

**UNIVERZITA PARDUBICE**  
**Dopravní fakulta Jana Pernera**

**Analýza brzdění vozidla v obecném směrovém oblouku**  
**Bc. Petr Dvořák**

**Diplomová práce**  
**2009**

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky  
Akademický rok: 2008/2009

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr DVOŘÁK**

Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**

Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**

Název tématu: **Analýza brzdění vozidla v obecném směrovém oblouku**

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

1. Analýza brzdění vozidla v přímém směru 2. Analýza jízdy a brzdění vozidla v obecném směrovém oblouku 3. Numerické stanovení brzdné dráhy vozidla v oblouku při konstantním poloměru a proměnlivých adhezních koeficientech 4. Numerické stanovení brzdné dráhy v závislosti na proměnlivém poloměru oblouku a příčném sklonu 5. Stanovení brzdné dráhy vozidla v oblouku přímým měřením na vozidle 6. Porovnání výsledků brzdné dráhy získané numerickým řešením a experimentálním měřením

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. BRADÁČ a kol., Soudní inženýrství, Akademické nakladatelství CERM s.r.o., Brno 1997
2. VALA, M. a TESAŘ, M. Teorie a konstrukce silničních vozidel I Pardubice: Univerzita Pardubice, 2003. ISBN 80-8209-7194-8; 8209-503-X.
3. VLK, F. Dynamika motorových vozidel. Brno: Nakladatelství a vydavatelství vlk, 2001. ISBN 80-8209-238-5; 8209-5273-6.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Tomáš Zikmund, Ph.D.**

Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání diplomové práce: **20. února 2009**

Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2009**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

dne

## **PROHLÁŠENÍ**

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 18. května 2009

Bc. Petr Dvořák

## **PODĚKOVÁNÍ**

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Tomášovi Zikmundovi, Ph.D. za odborné vedení práce, velkou pozornost, kterou mé práci věnoval a dále za pomoc při realizaci a vyhodnocení jízdni zkoušky.

Dále bych chtěl poděkovat za pomoc při realizaci jízdni zkoušky Ing. Janu Pokornému a Ing. Petru Jílkovi, DiS.

Bc. Petr Dvořák

## **SOUHRN**

Práce se zabývá analýzou brzdění vozidla v obecném směrovém oblouku se zaměřením na odvození konkrétních vztahů pro výpočet brzdné dráhy. Dále se práce zabývá vytvořením metodiky pro provádění jízdních zkoušek za účelem zjištění brzdné dráhy vozidla v oblouku, vyhodnocením naměřených dat a jejich porovnáním s numericky stanovenou brzdou dráhou.

## **Klíčová slova**

brzdná dráha; brzdné zpomalení; jízdní odpory; jízdní zkouška; mezní rychlost

## **Title**

Analysis of braking the vehicle in the general direction arc

## **Abstrakt**

The work deals with the analysis of braking the vehicle in the general direction of the arc with a focus on the derivation of specific figures to calculate braking distance. Furthermore, the work deal with creating a methodology for the implementation of driving tests in order to determine the vehicle braking distance in the arc by evaluating the measured data and their comparison with the numerically calculated the braking distance.

## **Keywords**

braking distance; braking retardation; riding resistance; riding examination; speed limit

## OBSAH

Úvod .....	- 8 -
Cíl práce .....	- 8 -
1. Analýza brzdění vozidla v přímém směru.....	- 9 -
2. Analýza jízdy a brzdění vozidla v obecném směrovém oblouku.....	- 17 -
3. Numerické stanovení brzdné dráhy .....	- 32 -
3.1 Postup při výpočtu brzdné dráhy .....	- 32 -
3.2 Numerické stanovení brzdné dráhy vozidla v oblouku konstantního poloměru pro různé součinitele adheze.....	- 35 -
3.3 Numerické stanovení brzdné dráhy v závislosti na poloměru oblouku a příčném sklonu .....	- 40 -
4. Stanovení brzdné dráhy vozidla v oblouku přímým měřením na vozidle.....	- 47 -
4.1 Obecná metodika zkoušek ke stanovení brzdné dráhy.....	- 47 -
4.1.1. Cíl zkoušek .....	- 47 -
4.1.2. Technické požadavky na vozidlo .....	- 47 -
4.1.3. Technické požadavky na zkušební dráhu .....	- 49 -
4.1.4. Podmínky jízdní zkoušky .....	- 49 -
4.1.5. Měřicí zařízení a pomůcky .....	- 49 -
4.1.6. Příprava zkušební dráhy a vozidla .....	- 50 -
4.1.7. Měření .....	- 50 -
4.1.8. Záznam o výsledku zkoušky .....	- 50 -
4.2 Průběh zkoušek ke stanovení brzdné dráhy .....	- 51 -
4.3 Vyhodnocení naměřených dat .....	- 55 -
5. Porovnání výsledků brzdné dráhy získané numerickým řešením a experimentálním měřením.....	- 58 -
Závěr.....	- 61 -
POUŽITÁ LITERATURA.....	- 63 -
Seznam obrázků .....	- 64 -
Seznam tabulek .....	- 65 -
Seznam grafů.....	- 66 -
Seznam příloh.....	- 67 -

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana - 8 -
Dopravní fakulta Jana Pernera		

## Úvod

V České republice od roku 1990, vlivem změny společenské a ekonomické situace, dochází se vzrůstající tendencí k nárůstu silniční dopravy, na které se značnou měrou podílí zejména nákladní doprava. V souvislosti s tímto nárůstem přímo souvisí zvyšující se počty vozidel různého stáří a výkonových parametrů pohybujících se po pozemních komunikacích České republiky. Je však zřejmé, že na tuto situaci však v odpovídajícím měřítku nereaguje budování nových a zkvalitňování stávajících dopravních cest. Tato situace, i přes nezpochybnitelné společenské a ekonomické přínosy dopravy, má za následek i jevy negativní, kterými jsou mimo jiné dopravní nehody.

Dopravní nehody, jejichž nárůst se dá jednoznačně odvodit mimo jiné i ze vzrůstající hustoty silničního provozu, tak tvoří důležitou součást provozu na pozemních komunikacích. S tímto negativním jevem jsou spojené značné škody na majetku a zdraví osob. Současně tak dochází k nárůstu zatížení orgánů činných v trestním řízení, které se zabývají vyšetřováním dopravních nehod za účelem zjištění jejich příčin a případné trestné či jiné odpovědnosti.

Při vyšetřování dopravních nehod je jedním z nejdůležitějších úkonů ohledání místa činu, tedy prostoru, ve kterém došlo k dopravní nehodě, za účelem nalezení a zajištění stop vzniklých v příčinné souvislosti s dopravní nehodou, prostřednictvím kterých lze následně rekonstruovat nehodový děj a z tohoto vyplývající další aspekty.

Již při provádění ohledání místa dopravní nehody je velmi důležité, aby se orgán činný v trestním řízení orientoval v možných příčinách nehodového děje a mohl tak díky předběžnému určení příčiny tohoto děje zefektivnit práci na místě a rychleji nalézt konkrétní stopy.

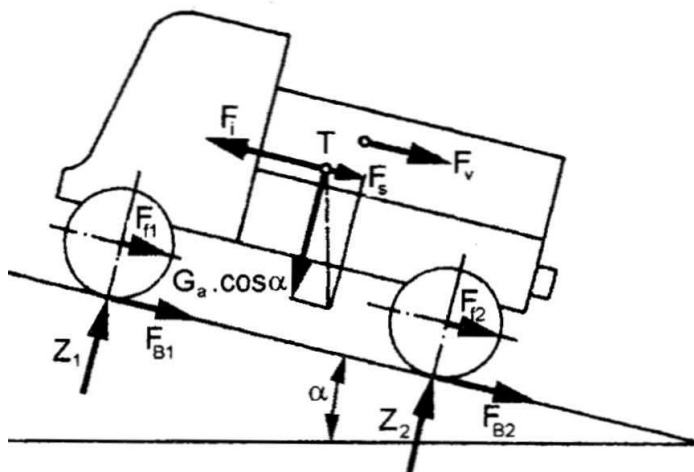
## Cíl práce

Cílem práce je zabývat se analýzou brzdění vozidla v obecném směrovém oblouku a dále ověřit využití výpočetní techniky při určení brzdě dráhy vozidla s ohledem na charakteristiku směrového oblouku a počáteční rychlost vozidla, za účelem zrychlení a zefektivnění prvotní analýzy nehodového děje Policií České republiky při vyšetřování dopravních nehod.



## 1. Analýza brzdění vozidla v přímém směru

Brzděním vozidla rozumíme takový proces, kdy dochází ke snižování rychlosti vozidla na základě vůle řidiče až do případného zastavení vozidla. Pro analýzu brzdění vozidla je nutné si nejprve uvědomit, jaké síly působí na vozidlo při brzdění. Síly působící na vozidlo brzdící v přímém směru jsou znázorněny na Obr. 1.1



**Obr. 1.1** Síly působící na brzdící vozidlo [10]

Z Obr. 1.1 je patrné, že vozidlo je zpomalováno krom brzděné síly  $F_B$ , která je dána součtem jednotlivých brzděných reakcí na kolech vozidla  $F_{B1}, F_{B2}, \dots$ , též jízdními odpory. Konkrétně:

1) valivý odpor  $F_f$ , který je dán součtem odporů na jednotlivých kolech  $F_{f1}, F_{f2}, \dots$ , tedy:

$$F_f = f \cdot \sum Z_k \Rightarrow F_f = G_a \cdot f \cdot \cos \alpha = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha \quad [10] \quad (1-1)$$

kde značí:

- $f$  - součinitel odporu valení pneumatik,
- $Z_k$  - radiální reakce kola vozidla [N],
- $G_a$  - tíhová síla působící v těžišti vozidla [N],
- $\alpha$  - úhel sklonu vozovky [rad],
- $m$  - hmotnost vozidla [kg],
- $g$  - gravitační zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ],

2) odpor vzduchu  $F_v$ , jehož velikost se určí pomocí vztahu:

$$F_v = \frac{\rho}{2} \cdot c_x \cdot S \cdot v^2 \quad [10] \quad (1-2)$$

kde značí:

$\rho$  - hustota vzduchu (1,23 kg/m<sup>3</sup>),

$c_x$  - součinitel odporu vzduchu; zpravidla:

aerodynamicky velmi pečlivě řešená vozidla	0,3-0,4
osobní vozidla s běžnou karosérií	0,4-0,6
nákladní vozy	0,7-1,0
autobusy	0,6-0,8

$S$  - čelní plocha vozidla (m<sup>2</sup>); v případě, že tato plocha není známa, je možné ji přibližně určit ze vztahu  $S = B \cdot h$ , kde  $B$  je rozchod kol a  $h$  výška vozidla,

$v$  - rychlost vozidla vůči vzdušnému prostředí,

3) odpor stoupání  $F_S$ , který je dán sinovou složkou tíhové síly vozidla:

$$F_S = G_a \cdot \sin \alpha = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (1-3)$$

4) odpor setrvačný  $F_i$ , který je složen ze setrvačného odporu proti postupnému pohybu hmot vozidla a setrvačného odporu proti urychlování rotujících hmot. Velikost tohoto odporu lze určit ze vztahu:

$$F_i = m \cdot a \cdot \vartheta \quad [10] \quad (1-4)$$

kde značí:

$a$  - zpomalení vozidla [m.s<sup>-2</sup>],

$\vartheta$  - součinitel vlivu rotujících hmot, empiricky vyjádřený vztahem:

$$\text{u osobních automobilů: } \vartheta = 1 + (0,035 + 0,042 \cdot i_p^2) \cdot \gamma$$

$$\text{u užitkových automobilů: } \vartheta = 1 + (0,055 + 0,022 \cdot i_p^2) \cdot \gamma$$

kde:

$i_p$  - měnitelný převod v převodovce,

$\gamma$  - poměr maximální a skutečné tíhy vozidla v konkrétním případě,

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 11 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

5) odpor přívěsu  $F_H$ , je jízdním odporem, který není znázorněn na Obr. 1.1, přesto pokud uvažujeme brzdění vozidla s přívěsem, musíme se i tímto odporem zabývat. Velikost odporu přívěsu určíme ze vztahu:

$$F_H = F'_f + F'_s + F'_i$$

$$F_H = (m' \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha) + (m' \cdot g \cdot \sin \alpha) + (m' \cdot a \cdot \vartheta')$$

$$F_H = m' (g(f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + a \cdot \vartheta')$$
(1-5)

kde značí:

$a$  - zpomalení přívěsu, totožný se zpomalením tažného vozidla [ $m \cdot s^{-2}$ ],

$m'$  - hmotnost přívěsu [kg],

$\vartheta'$  - součinitel vlivu rotujících hmot přívěsu a vyjadřuje souhrnně účinek setrvačnosti hmotnosti přívěsu i jeho rotujících hmot na tažné vozidlo [10],

*Pozn.: V případě, kdy čelní plocha přívěsu výrazně nepřesahuje čelní plochu tažného vozidla, neuvažujeme odpor vzduchu přívěsu. Jeho účinek respektujeme zvětšením odporu vzduchu tahače tak, že jeho odpor vzduchu se zvětší o 10 – 40 % [4].*

Celkovou brzdnou sílu  $F_{BC}$  působící na vozidlo vyjádříme následujícím způsobem:

$$F_{BC} = F_B + F_f + F_s + F_v + F_H$$
(1-6)

Pro další analýzu brzdění vozidla je zanedbán odpor vzduchu a odpor valení, z důvodu, kdy tyto odpory při intenzivním brzdění mají relativně malý vliv na vozidlo [4]. Též bude dále uvažován součinitel vlivu rotujících hmot  $\vartheta = 1$  a vozidlo bez připojeného přívěsu.

**Určení brzdné dráhy  $s$  a zpomalení  $a$  pro případ brzdění vozidla v přímém směru:**

Za předpokladu výše uvedeného zjednodušení, přechází vztah pro určení celkové brzdné síly na tvar:

$$F_{BC} = F_B \pm F_s$$
(1-7)

Pokud vozidlo má brzdit aniž by došlo k zablokování kol a z toho vyplývajících negativních účinků (vozidlo se pohybuje za současného smýkání kol po vozovce a kola vozidla nejsou schopna přenášet boční síly), musí nutně platit podmínka:

$$F_{BC} \leq F_{ad}$$
(1-8)

kde značí:

$F_{ax}$  - síla adhezní, kterou lze určit ze vztahu [N]:

$$F_{ax} = G_a \cdot \mu_x \quad (1-9)$$

kde značí:

$G_a$  - adhezní tíha vozidla [N],

$\mu_x$  - součinitel adheze,

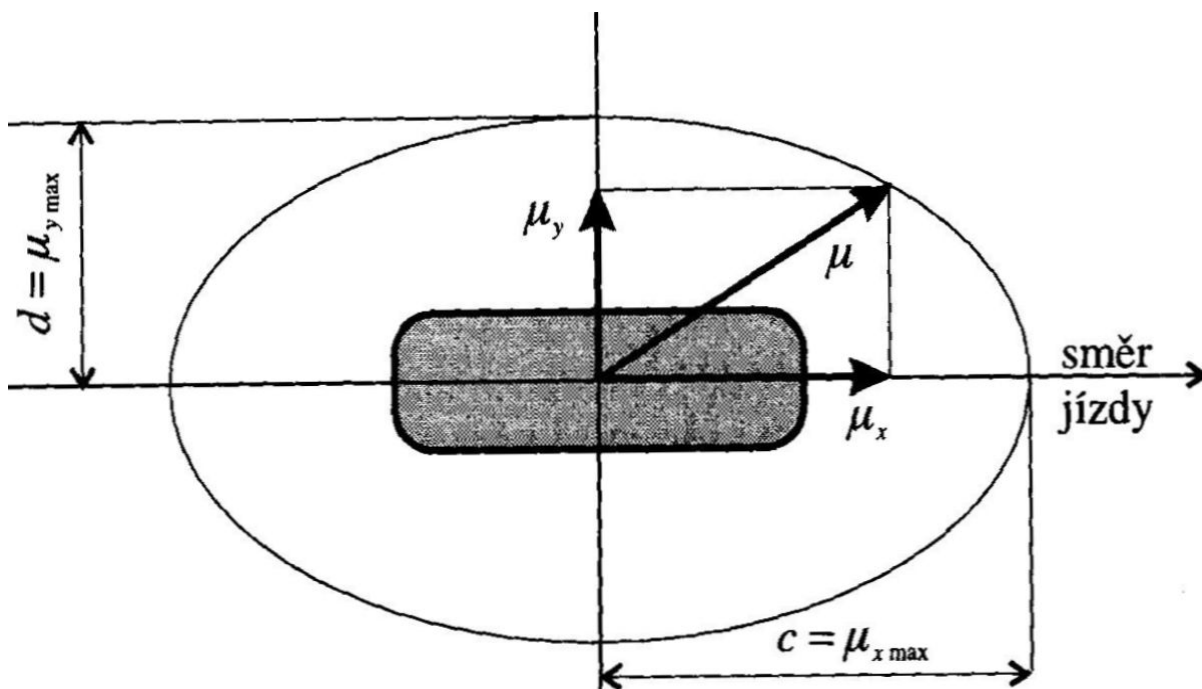
Součinitelé adheze pro různé povrchy vozovky jsou uvedeny v Tab. 1.1.

**Tab. 1.1 Součinitel adheze na různém povrchu [1]**

Povrch vozovky		$\mu$	Povrch vozovky		$\mu$
beton	suchý	0,8-1,0	polní cesta	suchá	0,4-0,6
	mokrý	0,5-0,8		mokrá	0,3-0,4
asfalt	suchý	0,6-0,9	tráva	suchá	0,4-0,6
	mokrý	0,3-0,8		mokrá	0,2-0,5
dlažba	suchý	0,6-0,9	hlub. písek, sníh		0,2-0,4
	mokrý	0,3-0,5	náledí	0°C	0,05-0,10
makadam	suchý	0,6-0,8		-10°C	0,08-0,15
	mokrý	0,3-0,5		-20°C	0,15-0,20

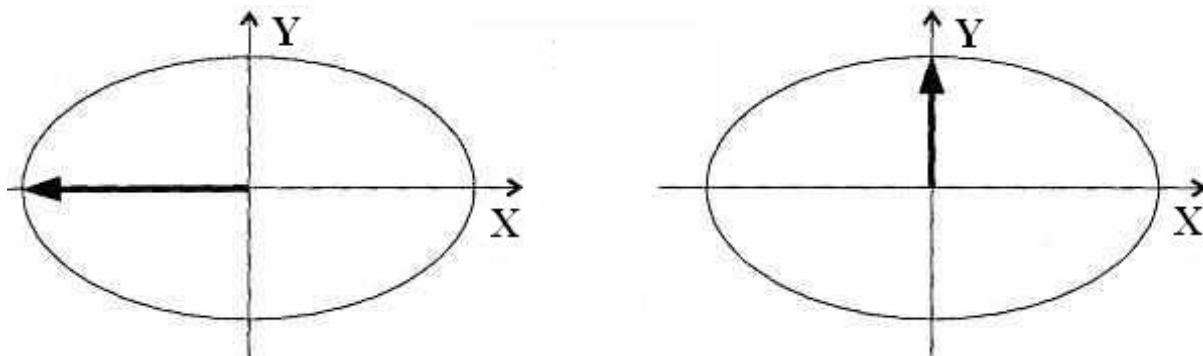
Přenos síly mezi pneumatikou vozidla a vozovkou je omezen adhezní elipsou. K tomuto dochází vlivem odlišných adhezních vlastností pneumatiky v podélném a příčném směru.

V případě, pokud pneumatika vozidla přenáší současně sílu v podélném směru i sílu ve směru příčném, nesmí vektorový součet těchto působících sil překročit adhezní sílu v odpovídajícím směru. Pokud vektorový součet působících sil překročí hodnotu adhezní síly, dochází ke ztrátě stability vozidla a smyku vozidla v podélném či příčném směru.



**Obr. 1.2 Adhezní elipsa [1]**

Dle znázornění na Obr. 1.2, maximální využitelná adheze v podélném směru  $\mu_{x \max} = c$  a ve směru příčném  $\mu_{y \max} = d$ . Z tohoto vyplývají dva možné mezní stavy využití adheze:



**Obr. 1.3 Mezní situace využití adheze [1]**

Na levé části Obr. 1.3 je znázorněna situace, kdy je využita maximálně adheze v podélném směru ( $\mu_{x \max} = c, \mu_y = 0$ ). Za této situace kola vozidla nejsou schopna přenášet síly působící na vozidlo v příčném směru (zatáčení). Na pravé části Obr. 1.3 je znázorněna situace, kdy je využita maximálně adheze v příčném směru ( $\mu_x = 0, \mu_{y \max} = d$ ). Za této situace nejsou schopna kola vozidla přenášet síly působící na vozidlo v podélném směru (brzdění).

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 14 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

V literatuře [10] je uvedeno, že okrajové podmínky však oválná závislost (adhezní elipsa) vystihuje nepřesně. Z provozu vozidel je známo, že i blokující zabrzděné kolo do určité míry vede, ačkoliv dle levé části Obr. 1.3. by v této situaci příslušné kolo vozidla nebylo schopno přenášet žádných bočních sil. Současně je však v uvedené literatuře poznamenáno, že velikost přenesitelné boční síly za této situace je zejména v případě nízkých součinitelů adheze velmi malá.

Pro následnou analýzu brzdění vozidla v přímém směru bude uvažováno, že na vozidlo nepůsobí žádné síly v příčném směru a lze využít maximálně adhezi v podélném směru ( $\mu_{x\max} = c, \mu_y = 0$ ).

Z rovnice rovnováhy sil v podélném směru můžeme po úpravě vyjádřit vztah pro adhezně nejvýše přípustné zpomalení vozidla  $a$  v případě brzdění na rovině:

$$F_i = F_B \Rightarrow F_i = F_a \Rightarrow G_a \cdot c = m \cdot a \Rightarrow m \cdot g \cdot c = m \cdot a \Rightarrow a = g \cdot c \quad (1-10)$$

pokud vozidlo brzdí při jízdě do svahu či ze svahu, vztah pro výpočet adhezně nejvýše přípustného zpomalení  $a$  odvodíme následujícím způsobem:

$$F_i = F_B \pm F_s$$

$$m \cdot a = m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot c \pm m \cdot g \cdot \sin \alpha \Rightarrow a = g \cdot (\cos \alpha \cdot c \pm \sin \alpha) \quad (1-11)$$

kde znaménko  $\pm$  odlišuje, zda se jedná o jízdu ze svahu (-), či jízdu do svahu (+).

Za předpokladu konstantního zpomalení vozidla, můžeme vyjádřit vztah pro určení brzdné dráhy vozidla:

$$s_3 = \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{a} = \frac{1}{a} \cdot \left[ \frac{v^2}{2} \right]_{v_x}^{v_0} = \frac{1}{2 \cdot a} \cdot (v_0^2 - v_x^2) = \frac{v_0^2 - v_x^2}{2 \cdot a} \quad (1-12)$$

kde:

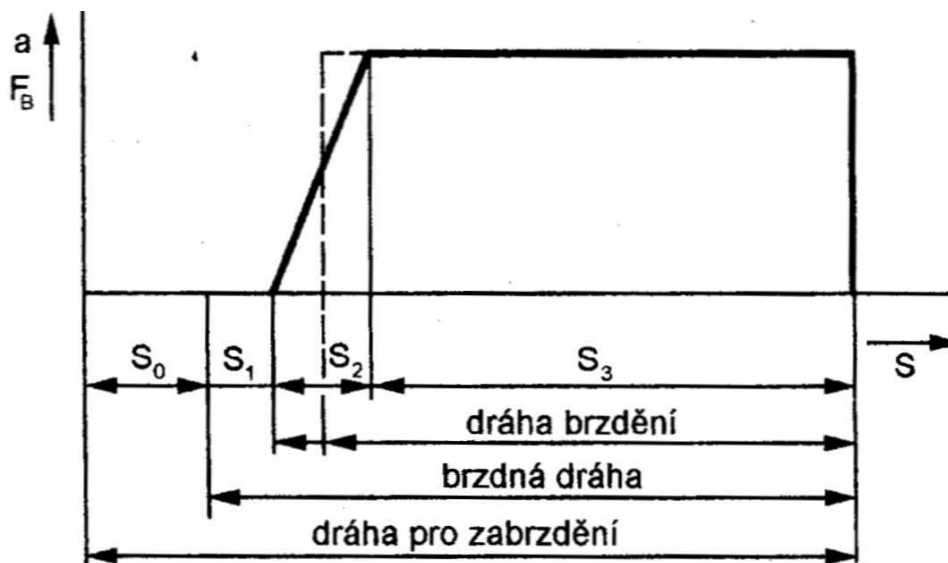
$s_3$  - dráha vozidla ujetá během plného brzdění [m],

$v_0$  - počáteční rychlost vozidla (před započítáním brzdění) [m],

$v_x$  - konečná rychlost vozidla (po ukončení brzdění vozidla) [m.s<sup>-1</sup>].

Dráha pro zabrzdění vozidla se skládá z jednotlivých úseků, které vozidlo ujede během reakční doby řidiče, prodlevy brzd, náběhu brzdění a plného brzdění (viz. Obr.1.4).

Součtem těchto úseků je dána dráha potřebná pro zabrzdění vozidla.



**Obr. 1.4 Zjednodušený průběh brzdné síly a zpomalení jako funkce dráhy při brzdění [10]**

Na Obr. 1.4 je znázorněno:

- $s_0$  - dráha vozidla ujetá během reakční doby řidiče, tedy doby, která uplyne od okamžiku, kdy řidič zpozoruje vnější podnět do okamžiku sešlápnutí brzdového pedálu, viz. Tab 1.2,
- $s_1$  - dráha vozidla ujetá za dobu prodlevy brzd, která se pohybuje v rozmezí 0,05-0,1 s u brzd kapalinových a v rozmezí 0,2-0,5 s u brzd přetlakových [10],
- $s_2$  - dráha vozidla ujetá během doby náběhu brzdění, která se pohybuje v rozmezí 0,1-0,3 s u brzd kapalinových a v rozmezí 0,5-1,0 s u brzd přetlakových,
- $s_3$  - dráha vozidla ujetá během plného brzdění,

**Tab. 1.2 Reakční doba řidiče [2]**

Zkušební řidič připravený brzdít	0,6-0,7 s
Pozorný řidič, který nečeká překážku	0,7-0,9 s
Řadící nebo předjíždějící řidič	1,0-1,2 s
Nepozorný řidič	1,4-1,8 s
Indisponovaný řidič (únavou, nemocí, požitím alkoholu)	1,6 s a více

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana - 16 -
Dopravní fakulta Jana Pernera		

Vztah pro výpočet dráhy pro zabrzdění vozidla v souladu se znázorněním na Obr. 1.4, lze napsat ve tvaru:

$$s_b = s_0 + s_1 + s_2 + s_3$$

$$s_b = v_0 \cdot \left( t_0 + t_1 + \frac{t_2}{2} \right) + \frac{v^2}{2 \cdot a} \quad (1-13)$$

Použitím vztahu (1-13) vypočteme mezní hodnotu brzdné dráhy. Jedná se o nejkratší možnou brzdnou dráhu vozidla pro konkrétní povrch vozovky za předpokladu, že na brzděná kola vozidla je rozdělena brzdná síla úměrně jejich radiálnímu zatížení. Tedy pokud by byla vyvozena brzdná síla větší než síla adhezní, došlo by k zablokování všech brzděných kol současně.



## 2. Analýza jízdy a brzdění vozidla v obecném směrovém oblouku

Při jízdě vozidla v obecném směrovém oblouku na vozidlo působí krom jízdních odporů zmíněných v předchozí kapitole, tíhové síly, radiálních reakcí vozovky a adhezních sil, též síla odstředivá. Velikost této síly je možno vypočítat prostřednictvím vztahu:

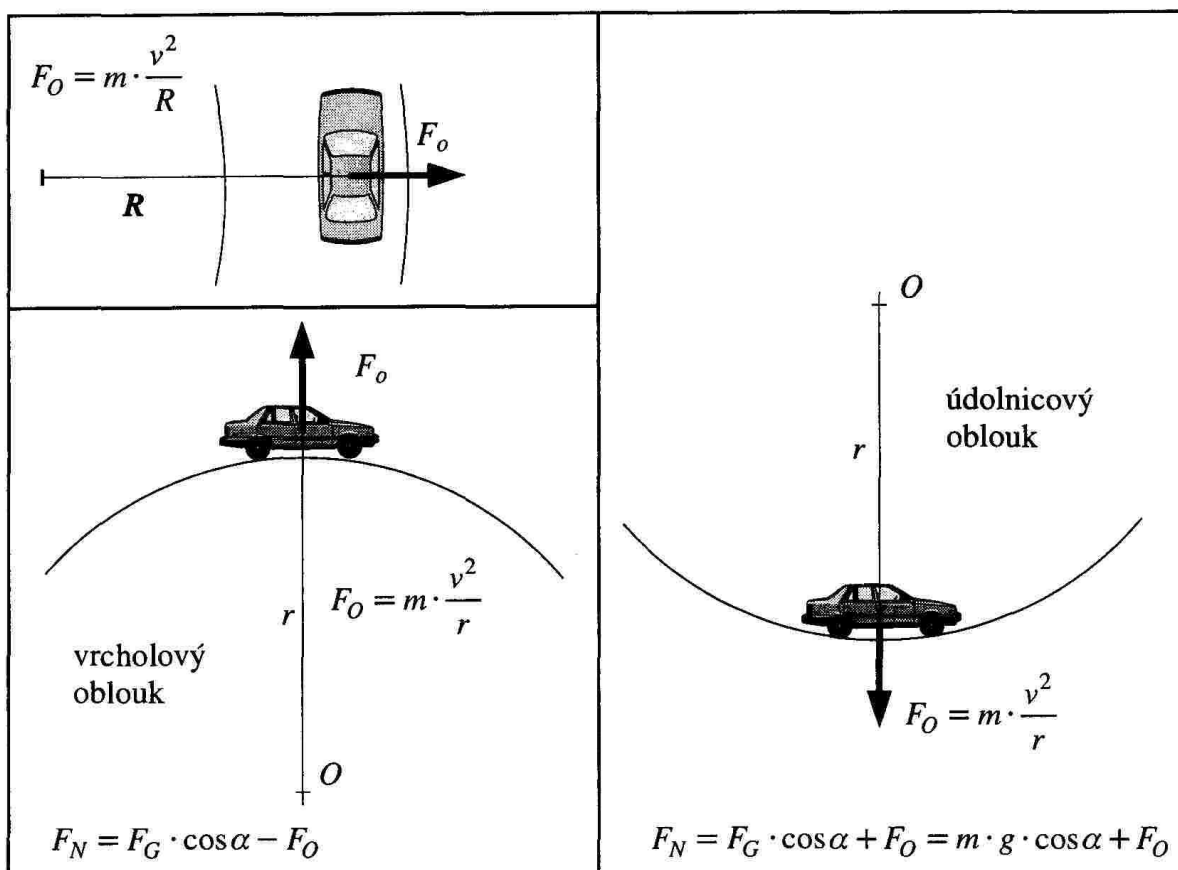
$$F_o = m \cdot \frac{v^2}{R} \quad (2-1)$$

kde značí:

R - poloměr oblouku v horizontální rovině [m]

*Pozn.: Pokud se vozidlo pohybuje po vertikálním oblouku, tak poloměr tohoto oblouku je označen  $r$ , vztah pro výpočet odstředivé síly je totožný.*

Charakter oblouku, tedy zda se jedná o oblouk v horizontální či vertikální rovině, určuje jakým směrem působí síla odstředivá na vozidlo, viz. Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Odstředivá síla působící na vozidlo [1]

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 18 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

### ***Mezní rychlost***

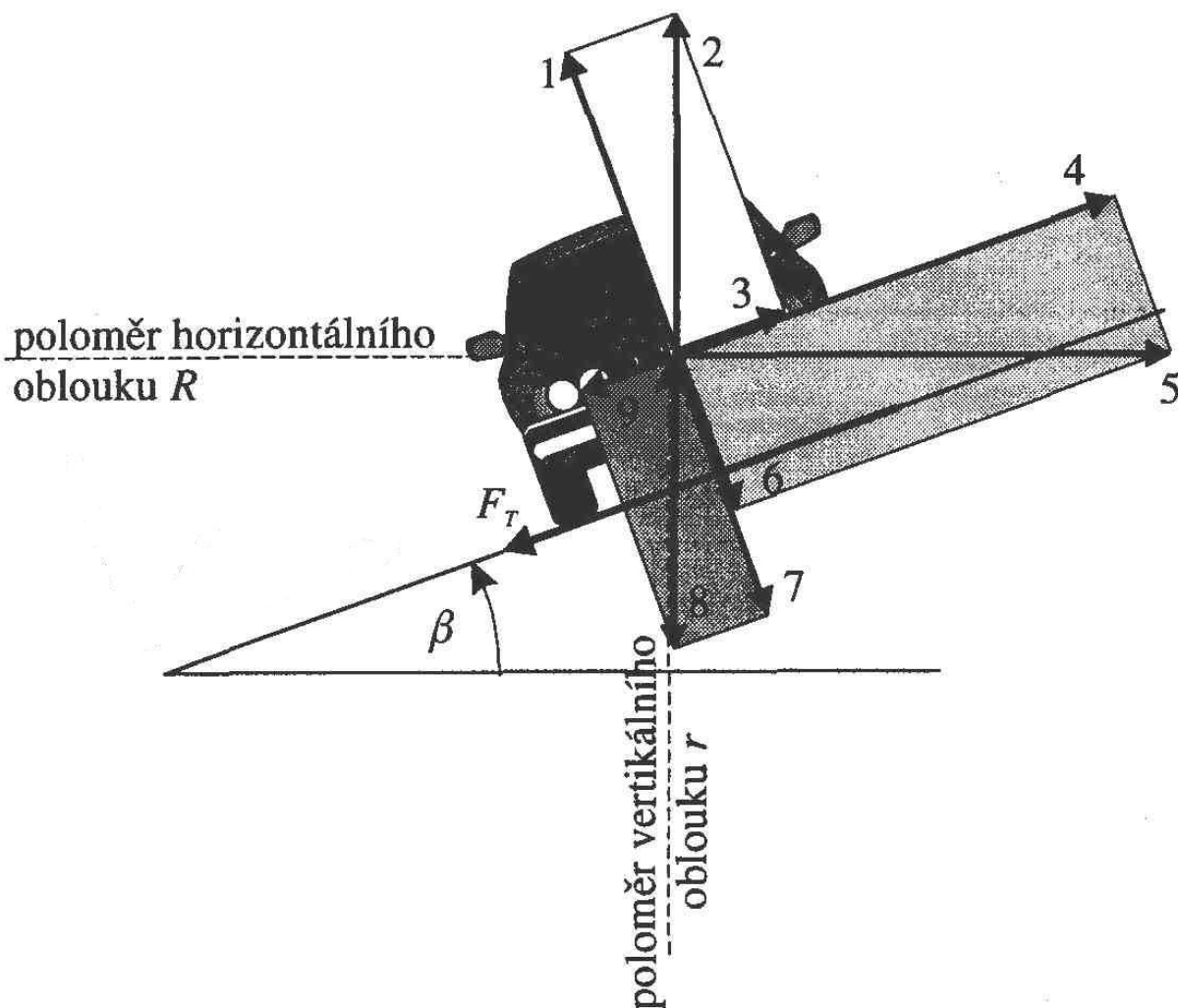
V případě jízdy vozidla v horizontálním oblouku (viz. horní část levé poloviny Obr. 2.1), lze rozbořem sil působících na vozidlo určit mezní rychlost  $v_m$ , při které hodnota působící odstředivé síly bude totožná s hodnotou adhezní síly v příčném směru a pokud tato rychlost bude překročena, dojde ke ztrátě příčné stability vozidla - nastane příčný smyk vozidla a nebude již schopno se pohybovat určeným směrem. Jedná se tedy o případ, kdy vozidlo jede po horizontálním oblouku, případně horizontálním oblouku v kombinaci s obloukem vertikálním, konstantní rychlosti, při maximálním využití adheze v příčném směru (viz. pravá část Obr. 1.3,  $\mu_{y \max} = d$ ).

V případě jízdy vozidla ve vertikálním vrcholovém oblouku, lze též rozbořem sil působících na vozidlo určit mezní rychlost  $v_m$ , při které hodnota působící odstředivé síly bude totožná s hodnotou tíhové síly vozidla a pokud tato rychlost bude překročena, dojde k odpoutání kol vozidla od vozovky.

V obou výše popsáných případech se z hlediska bezpečnosti jedná o nežádoucí jevy, neboť při těchto není možný přenos sil v podélném a příčném směru.

V případě jízdy vozidla ve vertikálním údolnicovém oblouku, působí odstředivá síla totožným směrem jako tíhová síla vozidla. Působení odstředivé síly tímto směrem působí pozitivně, neboť zvyšuje adhezní tíhu vozidla a vozidlo je schopno přenášet vyšší hodnoty sil působících jak v podélném, tak i v příčném směru.

Z hlediska analýzy brzdění vozidla v obecném směrovém oblouku je důležité odvodit vztah právě pro mezní rychlost, neboť jak bude z následně prováděné analýzy patrné, na základě vyjádření vztahu pro mezní rychlost, lze poté odvodit vztah pro adhezně nejvýše přípustné brzděné zpomalení.



**Obr. 2.2 Síly působící na vozidlo jedoucí po prostorovém vrcholovém oblouku [1]**

Na Obr. 2.2 jsou znázorněny síly působící na vozidlo při průjezdu obecným směrovým obloukem, včetně rozkladu na jednotlivé složky. Jednotlivé působící síly je možné vyjádřit následujícími vztahy:

$$1 \quad F'_{oz} = \frac{m \cdot v^2}{r} \cdot \cos \beta \quad (2-2)$$

$$2 \quad F'_o = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (2-3)$$

$$3 \quad F'_{oy} = \frac{m \cdot v^2}{r} \cdot \sin \beta \quad (2-4)$$

$$4 \quad F_{oy} = \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \cos \beta \quad (2-5)$$

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 20 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

$$5 \quad F_o = \frac{m \cdot v^2}{R} \quad (2-6)$$

$$6 \quad F_{oz} = \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \sin \beta \quad (2-7)$$

$$7 \quad F_{Gz} = m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \quad (2-8)$$

$$8 \quad F_G = m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (2-9)$$

$$9 \quad F_{Gy} = m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta \quad (2-10)$$

kde značí:

$F_G$  – tíhová síla,

$F_o$  – odstředivá síla od horizontálního oblouku,

$F_o'$  – odstředivá síla od vertikálního oblouku,

$g$  – tíhové zrychlení,

$m$  – hmotnost vozidla,

$r$  – poloměr vertikálního oblouku,  $r > 0$  = vrcholový oblouk,

$R$  – poloměr horizontálního oblouku,

$v$  – rychlost jízdy vozidla,

$\alpha$  – podélný sklon vozovky [rad],  $\alpha > 0$  = jízda do svahu,

$\beta$  – příčný sklon vozovky [rad],  $\beta > 0$  = dostředivý sklon.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, adhezní vlastnosti pneumatik v příčném a podélném směru jsou odlišné. Pro řešení brzdné dráhy vozidla při brzdění v oblouku je nutné znát do jaké míry je využita adheze v příčném směru a následně určit adhezi v podélném směru, kterou lze využít pro brzdění vozidla. Pro řešení adheze v příčném směru se vychází z rovnice adhezní elipsy:

$$\frac{\mu_z^2}{c^2} + \frac{\mu_x^2}{d^2} = 1 \quad [1] \quad (2-11)$$

úpravou rovnice adhezní elipsy je získán vztah pro výpočet adheze v podélném směru:

$$\mu_z = \frac{c}{d} \sqrt{d^2 - \mu_x^2} \quad [1] \quad (2-12)$$

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 21 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

### **Rovinný oblouk, s nulovým příčným sklonem**

Parametry oblouku:

$$\alpha = 0, \beta = 0, R > 0, R = konst., r = \infty$$

Při zachování příčné stability vozidla musí být rovnice rovnováhy sil v příčném směru ve tvaru:

$$F_o \leq F_{ay} \Rightarrow \frac{m \cdot v^2}{R} \leq m \cdot g \cdot \mu_y \quad (2-13)$$

kde  $F_{ay}$  označuje adhezní sílu v příčném směru.

Za předpokladu  $\mu_{y\max} = d$ , lze z předchozího vztahu odvodit vztah pro výpočet mezní rychlosti:

$$v_m = \sqrt{g \cdot R \cdot d} \quad (2-14)$$

Z rovnice rovnováhy sil působících na vozidlo v podélném směru odvodíme vztah pro výpočet adhezně nejvýše přípustného brzdného zpomalení:

$$\begin{aligned} F_B = F_i; \quad F_B \leq F_{ax} \Rightarrow F_i \leq F_{ax} \\ m \cdot a \leq m \cdot g \cdot \mu_x \Rightarrow a \leq g \cdot \mu_x \end{aligned} \quad (2-15)$$

kde  $F_{ax}$  označuje adhezní sílu v podélném směru.

Použitím vztahu pro výpočet adheze v podélném směru (2-15), odvodíme obecný vztah pro výpočet adhezně nejvýše přípustného brzdného zpomalení následovně:

$$\begin{aligned} a &\leq g \cdot \frac{c}{d} \cdot \sqrt{d^2 - \left(\frac{v^2}{R \cdot g}\right)^2} \\ a &\leq \frac{g \cdot c}{d} \cdot \sqrt{\frac{d^2 \cdot R^2 \cdot g^2 - v^4}{R^2 \cdot g^2}} \\ a &\leq \frac{c}{d \cdot R} \cdot \sqrt{d^2 \cdot R^2 \cdot g^2 - v^4} \end{aligned} \quad (2-16)$$

K odvození vztahu pro výpočet brzdné dráhy vozidla pro zabrzdění je použit vztah (1-13):

$$\begin{aligned} s_b &= v \cdot (t_0 + t_1 + \frac{t_2}{2}) + \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{a} \\ s_b &= v_0 \cdot (t_0 + t_1 + t_2) + \frac{d \cdot R}{c} \int_{v_x}^{v_0} \frac{dv}{\sqrt{d^2 \cdot g^2 \cdot R^2 - v^4}} \end{aligned} \quad (2-17)$$

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 22 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

V literatuře [1] je uvedena odvozená primitivní funkce:

$$s_b = v_0 \cdot (t_0 + t_1 + t_2) + \frac{d \cdot R}{2 \cdot c} \left( \arcsin \frac{v_0^2}{d \cdot g \cdot R} - \arcsin \frac{v_x^2}{d \cdot g \cdot R} \right) \quad (2-18)$$

S ohledem na definiční obor funkce  $\arcsin \langle -1;1 \rangle$ , musí nutně platit podmínka:

$$\frac{v_0^2}{d \cdot g \cdot R} \leq 1 \Rightarrow v_0^2 \leq d \cdot g \cdot R \Rightarrow v_0 \leq \sqrt{d \cdot g \cdot R} \quad (2-19)$$

úpravou této podmínky byl znovu odvozen vztah (2-14) pro výpočet mezní rychlosti. Na doplněnou je nutno uvést, že daná podmínka platí i pro druhý člen v závorce uvedeného vztahu, kde je dosazována rychlost konečná.

Z uvedeného tedy vyplývá, že při použití vztahu (2-18) pro výpočet brzdné dráhy, lze brzdnou dráhu řešit pro počáteční rychlost totožnou s rychlosti mezní.

### ***Rovinný oblouk, s nenulovým příčným sklonem***

Parametry oblouku:

$$\alpha = 0, \beta \neq 0, R > 0, R = konst., r = \infty$$

Při zachování příčné stability vozidla musí být rovnice rovnováhy sil v příčném směru ve tvaru:

$$F_o \leq F_{ay} + F_{Gy} \Rightarrow F_{Oy} \leq \mu_y \cdot (F_{Oy} + F_{Gz}) + F_{Gy} \quad (2-20)$$

$$\frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \cos \beta \leq \mu_y \cdot \left( \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \sin \beta + m \cdot g \cdot \cos \beta \right) + m \cdot g \cdot \sin \beta$$

Za předpokladu  $\mu_y = d$ , lze z předchozího vztahu odvodit vztah pro výpočet mezní rychlosti:

$$\frac{v_m^2}{R} \cdot \cos \beta - \frac{v_m^2 \cdot d}{R} \cdot \sin \beta = d \cdot g \cdot \cos \beta + m \cdot g \cdot \sin \beta$$

$$v_m^2 = \frac{g \cdot R \cdot \cos \beta \cdot (d + \operatorname{tg} \beta)}{\cos \beta \cdot (1 - d \cdot \operatorname{tg} \beta)} \quad (2-21)$$

$$v_m = \sqrt{\frac{g \cdot R \cdot (\operatorname{tg} \beta + d)}{1 - d \cdot \operatorname{tg} \beta}}$$

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 23 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

Z rovnice rovnováhy sil v podélném směru:

$$F_B = F_i; F_B \leq F_{ax} \Rightarrow F_i \leq (F_{Gz} + F_{oz}) \cdot \mu_x$$

$$m \cdot a \leq \mu_z \cdot \left( m \cdot g \cdot \cos \beta + \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \sin \beta \right) \quad (2-22)$$

získáme úpravou vztah pro výpočet adhezně nejvýše přípustného brzdného zpomalení:

$$a \leq K_2 \cdot \sqrt{K_9 \cdot v^4 + M_1 \cdot v^2 + K_6} \quad [1] \quad (2-23)$$

kde:

$$K_2 = \frac{c \cdot \cos \beta}{d \cdot R}$$

$$K_6 = R^2 \cdot g^2 \cdot (d^2 - tg^2 \beta)$$

$$K_9 = d^2 \cdot tg^2 \beta - 1$$

$$M_1 = 2 \cdot R \cdot g \cdot tg \beta \cdot (1 + d^2)$$

Dráhu vozidla pro zabrzdění vozidla z počáteční rychlosti stanovíme prostřednictvím vztahu:

$$s_3 = \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{K_2 \sqrt{K_9 \cdot v^4 + M_1 \cdot v^2 + K_6}} = \frac{d \cdot R}{c \cdot \cos \beta} \cdot \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{\sqrt{K_9 \cdot v^4 + M_1 \cdot v^2 + K_6}} =$$

$$= \frac{-d \cdot R}{2 \cdot c \cdot \cos \beta \cdot \sqrt{-K_9}} \cdot \left( \arcsin \frac{2 \cdot K_9 \cdot v_0^2 + M_1}{\sqrt{M_5}} - \arcsin \frac{2 \cdot K_9 \cdot v_x^2 + M_1}{\sqrt{M_5}} \right)$$

↓

[1] (2-24)

$$s_b = v_0 \cdot (t_0 + t_1 + \frac{1}{2} \cdot t_2) +$$

$$+ \frac{-d \cdot R}{2 \cdot c \cdot \cos \beta \cdot \sqrt{-K_9}} \cdot \left( \arcsin \frac{2 \cdot K_9 \cdot v_0^2 + M_1}{\sqrt{M_5}} - \arcsin \frac{2 \cdot K_9 \cdot v_x^2 + M_1}{\sqrt{M_5}} \right)$$

kde:

$$M_5 = M_1^2 - 4 \cdot K_6 \cdot K_9$$

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 24 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

Obdobně jako v předchozím případě brzdění vozidla v rovinném oblouku s nulovým příčným sklonem, i zde s ohledem na definiční obor funkce arcsin po úpravě členů v závorce vztahu (2-24) opět odvozujeme vztah (2-21) pro výpočet mezní rychlosti pro daný oblouk. Z uvedeného vyplývá, že mezním případem, pro který lze řešit brzdnou dráhu, je případ, kdy vozidlo začne brzdit právě z mezní rychlosti.

Další význam má i druhý člen v závorce vztahu (2-24), neboť při numerickém řešení brzdné dráhy vozidla, bylo zjištěno, že při brzdění vozidla do úplného zastavení v oblouku s vyšším příčným sklonem, při nízkém součiniteli adheze, se dostává mimo definiční obor funkce arcsin.

Pro objasnění tohoto jevu byl proveden rozbor sil působících v příčném směru na vozidlo stojící na nakloněné rovině. Pokud nemá dojít k porušení stability vozidla v příčném směru a s tím souvisejícím příčným smykem vozidla, musí za předpokladu dostředného příčného sklonu vozovky nutně platit podmínka:

$$\begin{aligned}
 F_{ay} &\geq G \cdot \sin \beta \\
 \Downarrow \\
 m \cdot g \cdot \cos \beta \cdot \mu_y &\geq m \cdot g \cdot \sin \beta
 \end{aligned}
 \tag{2-25}$$

po úpravě:

$$\mu_y \geq \operatorname{tg} \beta
 \tag{2-26}$$

Prostřednictvím vztahu (2-26) lze určit kritickou hodnotu příčného sklonu vozovky, při kterém dochází ke ztrátě příčné stability vozidla v klidovém stavu.

V případě jízdy vozidla v oblouku, jehož tangenta úhlu příčného sklonu převyšuje součinitel adheze v příčném směru, aniž by došlo k porušení stability vozidla v příčném směru, musí platit podmínka:

$$\begin{aligned}
 F_{ay} + F_{oy} &\geq F_{Gy} \\
 \mu_x \cdot \left( m \cdot g \cdot \cos \beta + \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \sin \beta \right) + \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \cos \beta &\leq m \cdot g \cdot \sin \beta
 \end{aligned}
 \tag{2-27}$$

Z této podmínky lze pak určit minimální rychlost vozidla v rovinném oblouku s konkrétním příčným sklonem tak, aniž by došlo ke ztrátě příčné stability vozidla. Pokud vozidlo v daném oblouku brzdí, nesmí konečná rychlost vozidla klesnout pod určenou minimální rychlost. V opačném případě by došlo ke ztrátě příčné stability vozidla.



Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 25 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

### ***Rovinný oblouk ve svahu, s nulovým příčným sklonem***

Parametry oblouku:

$$\alpha \neq 0, \beta = 0, R > 0, R = konst., r = \infty$$

Při zachování příčné stability vozidla, musí být rovnice rovnováhy sil působících na vozidlo v příčném směru ve tvaru:

$$F_o \leq F_{ay}$$

$$\frac{m \cdot v^2}{R} \leq \mu_y \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (2-28)$$

Za předpokladu  $\mu_x = d$ , lze z předchozího vztahu odvodit vztah pro výpočet mezní rychlosti:

$$\frac{v_m^2}{R} = d \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (2-29)$$

$$v_m = \sqrt{d \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot R}$$

Z rovnice rovnováhy sil v podélném směru:

$$F_B \pm F_{Gx} = F_i; F_B \leq F_{ax} \Rightarrow F_i \leq F_{ax} \pm F_{Gx} \quad (2-30)$$

$$m \cdot a \leq \mu_z \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha + m \cdot g \cdot \sin \alpha$$

při použití vztahu pro přímý výpočet součinitele adheze v podélném směru (2-12), získáme úpravou vztah pro výpočet adhezně nejvýše přípustného brzdného zpomalení:

$$a \leq \left( \frac{c}{d} \cdot \sqrt{d^2 - \left( \frac{v_m^2}{R \cdot g \cdot \cos \alpha} \right)^2} \right) \cdot (g \cdot \cos \alpha) \pm (g \cdot \sin \alpha)$$

$$a \leq \left( \frac{c}{d \cdot R \cdot g \cdot \cos \alpha} \cdot \sqrt{d^2 \cdot R^2 \cdot g^2 \cdot \cos^2 \alpha - v_m^4} \right) \cdot (g \cdot \cos \alpha) \pm (g \cdot \sin \alpha) \quad (2-31)$$

$$a \leq \left( \frac{c}{d \cdot R} \cdot \sqrt{d^2 \cdot R^2 \cdot g^2 \cdot \cos^2 \alpha - v_m^4} \right) \pm (g \cdot \sin \alpha)$$

Brzdnou dráhu vozidla stanovíme pomocí vztahu:

$$s_3 = \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{a} = \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{\left( \frac{c}{d \cdot R} \cdot \sqrt{d^2 \cdot R^2 \cdot g^2 \cdot \cos^2 \alpha - v_m^4} \right) \pm (g \cdot \sin \alpha)} \quad (2-32)$$

$$s_b = v_0 \cdot (t_0 + t_1 + \frac{1}{2} \cdot t_2) + \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{\left( \frac{c}{d \cdot R} \cdot \sqrt{d^2 \cdot R^2 \cdot g^2 \cdot \cos^2 \alpha - v_m^4} \right) \pm (g \cdot \sin \alpha)}$$

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 26 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

Pozn.: Znaménko  $\pm$  v rovnici rovnováhy sil v podélném směru (2-30) a ve vztahu (2-31) a (2-32) rozlišuje situaci jízdy do svahu (+) a jízdy ze svahu (-).

### **Rovinný oblouk ve svahu, s nenulovým příčným sklonem**

Parametry oblouku:

$$\alpha \neq 0, \beta \neq 0, R > 0, R = konst., r = \infty$$

Při zachování příčné stability vozidla musí být rovnice rovnováhy sil v příčném směru ve tvaru:

$$F_o \leq F_{ay} + F_{Gy}$$

$$\frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \cos \beta \leq \mu_y \cdot (m \cdot g \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha + \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \sin \beta) + m \cdot g \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha \quad (2-33)$$

Za předpokladu  $\mu_x = d$ , lze z předchozího vztahu odvodit vztah pro výpočet mezní rychlosti:

$$\frac{v_m^2}{R} \cdot \cos \beta - \frac{v_m^2 \cdot d}{R} \cdot \sin \beta = d \cdot g \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha + g \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha$$

$$v_m^2 = \frac{g \cdot \cos \alpha \cdot (d \cdot \cos \beta + \sin \beta) \cdot R}{(\cos \beta - \sin \beta \cdot d)} \quad (2-34)$$

$$v_m = \sqrt{\frac{g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot (d + \operatorname{tg} \beta) \cdot R}{\cos \beta \cdot (1 - \operatorname{tg} \beta \cdot d)}} = \sqrt{\frac{g \cdot \cos \alpha \cdot (d + \operatorname{tg} \beta) \cdot R}{(1 - \operatorname{tg} \beta \cdot d)}}$$

Z rovnice rovnováhy sil v podélném směru:

$$F_B \pm F_{Gx} = F_i; F_B \leq F_{ax} \Rightarrow F_i \leq F_{ax} \pm F_{Gx}$$

$$m \cdot a \leq \mu_x \cdot (m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta + \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \sin \beta) \pm m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \quad (2-35)$$

získáme úpravou vztah pro výpočet adhezně nejvýše přípustného brzdného zpomalení:

$$a \leq K_1 \pm K_2 \cdot \sqrt{K_9 \cdot v^4 + M_2 \cdot v^2 + K_7} \quad [1] \quad (2-36)$$

kde:

$$K_1 = g \cdot \sin \alpha$$

$$K_7 = K_6 \cdot \cos \alpha = R^2 \cdot g^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot (d^2 - \operatorname{tg}^2 \beta)$$

$$M_2 = M_1 \cdot \cos \alpha = 2 \cdot R \cdot g \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \cos \alpha \cdot (1 + d^2)$$

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 27 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

Dráhu vozidla pro zabrzdění vozidla z počáteční rychlosti stanovíme prostřednictvím vztahu:

$$s_3 = \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{a} = \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{K_1 \pm K_2 \cdot \sqrt{K_9 \cdot v^4 + M_2 \cdot v^2 + K_7}}$$

$$\Downarrow$$

$$s_b = v_0 \cdot (t_0 + t_1 + \frac{1}{2} \cdot t_2) + \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{K_1 \pm K_2 \cdot \sqrt{K_9 \cdot v^4 + M_2 \cdot v^2 + K_7}} \quad (2-37)$$

Pozn.: Znaménko  $\pm$  v rovnici rovnováhy sil v podélném směru (2-35), ve vztahu (2-36) a (2-37) rozlišuje situaci jízdy do svahu (+) a jízdy ze svahu (-).

### **Vertikální vrcholový oblouk v přímé jízdě**

Parametry oblouku:

$$\alpha \neq 0, \beta = 0, R = \infty, r = konst., r > 0$$

Při stanovení vztahu pro mezní rychlost při jízdě v daném oblouku je nutno vycházet z podmínky:

$$F_o \leq F_G \quad (2-38)$$

dosazením, za předpokladu  $\mu_x = d$ , je možné vyjádřit vztah pro přímý výpočet mezní rychlosti:

$$\frac{m \cdot v_m^2}{r} = m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot d \Rightarrow v_m = \sqrt{r \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot d} \quad (2-39)$$

Překročení mezní rychlosti v daném případě nezpůsobuje příčný smyk vozidla, ale jeho odpoutávání od vozovky vlivem působící odstředivé síly.

Adhezně nejvýše přípustné brzdné zpomalení vyjádříme prostřednictvím rovnice rovnováhy sil v podélném směru:

$$F_B \pm F_{Gx} = F_i; F_B \leq F_{ax} \Rightarrow F_i \leq (F_{Gz} - F_o') \cdot \mu_x \pm F_{Gx}$$

$$m \cdot a \leq \mu_z \cdot (m \cdot g \cdot \cos \alpha - \frac{m \cdot v^2}{r}) \pm m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2-40)$$

úpravou, za předpokladu  $\mu_z = c$  (na vozidlo nepůsobí boční síla):

$$a \leq c \cdot \left( g \cdot \cos \alpha - \frac{v^2}{r} \right) \pm g \cdot \sin \alpha \quad (2-41)$$

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 28 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

Dráhu vozidla pro zabrzdění vozidla z počáteční rychlosti stanovíme prostřednictvím vztahu:

$$s_3 = \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{a} = \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{c \left( g \cdot \cos \alpha - \frac{v^2}{r} \right) \pm g \cdot \sin \alpha}$$

↓

(2-42)

$$s_b = v_0 \cdot \left( t_0 + t_1 + \frac{1}{2} \cdot t_2 \right) + \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{c \left( g \cdot \cos \alpha - \frac{v^2}{r} \right) \pm g \cdot \sin \alpha}$$

*Pozn.: Znaménko  $\pm$  v rovnici rovnováhy sil v podélném směru (2-40) a ve vztahu (2-41) a (2-42) rozlišuje situaci jízdy do svahu (+) a jízdy ze svahu (-).*

### **Vertikální údolnicový oblouk v přímé jízdě**

Parametry oblouku:

$$\alpha \neq 0, \beta = 0, R = \infty, r = \text{konst.}, r > 0$$

Při jízdě v daném oblouku není relevantní řešit mezní rychlost a to z důvodu, kdy odstředivá síla působící na vozidlo, působí totožným směrem, jako tíhová síla vozidla. V daném případě odstředivá síla umožňuje přenášet větší síly v příčném či podélném směru, neboť zvyšuje adhezní tíhu vozidla.

Adhezně nejvýše přípustné brzdné zpomalení vyjádříme prostřednictvím rovnice rovnováhy sil v podélném směru:

$$F_B \pm F_{G_x} = F_i; F_B \leq F_{ax} \Rightarrow F_i \leq (F_{G_z} + F_o) \cdot \mu_x \pm F_{G_x}$$

$$m \cdot a \leq \mu_z \cdot \left( m \cdot g \cdot \cos \alpha + \frac{m \cdot v^2}{r} \right) \pm m \cdot g \cdot \sin \alpha$$
(2-43)

úpravou, za předpokladu  $\mu_z = c$  (na vozidlo nepůsobí boční síla):

$$a \leq c \cdot \left( g \cdot \cos \alpha + \frac{v^2}{r} \right) \pm g \cdot \sin \alpha$$
(2-44)

Dráhu vozidla pro zabrzdění vozidla z počáteční rychlosti stanovíme prostřednictvím vztahu:

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 29 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

$$s_3 = \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{a} = \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{c \left( g \cdot \cos \alpha + \frac{v^2}{r} \right) \pm g \cdot \sin \alpha}$$

$$\Downarrow \quad (2-45)$$

$$s_b = v_0 \cdot (t_0 + t_1 + \frac{1}{2} \cdot t_2) + \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{c \left( g \cdot \cos \alpha + \frac{v^2}{r} \right) \pm g \cdot \sin \alpha}$$

Pozn.: Znaménko  $\pm$  v rovnici rovnováhy sil v podélném směru (2-43) a ve vztahu (2-44) a (2-45) rozlišuje situaci jízdy do svahu (+) a jízdy ze svahu (-).

### **Obecný prostorový oblouk vrcholový**

Parametry oblouku:

$$\alpha \neq 0, \beta \neq 0, R = konst., R > 0, r = konst., r > 0$$

Při stanovení vztahu pro mezní rychlost při jízdě v daném oblouku je nutno vycházet z podmínky:

$$F_{oy} + F'_{oy} \leq F_{ay} + F_{Gy}$$

$$\frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \cos \beta + \frac{m \cdot v^2}{r} \cdot \sin \beta \leq \quad (2-46)$$

$$\leq (m \cdot g \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha + \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \sin \beta - \frac{m \cdot v^2}{r} \cdot \cos \beta) \cdot \mu_x + m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta$$

úpravou, za předpokladu  $\mu_x = d$ :

$$v_m^2 \cdot \left( \frac{\cos \beta}{R} + \frac{\sin \beta}{r} - \frac{\sin \beta \cdot d}{R} + \frac{\cos \beta \cdot d}{r} \right) \leq g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot d + g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta$$

$$v_m^2 \leq \frac{R \cdot r \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot (d + tg \beta)}{r \cdot \cos \beta \cdot (1 - tg \beta \cdot d) + R \cdot \cos \beta \cdot (tg \beta + d)} \quad (2-47)$$

$$v_m = \sqrt{\frac{R \cdot r \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot (d + tg \beta)}{r \cdot (1 - tg \beta \cdot d) + R \cdot (tg \beta + d)}}$$

Při stanovení vztahu pro výpočet maximálního přípustného brzdného zpomalení je nutno vycházet z podmínky:

$$F_B + F_{Gz} = F_i; F_B \leq F_{az} \Rightarrow F_i \leq (F_{Gy} + F_{ox} - F'_{oy}) \cdot \mu_z + F_{Gz}$$

$$m \cdot a \leq \mu_z \cdot (m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta + \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \sin \beta - \frac{m \cdot v^2}{r} \cdot \cos \beta) + m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \quad (2-48)$$

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 30 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

po úpravě:

$$a \leq K_1 + K_3 \cdot \sqrt{K_4 \cdot v^4 + K_5 \cdot v^2 + K_8} \quad [1] \quad (2-49)$$

kde:

$$K_3 = \frac{c \cdot \cos \beta}{d \cdot R \cdot r}$$

$$K_4 = d^2 \cdot (r \cdot \operatorname{tg} \beta - R)^2 - (r + R \cdot \operatorname{tg} \beta)^2$$

$$K_5 = 2R \cdot r \cdot g \cdot [d^2 - (r \cdot \operatorname{tg} \beta - R) + (r + R \cdot \operatorname{tg} \beta)] \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \cos \alpha$$

$$K_8 = R^2 \cdot r^2 \cdot g^2 \cdot (d^2 - \operatorname{tg}^2 \beta) \cdot \cos^2 \alpha$$

Dráhu vozidla pro zabrzdění vozidla z počáteční rychlosti stanovíme prostřednictvím vztahu:

$$s_3 = \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{a} = \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{K_1 + K_3 \sqrt{K_4 \cdot v^4 + K_5 \cdot v^2 + K_8}} \quad (2-50)$$

$$s_b = v_0 \cdot (t_0 + t_1 + \frac{1}{2} \cdot t_2) + \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{K_1 + K_3 \sqrt{K_4 \cdot v^4 + K_5 \cdot v^2 + K_8}}$$

### ***Obecný prostorový oblouk údolnicový***

Parametry oblouku:

$$\alpha \neq 0, \beta \neq 0, R = \text{konst.}, R > 0, r = \text{konst.}, r > 0$$

Při stanovení vztahu pro mezní rychlost při jízdě v daném oblouku je nutno vycházet z podmínky:

$$F_{oy} \leq F_{ay} + F_{Gy} + F'_{oy}$$

$$\frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \cos \beta \leq (m \cdot g \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha + \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \sin \beta + \frac{m \cdot v^2}{r} \cdot \cos \beta) \cdot \mu_x +$$

$$+ m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta + \frac{m \cdot v^2}{r} \cdot \sin \beta \quad (2-51)$$

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 31 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

úpravou, za předpokladu  $\mu_x = d$ :

$$v_m^2 \cdot \left( \frac{\cos \beta}{R} - \frac{\sin \beta}{r} - \frac{\sin \beta \cdot d}{R} - \frac{\cos \beta \cdot d}{r} \right) \leq g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot d + g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta$$

$$v_m^2 \leq \frac{R \cdot r \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot (d + \operatorname{tg} \beta)}{r \cdot \cos \beta \cdot (1 - \operatorname{tg} \beta \cdot d) - R \cdot \cos \beta \cdot (\operatorname{tg} \beta + d)} \quad (2-52)$$

$$v_m = \sqrt{\frac{R \cdot r \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot (d + \operatorname{tg} \beta)}{r \cdot (1 - \operatorname{tg} \beta \cdot d) - R \cdot (\operatorname{tg} \beta + d)}}$$

Při stanovení vztahu pro výpočet adhezně nejvýše přípustného brzdného zpomalení je nutno vycházet z rovnice rovnováhy sil v podélném směru:

$$F_B \pm F_{Gx} = F_i; F_B \leq F_{ax} \Rightarrow F_i \leq (F_{Gz} + F_{oz} + F'_{oz}) \cdot \mu_x \pm F_{Gx}$$

$$m \cdot a \leq \mu_x \cdot \left( m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta + \frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \sin \beta + \frac{m \cdot v^2}{r} \cdot \cos \beta \right) \pm$$

$$\pm m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta \quad (2-53)$$

při použití vztahu pro přímý výpočet součinitele adheze v podélném směru (2-12), získáme úpravou vztah pro výpočet adhezně nejvýše přípustného brzdného zpomalení:

$$a \leq K_1 \pm K_3 \cdot \sqrt{N_8 \cdot v^4 + N_7 \cdot v^2 + K_8} \quad [1] \quad (2-54)$$

kde:

$$N_7 = 2 \cdot R \cdot r \cdot g \cdot [d^2 (R + r \cdot \operatorname{tg} \beta) - (R \cdot \operatorname{tg} \beta - r)] \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \cos \alpha$$

$$N_8 = d^2 (R + r \cdot \operatorname{tg} \beta)^2 - (R \cdot \operatorname{tg} \beta - r)^2$$

Dráhu vozidla pro zabrzdění vozidla z počáteční rychlosti stanovíme prostřednictvím vztahu:

$$s_3 = \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{a} = \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{K_1 \pm K_3 \cdot \sqrt{N_8 \cdot v^4 + N_7 \cdot v^2 + K_8}}$$

$$\Downarrow \quad (2-55)$$

$$s_b = v_0 \cdot \left( t_0 + t_1 + \frac{1}{2} \cdot t_2 \right) + \int_{v_x}^{v_0} \frac{v \cdot dv}{K_1 \pm K_3 \cdot \sqrt{N_8 \cdot v^4 + N_7 \cdot v^2 + K_8}}$$

*Pozn.: Znaménko  $\pm$  v rovnici rovnováhy sil v podélném směru (2-53) a ve vztahu (2-54) a (2-55) rozlišuje situaci jízdy do svahu (+) a jízdy ze svahu (-).*

### 3. Numerické stanovení brzdné dráhy

#### 3.1 Postup při výpočtu brzdné dráhy

Numerické řešení brzdné dráhy bylo prováděno prostřednictvím aplikace Microsoft Office Excel 2007. Současně byl vytvořen v prostředí aplikace výpočtový algoritmus za účelem zjednodušení výpočtu brzdné dráhy vozidla pro konkrétní situaci. Uživatelské prostředí tohoto algoritmu je patrné z Obr. 3.1.

**Výpočet brzdné dráhy vozidla v horizontálním oblouku**

Zadejte následující parametry :

Poloměr oblouku R	[m]		40
Rychlost na počátku úseku $V_0$	[m/s]		13,88
Rychlost na konci úseku $V_x$	[m/s]		0
<b>Pozn.</b>			<b>Podmínka splněna</b>
<b>Maximálně využitelná adheze</b>			
v podélném směru ( c )			1
v příčném směru ( d )	[%]		85
<b>Příčný sklon vozovky <math>\beta</math></b>	[°]		0
<b>Mezní rychlost</b>	[m/s]		18,2
<b>Pozn.</b>			<b>Podmínka splněna</b>
	<b>Zvolte :</b>		
<b>Brzdná dráha <math>s_0</math> [m]</b>		1,1	[s] 15,3
<b>Brzdná dráha <math>s_1</math> [m]</b>		0,075	[s] 1,0
<b>Brzdná dráha <math>s_2</math> [m]</b>		0,2	[s] 2,8
<b>Brzdná dráha <math>s_3</math> [m]</b>			10,5
<b>Brzdná dráha <math>s_b</math> [m]</b>			<b>29,5</b>
<b>Pozn.</b>			

Obr. 3.1 Dialogové okno výpočtového algoritmu pro řešení brzdné dráhy



Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 33 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

Pro výpočet brzdné dráhy v obecném horizontálním oblouku prostřednictvím sestaveného výpočtového algoritmu je třeba zadat:

- poloměr oblouku horizontálního oblouku  $R$ ,
- rychlost na počátku úseku  $v_0$ ,
- případně rychlost na konci úseku  $v_x$ ,
- součinitel adheze v podélném směru  $c$ ,
- součinitel adheze v příčném směru  $d$ ,
- příčný sklon vozovky  $\beta$ .

Pro konkrétní podmínky lze součinitel maximálně využitelné adheze v podélném a příčném směru určit:

1. na základě provedení jízdní zkoušky, spočívající v brzdění vozidla při jízdě v přímém směru na vozovce bez podélného a příčného sklonu. Během zkoušky se měří adhezně nejvýše přípustně dosažené zpomalení  $a_{x\max}$ . Při stanovení maximálně využitelné adheze v podélném směru  $c$ , se vychází z rovnice rovnováhy sil v daném směru, tedy:

$$F_B = F_i, F_B = F_{ax} \Rightarrow F_i = F_{ax}$$

$$m \cdot a_x = m \cdot g \cdot \mu_x \Rightarrow \mu_x = \frac{a_x}{g} \quad (3-1)$$

$$\mu_{x\max} = c \Rightarrow c = \frac{a_{x\max}}{g}$$

Při výše uvažovaném stanovení maximálně využitelné adheze v podélném směru  $c$ , je zanedbán odpor vzduchu a odpor valení.

Analogicky lze určit hodnotu maximálně využitelné adheze v příčném směru  $d$ , poté co se jízdní zkouškou měří adhezně nejvýše přípustně dosažené dostředné zrychlení  $a_{y\max}$ , při kruhové jízdě vozidla po vozovce bez podélného a příčného sklonu. Následně z rovnice rovnováhy sil v příčném směru:

$$F_{ay} = F_o$$

$$m \cdot g \cdot \mu_y = \frac{m \cdot v^2}{R}; a_y = \frac{v^2}{R} \quad (3-2)$$

$$\mu_{y\max} = d \Rightarrow d = \frac{a_{y\max}}{g}$$

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 34 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

2. na základě pozorování povrchu vozovky lze provést odhad součinitele adheze dle hodnot uvedených v Tab. 1.1.

Ve výpočtovém algoritmu se zadává součinitel maximálně využitelné adheze v příčném směru  $d$ , jako poměrná část maximálně využitelné adheze v podélném směru  $c$ , vyjádřená v procentech.

Hodnotu příčného sklonu vozovky  $\beta$  uživatel pro ulehčení zadává ve stupních, přestože je výpočet prováděn v obloukové míře (rad).

Na základě zadaných vstupních dat je nejprve vypočítána mezní rychlost  $v_m$ . Jedná se o kontrolní výpočet s ohledem na ověření přípustnosti zadané počáteční rychlosti  $v_0$ . V případě, že by byla zadána počáteční rychlost vyšší než je rychlost mezní pro daný charakter oblouku, nelze stanovit brzdnu dráhu z této rychlosti. Jak již bylo v předchozí kapitole vysvětleno, mezní rychlostí je rozuměna taková rychlost, při které je využita v maximální možné míře adheze v příčném směru. Při jejím překročení dochází k příčnému smyku vozidla. Kola vozidla tak nemohou přenášet sílu v podélném směru, tedy jak brzdnu tak i hnací.

Na zadání nepřijatelné hodnoty počáteční rychlosti upozorní uživatele poznámka. Pokud počáteční rychlost je maximálně rovna rychlosti mezní, je v příslušné buňce zobrazeno: ***Podmínka splněna***. V opačném případě se zde zobrazí upozornění: ***Nelze řešit – upravte  $v_0$ !***

Pokud rychlost na počátku úseku je vyšší než rychlost na konci úseku, tak z hlediska výpočtového algoritmu je vše v pořádku, jedná se o brzdění a zobrazí se poznámka: ***Podmínka splněna***. V opačném případě se zde zobrazí poznámka: ***Jedná se o zrychlení – upravte  $v_x$*** . Při zadání rychlosti na konci úseku vyšší než rychlosti na počátku úseku, by se zcela logicky nejednalo o případ brzdění, ale o případ opačný, zrychlování.

Dále pro výpočet brzdné dráhy je možno zvolit reakční dobu řidiče  $s_0$ . S ohledem na volbu této doby je vypočtena dráha ujetá během reakční doby řidiče. Obdobně je řešen výpočet dráhy ujeté během prodlevy brzd  $s_1$  a dráhy ujeté během doby náběhu brzd do plného brzdného účinku  $s_2$ .

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 35 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

Pro výpočet brzdné dráhy je použit vztah (2-37), odvozený v kapitole 2.

Součástí výpočtového algoritmu je i podmínka umístěná ve spodní části dialogového okna, zobrazující se ve formě poznámky, nemající vliv na vlastní výpočet brzdné dráhy. Tato podmínka zprostředkuje, v případě, že zadaná počáteční rychlost  $v_0$  je rovna zadané konečné rychlosti  $v_0$ , zobrazení upozornění: *Nejedná se o brzdění-jízda rovnoměrnou rychlostí.*

Pro urychlení a zjednodušení výpočtu brzdné dráhy, byly do výpočtového algoritmu umístěny jednotlivé nápovědy - komentáře k příslušným buňkám, díky kterým je uživatel ušetřen vyhledávání potřebných údajů v příslušné literatuře. K zobrazení nápovědy dochází při umístění kurzoru do příslušné buňky.

### **3.2 Numerické stanovení brzdné dráhy vozidla v oblouku konstantního poloměru pro různé součinitele adheze**

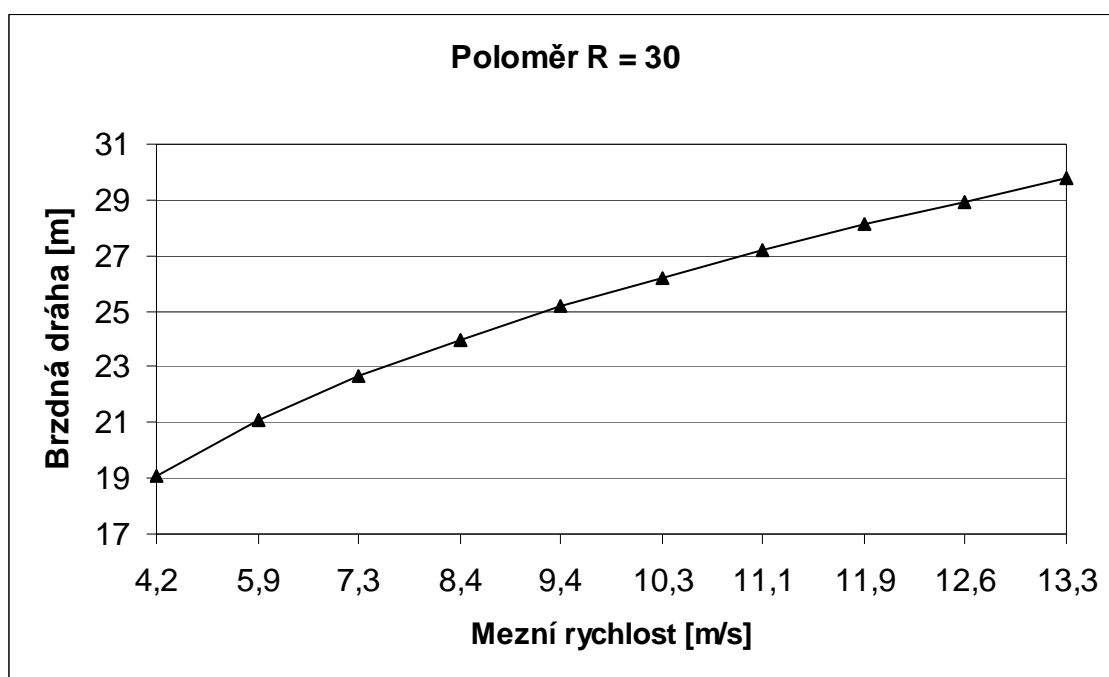
Při řešení brzdné dráhy vozidla při jízdě v oblouku bylo vycházeno z předpokladu, že vozidlo se pohybuje po rovinném oblouku konstantního poloměru bez příčného sklonu. Poloměry oblouků  $R$  byly vybrány zcela náhodně a to tak, aby byl zastoupen poloměr relativně malý a současně i relativně velký. Součinitelé adheze  $\mu$  byly vybrány tak, aby brzdná dráha byla řešena pro běžné případy povrchů vozovek (viz. Tab. 1.1).

Jak již bylo uvedeno, k řešení brzdné dráhy byla využita v plné míře aplikace Microsoft Office Excel 2007. Pro výpočet brzdné dráhy byl v daném případě využit vztah (2-18). Numericky stanovené brzdné dráhy vozidla v oblouku při konstantním poloměru a různých součinitelích adheze, včetně grafického vyjádření pomocí příslušných grafů, tvoří přílohu č. 1 této diplomové práce.

Pro prezentaci postupu byly vybrány výsledky řešení brzdné dráhy pro vybraný minimální a maximální poloměr oblouku  $R$ , viz. Tab. 3.1 a 3.2, Graf 3.1 a 3.2.

**Tab. 3.1** Vypočtená brzdná dráha vozidla pro poloměr oblouku R=30m

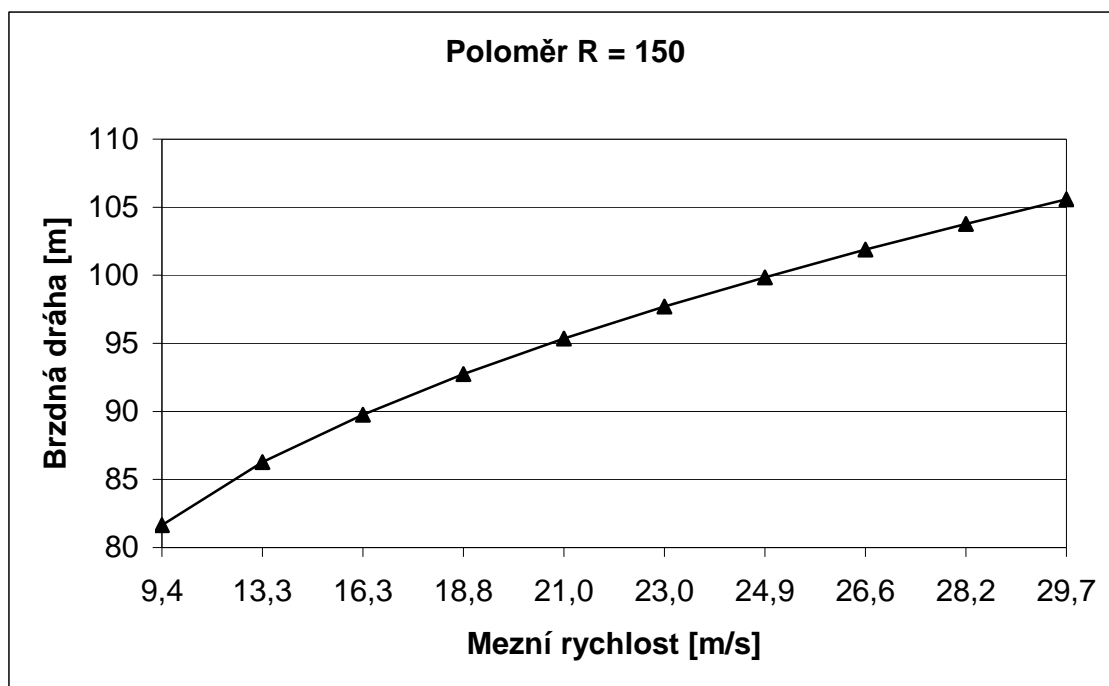
Souč. adheze $\mu_x$	$v_m$ [m/s]	$s_0$ [m]	$s_1$ [m]	$s_2$ [m]	$s_3$ [m]	$s_b$ [m]
0,1	4,20	4,20	0,32	0,42	14,12	19,06
0,2	5,94	5,94	0,45	0,59	14,12	21,10
0,3	7,28	7,28	0,55	0,73	14,12	22,68
0,4	8,40	8,40	0,63	0,84	14,12	24,00
0,5	9,40	9,40	0,70	0,94	14,12	25,16
0,6	10,29	10,29	0,77	1,03	14,13	26,22
0,7	11,12	11,12	0,83	1,11	14,13	27,19
0,8	11,89	11,89	0,89	1,19	14,13	28,09
0,9	12,61	12,61	0,95	1,26	14,12	28,94
1,0	13,29	13,29	1,00	1,33	14,13	29,75



**Graf 3.1** Závislost délky brzdné dráhy na počáteční rychlosti pro poloměr oblouku R=30m

**Tab. 3.2 Vypočtená brzdná dráha vozidla pro poloměr oblouku R=150m**

Souč. adheze $\mu_x$	$v_m$ [m/s]	$s_0$ [m]	$s_1$ [m]	$s_2$ [m]	$s_3$ [m]	$s_b$ [m]
0,1	9,40	9,40	0,70	0,94	70,61	81,66
0,2	13,29	13,29	1,00	1,33	70,66	86,28
0,3	16,27	16,27	1,22	1,63	70,63	89,75
0,4	18,79	18,79	1,41	1,88	70,66	92,74
0,5	21,01	21,01	1,58	2,10	70,66	95,35
0,6	23,02	23,02	1,73	2,30	70,66	97,71
0,7	24,86	24,86	1,86	2,49	70,63	99,84
0,8	26,58	26,58	1,99	2,66	70,66	101,89
0,9	28,19	28,19	2,11	2,82	70,64	103,76
1,0	29,71	29,71	2,23	2,97	70,66	105,57



**Graf 3.2 Závislost délky brzdné dráhy na počáteční rychlosti pro poloměr oblouku R=150 m**

Mezní rychlost  $v_m$  (druhý sloupec tabulek) byla vypočtena podle vztahu (2-14) odvozeného v kapitole 2.

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 38 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

Mezní rychlost byla použita jako rychlost na počátku úseku z důvodu zjištění nejdelší možné brzdě dráhy pro daný charakter oblouku při nejvýše adhezně přípustném zpomalení.

S ohledem na význam mezní rychlosti v souladu s analýzou prováděnou v rámci této diplomové práce, nelze při jízdě vozidla touto rychlostí ve směrovém oblouku provádět brzdění, neboť je využita maximálně adheze v příčném směru, adheze v podélném směru je nulová a kola vozidla nejsou schopna v podélném směru přenášet žádné síly aniž by došlo k jejich zablokování.

Pro analýzu brzdění vozidla prováděnou v kapitole 1 a 2 byl zanedbán odpor vzduchu a odpor valení.

Na následujícím příkladu bude demonstrováno, že ačkoliv mají tyto jízdní odpory malý vliv na brzdnou dráhu vozidla, dokáží vozidlo zpomalit během dráhy ujeté za reakční dobu řidiče, dobu prodlevy brzd a dobu náběhu brzd, natolik, že ačkoliv se vozidlo na počátku pohybovalo pro daný oblouk mezní rychlostí, než se na kolech vozidla projeví plný účinek brzdě síly, dojde ke znatelnému poklesu této rychlosti:

### **Příklad 3-1:**

**Zadání:** Osobní automobil s běžnou karosérií o hmotnosti 1 000 kg , se pohybuje po rovinném oblouku o poloměru 150 m, bez příčného sklonu, mezní rychlostí 9,4 m.s<sup>-1</sup> (součinitel adheze 0,1), povrch vozovky je tvořen asfaltem, rozchod kol vozidla 1,8 m a výška vozidla 1,6 m. Řidič vozidla na základě vnějšího podnětu začne brzdit.

Cílem je zjistit pokles počáteční rychlosti do doby počátku intenzivního brzdění vlivem působících jízdních odporů (odpor vzduchu a odpor valení).

Brzdě zpomalení vlivem působících jízdních odporů:

$$F_{BC} = F_v + F_f - F_s \quad \Rightarrow \quad F_s = F_v + F_f$$

$$m \cdot a = \frac{\rho}{2} \cdot c_x \cdot S \cdot v^2 + m \cdot g \cdot f$$

⇓

$$a = \frac{\rho}{2 \cdot m} \cdot c_x \cdot S \cdot v^2 + g \cdot f \cong 0,27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 39 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

Za předpokladu konstantního zpomalení a reakční doby řidiče 1 s, doby prodlevy brzd 0,075 s a doby náběhu brzd 0,2 s, určíme změnu rychlosti do doby počátku plného brzdění:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad \Delta v = a \cdot \Delta t \quad (3-3)$$

$$\Delta v = 0,27 \cdot \left(1 + 0,075 + \frac{1}{10}\right) \cong 0,32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

následně je možné určit rychlost vozidla na počátku plného brzdění:

$$v_0 = v_p - \Delta v \cong 9,08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Jak je ze zde uvedeného příkladu patrné, než vozidlo začne zpomalovat nejvýše adhezně přípustným zpomalením, dochází v reálných podmínkách vlivem působení v předchozích kapitolách zanedbaných jízdních odporů ke snížení počáteční rychlosti, v daném případě rychlosti mezní, natolik, že kola vozidla mohou v podélném směru do určité míry přenášet brzdnu sílu. Pokles rychlosti je nejvíce závislý na hmotnosti vozidla, čelní ploše vozidla, součiniteli valivého odporu pneumatiky, součiniteli odporu vzduchu a rychlosti vozidla.

Při numerickém řešení brzdné dráhy nebyly v souladu s analýzou uvedenou kapitole 1 a 2 zahrnuty do celkové brzdné síly odporu vzduchu a valení. Dále je uvažováno, že během reakční doby, doby prodlevy brzd a doby náběhu brzd se pohybuje vozidlo konstantní rychlostí  $v_0$ .

Na základě numerického řešení brzdné dráhy pro daný konstantní poloměr oblouku v závislosti na různých součinitelích adheze, bylo zjištěno, že dráha ujetá během plného brzdění je neměnná pro různé součinitele adheze.

Zvyšováním součinitele adheze, dochází i ke zvyšování mezní rychlosti, tedy vozidlo se v oblouku může pohybovat vyšší rychlosti, aniž by u něj došlo k příčnému smyku. Současně se zvyšováním součinitele adheze mohou kola vozidla přenášet větší brzdnu sílu a vozidlo tak zastaví na stejné brzdné dráze.

Současně výše uvedenou logickou úvahu lze odvodit i ze vztahu pro výpočet brzdné dráhy v rovinném oblouku bez příčného sklonu:

$$s_3 = \frac{d \cdot R}{2 \cdot c} \left( \arcsin \frac{v_0^2}{d \cdot g \cdot R} - \arcsin \frac{v_x^2}{d \cdot g \cdot R} \right)$$

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 40 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

za předpokladu  $v_0 = v_m$  a brzdění do úplného zastavení vozidla, lze vztah upravit následujícím způsobem:

$$v_0 = \sqrt{d \cdot g \cdot R}$$

$$\Downarrow$$

$$s_3 = \frac{d \cdot R}{2 \cdot c} \left( \arcsin \frac{d \cdot g \cdot R}{d \cdot g \cdot R} - \arcsin \frac{0}{d \cdot g \cdot R} \right) = \frac{d \cdot R}{2 \cdot c} \cdot \arcsin 1$$

při numerickém řešení brzdné dráhy byl zvolen součinitel adheze v příčném směru 60% hodnoty součinitele adheze v podélném směru, poté vztah přechází na tvar:

$$s_3 = \frac{0,6 \cdot c \cdot R}{2 \cdot c} \cdot \arcsin 1 = \frac{3}{10} \cdot R \cdot \arcsin 1$$

Je tak patrné, že změna součinitele adheze při jízdě vozidla v oblouku konstantního poloměru nemá vliv na dráhu vozidla ujetou během plného brzdění.

Výše uvedené závěry však platí pro ideální brzdění vozidla, kdy rozdělení brzdné síly na jednotlivá brzděná kola vozidla je úměrné jejich radiálnímu zatížení. Současně je uvažováno, že veškerá brzděná kola vozidla se pohybují po vozovce s totožným povrchem, resp. totožným součinitelem adheze a na vozidlo nepůsobí, krom síly odstředivé, jiných bočních sil.

### 3.3 Numerické stanovení brzdné dráhy v závislosti na poloměru oblouku a příčném sklonu

Obdobným způsobem jako v případě numerického stanovení brzdné dráhy vozidla v oblouku při konstantním poloměru a různých adhezních součinitelích, byla řešena brzdná dráha vozidla při brzdění v rovinném oblouku s příčným sklonem. Pro daný konstantní poloměr oblouku  $R$ , byla nejprve stanovena mezní rychlost vozidla  $v_m$ , za předpokladu  $\beta = 0$ . Poté byl zvyšován příčný sklon vozovky od  $1^\circ$  do  $6^\circ$ . Pro znázornění vlivu příčného sklonu vozovky na délku brzdné dráhy, byla dosazována pro všechny hodnoty úhlů příčného sklonu počáteční rychlost totožná (stanovená mezní rychlost pro nulový příčný sklon daného poloměru oblouku). Pro výpočet mezní rychlosti byl použit vztah (2-21) a brzdné dráhy vztah (2-24).



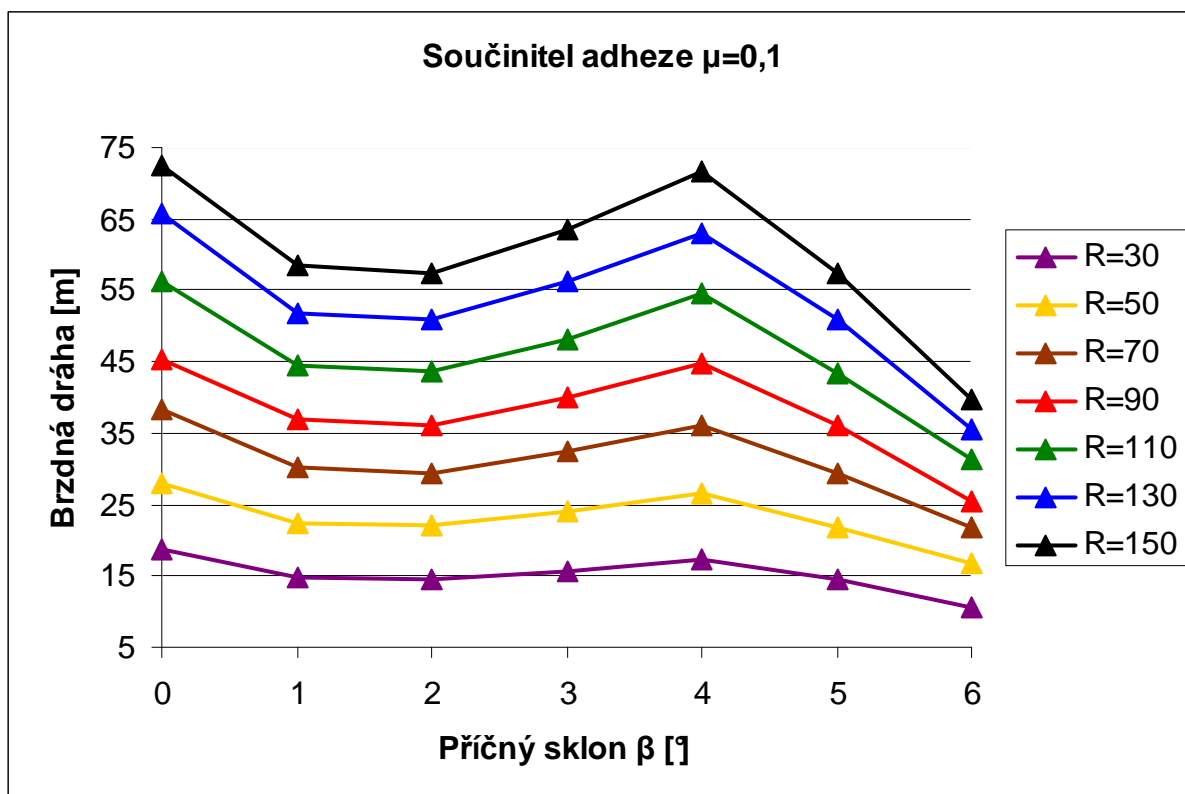
Numericky stanovené brzdné dráhy vozidla v závislosti na poloměru a příčném sklonu rovinného oblouku, včetně grafického vyjádření pomocí příslušných grafů, tvoří přílohu č. 2 této diplomové práce. Pro prezentaci postupu byly vybrány výsledky řešení brzdné dráhy pro  $\mu_x = 0,1$  a  $\mu_x = 1,0$ .

**Tab. 3.3 Brzdná dráha vozidla při součiniteli adheze  $\mu_x=0,1$  pro různé poloměry oblouku a různé úhly příčného sklonu**

$R$ [m]	$\beta$ [°]	$v_m$ [m/s]	$s_0$ [m]	$s_1$ [m]	$s_2$ [m]	$s_3$ [m]	$s_b$ [m]
30	0	4,20	4,20	0,32	0,42	13,73	18,67
30	1	4,20	4,20	0,32	0,42	9,73	14,67
30	2	4,20	4,20	0,32	0,42	9,45	14,39
30	3	4,20	4,20	0,32	0,42	10,68	15,62
30	4	4,20	4,20	0,32	0,42	12,26	17,20
30	5	4,20	4,20	0,32	0,42	9,45	14,39
30	6	4,20	4,20	0,32	0,42	5,79	10,73
50	0	5,40	5,40	0,41	0,54	21,52	27,87
50	1	5,40	5,40	0,41	0,54	16,04	22,39
50	2	5,40	5,40	0,41	0,54	15,62	21,97
50	3	5,40	5,40	0,41	0,54	17,69	24,04
50	4	5,40	5,40	0,41	0,54	20,19	26,54
50	5	5,40	5,40	0,41	0,54	15,37	21,72
50	6	5,40	5,40	0,41	0,54	10,28	16,63
70	0	6,40	6,40	0,48	0,64	30,70	38,22
70	1	6,40	6,40	0,48	0,64	22,56	30,08
70	2	6,40	6,40	0,48	0,64	21,95	29,47
70	3	6,40	6,40	0,48	0,64	24,84	32,36
70	4	6,40	6,40	0,48	0,64	28,65	36,17
70	5	6,40	6,40	0,48	0,64	21,78	29,30
70	6	6,40	6,40	0,48	0,64	14,37	21,89
90	0	7,20	7,20	0,54	0,72	36,81	45,27
90	1	7,20	7,20	0,54	0,72	28,42	36,88
90	2	7,20	7,20	0,54	0,72	27,76	36,22

90	3	7,20	7,20	0,54	0,72	31,51	39,97
90	4	7,20	7,20	0,54	0,72	36,37	44,83
90	5	7,20	7,20	0,54	0,72	27,64	36,10
90	6	7,20	7,20	0,54	0,72	16,94	25,40
110	0	8,00	8,00	0,60	0,80	46,82	56,22
110	1	8,00	8,00	0,60	0,80	35,19	44,59
110	2	8,00	8,00	0,60	0,80	34,29	43,69
110	3	8,00	8,00	0,60	0,80	38,84	48,24
110	4	8,00	8,00	0,60	0,80	45,03	54,43
110	5	8,00	8,00	0,60	0,80	34,08	43,48
110	6	8,00	8,00	0,60	0,80	21,83	31,23
130	0	8,70	8,70	0,65	0,87	55,51	65,73
130	1	8,70	8,70	0,65	0,87	41,63	51,85
130	2	8,70	8,70	0,65	0,87	40,56	50,78
130	3	8,70	8,70	0,65	0,87	45,93	56,15
130	4	8,70	8,70	0,65	0,87	52,72	62,94
130	5	8,70	8,70	0,65	0,87	40,83	51,05
130	6	8,70	8,70	0,65	0,87	25,32	35,54
150	0	9,30	9,30	0,70	0,93	61,58	72,51
150	1	9,30	9,30	0,70	0,93	47,44	58,37
150	2	9,30	9,30	0,70	0,93	46,33	57,26
150	3	9,30	9,30	0,70	0,93	52,57	63,50
150	4	9,30	9,30	0,70	0,93	60,82	71,75
150	5	9,30	9,30	0,70	0,93	46,36	57,29
150	6	9,30	9,30	0,70	0,93	28,76	39,69

Na Grafu 3.3 je patrný význam druhého členu v závorce vztahu (2-24), kdy s ohledem na podmínku (2-27) nelze v daném oblouku pro vyšší úhly (pro znázorněný případ úhel 5° a 6°) příčného sklonu řešit brzdnu dráhu vozidla do úplného zastavení, ale pouze do minimální možné konečné rychlosti stanovené v souladu s uvedenou podmínkou.



**Graf 3.3** Závislost brzdné dráhy na příčném sklonu  $\beta$  pro  $\mu_x=0,1$

Z tohoto důvodu je na grafu pro dané úhly znázorněna kratší brzdná dráha, ačkoliv by se dle předchozího vývoje znázorňujících křivek dal předpokládat opačný trend, tedy delší brzdná dráha.

**Tab. 3.4** Brzdná dráha vozidla při součiniteli adheze  $\mu_x=1,0$  pro různé poloměry oblouku a různé úhly příčného sklonu

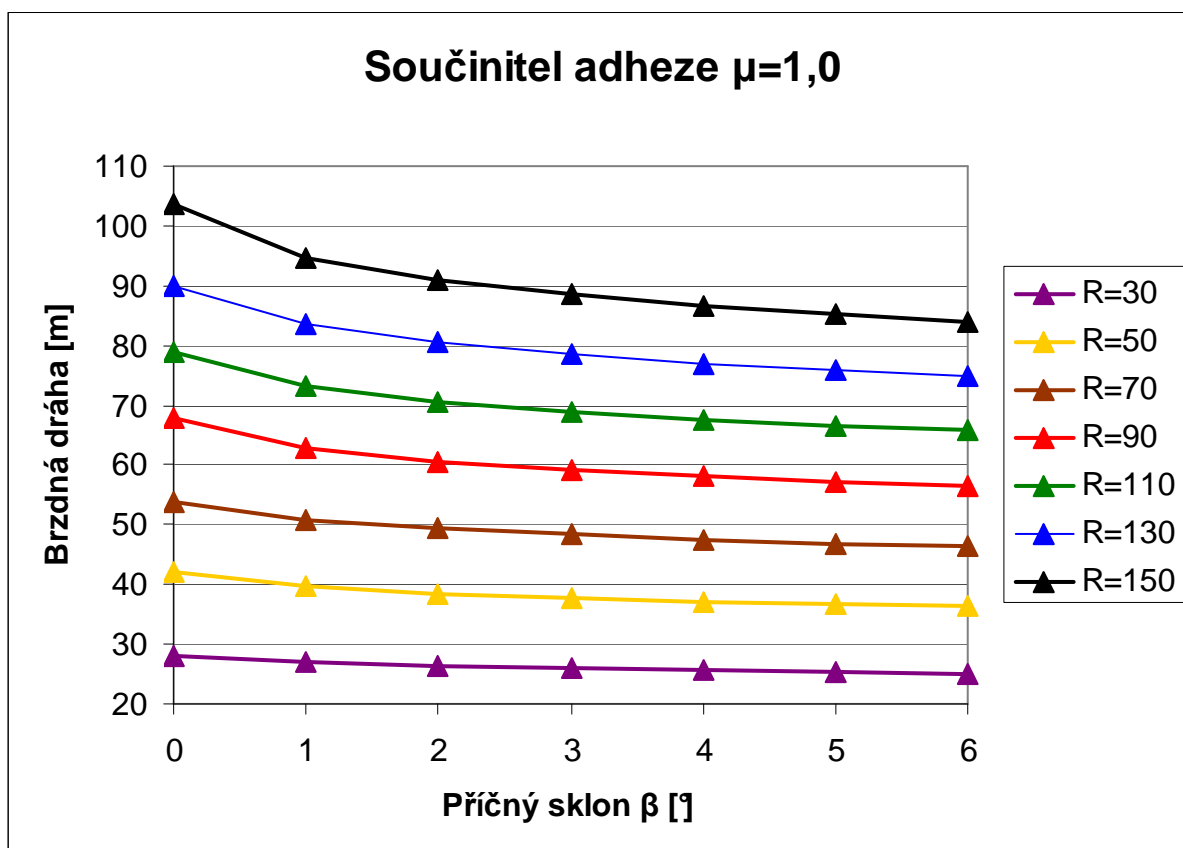
$R$ [m]	$\beta$ [°]	$v_m$ [m/s]	$s_0$ [m]	$s_1$ [m]	$s_2$ [m]	$s_3$ [m]	$s_b$ [m]
30	0	13,20	13,20	0,99	1,32	12,67	28,18
30	1	13,20	13,20	0,99	1,32	11,54	27,05
30	2	13,20	13,20	0,99	1,32	10,92	26,43
30	3	13,20	13,20	0,99	1,32	10,48	25,99
30	4	13,20	13,20	0,99	1,32	10,15	25,66
30	5	13,20	13,20	0,99	1,32	9,88	25,39
30	6	13,20	13,20	0,99	1,32	9,66	25,17
50	0	17,10	17,10	1,28	1,71	21,86	41,95
50	1	17,10	17,10	1,28	1,71	19,57	39,66
50	2	17,10	17,10	1,28	1,71	18,45	38,54

50	3	17,10	17,10	1,28	1,71	17,68	37,77
50	4	17,10	17,10	1,28	1,71	17,09	37,18
50	5	17,10	17,10	1,28	1,71	16,63	36,72
50	6	17,10	17,10	1,28	1,71	16,25	36,34
70	0	20,20	20,20	1,52	2,02	30,06	53,80
70	1	20,20	20,20	1,52	2,02	27,17	50,91
70	2	20,20	20,20	1,52	2,02	25,67	49,41
70	3	20,20	20,20	1,52	2,02	24,62	48,36
70	4	20,20	20,20	1,52	2,02	23,81	47,55
70	5	20,20	20,20	1,52	2,02	23,17	46,91
70	6	20,20	20,20	1,52	2,02	22,65	46,39
90	0	23,00	23,00	1,73	2,30	40,98	68,01
90	1	23,00	23,00	1,73	2,30	35,69	62,72
90	2	23,00	23,00	1,73	2,30	33,55	60,58
90	3	23,00	23,00	1,73	2,30	32,11	59,14
90	4	23,00	23,00	1,73	2,30	31,02	58,05
90	5	23,00	23,00	1,73	2,30	30,16	57,19
90	6	23,00	23,00	1,73	2,30	29,46	56,49
110	0	25,40	25,40	1,91	2,54	49,05	78,90
110	1	25,40	25,40	1,91	2,54	43,37	73,22
110	2	25,40	25,40	1,91	2,54	40,83	70,68
110	3	25,40	25,40	1,91	2,54	39,10	68,95
110	4	25,40	25,40	1,91	2,54	37,78	67,63
110	5	25,40	25,40	1,91	2,54	36,74	66,59
110	6	25,40	25,40	1,91	2,54	35,90	65,75
130	0	27,60	27,60	2,07	2,76	57,57	90,00
130	1	27,60	27,60	2,07	2,76	51,14	83,57
130	2	27,60	27,60	2,07	2,76	48,17	80,60
130	3	27,60	27,60	2,07	2,76	46,13	78,56
130	4	27,60	27,60	2,07	2,76	44,59	77,02

130	5	27,60	27,60	2,07	2,76	43,37	75,80
130	6	27,60	27,60	2,07	2,76	42,37	74,80
150	0	29,70	29,70	2,23	2,97	68,75	103,65
150	1	29,70	29,70	2,23	2,97	59,56	94,46
150	2	29,70	29,70	2,23	2,97	55,98	90,88
150	3	29,70	29,70	2,23	2,97	53,56	88,46
150	4	29,70	29,70	2,23	2,97	51,74	86,64
150	5	29,70	29,70	2,23	2,97	50,30	85,20
150	6	29,70	29,70	2,23	2,97	49,13	84,03

V materiálech tvořících přílohu diplomové práce je vypočítána brzdná dráha pro součinitele adheze  $\mu_x = 0,1 \div 1,0$  (je uvažována maximální hodnota součinitele adheze v příčném směru 60% z maximální hodnoty součinitele adheze v podélném směru). Součástí přílohy je též grafické vyjádření brzdné dráhy v závislosti na příčném sklonu. Křivky vyjadřující průběh této brzdné dráhy pro různé sklony mají vanovitý tvar.

V případě zvyšování hodnoty příčného sklonu vozovky nejprve dochází ke zkracování brzdné dráhy. Takto se děje pouze do určité hranice, následně zvyšování příčného sklonu působí již opačně a dochází k prodlužování brzdné dráhy. Tento jev je sice patrný pouze u grafu pro součinitel adheze  $\mu_x = 0,2$ . Při vzrůstajících součinitelích adheze k tomuto jevu dochází též, ale při vyšších úhlech příčného sklonu.



**Graf 3.4** Závislost brzdné dráhy na příčném sklonu  $\beta$  pro  $\mu_x=1,0$

K tomuto jevu dochází z důvodu, kdy zvyšováním úhlu příčného sklonu  $\beta$ , dochází ke zmenšování normálové síly  $F_{Gz}$  (Obr. 2.2, pozice 7). Vlivem poklesu této síly, dochází i k poklesu adhezní síly:

$$F_{ax} = F_{Gz} \cdot \mu_x \quad (3-4)$$

a pokud uvažujeme brzdění vozidla aniž by došlo k blokaci brzděných kol, musí nutně platit podmínka:

$$F_B \leq F_{ax} \quad (3-5)$$

Kola vozidla tak mohou přenášet brzdnou sílu menší a dochází tak k prodloužení brzdné dráhy.

Výše uvedené závěry však opět platí pro ideální brzdění vozidla, kdy rozdělení brzdné síly na jednotlivá brzděná kola vozidla je úměrné jejich radiálnímu zatížení. Současně je uvažováno, že veškerá brzděná kola vozidla se pohybují po vozovce s totožným povrchem, resp. totožným součinitelem adheze a na vozidlo nepůsobí, krom síly odstředivé a sinové složky normálové síly, jiných bočních sil.

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana - 47 -
Dopravní fakulta Jana Pernera		

## **4. Stanovení brzdné dráhy vozidla v oblouku přímým měřením na vozidle**

### **4.1 Obecná metodika zkoušek ke stanovení brzdné dráhy**

Plán jízdní zkoušky, během které bude zjišťována brzdná dráha vozidla, byl vypracován v souladu s mezinárodní legislativní úpravou, konkrétně v souladu se Směrnicí Evropské hospodářské rady č. 71/320 ze dne 26.7.1971 ve znění pozdějších změn a doplnění.

Zkouškami brzdění a účinkem brzdových zařízení, za účelem schvalovacího procesu každého vozidla, během kterého se měří účinek brzdění, se konkrétně zabývá příloha č. II této právní normy.

V rámci této normy je určeno, že předepsaný účinek pro brzdová zařízení vozidel je určen brzdou dráhou, kterou se rozumí dráha, kterou vozidlo ujede od okamžiku, kdy řidič začne působit na ovládací orgán zařízení, až do okamžiku, kdy vozidlo zastaví. Počáteční rychlostí se rozumí taková rychlost, kterou se vozidlo pohybuje v okamžiku, kdy řidič vozidla začne působit na ovládací orgán zařízení.

#### **4.1.1. Cíl zkoušek**

Cílem praktické jízdní zkoušky brzdné dráhy vozidla je zjistit brzdou dráhu v reálných podmínkách, za účelem porovnání experimentálně zjištěné brzdné dráhy s výsledkem numerického řešení brzdné dráhy vozidla v souladu s vypracovanou analýzou brzdění vozidla v rámci této diplomové práce. Na základě porovnání získaných údajů o brzdné dráze následně stanovit, zda lze numerickým řešením brzdné dráhy s dostatečnou přesností dodatečně určit skutečnou brzdou dráhu vozidla.

#### **4.1.2. Technické požadavky na vozidlo**

Pro potřeby jízdní zkoušky je třeba, aby vozidlo splňovalo následující technické požadavky:

- zatížení vozidla musí být rozloženo takovým způsobem, aby nedošlo k překročení mezních hodnot tlakových sil na nápravy udaných výrobcem vozidla, současně nesmí být překročena maximální přípustná hmotnost,
- geometrie kol a náprav vozidla musí být v souladu s údaji výrobce,
- náplně provozních kapalin vozidla dle technických podmínek musí být doplněny na horní povolenou mez,

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 48 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

- huštění pneumatik musí odpovídat údajům výrobce s přesností  $\pm 5$  kPa pro tlaky do 200 kPa a  $\pm 10$  kPa pro tlaky nad 200 kPa (kontrolováno ve studeném stavu, kdy pneumatiky nejsou zahřáty předchozím provozem),
- brzdy vozidla musí být v dobrém technickém stavu, seřizeny dle údajů výrobce (brzdy nesmí zejména samovolně brzdit),
- vozidlo nesmí být znečištěno,
- použité přístroje nesmí významně změnit aerodynamické vlastnosti vozidla.

Dále je nutné, aby pneumatiky vozidla byly zajety, tedy musí mít najeto nejméně 1 000 km a jejich vzorek musí mít nejméně  $2/3$  původní hloubky.

Dodržení výše uvedených technických požadavků na zkušební vozidlo zaručuje minimální ovlivnění výsledků zkoušky aktuálním technickým stavem vozidla a současně zaručuje podmínky pro reprodukovatelnost zkoušky.

Z důvodu nutnosti zajištění brzdění vozidla během zkoušky aniž by došlo k blokaci brzděných kol a vybočení vozidla z vytyčené brzdné dráhy, je nutné, aby vozidlo bylo vybaveno asistenčními systémy vozidla. Konkrétně protiblokovacím systémem (ABS), případně elektronickým stabilizačním systémem (ESP). V případě použití vozidla, které není vybaveno uvedenými asistenčními systémy, nelze dosáhnout objektivních výsledků zkoušek, neboť průběh zkoušky by zcela závisel na chování řidiče vozidla během jízdni zkoušky. Během jízdni zkoušky je nutné brzdit vozidlo na mezi adheze a získat tak údaj o mezní hodnotě brzdne dráhy. V případě, pokud by brzdění vozidla zcela záviselo pouze na chování řidiče, není v možnostech řidiče vyvíjet patřičný tlak na brzdový pedál, který by odpovídal brzdění na mezi adheze a toto činit opakovaně.

Dalším důvodem pro použití asistenčního systému ABS je skutečnost, kdy vztahy odvozené pro výpočet brzdne dráhy vozidla vycházely z předpokladu, že brzdna síla vozidla je na jednotlivá kola rozdělena úměrně k jejich schopnosti brzdnu sílu přenášet. Asistenční systém vozidla ABS tak zaručuje, že v průběhu jízdni zkoušky nedojde vlivem brzdění k zablokování některého z brzděných kol, tedy brzdna síla bude rozdělena na jednotlivá kola úměrně jejich schopnosti přenášet brzdnu sílu, resp. jejich radiálnímu zatížení.



Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 49 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

#### **4.1.3. Technické požadavky na zkušební dráhu**

Povrch zkušební dráhy musí mít dobré adhezní vlastnosti, současně musí být pevný a kvalitní. Z těchto požadavků vyplývá, že se musí jednat o neznečištěnou zkušební dráhu s živičným či betonovým povrchem za sucha.

S ohledem na charakter jízdní zkoušky musí být zkušební dráha dostatečně dlouhá, aby vozidlo mohlo dosáhnout potřebné počáteční rychlosti a byl potřebný prostor pro zabrzdění vozidla. Současně musí být i dostatečně široká, aby mohl být vytyčen oblouk potřebného poloměru. Dráha musí být bez podélného a příčného sklonu. Dále je nutné z důvodu bezpečnosti, aby se v okolí zkušební dráhy nenacházely pevné překážky.

#### **4.1.4. Podmínky jízdní zkoušky**

Stanovený průběh jízdní zkoušky, během které bude měřena brzdná dráha vozidla v rovinném oblouku, byl odvozen ze zkoušky typu O, dle přílohy č. II výše uvedené směrnice, která bude prováděna s odpojeným motorem.

Z toho vyplývá, že zkouška bude učiněna se studenými brzdami, tzn. teplota brzdových kotoučů či bubnů měřená na vnější straně nesmí být vyšší než 100°C. Během zkoušky se ve vozidle bude nacházet pouze řidič a osoba obsluhující měřící zařízení.

S ohledem na charakter jízdní zkoušky je stanovena maximální počáteční rychlost zkušebního vozidla na rychlost 50 km.h<sup>-1</sup> a minimální poloměr oblouku 20 m.

#### **4.1.5. Měřící zařízení a pomůcky**

Pro objektivnost provedení jízdní zkoušky je nutno použít kalibrované přístroje, jejichž přesnost měření činí ±1%.

Konkrétně bude při jízdní zkoušce použito:

1. měřící systém pro záznam rychlosti a času se snímačem Correvit S-CE s integrovaným gyroskopem,
2. optický snímač brzdového světla,
3. bezkontaktní teploměr,
4. tlakoměr pneumatik,
5. značkovací kužele, křída,
6. měřící pásmo, svinovací metr a posuvné měřítko.

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 50 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

#### **4.1.6. Příprava zkušební dráhy a vozidla**

Na zkušební dráze dle technických požadavků (viz. kap. 4.1.3) bude na vhodném místě vytyčena kružnice určeného poloměru.

Provede se kontrola tlaku v pneumatikách vozidla, hloubky dezénu pneumatik a kontrola provozních náplní vozidla.

Na zkušební vozidlo se nainstaluje měřicí zařízení.

#### **4.1.7. Měření**

Obsluha měřicího systému jej zapne a řidič se s vozidlem rozjede podél vnější strany vytyčené kružnice, přičemž dráha vozidla bude opisovat co možná nejtěsněji vyznačený vnější okraj kružnice. Po dosažení požadované počáteční rychlosti, vyšlápne spojkový pedál a intenzivně, maximální možnou silou, sešlápne brzdový pedál. V této poloze jej drží až do úplného zastavení vozidla. Po zastavení vozidla obsluha vypne měřicí systém.

Pro každou požadovanou počáteční rychlost budou provedeny minimálně tři měření.

#### **4.1.8. Záznam o výsledku zkoušky**

O provedené zkoušce bude vypracován protokol, který bude obsahovat:

1. jméno zkoušejícího,
2. jméno osoby vykonávající odborný dozor,
3. datum zkoušky,
4. údaje ke zkušebnímu vozidlu ( značka, typ, druh vozidla, rok výroby, přidělená registrační značka, č. motoru a karosérie, celkový počet ujetých km, dle stavu tachometru ),
5. typ, rozměr a výrobce pneumatik, hloubka dezénu a zjištěné hodnoty tlaku v pneumatikách,
6. popis zkušební dráhy a měřicího úseku,
7. použité měřicí přístroje,
8. data naměřená při jízdách zkouškách.

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 51 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

*Pozn.: Pro urychlení a zefektivnění provádění zkoušek brzdné dráhy bude sestaven podrobný program zkoušky, který bude detailně popisovat jednotlivé úkony konané v rámci zkoušek.*

#### **4.2 Průběh zkoušek ke stanovení brzdné dráhy**

Jízdní zkoušky za účelem stanovení brzdných drah vozidla při brzdění v rovinném oblouku se uskutečnily dne 12.5.2009 na ploše Letiště v Hradci Králové. Plocha byla pro účely jízdních zkoušek dostatečně dlouhá a současně i široká. Povrch plochy byl tvořen kvalitním a tvrdým cementovým povrchem s podélnými spárami vyplněnými asfaltem. Během zkoušek byl povrch plochy suchý, neznečištěný.

Příprava a samotný průběh jízdních zkoušek se řídil sestaveným programem jízdní zkoušky, který tvoří přílohu č. 3 této diplomové práce.



**Obr. 4.1 Letecký snímek zkušební dráhy na letišti v Hradci Králové**

Na Obr. 4.1 je vyobrazena část letištní plochy, která sloužila jako zkušební dráha při jízdních zkouškách. Červená kružnice znázorňuje vytyčenou kružnici o poloměru 19 m. Tento poloměr byl zvolen z důvodu, aby se s ohledem na rozměry zkušebního vozidla, jeho podélná osa při jízdě podél vyznačené kružnice pohybovala na poloměru 20 m.

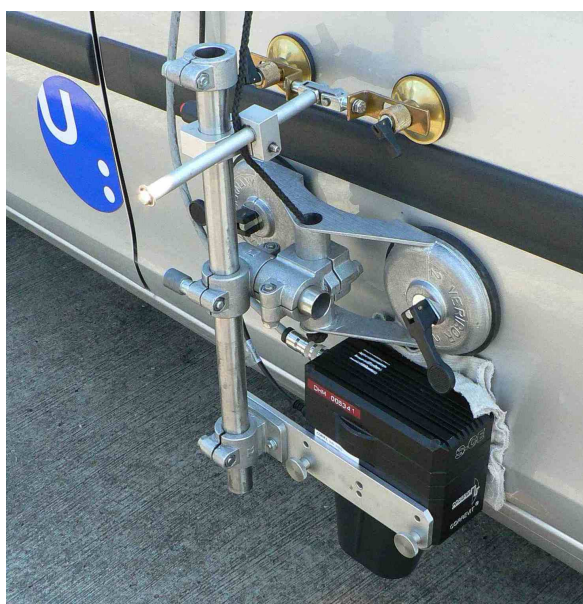
Jako zkušební vozidlo bylo použito vozidlo tov. značky ŠKODA Roomster 1,9 TDI, katedry dopravních prostředků a diagnostiky Dopravní fakulty Jana Pernera (Obr. 4.2).



**Obr. 4.2 Zkušební vozidlo ŠKODA Roomster**

Před provedením jízdních zkoušek byla provedena kontrola tlaku v pneumatikách vozidla, kontrola hloubky dezénu pneumatik a dále kontrola provozních náplní vozidla.

Dále do vozidla byl nainstalován měřicí systém a na levé zadní dveře byl za pomoci přísavných držáků nainstalován snímač rychlosti Correvit S-CE s integrovaným gyroskopem. Snímač a jeho uchycení je zobrazeno na Obr. 4.3.



**Obr. 4.3 Uchycení snímače Correvit S-CE**

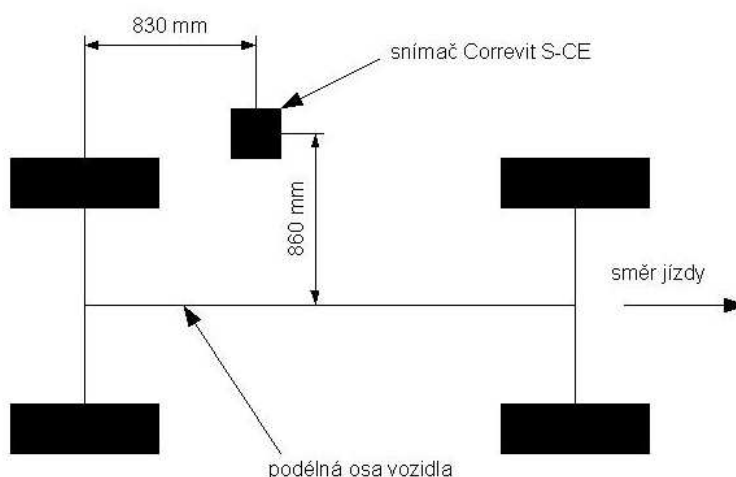
Na levé brzdové světlo vozidla byl za pomoci lepící pásky připevněn optický snímač brzdového světla. Zbývající část činné plochy brzdového světla byla pomocí lepící pásky zatemněna, z důvodu vyloučení ovlivnění funkce snímače okolním světlem.

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 53 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

Jednotlivé propojovací kabely byly vedeny pootevřeným oknem levých zadních dveří vozidla a na karosérii byly přichyceny lepicí páskou.

Vzorkovací frekvence měření byla zvolena 200 Hz, z toho vyplývající perioda měření 0,005 s.

Pro následnou korekci měřeného vektoru výsledné rychlosti bylo provedeno zaměření polohy snímače Correvit S-CE na vozidle. Poloha snímače na vozidle je znázorněna na Obr. 4.4.



**Obr. 4.4 Umístění snímače Correvit S-CE na zkušebním vozidle**

Po ukončení příprav vozidla a vyznačení kružnice o poloměru 19 m na letištní dráze, prostřednictvím značkovacích kuželů, řidič zkušebního vozidla zkušebně projel vyznačenou dráhu. Provedl opakované brzdění vozidla za účelem odstranění případných nečistot z brzdových kotoučů vozidla.

Poté bylo přistoupeno k provádění jízdních zkoušek. Obsluha měřicího systému jej uvedla do činnosti, řidič vozidla se po obvodu vyznačené kružnice s vozidlem rozjel. Po ustálení rychlosti vozidla na hodnotě požadované počáteční rychlosti a současně po korekci jízdní dráhy vozidla takovým způsobem, aby se vozidlo pohybovalo v co možná nejmenší vzdálenosti k vyznačenému obvodu kružnice a současně tak, aby řidič nemusel zásahy do řízení korigovat trajektorii vozidla, bylo provedeno intenzivní zabrzdění vozidla. Řidič vyšlápnul spojkový pedál a intenzivně sešlápnul brzdový pedál maximální možnou silou, pedál držel v sešlápnuté poloze do úplného zastavení vozidla. Po zastavení vozidla obsluha vypnula měřicí systém.

Totožným způsobem byly prováděny veškeré jízdní zkoušky pro předem určené počáteční rychlosti 20, 30, 40 45 a 50 km.hod<sup>-1</sup>. Pro každou počáteční rychlost bylo plánováno provedení alespoň tří platných měření. Celkem bylo provedeno 17 jízdních zkoušek, při zkoušce č. 13 však nebylo provedeno platné měření. Po provedení tří zkoušek bylo vždy přistoupeno k měření teploty brzdových kotoučů, z důvodu ověření zda teplota brzd nepřesahuje teplotu 100°C. Teplota brzdových kotoučů byla měřena pomocí bezkontaktního teploměru FLUKE 574. Naměřené hodnoty teploty byly zaznamenány do Tab.4.1.

**Tab. 4.1 Přehled naměřených teplot brzdových kotoučů**

Poř. č. měření	Teplota brzdových kotoučů[°C]			
	Pravý přední	Levý přední	Pravý zadní	Levý zadní
1.	52,6	51,6	30,1	30,8
2.	54,6	50,7	33,0	32,2
3.	55,0	60,0	40,0	38,0
4.	54,0	72,0	40,0	53,0
5.	43,0	70,0	31,0	52,0

Z Tab 4.1 je patrné, že teplota brzdových kotoučů nepřesáhla teplotu 100°C. Současně z údajů v tabulce je patrný vliv působení odstředivé síly na vozidlo, která v příčném směru vyvolává klopný moment, který způsobuje odlehčení vnitřních kol (pravá strana vozidla) a současně zvyšuje zatížení vnějších kol (levá strana vozidla). Kola vozidla na vnější straně mohou tak přenášet větší brzdovou sílu a brzdové kotouče jsou více tepelně zatíženy. Na vnitřní straně vozidla dochází k opačnému jevu. Tento jev vysvětluje rozdílné teploty brzdových kotoučů na pravé a levé straně vozidla naměřené během jízdních zkoušek.

Po ukončení jízdních zkoušek byla z řídicího PC měřícího systému naměřená data vyexportována do formátu dat xls, které poté byly zálohovány na flash disk k pozdějšímu využití při výpočtu brzdné dráhy.

Obecné údaje o provedené jízdní zkoušce, dále údaje o zkušebním vozidle a použitém měřícím systému, měřících přístrojích a pomůckách jsou zaznamenány v protokolu o měření (viz. Tab.4.2).

**Tab. 4.2 Protokol o měření**

<b>Obecné údaje</b>	
Datum	12.5.2009
Místo měření	Letiště Hradec Králové
Zkoušející pracovník	Bc. Dvořák Petr
Odborný dozor	Ing. Zikmund Tomáš, Ph.D.
Řidič vozidla	Ing. Pokorný Jan
Počet jízd	17
<b>Údaje o vozidlu</b>	
Značka a typ vozidla	ŠKODA Roomster 1,9 TDI
Rok výroby	2006
Celkový počet ujetých km	50 238
Rozměr pneumatik – přední/zadní	195/55 R15 / 195/55 R15
Hloubka dezénu – PP/LP/PZ/LZ [mm]	6,1/6,3/5,3/5,0
Tlak v pneumatikách – přední/zadní [kPa]	225/240
Atmosférické podmínky	polojasno, teplota 18°C
Povrch zkušební dráhy	betonové panely
<b>Použité přístroje a pomůcky</b>	
<b>Název</b>	
přenosné PC (notebook) zn. MSI	
měřicí ústředna Cronos PL2	
rozvaděč	
snímač rychlosti Correvit S-CE s integrovaným gyroskopem	
optický snímač brzdových světel	
napájecí zdroj - akumulátor	
propojovací kabely	
značkovací kužely	
zálohovací flash disk	
měřicí pásmo	
bezkontaktní teploměr	
barevná křída	
lepící páska	
tlakoměr pneumatik	
svinovací metr	
posuvné měřítko	
fotoaparát	

### 4.3 Vyhodnocení naměřených dat

Data naměřená během jízdních zkoušek byla zpracována prostřednictvím aplikace Microsoft Office Excel 2007. Při zjišťování brzdné dráhy zkušebního vozidla bylo postupováno následujícím způsobem:

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 56 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

- ze záznamu referenčního signálu snímače brzdového světla, byl nejprve stanoven počátek brzdění, jako počátek brzdění byla ve všech případech měření stanovena doba, kdy referenční signál snímače dosáhl hodnotu napětí 0,1 V, data pořízena před touto dobou byla pro přehlednost vymazána,
- následně byla určena doba ukončení brzdění, tedy doba, kdy rychlost vozidla byla nulová, opět pro přehlednost byla data naměřená po této době vymazána,
- velikost vektoru výsledné rychlosti naměřený snímačem Correvit S-CE, udávaný v jednotkách m.hod.<sup>-1</sup>, byl pro další zpracování převeden do jednotek m.s<sup>-1</sup>,
- korekce velikosti vektoru výsledné rychlosti byla provedena na základě následující úvahy:
  1. vzhledem k tomu, kdy se nepodařilo zjistit přesnou polohu těžiště zkušební vozidla, bylo rozhodnuto, že se bude stanovovat brzdná dráha k podélné ose vozidla,
  2. vztah pro korekci vektoru výsledné rychlosti byl odvozen následovně:

$$\begin{aligned}
v_s &= \omega \cdot R_s \\
v_p &= \omega \cdot R_p \\
\frac{v_p}{v_s} &= \frac{\omega \cdot R_p}{\omega \cdot R_s} \Rightarrow v_p = v_s \cdot \frac{R_p}{R_s}
\end{aligned} \tag{4-1}$$

kde značí:

- $v_s$  - vektor výsledné rychlosti snímače [m.s<sup>-1</sup>],
- $v_p$  - vektor výsledné rychlosti podélné osy vozidla [m.s<sup>-1</sup>],
- $R_s$  - poloměr oblouku, na kterém se pohyboval snímač [m],
- $R_p$  - poloměr oblouku, na kterém se pohybovala podélná osa vozidla [m],
- $\omega$  úhlová rychlost [rad/s],

- užitím zjednodušujícího předpokladu, kdy při zvolení dostatečně vysoké vzorkovací frekvence měření, dochází během periody měření pouze k zanedbatelnému poklesu rychlosti, byla určena brzdná dráha zkušební vozidla pomocí vztahu:

$$s_b = \sum_{i=0}^{i=n} (v_i \cdot t_m) \tag{4-2}$$

kde značí:

- $v_i$  - velikost vektoru výsledné rychlosti snímače Correvit,
- $n$  - počet period měření od počátku brzdění vozidla do jeho úplného zastavení,
- $t_m$  - doba periody, závislá na zvolené vzorkovací frekvenci měření,



Na základě uvedeného postupu byla stanovena brzdná dráha zkušebního vozidla při jízdách zkouškách. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 4.3.

**Tab. 4.3 Stanovená brzdá dráha při jízdách zkouškách**

Poř. č. zk.	Rychlost $v_s$ [m.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost $v_p$ [m.s <sup>-1</sup> ]	Brzd. dráha $s_b$ [m]
1.	6,05	6,24	2,61
2.	5,43	5,20	1,94
3.	5,57	5,35	1,61
4.	8,52	8,18	3,64
5.	8,68	8,33	4,12
6.	8,69	8,34	4,56
7.	10,55	10,13	6,07
8.	11,12	10,68	7,65
9.	11,01	10,57	6,91
10.	12,76	12,25	9,55
11.	12,64	12,13	9,88
12.	12,26	11,77	8,80
13.	-----	-----	-----
14.	13,08	12,56	10,38
15.	13,50	12,96	12,66
16.	13,84	13,29	12,16
17.	13,89	13,33	13,95

*Pozn.: Při jízdě zkoušce s pořadovým číslem třináct nebylo provedeno korektní měření a zkouška byla opakována. Z tohoto důvodu nejsou v tabulce v příslušném řádku poznamenány žádné údaje.*

## 5. Porovnání výsledků brzdné dráhy získané numerickým řešením a experimentálním měřením

Brzdná dráha vozidla, stanovená numerickým řešením, byla pro účely porovnání stanovena za pomoci vztahu (2-18). Součinitel adheze v podélném směru, s ohledem na charakter povrchu zkušební dráhy, byl odhadnut na základě údajů uvedených v Tab. 1.1 na hodnotu 1,0 a součinitel adheze v příčném směru byl odhadnut na hodnotu 0,9.

Zkušební vozidlo bylo vybaveno kapalinovými brzdami a z tohoto důvodu byla stanovena v souladu s údaji uvedenými v literatuře [4] doba prodlevy brzd 0,075 s a doba náběhu brzdění 0,2 s (jedná se o střední hodnoty z rozsahů uvedených v literatuře). Při numerickém řešení bylo uvažováno, že vozidlo se během doby prodlevy a náběhu brzd pohybuje konstantní počáteční rychlostí. Při numerickém řešení brzdné dráhy nebyla uvažována dráha ujetá během reakční doby řidiče a to z důvodu, kdy řidič po

**Tab. 5.1 Vyhodnocení brzdné dráhy**

Poč. rychlost [km.hod. <sup>-1</sup> ]	Numericky řešená $s_b$ [m]	Experimentálně zjištěná $s_b$ [m]	Rozdíl [m]
21,8	2,24	2,43	-0,13
19,53	1,83	1,94	-0,11
20,05	1,92	1,61	0,31
30,66	4,3	3,64	0,66
31,25	4,46	4,12	0,34
31,28	4,47	4,56	-0,09
37,98	6,67	6,07	0,6
40,02	7,48	7,654	-0,174
39,62	7,32	6,91	0,41
45,92	10,56	9,55	1,01
45,51	10,29	9,88	0,41
44,15	9,48	8,8	0,68
47,09	11,4	10,38	1,02
48,57	12,73	12,66	0,07
49,82	14,43	12,16	2,27
50,02	14,86	13,95	0,91

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 59 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

dosažení požadované rychlosti a současně požadované trajektorie, bez vnějšího podnětu, sám o své vůli zahájil brzdění.

Údaje o numericky řešené brzdné dráze a brzdné dráze zjištěné během jízdních zkoušek byly zaznamenány do Tab. 5.1.

Z údajů uvedených v Tab. 5.1 vyplývá, že brzdná dráha řešená numericky není v žádném z uvedených případů totožná s brzdnou dráhou zjištěnou při jízdních zkouškách. Tato skutečnost se dala předpokládat již před provedením porovnání. Hlavní důvody uvedených rozdílů jsou následující:

- hodnoty součinitele adheze v podélném a příčném směru byly pouze odhadnuty na základě subjektivního pozorování povrchu zkušební dráhy v souladu s údaji uvedenými v Tab. 1.1, pro objektivnost by měly být součinitele adheze zjištěny postupem uvedeným v kap. 3.1, současně je nutno poznamenat, že povrch zkušební dráhy nebyl jednoduše tvořen cementovým povrchem, ale dráha byla tvořena panely mezi nimiž byly spáry, zaláty asfaltovou hmotou,
- při numerickém řešení brzdné dráhy bylo uvažováno, že se vozidlo pohybovalo po konstantním poloměru oblouku, konkrétně podélná osa vozidla se pohybovala po oblouku o poloměru 20 m, v průběhu prováděných zkoušek bylo pro řidiče zkušební vozidla však obtížné dosáhnout toho, aby se vozidlo během každé z jízdních zkoušek pohybovalo ve stejné vzdálenosti od vyznačené hranice kružnice a to zejména při vyšších rychlostech ( $45 \text{ km.hod.}^{-1}$  a  $50 \text{ km.hod.}^{-1}$ ),
- výsledky numericky řešené brzdné dráhy do značné míry ovlivňuje i skutečnost, kdy jako doba prodlevy brzd a doba náběhu brzd byla zvolena střední hodnota z rozsahu těchto dob uvedených v literatuře [4],
- během jízdních zkoušek nebylo možno zajistit, aby řidič vyvíjel při každém brzdění totožnou sílu na brzdový pedál, tato skutečnost tak též značně ovlivňuje délku brzdné dráhy zjištěnou během jízdních zkoušek,
- samotné vyhodnocení naměřených dat do jisté míry ovlivňuje délku stanovené brzdné dráhy, neboť nebyla známa poloha těžiště vozidla a výpočet se tak vztahoval k podélné ose vozidla.

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana - 60 -
Dopravní fakulta Jana Pernera		

Ačkoliv výše uvedené důvody do jisté míry ovlivňují délky brzdných drah vozidla zjištěné během jízdních zkoušek i numerickým řešením, přesto se navzájem diametrálně neliší.

Nelze však učinit objektivní závěr, zda se brzdné dráhy od sebe významně neliší či nikoliv, neboť s ohledem na ekonomickou, časovou a logistickou náročnost provádění měření při jízdních zkouškách, byl proveden relativně malý počet měření a pouze u oblouku jednoho poloměru. Pokud by měly být učiněny objektivní závěry, bylo by nutné provést více měření pro větší rozsah počátečních rychlostí a dále i pro více poloměrů oblouku. Dále by bylo nutné zjistit polohu těžiště vozidla, zjistit skutečnou dobu prodlevy a náběhu brzd pro dané vozidlo, zajistit působení konstantní síly na brzdný pedál apod., což s ohledem na předem stanovený rozsah této práce nebylo možné.

Je však nutné podotknout, že přes výše uvedené nedostatky, provedené porovnání zcela dostačuje pro splnění cíle této práce.

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 61 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

## **Závěr**

Cílem práce bylo provést analýzu brzdění vozidla v obecném směrovém oblouku a současně ověřit, zda brzdná dráha vozidla určená na základě provedené analýzy za použití výpočetní techniky, odpovídá brzdné dráze vozidla v reálných podmínkách. Daný cíl práce byl zvolen z důvodu zrychlení a zefektivnění prvotní analýzy nehodového děje Policií České republiky při vyšetřování dopravních nehod a též z důvodu kdy brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku je v odborné literatuře uváděno zřídka.

Pro dosažení cíle práce byla provedena analýza brzdění v obecném směrovém oblouku. Byly určeny síly, které na vozidlo v průběhu procesu brzdění působí v příčném a podélném směru. Následně byly na základě působících sil odvozeny vztahy pro výpočet mezní rychlosti vozidla v daném oblouku, adhezně nejvýše přípustného zpomalení a brzdné dráhy. Vztahy pro výpočet brzdné dráhy byly určeny pro mezní případ, tedy pro nejkratší možnou brzdnou dráhu z počáteční rychlosti vozidla, za předpokladu rozložení brzdných sil na kola vozidla úměrně jejich radiálnímu zatížení a tedy i schopnosti přenášet brzdnou sílu.

Aby mohl být učiněn závěr, zda stanovená brzdná dráha na základě provedené analýzy odpovídá brzdné dráze vozidla v reálných podmínkách, bylo třeba provést jízdní zkoušky brzdění vozidla v oblouku. Za tímto účelem byla vypracována obecná metodika pro provádění zkoušek brzdné dráhy vozidla v rovinném oblouku. Dle obecné metodiky a samostatně zpracovaného podrobného programu zkoušek byly provedeny jízdní zkoušky v areálu Letiště Hradec Králové. Byl sestaven postup pro určení brzdné dráhy vozidla z velikosti vektoru výsledné rychlosti zaznamenaného měření.

Následně byly brzdné dráhy určené na základě numerického řešení dle provedené analýzy a brzdné dráhy zjištěné během jízdních zkoušek porovnány, přičemž byl zjištěn mezi těmito drahami jistý rozdíl, který však bylo možno předpokládat s ohledem na množství faktorů, které měření i výpočet brzdné dráhy ovlivnily.

Přesto lze konstatovat, že stanovený cíl této práce se podařilo splnit, neboť bylo prokázáno, že brzdné dráhy se od sebe výrazně neliší, což z hlediska činnosti policejních orgánů při prvotním šetření na místě dopravní nehody je zcela dostatečné pro zjišťování stop vzniklých v souvislosti s nehodovým dějem.

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana - 62 -
Dopravní fakulta Jana Pernera		

Výpočtový algoritmus sestavený pro účely této práce by ve stávající verzi, s případným doplněním o různá rozšíření, která by přinesla detailnější řešení dané problematiky, mohl být použit jako pomůcka pro orgány činné v trestním řízení k objasňování příčin dopravních nehod, ke kterým došlo v souvislosti s brzděním vozidla v obecném směrovém oblouku.

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana	- 63 -
Dopravní fakulta Jana Pernera			

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BRADÁČ, A. *Soudní inženýrství*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999. ISBN 80-7204-057-X.
- [2] Cibere, R. *Porovnání jízdní brzdné zkoušky a zkoušky na válcové zkušebně*, [Bakalářská práce], Pardubice, 2008 Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [3] CZUDKOVÁ, L. *Fyzika a dopravní nehody*. Brno: Přírodovědecká fakulta MU. Dostupné na: <<http://sf.zcu.cz/rocnik06/cislo04/nehody.html>>.
- [4] ČERVINKA, P. *Návrh metodiky zjišťování součinitele odporu vzduchu z dojezdové zkoušky*, [Diplomová práce], Pardubice, 2008, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [5] GRAJA, M. *Měřicí systém* [přednášky], Pardubice, 2007 Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [6] GRAJA, M. *Program zkoušky* [přednášky], Pardubice, 2007 Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [7] HALASKOVÁ, J.; VOJTĚŠEK, A. Stanovení brzdné dráhy vozidel za různých podmínek [online]. Dostupné na: <[http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/Sekce\\_2.3/Halaskova\\_Jaroslava\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/Sekce_2.3/Halaskova_Jaroslava_CL.pdf)>.
- [8] PANÁČEK, V. *Problematika znalecké analýzy jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku* [online]. 2008. Dostupné na: <[http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008\\_sekce/pdf/7/Panacek\\_Vladimir\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/7/Panacek_Vladimir_CL.pdf)>.
- [9] POKORNÝ, J. *03-PCWorld Edition – MS Excel a práce se vzorci*. Brno: UNIS Publishing, 2001. ISBN 80-86097-56-0.
- [10] VALA, M.; TESAŘ, M. *Teorie a konstrukce silničních vozidel I, 1. vyd.* Pardubice: Univerzita Pardubice, 2002. 229 s. ISBN 80-7194-503-X.
- [11] VLK, F. *Dynamika motorových vozidel*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2005. 432 s. ISBN 80-239-0024-2.
- [12] VLK, F. *Úlohy z dynamiky motorových vozidel*. Brno: Nakladatelství a zasilatelství VLK, 2001. ISBN 80-238-6574-9.
- [13] 71/320/EHS *Směrnice rady o sblížení právních předpisů členských států týkající se brzdových zařízení a určitých kategorií motorových vozidel a jejich přípojných vozidel*.

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana - 64 -
Dopravní fakulta Jana Pernera		

## Seznam obrázků

- Obr. 1.1 Síly působící na brzdící vozidlo [10]
- Obr. 1.2 Adhezní elipsa [1]
- Obr. 1.3 Mezní situace využití adheze [1]
- Obr. 1.4 Zjednodušený průběh brzdné síly a zpomalení jako funkce dráhy při brzdění [10]
- Obr. 2.1 Odstředivá síla působící na vozidlo [1]
- Obr. 2.2 Síly působící na vozidlo jedoucí po prostorovém vrcholovém oblouku [1]
- Obr. 3.1 Dialogové okno výpočtového algoritmu pro řešení brzdné dráhy
- Obr. 4.1 Letecký snímek zkušební dráhy na letišti v Hradci Králové
- Obr. 4.2 Zkušební vozidlo ŠKODA Roomster
- Obr. 4.3 Uchycení snímače Correvit S-CE
- Obr. 4.4 Umístění snímače Correvit S-CE na zkušebním vozidle



Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana - 65 -
Dopravní fakulta Jana Pernera		

## Seznam tabulek

Tab. 1.1 Součinitel adheze na různém povrchu [1]

Tab. 1.2 Reakční doba řidiče [2]

Tab. 3.1 Vypočtená brzdná dráha vozidla pro poloměr oblouku  $R=30\text{m}$

Tab. 3.2 Vypočtená brzdná dráha vozidla pro poloměr oblouku  $R=150\text{m}$

Tab. 3.3 Brzdná dráha vozidla při součiniteli adheze  $\mu_x=0,1$  pro různé poloměry oblouku a různé úhly příčného sklonu

Tab. 3.4 Brzdná dráha vozidla při součiniteli adheze  $\mu_x=1,0$  pro různé poloměry oblouku a různé úhly příčného sklonu

Tab. 4.1 Přehled naměřených teplot brzdových kotoučů

Tab. 4.2 Protokol o měření

Tab. 4.3 Stanovená brzdná dráha při jízdách zkouškách

Tab. 5.1 Vyhodnocení brzdné dráhy

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana - 66 -
Dopravní fakulta Jana Pernera		

## Seznam grafů

Graf 3.1 Závislost délky brzdné dráhy na počáteční rychlosti pro poloměr oblouku  $R=30\text{m}$

Graf 3.2 Závislost délky brzdné dráhy na počáteční rychlosti pro poloměr oblouku  $R=150\text{ m}$

Graf 3.3 Závislost brzdné dráhy na příčném sklonu  $\beta$  pro  $\mu=0,1$

Graf 3.4 Závislost brzdné dráhy na příčném sklonu  $\beta$  pro  $\mu=1,0$

Univerzita Pardubice	<b>Diplomová práce</b>	Strana - 67 -
Dopravní fakulta Jana Pernera		

## Seznam příloh

- Příloha I** - Numericky stanovená brzdná dráhy vozidla v oblouku konstantního poloměru pro různé součinitele adheze,
- Příloha II** - Numericky stanovená brzdná dráha vozidla v závislosti na poloměru oblouku a příčném sklonu,
- Příloha III** - Program zkoušky,
- Příloha IV** - Grafy průběhu poklesu rychlosti a stanovené brzdné dráhy během jízdních zkoušek v závislosti na čase.