne nám dobrý výchozí bod pro relevantní výpočet.

Vytvoření parametrického modelu pneumatiky probíhal v programu Creo Parametric. Původní nápad udělat model závislý na tlaku i na zatížení musel být zjednodušen pouze na změnu zatížení, protože pro tlaky 1,4 a 3,0 bar byly pouze dvě hodnoty, což je pro tvorbu závislosti nedostatečné a lineární závislost by v žádném případě nevystihla změny tvarů. Největší důraz při tvorbě modelu byl kladen na vystižení co nejlepších a nejpřesnějších změn tvaru bočnice pneumatiky.

Na začátku bylo třeba naimportovat si vertikální řezy pneumatiky a vytvořit podle řezu náčrt pro rotaci. Po zkoušení různých variant se ukázala varianta jedné přímky a dvou oblouků jako varianta s nejlepším poměrem složitosti a přesnosti. Po zjištění, že získané závislosti jsou hrubě nedostatečné, protože bylo třeba daleko více než dva rozměry, byl hledán způsob, jak zjistit potřebné kóty. Nakonec byl zvolen způsob asi nejjednodušší, ale nejvíce časové náročný. Aby bylo možné okótovat jednoznačně celý řez, byly použity souřadnice těchto bodů:

- výška a šířka souřadnice začátku přímky (počátek – stále stejné)
- výška a šířka souřadnice konce přímky

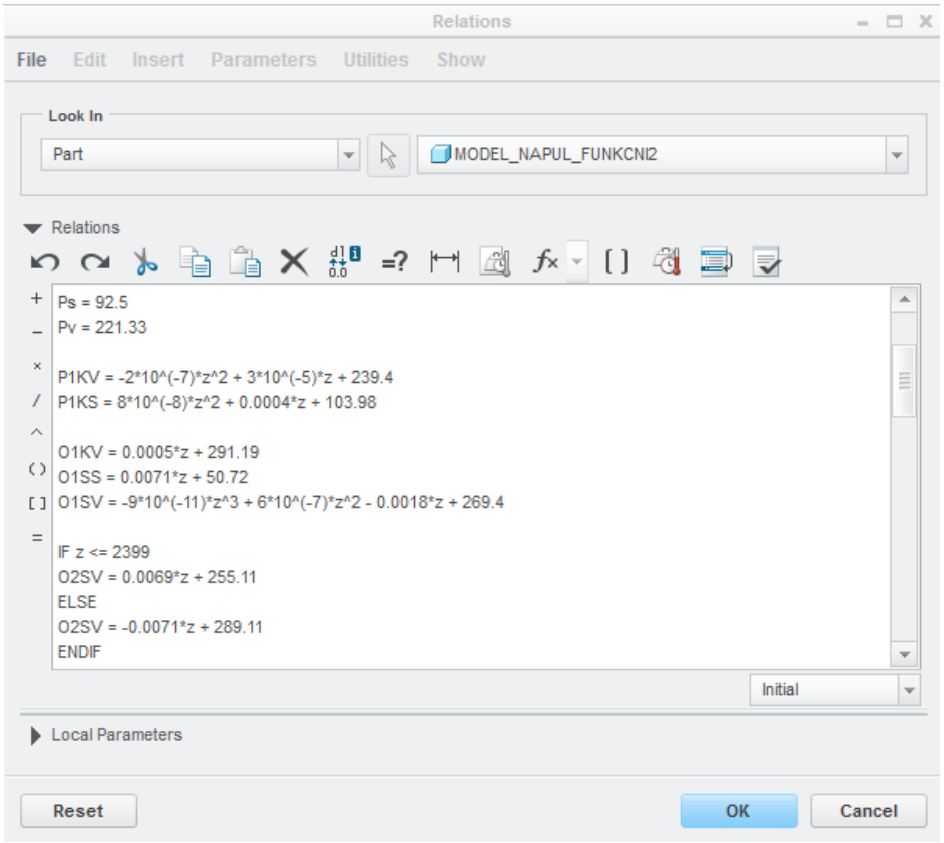


Obrázek 58: Náčrt řezu pneumatiky

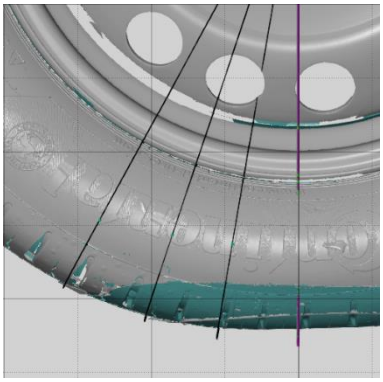
- výška souřadnice konce oblouku 1
- výška a šířka souřadnice středu oblouku 1
- výška souřadnice konce oblouku 2
- výška a šířka souřadnice středu oblouku 2

Pro každý řez bylo třeba upravit zvlášť všechny potřebné kóty, aby co možná nejlépe odpovídaly povrchu pneumatiky. Po každé úpravě se kóty zapsali do tabulky, čímž vzniklo osm hodnot (pokud nepočítáme stále stejný počátek přímky). Pro každý řez a pro každou souřadnici bylo třeba vytvořit vlastní závislost změny její hodnoty na zatížení, která se pak použila v příkazu „relations“ pro výpočet parametrů.

Tato operace vyžadovala učinit ústupky směrem ke zjednodušení, aby bylo vůbec možné tento způsob použít. Prvním zjednodušením bylo použití symetrie, takže není uvažován odklon. Druhým ústupkem bylo vymazání tangenciálních vazeb u oblouků a přímky s obloukem, protože při ponechání těchto vazeb program nedovolil zadání všech potřebných kót kvůli překódování náčrtu, to ale způsobilo, že náčrt nebyl určen tak jednoznačně, jak by bylo třeba, a po zadání rovnic odmítl model vykreslit kvůli chybné geometrii.



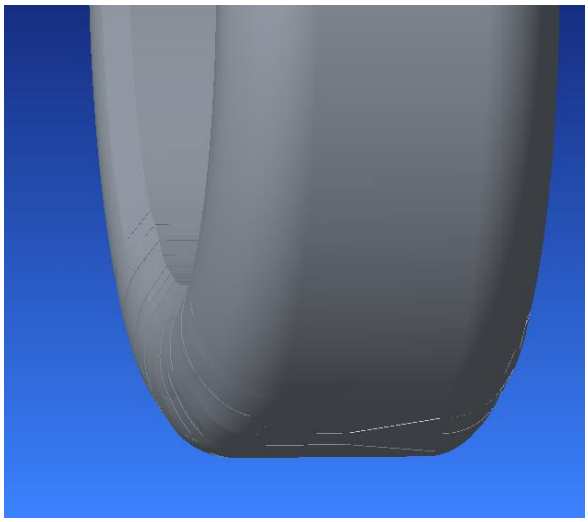
Obrázek 59: Ukázka parametrizování modelu



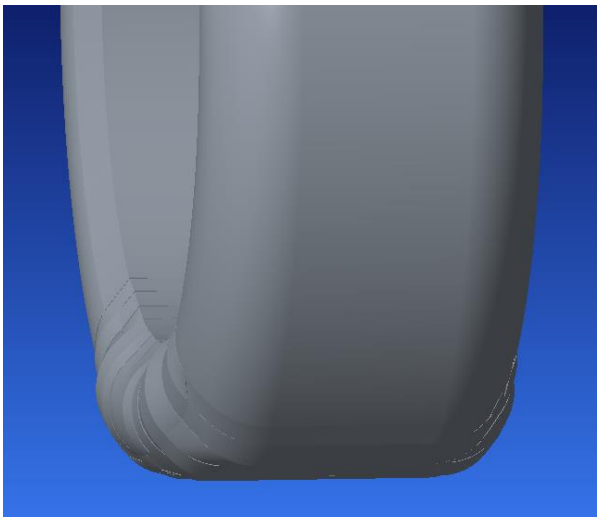
Obrázek 60: Další řezy

Protože jeden řez se ukázal jako velmi malá část pro takovýto model, byly použity ještě další tři řezy v rozestupu několika stupňů, pro které se musel postup opět opakovat, z toho plyne, že na modelu je použito 32 parametrických rovnic. Na obrázku 54 je vidět i použití funkce IF, neboť pro závislost výšky středu druhého oblouku nebylo možné použít žádnou z nabízených funkcí v programu MS Excel, takže se přistoupilo na dvě lineární funkce, kde hranice pro použití jedné či druhé je 2399 N.

Jakmile byly vytvořeny závislosti a svázány s kótami, každý řez byl symetricky rotován o 2,5° na každou stranu. Zbývající mezery byly vyplněny pomocí příkazu „Boundary blend“. Při zkoušce správného fungování změn rozměrů, se zjistilo, že zaoblení, které bylo použito u přechodu z bočnice na pomyslný běhoun, je ve vyšších zatíženích příliš velké a nedovoluje správnou regeneraci prvků funkce „Boundary blend. Proto se přistoupilo na další využití funkce IF, která v tomto případě řídí, kdy se změní zmíněné zaoblení z hodnoty 40 na hodnotu 20. Jako poslední krok byla pro každou spojovací plochu použita funkce „Thickness“, zvyšující estetiku modelu.

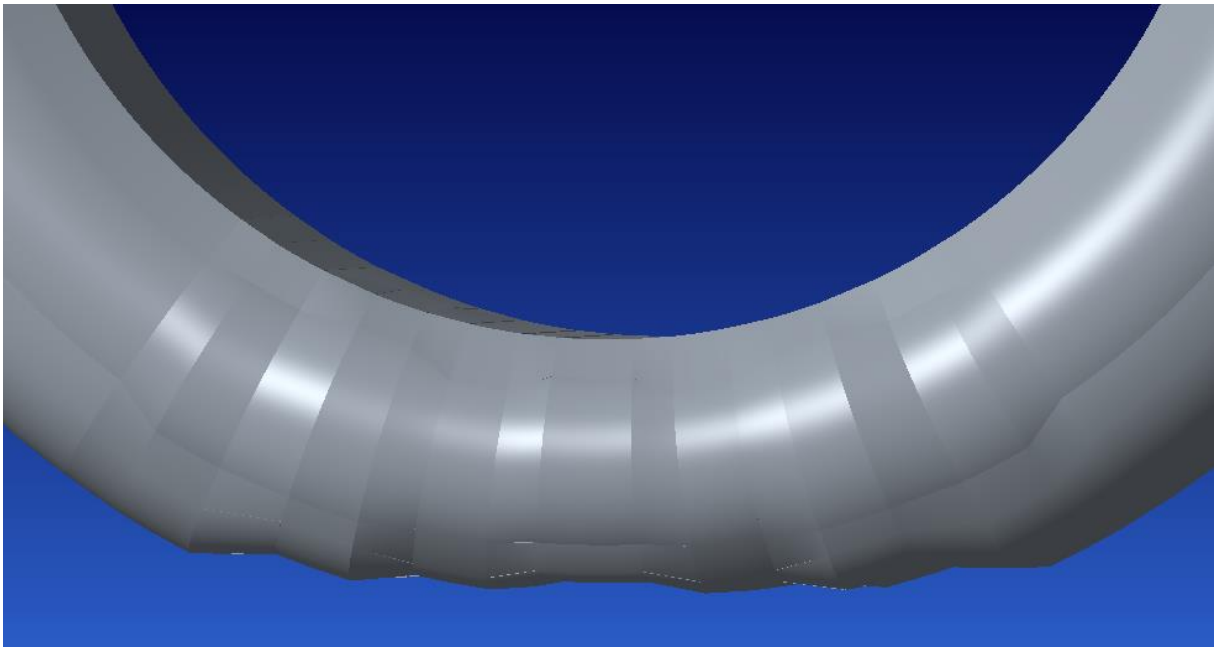


Obrázek 62: Minimální zatížení



Obrázek 61: Maximální zatížení

Při kontrole řezů exportovaných z Gom Inspectu s náčrty překreslenými po změně zatížení bylo zjištěno, že tvar těchto řezů kopíruje model velmi dobře. Problém nastává při zatížení více než 3000 N, kdy se projeví použití stále ještě malého množství řezů a přechod mezi jednotlivými revolvy nedokáže funkce „Boundary blend“ vytvořit tak, aby odpovídaly realitě. Jednou z možností, jak zmírnit tento jev, je použití většího množství řezů, nicméně pro velmi velkou časovou náročnost tvorby každého řezu se od této varianty upustilo.



Obrázek 63: Problém modelu při maximálním zatížení

ZÁVĚR

Pneumatika, jak bylo napsáno v úvodu, je jediná část vozidla, která spojuje hnací ústrojí vozu s povrchem vozovky a přenáší na něj brzdné a hnací účinky motoru. S důležitostí, kterou tento úkol bezesporu má, by se mělo k pneumatikám i přistupovat, nicméně alespoň v očích veřejnosti se tak určitě neděje a pneumatiky ještě dlouho budou až druhořadou věcí, jejíž výběr z velké části ovlivní hlavně cena a nikoliv nabízené vlastnosti.

Na začátku této práce bylo třeba navrhnout měřící stanoviště, na kterém se budou požadovaná měření provádět. Stanoviště bylo navrženo, otestováno v příslušných programech a vyrobeno. Při samotném měření se pak ukázalo, že stanoviště pro svůj úkol perfektně dostačuje a plní všechny zadané podmínky. Po doměření zátěžných stavů pro tuto diplomovou práci se stanoviště i nadále používá pro další měření a vzhledem k tuhé konstrukci celého stanoviště nebude problém jej používat opakovaně pro nové projekty.

Měření, která byla v rámci této diplomové práce provedena, nejsou samoúčelná a neslouží pouze pro analýzu v mé práci, ale jsou součástí probíhajících projektů na UADI, a všechny jsou dále používány i ve spolupráci s průmyslovým partnerem. Při tvorbě této práce jsem si nejen vyzkoušel konstrukční návrh zařízení, který nekončí pouze na papíře, ale také jsem si osvojil práci s optickými 3D skenery při měření tvaru zatížených pneumatik.

Pokud se podíváme na samotné výsledky měření – získané závislosti, podle kterých mění pneumatika svůj tvar, jsou většinou zřejmé. Ať už se jedná o svislý řez, či řez stopy, vždy se dá najít lineární nebo polynomická závislost, která určuje, jak se bude změna tvaru chovat. Je ale důležité si uvědomit, že nelze výsledky v této práci zobecnit na všechny pneumatiky, ani například na pneumatiky se stejným rozměrem. Rozměry, zkoumané v této práci, se ve velké míře odvíjí od radiální tuhosti pneumatiky, danou konstrukcí a může se lišit u každého typu pneumatiky stejně tak jako výrobce. Další skutečnost, kterou je třeba zohlednit je, že mnou měřená a zkoumaná pneumatika byla celou dobu zatěžována staticky. Je velmi dobře možné, že pokud bychom měřili tvar zatížené a rotující pneumatiky, výsledky by se mohly znatelně lišit. I když by to bylo ideální – měřit tvar zatížené pneumatiky při rotaci, nebylo to úkolem této práce ani by to nebylo možné realizovat v rámci zařízení laboratoří UADI strojní fakulty VUT.

U modelu, vytvořeného podle tvaru změřených pneumatik, byl kladen důraz na co nejvěrnější podání změny tvaru bočnice pneumatiky při různém zatížení. Jak bylo uvedeno v práci, model není dokonalý, zejména při vyšším zatížení, ale pouze u části pomyslného běhounu, kde by bylo zapotřebí daleko většího počtu řezů. V oblasti bočnice se chová model velmi dobře a věrně kopíruje změnu tvaru reálné pneumatiky.

Věřím, že mnou vytvořený model a zjištěné informace uvedené v této práci mohou pomoci při zpřesnění aerodynamických CFD výpočtů a simulací.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] HUCHO, Wolf-Heinrich. *Aerodynamics of road Vehicles*. 4 ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998, 918 s. ISBN 0-7680-0029-7.

[2] HANEY, P. *The Racing & High-Performance Tire*. 1st edition. Warrendale: TV Motorsports and SAE, 2003. 286 s. ISBN 0-9646414-2-9.

[3] GERINGER, B.: *KFZ-Technik Grundzuge*. [Skripta]. Videň 2011. Technische UniversitatWien. Institut fur Fahrzeug Antriebe und Automobiltechnik.

[4] Historie pneumatiky, dějiny a vývoj pneu technologií. 2014. *AUTOJenda.cz* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: http://www.pneu-jenda.cz/historie-pneumatiky

[5] Pneu-rádce. 2012. *Pneulux* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: http://www.pneulux.cz/pneu-radce.html

[6] Technologie Hankook: Jednotlivé části. 2013. *Hankook: driving emotion* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: http://www.hankooktire-eu.com/cz/hankook/strany/technologie/jednotlive-casti.html

[7] BERÁNEK, LUKÁŠ. 2013. *Výroba pneumatik.* Brno. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64655. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

[8] Konstrikce, funkce a výroba pneumatik. 2014. *Pneuservis v Rokytnici, Poradce při výběru pneumatik, OMW dealer* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: http://www.pneu-asistent.cz/Konstrukce_funkce_a_vyroba_pneumatiky.html

[9] Konstrukce pneumatiky. 2014. *Autolexikon.net: náskok díky znalostem* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: http://www.autolexicon.net/cs/articles/konstrukce-pneumatiky/

[10] Pneumatiky - konstrukce. 2014. *AutoZnalosti: Víme co je pod kapotou.* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: http://www.autoznalosti.cz/index.php/podvozek-a-kola/12-pneumatiky-

[11] Typy dezénů pneumatik - symetrický, směrový, asymetrický. *Pneulux.cz* [online]. 2014 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.pneulux.cz/typy-dezenu-pneumatik-symetricky-smerovy-asymetricky-220489

[12] Jaký je v nich rozdíl? Asymetrické, symetrické nebo směrové pneumatiky. VALSKÝ, Tomáš.*Pneumatiky.cz: radost z každého kilometru* [online]. 2014 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.pneumatiky.cz/info/jaky-je-v-nich-rozdil-asymetricke.symetricke-nebo-smerove-pneumatiky.html

[13] Kumho R800. *RZ1: Rally Shop* [online]. 2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.rz1.cz/p/587/kumho-r800

[14] *Bezpečnost vozidel silničního provozu: PNEUMATIKY VOZIDEL* [online]. 2014 [cit. 2015-05-20

[15] Technický rádce. 2014. *Barum-Pneu* [online]. [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: http://www.barum-pneu.cz/technicky-radce

[16] VDOVIN, ALEXEY. 2013. Investigation of Aerodynamic Resistance of Rotating Wheels on Passenger Cars. Göteborg. THESIS FOR LICENTIATE OF ENGINEERING. Chalmers University of Technology.

[17] Reifenentwicklung unter aerodynamischen Aspekten. 2013. Berlin: Forschungsvereinigung Automobiltechnik. ISSN 2192-7863.

[18] VLK, František. 2006. Dynamika motorových vozidel /. Vyd. 2. Brno: Prof.Ing.František Vlk,DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 432 s. ISBN 80-239-0024-2.

[19] VLK, F. Podvozky motorových vozidel. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Prof. Ing. František Vlk, Dr.Sc., 2006. ISBN 80-239-6464-X.

[20] SZTWIERTINA,. 2006. *Stabilita vozidla v zatáčce*. Pardubice. Dostupné také z: https://dspace.upce.cz/bitstream/10195/21302/1/D15706.pdf. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.

[21] SKOUPÝ, P. *3D optické měřící a skenovací systémy pro strojírenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 64 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Paloušek.

[22] 3D Skenery (GOM). 2014. *MCAE: 3D Digitální technologie* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.mcae.cz/3d-skenery

[23] Operační program životního prostředí: *Metodika výpočtu enviromentálních přínosů projektů zaměřených na snížení resuspenze tuhých znečišťujících látek do ovzduší vlivem dopravy* [online]. 2014. 5 s. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.opzp.cz/soubor-ke-stazeni/48/14449-xlv_vyzva_PO2.1.3_metodika_vypoctu_emisi.pdf

[24] FOALE, Tony. 1997. CAMBER THRUST. *Tony Foale Designs: motorcycle chassis and frame info*[online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.tonyfoale.com/Articles/Tyres/TYRES.htm

[25] 3D ATOS Compact Scan. 2014. *MCAE: 3D Digitální technologie* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.mcae.cz/atos-compact-scan

[26] LEINVEBER, J. VAVRA, P. *Strojnicke tabulky.* 1. vyd. Uvaly: Albra, 2003. 865 s. ISBN 80-86490-74-2

[27] Zlá geometria, excentrické šróby na odklon kolesa. 2014. *KUPÍŠ PREDÁŠ Blog* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.kupispredas.sk/blog/vsetky-clanky-na-blogu/35-zla-geometria-excentricke-sroby-na-odklon-kolesa

[28] Longacre Computerscales AccuSet II 72593. 2015. *Longacre: Racing Products* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.longacreracing.com/products.aspx?itemid=1785&prodid=7143&pagetitle=Computerscales%C2%AE+AccuSet+II%E2%84%A2+Basic+System

[29] Škoda Octavia III: kompletní technické údaje a první videa. 2014. *Novinky.cz* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.novinky.cz/auto/289729-skoda-octavia-iii-kompletni-technicke-udaje-a-prvni-videa.html

[30] VEVERKA, Libor. 2014. 3D měření tvarově složitých dílů v procesu přesného lití pomocí 3D optického skeneru ATOS Compact Scan. *CAD.cz* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/4272-3d-mereni-tvarove-slozitych-dilu-v-procesu-presneho-liti-pomoci-3d-optickeho-skeneru-atos-compact-scan.html

[31] Continental EcoContact 5 215/60 R16 95 V Letní. 2014. *E-pneumatiky.cz* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.e-pneumatiky.cz/continental-ecocontact-5-215-60-r16-95-v-letni.html

[32] CONTINENTAL conti eco contact 5 215/60 R16 95V, letní pneu, osobní a SUV. 2014. *E-nejlevnejsi-pneu.cz* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.e-nejlevnejsi-pneu.cz/continental-conti-eco-contact-5-215-60-r16-95v-tl-letni-pneu-osobni-a-suv

[33] Šroub šestihranný celý závit DIN 933 M20x340-8.8 pozink. 2014. *Spojovaci-material.net* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: http://www.spojovaci-material.net/sp/srouby/sestihranna-hlava/cely-zavit-din-933/ocel-8-8/pozink/sroub-sestihranny-cely-zavit-din-933-m20x340-8-8-pozink-17528.htm