

**UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA**

DISERTAČNÍ PRÁCE

2008

Ing.Martin MORAVEC

**Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera**

Zvýšení bezpečnosti silničního provozu metodou drážkování

Ing.Moravec Martin

**Školitel: Doc. Ing.Karel Pospíšil, Ph.D., MBA
Doc. Ing.Miroslav Kaun, CSc. (do 31.8.2004)**

**Disertační práce
2008**

...Zadání stag...

Abstrakt

Práce prověřuje možnost eliminace aquaplaningu metodou drážkování pro dodatečné odvodnění pozemní komunikace s nevhodným podélným popř. příčným sklonem. Na základě měření magnetickou indukcí porovnává rychlost proudění vody v odvodňovací drážce a na vozovce bez drážkování po průjezdu vozidla. Rychlost proudění přímo ve stopě je dpočítána Bernoulliho rovnicí. Tlak ve stykové ploše kolo-vozovka je uvažován tlak huštění pneumatiky. Jeho skutečná hodnota je získána statistickým průzkumem. Měření odvodnění bylo provedeno ve dvou lokalitách s rozdílnými drážkami. Práce také monitoruje stav pneumatik osobních vozidel provozovaných v ČR (zejména tlak huštění a hloubku dezénu).

Klíčová slova: aquaplaning, komunikace, vozovka, pneumatika, drážkování, voda, viskozita, rychlost proudění, podélný/příčný sklon, stopa, tlak huštění, dezén pneumatiky, magnetická indukce

Abstract

This paper checks possibility elimination hydroplaning by the Grooving method for additional drainage road with wanting pavement longitudinal/cross slope. Water flow velocity within groove and on the pavement was measured by the magnetic inductance method after passage vehicles and results were compared each other. Drift directly in tire contact area was computed by quadratic of Bernoulli. Pressure in tire contact area was reflected of tire inflating pressure. His actual value was found of statistical search. Metering drainage was fulfilment double diferent locations. Work monitors tire condition motor car operate in Czech republic too (especially tire infflating pressure and tread).

Key words: aquaplaning, road, pavement, pneumatic tyre, grooving, water, viscosity, flowing velocity, pavement longitudinal/cross slope, tyre footprint, inflation pressure, tread, flux density

Obsah:

1) Úvod	6
2) Stávající poznatky	7
2.1 Pneumatika	7
2.1.1 3-D model pneumatiky se vzorkem	7
2.1.2 Praktická zkouška pneumatiky na aquaplaning	8
2.1.3 Posouzení odolnosti běhounu proti oděru, v důsledku valení pod úhlem směrové úchytky ...	9
2.1.4 Směrové vlastnosti pneumatik	10
2.1.5 Kinematický model pro determinaci periferních sil	12
2.1.6 Konstrukce pneumatiky, použití kordů	17
2.2 Vozovka	18
2.2.1 Podstata metody drážkování	18
2.2.2 Vybrané technické faktory drážkování, technická specifika, vhodnost použitelnosti pro různé podmínky	20
2.2.3 Vliv aplikace drážkování na pevnost betonu	22
2.2.4 Životnost technologie drážkování	22
2.2.5 Minimalizace rizika vzniku aquaplaningu sledováním geometrických parametrů vozovky ...	23
2.3 Voda	24
2.3.1 Fyzikální vlastnosti kapalin	24
2.3.2 Princip magneticko-indukčního měření průtoku	29
2.4 Styková plocha kolo-vozovka	30
2.4.1 Valení pneumatiky na mokré vozovce	30
2.4.2 Základní pohybové rovnice	37
2.4.3 Vlnová rovnice pro nárazník, pás kruhové rotující pneumatiky	46
2.4.4 Hraniční podmínky pro stykovou plochu pneumatika – vozovka	48
2.4.5 Valení kola s pneumatikou na rovinné ploše	52
2.4.6 Styk kola s vozovkou v případě smyku	59
2.4.7 Valení kola v klopení	63
2.4.8 Predikce vlastností stykové plochy pneumatiky	66
2.4.9 Popis ideální stykové plochy	76
2.4.10 Teoretický popis stavu při přejezdu kola přes překážku (nerovnost) na vozovce ...	76
2.4.11 Soudržnost pneumatiky s vozovkou, při zanedbání aerodynamických sil a valivého odporu	77
2.4.12 Valivý odpor	80
2.4.13 Součinnost kolo-drážka z hlediska času	82
2.4.14 Distribuce kontaktního tlaku ve stopě	85
2.5 Matematické vazby vhodné pro aplikaci	87
2.5.1 Stanovení rozsahu náhodného výběru	87
2.5.2 Test χ^2 dobré shody	87
3) Zhodnocení stávajících poznatků a další postup	89
3.1 pneumatika	89
3.1.1 Model	89
3.1.2 Kontaktní problematika	89
3.1.3 Průzkum situace v ČR	90
I. Hloubka dezénu	90
II. Tlak huštění	91
III. Vliv umístění pneumatiky na vozidle	92
IV. Vzorek běhounu	92
3.2 vozovka	92
3.2.1 Vliv materiálu povrchu komunikace	92
3.2.2 Porovnání komunikace s drážkováním a bez drážek	92
3.2.3 Technické faktory a specifika drážkování, vhodnost použitelnosti pro různé podmínky	93
I. Aplikace drážkování v ČR	93
II. Vliv frézovaných drážek na změnu vlastností vozovky	93
III. Podmínky použitelnosti metody	94
3.2.4 Volba lokality pro potřeby měření	94
3.3 voda	95
3.3.1 Hydrologické faktory	95
3.3.2 Podstata měření	96

3.4 styk kolo-vozovka	96
3.4.1 Geometrie stykové plochy	96
3.4.2 Vliv charakteru povrchu pojížděné komunikace	97
3.4.3 Rozložení tlaku a silové působení ve stykové ploše	97
3.4.4 Změny vyvolané působením srážkové vody	97
3.5 Rekapitulace stávajících poznatků a schéma postupu	98
4) Analýza naměřených dat o pneumatikách	100
5) Experimentální posouzení odvodnění za součinnosti drážek a pneumatik při průjezdu vozidla	
5.1 Popis měření, postup	111
5.1.1 Charakteristika míst měření	111
5.1.2 Instalace měřicího zařízení	111
5.1.3 Stanovení potřebného počtu měřených průjezdů	112
5.2 Lokality, podmínky měření a naměřená data	112
5.2.1 Silnice I/35 mezi obcí Hřebeč a Moravská Třebová	112
5.2.2 Silnice I/34 mezi obcí Michalovice a Šmolovy	130
6) Vyhodnocení	142
6.1. Analýza dat z I/35 mezi obcí Hřebeč a Moravská Třebová	142
6.2. Analýza dat z I/34 mezi obcí Michalovice a Šmolovy	145
7) Závěr	148
8) Využití a další rozvoj poznatků	149
8.1 Přínos poznatků disertační práce v praxi	149
8.2 Možnosti dalšího rozvoje bádání v dané problematice	149
9) Soupis bibliografických citací, reference	150 - 154

1) Úvod

Jak dokazují statistiky, dopravní nehodovost je stále větším celospolečenským problémem. Nejenže počet nehod v silničním provozu neklesá, ale navíc se ještě zvyšuje jejich závažnost [82]. Nárůst počtu mrtvých a těžce zraněných je toho důkazem.

„Uvažme, že jedna z největších dopravních tragedií - ztroskotání lodi Titanic, který svým provozem „ukončil“ v roce 1912 1503 lidských životů, šokovala celý svět i na mnoho let dopředu. Osud lodi a lidí z ní, dodnes inspiruje spisovatele románů, autory muzikálů i tvůrce divadelních her. Filmové zpracování tragédie Titanicu dojímalo a zajímalo milióny lidí po celém světě, Českou republiku nevyjímaje. Že však již od počátku 90 let k podobné skutečnosti dochází na silnicích České republiky, (v roce 1996 1568 mrtvých, v roce 1997 1597 mrtvých, v roce 1999 1455 mrtvých, atd.), nás nechává klidnými. Tato skutečnost zajímá a možná dojímá jen úzkou hrstku odborníků a přitom se každý den vydáváme na každoroční plavbu Titanicu po českých silnicích všichni.“ Ing. Jaroslav Heinrich, CDV [94]

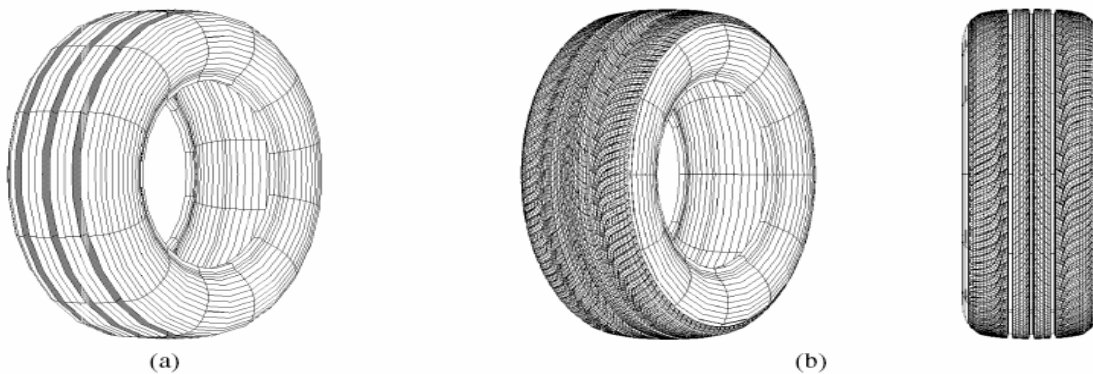
Jednou z příčin vzniku dopravní nehody je ztráta kontroly řízení, zejména aquaplaning. Je zřejmé, že rizikovými místy pro vznik aquaplaningu při průjezdu vozidla za mokra zejména na stávajících pozemních komunikacích, budou místa s nedostatečným odvodněním komunikace, kde je nebezpečí hromadění srážkové vody. Stavební zásah do takové komunikace, který by zaručil jistou nápravu tohoto stavu např. změnou směrového a výškového vedení komunikace v kombinaci se změnou příčného sklonu však obnáší vysoké finanční náklady, potíže spojené s uzavírkou komunikace i možností vhodné objízdné trasy a v neposlední řadě také časové prodloužení způsobené přípravou takové stavby počínaje zadáním projektu a konče povolením kompetentním úřadem. Možným řešením je dodatečné odvodnění komunikace metodou drážkování.

Vytýčeným úkolem disertační práce je ověření účinnosti a zjištění skutečných možností metody dodatečného odvodnění komunikace frézováním drážek – drážkováním (dále jen metoda drážkování) ve vztahu ke snížení možnosti vzniku aquaplaningu, následných dopravních nehod a tím ke zvýšení bezpečnosti silničního provozu. Tato metoda se svým charakterem jeví jako rychlá, levná, dá se provádět za dopravního provozu třeba jen s jeho částečným omezením anebo v době malé intenzity dopravy (přes noc), s malou pracností bez vážné závislosti na počasí, tedy zjevně nepodléhá vlivům uvedeným na konci předchozího odstavce.

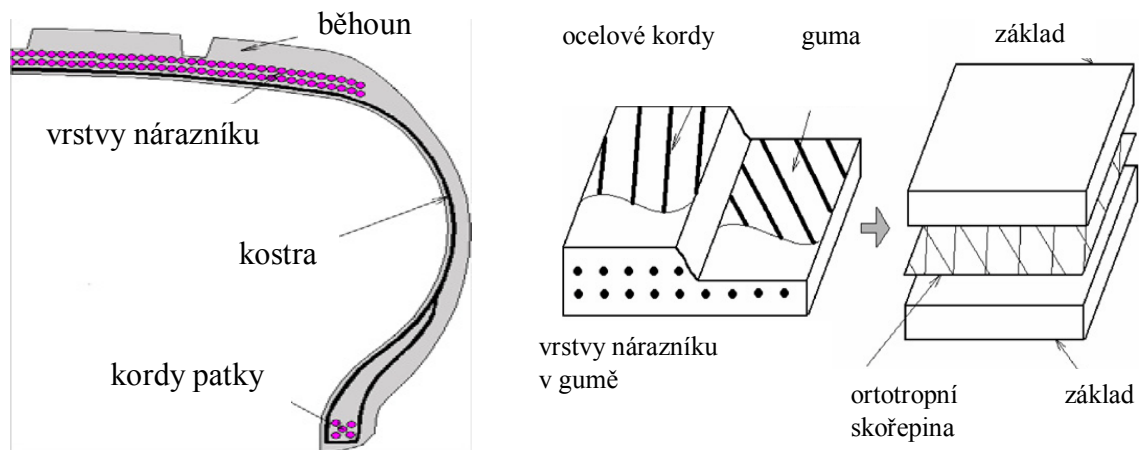
Do současné doby nebyla metoda drážkování zkoumána nezávislým pracovištěm v podmínkách provozu na českých pozemních komunikacích ve vztahu ke zvýšení bezpečnosti silničního provozu kromě [56], kdež byla zkoumána jen v obecné rovině. Proto bude metoda drážkování podrobena bližšímu zkoumání za použití prakticky zjištěných skutečných hodnot a veličin. Cílem zkoumání je přesné zjištění účinků metody drážkování a ověření výhod jejího použití v naší silniční síti ke snížení počtu dopravních nehod zaviněných aquaplaningem ve stávajících místech nedostatečně odvodněných bez nutnosti dodatečných nákladných stavebních zásahů.

2.Stávající poznatky

2.1.Pneumatika



Obr. 1. 3-D modely pneumatiky. (a) model s třemi drážkami, (b) vzorovaný model [1]



Obr. 2. Modelování materiálu pneumatiky. (a) 2-D řez, (b) modelování vrstev pásu [3].

2.1.1 3-D model pneumatiky se vzorkem

Obr.1. ukazuje obecný model pneumatiky zavedený pro 3-D analýzu pneumatiky, který obsahuje jen obvodové drážky zatímco detailní bloky běhounu jsou kompletně zanedbané. Ostatně jednoduchou konstrukci v souladu s 2-D rotací průřezu pneumatiky jako zjednodušený model, bylo zvykem užívat pro řešení velkých maticových soustav při nedostatku výpočetní techniky [3]. Zanedbání bloků běhounu přirozeně vede k předpokladu, že nelze očekávat zjištění významnějších vlastností pneumatiky jako je stopa a styčný tlak, distribuce třecí energie, styková plocha a tak dále.

Tento nedostatek se stává vážnějším tehdy, když je tento zjednodušený model využit pro analýzu valení pneumatiky po vodě, resp. po mokré vozovce, protože nemůže zaznamenat skutečné proudění dešťové vody protékající mezi bloky běhounu.

Obr. 1. (b) znázorňuje 3-D model pneumatiky se vzorkem běhounu vytvořený programem FEM v tri - lineární soustavě, kde na nesourodý styk povrchů je použito pro sloučení jemné sítě běhounu a hrubé sítě základní kostry.

Na obr.2 (a) je schematicky znázorněn příčný řez pneumatikou. Materiální složení většiny pneumatik je charakterizováno především množstvím vláken vyztužujících gumu (dále jen FRR) a zbývajícím, nevyztuženým pryžovým dílem. Struktura a složení uvedené části jsou mírně odlišné typ od typu pneumatiky, ale typ zde uvedený je složen ze samostatné vrstvy polyesterové kostry, dva ocelové pásy, a několika výztuh ocelovými kordy. Od doby používání FRR částí jsou pneumatiky komplexně posuzovány; jejich materiální modelování je založeno na numerické simulaci [4].

V analýze statické pneumatiky, jsou tyto části obvykle modelovány za použití trojrozměrných soustav jako uzlové části, které nezpůsobí potíže aspektu výpočtového času. Ale v dynamické analýze pneumatiky je toto plné modelování časově náročné, a tak jsou FRR části modelovány buď jako složená blána nebo složená skořepina [8, 5].

Obr. 2(b) ilustruje FEM modelování dvou pásových vrstev v podloží základní kaučukové hmoty jako samostatné vrstvy ortotropní skořepiny, v kterém jsou jednotlivé ocelové dráty a guma považovány za izotropní a konstanty složení ekvivalentního materiálu jsou počítány dle teorie Halpin-Tsaiovy [9].

Obr. 27. prezentuje příčný řez, síť vytvořené pro analýzy valení vzorované pneumatiky na mokré vozovce s materiálním složením znázorněným na obr. 2. Dvě pásové vrstvy a jedna kosterní vrstva jsou modelovány jako samostatná kompozitní vrstva, připojená na pneumatiku vnitřním pláštěm. Na druhé straně, zesílení ocelovými lanky v základní kaučukové vrstvě jsou modelována jako tuhé elementy s ekvivalentní objemovou hmotností. Tento způsob modelování materiálu není vhodný pro analýzy pneumatiky zaměřené na lokální deformace a napěťová pole. To však nezpůsobí žádné potíže při analýzách valení pneumatiky na mokré vozovce či pojíždění po vodě, které se soustředí na proudění dešťové vody, globální hydrodynamické a kontaktní síly, neboť tok dešťové vody a vyplývající hydrodynamický tlak je citlivější na geometrii bloků běhounu a celkovou kinetickou energii kola.

Guma s výjimkou FRR částí jsou modelovány na základě prvního řádu Moonley–Rivlinova modelu [6] v kterém je funkce napětí měrné hmotnosti definována

$$W(J_1, J_2, J_3; K) = C_{10}(J_1 - 3) + C_{01}(J_2 - 3) + 1/K(J_3 - 1)^2 \quad (2.1.1)$$

kde J_i jsou invariantní Green – Lagrangianovy tenzory napětí, C_{10} a C_{01} jsou experimentálně zjištěné materiálové konstanty pryže. Na druhé straně, K je druh parametru regulující nestlačitelnost kaučuku.

$$\nu = [3K/4(C_{10} + C_{01}) - 2] / [3K/2(C_{10} + C_{01}) + 2] \quad (2.1.2)$$

Je jasné, že nestlačitelnost gumy je asymptoticky vynucena jako pokusná proměnná blížící se nekonečnu, ale volba K blížící se 100 je obvykle doporučena pro ustálenou přechodnou dynamickou odezvu s racionální velikostí časového kroku [5].

2.1.2 Praktická zkouška pneumatiky na aquaplaning

Podmínky zkoušky

Zkouška aquaplaningu je praktickou částí testu pneumatiky s novým typem vzorku (před zavedením do výroby), probíhá na zkušební dráze [44] v místě určeném pro zkoušku aquaplaningu v tzv. aquaplaningové vaně. Jedná se o rovný, přímý úsek dráhy, přičemž délka vany je cca 60m, prostor na rozjezd vozidel cca 120m. Aquaplaningová vana je naplněna vodou do stanovené hladiny 8mm avšak přesnosti této hodnoty se dosahuje těžko. Zpravidla

hodnota kolísá kolem 8mm a nikdy není v podstatě konstantní. Měřicí záznamové zařízení snímající pohyb automobilu je umístěno na speciálním tzv. pátém kole, připojeném ke zkušebnímu vozidlu. Na jednotlivých kolech jsou pak umístěna zařízení k měření rozdílu otáček.

Princip zkoušky:

Automobil během zkoušky projíždí aquaplaningovou vanou jen pravými pneumatikami, pravou stopou. V rámci přípravy na zkoušku, projíždí zkušební jezdcí vanou (obě stopy) při různých rychlostech, aby zjistili, při jaké rychlosti aquaplaning vzniká. Následně rychlostí nižší (před zkouškou stanovenou) než je rychlost aquaplaningová, vjedou do aquaplaningové vany (jen pravou stopou) a prudce zrychlují (3. rychlostní stupeň převodovky). Automobil akceleruje a při dosažení jisté rychlosti vznikne na kole, které jede v aquaplaningové vaně aquaplaning. Tento okamžik je určen na základě rozdílu otáček levého (valí se pevně po asfaltobetonu) a pravého (prokluzuje v aquaplaningové vaně) kola. Rozdíl otáček dosahuje hodnoty okolo 15%.

Přímým výstupním (zaznamenaným) údajem zkoušky je poměr čas/projetá dráha. Všechny ostatní potřebné údaje se zjišťují výpočtem.

2.1.3 Posouzení odolnosti běhounu proti oděru, v důsledku valení pod úhlem směrové úchylky

Z hlediska odolnosti běhounu proti oděru lze použít pro porovnání konstrukčních rysů pneumatik, jednoduchý model trámce [47]. Do výpočtů ohybu trámce kromě ohybových deformací je však třeba zahrnout i střih v rovině. Zatížení F_p (kolmo na styčnou plochu ve středové rovině kola) bylo centrálně aplikováno na jednoduše opřený trámec délky L s konstantami elasticity E a G . Maximální průhyb δ je

$$\delta = F_p L^3 / 48 EI + 3 F_p L / 8 AG \quad (2.1.3)$$

kde A je plocha průřezu a I je moment setrvačnosti plochy trámce. V tomto případě lze předpokládat zatěžování v rovině styčné plochy pneumatiky. Přepsáním uvedené rovnice pro tuhost S a nahrazením typických parametrů pneumatiky veličinami A , I a L , vztažených k relaxační délce pneumatiky dostaneme:

$$S = F_p / \delta = E_\xi G_{\Phi\xi} / (C_1 E_\xi + C_2 G_{\Phi\xi}) \quad (2.1.4)$$

kde E_ξ a $G_{\Phi\xi}$ jsou obvodový a střihový modul laminátu kord-přýž v běhounové oblasti a C_1 a C_2 jsou konstanty (při experimentu $C_1 = 97,8 \text{mm}^{-1}$, $C_2 = 1,68 \text{m}^{-1}$). Konstanty se ovšem mění s typem a rozměrem pneumatiky.

Za podmínek malého bočního zatěžování pneumatik a u pneumatik jiných než pro osobní vozy (leteckých, traktorových, pro stavební stroje, atd.) mohou být brzdné a záběrové síly z hlediska ovlivnění oděru běhounu přinejmenším stejně důležité jako síly boční. Pro tyto případy je model nepoužitelný.

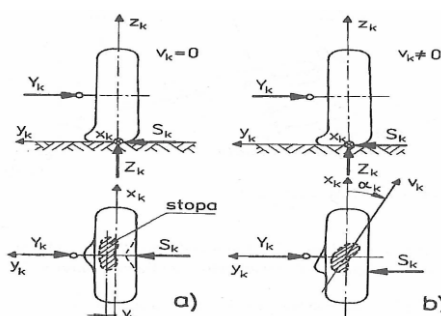
Závěrem lze říci, že tuhost pneumatiky tak, jak je ovlivňována elastickými konstantami laminátu, je jedním z principiálních faktorů ovlivňujících oděr běhounu. Čím tužší je pneumatika ve stopě, tím větší je tuhost S , a tím větší je odolnost běhounu proti oděru.

2.1.4 Směrové vlastnosti pneumatik

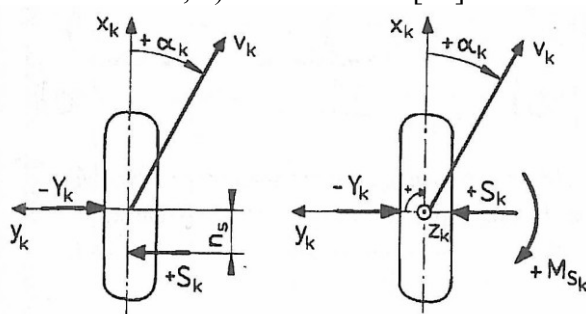
Pokud na kolo nepůsobí boční síla, je střední rovina kola totožná s podélnou osou stykové plochy pneumatiky s vozovkou – stopou. Působí-li v ose otáčení kola boční síla \underline{Y}_k (obr.3.a), pak ve stopě vznikne vodorovná boční reakce \underline{S}_k – boční vodící síla kola [51]. Tím dojde k pružné deformaci pneumatiky v bočním směru a osa stopy se vzhledem k podélné rovině kola vychýlí o hodnotu, která závisí na velikosti boční síly a boční tuhosti pneumatiky. Začne-li se kolo otáčet (obr.3.b), pak jeho jednotlivé elementy na povrchu pneumatiky přicházejí do styku s vozovkou bočně vysunuty proti těm elementům, které jsou již ve styku s vozovkou a osa stopy se tím vychýlí o úhel $\underline{\alpha}_k$. Valící se pneumatika, která je zatížena boční silou se tedy nepohybuje ve směru podélné osy kola. Úhel mezi vektorem rychlosti pohybu kola \underline{v}_k a podélnou osou kola \underline{x}_k se nazývá úhel směrové odchylky $\underline{\alpha}_k$. Odvaluje-li se kolo se směrovou úchylkou, vznikají ve stopě pneumatiky elementární síly, které vzrůstají směrem k zadnímu konci stopy. Jejich výslednice, tzn. boční vodící síla \underline{S}_k neleží tedy v ose otáčení kola \underline{y}_k , ale je posunuta směrem dozadu (obr.4.). Rameno boční vodící síly vzhledem k příčné ose kola nazýváme závlekm pneumatiky \underline{n}_s . Přeložíme-li dle obr.4.b boční sílu \underline{S}_k do příčné osy kola, pak na kolo musí působit ještě moment

$$M_{sk} = S_k n_s \quad (2.1.5)$$

Tento moment natáčí kolo kolem jeho svíslé osy do skutečného směru valení kola (do směru rychlosti \underline{v}_k), a proto je nazýván vratným momentem pneumatiky (kola).



Obr.3. Vznik boční vodící síly S_k a směrové úchylky α_k při působení boční síly a) stojící kolo, b) valící se kolo [51]



Obr.4. Vratný moment M_{sk} a závlek pneumatiky n_s na valícím se kole se směrovou úchylkou [51]

V oblasti malých směrových úchylek $\underline{\alpha}_k = 0 - 3^\circ$ můžeme vyjádřit závislost boční síly na úhlu směrové úchylky vztahem

$$S_k = C_{\alpha k} \alpha_k \quad (2.1.6)$$

Kde

$$C_{\alpha_K} = \left(\frac{\partial S_K}{\partial \alpha_K} \right)_{\alpha_K \rightarrow 0} \quad [\text{N/rad}] \quad (2.1.7)$$

je tzv. směrová tuhost pneumatiky. Závlek pneumatiky n_s je pro malé úhly α_k při stejném zatížení kola přibližně konstantní, takže pro vratný moment pneumatiky platí

$$M_{S_K} = S_K n_s = C_{\alpha_K} n_s \alpha_K = C_{M\alpha_K} \alpha_K \quad (2.1.8)$$

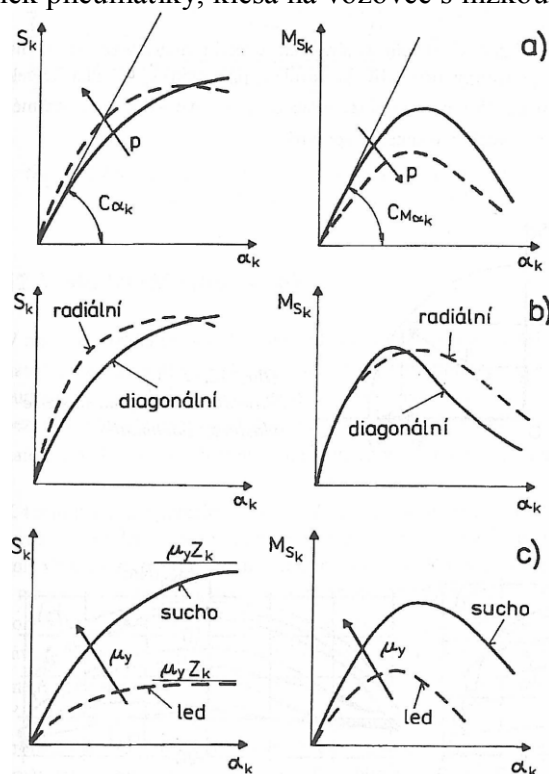
kde $C_{M\alpha_K} = (\partial M_{S_K} / \partial \alpha_K)_{\alpha_K \rightarrow 0} \quad [\text{Nm/rad}] \quad (2.1.9)$

je tzv. vratná tuhost pneumatiky. Vyšší tlak vzduchu v pneumatice při konstantním svislém zatížení kola zvyšuje směrovou tuhost C_{α_k} a snižuje vratnou tuhost $C_{M\alpha_k}$. To znamená, že pro stejnou boční sílu bude mít pneumatika s větším huštěním menší směrovou úchylku. Vyšší huštění snižuje vratný moment kola, tzn. má za následek menší závlek pneumatiky.

Podle povětrnostních podmínek se mění přilnavost vozovky. Při větších úhlech α_k značně klesá boční vodící síla S_k i vratný moment kola. Maximální přenositelná boční síla S_{kmax} je omezena přilnavostí vozovky v bočním směru

$$\mu_y = S_{kmax} / Z_k \quad (2.1.10)$$

Je-li boční síla $S_k > S_{kmax}$ tzn. je překročena mez boční přilnavosti, pak dochází k bočnímu smyku kola (směrová úchylka $\alpha_k \rightarrow 90^\circ$) Pro úhel směrové úchylky $\alpha_k = 0$ nezávisí směrová tuhost C_{α_k} charakterizovaná směrnici křivky $S_k = f(\alpha_k)$ v počátku diagramu na povrchu vozovky, protože i na ledě ještě všechny elementy stopy lpí na vozovce. Nahradíme-li závislost $S_k = f(\alpha_k)$ sečnou, pak její sklon pro led je menší, než pro suchou vozovku. Také vratná tuhost a tedy i závlek pneumatiky, klesá na vozovce s nízkou přilnavostí.



Obr.5. Vliv některých faktorů na směrové vlastnosti pneumatiky [51]

2.1.5 Kinematický model pro determinaci periferních sil

Kinematická analýza valícího se kola

Zemina je úhrn pevných částecek a tak její reakce pod zatížením je odlišná od pevné fáze. Pod zatíženým povrchem se některé části zeminy mohou opírat, zatímco jiné mohou být posunuty. Jednotlivé části pneumatiky nejsou spojeny s přenosem síly současně [52]. Aktivují se postupně. Oblast prokluzu začíná na zadní hraně plochy dotyku a narůstá ve směru jízdy úměrně periferní síle. Tento aktivní povrch je tak velký, jak je potřeba k překonání odporů. Pohyb zemních částic pod valícím se kolem je určen kinematikami kola, které determinuje také dynamický proces. Lze tak určit vzájemné silové působení mezi kolem a podložkou (vozovkou) analýzou kinematik procesu. Jednotlivé body valícího se kola opíšíu cykloidu a tak rovnice této křivky může být použita pro popis trajektorie těchto bodů. Obecná rovnice cykloidy je (v souladu s obr.6.):

$$x = R\varphi - R_0 \sin\varphi \quad (2.1.11)$$

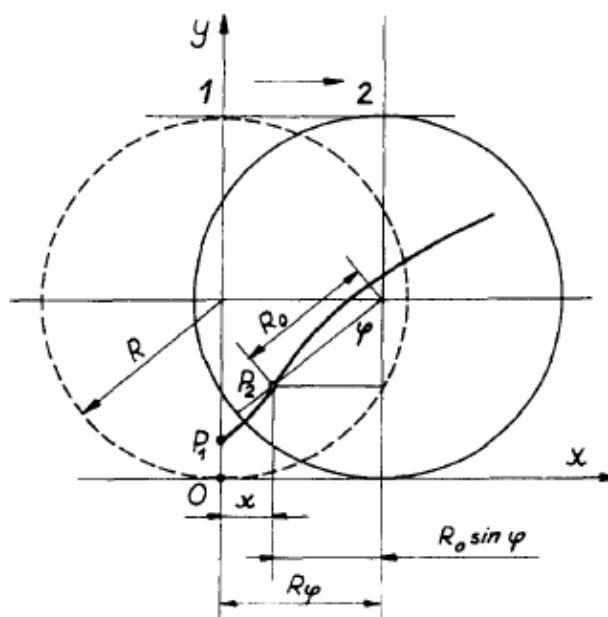
$$y = R - R_0 \cos\varphi \quad (2.1.12)$$

kde R_0 je vzdálenost sledovaného bodu od středu kola a R je poloměr valení.

Když $R_0 = R$ je křivkou normální cykloida;

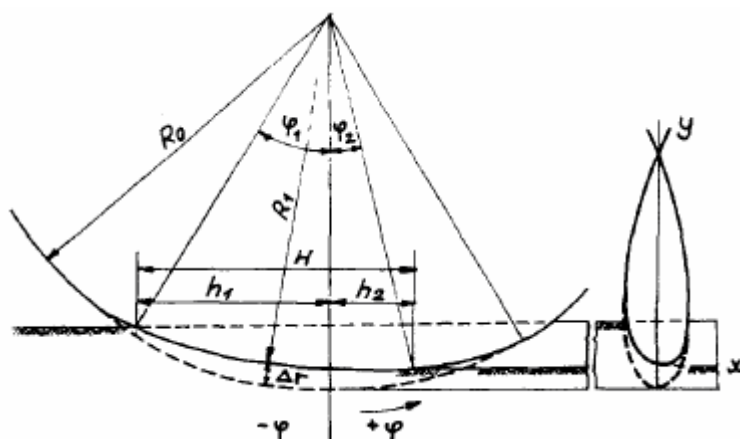
když $R_0 < R$ je křivkou prodloužená cykloida;

a když $R_0 > R$ je křivkou ovinutá cykloida.



Obr. 6. Matematická analýza valení [52]

Obr.7. ukazuje pneumatiku namáhanou krutem valící se na deformovatelném podkladu. Jednotlivé body obvodu kola se pohybují podél ovinuté cykloidy. Vyšetřit adhesivní podmínky musí analýza pohybu těchto bodů pneumatiky, které jsou ve stykové ploše pneumatiky s vozovkou, to jest od vstupního bodu φ_1 po výstupní φ_2 . Posunutí daného bodu vzájemně k podložce ve směru x je následující (Obr.7.):



Obr.7. Body na obvodu řídicího kola popíšu ovinutou cykloidu [52]

$$x = (R_0\varphi_2 - R_1\sin\varphi_2) + (R_0\varphi_1 - R_1\sin\varphi_1) \quad (2.1.13)$$

nebo

$$x = R_0\varphi - H \quad (2.1.14)$$

jestliže přijmeme konvenci souřadnic v obr.7., obdržíme:

$$x = H - R_0\varphi \quad (2.1.15)$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (2.1.16)$$

$$R_1\sin\varphi_1 + R_1\sin\varphi_2 = h_1 + h_2 = H \quad (2.1.17)$$

R_0 je poloměr sledovaného bodu na obvodu;

H je délka stykové plochy dotyku, který je horizontálním průmětem zaobleného kontaktu;

φ je středový úhel náležící H .

Když řídicí pneumatika poloměru R_0 pracuje bez namáhání jakékoliv periferní síly, její vertikální deformace a doprovodná deformace podložky tvoří podmínku, jako kdyby byla valena bez prokluzu s poloměrem R_a . Ten definuje fiktivní kružnici, kterou lze nazvat "základní kružnici". Tato kružnice nemůže být měřena žádným praktickým způsobem. Její poloměr může být vypočítán následujícím vzorcem:

$$R_a = R_0 (1 - S_{RD}^0) \quad (2.1.18)$$

kde S_{RD}^0 je relativní horizontální prokluz, který náleží $F_k = 0$ a $s = 0$. Poloměr základní kružnice není totožný s katalogovými poloměry statického ani dynamického válení. Prokluz s je indukován když řídicí kolo působí periferní silou F_k . Vyplývající poloměry válení mohou být nazývány "poloměry prokluzu" a odpovídající kružnice "kružnicí prokluzu". Poloměr prokluzu je:

$$R_s = R_a (1 - S) \quad (2.1.19)$$

a dále:

$$R_s = R_0 (1 - S_{RD}^0)(1 - S) \quad (2.1.20)$$

Součin $(1 - S_{RD}^0)(1 - S)$ může být přepsán jako $(1 - S_R)$, kde

$$S_R = (1 - S) S_{RD}^0 + S = S_{RD} + S \quad (2.1.21)$$

$$\begin{aligned} \text{když } s = 0 \quad S_R &= S_{RD}^0 \\ \text{když } s = 1 \quad S_R &= 1 \end{aligned}$$

Bráno v úvahu mimo poznámky, bude finální výraz pro prokluz řídicího kola:

$$x = H - R_0 (1 - S_R)\varphi \quad (2.1.22)$$

Podle vztahu (2.1.22) pohyb řídicího kola může být vysvětlován jako valení s poloměrem R_0 a prokluzem S_R . Výsledný prokluz S_R je způsoben prokluzem zapříčiněným periferní silou a deformací. Zásadním předpokladem je to, že sledovaný bod je na obvodu pneumatiky, a že cestování rychlost kola je konstantní. A také, že pneumatika a zemina (podklad) jsou deformovatelné. Rovnice (2.1.22) je vhodná pro zkoušku kinematické interakce mezi pneumatikou deformovanou kontaktní plochou a podkladem. Uvažme případ, kdy $S_R = 0$, to je když se valí deformovatelná pneumatika poloměru R_0 . Potom

$$x_0 = H - R_0 \varphi \quad (2.1.23)$$

x bude záporné od $H < R_0 \varphi$. Tedy prokluz kola ve směru jízdy. Když $x = 0$, $s = 0$, pak

$$x = H - R_0 \varphi (1 - S_{RD}^0) = 0 \quad (2.1.24)$$

a

$$S_{RD}^0 = 1 - H / (R_0 \varphi) \quad (2.1.25)$$

$H < R_0 \varphi$, a proto $S_{RD}^0 > 0$.

Relativní prokluz S_{RD}^0 kompenzuje čelní prokluz způsobený deformací, když $S_R = 0$, a tak je pravděpodobné $x = 0$. To lze vyjádřit matematicky, neboť výraz prokluzu S pro $S_R = 0$ bude:

$$S = x_0 / R_0 \varphi = (H / R_0 \varphi) - 1 = - S_{RD}^0 \quad (2.1.26)$$

Získejme výraz pro totální posunutí prokluzem vzhledem k relativnímu prokluzu S_R . To je rozdíl mezi posunutím v S_R a $S_R = 0$; takže

$$\Delta x = x_{SR} - x_0 \quad (2.1.27)$$

$$\Delta x = [H - R_0 \varphi(1 - S_R)] - (H - R_0 \varphi) \quad (2.1.28)$$

$$\Delta x = R_0 \varphi S_R \quad (2.1.29)$$

Determinace periferní síly

Když se valí deformovatelná pneumatika na deformovatelné podložce, mohou být podmínky jejího prokluzu charakterizovány spolupůsobením dvou kružnic. A to: [53] kružnicí prokluzu s poloměrem $\underline{R}_a(1 - S)$ a kružnicí určenou dimenzí pneumatiky s poloměrem \underline{R}_0 . Výsledný prokluz \underline{S}_R působí na kružnici charakterizovanou \underline{R}_0 . Kružnice prokluzu je vygenerována prokluzem \underline{S} , způsobeným periferní silou, takže jeho poloměr může kolísat mezi \underline{R}_a a $\underline{0}$, korespondující příslušně se $\underline{s} = \underline{0}$ a $\underline{s} = \underline{1}$. Od

$$S_R = (1 - S) S_{RD}^0 + S \quad (2.1.30)$$

lze substitucí do (2.1.29) získat:

$$\Delta x = R_0 \varphi S_{RD}^0 - R_0 \varphi S S_{RD}^0 + R_0 \varphi S \quad (2.1.31)$$

$\underline{R}_0 \varphi \underline{S}$, který je součástí totálního posunutí $\underline{\Delta x}$, může být považován za podstatný nebo vhodný ve výše uvedeném výrazu. Jeho poměr $k \underline{\Delta x} = \underline{R}_0 \varphi \underline{S}_R$ vyjadřující účinnost adheze ve stykové ploše:

$$\eta_{adh} = S / S_R = A_s / A \quad (2.1.32)$$

kde \underline{A}_s je část kontaktní plochy \underline{A} , který je využitá pro vytvoření smykového napětí. Periferní síla je:

$$F_k = \tau^* \cdot A_s \quad (2.1.33)$$

$$F_k = \tau^* \cdot A \cdot S / S_R \quad (2.1.34)$$

$\underline{\tau}^*$ může být konstantní, ale může také záviset na prokluzu anebo na rychlosti prokluzu posunutí. Plocha dotyku je zakřivená, kromě případu tuhé podložky [53]. Její průmět do vodorovné roviny může být determinován. Lze předpokládat, že projekční oblast je identická aktuální oblasti rovné ekvivalentu pravoúhlého čtyřúhelníku.

Zkušební data získané aplikací nové metody

Byla analyzována a zpracována zkušební data tažné síly potvrzující výše uvedenou teorii. Tento test [54] byl proveden použitím prostředků zkušebního vozidla na beton, na jílovitou zeminu střední sílou a na písku. Testovací pneumatiky byly radiální konstrukce. Byly použity dvě různé velikosti vyrobené dvěma různými výrobci. Jedním z hlavních cílů analýzy bylo determinovat řád hodnoty nově stanovených parametrů k posouzení jejich reality.

Idea, které parametry zeminy mohou být determinovány z vlečné/skluzové křivky byla rozvíjena již dříve [55], ale je třeba ještě zvážit to, jak validní postup zapříčinil, že jsou brány v úvahu rovnice uvedené ve studii.

Parametry vypočítané z testu vlečné/skluzové křivky prokázaly, že teorie je správná, a že parametry jsou reálné. Je determinováno, že skutečné \underline{S}_{RD}^0 hodnoty prokluzu jsou větší než ty vypočítané [55], kromě případu betonového povrchu. To může být způsobeno nepřesnostmi v souvislosti s měřením deformace zeminy, vertikální a horizontální deformací pneumatiky a determinací poloměru \underline{R}_0 a smykem jako takovým.

Je zřejmé, že \underline{S}_{RD} neklesá lineárně s prokluzem jak ukazuje obr.8. Za povšimnutí zde stojí to, že součinitel valivého odporu $\underline{\rho} = \underline{F}_R / \underline{Q}_{din}$. Redukce rychlosti závisí na pneumatice,

zemině (podkladu, vozovce) a dalších významných faktorech. Jako výsledek úvahy platí následující vztah:

$$S_{RD} = (1 - S)^n S_{RD}^0 \quad (2.1.35)$$

tak , že

$$S_R = S_{RD} + S = (1 - S)^n S_{RD}^0 + S \quad (2.1.36)$$

kde $n > 1$

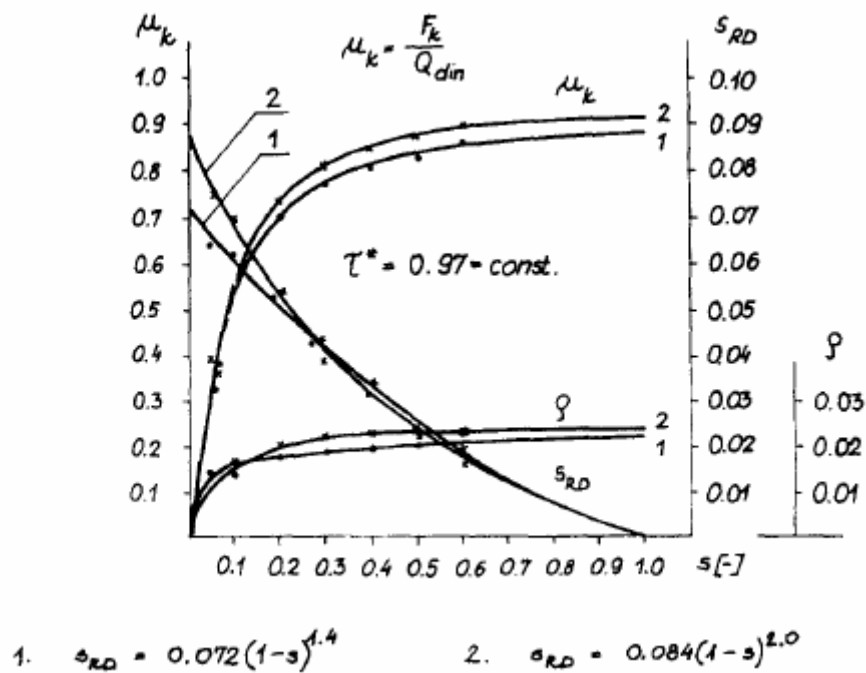
Rovnice periferní síly zůstane nezměněna:

$$F_k = \tau^* \cdot A \cdot S / S_R \quad (2.1.37)$$

Novým vztahem vyvinutým pro determinaci periferní síly je snadné zpracovat a následně praktikovat přesně podmínky. Na rozdíl od dřívějších konceptů, i když zdůrazňuje vztah periferní síly-prokluz, oponuje tažení táhlem. Bohužel tato příčina by přidala potíže řešiteli, protože analytická predikce a determinace nezbytných parametrů vyžaduje s novou metodou komplexnější experimenty [55] a vyhodnocení než s metodou aktuálně přijatou [54].

Analýza ukazuje význam jízdního odporu. Je třeba vyšetřit, jak je generován jízdní odpor a detaily z jeho vývoje právě tak jako jeho charakteristiky a jeho vztah ke smyku. Je třeba vyvinout "standardní" metodu pro determinaci smyku a poloměr "základní kružnice". Musí být prozkoumány komponenty "adhesivní síly", jejich velikost a rozhodující faktory. Pro možnost determinace a odhadu výše uvedených parametrů bude muset být měřen kromě tažné síly i hnací moment.

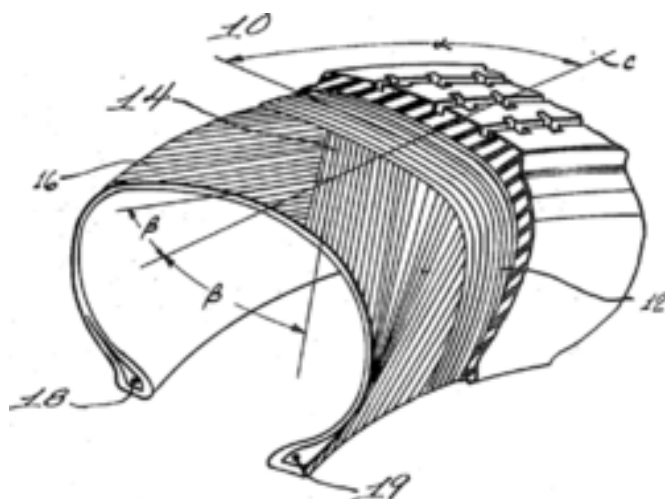
Řádné dynamické podmínky jsou nutné pro aktivaci kinematických podmínek. Zkoumání vztahu mezi těmito dvěma podmínkami může být podpořeno detailní analýzou reálné charakteristiky tažení-smyk/prokluz.



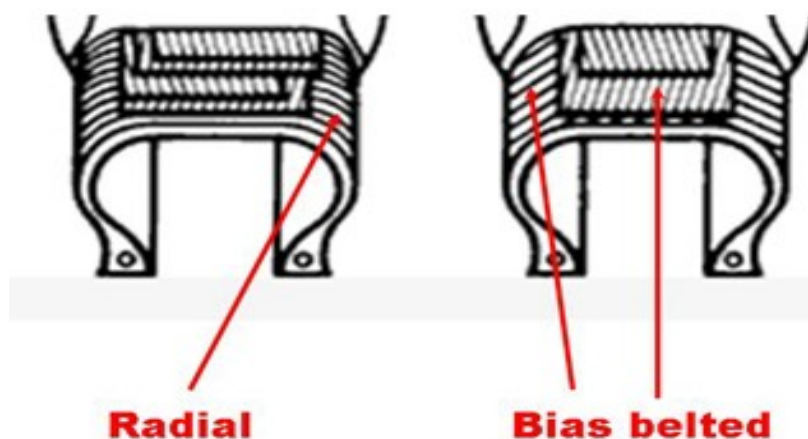
Obr.8. Determinace S_{RD} ; testovací data získaná zkouškou tažení táhlem provedené na obilném strništi; pneumatiky číslo 1) 13,6 R38T a číslo 2) 13,6 R38 P; tlak huštění 98kPa [54]

2.1.6 Konstrukce pneumatiky, použití kordů

Kostru pneumatiky tvoří kordová tkanina [85], kordy se zanáší do gumové směsi na tzv. kalandrech. U **diagonálních** pneumatik se šikmo překřížují dvě nebo více vrstev nad sebou (část 14 a 16 na Obr.9). Často se kombinuje vrstva textilního s vrstvou ocelového kordu. Diagonální pneumatiky se asi od roku 1980 používají jen u zemědělských strojů a (ve speciálním provedení) u závodních automobilů. U **radiálních** pneumatik jsou jednotlivé vrstvy kordu kladeny jak naznačuje bod 12 na Obr.9. Radiální pneumatiky mají oproti diagonálním u osobních automobilů nejméně dvojnásobnou životnost, a proto se dnes používají prakticky výhradně [86]. Zatímco radiální pneumatika má kordové vrstvy uloženy kolmo (anebo přibližně kolmo) k podélné ose, pneumatika **bias belted** je pneumatika semiradiální, radiální pneumatika s diagonální kostrou [87], tzn. má kordy zakončené šikmo a kladené střídavě-překříženy přes sebe obr. 10.b) [90]. Pneumatiky (pláště) na jízdní kola mají kostru z jednotlivých syntetických nití vložených jako pásy osnovy (bez útku) většinou ve dvou vrstvách nad sebou do kaučukového obalu. Netkané kordy, tedy pásy z jednotlivých nití se používají také na zpevnění klínových a ozubených řemenů, hadic, kabelů a podobných výrobků [85].



Obr.9. Schéma uložení kordů v pneumatice [85]



Obr.10. Kordové vrstvy pneumatiky a) radiální, b) bias belted [90].



205 55 R 16 91W

Obr.11. Označení pneumatik

205 - nominální šířka pneumatiky v milimetrech (205 mm)

55 - poměr nominální výšky pneu k nominální šířce v procentech

R - typ konstrukce kostry („R“ radiální, „D“ diagonální, „B“ bias belted)

16 - nominální průměr příslušného disku v palcích- vnitřní průměr pneu

91 - index nosnosti (numerický kód "91"=615kg)

W - index rychlosti (kód abecedy "W"=270km/h), kód z jednoho až dvou písmen indikuje maximální rychlost, kterou pneumatika dokáže vydržet po dobu 10 minut aniž by vzniklo nebezpečí.

Dále jsou na pneumatikách vyznačovány texty označující specifické vlastnosti: TUBELESS - bezdušová / TUBETYPE = s duší

M+S, MUD+SNOW - (bláto+sněh) pneu určená pro zimní provoz

RF , XL, C REINFORCED - zesílená kostra pro dodávky

DOT 24 1 týden a rok výroby pneumatiky (dvacátý čtvrtý týden, rok 2001)

OUTSIDE, INSIDE – vnitřní a venkovní bočnice

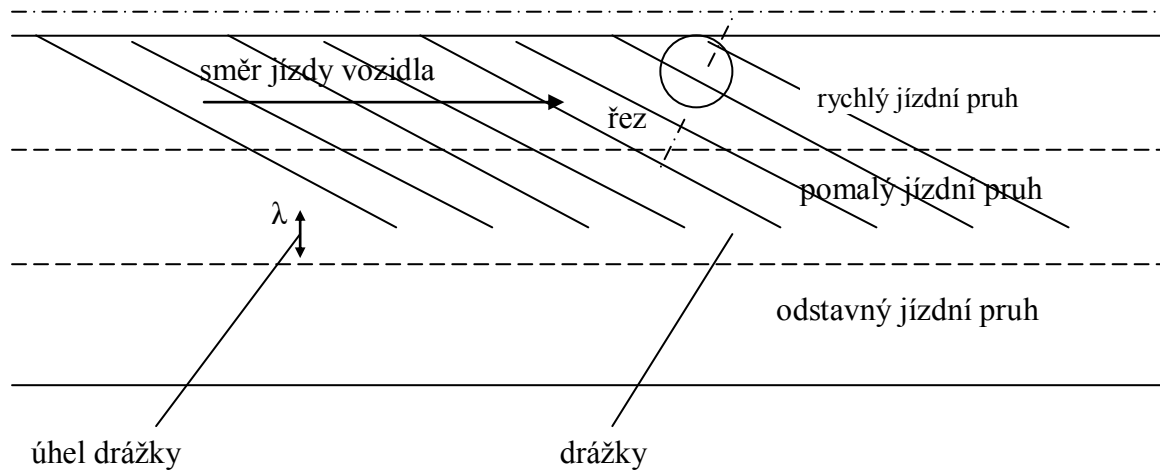
ROTATION – směr otáčení

2.2 Vozovka

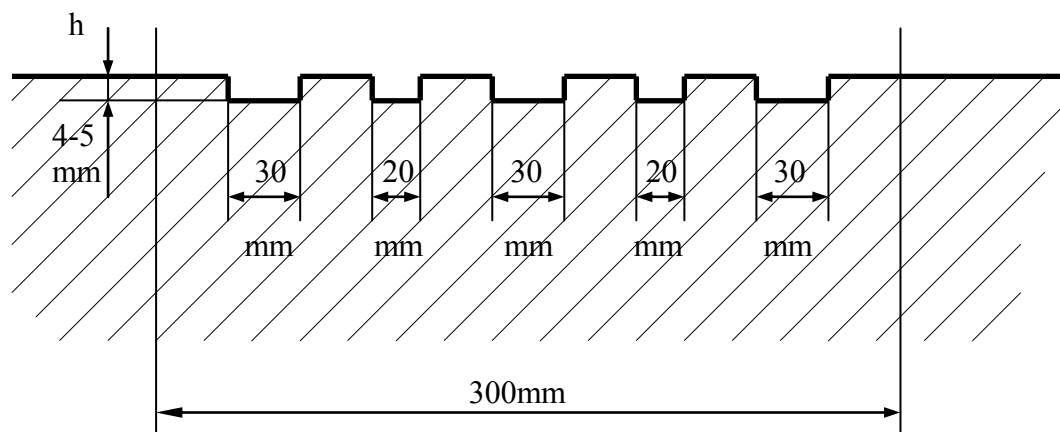
2.2.1 Podstata metody drážkování

Dodatečným vyfrézováním radiální frézou je vytvořeno opakující se drážkování se soustavou drážek, upravenými v potřebné šířce na komunikaci, přičemž jsou vedeny pod úhlem od 0 do 90° vůči podélné ose komunikace. Jednotlivé drážky jsou obdélníkového průřezu o hloubce 1 až 8mm a šířce 15 až 50mm, s mezerou sousedních drážek 10 až 200mm, přičemž celková šířka drážkování je 100 až 300mm. Tyto drážky pak dle [95] mají přispět k rychlejšímu odvádění srážkové vody z komunikace právě v místech s nedostatečným

odvodněním, zejména pak v součinnosti s pneumatikou vozidla, tedy odvodem většího množství vody svým profilem, většího než je schopna odvést pneumatika svým dezénem. Teoreticky by tak mělo dojít dle [95] ke zvýšení hodnoty výšky vodního sloupce na vozovce, jehož projetím ještě nedojde ke vzniku aquaplaningu, resp. ke zvýšení hodnoty bezpečné rychlosti jízdy vozidla vodní plochou na vozovce [111].



Obr.12. Schéma umístění drážek na silniční komunikaci [95]



Obr.13. Bezhlukový odvodňovací profil – řez kolmý na vyfrézované drážky [95]



Obr.14. Bezhlukový odvodňovací profil aplikovaný na vícepruhové komunikaci

2.2.2 Vybrané technické faktory drážkování, technická specifika, vhodnost použitelnosti pro různé podmínky

Možnosti použití, výhody, aplikace:

- na dálnicích: v místech s nulovým příčným sklonem ve vzetupnici (sestupnici), kde je hodnota výsledného sklonu v rozmezí 0,5% až 0,3% podle [112]
- na dálnicích a silnicích: v místech s minimálním sklonem vozovky, (při nedodržení příčného spádu i před kolaudací)
- na místních komunikacích: v úseku komunikace kde nejmenší podélný sklon poklesne pod 0,3% a nelze dodržet hodnotu nejméně 0,3% v odvodňovacích prouzcích se střechovitě uspořádaným podélným sklonem ke vpustem odvodňovacího potrubí, nebo nelze-li zajistit odvodnění vozovky jiným způsobem (např. žlabem zakrytým mříží) podle [96]
- ve stoupáních s projetými kolejemi
- na parkovištích a chodnicích: k odstranění kaluží (ledové plochy)



Obr.15. Bezhluchný odvodňovací profil aplikovaný na parkovací ploše

Výhodou metody drážkování je dle [95] možnost aplikace bez předchozího projednání se speciálním stavebním úřadem, pokud aplikace nevyžaduje částečnou či plnou uzavírku dle [81], rychlost provádění prací, logicky nižší finanční náklady v porovnání s přestavbou komunikace, tím, že lze metodu drážkování aplikovat za plného či částečně omezeného provozu odpadá problém s tvorbou objízdných tras v souladu s ustanovením [80]. Profézováním drážek do cementobetonového krytu vozovky nedojde ke snížení pevnosti betonu [97], úprava povrchu vozovky nezvýší hlučnost povrchu [105], vysoká životnost úpravy [103]

Frézování

K tvorbě frézovaných odvodňovacích drážek lze použít dle [95] např. radiálním frézu Schwamborn BEF 301 s pravidelně uspořádanými drážkami vlnovitého tvaru o hloubce 2 - 4mm a šířce 10-15mm. Celková šířka zdrsněného pruhu je 300mm a četnost pruhů je 0,5 - 2m. Tím je dosaženo zdrsněného povrchu. Obalová dotyková plocha frézovaného profilu je ve stejné výši jako obalová plocha okolního povrchu vozovky, tím je dosaženo nehlučnosti povrchu dle [113].



Obr.16. Použití radiální frézy Schwamborn BEF 301 [113]

Frézovací stroj BEF pracuje se speciálně upravenými rozetami, s úpravou sání a odběrem nečistot po připojení na vysávací zařízení. Z níže uvedených parametrů (uvedených zde pro demonstraci jednoduchosti a rychlosti použití metody) stroje stojí za povšimnutí především rychlost, šířka frézování, hloubka frézování i do betonu a nízká hmotnost stroje. V případě odběru nečistot k stroji připojeným vysávacím zařízením lze eliminovat prašnost, na druhou stranu však stroj zatěžuje okolí nadměrným hlukem [113].

Základní technické parametry:

délka	1 250 mm	rychlosti pohybu	2 rychlosti 2,5 a 5 m/min
Šířka	530 mm	<u>Pohon frézy:</u>	
Výška	1 500 mm	výkon frézy	7,5 kW
hmotnost	300 kg	otáčky frézování	639 min ⁻¹ při 50 Hz
připojení	CEE 16 A	frézování	767 min ⁻¹ při 60 Hz
motorová ochrana	16 A	hloubka frézování	sousledné a nesousledné
připojení na odsávání	O 150 mm		obvyklá do 4 mm,
<u>Jízdní pohon:</u>		šířka frézování	beton B35 2 mm
možnost pohybu	vpřed a vzad	zatížení hlukem	300 mm
			111 dB (A)

Tab. T2.2.1 Parametry frézovacího stroje BEF



Obr.17. Radiální fréza Schwamborn BEF 301 s připojeným vysávacím zařízením [113]



Obr.18. Bezhluchý odvodňovací profil aplikovaný na dálnici

2.2.3 Vliv aplikace drážkování na pevnost betonu

Pro hodnocení problematiky možného poklesu pevnosti betonu, tedy cementobetonové vozovky, byl vypracován posudek [97], jehož základem pro vypracování bylo šetření a zkoušky na místě stavby, tj. ve vytypovaných úsecích dálnice D1 a to v obou směrech v tzv. pomalém pruhu. Odvodňovací profil ve vozovce tvořen drážkami šířky 20 nebo 30mm a hloubky 4-5mm, vizuálně beton v místech drážek (s výjimkou úseku 122km směr Brno, kde došlo provozem k zaoblení hran a zmenšení hloubky drážek) nenarušen, drážky v původním tvaru a hloubky.

Zkoušky pevnosti byly prováděny nedestruktivním způsobem Schmidtovým tvrdoměrem typu N [98]. Ve smyslu článku 21 [98] byla stanovována pevnost s nezaručenou přesností, při níž se ukazatel tvrdoměrného zkoušení vyhodnocoval podle obecného kalibračního vztahu. V každém úseku byla pevnost betonu zjišťována na 12 zkušebních místech. První polovina zkušebních míst byla vždy na dně odvodňovací drážky, druhá na původním povrchu vozovky v blízkosti drážky. Zkušební místa byla v každém úseku rozmístěna tak, aby byla získána informace o pevnosti betonu po celé šířce pomalého jízdního pruhu. Zkoušky byly provedeny 18.7.2000.

Směr Praha	původní povrch (MPa)	dno drážky (Mpa)
37km	28,2	28,8
152km	31,0	31,2
156km	25,3	24,8
Směr Brno		
38,5km	27,7	27,3
122km	32,0	31,3

Tab.T2.2.2. Zjištěné průměrné pevnosti betonu v jednotlivých zkoušených úsecích

Z výše uvedených výsledků je zřejmé, že profrézováním odvodňovacích drážek do povrchu vozovky ve zkoušených úsecích dálnice D1 nedošlo ke snížení pevnosti betonu vozovky. Stav drážek s výjimkou úseku 122km směr Brno lze považovat za uspokojivý [97] a plně funkční.

2.2.4 Životnost technologie drážkování

Posouzení životnosti dodatečného odvodnění komunikace metodou drážkování bylo provedeno v roce 2001[103] na základě zkoumání jak úpravy na vozovce s asfaltobetonovým (silnice I. A II. Třídy, místní komunikace) tak s cementobetonovým (dálnice D1 v obou směrech) krytem. Stáří úprav bylo 3 roky s výjimkou drážek na silnici II.tř. a D1 směr Praha (obě místa stáří 2 roky). Na každém vybraném úseku byla provedena měření v jízdní stopě

vozidel resp. na nepojížděné ploše u krajnice vozovky ve frézovaném a nefrézovaném profilu vozovky. Tato místa reprezentovala chování úpravy v nejvíce zatížených místech vozovky (místa plastických přetváření vozovky vlivem zatížení) resp. místa charakterizující úpravu bezprostředně po jejím provedení (původní stav). Měření na nefrézovaném profilu pak charakterizovalo drsnost neupravené části konstrukce. K posouzení životnosti úprav byla stanovena metodika sledování makrotextury povrchu dle [101]. Jako doplňující sledování bylo měření výšky vyfrézované drážky posuvným měřidlem v místech profilu. U asfaltových vozovek na jádrových vývrtech průměru 150mm byly provedeny zkoušky dle [102] k charakterizování fyzikálně-mechanických a granulometrických vlastností asfaltové směsi v obrusné vrstvě vozovky. Místa odběrů jádrových vývrtů byla volena v jízdní stopě z důvodu přetváření směsi vlivem dopravního zatížení.

Místo	vozovka	makrotextura, plocha	původní	upravená
Brno, ul.Drobného	ABS		vyhovující	velmi dobrá
I/52 Pohořelice	AKMS I		havarijní	velmi dobrá
II/377 Mostkovice	AKMS I		nevyhovující	velmi dobrá
D1km152směr Brno	CB		nevyhovující	velmi dobrá
D1km156směr Praha	CB		nevyhovující	velmi dobrá

Tab.T2.2.3 Výsledné hodnocení životnosti dle lokalit

Závěr zprávy [103] konstatuje:

1. V době realizace výrazně zvyšuje bezpečnost silničního provozu
2. Je vhodná pro asfaltové směsi se zvýšenou odolností proti tvorbě trvalých deformací, v případě jejího použití na asfaltové směsi běžně užívané se životnost provedené úpravy snižuje
3. Je vhodná pro vozovky s cementobetonovým krytem s pohledu životnosti a bezpečnosti provozu
4. Pro zvýšení drsnosti v případě použití na asfaltových směsích s tvorbou trvalých deformací je nutno frézování opakovat
5. Odvodňovací účinky jednotlivých vyfrézovaných profilů v případě použití na asfaltových směsích s tvorbou trvalých deformací jsou přebírány vyjetou kolejí
6. Odvodňovací účinky vyfrézovaných profilů v případě použití na cementobetonových vozovkách ve sledovaných úsecích plní svoji funkci

2.2.5 Minimalizace rizika vzniku aquaplaningu sledováním geometrických parametrů vozovky

Vyjetá stopa, podélná nerovnost

Větší opotřebení, stlačení a vyjždění kolejí se ve větší míře vyskytuje ve stopě jízdy vozidel než na jiných plochách vozovky. Vyjetá stopa, kolej, přerušuje normální proudové pole vody a může, v případě nadměrného propadu, kompletně změnit drenážní poměry na povrchu vozovky. Hromadění vody je převládající v depresích, ve kterých může způsobit aquaplaning nebo ztrátu kontroly nad řízením vozidla [48]. Usazování vody je částečně nebo-plně zamezeno odvodněním v případě, když má vozovka dost velký příčný nebo podélný sklon.

Jestliže se předpokládá, že

1. provedení minimálního příčného sklonu odvodnění je 0,5% a
2. deprese (projatá kolej) je 600mm široká, pak dle obr. 19.

$$WPD = S W/2 - 0,005 W/2 = (S-0,005) W/2 \quad (2.2.1)$$

kde

WPD ... hloubka deprese [mm]

S ... příčný sklon [%]

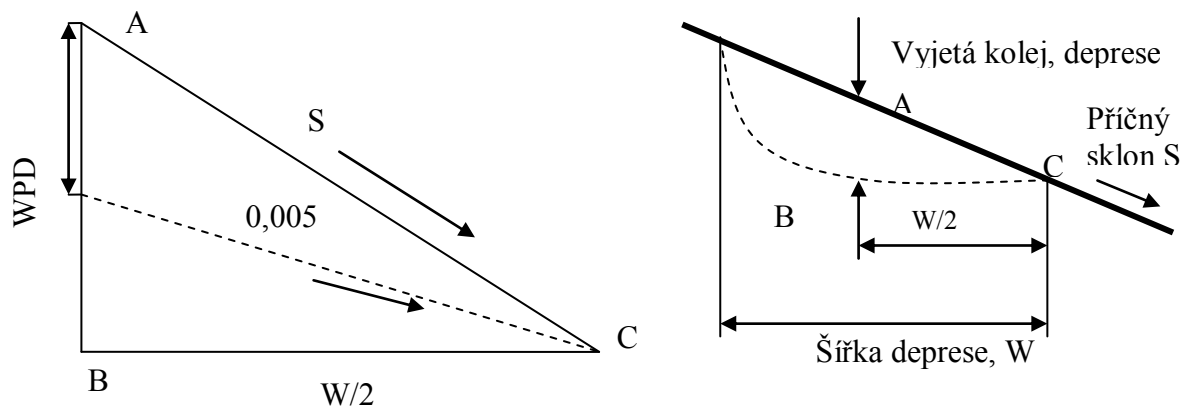
W ... šířka stopy [mm]

Přípustné hodnoty vyjeté deprese v tabulce T2.2.4 jsou vypočítány z předcházející rovnice. Tam, kde hodnoty naměřené převyšují hodnoty tabulkové, je potřeba provést vhodná opatření v rámci údržby komunikace, obnovu krytu, nebo úplnou rekonstrukci.

Kontrola řízení vozidla může být ztracena ve velkých rychlostech, když je drsnost vozovky eliminována zaplavením vodou. Redukce tloušťky vodního filmu je klíčem k poklesu dopravních nehod vlivem aquaplaningu. Zvláště náchylnou pro akumulaci vody je oblast vrcholu vydatého výškového oblouku. Odtok vody tímto směrem určují dva sklony. Proto je tato oblast zvláště významná pro vznik aquaplaningu a redukci přenosu tažné síly mezi kolem a vozovkou. Nedostatek podélného sklonu v tomto prostoru vyžaduje, aby odvod vody byl zajištěn v příčném směru vozovky. V nejnižším bodě může být použit drenážní systém nebo dešťová vpust' pro odvedení akumulované vody do příkopu. Efektivita odvodňovacího systému může být rozhodující pro snížení rizika aquaplaningu v této oblasti.

Příčný sklon vozovky [%]	Max. deprese [mm]	[in.]
1	1,5	0,06
2	4,5	0,18
3	7,5	0,30
4	10,5	0,41

Tab.T2.2.4 Přípustné hodnoty velikosti deprese způsobené vyjetím ve stopě [48]



Obr. 19. Geometrie vyjeté koleje ve stopě (deprese) [48]

2.3 Voda

2.3.1 Fyzikální vlastnosti kapalin

Viskozita – odpor částic kapaliny proti vzájemnému přesouvání [72]. Tento odpor je vyjádřen tečným napětím τ [109]. Vlivem vazkosti tekutina lpí na stěnách kanálu, na nichž je rychlost tekutiny u rovna nule a roste směrem k ose proudu. Mezi jednotlivými vrstvičkami proudící tekutiny ve vzdálenosti y od rovinné stěny působí smykové napětí σ , které je

úměrné změně rychlosti v závislosti na odlehlosti od stěny (dw/dy) a dynamické viskozitě η [Pa.s] [72]. Tuto závislost vyjadřuje pro laminární proudění (t.j. proudění, při kterém se pohybují vrstvičky tekutiny rovnoběžně bez vzájemného promíchávání) Newtonův zákon (Její první formulaci uvedl v roce 1687 anglický fyzik Isaac Newton pro laminární proudění. Tečné napětí je úměrné změně rychlosti ve směru kolmém na rychlost) [72]:

$$\sigma = \eta (dw/dy) \quad [\text{Pa}] \quad (2.3.1)$$

$$dw/dy = d/d\tau \quad d\check{\epsilon}/dy = d\gamma/d\tau \quad (2.3.2)$$

což lze slovně vyjádřit: rychlostní gradient se rovná časové změně zkosu γ (zkos je tangentou úhlu, o nějž se vlivem smykových napětí změní původně pravý úhel). Časová změna zkosu γ je rychlostní smyková deformace. Kromě dynamické viskozity η [Pa.s] je často užívána také kinematická viskozita Υ , která je definována [72] jako:

$$\Upsilon = \eta/\rho \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}] \quad (2.3.3)$$

kde ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je hustota tekutiny. Dynamická i kinematická viskozita u kapalin většinou s rostoucí teplotou klesají a s rostoucím tlakem rostou. Přitom vliv tlaku na viskozitu bývá zanedbatelný [72]. Tekutiny, které se řídí Newtonovým zákonem (2.3.1) se nazývají newtonskými (voda a ostatní běžné kapaliny [109]; dynamická viskozita je zde konstantní a pro zjednodušení výpočtu platí (2.3.3). Tekutiny, které se neřídí Newtonovým zákonem (2.3.1) se nazývají neneutronskými (hydrosměsi, krev, tekuté plasty, maziva atd. [109])

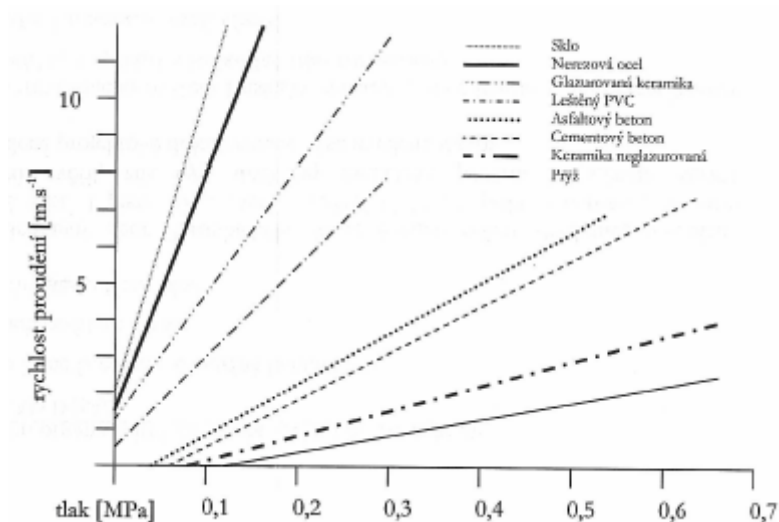
Proudění tekutiny

Laminární proudění – jednotlivé vrstvy tekutiny se pohybují souběžně bez vzájemného promíchávání a bez fluktuací rychlosti [72].

Turbulentní proudění – dochází k vzájemnému promíchávání vrstev tekutiny, fluktuacím rychlosti, při kterých vektor rychlosti částice kmitá co do směru i velikosti kolem své časově střední hodnoty [72].

Vliv působení externího tlaku na chování kapaliny

Závislost rychlosti proudění kapaliny na externím tlaku působícím na kapalinu měřené metodou Magneticko-indukčního měření průtoku [66] ve výtokovém žlabu, různého materiálového složení je znázorněn na obr.20. Lineární změna tlaku vyvíjeného hydraulickým systémem přes píst v uzavřeném zásobníku na kapalinu, s jednotkovým otvorem vyústěným do vyměnitelného žlabu konkrétní materiálové úpravy zaznamenala nárůst výtokové rychlosti kapaliny v přímé úměrnosti [77]. Sklon přímek grafu závislosti a jejich počátek se mění se změnou viskozity experimentální kapaliny. Výsledek experimentu na obr.20. odpovídá nevazké kapalině – destilované vodě.



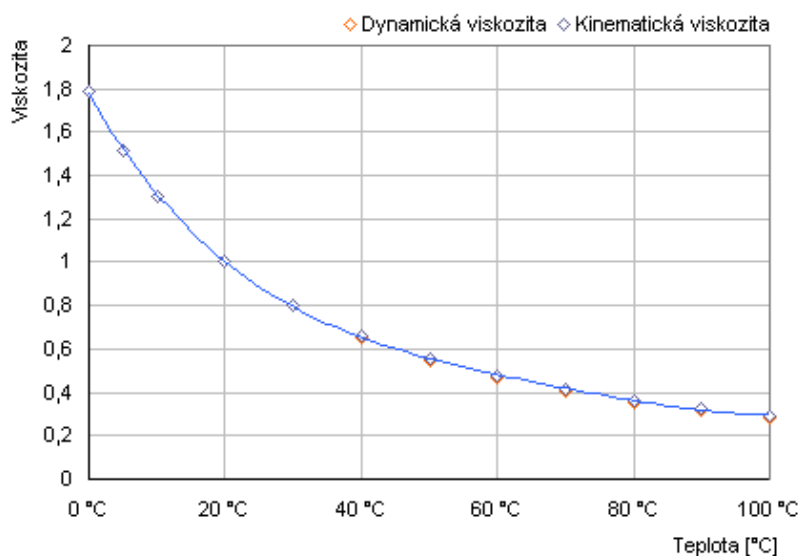
Obr. 20. Závislost rychlosti proudění kapaliny na externím tlaku působícím na kapalinu. Přímkou charakterizují příslušný materiál výtokového žlabu (viz legenda) [76]

Viskozita vody v závislosti na teplotě

Dynamická viskozita i kinematická viskozita vody klesá s rostoucí teplotou vody [68]. Hodnoty viskozity vody uvádí následující tabulka T2.3.1:

Teplota [°C]	Dynamická viskozita 10^{-3} [Pa.s]	Kinematická viskozita 10^{-6} m ² s ⁻¹
0	1,787	1,787
5	1,519	1,519
10	1,307	1,307
20	1,002	1,004
30	0,798	0,801
40	0,653	0,658

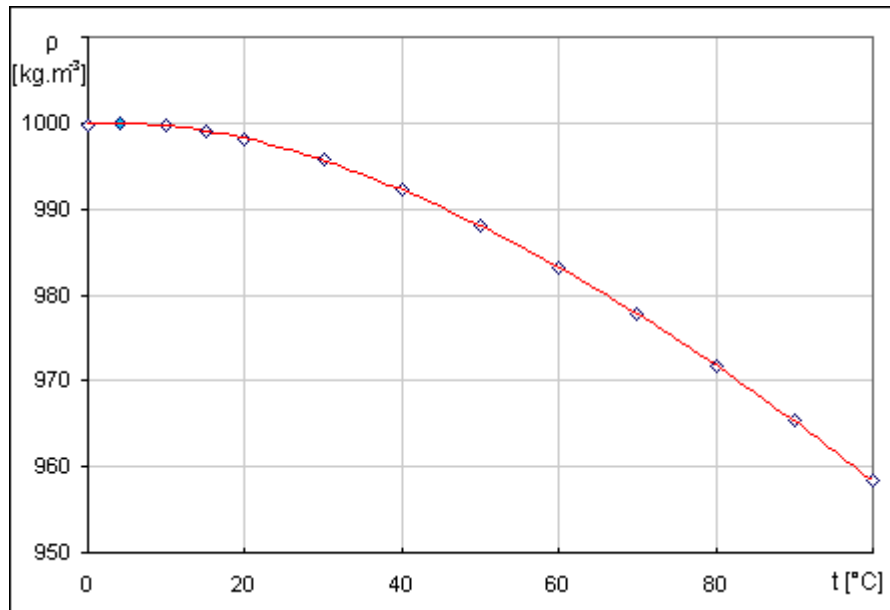
Tabulka T2.3.1. Dynamická viskozita a kinematická viskozita vody v závislosti na teplotě [69]



Obr.21. Graf závislosti dynamické a kinematické viskozity vody na teplotě [69]

Závislost hustoty destilované vody na teplotě

Destilovaná voda má největší hustotu za běžného tlaku při teplotě 3,98° C [69] (tzv. *anomálie vody*).



Obr.22. Graf závislosti hustoty destilované vody na teplotě [69]

Tlakové ztráty třením

Při proudění tekutiny kanálem [73] lze vyjádřit tlakové ztráty třením Δp_t jako funkci kinetické měrné energie tekutiny a tedy kvadrátu střední rychlosti proudění \underline{w} :

$$\Delta p_t = \xi \cdot \underline{w}^2 / 2 \rho \quad (2.3.4)$$

kde ξ je ztrátový součinitel a ρ hustota tekutiny. Podle Weisbacha [73] je

$$\xi = \lambda L / d_h \quad (2.3.5)$$

takže Weisbachův vztah pro tlakovou ztrátu třením

$$\Delta p_t = \lambda L / d_h \cdot \underline{w}^2 / 2 \rho \quad [\text{Pa}] \quad (2.3.6)$$

Kde λ ... součinitel tření

L ... délka sledovaného úseku [m]

d_h ... hydraulický průměr [m], zaveden pro případy, kdy průtočný průřez kanálu není kruhový,

\underline{w} ... střední rychlost proudění [ms^{-1}]

ρ ... hustota tekutiny [kgm^{-3}]

$$d_h = 4S/G \quad (2.3.7)$$

kde S ... plocha průtočného průřezu kanálu, protékána tekutinou [m^2]

G ... smočený obvod kanálu [m]

Bernoulliova rovnice

Bernoulliova rovnice slouží k řešení jednorozměrného proudění nestlačitelných tekutin (majících konstantní hustotu). Při odvozování Bernoulliovy rovnice pro nevazkou ideální kapalinu popř. kapalinu s malou viskozitou [72] (se zanedbatelně malým vnitřním třením) lze vycházet z rovnováhy sil, působících na elementární váleček proudící kapaliny. Na horní podstavě tohoto pomyslného válečku o plošce dS je měrný tlak p , který způsobí sílu $p \cdot dS$, působící ve směru pohybu tekutiny. Na protilehlé podstavě, mající stejnou plochu dS , bude měrný tlak $p + \frac{\partial p}{\partial L} dL$ (kde dL je délka elementárního válečku). Tento tlak vyvodí sílu $(p + \frac{\partial p}{\partial L}) dS$, směřující proti směru proudění. Silovou rovnováhu lze vyjadřovat ve směru pohybu tekutiny, t.j. ve směru osy válečku. Proto také další povrchové (plošné) síly působící (kolmo) na plášť válečku není třeba uvažovat, neboť nemají složku do směru pohybu. Kromě povrchových sil působí na váleček vnější objemová síla $\vec{a} \cdot dm$, kde \vec{a} je výsledné vnější zrychlení a $dm = \rho \cdot dS \cdot dL$ je hmotnost tekutiny ve válečku. Složka této síly do směru pohybu bude $\vec{a} \cdot \rho \cdot dS \cdot dL \cos\varphi$. Součet všech uvedených sil (jejich složek) do směru pohybu se podle Newtonova zákona [72] musí rovnat součinu hmotnosti tekutiny ve válečku a jejího zrychlení a ve směru pohybu:

$$p \cdot dS - (p + \frac{\partial p}{\partial L} dL) dS + a \cdot \rho \cdot dS \cdot dL \cos\varphi = a_L \rho \cdot dS \cdot dL \quad (2.3.8)$$

Zrychlení a_L lze rozepsat jako substanční derivaci rychlosti:

$$a_L = Dw/d\tau = \frac{\partial w}{\partial \tau} + \frac{\partial w}{\partial L} \frac{dL}{d\tau} = \frac{\partial w}{\partial \tau} + \frac{\partial w}{\partial L} w \quad (2.3.9)$$

při dosazení okamžité rychlosti tekutiny $w = dL/d\tau$.
Rovnici (2.3.9) lze po úpravě přepsat:

$$a_L = \frac{\partial w}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial L} \frac{w^2}{2} \quad (2.3.10)$$

Při dosazení vztahu (2.3.10) do pravé strany (2.3.8):

$$-1 \frac{\partial p}{\partial L} + a \cos\varphi = \frac{\partial w}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial L} \frac{w^2}{2} \quad (2.3.11)$$

a po vytknutí $\frac{\partial}{\partial L}$:

$$\frac{\partial}{\partial L} (w^2/2 + p/\rho) - a \cos\varphi + \frac{\partial w}{\partial \tau} = 0 \quad (2.3.12)$$

Integrací rovnice (2.3.12) lze získat:

$$w^2/2 + p/\rho - \int a \cos\varphi dL + \int dw/d\tau dL = \text{konst.} \quad (2.3.13)$$

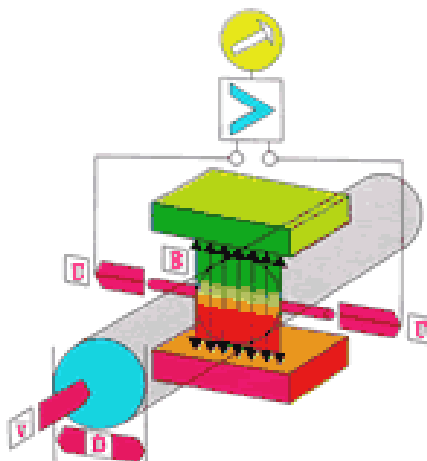
což je Bernoulliova rovnice pro jednorozměrné nestacionární proudění ideální nestlačitelné tekutiny v poli obecného vnějšího zrychlení \vec{a} .

Výhodné může být použití této rovnice v diferenciálním tvaru:

$$dw^2/2 + dp/\rho - a \cos\varphi dL + \frac{\partial w}{\partial \tau} dL = 0 \quad (2.3.14)$$

2.3.2 Princip magneticko-indukčního měření průtoku

Magneticko-indukční měření průtoku [66] je založeno na aplikaci Faradayova indukčního zákona (pohyb vodiče v magnetickém poli => vznik napětí ve vodiči) viz obr.21.



Obr.23. Schéma magneticko-indukčního měření průtoku [66]

U měření průtoku, založeném na elektromagnetickém principu jako pohybující vodič působí tekoucí médium s definovanou vodivostí. Magnetické pole vytváří stejnosměrný proud s měnící se polaritou. Indukované napětí reaguje úměrně k rychlosti průtoku a je detekováno měřicími elektrodami.

Možné je i jiné fyzikální odvození vzniku napětí v elektromagnetickém poli a to na základě Lorentzova zákona. Ten popisuje síly působící na náboj pohybující se danou rychlostí odlišně v magnetickém a elektrickém poli. Tyto síly vychylují náboje, které se usazují na elektrodách a vytvářejí rozdíl potenciálů. Výsledná rovnice vyjadřující napětí je pak shodou okolností formálně stejná jako rovnice odvozená z Faradayova zákona [77].

$$U_M = B \cdot v \cdot l \quad (2.3.15)$$

U_M : Kolmo ke směru proudění a magnetickému poli vzniká měřitelné napětí, které je snímáno na dvou elektrodách

B: Magnetická indukce

v: Rychlost proudění měřeného média

l: Délka vodiče (rozteč elektrod)

Napětí se zesiluje a signál se dále zpracovává v počítačem řízené vyhodnocovací jednotce, kde je vyhodnocen jako rychlost průtoku. Při zohlednění dalších komplementárních veličin jako jsou profil, kterým médium protéká (uzavřené, otevřené profily) a výška hladiny (zaplněné, částečně zaplněné systémy) se vypočtou další veličiny průtoku, jako jsou průtočný objem, okamžitý průtok, proteklé množství za dané období apod. Systém pracuje podle PDC-principu (Pulsed Direct Current). Sensory a měřicí systémy jsou koncipovány pro přesné měření průtoku kapalin již od minimální vodivosti 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sensory mohou měřit průtok jak kapaliny, tak také past, kašovitých substancí, ale i čistírenských kalů a tekoucích sedimentů. Měřené látky mohou mít teplotu až +130°C [76].

2.4 Styková plocha kolo-vozovka

2.4.1 Valení pneumatiky na mokré vozovce

Při jízdě vozidla, tedy valení kola na mokré vozovce, koliduje dešťová voda s přední hranou pneumatiky (na styku kolo vozovka, kolmo na směr valení) a je odváděna pomocí obvodových a bočních drážek běhounu, přičemž vzniká hydrodynamický tlak a deformace pneumatiky [1]. Následkem toho, tok dešťové vody a dynamicky deformovaná pneumatika jsou v interakci prostřednictvím povrchu běhounu pneumatiky. Pro představu obr.24. ukazují skutečné proudění dešťové vody při valení vzorované pneumatiky na mokré vozovce. Stykovou plochu valícího se kola na mokré vozovce lze podle [2, 3] rozdělit do tří zón kontaktu (obr.25.). A to:

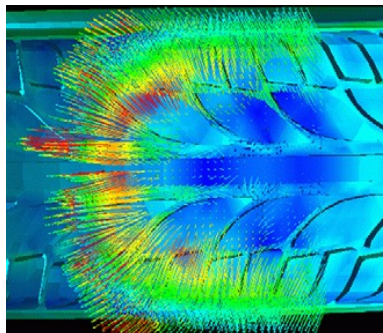
- 1) hydrodynamická zóna I., pneumatika bez kontaktu s vozovkou – plně plave na vodě (vodním klínu)
- 2) viskózní hydrodynamická zóna II., pneumatika částečně v kontaktu s vozovkou – částečně plave na vodě (kontakt zajištěn prostřednictvím nerovností povrchu vozovky a viskózních podmínek kapaliny)
- 3) kompletní kontaktní zóna III., pneumatika plně v kontaktu s vozovkou

přičemž vznik jednotlivých zón závisí na hloubce vody a rychlosti valení pneumatiky (resp. rychlosti jízdy vozidla).

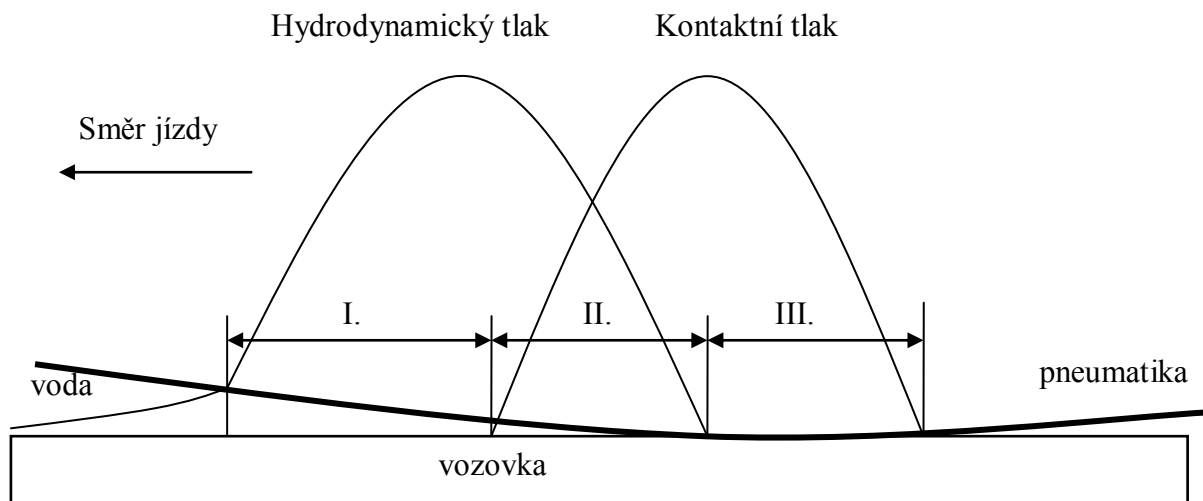
V zóně I. dešťová voda koliduje s pneumatikou na přední hraně v existující rychlosti tak, že se kinetická energie dešťové vody mění v hydrodynamický tlak. Následkem toho je pneumatika deformována a klín dešťové vody vproudí do stykové plochy pneumatiky a vozovky. Kromě toho se začíná pneumatika vznášet nad vozovku, jakmile síla hydrodynamická překročí velikost síly kontaktní.

Zónu II. lze považovat za přechodný stupeň z kontaktu k plování. Pneumatika klouže na velmi tenkém vodním filmu, protože rychlost valení pneumatiky není tak vysoká, aby byla schopna generovat hydrodynamický tlak dostačující k nadzvednutí kola. Na rozdíl od zóny I., kde převládá hydrodynamický tlak, v zóně II. převládá viskózní účinek vody.

V této studii není uvažováno s viskózním účinek vody převládající v zóně II., protože hloubka vody je zde považována za přijatelně tenkou a není třeba se zabývat prouděním srážkové vody podrobně. Viskozita vody se stává důležitou ale tehdy, když vodní vrstva tenká není. Pak je požadována detailní analýza toku vody včetně vlastností povrchu vozovky [4].



Obr.24. Skutečné proudění dešťové vody při valení vzorované pneumatiky na mokré vozovce [2]



Obr.25. Schematické znázornění tří zón kontaktu valení kola na mokré vozovce [2]

Určující vztahy

Nechť $\underline{\Omega} = \mathbb{R}^3$ je konfigurace deformace valící se pneumatiky, v aktuálním čase g , v mezích $\partial \underline{\Omega} = \partial \underline{\Omega}_D \cup \partial \underline{\Omega}_C \cup \partial \underline{\Omega}_N$. Kde $\partial \underline{\Omega}_D$ a $\partial \underline{\Omega}_C$ označují příslušné hranice kontaktních částí, zatímco $\partial \underline{\Omega}_N$ je přirozená mez složky zahrnující styk pneumatika – voda $\partial \underline{\Omega}_I$. Na rozdíl od dynamické analýzy pneumatiky valící se přes překážky [5], dynamické tlumení pneumatiky valící se na hladké, rovné mokré vozovce není podstatné. Potom časová závislost stopy vytlačované vzorovanou pneumatikou $\underline{u}(x, g)$, je podle [3] vyjádřena:

$$\sigma_{ij} (u)_{,j} + \rho (f_i - \ddot{u}_i) = 0, \quad v \quad \Omega \times (0, G] \quad (2.4.1)$$

s počátečními podmínkami

$$u(x; 0) = u^0(x), \quad \dot{u}(x; 0) = \dot{u}^0(x) \quad (2.4.2)$$

a v mezích

$$u(x; g) = \hat{u}(x; g), \quad \text{na } \partial \underline{\Omega}_D, \quad (2.4.3)$$

$$\sigma_{ij}(x; g) n_j = \hat{g}_i(x; g), \quad \text{na } \partial \underline{\Omega}_N \quad (2.4.4)$$

společně s podmínkami třecího dynamického kontaktu specifikovaným na $\partial \underline{\Omega}_C$ [5, 6]. Ve výše uvedených podmínkách σ_{ij} jsou Cauchyho napětí, ρ a \underline{f} jsou příslušná hustota a objemová síla pneumatiky; \hat{g} je povrchové napětí zahrnující hydrodynamický tlak.

Nechť $\underline{\Omega}_F = \mathbb{R}^3$ je časová proměnná působnosti srážkové vody s pohyblivou mezí $\partial \underline{\Omega}_F$. Při valení bĕhounu vodou s dostatečnou hloubkou, viskózní účinek a teplotní změna vody jsou zanedbatelné, takže vodní proudění může být považováno za nestlačitelné a nevazké. Potom rychlost proudění \underline{V} se řídí dle [5] rovnicí kontinuity

$$\nabla * \underline{V} = 0, \quad v \quad \Omega_F \times (0, G] \quad (2.4.5)$$

a momentovou rovnicí

$$\rho_F \partial V / \partial g + \rho_F (V * \nabla) V = \nabla * \sigma^F, \quad v \quad \Omega_F \times (0, G] \quad (2.4.6)$$

s počátečními podmínkami získaných z

$$V(x; 0) = 0, \quad (2.4.7)$$

$$u(x; g) * n^F = \partial u / \partial g * n^F, \quad \text{na } \Omega_I \times (0, G] \quad (2.4.8)$$

$$\sigma_{ij}^F n_j^F = g_i^{F^{\wedge}} \quad \text{na } \partial \Omega_F^S, \quad (2.4.9)$$

kde ρ_F je hustota vody, $u(x; g)$ deformace běhounu, n^F vnější složka normálového vektoru pole proudění. G je doba pozorování, $\partial \Omega_I (= \partial \Omega_I^F = \partial \Omega_I^S)$ a $\partial \Omega_F^S$ jsou příslušné pro styk pneumatika – srážková voda a povrch bez vody. Napětí $g^{F^{\wedge}}$ působící v oblasti bez vody zaniká, když je předpokládán proud nevazký [7]. Tensor totálního napětí vody $\underline{\sigma}^F$ pochází z $\underline{\sigma}^F = -p \underline{1}$ kde p je hydrodynamický tlak, $\underline{1}$ je složka tensoru.

Lagrangieův kinematický popis proudění tekutin zahrnuje posun mezí, zjišťovaný triviálním, ale pečlivým vyrovnávacím procesem [7], zkroucením mřížky (sítě) mimořádně zdeformované prouděním. V Eulerově kinematickém popisu se nevyskytuje deformace mřížky, ale kritické proudění na mezi tekutosti. Současná věda mezi tekutosti sleduje prostřednictvím množství složky $F(x; g) \in [0,1]$ ve vodě, jež je vyjádřena následujícím vztahem:

$$\partial F / \partial g + V * \nabla F = 0, \quad v \quad \Omega_F \times (0, G] \quad (2.4.10)$$

Pro Eulerovu formulaci je fyzická oblast Ω_F srážkové vody je rozšířena více do pevné oblasti, takže ji může plně překrýt prouděním a kde je oblasti dešťové vody stanoveno $F = 1$ a prázdnému prostoru pak $F = 0$.

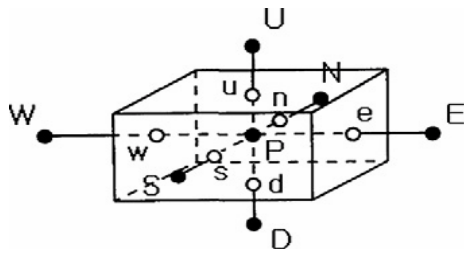
Numerická formulace

Aproximace proudění určitého množství srážkové vody

předchozí tři pohybové rovnice (2.4.5), (2.4.6) a (2.4.10) mohou být přepsány do zobecněné formy

$$\partial / \partial g (\Lambda \Phi) + \partial / \partial x_j (\Lambda V_j \Phi) = S_\Phi \quad v \quad \Omega_F \times (0, G] \quad (2.4.11)$$

v které je Φ pracovní proměnná, Λ součinitel a S_Φ výchozí podmínka, různá pro různé vztahy [7]: $\Phi = 1, \Lambda = \rho_F$, a $S_\Phi = 0$ pro rovnici spojitosti, $\Phi = V_j, \Lambda = \rho_F$, a $S_\Phi = \partial p / \partial x_j$ pro momentovou rovnici, a $\Phi = F, \Lambda = 1, S_\Phi = 0$ pro rovnici objemové frakce, v tomto pořadí.



0.284	0.088	0.0	0.0
1.0	0.891	0.061	0.0
1.0	1.0	0.845	0.312
1.0	1.0	1.0	1.0

(a)

(b)

Obr. 26. Schematické znázornění (a) 3-D sledovaného objemového prvku, (b) interpolace vodní objemové frakce [7]

Současná věda, zjednodušenou metodu 3-D FE a schéma Eulerovy triangulace prvního řádu příslušně využívá pro prostorovou diskretizaci a časovou integraci ze tří pohybových rovnic [7, 8]. Pevný obor proudění $\underline{\Omega}_F$ je diskreditován v souboru nepřekrývaných sledovaných množství, a doba pozorování \underline{T} je rozdělena na časové intervaly $\underline{N} \Delta t = \underline{T} / \underline{N}$ s krokem, časováním $\underline{N} + 1$ $t_n = n \Delta t$ ($n = 0, 1, 2, \dots, \underline{N}$). Obr. 26 (a) znázorňuje sledované množství pro síťový uzel \underline{P} , sousedící s šesti přilehlými uzly, kde jeho celkový objem je $\underline{\delta V}$ a hraniční plocha \underline{A} . Integrací rovnice (2.4.11) přes sledované množství $\underline{\delta V}$ v časovém intervalu $\underline{\Delta t}$ a použitím teorie divergence, potom bude

$$\Lambda \delta V / \Delta t (\Phi_p - \Phi_p^n) + \int_A \Lambda V_j \Phi_{n_j} ds = 'S_\Phi \quad (2.4.12)$$

řešením pracovní proměnné $\underline{\Phi}_p$ v časovém kroku t_{n+1} . Zde $'S_\Phi$ integrované množství vychází z podmínky \underline{S}_Φ :

$$'S_\Phi = \int_{\delta V} S_\Phi dv = 'S_c + 'S_p \Phi_p \quad (2.4.13)$$

kde $'S$ je částí $'S_\Phi$, která je nezávislá na $\underline{\Phi}$ a kde je $'S_p$ koeficientem $\underline{\Phi}_p$. Oba $'S_c$ a $'S_p$ jsou vyhodnoceny použitím známých hodnot aproximovaných v časovém stupni t_n .

Prostorová změna v souladu s aproximací plošného integrálu převodem rovnice (2.4.12) je provedena tak, že páry síťového uzlu \underline{P} s jeho sousedními uzly, jsou diskretizovány pro $\underline{\Phi}_p$ v časovém stupni t_{n+1} , vyjádřena jako

$$a_p \Phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \Phi_{nb} + 'S_c + a_p^0 \Phi_p^n \quad (2.4.14)$$

kde

$$a_p^0 = \Lambda \delta V / \Delta t, \quad a_p = \sum_{nb} a_{nb} + a_p^0 - 'S_p \quad (2.4.15)$$

Součinitelé a_{nb} jsou funkcí pracovní proměnné a jejich vazba závisí na aproximaci obou a na podobě sítě. Současné studium, tedy energetická věta [10] je zaměřena na aproximaci prostorové změny.

Všechny diskretizované lineární algebraické rovnice pro každé sledované médium jsou vyřešeny technikou založenou na TDMA [10]. V každém časovém stupni je nejdříve vyřešena rychlost proudění pole $\underline{V}(x; t)$, a teprve pak je získána objemová frakce pole $\underline{F}(x; t)$ v Eulerově neměnném intervalu $\underline{\Omega}_F$.

Jakmile jsou hledána přiměřená stálá množství objemových frakcí, volná hladina hranice dešťové vody je identifikována používáním techniky lineární interpolace, jak ukazuje obr.26 (b). Na druhé straně, tlak pole dešťové vody je získán jednodušším algoritmem

korrekce tlaku, v kterém je spojitost proudění vynucena korigovaným tlakem [7] tak, že vyplývající tlaková rovnice nahradí rovnicí kontinuity.

Aproximace dynamické deformace pneumatiky konečnými prvky

Dynamický problém valící se pneumatiky je formulovaný komplexní Lagrangeovou metodou uvedenou v původním rozsahu $\underline{\Omega}^0$, společně s metodou pro uplatnění dynamického kontaktu a materiální nestlačitelnost [11, 5]. Zanedbání účinku tlumení a zavedení isoparametrického konečného prvku základu funkce $\{ \Phi_l(\mathbf{X}) \}_{l=1}^N$ zhodnoceného komplexní Lagrangeovou metodou, vede k následující rovnici matice:

$$\mathbf{M}'\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{F}_{\text{int}} = \mathbf{F}_{\text{ext}} \quad (2.4.16)$$

s uzlovým posunutím vektoru $\underline{\mathbf{u}}$. Hmotnostní matice a vektory vnitřního a vnějšího zatížení v (2.4.16) jsou definovány jako:

$$\mathbf{M} = \int_{\Omega^0} \rho^0 \Phi^T \Phi \, d\Omega^0 \quad (2.4.17)$$

$$\mathbf{F}_{\text{int}} = \int_{\Omega^0} \mathbf{B}_0^T \{ \mathbf{S}(\mathbf{u}) \} \, d\Omega^0 + \int_{\partial\Omega_{c0}} k_p (\mathbf{n}\Phi)^T \mathbf{n}\Phi \, ds^0 \quad (2.4.18)$$

$$\mathbf{F}_{\text{ext}} = \int_{\Omega^0} \rho^0 \Phi^T \mathbf{f} \, d\Omega^0 + \int_{\partial\Omega_{N0}} \Phi^T \mathbf{t}^0 \, ds^0 + \int_{\partial\Omega_{c0}} k_p \mathbf{g} (\mathbf{n}\Phi)^T \, ds^0 \quad (2.4.19)$$

ve kterém ρ^0 je počáteční objemová hmotnost pneumatiky, Φ je matice ($3 \times 3N$) skládající se ze základní funkce $\underline{\mathbf{N}}$ a $\underline{\mathbf{n}}$ složka normálového vektoru směřující vnitřně na pevnou kontaktní hranici základu; k_p je kritický součinitel, \mathbf{f} objemová síla a \mathbf{g} funkce diference. Nadto, \mathbf{t}^0 je externí napětí zahrnující hydrodynamický tlak, znázorňující počáteční uspořádání. Na druhé straně, $\underline{\mathbf{B}}_0$ a $\{ \underline{\mathbf{S}} \}$ jsou příslušné vektorové matice ($6 \times 3N$) a (6×1)

$$\mathbf{B}_0 = \{ \mathbf{B}_0^1, \dots, \mathbf{B}_0^1, \dots, \mathbf{B}_0^N \}, \quad (2.4.20)$$

$$\{ \mathbf{S} \} = \{ \mathbf{S}_{xx}, \mathbf{S}_{yy}, \mathbf{S}_{zz}, \mathbf{S}_{xy}, \mathbf{S}_{yz}, \mathbf{S}_{zx} \}^T \quad (2.4.21)$$

kde $\underline{\mathbf{S}}_{ij}$ jsou druhotná Piola–Kirchhoffova napětí, $\underline{\mathbf{B}}_0^l$ matice (6×3) obsahující podmínky $\frac{\partial \Phi_l}{\partial X_i}$ násobené $\underline{\mathbf{F}}_{jk}$ [12].

Časová integrace může být provedena použitím buď explicitního schématu jako centrální rozdílové metody nebo implicitně jako Newmarkovy metody [12]. Ale pro dynamickou analýzu problematiky nelineární pneumatiky ve velkém měřítku je široce uplatnitelné explicitní centrální rozdílové schéma. Hlavním důvodem je, že diagonalizace hmotnostní matice značně redukuje úhrn CPU času [13].

Pozorovaný časový interval t^* je rozdělen na konečný počet subintervalů t^n ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) tak, že $t^{n+1} = t^n + \Delta t^n$. Souhrnná hmotnostní matice \mathbf{M} umožňuje pohybovou rovnici (2.4.16) zapsat jako:

$$\mathbf{M}'\ddot{\mathbf{u}}^n = \mathbf{M}'^{-1} (\mathbf{F}_{\text{ext}}^n - \mathbf{F}_{\text{int}}^n) \quad (2.4.22)$$

v přírůstkové formě explicitního času. Povšimněme si, že $\underline{\mathbf{F}}_{\text{ext}}^n$ a $\underline{\mathbf{F}}_{\text{int}}^n$ jsou definovány nahrazením $\underline{\mathbf{B}}_0$, $\{ \underline{\mathbf{S}} \}$, $\underline{\mathbf{n}}$, \mathbf{t}^0 a \mathbf{t}_T^0 v (2.4.18) a v (2.4.19), hodnotami vypočítanými v časovém stupni t^n . Podle centrální rozdílové metody a α tlumení pro dynamické dopružení, časový krok rychlosti a posunutí jsou určeny jako

$$\mathbf{u}'^{n+1/2} = (1 - \alpha) \mathbf{u}'^{n-1/2} + \Delta t \mathbf{u}''^n \quad (2.4.23)$$

$$\dot{u}^{n+1} = u^{-n} + \Delta t \dot{u}^{n+1/2} \quad (2.4.24)$$

kde $\alpha \cong 1.67 \omega_{\max} \Delta t$. Za účelem zabezpečit číselnou konvergenci a stabilitu, velikost časového kroku by měla odpovídat následující podmínce:

$$\Delta t \leq 2 / \omega_{\max} \quad (2.4.25)$$

stanovenou s největší četností prvku ω_{\max} v síti konečných prvků.

Euler–Lagrangieova vazba

V procesu pneumatiky valící se po mokré vozovce na sebe vzájemně působí proudění pole dešťové vody a pole dynamicky deformované pneumatiky prostřednictvím běžného rozhraní (stykové plochy) $\partial \Omega_I$. Se zřetelem k našemu předpokladu vytvořenému pro tok dešťové vody, by měla obě pole vyhovět následujícímu omezení kinematického a kontaktního tlaku vyplývající z:

$$\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}^F = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}^F \quad \text{v oboru } \partial \Omega_I \quad (2.4.26)$$

$$\sigma_{ij}^F n_j^F = \sigma_{ij} n_j^F \quad \text{v oboru } \partial \Omega_I \quad (2.4.27)$$

tato omezení vazby kapalina - běhoun mohou být číselně implementována, buď přímým uceleným přístupem nebo iteračním odděleným přístupem. Nicméně, od doby používání bývalého přístupu stává se neúnosné vzhledem k velkému měřítku problematiky použití pro složitý problém vzájemného působení vazby kapalina - běhoun.

Na rozdíl od přímého uceleného přístupu, dvě rovnice polí jsou řešeny samostatně, rozděleny v iteračním přístupu, v interakci mezi kapalinou a strukturou běhounu vystřídáním způsobem. Mezitím, metoda porovnání vazby kapalina - běhoun se v tomto přístupu vyznačuje diskretizací oblasti tekutosti [14]. Například, algoritmus pro základ kontaktu nebo Lagrangieovu síť tekutiny nebo Euler–Lagrangieovu spojovací metodu pro stálou Eulerovu síť tekutiny. Bez ohledu na vazbu přístupu a vazbu metody, obě sítě, tekutiny a běhounu si nemusí diskrétně odpovídat podél rozhraní kapalina – běhoun (vzorek) $\partial \Omega_I$, ale dodatečným zobrazení průmětu je nutno z důvodů neslučitelnosti sítí, transformovat jednotlivé výsledky tak, aby si vzájemně odpovídaly [15].

V souladu s použitím fixní Eulerovy sítě pro dešťovou vodu a komplexní konečné sítě pneumatiky, lze přizpůsobit neslučitelnou Euler–Lagrangieovu vazbu pro nynější studium. S odkazem na obr. 27.(a), je síť tekutiny ve složení větším než jen v oblasti dešťové vody a kostry pneumatiky, částečně začleněna do fixní Eulerovy sítě. Na druhé straně je vazba povrchu Γ v podobě uzavřené roury, definované kombinací vnějšího povrchu pneumatiky a dvou stran disku vystředěné v ose pneumatiky. V konkrétním případě, vazba povrchu je nastavena jako větší, než běžná styková plocha kapalina –běhoun ($\partial \Omega_I \subset \Gamma$). Hodnotný názor je, že část fixované Eulerovy sítě uvnitř vazby roury je vyjádřena pasivní oblastí, zatímco zbývající část, oblastí aktivní. Za účelem přenést tlak \underline{p} dešťové vody, posunutí \underline{u} a rychlost \underline{u} pneumatiky přes běžnou stykovou plochu $\partial \Omega_I$, je nutno tyto proměnné interpolovat. Od počátku vzniku sítě vzorku pneumatiky platí, že je jemnější než síť kapaliny; v aktuálním případě je vybrán diskretizovaný vzorek a základ funkce je užíván pro interpolaci těchto proměnných pneumatiky. Pak, dle obr.27.(b), je povrchové napětí $\underline{t}^F | \partial \Omega_K$ přiřazeno povrchovému prvku $\partial \Omega_K$ na stykové ploše pneumatiky $\partial \Omega_I^S$ a může být implicitně interpolováno jako

$$t_i^F | \partial \Omega_K = \sum_{k=1}^n \psi_k(\mathbf{x}) (p_k n^{ik}), \quad \mathbf{x} \in \theta \quad (2.4.28)$$

s \underline{n} tvary funkce $\underline{\psi}_k$ na 2-D sledovaném prvku θ . Kde \underline{p}_k znamená hodnotu tlaku v místě stykové plochy srážková voda – kolo, které odpovídá k-tému uzlu $\partial \Omega_K$.

Numerická integrace těchto implicitních transformací zahrnutých do externě zavedeného vektoru $\underline{F}^{\text{ext}}$ v (2.4.19) může být provedena odhadem \underline{p}_k dle Gaussova rozdělení.

Na druhé straně, obojí, posunutí pneumatiky a rychlost mohou být přeneseny do pole dešťové vody podle nepárové interpolace založené na teorii Hardera a Desmaraise [16]. Zde stojí za povšimnutí změna dřívějšího nastavení materiální hranice dešťové vody, která se stává mezní podmínkou danou v (2.4.4). Označení j a \underline{k} znamená, příslušně j -tý bod na $\partial \Omega_I^F$ a i -tý uzel na $\partial \Omega_I^S$. Kinematické omezení v (2.4.26) může být implementováno jako

$$(\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}^F)_j = \sum_{k=1}^m H_{jk} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}^F)_k \quad (2.4.29)$$

s vazbou matice H [17].

Numerická simulace pneumatiky pojíždějící po vodě, využívající rozdílné Euler–Lagrangeovy metody je opakovaně prováděna tímto způsobem:

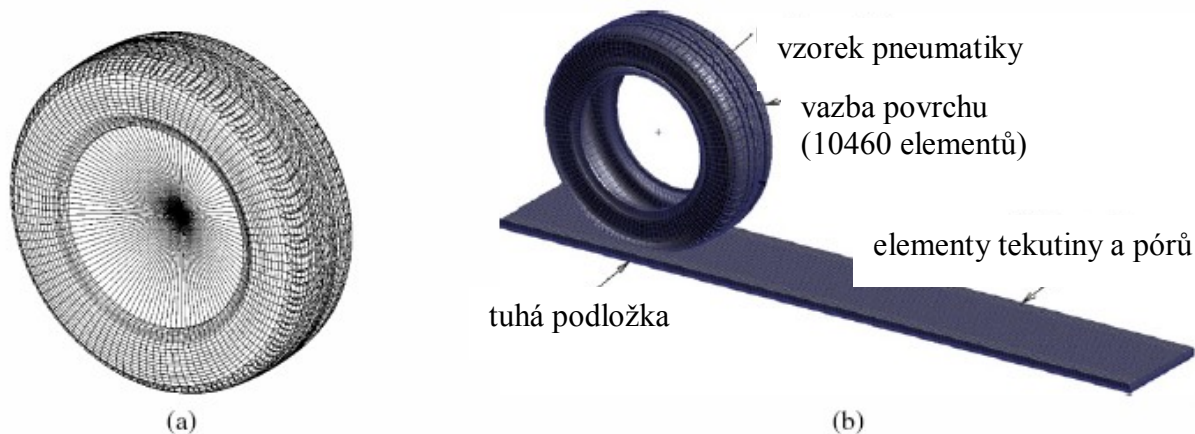
(1) Počáteční styková plocha pneumatika – voda (resp. mokrá vozovka) $\partial \Omega_I$ je specifikována po otisku stykové plochy pneumatiky s vozovkou staticky pod působením svislého zatížení na počáteční volnou hladinu $\partial \Omega_F^S$, definována přiřazením každé objemové složky \underline{F} Eulerovy sítě. Dešťová voda je nastavena zpočátku v klidu, a bez pohybu zůstává, neboť působí na $\partial \Omega_I$ jen atmosférický tlak \underline{p}_a .

(2) S počátečními podmínkami (2.4.8)– (2.4.10) je dynamická soustava rovnic (2.4.16) jednotně řešena substitucí \underline{u} a rychlostí vzorované pneumatiky \underline{u} .

(3) Potom styková plocha dešťové vody $\partial \Omega_I^F$ je rozpočívána prostřednictvím \underline{u} a specifikována \underline{u} , jako stykové plochy proudu dle počáteční podmínky (2.4.16), podle nepárové interpolace vztahu (2.4.29).

(4) S nastavenou materiální mezí dešťové vody a počáteční podmínkou proudění a zároveň s počáteční podmínkou (2.4.7) a převedenými rovnicemi (2.4.11) je vyřešena hledaná rychlost proudění \underline{V} , objemová složka \underline{F} a hydrodynamický tlak \underline{p} .

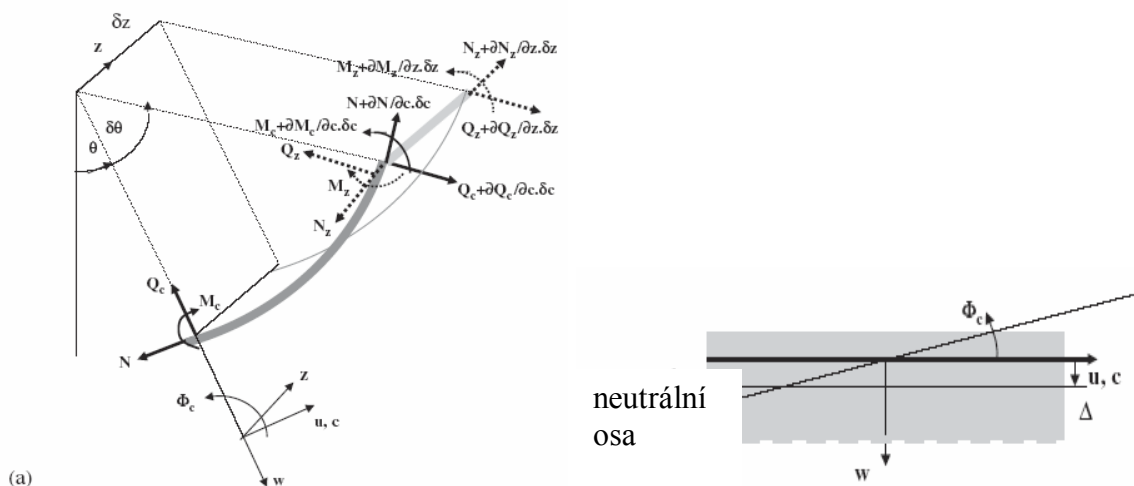
(5) volná hladina $\partial \Omega_F^S$, obnovená styková plocha pneumatika – voda $\partial \Omega_I$ a také vodní napětí $\underline{\sigma}^F$, jsou přeneseny do stykové plochy pneumatiky $\partial \Omega_I^S$. Potom následuje další iterace spojených analýz.



Obr.27. Simulační model: a) FEM 3-D model vzorované pneumatiky, b) vazba FVM sítě s vodní plochou [13]

2.4.2 Základní pohybové rovnice

Celkové schéma [17] znázorňuje obr.28., kde pneumatika rotuje po směru (označme pozitivní směr) nebo proti směru (označme negativní směr) hodinových ručiček, rychlostí \underline{V} a úhlovou rychlostí $\underline{\Omega}$. Nejdříve bylo předpokládáno, že všechna buzení pocházejí z příčné linie kontaktu. Pro výpočet odezvy na tyto síly musejí být nalezeny pohybové rovnice pneumatiky. Obr.28.a) ukazuje segment délky δc a šířky δz , v nárazníku pneumatiky poloměru a šířky b , zobrazený popis konvence pro pozitivní směr rotace síly a momentů. Předpokládá se, že je pás doplněn dokola ovinutým drátem vyztužujícím neutrální osu dle obr.28.b). Je také předpokládáno, že průměrné vlastnosti materiálu jsou známé z příčného řezu, jak bude ještě jednotlivě zmíněno o těchto materiálních vlastnostech. Použitím vlnového přístupu je v případě nutnosti snadné vytvořit tyto materiální vlastnosti závislé na frekvenci; není ale nezbytné tuto závislost až do programovací fáze uvádět.



Obr.28. (a) Konvence značení pro pásový prvek a (b) nesouměrný pásový prvek [17]

Pneumatika by mohla být popsána jako zakřivená, předpjatá, Mindlinova deska [18] rozdělená do dvou směrů tuhosti. Pás, nárazník je namáhán sítí statického tlaku \underline{P} , který způsobuje statické napětí $\underline{N}_c, \underline{N}_z$ v obvodovém a příčném směru c, z . $\underline{Q}_c, \underline{Q}_z$ jsou smykové

síly. \underline{N} je totální statická a dynamická obvodová síla. $\underline{M}_c, \underline{M}_z$ jsou ohybové momenty. Doprovázející posunutí jsou $\underline{u}, \underline{w}$, v obvodovém a radiálním směru. $\underline{\theta}$ popisuje geometrickou pozici a má vazbu na obvodovou koordinaci \underline{c} podle $\underline{\theta}$. Pneumatika v pozitivním směru $\underline{\theta}$ rotuje rychlostí \underline{V} . Pás je oboustranně omezen boční stěnou s tuhostí pásu $\underline{K}_c, \underline{K}_r$, v obvodovém a příčném směru.

Kinematické vztahy

Pohyb segmentu může být popsán třemi proměnnými: posunutím $\underline{u}, \underline{w}$ a kinematickou rotací $\underline{\Phi}$. Pro Mindlinovu desku, která může být deformována v ohybu a střihu, je příslušný sklon \underline{s} v dané pozici:

$$\partial w / \partial c = \beta_c + \gamma_c \quad (2.4.30)$$

$$\partial w / \partial z = \beta_z + \gamma_z \quad (2.4.31)$$

kde $\underline{\beta}_c, \underline{\beta}_z, \underline{\gamma}_c, \underline{\gamma}_z$ jsou příslušné sklony přiměřené ohybu a smyku. Kinematická rotace elementu $\underline{\Phi}_c$ ve směru \underline{c} , jak ukazuje obr.28.a), 28.b), zahrnuje náležité posunutí \underline{u} , a proto:

$$\Phi_c = u / a - \partial w / \partial c \quad (2.4.32)$$

kde není žádné geometrické zakřivení ve směru \underline{z} a tak je rotace jednoduše

$$\Phi_z = - \partial w / \partial z \quad (2.4.33)$$

Totální úhel $\underline{\varphi}$ ve směru \underline{c} je suma z geometrické rotace $\underline{\theta}$ a kinematická rotace $\underline{\Phi}_c$. Drobná změna ve sklonu na délku $\underline{\delta}_c$ je proto:

$$\delta_\varphi = (1 / a + \partial \Phi_c / \partial c) \delta_c \quad (2.4.34)$$

Také obvodové napětí $\underline{\varepsilon}_c$ má příspěvky od obou posunutí

$$\varepsilon_c = \partial u / \partial c + w / a \quad (2.4.35)$$

Jen příčné napětí $\underline{\varepsilon}_z$, má příspěvek z příčného posunutí \underline{u}_z

$$\varepsilon_z = \partial u_z / \partial z \quad (2.4.36)$$

nicméně, příčné napětí je zde ignorováno a podle toho je nulové.

Podmínky rovnováhy sil

Případají zde čtyři podmínky rovnováhy [17]:

- a) Pro síly v radiálním směru
- b) Pro síly v obvodovém směru (\underline{c}),
- c) Pro momenty ve směru \underline{s}
- d) Pro momenty ve směru příčném (\underline{z}).

Rovnováha obvodových sil vychází z obvodové smykové síly Q_c . Substituce rotace segmentu dle (2.4.32) přináší podmínku rovnováhy. Pro usnadnění jsou zde podmínky pro statickou a dynamickou rovnováhu oddělené. Rovnice (2.4.37) pro statickou rovnováhu je také vypočítána ve stati „Pás pneumatiky a napětí bočních stěn“:

$$P + \mu \Omega^2 a - 2N_z \sin \phi_1 / b - N_c / a = 0 \quad (2.4.37)$$

$$p(c, z) + \partial Q_c / \partial c + \partial Q_z / \partial z - N_{cd} (1/a + \partial \Phi_c / \partial c) - N_c \partial \Phi_c / \partial c + N_z \partial^2 w / \partial z^2 = \\ = \mu \ddot{w} - (P/a + \mu \Omega^2) w \quad (2.4.38)$$

kde P je statický tlak čistého vzduchu. $p(c, z)$ je dynamický tlak způsobený boční stěnou a externí radiální silou. N_z je statická příčná tahová síla; N_c a N_{cd} jsou příslušná statická a dynamická napětí po obvodu; Q_z je smyková síla v radiálním směru, μ je součinitel množství hmoty pásu.

Podle rozlišování sil ve směru c ve shodě s obvodovou silou N , dle obr.28. a) a substitucí rotace segmentu dle vztahu (2.4.32), je

$$\tau(c, z) + \partial N / \partial c + \partial Q_{zc} / \partial z + Q_c (1/a + \partial \Phi_c / \partial c) = \\ = \mu (\ddot{u} + \Delta \Phi_c'') + 2 \mu w' (c + u) / a + 2 K_c u / b \quad (2.4.39)$$

kde K_c je obvodová tuhost pásu s prostou boční stěnou, τ je tangenciální vnější napětí, Q_{zc} je smyková síla v obvodovém směru. u je posunutí drátem vyztužené neutrální osy, nicméně, nesouměrnost pásu okolo neutrální osy dává těžiště setrvačnosti, které je přesunuto o Δ , jak znázorňuje obr.29.b). Těžiště setrvačnosti proto dodatečně akceleruje rotaci zahrnutou ve vztahu (2.4.39). Druhá podmínka zprava je Coriolisova síla, která udává gyroskopickou vazbu mezi obvodovým a radiálním pohybem. Nelineární následek radiální a axiální rychlosti je v pozdějších analýzách ignorován.

Čistý moment, vzatý vpravo od osy segmentu z , odpovídá jen úhlovému zrychlení vzhledem k ohybu β_c'' (jako smyková složka sklonu distorze, která nezahrne celkovou rotaci). Vnější moment M_0 vzniklý přeložením h z neutrální osy externí smykové síly τ je zde také zahrnut:

$$\partial M_0 / \partial c = \tau h \quad (2.4.40)$$

Momentová rovnováha okolo osy z , vyplývá ze:

$$Q_c - \partial M_c / \partial c = I_c \beta_c'' + \partial M_0(s, z) / \partial c \quad (2.4.41)$$

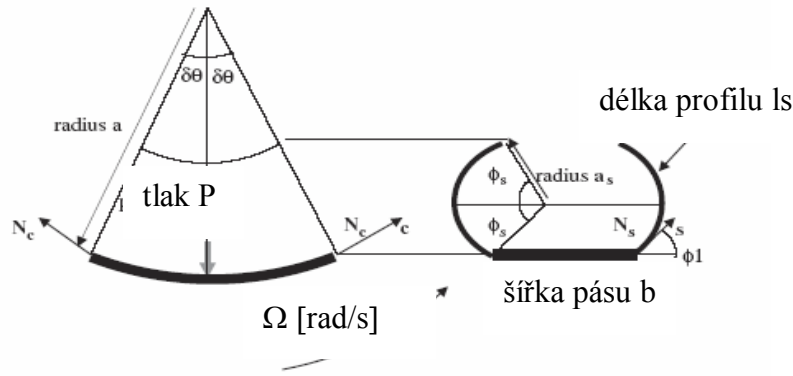
kde I_c je moment setrvačnosti pásu. Podobně, čistý moment vpravo okolo osy c :

$$Q_z - \partial M_z / \partial z = I_z \beta_z'' \quad (2.4.42)$$

kde I_z je moment setrvačnosti pásu k ose c .

Pás pneumatiky a napětí bočních stěn

Příčný řez pneumatiky je zobrazený na obr.29., jako segment délky $2a\delta\theta$ a pás poloměru a ; množství materiálu na plochu je μ ; příčné a obvodové napětí pásu N_z , N_c a části boční stěny, jsou jen funkcí tlaku a geometrie [19].



Obr.29. Element pásu, příčný řez [19]

Napětí pásu \underline{N}_c je zjištěno z podmínek rovnováhy v horizontálním a radiálním směru. Pneumatika rotuje rychlostí $\underline{\Omega}$ v rad/s a pás, nárazník rychlostí \underline{c} v m/s .

Boční stěna je oblouk z kruhu o poloměru \underline{a}_s ležící pod úhlem $2\underline{\phi}_s$. Oblouk je natočen tak, aby svíral úhel $\underline{\phi}_1$ s horizontální rovinou. Vzhledem k horizontální rovnováze elementu pravé boční stěny

$$N_z = P a_s \quad (2.4.43)$$

kde poloměr boční stěny \underline{a}_s souvisí s délkou oblouku \underline{l}_s boční stěny, podle

$$a_s = l_s / 2\underline{\phi}_s \quad (2.4.44)$$

Radiální rovnováha pásového segmentu může nyní být uvažována podél osy

$$0 = ((P + \Omega^2 \mu a) a b - N_c b - 2N_z a \sin \phi_1) 2\delta\theta \quad (2.4.45)$$

přičemž jsou příslušně zahrnuty příspěvky tlaku, odstředivé síly, napětí pásu a boční stěny. Substitucí z (2.4.43) a (2.4.44), do vztahu (2.4.45) může být přepsáním dána rovnice napětí pásu:

$$N_c = Pa (1 - l_s \sin \phi_1 / b \phi_s) + \Omega^2 a^2 \mu \quad (2.4.46)$$

Obvodové tlakové napětí

Obvodová síla \underline{N} má statickou složku \underline{N}_c a dynamickou $\underline{N}_{cd} = \underline{A}_c \underline{\epsilon}_c$ vyplývající z obvodového napětí

$$N = N_c + N_{cd} \quad (2.4.47)$$

kde \underline{A}_c je obvodová tuhost pásu. Napětí \underline{N}_c , vypočítané v (2.4.46) obr.29., má dvě složky - první určené z tlaku a geometrie pneumatiky, druhou z konstantní hodnoty odstředivé síly $\underline{\mu}\Omega^2 a$

$$N_c = Pa (1 - l_s \sin \phi_1 / b \phi_s) + \Omega^2 a^2 \mu \quad (2.4.48)$$

kde \underline{l}_s je délka profilu boční stěny a $2\underline{\phi}_s$ úhel boční stěny profilu. Boční stěna je k pásu připojena po úhlem $\underline{\phi}_1$. Statická síla v příčném směru je

$$N_z = \frac{1}{2} P l_s / 2 \phi_s \quad (2.4.49)$$

Vztahy pro smyková napětí

Smyková síla Q_c působící v obvodovém směru má vazbu na smykové napětí γ_c a smykovou tuhost pásu S_c .

$$Q_c = S_c \gamma_c \quad (2.4.50)$$

podobně v příčném směru smyková síla Q_z ve vazbě na smykové napětí γ_z a smykovou tuhost pásu S_z .

$$Q_z = S_z \gamma_z \quad (2.4.51)$$

Smyková síla Q_{zc} v obvodovém směru k normálové ose z , je regulována smykovou tuhostí S_{zc} :

$$Q_{zc} = S_{zc} \partial u / \partial z \quad (2.4.52)$$

Ohybový moment

Pro štíhlý předem zakřivený nosník s počáteční poloměrem zakřivení a ohybovým momentem M_c se vztahuje totální poloměr křivosti r a ohybová tuhost B_c [28]:

$$M_c = B_c (1 / r - 1 / a) \quad (2.4.53)$$

[29] udává poloměr křivosti r jako funkci napětí a kinematické rotace jako

$$1 / r = (1 / a + \partial \Phi_c / \partial c) (1 - \varepsilon_c) \quad (2.4.54)$$

Proto kombinace vztahu (2.4.53) a (2.4.54) s předpokladem velkého počátečního zakřivení, dává

vztah ohybový moment – zakřivení jako:

$$M_c = - B_c (\partial \Phi_c / \partial c - \varepsilon_c / a) \quad (2.4.55)$$

Substitucí z (2.4.30), (2.4.32) a (2.4.35) může být zapsán ohybový moment v obvodovém směru jako

$$M_c = - B_c (\partial \beta_c / \partial c + w / a^2) \quad (2.4.56)$$

první termín v závorce je zakřivení pro plochou desku. Druhý termín je moment v důsledku protažení neutrální osy; stávající nulové pro plochou desku se jako poloměr a blíží nekonečnu. Toto je zjednodušené a mírně odlišné vyjádření tohoto vztahu než je dáno v [25]. Podobně substitucí z (2.4.31), (2.4.33) a (2.4.36) lze získat ohybový moment v příčném směru, jako

$$M_c = - B_z (\partial \beta_z / \partial z) \quad (2.4.57)$$

což koresponduje s výrazem pro čistý ohyb ploché desky, kde B_z je ohybová tuhost v příčném směru.

Poměr smykové a ohybové rotace

Rovnice (2.4.30) dokladuje, že v obvodovém směru má sklon nebo rotace ze stříhu a ohybu dvě složky - $\gamma_{c_s} \beta_c$. Úměrnou velikost ohybového sklonu ke sklonu celkovému lze nalézt eliminací nepotřebných proměnných z (2.4.30), (2.4.41) a (2.4.56) použitím harmonické časové závislosti $e^{i\omega t}$, kde ω je frekvence v $[\text{rad}^2]$ a t je čas.

$$\partial w / \partial c (B_c / a^2 + S_c) = -B_c \partial^2 \beta_c / \partial c^2 + (S_c - \omega^2 I_c) \beta_c \quad (2.4.58)$$

Odpovídající převod pro smykový sklon v obvodovém směru lze nalézt substitucí (2.4.30). Podobně v příčném směru, poměr úplného k ohybovému sklonu lze získat z (2.4.31), (2.4.34) a (2.4.57)

$$\partial w / \partial z (S_z) = -B_z \partial^2 \beta_z / \partial z^2 + (S_z - \omega^2 I_z) \beta_z \quad (2.4.59)$$

Ekvivalent modální tuhosti

Vztah (2.4.38) pro radiální rovnováhu obsahuje dvě podmínky s diferencemi v z a také v podmínce dynamického tlaku $p(c, z)$, ve spojitosti s tuhostí boční stěny. Všechny tyto tři podmínky popisující vlastnosti pásu (příčně) jsou vyjádřeny jako dynamická tuhost pásu v příčném směru, m -tým způsobem. Tato procedura redukuje vztahy (2.4.37), (2.4.38) a následující analýzy jednorozměrném tvaru, jen s proměnnou z pro každý příčný způsob m -tého řádu řešení pásu.

Modální tuhost ve vztahu ke smykové síle a napětí

Jestliže harmonická vlna z řešení podmínky $z \beta_z = \beta_z \exp(\mp i k_z z)$ je aplikována v (2.4.59) ohybová rotace pak může být psána jako

$$\beta_z = (S_z / (B_z k_z^2 + S_z - \omega^2 I_z)) \partial w / \partial z \quad (2.4.60)$$

Substituce tohoto vztahu do (2.4.31) a (2.4.51) dává smykovou sílu v příčném směru v podmínkách pro w :

$$Q_z = S_z (B_z k_z^2 - \omega^2 I_z) / (B_z k_z^2 + S_z - \omega^2 I_z) \partial w / \partial z \quad (2.4.61)$$

tato podmínka smykové síly a napětí N_z ve vztahu (2.4.37) a (2.4.38) může být nyní psána jako modální tuhost, a to jestliže některé způsoby tvarů mohou selektivně popsat pohyb v radiálním směru. Pro zjednodušení této procedury je zde předpokládáno, že konstrukce pásu je mnohem těžší než boční stěny, která poskytuje nějaké odůvodnění pro výběr hraničních podmínek v $z = \pm b / 2$, které nejsou vynucené v radiálním směru, ale s nulovým sklonem. Také zde není smyslem přesně stanovit frekvenci rezonance, ale spíše demonstrovat fyzické chování nejjednodušší formou, zejména vybranými tvary funkcí sinus a cosinus pro vyhovění hraničním podmínkám. Ty připadají v úvahu pro jednotlivý soubor vlnových čísel $k_z = m \pi / b$, $m = 0, 1, 2, 3 \dots n$.

$$w(c, z) = \sum_{m=0,2,4,\dots} w_m(c) \cos(m \pi z / b) + \sum_{m=1,3,5,\dots} w_m(c) \sin(m \pi z / b) \quad (2.4.62)$$

Použití vztahů (2.4.61) a (2.4.62) dvou podmínek závislých na z ve vztahu (2.4.37) a (2.4.38), může být nahrazeno modální tuhostí K_{mz} , takže

$$\partial Q_z / \partial z + N_z \partial^2 w / \partial z^2 = K_{mz} w \quad (2.4.63)$$

kde

$$K_{mz} = (m \pi / b)^2 (N_z + S_z (B_z (m \pi / b)^2 - \omega^2 I_z) / (B_z (m \pi / b)^2 + S_z - \omega^2 I_z)) \quad (2.4.64)$$

Pro nosník v režimu pásu, označený $m = 0$, nezakřiveným ve směru z je modální tuhost 0. Pro vyšší řády režimů se tuhost zvyšuje s druhou mocninou napříč pásem řádu m , který určuje režim průřezu frekvencí, jež lze určit tvarem vztahu (2.4.62) šířením ve směru c .

Modální tuhost boční stěny

Tlak na pásu $p(c, z)$ má dvě složky, a to externí zatížení p_0 a tlak p_s z posunutí boční stěny w v $z = \pm b / 2$. Tyto komponenty pak dávají vznik tlaku distribuovaném na pásu

$$p(c, z) = K_r [\delta(z - b / 2) + \delta(z + b / 2)] w(c, z) + p_0(c, z) \quad (2.4.65)$$

který může být vyjádřen jako suma modálních tlaků P_m :

$$p(c, z) = \sum_{m=0,2,4,\dots} P_m(c) \cos(m \pi z / b) + \sum_{m=1,3,5,\dots} P_m(c) \sin(m \pi z / b) \quad (2.4.66)$$

Substituce z (2.4.62) do (2.4.65) a aplikace ortogonálních vztahů na (2.4.65) a (2.4.66) umožňuje psát podmínky modálního tlaku použitím externího modálního tlaku P_{0m} a modální tuhosti K_{rm}

$$P_m = -K_{rm} w_m + P_{0m} \quad (2.4.67)$$

kde pro $m = 0$ je $K_{rm} = 2K_r / b$; pro $m > 0$ je $K_{rm} = 4K_r / b$. Všechny podmínky v z zjištěné v (2.4.37), (2.4.38) mohou být nyní nahrazeny podmínkami modální tuhosti ze vztahů (2.4.63) a (2.4.67). Nyní je výsledkem analýzy jen vlnění ve směru c .

Podmínky rovnováhy v kinematických parametrech

Tři skupiny vztahů z předchozích odstavců mohou být kombinovány pro získání dvou podmínek rovnováhy sil jen v rámci podmínek posunutí u, w .

Vztah radiální rovnováhy

Rovnice radiální rovnováhy je nalezená ve třech předběžných krocích [28]. A to je zjištění:

- 1) smykového gradientu
- 2) ohybového gradientu
- 3) přidružené smykové síly

Rovnice (2.4.37) a (2.4.38) radiální rovnováhy je prvně rozšířena použitím vztahů (2.4.30), (2.4.32), (2.4.35), (2.4.41), (2.4.47), (2.4.50), (2.4.55), (2.4.63) a (2.4.67), získáním gradientů smykového napětí nebo přetvoření ve smyku.

Radiálním posunutí pro všechny následné analýzy se stává \underline{w}_m . Jako každá rovnice odvolávající se jen na posunutí příčně pro \underline{m} -tý stupeň, jako vyjádření (2.4.62). Jako další kinematická a silová proměnná má podobně modální dolní index \underline{m} , to jest $\underline{u}_m, \underline{\gamma}_m, \underline{\beta}_m$:

$$S_c \partial \gamma_m / \partial c = - P_{0m} + \partial u_m / a \partial c (N_c + A_c) - N_c \partial^2 w_m / \partial c^2 + (A_c + (K_{zm} + K_{rm}) a^2 - Pa - (\omega^2 + \Omega^2) \mu a^2) w_m / a^2 \quad (2.4.68)$$

Gradient sklonu vyvolaného ohybem je odvozen ze vztahu (2.4.30):

$$\partial \beta_m / \partial c = \partial^2 w_m / \partial c^2 - \partial \gamma_m / \partial c \quad (2.4.69)$$

Smyková síla může být napsána, v první řadě rozšířením vztahu (2.4.41) s (2.4.56)

$$Q_m = - B_c (\partial^2 \beta_m / \partial c^2 + \partial w_m / a^2 \partial c) - \omega^2 I_c \beta_m + \partial M_{0m} / \partial c \quad (2.4.70)$$

Substitucí vztahu (2.4.68) do (2.4.70), je smyková síla

$$Q_m = - B_c / a^2 S_c \left\{ \begin{aligned} & a^2 \partial^3 w_m / \partial c^3 (S_c + N_c) - \partial w_m / \partial c (A_c - S_c - Pa + (K_{zm} + K_{rm}) a^2 - (\omega^2 + \Omega^2) \mu a^2) \\ & - a \partial^2 u_m \partial c^2 (N_c + A_c) - a^2 \partial P_{0m} / \partial c \\ & - \omega^2 I_c \beta_m + \partial M_{0m} / \partial c \end{aligned} \right\} \quad (2.4.71)$$

Tento výraz pro smykovou sílu může být odlišen s ohledem na \underline{c} . Pak v kombinaci se vztahem (2.4.69) eliminuje $\partial \beta_m / \partial c$. Vyplývající výraz pro $\partial \gamma_m / \partial c$ pak substitucí v (2.4.68) dává rovnici pro svislou rovnováhu jen v rámci \underline{u}_m a \underline{w}_m . Ten je dále uveden v bezrozměrné formě, která bude využita později ve vlnové rovnici

$$0 = - a^3 \partial^4 w_m / \partial c^4 (S_c + N_c) + a \partial^2 w_m / \partial c^2 (C_1 - S_c (1 + z c^2) - N_c C_2) + w_m / a C_1 C_2 + (1 + N_c) \{ a^2 \partial^3 u_m / \partial c^3 + \partial u_m / \partial c C_2 \} + C_2 C_3 + f_m \quad (2.4.72)$$

V rovnici (2.4.72) byly některé parametry seskupeny společně v závorce, podle sdílení jejich fyzikálního významu

$$C_1 = 1 + K_m - Pa - z^2 L_c - Z_{ce} \quad (2.4.73)$$

$$C_2 = z^2 c - R_c \quad (2.4.74)$$

$$C_3 = - P_{0m} \quad (2.4.75)$$

$$f_m = a^2 \partial^2 P_{0m} / \partial c^2 + h R_s \partial \tau / \partial c \quad (2.4.76)$$

kde

$$S_c = S_c / A_c; \quad (2.4.77)$$

$$\bar{N}_c = N_c / A_c; \quad (2.4.78)$$

$$\bar{P}_a = P_a / A_c; \quad (2.4.79)$$

$$\bar{R}_c = a^2 S_c / B_c; \quad (2.4.80)$$

$$\bar{K}_m = a^2 K_{rm} + K_{zm} / A_c; \quad (2.4.81)$$

$$Z_{ce} = a^2 \mu \Omega^2 / A_c \quad (2.4.82)$$

Podmínky externího zatížení \underline{f}_m užívá vztah (2.4.40) s momentem \underline{M}_{0m} v rámci smykového napětí $\underline{\tau}$. Normalizovaný vnější tlak a smykové napětí jsou definovány jako

$$\bar{P}_{0m} = a P_{0m} / A_c; \quad (2.4.83)$$

$$\bar{\tau}_m = a \tau_m / A_c \quad (2.4.84)$$

Normalizované bezrozměrné obvodové vlnové číslo \underline{z}_{Lc} je definováno jako

$$Z_{Lc}^2 = (a \omega)^2 \mu / A_c \quad (2.4.85)$$

Místo, kde vlna protíná ve vysoké frekvenci jen rotaci pásu bez přenosu, je nazváno rotační vlnou [23], nebo také první asymetrickou Lambovou vlnou [30]. Vlnové číslo \underline{z}_c je definováno jako

$$z_c^2 = (a \omega)^2 I_c / B_c \quad (2.4.86)$$

Když je $\underline{C}_1 = 0$, nastane prstencová frekvence pro vlny $\underline{m} = 0$, zvyšuje se radiální tuhost \underline{K}_r boční stěny, ale snižuje s tlakem \underline{P} a úhlovou rychlostí. Nestabilita nastane, když rychlost pneumatiky ovlivňuje prstencovou frekvenci směrem nule. Radiální tuhost je pak také nulová.

Když je $\underline{C}_2 = 0$, protne rotace vlnu. Tento průnik frekvence zvyšuje částečně smykovou tuhost (úměrně tloušťce pásu), ale částečně snižuje moment setrvačnosti (úměrně kvadrátu tloušťky pásu). Průnik frekvence je proto nepřímo úměrný tloušťce pásu.

Pro nekonečný válec bez boční stěny, vychází statická rovnováha $\underline{C}_3 = 0$. Pro konečnou šíři pneumatiky může být předpokládáno, že tato podmínka neplatí, neboť boční stěna převezme část napětí. Externí zatížení \underline{f}_m má dvě složky. První je radiální zatížení a druhou je moment tangenciální síly.

Pro plochý řemen s nulovým: napětím, smykovou tuhostí, je tuhost boční stěny (2.4.72) vrácena k Eulerovu vztahu ohybu nosníku.

Rovnice obvodové rovnováhy

Vztah (2.4.39) pro obvodovou rovnováhu může po rozšíření vztahy (2.4.30), (2.4.47) a (2.4.50) přinášet:

$$\bar{\tau}_m + a \partial^2 u_m / \partial c^2 + \partial w_m / \partial c (1 - z_{Lc}^2 \Delta) + S_c \gamma_m (1 + a \partial \Phi_m / \partial c) = u_m / a (\bar{K}_{cm} + \bar{K}_{zcm} - z_{Lc}^2) + Z_{co} w_m / a \quad (2.4.87)$$

kde normalizovaná radiální tuhost boční stěny odvozené v (2.4.67) je $\underline{k}_z = m\pi/b$. Normalizovaná smyková tuhost v příčném směru je nalezena z rovnice (2.4.39) a (2.4.52) úpravou:

$$\bar{K}_{cm} = 2a^2 K_c / A_c b \quad \text{pro } m = 0; \quad (2.4.88)$$

$$\tau_{cm} = 4a^2 K_c / A_c b \quad \text{pro } m > 0; \quad (2.4.89)$$

$$\tau_{zcm} = S_{zc} (m\pi/b)^2 a^2 / A_c \quad (2.4.90)$$

Coriolisova podmínka a těžiště jsou vyjádřeny:

$$Z_{co} = 2i\omega\mu c / A_c \quad (2.4.91)$$

$$\Delta = \Delta / a \quad (2.4.92)$$

Bezrozměrná smyková tuhost τ_{Sc} , definovaná v (2.4.72), je koeficientem průměrné části smykové tuhosti v obvodovém směru. Pro smykovou tuhost nárazníku pneumatiky je dominantní guma a pro tuhost obvodovou vložené ocelové dráty. Podíl smykové tuhosti je pravděpodobně v řádu 0,01 a dovoluje v procesu analýzy tento finální vztah (2.4.91), ignorovat.

Pro homogenní materiál je také pravděpodobně bezpečné ignorovat tento vztah a to ze tří následujících důvodů.

- 1) vztah v první závorce vlevo v rovnici (2.4.87), vytváří nelineární výsledek $\gamma_m \partial \phi_m / \partial c$, který je také velmi malý
- 2) největší hodnotu podílu smykového namáhání pro homogenní materiál například pro ocel je $\tau_{Sc} \approx 0,3$
- 3) z (2.4.30) a (2.4.31) $\gamma \leq \partial w / \partial c$, je největší možná chyba ze zanedbání vlnového čísla smyku a to 30%

Rovnice pro obvodovou rovnováhu může být proto napsána redukovanou formou:

$$\tau_{cm} + a \partial^2 u_m / \partial c^2 + \partial w_m / \partial c (1 - z_{Lc}^2 \Delta) = u_m / a (\tau_{cm} + \tau_{zcm} - z_{Lc}^2) + Z_{co} w_m / a \quad (2.4.93)$$

pro plochý nosník kde $a \rightarrow \infty$ a (2.4.93) připadá v úvahu pro podélný pohyb prutu. Příčná vazba k radiálnímu pohybu w je čistě geometrická a zvyšuje se s klesajícím poloměrem a . Termín v závorce, C

$$C_4 = \tau_{cm} + \tau_{zcm} - z_{Lc}^2 \quad (2.4.94)$$

je nulový v rotační resonanci pevného pásu ($n = 0$). V této frekvenci smykové tuhosti pás rotuje s boční stěnou. V $1/\sqrt{2}$ této frekvence kdy $n = 1$, v přepočtu nastane pevná resonance. Pod těmito frekvencemi je hlavně pohyb pevné části pásu.

2.4.3 Vlnová rovnice pro nárazník, pás kruhové rotující pneumatiky

Vlnovou rovnici pro volný pás lze obdržet kombinací rovnic (2.4.72) a (2.4.93), ale při nastavení zatěžujících podmínek f_m a τ_m jako nulových. Harmonické řešení pro vlnu šířenou v pozitivním směru c , v platné podmínce e^{-ikc} . Po substituci w_m použitím vztahu (2.4.93), je získána vlnová rovnice šestého řádu standardizovaným vlnovým číslem $z_m = k_m a$

$$0 = z_m^6 (\tau_{Sc} + \tau_{Nc}) - z_m^4 [z_{Lc}^2 (1 - \Delta (1 + \tau_{Nc})) + \tau_{Pa} + Z_{ce} - \tau_{Km} - \tau_{Nc} \tau_{Rc} + (\tau_{Sc} + \tau_{Nc})(1 + z_c^2 + z_{Lc}^2 - \tau_{cm} - \tau_{zcm})] +$$

$$+ z_m^2 [(\tau_{cm} - \tau_{zcm} - z_{Lc}^2)(1 + \tau_{Km} - \tau_{Pa} - \tau_{Sc} - z_{Lc}^2 + Z_{ce} + \tau_{Nc} \tau_{Rc} - z_c^2 (\tau_{Sc} + \tau_{Nc})) + (z_c^2 - \tau_{Rc})(\tau_{Nc} - \tau_{Km} + \tau_{Pa} +$$

$$+Z_{ce}+z_{Lc}^2(1-\Delta(1+N_c)))+(1+K_m-Pa-Z_{ce}-z_{Lc}^2)(z_c^2-R_c)(z_{Lc}^2-K_{cm}-K_{zcm}) \pm \pm i(1+N_c)(z_m^3-(z_c^2-R_c)z_m)Z_{co} \quad (2.4.95)$$

Komponenty uvnitř závorek jsou funkcemi frekvence nebo konstanty. Materiální vlastnosti mohou být komplexně zahrnuty v hysterézni tlumení, popř. mohou být zapsány také jako funkce frekvence (kupříkladu jako v případě polymerů).

Finální vztah s lichými řády vlnočíslel je Coriolisova vazba; znaménko \pm značí příslušně směr podle hodinových ručiček. Tento vztah může být významný pro stykové plochy, ale ne pro kruhovou pneumatiku, a tak jej lze ignorovat.

Vztah z_m^2 je vyřešen pro každou frekvenci, s tím, že dává tři páry kořenů $p = 1, 2, 3$ pro každý příčný směr skupiny m . Normalizovaná vlnočíslel jsou ve formě z_{pm} to je $\pm z_{1m}, \pm z_{2m}, \pm z_{3m}$. Znaménko $+$ značí pozitivní směr nebo protisměr hodinových ručiček šíření vlny, znaménko $-$ značí záporný směr nebo chod ve směru hodinových ručiček šíření vlny. Dolní index m bude pro zjednodušení v následujícím pojednání opomenut.

V této analýze tří vybraných vlnočíslel existujících v pozitivním směru bude užito značení k_p . Odpovídající vlna v negativním směru je vždy předpokládána s opozitním značením. Reálné kořeny nebo vlny jsou ty, které jsou rozloženy proti směru hodinových ručiček a mají možnosti $(\pm k_r - ik_i)$, kde k_r a k_i jsou reálná a imaginární vlnočíslel. Správný směr vlny (dle hodinových ručiček) dostává podobu:

$$\exp(-ik_p c) = \exp(\pm ik_r c) \exp(-k_i c) \quad (2.4.96)$$

Tato vlna může být tří typů [27]:

1. $k_r > k_i$, šíření nebo přesun vlny, je pod reálnou osou. Pro nulové tlumení tohoto kořenu leží na ose, tlumení tohoto kořenu a také všech ostatních způsobuje rotaci ve směru hodinových ručiček.
2. $k_i > k_r$, nestálost ohybové vlny je čistě imaginární pro nulové tlumení; tlumení dává malou zápornou reálnou část.
3. $k_r \approx k_i$ je nazýváno „komplexní vlna“, která vždy nastane v páru $\pm k_r - ik_i$ (označeném pro pořádek 1, 2) rapidně rozkládající se stojaté vlny, která obvykle popisuje lokální vlastnosti tuhosti.

Vlnočíslel upravená rotací pneumatiky

Všechna posunutí jsou funkcí vlnočíslel, definovaná v souřadném systému pneumatiky. Nicméně, v praxi se pneumatika otáčí kolem osy a stojí za povšimnutí, že zde sledovaná vlnočíslel se liší od těch ze soustavy souřadnic z pneumatiky. To je pravdivé jen pro přesouvající se vlny, kde je energie uložena uvnitř pneumatiky a to jak energie kinetická tak deformační [27]. Nicméně, situace je méně jasná pro nestabilní a komplexní vlny, u kterých existují jen uspokojivé hraniční podmínky v místě buzení. Komplexní vlna popíše tuhost, a nebude proto ovlivňována rotací, která způsobuje setrvačnost. Alternativně by to mohlo vypovídat, že fáze rychlosti pro komplexní vlnu je nekonečná a tak nebude významně rušena rotací. Nestabilita ohybové vlny je reprezentována setrvačností a tak lze očekávat, že bude rotací ovlivněna. Tento účinek je ale zde ignorován vzhledem k obtížnosti izolace kořenu v programu.

Fáze rychlosti vlny proti a ve směru hodinových ručiček pohybujících se vln, jsou stejné, to je V_p , $p = 1, 2, 3$ pro nerotující. Jestliže se pneumatika otáčí proti směru hodinových

ručiček rychlostí \underline{V} , pohybující se vlny mění rychlost v závislosti k ose kola a čáře dotyku (ale co se týče pásu, vlny se ještě pohybují svou původní rychlostí). Upravené rychlosti vln ve vztahu k ose jsou:

$$V_{pa} = V_p + V \quad (2.4.97)$$

$$V_{pb} = V_p - V \quad (2.4.98)$$

Vlna \underline{V}_{pa} se v protisměru hodinových ručiček stává rychlejší prostřednictvím \underline{V} ; zatímco ve směru hodinových ručiček je vlna \underline{V}_{pb} prostřednictvím \underline{V} zpomalena. Používání vztahu, $\underline{k}_p = \omega \underline{V}_p$, se vlnčíslo stává:

$$k_{pa} = k_p / (1 + \text{Re}(k_p) V/\omega) \quad (2.4.99)$$

$$k_{pb} = k_p / (1 - \text{Re}(k_p) V/\omega) \quad (2.4.100)$$

Za povšimnutí stojí, že obě vlnčíslo jsou zde pozitivní. S přenosem energie je spjatá jen reálná část vlnčíslo; je použita ve jmenovateli. Jestliže nedochází k rotaci pak: $\underline{k}_b = \underline{k}_p$, $\underline{k}_{pa} = \underline{k}_p$.

2.4.4 Hraniční podmínky pro stykovou plochu pneumatika – vozovka

Pro stykovou plochu pneumatika – vozovka je stanoveno šest hraničních podmínek [23]. Tři jsou geometrické rovnice kontinuity spojující obě strany pásu s kontaktní plochou. Další tři jsou rozkladem dvou vnějších sil a momentu, do vnitřních sil. Všechny hraniční podmínky jsou vyjádřeny v rámci šesti radiálních amplitud vlny \underline{w}_p .

Kontinuita radiálního posunutí

Kontinuita radiálního posunutí spočívá v $\theta = 0, \theta = 2\pi$, nebo $c = 0, c = l_c$; kde l_c je délka pásu.

$$0 = B_{1p} w_p \quad (2.4.101)$$

kde

$$B_{1p} = I^T (L_{pc}(0) L_{pc}(l_c)) \quad (2.4.102)$$

nebo

$$B_{1p} = [1 - \alpha_{1a} \quad \alpha_{1b} - 1 \quad 1 - \alpha_{2a} \quad \alpha_{2b} - 1 \quad 1 - \alpha_{3a} \quad \alpha_{3b} - 1] \quad (2.4.103)$$

Kontinuita obvodového posunutí

Kontinuita obvodového posunutí spočívá v $c = 0, c = l_c$;

$$0 = B_{2p} w_p \quad (2.4.104)$$

kde

$$B_{2p} = I^T A_p (L_{pc}(0) L_{pc}(l_c)) \quad (2.4.105)$$

nebo

$$B_{2p} = [A_{1a}(1-\alpha_{1a})A_{1b}(\alpha_{1b}-1)A_{2a}(1-\alpha_{2a})A_{2b}(\alpha_{2b}-1)A_{3a}(1-\alpha_{3a})A_{3b}(\alpha_{3b}-1)] \quad (2.4.106)$$

Kontinuita sklonu v důsledku ohybu

Sklon v důsledku ohybu β je kontinuální napříč vstupní hranicí kontaktu. Nicméně sklon v důsledku stříhu γ , je diskontinuální vzhledem k externí příčné síle. Kontinuita sklonu v důsledku ohybu může být vyjádřena jako $\beta(0) = \beta(l_c)$

$$0 = B_{3p} w_p \quad (2.4.107)$$

kde

$$B_{3p} = I^T E_p D_p (L_{pc}(0) L_{pc}(l_c)) \quad (2.4.108)$$

nebo vyjádřeno maticí 6 x 1

$$B_{3p} = [-ik_{pa}E_{pa}(1 - \alpha_{pa}) \quad ik_{pb}E_{pb}(\alpha_{pb} - 1) \quad \dots], p = 1, 2, 3 \quad (2.4.109)$$

Ohybový moment

Vnější moment bude platný v nějaké praktické situaci, protože externí rovinná síla působí spíše v povrchu běhounu než v neutrální ose. Vnější moment \underline{M}_0 je vyvážen vnitřními momenty v $\underline{c} = 0$ a \underline{l}_c , to je:

$$M_0 = M_c(l_c) - M_c(0) \quad (2.4.110)$$

Jestliže je substituce provedena z (2.4.56):

$$M_0 = B_c [\partial\beta_c / \partial c - w / a]_{c=0} - B_c [\partial\beta_c / \partial c - w / a]_{c=l_c} \quad (2.4.111)$$

použitím kontinuity ve \underline{w} , lze psát:

$$M_0 = B_{4p} w_p \quad (2.4.112)$$

kde

$$B_{4p} = B_c I^T E_p D_p^2 (L_{pc}(0) L_{pc}(l_c)) \quad (2.4.113)$$

Rozšíření tohoto výrazu dává matici 6 x 1

$$B_{4p} = B_c [-k_{pa}^2 E_{pa}(1 - \alpha_{pa}) - k_{pb}^2 E_{pb}(\alpha_{pb} - 1) \quad \dots], p = 1, 2, 3 \quad (2.4.114)$$

Rozklad normálové síly

Normálová síla \underline{F}_y , znázorněná na obr.30., může být rozdělena do komponenty vnitřní smykové síly \underline{Q}_c a obvodové síly \underline{N} , v $\underline{c} = 0$; $\underline{c} = \underline{l}_c$

$$F_y = [Q_c - N\Phi_c]_{c=0} - [Q_c - N\Phi_c]_{c=l_c} \quad (2.4.115)$$

kde kinematická rotace $\underline{\Phi}_c$, je dána ve vztahu (2.4.32). Obvodová síla \underline{N} je získána v (2.4.47) jako dynamická síla a \underline{N}_c , statická rovinná síla. Smyková síla pro p - tou vlnu může být vyjádřena užitím vztahů (2.4.30), (2.4.50) a (2.4.15). \underline{I}_0 je jednotková matice

$$Q_p = S_c (I_0 - E_p) \partial w_p / \partial c \quad (2.4.116)$$

Jestliže je uvažována jen statická obvodová síla, tzn. $\underline{N} = \underline{N}_c$, pak substituce do (2.4.115) z (2.4.117), (2.4.116) přináší:

$$F_y = B_{5p} w_p \quad (2.4.117)$$

kde

$$B_{5p} = I^T ((S_c + N_c) D_p - S_c E_p D_p - N_c / a A_p) (L_{pc}(0) L_{pc}(l_c)) \quad (2.4.118)$$

Rozšíření tohoto výrazu dává matici 6×1

$$B_{5p} = [B_{51a} B_{51b} : B_{52a} B_{52b} : B_{53a} B_{53b}] \quad (2.4.119)$$

Pro p -tou dvojici součinitelů $B_{5pa} B_{5pb}$ (protisměru a ve směru hodinových ručiček):

$$[B_{5pa} B_{5pb}] = \begin{cases} \{ ik_{pa}(S_c(1-E_{pa}) + N_c) - N_c / a A_{pa} \} (\alpha_{pa} - 1) \\ \{ ik_{pb}(S_c(1-E_{pb}) + N_c) - N_c / a A_{pb} \} (\alpha_{pb} - 1) \end{cases} \quad | p = 1, 2, 3 \quad (2.4.120)$$

Rozklad tangenciální síly

Rozklad tangenciálních sil znázorněných na obr.30., přináší:

$$F_x = N(l_c) - N(0) \quad (2.4.121)$$

kde F_x je externí tangenciální síla; \underline{N} je obvodová síla definovaná ve vztahu (2.4.47). Provedením substituce ze vztahů (2.4.47) a (2.4.35), lze tangenciální sílu vyjádřit

$$F_x = A_c (\partial u / \partial c + w / a)_{c=l_c} - A_c (\partial u / \partial c + w / a)_{c=0} \quad (2.4.122)$$

kteřá je, při užití amplitudy

$$F_x = B_{6p} w_p \quad (2.4.123)$$

kde

$$B_{6p} = - A_c I^T (D_p A_p + 1/a I_0) (L_{pc}(0) L_{pc}(l_c)) \quad (2.4.124)$$

Vztah (2.4.123) může být dále rozšířen jako matice tří párů:

$$B_{6p} = [B_{61a} B_{61b} : B_{62a} B_{62b} : B_{63a} B_{63b}] \quad (2.4.125)$$

p -tý pár je tedy

$$[B_{6pa} B_{6pb}] = [A_c(\alpha_{pa} - 1)(-ik_{pa}A_{pa} + 1/a) A_c(1 - \alpha_{pb})(ik_{pb}A_{pb} + 1/a)], p = 1,2,3 \quad (2.4.126)$$

Radiální a obvodová mobilita normálové síly

Radiální a obvodovou mobilitu normálové síly lze získat za podmínek $F_x = 0, M_0 = 0, F_y = -F_{ym}$, kde F_{ym} v odvolání specificky na sílu působící v m -tém příčném režimu pásu. Záporné znaménko zde připadá v úvahu proto, že radiální síla na obr.30., působí v negativním směru. Odezvy jsou také nahrazeny specifickým ekvivalentem, to je $w_m(c) = w(c), u_m(c) = u(c)$. Potom:

$$w_m(c) / F_{ym} = Y_m^{yy}(c) = i\omega l^T L_{pc} K^{-1} F \quad (2.4.127)$$

$$u_m(c) / F_{ym} = Y_m^{xy}(c) = i\omega A_p K^{-1} F \quad (2.4.128)$$

$Y_m^{yy}(c), Y_m^{xy}(c)$ jsou typické mobility v pozici c příslušně v radiálním a obvodovém směru. Typická síla pro jakoukoliv nositelku síly $F_{ym}(z)$ může být zjištěna z charakteristického rozkladu vztahu:

$$F_y(z) = \sum_{m=0,2,4,\dots} F_{ym} \cos m\pi z/b + \sum_{m=1,3,5,\dots} F_{ym} \sin m\pi z/b \quad (2.4.129)$$

Pro zvláštní případ bodové síly v z , t.j. $F_y(z) = F_0 \delta(z-z_0)$ ortogonálních vztahů aplikovaných v (2.4.129), tedy

$$\int_{z=-b/2}^{z=b/2} \dots (\cos m\pi z/b + \sin m\pi z/b) dz \quad (2.4.130)$$

je výsledkem

$$F_{y0} = F_0 / b \quad m=0 \quad (2.4.131)$$

$$F_{ym} = 2F_0 / b (\cos m\pi z_0/b \quad m=2,4,\dots + \sin m\pi z_0/b \quad m=1,3,\dots) \quad (2.4.132)$$

Typická síla na nositelce sil celkové velikosti F_0 aplikované nad pásem šířky b je výrazem (2.4.131). Rychlost odezvy v radiálním obvodovém směru k jednotkovému bodu radiální síly je sumou typických příspěvků v (2.4.128), s charakteristickými silami využitelnými z (2.4.131), (2.4.132):

$$Y^{yy} = \sum_{m=0,1,2,3,\dots} Y_m^{yy} \quad (2.4.133)$$

$$Y^{xy} = \sum_{m=0,1,2,3,\dots} Y_m^{xy} \quad (2.4.134)$$

Radiální a obvodová mobilita obvodové síly

Mobilitu jednotkové lineární obvodové síly působící v neutrální ose, lze získat modifikací silového sloupce matice v (2.4.127), (2.4.128). $F_x = 1/b, F_y = 0, M_0 = 0$, kde b je šířka pásu.

Radiální a obvodová mobilita tangenciální síly na povrchu

Mobilitu jednotkové lineární obvodové síly působící tangenciálně na povrchu, lze získat modifikací silového sloupce matice v (2.4.127), (2.4.128). $F_x = 1/b, F_y = 0, M_0 = t/b$, kde b je šířka pásu a t vzdálenost povrchu od neutrální osy [29]. Obvodové posunutí na povrchu u_{pc} zahrnuje složku rotace pásu

$$\dot{u}_{pc} = u_{pc} + tD_p w_{pc} \quad (2.4.135)$$

2.4.5 Valení kola s pneumatikou na rovinné ploše

Model kola s pneumatikou

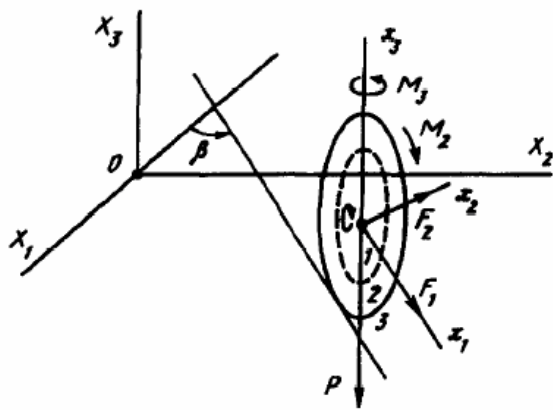
Předpokládejme, že se kolo skládá z disku v ose (1) (pevný), deformovaného bočního povrchu pneumatiky (2) a neroztažitelného běhounu (3), podél části, kde nastane kontakt, bez prokluzování, mezi kolem a rovinou $\underline{OX}_1\underline{X}_2$ (obr.30.). Souřadnicová soustava $\underline{CX}_1\underline{x}_2\underline{x}_3$ je obdržena od inerciální souřadnicové soustavy $\underline{OX}_1\underline{X}_2\underline{X}_3$ posunem původní, k bodu \underline{C} (těžiště nepřetvořeného kola) a rotací v úhlu β kolem osy \underline{CX}_3 . Osa \underline{CX}_2 je osou rotace disku, zatímco rovina $\underline{CX}_1\underline{X}_2$ je střední rovinou kola a je ortogonální [31] k rovině $\underline{OX}_1\underline{X}_2$. Dále, $\Gamma_2(\theta): \underline{Cxyz} \rightarrow \underline{CX}_1\underline{x}_2\underline{x}_3$ je operátor rotace kolem osy \underline{CX}_2 pod úhlem θ , zatímco souřadnicová soustava \underline{Cxyz} je pevně připojena k disku kola (obr.32). Předpokládejme, že boční povrch pneumatiky se v nepřetvořeném stavu shoduje s částí povrchu anuloidu. Jen může změnit toroidní souřadnicovou soustavu $\underline{M}\eta_1\underline{\eta}_2\underline{\eta}_3$ přes operátor $\Gamma_2(\varphi)\Gamma_3(\psi)$ (Obr.31.). Označme průvodiče bodu na straně povrchu pneumatiky v deformovaném stavu v souřadnicové soustavě $\underline{OX}_1\underline{X}_2\underline{X}_3$ ve tvaru:

$$R(\varphi, \psi, t) = \sum_{i=1}^3 X_i I_i + \Gamma_3(\beta) \Gamma_2(\theta + \varphi) \{ a e_{x'} + \Gamma_3(\psi) [b \eta_1 + \sum_{i=1}^3 u_i(\varphi, \psi, t) \eta_i] \} \quad (2.4.136)$$

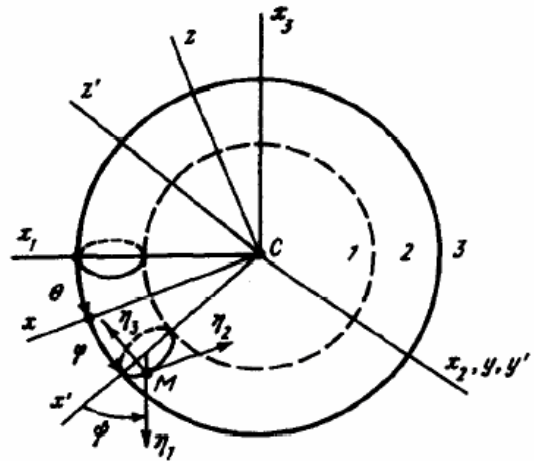
$$\varphi \bmod 2\pi, \quad |\psi| \leq \psi_0$$

$$\Gamma_2(\theta) = \begin{vmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{vmatrix} \quad (2.4.137)$$

$$\Gamma_3(\beta) = \begin{vmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.4.138)$$



Obr.30. Normálové síly [31]



Obr.31. Tangenciální síly [31]

Zde \underline{l}_i je jednotkový vektor v ose OX_i za předpokladu, že \underline{e}_x je jednotkový vektor v ose CX' (obr.32.), a $\underline{u}_i(\varphi, \psi, t)$ je průmět posunutí vektoru bodu na povrchu pneumatiky na osu jednotkového vektoru $\underline{\eta}_i$ toroidní souřadnicové soustavy.

Formulujme několik hypotéz pro vyjádření posunutí bodů na povrchu pneumatiky v rámci posunutí bodů běhounu. Za prvé, nechť vlákna pneumatiky odpovídající hodnotě konstanty z úhlu $\underline{\varphi}$, jsou neroztažitelná. Od konstanty b je poloměr kruhu získaného z řezu anuloidu v rovině procházející skrz osu CX_2 , dle (2.4.136) lze dle [31] získat

$$(\partial R / \partial \psi)^2 = b^2 \Rightarrow (\eta_3 \times \eta_1 + \eta_3 \times \sum_{i=1}^3 u_i \eta_i + \sum_{i=1}^3 \partial u_i / \partial \psi \eta_i)^2 = 1 \quad (2.4.139)$$

a dále

$$(1 + u_1 + \partial u_2 / \partial \psi)^2 + (\partial u_1 / \partial \psi - u_2)^2 + (\partial u_3 / \partial \psi)^2 = 1 \quad (2.4.140)$$

Od teď předpokládejme, že funkce \underline{u}_i a $\partial \underline{u}_2 / \partial \psi$ jsou malé a znázorníme (2.4.140), bez ohledu na nekonečně malé množství, ve tvaru

$$u_1 + \partial u_2 / \partial \psi = 0 \quad (2.4.141)$$

Za druhé, předpokládejme, že je běhoun pneumatiky také neroztažitelný, to jest

$$(\partial R(\varphi, 0, t) / \partial \varphi)^2 = r^2 \Rightarrow (\eta_2 \times [r\eta_1 + b \sum_{i=1}^3 u_i \eta_i] + b \sum_{i=1}^3 \partial u_i / \partial \varphi \eta_i)^2 |_{\psi=0} = r^2 \quad (2.4.142)$$

$$r = a + b$$

a dále

$$(1 + u + \partial v / \partial \varphi)^2 + (v - \partial u / \partial \varphi)^2 + (\partial w / \partial \varphi)^2 = 1 \quad (2.4.143)$$

$$u(\varphi, t) = u_1(\varphi, 0, t) b / r \quad (2.4.144)$$

$$v(\varphi, t) = -u_3(\varphi, 0, t) b / r \quad (2.4.145)$$

$$w(\varphi, t) = u_2(\varphi, 0, t) b / r \quad (2.4.146)$$

Za povšimnutí stojí, že hodnoty úhlu $w = 0$ odpovídají bodům běhounu. Linearizací vztahů (2.4.143) až (2.4.146) lze získat

$$u + \partial v / \partial \varphi = 0 \quad (2.4.147)$$

Funkce \underline{u} , \underline{v} a \underline{w} definují posunutí bodů běhounu v toroidní souřadnicové soustavě, shodující se v tomto případě, když $\underline{\psi} = 0$, s válcovými souřadnicemi $\underline{C}x'y'z'$, když $\underline{e}_x = \underline{\eta}_1$, $\underline{e}_y = \underline{\eta}_2$, $\underline{e}_z = \underline{\eta}_3$.

Za třetí, předpokládejme, že zakřivení vláken pneumatiky, odpovídá velikosti úhlu φ , a je konstantní. Tato hypotéza je založená na skutečnosti, že neroztažitelné vlákno, vetknuté na koncích fungovalo na základě konstantní distribuce normálového zatížení (tlaku), nabývající tvaru kruhu procházení skrz konce vlákna v rovině působení zatížení. Zakřivení vlákna \underline{k} může být určeno z průmětů akcelerace bodu na osách Frenetova tříhranu, a to zejména $|\partial^2 R / \partial \psi^2| = b^2 k$. Z (2.4.136) lze získat:

$$\begin{aligned} & (\eta_3 x [\eta_3 + (\eta_1 + \eta_2) \sum_{i=1}^3 u_i \eta_i]) + \eta_3 x \sum_{i=1}^3 2 \partial u_i / \partial \psi \eta_i + \sum_{i=1}^3 \partial^2 u_i / \partial \psi^2 \eta_i^2 = k^2 b^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow & (1 + u_1 + 2 \partial u_2 / \partial \psi - \partial^2 u_1 / \partial \psi^2)^2 + (\partial^2 u_2 / \partial \psi^2 + 2 \partial u_1 / \partial \psi - u_2)^2 + (\partial^2 u_3 / \partial \psi^2)^2 = k^2 b^2 \end{aligned} \quad (2.4.148)$$

Záchytné podmínky nultého a prvního řádu štíhlosti v (2.4.148), čítající (2.4.141), lze obdržet

$$\partial^4 u_2 / \partial \psi^4 + \partial^2 u_2 / \partial \psi^2 = 0 \quad (2.4.149)$$

Tak lze získat řešení vztahu (2.4.149), které dle (2.4.143) až (2.4.146) a (2.4.147), splňuje podmínky

$$u_2(\varphi, \pm \psi_0, t) = 0 \quad (2.4.150)$$

$$u_2(\varphi, 0, t) = w(\varphi, t) r / b \quad (2.4.151)$$

$$\partial u_2(\varphi, \pm \psi_0, t) / \partial \psi = 0 \quad (2.4.152)$$

$$\partial u_2(\varphi, 0, t) / \partial \psi = -u(\varphi, t) r / b \quad (2.4.153)$$

Obecné řešení vztahu (2.4.149) má formu $\underline{u}_2 = c_1 \psi + c_2 + c_3 \cos \psi + c_4 \sin \psi$, kde c_i jsou funkce $\underline{\psi}$ a \underline{t} . Při zahrnutí mezních podmínek (2.4.150) až (2.4.153) lze získat:

$$u_2 = (\varphi, t) f(\psi, \psi_0) + w(\varphi, t) g(\psi, \psi_0) \quad (2.4.154)$$

$$u_1 = -u(\varphi, t) f'(\psi, \psi_0) - w(\varphi, t) g'(\psi, \psi_0), \quad 0 \leq \psi \leq \psi_0 \quad (2.4.155)$$

$$f(\psi, \psi_0) = r / b \Delta [(1 - \cos \psi_0) \psi + \Delta_1 - \Delta_1 \cos \psi + \Delta_2 \sin \psi] \quad (2.4.156)$$

$$g(\psi, \psi_0) = r / b \Delta [-\sin \psi_0 \psi - \Delta_2 + (\cos \psi_0 - 1) \cos \psi + \sin \psi_0 \sin \psi] \quad (2.4.157)$$

$$\Delta = \psi_0 \sin \psi_0 - 2 + 2 \cos \psi_0 \quad (2.4.158)$$

$$\Delta_1 = \psi_0 \cos \psi_0 - \sin \psi_0 \quad (2.4.159)$$

$$\Delta_2 = 1 - \cos \psi_0 - \psi_0 \sin \psi_0 \quad (2.4.160)$$

v rozsahu hodnot $\underline{\psi}$, od $-\underline{\psi}$ k nule, je třeba zaměnit $\underline{\psi}_0$ za $-\underline{\psi}_0$ v (2.4.154) až (2.4.160). Za povšimnutí stojí, že funkce $f(\underline{\psi})$ je sudá zatímco $g(\underline{\psi})$ je lichá.

Rozviňme funkci $\underline{u}_3(\varphi, \underline{\psi}, t)$ v Taylorovu řadu s ohledem na proměnnou $\underline{\psi}$ v okolí bodů $\underline{\psi} = \underline{\psi}_0$ a $\underline{\psi} = -\underline{\psi}_0$ a omezme ji v těchto rozvojiích prvními dvěma podmínkami; pak

$$u_3(\varphi, \underline{\psi}, t) = -v(\varphi, t) (1 - |\underline{\psi}| / \underline{\psi}_0) r / b \quad (2.4.161)$$

z toho důvodu, z deformovaného stavu běhounu (funkce \underline{u} , \underline{v} , \underline{w}) lze určit posunutí bodů bočního povrchu pneumatiky /vztahy (2.4.154) až (2.4.161)/. Tvar deformované pneumatiky je asymetrický v rovině $\underline{C}_{x_1x_3}$, zatímco deriváty $\frac{\partial u_i(\varphi, \underline{\psi}, t)}{\partial \underline{\psi}}$ mohou být nespojitě jestliže $\underline{\psi} = 0$. Vypočteme elementární práci tlaku v pneumatice pro možná posunutí bodů na jejím povrchu:

$$\delta A = -\underline{\psi}_0 \int_0^{\underline{\psi}_0} \int_0^{2\pi} p n \delta R \sigma \quad (2.4.162)$$

$$\delta R = b \sum_{i=1}^3 \delta u_i \eta_i \quad (2.4.163)$$

$$n d\sigma = [\partial R / \partial \varphi \times \partial R / \partial \underline{\psi}] d\underline{\psi} d\varphi \quad (2.4.164)$$

a dále, nehledě na podmínky druhého řádu štíhlosti zahrnuté

$$\delta A = p b^3 \int_0^{\underline{\psi}_0} \int_0^{2\pi} [\delta u_1 (a/b + \cos \underline{\psi} - \partial u_3 / \partial \varphi + u_1 \cos \underline{\psi} - u_2 \sin \underline{\psi}) + \delta u_2 (a/b + \cos \underline{\psi}) (u_2 - \partial u_1 \partial \underline{\psi}) + \delta u_3 (\partial u_1 / \partial \varphi + u_3 \cos \underline{\psi})] d\underline{\psi} d\varphi \quad (2.4.165)$$

Ve vztahu (2.4.165) nutno zaměnit \underline{u}_i a $\frac{\partial u_i}{\partial \underline{\psi}}$ výrazy (2.4.154) až (2.4.161) a integrovat přes $\underline{\psi}$. Integrál v (2.4.165) obsahuje vztah $\frac{\partial u_1 (a/b + \cos \underline{\psi})}{\partial \underline{\psi}}$, lineární v $\frac{\partial u_1}{\partial \underline{\psi}}$. Pro zachování předpokládané přesnosti, je nutno obdržet \underline{u}_i druhého řádu jako nekonečně malé, s ohledem na \underline{u} , \underline{v} , \underline{w} , což lze vyvodit ze vztahů (2.4.139), (2.4.140) a (2.4.148) a $\underline{u}_i = \underline{u}_{i0} + \underline{z}_i$, kde \underline{u}_{i0} jsou funkce (1.180) až (1.187) a \underline{z}_i jsou korekce, kvadratické v \underline{u} , \underline{v} , \underline{w} . (vrchol získán derivací podle $\underline{\psi}$)

$$z_1'' + z_1 = \frac{1}{2} u_{30}'^2 - \frac{1}{2} (u_{10}' - u_{20})^2 \quad (2.4.166)$$

Pravá strana rovnice Eq. (2.4.166) se rovná $\frac{-1/2[u(f'+f) + w(g''+g)]^2 - v^2 r^2 (b\underline{\psi}_0)^2}{}$, zatímco funkci \underline{z}_i lze zanedbat, když $\underline{\psi} = 0$, a $\underline{\psi} = \pm \underline{\psi}_0$. Řešení vztahu (2.4.166) má podobu

$$z_1(\varphi, \underline{\psi}, t) = A_{11}(\underline{\psi}) u^2 + A_{33}(\underline{\psi}) w^2 + 2A_{13}(\underline{\psi}) uw + A_{22}(\underline{\psi}) v^2 \quad (2.4.167)$$

kde $\underline{A}_{ij} (i = 1, 2, 3)$ je funkcí sudou, zatímco \underline{A}_{33} je funkcí lichou. Funkce \underline{A}_{ij} jsou specifikovány v intervalu $[-\underline{\psi}_0, \underline{\psi}_0]$ a jsou lineární kombinací $\underline{\psi}$, $\underline{\psi}^2$, $\cos \underline{\psi}$, $\sin \underline{\psi}$ a jsou konstantní. Žádné potíže nevystávají v determinaci těchto funkcí ačkoli to je podstatně dlouhý proces. Substituce (2.4.154) až (2.4.161) do (2.4.165), vymění $\frac{\partial u_i}{\partial \underline{\psi}}$ za $-\underline{f}' \delta u - \underline{g}' \delta w + \delta z_1$ a integrací výrazů lze získat, vezme-li v úvahu paritu odpovídajících funkcí s ohledem na $\underline{\psi}$, výraz pro práci zapříčiněnou tlakem v možných posunutích ve tvaru

$$\delta A = - \int_0^{2\pi} [n_0 \delta u + n_1 u \delta u + n_2 v \delta v + n_3 w \delta w + n_{12} (u' \delta v - v' \delta u)] d\varphi \quad (2.4.168)$$

Tímto zdlouhavým procesem lze vypočítat součinitele n_k ($k = 0, \dots, 3$) a n_{12} v explicitní formě. Za povšimnutí stojí, že $n_0 < 0$, zatímco variace (2.4.168), vzato v úvahu (2.4.147), může být vyjádřena ve tvaru

$$\delta A = \delta \Pi[v, w] \quad (2.4.169)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} [n_1 + 2n_{12}] v'^2 + n_2 v^2 + n_3 w^2] d\varphi \quad (2.4.170)$$

kde Π je potenciální energie deformované pneumatiky. Když $\underline{u} = \underline{v} = \underline{w} = 0$ je pneumatika ve stabilní rovnováze, to znamená, že funkcionál Π má diskrétní minimum a kladné součinitele $n_1 + 2n_{12}, n_2, n_3$.

Dále si lze povšimnout konstantního tlaku p . Předpokládáme-li, že vzduch v pneumatice je ideálním plynem [31], a procesy jsou izotermické, potom $pV = p_0 V_0$, kde p , V a p_0 , V_0 je příslušný tlak a objem plynu v deformované a v nedeformované pneumatice. Pak

$$p = p_0 (1 + \Delta V / V_0)^{-1} = p_0 (1 - \Delta V / V_0 + \dots)^{-1} \quad (2.4.171)$$

$$V = \Delta V + V_0 \quad (2.4.172)$$

$$\Delta V = b^3 \int_{-\psi_0}^{\psi_0} \int_0^{2\pi} u_1 (a/b + \cos \psi) d\psi d\varphi + O_2 \quad (2.4.173)$$

kde O_2 jsou druhé a vyšší řády nekonečně malých členů v $\underline{u}, \underline{v}, \underline{w}$ a jejich derivace. Vzato v úvahu (2.4.147) a (2.4.154) až (2.4.160) a odchylky funkce $g'(\psi)$, lze dospět k závěru, že kvantita ΔV ve (2.4.171) až (2.4.173) je druhého a vyššího řádu štíhlosti v $\underline{u}, \underline{v}, \underline{w}$, a následkem toho může být tlak p ve (2.4.165) předpokládán konstantní, který odpovídá předpokládané přesnosti při výpočtu práce způsobené tlakem v možných posunutích.

Pohybové rovnice kola s pneumatikou

Kinetická energie kola je dána energií kinetickou disku

$$T_d = \frac{1}{2} m_d \sum_{i=1}^3 x_i'^2 + \frac{1}{2} J_{1d} \beta'^2 + \frac{1}{2} J_{2d} \theta'^2 \quad (2.4.174)$$

kde m_d je hmotnost disku a J_{1d}, J_{2d} jsou momenty setrvačnosti disku k osám Cx_3 a Cx_2 ; (kinetická energie deformované pneumatiky). Co se týče výše zmíněného, lze předpokládat, že veškerá hmotnost pneumatiky je koncentrována v běhounu (rovnoměrné neroztažitelné vlákno), a lze pak vyjádřit kinetickou energii běhounu ve tvaru

$$T_b = \frac{1}{2} \rho r \int_0^{2\pi} R'^2(\varphi, 0, t) d\varphi \quad (2.4.175)$$

$$\Phi = \theta + \varphi \quad (2.4.176)$$

$$R'^2(\varphi, 0, t) = \sum_{i=1}^3 x_i' I_i + r \Gamma_3(\beta) \{ \beta' I_3 \times \Gamma_2(\Phi) [(1+u)\eta_1 + w\eta_2 - v\eta_3] \} + r \Gamma_3(\beta) \Gamma_2(\Phi) \{ \theta \eta_2 \times [(\eta_1 + u)\eta_1 + w\eta_2 - v\eta_3] + u'\eta_1 + w'\eta_2 - v'\eta_3 \} \quad (2.4.177)$$

kde ρ je objemová hmotnost na jednotku délky běhounu. Dále, lze získat

$$\Gamma_2(-\Phi) \Gamma_3(-\beta) R'(\varphi, 0, t) = \sum_{i=1}^3 Z_i \eta_i \quad (2.4.178)$$

$$Z_i = \xi_{i1} + r \xi_{i2} \quad (2.4.179)$$

$$\xi_{11} = X'_1 \cos\Phi \cos\beta + X'_2 \cos\Phi \sin\beta - X'_3 \sin\Phi \quad (2.4.180)$$

$$\xi_{12} = u' - v\theta' - \beta'w \cos\Phi \quad (2.4.181)$$

$$\xi_{21} = -X'_1 \sin\beta + X'_2 \cos\beta \quad (2.4.182)$$

$$\xi_{22} = w' + \beta'(1 + u) \cos\Phi - \beta'v \sin\Phi \quad (2.4.183)$$

$$\xi_{31} = X'_1 \sin\Phi \cos\beta + X'_2 \sin\Phi \sin\beta + X'_3 \cos\Phi \quad (2.4.184)$$

$$\xi_{32} = -v' - \theta'(1 + u) - \beta'w \sin\Phi \quad (2.4.185)$$

a proto kinetická energie kola je

$$T = T_d + T_b = m / 2 \sum_{i=1}^3 X'_i{}^2 + 1/2 J_1 \beta'^2 + 1/2 J_2 \theta'^2 + \rho r / 2 \int_0^{2\pi} \{ r^2 [\xi_{12}^2 + (\zeta_{22} - \beta' \cos\Phi)^2 + (\zeta_{32} + \theta')^2] + 2r[\zeta_{11}\zeta_{12} + (\zeta_{21} + r\beta' \cos\Phi)(\zeta_{22} - \beta' \cos\Phi) + (\zeta_{31} - r\theta')(\zeta_{32} + \theta')] \} d\varphi \quad (2.4.186)$$

kde m , J_1 a J_2 jsou hmotnost kola a jeho momenty setrvačnosti v nepřetvořeném stavu k osám $\underline{OX_3}$ a $\underline{OX_2}$.

Předpokládejme, že se kolo valí na rovině $\underline{OX_1X_2}$ bez prokluzování. Toto znamená v rozsahu $[\varphi_1, \varphi_2]$ změnou úhlu φ ; rychlost bodů na běhounu je rovna nule. Ze vztahů (2.4.178) až (2.4.185) lze získat

$$Z_i = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad \varphi \in [\varphi_1, \varphi_2] \quad (2.4.187)$$

a možná posunutí splní podmínky

$$\delta Z_i = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad \varphi \in [\varphi_1, \varphi_2] \quad (2.4.188)$$

Vztahy (2.4.187) mohou být nahrazeny samostatným holonomickým vztahem $\underline{R}(\varphi, \underline{0}, \underline{t}) \underline{l}_3 = 0$ a dvěma ne-holonomickými vztahy, například $\underline{Z}_2 = 0$ a $\underline{Z}_3 = 0$. Mimoto, v hraničních dotykových bodech mezi běhounem a rovinou (stykovou plochou), odpovídajícím úhlu φ_1 a φ_2 je třeba znát dva omezující vlivy $\underline{v}_1(\underline{t})$ a $\underline{v}_2(\underline{t})$, který splní podmínky

$$\Gamma_2(-\Phi) \Gamma_3(-\beta) I_3 v_k = 0 \Rightarrow v_{1k} \sin\Phi_k - v_{3k} \cos\Phi_k = 0 \quad (2.4.189)$$

$$v_k = (v_{1k}, v_{2k}, v_{3k}) \quad (2.4.190)$$

$$\Phi_k = \varphi_k + \theta; \quad k = 1, 2 \quad (2.4.191)$$

podmínky (2.4.189) a (2.4.190) značí, že omezující vlivy v hraničních bodech kontaktní linie jsou rovny nule v průmětu na osu $\underline{OX_3}$. Práce vzniklá z těchto sil v možných posunutích, po eliminaci omezení, je

$$\delta A_k = \sum_{i=1}^3 v_{ik} \delta Z_{ik}, \quad k = 1, 2; \quad (2.4.192)$$

$$\delta Z_{ik} = \delta Z_{ik} I_{\varphi = \varphi_k} \quad (2.4.193)$$

Když dojde k eliminaci omezení (2.4.187) musí být také vzata v úvahu práce vzniklá působením $\mu(\varphi, t)$, $\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2$ definované ve tvaru

$$\delta A_\mu = \varphi_1 \int^{\varphi_2} \sum_{i=1}^3 \mu_i(\varphi, t) \delta Z_i d\varphi \quad (2.4.194)$$

Předpokládejme, že síla a moment jsou přenášeny na disk kola (obr.31.), tak práce možných posunutí je

$$\delta A_F = F(\beta) \delta X_1 + F(\beta - \pi/2) \delta X_2 - P \delta X_3 + M_2 \delta \theta + M_3 \delta \beta \quad (2.4.195)$$

$$F(\beta) = F_1 \cos \beta - F_2 \sin \beta \quad (2.4.196)$$

Pohybovou rovnicí kola a podmínky kde funkce prochází hraniční body kontaktní linie skokem, lze obdržet z Hamiltonova variačního principu

$$t_1 \int^{t_2} (\delta T + \delta A + \delta A_1 + \delta A_2 + \delta A_F + \delta A_\mu + \delta A_3) dt = 0 \quad (2.4.197)$$

$$\delta A_3 = \varphi_2 \int^{2\pi - \varphi_1} \lambda(\varphi, t) [(1 + u + v')(\delta u + \delta v') + (v - u')(\delta v - \delta u') + w' \delta w'] d\varphi \quad (2.4.198)$$

kde $\lambda(\varphi, t)$ je Lagrangeův činitel, odpovídající podmínkám neroztažitelnosti běhounu (1.169) až (2.4.146), zatímco zbývající veličiny lze získat prostřednictvím (2.4.168) a (2.4.192) až (2.4.196). Integrační obor $[t_1, t_2] \cup [0, 2\pi]$ ve vztazích (2.4.197) a (2.4.198) je rozdělen křivkami $\varphi = \varphi_1(t)$ a $\varphi = \varphi_2(t)$ na dvě části, pro každou, z nichž platí Greenův vzorec [33]. Z toho důvodu lze získat následující soustavu rovnic:

$$-d/dt \nabla_{x_1} T + \varphi_1 \int^{\varphi_2} S_1(\mu_i, \Phi, \beta) d\varphi + \sum_{k=1}^2 S_1(v_{ik}, \Phi_k, \beta) + F(\beta) = 0 \quad (2.4.199)$$

$$-d/dt \nabla_{x_2} T + \varphi_1 \int^{\varphi_2} S_1(\mu_i, \Phi, \beta - \pi/2) d\varphi + \sum_{k=1}^2 S_1(v_{ik}, \Phi_k, \beta - \pi/2) + F(\beta - \pi/2) = 0 \quad (2.4.200)$$

$$S_1(\mu_i, \Phi, \beta) = \mu_1 \cos \Phi \cos \beta - \mu_2 \sin \beta + \mu_3 \sin \Phi \cos \beta \quad (2.4.201)$$

$$-d/dt \nabla_{x_3} T - \varphi_1 \int^{\varphi_2} S_2(\mu_i, \Phi) d\varphi - \sum_{k=1}^2 S_2(v_{ik}, \Phi_k) - P = 0 \quad (2.4.202)$$

$$S_2(\mu_i, \Phi) = \mu_1 \sin \Phi - \mu_3 \cos \Phi \quad (2.4.203)$$

$$\nabla_\theta T - d/dt \nabla_{\theta'} T - r \varphi_1 \int^{\varphi_2} S_3(\mu_i, u, v) d\varphi - r \sum_{k=1}^2 S_3(v_{ik}, u_k, v_k) + M_2 = 0 \quad (2.4.204)$$

$$S_3(\mu_i, u, v) = \mu_1 v + \mu_3(1 + u) \quad (2.4.205)$$

$$\nabla_\beta T - d/dt \nabla_{\beta'} T - r \varphi_1 \int^{\varphi_2} S_4(\mu_i, \Phi, u, v, w) d\varphi - r \sum_{k=1}^2 S_4(v_{ik}, \Phi_k, u_k, v_k, w_k) + M_3 = 0 \quad (2.4.206)$$

$$S_4(\mu_i, \Phi, u, v, w) = \mu_1 w \cos \Phi - \mu_2 ((1+u) \cos \Phi - v \sin \Phi) + \mu_3 w \sin \Phi \quad (2.4.207)$$

$$u_k = u(\varphi_k, t) \quad k = 1, 2 \quad (2.4.208)$$

$$v_k = v(\varphi_k, t) \quad k = 1, 2 \quad (2.4.209)$$

$$w_k = w(\varphi_k, t) \quad k = 1, 2 \quad (2.4.210)$$

$$\nabla_u T - d/dt \nabla_{u'} T - n_0 - n_1 u + n_{12} v' + \lambda(1+u+v') + [\lambda(v-u')] = 0, \varphi \in I_2 \quad (2.4.211)$$

$$-n_0 - n_1 u + n_{12} v' + \mu_1 r = 0, \varphi \in I_1 \quad (2.4.212)$$

$$\rho r^3 \varphi'_k [u']_k - (-1)^{k+1} \lambda (v - u') I_{l(k)} + r v_{1k} = 0 \quad (2.4.213)$$

$$\nabla_v T - d/dt \nabla_{v'} T - n_2 v - n_{12} u' + \lambda (v - u') - [\lambda (1 + u - v')] = 0, \varphi \in I_2 \quad (2.4.214)$$

$$n_2 v + n_{12} u' + \mu_3 r = 0, \varphi \in I_1 \quad (2.4.215)$$

$$\rho r^3 \varphi'_k [v']_k + (-1)^{k+1} \lambda (1 + u + v') I_{l(k)} - v_{3k} r = 0 \quad (2.4.216)$$

$$\nabla_w T - d/dt \nabla_{w'} T - n_3 w - (\lambda w') = 0, \varphi \in I_2 \quad (2.4.217)$$

$$n_3 w = \mu_2 r, \varphi \in I_1 \quad (2.4.218)$$

$$\rho r^3 \varphi'_k [w']_k + (-1)^{k+1} \lambda w' I_{l(k)} + r v_{2k} = 0 \quad (2.4.219)$$

$$k = 1, 2; I_1 =]\varphi_1, \varphi_2[, I_2 =]\varphi_2, 2\pi - \varphi_1[\quad (2.4.220)$$

Kde $[f(\varphi, t)]_k = f(\varphi_k + 0, t) - f(\varphi_k - 0, t)$ je skoková změna funkce v bodě φ_k , zatímco dolní indexy $l(1)$ a $l(2)$ značí hranice odpovídající funkcím jako $\varphi \rightarrow \varphi_1$ zleva a $\varphi \rightarrow \varphi_2$ zprava. Vztahy (2.4.199) až (2.4.219), přidané k pohybovým rovnicím, obsahují podmínky (skokové podmínky) na hranicích stykové plochy za předpokladu $\varphi \rightarrow \varphi_1$ a $\varphi \rightarrow \varphi_2$; společně s omezujícími podmínkami (2.4.143) až (2.4.146) a (2.4.187) až (2.4.189), (2.4.190) tvoří kompletní soubor vztahů problému (20 vztahů ve všech) pro 20 neznámých: $X_i, \mu_i, v_{ij}, v_{i2}$ ($i = 1, 2, 3$), $\beta, \theta, u, v, w, \lambda, \varphi_1, \varphi_2$. V doplňku, determinace funkcí u, v, w je nutno vzít v úvahu jejich spojitost v bodech φ_1, φ_2 a to $[u]_k = [v]_k = [w]_k = 0$ ($k = 1, 2$).

2.4.6 Styk kola s vozovkou v případě smyku

Nechť nastane zvláštní stav valení kola na rovině (vozovce) – smyk. Tehdy lze obdržet analytické řešení [35] podstaty problému a určení sil a momentů vyskytujících se v tomto stavu. Vezměme v úvahu valící se kolo ve smyku, když

$$\beta = \beta' = 0 \quad (2.4.221)$$

$$X'_1 = c \cos \varepsilon \quad (2.4.222)$$

$$X'_2 = c \sin \varepsilon \quad (2.4.223)$$

$$X_3 = \text{const.} \quad (2.4.224)$$

$$\theta' = \Omega \quad (2.4.225)$$

$$(u, v, w)(\varphi, t) = (U, V, W)(\alpha) \quad (2.4.226)$$

$$\alpha = \varphi + \Omega t - \pi/2 \quad (2.4.227)$$

$$\mu(\varphi, t) = \mu(\alpha) \quad (2.4.228)$$

$$\varphi_k' = -\Omega \quad (2.4.229)$$

$$v_k = \text{konst.}, k = 1,2 \quad (2.4.230)$$

$$\lambda(\varphi, t) = \lambda(\alpha) \quad (2.4.231)$$

kde ε je konstantní úhel smyku. Pohybové rovnice (2.4.199) až (2.4.219) pro funkce \underline{u} , \underline{v} , \underline{w} ve stykové ploše a podmínka pro valení bez prokluzu (2.4.187) mohou být prezentovány (primárně udávající derivace podle $\underline{\alpha}$) ve tvaru

$$\mu_1 r = n_0 + n_1 U - n_{12} V' \quad (2.4.232)$$

$$\mu_2 r = n_3 W \quad (2.4.233)$$

$$-\mu_3 r = n_2 V + n_{12} U' \quad (2.4.234)$$

$$\alpha \in]\alpha_1, \alpha_2[\quad (2.4.235)$$

$$\alpha_k = \varphi_k + \Omega t - \pi/2 \quad (2.4.236)$$

$$c \cos \varepsilon \sin \alpha = r \Omega (U' - V) \quad (2.4.237)$$

$$c \sin \varepsilon = -r \Omega W' \quad (2.4.238)$$

$$c \cos \varepsilon \cos \alpha = r \Omega (1 + U + V') \quad (2.4.239)$$

V předpokladu, že ložisko kola obíhá kolem přímky $\underline{L} = \{X_2 = X_1 \operatorname{tg} \varepsilon, X_3 = \text{konst.}\}$ konstantní rychlostí \underline{c} , je třeba hledat řešení v rovnicích (2.4.237) až (2.4.239), které definují stykovou plochu, beroucí v úvahu neroztažitelnost běhounu (2.4.143) až (2.4.146) ve formě části přímky paralelní k \underline{L} . Následkem toho lze získat

$$U = d \alpha \sin \alpha + d_1 \sin \alpha + r^{-1} X_3 \cos \alpha - 1 \quad (2.4.240)$$

$$V = d \alpha \cos \alpha + d_1 \cos \alpha + r^{-1} X_3 \sin \alpha \quad (2.4.241)$$

$$W = -d \operatorname{tg} \varepsilon \alpha d_3, \quad d = c \cos \varepsilon (r \Omega)^{-1} \quad (2.4.242)$$

kde \underline{d}_1 a \underline{d}_3 jsou volitelné konstanty. Vztahy kontaktní linie v souřadnicové soustavě $\underline{OX}_1 \underline{X}_2 \underline{X}_3$ jsou ve tvaru

$$\xi_1 = c \cos \varepsilon t - c \cos \varepsilon \Omega^{-1} \alpha - r d_1 \quad (2.4.243)$$

$$\xi_2 = c \sin \varepsilon t - c \sin \varepsilon \Omega^{-1} \alpha + r d_3 \quad (2.4.244)$$

$$\xi_3 = 0; \quad \alpha \in [\alpha_1, \alpha_2] \quad (2.4.245)$$

Z podmínky neroztažitelnosti běhounu vyplývá, že se změnou úhlu $\underline{\alpha}$ koinciduje oblouk běhounu $\underline{r\alpha}$ s odpovídající částí plochy styku; za předpokladu $\underline{c} = r \underline{\Omega}$. Kontaktní linie

dle (2.4.243) až (2.4.245), je přímka paralelní přímce \underline{L} . Dále, reakce v ploše styku $\underline{\mu}_1, \underline{\mu}_2, \underline{\mu}_3$, jsou nalezeny z rovnic (2.4.232) až (2.4.234).

Tvar deformovaného běhounu vně plochy styku může být nalezen řešením vztahů (2.4.199) až (2.4.219) pro funkce $\underline{u}, \underline{v}, \underline{w}$ prezentované ve tvaru

$$g_0(1+U-U''+2V')-n_0-n_1U+n_{12}V'+\lambda(1+U+V')+\lambda(V'-U'')+\lambda'(V-U')=0 \quad (2.4.246)$$

$$g_0(V-V''-2U')-n_2V-n_{12}U'-\lambda'(1+U+V')-\lambda(U'-V'')+\lambda(V-U')=0 \quad (2.4.247)$$

$$g_0W''+n_3W+\lambda'W'+\lambda W''=0, \quad U+V'=0; \quad g_0=\rho r^3\Omega^2; \quad \alpha \in [\alpha_1, 2\pi-\alpha_1] \quad (2.4.248)$$

Rovnice (2.4.248) je linearizací podmínky pro neroztažitelnost běhounu. Předpoklad, že napětí v běhounu je $-\lambda = \frac{g_0 - n_0 - v(\alpha)}{v(\alpha)}$, kde $v(\alpha)$ je nevýznamná kvantita. Lineární podmínky zbývající v (1.271) až (1.273), lze získat jen obecným řešením odpovídajícího lineárního systému ve tvaru

$$V = \sum_{k=1}^4 C_k \exp(D_k \alpha) \quad (2.4.249)$$

$$W = A_1 \exp(\gamma \alpha) \quad (2.4.250)$$

$$A_2 \exp(-\gamma \alpha) \quad \alpha \in [\alpha_1, 2\pi - \alpha_1] \quad (2.4.251)$$

$$U = -V' \quad (2.4.252)$$

$$D_k = \pm [n' \pm (n'^2 - 1 + n_2/n_0)^{1/2}]^{1/2} \quad (2.4.253)$$

$$n' = 1 + (n_1/2 + n_{12}/n_0) \quad (2.4.254)$$

$$\gamma = (-n_s/n_0)^{1/2} > 0 \quad (2.4.255)$$

Forma kořenů \underline{D}_k závisí na geometrických charakteristikách pneumatiky (množství $\underline{a}, \underline{b}, \underline{\psi}_0$). Součinitelé \underline{C}_k a \underline{A}_k jsou získány z podmínek předepsaných v (2.4.199) až (2.4.219) a z podmínek pro funkce $\underline{U}, \underline{V}, \underline{W}$ pokračujících v hraničních bodech plochy styku \underline{K}_1 a \underline{K}_2 , totiž

$$g_0[U']_k + (-1)^{k+1} (n_0 - g_0)(V - U')_{i(k)} = r v_{1k}, \quad [U]_k = 0 \quad (2.4.256)$$

$$g_0[V']_k - (-1)^{k+1} (n_0 - g_0 + V)_{i(k)} = -r v_{3k}, \quad [V]_k = 0 \quad (2.4.257)$$

$$g_0[W']_k - (-1)^{k+1} (n_0 - g_0)W'_{i(k)} = r v_{2k}, \quad [W]_k = 0; \quad k = 1, 2 \quad (2.4.258)$$

Použitím (2.4.240) až (2.4.242) a (2.4.249) až (2.4.255) lze prezentovat spojující podmínky (2.4.256) až (2.4.258) ve tvaru

$$\sum_{k=1}^4 D_k^m W_{kj} = a_{mj}, \quad m = 0, 1, 2, 3 \quad (2.4.259)$$

$$a_{0j} = (\cos \varepsilon - 1) \alpha_j + d_1 \quad (2.4.260)$$

$$a_{1j} = d_2 = 1 - X_3 r^{-1} \quad (2.4.261)$$

$$a_{2j} = (1 - \cos\varepsilon) \alpha_j - d_1 - g_0/n_0 \cos\varepsilon\alpha_j - (-1)^j rv_{1j}/n_0 \quad (2.4.262)$$

$$a_{3j} = 1 - [1+(n_1 + n_{12})/n_0] d_2 - g_0/n_0 \cos\varepsilon + (-1)^j rv_{3j}/n_0 \quad (2.4.263)$$

$$W_{k1} = C_k \exp[D_k(2\pi - \alpha_1)] \approx C_k \exp(2\pi D_k) \quad (2.4.264)$$

$$W_{k2} = C_k \exp(D_k \alpha_2) \approx C_k \quad (2.4.265)$$

$$A_m \exp\{(-1)^{m+1} \gamma[2\pi(2-s) + (-1)^s \alpha_s]\} = G_{ms} \quad (2.4.266)$$

$$G_{ms} = 1/2\gamma[\gamma d_3 + (-1)^m g_0 \sin\varepsilon/n_0 - \alpha_s \gamma \sin\varepsilon - (-1)^{m+s} rv_{2s}/n_0]; m,s = 1,2 \quad (2.4.267)$$

Množství W_{ki} jsou získána systémem lineárních algebraických rovnic (2.4.259) až (2.4.267) ve tvaru

$$W_{kj} = [_{i \neq k} \prod^4 (D_i - D_k)]^{-1} [a_{0j} D_k^{-1} D_1^2 D_3^2 + a_{1j} (D_1^2 + D_3^2 - D_k^2) - a_{2j} D_k - a_{3j}] \quad (2.4.268)$$

$$k = 1, \dots, 4, j = 1,2$$

Přijmeme-li předpoklad $\exp(D_k \alpha_j) \approx 1$ a $\exp(\pm \gamma \alpha_j) \approx 1$, z (2.4.259) až (2.4.268) získáme vztahy

$$W_{k1} \exp(-\pi D_k) = W_{k2} \exp(\pi D_k), k = 1, \dots, 4 \quad (2.4.269)$$

$$G_{j1} \exp(-\gamma\pi) = G_{j2} \exp(\gamma\pi), j = 1,2 \quad (2.4.270)$$

z nichž lze získat rovnice

$$r/n_0 (v_{11} + v_{12}) = [(1 - \cos\varepsilon)(1 + H_1) - g_0/n_0 \cos\varepsilon](\alpha_2 - \alpha_1) + 2H_2 d_2 \quad (2.4.271)$$

$$r/n_0 (v_{11} - v_{12}) = [2d_1 - (1 - \cos\varepsilon)(\alpha_2 + \alpha_1)](1 + H_3) \quad (2.4.272)$$

$$r/n_0 (v_{31} + v_{32}) = - [2d_1 - (1 - \cos\varepsilon)(\alpha_2 + \alpha_1)] H_4 \quad (2.4.273)$$

$$r/n_0 (v_{31} - v_{32}) = 2 - 2g_0 \cos\varepsilon/n_0 - 2[1+(n_1+n_{12})/n_0 + H_5]d_2 - (1 - \cos\varepsilon)H_6(\alpha_2 - \alpha_1) \quad (2.4.274)$$

$$r/n_0 (v_{21} + v_{22}) = \gamma \operatorname{tg}\pi\gamma[\sin\varepsilon(\alpha_2 + \alpha_1) - 2d_3] \quad (2.4.275)$$

$$r/n_0 (v_{21} - v_{22}) = - 2g_0 \sin\varepsilon/n_0 - \gamma \sin\varepsilon \operatorname{cotg}\pi\gamma(\alpha_2 - \alpha_1) \quad (2.4.276)$$

$$H_1 = D_1 D_3 G_{13} / G_{31} \quad (2.4.277)$$

$$H_2 = (D_3^2 - D_1^2) \operatorname{tg}\pi D_1 \operatorname{tg}\pi D_3 / G_{31} \quad (2.4.278)$$

$$H_3 = D_1 D_3 G_{31} / G_{13} \quad (2.4.279)$$

$$H_4 = D_1 D_3 (D_3^2 - D_1^2) \operatorname{tg}\pi D_1 \operatorname{tg}\pi D_3 / G_{13} \quad (2.4.280)$$

$$H_5 = (D_3^3 \operatorname{tg}\pi D_1 - D_1^3 \operatorname{tg}\pi D_3) / G_{31} \quad (2.4.281)$$

$$H_6 = D_1 D_3 (D_1^2 - D_3^2) / G_{31} \quad (2.4.282)$$

$$G_{ik} = D_i \operatorname{tg} \pi D_1 - D_k \operatorname{tg} \pi D_3, \quad i, k = 1, 3 \quad (2.4.283)$$

Ve vztazích (2.4.268) až (2.4.283) bylo stanoveno, že $\underline{D}_2 = -\underline{D}_1$ a $\underline{D}_4 = -\underline{D}_3$. Podmínky prvního řádu zbývající v rovnicích (2.4.199) až (2.4.203) a v podmínce (2.4.189) mohou být prezentovány ve tvaru

$$F_1 = -v_{31} - v_{32} = r^{-1} [2d_1 - (1 - \cos \varepsilon)(\alpha_2 + \alpha_1)] H_4 n_0 \quad (2.4.284)$$

$$-rF_1 = M_2 \quad (2.4.285)$$

$$F_2 = -v_{21} - v_{22} = r^{-1} n_0 \gamma \operatorname{tg} \pi \gamma [2d_3 - \sin \varepsilon (\alpha_2 + \alpha_1)] \quad (2.4.286)$$

$$P = -r^{-1} n_0 (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (2.4.287)$$

$$M_3 = n_0 \sin \varepsilon (\alpha_2 - \alpha_1) \quad (2.4.288)$$

$$\begin{aligned} v_{11} - v_{12} + v_{31}\alpha_1 + v_{32}\alpha_2 = 0 &\Rightarrow \\ \Rightarrow 2H_2 d_2 + [H_1 - (1+H_1)\cos \varepsilon](\alpha_2 - v_{11} - v_{12} + v_{31}\alpha_1 - v_{32}\alpha_2) = 0 &\Rightarrow \\ \Rightarrow [1 - g_0 \cos \varepsilon / n_0] (\alpha_2 + \alpha_1) + [2d_1 - (1 - \cos \varepsilon)(\alpha_2 + \alpha_1)](1 + H_3) = 0 &\quad (2.4.289) \end{aligned}$$

Ze vztahů (2.4.284) až (2.4.289) vyplývá, že podmínky pro stabilní valení kola ve smyku trvají vztahy $\underline{M}_2 = -rF_1$, $\underline{M}_3 = -Pr \sin \varepsilon$. Zbývající charakteristiky pro stabilní stav jsou získány z podmínek (2.4.284) až (2.4.288) ve tvaru

$$\alpha_2 - \alpha_1 = -n_0^{-1} Pr \quad (2.4.290)$$

$$\alpha_2 + \alpha_1 = -[1 - g_0 \cos \varepsilon / n_0]^{-1} (1 + H_3) H_4^{-1} - n_0^{-1} F_1 r \quad (2.4.291)$$

$$2d_1 = H_4^{-1} [1 - (1 - \cos \varepsilon) (1 - g_0 \cos \varepsilon / n_0)^{-1} (1 + H_3)] n_0^{-1} F_1 r \quad (2.4.292)$$

$$2d_3 = \cot \gamma \pi \gamma n_0^{-1} F_2 r - \sin \varepsilon [1 - g_0 \cos \varepsilon / n_0]^{-1} (1 + H_3) H_4^{-1} n_0^{-1} F_1 r \quad (2.4.293)$$

Za povšimnutí zde stojí neodolnost valícího se kola proti smyku.

2.4.7 Valení kola v klopení

Lze považovat stav valení kola v klopení za stabilní, když

$$X_1 = R \sin \omega t \quad (2.4.294)$$

$$X_2 = -R \cos \omega t \quad (2.4.295)$$

$$X_3 = \text{const.} \quad (2.4.296)$$

$$\beta = \omega t \quad (2.4.297)$$

$$\omega = \text{const.} \quad (2.4.298)$$

$$\theta' = \Omega \quad (2.4.299)$$

$$\varphi'_k = -\Omega = \text{konst.}, k = 1, 2 \quad (2.4.300)$$

$$(u, v, w)(\varphi, t) = (U, V, W)(\alpha) \quad (2.4.301)$$

$$\alpha = \varphi + \Omega t - \pi/2 \quad (2.4.302)$$

$$\mu(\varphi, t) = \mu(\alpha) \quad (2.4.303)$$

$$v_k = \text{konst.}, k = 1, 2 \quad (2.4.304)$$

$$\lambda(\varphi, t) = \lambda(\alpha) \quad (2.4.305)$$

Zde \underline{R} a $\underline{R\omega}$ jsou poloměr klopeného oblouku a úhlová rychlost kola. Pro případ, kdy se kolo valí klopením, rovnice (2.4.232) až (2.4.234) zachovávají svou formu [35], zatímco rovnice (2.4.237) až (2.4.239) jsou psány ve tvaru

$$\Omega U' - \Omega V + \omega W \sin \alpha = r^{-1} R \omega \sin \alpha \quad (2.4.306)$$

$$\Omega W' - \omega(1 + U) \sin \alpha - \omega V \cos \alpha = 0 \quad (2.4.307)$$

$$\Omega V' + \Omega(1 + U) + \omega W \cos \alpha = r^{-1} R \omega \cos \alpha \quad (2.4.308)$$

Rovnice (2.4.306) až (2.4.308) zohledňují první integrál

$$(1 + U) \cos \alpha - V \sin \alpha = X^3 r^{-1} \quad (2.4.309)$$

zatímco podmínky pro neroztažitelnost běhounu (2.4.143) až (2.4.146) se mění na

$$W'^2 + [W \omega/\Omega - R\omega/r\Omega]^2 = 1 \quad (2.4.310)$$

a obecné řešení (2.4.310) má formu

$$W = R/r - \Omega/\omega \cos[\omega/\Omega \alpha + \delta]; \quad \alpha \in [\alpha_1, \alpha_2] \quad (2.4.311)$$

kde $\underline{\delta}$ je doplňková konstanta. Dále lze obdržet z (2.4.307) a (2.4.309)

$$U = \Omega/\omega \sin[\omega/\Omega \alpha + \delta] \sin \alpha + X_3/r \cos \alpha - 1 \quad (2.4.312)$$

$$V = \Omega/\omega \sin[\omega/\Omega \alpha + \delta] \cos \alpha - X_3/r \sin \alpha - 1; \quad \alpha \in [\alpha_1, \alpha_2] \quad (2.4.313)$$

Lze obdržet rovnice [35] popisující kontaktní plochu v souřadnicové soustavě $\underline{OX_1X_2X_3}$ z (2.4.136) až (2.4.138) s $\underline{\psi = 0}$ ve tvaru

$$\xi_1 = r \Omega/\omega \sin[\beta - \omega/\Omega \alpha - \delta] \quad (2.4.314)$$

$$\xi_2 = -r \Omega/\omega \cos[\beta - \omega/\Omega \alpha - \delta] \quad (2.4.315)$$

$$\xi_3 = 0 \quad (2.4.316)$$

Ze vztahů (2.4.314) až (2.4.316) vyplývá, že plocha styku má tvar jako kruhový oblouk s centrem v bodu \underline{O} a poloměru $r \Omega/\omega$. Od okamžiku co velikost $\underline{U}, \underline{V}, \underline{W}, \alpha_1, \alpha_2$ je malá, lze dospět k závěru, že velikost $\underline{\delta}_1 = \omega/\Omega - R/r$ a $\underline{\delta}$ je malá také. Z toho důvodu, v kontaktní ploše lze získat

$$U = -d_2 \quad (2.4.317)$$

$$V = r^{-1}R\delta \quad (2.4.318)$$

$$W = -\delta_1 \quad (2.4.319)$$

$$d_2 = 1 - r^{-1} X_3 \quad (2.4.320)$$

$$U' = \alpha + \delta R/r \quad (2.4.321)$$

$$V' = d_2 \quad (2.4.322)$$

$$W' = \delta + r\alpha/R \quad (2.4.323)$$

Tvar deformovaného běhounu a jeho napětí lze získat ze vztahů (2.4.246) až (2.4.258). Rovnice (2.4.259) až (2.4.267) mají stejnou formu, jen jejich pravé strany musí být brány tímto způsobem:

$$a_{0j} = \delta R/r \quad (2.4.324)$$

$$a_{1j} = d_2 \quad (2.4.325)$$

$$a_{2j} = -R/r\delta - g_0/n_0\alpha_j - (-1)^j r v_{1j}/n_0 \quad (2.4.326)$$

$$a_{3j} = 1 - g_0/n_0 - [1 + (n_1 + n_{12})/n_0] d_2 + (-1)^j r v_{3j}/n_0 \quad (2.4.327)$$

$$G_{ms} = 1/2\gamma[-\gamma\delta_1 - (-1)^m g_0/n_0 (r/R\alpha_s + \delta) - (-1)^{m+s} r v_{2s}/n_0]; \quad m,s = 1,2 \quad (2.4.328)$$

Řešení rovnic je získáno určení používání schématu popsaného v části „*Styk kola s vozovkou v případě smyku*“. Následkem toho lze získat:

$$F_1 = [4g_0/R(D_1^2 + 1)(D_3^2 + 1) - 2n_0R/r^2]H_4\delta \quad (2.4.329)$$

$$F_2 = mR\omega^2 + 2[r g_0/R^2\gamma^2 - n_0/r] \gamma\delta_1 \operatorname{tg}\pi\gamma g_0/R[1 - r^2 g_0/n_0 R^2\gamma^2](\alpha_2 - \alpha_1) \quad (2.4.330)$$

$$P = -r^{-1}n_0(\alpha_2 - \alpha_1) \quad (2.4.331)$$

$$d_2 = -1/2H_2^{-1}(\alpha_2 - \alpha_1) \quad (2.4.332)$$

$$M_2 = [2n_0R/r - 6g_0r/R(D_1^2 + 4)(D_3^2 + 4)]H_4\delta \quad (2.4.333)$$

$$M_3 = -4g_0r H_4\delta / R(D_1^2 + 1)(D_3^2 + 1) \quad (2.4.334)$$

$$\alpha_2 + \alpha_1 = -2(1 + H_3) R/r\delta \quad (2.4.335)$$

Charakteristiky deformovaného běhounu $\underline{\alpha}_2 - \underline{\alpha}_1, \underline{\alpha}_2 + \underline{\alpha}_1, \underline{\delta}, \underline{\delta}_1, \underline{d}_2$ a momenty \underline{M}_2 a \underline{M}_3 jsou pro libovolné hodnoty $\underline{F}_1, \underline{F}_2$ a \underline{P} nalezeny v (2.4.330) až (2.4.335). Lze potom najít vztah mezi úhlovými rychlostmi $\underline{\Omega}$ a $\underline{\omega}$ použitím vztahu

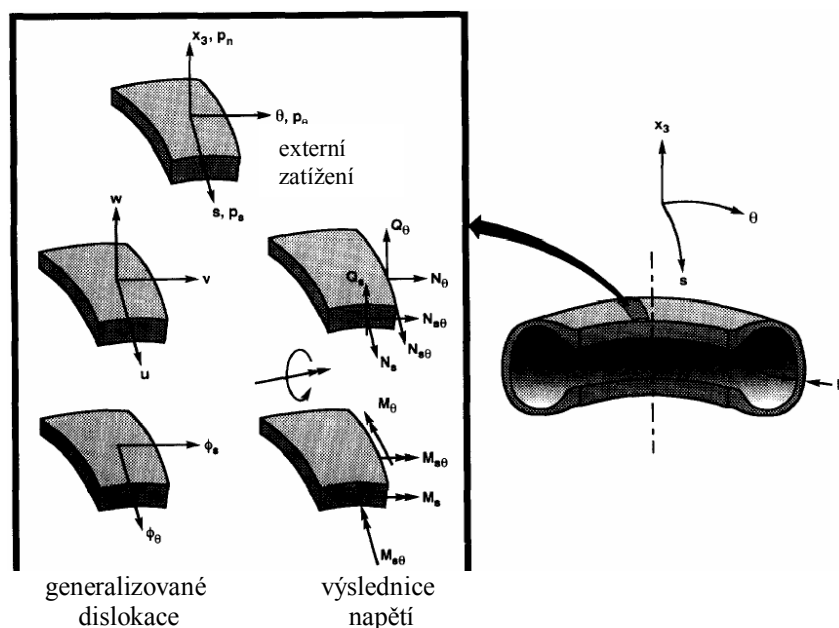
$$\underline{\Omega} = \underline{\omega}(Rr^{-1} + \delta_1) \quad (2.4.336)$$

V případě zanedbání dynamických efektů ve vztazích (2.4.290) až (2.4.293) a (2.4.329) až (2.4.335) mezi silami, momenty a veličinami charakterizujícími deformaci běhounu, podle předpokladu $\underline{g}_0 = \underline{0}$, lze dojít ke shodě s odpovídajícími vztahy získanými předtím v [2, 3, 6].

2.4.8 Predikce vlastností stykové plochy pneumatiky

Matematická formulace

Analytická formulace pro kontakt pneumatik bez tření je založený na nelineární formě, mírné rotaci, Sanders-Budianskeho typu teorie skořepin [35] s efekty variace geometrických a materiálních parametrů, anizotropní materiální odezvy a zahrnující příčnou smykovou deformaci [2,4,5]. Konvence označení zobecněných dislokací a výslednic napětí je znázorněna na obr.32.



Obr.32. Dvojměrný model pneumatiky a konvence značení externích zatížení, generalizovaných dislokací a výslednic napětí [35]

Kontaktní podmínky pro pneumatiku stlačenou proti tuhému povrchu jsou sumarizovány dále, v následující stati a jsou začleněny do formulace užitím perturbovaného Lagrangianova přístupu [35].

Základní neznámé se skládají z výslednic napětí, zobecněných dislokací a Lagrangeových multiplikátorů sružených s kontaktními podmínkami. Elementární vektory jsou získány použitím modifikovaným dvou-polovým Hellinger-Reissnerovým smíšeným

variačním principem [35]. Modifikace sestává z rostoucí funkce tohoto principu za dvou podmínek:

- 1) Lagrangeuv multiplikátor je spojen s uzlovými styčnými tlaky
- 2) sjednocení podmínky, jež je v rámci Lagrangeových multiplikátorů kvadratická [39, 40, 41, 42].

Obě výslednice sil a Lagrangeovy multiplikátory jsou považovány za diskontinuální na interelementárních hranicích.

Řídící rovnice FE (finite element)

Řídící rovnice diskrétního FE prvku odezvy kontaktu bez tření a součinitele sensitivity pneumatiky prvního řádu pneumatiky mohou být napsány v následující kompaktní formě:

$$[K]\{Z\} + \{G(Z)\} - \{P\} = 0 \quad (2.4.337)$$

a

$$[[K] + (\partial G_i / \partial Z_j)] [\partial Z / \partial \lambda] = - [\partial K / \partial \lambda] \{Z\} + \{\partial P / \partial \lambda\} \quad (2.4.338)$$

kde $[K]$ je globální lineární matice pneumatiky, která zahrnuje matici flexibility, matici posunutí lineárního napětí a matice sdružené s kontaktní podmínkou a sjednocení oboru funkce; $\{Z\}$ je globální vektor odezvy, který zahrnuje parametry výslednice tlaku, uzlové hodnoty zobecněných posunutí a uzlové hodnoty Lagrangeových multiplikátorů; $\{G(Z)\}$ je vektor nelineárních příspěvků; $\{P\}$ je globální vektor externích zatížení a počátečních mezer; λ odráží typické geometrický nebo materiální parametry pneumatiky. Forma polí $[K]$, $\{G(Z)\}$ a $\{P\}$ je daná následovně.

Tvar matic diskrétních řídicích rovnic pneumatiky

Diskrétní řídicí rovnice pneumatiky (2.4.337) se skládá ze základních vztahů (vyjádřených výslednicemi napětí a posunutí), podmínkami rovnováhy a kontaktními podmínkami. Vektor odezvy $\{Z\}$ může být rozdělen do subvektorů výslednice napětí parametrů $\{H\}$, uzlových posunutí $\{X\}$, Lagrangeových multiplikátorů spojených s kontaktními uzly, $\{\lambda'\}$, tímto způsobem:

$$\{Z\} = \begin{Bmatrix} H \\ X \\ \lambda' \end{Bmatrix} \quad (2.4.339)$$

Rozdílné matice v (2.4.337) mohou být rozděleny následovně:

$$[K] = \begin{bmatrix} -F & S & 0 \\ S^1 & 0 & Q \\ 0 & Q & R/\theta \end{bmatrix} \quad (2.4.340)$$

$$\{G(Z)\} = \begin{Bmatrix} G'(X) \\ M(H, X) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.4.341)$$

$$\{Z\} = \begin{Bmatrix} H \\ X \\ \lambda' \end{Bmatrix} \quad (2.4.342)$$

kde $[F]$ je matice koeficientů lineární flexibility; $[S]$ je matice napjatosti-posunutí; $[Q]$ a $[R]$ jsou matice spojené s kontaktní podmínkou a podmínkou sjednocení ve funkci [42]; $\{G(X)\}$ a $\{M(H, X)\}$ jsou vektory nelineárních podmínek; $\{g_0\}$ je vektor počátečních mezer v kontaktní oblasti Ω_c ; $\{P'\}$ je normalizovaný vektor externího zatížení; p je parametr zatížení; index t označuje matici superpozice [35].

K povšimnutí je, že rovnice (2.4.337) je nelineární, ale rovnice (2.4.338) je lineární. Rovnice (2.4.337) je vyřešena a kontaktní plocha a kontaktní tlaky jsou určeny za použití inkrementálně iterační techniky (to jest predikčně korektivním algoritmem), kde vektor odezvy $\{Z\}$ odpovídá partikulární hodnotě kontrolního parametru (parametr zatížení nebo posunutí) p , užívaného pro výpočet vhodné aproximace (predikce) pro $\{Z\}$ v různé hodnotě p . Tato aproximace je pak vybrána jako počáteční odhad pro $\{Z\}$ v korektivním iteračním schématu takovém jako Newton-Raphsonova technika [35]. V každé Newton-Raphsonově iteraci jsou kontaktní podmínky zkontrolovány a aktualizovány.

Matice na levé straně vztahu (2.4.338) je identická k matici užívané v Newton-Raphson iteračním procesu. Proto, vyhodnocování každého součinitele sensitivity vyžaduje jen generování pravé strany vztahu (2.4.338) a před-redukci/zpětně substituci operace (je požadováno zachování/ne dekomposice/ matice na levé straně).

Základy redukce a redukovaná soustava rovnic

Aplikace redukční techniky pro stykovou plochu pneumatiky s vozovkou, je FE model rozdělený do dvou oblastí. První se skládá z kontaktní plochy /region 1/ (to jest uzly, které přijdou pravděpodobně do kontaktu s vozovkou); a druhý /region 2/ se skládá ze všech zbývajících uzlů. Vektor odezvy $\{Z\}$ a jeho součinitelé sensitivity prvního řádu jsou rozděleny tímto způsobem:

$$\{Z\} = \begin{Bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{Bmatrix} \quad (2.4.343)$$

$$\{\partial Z / \partial \lambda\} = \begin{Bmatrix} \partial Z_1 / \partial \lambda \\ \partial Z_2 / \partial \lambda \end{Bmatrix} \quad (2.4.344)$$

kde dolní indexy 1 a 2 značí subvektory vztažené k regionu 1 a 2. Od subvektorů $\{Z_1\}$ a $\{\partial Z_2 / \partial \lambda\}$ je předpokládáno, že zobrazí významné změny v působícím zatížení (nebo posunutí), a proto nejsou jen přibližné. Naopak subvektory $\{Z_2\}$ a $\{\partial Z_1 / \partial \lambda\}$ jsou aproximovány lineární kombinací několika předvolenými základními vektory, od chvíle, kdy není očekávána změna odezvy pneumatiky z kontaktní plochy. Aproximace vektorů $\{Z_1\}$ a $\{\partial Z / \partial \lambda\}$ může být vyjádřena následujícími transformacemi

$$\begin{Bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I & O \\ O & \Gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Z_1 \\ \Psi \end{Bmatrix} \quad (2.4.345)$$

$$\begin{Bmatrix} \partial Z_1 / \partial \lambda \\ \partial Z_2 / \partial \lambda \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I & O \\ O & \Gamma \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \partial Z_1 / \partial \lambda \\ \partial \Psi / \partial \lambda \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \partial \Gamma / \partial \lambda \end{bmatrix} \{\Psi\} \quad (2.4.346)$$

kde $[I]$ je matice rovnosti; sloupce matic $[\Gamma]$ a $[\partial \Gamma / \partial \lambda]$ v (2.4.345) a (2.4.346) jsou vektory globální aproximace (nebo báze). Elementy vektorů $\{\Psi\}$ a $\{\partial \Psi / \partial \lambda\}$ jsou aproximací vektorů amplitudy, které jsou zatím neznámé. Za povšimnutí stojí to, že počet bází vektorů v (2.4.345) a (2.4.346) je značně menší než celkový počet stupňů volnosti vektorů $\{Z_2\}$ a $\{\partial Z_2 / \partial \lambda\}$.

Bubnov-Galerkinovu techniku [35] je nyní zvykem zaměnit řídicí rovnici pro kontaktní odezvu a její součinitele sensitivity, (2.4.337) a (2.4.338), příslušně dvěma redukovanými soustavami rovnic, nelineární soustavou rovnic v $\{Z_1\}$, $\{\Psi\}$ a lineární soustavou rovnic v $\{\partial Z_1 / \partial \lambda\}$, $\{\partial \Psi / \partial \lambda\}$.

Výběr a generace bází vektorů

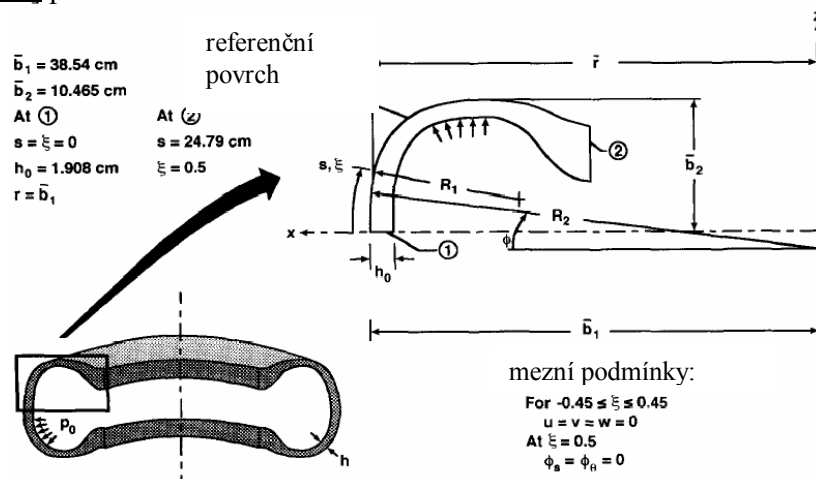
Efektivita redukční techniky pro vypočítávanou odezvu pneumatiky se stykovou plochou vozovky a její součinitelé sensitivity závisí do značné míry na řádné volbě bází vektorů (sloupce matic $[\Gamma]$ a $[\Gamma]$). Efektivní volba pro báze vektorů využívá aproximace vektoru odezvy $\{Z_2\}$, v (1.370) byla nalezena existence stopy variačním postupem derivace (derivace podle kontrolního parametru \underline{p}), to je matice $[\Gamma]$ použitá v aproximaci $\{Z_2\}$, přes rozsah hodnot \underline{p} , zahrnující vektor odezvy odpovídající částečné hodnotě \underline{p} (viz. \underline{p}^0) a jeho různé řády derivace podle \underline{p} , vyčíslené ve stejné hodnotě \underline{p}^0 , nebo

$$[\Gamma] = [\{Z_2\} \{\partial Z_2 / \partial p\} \{\partial^2 Z_2 / \partial p^2\} \{\partial^3 Z_2 / \partial p^3\}, \dots] p^0 \quad (2.4.347)$$

Aproximace za $\{\partial Z_2 / \partial \lambda\}$, v (2.4.346) zahrnuje obě cesty derivace $\{Z_2\}$ (sloupce matice $[\Gamma]$) a jejich první derivace podle $\underline{\lambda}$.

Proto, počet vektorů použitých v aproximaci $\{\partial Z_2 / \partial \lambda\}$ je dvojnásobný než v aproximaci $\{Z_2\}$. Derivační cesty (sloupce matice $[\Gamma]$) jsou získány následným derivováním FE řídicí rovnice pneumatiky, (2.4.337) podle parametru \underline{p} . Rekurze vztahů pro vyčíslení derivační cesty jsou dány v [43]. Za povšimnutí stojí, že jediná matice faktorizace stačí pro generaci všech derivačních cest.

Derivace $[\Gamma]$ podle $\underline{\lambda}$, $[\partial \Gamma / \partial \lambda]$, jsou získány derivováním každého z rekurzivních vztahů pro vyčíslení derivační cesty (derivace podle $\underline{\lambda}$). Výsledné rovnice mají stejné levé strany jako původní rekurzivní rovnice, a proto žádná další matice rozložení činitelů není pro generaci $[\partial \Gamma / \partial \lambda]$ potřebná.



Obr.33. Geometrické charakteristiky pneumatiky modelu předního kola raketoplánu [35]

Výpočtová procedura

Výpočtová procedura pro generaci nelineárního subvektoru odezvy $\{Z_2\}$ a jeho koeficientů sensitivity $\{\partial Z_2/\partial \lambda\}$ může být pohodlně rozdělena do dvou odlišných fází, totiž:

- 1) vyčíslení bází vektorů v partikulární hodnotě p (p^0), sloupce z matic $[\Gamma]$, $[\Gamma']$ a generace redukováných rovnic;
- 2) postup s redukovánými rovnicemi v řešeném prostoru a generace odezvy a součinitelů sensitivity v různých hodnotách p . Pro každou hodnotu p , je vektor redukované neznámé $\{\Psi\}$ získán řešením redukované soustavy nelineárních rovnic. Pak je vektor $\{\partial \Psi/\partial \lambda\}$ asociovaný se stejnou hodnotou $\{\Psi\}$ vyčíslen řešením redukované soustavy lineárních rovnic. Subvektor odezvy a jeho součinitelé sensitivity, $\{Z_2\}$ a $\{\partial Z_2/\partial \lambda\}$ jsou získány užitím vztahů (2.4.345) a (2.4.346). Proces se opakuje pro různé hodnoty p .

Numerické studie

Numerické studie slouží k testování a vyčíslení efektivity předcházející redukční techniky. Touto technikou také byla vygenerována odezva kontaktu bez tření příďové pneumatiky raketoplánu a její součinitelé sensitivity. Srovnání byla provedena s kontaktní odezvou a součiniteli sensitivity získaných použitím plné soustavy rovnic modelu konečných prvků. Geometrické a materiálové charakteristiky pro pneumatiku jsou uvedeny na obr.33 a 34. a v tabulkách T2.4.1. a T2.4.2. Každá polovina příčného řezu pneumatiky byla rozdělena na sedm částí jak ukazuje obr.34. Každá část obsahovala různé množství vrstev, různé materiální vlastnosti odpovídající různému obsahu kordů v kompositu a proměnné orientaci kordu. Zohlednění konce kordu a tloušťky vrstvy v různých regionech jsou dle [42]. Pro vyhlazení experimentálních dat (v [42]), která byla užívána pro definování geometrických a materiálních charakteristik dvojrozměrného skořepinového modelu byla použita křivka kubické interpolace. Vnější povrch pneumatiky byl vybrán s odvoláním na povrch skořepinového modelu. Variace zohlednění ukončení kordů, rozložení a jejich úhel s meridiálním směrem, byly aproximovány následujícími vzorci:

$$e_{pi} = b_0 + b_1 \xi + b_2 \xi^2 + b_3 \xi^3 \quad (2.4.348)$$

$$\theta' = \theta_0 - \theta_1 \xi - \theta_2 \xi^2 \quad (2.4.349)$$

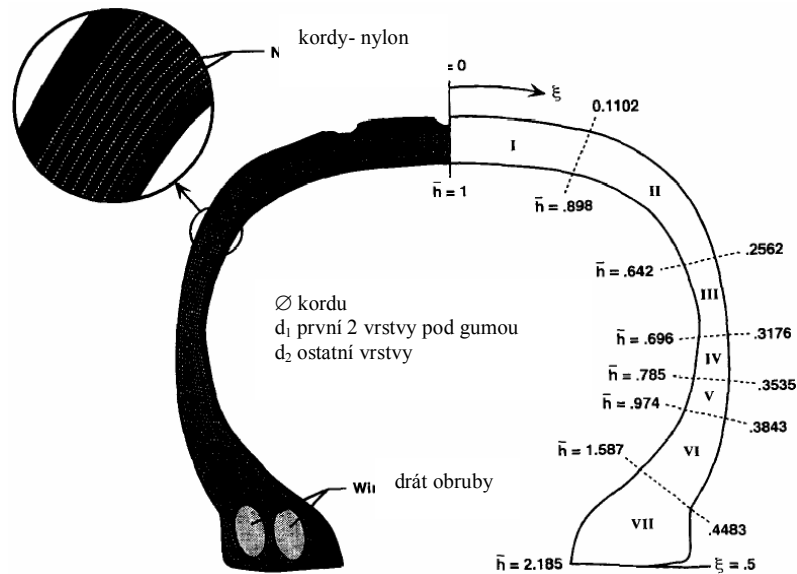
kde číselné hodnoty b_0, b_1, b_2, b_3 jsou dané v tabulce 1.01; $\theta_0 = 54,38$; $\theta_1 = 3.884$; $\theta_2 = 148.96$; a hodnoty úhlů kordu θ' jsou dané v tabulce T2.4.1.

Vrstva č. (shora dolů)	θ' , pro region							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	
1.		G	G	G	G	G	G	G
2.		$-\theta' - 6$	θ'	θ'	θ'	θ'	θ'	θ'
3.		θ'	$-\theta'$	$-\theta'$	$-\theta'$	$-\theta'$	$-\theta'$	$-\theta'$
4.		$-\theta'$	θ'	θ'	θ'	θ'	θ'	θ'
5.		θ'	$-\theta'$	$-\theta'$	θ'	$-\theta'$	$-\theta'$	$-\theta'$
6.		$-\theta'$	θ'	θ'	$-\theta'$	θ'	θ'	*
7.		θ'	$-\theta'$	$-\theta'$	θ'	$-\theta'$	$-\theta'$	θ'
8.		$-\theta'$	θ'	θ'	$-\theta'$	θ'	θ'	$-\theta'$
9.		θ'	$-\theta'$	$-\theta'$	θ'	$-\theta'$	$-\theta'$	θ'
10.		$-\theta'$	$\theta' + 6$	$\theta' + 6$	$-\theta'$	θ'	θ'	$-\theta'$

11.	$\theta'+6$	$-\theta'-6$	$-\theta'-6$	$\theta'+6$	$-\theta'$	$-\theta'$	*
12.	$-\theta'-6$	G	G	$-\theta'-6$	$\theta'+6$	θ'	θ'
13.	G			G	$-\theta'-6$	$-\theta'$	$-\theta'$
14.					G	$\theta'+6$	$\theta'+6$
15.						$-\theta'-6$	$-\theta'-6$
16.						G	G

G ... guma,
* ... obruba

Tabulka T2.4.1. Variace orientace úhlů kordů v jednotlivých vrstvách θ' , podél meridiánu regionů



Obr.34. Příčný řez pneumatikou a variace tloušťek použitých ve výpočtu pro pneumatiku předového kola raketoplánu ($h' = h/h_0$, $h_0 = 1,908\text{cm}$), zkoumaný uvedenou studií [35]

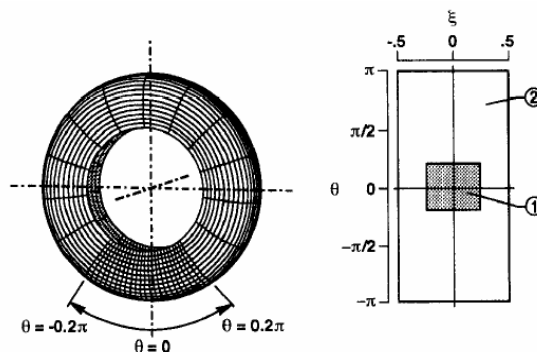
č.	Youngův modul E [Pa]	smykový modul G [Pa]	Poissonovo
Guma	$3,10 \times 10^6$	$1,04 \times 10^6$	0,49
Nylonové kordy	$2,41 \times 10^9$	$4,83 \times 10^6$	0,66
Obruba	$2,00 \times 10^{11}$	$7,69 \times 10^{10}$	0,30

Jakmile vzniknou deformace, jsou malé v oblasti obruby, což je přijatelné pro předpoklad, že jsou dráty v obrubě isotropní.

Tabulka T2.4.2. Hodnoty elastických konstant prvků pneumatiky použitých v [35]

Numerické studie byly provedeny použitím dvojrozměrného FE modelu pro diskretizaci pneumatiky, demonstrováno obr.35. Bilineární interpolace [35] funkcí jsou užívány pro aproximace každé z výslednic napětí a bikvadratické Lagrangianovy interpolace funkcí je užíváno pro aproximaci každého ze zobecněných posunutí a Lagrangieových multiplikátorů. Výslednice napětí a Lagrangieovy multiplikátory jsou považovány za nespojitelné v interelementárním styku. Integrály v řídicích rovnicích jsou vyčísleny použitím dvou bodové Gauss-Legendreovy numerické kvadraturní formule. Celkem bylo použito 1080 FE v modelování plné pneumatiky (8640 parametrů výslednic napětí a 20736 nenulových zobecněných posunutí). Tři komponenty posunutí v oblasti $0,45 < \xi < 0,5$ jsou totálně odměřené a navíc komponenty rotace jsou odměřeny v $\xi = 0,5$. Za povšimnutí stojí, že výpočetní modely mohou být redukovány na jeden kvadrant pneumatiky použitím technik

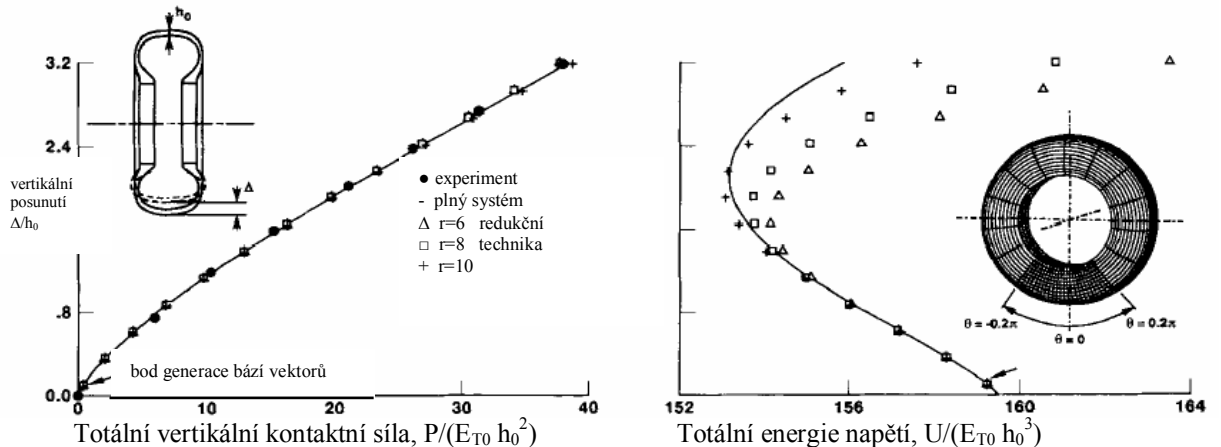
popsaných v [36]. Vybrané dvě oblasti modelu pneumatiky jsou na obr.35. Region 1 je příliš nadhodnocenou kontaktní oblastí. Na pneumatiku byl aplikován plný tlak huštění 2.206Mpa. Pak byla nahuštěná pneumatika stlačena proti tuhé vozovce a aplikováno posunutí při nárůstu $\Delta/h_0 = 3,2$. Pro rozdělení znázorněné v obr.35., byly báze vektorů generovány v $\Delta/h_0 = 0,1$, následně byly vygenerovány redukované rovnice pro vyčíslení kontaktní odezvy bez tření a součinitelů sensitivity. Báze vektorů nebyly aktualizovány v rozsahu uvažovaného aplikovaného posunutí a vyplývající redukovaná soustava rovnic byla použita pro generování odezvy pneumatiky a součinitelů sensitivity až $\Delta/h_0 = 3,2$. Pro vyhodnocení efektivity předcházející redukční techniky, byly nelineární kontaktní odezva bez tření a její součinitel sensitivity získané použitím předcházející redukční techniky, srovnávány s těmi, které byly získány řešením plné soustavy rovnic. Typické výsledky jsou uvedeny na obr.36.-41., a jsou diskutovány postupně.



Sektor	počet elementů	počet nenulových posunutí
$-0,2\pi \leq \theta \leq 0,2\pi$	720 (30x20)	13867
$\theta < -0,2\pi$	360 (30x12)	6509
$\theta > 0,2\pi$		
Region 1	432 (18x24)	9065
Region 2	648	20376

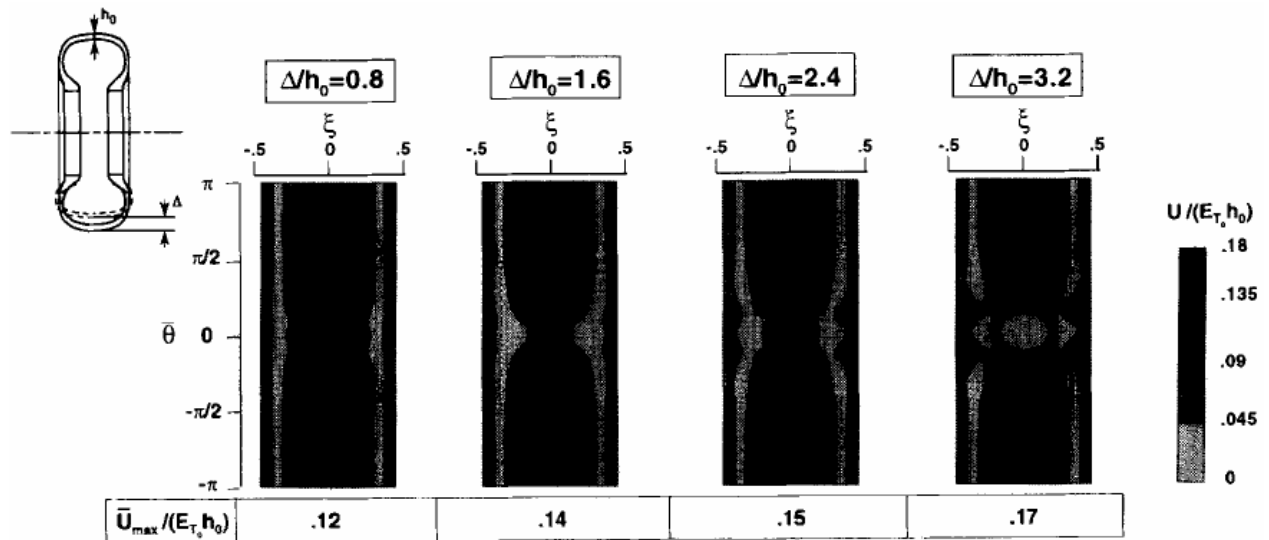
Obr.35. FE model pneumatiky předřového kola raketoplánu zkoumaný uvedenou studií [36]

Obr.36 znázorňuje grafy aplikovaného posunutí proti totální svislé kontaktní síle a totální energii napětí \underline{U} , v regionu $-0,45 < \xi < 0,45$, získané jak redukční technikou tak plnou soustavou rovnic. Pro rozsah Δ/h_0 lze považovat totální svislou kontaktní sílu získanou používáním 10 bází vektorů za totožnou s tou, získanou používáním plného systému rovnic FE. Nepřesnost v úhrnu energie napětí získaného používáním 10 vektorů, byla méně než 2% (stupnice vyznačená v obr.36. zvýrazňuje tuto nepřesnost).

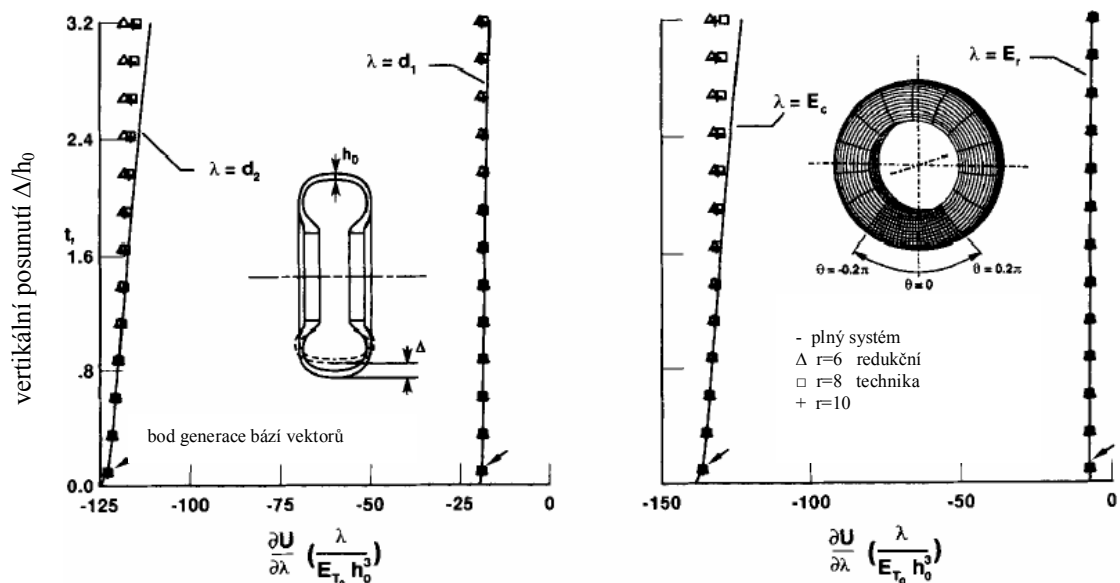


Obr.36. Přesnost nelineární odezvy pneumatiky obdržené redukční technikou [36]

Obr.37. znázorňuje variaci koncentrace energie napětí s aplikovaným posunutím v regionu $-0,45 < \xi < 0,45$. Kontury koncentrace energie napětí jsou normalizovány jejich dělením pomocí $E_T \theta h_0$. Koncentrace energie napětí je v první řadě ovlivněna tlakem huštění. Protože normálové tažné síly spojené s kontaktem jsou kompresivní, je koncentrace energie napětí redukována v kontaktním regionu právě tak, jako v oblasti boční stěny blízko patky pneumatiky (daleko od regionu kontaktního).

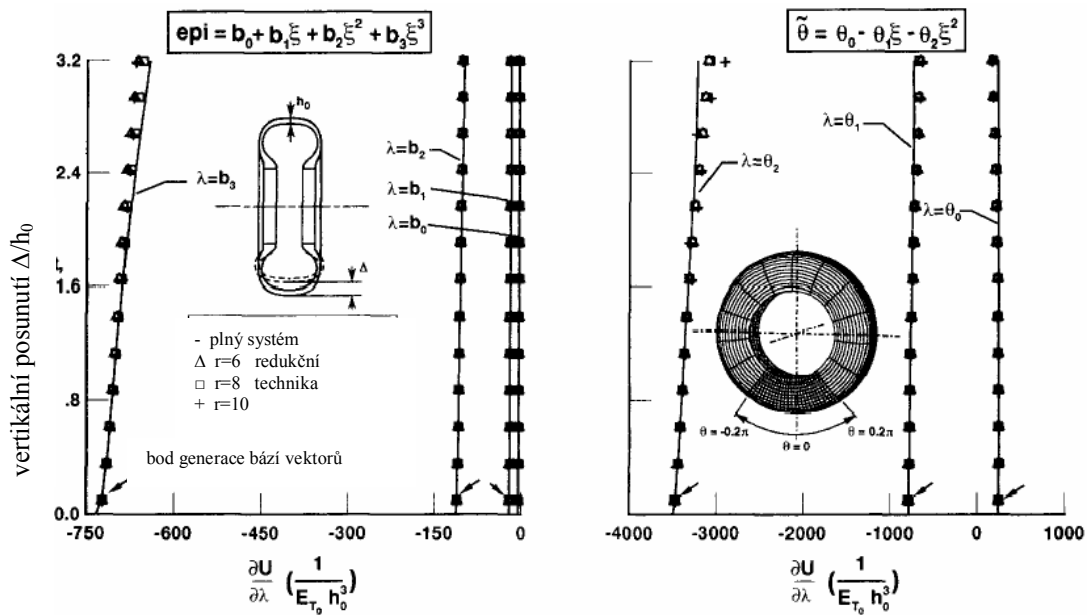


Obr.37. Variace energie napětí rozdělení hustoty s aplikovaným posunutím [36]

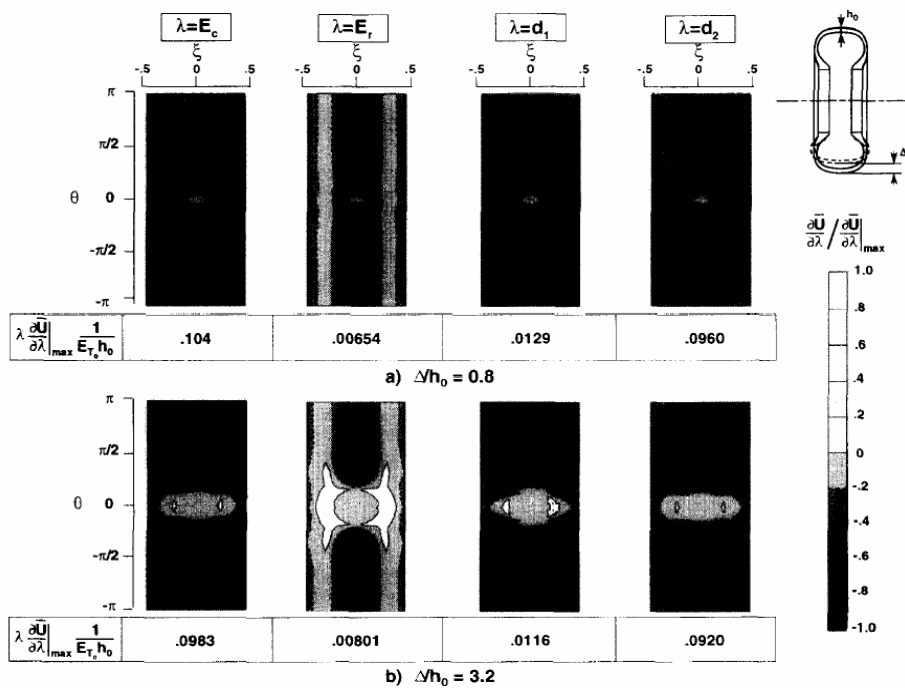


Obr.38. Přesnost koeficientů sensitivity totální energie napětí, respektující průměr kordu a Youngův modul [36].

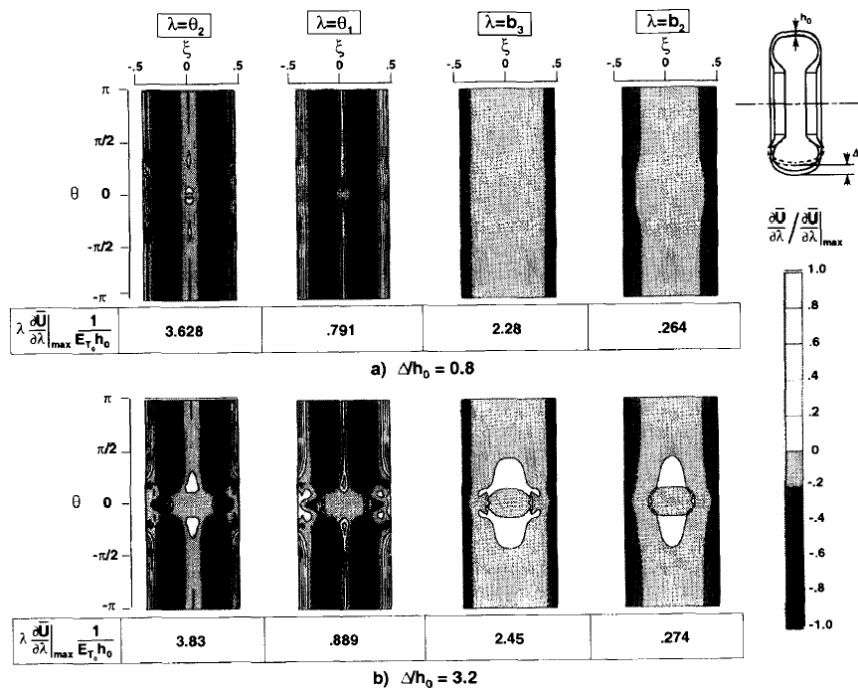
Obr.38. a obr.39. uvádějí indikaci přesnosti součinitelů sensitivity totální energie napětí získané používáním redukční techniky s $r = 6, 8$ a 10 . Na obr.38. jsou součinitelé sensitivity s ohledem na Youngův modul kordu E_c i guma E_r a průměr kordu d_1 a d_2 . Na obr.39. jsou pak součinitelé sensitivity s ohledem na úhel kordu $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ a parametry ukončení kordů b_0, b_1, b_2, b_3 . Je zde patrné, že rozumná přesnost je získána s jen 10 základními vektory.



Obr.39. Přesnost koeficientů sensitivity totální energie napětí, respektující úhel kordů a jejich ukončení v regionu 2 [36]



Obr.40. Normalizované diagramy kontur pro koeficienty sensitivity hustoty energie napětí, respektující Youngův modul a průměry kordů [36]



Obr.41. Normalizované diagramy kontur pro koeficienty sensitivity hustoty energie napětí, respektující úhel kordů a jejich ukončení v regionu 2 [36]

Obr.40. a obr.41. znázorňují grafy kontur normalizovaných součinitelů sensitivity koncentrace energie napětí \underline{U}' pneumatiky s ohledem na osm parametrů pneumatiky (E_C , E_r , \underline{d}_1 , \underline{d}_2 , $\underline{\theta}_1$, $\underline{\theta}_2$, \underline{b}_2 , \underline{b}_3) v $\Delta/h_0 = 0,8$ a $\Delta/h_0 = 3,2$. Každý součinitel sensitivity je normalizován podle rozdělení jeho maximální hodnoty v existující Δ/h_0 . Je zde patrné, že distribuce součinitelů sensitivity \underline{U}' se od sebe a od odpovídajících distribucí \underline{U}' liší. Také, distribuce součinitelů sensitivity z plochy styku zbývají téměř axisymetricky.

Závěrečné poznámky

Redukční technika a výpočtový algoritmus jsou prezentovány pro predikci bez třecí kontaktní odezvy pneumatiky a ohodnocení koeficientů sensitivity různých kvantit odezvy. Pneumatika je modelována za použití nelineární volné rotace Sanders-Budianského teorie skořepin [35] s efekty variací geometrických a materiálních parametrů, a zahrnující anizotropní materiální odezvy i příčné smykové deformace. Kontaktní podmínky jsou začleněny do formulace použitím perturbovaného Lagrangieova postupu s fundamentálními neznámými skládající se z výsledného napětí, zobecněných posunutí a Lagrangieova multiplikátoru spojeného s kontaktními podmínkami. Řídící FE rovnice jsou získané používáním upraveného dvou-polového Hellinger-Reissnerova variačního principu.

Pro aplikaci redukční techniky je FE model pneumatiky rozdělen do dvou regionů: První region se skládá z uzlů, které pravděpodobně přicházejí do kontaktu s vozovkou, a druhý region zahrnuje všechny zbývající uzly. Redukční technika je užívána pro významnou redukci stupňů volnosti ve druhém regionu. Subvektor strukturální odezvy ve druhém regionu a jeho koeficienty sensitivity prvního řádu (derivate podle různých geometrických a materiálních parametrů pneumatiky), jsou vyjádřeny jako lineární kombinace malého počtu bází (nebo globální aproximace) vektorů. Bubnov-Galerkinovou technikou je pak zvykem aproximovat menší množství algebraických rovnic každého FE řídicí rovnice odezvy a koeficienty sensitivity.

Neznámé v těchto rovnicích se skládají z množství odezvy (a jejich koeficientů sensitivity) v kontaktním regionu a amplitudy základních vektorů, použitých aproximačních množství odezvy (a jejich koeficientů sensitivity) ve zbytku pneumatiky. Kombinaci derivační cesty a derivace podle parametrů pneumatiky je užíváno pro aproximaci koeficientů sensitivity.

Efektivita bází vektorů v aproximaci odezvy pneumatiky a koeficientů sensitivity byla ověřena numerickým příkladem pneumatiky příďového kola raketoplánu vystavené stálému tlaku huštění a následnému přitlačení proti tuhé vozovce. Zahrnuté parametry pneumatiky jsou jednak materiální vlastnosti kordu a gumy, ale také průměry kordů a jejich úhly.

2.4.9 Popis ideální stykové plochy

Pro idealizaci popisu stykové plochy mezi pneumatikou a vozovkou lze uvažovat pneumatiku hladkou (bez dezénu) jako membránu tvaru toroidu s nulovou ohybovou tuhostí [45]. Jako vozovku pak ideálně rovinnou desku-podložku bez textury. Pneumatika – membrána, je k vozovce tisknuta kolmou silou ve směru podélné osy pneumatiky. Není zde uvažován závlek, adheze, tření, prokluz, huštění, směrová úchylnka valení ani vliv boční síly. Jedná se o teoretický styk pneumatika-vozovka, se záměrným opomenutím nemožnosti rozvinutí toroidu v rovině a tedy deformace stykové plochy během skutečné pneumatiky se skutečnou vozovkou, kde musí docházet současně k ohybu a kompresi povrchu pneumatiky. To znamená, že elementy během styku s vozovkou budou vystaveny deformaci tak, jak elementy procházejí stopou valící se pneumatiky a vystupují na zadní hraně stopy.

Membrána tvaru toroidu, demonstruje pneumatiku s nulovou ohybovou tuhostí. Je schopna se otisknout na plochu (vozovku) vhodným stlačením. Idealizovaná geometrie kontaktu mezi toroidem a vozovkou je tvaru elipsy. Protože styčná plocha má eliptický tvar, je její velikost

$$A = \pi L/2 b/2 = \pi \delta \sqrt{(w-\delta)(D_c - \delta)} \approx \pi \delta \sqrt{D_c} w \quad (2.4.350)$$

kde

$$L, b \dots \text{ osy elipsy, } L - \text{ délka stopy} \quad L/2 = \delta^{1/2} (D_c - \delta)^{1/2} \quad (2.4.351)$$

$$b - \text{ šířka stopy} \quad b/2 = \delta^{1/2} (w - \delta)^{1/2} \quad (2.4.352)$$

w ... ø toroidu v příčném řezu

D ... ø toroidu v podélném

δ ... výškový rozdíl mezi stlačeným a volným toroidem

2.4.10 Teoretický popis stavu při přejezdu kola přes překážku (nerovnost) na vozovce

Pro překážky typu expanzních spojů betonu, které jsou uspořádány ve stopě meridiálně [46] (rovnoběžně s osou kola), je primárně indukován obvodový moment v kompozitu pryž-kord ve stopě. Tedy za předpokladu válcového ohybu:

$$N_\xi = A_{22} \epsilon_\xi + B_{22} K_\xi = 0 \quad (2.4.353)$$

$$\text{nebo } \epsilon_\xi = -B_{22} K_\xi / A_{22} \quad (2.4.354)$$

$$\text{a } M_\xi = B_{22} \epsilon_\xi + D_{22} K_\xi \quad (2.4.355)$$

takže po substituci za ϵ_ξ do posledního výrazu:

$$M_{\xi} = (D_{22} - B_{22}^2 / A_{22}) K_{\xi} \quad (2.4.356)$$

Rovnice (2.4.356) je vztah moment – zakřivení popisující deformaci trámce, odvozený v elementární mechanice materiálů, který ovšem nyní zahrnuje efekt anizotropie. Výraz v závorce v rovnici (2.4.356) je ekvivalentní ohybové tuhosti trámce (obvykle označované pro izotropní materiály EI , kde E je Youngův modul materiálu trámce a I je plošný moment setrvačnosti okolo neutrální osy). Ohybová tuhost je mírou tuhosti trámce v ohybu, protože zahrnuje jak materiálové vlastnosti, tak geometrii průřezu. Obvodovou ohybovou tuhost $(EI)_{\xi}$ laminátu pryž-kord používaného v pneumatikách lze tedy vyjádřit jako

$$(EI)_{\xi} = D_{22} - B_{22}^2 / A_{22} \quad (2.4.357)$$

přičemž pro homogenní, izotropní materiál platí

$$D_{22} = Eh^3 / 12 (1 - \nu^2) \quad (2.4.358)$$

$$A_{22} = Eh / (1 - \nu^2) \quad (2.4.359)$$

$$B_{22} = 0 \quad (2.4.360)$$

takže je získán výraz pro ohybovou tuhost

$$EI = Eh^3 / 12 (1 - \nu^2) \quad (2.4.361)$$

podobně v meridiánovém směru platí

$$(EI)_{\Phi} = D_{11} - B_{11}^2 / A_{11} \quad (2.4.362)$$

Je-li možné považovat laminát za speciálně ortotropní, redukuje se rovnice pro ohybovou tuhost (2.4.357) a (2.4.362) na rovnice (2.4.363) a (2.4.364)

$$(EI)_{\Phi} = E_{\Phi} t^3 / 12 (1 - \nu_{\Phi\xi} \nu_{\xi\Phi}) = A_{11} t^2 / 12 \quad (2.4.363)$$

$$(EI)_{\xi} = E_{\xi} t^3 / 12 (1 - \nu_{\Phi\xi} \nu_{\xi\Phi}) = A_{22} t^2 / 12 \quad (2.4.364)$$

kde

$$\text{Poissonův poměr} \quad \nu_{\Phi\xi} = A_{12} / A_{22} \quad (2.4.365)$$

$$\nu_{\xi\Phi} = A_{12} / A_{11} \quad (2.4.366)$$

2.4.11 Soudržnost pneumatiky s vozovkou, při zanedbání aerodynamických sil a valivého odporu

Vztahy mezi silami působícími na kolo a změnami jeho rychlosti, rovnice umožňující semikvantitativní popis funkčních vztahů [49]:

Základní veličinou je skluz \underline{s} , což je vektorová kinematická veličina definovaná rovnicí

$$\underline{s} = (\underline{v} - \underline{v}_0) / |\underline{v}| \quad (2.4.367)$$

Kde \underline{v} je rychlost pohybu vozovky vzhledem k ose kola a \underline{v}_0 je obvodová rychlost kola v rovině styčné plochy rovněž vzhledem k ose kola. Jestliže se kolo valí ve směru, který svírá s jeho rovinou úhel $\underline{\theta}$ (boční skluz), je

$$s = \sin\theta \quad (2.4.368)$$

Čistý obvodový skluz je dán rovnicí

$$S = 1 - v_0 / v \quad (2.4.369)$$

Při brzdění ($v > v_0$) je s kladné s maximální hodnotou 1 pro zablokované kolo. Při zrychlení ($v < v_0$) je s negativní a stává se záporně nekonečným při statickém protáčení kola. Obvodový skluz má jednoduchý fyzikální smysl. Během brzdění se kinetická energie spotřebovává v brzdách, pneumatikách a vozovce. Vozovka, i když nedojde k její významnější deformaci, přijímá značnou část brzděné energie jako teplo [49]. Skluz představuje část energie ztracené v pneumatikách a vozovce. Podobně se část energie motoru ztrácí v pneumatikách při zrychlení; skluz se udává jako poměr mezi ztrátami v pneumatice plus vozovce a ziskem kinetické energie vozidla. Tedy jeho negativní hodnota má limit v nekonečnu.

Exaktní výpočet sil na pneumatice, pohybující se skluzem, je mimořádně obtížný z důvodu složitosti struktury pneumatiky. Ovšem, lze odvodit výrazy pro jednoduchý model, jenž nahrazuje pneumatiku ozubeným kolem. Jednotlivé zuby kola se mohou vzájemně nezávisle deformovat a jejich napětově deformační vztah se řídí Hookovým zákonem [49].

Do výpočtů je třeba zahrnout koeficient tření. Bez zřetele k jeho závislosti (v případě pryže) na teplotě, rychlosti klouzání a zatížení, jej lze brát jako konstantu. Protože předpokládáme platnost Hookova zákona, vzrůstá boční záběr nejprve rychlostí úměrnou tuhosti k_s kola

$$F_s = k_s X \operatorname{tg}\theta \quad (2.4.370)$$

kde X je koordináta povrchového prvku relativně k nedeformovanému kolu. Limita tangenciálního záběru $\underline{\mu p}$ znázorňována jako polooválná křivka, $\underline{\mu}$ koeficient tření a \underline{F}_p normálová síla na jednotku délky. Je-li $\underline{F}_s = \underline{\mu F}_p$ v bodě \underline{X}_l (bod, kde kolmice na koordinátu povrchového prvku dosahuje největší délky při protnutí polooválné křivky limity tangenciálního záběru $\underline{\mu p}$), potom začíná klouzání a \underline{F}_s ve zbytku kontaktu je

$$F_s = \mu F_p \quad (2.4.371)$$

Při distribuci síly \underline{F}_c vyvolané obvodovým skluzem, nahradí rovnicí (1.398) rovnice

$$F_c = k_c X s / (1 - s) \quad (2.4.372)$$

tuhost k_c je podstatně větší než k_s . Boční síla \underline{F}_s , brzdná síla \underline{F}_b a hnací síla \underline{F}_a jsou tedy formálně dány stejným typem výrazů. Je-li distribuce normálového tlaku vzata jako eliptická podél styčné plochy a konstantní napříč, lze odvodit, že

$$F = (\mu Q / \pi) (\sin^{-1} 2c / (1 + c^2) + 2c / (1 + c^2)) \quad (2.4.373)$$

kde \underline{F} nahrazuje \underline{F}_s , \underline{F}_b , \underline{F}_a , Q je normálové zatížení a c je definováno jako

$$c = \pi / 8 (k_s a^2 / \mu Q) \operatorname{tg}\theta \quad \text{pro boční skluz} \quad (2.4.374)$$

$$c = \pi / 8 (k_c a^2 / \mu Q) / (1 - s) \quad \text{pro obvodový skluz} \quad (2.4.375)$$

Z rovnice (2.4.373) plyne, že za nízkého skluzu se redukuje na

$$(F_s)_{\text{malý skluz}} = \frac{1}{2} k_s a^2 \theta \quad (2.4.376)$$

$$(F_b)_{\text{malý skluz}} = (F_a)_{\text{malý skluz}} = \frac{1}{2} k_c a^2 s \quad (2.4.377)$$

Z rovnic (2.4.376) a (2.4.377) vymizel koeficient tření, protože příspěvek oblasti klouzání ve styčné ploše se stává zanedbatelným a význam má pouze tuhost kola. Lineární vztah mezi silou a skluzem popisuje Hookův zákon. Při velkém skluzu nebo malém koeficientu tření \underline{F} směřuje asymptoticky k hodnotě $\underline{\mu\theta}$. Adhezní složka, jež je pro \underline{F} dominantní při malých hodnotách \underline{c} , dosahuje maxima při

$$c = 1 / \sqrt{3} \quad (2.4.378)$$

a je převážena kluzovou složkou, když \underline{c} přesáhne 0,82. Pneumatiky pracují občas pod současným působením bočního a podélného skluzu. Síly vznikající za těchto podmínek se liší od sil při jediném druhu skluzu. Obvodový záběr \underline{F}_c působí ve styčné ploše společně s bočním záběrem \underline{F}_s . Tím vzniká výsledná síla na jednotku délky \underline{t} ve tvaru

$$F = (F_s^2 + F_c^2)^{1/2} \quad (2.4.379)$$

a skluz nastává, když se tato kombinovaná síla rovná $\underline{\mu F}_p$. Bod \underline{X}_1 se tedy posouvá vpřed v porovnání s případem, kdy působí pouze jeden ze záběrů. [49] Dále, frikční síla v oblasti klouzání je nyní přenášena jak boční, tak obvodovou tuhostí pneumatiky, takže pro boční sílu je k dispozici pouze část kluzné frikce. Tyto úvahy lze aplikovat na brzdné i hnací síly, jež snižují boční sílu ekvivalentně. Pro boční sílu \underline{F}_s jako funkci současného bočního skluzu $\underline{\theta}$ a obvodového skluzu \underline{s} dává teorie tyto vztahy:

$$F_s = \mu Q / \pi * k_s \sin\theta / k_s^2 \sin^2 \theta + k_c^2 s^2)^{1/2} [\sin^{-1} 2c / (1 + c^2) + 2c / (1 + c^2)] \quad (2.4.380)$$

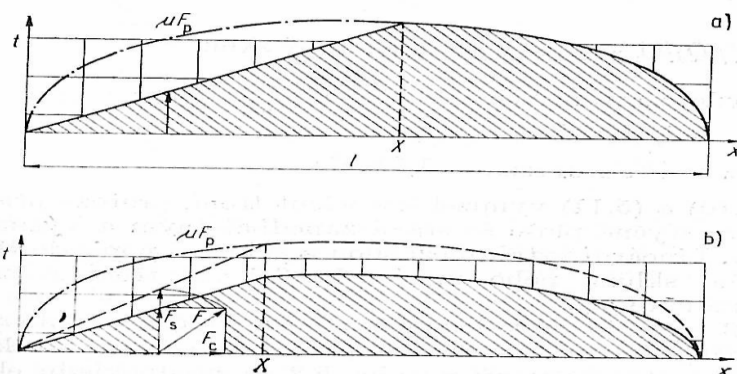
kde

$$s = \cos\theta - v_0/v \quad (2.4.381)$$

$$c = \pi / 8 * ((k_s^2 \sin^2 \theta + k_c^2 s^2)^{1/2} / (\cos\theta - s)) * a^2 / \mu\theta \quad (2.4.382)$$

Poměr mezi boční silou a brzdnou či akcelerační je

$$F_s / F_b = F_s / F_a = (k_s \sin\theta) / (k_c s) \quad (2.4.383)$$



Obr.42.a) Horizontální průřez stykové plochy kola při skluzu pod úhlem.

b) Současné působení skluzu pod úhlem a obvodového skluzu. [49]

-.-.-. limitní tangenciální síla (μF_p), _____ boční síla na jednotku délky (F_s), celková tangenciální síla na jednotku délky (F), obvodová síla v důsledku skluzu na jednotku délky (F_c), délka stopy (l), šrafovaná plocha – celková boční síla

2.4.12 Valivý odpor

Odpor valivý vzniká deformací pneumatiky a vozovky. Je-li vozovka tuhá, pak dochází jen k deformaci pneumatiky. Pneumatika se stýká s vozovkou v určité ploše, kterou nazýváme stopou. V přední části stopy ve směru valení dochází ke stlačování obvodu pneumatiky do roviny vozovky a v zadní části se obvod opět vyrovnává do kruhového tvaru [50]. Rozložení měrných tlaků ve stopě pneumatiky je znázorněno na obr.43. Vlivem ztrát v pneumatice, které se mění v teplo, jsou síly potřebné ke stlačení pneumatiky větší, než síly jimiž působí pneumatika na vozovku při navrácení do kruhového tvaru (hystereze). Měrné tlaky v přední části stopy jsou tedy větší, a proto výslednice elementárních sil ve stopě pneumatiky, tzn. svislá, přesněji řečeno radiální reakce vozovky Z_k je předsunuta před svislou osu kola o hodnotu e (obr.44.a). Reakce vozovky Z_k je stejně velká jako zatížení kola, tzn. vzniká silová dvojice neboli moment

$$M_{fk} = Z_k e \quad (2.4.384)$$

který působí proti otáčení kola. Předsunutou svislou reakci Z_k můžeme dle obr.44.b), posunout do svislé osy kola, zavedeme-li moment M_{fk} , který působí z vozovky na kolo. Moment M_{fk} vyvolá vodorovnou reakci O_{fk} (obr.44.c), která směřuje proti pohybu kola, tzn. ve středu kola musí působit vodorovná síla

$$F_{xk} = O_{fk} \quad (2.4.385)$$

aby vznikla opět silová dvojice. Vodorovnou reakci O_{fk} nazýváme valivý odpor kola. Podle obr.44.c) platí

$$M_{fk} = O_{fk} r_d = Z_k e \quad (2.4.386)$$

neboli valivý odpor kola je

$$O_{fk} = Z_k e / r_d = Z_k f_k \quad (2.4.387)$$

kde $f_k = e / r_d$ je součinitel valivého odporu kola. Účinek valivého odporu můžeme vyjádřit také jednoduchým silovým schématem (obr.44.d).

Součinitel valivého odporu f_k závisí především na povrchu vozovky. Z dalších vlivů je nejdůležitější vliv deformace a vliv rychlosti kola. Deformace pneumatiky závisí především na huštění. Při menším tlaku vzduchu v pneumatice dochází k větší deformaci, vzrůstá deformační práce a současně stoupá i tlumící práce, která zvětšuje valivý odpor [50]. Při vyšších rychlostech nestačí pneumatika v poměrně krátkém čase vyrovnávat deformace, které vznikají v přední části stopy. Proto v zadní části stopy vzniká menší měrný tlak než při nižší rychlosti. Tím se svislá reakce Z_k posouvá více dopředu (obr.44.a) a součinitel valivého odporu se podle rovnice (1.415) zvětší. Při velkých rychlostech se součinitel valivého odporu zvětšuje také vlivem ztrát, které souvisejí s rozkmitáním oběžné plochy u bočních stěn pneumatiky. Při nízkých rychlostech – u osobních vozidel do rychlosti 80km/h, u nákladních do 50km/h – můžeme považovat součinitel valivého odporu nezávislý na jízdní rychlosti. Vliv huštění na valivý odpor kola je zřejmý z obr.45. Valivý odpor vozidla O_f je dán součtem valivých odporů jednotlivých kol

$$O_f = \sum O_{fki} = \sum Z_{ki} f_{ki} \quad (2.4.388)$$

Předpokládáme-li, že součinitelé valivého odporu všech kol mají stejnou hodnotu (rozdíly vzniklé různým huštěním pneumatik) pak pro

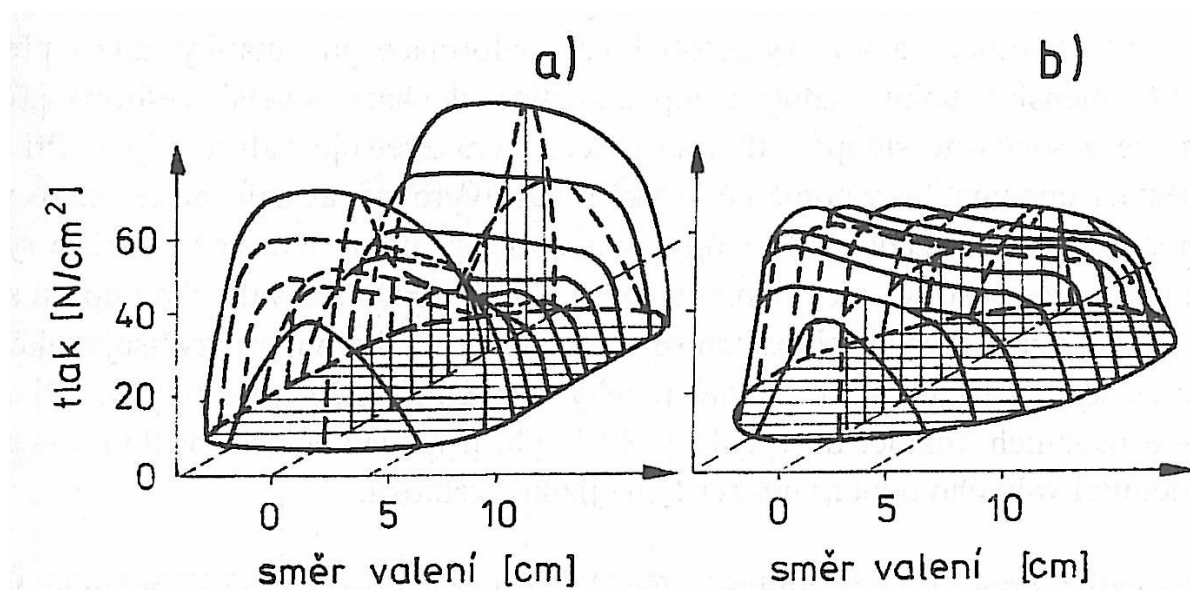
$$f_{ki} = f \quad (2.4.389)$$

bude platit

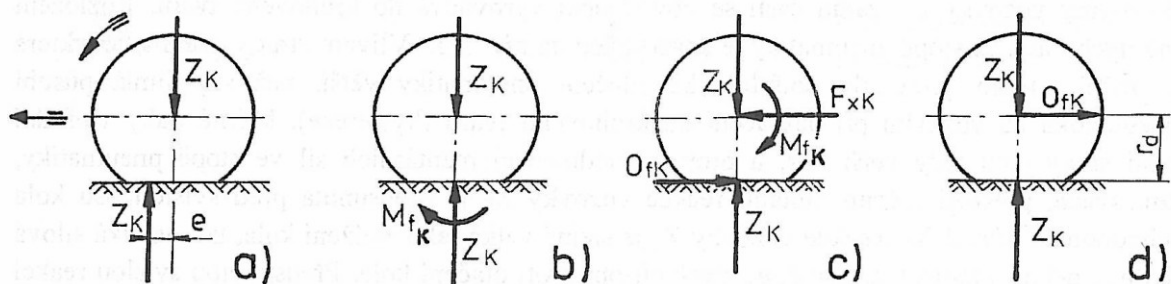
$$O_f = f \sum_i Z_{ki} = f G \cos \alpha \quad (2.4.390)$$

neboť součet radiálních reakcí jednotlivých kol je roven složce tíhy vozidla $G \cos \alpha$ kolmé k rovině vozovky. Pro jízdu po rovině platí

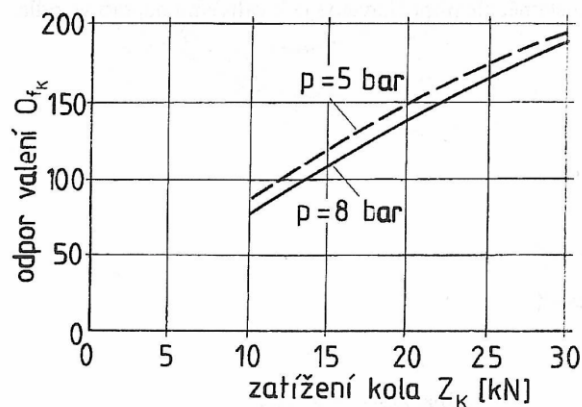
$$O_f = f G \quad (2.4.391)$$



Obr.43. Deformace a) diagonální a b) radiální pneumatiky [50]



Obr.44. Moment valivého odporu kola M_{fk} a valivý odpor kola O_{fk} na volně se valícím kole [50]



Obr.45. Vliv huštění pneumatiky na odpor valení [50]

Teoretické zjištění plochy odvodňovacích drážek F (m^2) dle [56]:

2.4.13 Součinnost kolo-drážka z hlediska času

Dle předaného příčného řezu se hloubka základní sestavy drážek provádí 4-5mm. V prověřovaném případě [56] je hloubka měřených drážek 2mm.

– Při hloubce drážek $h_1 = 2\text{mm}$:
 $F_1 = 0,002 \cdot (5 \cdot 0,03 + 2 \cdot 0,02) = 0,00038\text{m}^2$ (2.4.392)

Při hloubce drážek $h_2 = 4\text{mm}$
 $F_2 = 0,004 \cdot (5 \cdot 0,03 + 2 \cdot 0,02) = 0,00076\text{m}^2$ (2.4.393)

Při hloubce drážek $h_3 = 5\text{mm}$
 $F_3 = 0,005 \cdot (5 \cdot 0,03 + 2 \cdot 0,02) = 0,00095\text{m}^2$ (2.4.394)

Šířka pneumatiky uvažovaná jako průměr v hodnotě 0,20m. Šikmost drážek 45° po směru jízdy k pravému okraji vozovky.

– Pro $h_1 = 2\text{mm}$ $Q_1 = 0,269 \cdot 0,20 \cdot 0,002 \cdot 100 = 0,108 \text{ l}$ (2.4.395)

– Pro $h_2 = 4\text{mm}$ $Q_1 = 0,269 \cdot 0,20 \cdot 0,004 \cdot 100 = 0,215 \text{ l}$ (2.4.396)

– Pro $h_3 = 5\text{mm}$ $Q_1 = 0,269 \cdot 0,20 \cdot 0,005 \cdot 100 = 0,269 \text{ l}$ (2.4.397)

Dotkový tlak pneumatiky na povrch vozovky je zhruba roven jejímu huštění, které se dle typů vozidla a použitých pneumatik obvykle pohybuje v rozmezí 0,15-1,00MPa. [56] (1,00MPa je dle vyhlášky maximální přípustný tlak, který je užíván pouze u speciálních vozidel. Běžně používané maximum u těžkých nákladních vozidel se pohybuje na hranici 0,9MPa). Díky tuhosti pneumatiky a nerovnosti povrchu je maximální dosažený tlak v kontaktní ploše pneumatiky a krytu vozovky ještě výrazně vyšší a dosahuje zcela běžně bodově hodnot v rozmezí 0,2MPa u osobních vozidel a až 1,5MPa u některých těžkých nákladních automobilů.

Tento tlak má tendenci a schopnost vypudit hmotu o nižší specifické hmotnosti a zejména bez pevné molekulární vazby mimo kontaktní plochu. V daném případě se jedná o kapalinu – dešťovou vodu. Při velmi nízkých rychlostech pojezdu lze vypudit (vytlačit) vodu i u velmi širokých pneumatik, a to i bez dezénu, bez jakýchkoliv problémů již v čele kontaktní plochy. Při zvyšující se rychlosti pak již nestačí voda opustit hranu kontaktní plochy a začíná se dostávat pod náběhovou hranu dotykové plochy, kde vytvoří vodní klín. Pokud je překročena odvodňovací schopnost drážek dezénu pneumatiky, pak se vodní klín začne

prodlužovat a v mezním případě vytvoří souvislou vodní vrstvu pod celou kontaktní plochou a dojde k přerušení přímého kontaktu mezi pneumatikou vozidla a krytem vozovky, k tzv. aquaplaningu. Riziko aquaplaningu rychle vzrůstá se zvyšující se rychlostí pohybu [56] (kritické mohou být rychlosti již kolem 50 - 60km/h) a tloušťkou vodního filmu na vozovce (kde v závislosti na rychlosti a dezénu rozměru pneumatiky je možnost vzniku udávána již při tloušťce vodního filmu 2 – 4mm). Naopak příznivý vliv pro zamezení aquaplaningu má jednak hrubá makrotextura krytu vozovky, užší pneumatika a výraznější dezén pneumatiky. Frézované odvodňovací drážky jednak vytváří velmi hrubou makrotexturu v krytu vozovky a jednak v podstatě dubluje odvodňovací schopnost drážek dezénu. Průtočný průřez frézovaných drážek, či lépe řečeno jejich průtočná kapacita, je plně srovnatelná s odvodňovací kapacitou pneumatiky osobního automobilu s letním či univerzálním dezénem. Navíc, frézované drážky nejsou zalomené a v mnoha případech umožňují rychlejší odvedení vody z kontaktní plochy než u drážek dezénu.

Velmi významná je skutečnost, že frézované drážky jsou provedeny šikmo pod úhlem 45° ve směru jízdy od levého k pravému okraji. Drážky tak jsou při pojezdu vozidlem ve velmi malém časovém okamžiku pneumatikou překrývány postupně zleva doprava (při rychlosti jízdy 80km/h se jedná o časový interval cca 0,01s). Toto postupné překrytí způsobí, že voda je z frézovaných drážek velmi prudce vypuzena směrem k pravému okraji vozovky na rozdíl od drážek běžného dezénu pneumatiky, kdy vypuzení vody probíhá do obou stran prakticky stejnou měrou.

Dále je nutno si uvědomit, že k efektu pravostranného vypuzování (prudkému vystřikování) vody z drážek dochází při jakémkoliv množství vody v drážkách či vodního filmu nad drážkami. Pokud jsou drážky ve vozovce překryty vodním filmem v celé ploše vozovky, pak voda z tohoto filmu je poměrně vysokým tlakem (0,2 – 1,5MPa) a ve velmi krátkém časovém intervalu vtlačena do frézovaných drážek a díky její nestlačitelnosti musí zcela logicky dojít k vytlačení (výstřiku) vody z drážek. Ke stejnému efektu ale dojde i v případě, že hladina vody v drážkách bude na úrovni či i pod úrovní povrchu vozovky přilehlého k drážkám. I v tomto případě bude na vodu v drážkách působit značně vysokým tlakem ve velmi krátkém okamžiku vzduch stlačovaný pod pneumatikou. Pouze se zmenší množství vypuzované vody. Lze-li předpokládat, že při určité výšce vodního filmu nad celou plochou vozovky bude přes frézované drážky vypuzena nejen voda původně vyplňující drážky, ale i část vody z nadložního vodního filmu, jehož určitá část bude z kontaktní plochy odváděna i drážkami v dezénu, pak v případě, že voda vyplňuje pouze objem frézovaných drážek (tj. při nulové výšce vodního filmu nad drážkami), může být vypuzeno pouze toto množství vody.

Úvaha by mohla být rozšířena o vliv rychlosti pojezdu. Při velmi malých rychlostech se může odvodňovací efekt při absenci celoplošného vodního filmu značně omezit či zcela vytratit. Při těchto rychlostech však nehrozí riziko vzniku aquaplaningu a tímto případem se není nutno zabývat. Na druhé straně jistě existuje limitní vysoká rychlost, která však není v silničním provozu dosažitelná, kdy časový okamžik překrytí drážky je natolik krátký, že voda v drážkách není schopna na vyvozený tlak reagovat. Například při rychlosti 1000km/h je časový interval překrytí drážky již jen cca 0,001s a voda v drážkách se bude chovat obdobně jako pevná hmota. V rozmezí rychlostí cca 40 – 150 (200) km/h však lze s odvodňovací schopností drážek jistě uvažovat.

Další námitka k dále uvedeným závěrům posudku by se mohla týkat možnosti se vracení vypuzené (vystřiknuté) vody při nulovém výsledném sklonu zpět (alespoň z části) do původního místa. Znalec v [56] tvrdí, že voda je odstříknuta při přejezdu pneumatiky rychlostí cca 80km/h do vzdálenosti až cca 1,5m, při přítomnosti celoplošného vodního filmu i více. V případě, že nad vozovkou je vytvořen vodní film o tloušťce již 1 – 2mm, pak pojezdem vyprázdňovanou drážkou pod kontaktní plochou daleko dříve vyplní okolní voda z vodního

filmu, takže vystříknutá voda z drážek se již nemůže vracet. V případě absence vodního filmu je drážka zpětně znovu zaplavena daleko dříve z levé strany, takže i zde je možnost vrácení se vody z pravé strany velmi omezena a díky odstříknutí vody při rychlostech cca nad 60km/h do 1,5m a při absolutně nulovém výsledném sklonu, je prakticky množství vody vrácené z pravé strany do původní kontaktní plochy nulové.

Jako další efekt, který zvyšuje množství vody odváděné frézovanými drážkami lze uvažovat následující skutečnost: pokud jízdní stopu projede jednostopé dvoukolové vozidlo (například motocykl), pak i při přítomnosti vodního filmu se při rychlosti pojezdu nad 60km/h nestačí za předním kolem drážky znovu naplnit před zadním kolem vodou a zadní pneumatika jede v „suché“ stopě. U dvoustopých vozidel s rozchodem cca 1,5m pak přední levé kolo odstříkne jisté množství vody pod pravou zadní pneumatiku, takže i zadní pneumatika může mít jistý odvodňovací efekt. Tento efekt bude výraznější při velkých rozchodech (nákladní automobil) a přítomnosti vodního filmu.

Odvodňovací efekt mají samozřejmě i levé pneumatiky. Protože však o odvodňování jízdního pruhu můžeme hovořit až v okamžiku, kdy voda opustí až pravou jízdní stopu, kam odvodňovací efekt levých pneumatik nezasahuje, či jen velmi omezeně, je nutno při výpočtu možného množství odváděné vody vycházet pouze z pneumatik v pravé jízdní stopě. Pneumatiky levé jízdní stopy vykonávají převážně funkci možno-li tak říci „podavače pro pravou jízdní stopu.

Vzhledem k časům naměřeným při měření dne 18.1.2000, kdy při nulové hladině vodního filmu nad drážkami došlo k opětovnému naplnění drážek vodou za cca 20-29s a při vodním filmu hloubky 2mm již za dobu jen cca 1-2s, lze zcela logicky předpokládat, že účinek odvodnění bude při přítomnosti vodního filmu (který je nebezpečím pro vznik aquaplaningu) podstatně výraznější. Při rychlosti jízdy cca 60 – 80km/h by časové rozestupy mezi projíždějícími vozidly neměly poklesnout pod 2 - 3s (a to jde o mezery na hranici nebezpečnosti). Znamená to však, že při přítomnosti alespoň 2mm vodního filmu v ploše vozovky každé projíždějící vozidlo vykoná plný odvodňovací efekt.

Výrazně na straně bezpečnosti lze uvažovat, že při šířce pneumatiky 200mm odvede z jízdního profilu každý přejezd vozidla při kolmé šířce základní sestavy drážek 0,30m (to je při délce v podélném směru komunikace 0,42m) při hloubce drážek $h_2 = 4\text{mm}$ celkově minimální $Q_2 = 0,215\text{ l}$ vody a při hloubce drážek $h_3 = 5\text{mm}$ celkově minimální $Q_3 = 0,269\text{ l}$ vody. Pokud by byly základní sestavy drážek prováděny na sraz, to je bez vzájemných mezer, pak lze uvažovat, že jeden běžný metr vozovky opatřený drážkami odvede při každém přejezdu vozidla při výšce vodního filmu 2mm a více (což jsou výšky vodního filmu, kdy vzniká riziko aquaplaningu) podle hloubek drážek $Q_2 = 0,507\text{ l/bm}$ či $Q_3 = 0,634\text{ l/bm}$.

Jak je již výše řečeno, odvodňovací efekt je uvažován na hranici minima. Zvýší se například při vyšším podílu nákladní dopravy, kde lze počítat s větší šířkou pneumatik a zejména pak ke zvýšení dojde opět výše popsaným předpokládaným znásobením množství odváděné vody při přítomnosti vodního filmu, kde frézovanými drážkami ve vozovce bude odvedena nejenom voda vyplňující drážky, ale i část vody z nadložního vodního filmu. Toto zvýšení odvodňovacích schopností lze logicky předpokládat, ale znalec ho v [56] není schopen výpočtově doložit.

I tak se však jedná o poměrně velké množství vody. Např. při intenzitě provozu na dvoupruhové komunikaci kolem 10 000voz/h (vozidel/hodinu), lze uvažovat, že za špičkovou hodinu dosáhne intenzita podílu cca 10%, to je 1000voz/h při rovnoměrném rozdělení na oba jízdní směry pak 500voz/h. Odvodňovací drážky pak odvedou z 1 běžného metru minimálně 254 – 317 l vody/h, v průměru lze počítat s cca 300 l/bm. Pokud by byly drážky frézovány vstřícně ve větších délkách, pak množství odváděné vody se již pohybuje v násobcích m^3 .

Výpočet je však založen na předpokladu, že z drážky je vypuzena přejezdem pneumatiky pouze voda obsažená v drážkách pod kontaktní plochou. To však zdaleka není

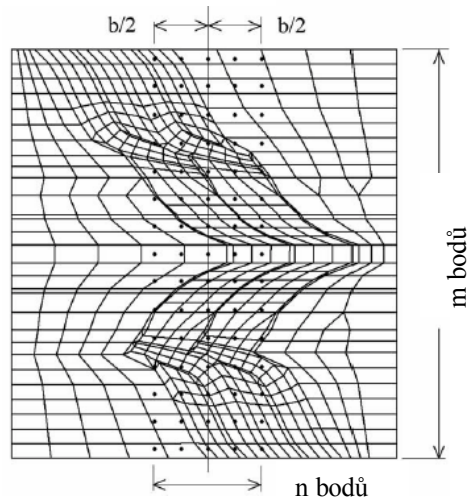
pravda. Voda, která prudce vystříkne z kontaktní plochy, velmi výrazně ovlivní i vodu vedle pneumatiky. Tryskající voda má sice v prvním okamžiku objem odpovídající objemu drážky pod kontaktní plochou. Ale svou hmotností a rychlostí (pohybovou energií) ihned následně uvede do pohybu i okolní vodu a ovlivní odvodnění do vzdálenosti 1,5m i více od pravé jízdní stopy. Přesný výpočet by byl velmi složitý a navíc závislý na celé řadě faktorů. Znalec je však v [56] přesvědčen, že jedním pojedem je při základní sestavě drážek a při jejich naplnění či dokonce při přítomnosti nadložního filmu vody, uvedeno do pohybu k pravému okraji minimálně dvojnásobek množství vody než je ve výpočtu uvažováno.

Nejde však jen o samotné množství odváděné vody dané intenzitou provozu. I pro ojedinělé vozidlo (například v nočních hodinách) mají frézované odvodňovací drážky značný význam. Jednak se zvýší makrostruktura krytu, to je drážky, i když mají hlavní funkci odvodňovací, plní funkci i zdršňování a jednak, a to je daleko významnější, posunují minimální hloubku vodního filmu potřebnou pro riziko vzniku aquaplaningu, z hodnot 2 – 4mm nejméně na cca 6 – 9mm [56].

2.4.14 Distribuce kontaktního tlaku ve stopě

Styčný tlak se v tří-drážkovém modelu [61] mění hladce, takže styčný tlak distribuovaný podél střední osy kontaktu s vozovkou, kolmo na pneumatiku ve směru otáčení může být přímo obdržen z uzlového tlaku bez jakéhokoliv vyhlazování. Na druhou stranu, styčný tlak v detailním modelu pneumatiky významně kolísá uvnitř plochy styku vzhledem k složitosti běhounu s bloky, takže je nějaké numerické zpracování nutné k získání dostatečně hladké distribuce. V aktuálním studiu lze odhadovat uzlové styčné tlaky s jednotnou sítí složenou z $m \times n$ vzorových bodů zobrazených na obr.46., kde síť střední osy je uspořádána identicky s osou kontaktu.

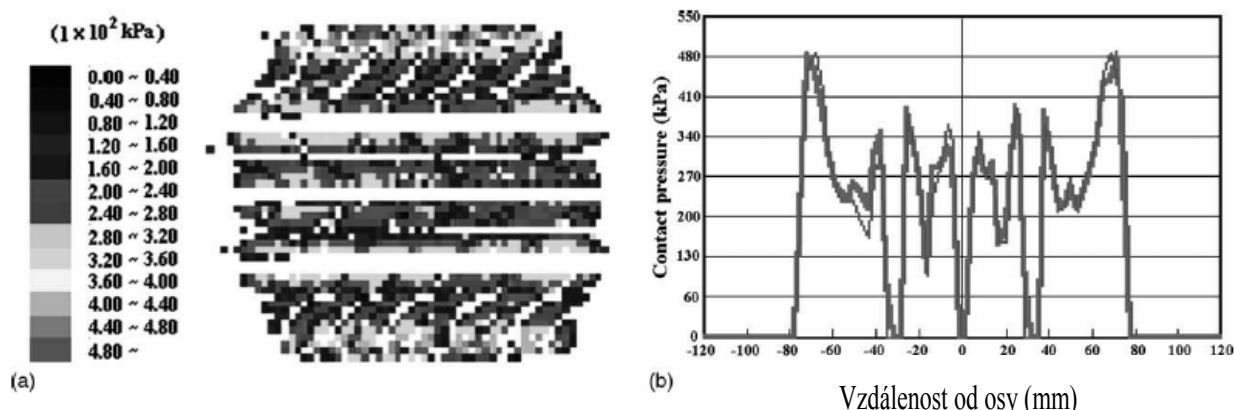
Osa stykové plochy



Obr.46. Rozvržení bodů vzorku v kontaktní ploše [61]

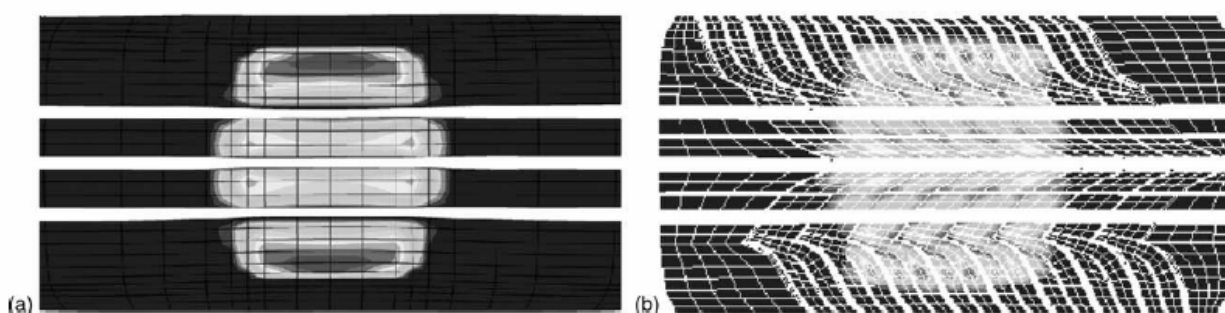
Pro vysvětlení integračního procesu, je třeba prvně vyloučit vzorkové body uvnitř sítě buď lokalizované v drážkách nebo mající styčný tlak méně než 34,5kPa (5 liber na čtvereční palec). Vyloučení takových vzorkových bodů zaručuje konzistenci s podmínkou v experimentech popsanych níže [61]. Potom je třeba vypočítat hodnoty styčného tlaku ve zbývajících vybraných bodech podle lineární interpolace uzlových tlaků. Dále vzít průměr hodnot styčného tlaku vybraných bodů lokalizovaných na stejné horizontále. Zde, by šíře b sítě měla být menší než šířka stopy. Také by měla být vhodně zvolena, protože ovlivňuje

spolehlivost integračního procesu. Jak ukazuje obrys rozložení styčného tlaku obr. 47.a) a 47.b), byla nastavena síť šíře do 30mm (to jest přibližně 29°) a vzorové body do 200 x 200.



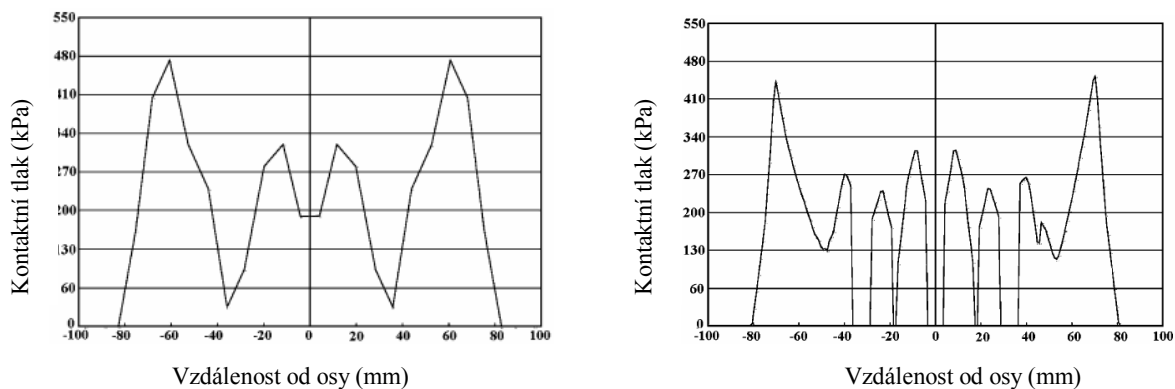
Obr.47. Experiment. výsledky kontaktního tlaku: a) obrys stykové plochy, b) rozložení tlaku [61]

Stopa a distribuce styčného tlaku získané experimentem jsou znázorněny na obr.47. Experiment byl proveden výzkumným centrem Kumho Industrial Company Korea. Detaily experimentu jsou popsány v [62]. Stopa snímače pole byla složena ze zahrnutých buněk oblasti $3,05 \times 3,05 \text{mm}^2$ a uspořádána kolmo na směr otáčení pneumatiky. Za účelem získání hladké distribuce styčného tlaku podél kontaktní osy, každý zahrnutá buňka snímala styčné tlaky desetkrát během odvalení pneumatiky a deset styčných tlaků bylo průměrováno. Podobně jako v numerickém experimentu, byly hodnoty styčného tlaku menší než 34,5kPa vyloučeny z průměrování. Obr.47.b) ukazuje distribuci styčného tlaku získanou experimentem, kde styčný tlak dosáhne špičkové hodnoty (přibližně 487kPa) v ramenu pneumatiky. Srovnání kontur styčného tlaku predikovaného dvěma různými modely pneumatiky je na obr.48., kde detailní model poskytne stopu a profil styčného tlaku více v souladu se zkušebními výsledky na obr.47.a).



Obr.48. Obrys kontaktního tlaku: a) třídrážkovým modelem b) 70°detailním modelem [61]

Na druhé straně, prostý tří-drážkový model produkuje značně hrubý profil s relativně širší styčnou plochou a koncentrací tlaku v ramenní oblasti. Distribuce styčného tlaku podél osy kontaktu kolmo na směr otáčení pneumatiky poměrně znázorněné na obr.34. Je zřejmé, že podrobný model předpokládá přesnější a detailní distribuci styčného tlaku než model zjednodušený v porovnání se zkušebními výsledky na obr.47.b). Nicméně, zjednodušený model pneumatiky, při vytváření hrubého předpokladu v kontaktním profilu a distribuci, vytvoří vrchol hodnoty styčného tlaku blízko hodnotě experimentální. Třebaže špičková hodnota má význam v jeho vlastním způsobu, celkové rozložení informací je důležitější návrhářům pneumatik pro zhodnocení významnějších vlastností pneumatik jako sjíždění pneumatiky a jízdní odpor.



Obr.49. Distribuce kontaktního tlaku: a) třídrážkový model b) 70° detailní model [61]

2.5 Matematické vazby vhodné pro aplikaci

2.5.1 Stanovení rozsahu náhodného výběru

Při stanovení rozsahu náhodného výběru např. pro měření hloubky dezénu, či tlaku huštění pneumatik vozidel lze užít dle [57] statistickou metodu 3σ při normálním rozdělení pravděpodobnosti. Při zachování uvedených předpokladů (základní soubor s normálním rozdělením) lze použít vztahu (2.5.1) pro odvození příslušného vzorce, kde symbolem Δ je požadovaná přesnost výběrového průměru, definovaná jako polovina intervalu spolehlivosti:

$$\Delta = u_p \cdot s \cdot (\sqrt{n-1})^{-1} = u_p \cdot \sigma' \cdot (\sqrt{n})^{-1} \quad (2.5.1)$$

odtud rovnice

$$n = u_p^2 \cdot \sigma'^2 \cdot (\Delta^2)^{-1} \quad (2.5.2)$$

kde

Δ Požadovaná přesnost výběrového průměru (vzhledem k možnostem měření)

u_p ... normovaná náhodná veličina (statistické tabulky [13])

σ' ... odhad směrodatné odchylky základního souboru

2.5.2 Test χ^2 dobré shody

Vhodnost nebo nevhodnost použití určitého rozdělení jako modelu pro napozorovaná data je možno posoudit tak, že libovolnou množinu \underline{A} je porovnávána relativní četnost, se kterou padají data do této množiny, a pravděpodobnost, s jakou se náhodná veličina s rozdělením, které je pro modelování použito, realizuje uvnitř množiny \underline{A} [110]. Je zřejmé, že lze toto porovnávání provádět pro každou množinu \underline{A} . Většinou je zvolen systém disjunktních množin $\underline{A}_1, \dots, \underline{A}_k$ (tříd), které pokrývají množinu možných hodnot teoretického rozdělení, o kterém je žádáno rozhodnout, zda-li je to dobrý model nebo ne. [110] Nechť pro $i = 1, \dots, k$, značí n_i absolutní četnost množiny \underline{A}_i , to znamená počet dat, které padnou do množiny \underline{A}_i , a podíl n_i/n , kde n je rozsah výběru, značí relativní četnost množiny \underline{A}_i . Čím je shoda mezi relativními četnostmi n_i/n , $i = 1, \dots, k$, a pravděpodobnostmi $p_i = P(X \in A_i)$, $i = 1, \dots, k$, větší, tím je vybraný model vhodnější. Dobrá shoda mezi relativními četnostmi n_i/n a

pravděpodobnostmi p_i , $i = 1, \dots, k$, nastává právě tehdy, jestliže je dobrá shoda mezi skutečnými (empirickými) absolutními četnostmi n_i , $i = 1, \dots, k$, a tzv. teoretickými četnostmi np_i , $i = 1, \dots, k$. Jednou z možností, jak tuto shodu měřit, je použít statistiku χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n_i - np_i)^2 / np_i \quad (2.5.3)$$

Je zřejmé, že čím se skutečné četnosti n_i a teoretické četnosti np_i více shodují, tím je statistika χ^2 menší, a naopak, čím se více liší, tím je statistika χ^2 větší. Na této myšlence je založen hojně užívaný test χ^2 dobré shody. Platí totiž, že pozorování jsou skutečně realizací náhodného výběru z rozdělení, pro které platí $p_i = P(X \in A_i)$, $i = 1, \dots, k$, pak je pro velká n statistika (2.5.3) rozdělena přibližně podle χ^2 rozdělení s $k - 1$ stupni volnosti. Hypotéza H_0 , že data pocházejí z daného rozdělení je zamítnuta, jestliže $\chi^2 > \chi^2_{\alpha} [k - 1]$, kde $\chi^2_{\alpha} [k - 1]$ je 100% horní kvantil χ^2 rozdělení o $k - 1$ stupních volnosti. Pro praktické použití testu se doporučuje [110], aby teoretické četnosti všech tříd nebyly menší než 5.

3) Zhodnocení stávajících poznatků a další postup

Protože je předmětem této práce posouzení vlivu metody drážkování na zvýšení bezpečnosti silničního provozu a to tuzemské silniční sítě, je třeba zohlednit veškeré faktory připadající v úvahu v ČR.

3.1 Pneumatika

3.1.1 Model

Popsat pneumatiku jako těleso pro možné hodnocení je velice obtížné, uvážíme-li její materiálovou nehomogenitu, složitý tvar s velice proměnnou konstrukcí a rozložením hmoty, rozdílnou tuhost a moment setrvačnosti jednotlivých částí atd. Lze ji modelovat např. tak jako [1], kde je využit její model pro analýzu valení na mokré vozovce, tedy jako dynamický model podobně [17] zabývající se hlučností pneumatiky, kde ale za pozornost stojí základní pohybové rovnice a kinematické vztahy. Pozitivní je zde zohlednění vnitřního prostoru pneumatiky (vliv huštění), avšak je zřejmě třeba zahrnout i určitý vliv na pneumatiku samotnou od ostatních složek systému jako je disk, vyvažovací závaží, ložisko, náprava atd. Podobně vliv možných dějů a veličin v systému jako kmitání způsobené tlumením, nevyváženost, imperfekce, geometrie apod.

3.1.2 Kontaktní problematika

Zjednodušení uvažované v [45] poslouží jistě statickému znázornění stykové plochy kolo-vozovka, jedná se o idealizovaný tvar pneumatiky, bez vlivu její tuhosti zejména ramenní partie a tuhosti běhounu. Odpovídá spíše vzdušníku kola než celému kolu, neuvažuje náklon kola a vliv jiných sil než kolmé na rovinu styku. Použitelnost v rámci studie je ale možná, byť za předpokladu absence zohlednění tuhosti pneumatiky, nerovnoměrnosti materiálového rozložení skutečné pneumatiky v interakci s drážkovanou vozovkou. Vhodnosti uvedeného zjednodušení nasvědčuje i teorie [47] zabývající se posouzením odolnosti běhounu proti oděru, v důsledku valení pod úhlem směrové úchytky, jež uvažuje stykovou plochu stejně ideálně jako [45], nechává kolmo na tuto styčnou plochu ve středové rovině kola působit zatížení F_p , tedy centrálně jako na jednoduše opřený trámec délky L s konstantami elasticity E a G , přičemž tento tvar stykové plochy považuje za dostatečně vyhovující a ostatní upřesnění tvaru této plochy zanedbává, viz vztahy (2.1.3) a (2.1.4). Jak [47] uvádí, za podmínek malého bočního zatěžování pneumatik a u pneumatik jiných než pro osobní vozy (leteckých, traktorových, pro stavební stroje, atd.) mohou být brzdné a záběrové síly z hlediska ovlivnění oděru běhounu přinejmenším stejně důležité jako síly boční. Pro tyto případy je model teorie [47] nepoužitelný. Pro potřeby této práce však dokládá, že úvaha zjednodušené stykové plochy, z níž vychází [45] je relevantní, neboť tato práce hodnotí jako jednu ze složek systému kolo-vozovka pneumatiku osobního vozidla jako tu méně příznivou variantu před pneumatikou vozidla nákladního. Méně příznivou z odkazem na [56], kde huštění pneumatiky jako podstatný faktor (při větším tlaku huštění u nákladního vozidla) příznivě ovlivňující odvod srážkové vody z vozovky nejen pro nákladní vozidlo samotné, ale i pro ostatní (osobní) vozidla jedoucí v intervalu 2-3s při rychlosti 60–80km/h. [56] také potvrzuje vliv sledování hodnoty tlaku huštění.

3.1.3 Průzkum situace v ČR

Pro posouzení interakce vozidlo/pneumatika – vozovka v rámci daného problému je v první fázi třeba získat komplexní přehled o pneumatikách provozovaných v našem silničním provozu. Podle [56] je třeba sledovat hloubku dezénu a také podle [50] a [51] tlak v pneumatice. Jak naznačuje [17], tlak huštění je jednou ze vstupních veličin pro stanovení modální tuhosti následně pro určení smykové síly v příčném směru a smykového napětí. Také v případě výpočtu elementární práce pro možná posunutí bodů na povrchu pneumatiky dle [31] vztahu (2.4.87) až (2.4.90) je třeba tlaku v pneumatice, obdobně jako [35], kde je stanoveno, že koncentrace energie napětí je v první řadě ovlivněna tlakem huštění. Rozměry pneumatik tak jako v [56] pro potřeby této práce, s ohledem na dále uvedené sledovány nebudou.

Místo: _____
Vozidlo/stáří: _____

Huštění:

LP: _____ LZ: _____ PZ: _____ PP: _____

Hloubka dezénu:

LP: _____ LZ: _____ PZ: _____ PP: _____

Obr.50. Formulář pro zápis zjištění používaných pneumatik v naší silniční síti

Vhodnými místy pro získání reprezentativního výběru budou patrně různé parkovací plochy s vysokou frekvencí obratu vozidel různých provozovatelů, bez ovlivnění charakterem objektu (autoservis, autobazar), právním normou (stanice technické kontroly), popř. jiným faktorem (vkus řidičů (autosalon, apod.)). Ideálním místem ale zřejmě bude čerpací stanice pohonných hmot, neboť tankovat přijedou vozidla provozovaná, ne tedy ta dlouhodobě odstavená na parkovišti, bez rozdílu typu a pořizovací hodnoty automobilu, bez rozdílu vlastníka či provozovatele.

Sběr dat je velice pracný, zejména co do množství úkonů a počtu vzorků, ale i náročný na zdůvodnění takového konání v případě zastižení vlastníkem, hlídačem parkoviště či policií. Měření pro vědecké zkoumání je pak lehce zaměnitelné s činností nelegální. I proto se jeví být nejlepším místem měření pneumatik čerpací stanice pohonných hmot, kdy v přímém kontaktu s řidičem mohou být vysvětleny okolnosti sběru dat, popř. ke změření vozidla získán souhlas. Také skutečnost, že vozidla k čerpací stanici přijíždějí z různých oblastí a v náhodném pořadí, je pro sestavení reprezentativního výběru důležitá.

I. Hloubka dezénu

Při stanovení rozsahu náhodného výběru měření dezénu pneumatik vozidel pro určení skutečné úrovně ojetí pneumatik osobních automobilů na naší silniční síti, lze užít dle [57] statistickou metodu 3σ při normálním rozdělení pravděpodobnosti. Minimální hodnotu vzhledem k možnosti úplného fyzického sjetí dezénu, je uvažována 0. Jako maximální hodnota, je uvažována hloubka dezénu nové pneumatiky a to 12mm. Při aplikaci vztahu (2.5.1) a rovnice (2.5.2) kde

Δ Požadovaná přesnost výběrového průměru (vzhledem k možnostem měření)
 $= \pm 0,1\text{mm}$

u_p ... normovaná náhodná veličina pro 95% spolehlivost = 1,96 (statistické tabulky [13])

σ' ... odhad směrodatné odchylky základního souboru = 2;

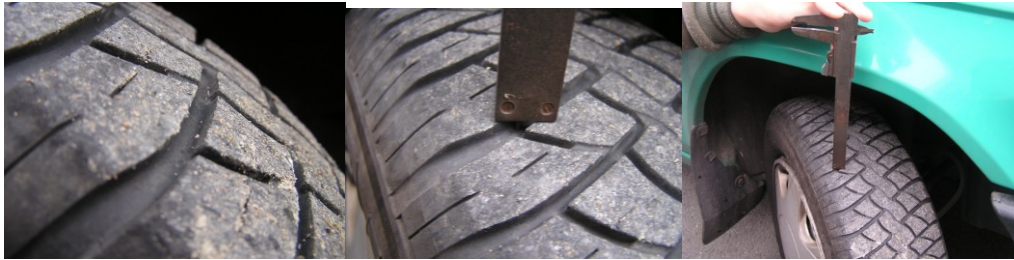
jestliže $\mu - 3\sigma = 0\text{mm}$, $\mu + 3\sigma = 12\text{mm}$, $(-3\sigma, +3\sigma) = 6$, potom $12/6 = 2$

po dosazení do (2.5.2)

$$n = 1,96^2 \cdot 2^2 \cdot (0,1^2)^{-1} = 1536,64 \approx 1537 \quad (3.1.1)$$

Pro potřebu přehledu o hloubce dezénu je třeba provést změřeni 1537 pneumatik.

Pro měření hloubky dezénu pneumatiky bude použito posuvné měřítko s vestavěným hloubkoměrem, dělení stupnice po 0,1mm. Měření viz obr.51, záznam do formuláře viz obr.50.



Obr.51. Měření hloubky dezénu hloubkoměrem na posuvném měřítku

II. Tlak huštění

Při stanovení rozsahu náhodného výběru měření tlaku huštění pneumatik lze rovněž užít dle [57] statistickou metodu 3σ při normálním rozdělení pravděpodobnosti. Minimální hodnotu huštění, kdy je pneumatika schopna přenášet zatížení dle [44], je 60kPa. Maximální hodnota je 300kPa (stanovena výrobcí pneumatik). Při zachování uvedených předpokladů (základní soubor s normálním rozdělením) a použití vztahů (2.5.1), (2.5.2), kde

Δ ... Požadovaná přesnost výběrového průměru (vzhledem k možnostem měření)
 $= \pm 2\text{kPa}$

u_p ... normovaná náhodná veličina pro 95% spolehlivost = 1,96 (statistické tabulky [13])

σ' ... odhad směrodatné odchylky základního souboru = 50;

jestliže $\mu - 3\sigma = 60\text{kPa}$, $\mu + 3\sigma = 300\text{kPa}$, $(-3\sigma, +3\sigma) = 6$, potom $300/6 = 50$

po dosazení do (2.5.2)

$$n = 1,96^2 \cdot 50^2 \cdot (2^2)^{-1} = 2401 \quad (3.1.2)$$

Protože k přehledu o hloubce dezénu je třeba provést změřeni jen 1537 pneumatik oproti 2401 pneumatikám pro přehled o tlaku huštění, bude počet vzorků odpovídat min vyšší z obou hodnot.

Měření tlaku huštění pneumatik bude provedeno tlakoměrem pro měření pneumatik osobních vozidel s rozsahem do 450kPa. Měření viz obr.52, záznam do formuláře viz obr.50.



Obr.52. Měření tlaku huštění pneumatiky tlakoměrem

III. Vliv umístění pneumatiky na vozidle

V [56] je zvažován i rozdílný vliv kola vzhledem k jeho umístění na vozidle; bude tedy i takto formován zápis při zjišťování podkladů pro statistické vyhodnocení (detekováno každé kolo zvlášť a také zvlášť dle umístění zaznamenáno). Zde připadá v úvahu vliv pořadí jednotlivých kol dané nápravy při průjezdu drážkou vzhledem k její šikmosti k podélné ose komunikace.

IV. Vzorek běhounu

Podle [44] není třeba statisticky sledovat vzorek dezénu pneumatiky /tvar, obraz/ neboť ze [44] vyplývá, že každý nový typ vzorku je před zavedením do výroby na aquaplaning testován. Nebyl by tudíž z logiky věci hromadně vyráběn vzor, jež by neobstál. Nový testovaný vzorek je s plnou, neojetou hodnotou hloubky dezénu. Test pneumatiky má dále část teoretickou založenou na matematické analýze za použití nástrojů FEM. Výsledky obou částí testu, praktické na aquaplaningové dráze a teoretické jsou dle [44] vzájemně porovnávány. Výkonnost vzorku je pak omezena pouze jeho opotřebením, sjetím.

3.2 Vozovka

3.2.1 Vliv materiálu povrchu komunikace

[65] Přímka závislosti rychlosti proudění nevazké kapaliny, destilované vody, na externím tlaku (obr. 37) pro povrch z asfaltového betonu a pro povrch z betonu cementového, leží v těsné blízkosti hodnot uvedených materiálů. Porovnáme-li kinematickou viskozitu kapaliny, jež byla použita v experimentu podle [65] a vody (řekněme dešťové) vyskytující se na pozemní komunikaci, podle [67] nezjistíme při stejné teplotě a odpovídajícím tlaku rozdíl. Uvážíme-li navíc, že experiment byl prováděn v laboratorním prostředí, tedy za ideálních podmínek, pak vliv rozdílu materiálu povrchu lze zanedbat při zohlednění rozptylu hodnot tlaku v pneumatice projíždějících vozidel. Z toho plyne, že vlastní výzkum lze provádět jen na jednom druhu povrchu komunikace, jež přinese výsledek použitelný i pro ostatní materiálně odlišné vozovky.

3.2.2. Porovnání komunikace s drážkováním a bez drážek

Možnost vlastní konfrontace odvodnění dvou pozemních komunikací stejných/obdobných parametrů (šířka, sklonové poměry) i dopravního dění na nich (intenzita, složení dopravního proudu, obvyklý styl jízdy atd.) bude ideálně zajištěna tak, jestliže měření proběhne ne na dvou různých komunikacích, ale na jedné, kde hodnoty budou snímány jak v drážkách, tak v mezilehlém úseku. Tím je navíc zajištěna objektivita měření, neboť totožné

vozidlo (totožné pneumatiky) vygeneruje na stejné komunikaci dva záznamy hodnot (s drážkováním a bez), a to za stejných podmínek měření.

3.2.3 Technické faktory a specifika drážkování, vhodnost použitelnosti pro různé podmínky

I. Aplikace drážkování v ČR

Podle [95] je metoda drážkování aplikována na tuzemských pozemních komunikacích od roku 1998. Byla provedena v různých variantách (různá šířka, hloubka a úhel šikmosti drážek k podélné ose komunikace) a to jak na vozovkách s cemento tak asfaltobetonovým krytem. Jednalo se především o dálnice a silnice I. třídy. Výjimkou jsou místní komunikace funkční skupiny A a popř. B dle [96], ojediněle pak parkovací plochy v inravilánu.



Obr.53. Bezhluchný odvodňovací profil aplikovaný na místní komunikaci

II. Vliv frézovaných drážek na změnu vlastností vozovky

Předpokládané snížení pevnosti materiálu vozovky vlivem profrézování drážek vyvrací [97] v případě cementového betonu, v případě asfaltového i cementového betonu [100]. Vhodnost aplikace metody drážkování pro asfaltové směsi se zvýšenou odolností proti tvorbě trvalých deformací a vozovky s cementobetonovým krytem s hlediska životnosti potvrzuje [103]; zároveň ale poukazuje na nevhodnost aplikace v případě vozovek z asfaltových směsí bez modifikace kde je životnost úpravy snížena a vyžaduje opakování. Jako nevhodný povrch pro frézování drážek je uváděn [104] také kryt ošetřený asfaltovou emulzí.

Úroveň stavu makrotextury v zatížených místech vozovky v prostoru provedené úpravy (drážky) hodnotí [103] dle stupnice hodnocení podle [101] jako velmi dobrou. Zde je nutno brát na zřetel, že posudek [103] byl prováděn teprve po dvou letech od vyfrézování drážek.

Závěr posouzení hlučnosti drážkování [105] vyznívá příznivě pro cemento i asfalto betonový povrch a způsobený hluk přejezdem vozidla hodnotí jako zanedbatelný jak v kabině projíždějícího automobilu, tak ve vztahu k okolí. Předmětem disertační práce není otázka hlučnosti, a proto není tento faktor dále rozvíjen.



Obr.54. Bezhlučný odvodňovací profil v aplikaci na CB kryt

III. Podmínky použitelnosti metody

Výhody metody drážkování spatřuje [95] v možnosti aplikace bez předchozího projednání se speciálním stavebním úřadem, pokud aplikace nevyžaduje částečnou či plnou uzavírku dle [81], rychlost provádění prací, logicky nižší finanční náklady v porovnání s přestavbou komunikace, dále to, že lze metodu drážkování aplikovat za plného či částečně omezeného provozu odpadá problém s tvorbou objízdných tras v souladu s ustanovením [80]. Vliv klimatických podmínek s ohledem na teplotní podmínky ovzduší (5-25°C dle [95]) kdy je možné a vhodné drážky frézovat, je v našem pásmu nízký. Frézovat tak lze v ČR mimo zimního období (sníh, mráz) prakticky po celý rok i v dešti.



Obr.55. Frézování drážek za krátkodobé uzavěry provozu na silnici I.tř.

3.2.4 Volba lokality pro potřeby měření

Jednou z prvních lokalit, kde bylo dodatečné odvodnění drážkováním provedeno je silnice I/34 mezi obcí Michalovice a Šmolovy. Drážkování zde v současnosti vykazuje vizuální známky opotřebení a místy i přerušení vlivem následné stavebně technické údržby viz obr.56. V úseku drážkování (40°, místy oboustranně protisměrném se středovým překrytím viz obr.56.) je komunikace vedena jako dvoupruhová, směrově v přechodnici před levým směrovým obloukem s nedostatečným podélným sklonem (0,8%) právě v místě, kde dochází k překlápní vozovky do opačného příčného sklonu. Intenzita dopravy podle sčítání v roce 2005 je 7736voz/24h [107].

Naopak jednou z nejmladších úprav v České republice je drážkování s jedním sklonem 45° v celé šíři komunikace na silnici I/35 mezi obcí Hřebeč a Moravská Třebová viz obr. 57. Silnice je zde třípruhová, s jízdním pruhem pro pomalá vozidla ve směru od Moravské Třebové, směrově v přímé s podélným sklonem 4-5%, avšak s nedostatečným sklonem příčným. Stáří úpravy je 20měsíců. Intenzita dopravy podle sčítání v roce 2005 je 13297voz/24h [108]. Rozdíly v obou vybraných pozemních komunikacích umožní komplexní posouzení výsledků měření. V obou případech se ale jedná o vozovky z asfaltového betonu.



Obr.56. Opatření drážkování provedené na silnici I/34 mezi obcí Michalovice a Šmolovy okres Havlíčkův Brod



Obr.57. Drážkování provedené na silnici I/35 mezi obcí Hřebeč a Moravská Třebová

3.3 Voda

3.3.1 Hydrologické faktory

Vliv srážkové vody je pro riziko vzniku aquaplaningu při jejím hromadění zásadní. Úhrn atmosférických srážek je dle [108] v obou vybraných lokalitách měření srovnatelný. Jak vyplývá z [76] rychlost proudění kapaliny za působení externího tlaku závisí především na její viskozitě. Dynamická viskozita i kinematická viskozita vody klesá s rostoucí teplotou kapaliny (vody) [68]. Jak ukazuje tabulka T2.3.1 změna dynamická viskozity a kinematické viskozity vody v závislosti na teplotě [69] může v našem klimatickém pásmu dosahovat markantních změn; bude sledována její změna dle teploty ovzduší v den měření rychlosti odtoku vody v drážkách. Změnu hustoty kapaliny (vody) v důsledku teploty jako v případě viskozity není nutné zohledňovat neboť hustota vody v závislosti na teplotě se ([69]) v oblasti grafu teplot běžných v našem klimatickém pásmu prakticky nemění. Pro potřeby měření bude jako kapalina pro simulaci srážkové vody použita voda z městského vodovodního řadu popř.

pro úsporu nákladů voda bez mechanických nečistot z přírodního zdroje (rybník, řeka, potok) o teplotě odpovídající teplotě klimatické v den měření ideálně za deštivého počasí.

Voda bude dopravována v tanku automobilní cisterny na místo měření a zde rovnoměrně nanášena rozstříkem hadicí pod tlakem čerpadla cisterny, popř. samotíží v regulaci vypouštěcím ventilem tanku, v množství úplně zaplňujícím drážkování a s nadvýšením 3-4mm nad povrch nedrážkované vozovky.

3.3.2 Podstata měření

Podle [1] je významným faktorem pro vymezení jednotlivých zón, jak rychle je odváděna voda ze stopy, tzn. schopnosti pneumatiky (dezénu) a povrchu vozovky společně vodu vypudit, přičemž rychlost tohoto vypuzení ovlivní zónovou lokaci a diverzifikaci.

Vodítkem posouzení příznivého vlivu drážkování k eliminaci aquaplaningu je prověření, zda srážková voda na vozovce s nedokonalým odvodněním je v interakci pneumatika-drážkování odváděna rychleji. Rychlejším odvodem kapaliny by došlo dle [2] ke zmenšení zóny I., posunu zóny II. dopředu ve směru jízdy a především zvětšení kontaktní zóny III. viz (obr.25. Schematické znázornění tří zón kontaktu valení kola na mokré vozovce [2])

Pro zjištění hodnot tlaku a rychlosti proudění, lze použít metodu založenou na [66], kde sonda snímá jak rychlost, tak i tlak proudící kapaliny. Rychlost proudění kapaliny ze stykové plochy bude doložena aplikací vztahu (2.3.6) a (2.3.13). Hodnoty rychlosti proudění a tlaku na konci kanálu budou měřeny sondou [66]. Tlak ve stykové ploše je předpokládán jako tlak huštění.

Porovnání odvodňovací schopnosti úseku vozovky s drážkováním a úseku bez drážek, bude provedeno přímo tak, že bude jeden snímač [66] uložen na konci drážky vpravo, druhý nezávisle ve stejném místě avšak v prostoru mezi drážkami přímo na vozovce. Tím jsou dodrženy ideální podmínky pro porovnání vzhledem ke stejnému sklonu vozovky a dokonce stejnému projíždějícímu vozidlu /stejný dezén, stejný tlak huštění, stejná rychlost atd./.

Formulace rovnice aplikací vztahu (2.3.6) a (2.3.13) pro finální výpočet bude:

$$w^2/2 + p/\rho - \int a \cos\phi \, dL + \int dw/d\tau \, dL - \lambda \int L/d_h \cdot w^2/2 \, \rho \, dL = \text{konst.} \quad (3.3.1)$$

3.4 Styková plocha kolo-vozovka

3.4.1 Geometrie stykové plochy

Přímá aplikace teorie [45] připadá v úvahu v místě vozovky bez úpravy drážkováním; v místě drážky lze teoretickou plochu kontaktu redukovat. Rovněž postupem dle [35] je docíleno přesného obrazu stykové plochy v místě bez drážkování avšak se zahrnutím vlivu celého kola, nejen pneumatiky. Podle [56] se voda vzhledem ke své nestlačitelnosti a časově krátkému překrytí drážky pneumatikou, může chovat jako pevná látka. Tím dojde k vyplnění stopy tak, jako by vozovka drážkou přerušena nebyla. V případě nižších rychlostí přejezdu drážky dle [57] je voda vypuzována, a tudíž by bylo nutno zahrnout do aplikace [35] rychlost přejezdu vozidla přes drážkovaný úsek.

3.4.2 Vliv charakteru povrchu poježděné komunikace

Otázku styku kolo-vozovka lze řešit podle [46] uvažující překážky typu expanzních spojů betonu, které jsou uspořádány ve stopě meridiálně (rovnoběžně s osou kola), za předpokladu válcového ohybu. Při zanedbání skutečnosti přejezdu dvou hran nerovnosti (v případě drážky) anebo úvahy, že se jedná o dvě paralelní překážky těsně za sebou, lze vztahy (2.4.361) a (2.4.362) použít bez úprav. Model pro determinaci periferních sil [52] je vytvořen na bázi valení kola na poddajném, deformovatelném podkladu což vozovka pozemní komunikace sledovaného typu není. Dává však možnost odvodit velikost té části stykové plochy kolo-vozovka, kde dochází k prokluzu pneumatiky, jako totální posunutí prokluzem.

3.4.3 Rozložení tlaku a silové působení ve stykové ploše

Tlak ve stykové ploše pneumatika-vozovka podle [56] [61] odpovídá přinejmenším hodnotě tlaku huštění. Avšak maximální dosažený tlak v kontaktní ploše pneumatiky a krytu vozovky může být vlivem tuhosti pneumatiky a nerovnosti povrchu ještě výrazně vyšší a dosahuje zcela běžně bodově hodnot v rozmezí 0,2MPa u osobních vozidel a až 1,5MPa u některých těžkých nákladních automobilů [56]. Postačí zde úvaha, že tlak vypuzující vodu ze stopy odpovídá tlaku huštění, neboť narůstající tlak ve smyslu Bernoulliho rovnice a rovnice kontinuity ovlivní schopnost odvodnění pozitivním směrem.

Podle [56] je dotykový tlak pneumatiky na povrch vozovky zhruba roven jejímu huštění, což aplikováno na [50] znamená, že větším tlakem je odváděna voda ze stopy v přední, náběžné části kontaktní plochy, neboť [50] říká, že vlivem ztrát v pneumatice, které se mění v teplo, jsou síly potřebné ke stlačení pneumatiky větší, než síly, jimiž působí pneumatika na vozovku při navracení do kruhového tvaru (hystereze). Měrné tlaky v přední části stopy jsou tedy větší, a proto výslednice elementárních sil ve stopě pneumatiky, tzn. svislá, přesněji řečeno radiální reakce vozovky \underline{Z}_k je předsunuta před svislou osu kola o hodnotu \underline{e} . Dá se tedy dovodit, že tlak huštění pneumatiky je úměrný tlaku v přední části stykové plochy viz [50, 56] a odpovídá podle [1] obr.25 hydrodynamickému tlaku v zóně I. popř. i II. podle rozdělení odpovídající [2, 3]. Rozdíl vzniklé deformace pneumatiky podle [50] mezi diagonální a radiální pneumatikou je zřejmý z obr.43. Je potřeba sledování tohoto parametru při vlastním statistickém průzkumu pneumatik používaných v ČR v případě hlubšího rozboru stopy/stykové plochy.

3.4.4 Změny vyvolané působením srážkové vody

Protože podle [59] má největší podíl na účinném odvedení srážkové vody ze stopy oblast A. a B., tedy až do okamžiku (vyjma) vzniku aquaplaningu, je možno uvažovat pro potřeby této studie i stykovou plochu kolo-vozovka redukovanou o oblast C. [60] pracuje s kontaktní plochou složenou z oblastí označených v [59] A a B o velikosti přibližně 2/3 celkové stykové plochy v závislosti na tlaku huštění. Nepatrné odchylky redukované plochy se změnou tlaku v pneumatice (znázorněné v [60]) vedou zanedbání pro potřeby této studie.

Kontaktní plocha naznačená v [51] zejména s vlivem boční síly, vratného momentu, zřejmě na mokré vozovce vzhledem ke snížené přilnavosti vozovky nedozná podoby se zakřivením. Což dále potvrzuje [51] podmínkou $\underline{S}_k > \underline{S}_{kmax}$ tzn. je překročena mez boční přilnavosti. Pak dochází k bočnímu smyku kola (směrová úchylka $\underline{\alpha}_k \rightarrow 90^\circ$). Poté i křivka v obr.5 pro mokrou vozovku bude v rozmezí křivky pro vozovku suchou a křivkou pro led, v závislosti na výšce/tloušťce/ vodního filmu. Také tento poznatek dle [51] potvrzuje možnost úvahy ideální stykové plochy podle [45].

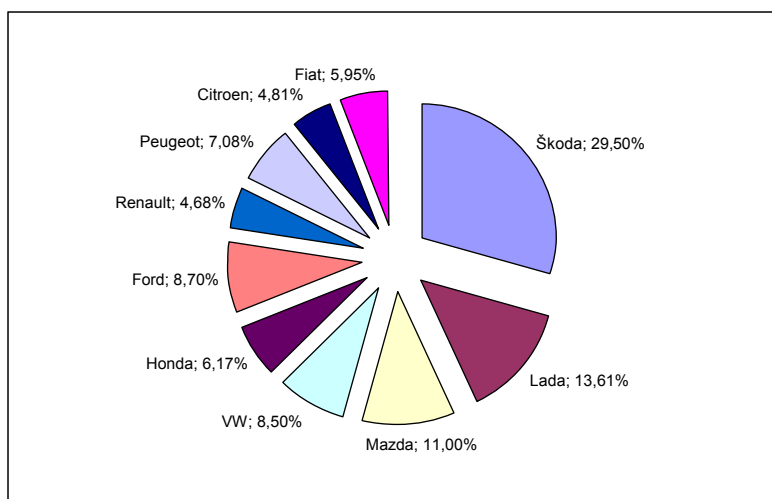
3.5 Rekapitulace stávajících poznatků a schéma postupu

1. Podstatnějším vlivem pro rychlost odtoku srážkové vody není materiálové složení povrchu vozovky [65], ale viskozita kapaliny. Ta se mění v závislosti na teplotě kapaliny, (voda viz [68]) směrodatná pro teploty reálné v našem klimatickém pásmu podle aktuální teploty v den měření.
2. S ohledem na předchozí bod není nezbytné sledovat chování procesu odvodnění (součinnost pneumatika-drážkovaný povrch) zvláště na komunikaci s cementobetonovým a asfaltobetonovým povrchem; postačí prakticky jen jeden druh povrchu vozovky.
3. Hustota vody v závislosti na teplotě se ([69]) v oblasti grafu teplot běžných v našem klimatickém pásmu prakticky nemění. Není důvodu uvažovat vliv její změny v důsledku teploty jako v případě viskozity.
4. S ohledem na rozložení tlaku ve stykové ploše [61] lze uvažovat hodnotu jednotnou, odpovídající tlaku huštění pneumatiky.
5. Míra rozstříku kapaliny při náhlém průjezdu vozidla její souvislou vrstvou, není ovlivněna tvarem či hloubkou dezénu pneumatiky, ale rychlostí projíždějícího vozidla jak vyplývá z [63].
6. Na kapalinu odváděnou drážkou/drážkami/ se vztahuje Beurnoulliova rovnice pro otevřená koryta a kanály a rovnice kontinuity.
7. Podle [73] lze lehce stanovit rychlost proudění kapaliny vlivem působení pneumatiky při vstupní znalosti tlaku ve stykové ploše, délce kanálu a naměřené rychlosti a tlaku na konci kanálu (odvodňovací drážky)
8. Rychlost proudění kapaliny ze stykové plochy bude dopočtena aplikací vztahu (1.464). Hodnoty rychlosti proudění a tlaku na konci kanálu budou měřeny sondou [66]. Tlak ve stykové ploše je předpokládán jako tlak huštění.
9. Podle [1] je významným faktorem pro vymezení jednotlivých zón, jak rychle je odváděna voda ze stopy, tzn. schopnosti pneumatiky (dezénu) a povrchu vozovky společně vodu vypudit, přičemž rychlost tohoto vypuzení ovlivní zónovou lokaci a diverzifikaci.
10. Pro zjištění hodnot tlaku a rychlosti proudění uvedených v 8. této kapitoly, lze použít metodu založenou na [66].
11. Porovnání odvodňovací schopnosti úseku vozovky s drážkováním a úseku bez drážek, provedeno přímo tak, že bude jeden snímač [66] uložen na konci drážky vpravo, druhý nezávisle ve stejném místě avšak v prostoru mezi drážkami přímo na vozovce. Tím jsou dodrženy ideální podmínky pro porovnání vzhledem ke stejnému sklonu vozovky a dokonce stejnému projíždějícímu vozidlu /stejný dezén, stejný tlak huštění, stejná rychlost atd./.
12. Vzhledem k výše uvedenému bude měření prováděno za zcela zaplavené drážky a souvislou vrstvou vody nad nedrážkovanou vozovkou.
13. Stanovení rozsahu náhodného výběru měření průjezdu vozidel přes drážky na vozovce bude provedeno v souladu s [57] statistickou metodu 3σ při normálním rozdělení pravděpodobnosti aplikací vztahu (1.461) a rovnice (1.462), přičemž odhad směrodatné odchylky základního souboru bude vycházet z naměřené minimální a maximální hodnoty proudění vody v drážce po zkušebním množství průjezdů.
14. Porovnání rychlosti proudění odváděné vody ze stopy v drážkovaném/nedrážkovaném úseku resp. v drážce a na srovnatelném místě bez úpravy povrchu drážkováním.
15. Po vyhodnocení poznatků o pneumatikách zjištěných vlastním statistickým průzkumem, a zjištění druhu a parametrů příslušného rozdělení pravděpodobnosti po statistickém uspořádání naměřených hodnot, lze generovat náhodná čísla z tohoto

rozdělení pravděpodobnosti pro zohlednění vlivu pneumatik (používaných v ČR) ve výpočtu.

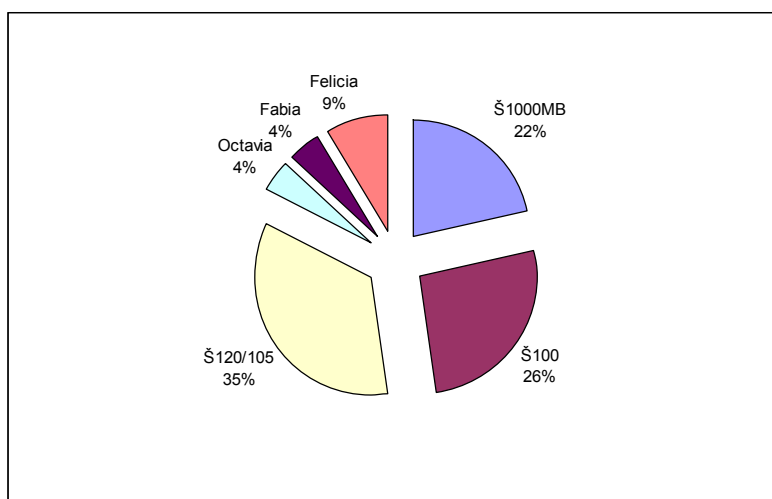
4) Analýza naměřených dat o pneumatikách

Zápis měřených dat ohledně pneumatik používaných na naší silniční síti obsahoval kromě tlaku a hloubky dezénu jednotlivých pneumatik podle konkrétního umístění na vozidle (tzn. zda-li se jednalo o přední či zadní kolo na pravé či levé straně ve směru jízdy), také identifikaci vozidla podle značky, typu a stáří. Místa odběru byla čtyři a to čerpací stanice PHM (Benzina, JET, Shell, Aral). Na základě těchto zapsaných a roztríděných údajů lze provést následující pojednání.



Obr.58 Podíl vozidel podle tovární značky, s pneumatikami ojetými pod 1,6mm

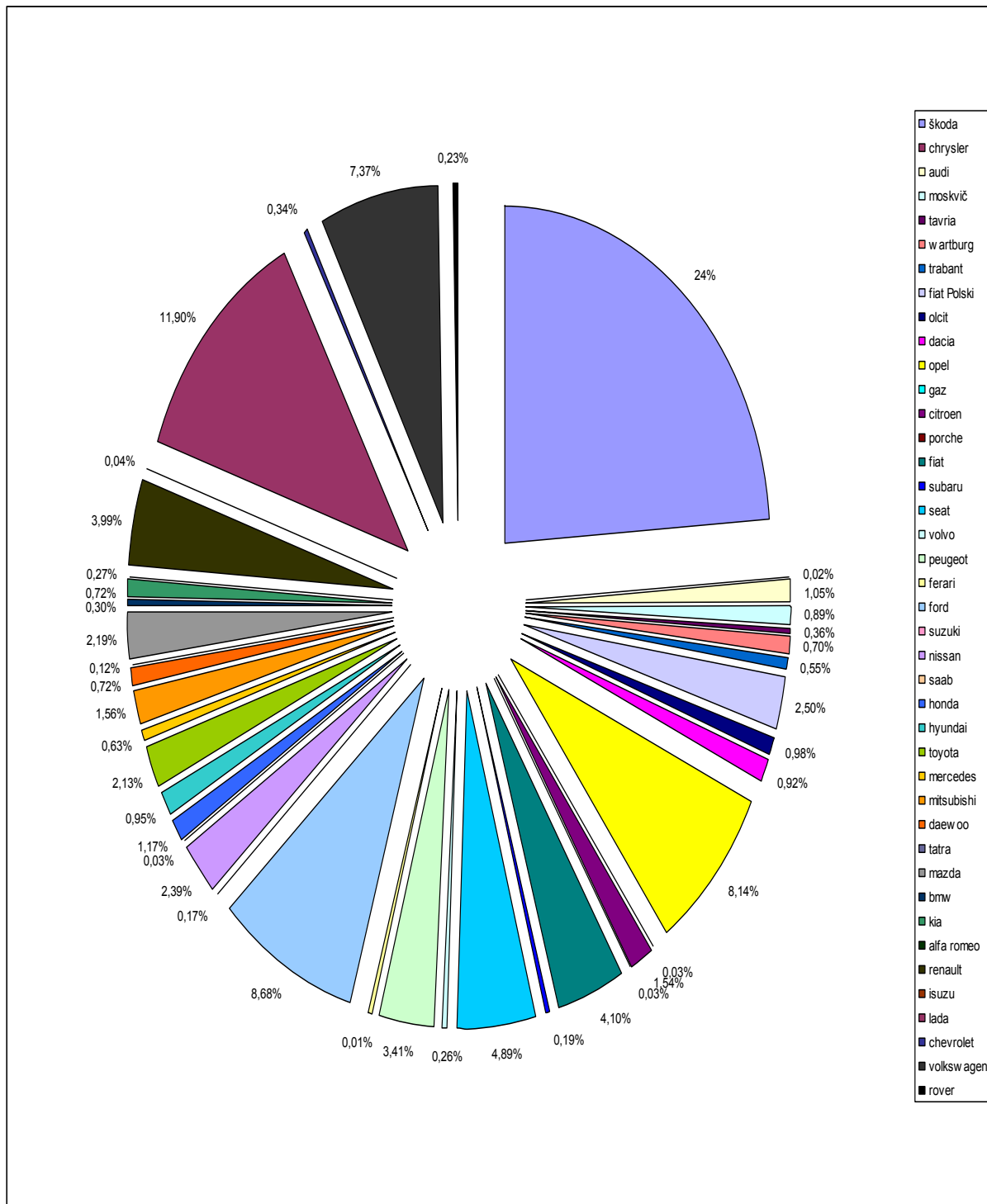
Graf na obr.58 nám ukazuje podíl vozidel podle tovární značky, u nichž byla na některé z pneumatik naměřena hodnota hloubky dezénu nižší než 1,6mm tedy pod zákonem [58] stanovenou mez. Vysoký podíl automobilů na obr.58.značky Škoda zde zřejmě souvisí s faktem, že v základním souboru měřených vzorků s počtem 2600 pneumatik, byla vozidla značky Škoda zastoupena nejpočetněji (viz obr.60).



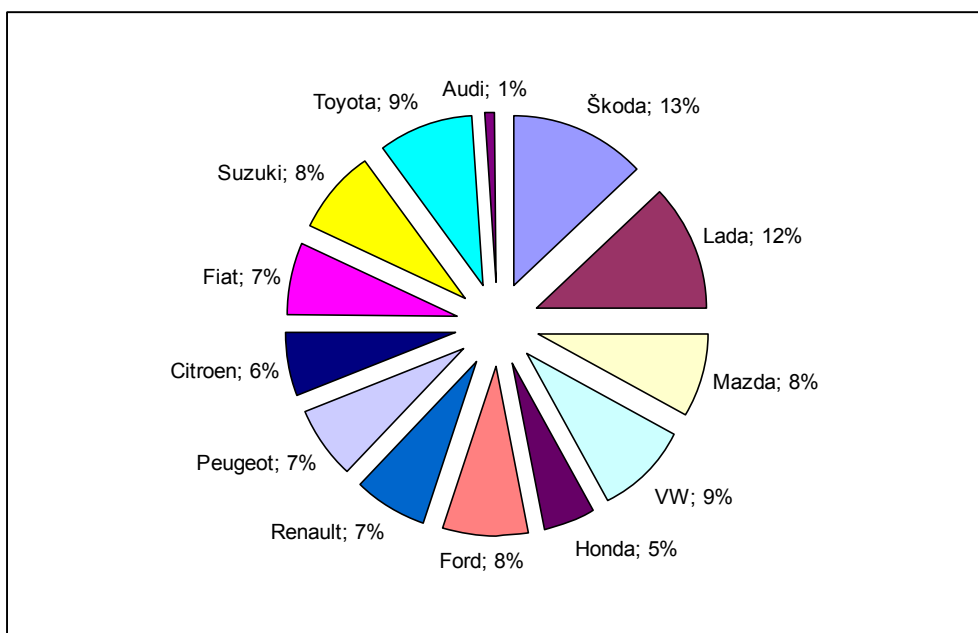
Obr.59 Podíl vozidel Škoda podle typu, s pneumatikami ojetými pod 1,6mm

Obr.59, kde je znázorněn podíl vozidel Škoda podle typu, s pneumatikami ojetými pod 1,6mm, jednoznačně demonstruje, že převážná většina (83%) vozidel Škoda, na jejichž obutí byl tento nedostatek zjištěn, je starší produkce, kde časový předěl tvoří skupina vozů Felicia

(9%) jež je přibližně dvojnásobně početnější než vozidla nová (Fabia, Octavia /oba typy staršího vzoru/), ale zároveň přibližně dvojnásobně méně početná než vozidla stará (Š100, 1000, 105/120). Zajímavostí je, že vozidla typu Superb, Octavia a Fabia (oba novějšího vzoru), přestože tvoří téměř čtvrtinu podílu značky Škoda v celkovém počtu měřených vozidel, se mezi automobily s defektem obutí (podhuštěným nebo ojetým) vůbec nevyskytují.

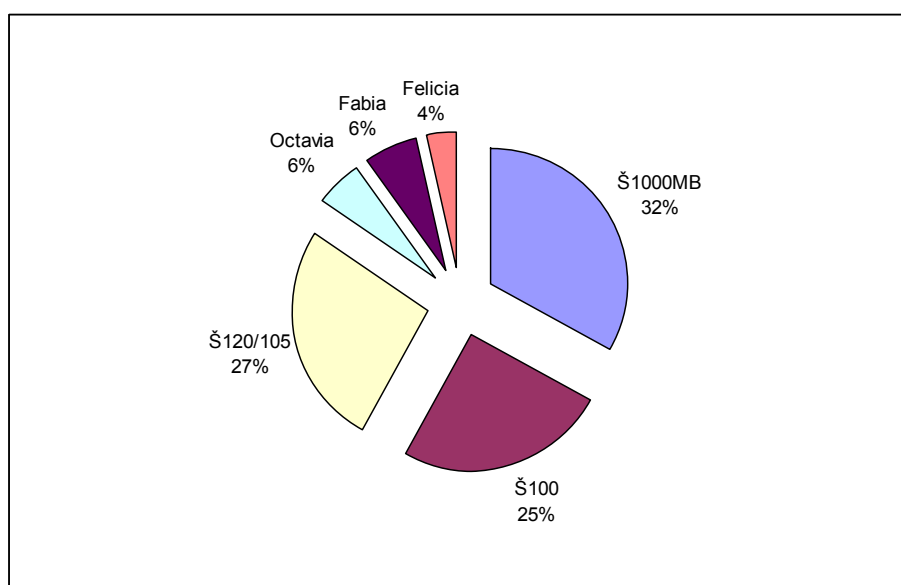


Obr.60 Podíl všech měřených vozidel podle tovární značky



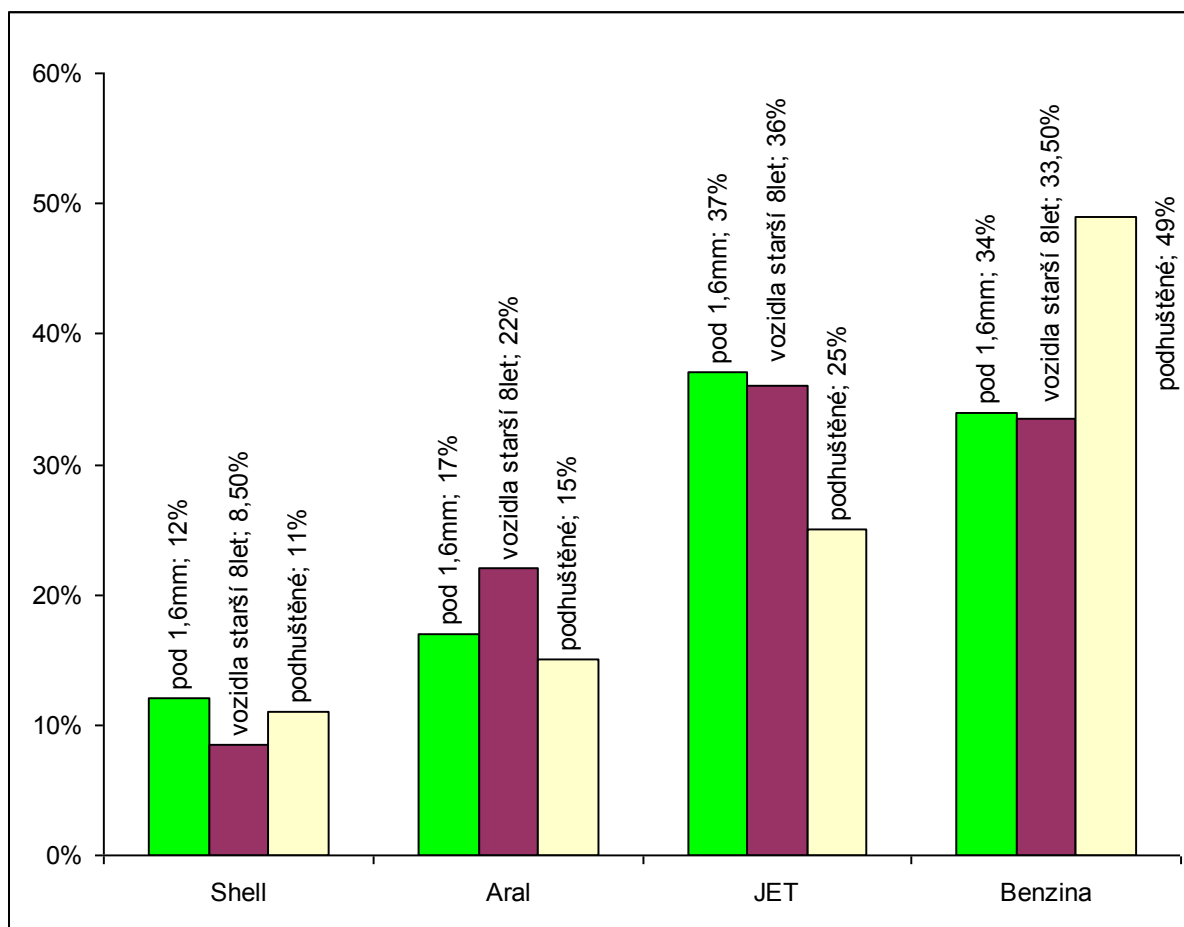
Obr.61 Podíl vozidel podle tovární značky, s pneumatikami podhuštěnými pod výrobcem stanovenou mez

U měření tlaku huštění (viz obr.62) je u pneumatik vozidel Škoda situace obdobná (modely Š100, 1000, 105/120 zastoupeny 86%), jen s tím rozdílem, že difference mezi četností typů Felicia, Fabia a Octavia (opět oba ne nejnovější verze) je nepatrná. Diverzifikace podhuštěných pneumatik podle tovární značky (obr.61) vychází pro značku Škoda příznivěji. Obsazuje spolu s našimi silnicemi tradiční značkou Lada sice nejpočetnější skupinu vozidel s podhuštěným obutím, ale uvážíme-li, že základní soubor měřených vzorků je na vozidla Škoda a pak Lada nejbohatší, existuje vyšší pravděpodobnost, že se vozidla těchto značek objeví i ve skupině vozidel majících závady na pneumatikách. Rozdíly mezi ostatními vozidly s nedostatky obutí podle obr. 61 už nejsou markantní a kolísají kolem 7%. Jedinou výjimkou je 1% -ní zastoupení značky Audi. Všechna vozidla, u nichž byly zjištěny nedostatky pneumatik (podhuštění a ojetí pod 1,6mm) byla starší 8-mi let.



Obr.62 Podíl vozidel Škoda podle typu, pneumatikami podhuštěnými pod výrobcem stanovenou mez

Výše uvedená zjištění nasvědčují, že menší pozornost pneumatikám věnují majitelé vozidel staršího data výroby/uvedení do provozu. Nejenže neobnovují obutí v případě sjetí vzorku pod zákonem [58] stanovenou hloubku dezénu, ale podceňují i důležitost správného tlaku huštění.

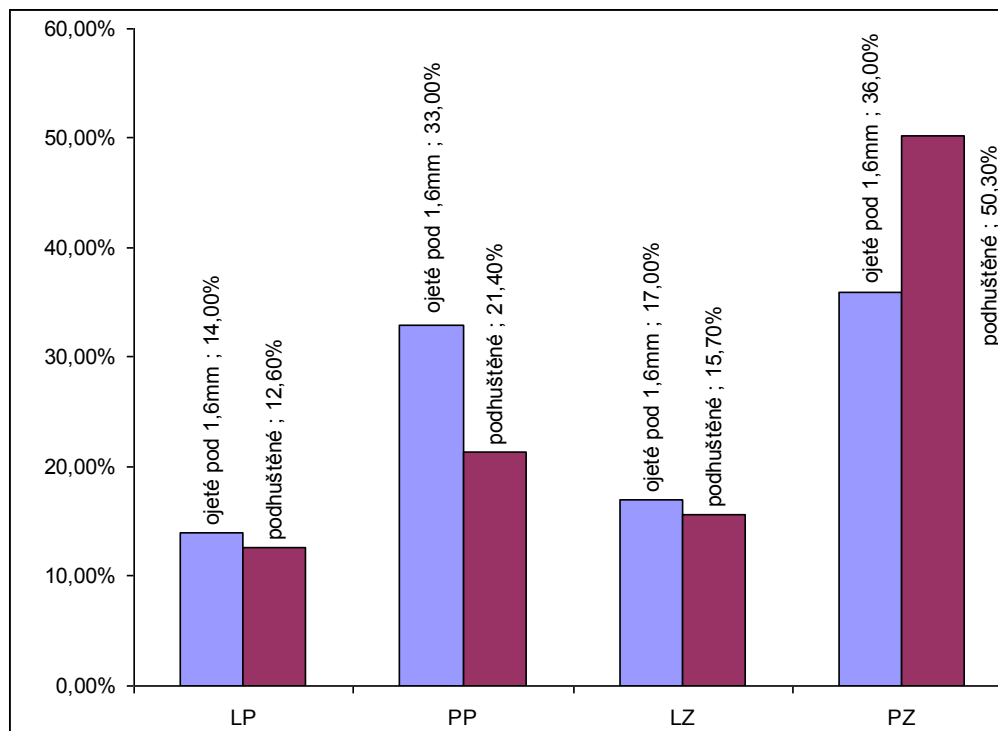


Obr.63 Podíl podhuštěných, ojetých pneumatik a vozidel starších 8 let podle místa měření

Obr.63 naznačuje, že k čerpacím stanicím PHM Benzina a JET přijíždějí častěji tankovat řidiči starších vozidel a také řidiči vozidel kde je častěji zanedbávána údržba a kontrola obutí, než je tomu u čerpacích stanic Shell a Aral. To doplňuje údaje z předchozího odstavce, jež nasvědčují, že s ohledem na nižší průměrné ceny PHM čerpadel Benzina a JET, jsou využívány často řidiči, kde snaha ušetřit vede k tomu, že nehodlají investovat ani do obnovy pneumatik.

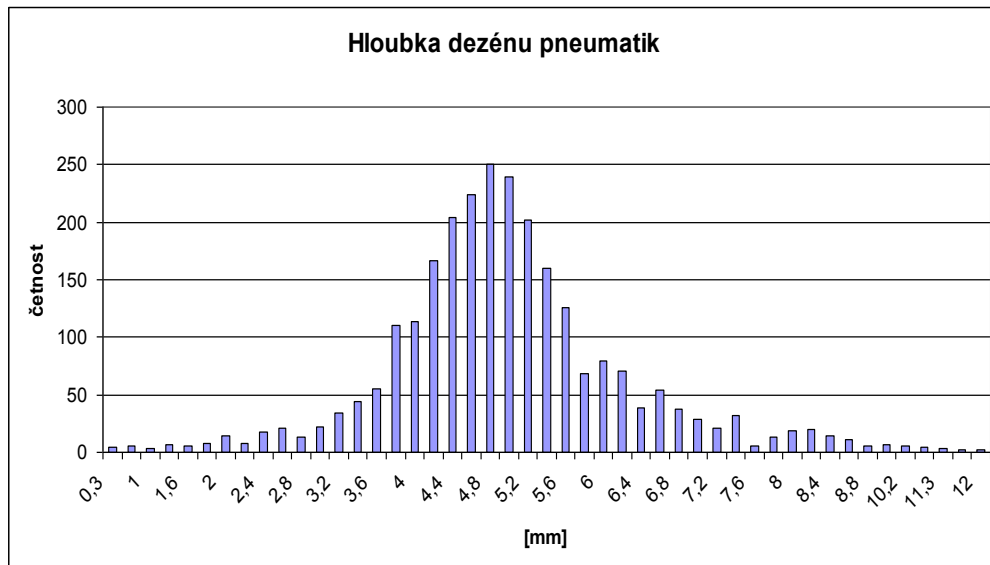
Zařadíme-li do úvahy obr.64, kde je znázorněno rozdělení ojetých a podhuštěných pneumatik podle jejich umístění na vozidle, lze zaregistrovat evidentní diferenci mezi koly na pravém a levém (tedy na straně řidiče!) boku vozidla. Což vypadá jako by řidič podvědomě více sledoval stav pneumatik právě na té straně, při které se pohybuje častěji. Při tom na zadní nápravě vpravo je dle průzkumu pneumatika zanedbávána nejčastěji a to u obou sledovaných charakteristik. Oproti přední pneumatice vlevo bývá až dvakrát častěji ojetá pod zákonnou hodnotu a více než čtyřikrát častěji podhuštěná. Pravá přední pneumatika, bývá ojetá přibližně stejně často jako pravá zadní avšak množství případů podhuštění bylo sledováno poloviční, což zřejmě souvisí s nároky na kola řídící nápravy – řidič doplní tlak podhuštěné pneumatiky z důvodu zhoršené kvality a pohodlí řízení. Podle [50] vlivem ztrát v pneumatice, které se mění v teplo, jsou síly potřebné ke stlačení pneumatiky větší, než síly, jimiž působí pneumatika na vozovku při navracení do kruhového tvaru (hystereze). Měrné tlaky v přední

části stopy jsou tedy větší, a proto výslednice elementárních sil ve stopě pneumatiky, tzn. svíslá, přesněji řečeno radiální reakce vozovky je předsunuta před svíslou osu kola. Reakce vozovky je stejně velká jako zatížení kola, tzn. vzniká silová dvojice neboli moment, který působí proti otáčení kola. Tento moment vyvolá vodorovnou reakci, která směřuje proti pohybu kola. Tato vodorovná reakce je nazývána valivým odporem kola. Tento odpor může řidič zaregistrovat právě zhoršenými jízdními vlastnostmi a nárůstem spotřeby PHM, což je další faktor, který přiměje řidiče tlak huštění zkontrolovat a doplnit.

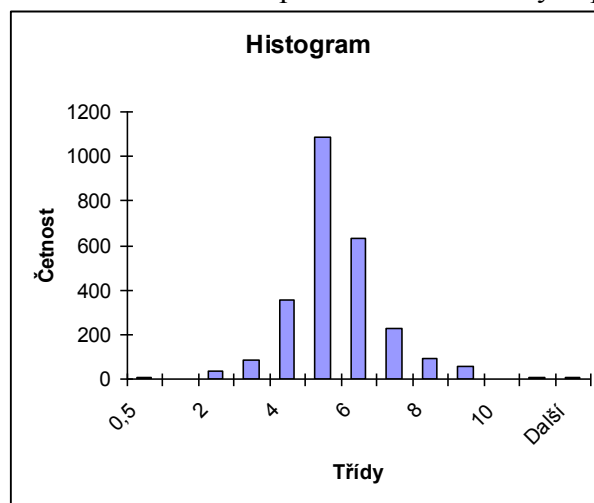


Obr.64 Rozdělení ojetých a podhuštěných pneumatik podle umístění na vozidle (LP...levá přední, PP...pravá přední, LZ...levá zadní, PZ...pravá zadní)

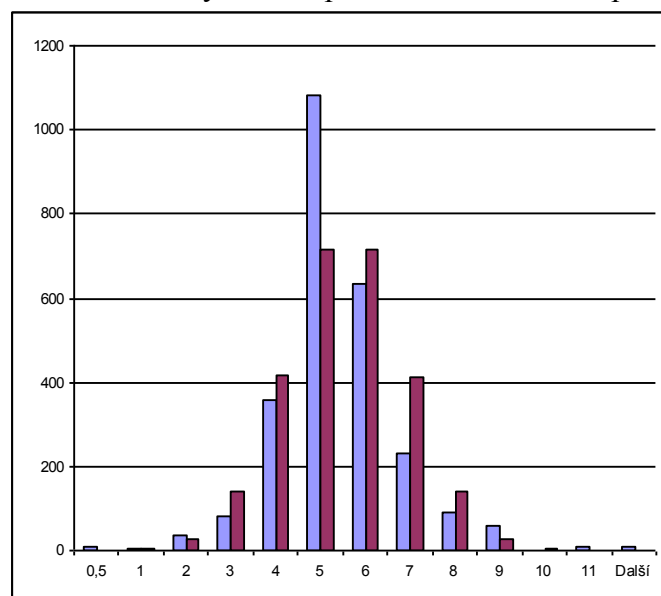
Pro přehled o zjištěných datech hloubky dezénu byl sestaven histogram hloubky dezénu pneumatik sledovaných průzkumem na obr.65, kde na vertikální ose y je vynesena četnost a na horizontální ose x hloubka dezénu v milimetrech. Předpokládáno bylo normální $N(\mu, \sigma^2)$ rozdělení pravděpodobnosti [83]. Výsledek tohoto předpokladu, tedy výsledek měření zobrazený histogramem hloubky dezénu pneumatik sledovaných průzkumem na obr.65, byl podroben χ^2 testu dobré shody [84]. Naměřená data byla uspořádána do 12 tříd (viz Tab.T4.1, sloupec *třídy*) s ohledem na to, aby četnosti v krajních třídách dosahovaly hodnoty alespoň 5. Histogram po zatřídění naměřených hodnot do uvedených tříd je znázorněn na obr.66. Výpočet je proveden dle [83], [84]. Byla testována hypotéza kdy H_0 : výběr pochází ze základního souboru s normálním rozdělením pravděpodobnosti; H_1 : neplatí H_0 ; Pro rozhodnutí o platnosti hypotézy H_0 bylo třeba spočítat hodnota statistiky χ^2 (jako součet posledního sloupce tab.T4.1. /8454,59/) Tato hodnota je v porovnání s 5% horním kvantilem χ^2 rozdělení /18,31/ daleko větší, a proto lze hypotézu H_0 zamítnout. Výběr při měření hloubky dezénu pneumatik nepochází ze základního souboru s normálním rozdělením pravděpodobnosti. Pro vizuální porovnání histogramu z obr.66 je přiložen histogram výběru ze základního souboru s normálním rozdělením pravděpodobnosti na obr.67. Toto zjištění signalizuje, že řidiči/majitelé automobilů v České republice obecně věnují pozornost kontrole a obnově stavu pneumatik, v tomto případě hloubce dezénu.



Obr.65 Hloubka dezénu pneumatik sledovaných průzkumem



Obr.66 Histogram hodnot hloubky dezénu po zařazení do 12 tříd pro χ^2 test dobré shody



Obr.67 Porovnání histogramu hodnot hloubky dezénu (modrý) a histogramu výběru ze základního souboru s normálním rozdělením pravděpodobnosti (červený)

hloubka
dezenu
(mm)

	4,993462	1,75145							
				Třída	Četnost	F(xi)	pit	n _{pi}	(n _i -n _{pi}) ² /n _{pi}
0,3	4	1,2	88,11432	0,5	10	0,000343	0,000343	1	93,11
0,5	6	3	121,1472	1	3	0,001274	0,000932	2	0,14
1	3	3	47,84321	2	35	0,011852	0,010577	28	2,04
1,5	7	10,5	85,42991	3	82	0,065996	0,054145	141	24,54
1,6	6	9,6	69,09349	4	357	0,226424	0,160428	417	8,66
1,8	8	14,4	81,58557	5	1083	0,501971	0,275547	716	187,57
2	14	28	125,4514	6	635	0,776539	0,274568	714	190,86
2,2	8	17,6	62,42742	7	230	0,935262	0,158723	413	119,77
2,4	18	43,2	121,0688	8	91	0,98845	0,053188	138	60,82
2,6	21	54,6	120,3018	9	57	0,998767	0,010316	27	153,56
2,8	13	36,4	62,54656	10	0	0,999923	0,001156	3	970,13
3	22	66	87,42556	11	10	0,999997	7,46E-05	0	0,19
3,2	34	108,8	109,3611	Další	7	1	2,83E-06	0	6643,19
3,4	44	149,6	111,7213	suma	2600			1	8454,59
3,6	55	198	106,7954						
3,8	110	418	156,6785					KH	18,31
4	114	456	112,5141						
4,2	166	697,2	104,5105						
				průměr	5,0				
				směrodatná					
				odchylka	1,3				
				n	2600				
4,4	204	897,6	71,84811						
4,6	224	1030,4	34,67788						
4,8	250	1200	9,356842						
5	239	1195	0,010218						
5,2	202	1050,4	8,616943						
5,4	160	864	26,44376						
5,6	126	705,6	46,354						
5,8	68	394,4	44,23429						
6	79	474	80,03645						
6,2	71	440,2	103,3572						
6,4	39	249,6	77,15567						
6,6	54	356,4	139,3722						
6,8	37	251,6	120,7525						
7	29	203	116,7597						
7,2	21	151,2	102,2451						
7,4	32	236,8	185,3257						
7,6	6	45,6	40,76426						
7,8	13	101,4	102,3966						
8	19	152	171,7462						
8,2	20	164	205,6378						
8,4	14	117,6	162,4631						
8,6	11	94,6	143,0783						
8,8	5	44	72,44868						
9	7	63	112,3665						
10,2	6	61,2	162,6483						
10,8	4	43,2	134,8636						
11,3	3	33,9	119,3173						
11,6	2	23,2	87,2927						
12	2	24	98,18316						

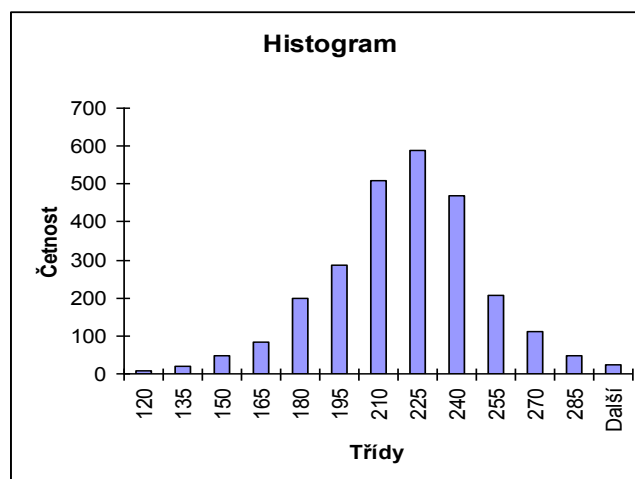
2600

Tab.T4.1. χ^2 test dobré shody výběru při měření hloubky dezénu pneumatik

Histogram hodnot měření tlaku huštění je znázorněn na obr.68. Obdobně jako v případě hloubky dezénu bylo předpokládáno normální $N(\mu, \sigma^2)$ rozdělení pravděpodobnosti [83]. Výběr měření zobrazený histogramem tlaku huštění pneumatik sledovaných průzkumem na obr.68, byl rovněž podroben χ^2 testu dobré shody [84]. Naměřená data byla uspořádána do 12 tříd (viz Tab.T4.2, sloupec *třídy*) s ohledem na to, aby četnosti v krajních třídách dosahovaly hodnoty alespoň 5. Histogram po zařazení naměřených hodnot do uvedených tříd je znázorněn na obr.69. Výpočet je proveden dle [83], [84]. Byla testována hypotéza kdy H_0 : výběr pochází ze základního souboru s normálním rozdělením pravděpodobnosti; H_1 : neplatí H_0 ; Pro rozhodnutí o platnosti hypotézy H_0 bylo třeba spočítat hodnota statistiky χ^2 (jako součet posledního sloupce tab.T4.2 /91,04/). Tato hodnota je v porovnání s 5% horním kvantilem χ^2 rozdělení /16,92/ větší, i když ne tak výrazně jako v případě hloubky dezénu, a proto lze hypotézu H_0 zamítnout. Výběr při měření tlaku huštění pneumatik nepochází ze základního souboru s normálním rozdělením pravděpodobnosti. Pro vizuální porovnání histogramu z obr.69 je přiložen histogram výběru ze základního souboru s normálním rozdělením pravděpodobnosti na obr.70. Toto srovnání ukazuje, že rozdíl obou histogramů není diametrální jako v případě hloubky dezénu, nicméně potvrzuje závěr učiněný výše, tedy že řidiči/majitelé automobilů v České republice obecně věnují pozornost kontrole a obnově stavu pneumatik, avšak v případě tlaku huštění je jejich důslednost nižší než v případě hloubky dezénu. To je možná způsobeno hrozbou postihu, jestliže hloubka dezénu pneumatiky poklesne pod zákonem určenou minimální hranici, jež je pro tlak huštění omezena hodnotou maximální, přičemž policejní hlídka tlak huštění obvykle nekontroluje tak jako hloubku dezénu.



Obr.68 Histogram tlak huštění pneumatik sledovaných průzkumem



Obr.69 Histogram hodnot tlaku huštění po zařazení do 12 tříd pro χ^2 test dobré shody

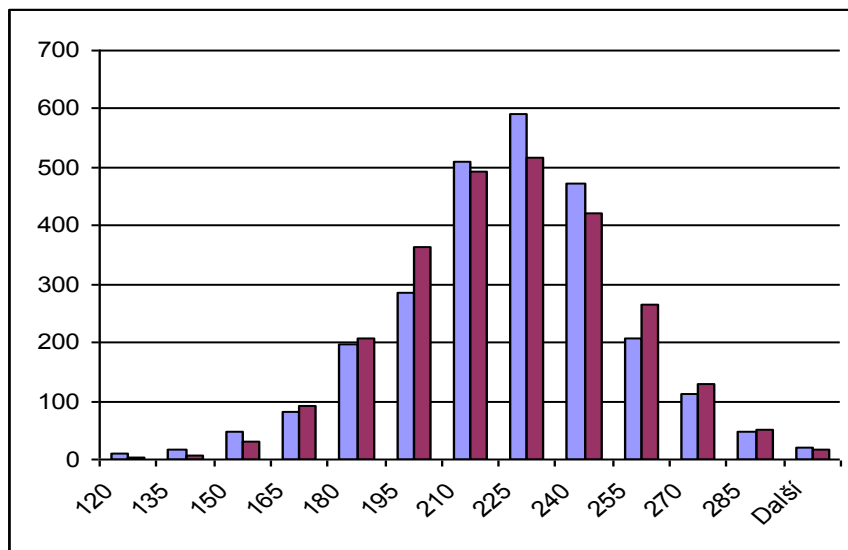
[kPa]	n	212,9354	866,482
110	1	110	10595,69
112	1	112	10187,95
114	1	114	9788,21
116	1	116	9396,469
118	1	118	9012,727
120	4	480	34547,94
122	5	610	41346,22
130	6	780	41269,67
132	7	924	45853,76
140	7	980	37236,99
142	8	1136	40254,63
144	9	1296	42768,79
146	7	1022	31362,42
150	15	2250	59412,94
154	10	1540	34733,8
156	21	3276	68074,4
160	13	2080	36428,01
162	19	3078	49293,85
164	19	3116	45498,77
166	29	4814	63884,98
170	23	3910	42399,29
172	31	5332	51946,88
174	30	5220	45478,93
176	26	4576	35469,79
178	32	5696	39055,4
180	26	4680	28203,23
182	29	5278	27752,94
184	37	6808	30978,49
186	45	8370	32648,17
188	40	7520	24870,94
190	38	7220	19989,21
192	51	9792	22352,81
194	47	9118	16851,79
196	55	10780	15774,4
198	50	9900	11153,29
200	61	12200	10206,77
202	58	11716	6935,793
204	60	12240	4790,466
206	72	14832	3463,168
208	78	16224	1899,926
210	77	16170	663,4692
212	84	17808	73,49533
214	86	18404	97,47291
216	87	18792	817,0925
218	82	17876	2103,327
220	86	18920	4292,156
222	84	18648	6902,049
224	81	18144	9916,483
226	80	18080	13654,73
228	71	16188	16112,93
230	68	15640	19801,67
232	66	15312	23988,33
238	38	9044	23872,93

Třída	Četnost	F(xi)	pit	n _{pi}	(n _i -n _{pi}) ² /n _{pi}
120	9	0,000796	0,000796	2	23,19
135	18	0,004053	0,003257	8	10,73
150	46	0,016257	0,012204	32	6,42
165	82	0,051714	0,035457	92	1,13
180	197	0,131596	0,079882	208	0,55
195	287	0,271163	0,139567	363	15,86
210	511	0,460283	0,18912	492	0,76
225	590	0,659045	0,198762	517	10,37
240	471	0,821067	0,162021	421	5,87
255	208	0,9235	0,102434	266	12,77
270	112	0,973725	0,050224	131	2,64
285	47	0,992821	0,019096	50	0,14
Další	22		1	19	0,60
suma				1	91,04
				KH	16,92

průměr 212,9
směrodatná odchylka 29,4
n 2600

240	43	10320	31497,22
242	38	9196	32100,57
244	36	8784	34740,37
246	28	6888	30611,53
248	30	7440	36885,82
250	26	6500	35718,43
252	25	6300	38151,1
254	25	6350	42157,57
256	21	5376	38945,78
258	13	3354	26400,65
260	19	4940	42086,48
262	15	3930	36110,05
264	13	3432	33898,73
266	11	2926	30974,39
268	10	2680	30321,12
270	10	2700	32563,7
272	6	1632	20931,77
274	9	2466	33559,99
276	8	2208	31817,17
278	6	1668	25400,43
280	7	1960	31483,64
282	6	1692	28619,53
284	5	1420	25250,9
286	4	1144	21353,75
288	3	864	16904,09
290	4	1160	23755,82
292	3	876	18753,64
294	3	882	19714,42
296	2	592	13799,46
298	2	596	14471,98
300	1	300	7580,247

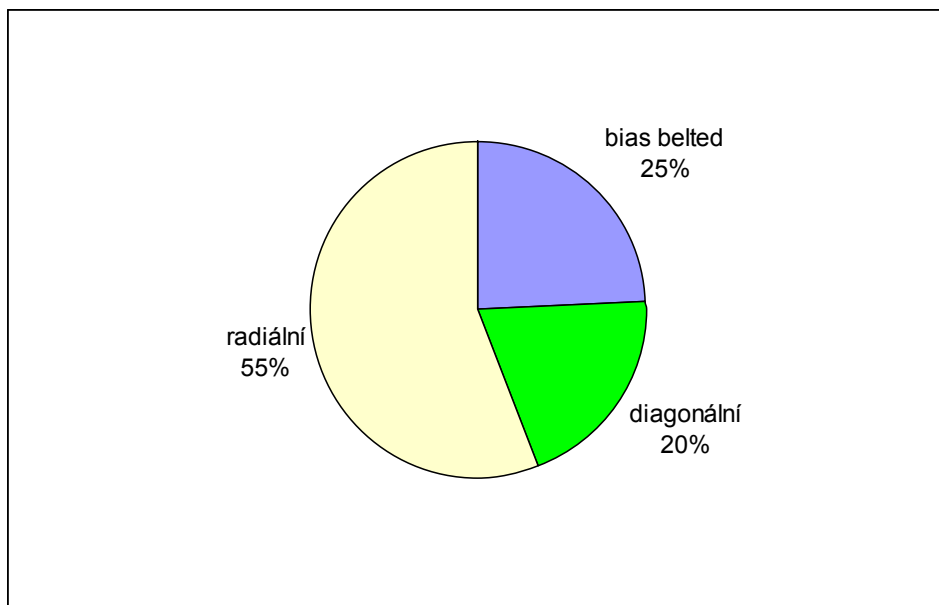
Tab.T4.2. χ^2 test dobré shody výběru při měření tlaku huštění pneumatik



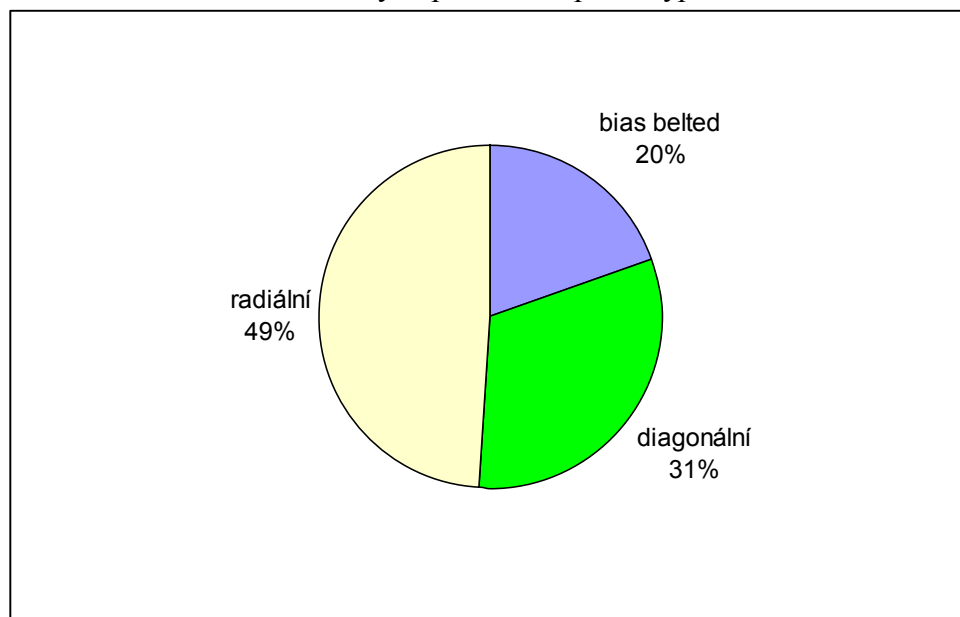
Obr.70 Porovnání histogramu hodnot tlaku huštění (modrý) a histogramu výběru ze základního souboru s normálním rozdělením pravděpodobnosti (červený)

Sledováním konstrukce [85], [86], [87] měřených pneumatik viz obr.71 lze dojít k závěru, že radiální konstrukce silně převládá a to jak u vozů domácích značek tak i

zahraniční provenience a také bez rozdílu stáří automobilu. Naopak diagonální pneumatiky byly zjištěny hlavně na vozidlech starších typů viz obr.72, kde tvoří skoro třetinu podílu avšak v celkovém počtu všech vozidel klesá jejich díl na pětinu. To naznačuje možný ústup výrobců pneumatik od této konstrukce. Konstrukce bias belted co do celkového počtu je zastoupena jednou čtvrtinou s tím, že je přibližně stejně rozložena mezi vozidla mladší i starší osmi let.



Obr.71 Podíl měřených pneumatik podle typu konstrukce



Obr.72 Použití pneumatik podle typu konstrukce na vozidlech starších osmi let

Pokles počtu pneumatik diagonální konstrukce u vozidel mladších osmi let nastává jak ve prospěch konstrukce radiální tak bias belted téměř rovnocenně, jak je vidět z porovnání obr.71 a obr.72. Použití pneumatik současně různé konstrukce na vozidle a ne shodné pneumatiky na téže nápravě tedy v rozporu s [88] bylo zaznamenáno zcela výjimečně, kolem 2% vozidel (všechna starší osmi let).

5) Experimentální posouzení odvodnění za součinnosti drážek a pneumatik při průjezdu vozidla

5.1 Popis měření, postup

5.1.1 Charakteristika míst měření

Jak již bylo popsáno v odd. 3.2.4 pro měření účinků odvodnění, kdy je v součinnosti pneumatika jedoucího automobilu přes vyfrézované drážky na vozovce pozemní komunikace, byly vybrány dvě lokality odlišného charakteru. První (viz odd.5.2.1.) je lokalita, kde z pohledu životnosti vozovky došlo k úpravě poměrně nedávno a funkce drážek není ovlivněna deformací vozovky, dodatečnou stavebně technickou údržbou komunikace ani jejich vlastním sjetím. Naproti tomu silnice uvedená v odd. 5.2.1, doznala zejména v drážkovaném úseku četných zásahů ze strany správce, které by funkci drážek vystavených navíc desetiletému provoznímu zatížení, mohly ovlivnit.

5.1.2 Instalace měřícího zařízení

Pro měření porovnávací veličiny, tedy rychlosti proudění srážkové vody, byly instalovány vždy dva snímače níže uvedeného měřícího zařízení (pracujícího na principu popsaného v 2.3.2 čili magneticko-indukčního měření průtoku). Jeden na volnou nedrážkovanou plochu vozovky /pro zjednodušení jej označme A/ a druhý přímo do vyfrézované drážky /snímač B/. Aby snímač B dosedl volně až na dno, byla drážka v místě uložení lehce mechanicky zahlazena, především její boky. Oba snímače byly umístěny směrově na pravém okraji vozovky (se vzájemným rozstupem 1,8m, tedy přes další drážkovaný pás, z důvodu eliminace vzájemného vlivu) snímač B na konci drážky, snímač A rovnoběžně podélné ose silnice na stejném místě mimo drážku.

Aby mohlo být měření provedeno v obou směrech jízdy, muselo být měřící zařízení instalováno postupně s mezi přestěhováním i na opačnou stranu v příčném směru silnice. V každý měřící den v téže lokalitě byla volena různá místa a různé drážky. Snímače byly s vyhodnocovací jednotkou propojeny vodiči.

K zjištění rychlosti projíždějícího vozidla byl použit stacionární radar. Teplota rozstříkované vody a teplota ovzduší dvěma teploměry pro každé měřené medium. Všechny naměřené údaje byly odečítány a zapisovány ručně, dále tříděny, dopočítávány a zpracovávány s využitím MS Office. Hodnoty rychlosti proudění vody měřené i dopočítávané byly vzhledem k toleranci měřícího zařízení matematicky zaokrouhlovány na 0,25m/s.

Voda byla rozlévána vždy až na vozovku mokrou od atmosférických srážek tak, aby nebyly průzkumem měněny jízdní podmínky vozidel z důvodu bezpečnosti provozu. Výška vodní hladiny udržované na silnici byla sledována na zalití plastových šablon tl.3mm, přilepených mimo jízdní stopu k vozovce.

Všechny technické prostředky potřebné k měření a osoby měření provádějící, byly oku řidiče maximálně ukrývány, aby byl zachován nerušený dopravní provoz se všemi jeho běžnými projevy z důvodu objektivnosti měření. Pojízdna zásobárna vody používaná k měření (nákladní cisterna) byla ve všech případech odstavena zcela mimo pozemní komunikaci; voda k místu měření byla dopravována požární hadicí tlakem čerpadla cisterny.

5.1.3 Stanovení potřebného počtu měřených průjezdů

Při stanovení rozsahu náhodného výběru měření průjezdů vozidel přes drážkovaný/nedrážkovaný úsek komunikace pro posouzení součinnosti pneumatiky a drážkování na vozovce, bylo užito dle [57] statistické metody 3σ . Pro určení krajních hodnot bylo nejdříve provedeno zkušební měření s 300 průjezdy, poté měření přerušeno a data seříděna. Jako minimální hodnota byla naměřena 0, jako maximální 3,0m/s. Shodné meze byly přebrány stanovením rozsahu náhodného výběru a aplikován vztah (2.5.1) a rovnice (2.5.2) kde

- Δ ... Požadovaná přesnost výběrového průměru (vzhledem k možnostem měření)
 $= \pm 0,25\text{m/s}$
 u_p ... normovaná náhodná veličina pro 95% spolehlivost = 1,96 (statistické tabulky [13])
 σ' ... odhad směrodatné odchylky základního souboru = 0,5;
 jestliže $\mu - 3\sigma = 0\text{m/s}$, $\mu + 3\sigma = 3\text{m/s}$, $(-3\sigma, +3\sigma) = 6$, potom $3/6 = 0,5$

po dosazení do (2.5.2)

$$n = 1,96^2 \cdot 0,5^2 \cdot (0,25^2)^{-1} = 15,36 \approx 16 \quad (5.1.1)$$

Potřebný počet průjezdů vozidel je tedy 16.

5.2 Lokality, podmínky měření a naměřená data

5.2.1 Silnice I/35 mezi obcí Hřebeč a Moravská Třebová

Charakteristika komunikace: třípruhová, s jízdním pruhem pro pomalá vozidla ve směru od Moravské Třebové (MT), směrově v přímé s podélným sklonem 4-5%, příčný sklon jednostranný vpravo 0,5% (ve směru od MT), mírná podélná nerovnost ve stopě jízdního pruhu pro pomalá vozidla (vyjeté podélné koleje) povrch asfaltový beton; intenzita dopravy podle sčítání v roce 2005 je 13297voz/24h [108]

Charakteristika drážkování: drážkování s jedním sklonem 45° v celé šíři komunikace, se sklonem zleva doprava ve směru od MT, šířka drážky 30mm, hloubka drážky 5mm, sdružené po 5, rozestup drážkování 1100mm, stáří úpravy je 20měsíců.

Datum měření: 10.7.2008,

Počasí: polojasno - zataženo, chvílemi déšť malé intenzity vozovka mokrá již před postřikem

Teplota ovzduší a vody: 20°C/ 18°C

Drážky zaplaveny postřikem s nadvýšením hladiny 3-4mm

Počet měřených průjezdů: 300 v každém směru vozovka mokrá již před postřikem

Průměrná rychlost vozidel ve směru do MT/z: 93,2km/h/ 79,7km/h

Vybavení: sestava UFM 535-P-MAG, čidlo MAG-Flow OG-s-P mikro, vyhodnocovací jednotka UFM 535 -W4,

Výsledné hodnoty rychlosti proudění vody, zaokrouhlené na 0,25m/s

směr z MT		směr do MT	
rychlost proudění	rychlost vozidla	rychlost proudění	rychlost vozidla
m/s	km/h	m/s	km/h
drážka	vozovka	drážka	vozovka
0,25	0,25	0,75	0,5
	50,2		70,5

0,25	0,25	51,2	0,75	0,5	72,3
0,25	0,25	52	0,75	0,75	74,3
0,25	0,25	52,6	1	0,5	78,9
0,25	0,25	51,4	1	0,75	77,1
0	0,25	51,8	1	0,75	74,1
0,25	0,25	50,4	1	0,5	73,6
0,25	0,25	50,3	1	0,75	76,4
0,25	0,25	52	1	0,75	78,2
0,25	0,25	53,1	1	0,75	77
0,25	0,25	51,7	1	0,75	79,3
0,25	0,25	51,9	1	0,75	76,5
0,25	0,25	52,3	1	0,75	78,2
0,25	0,25	51,3	1	0,75	72,6
0,25	0,25	51,7	1	0,75	78,1
0,25	0,25	51,1	1	0,75	79,2
0,25	0,25	52,9	1	0,75	74
0,25	0,25	53,2	1	0,75	78,8
0,25	0	50,9	1	0,75	79,1
0,25	0,25	51,3	1	0,75	78
0,25	0,25	52,2	1	0,75	78,1
0,25	0,25	51,8	1	0,75	79,2
0,25	0,25	51,2	1	0,75	78,5
0,5	0,5	53,9	1	0,75	77,6
0,5	0,5	54,2	1	0,75	78,2
0,5	0,5	55,5	1	0,75	78,4
0,5	0,5	54,6	1	0,75	79,2
0,5	0,5	55,4	1	0,75	78
0,5	0,5	56,2	1	0,75	77,6
0,5	0,5	56,1	1	0,75	77,1
0,5	0,5	55,4	1	0,75	78
0,5	0,5	55,7	1	0,75	79,6
0,5	0,5	56,4	1	0,75	77,3
0,5	0,5	53,9	1	0,75	77
0,5	0,5	54,8	1	0,75	76,9
0,5	0,5	56,8	1	0,75	78,1
0,5	0,5	54,7	1	0,75	76
0,5	0,5	56,7	1	0,75	78,9
0,5	0,5	55,4	1	0,5	75
0,5	0,5	57,2	1	0,75	78,6
0,5	0,5	56,3	1	0,75	79,2
0,5	0,5	58,1	1	0,75	80,1
0,5	0,5	54,9	1	0,75	79,3
0,5	0,5	56,2	1	0,75	80
0,5	0,5	54,8	1	0,75	80,2
0,5	0,5	54,4	1	0,75	79,6
0,5	0,5	55,7	1	0,75	77,8
0,5	0,5	55,3	1	0,75	78
0,75	0,5	58,9	1	0,75	78
0,75	0,75	59,2	1	0,75	79,2
0,75	0,5	58,9	1	0,75	80,1
0,75	0,5	59,9	1	0,75	79,9
0,75	0,5	58,7	1	0,75	80,2
0,75	0,75	59,2	1	0,75	81,3
0,75	0,75	59,8	1	0,75	80,2

0,75	0,5	57,9	1	0,75	79
0,75	0,5	58,8	1	0,75	78,5
0,75	0,5	59,1	1	0,75	77,9
0,75	0,5	56,9	1	0,75	78,4
0,75	0,75	60,2	1	0,75	79
0,75	0,5	58,9	1	0,75	78,9
0,75	0,5	59,4	1	0,75	77,9
0,75	0,5	57,8	1	0,5	76,3
0,75	0,75	60,6	1	0,75	77,8
0,75	0,5	59,9	1	0,75	80,1
0,75	0,5	58,7	1	0,75	80,2
0,75	0,25	56,8	1	0,5	75,8
0,75	0,5	57,7	1	0,75	78,9
1	0,5	64,5	1	0,75	80,4
1	0,75	63,9	1	0,75	80
1	0,75	64	1	0,75	80,6
1	0,5	63,2	1,25	1	82
1	0,75	62,3	1,25	1	84,2
1	0,5	64,8	1,25	1	85,2
1	0,5	63,8	1,25	1	84,7
1	0,75	64,7	1,25	1	82,9
1	0,75	63,9	1,25	1	84,9
1	0,75	65,5	1,25	1	86,5
1	0,75	65,9	1,25	1	85,3
1	0,75	68,3	1,25	1	88,7
1	0,75	69,1	1,25	1	87,7
1	0,75	65,7	1,25	1	88
1	0,75	66,3	1,25	1,25	89,9
1	0,5	64,5	1,25	1,25	90
1	0,75	66,1	1,25	1	88,7
1	0,75	66,8	1,25	1	86,9
1	0,75	67,8	1,25	1	88,3
1	0,5	66,6	1,25	1	89,7
1	0,75	64,9	1,25	1	88,7
1	0,75	68	1,25	1	87
1	0,75	69,1	1,25	0,75	86,5
1	0,75	69,4	1,25	1	87,9
1	0,5	66,4	1,25	1	88,3
1	0,5	65,9	1,25	1	89,5
1	0,75	68,7	1,5	1	90,4
1	0,75	69,5	1,5	1	90,6
1	0,75	68,9	1,5	1,25	90,7
1	0,75	69,3	1,5	1	91,2
1	0,75	68,8	1,5	1	91,5
1	0,75	69,5	1,5	0,75	89,1
1	0,75	68,2	1,5	1	90
1	0,75	67,8	1,5	1	90
1	0,75	66,9	1,5	1	90,4
1,25	1,25	70,2	1,5	1	90,2
1,25	1	69,9	1,5	1	94,2
1,25	1	72,2	1,5	1	92,4
1,25	1,25	74	1,5	0,75	88,9
1,25	1,25	74,6	1,5	0,75	89,4
1,25	1	73,8	1,5	1	90,2

1,25	1	75,8	1,5	1	90,3
1,25	1	78,8	1,5	1	90
1,25	1	74,4	1,5	1	92,4
1,25	1	75,5	1,5	1	90,7
1,25	1	75,8	1,5	1	89,9
1,25	1	78,2	1,5	1	90
1,25	1,25	79,1	1,75	1	92,2
1,25	1,25	80,2	1,75	1	90
1,25	1	79,9	1,75	1	94
1,25	1	78,9	1,75	1	92
1,25	1	78,4	1,75	1	90
1,25	1	76,6	1,75	1	90,3
1,25	1	77,7	1,75	1	92
1,25	1	76,9	1,75	1	93,6
1,25	1	74,8	1,75	1	92
1,25	1	74,5	1,75	0,75	94
1,25	1	79,8	1,75	1	92,5
1,25	1	79,8	1,75	1	90,9
1,25	1	80,4	1,75	1	93
1,25	1	81,1	1,75	1	93,5
1,25	1	82,2	1,75	1	92,7
1,25	1	79,8	1,75	1	89,9
1,25	1	79,9	1,75	1	90,2
1,25	1	78,5	1,75	1,5	94
1,25	1	79,5	1,75	1,75	98
1,5	1	82,2	1,75	1,75	96,9
1,5	1	80,2	1,75	1,5	90
1,5	1,25	84,2	1,75	1,5	90,6
1,5	1,25	80,9	1,75	1,5	90,6
1,5	1,5	87,5	1,75	1	94
1,5	1	84,7	1,75	1,5	90,4
1,5	1,5	86,5	1,75	1,5	89,9
1,5	1	88,6	1,75	1,5	90
1,5	1,25	81,2	2	1,5	90,3
1,5	1	80,9	2	1,75	94
1,5	1,25	85,5	2	1,75	96,8
1,5	1	80	2	1,75	95,8
1,5	1,25	80,1	2	1,75	96,6
1,5	1,5	88,4	2	1,75	96,3
1,5	1,25	85,6	2	1,75	98,5
1,5	1,25	84,6	2	1,5	98,3
1,5	1,25	87,1	2	1,75	99
1,5	1,25	88,1	2	1,75	93,6
1,5	1,25	86,2	2	1,75	98,6
1,5	1	82,3	2	1,5	100,1
1,5	1	80,6	2	1,75	102
1,5	1	82,4	2	1,75	98,8
1,5	1,25	86,3	2	1,75	96
1,5	1,25	85	2	1,75	101
1,5	1,25	84,9	2	1,75	100,3
1,5	1,25	85,6	2	1,75	89,6
1,5	1,25	84,9	2	1,5	88,9
1,5	1,5	88,4	2	1,75	95
1,5	1,25	86,4	2	1,75	94,7

1,5	1,25	84,2	2	1,75	96
1,5	1,25	84,6	2	1,75	96
1,5	1,25	86,5	2	1,75	96,9
1,5	1,25	84,7	2	1,75	98,3
1,5	1,25	84,9	2	1,75	99,9
1,5	1	82,2	2	1,75	98,9
1,5	1	83,2	2	1,75	94,7
1,5	1,25	84,4	2	1,75	96,1
1,5	1,25	85,9	2	1,75	98,3
1,5	1,25	85,5	2	2	104
1,5	1,25	84	2	1,5	93,5
1,5	1,25	86,3	2	1,5	92,8
1,5	1,25	84,9	2	1,75	99,5
1,5	1,25	84,5	2	1,75	102
1,5	1	80,6	2	1,75	98
1,5	1	80,7	2	1,75	99,6
1,5	1	82,2	2	1,75	98,7
1,5	1,5	87,2	2	1,75	98,4
1,5	1	84,4	2	1,75	97
1,5	1,25	86,9	2	1,75	96,3
1,5	1,25	84,6	2	1,75	99
1,5	1,25	83	2	1,75	96,8
1,5	1,25	87	2	1,5	96,4
1,5	1	80,9	2	1,75	98,3
1,75	1,5	89,9	2	1,75	97,5
1,75	1	89,2	2	1,75	98,3
1,75	1,5	88,7	2	1,75	99,7
1,75	1,75	90,2	2	1,75	92,5
1,75	1	86,7	2	1,75	97,7
1,75	1,25	84,5	2	1,75	97
1,75	1,5	87,2	2	1,75	96,8
1,75	1,5	86,8	2	1,75	94,9
1,75	1,5	86,9	2	1,75	99
1,75	1,5	87,8	2	1,75	101,1
1,75	1,75	90,2	2	1,5	100
1,75	1,5	89,9	2	1,75	98,7
1,75	1,5	84,8	2	1,75	99,3
1,75	1,5	90,4	2	1,75	99,4
1,75	1,5	89,8	2	1,75	99
1,75	1,25	84	2	1,75	95,7
1,75	1,5	88,3	2	1,75	97,2
1,75	1,5	90	2,25	2	98,3
1,75	1,5	90,2	2,25	2	98,3
1,75	1,25	91,7	2,25	2	102
1,75	1,5	89,5	2,25	2	106
1,75	1,5	88,7	2,25	2	103
2	1,5	97	2,25	2	105,1
2	1,75	90,6	2,25	2	102,4
2	1,5	90,1	2,25	2	103
2	1,5	90,4	2,25	2	104
2	1,75	90,8	2,25	2	100
2	1,75	94	2,25	2	102,2
2	1,75	96,2	2,25	2	103
2	1,75	94,5	2,25	2	100

2	1,5	95,5	2,25	2	103,8
2	1,5	96,6	2,25	2	106
2	1,5	90,7	2,25	2	102,3
2	1,75	92,9	2,25	2	105,1
2	1,75	94,1	2,25	2	99,8
2	1,75	92,5	2,25	2	102,9
2	1,75	91,1	2,25	2	103,7
2	1,75	90,9	2,25	2	102
2	1,75	90,4	2,25	2	104,5
2	1,75	92,4	2,25	1,75	102
2	1,75	94	2,25	1,75	99,2
2	1,75	95,6	2,25	1,75	98,7
2	1,75	94,1	2,25	1,5	94,5
2,25	2	92,8	2,25	1,5	96
2,25	2	96,5	2,25	2	98,2
2,25	2,25	98	2,25	2	102,3
2,25	2	97,7	2,25	2	105,1
2,25	2	91,8	2,25	2	104,5
2,25	2	96,5	2,25	2	100
2,25	2	99,1	2,25	2	102,9
2,25	2	102,2	2,25	2	105,7
2,25	2	99,8	2,25	2	103,5
2,25	2	98,6	2,25	2	100,6
2,25	2	98,8	2,25	2	107
2,25	2	96,8	2,25	2	106,1
2,25	2	97,4	2,25	2	104,2
2,25	2	96,4	2,25	2	106
2,25	2	98,2	2,25	2	105,2
2,25	2	96,4	2,25	2	104,9
2,25	2	97,2	2,25	1,5	105,2
2,25	2	98,3	2,25	1,5	104
2,25	2	97,5	2,25	2	105
2,25	2	97,4	2,25	2	106,3
2,25	2	98,1	2,25	2	105,7
2,25	2	97,7	2,25	2	100,2
2,5	2	104	2,25	2	100,9
2,5	1,75	99,7	2,25	2	100
2,5	2,25	108,2	2,25	2	99
2,5	2,25	102	2,25	2	98,2
2,5	2,25	99,9	2,25	2	105,4
2,5	2,5	94,3	2,25	1,5	97,8
2,5	2,25	98,7	2,5	2	98,7
2,5	2,25	108,1	2,5	2,25	105,7
2,5	2,25	99,4	2,5	2,25	104,5
2,5	2,25	98,8	2,5	2,25	106
2,5	2,25	102,3	2,5	2,25	105,8
2,5	2,25	100	2,5	2,25	105,2
2,5	2,25	101,4	2,5	2,25	105,7
2,5	2,25	103	2,5	2,25	109
2,5	2,25	101	2,5	2,25	108
2,5	2,25	99,5	2,5	2,25	110,1
2,5	2	105	2,5	2,25	108,9
2,5	2	106	2,5	2,25	105,9
2,5	2,25	96,9	2,5	2,25	108

2,5	2,25	98,8	2,5	2,25	107,9
2,5	2,25	96,5	2,75	2,5	105,9
2,75	2,75	108,1	2,75	2,5	105,8
2,75	2,25	104,2	2,75	2,5	105,2
2,75	2,5	102,3	2,75	2,5	98,7
2,75	2,5	100	2,75	2,5	99,8
2,75	2,5	102,3	2,75	2,5	99
2,75	2,5	100,9	2,75	2,5	100
2,75	2,5	99,8	2,75	2,5	102,3
2,75	2,5	107	2,75	2,5	100
2,75	2,5	104,5	2,75	2,5	102,4
2,75	2,5	102,2	2,75	2,5	104
2,75	2,5	100	2,75	2,5	108
2,75	2,5	103,5	3	2,5	106
2,75	2,5	102,2	3	2,75	108
2,75	2,5	99,9	3	2,75	103,9
3	2,5	108	3	2,75	105,8
3	2,75	110,2	3	2,75	108
3	2,75	110	3	2,75	106,9
3	2,75	108,2	3	2,5	105,1
3	2,75	106,9	3	2,5	106,8
3	2,75	104,9	3	2	102,3
3	2,75	105,6	3	2,5	110,1
3	2,75	106	3	2,5	109,2
3	2,75	106,8	3	2,75	108,4
3	2,75	108,1	3	2	110
3	2,75	105	3	2,75	114,2
3	2,75	102,5	3	2,75	125,1
3	2,75	106,6	3	2,5	120,2

TAB.T5.1 Výsledné hodnoty ze dne 10.7.2008 na I/35

Datum měření: 12.7.2008,

Počasi: zataženo, chvílemi déšť vozovka mokrá již před postřikem

Teplota ovzduší a vody: 25°C/ 21°C

Drážky zaplaveny postřikem s nadvýšením hladiny 3-4mm

Počet měřených průjezdů: 300 v každém směru v různých drážkách

Průměrná rychlost vozidel ve směru do MT/z: 88,9km/h/ 78km/h

Vybavení: sestava UFM 535–P–MAG, čidlo MAG-Flow OG-s-P mikro, UFM 535 –W4, směr z MT

směr z MT			směr do MT		
rychlost proudění m/s		rychlost vozidla	rychlost proudění		rychlost vozidla
drážka	vozovka	km/h	m/s	drážka	vozovka
0,25	0,25	49,5	0,5	0,5	55,4
0,25	0,25	52,5	0,5	0,5	52,9
0,25	0,25	55	0,5	0,5	53,2
0,25	0,25	52,6	0,5	0,5	51,2
0,25	0,25	52,4	0,5	0,5	52,4
0,25	0,25	50	0,5	0,5	52,4
0,25	0,25	50	0,5	0,5	53,4
0,25	0,25	51,2	0,5	0,5	51,1
0,25	0,25	48,7	0,5	0,5	50,2
0,25	0,25	52,4	0,75	0,5	54,1

0,25	0,25	52,8	0,75	0,5	55,5
0,25	0,25	50,9	0,75	0,5	54,8
0,25	0,25	51,7	0,75	0,5	56,3
0,25	0,25	52,9	0,75	0,25	49,9
0,25	0,25	54	0,75	0,25	48,7
0,25	0,25	51,7	0,75	0,5	51,6
0,25	0,25	53,9	0,75	0,75	54,4
0,25	0,25	50,9	0,75	0,75	55,1
0,25	0,25	52,8	0,75	0,5	56,2
0,5	0,25	54,7	0,75	0,5	55,8
0,5	0,25	52,9	0,75	0,75	56,9
0,5	0,25	50,2	0,75	0,75	55,6
0,5	0,25	50	0,75	1	5
0,5	0,25	57,1	1	1	62
0,5	0,5	55,1	1	0,75	78,8
0,5	0,5	54,6	1	0,5	79,1
0,5	0,25	55,9	1	0,75	78
0,5	0,25	54,8	1	0,75	78,1
0,5	0,5	55	1	0,5	80,1
0,5	0,25	55	1	0,75	82,2
0,5	0,5	54,9	1	0,75	81,9
0,5	0,5	54,7	1	0,75	79,8
0,5	0,25	55,8	1	0,75	78
0,5	0,25	56	1	0,75	77,9
0,5	0,25	54,9	1	0,75	78
0,5	0,25	53,8	1	0,75	82
0,5	0,25	53	1	0,75	81,4
0,5	0,25	57	1	0,75	79,2
0,5	0,25	54,8	1	0,75	78,5
0,5	0,25	54,1	1	0,75	77,9
0,5	0,25	52,8	1	0,75	78,9
0,5	0,25	56,1	1	0,75	80
0,5	0,25	56,2	1	0,75	79,2
0,5	0,25	54,6	1	0,75	81
0,75	0,5	58,9	1	0,75	77,6
0,75	0,5	57,2	1	0,75	82
0,75	0,5	59	1	0,75	78,4
0,75	0,5	56,8	1	0,75	78,2
0,75	0,5	55	1	0,5	77
0,75	0,5	59	1	0,75	79,5
0,75	0,5	57,8	1	0,75	79
0,75	0,5	58,9	1	0,75	78,9
0,75	0,5	55,9	1	0,75	74,8
0,75	0,5	58,9	1	0,75	77,9
0,75	0,5	54,9	1	0,75	78,4
0,75	0,5	60,1	1	0,75	79,8
0,75	0,5	60,2	1	0,75	80
0,75	0,5	60	1	0,75	75,8
0,75	0,5	58,7	1	0,75	78,9
0,75	0,5	59,2	1	0,75	81
0,75	0,5	58	1	0,75	82
0,75	0,5	56,9	1	0,75	80,6
0,75	0,5	57,7	1	0,5	77,9
0,75	0,5	59	1	0,75	79,5

0,75	0,5	58,7	1	0,5	80
0,75	0,5	54,9	1	0,75	81,4
0,75	0,5	58,9	1	0,75	80,2
0,75	0,75	62	1	0,75	80,4
0,75	0,75	61,9	1	0,75	80
0,75	0,5	59,7	1	0,5	76,3
0,75	0,5	62,5	1	0,75	77,8
0,75	0,5	62,5	1	0,75	80,1
0,75	0,5	62,9	1	1	82
0,75	0,5	59	1	0,75	80
0,75	0,5	58,7	1	0,75	82,4
0,75	0,5	58,6	1	0,75	83,5
0,75	0,5	58,4	1	0,75	81
0,75	0,5	54,9	1	0,75	82
0,75	0,5	58,7	1	0,75	81,7
0,75	0,5	56,9	1	0,75	79,8
0,75	0,5	54,8	1	0,75	78,9
0,75	0,5	54,9	1	0,75	77,9
0,75	0,5	58	1	0,75	80
0,75	0,5	56,9	1	0,75	81
0,75	0,5	57,8	1	0,75	82,9
0,75	0,5	59,3	1	0,75	78,9
0,75	0,5	55,7	1	0,75	77,9
0,75	0,5	58,7	1	0,75	80
0,75	0,5	59	1	0,75	80
0,75	0,5	60	1	0,75	80,9
1	0,5	63	1	0,75	79,8
1	0,5	62,8	1	1	81
1	1	69	1	0,5	80,4
1	0,5	70,1	1,25	1	85
1	0,75	72,1	1,25	1	84,9
1	0,75	72,6	1,25	1	83,9
1	0,75	69,4	1,25	1	85
1	0,75	69,4	1,25	1	84,7
1	0,75	68,9	1,25	1	85,9
1	0,5	69,3	1,25	1	87,7
1	1	72	1,25	1	88
1	0,75	63,9	1,25	1	86
1	0,75	65,5	1,25	1	84
1	0,75	65,9	1,25	1	85,9
1	0,75	68,9	1,25	1,25	89
1	0,75	67	1,25	1	84
1	0,75	64,9	1,25	1	85,6
1	0,75	69,1	1,25	1	84,9
1	0,75	67,6	1,25	1	87
1	0,75	70,1	1,25	1	86,3
1	0,75	71	1,25	1	81,9
1,25	1	79,9	1,25	1	84
1,25	1	75,9	1,25	1	85
1,25	1	76,5	1,25	1	86,4
1,25	1	76,6	1,25	1	84,9
1,25	1	80,1	1,5	1,5	89
1,25	1	82	1,5	1,25	88,7
1,25	1	78,9	1,5	1	86,9

1,25	1	78,4	1,5	1	88,5
1,25	1	81	1,5	1	87,9
1,25	1	79,8	1,5	1	87,8
1,25	1	75,9	1,5	1	89,6
1,25	1	77,7	1,5	1	89,5
1,25	1	76,9	1,5	1	90
1,25	1	74,8	1,5	1	91,5
1,25	1	80,2	1,5	1	90
1,25	1	80	1,5	1	87,9
1,25	1	79,8	1,5	1,5	88,8
1,25	1	78,8	1,5	1,5	90,1
1,25	1	77	1,5	1,25	90,2
1,25	1	79	1,5	1,25	91
1,25	1	80,6	1,5	1,25	93,5
1,25	1	79	1,5	1,25	89,8
1,25	1,25	78	1,5	1,25	87,9
1,25	1	76,5	1,5	1,25	88,9
1,25	1	76,6	1,5	1,25	89,5
1,25	1	80,1	1,5	1,25	90,1
1,25	1	82	1,5	1,25	92,6
1,25	1	80,2	1,5	1,25	92,5
1,25	1	80	1,5	1,25	94,8
1,25	1	76,9	1,5	1,25	90,5
1,25	1	79,8	1,75	1,5	92,3
1,25	1	75,9	1,75	1,5	91,9
1,25	1	77,7	1,75	1,5	92,4
1,25	1	78,3	1,75	1,5	92,5
1,25	1	74,8	1,75	1,5	92
1,25	1	75	1,75	1,5	92,6
1,25	1	79,8	1,75	1,5	94
1,25	1	79,8	1,75	1,5	95,4
1,25	1	78,8	1,75	1,5	92
1,25	1	78,9	1,75	1,5	92
1,25	1	78,4	1,75	1,5	91,8
1,25	1	81	1,75	1,5	91,7
1,25	1	82	1,75	1,5	92,4
1,25	1	81,9	1,75	1,5	92,4
1,25	1	76,9	1,75	1,5	92,4
1,25	1	76,9	1,75	1,5	93
1,25	1	79,8	1,75	1,5	95
1,25	1	77	1,75	1,5	97,1
1,25	1	78,3	1,75	1,5	92,5
1,5	1,25	83	1,75	1,5	92,4
1,5	1,25	84,5	1,75	1,5	92,8
1,5	1,25	86,2	1,75	1,5	92,4
1,5	1,25	84,5	1,75	1,5	93,5
1,5	1,25	87	1,75	1,5	96,1
1,5	1,5	82,9	1,75	1,5	92,5
1,5	1	85,6	1,75	1,5	92,4
1,5	1	89	1,75	1,5	90,4
1,5	1	84,4	1,75	1,5	90
1,5	1	86,2	1,75	1,5	90,7
1,5	1	87	1,75	1,5	90,5
1,5	1	82,1	1,75	1,5	94,7

1,5	1	85	1,75	1,5	93
1,5	1	82,6	1,75	1,5	93
1,5	1,25	82,5	1,75	1,5	96,1
1,5	1,25	82,6	1,75	1,5	92,5
1,5	1,25	83,9	1,75	1,5	91,7
1,5	1	81,4	1,75	1,5	90
1,5	1,25	84,9	1,75	1,5	91,8
1,5	1,25	82	1,75	1,5	90,3
1,5	1,25	81,9	1,75	1,5	90,4
1,75	1,5	82	1,75	1,5	90
1,75	1,5	89,5	1,75	1,5	91
1,75	1,5	88,7	2	1,75	95
1,75	1,25	86,9	2	1,75	96,4
1,75	1,5	90,4	2	1,75	97,8
1,75	1,5	90	2	1,75	95,6
1,75	1,25	92,1	2	1,75	95
1,75	1,25	89,7	2	1,5	98
1,75	1,5	90	2	1,75	99,1
1,75	1,5	88,9	2	1,75	102,1
1,75	1,5	90,2	2	1,5	98,7
1,75	1,25	90,7	2	1,75	96,5
1,75	1,5	90	2	1,75	98,8
1,75	1,25	81,9	2	1,75	99
1,75	1,5	88	2	1,75	99,4
1,75	1,5	84,8	2	1,75	99
1,75	1,5	90,4	2	1,5	95,4
1,75	1,5	89,8	2	1,75	97,8
1,75	1,5	84	2	1,75	96,3
1,75	1,5	95,6	2	1,75	95,2
1,75	1,5	89,8	2	1,75	98,4
1,75	1,75	94,1	2	1,75	96,3
1,75	1,75	92	2	1,5	97
1,75	1,25	81,9	2	1,75	99,1
1,75	1,5	88,7	2	1,75	95,8
1,75	1,5	90,2	2	1,75	94,9
1,75	1,5	89,7	2	1,75	96,6
1,75	1,5	88,3	2	1,75	98
1,75	1,5	90	2	1,75	98
1,75	1,5	90,2	2	1,75	97,8
1,75	1,5	91,2	2	1,75	94
1,75	1,5	92,5	2	1,75	97,8
1,75	1,5	95,6	2	1,75	96,5
1,75	1,5	90,2	2	1,75	101
1,75	1,5	89,7	2	1,75	97,8
1,75	1,5	88	2	1,75	98
1,75	1,5	84,9	2	1,75	99,2
1,75	1,5	91,7	2	1,75	97,3
1,75	1,5	89,5	2	1,75	98
1,75	1,5	88,7	2	1,75	99
1,75	1,5	87,9	2	1,75	99
1,75	1,5	90,1	2	1,75	97,7
1,75	1,5	90	2	1,75	97,3
1,75	1,5	89,4	2	1,75	95,6
1,75	1,5	88,5	2	1,75	98,8

1,75	1,5	89,4	2	1,75	100
1,75	1,75	94	2	1,75	97,5
1,75	1,25	87,2	2	1,75	97,6
1,75	1,5	90	2	1,75	100
1,75	1,5	91,2	2	1,75	100,1
1,75	1,5	92,8	2	1,75	98,4
1,75	1,5	92,4	2	1,75	98,2
1,75	1,5	90	2	1,75	97
1,75	1,5	84,9	2	1,75	99
1,75	1,5	91,7	2	1,75	96,9
1,75	1,5	89,5	2	1,75	100,6
1,75	1,5	89,7	2	1,75	97,7
1,75	1,5	90,1	2	1,75	94,8
1,75	1,5	92	2	1,75	99
1,75	1,5	90,8	2	1,75	100,6
1,75	1,5	91	2	1,75	102
1,75	1,5	87,9	2	1,75	104,2
1,75	1,5	88,9	2	1,75	97,5
1,75	1,5	90,2	2	1,75	94,9
1,75	1,5	90	2	1,75	96,8
1,75	1,5	91	2	1,75	95
1,75	1,5	91	2	1,75	99
2	1,75	89,9	2	1,75	98,7
2	1,75	90,5	2	1,75	100,6
2	1,75	90,1	2	1,75	99,2
2	1,75	92	2	1,75	97
2	1,75	93,5	2,25	2	102
2	1,75	90	2,25	2	105,1
2	1,75	94,2	2,25	2	99,8
2	1,75	90,4	2,25	2	104
2	1,75	90,2	2,25	2	100,9
2	1,75	89,7	2,25	2	104
2	1,75	91,5	2,25	2	106,3
2	1,75	92,8	2,25	2	105,9
2	1,75	90,9	2,25	2	104,7
2	1,75	92,5	2,25	2	105,8
2	1,75	93	2,25	2	99,9
2	1,75	92,8	2,25	2	100
2	1,75	96	2,25	2	107,2
2,75	2	100	2,25	2	108
2,75	2	101,8	2,25	2	99,8
2,75	2,5	105	2,25	2	107,1
2,75	1,75	104,7	2,25	2	105
2,75	1,75	102	2,25	2	106,4
2,75	1,75	103	2,25	2	105,1
2,75	2,5	99,9	2,25	2	108,1
2,75	2,5	104	2,25	2	104,6
2,75	2,5	108,1	2,25	2,25	105,7
2,75	2,5	104	2,25	1,75	106,9
2,75	2,5	106,9	2,25	2	108
2,75	2,5	106	2,5	2,25	110
2,75	2,5	105	2,5	2,25	109,8
2,75	2,5	105	2,5	2,25	106,9
2,75	2,5	103,9	2,5	2,25	112,1

2,75	2,25	105,8	2,75	2,5	106,2
2,75	2,25	102,6	2,75	2,5	104
2,75	2	104,5	2,75	2,5	106,2
2,75	2,25	105	2,75	2,5	105,7
3	2,75	110	2,75	2,5	107
3	2,75	112,2	2,75	2,5	103,6
3	2,75	112,8	2,75	2,5	110
3	2,75	110	2,75	2,5	108,7
3	2,75	108,9	2,75	2,5	109
3	2,75	108	2,75	2,5	105,1
3	2,5	104,9	2,75	2,5	104,7
3	2,5	110,4	2,75	2,5	106,8
3	2,25	109,7	2,75	2,5	107
3	2,75	115,2	2,75	2,5	106,3
3	2,75	110,8	2,75	2,5	104,7
3	2,75	112,1	2,75	2,5	100
3	2,75	110,2	2,75	2,5	110,2
3	2,75	108	3	2,5	110
3	2,75	110,7	3	2,75	120
3	2,25	120	3	2,75	115,4

TAB.T5.2 Výsledné hodnoty ze dne 12.7.2008 na I/35

Datum měření: 13.7.2008,

Počasí: zataženo, déšť, vozovka mokrá již před postřikem, postřik jen pro doplnění hladiny

Teplota ovzduší a vody: 24°C/ 21°C

Drážky zaplaveny postřikem s nadvýšením hladiny 3-4mm

Počet měřených průjezdů: 300 v každém směru v různých drážkách

Průměrná rychlost vozidel ve směru do MT/z: 84,7km/h/ 59,3km/h

Vybavení: sestava UFM 535-P-MAG, čidlo MAG-Flow OG-s-P mikro, UFM 535 -W4,

směr z MT

směr z MT			směr do MT		
rychlost proudění	rychlost vozidla		rychlost proudění	rychlost vozidla	
m/s	km/h		m/s	km/h	
drážka	vozovka		drážka	vozovka	
0,25	0,25	50,2	0,25	0,25	54,1
0,25	0,25	53,1	0,25	0,25	52,6
0,25	0	48,2	0,25	0,25	56
0,25	0,25	52	0,25	0,25	52,1
0,25	0,25	57	0,25	0,25	53,8
0,25	0,25	54,3	0,25	0,25	51,9
0,25	0,25	51,6	0,25	0,25	52,8
0,25	0,25	54,9	0,5	0,25	54,7
0,25	0	46,1	0,5	0,25	55,2
0,25	0,25	52,1	0,5	0,25	55
0,25	0,25	52	0,5	0,25	56,3
0,25	0,25	55,6	0,5	0,25	54,7
0,25	0,25	57	0,5	0,25	58
0,25	0,25	53,1	0,5	0,25	54,6
0,25	0	44,3	0,5	0,25	53,8
0,25	0,25	54,6	0,5	0,25	56,7
0,25	0,25	52	0,5	0,25	58
0,25	0,25	57	0,5	0,25	55,1
0,25	0,25	56,5	0,5	0,25	56,4

0,25	0,25	52,3	0,5	0,25	57
0,25	0,25	54	0,5	0,25	56,6
0,25	0,25	56,2	0,5	0,25	54,1
0,25	0,25	51,9	0,5	0,25	53
0,25	0,25	54	0,5	0,25	53,9
0,25	0,25	53,6	0,5	0,25	54,7
0,25	0,25	57	0,5	0,25	56
0,25	0,25	50	0,5	0,25	55,8
0,25	0,25	54,9	0,5	0,25	59
0,25	0,25	57,1	0,5	0,5	54,7
0,25	0,25	50,3	0,5	0,25	57
0,25	0,25	49,9	0,5	0,25	57
0,25	0,25	53,7	0,5	0,25	58
0,25	0,25	52,1	0,75	0,5	57
0,25	0,25	50	0,75	0,5	57
0,25	0,25	49,8	0,75	0,5	58,9
0,25	0,25	48,9	0,75	0,5	56,8
0,25	0,25	52	0,75	0,5	59,3
0,25	0,25	54,7	0,75	0,5	59,1
0,25	0,25	55	0,75	0,5	54,9
0,25	0,25	56,3	0,75	0,5	58
0,25	0,25	51,2	0,75	0,5	58
0,25	0,25	54,7	0,75	0,5	58
0,25	0,25	56	0,75	0,5	56,8
0,25	0,25	50,3	0,75	0,5	57,9
0,25	0,25	49,7	0,75	0,5	59
0,25	0,25	53,9	0,75	0,5	59
0,25	0,25	54,7	0,75	0,5	59
0,25	0,25	55	0,75	0,5	59,1
0,25	0,25	56,8	0,75	0,5	59,1
0,25	0,25	56,8	0,75	0,5	57,8
0,25	0,25	56,8	0,75	0,5	59,2
0,25	0,25	52	0,75	0,5	58
0,25	0,25	51,7	0,75	0,5	58,3
0,25	0,25	51,7	0,75	0,5	56,9
0,25	0,25	51,8	0,75	0,5	56,4
0,25	0,25	51,7	0,75	0,5	59
0,25	0,25	50	0,75	0,5	59
0,25	0,25	50,9	0,75	0,5	56,7
0,25	0,25	54	0,75	0,5	58,1
0,25	0,25	56,8	0,75	0,5	59,1
0,25	0,25	54,7	1	0,75	64,3
0,25	0,25	52,9	1	0,75	65
0,25	0,25	54,8	1	0,75	68,2
0,25	0,25	54,8	1	0,75	69,1
0,25	0,25	56	1	0,75	64,2
0,25	0,25	58,1	1	0,75	63,5
0,5	0,25	54,9	1	0,75	67,8
0,5	0,25	58	1	0,5	58,9
0,5	0,25	56,9	1	0,75	70
0,5	0,25	52,9	1	0,75	58
0,5	0,25	57	1	0,75	58
0,5	0,25	57,6	1	0,75	58,1
0,5	0,25	57,3	1	0,75	61,9

0,5	0,25	57,8	1	0,75	64
0,5	0,25	57,4	1	0,75	63,9
0,5	0,25	57,2	1	0,75	63,8
0,5	0,25	59	1	0,75	59,9
0,5	0,25	54	1	0,75	68,7
0,5	0,25	52,3	1	0,75	68
0,5	0,25	52,9	1	0,75	69,8
0,5	0,25	52,9	1	0,75	72,1
0,5	0,25	52,7	1	0,5	72,3
0,5	0,25	57	1	0,75	74,1
0,5	0,25	57	1	0,5	69,8
0,5	0,25	56,8	1	0,75	64,6
0,5	0,25	54,9	1	0,75	69,3
0,5	0,25	54,3	1	0,75	70,1
0,5	0,25	57,6	1	0,75	69,2
0,5	0,25	59	1	0,5	63
0,5	0,5	57,6	1	0,75	64,7
0,5	0,5	54,8	1	0,75	70,9
0,5	0,25	54,7	1	1	75
0,5	0,25	54,7	1	0,75	72,6
0,5	0,25	54,7	1	0,75	75,2
0,5	0,25	55	1	0,75	74,2
0,5	0,25	55,2	1	0,75	69,3
0,5	0,25	58	1	0,75	68
0,5	0,25	59,6	1	0,75	71
0,5	0,25	59,1	1	0,75	72,5
0,5	0,25	54,1	1	0,75	74,1
0,5	0,25	55	1	0,75	69
0,5	0,25	55	1	0,75	69,3
0,5	0,25	55	1	0,75	72
0,5	0,25	55	1	0,75	73,1
0,5	0,25	57,4	1	0,75	71,3
0,5	0,25	52,9	1	0,75	69
0,5	0,25	53,8	1,25	1	74
0,5	0,25	55	1,25	1	75,6
0,5	0,25	52,9	1,25	1	78,2
0,5	0,25	54,7	1,25	1	79,7
0,5	0,25	52,6	1,25	1	74
0,5	0,25	52,8	1,25	1	79
0,5	0,25	55	1,25	1	81,2
0,5	0,25	55	1,25	1	78,9
0,5	0,25	56,1	1,25	1	69,1
0,5	0,25	54,9	1,25	1	72,5
0,5	0,5	56,7	1,25	1	78,9
0,5	0,25	54,2	1,5	1	82,4
0,5	0,25	55	1,5	1	84
0,5	0,25	54,8	1,5	1	86,2
0,5	0,25	54,7	1,5	1	81,2
0,5	0,25	54,8	1,5	1	79,4
0,5	0,25	54,7	1,5	1	80,1
0,5	0,25	55,9	1,5	1	79,9
0,5	0,25	55	1,5	1	78
0,5	0,25	55,6	1,5	1	78
0,5	0,25	54,8	1,5	1,25	78

0,5	0,25	57	1,5	1,25	75,6
0,5	0,25	52,9	1,5	1,25	79,8
0,5	0,25	52	1,5	1,25	85,1
0,5	0,25	55,8	1,5	1,25	84,2
0,5	0,25	54,8	1,75	1,5	88
0,5	0,25	54,7	1,75	1,5	86,4
0,5	0,25	54,8	1,75	1,5	89,2
0,5	0,25	54,7	1,75	1,5	90,1
0,5	0,25	59	1,75	1,5	90,2
0,5	0,25	56,8	1,75	1,5	88,4
0,5	0,25	54,6	1,75	1,5	87,4
0,5	0,25	54,2	1,75	1,5	88
0,5	0,25	51,1	1,75	1,5	90,2
0,5	0,25	55,9	1,75	1,5	90,1
0,5	0,25	56,7	1,75	1,5	93
0,5	0,25	56,8	1,75	1,5	89,1
0,5	0,25	54	1,75	1,5	90,2
0,5	0,25	54	1,75	1,5	90
0,5	0,25	54	1,75	1,5	90
0,5	0,25	58	1,75	1,5	90
0,5	0,25	59	1,75	1,5	90
0,5	0,25	54,9	1,75	1,5	90,2
0,5	0,25	56,9	1,75	1,5	89,4
0,5	0,25	54,7	1,75	1,5	88,1
0,5	0,25	54,7	1,75	1,5	84,5
0,5	0,25	54,2	1,75	1,5	89,6
0,5	0,25	55,9	1,75	1,5	89,5
0,5	0,25	55,1	1,75	1,5	90,1
0,5	0,25	55,3	1,75	1,5	90
0,75	0,5	57,3	1,75	1,5	90
0,75	0,5	59	1,75	1,5	90
0,75	0,5	58,7	1,75	1,5	90,3
0,75	0,5	59,8	1,75	1,5	90,3
0,75	0,5	59,9	1,75	1,5	90,4
0,75	0,5	56,3	2	1,75	91,3
0,75	0,5	58,8	2	1,75	92,5
0,75	0,5	59	2	1,75	90,2
0,75	0,5	61	2	1,75	90
0,75	0,5	60,2	2	1,75	94,8
0,75	0,5	58,7	2	1,5	99
0,75	0,5	57	2	1,75	96,5
0,75	0,5	60,9	2	1,75	97
0,75	0,5	60,8	2	1,5	95,6
0,75	0,5	60,9	2	1,75	95,6
0,75	0,5	56,9	2	1,75	95,6
0,75	0,5	58,7	2	1,75	94,5
0,75	0,5	61	2	1,75	90,9
0,75	0,5	60,5	2	1,75	96,5
0,75	0,5	54,9	2	1,5	90
0,75	0,5	58,9	2	1,75	90,4
0,75	0,5	61,2	2	1,75	97,5
0,75	0,5	61,3	2	1,75	97,5
0,75	0,5	62	2	1,75	98
0,75	0,5	59,7	2	1,75	98

0,75	0,5	54,9	2	1,75	98
0,75	0,5	57,7	2	1,75	98
0,75	0,5	55,9	2	1,75	96,5
0,75	0,5	61	2	1,75	99,1
0,75	0,5	61	2	1,75	100
0,75	0,5	61,2	2	1,5	99,7
0,75	0,5	61	2	1,75	97,8
0,75	0,5	61	2	1,75	97
0,75	0,5	61	2	1,5	97
0,75	0,5	59	2	1,75	94,9
0,75	0,5	56,9	2	1,75	96,5
0,75	0,5	54,9	2	1,75	96
0,75	0,5	58,3	2	1,75	93,9
0,75	0,75	57,1	2	1,75	99
0,75	0,5	59	2	1,5	99,1
0,75	0,5	59	2	1,75	95,4
0,75	0,5	60,1	2	1,75	98,5
0,75	0,5	60,3	2	1,75	97,4
0,75	0,5	60,8	2	1,75	96,5
0,75	0,5	62	2	1,75	99
0,75	0,5	64	2	1,75	94,5
0,75	0,5	59	2	1,75	99,1
0,75	0,5	58,7	2	1,75	102
0,75	0,5	57,1	2	1,75	96,8
0,75	0,5	56,3	2	1,75	102
0,75	0,5	52,9	2	1,5	94,5
0,75	0,5	58,8	2	1,75	97
0,75	0,5	61	2	1,75	97
0,75	0,5	58,9	2	1,5	97
0,75	0,5	54,9	2	1,75	97
0,75	0,5	57,8	2	1,75	95,6
0,75	0,5	61	2	1,75	102
0,75	0,5	61	2	1,75	100
0,75	0,75	63,1	2	1,75	98,7
0,75	0,25	59,8	2	1,5	95,8
0,75	0,5	59,7	2	1,75	98,8
0,75	0,5	59,7	2	1,75	99
0,75	0,5	56,9	2	1,75	94,6
0,75	0,5	56,8	2	1,75	99
0,75	0,5	56,8	2	1,75	101,1
1	0,5	60	2,25	2	104
1	0,75	62,3	2,25	2	102,3
1	0,75	68,1	2,25	2	105,6
1	0,75	59,4	2,25	2	104,4
1	0,75	61	2,25	2	100
1	0,75	62,5	2,25	2	106,5
1	0,75	64,7	2,25	2	109,5
1	0,75	65	2,25	2	105,4
1	0,75	64,9	2,25	2	104,2
1	0,75	59,8	2,25	2	106
1	0,75	62,3	2,25	2	101,4
1	0,75	64,4	2,25	2	106,9
1	0,75	68,1	2,25	2	109
1	0,75	69,2	2,25	2	104

1	0,5	62	2,25	2	102,4
1	0,75	65,8	2,25	2	105
1	0,5	64,1	2,25	2	103,6
1	0,75	62,3	2,25	2	104
1	0,75	62,9	2,25	2	105,6
1	0,75	62,3	2,25	2	110
1	0,75	62,8	2,25	2	105,3
1	0,5	59,7	2,25	2	104,1
1	0,75	65,1	2,25	2	102
1	1	70,2	2,25	2	99,8
1	1	70,9	2,25	2	104,2
1	0,75	69,8	2,25	2	105,1
1	0,75	69,7	2,25	2	105,1
1	1	65,9	2,25	2	100
1	0,5	64,4	2,25	2	103,6
1	0,5	62	2,25	2	104,7
1	0,5	61	2,25	2	105,7
1	0,75	63,8	2,25	2	101,1
1	1	67	2,25	2	102,3
1	0,75	67	2,25	2	99,9
1	0,5	64,9	2,5	2,25	108
1	0,25	64	2,5	2,25	108
1	0,75	64,9	2,5	2,25	108
1	0,75	65	2,5	2,25	108,2
1	0,75	62	2,5	2,25	106,5
1	0,75	63,1	2,5	2,25	110
1,25	1	68,1	2,5	2,25	109
1,25	1	66	2,5	2,25	108,7
1,25	1	65,4	2,5	2,25	109
1,25	1	70,1	2,5	2,25	107,7
1,25	1	72,3	2,5	2,25	107,8
1,25	1	68,4	2,5	2,25	105,6
1,25	1	69,9	2,5	2,25	104
1,25	1	72,1	2,5	2,25	110
1,25	1	72,5	2,5	2,25	105,1
1,25	1	72,1	2,75	2,5	104,6
1,25	1	72,6	2,75	2,5	110
1,25	1	72,1	2,75	2,5	106
1,25	1	74,5	2,75	2,5	107,5
1,25	1	72,4	2,75	2,5	103,9
1,25	1	72,1	2,75	2,5	102,1
1,25	1	72,5	2,75	2,5	110
1,25	1	72,3	2,75	2,5	105,9
1,25	1	72,6	2,75	2,5	109
1,25	1	72,4	2,75	2,5	105
1,25	1	72,1	2,75	2,5	103,9
1,25	1	69,8	2,75	2,5	108,3
1,25	1	65,8	2,75	2,5	110
1,25	1	63	2,75	2,5	108,9
1,25	1	71	3	2,5	110
1,25	1	72,3	3	2,75	102,5
1,25	1	69,4	3	2,75	115,2
1,25	1	68,9	3	2,75	120,1
1,25	1	65,9	3	2,75	120

1,25	1,25	71,2	3	2,75	104,8
1,5	1,25	79,1	3	2,75	104
1,5	1,25	82,1	3	2,75	102,9
1,5	1,25	83	3	2,75	110
1,5	1,25	76,8	3	3	112
1,5	1,25	79,9	3	2,75	114,1
1,5	1,25	81,2	3	3	111
1,5	1,25	84,5	3	2,75	115,9
1,75	1,5	89	3	2,5	115,7
1,75	1,25	90,2	3	2,75	120,2
2	2	98,3	3	2,75	122

TAB.T5.3 Výsledné hodnoty ze dne 13.7.2008 na I/35

5.2.2 Silnice I/34 mezi obcí Michalovice a Šmolovy

Charakteristika komunikace: dvoupruhová, směrově v přechodnici před levým směrovým obloukem s nedostatečným podélným sklonem (0,8%) právě v místě, kde dochází k překlápění vozovky do opačného příčného sklonu, povrch asfaltový beton s četnými lokálními opravami; intenzita dopravy podle sčítání v roce 2005 je 7736voz/24h [107]

Charakteristika drážkování: s jednotným sklonem 40°v celé šíři komunikace, se sklonem zleva doprava ve směru od Michalovic, místy oboustranně protisměrně se středovým překrytím, šířka drážky 30mm, hloubka drážky 4mm, sdružené po 5, rozstup drážkování 1300mm; drážky celkově sjeté, zejména v jízdní stopě, místy rozvalky horní hrany, s mnoha přerušeními vlivem lokálních oprav komunikace bez obnovy drážkování; stáří úpravy je 10let.

Datum měření: 4.7.2008,

Počasí: zataženo, vozovka mokrá již před postřikem

Teplota ovzduší a vody: 21°C/ 18°C

Drážky zaplaveny postřikem s nadvýšením hladiny 3-4mm

Počet měřených průjezdů: 300 v každém směru v různých drážkách

Průměrná rychlost vozidel ve směru do MT/z: 70,3km/h/ 64km/h

Vybavení: sestava UFM 535-P-MAG, čidlo MAG-Flow OG-s-P mikro, UFM 535 -W4,

směr z Michalovic			směr do Michalovic		
rychlost proudění m/s	rychlost vozidla km/h		rychlost proudění m/s	rychlost vozidla km/h	
drážka	vozovka		drážka	vozovka	
0	0	54,2	0,25	0	56,3
0,25	0	52,6	0,25	0	49,9
0,25	0,25	58,4	0,25	0	51,9
0	0	56,2	0,25	0	52,8
0,25	0	54,1	0,25	0,25	52,4
0,25	0,25	56,9	0,25	0,25	53,4
0,25	0,25	56	0,25	0,25	54
0,25	0	58,4	0,25	0,25	52
0	0	52,3	0,25	0,25	56,9
0,25	0	53,7	0,25	0,25	55,5
0,25	0,25	54,2	0,25	0,25	54,8
0,25	0,25	56,3	0,25	0,5	55
0,25	0,25	54,8	0,25	0	51
0	0	52,3	0,25	0,5	48,7

0,25	0	51,9	0,25	0,25	51,6
0,25	0,25	57,6	0,25	0,25	54,4
0,25	0	56,9	0,25	0,25	53,9
0,25	0,25	54,8	0,25	0,25	54,7
0	0,25	56,2	0,25	0,25	56
0	0	54,7	0,25	0	50,2
0,25	0,25	59	0,25	0,5	59,4
0,25	0,25	54,9	0,25	1	60,1
0	0	51,3	0,25	0,25	54,8
0	0,25	52,7	0,25	0,25	54,9
0	0,25	51,7	0,25	0,25	51,1
0,25	0,25	54	0,25	0,25	51,1
0,25	0,25	58	0,25	0,25	50,2
0,25	0,25	56,2	0,25	0,25	54,1
0,25	0,25	58,1	0,25	0,25	51,1
0,25	0	56	0,25	0,25	50,2
0,25	0,25	54,2	0,25	0,25	54,1
0,25	0	56,1	0,25	0,25	55,5
0,25	0	54,7	0,25	0,25	51,1
0,25	0,25	59	0,25	0,25	50,2
0,25	0	56,1	0,25	0,25	54,1
0,25	0,25	58,4	0,25	0,25	57
0,25	0,25	57,2	0,25	0,25	56,5
0,25	0,25	59,1	0,25	0,25	54,9
0,25	0	56	0,25	0,25	51,1
0,25	0,25	58,9	0,25	0,25	50,2
0	0	52,1	0,25	0,25	54
0	0	53	0,25	0,25	57,1
0,25	0	54,8	0,25	0,25	50,3
0	0,25	56,2	0,25	0,25	57
0,25	0,25	54,9	0,25	0,25	50
0,25	0,25	59,1	0,25	0,25	54,9
0,25	0,25	57,7	0,25	0,25	57,1
0,25	0,25	56,4	0,25	0,25	50,3
0,25	0	55	0,25	0,25	49,9
0,25	0	54,1	0,25	0,25	53,7
0	0	52,3	0,25	0,25	52,1
0	0,25	53,1	0,25	0,25	52,3
0,25	0,25	52,6	0,25	0,25	54
0,25	0,25	59,1	0,25	0,25	56,2
0,25	0,25	58	0,25	0,25	51,9
0,25	0,25	57,7	0,25	0,25	54
0,25	0,25	54,9	0,25	0,25	53,6
0,25	0	52	0,25	0,25	53,7
0,25	0,25	58,1	0,25	0,25	52,1
0,25	0,25	56	0,25	0,25	52,3
0,25	0,25	54,9	0,25	0	54
0,25	0	53	0,25	0,5	56,2
0,25	0,25	52,9	0,25	0	54,1
0,25	0	54,8	0,25	0,25	49,9
0,25	0,25	58,3	0,25	0,25	53,6
0,25	0,25	59,9	0,25	0,25	53,7
0,25	0,5	60,1	0,25	0,25	52,3
0,25	0	59,7	0,25	0,25	53,7

0,25	0,25	58,1	0,25	0,25	52,1
0,25	0,25	57,1	0,25	0,25	58
0,25	0,5	58	0,5	0,5	54,9
0,25	0	54,2	0,5	0	55
0,25	0	52,9	0,5	0,5	55
0,25	0,25	56,1	0,5	0,25	60
0,25	0,5	58,9	0,5	0,5	52,3
0,25	0,5	56,9	0,5	0,5	56,2
0,25	0,25	54,7	0,5	0,25	59,8
0,25	0,25	55,8	0,5	0,5	57,8
0,25	0,25	59	0,5	0,5	58,7
0,25	0,25	51,2	0,5	0,5	64,7
0,25	0,25	52,9	0,5	0	62,1
0,25	0,25	58	0,5	0,5	66
0,25	0,25	59,1	0,5	0,5	55,2
0,25	0,25	53,9	0,5	0,25	61,2
0,25	0,25	54,7	0,5	0,5	68,7
0,25	0,25	52,2	0,5	0,5	54,9
0,25	0,25	55	0,5	0,25	64,5
0,25	0,25	54,8	0,5	0,5	58,9
0,25	0,25	54,3	0,5	0,5	60,2
0,25	0,25	54,3	0,5	0,5	63
0,25	0,25	54,3	0,5	0,25	67
0,25	0,25	56,9	0,5	0,5	63,9
0,25	0,25	59,8	0,5	0,25	60,7
0,25	0,25	52,4	0,5	0,5	60,9
0,25	0,25	51,2	0,5	0,5	61
0,25	0,25	56	0,5	0,25	61
0,25	0,25	58,7	0,5	0,5	61,2
0,25	0,25	52,9	0,5	0,25	63,9
0,25	0,25	51,3	0,5	0,25	63,4
0,25	0,25	54,7	0,5	0,25	62,1
0,25	0,25	59,4	0,5	0,25	62,1
0,25	0,25	51,2	0,5	0,25	62,1
0,25	0,25	57,8	0,5	0,25	60
0,25	0,25	52,8	0,5	0,25	60
0,25	0,25	52,8	0,5	0,25	68,1
0,25	0,25	56,9	0,5	0,25	64,1
0,25	0,25	56,4	0,5	0,25	65,9
0,5	0,5	59,1	0,5	0,25	62
0,5	0,5	60,2	0,5	0,25	62
0,5	0,5	60,8	0,5	0,25	60,1
0,5	0,5	60	0,5	0,25	58,7
0,5	0,5	62,8	0,5	0,25	59,4
0,5	0,5	59,7	0,5	0,25	54,1
0,5	0,5	54,1	0,75	0,5	58,7
0,5	0,5	59,8	0,75	0,5	59,8
0,5	0,5	59	0,75	0,75	59,9
0,5	0,5	62,1	0,75	0,5	56,3
0,5	0,5	62,1	0,75	0,5	58,8
0,5	0,5	62,1	0,75	0,5	59
0,5	0,5	60	0,75	0,25	61
0,5	0,5	60	0,75	0,5	60,2
0,5	0,5	63,4	0,75	0,5	58,7

0,5	0,5	64,1	0,75	0,5	57
0,5	0,5	65,9	0,75	0,5	60,9
0,5	0,5	62	0,75	1	60,8
0,5	0,5	62	0,75	0,5	60,9
0,5	0,5	60,1	0,75	0,5	56,9
0,5	0,5	58,7	0,75	1	58,7
0,5	0,5	59,4	0,75	0,5	61
0,5	0,5	54,1	1	0,75	77,9
0,5	0,5	55	1	0,75	79,5
0,5	0,5	55	1	0,75	80
0,5	0,5	60,7	1	0,75	81,4
0,5	0,5	60,9	1	0,75	80,2
0,5	0,5	61	1	0,75	80,4
0,5	0,5	61	1	0,75	80
0,5	0,5	61,2	1	0,75	83,5
0,5	0,5	63,9	1	0,5	81
0,5	0,5	64,7	1	0,5	82
0,5	0,5	59,8	1	1	83,5
0,5	0,5	57,8	1	1	81
0,5	0,5	55,2	1	0,75	82,4
0,5	0,5	61,2	1	1	83,5
0,5	0,5	60	1	1	81
0,5	0,5	52,3	1	1	82
0,5	0,5	56,2	1	1	84,6
0,5	0,5	58,9	1	1	86,9
0,5	0,5	60,2	1	1	84,7
0,5	0,5	63	1	1	77,9
0,5	0,5	68,7	1	1	80
0,5	0,5	54,9	1	1	81
0,5	0,5	53,6	1	1	76,3
0,5	0,5	52,8	1	1	77,8
0,5	0,5	60,1	1	1	81,2
0,5	0,5	59	1	1	82
0,5	0,5	54,8	1	1	80
0,5	0,5	59,4	1	1	81,7
0,5	0,5	60	1	1	79,8
0,5	0,5	56,8	1	1	78,9
0,5	0,5	59,4	1	1	83,5
0,5	0,5	60,2	1	1	79,8
0,5	0,5	60,4	1	1	77,8
0,5	0,5	60	1	1	80,1
0,5	0,5	58,4	1	1	82
0,5	0,5	59,7	1	0,75	84,3
0,5	0,5	58,6	1	1	89,6
0,5	0,5	60,3	1	1	79,5
0,5	0,5	60,4	1	1	84,2
0,5	0,5	59,8	1	1	81
0,5	0,5	57,8	1	1	80,2
0,5	0,5	55	1	1	89,3
0,5	0,5	60,1	1	1	82,4
0,5	0,5	62	1	1	84,7
0,5	0,5	67,1	1	1	88
0,5	0,5	62,5	1	1	90,5
0,5	0,5	59,4	1	1	84,5

0,5	0,5	60,4	1	1	87,2
0,5	0,5	62	1	1	83,6
0,5	0,5	68,1	1	1	89,5
0,5	0,5	55	1	1	81,2
0,5	0,5	68,1	1	1	80,2
0,5	0,5	62,4	1	1	80
0,5	0,5	63,8	1	1	86,9
0,5	0,5	65,7	1	1	90,1
0,5	0,5	59,8	1	1	90,4
0,5	0,5	56	1	1	82,1
0,5	0,5	59,7	1	1	84
0,5	0,5	60	1,25	1	74
0,75	0,5	58	1,25	1	75,6
0,75	0,5	56,8	1,25	1	81,2
0,75	0,5	57,9	1,25	1	78,9
0,75	0,5	58	1,25	1	78,2
0,75	0,5	58,3	1,25	1,25	79,7
0,75	0,5	56,9	1,25	1	74
0,75	0,5	59,1	1,25	1	79
0,75	0,5	57,8	1,25	1,25	69,1
0,75	0,5	59,2	1,25	1	72,5
0,75	0,5	67,8	1,5	1,5	82,4
0,75	0,5	58,9	1,5	1,5	84
0,75	0,5	64,2	1,5	1,5	86,2
0,75	0,5	56,4	1,5	1,5	81,2
0,75	0,5	59	1,5	1,5	79,4
0,75	0,5	63,5	1,5	1,5	80,1
0,75	0,5	70	1,5	1,5	79,9
0,75	0,5	58	1,5	1,25	78
0,75	0,5	58	1,5	1,25	78
0,75	0,5	59	1,5	1,25	85,1
1	0,75	59	1,5	1,25	90,1
1	0,75	56,7	1,5	1,25	79,8
1	0,75	58,1	1,5	1	90,2
1	0,75	59,1	1,5	1	84,2
1	0,75	64,3	1,5	1,5	88
1	0,75	65	1,5	1,5	78
1	0,75	68,2	1,5	1,5	76,5
1	0,5	69,1	1,5	1,5	77,1
1	0,75	59	1,5	1,5	75,6
1	0,75	59	1,5	1,5	74,8
1	0,75	59	1,5	1,5	73,6
1	0,75	59,1	1,5	1,5	78
1,25	1	60,2	1,75	1,75	62,5
1,25	1	64	1,75	1,75	65,1
1,25	1	90,2	1,75	1,75	70,2
1,25	1	84,2	1,75	0,5	72,3
1,25	1	88	1,75	0,5	70,5
1,25	1	66,9	1,75	0,5	71,1
1,25	1	67	1,75	1	69,1
1,25	1	67	1,75	1,75	68,4
1,25	1	66,5	1,75	1,75	72,1
1,25	1	69,8	1,75	1,75	72,5
1,25	1	71,1	1,75	1,75	73

1,25	1	78	1,75	1,75	68,9
1,25	1	76,5	1,75	1,5	63,9
1,25	1	77,1	1,75	1,5	67,8
1,25	1	79	1,75	1,5	66,3
1,5	1,25	78	1,75	1,75	67,8
1,5	1,25	75,6	1,75	1,75	71,2
1,5	1,25	79,8	1,75	1,75	75,4
1,5	1,25	85,1	1,75	1,75	74,1
1,5	1,25	84,2	1,75	1,75	78,5
1,5	1,25	76,5	1,75	1,75	78,4
1,5	1,25	77,1	1,75	1,75	77
1,5	1,25	79	1,75	1,75	78,5
1,5	1,25	78,9	1,75	1,75	74,1
1,75	1,5	88	1,75	1,75	79,8
1,75	1,75	74,2	1,75	1,75	74,5
1,75	1,75	78,9	1,75	1,75	78,1
1,75	1,75	74,1	1,75	1,75	76,5
1,75	1,75	73,9	1,75	1,5	74,5
1,75	1,75	71,4	1,75	1,5	76,5
1,75	1,75	79,8	1,75	1,5	74,5
1,75	1,75	77	1,75	1,5	72
1,75	1,75	77	1,75	1,5	79,8
1,75	1,75	75,8	1,75	1,5	71
1,75	1,75	74,5	1,75	1,5	72,6
1,75	1,75	78,9	1,75	1,5	74,5
1,75	1,75	71,2	1,75	1,5	77
1,75	1,75	80,1	1,75	1,5	78,9
1,75	1,75	82	1,75	1,5	80,1
1,75	1,75	81,4	1,75	1,5	69,4
1,75	1,75	79,5	1,75	1,5	64,1
1,75	1,75	77,1	1,75	1,5	65
1,75	1,75	76,5	1,75	1,5	62,3
1,75	1,75	73,2	1,75	1,5	66
1,75	1,75	77	1,75	1,75	65,4
1,75	1,75	77,9	1,75	1,75	78,9
1,75	1,75	81,2	1,75	1,75	77
2	2	84,6	1,75	1,75	79,9
2	2	88	1,75	1,75	81,2
2	2	82,5	1,75	1,5	64,2
2	1,75	89,6	1,75	1,5	68,7
2	1,75	81,4	1,75	1	69,8
2	1,75	82,5	1,75	1,75	71
2	1,75	81,3	1,75	1,75	72,5
2	1,75	79,8	1,75	1,75	74,2
2	1,75	78,2	1,75	1,75	78,9
2	1,75	80,2	2	1,75	88
2	1,75	81,4	2	1,75	89,6
2	1,75	88,3	2	1,75	90,1
2	1,75	88	2	1,75	90
2	1,75	89,6	2	1,75	84
2	2	90,1	2	2	86,5
2	2	90	2	2	89,1
2	1,75	84	2	1,75	88,2
2	1,75	86,5	2	1,75	84

2	1,75	89,1	2	1,75	86,9
2	1,75	88,2	2	1,75	86,5
2	1,75	89,7	2	1,75	89,1
2	1,75	90,2	2	1,75	88,2
2	1,75	91,5	2	1,75	90,1
2	1,75	94,5	2,25	2	102,3
2	2	88,1	2,25	2	99,9
2	2	89,6	2,5	2,25	110,3
2	2	89,4	2,5	2,25	108
2	2	87,5	2,5	2,25	107,9
2	2	84,2	2,75	2,5	102,4
2	2	85	2,75	2,5	103,9
2	1,75	89,6	2,75	2,5	108,3
2	1,75	83,5	2,75	2,5	110
2	1,75	89,7	2,75	2,5	108,9
2	1,75	84,5	3	2,5	120,6

TAB.T5.4 Výsledné hodnoty ze dne 4.7.2008 na I/34

Datum měření: 7.7.2008,

Počasí: zataženo, chvílemi déšť, vozovka mokrá již před postřikem

Teplota ovzduší a vody: 19°C/ 18°C

Drážky zaplaveny postřikem s nadvýšením hladiny 3-4mm

Počet měřených průjezdů: 300 v každém směru, v různých drážkách

Průměrná rychlost vozidel ve směru do MT/z: 75,7km/h/ 73,1km/h

Vybavení: sestava UFM 535-P-MAG, čidlo MAG-Flow OG-s-P mikro, UFM 535 -W4, směr z Michalovic

směr z Michalovic			směr do Michalovic		
rychlost proudění m/s	rychlost vozidla km/h		rychlost proudění m/s	rychlost vozidla km/h	
drážka	vozovka		drážka	vozovka	
0,25	0	54,2	0,25	0,25	50,2
0,25	0	52,6	0,25	0,25	52,1
0,25	0,25	58,4	0,25	0,25	53,6
0,25	0,25	56,2	0,25	0,25	54,8
0,25	0,25	56,9	0,25	0,25	55
0,25	0,25	54,8	0,25	0,25	56,9
0,25	0,25	57,1	0,25	0,25	54,1
0,25	0,25	54,8	0,25	0,25	52
0,25	0,25	56,2	0,25	0,25	54,1
0,25	0,25	55,1	0,25	0,25	51,1
0,25	0,25	51,3	0,25	0,25	55
0,25	0,25	52,7	0,25	0,25	56,9
0,25	0,25	51,7	0,25	0,25	54,5
0,25	0,5	52,3	0,25	0,25	58,6
0,25	0,5	51,9	0,25	0,25	54,8
0,25	0,5	57,6	0,25	0,25	54,9
0,25	0	56,1	0,25	0,25	51,1
0,25	0	58,4	0,25	0,25	51,1
0,25	0,25	54,1	0,25	0,25	50,2
0,25	0,25	53,7	0,25	0,25	57,8
0,25	0,25	57,8	0,25	0,25	56,9
0,25	0,25	51,3	0,25	0,25	50,2
0,25	0,25	52,7	0,25	0	54,1
0,25	0,25	60,3	0,25	0,25	55,1

0,25	0,25	59,2	0,25	0,25	50,1
0,25	0	54	0,25	0,25	58,9
0,25	0,5	58	0,25	0	52,3
0,25	0,25	56,2	0,25	0,25	59,4
0,25	0,25	58,1	0,25	0,25	54,6
0,25	0,25	52	0,25	0,25	52,3
0,25	0	50,1	0,25	0,25	57,4
0,25	0,25	52,9	0,25	0	54
0,25	0,25	54,7	0,25	0,5	56,2
0,25	0,25	59	0,25	0,25	58,6
0,25	0,5	56,1	0,25	0,25	54,9
0,25	0,5	58,4	0,25	0,25	49,9
0,25	0,5	54,1	0,25	0,25	53,6
0,25	0,75	56,9	0,25	0,25	56,9
0,25	0	56	0,25	0,25	53,7
0,25	0,25	57,1	0,25	0,25	52,1
0,25	0,25	52,3	0,25	0,25	54,1
0,25	0,25	53,7	0,25	0,25	56,7
0,25	0,25	54,2	0,25	0,25	54,9
0,25	0,25	56,3	0,25	0,25	53,7
0,25	0,25	54,8	0,25	0,25	52,3
0,25	0	56	0,5	0,25	56,2
0,25	0,75	54,2	0,5	0,25	59,8
0,25	0,5	56,1	0,5	0,25	54,7
0,25	0	58,4	0,5	0,25	58,6
0,25	0,25	56,2	0,5	0,25	56,8
0,25	0,25	54,7	0,5	0,25	55
0,25	0,25	59	0,5	0,25	59,8
0,25	0,25	54,9	0,5	0,25	57,3
0,25	0,25	52,3	0,5	0,25	54,7
0,25	0,25	55	0,5	0,25	59,8
0,25	0,25	57,7	0,5	0,25	59
0,25	0,25	54,9	0,5	0,25	56,3
0,5	0,5	60,1	0,5	0,25	54,8
0,5	0,5	58,1	0,5	0,25	59,9
0,5	0,5	56	0,5	0,25	60
0,5	0,75	63,8	0,5	0,25	60,4
0,5	0,5	69,8	0,5	0,25	62,5
0,5	0,5	59,1	0,5	0,25	59,8
0,5	0,5	50,2	0,5	0,25	61
0,5	0,5	54,8	0,5	0,25	64,2
0,5	0,5	54,3	0,5	0,25	59,8
0,5	0,5	51,2	0,5	0,25	59
0,5	0,5	54,3	0,5	0,25	60,1
0,5	0,5	69	0,5	0,25	60,4
0,5	0,5	64,5	0,5	0,25	54,8
0,5	0,5	52,4	0,5	0,25	58,4
0,5	0,25	62,9	0,5	0,25	57
0,5	0,25	55	0,5	0,25	60,4
0,5	0,25	54,3	0,5	0,25	62,5
0,5	0,25	56,9	0,5	0,25	59,6
0,5	0,25	59,8	0,5	0,25	60,4
0,5	0,25	61,2	0,5	0,25	59,9
0,5	0,5	69,8	0,5	0,25	61,2
0,5	0,5	59,1	0,5	0,25	59
0,5	0,5	50,2	0,5	0,25	60,1

0,5	0,75	54,3	0,5	0,25	60
0,5	0,5	51,2	0,5	0,25	58,4
0,5	0,5	60,1	0,5	0,5	60
0,5	0,5	54,3	0,5	0,25	57,7
0,5	0,5	69	0,5	0,25	54,9
0,5	0,5	64,5	0,5	0,25	59,8
0,5	0,75	54,8	0,5	0,25	61
0,5	0,25	58,9	0,5	0,25	64,2
0,5	0,25	63	0,5	0,25	59,8
0,5	0,25	67	0,5	0,25	60,4
0,5	0,25	60,2	0,5	0,25	59,9
0,5	0,25	63,9	0,5	0,25	61,2
0,75	0,5	58,7	0,5	0,25	57,7
0,75	0,5	59,8	0,5	0,25	58,4
0,75	0,75	58,8	0,5	0,25	60
0,75	0,5	59	0,5	0,25	61
0,75	0,5	61	0,5	0,5	60
0,75	0,5	60,2	0,5	0,25	59,8
0,75	0,25	59,7	0,5	0,25	54,9
0,75	0,5	58,7	0,5	0,25	59,8
0,75	0,5	57	0,5	0,25	60,1
0,75	0,5	60,9	0,5	0,25	64,2
0,75	0,5	61	0,5	0,25	60,1
0,75	1	60,8	0,5	0,25	59
0,75	0,5	60,9	0,5	0,25	64,2
0,75	0,5	56,9	0,5	0,25	59,8
0,75	0,5	59,9	0,5	0,25	61
0,75	0,5	56,3	0,5	0,25	58,4
0,75	0,5	62,1	0,5	0,25	59,9
0,75	0,25	62,1	0,5	0,25	57,7
0,75	0,5	62,1	0,5	0,25	60,4
0,75	0,5	60	0,5	0,25	60
0,75	0,5	63,8	0,5	0,25	61,2
0,75	0,5	62,8	0,5	0,25	54,9
0,75	0,5	67	0,5	0,25	58,4
0,75	0,5	65,9	0,5	0,25	61,2
0,75	0,5	62	0,75	0,5	60
0,75	0,5	62	0,75	0,5	63,4
0,75	0,5	60,1	0,75	0,5	64,1
0,75	0,5	60	0,75	0,5	60,9
0,75	0,5	63,4	0,75	0,5	61
0,75	0,5	64,1	0,75	0,5	61
0,75	0,5	60,9	0,75	0,5	61,2
0,75	0,5	61	0,75	0,5	67
0,75	0,5	61	0,75	0,5	57,8
0,75	0,5	61,2	0,75	0,5	60,2
0,75	0,5	59,8	0,75	0,5	64,5
0,75	0,5	57,8	0,75	0,25	64,2
0,75	0,5	60,2	0,75	0,5	61,2
0,75	0,5	64,5	0,75	0,5	60
0,75	0,5	67	0,75	0,5	61
0,75	0,5	61,2	0,75	0,5	64,1
0,75	0,5	60	0,75	0,5	60,9
0,75	0,5	52,3	0,75	0,25	59,9
0,75	0,5	63,9	0,75	0,5	61
0,75	0,5	64,7	0,75	0,5	59,8

0,75	0,5	62,9	0,75	0,5	64,5
0,75	0,5	67	0,75	0,5	63,4
0,75	0,5	55,2	0,75	0,75	59,9
0,75	0,5	59,8	0,75	0,5	61
0,75	0,5	69,7	1	1	84,6
0,75	0,5	69,3	1	1	86,9
1	1	83,5	1	1	
1	1	81	1	1	77,9
1	1	79,2	1	1	80
1	0,75	75	1	1	81
1	1	74,6	1	0,5	82
1	1	80,2	1	0,75	77,8
1	0,5	77,9	1	0,75	81,2
1	1	74,3	1	1	86,7
1	1	82	1	0,75	80
1	1,25	84,6	1	0,75	81,7
1	1	86,9	1	1	79,8
1	1	84	1	1	84,7
1	1	82	1	0,75	83,7
1	1,25	80	1	1	81,4
1	1	81,7	1	0,75	76,3
1	1	79,8	1	1	90
1	1,5	78,9	1	1	82
1	0,75	84,7	1	0,75	77,8
1	0,75	77,9	1	1	79,8
1	0,75	80	1	0,75	77,8
1	0,75	81	1	0,75	81,2
1	0,75	76,3	1	1	81,7
1	0,75	77,8	1	0,75	86
1	0,75	81,2	1	1	79,8
1	0,75	80	1	0,75	90,5
1	0,75	81	1	0,75	81,2
1	0,75	76,3	1	0,75	79,9
1	0,75	77,8	1	0,75	90,1
1	0,75	79	1	0,75	89,5
1	0,75	76,9	1	0,75	81,2
1	0,75	78,5	1	0,75	80,2
1	0,75	77,9	1	0,75	84
1	0,75	80	1	0,75	81,2
1	0,75	81	1	0,75	87,5
1	0,75	86	1	0,75	84,5
1	0,75	79,9	1	0,75	87,2
1	0,75	74,6	1	0,75	83,6
1	0,75	77,7	1	0,75	81,2
1	0,75	80,1	1	0,75	77,8
1	0,75	79,9	1	0,75	90,2
1	0,75	79,4	1	0,75	82,4
1	0,75	78,5	1	0,75	81,2
1	0,75	76,9	1	0,75	86,9
1	0,75	78,5	1	0,75	87,2
1	0,75	76,3	1	0,75	83,6
1	0,75	77,8	1	0,75	88
1	0,75	81,2	1	0,75	81,2
1	0,75	80	1	0,75	84,7
1	0,75	81	1	0,75	86,9
1	0,75	76,3	1	0,75	81,2

1	0,75	77,8	1	1	86,9
1	1	79	1	0,75	90,1
1,25	1	74	1	1	90,4
1,25	0,75	75,6	1	0,75	83,6
1,25	1	81,2	1	1	90,1
1,25	1	78,9	1	0,75	83,6
1,25	1,5	78,2	1	0,75	87,1
1,25	1,25	79,7	1	0,75	86,9
1,25	1	74	1	0,75	91,2
1,25	1	79	1	0,75	90
1,25	1,25	69,1	1	0,75	87,5
1,25	1	72,5	1	0,75	94
1,25	1	80,6	1,25	1,25	87,1
1,25	1	81,2	1,25	1,5	97
1,25	1	84,7	1,25	1	96,5
1,25	1	86,9	1,25	1,25	83,6
1,25	1	90,4	1,25	1,25	94
1,25	1	90	1,25	1,25	86,9
1,25	1	87,1	1,25	1,25	90,6
1,25	1	84	1,25	1,25	90,2
1,25	1	90,6	1,25	1,25	89,1
1,25	1	87	1,25	1	94,5
1,25	1	86,9	1,25	1	97,3
1,25	1	90,4	1,25	1	97,2
1,25	1	89	1,25	1,25	94,5
1,25	1	84,7	1,25	1	90,6
1,25	1	90,6	1,25	1,25	88
1,25	1	91	1,25	1	96,5
1,25	1	88,7	1,25	1	94,5
1,25	1,25	80,2	1,25	1,25	97
1,25	1	90	1,25	1,25	96,5
1,25	1	87,1	1,25	1,25	92,3
1,25	1,25	84	1,25	1,25	94,1
1,25	1	90,6	1,25	1	97,5
1,5	1,25	90,2	1,25	1	90,7
1,5	1,25	97	1,25	1	96,5
1,5	1,25	94,5	1,25	1	94,1
1,5	1,25	97,3	1,25	1	89
1,5	1,25	92,1	1,5	1,25	91
1,5	1,25	90	1,5	1,25	92,1
1,5	1,25	95,6	1,5	1,25	88
1,5	1,25	92,1	1,5	1,25	92,3
1,5	1,25	90,1	1,5	1,25	95
1,75	1,75	92,3	1,5	1,25	94,5
1,75	1,75	97,2	1,5	1,25	92,3
1,75	1,75	94,5	1,5	1,25	97,2
1,75	1,75	90,7	1,5	1,25	97
1,75	1,75	90	1,5	1,25	90,1
1,75	1,75	83,6	1,5	1,25	93,5
1,75	1,75	87,4	1,5	1,25	97,8
1,75	1,75	89,6	1,5	1,25	97,2
1,75	1,75	89,4	1,5	1,25	100
1,75	1,75	89,7	1,5	1,25	93,2
1,75	1,5	89,2	1,5	1,25	111
1,75	1,5	90	1,5	1,25	97
1,75	1,5	91,2	1,5	1,25	90,1

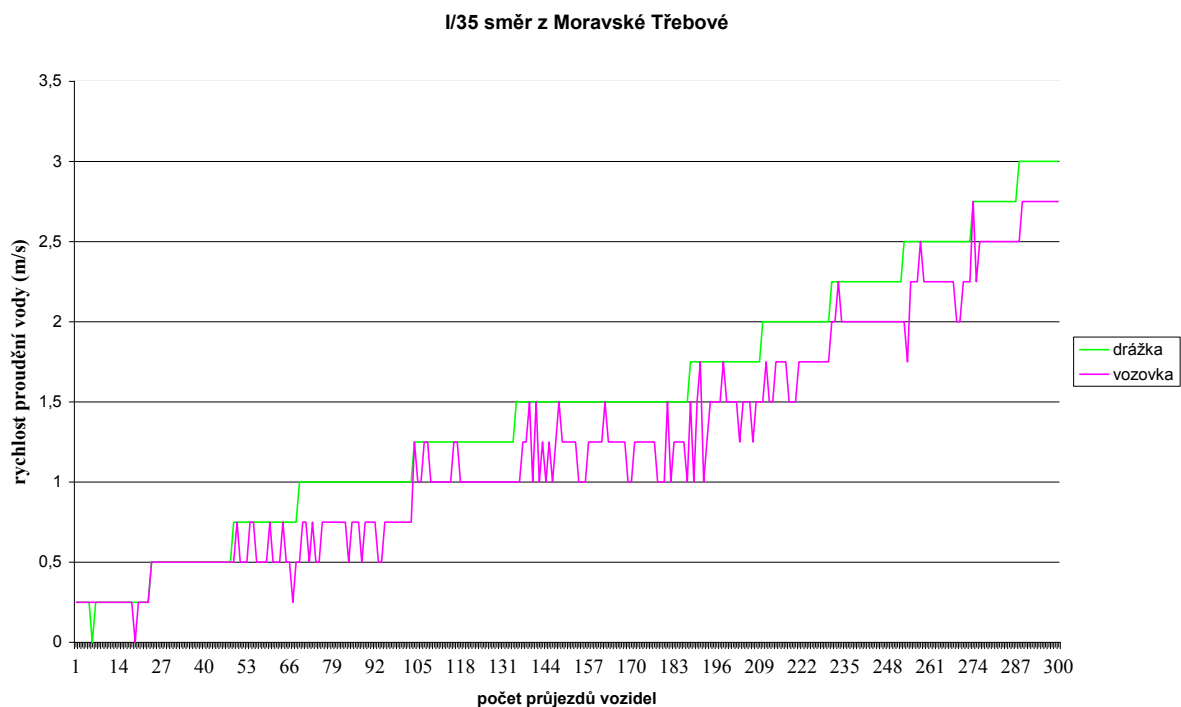
1,75	1,5	95,4	1,5	1,25	97,2
2	1,75	90,5	1,5	1,25	97,8
2	1,75	97,2	1,5	1,25	105,1
2	1,5	89,6	1,5	1,25	100
2	1,75	90,4	1,5	1,25	93,2
2	1,75	91,2	1,5	1,25	106,8
2	2	90	1,5	1,25	93,5
2	2	89,9	1,5	1,25	97,2
2	1,75	86,9	1,75	1,75	89,7
2	1,75	91	1,75	1,75	90,2
2	2	97,5	1,75	1,75	98,7
2	1,75	89,4	1,75	1	100,7
2	1,75	92,3	1,75	1,75	88,1
2	2,25	90	1,75	1,75	89,6
2	1,75	94,1	1,75	1,5	89,4
2	1,75	89,4	1,75	1,75	91,5
2	1,75	92,3	1,75	1,75	94,5
2,25	2	94,2	2	1,75	99,1
2,25	2	90,1	2	2	97,5
2,25	2	92,3	2	1,75	96,5
2,25	2	92,6	2	2	94,5
2,25	2	99	2	1,75	98,7
2,25	2	94,2	2	2	92
2,25	2	92,3	2	2	94,1
2,25	2	90	2	2	89,4
2,25	2	94,1	2	2	96,3
2,25	2	89,4	2	2	95,6
2,5	2,25	99,1	2	2	104
2,5	2,25	95,6	2	2	105,8
2,5	2,25	94,5	2	1,75	99,8
2,5	2,25	90	2	1,75	96,4
2,5	2,25	90	2	1,75	97
2,5	2,25	90	2	1,75	94,1
2,5	2,25	90,1	2	1,75	92,3
2,5	2,25	90,2	2,25	2	102,3
2,5	2,25	90,1	2,25	2	99,9
2,75	2,5	90	2,25	2,5	102,3
2,75	2,5	90,5	2,25	2	102,3
2,75	2,5	91,6	2,25	2	110
2,75	2,5	91,2	2,25	1,75	99,9
2,75	2,5	89,4	2,25	2,5	93,6
2,75	2,5	91,4	2,25	2	101
2,75	2,5	89,7	2,25	2	99,9
2,75	2,5	90	2,5	2,25	110,2
2,75	2,5	93,6	2,5	2,25	105,9
2,75	2,5	88,7	2,5	2,25	98,7
3	2,75	98	2,5	2,25	104
3	2,5	96,8	3	2,75	102,3
3	3	110,1	3	2,5	120
3	2,5	105,4	3	2,75	125,6
3	2,5	99,8	3	2,5	109,7
3	2,75	103	3	2,75	120,5

TAB.T5.5 Výsledné hodnoty ze dne 7.7.2008 na I/34

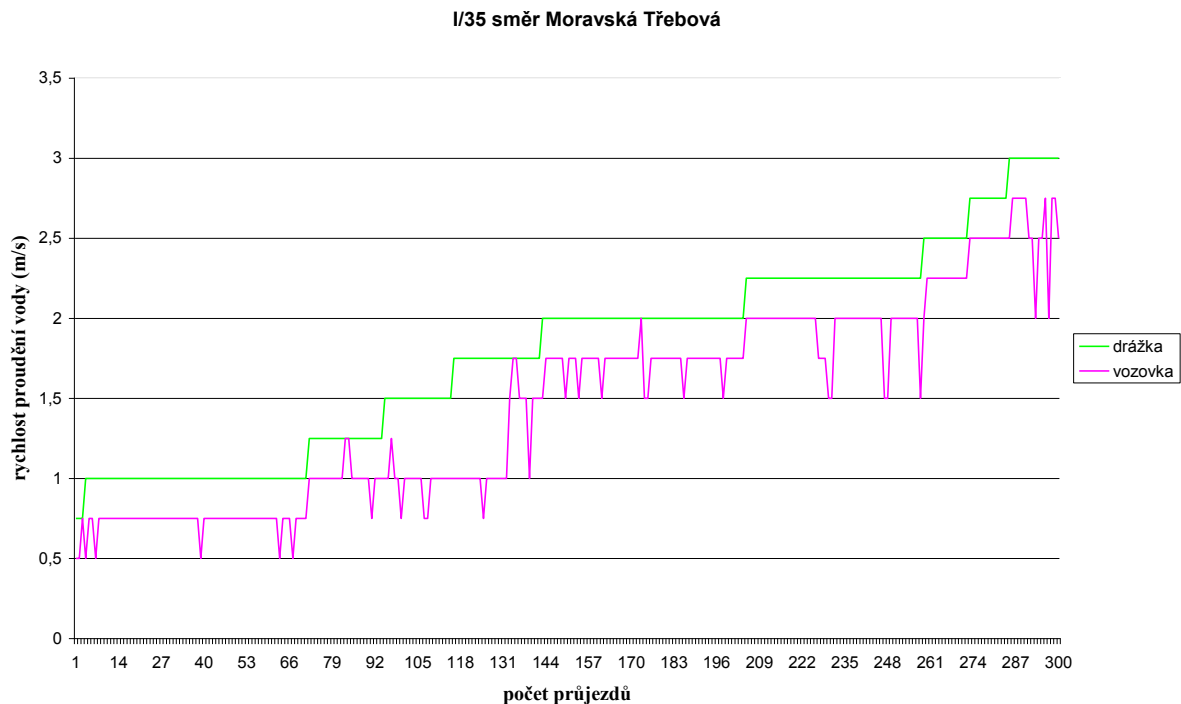
6) Vyhodnocení

6.1. Analýza dat z I/35 mezi obcí Hřebeč a Moravská Třebová

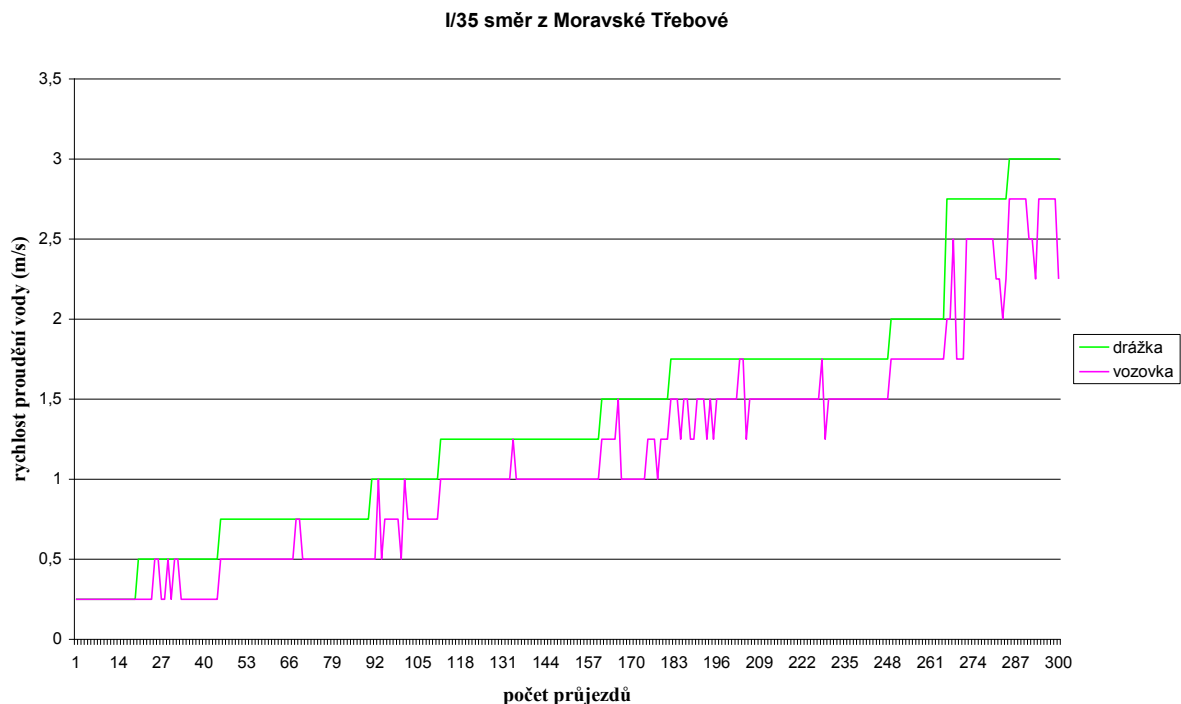
Na obr.73 je graficky znázorněn rozdíl rychlostí odtoku vody ze stopy pomocí drážek (zeleně) a na vozovce bez úpravy drážkováním (fialově) na základě hodnot (tab.T5.1) rychlosti v drážkách seřazených vzestupně. Jedná se o směr z Moravské Třebové na Hřebeč, kde silnice výškově stoupá. Tomu také odpovídají hodnoty rychlosti jízdy vozidel (třetí sloupec T5.1). Průměrná rychlost byla jen 79,7km/h oproti průměrné rychlosti 93,2km/h naměřené toho dne ve směru opačném. Jak se vyšší rychlosti projíždějících vozidel promítly do záznamu odvodnění drážkou a neupravenou vozovkou je vidět na obr.74. Porovnáme-li obr.73 a 74 shledáme větší distanci hodnot obou sledovaných rychlostí proudění na obr.74, tedy za průměrně vyšší pojezdové rychlosti. Tento odstup se dle obr.74 projevuje již téměř od počátku vodorovné osy, kde jsou zařazeny nejnižší rychlosti proudění a dále s rostoucí rychlostí proudění se protínají záznamy jen ojedinele a vzájemný odstup si v proměnné velikosti udržují. Naproti tomu v opačném směru dle obr.73 se rozdíl rychlostí zpočátku neprojevuje. Zlom nastává až s nárůstem pojezdové rychlosti, zhruba kolem 60km/h, ale je rušen četnými průniky hodnot obou rychlostí proudění, které řídnu s rostoucí rychlostí jízdy vozidel. Druhý měřicí den v též lokalitě přinesl obdobné výsledky, ovšem ne tak jednoznačně patrné. Náznorně je tento jev demonstrován až v pravé polovině (při rychlostech průjezdu kolem 85-90km/h) obr.75 a 76. Je nutno doplnit, že průměrná pojezdová rychlost byla druhý den měření ve směru stoupání silnice tedy z Moravské Třebové 78km/h; ve směru opačném 88,9km/h. V obou směrech jezdila vozidla průměrně pomaleji než v den prvního měření. Zde na snížení rychlosti projíždějících vozidel měly zřejmě vliv klimatické podmínky, neboť intenzivní déšť byl chvílemi provázen i bočním větrem.



Obr.73. Grafické porovnání výsledných hodnot rychlosti proudění vody v drážkách a mimo ně ze stopy, dne 10.7.2008 na I/35 směrem z Moravské Třebové

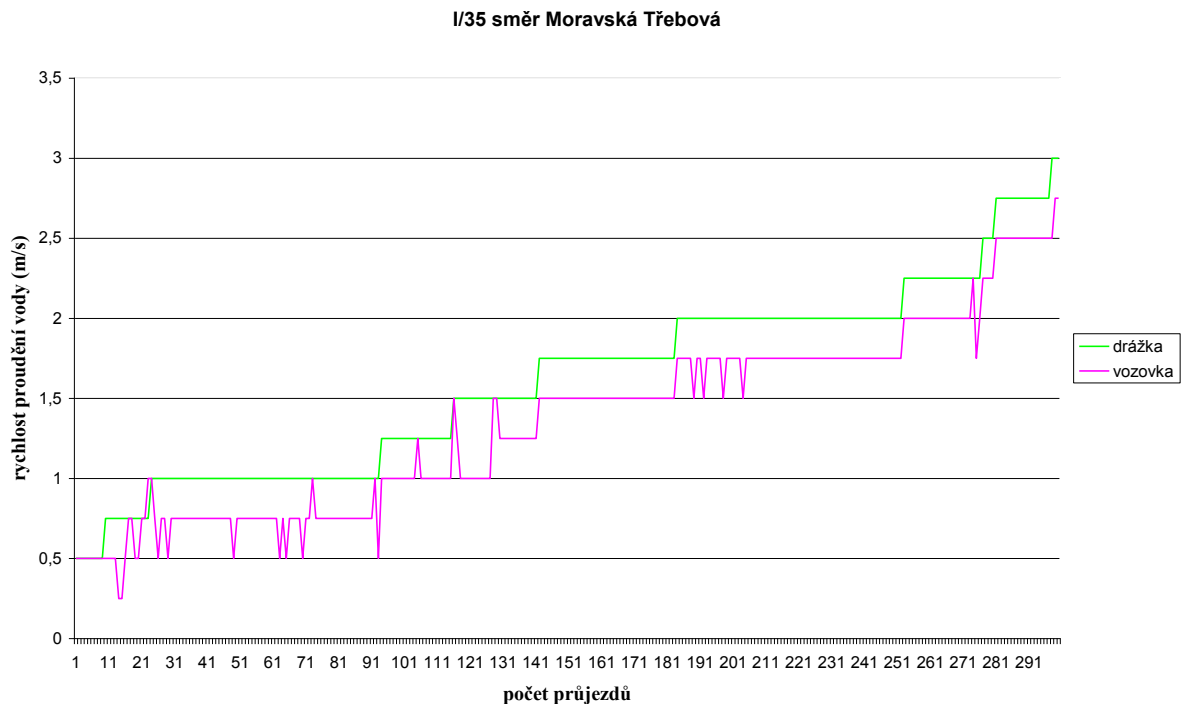


Obr.74. Grafické porovnání výsledných hodnot rychlosti proudění vody v drážkách a mimo ně ze stopy, dne 10.7.2008 na I/35 směr Moravská Třebová

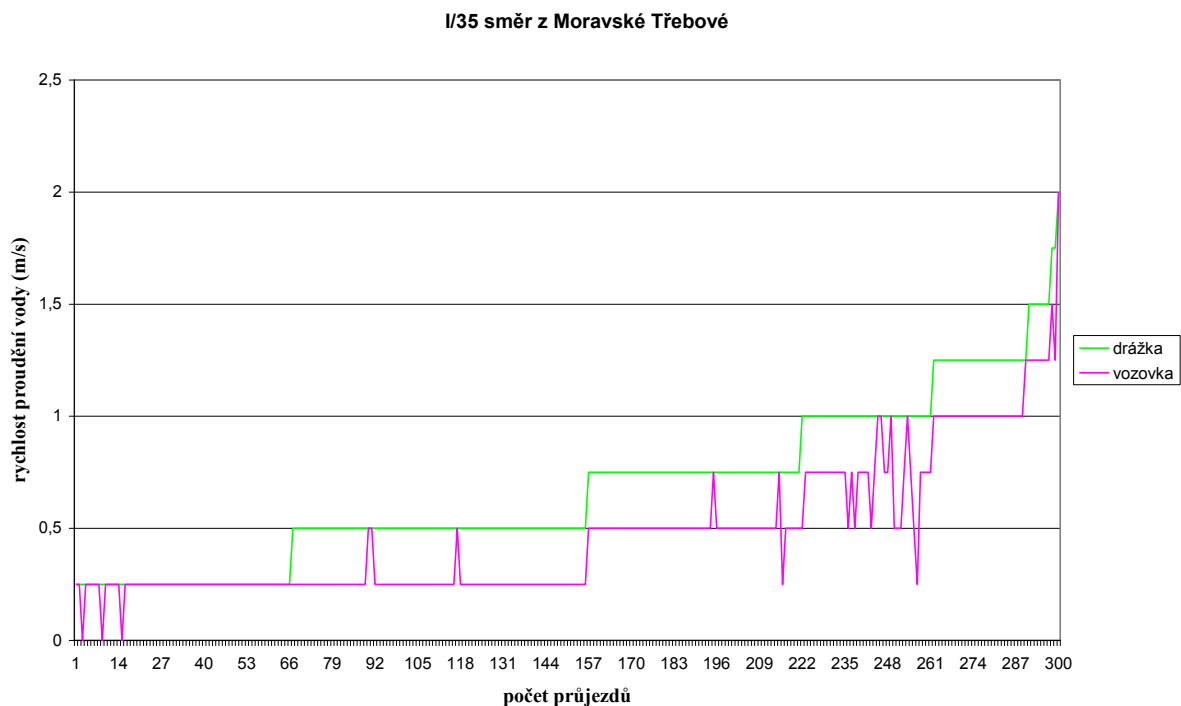


Obr.75. Grafické porovnání výsledných hodnot rychlosti proudění vody v drážkách a mimo ně ze stopy, dne 12.7.2008 na I/35 směrem z Moravské Třebové

V rozporu s výše uvedenou úvahou, že rozdíl rychlosti proudění vody ze stopy v drážce a mimo ně se projevuje teprve až s rostoucí průjezdovou rychlostí, je grafická demonstrace hodnot naměřených následujícího dne na obr.77 a 78. Průměrná rychlost totiž činila 84,7km/h směr Moravská Třebová a 59,3km/h směrem opačným, což jsou nejnižší průměrné rychlosti v daných směrech pro dny, kdy bylo měření prováděno.



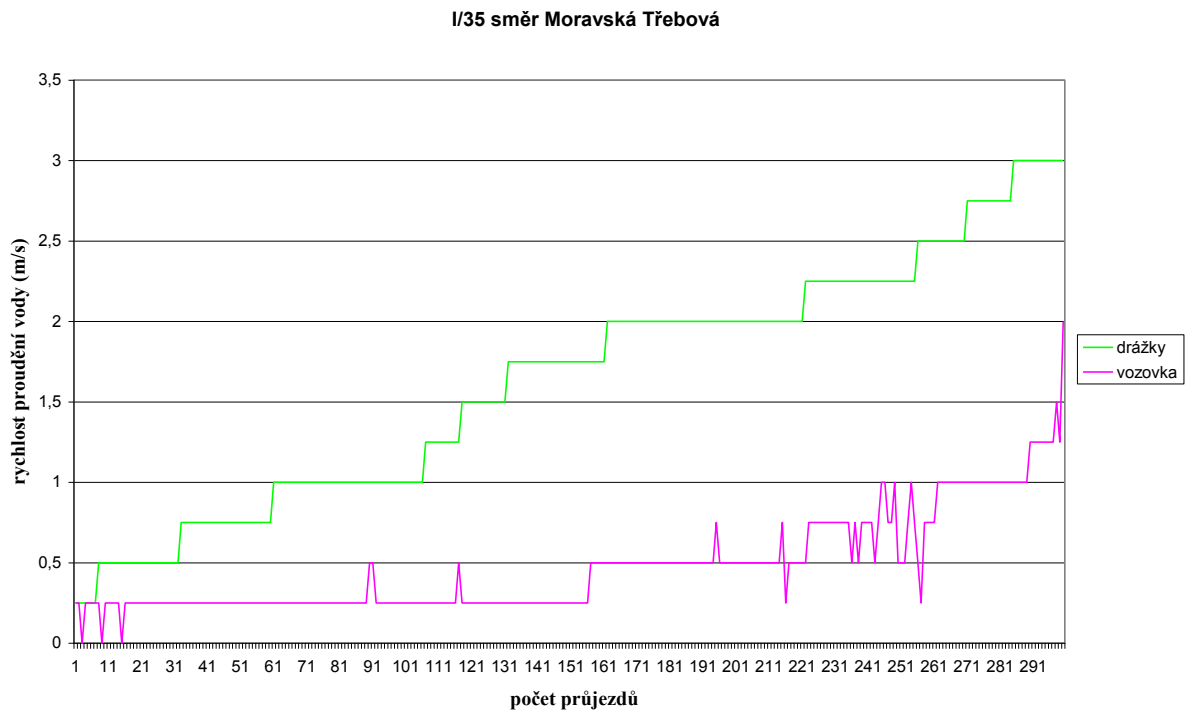
Obr.76. Grafické porovnání výsledných hodnot rychlosti proudění vody v drážkách a mimo ně ze stopy, dne 12.7.2008 na I/35 směr Moravská Třebová



Obr.77. Grafické porovnání výsledných hodnot rychlosti proudění vody v drážkách a mimo ně ze stopy, dne 13.7.2008 na I/35 směrem z Moravské Třebové

Určitý rozdíl zřejmě vlivem pojezdové rychlosti, je přeci jen možné zde spatřit. Je to rozdíl v rychlostech mezi oběma směry během měření. Projev tohoto rozdílu je markantní při komparaci obr.77 a 78. Obr.78 zřetelně ukazuje rozdíl rychlosti proudění vody v drážkách (zelená) a mimo ně (fialová), z čehož lze dovodit, že vliv drážkování na rychlost proudění

vody ze stopy ve vztahu k rychlosti průjezdové, nastává až při rychlosti kolem 60km/h, přičemž již se zvyšující rychlostí průjezdu úměrně nenarůstá.



Obr.78. Grafické porovnání výsledných hodnot rychlosti proudění vody v drážkách a mimo ně ze stopy, dne 13.7.2008 na I/35 směr Moravská Třebová

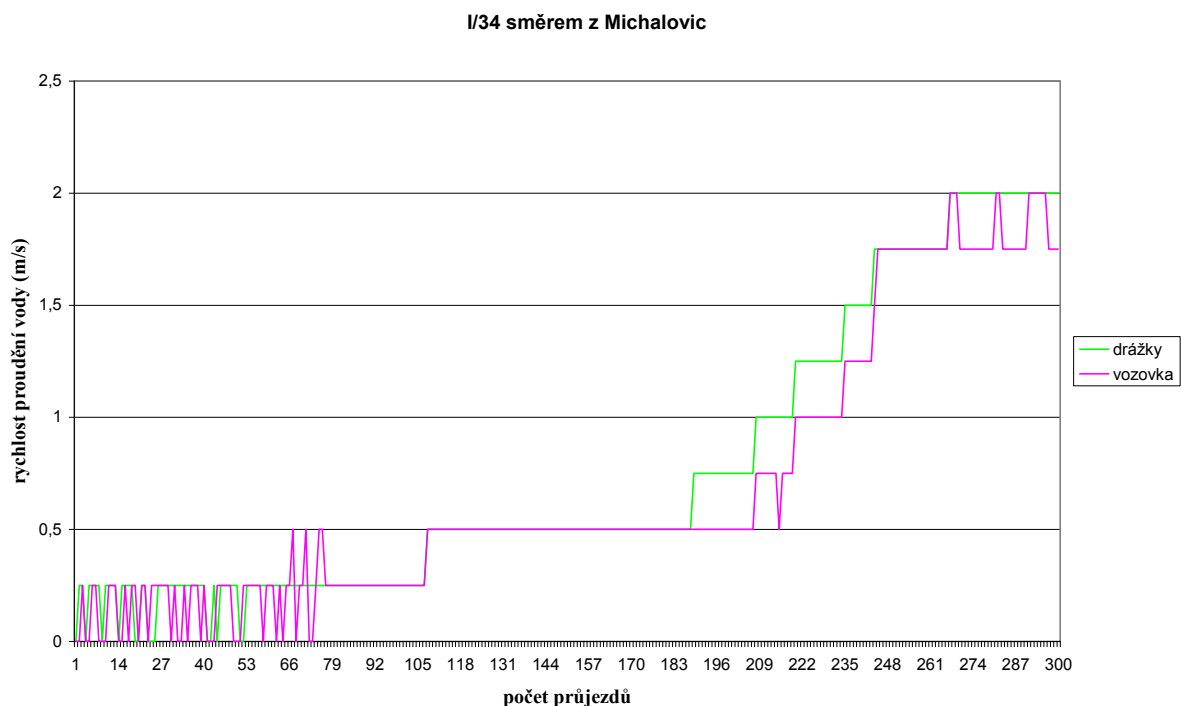
6.2. Analýza dat z I/34 mezi obcí Michalovice a Šmolovy

Při pohledu na grafické znázornění dat pocházejících z lokality druhé, ze silnice I/34 v úseku mezi obcí Michalovice a obcí Šmolovy na Havlíčkovobrodsku, již takový markantní rozdíl mezi rychlostmi proudění vody v drážkách a na vozovce bez drážek vidět není. V některých oblastech grafů, např. na obr.81, se křivky překrývají, nebo dokonce prolínají jako na obr.80. Jednoznačnou vyšší rychlost proudění, ať už v drážkách či na volné vozovce nelze deklarovat ani po provedení opakovaného měření, jehož výsledky jsou zobrazeny na obr.82 a 83. Nelze tak učinit ani po zohlednění případného vlivu pojezdové rychlosti vozidel, neboť i při vyšší rychlosti pojezdu, dochází k výkyvům a to nejen bodově viz obr.80 a 81 v prostřední a obr.80 ještě v pravé části zobrazované oblasti.

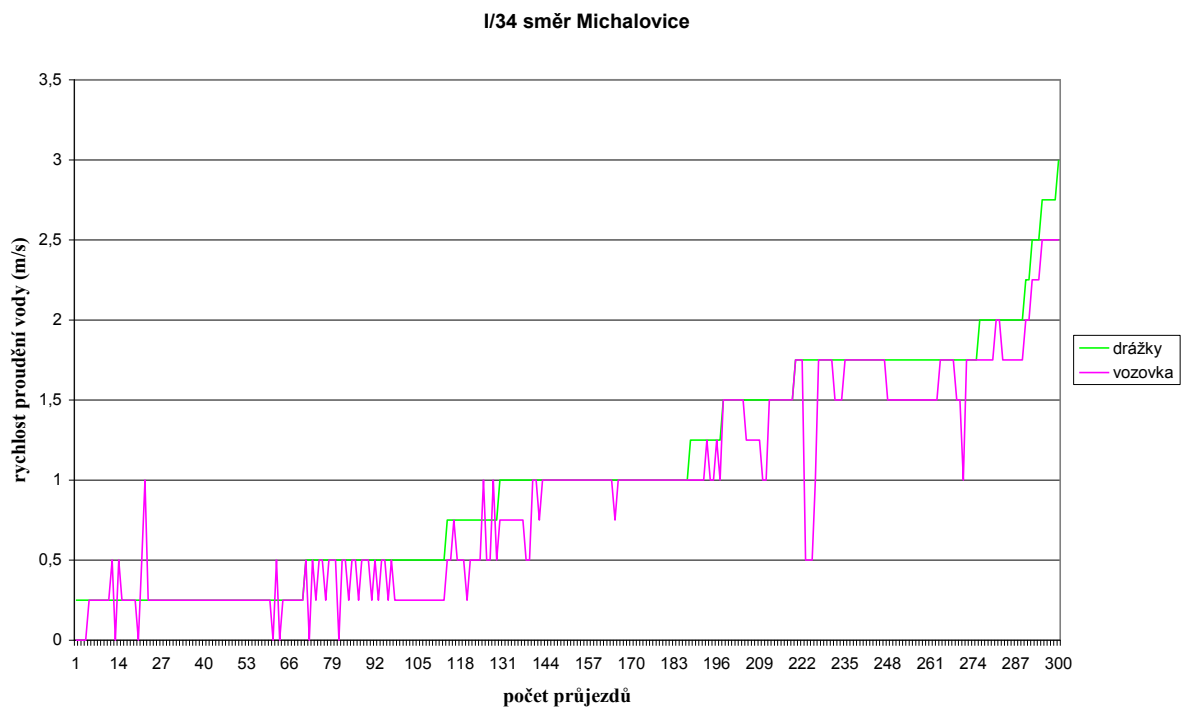


Obr.79 Přerušování drážek lokální opravou vozovky

Tuto nejednoznačnost naměřených dat v této lokalitě v porovnání s výsledky zjištěnými v lokalitě předchozí si lze vysvětlit zřejmě stavem, v jakém se obě silnice a zejména drážkování nacházejí. Zatímco v podstatě neporušené a neopotřebované drážkování na silnici I/35 funguje k účelu, kterému bylo určeno, tedy k odvodnění bez vlivů poruch celistvosti a kontinuity, funkce drážkování na silnici I/34 je častými poruchami a vlastním poškozením a opotřebením značně limitována.

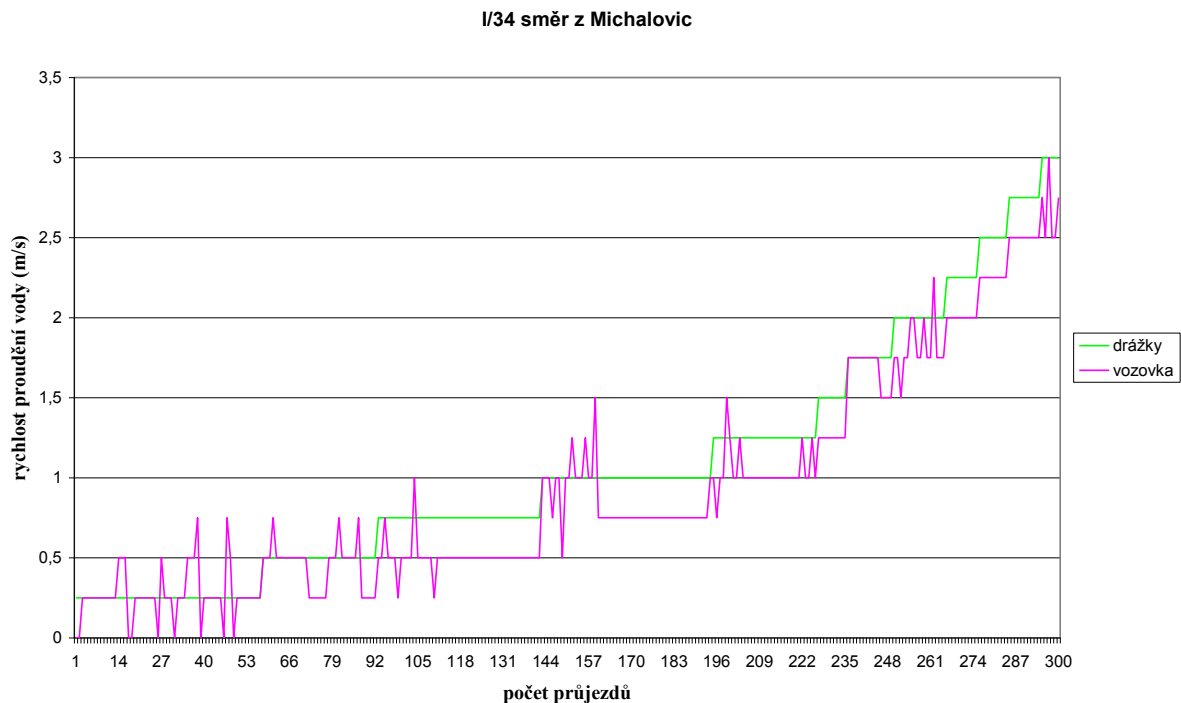


Obr.80. Grafické porovnání výsledných hodnot rychlosti proudění vody v drážkách a mimo ně ze stopy, dne 4.7.2008 na I/34 ve směru z Michalovic na Šmolovy

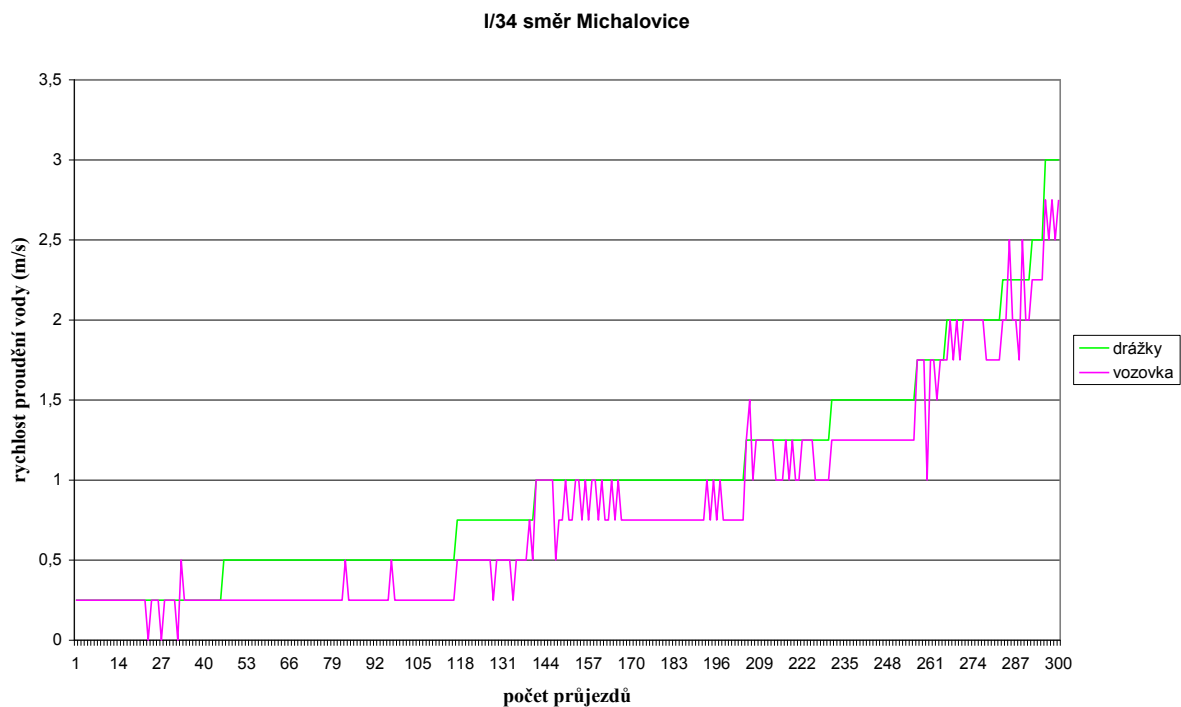


Obr.81. Grafické porovnání výsledných hodnot rychlosti proudění vody v drážkách a mimo ně ze stopy, dne 4.7.2008 na I/34 směr Michalovice

To vysvětluje i fakt, že v některých oblastech hodnot je drážkování dokonce předčeno vozovkou bez úprav a ocitá se opačné poloze znázornění, tedy níže. Po průjezdu vozidla přes poškozenou drážku sice dochází k pohybu/proudění vody ze stopy avšak tento proud je okamžitě rozbíjen a brzděn členitým a nerovnoměrným profilem, anebo je zpět odrážen do stopy překážkou, která drážku přetíná jako např. lokální vysrávka vozovky viz obr.79



Obr.82. Grafické porovnání výsledných hodnot rychlosti proudění vody v drážkách a mimo ně ze stopy, dne 7.7.2008 na I/34 ve směru z Michalovic na Šmolovy



Obr.83. Grafické porovnání výsledných hodnot rychlosti proudění vody v drážkách a mimo ně ze stopy, dne 7.7.2008 na I/34 směr Michalovice

7) Závěr

Bereme-li v úvahu, že podstatným faktorem při sledování vzniku aquaplaningu je to, jak rychle je odváděna srážková voda ze stopy projíždějící pneumatiky automobilu, je nutno přiznat, že metoda drážkování tak jak bylo pojednáno výše, přispěje ke zvýšení bezpečnosti silničního provozu. Zjištěný přínos spočívá v urychlení odtoku vody ze stopy oproti vozovce bez úpravy průměrně o 0,25-0,5m/s. To je ovšem za předpokladu, že jsou drážky v takovém tvaru a přibližně v takovém stavu, jak byly vytvořeny. Jejich opotřebení ojetím, přerušení vlivem dodatečné lokální opravy vozovky bez obnovy profilu drážek popř. znečištění, tento přínos degraduje. Po opotřebení desetiletým dopravním provozem a lokálními zásahy údržby je, jak bylo zjištěno diskutabilní. Bylo také zjištěno, že tento účinek se začíná projevovat až při rychlosti kolem 60km/h a více.

Drážkování bylo zkoumáno v místech, kde pozemní komunikace vykazovala z různých příčin nedostatky v odvodnění (zejména malý příčný či podélný sklon). Z tohoto důvodu metodu drážkování také správce komunikace v těchto úsecích použil. Výše uvedená výhoda drážkování ale není míněna pro úseky silnic, kde bylo drážkování použito z jiných důvodů např. zvýšení pozornosti řidiče apod.(tedy nebylo třeba zajistit účinnost odvodnění tímto způsobem), neboť tam zkoumáno v rámci této práce nebylo.

Metoda drážkování je vhodnou technologií pro snížení rizika vzniku aquaplaningu a tím zvýšení bezpečnosti silničního provozu v součinnosti s pneumatikami automobilu, jejichž stav v ČR co do ojetí a tlaku huštění byl průzkumem provedeným v rámci této práce hodnocen jako dobrý.

8) Využití a další rozvoj poznatků

8.1 Přínos poznatků disertační práce v praxi

Hlavní využití v praxi je spatřováno především ze strany vlastníků a správců pozemních komunikací. Současná legislativa, zejména [80] a [81] určuje vlastníkově pozemní komunikace mimo výkonu vlastnického práva také povinnost údržby a technické správy. Zde v případě, že vlastník komunikace není zároveň schopen vykonávat tuto správu, zřizuje či najímá si správce komunikace. Pak oba, ať již vlastník sám či případný správce mohou využít disertační práci hodnocenou metodu v režimu silničního hospodářství vzhledem k její finanční a technologické dostupnosti zvláště pak tehdy, bude-li mít vlastník komunikace větší podíl zodpovědnosti za bezpečnost dopravního provozu. V tom okamžiku bude při svém již tak omezeném finančním rozpočtu hledat laciná a efektivní opatření pro zvýšení bezpečnosti silničního provozu na jím obhospodařovaných cestách.

Hmatatelný přínos pro využití v praxi je spatřován ve finanční úspoře vlastníka/správce pozemní komunikace, který namísto nákladné a zdoluhavé stavební rekonstrukce nedostatečně odvodněné komunikace, kde hrozí zvýšené riziko vzniku aquaplaningu a kde v důsledku toho dochází k častým dopravním nehodám, použije podstatně levnější a rychlejší metodu drážkování.

8.2 Možnosti dalšího rozvoje bádání v dané problematice

Práce hodnotí vliv na zvýšení bezpečnosti silničního provozu drážek provedených na vozovce pozemní komunikace z pohledu životnosti komunikace zcela nedávno (silnice I/35 u Moravské Třebové) kde zaznamenala výsledky jednoznačné. Tato jednoznačnost se už ale v druhém případě kdy stáří úpravy dosáhlo 10 let (silnice I/34 u Havlíčkova Brodu) vytrácí. Jaká ale bude účinnost dodatečného odvodnění komunikace – drážkování, po delší době provozu, po 15 nebo 20 letech? Bude docházet dlouhodobým přejížděním drážek v jedné stopě k rozvalování a deformaci frézovaných hran drážek tak až v těchto místech zcela splynou jakousi nedefinovatelnou nerovnost? A jaký vliv budou mít v tomto pozměněném tvaru na bezpečnost silničního provozu? Jak budou drážky fungovat při následném vzniku podélných deformací vozovky? Bude mít zásadní vliv pro odvodnění drážkami možná změna jejich profilu způsobená právě těmito deformacemi? A jaký má vliv aplikace technologie drážkování na životnost vozovky samotné? Do detailu nebyla také zmapována problematika závislosti rychlosti proudění srážkové vody ze stopy na rychlosti průjezdu vozidla. Při stávajícím systému technické údržby a oprav pozemních komunikací jednotlivých správců lze předpokládat také určitý vliv na odvodňovací drážky lokální opravou vozovky v drážkovaném úseku ať už s obnovou drážek či bez ní tak jak již naznačila tato práce. Na všechny tyto otázky lze hledat odpověď, která by správci komunikace byla prospěšná, v dalším zkoumání problematiky.

Možným nástrojem se může stát průběžné statistické sledování konkrétního úseku pozemní komunikace, včetně měření provedeného v rámci této disertační práce.

9) Soupis bibliografických citací, reference

- [1] Cho, J.R., Lee, H.W., Sohn, J.S., Kim, G.J., Woo, J.S., 2006. Numerical investigation of hydroplaning characteristics of three-dimensional patterned tire. *European Journal of Mechanics A/Solids* 25, 914–926.
- [2] Moore, D.F., 1975. *The Friction of Pneumatic Tyres*. Elsevier Scientific Publishing Company.
- [3] Browne, A.L., Cheng, H., Kistler, A., 1972. Dynamic hydroplaning of pneumatic tires. *Wear* 20, 1–28.
- [4] Nakajima, Y., Seta, E., Kamegawa, T., Ogawa, H., 2000. Hydroplaning analysis by FEM and FVM: Effect of tire rolling and tire pattern on hydroplaning. *Int.J. Automotive Technol.* 1 (1), 26–34.
- [5] Cho, J.R., Kim, K.W., Jeon, D.H., Yoo, W.S., 2005. Transient dynamic response analysis of 3-D patterned tire rolling over cleat. *Eur. J. Mech. A Solids* 24 (3), 519–531.
- [6] Wriggers, P., 2002. *Computational Contact Mechanics*. John Wiley & Sons.
- [7] Cho, J.R., Lee, S.Y., 2003. Dynamic analysis of baffled fuel-storage tanks using the ALE finite element method. *Int. J. Numer. Methods Fluid* 41, 185–208.
- [8] Shiraishi, M., Yoshinaga, H., Miyori, A., Takahashi, E., 2000. Simulation of dynamically rolling tire. *Tire Sci. Technol.* 28 (4), 264–276.
- [9] Walter, J.D., Patel, H.P., 1979. Approximate expressions for the elastic constants of cord rubber laminates. *Rubber Chem. Technol.* 52, 710–724.
- [10] Patankar, S.V., 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill.
- [11] Oden, J.T., Carey, G.F., 1984. *Finite Elements: Special Problems in Solid Mechanics*, vol. V. Prentice-Hall.
- [12] Belytschko, T., Liu, W.K., Moran, B., 2000. *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*. John Wiley & Sons.
- [13] Hu, N., 1997. A solution method for dynamic contact problems. *Comput. & Structures* 63 (6), 1053–1063.
- [14] Aquelet, N., Souli, M., Olovsson, L., 2006. Euler–Lagrange coupling with damping effects: Application to slamming problems. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 195, 110–132.
- [15] Farhat, C., Lesoinne, M., LeTallec, P., 1998. Load and motion transfer algorithms for fluid/structure interaction problems with non-matching discrete interfaces: Momentum and energy conservation, optimal discretization and application to aeroelasticity. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 157, 95–114.
- [16] Harder, R.L., Desmarais, R.N., 1972. Interpolation using surface splines. *J. Aircraft* 9, 189–191.
- [17] Pinnington, R.J., 2006. A wave model of circular tyre. Part 1: belt modelling. *Journal of Sound and Vibration* 290, 101–132.
- [18] H. Ishiara, Development of a three dimensional membrane element for the finite element analysis of tires, *Tire Science and Technology* 13 (2) (1985).
- [19] P.W.A. Zegelaar, S. Gong, H.B. Pacejka, Tyre models for the study of in-plane dynamics, in: *The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, Vehicle System Dynamics*, Swets & Zeitlinger, 1994.
- [20] W. Kropp, Structure-sound on a smooth tyre, *Applied Acoustics* 20 (3) (1989) 181–193.
- [21] K. Larsson, W. Kropp, A high frequency tyre model based on two coupled elastic layers, *Journal of Sound and Vibration* 253 (4) (2001) 889–908.
- [22] S. Gong, A Study of In-plane Dynamics of Tires, PhD Thesis, Delft University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Marine Technology, 1993. R.J. Pinnington / *Journal of Sound and Vibration* 290 (2006) 101–132

- [23] Pinnigton R.J., A.R. Briscoe, A wave model for a pneumatic tyre belt, *Journal of Sound and Vibration* 253 (2002) 941–959.
- [24] Pinnigton R.J., Radial force transmission to the hub from an unloaded stationary tyre, *Journal of Sound and Vibration* 253 (2002) 961–983.
- [25] Walsh S.J., R.G. White, Mobility of a semi-infinite curved beam with constant curvature, *Journal of Sound and Vibration* 221 (1999) 887–902.
- [26] Walsh S.J., R.G. White, Vibrational power transmission in curved beams, *Journal of Sound and Vibration* 223 (3) (2000) 455–488.
- [27] Pinnigton R.J., A wave model for a circular tyre. Part 2: side-wall and force transmission modelling, *Journal of Sound and Vibration*; doi:10.1016/j.jsv.2005.03.024.
- [28] Benham P.P., F.W. Warnock, *Mechanics of Solids*, Pitman, New Zealand, Wellington, 1979.
- [29] Timoshenko S., *Theory of Elastic Stability*, McGraw-Hill, New York, 1936.
- [30] Cremer L., M.L. Heckl, E.E. Ungar, *Structure-borne Sound*, Springer, Berlin, 1973.
- [31] Vil'ke V.G., M.V. Dvornikov, The rolling of wheel with a pneumatic tyre on a plane, *J. Appl. Maths Mechs*, Vol.62, No.3, pp.359-369, Elsevier Science Ltd., UK, 1998
- [32] Keldysh, M.V., The front-wheel shimmy of a three-wheeled undercarriage. *Trudy. Tsentr. Aerogidrodin. Inst.*, 564, 1945.
- [33] Levin, M.A., Fufayev, N.A., *Theory of the Rolling of a Deformed Wheel*. Nauka, Moskva 1989
- [34] Pacejka, H.B., Bakker, E., The magic formula tyre model. *Proc. 1st International Colloq. Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis*, Delft, 1991. Swets & Zeitlinger, Amsterdam 1993, 1-18
- [35] Noor K. Ahmed, Peters M. Jeanne, Reduction Technique for tire contact problems, Center for Advanced Computational Technology, University of Virginia, NASA Langley Research Center, Hampton, VA 23681, U.S.A, 1995
- [36] Noor K.A., Andersen C.M., Tanner J.A., Exploiting symmetries in the modeling and analysis of tires, *Comput. Meth. appl. Mech. Engng* 63, 37 – 81, 1987
- [37] Sanders J. Lyell Jr., Nonlinear theories for thin shells, *Q appl Math* 21, 21 - 36, 1963
- [38] Budiansky Bernard, Notes on nonlinear shell theory, *J. appl Math* 35, 393 - 401, 1968
- [39] Simo C. Juan, Wriggers Peter, Taylor L. Robert, A perturbed Lagrangian formulation for the finite element solution of contact problems, *Comput. Meth. appl. Mech. Engng*. 50, 163 - 180, 1985
- [40] Stein E., Wagner W., Wriggers P., Finite element postbuckling analysis of shells with nonlinear contact constraints, *Finite Element Methods for Nonlinear Problems*, 719-744 Springer, Berlin 1986
- [41] Stein E., Wagner W., Wriggers P., Algorithms for nonlinear contact constraints with application to stability problems of rods and shells, *Comput. Mech.* 2, 215-230 1987
- [42] Kim O.K., Tanner J.A., Noor A.K., Robinson M.P., Computational methods for frictionless contact with application to space shuttle orbiter nose-gear tires, NASA TP-3073, 1991
- [43] Noor A.K., On making large nonlinear problems small, *Computational methods appl. Mech. Engng* 34, 955 - 985 1982
- [44] Žiačík Pavol, vedúci tímu Mat.-konšt. analýzy a vývoj foriem, Puček Marcel (FEM analytik), VÚG MATADOR a.s., Terézie Vansovej 1054, Púchov, osobní konzultace prosinec 2006
- [45] Marcin Jiří, *Konstrukce pneumatik - Teorie membrány*, SNTL Praha (1985)
- [46] Gough V.E., *Wear* 2, 107 (1958)
- [47] Gough V.E.: *Kaut. Gummi Kunstst.* 20, 469 (1967)

- [48] Gallaway B.M., Texas A+M University, Report No. FHWA-RD-79-31, Federal Highway Administration, Washington, D.C., Dec.1979, pp.1-278, PB 80 146194, USA
- [49] Holmes K.E. Stone R.D. : Tyre Forces as Functions of Cornering and Braking Slip on Wet Road Surfaces. Road Research Laboratory Report LR 254 (1969)
- [50] Vlk František, Dynamika motoprových vozidel, jízdní odpory, odpor valivý, SNTL Praha (1972)
- [51] Marcín J., Zítek P., Ducháček V., Gumárenské technologie, Boční síla, vratný moment, směrová úchylka, SNTL Praha (1985)
- [52] Komándi G., Gödöllo University of Agricultural Sciences, Gödöllo Hungary, Journal of Terremechanics, Vol.34, No.4, 261-268, 1997
- [53] Komandi G., Reevaluation of the adhesive relationship between the tire and the soil. Journal of Terramechanics, 1993, 30(2), 77-83.
- [54] Söhne W., Die Kraftfibertragung zwischen Schlepperreifen und Ackerboden. Grundlagen der Landtechnik, H.3, 1952, pp. 75-87.
- [55] Komandi G., Determination of mechanical properties in the upper layer of plough fields. Work under a research grant awarded to the author by the Hungarian Scientific Research Foundation, 1994-1996, (in Hungarian).
- [55] Kuo C.Y., Graf A.G., Dowling W.R., Graham W.R., Journal of Sound and Vibration, 2002, 256(3), 433-445
- [56] Jůza Petr, Posudek soudního znalce v oboru stavebnictví, odvětví dopravních staveb, č. 52-4/00 znaleckého deníku, březen 2000
- [57] Reisenauer R., Stanovení rozsahu náhodného výběru, Metody matematické statistiky a jejich aplikace v technice, SNTL 1970
- [58] Zákon č.361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích
- [59] Kokkalis G.Alexandros, Fractal Evaluation of Pavement Skid Resistance, Variations.I.: Surface Wetting, Chaos, Solitons and Fractals Vol. 9, No. 11, pp. 1875-1890, Thessaloniki, Greece 1998
- [60] Henry, J. J., Tire wet - pavement traction measurement: A state - of - the - art review. Symposium: The Tire Pavement Interface. ASTM Special Technical Publication, 929, 3-25, Baltimore, 1986
- [61] Choa J.R., Kimb K.W., Yooa W.S., Honga S.I., Mesh generation considering detailed tread blocks for reliable 3D tire analysis, School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Kumjung-Ku, Jangjeon-Dong, Pusan 609-735, South Korea 2003
- [62] Pottinger MG, McIntyre JE., Effect of suspension alignment and modest cornering on the footprint behavior of performance tires and heavy duty radial tires, 27(3):128-60 Tire Sci Technol, TSTCA 1999
- [63] Clark SK., Mechanics of pneumatic tires, Washington, DC: Government Printing Office, 1982
- [64] Meschke G, Payer HJ, Mang HA. 3D simulations of automobile tires: material modeling, mesh generation, and solution strategies. Tire Sci Technol, TSTCA 1995;25(3):175-88.
- [65] Becchi I., Caporali E., Castelli F., Lorenzini C., Field Analysis of the Water Film Dynamics on a Road Pavement, Dipartimento di Ingegneria Civile, Universita degli Studi di Firenze, Via S.Marta 3, Firenze, Italy, 2000
- [66] <http://www.prutoky.cz/kapaliny/teorie/magneticko-indukcni-mereni-prutoku-princip/>
- [67] <http://elektro.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=55&h=38&obor=6>
- [68] <http://www.engineeringtoolbox.com/>
- [69] Čmelík, M., Machonský, L., Šíma, Z., Fyzikální tabulky, Liberec: TU Liberec, 2001
- [70] ISO 3534-1 ČSN 010216 Pravděpodobnost a obecné statistické termíny, Český normalizační institut, prosinec 1994

- [71] Lehovec F., Špůrek J. Projektování pozemních komunikací z hlediska tvorby a ochrany životního prostředí, Praha ČVUT, 1980
- [72] Hejzlar R., Mechanika tekutin, Praha ČVUT, 1986
- [73] Allen T., Ditsworth R.L., Fluid Mechanics, Mc Graw Hill, New York, 1972
- [74] Idělčik I.E., Spravočnik po gidravličeskim soprotivlenijam 2.izd., Mašinostrojenije, Moskva 1975
- [75] Kalide W., Einführung in die technische Strömungslehre 2. Aufl., C. Hanser Verlag, München, 1968
- [76] Landau L.D., Lifschitz E.M., Hydrodynamik, Akademie Verlag, Berlin, 1966
- [77] Milne L., Thomson M., Theoretical Hydrodynamics 5.Ed., Macmillan, London, 1968
- [78] Neunass E., Praktische Strömungslehre, VEB Verlag Technik, Berlin, 1967
- [75] Stelzer F., Wärmeübertragung und Strömung, Verlag K. Thimig KG, München, 1971
- [79] Swanson W.M., Fluid Mechanics, Holt, Rinehart, New York, Winston, 1970
- [80] Zákon č.13/1997 Sb., o pozemních komunikacích
- [81] Vyhláška č.104/1997 Sb., kterou se provádí zákon o pozemních komunikacích
- [82] Tesařík J., Prezidium Policie ČR, „Zbytečně ztracené životy při silničních nehodách v ČR“, IX.dopravně inženýrské dny Přínos dopravně inženýrských činností pro zvýšení bezpečnosti silničního provozu, Mikukov 2008, sborník
- [83] Souček E., Základy pravděpodobnosti a statistiky, Univerzita Pardubice, 2003
- [84] Pavelka L., Doležalová J., Pravděpodobnost a statistika, Technická univerzita Ostrava, 2005
- [85] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Pneumatika>
- [86] <http://www.pneumatiky.cz>
- [87] http://www.pneu-auto.cz/data/technicke_info.php?show=7
- [88] Vyhláška č. 341/2002 Sb., o schvalování technické způsobilosti a o technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích, Ministerstva dopravy a spojů, 11. července 2002
- [89] <http://jit.sagepub.com/cgi/content/abstract/1/2/102>
- [90] [www.bikernet.com/avon/PageViewer.asp?PageID=986 - 12k](http://www.bikernet.com/avon/PageViewer.asp?PageID=986-12k)
- [91] SAE Paper 800087 – The Effect of Inflation Pressure on Bias, Bias-Belted, and Radial Tire Performance - by B. L. Collier and J. T. Warchol, B. F. Goodrich, February, 1980
- [92] Pospíšil K. a kol., Cementobetonové vozovky - nové technologie výstavby, rekonstrukcí a oprav, včetně srovnání AB a CB technologií, vazba na povrchové vlastnosti, dlouhodobé sledování, Brno CDV 2006
- [93] Vacek J., Aplikovaná geotechnika: experimentální výzkum v geotechnice, SEKURKON, Praha 1997
- [94] Přínos CDV k řešení dopravních problémů, sborník, Brno, září 2003
- [95] Růžička M., Blastrak-Morava, spol.s.r.o., Šumavská 31, Brno, osobní konzultace, leden 2005
- [96] ČSN 736110 Projektování místních komunikací, Český normalizační institut, 2006
- [97] Dočkal K., Odborný posudek č.06-8400 stavu a pevnosti betonu odvodňovacích drážek na dálnici D1, Technický a zkušební ústav stavební Praha, pobočka Brno, Hněvkovského 77, srpen 2000
- [98] ČSN 73 1373 Tvrdoměrné zkoušení betonu, Český normalizační institut 1983/Z1 2003
- [99] ČSN 731370 Nedestruktivní zkoušení betonu, společná ustanovení, Český normalizační institut 1982/a 1989/ Z2 2003
- [100] Kudrna J., Posouzení úprav povrchů vozovek mechanickým zdrsněním, VÚT Brno, Ústav pozemních komunikací, Brno, leden 1999
- [101] ČSN 736177 Měření a hodnocení protismykových povrchů vozovek, Český normalizační institut 1983/N 1996/Z1 2002/ Z2 2005

- [102] ČSN 736160 Zkoušení silničních živičných směsí, Český normalizační institut 2001
- [103] Urbanec K., Frýbort D., Životnost technologie zdrsnění a odvodnění vozovky- zpráva o měření makrotextury a hloubce drážky provedených úprav na vybraných úsecích, Consultest s.r.o., Veveří 95, Brno, leden 2001
- [104] Bešťák L., SSŽ, a.s., závod Emulze Kolín, Referát o činnosti závodu, zasedání Sdružení správců městských komunikací, Plzeň, říjen 2007
- [105] Zvěřina P., Smutný J., Pazdera L., Akustická analýza bezhlučného odvodňovacího profilu s kadencí 2m, VÚT Brno, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb, Brno, říjen 2004
- [106] http://www.scitani2005.rsd.cz/html/1_vy.htm
- [107] http://www.scitani2005.rsd.cz/html/1_pa.htm
- [108] <http://www.chmi.cz/hydro/hr05/obr/m11m.jpg>
- [109] <http://khzs.fme.vutbr.cz/~stigler/vyuka/hydrom/HM02.pps#277,12>
- [110] Jarušková D., Pravděpodobnost a matematická statistika, Česká technika–nakladatelství ČVUT, Praha 2006
- [111] InfoServis 024, 2005 ÚAMK
- [112] ČSN 73 6101 Projektování silnic a dálnic, Český normalizační institut, říjen 2004/O1 květen 2005
- [113] Nabídkový katalog výrobků č.174/2000 společnosti Schwaborn, stavební stroje
- [114] Menčík J., Reliability and diagnostics of transport structures and means 2002: proceedings of the 1st international conference, Pardubice, Czech Republic, 26-27 September 2002
- [115] Pospíšil K., Výzkum vybraných stavebních prvků, konstrukcí a technologií s využitím transferu poznatků ze zahraničí, Brno CDV 2002
- [116] Mašek F., Metodický návod pro zvyšování bezpečnosti silničního provozu při zpracování územní plánovací přípravné a projektové dokumentace, Výzkumný ústav výstavby a architektury, Praha 1981
- [117] CDV, Systematika údržby silnic, Brno : Stradis, 1994
- [118] Kaun M., Luxemburk F., Silnice a dálnice: stavba, Vydavatelství ČVUT, Praha 1991
- [119] Kudrna J., Navrhování vozovek a funkční vlastnosti silničních stavebních materiálů, Brno : VUT-FAST, 2005
- [120] Conference Road Safety in Europe and Str Proceedings of the Conference Road Safety in Europe and Strategic Highway Research Program (SHRP), Linköping : VTI, 1996, sborník
- [121] Špůrek J., Silniční stavitelství, Praha : SNTL, 1969