

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh metodiky pro zjišťování adhezních vlastností vozovek

Petr Bureš

Bakalářská práce

2015

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr Bureš**
Osobní číslo: **D11375**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**
Název tématu: **Návrh metodiky pro zjišťování adhezních vlastností vozovek.**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Úvod
Adheze u silničního vozidla
Současný stav zjišťování adhezivních vlastností
Návrh metodiky pro zjištění adheze vozovky
Závěr

Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího práce**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran textu a přílohy**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:

GSCHEIDLE, Rolf. Příručka pro automechanika. ISBN 978-80-86706-17-7.
VLK, František. Dynamika motorových vozidel. ISBN 80-238-5273-6.
Vala, M., Tesař, M., Teorie a konstrukce silničních vozidel 1.

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

Datum zadání bakalářské práce: **25. února 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **29. května 2015**



doc. Ing. Ivo Drahošský, Ph.D.
děkan

L.S.



doc. Ing. Michael Lata, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 25. února 2015

Prohlašuji:

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

Byl jsem seznámen s tím, že na toto téma „Návrh metodiky pro zjišťování adhezních vlastností vozovek“ se vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 19. 5. 2015

Petr Bureš

Poděkování:

Rád bych využil tohoto prostoru pro poděkování vedoucímu této práce Ing. Petru Jilkovi, DiS. za trpělivost a cenné rady, které mně pro vypracování této práce poskytl. Dále také bych chtěl poděkovat za psychickou podporu své rodiny a hlavně své přítelkyni, za to že mě motivovali k tomu, abych tuto práci v klidu dokončil.

ANOTACE

Práce je věnována adhezi a novodobým metodikám pro zjišťování protiskluzových vlastností vozovek a povrchů. Práce upřednostňuje výhodné metody měření adheze a navrhuje, jak se dají využít.

KLÍČOVÁ SLOVA

adheze, tření, síly, vozovky, pneumatiky, metodiky

TITLE

The proposal of methodology for detect of adhesion performance of roads

ANNOTATION

The work deals with a adhesion and modern methodology used to detect anti-skid properties of roads and the surface. The work prefers advantageous measurement methods of adhesion and proposes their application.

KEYWORDS

adhesion, friction, forces, roads, tires, methodology

Obsah

Úvod.....	10
1 Adheze.....	11
1.1 Adheze obecně.....	11
1.1.1 Adhezní síly na příkladech	11
1.2 Druhy adheze	12
1.2.1 Mechanická adheze	12
1.2.2 Chemická adheze.....	12
1.2.3 Disperzní adheze	13
1.2.4 Elektrostatická adheze	13
1.2.5 Difuzní adheze	13
2 Adheze u silničního vozidla.....	14
2.1 Faktory ovlivňující velikost adhezní síly	16
2.2 Adheze ze strany pneumatiky	18
2.3 Adheze ze strany vozovky.....	19
2.4 Dynamika vozidla ve vztahu k adhezi	21
2.4.1 Podélné síly (akcelerace, brzdění).....	22
2.4.2 Příčné síly (průjezd vozidla obloukem).....	22
2.5 Aquaplaning.....	24
3 Současný stav zjišťování adhezních vlastností vozovek	25
3.1 Měření hloubky makrotextury pískem	25
3.2 Měření hloubky makrotextury mikroprofilografem.....	27
3.3 Měření součinitele tření kyvadlem RRL	29
3.4 Měření součinitele podélného tření dynamometrickým přívěsem.....	30
3.5 Měření adhezních podmínek povrchů systémem TRT	33

3.6	Zjišťování adhezních podmínek povrchů systémem ARAN.....	35
4	Návrh metodiky pro zjištění adheze vozovky	37
4.1	Ideový návrh zařízení pro měření adheze vozovky	37
5	Závěr.....	41
6	Použitá literatura	42

Seznam ilustrací a tabulek

Obrázek 1: Pneumatika do terénu GOODYEAR WRANGLER [2]	12
Obrázek 2: Mechanika přenosu sil ve styku kola s vozovkou [6]	14
Obrázek 3: Závislost tečné síly na skluzu [6]	15
Obrázek 4: Skluzová charakteristika pneumatiky [6]	15
Obrázek 5: Závislost součinitele adheze na zatížení kola [6]	16
Obrázek 6: Závislost součinitele adheze na stavu vozovky [6]	17
Obrázek 7: Závislost součinitele adheze na tlaku huštění pneumatiky [6]	17
Obrázek 8: Závislost součinitele adheze na rychlosti jízdy [6]	18
Obrázek 9: Jízda po zidealizovaném povrchu	19
Obrázek 10: Současný přenos podélné a příčné síly [6]	21
Obrázek 11: Jednostopý rovinný model dvounápravového vozidla při jízdě s konstantním natočením volantu [6]	23
Obrázek 12: Valení kola za působení boční síly [6]	23
Obrázek 13: Vznik aquaplaningu – 1. Fáze: nepřenesený vodní film; 2. Fáze: částečně převedený vodní film; 3. Fáze: kontakt kola s vozovkou [9]	24
Obrázek 14: Vliv rychlosti a výšky profilu figury na součinitele adheze [9]	24
Obrázek 15: Měření hloubky makrotextury pískem	26
Obrázek 16: Princip měření hloubky makrotextury pískem	26
Obrázek 17: Schematický náčrt mikroprofilografu; 1 – elektromotor, 2 – voskový registrační papír, 3 – jehla s vyznačením směru pohybu, 4 – zapisovací jehla [8]	28
Obrázek 18: kyvadlo RRL; 1 – rameno, 2 – třecí pryžová patka, 3 – stupnice, 4 – délka prokluzu patky [8]	30
Obrázek 19: Kyvadlo KKL používané v praxi [11]	30
Obrázek 20: Dynamometrický přívěs [8]	31
Obrázek 21: Závislost součinitele tření f_P na rychlosti [8]	32

Obrázek 22: Tatra 613-3 TRT[12]	33
Obrázek 23: Ford Transit s nástavbou TRT s detailem měřicího kola [13]	34
Obrázek 24: Saab 9-5 Combi se systémem Sarsys Friction Tester [14]	35
Obrázek 25: Dodávkový vůz firmy VARS BRNO a. s. značky Chevrolet s nástavbou ARAN [15]	36
Obrázek 26: Schéma ideového měřicího přístroje	38
Tabulka 1: Součinitelé přilnavosti pro různé povrchy vozovek [9]	20
Tabulka 2: Kritéria pro hodnocení povrchu vozovky podle h_P [8]	26
Tabulka 3: Kritéria pro hodnocení povrchu vozovky podle h_M [8]	27
Tabulka 4: Požadované hodnoty součinitele tření f_k [8]	29
Tabulka 5: Součinitel M pro přepočítání f_P na nejmenší roční hodnoty [8]	32
Tabulka 6: Stupnice brzdících účinků [14]	35

Úvod

Toto téma „Návrh metodiky pro zjišťování adhezních vlastností vozovek“ jsem si vybral pro svou bakalářskou práci proto, že adheze jako taková je velice důležitá vlastnost, která vzniká v místě dotyku dvou předmětů. Adheze, neboli také přilnavost přenáší síly mezi dvěma povrchy za relativního klidu „bez vzájemného posunutí“. Proto je možné se s dopravním prostředkem vůbec rozjet. Samozřejmě adheze musí působit nejen v podélném směru, která zabezpečí rozjezd či brzdění, ale také musí působit v příčném směru pro vedení vozidla v námi zvolené stopě. Adheze je velice důležitá vlastnost, protože když přesáhneme její maximální hodnotu přenosu tečných sil, vozidlo se tak dostává do nestabilní fáze skluzu, která vede k neřízenému prokluzu nebo také smyku. Neřízený prokluz nebo smyk je při pohybu dopravních prostředků velice nebezpečný a často končí havárií se škodou na majetku či v nejhorším případě s těžkým zraněním a ztrátou života.

Existuje mnoho inteligentních systémů, jako je ABS, ASR, EMS či FDR a další, které fungují na principu porovnávání obvodových rychlostí různých kol – měření skluzu. Tento princip je možný z důvodu, že „... přenos sil mezi pneumatikou a vozovkou bez prokluzu není možný, protože pneumatika není s vozovkou spojena ozubením a při pohonu nebo brzdění trochu klouže“.[1, s. 493] Tyto systémy fungují dokonale, ale bez předběžného varování. Takřka řidič musí reagovat ve zlomku vteřiny na blikání ASR kontroly, či na zvuk elektroventilů jednotky ABS, aby vůbec věděl, že se blíží do nestabilní oblasti skluzu. Tyto systémy udělají velkou práci za řidiče, avšak jsou určité meze, kde se i velmi sofistikovaný systém dostává na okraj fyzikálních zákonů a naše situace se tak stává kritickou.

Proto beru zjišťování adhezních vlastností vozovek, ať už přímým či nepřímým měřením, jako **prevenci bezpečné jízdy**. Dále s těmito poznatky o adhezi dané vozovky (např.: závodní dráha) můžeme předpokládat, jak se určité vozidlo na ní bude chovat.

1 Adheze

1.1 Adheze obecně

Jak už bylo uvedeno, adheze či soudržnost nebo také přilnavost je z fyzikálního hlediska jev, při kterém dochází k přenosu sil mezi dvěma objekty. Objekty se navzájem dotýkají svými stykovými plochami a k přenosu sil dochází bez jakéhokoli posunutí jednoho objektu po druhém. Může však dojít k lehké relativní výchylce, a to za předpokladu zahrnutí deformací, které se při přenosu sil na povrchu daných objektů vytvoří. Princip adheze velmi úzce souvisí s molekulovou strukturou jednotlivých povrchů, při kterých se stále uplatňují fyzikální a chemické vazby.

1.1.1 Adhezní síly na příkladech

Velikost adhezní síly je možné si představit v situaci, kdy řídíme vozidlo bez jakéhokoliv systému zamezující blokování kol na zledovatělé vozovce a nutně potřebujeme zastavit z důvodu náhlé překážky na vozovce. Prudkým sešlápnutím brzdového pedálu dostaneme téměř okamžitě kola do smyku a v první chvíli se zdá („subjektivní názor“), že jsme spíše zrychlili, než zpomalili. Samozřejmě zrychlení není možné a je to jen klamný vjem, avšak brzdný účinek není tak velký, jak bychom předpokládali. Je to dáno tím, že při volné jízdě, kdy kola nejsou ve skluzu, jsou veškeré síly mezi zledovatělou vozovkou a vozidlem přenášeny adhezními silami. Adhezní síly jsou poměrně velké, avšak o adhezi mluvíme pouze tehdy, když dva dotýkající se povrchy (styčná plocha pneumatiky a vozovka) se vzájemně nepohybují. Při smyku kol po vozovce dochází k výraznému relativnímu pohybu mezi kolem a vozovkou, proto nemůžeme hovořit o adhezním přenosu sil, ale o smykovém tření. Smykovým třením se přeneše poměrně menší síla než při adhezním přenosu sil, a proto brzdný účinek není tak velký jako v situaci kontrolovaného brzdění při nezablokování kol.

Dále si adhezní sílu můžeme představit jako sílu potřebnou k rozpohybování skříně, když jí potřebujeme přesunout v pokoji na jiné místo. Všimněte si, že když už se vám to podaří a skřín se začala pohybovat, už nemusíte vynakládat takovou sílu. Tímto momentem jste překonali adhezní sílu a náhle pro další posun vám stačí překonávat pouze třecí sílu, která je z pravidla o něco nižší, než je ta adhezní. Z tohoto poznatku můžeme najít lehkou závislost adheze na tření.

Adheze samozřejmě velmi závisí na hmotnosti daného objektu či na síle, kterou je daný objekt přitlačován k podložce. Je určitě lehčí pohnout se 100 kg stolem než s 200 kg stolem. Dále také závisí na podložce. Jiné bude posouvání na linoleu, parketách anebo na koberci. Tento poznatek přirovnávám k makrostruktuře podložky. Také bude hodně záviset na tom, jaký máte povrch, zda dokonale rovný či zvlněný. Bude-li značná nerovnost pod vaší skříní a bude-li se skřín kymáčet, určitě bude snazší jí popostrčit, než když daná nerovnost bude ještě před hranou (ve směru pohybu) vaší skříně. Tento poznatek přirovnávám k pojmu rovnost podložky.

Dále si adhezi můžeme představit jako tzv. studený svar mezi dvěma Johanssonovými měrkami, které mají velmi dobrou povrchovou úpravu a takřka při jejich delším styku dojde k „přilepení“. Tento poznatek přiřazuji k mikrostruktuře podložky.

1.2 Druhy adheze

Adhezní jev funguje pomocí pěti základních druhů mechanismu, a to pomocí mechanické, chemické, disperzní, elektrostatické a difuzní adheze.

1.2.1 Mechanická adheze

Adhezní materiály vyplní či se vtlačí do dutin nebo pórů povrchů podložky a tímto se drží pospolu díky vzájemné blokaci pohybu. Tato adheze má velký vliv u pneumatik určené pro jízdu v terénu či po zasněžených nebo nezpevněných vozovkách (obrázek 1).



Obrázek 1:Pneumatika do terénu GOODYEAR WRANGLER [2]

1.2.2 Chemická adheze

K chemické adhezi dochází při navázání povrchových atomů do vazebných dvojic, a to iontovou, kovalentní či vodíkovou vazbou. Dochází tak při sdílení elektronů jednotlivých atomů obou povrchů. Tato adhezní síla vzniká ve velmi malých vzdálenostech, protože

standardní povrchy nejsou dokonale hladké, vzniká tato síla jen v malých styčných plochách a z technického hlediska je velmi malá.

1.2.3 Disperzní adheze

K disperzní adhezi, nebo jinak řečeno absorpční adhezi dochází mezi dvěma materiály za pomoci Van der Waalsovy síly. Tato síla působí mezi dvěma molekulami s opačnými náboji a působí na ně tak, že se molekuly přitahují. Pevnost spojení za pomoci disperzní adheze ovlivňuje především velikost a povrchová úprava stykových ploch a jeho vlastnosti pojíjí se k smáčení jeho povrchu.

1.2.4 Elektrostatická adheze

Elektrostatická adheze vzniká mezi dvěma vodivými materiály s opačným nábojem. Vzniklý potenciál mezi těmito materiály tvoří elektrostatické pole, které vytváří základ pro vznik adheze. Takřka jde o přitažlivé síly vzniklé mezi materiály na bázi elektrostatiky.

1.2.5 Difuzní adheze

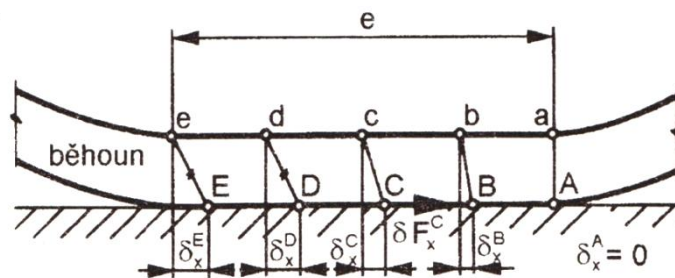
Difuzní adheze vzniká především u polymerů. Tyto přilnavé schopnosti vznikají pomocí vzájemné difuze, která je především závislá na čase, teplotě a relativní molekulové hmotnosti polymeru.

Podrobné rozdělení a vysvětlení jednotlivých druhů adheze viz literatura [3, s. 252 – 260] dále také [4, s. 15 – 22] a [5].

2 Adheze u silničního vozidla

„Přenos tečné síly mezi kolem a vozovkou je umožněn třením pryže pneumatiky o vozovku, zachytáváním běhounu o mikronerovnosti vozovky a molekulárními silami soudržnosti mezi běhounem a povrchem vozovky.“ [6, s. 41]

Při vzniku těchto sil a působením hnacího momentu motoru na kola, se pryž pneumatiky a povrch vozovky mírně deformuje. Může za to jejich schopnost elasticity. Tyto deformace nám také charakterizují valivý odpor pneumatiky, přičemž jejich elasticita má své meze a v každém místě plochy dotyku je jinak velká. Mechaniku přenosu tečných sil mezi kolem a vozovkou zobrazuje obrázek 2.

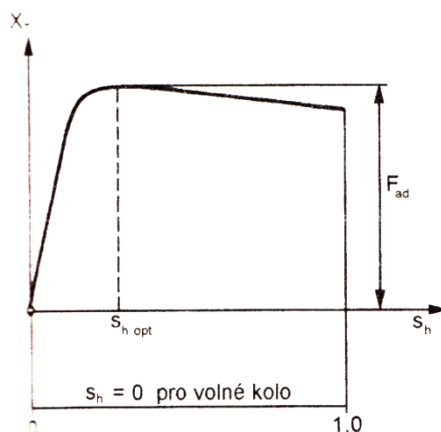


Obrázek 2: Mechanika přenosu sil ve styku kola s vozovkou [6]

Na obrázku je zobrazen styk běhounu pneumatiky s vozovkou. Vpravo vidíme nezdeformovanou část A, zde dochází k prvnímu styku zaměřené části běhounu s vozovkou (určí směr pohybu). Směrem doleva vidíme úseky B a C, v nichž se postupně zvyšuje deformace δ (stále je zaručená soudržnost), až do úseků D a E, kde už je soudržnost pneumatiky a vozovky překonána. Zde se deformace drží na konstantní velikosti, ale dochází zde k relativnímu pohybu mezi elementy běhounu a vozovky. Tuto část nazýváme místem skluzu a její velikost určujeme v procentech k celkové styčné ploše. V praxi je skluz brzděného kola počítán jinak. Jde o poměr, kde v čitateli je rozdíl skutečné rychlosti vozidla s obvodovou rychlostí kola dělené jmenovatelem, kde je obsažena skutečná rychlost vozidla. Jak uvádí vztah 1. Také lze místo obvodové rychlosti kola dosadit dynamický poloměr kola a skutečnou rychlost vozidla nahradit valivým poloměrem kola, který se vlivem přenosu sil mění. Pro výpočet skluzu pro hnané s_n kolo stačí zaměnit skutečnou rychlost vozu za obvodovou rychlost kola a obráceně.

$$s = \frac{v_{\text{vozidla}} - v_{\text{obvodová kola}}}{v_{\text{vozidla}}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

Typickou závislost mezi působící tečnou silou X_T a vzniklým skluzem s_h znázorňuje obrázek 3.



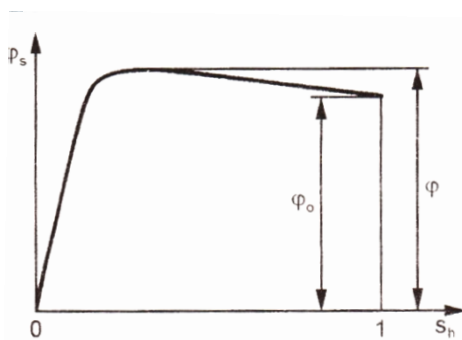
Obrázek 3: Závislost tečné síly na skluzu [6]

Na vodorovné ose je zobrazena změna skluzu od 0 do 1 (těž vyjádřeno v procentech). Na svislé ose vidíme závislou tečnou sílu na skluzu. Maximum vykreslené křivky říká, jaký je optimální skluz a jak velkou adhezní sílu je styk kola s vozovkou schopen přenést při určité adhezní tíze G_{ad} . Adhezní tíha je síla kola působící na vozovku při daném jízdním režimu a je rovna velikosti reakce podložky Z_k .

„Vyjádříme-li poměrnou velikost působící tečné síly vzhledem k adhezní tíze součinitelem tečné síly φ_s podle vztahu, (vztah 2)

$$\varphi_s = \frac{X_T}{G_{ad}} \quad (2)$$

pak tvoří grafické znázornění závislost $\varphi_s(s_h)$ skluzovou charakteristiku pneumatiky.“ [6, s. 42] (viz obrázek 4)

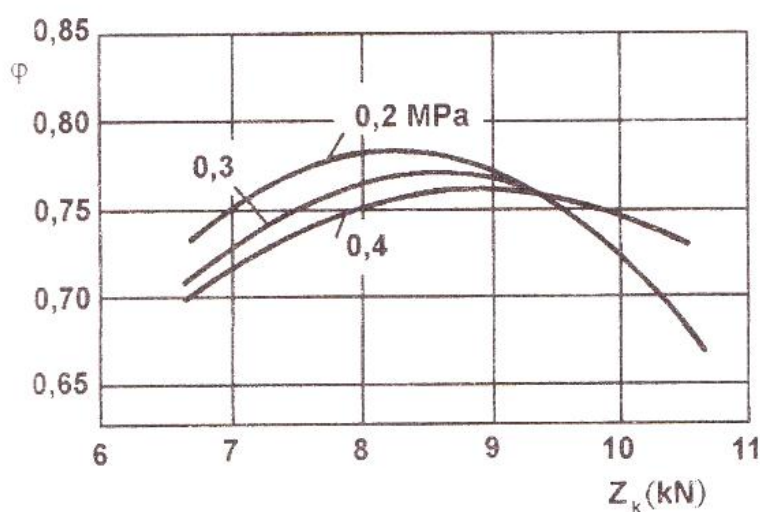


Obrázek 4: Skluzová charakteristika pneumatiky [6]

„Důležitý fyzikální význam má maximální hodnota součinitele tečné síly φ , která se nazývá součinitel adheze a je dosahovaná většinou při skluzu 15 – 30%.“ [6, s. 42]

2.1 Faktory ovlivňující velikost adhezní síly

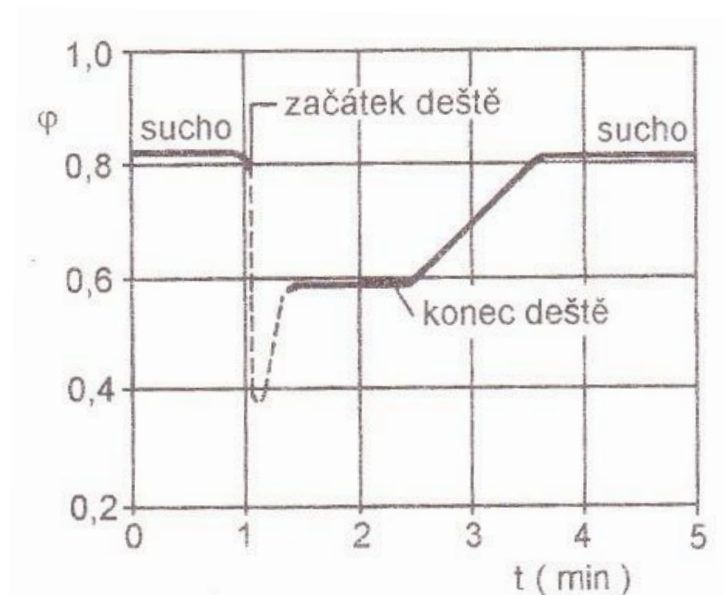
Ze základní rovnice vyplývá, že na adhezní sílu bude mít vliv adhezní tíha, která se jízdou vozidla může různě měnit. Mění se za působení vnitřních sil, jako je například vliv odstředivých sil průjezdem zatáčky, nebo také působením setrvačných sil během prudkého rozjezdu či brzdění, jízdou po nakloněné rovině apod. Dále se také mění za působení vnějších sil, jako je působení větru (viz obrázek 5).



Obrázek 5: Závislost součinitele adheze na zatížení kola [6]

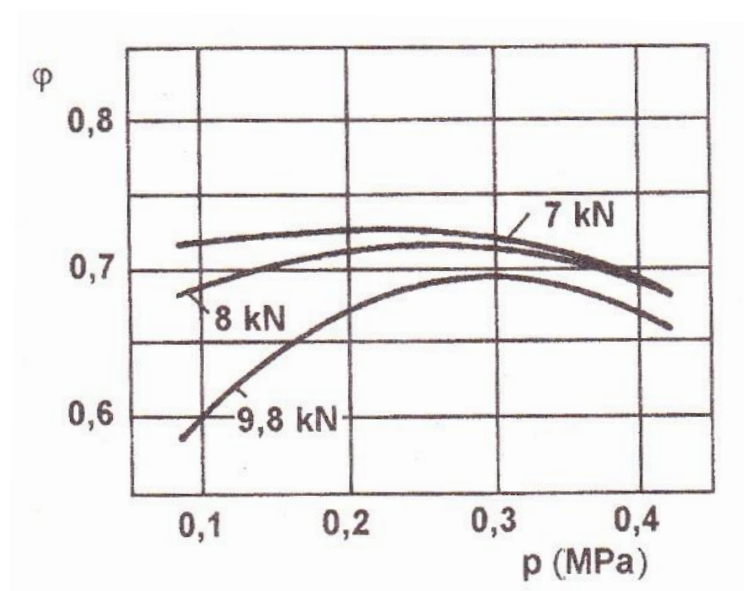
Na obrázku vidíme závislost součinitele adheze (svislá osa) na zatížení kola (neboli adhezní tíha – vodorovná osa) ve třech křivkách pro různá huštění pneumatik (0,2; 0,3; 0,4 MPa).

Dále je velikost adhezních sil závislá na součiniteli adheze, který je závislý na velikosti styčné plochy (platí u pryže), povrchové struktúře jednotlivých styčných ploch, materiálu styčných ploch, teplotě, vlhkosti, velikosti vodního filmu za deštivého počasí, množství nečistot mezi povrchy a dalšími (viz obrázek 6).



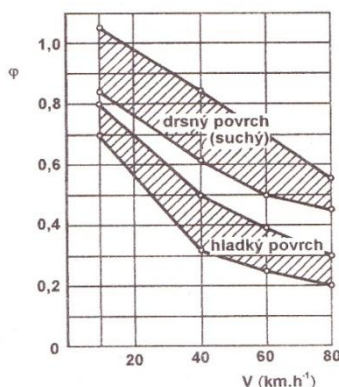
Obrázek 6: Závislost součinitele adheze na stavu vozovky [6]

Adheze je také závislá na skluzu vznikajícím v místě styku pneumatiky s vozovkou. Skluz je ovlivněn tím, jak dobře se odvaluje pneumatika po vozovce. Správné odvalování umožní kvalitní geometrie kol a platí jak pro přímou jízdu, tak pro jízdu v zatáčce. Správné odvalování kol a velikost styčné plochy je ovlivněno i přesným huštěním pneumatik, které je přímo úměrné jejich zatížení nákladem (viz obrázek 7).



Obrázek 7: Závislost součinitele adheze na tlaku huštění pneumatiky [6]

V neposlední řadě součinitel adheze závisí na rychlosti pohybujícího se vozidla. Tuto závislost demonstruje obrázek 8: Závislost součinitele adheze na rychlosti jízdy [6].



Obrázek 8: Závislost součinitele adheze na rychlosti jízdy [6]

2.2 Adheze ze strany pneumatiky

„Pneumatika má zcela mimořádný význam pro jízdní bezpečnost prakticky každého silničního vozidla. Odborníci hovoří o tom, že pneumatiky a brzdy jsou vůbec nejvýznamnějšími konstrukčními prvky, pokud jde o komplex aspektů spojených s jízdní bezpečností. Z oněch dvou prvků jsou pneumatiky zřejmě důležitější, neboť výsledný účinek brzd je na nich bezprostředně závislý. Je dobré vědět, jak složitý výrobek moderní pneumatika představuje.

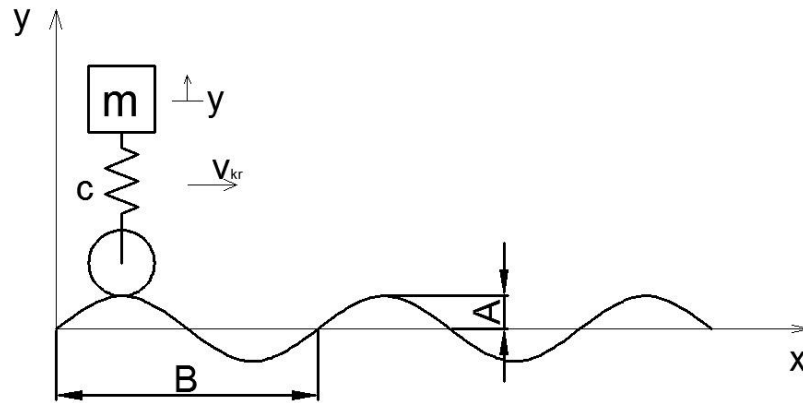
Principiálně se pneumatika skládá ze tří hlavních komponentů: 80-85 % tvoří pryž, 12-16 % různá vlákna a 2-3 % připadají na ocelový drát či umělohmotnou síť. Soudobá pneumatika je vyztužený kompozit vyrobený z polymerů (39 %), černých sazí (27 %), olejů (11 %), různých chemikálií (11 %), patkových lan (3 %) a textilií.“ [7, s. 10]

Povrchová plocha pláště pneumatiky je opatřena tzv. dezénem pneumatiky. Dezén pneumatik může mít mnoho podob. Je to soustava různě uspořádaných žlábků, které mají za úkol rozrušovat vodní film, či malou vrstvu sněhové pokrývky, za účelem dostat se do přímého styku kola s vozovkou, a tak umožnit přilnavost pneumatiky k vozovce. Soustava žlábků tvoří různé geometrické obrazce tzv. figury. Dostatečná výška figur je zvláště důležitá u mokré či sněhem zaváté vozovky, kde je potřeba odvádět velké množství vody. U sněhem zaváté vozovky, kdy se dezén nedostane až na povrch vozovky, už nemluvíme o přilnavosti kola s vozovkou, ale o sjízdnosti sněhové pokrývky. Figury za těchto podmínek se zarývají do sněhové „přikrývky“ a pomocí stěn přenášejí trakční a brzdící síly.

2.3 Adheze ze strany vozovky

U vozovky se v praxi měří a hodnotí rovnost a drsnost povrchu. Po těchto měření se komunikaci přiřadí klasifikační číslo (1 až 5) a rozhodne se návrhová rychlost na komunikaci.

Rovnost povrchu přímo nesouvisí s adhezí vozovky, ale velmi ovlivňuje chování vozidla na vozovce. Rovnost povrchu hodnotíme jak v podélném („vyjeté koleje“), tak v příčném profilu (hrby na vozovce vzniklé působením podélných sil – brzdění, akcelerace). Na této vlastnosti vozovky je velmi závislá pružící schopnost podvozku automobilu. Při nadměrné nerovnosti vozovky, nebo při stavu, kdy se frekvence nerovnosti a frekvence vypružení za určité rychlosti shodují – dochází k rezonančnímu jevu, který dále vede k odskoku kola a tím i ke ztrátě přilnavosti. Jízdu po zidealizovaném povrchu zobrazuje obrázek 9.



Obrázek 9: Jízda po zidealizovaném povrchu

Na tomto obrázku vidíme zidealizovaný povrch, který je sinusového průběhu. Po něm se dokonale odvaluje kolo s lineární pružinou bez tlumiče zatížené hmotou vozidla. V tomto případě se kritická rychlost, kde dochází k rezonančnímu stavu, vypočítá takto: (vztah 3)

$$v_{kr} = \sqrt{\frac{c}{m} \cdot \frac{B}{2\pi}} [m \cdot s^{-1}] \quad (3)$$

Kde: c – tuhost pružiny

m – část hmotnosti vozu působící na kolo

B – periodická vzdálenost sinusové trati (vzdálenost výmolů)

Drsnost povrchu je funkcí tzv. geometrické drsnosti, kterou se rozumí uspořádání, velikost a tvar profilu povrchu vozovky vytvořeného jednotlivými zrny kameniva. Tato charakteristika je vyjádřena průměrnou hloubkou makrotextury.

„Drsnost povrchu vozovky nebo také protismykové vlastnosti povrchu vozovky jsou funkcí hrubozrnnosti, nebo jemnozrnnosti povrchu kvalitativních parametrů použitých materiálů vyjádřených součinitelem tření.“ [8, s. 29]

Metody měření protismykových vlastností vozovek se dělí na:

- Přímé metody, kterými se měří přímo třecí síly nebo součinitel tření na zkoušeném povrchu.
- Nepřímé metody, kterými se měří charakteristiky povrchu, pro něž se definovaly závislosti mezi těmito hodnotami a součinitelem tření a z této závislosti se odvodila i jejich kritéria pro hodnocení kvality povrchu vozovky.

Pro přímé metody měření se používají laboratorní přenosná zařízení, dynamometrické přívěsy a speciální automobily, pomocí kterých se zjišťuje součinitel adhezního tření přímo.

Mezi nepřímé metody patří například vysypávání povrchu pískem, stereofotogrammetrické měření povrchu, mechanické měření povrchu, optické snímání povrchu a zjišťování drsnosti povrchu ultrazvukem nebo laserem. Tyto metodiky nám dají speciální veličinu většinou v jednotkách míry, ze kterých se přes koeficient korelace dále dopočítáme k našemu potřebnému součiniteli adhezního tření.

Více o adhezi ze strany vozovky viz literatura [8, s. 29].

Obvyklé součinitele adhezního tření μ_0 (adhezní koeficienty) pro různé povrchy vozovek udává tabulka 1: Součinitelé přilnavosti pro různé povrchy vozovek [9].

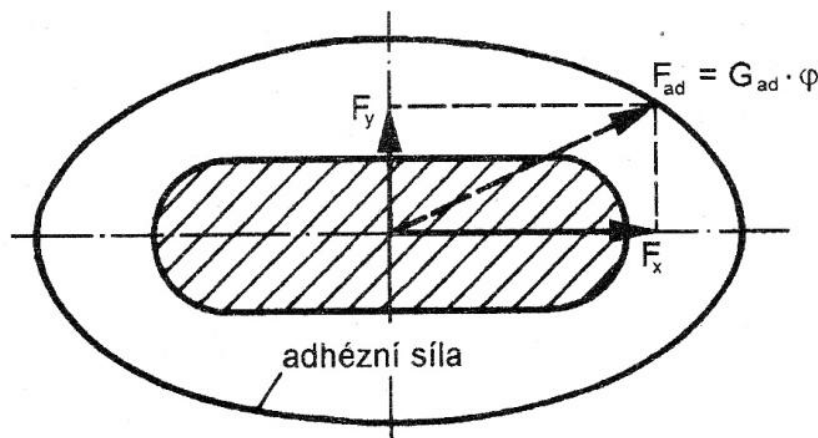
Tabulka 1: Součinitelé přilnavosti pro různé povrchy vozovek [9]

Vozovka		Hodnota	Vozovka		Hodnota
beton	suchý	0,8 – 1,0	asfalt	suchý	0,6 – 0,9
	mokrý	0,5 – 0,8		mokrý	0,3 – 0,8
dlažba	suchý	0,6 – 0,8	makadam	suchý	0,6 – 0,8
	mokrý	0,3 – 0,5		mokrý	0,3 – 0,5
polní cesta	suchý	0,4 – 0,6	tráva	suchý	0,4 – 0,6
	mokrý	0,3 – 0,4		mokrý	0,2 – 0,5
hluboký písek, sníh		0,2 – 0,4	náledí		0,1 – 0,3

Podrobný popis metodik pro zjišťování adhezních vlastností vozovek současného stavu je v kapitole 3.

2.4 Dynamika vozidla ve vztahu k adhezi

Jak již bylo uvedeno, schopnost jízdy vozidla velmi záleží na adhezních podmínkách, které ovlivňují maximální přenesenou podélnou a příčnou sílu. Tyto síly v jednom okamžiku nemohou být maximálně velké, jak jim příčná a podélná adheze dovoluje v samostatném stavu, ale jsou na sobě závislé. Například, když dojde k maximálnímu přenosu brzděné síly u řídicího kola a nedojde k blokaci, už se dále nemohou přenést jakékoliv směrové síly. Brzděním došlo k vyčerpání veškeré adhezní síly a jakákoli jiná síla potřebná pro zatočení není možná. Pokud se však vyžaduje při takovém brzdění síla potřebná pro zatočení, překoná se maximální adhezní síla a vozidlo se tak dostává do nestabilní fáze skluzu, jehož následkem je smyk. Pro tento případ přenosu sil hovoříme o adhezní elipse současně přenášených sil, kde elipsa znázorňuje hranice maximální adheze a jednotlivé vektory sil se vektorově sčítají (Pythagorova věta). Eliptický tvar proto, že adhezní podmínky pneumatik (tj. rozvržení vzorku a obdélníková plocha) jsou pro podélný a příčný směr jiné. Současný přenos podélné a příčné síly vyjadřuje obrázek 10 a vztah 4.



Obrázek 10: Současný přenos podélné a příčné síly [6]

$$\sqrt{F_x^2 + F_y^2} \leq F_{ad} = G_{ad} \cdot \varphi \text{ [N]} \quad (4)$$

2.4.1 Podélné síly (akcelerace, brzdění)

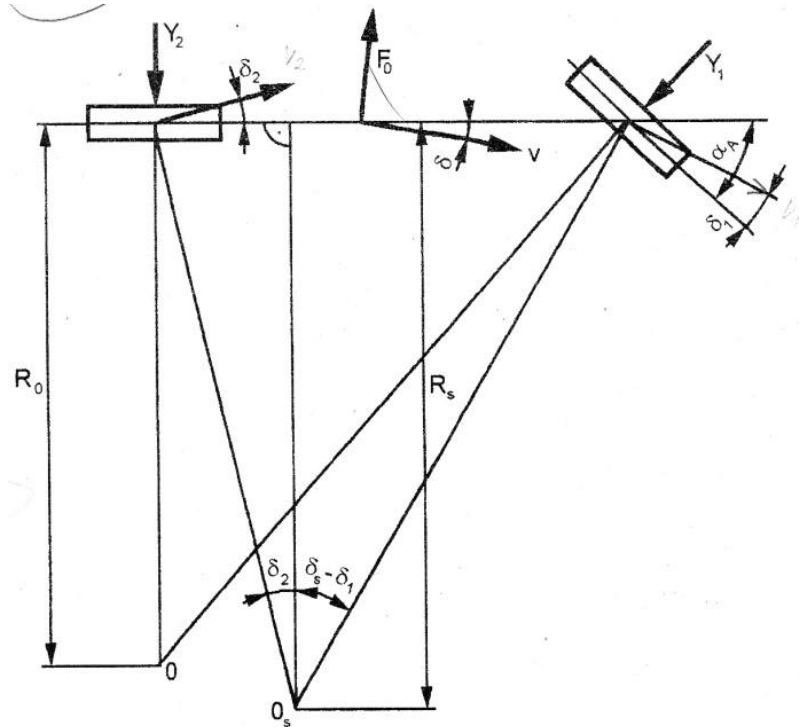
Každé motorové vozidlo má svůj zdroj pro vytvoření určité síly k rozpořybování vozidla. Vlastnosti tohoto zdroje se udávají vnější charakteristikou motoru. Jde o křivky produkovaného krouticího momentu a výkonu motoru v závislosti na otáčkách. Avšak tento výkon je dále snižován jednotlivými účinnostmi převodových soustav mezi motorem a vozidlovým kolem. Koncový krouticí moment na vozovém kole je závislý na přeneseném výkonu a na celkovém převodovém poměru, který máme zařazen. Z tohoto krouticího momentu a dynamického poloměru kola získáme sílu, kterou dané vozidlo působí na vozovku. Avšak tato síla je limitována silou adhezní a nedovoluje jakýmkoli způsobem větší než adhezní sílu převést.

Stejně jako systém pro sílu, která vozidlo rozpořybuje, tak má každé vozidlo systém, který má za úkol vozidlo zpomalit, zabrzdít či zajistit proti případnému nežádoucímu pohybu. Nejnovější systémy brzd už jsou velmi sofistikované. Nejen že nedovolí úplnému zablokování kol při prudkém brzdění, ale také při stavu nebezpečného přiblížení k překážce dokáže zajistit vozidlo proti havárii vlastním kontrolovaným brzděním, a to i v případě nepozornosti řidiče. Avšak brzdící účinek nebude vyšší, než mu adhezní podmínky dovolí.

Poznámka: Tyto síly fungují stejně tak, jak je uvedeno na obrázku 2.

2.4.2 Příčné síly (průjezd vozidla obloukem)

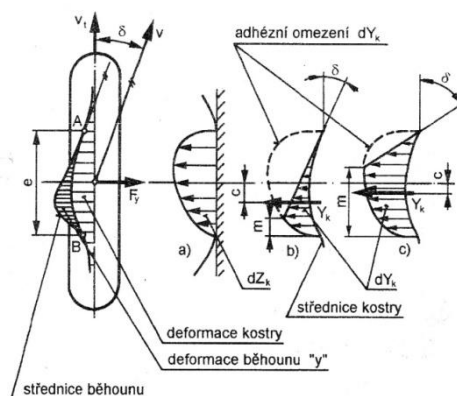
Nejčastější systém pro řízení směru jízdy je pomocí rejdových kol, kdy je většinou přední náprava řidicí. Pro ideální odvalování kol v malé rychlosti stačí dodržet tzv. Ackermannovy podmínky natočení kol. Avšak tuto rovnici pro jízdu ve vyšší rychlosti musíme rozšířit o dynamické účinky odstředivých sil. Tyto odstředivé síly jsou zachytávány v pneumatikách jako reakce styku kola s vozovkou a vyvolávají určité deformace, které způsobují směrové úchyly kol. Pro určení těchto sil a také pro určení poloměru zatáčení v závislosti na natočení volantu, poslouží po mnoha zjednodušeníh jednostopý rovinný model dvounápravového vozidla (viz obrázek 11).



Obrázek 11: Jednostopý rovinný model dvounápravového vozidla při jízdě s konstantním natočením volantu [6]

Na obrázku 11 vidíme jednoduchý model, kde: R_0 je teoretický poloměr zatáčení; R_s je skutečný poloměr zatáčení; α_A je průměrný úhel natočení kol; δ je směrová úchylka vozidla; $\delta_{1,2}$ jsou směrové úchylky kol jednotlivých náprav; síla F_0 zastupuje odstředivé síly vzniklé v průjezdu zatáčkou a síly $Y_{1,2}$ znázorňují reakce na tuto odstředivou sílu.

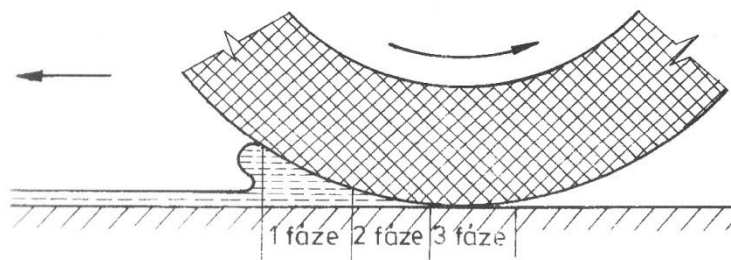
Reakce vzniklé ve styku kol s vozovkou na odstředivou sílu jsou taktéž omezeny adhezí a velmi dobře jej zobrazuje obrázek 12: Valení kola za působení boční síly [6].



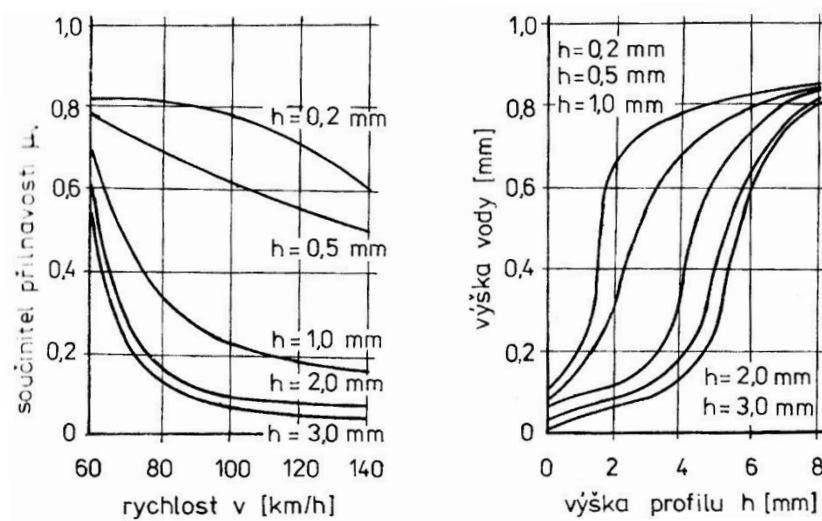
Obrázek 12: Valení kola za působení boční síly [6]

2.5 Aquaplaning

„Při vysokých rychlostech jízdy se může na zaplavené vozovce mezi pneumatikou a povrchem vozovky vytvořit vodní klín, který oddělí pneumatiku od vozovky.“ [1, s. 504] Poté přenos sil mezi pneumatikou a vozovkou prochází přes tuto vrstvu vody, což vede k prudkému poklesu součinitele adheze až k hodnotě $0,01 \div 0,001$. [6, s. 43]. Tento jev zobrazuje obrázek 13: Vznik aquaplaningu [9]. Průběhy součinitele adheze v závislosti na velikosti vodního profilu a výšky dezénu pneumatiky zobrazuje obrázek 14 s grafy.



Obrázek 13: Vznik aquaplaningu – 1. Fáze: nepřenesený vodní film; 2. Fáze: částečně převedený vodní film; 3. Fáze: kontakt kola s vozovkou [9]



Obrázek 14: Vliv rychlosti a výšky profilu figury na součinitele adheze [9]

3 Současný stav zjišťování adhezních vlastností vozovek

V této kapitole uvádím různé metody zjišťování adhezních vlastností vozovek, které se v současné době používají. Způsob použití těchto metodik je v ČR dán normou ČSN 73 6177 [10] (dále jen norma), která vydává ke každé metodě svá kritéria. Podle nich se hodnotí stav adhezních vlastností vozovek.

3.1 Měření hloubky makrotextury pískem

Účelem této zkoušky je zjistit průměrnou hloubku makrotextury povrchu vozovky. Podstatou zkoušky je zasypání povrchu vozovky určitým objemem písku, který se rovnoměrně rozprostře. Ze vzniklé plochy se vypočítá průměrná hloubka profilu.

- Příprava a postup měření:

Dle normy se na měřeném úseku zvolí 3 místa. Místa musí charakterizovat nejvíce zatěžovanou oblast vozovky, jako je například prudké stoupání, zatáčka, místo před křižovatkou, kde se nejčastěji brzdí a akceleruje + rizikové úseky. Zvolená místa musejí být čistá, suchá a bez jakýchkoliv abnormalit, jako je například prasklina či výmol. Pro uspokojivý výsledek měření, kdy můžeme promítnout výsledek z jedné části na celek, provádíme 5 měření v obou stopách přibližně po 5-ti metrech ve směru jízdy. Na jednom místě tak dostaneme 10 hodnot, což z měřeného úseku poskytne celkem 30 hodnot.

Připravený jemnozrný písek známého objemu (přibližně 25 cm³) se krouživým pohybem stěrky rozprostře na povrchu vozovky do kruhového tvaru (viz obrázek 15), až se vytvoří rovina, která symbolizuje výšku výstupků (viz obrázek 16). Tento kruhový útvar změříme ve více rovinách a výsledky zprůměrujeme. Dostáváme tak průměr obrazce, pomocí kterého vypočítáme hloubku textury podle vztahu 5.

$$h_p = \frac{10^5}{\pi \cdot d_p^2} [mm] \text{ Jak uvádí literatura [8, s. 30]} \quad (5)$$

Hodnota průměrné hloubky makrotextury se porovná s tabulkou obsahující kritéria daná normou. (Tabulka 2)

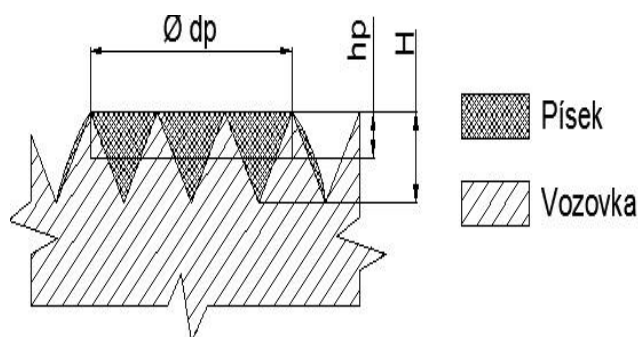
Tabulka 2: Kritéria pro hodnocení povrchu vozovky podle h_p [8]

Hodnocení	Návrhová rychlost na komunikaci	
	$v_n < 80 \text{ km/h}$	$v_n \geq 80 \text{ km/h}$
Vozovka nevyhovuje, povrch je potřeba zdrsnit	$h_p < 0,22^{1)}$	$h_p < 0,22^{1)}$
Je nutné provést doplňující měření dynamometrickým přívěsem	$0,22 < h_p \leq 0,80$	$0,22 < h_p \leq 0,55$
Vozovka vyhovuje	$h_p > 0,80$	$h_p > 0,55$

¹⁾Pokud jde o výsledky prvního měření a není možné provést měření dynamometrickým přívěsem, je třeba osadit dopravní značky omezující rychlost na 40 km/h a tyto dopravní značky doplnit dodatkovou značkou „Nebezpečí smyku“.
Poznámka: Při dalším měření musí vozovka vyhovovat hodnotám uvedené v této tabulce.



Obrázek 15: Měření hloubky makrotextury pískem



Obrázek 16: Princip měření hloubky makrotextury pískem

- Výhody a nevýhody měření pískem

Nevýhodou je, že tato metoda pracuje s určitou nepřesností, jako je například odhadování okraje měřené plochy, použití nepřesného objemu písku a námi tvořený nestálý přítlak na stěrku. Toto měření se dá provádět pouze za suchého a bezvětrného počasí (možnost použití zástěn).

Výhodou je pak její snadné provedení, je finančně nenáročná, a relativně rychlá na provedení a vyhodnocení výsledků, které je s použitím výpočetní techniky jednoduché.

Korelační závislost k následující metodě měření hloubky makrotextury mikroprofilografem je $r \cong 0,99$.

Více o metodě měření makrotextury pískem viz literatura [8, s. 30].

3.2 Měření hloubky makrotextury mikroprofilografem

Touto zkouškou zjišťujeme střední hloubku makrotextury přímým měřením hloubky pomocí mikroprofilografu. Zkoušku provádíme přímo na vozovce nebo v laboratořích na vzorcích vozovky (odlitek či výřez).

- Princip a postup měření

Dokonale očištěné vozovky se postupně dotýká jehla mikroprofilografu. Měřený přímý úsek je 140 mm dlouhý s četností dotyku jehly přibližně 40x na každých 10-ti milimetrech, což poskytne z každého úseku měření přibližně 560 hodnot. Tyto hodnoty se proloží jejich střední hodnotou a od této hladiny se dále získá 5 největších a 5 nejmenších hodnot. Zjištěné výsledky se zapisují buď na voskový papír (analogový přístroj) nebo v podobě dat (digitální přístroj). Dle normy se na jednom místě provede hned 5 měření, která jsou od sebe vzdálena 5 m po směru jízdy. Přitom na každém místě se udělají 2 měření vzájemně posunutá o 100 mm.

Ze získaných maximálních a minimálních hodnot hloubky makrotextury vypočítáme střední hloubku makrotextury podle vztahu 6:

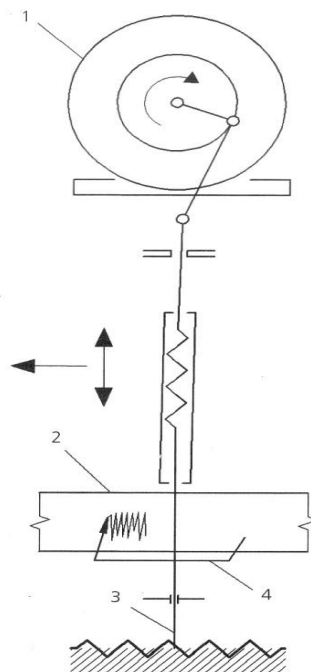
$$h_M = \frac{(h_{M1}+h_{M2}+\dots+h_{M5})-(h_{M6}+h_{M7}+\dots+h_{M10})}{5 \cdot 4} [mm] \quad (6)$$

Hodnota střední hloubky makrotextury se porovná s tabulkou obsahující kritéria daná normou. (Tabulka 3)

Tabulka 3: Kritéria pro hodnocení povrchu vozovky podle h_M [8]

Hodnocení pro hraniční hodnoty	Návrhová rychlost	
	$v_n \geq 80km/h$	$v_n < 80km/h$
Na začátku používání pro cementobetonový kryt	$h_M = 2,84$	$h_M = 2,30$
Na začátku používání pro asfaltový kryt	$h_M = 1,95$	$h_M = 1,62$
Stav vyžadující obnovu pro cementobetonový kryt	$h_M = 1,34$	$h_M = 0,84$
Stav vyžadující obnovu pro asfaltový kryt	$h_M = 0,94$	$h_M = 0,59$

Schéma funkce mikroprofilografu zobrazuje obrázek 17: Schematický náčrt mikroprofilografu [6].



Obrázek 17: Schematický náčrt mikroprofilografu; 1 – elektromotor, 2 – voskový registrační papír, 3 – jehla s vyznačením směru pohybu, 4 – zapisovací jehla [8]

- Výhody a nevýhody měření střední hloubky makrotextury mikroprofilografem

Mikroprofilograf poskytuje relativně přesné výsledky měření, ale jeho cena je velmi vysoká. Další nevýhodou je, že se tato zkouška nesmí používat při teplotách nad 25 °C, při které by docházelo k pronikání jehly do teplem změkčené vrchní vrstvy vozovky. Novodobé přístroje mají přímou vazbu s výpočetní technikou a za pomoci speciálních programů jsou tak naměřená data bez problému vyhodnocena. „Korelační závislost hodnot h_M a f_P je poměrně malá – koeficient korelace $R \cong 0,78$.“ [8, s. 31]

Více o metodě měření makrotextury mikroprofilografem viz literatura [8, s. 31].

3.3 Měření součinitele tření kyvadlem RRL

Touto zkouškou zjišťujeme koeficient tření povrchu vozovky pomocí ztráty kinetické energie třením kyvadla o vozovku. Zkouška je rychlá a lze provést přímo na vozovce (měření v terénu), ale také na odebraných vzorcích v laboratořích.

- Princip a postup měření

Na vozovku se ustaví do vodorovné polohy (pomocí libely) přenosné RRL kyvadlo. Místo dráhy dotyku se očistí a navlhčí dostatečnou vrstvou vody. Nejprve se uskuteční zkušební výkmit na prázdno, při kterém provedeme nastavení stupnice na nulu. Nastavení je nutné z důvodu ztrátové energie otočného čepu a okolních podmínek. Poté se nastaví správná výška kyvadla, na které je přímo závislá délka prokluzu patky kyvadla a provede se měřící výkmit. Výkmit se provádí ve směru pohybu vozidel. Změna výšky střelky ukazatele zobrazuje ztrátu energie třením. Součinitel tření se vypočítá dle vztahu 7:

$$f'_K = \frac{G \cdot (H-h)}{p \cdot d} \quad (7)$$

Kde G je hmotnost kyvadla; H je výchozí výška kyvadla; h je konečná poloha kyvadla měřená otočnou střelkou, p je průměrný přítlak pružiny kyvadla, d je kluzná délka kyvadla na zkoušeném povrchu.

Dle normy se na každém úseku uskuteční 5 měření po 5-ti metrech po směru jízdy. Při každém měření se provedou 3 měřící výkmity, ze kterých se vypočítá aritmetický průměr. Získaná hodnota se dále koriguje vlivem teploty vody v místě měření dle vztahu 8.

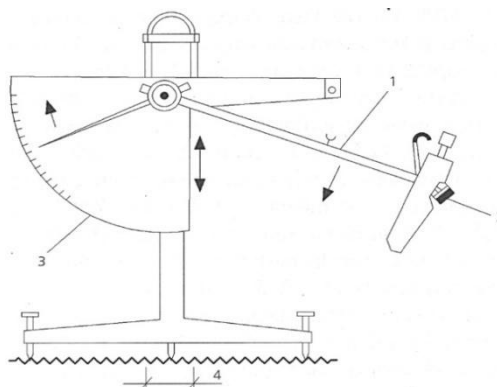
$$f_K = f'_K \pm T \quad (8)$$

Výsledná hodnota tření se porovná s tabulkou obsahující kritéria daná normou. (viz tabulka 4)

Tabulka 4: Požadované hodnoty součinitele tření f_k [8]

Hodnocení	Výsledná hodnota tření
Vozovka nevyhovuje, povrch je třeba zdrsnit	$f_K < 55$
Vozovka vyhovuje	$f_K \geq 55$

Schéma kyvadla a jeho části jsou zobrazeny na obrázku 18 a kyvadlo používané v praxi je na obrázku 19.



Obrázek 18: kyvadlo RRL; 1 – rameno, 2 – třecí pryžová patka, 3 – stupnice, 4 – délka prokluzu patky [8]



Obrázek 19: Kyvadlo KKL používané v praxi [11]

- Výhody a nevýhody měření součinitele tření kyvadlem RRL

Výhodou je rychlé a přesné měření s rychlým vyhodnocením výsledku. Avšak nevýhodou je drahý přístroj a nemožnost měření pod teplotou 5°C.

Více o metodě měření pomocí RRL kyvadla viz literatura [8, s. 31 – 32].

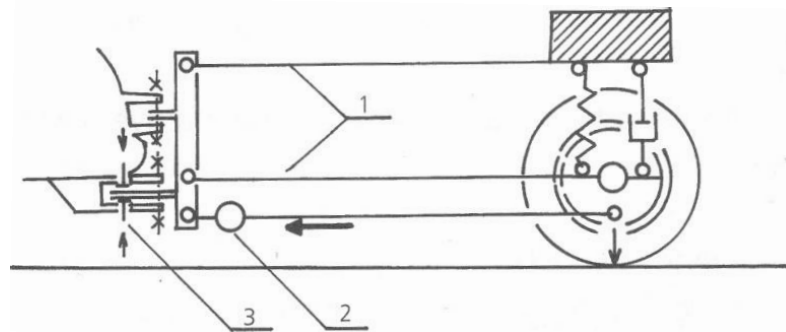
3.4 Měření součinitele podélného tření dynamometrickým přívěsem

Touto zkouškou zjišťujeme součinitel podélného tření pomocí dynamometrického přívěsu. Třecí součinitel se vypočítává přímo ze vstupních hodnot, jako je příčné zatížení kola dynamometrického přívěsu a přímo měřené hodnoty síly vyvolané reakcí na brzděné síly v závěsu tažného vozidla. Dle normy musí vozovka splňovat určité adhezní meze za deštivého počasí, a proto se při měření dynamometrickým přívěsem vozovka kropí určitým množstvím vody.

- Princip a postup měření dynamometrickým přívěsem

Postup měření závisí na několika podmínkách a na účelu využití výsledků. Podmínkou jsou určité vlastnosti měřidla, tažného vozidla a okolního prostředí.

Měřidlo jako samotný přívěs musí být určité konstrukce. Musí mít speciální radiální pneumatiku, která je bez dezénu, radiální konstrukce o jmenovitém rozměru 155 x 13 s huštěním na přetlak 1,7 MPa. Její materiál musí splňovat vlastnost odrazové pružnosti dle Lupkeho kladiva 46 ± 3 . Kolo musí být zatíženo svislou silou 3200 N. Přívěs je k tažnému vozu upevněn tak, aby byl schopen bez jakéhokoli příčného smýkání projet zatáčkou s tím, že jeho náklon bude minimální. Konstrukce přívěsu tvoří mnoho táhel, která tvoří ve svislé rovině rovnoběžník (paralelogram) – pro schopnost jistého odpružení přívěsu. Dále musí být přívěs vybaven velmi účinnou brzdou pro zablokování kola ve vysokých rychlostech a její brzdový účinek musí být regulován. Pro přesné měření zatížení (v podélné a svislé rovině) je přívěs vybaven tenzometry. K odvození skluzu kola je přívěs vybaven otáčkoměrem brzděného kola. Dynamometrický přívěs zobrazuje schematický obrázek 20.



Obrázek 20: Dynamometrický přívěs [8]

Pro správné provedení měření musí i tažený vůz splňovat určité podmínky. Jedním z hlavních požadavků je zajistit bezpečnost posádky během měření a dále vyvinutí rychlosti 120 km/h a udržet se na ní s brzdícím přívěsem. Také musí obsahovat prostor pro ovládání přívěsu se zařízením pro zápis naměřených dat. Pro simulaci vody na vozovce musí být vůz vybaven zásobníkem a systémem pro přesné dávkování vody. A v neposlední řadě musí vozidlo být viditelně označeno světly (majáky) oranžové barvy.

Měřený úsek se volí tak, aby se na něm mohlo bezpečně provádět měření za různých rychlostí a to: 20, 40, 60, 80, 100 a případně i 120 km/h. Proto se toto měření provádí zcela bez provozu. V každé rychlosti se dle normy provede měření pro 100 % skluz (může se měřit

i při nižším skluzu – dle potřeby). Námí zjišťovaný součinitel podélného tření se okamžitě během měření vypočítává z naměřených hodnot tenzometrů, a to z poměru podélných (tečných) a svislých (normálových) sil, jak uvádí vzorec 9: Coulombovo tření.

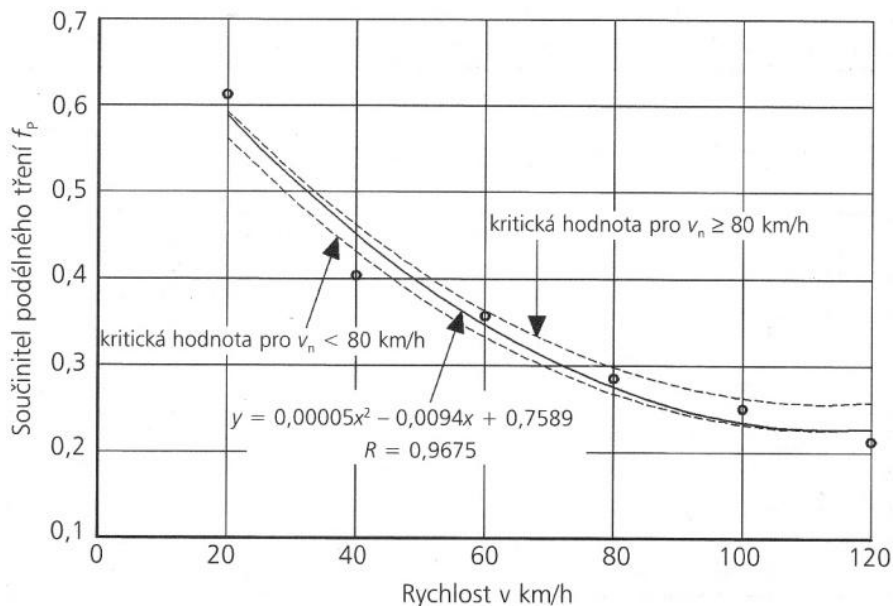
$$f'_P = \frac{T}{N} \quad (9)$$

Tento součinitel tření se dále násobí koeficientem M pro zohlednění teploty ročního období (nesmí se měřit při teplotě pod 5°C). Tabulka 5 ukazuje hodnoty pro určení součinitele M v různých měsících roku. Výchozí hodnota je pro letní období.

Tabulka 5: Součinitel M pro přepočet f_P na nejmenší roční hodnoty [8]

Měsíc	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
Asfaltový kryt	0,86	0,87	0,87	0,88	0,92	0,98	1,00	1,00	0,96	0,90	0,87	0,86
Cementobetonový kryt	0,91	0,91	0,92	0,94	0,96	0,99	1,00	1,00	0,97	0,92	0,92	0,92

Po takto získaných hodnotách a vynásobením koeficientem M pro daný měsíc, zaneseme hodnoty do grafu v závislosti na rychlosti a porovnáme s požadovanými hodnotami dle kritérií daných normou. Příkladný graf zobrazuje obrázek 21.



Obrázek 21: Závislost součinitele tření f_P na rychlosti [8]

Více o metodě měření podélného tření dynamometrickým přívěsem viz literatura [8, s. 32 až 33].

3.5 Měření adhezních podmínek povrchů systémem TRT

Zkratka TRT vychází z názvu jednoho z prvních testovacích zařízení pro měření adhezních vlastností vozovek u nás: TATRA RUNWAY TESTER. Jedním z prvních TRT byl speciální vůz Tatra 613-3 TRT a byl určen pro zjišťování adhezních podmínek povrchu letištních drah a dálničních komunikací. Toto vozidlo bylo v prostoru zadních sedadel vybaveno měřicím systémem, který obsahoval měřicí a referenční kolo. Měřicí kolo bylo poháněno a brzděno hydrostatickým pohonem, který umožňoval plynulou regulaci prokluzu. Dále měřicí systém obsahoval hydraulické ovládání přitlaku měřicího kola, samoskrápěcí systém pro režim testování povrchů s nádrží na 400 l vody a snímače měřicí horizontální a vertikální síly. Celý proces měření byl vyhodnocován a řízen dvouprocesorovým mikropočítačem umístěným na palubní desce vozu a obsluhoval ho řidič vozu pomocí dálkového ovládání se třemi tlačítky s předvolbou režimu testování.

- Princip a postup měření

Na zvolené trajektorii dosáhne měřicí vozidlo požadované rychlosti (doporučená měřicí rychlost je 65, 96 a 130 km/h) a spustí se určitý program měření. Měřicí systém dle programu začne skrápět vozovku (s vodním filmem o velikosti až 1 mm), dále spustí hydraulicky ovládaným ramenem měřicí a referenční kolo k vozovce a nastaví požadovaný přitlak. Nakonec se začne přibrzďovat měřicí kolo. Toto měřicí vozidlo zobrazuje obrázek 22: Tatra 613-3 TRT.



Obrázek 22: Tatra 613-3 TRT[12]

Více o měřicím zařízení Tatra 613-3 TRT viz internetová stránka [12].

Mezi další vozidla nesoucí nástavbu s měřícím zařízením TRT patří i Ford Transit. Tento vůz je navržen pro testování adhezních vlastností vozovek za neomezené dopravní situace. V měřícím systému roli referenčního kola, přebírají kola zadní nepoháněné nápravy. Přičemž princip měření zůstává stále stejný jako u předchozího TRT jen s určitou inovací zpracovávání dat v podobě výkonnějšího počítače a novějšího softwaru. Obrázek 23 zobrazuje toto vozidlo s detailem měřícího kola s tryskou pro přívod vody.



Obrázek 23: Ford Transit s nástavbou TRT s detailem měřícího kola [13]

Více o měřícím vozidle Ford Transit s nástavbou TRT viz odkaz na internetové stránky [13].

Nejnovější automobil (používaný u nás na pražském Letišti Václava Havla) se stejným principem měření adhezních podmínek vozovky je Saab 9-5 Combi (obrázek 24). Tento automobil sice pracuje na stejném principu, ale už ho nenajdeme s označením TRT jako jeho předchůdce, ale nese název Sarsys Friction Tester. Tento novodobý automobil byl konstruován především na testování povrchů letištních drah s možností měření za jakýchkoliv podmínek. Měřící kolo má umístěné přesně mezi koly zadní nápravy. Také nemá referenční kolo, které mělo za úkol podávat údaje o ujeté dráze bez skluzu. Z této referenční hodnoty se u měřeného kola vypočítával aktuální skluz. Na letištních drahách se pro zjednodušení třídí velikost adhezního koeficientu do 5-ti stupňů, které nám říkají, i přes neznalost adheze, jaké jsou vlastnosti dráhy. Rozdělení a popis jednotlivých adhezních stupňů zobrazuje tabulka 6.

Tabulka 6: Stupnice brzdících účinků [14]

Stupeň brzdného účinku	Popis daného stupně
5	Velmi dobré podmínky na dráze ($\varphi \geq 0,4$)
4	Dobré až středně dobré podmínky na dráze ($0,39 \geq \varphi \geq 0,36$)
3	Středně dobré podmínky – vyšší opatrnost při brzdění a dosedání letadel na dráhu ($0,35 \geq \varphi \geq 0,31$)
2	Středně dobré až špatné podmínky – výstraha „pozor smyk“ ($0,3 \geq \varphi \geq 0,26$)
1	Špatné podmínky na dráze – zastavení provozu * ($0,25 \geq \varphi$)

* Při tomto stupni brzdného účinku se na trať povolávají speciální stroje pro úpravu letištní plochy, jako jsou sypači, pluhy atd.



Obrázek 24: Saab 9-5 Combi se systémem Sarsys Friction Tester [14]

Více o měřicím systému Sarsys Friction Testeru viz internetový článek [14].

3.6 Zjišťování adhezních podmínek povrchů systémem ARAN

Speciální vozidla vybavena systémem ARAN (Automatic Road Analyzer) jsou určena k bezkontaktnímu zjišťování vlastností vozovky. Tato vozidla fungují na tzv. síťové úrovni, jinak řečeno, jde o rychlou diagnostickou metodu pro zjištění stavu dálniční sítě. Tento systém je multifunkční a při jednom projetí daného úseku komunikace měří a zjišťuje různé parametry vozovky, jako jsou:

- Podélná nerovnost vozovky (výmoly) – zjišťovaný index *IRI*
- Hloubka vyjeté koleje (příčná nerovnost) – zjišťovaná hloubka *R* v mm

- Teoretická hloubka vody ve vyjeté koleji (z příčné nerovnosti)
- Příčný sklon vozovky jízdního pruhu
- Makrotextura (střední hloubka profilu vozovky) – zjišťovaná hloubka *MPD*
- Různé poruchy vozovek
- Fotodokumentace vozovky

Aby speciální vozidlo mohlo měřit a pořizovat všechny výše uvedené vlastnosti a data s danou vozovkou spojená, musí být vybavené různými subsystémy. Jako jsou například DMI (řídící a sledující systém), GPS a POS LV (systém pro lokalizaci), Laser SPD, Laser XPV, RoadProfiler a Texture (systémy pro zjišťování geometrie povrchu vozovky a její makrotextury). Takto vybavené vozidlo ukazuje obrázek 25.



Obrázek 25: Dodávkový vůz firmy VARS BRNO a. s. značky Chevrolet s nástavbou ARAN [15]

Více o tomto diagnostickém zařízení viz internetová stránka [15].

4 Návrh metodiky pro zjištění adheze vozovky

Již uvedené (normou uznávané) metodiky pro zjišťování protiskluzových vlastností vozovky byly vyvinuty na principu různých fyzikálních zákonů. Závislosti jednotlivých metodik byly laboratorně testovány a odvozeny k hlavní metodě určující přímo koeficient podélného tření, viz metoda dynamometrického přívěsu či systém TRT. Tyto metody tudíž nejvíce rozhodují o protiskluzových vlastnostech vozovky. Je to dáno tím, že tato metoda je nejpřesnější a její průběh se nejvíce podobá reálné jízdě vozidla. Z těchto poznatků vyplývá, že při návrhu měřicího přístroje se musí zohlednit fyzikální jevy, na kterých je adheze nejvíce závislá. Dále také pro dobré využití výsledku naměřených hodnot musí přístroj odpovídat reálnému modelu přenosu sil pomocí adheze.

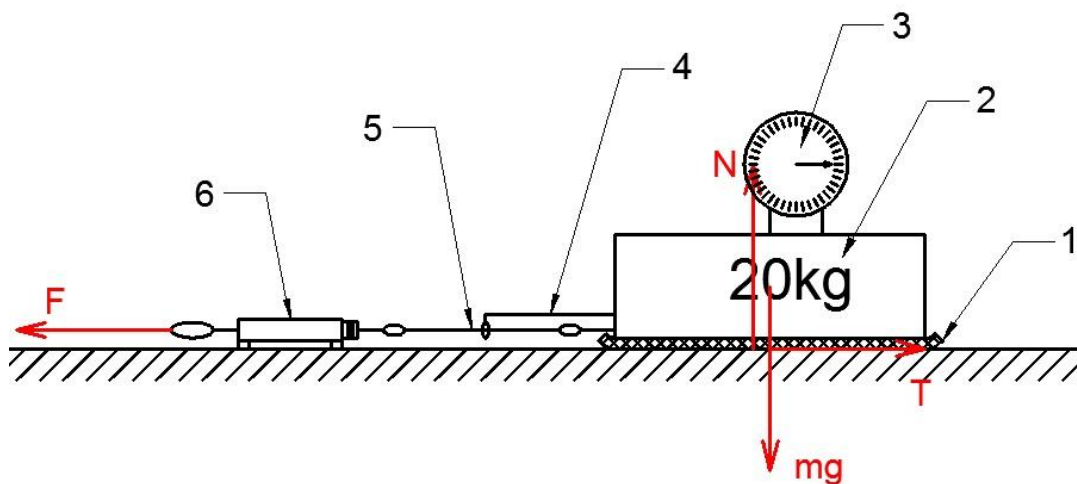
4.1 Ideový návrh zařízení pro měření adheze vozovky

V našem případě jde o styk kola s vozovkou. Tudíž jev, při kterém dochází k přenosu sil a je závislý na mechanické, disperzní a difuzní adhezi. Pro návrh takového přístroje se nabízí jednoduchý vztah vycházející z Coulombova tření. Aby výstupní veličina měla jistou věrohodnost, musí se tento vztah násobit určitým koeficientem „ K “. Tento koeficient je dle mechanismů adheze závislý na velikosti, přítlaku a na použitém materiálu styčných ploch a také na teplotě a vlhkosti jejich prostředí. Určení tohoto koeficientu není lehké, a proto, jako u ostatních metodik, ho lze odvodit po mnoha testech v laboratořích.

Pro zjištění statického koeficientu tření, který odpovídá adhezi, jsem se inspiroval vodorovným a sklonným drsnoměrem. Avšak na těchto zařízeních se dají testovat pouze vzorky vozovky, a proto nejsou moc praktické. Má představa zařízení, které by fungovalo na stejném principu a přitom by se dalo použít i v terénu přímo na vozovce je taková:

- měřidlo disponuje poměrně těžší konstrukcí (min 20 kg) pro vytvoření potenciálu síly na odlehčené virtuální kolo
- jako třecí medium (virtuální kolo) se použije pryžová deska obdélníkového tvaru pevně přilepená na ocelový rám
- rám je vybaven okem pro připevnění siloměru pomocí velmi tuhého tažného lana

Schéma tohoto přístroje zobrazuje obrázek 26.



Obrázek 26: Schéma ideového měřicího přístroje

Popis obrázku 26: 1 – pryžová deska obdélníkového tvaru; 2 – ocelový těžký rám; 3 – gravitační ručičkový úhломěr; 4 – naváděcí očko; 5 – tuhé tažné ocelové lano; 6 – siloměr (pružinový nebo tenzometrický s možností sběru dat)

Princip přístroje je následující: těžký rám o známé hmotnosti působí svojí tíhou $m \cdot g$ na zkušební vozovku. Na tuto tíhu se na povrchu vozovky tvoří stejně velká reakce N . Dále, jak už bylo uvedeno, rám je vybaven upevňujícím okem, na které je připevněno lano a siloměr. Toto lano musí být rovnoběžné s vozovkou tak, aby síla působila přibližně v námi zvoleném směru a aby nebyl model odlehčován šikmým působením síly. Kontrolu směrové a výškové správnosti přibližně zajišťuje naváděcí očko, kterým je ocelový rám vybaven. Při působení síly (kterou okamžitě měříme) se měřidlo pokouší uvést do pohybu, ale je stále nehybné – měří se adheze μ_0 . Po uvedení rámu do pohybu se měří koeficient tření f . Adhezní koeficient se vypočítá z dříve uvedeného vztahu 9: Coulombova tření, který se doplní tak, aby bylo možné dosadit i zohledněný sklon měřené vozovky a o již zmíněný koeficient K zohledňující okolní vlivy a adhezní podmínky. Po těchto úpravách bude vzorec pro měření adheze vypadat takto (vztah 10).

$$\varphi_{max} \cong f_{static} \cdot g \equiv \mu_0 = \left(\frac{F_{max}}{m \cdot g \cdot \cos \alpha} \pm \tan \alpha \right) \cdot K \quad (10)$$

Znaménko „+“ znamená, že působíme silou po směru sklonu vozovky („z kopce dolů“) a naopak...

Při tenzometrickém měření síly za použití této konstrukce se očekává rozsah měřených sil od 15 N do 260 N (platí při měření standardních povrchů na vodorovné vozovce).

Tato metodika měření bude tak přesná, jak budou přesné jednotlivé díly měřidla a jak se správně odečtou hodnoty ze siloměru a z gravitačního úhlooměru. Metodika bude umožňovat simulaci vlhké vozovky přidáním určitého množství vody na vozovku. Myslím, že měření touto metodikou bude rychlé a poměrně přesné. Samozřejmě aby zařízení fungovalo podle již zmíněného vztahu, musíme působit takovou silou, aby nevyvolávala velké zrychlení měřicího rámu, jinak řečeno „s citem“.

Pro odstranění subjektivního názoru, zda se už měřící rám pohybuje, či ještě setrvává v klidu, může být měřidlo vybaveno citlivým akcelerometrem, který změří podélné zrychlení ve směru působící síly. Při znalosti zrychlení, velikosti působící síly a sklonu vozovky lze dopočítat i dynamický koeficient adhezního tření. (viz vztah 11)

$$f_{\text{dynamick}} = \left(\frac{F - m \cdot a}{m \cdot g \cdot \cos \alpha} \pm \tan \alpha \right) \cdot K^* \quad (11)$$

Stejně, jako u vztahu 10 znamená znaménko „+“ měření po směru sklonu vozovky a naopak. Do tohoto vztahu se přidává i naměřené zrychlení „ a “, které reprezentuje dynamiku pohybu.

Poznámka: Pro dynamický charakter tohoto měření bude zapotřebí ověřit koeficient „ K^* “, zda se s účinkem dynamických sil nemění.

Samozřejmě i při pohybu může být zrychlení rovno nule, tudíž měřidlo setrvává v rovnoměrném přímočarém pohybu. V tomto případě se měří koeficient tření f a v záznamu naměřených hodnot se musí tento fakt zaznamenat.

- Výhody a nevýhody měření adhezních vlastností tímto ideovým zařízením

Pro přesnost měření je zapotřebí kvalitního, minimálně dvoukanalového osciloskopu nejlépe s možností připojení k výpočetní technice. Pro případné úpravy signálu je zapotřebí softwaru, který umožňuje přímé přepočítání naměřených veličin na adhezní koeficient.

Nevýhodou je, že se tato metodika měření adheze musí nejprve osvědčit v laboratorních zkouškách, kde se bude porovnávat s etalonem tj. s metodou měření dynamometrickým přívěsem.

Další nevýhodou je měření probíhající ve velmi malých rychlostech, takže neodpovídá pohybu automobilu. Zároveň měření nesimuluje již dříve uváděné deformace, které na povrchu pneumatiky vznikají. Tato metoda podává diskrétní data, co se týče adheze na vozovce. Proto se musí provést měření na více místech vozovky podobně, jak uvádí například metoda zjišťování makrotextury pískem.

5 Závěr

Tato práce zkoumá, popisuje a odhaluje fyzikální jev, při kterém dochází k přenosu sil mezi vozovkou a pneumatikou vozidlového kola. Práce stručně vypovídá o tom, co to vlastně adheze je a pomocí jakých mechanismů funguje. Jsou zde uvedené příklady podmětů, které adhezi velmi ovlivňují a pro případ metodiky měření adheze vozovky je musíme brát v potaz. Jsou zde popsány jednotlivé metodiky měření adheze, které se u nás používají a jejich postupy a vyhodnocení jsou podloženy státní normou ČSN 73 6177 [10]. Na základě poznatků o adhezi je na konci vypracován návrh na měřicí přístroj a popis metodiky, jak by se s tímto měřidlem určila adheze dané vozovky.

Každá metodika má své výhody a nevýhody použití. Před každým měřením jakékoliv části vozovky, ať už je to prostor jedné zatáčky či vozovka ve velkém stoupání nebo celý závodní okruh, musíme vyhodnotit, jaká metodika bude pro náš test z ekonomického a metrologického hlediska nejvýhodnější. Do ekonomického hlediska jistě patří, jak je daná metodika finančně nákladná. V nákladech se promítne vlastní pořízení daného měřicího přístroje, případně jeho výroba, získávání a zaučení obsluhy přístroje a v neposlední řadě prostředky pro vyhodnocení dat. Samozřejmě sem patří i časová náročnost dané metodiky. Pokud si přístroj pořizovat nechceme, existuje možnost zaplatit si danou službu od firmy, která se měřením adhezních podmínek na vozovkách zabývá. Jako příklad zde uvádím odkaz na ceník firmy VARS BRNO a. s. [16]. Do metrologického hlediska patří, jak přesné měření budeme vyžadovat. Zda nám bude postačovat jen lehký nástin, kde a jak velká je adheze, nebo přímo číselný koeficient adheze φ s přesností například na 3 desetinná místa. Různé metody zároveň poskytují rozdílná data o adhezní situaci. Musíme tak zvážit, zda nám stačí diskrétní data naměřená například pískovou metodou nebo metodou měření hloubky makrotextury mikroprofilografem, či zda potřebujeme spojitá data, která nám poskytne metoda měření podélného tření pomocí systému TRT. Samozřejmě veškeré metrologické požadavky se promítnou do ekonomického hlediska.

Zpracovávání této práce bylo velmi poučné. Odhalil jsem mnoho skutečností, o kterých jsem se před tím pouze domníval. Práce mi dala mnoho poznatků o vlastnostech vozovky i pneumatiky. Zjistil jsem a pochopil, jak jsou to složité výrobky a jak musejí být zpracované, aby bezpečnost v dopravní situaci byla maximální.

6 Použitá literatura

- [1] GSCHEIDLE, Rolf. *Příručka pro automechanika*. 3. přeprac. vyd. /. Překlad Iva Michňová, Zdeněk Michňa, Jiří Handlíř. Praha: Europa - Sobotáles, 2007, 685 s. ISBN 978-80-86706-17-7.
- [2] GOODYEAR WRANGLER DURATRAC 265/75 R16 112 Q [online]. 2015 [cit. 2015-04-01]. Dostupné z:<http://www.barum-pneu.cz/goodyear-wrangler-duratrac-265-75-r16-112q?term=Goodyear%20WRANGLER%20DURATRAC%20265/75%20R16%20112%20Q>
- [3] HORÁK, Z., F. KRUPKA a V. ŠINDLÁŘ. *Základy technické fyziky I: přehled v celém rozsahu*. Praha: Práce vydavatelstvo ROH, 1954, 921 s.
- [4] BEČKA, Jan. 1997. *Tribologie*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 212 s. ISBN 80-010-1621-8.
- [5] Adheze. 2001-. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Adheze>
- [6] VALA, M. a M. TESAŘ. *Teorie a konstrukce silničních vozidel I*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003, 229 s.
- [7] VLK, František. *Podvozky motorových vozidel: pneumatiky a kola, zavěšení kol, nápravy, odpružení, řídicí ústrojí, brzdové soustavy*. 1. vyd. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000, 392 s. ISBN 80-238-5274-4.
- [8] GSCHWENDT, Ivan. *Vozovky: obnova, zesilování a rekonstrukce*. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2004, 166 s. ISBN 80-807-6005-5.
- [9] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003, 432 s. ISBN 80-239-0024-2.
- [10] ČSN 73 6177: *Měření a hodnocení protismykových vlastností povrchu vozovek*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2009
- [11] ZKOUŠKA DRSNOSTI KYVADLEM RRL [online]. 2015 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.consultest.cz/fotogalerie2/zkousky>
- [12] TATRA RUNWAY TESTR [online]. [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: tatrula.aircooled.cz/CZ/T613%20Menu/613-TRT.html

- [13] TRT NÁSTAVBA FORD TRANSIT [online]. 2005 [cit. 2015-04-27].
Dostupné z: http://www.rsd.cz/sdb_intranet/sdb/download/trt.pdf
- [14] ŠÍROVÁ, Tereza. *Auto, které hlídá, aby to letadlům neklouzalo, má o kolečko víc.* Technet.cz [online]. 2013 [cit. 2015-05-03].
Dostupné z: http://technet.idnes.cz/kontrola-namrazy-letiste-0yr-/tec_technika.aspx?c=A130329_124217_tec_technika_sit
- [15] Měření povrchových vlastností vozovek multifunkčním diagnostickým vozidlem. 2012. VARS BRNO a. s. [online]. [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: http://sledovanivozovek.vars.cz/Data/Sites/1/diagnostika_vzory/d1_aran_2013.pdf
- [16] Ceny diagnostických prací. VARS BRNO a. s [online]. [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://sledovanivozovek.vars.cz/ceny-diagnostických-prací>