



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
INSTITUTE OF FORENSIC ENGINEERING

# PROBLEMATIKA ZNALECKÉ ANALÝZY JÍZDY A BRZDĚNÍ VOZIDLA V OBECNÉM PROSTOROVÉM OBLOUKU PŘI RYCHLOSTECH VYŠŠÍCH NEŽ 50 KM/H

PROBLEMS OF THE EXPERT ANALYSIS OF THE VEHICLE MOVEMENT AND BRAKING ACTION  
IN GENERAL SPATIAL CURVE AT SPEED HIGHER THAN 50 KPH

DIZERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. VLADIMÍR PANÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. ALEŠ VÉMOLA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství

Akademický rok: 2014/15

## ZADÁNÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

student(ka): Ing. Vladimír Panáček

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

obor: **Soudní inženýrství (3917V001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma dizertační práce:

### **Problematika znalecké analýzy jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku při rychlostech vyšších než 50 km/h**

v anglickém jazyce:

### **Problems of the Expert Analysis of the Vehicle Movement and Braking Action in General Spatial Curve at Speed Higher than 50 km/h**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Dizertační práce se bude zabývat problematikou znalecké analýzy jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku při rychlostech vyšších než 50 km/h při současném zkoumání vlivu elektronického stabilizačního systému podvozku na jízdní dynamiku vozidla. V práci budou uvedeny možnosti řešení uvedené problematiky vycházející z klasických analytických metod, experimentálních měření a s využitím počítačových simulačních programů používaných ve znalecké praxi.

Cíle dizertační práce:

1. Vyšetřit vzájemný vztah mezi mezní rychlostí vozidla v oblouku stanovenou analytickým výpočtem a experimentálně zjištěnou rychlostí vozidla v oblouku měřením parametrů jízdní dynamiky vozidla vybaveného elektronickým stabilizačním systémem.
2. Zjistit vliv vybraných elektronických stabilizačních systémů podvozku na pohyb vozidla ve vyšetřovaném ději v oblouku.
3. Stanovit rozsah vstupních údajů podstatných veličin výpočtových modelů ESP simulačních programů odpovídající výsledkům experimentálních měření u vozidel vybavených elektronickými stabilizačními systémy.

Seznam odborné literatury:

[1] BRADÁČ, A.: Soudní inženýrství. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 1999. ISBN 80-7204-057-X.

[2] BURG, Heinz, RAU, Hartmut. Handbuch der Verkehrsunfall-Rekonstruktion, Verlag INFORMATION Ambs GmbH, Kippenheim: 1981. ISBN 3 88550 020 5.

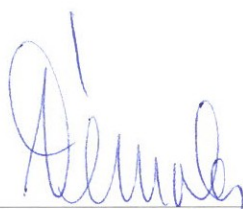
[3] BURG, Heinz, MOSER, Andreas. Handbuch Verkehrsunfall-rekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation. 1. vyd. Wiesbaden: Vieweg Teubner, 2007. 952 s. ISBN 978-3-8348-0172-2.

[4] VÉMOLA, A.: Problematika znalecké analýzy jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku, disertační práce. Brno: VUT v Brně, ÚSI. 2005.

Vedoucí dizertační práce: doc. Ing. Aleš Vémola, Ph.D.

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

V Brně, dne 5. 1. 2015



---

doc. Ing. Aleš Vémola, Ph.D.  
ředitel vysokoškolského ústavu

## **Abstrakt**

Současný aparát pro technickou analýzu silničních nehod neobsahuje žádné ucelené informace, doporučení či postupy, jakým způsobem komplexně vyřešit analýzu silniční nehody za účasti vozidla vybaveného stabilizačním systémem jízdní dynamiky. Problémem při vyšetřování pohybu vozidla v oblouku je neznalost míry ovlivnění jízdní dynamiky vozidla zásahem elektronického stabilizačního systému. Některé počítačové simulační programy používané při analýze silničních nehod sice umožňují zohlednit modelovaný pohyb vozidla s vlivem stabilizačního systému ve zkoumaném ději, ale není znalecké oblasti známo, jaké parametry je třeba ve vytvořených numerických modelech stabilizačního systému v počítačovém programu zadat.

Proto dizertační práce vyšetřuje problematiku znalecké analýzy jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku při rychlostech vyšších než 50 km/h při současném zkoumání vlivu elektronického stabilizačního systému podvozku na jízdní dynamiku vozidla. Zpracování práce se nejprve věnuje jednak řešením vycházejícím z klasických analytických metod, dále pak experimentálním měřením v reálných podmínkách na zkušebních polygonech a závěrem také využitím počítačových simulačních programů ve znalecké praxi. Nicméně je však třeba si uvědomit, že žádný počítačový simulační program není stoprocentním jednoznačným řešitelem a nestačí pouze vygenerovat počítačovou simulaci, ale je nezbytné technicky posoudit a zdůvodnit takovýmto způsobem získané výsledky. Pro práci analytika silničních nehod je nezbytné znát míru vlivu elektronických stabilizačních systémů vozidla na jeho pohyb.

Dizertační práce vyšetřila vzájemný vztah mezi mezní rychlostí vozidla v oblouku stanovenou analytickým výpočtem a experimentálně zjištěnou rychlostí vozidla v oblouku měřením parametrů jízdní dynamiky vozidla vybaveného elektronickým stabilizačním systémem. Jízdními experimenty byl zjištěn a kvantifikován vliv vybraných elektronických stabilizačních systémů podvozku na pohyb vozidla ve vyšetřovaném ději v oblouku. Závěrem práce byly nalezeny vstupní hodnoty podstatných veličin výpočtových modelů ESP simulačních programů odpovídající výsledkům experimentálních měření v definovaných obloucích u vozidel vybavených elektronickými stabilizačními systémy. Výsledky této práce mohou být využity jak při znalecké tak i pedagogické činnosti.

## **Klíčová slova**

Vozidlo, oblouk, jízda, brzdění, adheze, ESP.



## **Abstract**

The present apparatus for the technical analysis of road accidents has no well-integrated information, recommendations or procedures of how to solve comprehensively the analysis of road accidents involving vehicles equipped with stabilization system of driving dynamics. The problem in the investigation of a vehicle movement in a curve is the ignorance of the contributions of vehicle dynamics intervention of the electronic stability system. Although some of the simulation software used in the analysis of road accidents makes it possible to take into account the modelled vehicle movement impacted by a stabilization system in the examined process, but the experts do not know what parameters should be entered in the numerical models of stabilization system in a computer programme.

Therefore, the thesis investigates the issue of the expert analysis of vehicle riding and braking in a general spatial curve at speeds exceeding 50 kph with simultaneous examining the impact of electronic stability system chassis on vehicle driving dynamics. The thesis first deals with the solutions based on classical analytical methods, then dwells on experimental measurements in real conditions on testing grounds and, finally, addresses the use of computer simulation software in expert practice. Nevertheless, it is important to realize that no computer simulation software can be an absolutely unambiguous solver, and it is not enough to generate a computer simulation, but so obtained results should be evaluated and justified technically. Road accident analyst needs to know the impact of vehicle electronic stability control systems on vehicle movement.

The thesis investigated the mutual relationship between the vehicle speed limit in a curve specified by analytical calculation and the vehicle speed in a curve experimentally detected by measuring the parameters of driving dynamics of a vehicle equipped with electronic stability system. The impact of selected electronic stability control systems of the chassis on the vehicle movement in the investigated processes in the curve was detected and quantified by driving experiments. Finally, the input values of significant quantities of computational models of the ESP simulation programs were found consistent with the results of experimental measurements in defined curves for the vehicles equipped with electronic stability systems. The results of the thesis can be used both in the expert and in the teaching activities.

## **Key words**

Vehicle, curve, driving, braking, adhesion, ESP.

### **Bibliografická citace**

PANÁČEK, V. *Problematika znalecké analýzy jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku při rychlostech vyšších než 50 km/h*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2015. 187 s. textu, 152 s. příloh. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Aleš Vémola, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto dizertační práci na téma *Problematika znalecké analýzy jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku při rychlostech vyšších než 50 km/h* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Brně dne 27.02.2015.

.....  
Ing. Vladimír Panáček

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat předně vedoucímu této práce panu doc. Ing. Aleši Vémolovi, Ph.D. za metodické a pedagogické vedení, podporu při rozsáhlých experimentálních měřeních, jeho cenné rady, postřehy a připomínky při zpracování této dizertační práce. Za odborné konzultace a účinnou aktivní pomoc při experimentálních měřeních tímto děkuji panu Ing. Bc. Marku Semelovi, Ph.D. Zvláštní poděkování patří panu prof. Ing. Albertu Bradáčovi, DrSc. za ochotu tuto práci prostudovat a poskytnout cenné rady a připomínky.

Dále rovněž děkuji svým kolegům z Ústavu soudního inženýrství VUT v Brně, bez jejichž účinné pomoci by uskutečněná měření v rámci této práce nemohla proběhnout.

Závěrečné poděkování patří společnosti Škoda Auto a.s. a společnosti DSD - Dr. Steffan Datentechnik Ges.m.b.H. za možnost využití polygonu pro uskutečněná experimentální měření.

# Obsah

<b>1 Vymezení problémové situace</b>	<b>11</b>
<b>2 Formulace problému</b>	<b>13</b>
<b>3 Formulace cílů dizertační práce</b>	<b>13</b>
<b>4 Současný stav řešené problematiky, rešeršní studie</b>	<b>14</b>
4.1 Dynamika pohybu vozidla v oblouku a při příčném přemístění	14
4.2 Studie vlivu asistenčních systémů na jízdní dynamiku vozidla i na řidiče	21
4.3 Asistenční systémy vozidla	23
4.3.1 Protiblokovací systém	25
4.3.2 Elektronický stabilizační systém jízdní dynamiky vozidla	28
4.4 Projektování oblouků na pozemních komunikacích	32
<b>5 Definování systému podstatných veličin ve vyšetřovaném ději</b>	<b>34</b>
<b>6 Metody k dosažení stanovených cílů</b>	<b>35</b>
6.1 Analytický přístup k vyšetřovanému pohybu vozidla v oblouku	36
6.2 Experimentální měření	40
6.2.1 Experimentální měření na letišti Vyškov	42
6.2.1.1 Metodika jízdních zkoušek v oblouku	42
6.2.1.2 Měřený objekt - vozidlo VW Golf	44
6.2.1.3 Měřicí přístroje	47
6.2.1.4 Měřicí plocha - letiště Vyškov	50
6.2.1.5 Provedená a analyzovaná experimentální měření	51
6.2.1.6 Vyhodnocení provedených experimentálních měření na letišti Vyškov	67
6.2.2 Experimentální měření na polygonu společnosti Škoda Auto a.s.	68
6.2.2.1 Analýza příčného přemístění vozidla Škoda Superb II dvěma oblouky	69
6.2.2.1.1 Měřený objekt - vozidlo Škoda Superb II	69
6.2.2.1.2 Měřicí přístroje	69
6.2.2.1.3 Měřicí plocha - parametry polygonu	71
6.2.2.1.4 Provedená a analyzovaná experimentální měření	73
6.2.2.1.5 Vyhodnocení provedených experimentálních měření příčného přemístění oblouky	81
6.2.2.2 Analýza pohybu vozidla Škoda Octavia II v rovinném oblouku - kruhové zkoušky	82
6.2.2.2.1 Měřený objekt - vozidlo Škoda Octavia II	82
6.2.2.2.2 Měřicí přístroje	83
6.2.2.2.3 Měřicí plocha - točna polygonu	83
6.2.2.2.4 Provedená a analyzovaná experimentální měření - kruhové zkoušky	85
6.2.2.2.5 Shrnutí výsledků a vyhodnocení provedených kruhových zkoušek	110
6.2.3 Experimentální měření na polygonu společnosti DSD v Rakousku	112
6.2.3.1 Měřený objekt - vozidlo Volvo V40 T5 AWD Cross Country	112

6.2.3.2 Měřicí přístroje a záznamová technika	115
6.2.3.3 Měřicí plocha - polygon DSD	118
6.2.3.4 Analýza experimentálních měření parametrů jízdní dynamiky v oblouku	125
6.2.3.4.1 Jízda a brzdění vozidla Volvo v oblouku o poloměru 30 m	125
6.2.3.4.2 Jízda a brzdění vozidla Volvo v oblouku o poloměru 40 m	130
6.2.3.4.3 Jízda a brzdění vozidla Volvo v oblouku o poloměru 50 m	134
6.2.3.5 Kruhové zkoušky provedené s vozidlem Volvo	137
6.2.3.6 Příčné přemístění dvěma oblouky s vozidlem Volvo s DSTC "N"	139
6.2.3.7 Shrnutí výsledků a vyhodnocení provedených jízd a brzdění vozidla v oblouku	140
<b>6.3 Simulační modelování pohybu vozidla ve vyšetřovaném ději v oblouku</b>	<b>142</b>
6.3.1 Simulační modelování v počítačovém programu Virtual Crash verze 3.0	144
6.3.1.1 Simulační modelování pohybu vozidla v oblouku o poloměru 30 m	145
6.3.1.2 Simulační modelování pohybu vozidla v oblouku o poloměru 40 m	150
6.3.1.3 Simulační modelování pohybu vozidla v oblouku o poloměru 50 m	155
6.3.2 Simulační modelování v počítačovém programu PC-Crash verze 9.1	159
6.3.2.1 Simulační modelování pohybu vozidla v oblouku o poloměru 30 m	160
6.3.2.2 Simulační modelování pohybu vozidla v oblouku o poloměru 40 m	163
6.3.2.3 Simulační modelování pohybu vozidla v oblouku o poloměru 50 m	166
6.3.3 Shrnutí a vyhodnocení výsledků simulačního modelování	169
<b>7 Závěr a přínos práce pro vědní obor Soudní inženýrství</b>	<b>171</b>
Seznam použitých zdrojů	175
Seznam obrázků	179
Seznam tabulek	184
Seznam vybraných zkratk a symbolů	185
Seznam příloh	187

# 1 Vymezení problémové situace

Název tématu napovídá, že se dizertační práce zabývá dílčí problematikou velmi úzce související se znaleckou činností, resp. technickou analýzou silničních nehod. Provedení komplexní analýzy nehodového děje vyžaduje nejen svědomitý přístup řešitele (znalce) či aplikaci nejmodernějších metod a postupů, ale je také třeba při hledání technicky přijatelného řešení vycházet především ze správných a co nejpřesnějších vstupních údajů pro výpočet ať již ryze analytický či s podporou numerických metod. Zohlednění těchto kritérií klade vysoké nároky na zpracovatele znaleckých posudků, ale pouze tak může vzniknout posudek na vysoké odborné úrovni.

Dynamika pohybu vozidla spoluvytváří základní aparát při technické analýze silničních nehod. S komplexním rozbohem pohybu vozidla v obecném prostorovém oblouku se v odborné literatuře setkáme jen zřídka. Převážná většina publikací se zabývá pouze zkoumáním pohybu vozidla v přímém směru, což také dodalo podnět k podrobnějšímu zpracování problematiky jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku.

V současné době se v řadě oblastí a odvětví úspěšně rozšiřuje zavádění počítačových programů a jinak tomu není ani v oborech znalecké činnosti. V technické analýze silničních nehod se s velkým rozmachem využívají počítačové simulační programy, které vedle běžných analytických metod vytvářejí další styčnou rovinu pro podporu řešení problematiky silničních nehod. Výhody počítačové simulace spočívají nejen v časové efektivitě zpracovávané analýzy, ale především v přesnosti řešení vyšetřovaného nehodového děje, kterou zajišťuje např. možnost editace parametrů modelu vozidla či vozovky s cílem přiblížení se skutečným vlastnostem a stavu při konkrétní jízdě situaci. Běžnými analytickými metodami využívanými při analýze silničních nehod lze jen stěží zohlednit veškeré dynamické účinky působící na vozidlo. Například při jízdě vozidla rovinnou zatáčkou dochází vlivem jeho klonění k dynamickému přetížení vnějších, resp. odlehčení vnitřních kol (uvažováno od středu zatáčky) a v případě, že řidič takto pohybujícího se vozidla započne na vzniklou dopravní situaci reagovat brzděním, pak navíc dochází vlivem klonění vozidla k dynamickému přetížení přední, resp. odlehčení zadní nápravy. Mezi výhody použití počítačové simulace při řešení nehodového děje patří mj. i možnost velmi rychle provést opakovaný výpočet při změně vstupních parametrů analýzy, což lze při analytickém výpočtu často jen stěží zohlednit. Na směrovou stabilitu vozidla má také vliv jeho tuhost odpružení, tlumení, charakteristiky

použitých pneumatik, stav vozovky a v neposlední řadě technický stav podvozkových skupin vozidla.

Při dnešní produkci moderních vozidel je kladen velký důraz zejména na bezpečnost a efektivitu provozu (legislativní požadavky), ale také na jízdní pohodlí. Tyto aspekty vedou k zavádění tzv. asistenčních (podpůrných) elektronických systémů vozidla, které pomáhají řidiči při jeho ovládní. Mezi podpůrné systémy vozidla z hlediska bezpečnosti patří mj. i elektronické stabilizační systémy jízdní dynamiky. Popis jízdní dynamiky a následná analýza silniční nehody s účastí vozidla vybaveného elektronickým stabilizačním systémem, vypovídající o míře ovlivnění chování vozidla instalovanou elektronikou řídící podvozkové skupiny, je pro znaleckou i odbornou oblast neznámou kapitolou. Proto se tato dizertační práce podrobně věnuje zkoumání pohybu vozidla při jízdě a brzdění v oblouku při působícím vlivu elektronického stabilizačního systému na jízdní dynamiku vozidla.

V literatuře [1] prof. Janíček formuluje problémovou situaci jako určitou nestandardní situaci, která z objektivních či subjektivních důvodů vyžaduje řešení. Problémová situace směřuje na řešení problémů. Od standardní situace se problémová situace liší tím, že proces řešení není rutinní. Proto musí zpracovatel při problémové situaci využívat informační, hodnotící, rozhodovací a tvůrčí činnosti a s jejich využitím hledat odpovídající metody řešení této nestandardní situace. Řešení problémové situace souvisí primárně se stanovením množiny problémů a jejich následným řešením. Množinu problémů tvoří právě výroky spojené s řešením problémové situace.

V případě této dizertační práce lze jako problémovou situaci vymezit nutnost exaktního řešení silničních nehod vozidel vybavených elektronickými stabilizačními systémy jízdní dynamiky nejen s podporou počítačové simulace, ale i ověřením správnosti používaných analytických metod, počítačových modelů a technicky přijatelných vstupních hodnot pro počítačové simulace s cílem objektivního posouzení skutečného průběhu analyzované dopravní nehody.



## 2 Formulace problému

Problémem podle prof. Janíčka (viz [1]) můžeme označit situace či stavy objektu, jež není možné vyřešit rutinními činnostmi. Je v tomto případě vyžadováno uskutečnění tvůrčích, hodnotících, rozhodovacích, informačních a výkonných činností řešitele pro nalezení metod řešení.

Problémem při vyšetřování pohybu vozidla v oblouku je neznalost míry ovlivnění jízdní dynamiky vozidla zásahem elektronického stabilizačního systému. Některé počítačové simulační programy používané při analýze silničních nehod sice umožňují zohlednit modelovaný pohyb vozidla s vlivem stabilizačního systému ve zkoumaném ději, ale není znalecké oblasti známo, jaké parametry je třeba ve vytvořených numerických modelech stabilizačního systému v počítačovém programu zadat. Podstatné veličiny a zejména jejich zadané hodnoty užití při modelování jízdní dynamiky zásadním způsobem ovlivňují získaný výsledek. Podstatné veličiny pro řešení primárního problému je nutno následně definovat a jejich vliv kvantifikovat.

## 3 Formulace cílů dizertační práce

Tato dizertační práce vyšetřuje problematiku znalecké analýzy jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku při rychlostech vyšších než 50 km/h při současném zkoumání vlivu elektronického stabilizačního systému podvozku na jízdní dynamiku vozidla. Zpracování práce se nejprve věnuje jednak řešením vycházejícím z klasických analytických metod, dále pak experimentálními měřeními v reálných podmínkách na zkušebních polygonech a závěrem také využitím počítačových simulačních programů ve znalecké praxi. Význam dnes značně rozšířených počítačových simulačních programů, jakožto podpůrných pomůcek analytika silničních nehod, spočívá především v možnosti využití konkrétních skutečností a parametrů, které lze jen velice obtížně řešit ryze analyticky. Jako příklad vhodnosti použití počítačové simulace lze uvést možnost zahrnutí vlivu tuhosti odpružení náprav, volby výpočtového modelu pneumatik a neposlední řadě i stabilizačního systému podvozku do analýzy vyšetřovaného děje.

Nicméně je však třeba si uvědomit, že žádný počítačový simulační program není stoprocentním jednoznačným řešitelem a nestačí pouze vygenerovat počítačovou simulaci, ale je nezbytné technicky posoudit a zdůvodnit takovýmto způsobem získané výsledky.

Pro analytika silniční nehody je nezbytné znát míru vlivu elektronických stabilizačních systémů vozidla na jeho pohyb.

Na základě formulované problémové situace a problému lze formulovat i cíle této dizertační práce. Úkolem dizertační práce je:

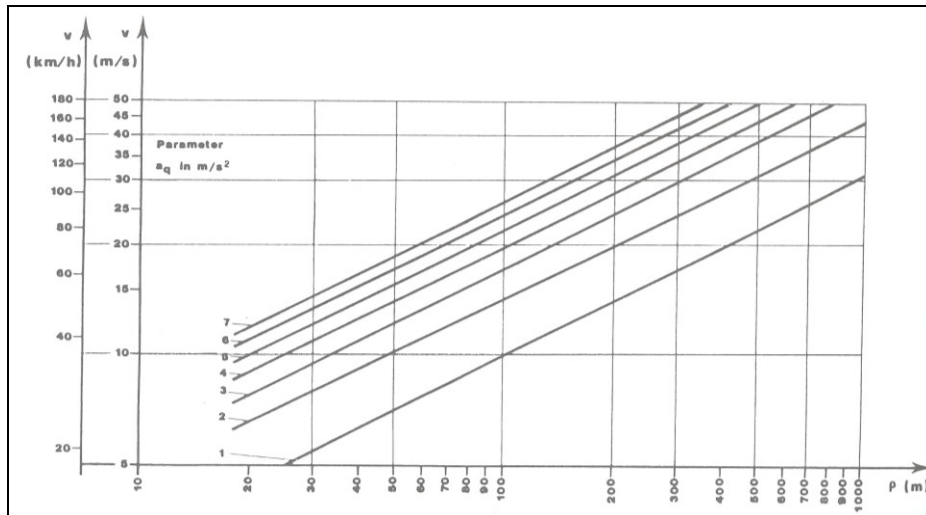
- Vyšetřit vzájemný vztah mezi mezní rychlostí vozidla v oblouku stanovenou analytickým výpočtem a experimentálně zjištěnou rychlostí vozidla v oblouku měřeními parametrů jízdní dynamiky vozidla vybaveného elektronickým stabilizačním systémem.
- Zjistit vliv vybraných elektronických stabilizačních systémů podvozku na pohyb vozidla ve vyšetřovaném ději v oblouku.
- Stanovit rozsah vstupních údajů podstatných veličin výpočtových modelů ESP simulačních programů odpovídající výsledkům experimentálních měření u vozidel vybavených elektronickými stabilizačními systémy.

## 4 Současný stav řešené problematiky, rešeršní studie

S ohledem na vymezenou problémovou situaci dizertační práce je tato kapitola rozdělena na tři související podkapitoly. První podkapitola se zabývá nejprve současným stavem poznání v oblasti dynamiky pohybu vozidla vycházejícím z prostudování dostupných zahraničních zdrojů, dále pak studiem tuzemských pramenů, které úzce souvisí s problematikou jízdy a brzdění vozidla v oblouku. Druhá podkapitola se zabývá studii vlivu asistenčních systémů na jízdní dynamiku vozidla i jeho řidiče. V třetí podkapitole jsou rozebrány asistenční systémy ovlivňující jízdní dynamiku dnešních moderních vozidel, které dnes vytvářejí jejich nedílnou a od roku 2012 u nově vyráběných osobních vozidel povinnou součást.

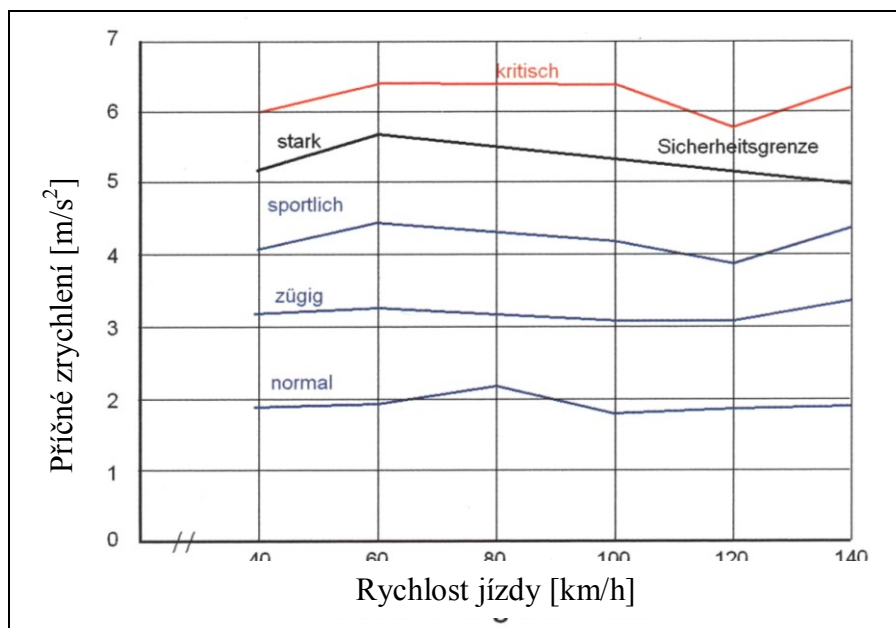
### 4.1 Dynamika pohybu vozidla v oblouku a při příčném přemístění

V literatuře [2] na straně 638 se renomovaní autoři věnují mezní rychlosti vozidla v oblouku, resp. v rovinné zatáčce. Je zde uveden graf (viz **Obr. 1**) závislosti rychlosti jízdy vozidla na poloměru zatáčky, ve kterém je vykresleno sedm přímků pro dostředivé zrychlení od 1 do 7 m/s<sup>2</sup>. Při známé hodnotě poloměru zatáčky a dostředivého zrychlení můžeme z **Obr. 1** snadno odečíst mezní rychlost vozidla v rovinné zatáčce, která je speciálním případem obecného prostorového oblouku.



**Obr. 1:** Závislosti rychlosti jízdy vozidla na poloměru oblouku při určitém dostředivém zrychlení [2]

Ve druhém rozšířeném vydání publikace [3] z roku 2009 na straně 132 (viz **Obr. 2**) uvádějí zahraniční autoři závislosti příčného zrychlení vozidla na rychlosti jízdy při různé dynamice pohybu vozidla. Z **Obr. 2** jsou zřejmá rozmezí hodnot příčného zrychlení vozidla rozdělená do pěti definovaných dynamických stavů (pohybů) vozidla. Při normální jízdě se pohybovalo využívané příčné zrychlení přibližně v rozmezí hodnot 2 až 3,1  $\text{m/s}^2$ , při rychlé jízdě pak v rozmezí cca 3,1 až 4,4  $\text{m/s}^2$ , při sportovní jízdě pak v rozmezí cca 4,0 až 5,7  $\text{m/s}^2$ , při razantním průjezdu v rozmezí cca 5,0 až 5,7  $\text{m/s}^2$ . Černá křivka na **Obr. 2** představuje hranici bezpečné jízdy vozidla obloukem. Při hodnotách v rozmezí 5,8 až 6,4  $\text{m/s}^2$  se jedná o kritickou jízdni situaci.



**Obr. 2:** Závislost příčného zrychlení na rychlosti jízdy vozidla [3], [4]

Na straně 144 literatury [3] je uvedena tabulka s definovaným dynamickým stavem pohybu vozidla a příslušným součinitelem adheze v příčném směru (viz **Tabulka 1**). Dále autoři v textu kapitoly 5.10.3 mj. uvádějí, že kritická hodnota (limit) součinitele adheze v příčném směru je 0,6, bezpečná hranice součinitele adheze v příčném směru se pohybuje okolo hodnoty 0,55. Uvedený **Obr. 2** a **Tabulka 1** jsou také obsahem literatury [4] z roku 2007 na straně 108, resp. 120.

**Tabulka 1:** Součinitele adheze v příčném směru v závislosti na pohybu vozidla [3], [4]

Jízdní stav (pohyb vozidla)	Součinitel adheze v příčném směru
Sportovní jízda	0,40 až 0,45
Rychlá jízda	0,30 až 0,35
Normální jízda	0,10 až 0,20

V článku [6] se jeho zpracovatelé věnují součinitelům adheze a poloměru oblouku v závislosti na dopravním proudu a jeho modelování, a to analyticky a numericky. Autoři představili model popisující pohyb vozidel jedoucích po vozovce v oblouku. Podmínka stability byla získána použitím kontrolních teorií. K verifikaci byly provedeny simulace s dobrou shodou. Součinitele adheze byly voleny od hodnot 0,2, 0,4, 0,6 po 0,8 a poloměry oblouku 30, 60, 90 a 120 m, celková dráha byla 800 m a simulace se zúčastnilo 200 vozidel. Pokud je poloměr oblouku konstantní, bezpečná rychlost jízdy se zvyšuje stejně jako součinitel adheze, takže rovněž tok vozidel je větší. Pokud je součinitel adheze konstantní, maximální proud vozidel je větší na silnicích s vyšším poloměrem oblouku. Závěrem bylo zjištěno, že amplituda rychlosti se zvyšuje se zvýšením poloměru oblouku a součinitele adheze.

Autoři se v článku [7] věnovali příčnému zrychlení při přímé jízdě a na testovaných vozidlech dospěli k závěrům, že hodnoty příčného zrychlení při přímé jízdě ani při vyšších rychlostech při přímé jízdě u dvoustopých vozidel nepřekročily  $0,5 \text{ m/s}^2$  (dáno korekcí volantů) s výjimkou testované tříkolky, kde překročily hodnoty až  $1 \text{ m/s}^2$ , při větších korekcích u tříkolky hodnoty dostaly až k  $3 \text{ m/s}^2$ . Autoři prokázali inverzní vztah mezi příčným zrychlením a rychlostí. Dále ukázali, že příčné zrychlení je vyšší u malých rychlostí, cca do  $5 \text{ m/s}$ . Úhel změny vektoru rychlosti byl nejvyšší  $4^\circ$  u tříkolky, u ostatních dvoustopých vozidel při přímé jízdě byl úhel do  $2^\circ$ . Dále autoři odkazují na studii [8] vztahu mezi podélnou složkou rychlosti a příčným zrychlením při jízdě v oblouku při normální jízdě,

kteře se zúčastnilo 50 řidičů na 227 zatáčkách. Výsledky ukázaly, že příčné zrychlení bylo inverzní funkcí rychlosti v oblouku, muži jeli rychleji než ženy a tedy využívali vyšší hodnoty zrychlení. Autoři článku [7] odkazují také na studii [9] z roku 2008, která se věnovala chování rychlosti a příčného zrychlení při kontrolované noční jízdě. Dvě proměnné hodnoty, tj. směr oblouku a horizontální poloměr oblouku, měly nejvyšší vliv na změnu polohy vozidla.

Článek [10] se věnuje mj. měření dynamických veličin a aplikaci na jednostopém modelu při průjezdu vozidla obloukem. Na několika příkladech ukazuje možné přístupy a výsledky, např. při poloměru oblouku 14 m dosahovalo vozidlo rychlosti cca 10 m/s (tj. 36 km/h) a příčného zrychlení v rozmezí 7,5 až 9 m/s<sup>2</sup>. Při jízdách slalomech bylo dosaženo mezních hodnot příčného zrychlení opět v rozmezí 8 až 10 m/s<sup>2</sup>.

Autoři se v článku [11] věnují problematice smykového tření v závislosti na výchozí rychlosti vozidla. Naměřená data ukázala hodnoty součinitele smykového tření při smyku z rychlostí 20, 40, 60 a 80 km/h při užití tří různých typů pneumatik. Brzděno bylo z výchozí rychlosti do zablokování kol. Zablokování prvního kola nastalo v čase cca 0,34 až 0,46 s. Hodnoty smykového tření při zablokovaných kolech klesaly s rostoucí rychlostí, ačkoliv rozdíly u rychlostí 60 a 80 km/h, nebyly statisticky významné. U smykového tření dosahovaly hodnoty 0,72 až 0,80 u smykových drah od 5 m výše, u krátké smykové dráhy byly hodnoty smykového tření vyšší, dosahovaly až k hodnotě 1,0. V článku jsou rovněž použity zdroje, které v minulosti potvrdily nelineární pokles hodnot smykového tření s rostoucí rychlostí. Obecně užívané hodnoty smykového tření mezi 0,6 až 0,8 článek s ohledem na jeho výzkumy považuje u výchozí rychlosti 20 km/h za podhodnocené o 9 až 21 %. Při vyšších rychlostech jízdy byla shledána obecně možná užívaná hodnota smykového tření cca 0,74 pro kombinaci smyku všech kol oproti dříve publikovaným hodnotám 0,55 až 0,70 u rychlostí přes 50 km/h. Použití dříve akceptovaných hodnot smykového tření by znamenalo zjištění výchozí rychlosti o 18 % nižší. U pneumatik typu „touring“ byly hodnoty nižší než u typů „economy“ a „performance“. Naměřená data z uvedeného článku však byla získána pouze pro jedno vozidlo Honda Accord z roku výroby 1991 bez systému ABS a pro tři použité sady pneumatik.

Článek [12] ukázal, že způsob jízdy obloukem závisí na zkušenostech řidičů. Data o chování ukazují, že regulace rychlosti a způsob řízení jsou ovlivněny dopředným plánováním trajektorie jízdy obloukem. Pokud se blíží řidič k oblouku, získává relevantní vizuální informace, vytváří potřebu odpoutání se od řízení pohledem před oblouk. S rostoucí

zkušeností řidičů může dojít k výraznému zvýšení periferního vizuálního vnímání. 18 řidičů jelo venkovskou silnicí čtyřikrát v obou směrech a jejich pohyb očí byl analyzován v šesti obloucích, byla zmapována trajektorie vozidla ve fázích jízdy obloukem. Zkušební řidiči strávili méně času pohledem na silnici před nimi a více času věnovali pohledu vpřed přes oblouk. Z výzkumu vyplynulo, že zkušební řidiči více času věnují plánování jízdy obloukem namísto bezprostředního sledování úseku silnice před vozidlem.

Autor v článku [13] prezentuje metodiku zjišťování bočních sil působících na pneumatiku. Metodika je založena na takzvaném rozšířeném Kalmanově filtru a zjišťuje boční síly na pneumatice na bázi výsledků získaných ze standardních jízdních manévřů. V článku je popsána experimentální část, model vozidla a vhodný srovnávací algoritmus. Model vozidla má čtyři stupně volnosti. Testovaná vozidla byla vybavena standardními snímači. Byly porovnávány parametry sil a skluzu při experimentech a s pomocí jednoduchého modelu vozidla a Kalmanova filtru. Boční zrychlení vozidla dosahovalo hodnot 9 až 10 m/s<sup>2</sup>.

Článek [14] popsal detailně významný vliv vodorovného značení na vizuální vnímání řidiče a volbu jeho trajektorie při jízdě v oblouku.

Zohlednění vlivu jednotlivých veličin vstupujících do řešení problematiky jízdy v oblouku popisuje literatura [15], přičemž výpočtové vztahy jsou uvedeny pouze pro speciální uvažované případy.

Vztahy pro výpočet mezní rychlosti vozidla v oblouku jsou bez grafického zobrazení uvedeny v literatuře [16]. Odvození vztahů publikováno nebylo. Autor mj. uvádí, že obvykle využívaný součinitel adheze při bezpečné jízdě obloukem lze orientačně odečíst z uvedeného obrázku, který zahrnuje i psychologické aspekty. Součinitele adheze za dobrých podmínek dosahují při rychlosti jízdy 50 až 60 km/h hodnoty 0,4 a za zhoršených podmínek 0,3.

Dalším speciálním případem, resp. dílčí variantou řešení chování vozidla v obecném prostorovém oblouku, s ohledem na vyšetřování mezní rychlosti, se zabývá literatura [17], resp. její kapitola 2.3.3. Jedná se zde o vyšetřování pohybu vozidla v rovinné zatáčce s příčným sklonem vozovky bez zahrnutí vlivu podélného sklonu vozovky a vertikálního zakřivení. Autoři v publikaci konstatují, že měření na osobních automobilech ukázala, že v zatáčkách s poloměrem větším než 30 m hodnota maximálně dosažitelného bočního součinitele smykového tření pneumatik nezávisí na rychlosti vozidla a poloměru zatáčky.

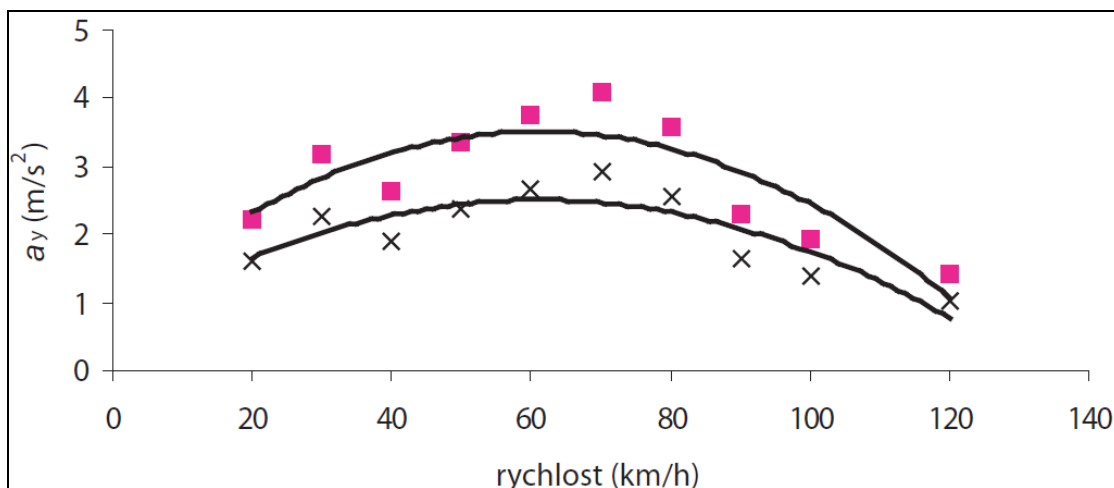
S různými vozidly, jejichž technické parametry však autoři neuvádí, byly změřeny následující hodnoty příčné adheze na hranici smyku: pro osobní automobily 0,75, pro sportovní automobily 0,90, pro závodní automobily 1,25.

V literatuře [18], kapitole 5.2.1, se autor věnuje jízdě v rovinné zatáčce při odvozování podmínek převrácení vozidla. Mezní rychlostí vozidla v souvislosti se ztrátou směrové stability se zde autor nezabývá.

Problematiku jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku výstižně předkládá literatura [19], resp. její kapitola 23.6, kde jsou na straně 375 mj. tabulkově uspořádány vztahy pro výpočet mezní rychlosti vozidla pro různé geometrické parametry vozovky. Vlastní odvození vztahů však autor neuvádí. Pojem mezní rychlost je zde definován jako taková rychlost, kdy vozidlo jede po horizontálním oblouku, případně včetně vertikálního, konstantní rychlostí při maximálním využití dostředivého zrychlení.

V publikaci [20] autor prezentuje výsledky měření jízdních manévrů vozidel, při kterých bylo simulováno vyhnutí vozidla překážce – tzv. vyhýbací manévr. Publikace analyzuje celkem 13 vyhýbacích manévrů. Testovaným vozidlem byla Škoda Octavia I 1,9 TDI ve výbavě Ambiente. Rekonstrukce pohybu vozidla byla provedena pro měření s příčným přemístěním od 2,6 m do 3,8 m v rozmezí rychlostí od 31 do 102 km/h s využitým příčným zrychlením v rozmezí od  $2,5 \text{ m/s}^2$  do  $7,5 \text{ m/s}^2$ . Na základě podrobné analýzy měření prokázal autor dobrou použitelnost tzv. Kovaříkova vzorce pro použití v praxi. Experimentální měření byla provedena mj. i jako součást práce v rámci projektu GAČR 103/00/0722-2000-2001.

Publikace [21] se podrobně věnuje analýze příčného přemístění vozidel při posuzování ve znalecké praxi. Autor prezentuje výsledky rozsáhlých měření příčného přemístění při extrémním manévru i při jízdě v běžném provozu. **Obr. 3** ukazuje závislost využívaného příčného zrychlení na rychlosti vozidla. Naměřené hodnoty příčného zrychlení vychází také ze závěrečných prací studentů v kurzech technického znalectví, a protože, jak autor uvádí, byly zjišťovány různými metodami, kdy ne vždy byla zajištěna přesnost provedeného měření, lze proto **Obr. 3** považovat pouze jako přibližné hodnoty příčného zrychlení.



**Obr. 3:** Závislost využitelného příčného zrychlení na rychlosti vozidla [21]

V práci [22] se její autor zabývá mj. měřením příčného zrychlení vozidel Mazda 323 F (r.v. 1995, výkon motoru 65 kW, pneumatiky značky Continental 185/65 R 14, hloubka dezénu 2,0 mm) a Škoda Octavia I (r.v. 1999, výkon motoru 75 kW, pneumatiky značky Matador 195/70 R 15, hloubka dezénu 6,0 mm). Měření příčného zrychlení byla s vozidly provedena v oblouku o poloměru 30 a 40 m na rovném asfaltovém povrchu. Celkem bylo provedeno 12 měření na suchém a 12 měření na mokřém povrchu vozovky. Průjezd každým obloukem byl s vozidlem opakován třikrát. Na suchém povrchu byly zjištěny hodnoty příčného zrychlení v rozmezí 2,4 až 5,9 m/s<sup>2</sup> pro poloměr oblouku 30 m a rychlosti jízdy od 30 do 50 km/h, pro poloměr oblouku 40 m a rychlosti jízdy od 40 do 60 km/h byly zjištěny hodnoty příčného zrychlení v rozmezí 2,5 až 5,8 m/s<sup>2</sup>. Autor uvádí, že při měření průjezdů obloukem o poloměru 40 m a rychlosti jízdy 60 km/h byla již „odstředivá síla znatelná“, a proto nebylo z bezpečnostních důvodů v měřeních pokračováno až na hranici adhezních možností vozidel. Na mokřém povrchu byly měření zjištěny hodnoty příčného zrychlení v rozmezí 2,9 až 6,8 m/s<sup>2</sup> pro poloměr oblouku 30 m a rychlosti jízdy od 30 do 50 km/h, pro poloměr oblouku 40 m a rychlosti jízdy od 40 do 60 km/h byly zjištěny hodnoty příčného zrychlení v rozmezí 4,6 až 7,5 m/s<sup>2</sup>. Autor uvádí, že při měření průjezdů obloukem o poloměru 40 m a rychlosti jízdy 60 km/h byla již „odstředivá síla znatelná“, vozidlo nedrželo jízdní směr a došlo ke smyku.

Přínosem pro oblast pohybu vozidla v obecném prostorovém oblouku je literatura [23] z roku 2005, která se detailně zabývá rozbořem uvedené problematiky, avšak bez zkoumání vlivu elektronických stabilizačních systémů podvozku působících na jízdní dynamiku moderního vozidla, který autor z pohledu soudního inženýrství trefně vymezil jako



„neprozkoumanou problematiku“. Provedená experimentální měření byla s ohledem na konstrukci zatáčky autodromu provedena pouze pro nižší rychlosti jízdy, přibližně jen do 50 km/h. V závěru práce autor mj. uvádí: „že pokud součinitel adheze nepřekročil hodnotu 0,45 a rychlost jízdy asi 50 km/h, byly hodnoty naměřeného bočního zrychlení úměrné adhezi. Při adhezi 0,6 a 0,7 byla hodnota dosažitelného bočního zrychlení při mezní rychlosti o něco nižší, než by odpovídalo stoprocentnímu využití v příčném směru“. Problémem, na který autor upozorňuje, je tzv. technicky přijatelné rozmezí vstupních hodnot. Uvádí se zde např. pro rozmezí součinitele využitelné adheze 0,6 až 0,7, pro horizontální poloměr zatáčky 53 m, výsledek mezní rychlosti 64 až 69 km/h, z čehož plyne střední hodnota mezní rychlosti  $66,5 \pm 2,5$  km/h. Obě rozmezí, tj. součinitele adheze a mezní rychlosti, jsou dosti úzká pro běžné posuzování ve znalecké v praxi.

## 4.2 Studie vlivu asistenčních systémů na jízdní dynamiku vozidla i na řidiče

Podle článku [24] je velká část dopravních nehod způsobena ztrátou kontroly nad vozidlem. Elektronické systémy pomáhají řidiči udržovat kontrolu nad vozidlem, nebo ji znovu získat. Článek představil empirickou studii na jízdním simulátoru „*National Advanced Driving Simulator*“ se dvěma vozidly. Vizuální systém simulátoru se skládal z 15 monitorů, pokrýval horizontální rozsah  $360^\circ$  a vertikální rozsah  $39^\circ$ , včetně zpětných zrcátek. Zkoušek se účastnilo 120 testovacích jezdců a testy ukázaly významné snížení ztráty jízdní kontroly, a to u obvyklých kritických situací. Průběh testu byl takový, že testovanému řidiči do jízdní dráhy neočekávaně vjelo zprava kolmo k jeho směru jízdy jiné vozidlo a řidič provedl vyhybací manévř částečně protisměrným jízdním pruhem. Dalším scénářem byl sjezd z dálnice rychlostí 55 MPH a po krátkém rovném úseku následoval oblouk ve tvaru písmene U. Dalším scénářem byl prudký závan bočního větru zleva při přímé jízdě.

Studie [25] udělala průzkum u 2000 řidičů, z nichž polovina užívala vozidla vybavená stabilizačním systémem a druhá polovina nikoliv. Hlavním cílem bylo zjistit vliv stabilizačního systému na chování řidiče. Bylo dokonce prokázáno, že řidiči jezdící se systémem stabilizace, mohou s vozidlem jezdit dokonce opatrněji než bez stabilizačního systému. Celkem 62 až 65 % řidičů vysvětlovalo změnu záměru riskovat subjektivně vnímanou kontrolou vozidla. Byla užita teorie plánovaného chování. Dále bylo zjištěno, že více než 35 % řidičů se mylně domnívalo, že jejich vozidlo bylo systémem vybaveno. Autoři odkazují na zdroj [30], kdy bylo prokázáno, že někteří řidiči se systémem jízdní stability více riskovali, což nazvali adaptací chování. Vysvětlovali to důvěrou v stabilizační systém, a tedy byli velmi

sebevědomí. Vztah mezi použitím stabilizačního systému a adaptací chování není dobře prozkoumán. Závěrem bylo poukázáno na to, že řidiči, kteří věřili, že mají své vozidlo vybaveno stabilizačním systémem, podstupovali větší míru rizika. Nejvíce se to projevilo u mladých řidičů a u mužů.

Studie [26] se věnovala empirickému výzkumu efektu stabilizačního systému na dopravní nehody. Byl prokázán 49 % pokles nehod jednoho vozidla a 13 % pokles čelních střetů více vozidel. U střetů více vozidel byl dokonce pokles až 32 %. Tento efekt lze vysvětlit potenciálem systému zlepšit jízdní dynamiku a snížit pravděpodobnost ztráty jízdní stability.

Článek [27] analyzuje výsledky 90 modelů celkem 7699 vozidel vybavených stabilizačním systémem. Autoři ukázali, že stabilizační systém snižuje riziko nehody se zraněním řidiče u vozidel s pohonem všech kol o 68 % a o 27 % u osobních vozidel v lokalitě Asie a Austrálie a Nového Zélandu. Byl prokázán vysoký potenciál použití stabilizačních systémů vozidel do budoucna.

V článku [28] autoři zkoumají autonomní systémy ABS, které mohou převzít kontrolu trakce vozidla plně či částečně. Článek popisuje dynamiku integrovaného brzdového systému a kontrolu u čtyřkolového vozidla při modelování pomocí Bondova grafu. Výhodou systému je kromě směrové stability vozidla při nouzovém brzdění na kluzkém povrchu i snížení dráhy na zastavení, které je docíleno maximální brzdou silou při nezablokovaném kole. Naproti tomu u některých měkkých či šterkových povrchů se dráha na zastavení prodlužuje. Studie ukázaly, že součinitel adheze je nelineární funkcí skluzu. ABS kontroluje skluz v nastavených mezích, a v literatuře popsané modely a algoritmy k optimalizaci jsou velice složité. Když vozidlo brzdí, naklání se dopředu a náklad se pohybuje od zadních kol k předním. Při jízdě v oblouku je náklad posouván od vnitřních kol k vnějším. Vrchol brzdné síly ABS závisí na hodnotě součinitele adheze mezi pneumatikou a povrchem, který záleží na normálovém zatížení pneumatiky a ostatních faktorech.

Studie [29] ukázala redukci ztráty jízdní stability u vozidel typu SUV při užití stabilizačního systému až o 70 %, přičemž maximální snížení s ohledem na věk bylo až 73,6 % a to na základě scénářů typu vyjetí z vozovky vlevo a vpravo, ztráty stability a tedy smyku na vozovce, při vyhýbání před kolizí s vozidlem, chodcem a zvířetem.

Problematicke vlivu chování asistenčních systémů se věnuje článek [31], kdy 22 jezdců jezdilo střídavě ve vozidlech vybavených a nevybavených asistenčními systémy a zkoumaly se jednotlivé jízdní scénáře, kdy použití systémů „*Adaptive Cruise Control*“ a „*Cruise Control*“ (pozn. autora této práce: jedná se o adaptivní tempomaty) vedlo ke snížení rychlostí účastníků a tedy menšímu porušování pravidel provozu. Během jízdy měli řidiči plnit další úkoly. Neprokázalo se, že by při aktivovaných systémech řidiči více věnovali pozornost sekundárním úkolům, naopak se prokázalo prodloužení reakce v kritických situacích při jízdě v mlze či úzké zatáčce. Článek rovněž odkazuje na studii [30], kdy řidiči navolili na tempomatu rychlost průměrně 119 km/h, namísto 129 km/h při užití omezovačů a rychlost byla při užití tempomatu výrazně méně překračována. Některé studie [33] a [34] však ukázaly pravý opak, kdy byl u řidičů vysledován kratší odstup při užití systémů či delší pohyb v levém jízdním pruhu a vyšší rychlost. Četné studie [35] a [36] poukázaly na snížení pracovního zatížení řidiče při užití asistenčních systémů. Další studie ukázaly, že řidiči se spoléhají na tyto adaptivní tempomaty a věnují menší pozornost nebezpečí pramenící z okolí.

Problematicke adaptivních tempomatů se věnoval i článek [37] v časopisu *Safety Science*, který prokázal přehnanou důvěru řidičů v asistenční systémy – adaptivní tempomaty, která může snadno přejít v negativní efekt jinak pozitivního pomocníka. Bylo testováno 26 řidičů, zkušení a nezkušení uživatelé systémů. U obou skupin se v kritických situacích ukázalo zhoršení (prodloužení) reakcí, tj. zhoršení parametru TTC („*Time To Collision*“ – pozn. autora této práce: jedná se o čas do kolize), což indikuje vyšší riziko nehody.

### **4.3 Asistenční systémy vozidla**

Pokud je vlivem vytvořené dopravní situace aktivován zásah asistenčního systému vozidla, konkrétně např. elektronického stabilizačního systému, pak příslušný asistenční systém ovlivní další jízdní dynamiku vozidla. Tedy i jízdu a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku mohou ovlivnit asistenční systémy, jimiž bývají dnešní moderní vozidla vybavena. Asistenčními systémy vozidla lze charakterizovat všechny podpůrné systémy, které pomáhají řidiči při ovládání vozidla v různých jízdních režimech. Mezi hlavní režimy patří především pohon, brzdění a následně další variace těchto dvou výchozích režimů při jízdě obecným prostorovým obloukem.

V minulosti, kdy nebyly ve vozidle instalovány žádné elektronické asistenční systémy, vykonával řidič mj. také funkci měřicí a regulační, takže se v podstatě stával jakýmsi měřicím přístrojem a regulátorem zároveň. V dnešní době výpočetní techniky a masivní elektronizace

prakticky jakéhokoliv zařízení, získává řidič vozidla spíše funkci vedoucí, kdy za něj převážnou většinu dříve běžných úkonů provádí elektronická regulace, která také přispívá k větší aktivní bezpečnosti celého dopravního systému.

Podpůrné (asistenční) systémy lze rozdělit do tří základních skupin:

- Aktivní podpůrné systémy – vstupují do ovládání vozidla automaticky;
- Pasivní podpůrné systémy – poskytují informace pro řidiče a ochranu cestujících;
- Systémy zajišťující bezpečnost a komfort.

Podpůrné systémy zajišťující bezpečnost reprezentují zejména:

- Protiblokovací systém (ABS);
- Systém elektronického rozdělování brzdného účinku (EBD), někdy též rozdělovač brzdné síly (EBV);
- Protiprokluzový systém (ASR);
- Elektronický stabilizační systém (ESP, ESC, aj. viz **Tabulka 2**);
- Brzdový asistent (BAS, HBA, BA);
- Elektronický systém odpružení;
- Elektronické řídicí ústrojí – užívané převážně u vozidel, kde jsou řízena všechna kola;
- Systém ADR – automatická regulace podélného odstupu vozidel.

Mezi systémy zabezpečující komfort zahrnujeme:

- Elektronické řízení klimatizace;
- Elektronické řízení převodovky;
- Systém ACC (adaptivní tempomat) – systém aktivního přizpůsobení rychlosti jízdy podle konkrétní dopravní situace;
- Parkpilot, parkovací asistent – pomáhá řidiči při parkování vozidla na základě akustických signálů.

Z výše uvedené souhrnné struktury asistenčních systémů je patrné, jakým rozsáhlým způsobem se elektronika podílí na provozu dnešního moderního vozidla. Pro posuzování problematiky chování vozidla v obecném prostorovém oblouku s vlivem asistenčních systémů na jízdní dynamiku bude vhodné zaměřit se na systém bránící úplnému zablokování kol (ABS) a zejména pak na elektronický stabilizační program zajišťující směrovou stabilitu

podvozku (ESP). Nutno dodat, že pokud je dnes vozidlo vybaveno stabilizačním systémem jízdní dynamiky (např. ESP, ESC) jsou již další asistenční systémy související s bezpečností pohybu vozidla (tj. např. ASR, ABS) vč. jejich řízení integrovány v rámci jedné elektronické řídicí jednotky celého systému.

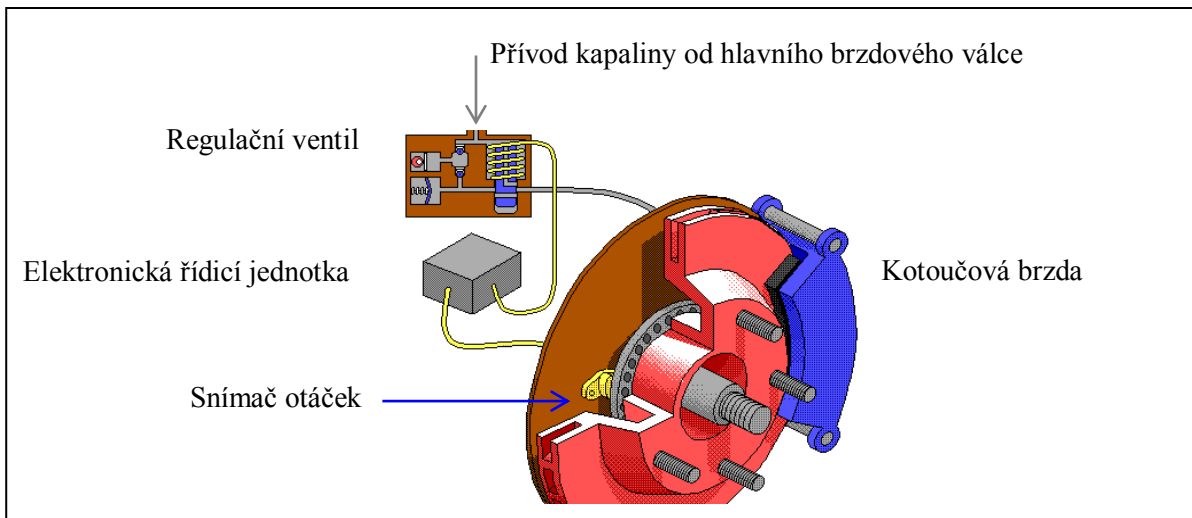
### 4.3.1 Protiblokovací systém

U vozidel bez protiblokovacího systému, označovaného zkratkou ABS, je velikost brzdných momentů na kolech vozidla, potažmo brzdných sil, závislá pouze na nožní (svalové) síle řidiče, event. na jejím zvýšení prostřednictvím posilovače brzd. Krizová situace při provozu vozidla může vyústit v prudké sešlápnutí brzdového pedálu řidičem, které může způsobit úplné zablokování kol, zejména na kluzkém povrchu. Zablokované kolo nepřenáší žádnou boční (vodicí) sílu, tudíž je plně zamezeno řízení a hovoříme o ztrátě směrové stability vozidla, která vylučuje možnost jakéhokoli vyhýbacího manévru. Proto lze tedy konstatovat, že rozvoj protiblokovacích systémů zvyšuje aktivní bezpečnost vozidel.

Princip protiblokovacího systému spočívá v zamezení úplného zablokování kol vozidla, tedy situaci, aby se kolo pohybovalo po povrchu vozovky smykem. Mezi hlavní přednosti systému patří skutečnost, že i při silném intenzivním brzdění je vozidlo říditelné, čímž je umožněno provedení vyhýbacího manévru. Současné verze protiblokovacího systému ABS jsou optimalizovány elektronickým rozdělovačem brzdného účinku. Oba systémy v podstatě vytváří kompaktní celek (jednotku), využívající společné prvky. Dnes vyráběná vozidla, vybavená systémem ABS, obsahují většinou automaticky také systém elektronického rozdělování brzdného účinku, který zohledňuje vliv změny zatížení náprav při brzdění a reguluje brzdný tlak na každém kole. Zamezuje též přebrzdění zadní nápravy, které má za následek nestabilní stav vozidla, regulací maximálního aktuálně přípustného brzdného tlaku na této nápravě. Využitím optimálního výkonu brzd zadní nápravy dochází k odlehčení brzd přední nápravy, tudíž jsou tyto méně tepelně namáhány a eliminuje se zde riziko slábnutí účinku brzd přední nápravy.

Mezi hlavní prvky protiblokovacího systému ABS patří (viz **Obr. 4**):

- snímače otáček kol;
- elektronická řídicí jednotka;
- regulační ventil.



**Obr. 4:** Kolová kotoučová brzda s prvky systému ABS<sup>1</sup>

### Stáčivost vozidla kolem jeho svislé osy

Při jízdě v režimu brzdění, kdy se pravá a levá část vozidla nachází na různých površích, tj. s odlišným součinitelem adheze, vznikají značně rozdílné brzděné síly na kolech. Jedná se o situaci podle **Obr. 5**, kdy značně odlišné brzděné síly především na přední nápravě iniciují vznik stáčivého momentu kolem svislé osy vozidla.

U vozidel vyšší hmotnosti, tj. těžké osobní automobily, které mají většinou poměrně větší rozchod kol a relativně značný moment setrvačnosti, dochází k stáčení podél osy souměrnosti vozidla vcelku pomalu, proto lze při brzdění se systémem ABS pozvolným zásahem do natočení volantu nepříjemnou situaci vyrovnat. Lehčí vozidla s menším rozchodem kol a momentem setrvačnosti bývají společně se systémem ABS vybavena funkcí tzv. opoždění nárůstu stáčivého momentu (GMA), která zaručí dobrou ovladatelnost vozidla na površích s rozdílnou adhezí. Tato funkce je zabezpečena časově opožděným nárůstem brzděného tlaku u kola s vyšší adhezí, což vede k časově opožděnému nárůstu brzděné síly na příslušném kole.

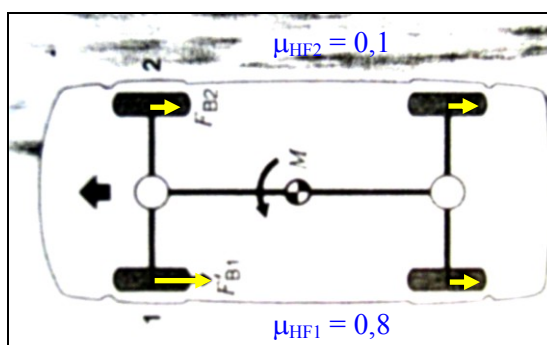
Automobily s méně či více kritickými jízdními poměry mohou tedy vedle ABS obsahovat také systém GMA 1 či 2 (příp. funkci „Select Low“), označený dle krizovosti jízdních poměrů, který ve své podstatě zabezpečuje spolehlivé chování vozidla při brzdění na odlišných površích vozovky. Vzhledem k časovému posunutí při nastavení maximálního brzděného tlaku na kole využívajícím vyšší adhezi dojde k nepatrnému prodloužení brzděné dráhy ve srovnání s vozidly bez systému GMA, kde brzdí každé kolo vždy s maximálně

<sup>1</sup> Obrázek autorem práce upraven; zdroj původního obrázku: [http://cs.autolexicon.net/obr\\_clanky/cs\\_abs\\_001.jpg](http://cs.autolexicon.net/obr_clanky/cs_abs_001.jpg)

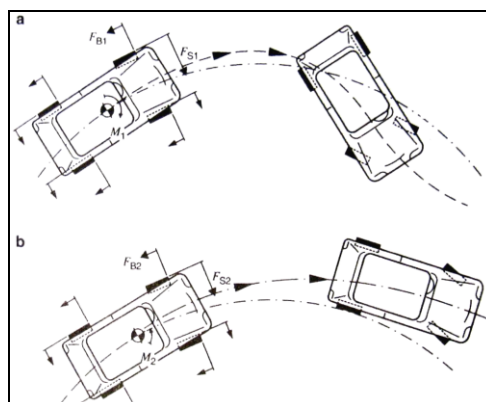
možným využitím adheze. Ideální opoždění nárůstu stáčivého momentu je kompromisem mezi dobrou ovladatelností vozidla a co nejkratší brzdou dráhou.

Při brzdění vozidla v rovinné zatáčce (viz **Obr. 6**), která je specifický případ obecného prostorového oblouku, způsobuje systém GMA při dynamickém zatížení přední a dynamickém odlehčení zadní nápravy, zvyšující boční vodící síly na přední a zároveň snižující tytéž síly na zadní nápravě. Tento děj přispěje k vytvoření stáčivého momentu, který směřuje do vnitřku zatáčky a způsobuje smyk vozidla, jenž je velmi obtížně kompenzovatelný protinátčením volantů. Pro vyřešení této kritické situace je systém GMA vybaven snímačem příčného zrychlení, který tento systém vyřazuje z činnosti při hodnotě příčného zrychlení vyšší než 0,4g. Deaktivaci GMA vzniká během brzdění v zatáčce na vnějším předním kole vyšší brzdná síla, která vytváří stáčivý moment směřující do vnější strany zatáčky. Tento moment se vyrovnává s momentem bočních vodících sil směřujících do vnitřní strany zatáčky a automobil zůstává dobře ovladatelný.

Na základě stručně formulované problematiky protiblokovacích systémů lze konstatovat, že i tyto systémy obsahují stabilizující funkce pro pohyb vozidla.



**Obr. 5:** Vznik stáčivého momentu:  $M$  – stáčivý moment,  $F_B$  – brzdná síla,  $\mu_{HF}$  – součinitel adheze, 1 – kolo na asfaltu, 2 – kolo na kluzké vozovce [38]



**Obr. 6:** Brzdění vozidla v rovinné zatáčce při rychlostech blízkých jejich mezní hodnotě: a – systém GMA aktivní, vozidlo se chová jako přetáčivé; b – systém GMA deaktivován, vozidlo se chová nedotáčivé;  $M$  – stáčivý moment,  $F_B$  – brzdná síla,  $F_S$  – boční vodící síla [38]

### 4.3.2 Elektronický stabilizační systém jízdní dynamiky vozidla

V běžném silničním provozu je řidič často postaven do situací, ve kterých musí řešit složité skutečnosti generované jízdou, kdy se vozidlo nachází v mezních oblastech a je jen stěží ovladatelné. Většina takto popsaných kritických situací bývá nepřesně odhadnuta a s příspěvkem nevhodného počínání řidiče může dojít ke ztrátě stability vozidla.

Dnes nejrozšířenějším systémem jízdní stability vozidla je tzv. elektronický stabilizační program (Electronic Stability Programme – zkratka ESP, příp. Electronic Stability Control – zkratka ESC), jehož označení ESP, resp. dnes ESC používá koncern Volkswagen (viz **Tabulka 2**). Další možné označení systémů uvádí **Tabulka 2**.

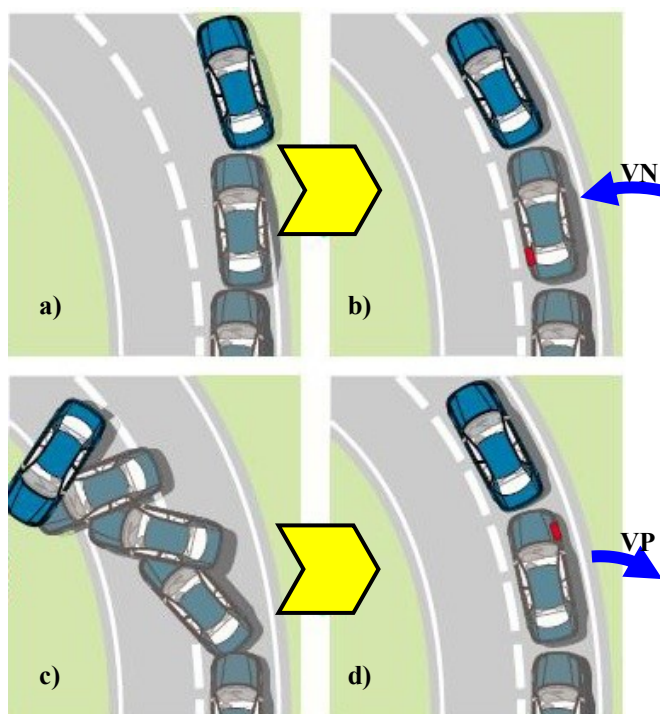
*Tabulka 2: Vybrané stabilizační systémy označené dle výrobců vozidel vč. uváděných zkratek*

Název stabilizačního systému jízdní dynamiky vozidla	Zkratka
Electronic Stability Program (koncern VW do modelu Škoda Octavia II)	ESP
Electronic Stability Control (koncern VW od modelu Škoda Octavia III)	ESC
Active Handling System (Chevrolet)	AHS
Dynamic Stability Control (BMW)	DSC
Porsche Stability Management (Porsche)	PSM
Vehicle Dynamics Control (Subaru)	VDC
Dynamic Stability and Traction Control (Volvo)	DSTC
Vehicle Stability Control (Lexus)	VSC

Systémy jízdní stability jsou jakýmsi rozšířením (nadstavbou) systémů protiblokovacích a protiprokluzových, doplňují jejich funkce, ale také funkce systémů rozdělování brzdné síly, regulace momentu motoru či výše zmíněné regulace stáčivého momentu GMA. Protiblokovací či protiprokluzové systémy umožňují ovládat skluz či prokluz kola pouze v podélném směru jízdy vozidla. Elektronické stabilizační systémy regulují také skluz pneumatiky v příčném směru, který vede ke ztrátě bočního vedení kola a tím následně k příčnému vychýlení ze směru jízdy vozidla. Nyní popisované systémy zvyšují stabilitu vozidla ve vztahu k dodržení nastavené stopy při průjezdu zatáčkou a rovněž také významně snižují riziko smyku při brzdění, zrychlování či při obecném pohybu vozidla.



Funkce stabilizace jízdní dynamiky vozidla je zabezpečena samočinnými cílenými zásahy do brzd jednotlivých kol a točivého momentu motoru bez účasti řidiče. Vyhodnotí-li systém z dat získaných prostřednictvím snímačů kritický stav vozidla, přistoupí k přibrzdění příslušných kol, čímž vznikne právě takový příznivý stáčivý moment kolem svislé osy vozidla, který vyrovnává nepříznivý přetáčivý či nedotáčivý pohyb vozidla. Zároveň dojde ke snížení hnacího momentu motoru na úroveň systémem vyhodnocené situace. Tyto zákroky systému do ovládání vozidla vytvoří potřebné zpomalení, jež má v konečném důsledku stabilizační účinek. V případě nedotáčivého chování vozidla, jak je popsáno na **Obr. 7a**, se zásah systému ESP projeví přibrzděním kol na vnitřní straně zatáčky, kdy významná část brzdné síly je přenesena přes příslušné zadní kolo (viz **Obr. 7b**). Chování přetáčivého vozidla ukazuje **Obr. 7c**, kde při hrozícím příčném vychýlení zadní části vozidla jsou přibrzděna kola na vnější straně zatáčky, kdy větší brzdná síla působí na přední příslušné kolo (viz **Obr. 7d**). Stabilizační elektronická soustava zároveň sleduje, jakým způsobem zasahuje do kritické situace řidič, na základě čehož určí, jak významným způsobem a které kolo potřebuje přibrzdit, příp. jakým způsobem je třeba snížit točivý moment motoru pro stabilizaci vozidla.

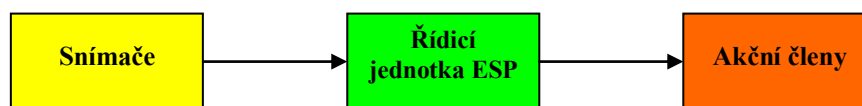


**Obr. 7:** Chování nedotáčivého a přetáčivého vozidla při průjezdu zatáčkou: a – nedotáčivé vozidlo bez systému ESP, b – nedotáčivé vozidlo se systémem ESP, c – přetáčivé vozidlo bez systému ESP, d – přetáčivé vozidlo se systémem ESP, VN - vyrovnání nedotáčivosti, VP – vyrovnání přetáčivosti<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Zdroje původního obrázku (obrázek autorem upraven): [http://cs.autolexicon.net/obr\\_clanky/cs\\_esp\\_0021.jpg](http://cs.autolexicon.net/obr_clanky/cs_esp_0021.jpg) a [http://cs.autolexicon.net/obr\\_clanky/cs\\_esp\\_002a.jpg](http://cs.autolexicon.net/obr_clanky/cs_esp_002a.jpg)

V krizových situacích ESP zvyšuje stabilitu jízdy v příčném směru a zároveň zvyšuje dodržování jízdní stopy vozidla nastavené řidičem. U vozidel s ESP se při mezních situacích podílí hnací a brzdová soustava na směru pohybu vozidla. Vozidlo pohybující se obecným prostorovým obloukem vybavené stabilizačním systémem se až do regulačního zásahu systému chová stejně jako vozidlo bez systému ESP. V případě dosažení kritického stavu vozidla není již požadavek řidiče na zvýšení rychlosti vozidla díky systému ESP přijat, protože se vozidlo nachází na hranici stability. ESP provede takové zásahy do hnací a brzdové soustavy, že se pro úspěšné udržení stopy nemusí zvětšovat úhel natočení volantu, směrová odchylka se přestává zvětšovat. Mírné vychýlení od zadaného směru pohybu vozidla řidič příslušnými pohyby řízení eliminuje. Řidič se tedy rovněž podílí na regulaci. Kolísání úhlu natočení volantu a úhlu směrové odchylky těžiště jsou tedy závislé na reakci řidiče. Stabilizační systémy však tato kolísání udržují ve stabilní oblasti.

Pro správnou funkci stabilizačního systému v kritické oblasti je třeba nejprve zjistit, jakým způsobem se má vozidlo chovat podle požadavku řidiče a jak se vozidlo skutečně chová. Eliminaci rozdílu požadovaného a skutečného chování vozidla, tzv. regulační odchylku, řeší regulátor ESP výše uvedenými zákroky. Zjednodušenou strukturu regulační soustavy systému ESP popisuje **Obr. 8**.



**Obr. 8:** Struktura regulační soustavy ESP

Soustava využívá následující snímače:

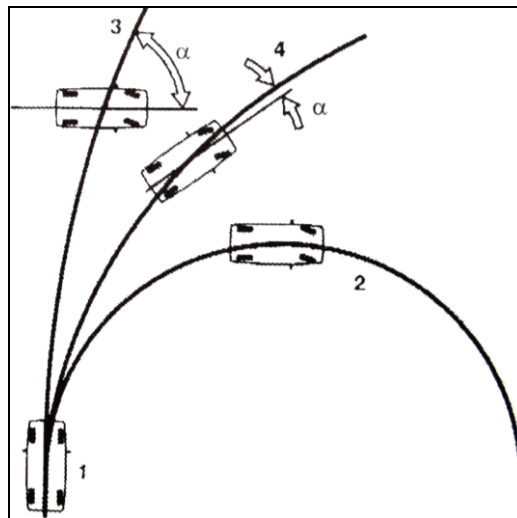
- úhlu natočení volantu;
- otáček kol;
- příčného zrychlení;
- brzdových tlaků;
- stáčivé rychlosti.

Reprezentanty akčních členů jsou:

- hydraulická jednotka brzd ovládající:
  - jednotlivé kolové brzdy;
- řídicí jednotka motoru ovládající:
  - úhel předstihu zážehu (zapalování);

- vstřikování paliva;
- škrtecí klapku.

Zobrazení příčné dynamiky pohybu vozidla zachycuje **Obr. 9**. Všechny na **Obr. 9** zobrazené jízdny zkoušky vychází z polohy 1, kde došlo ke skokovému natočení volantu. Trajektorie 2 odpovídá nastavenému úhlu natočení volantu a bude vozidlem opisována za předpokladu, že boční zrychlení je menší než odpovídající maximálnímu využití součinitele adheze. V případě překročení bočního zrychlení nad hodnotu odpovídající maximální hodnotě součinitele adheze opisuje vozidlo trajektorii 3. Vozidlo se sice natočí do pozice jako v poloze 2, ale vzhledem k značnému úhlu směrové odchylky inklinuje vozidlo do nestabilního stavu. Proto stabilizační systém ESP reguluje kromě úhlu směrové odchylky také současně stáčivou rychlost vozidla. Tyto dvě veličiny jsou hlavní pro zásah systému ESP do jízdny dynamiky vozidla. Tento stabilní stav vyznačuje poloha 4.



**Obr. 9:** Trajektorie pohybu vozidla v rovinné zatáčce: 1 – výchozí poloha, skoková změna úhlu natočení volantu, 2 – trajektorie na vozovce s vysokou adhezí, 3 – trajektorie na mokré vozovce s regulací pouze stáčivé rychlosti, 4 – trajektorie na mokré vozovce s regulací jak stáčivé rychlosti, tak i úhlu směrové odchylky  $\alpha$  [38]

Třeba závěrem doplnit, že zmíněné asistenční systémy vozidla, tj. ABS a ESP vč. systému bránícímu prokluzu hnacích kol označovaného zkratkou ASR spolu vzájemně spolupracují. Systémem funkčně nadřazeným je ESP, systémy ABS a ASR jsou podřízené stabilizačnímu programu ESP. Soustava pracuje s cílem zachování směrové stability vozidla na mezi adheze, tj. s maximálně možným využitím součinitele adheze.

Elektronický stabilizační systém dokáže rozpoznat, že se vozidlo dostává do nestabilního stavu a řídicí jednotka ESP na základě signálů získaných od snímačů vyše instrukce pro akční členy, které vhodným způsobem ovlivní směrové chování vozidla

a v konečném důsledku odvrátí kritickou situaci. Zvýšení aktivní bezpečnosti a snížení možnosti vzniku nehody je při využití systému ESP z výše uvedených pasáží patrné. Nicméně si je však třeba uvědomit, že žádný stabilizační systém nedokáže překonat fyzikální zákony, a pokud řidič nebude svým chováním respektovat možnosti konstrukce podvozku i systému ESP, silniční nehodě neunikne.

#### 4.4 Projektování oblouků na pozemních komunikacích

Navrhováním směrových oblouků na pozemních komunikacích ČR se podrobně zabývá norma ČSN 73 6101 o Projektování silnic a dálnic v kapitole 8.5. Výškové oblouky jsou v normě popsány v kapitole 8.14 s názvem Lomy podélného sklonu. Pro potřeby této dizertační práce budou oblouky rozebrány jako směrové a výškové, které lze dále členit.

Směrové oblouky rozděluje norma ČSN 73 6101 následovně:

- a) kružnicový s přechodnicemi (nejčastější řešení směrového oblouku v praxi);
- b) prostý kružnicový;
- c) složený;
- d) přechodnicový.

Použití jednotlivého druhu oblouku přesně vymezuje norma ČSN 73 6101 v kapitole 8.5. Následující **Tabulka 3** udává nejmenší dovolené poloměry směrových kružnicových oblouků ve vztahu k návrhové rychlosti a dostředivému sklonu.

*Tabulka 3: Nejmenší dovolené poloměry směrových kružnicových oblouků ve vztahu k návrhové rychlosti a dostředivému sklonu [39]*

Návrhová/ směrodatná rychlost v km/h	Poloměr kružnicového oblouku v metrech										se základním příčným sklonem 2,5 % <sup>*)</sup>
	při dostředivém sklonu vozovky v %										
	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	
130	2450	2050	1750	1525	1350	1225	1125	1025	-	-	4500
120	2075	1750	1500	1300	1150	1050	950	850	-	-	3800
110	1750	1450	1250	1100	925	825	800	725	-	-	3200
100	1450	1200	1050	900	800	720	650	600	-	-	2700
90	1200	1000	850	750	650	600	550	500	-	-	2200
80	775	650	550	500	450	400	350	325	-	-	1700
70	600	500	425	375	330	300	270	250	-	-	1300
60	450	375	325	270	240	220	200	180	170	-	950
50	300	250	220	190	170	150	140	125	120	110	700
40	200	160	140	120	110	100	90	80	75	70	450
30	110	90	80	70	60	55	50	45	40	35	250

Výškové oblouky rozděluje norma ČSN 73 6101 následovně:

- a) vypuklé (jedná se o oblouky vrcholové, *pozn. autora této práce*);
- b) vyduté (jedná se o oblouky údolnicové, *pozn. autora této práce*).

Následující **Tabulka 4** uvádí nejmenší poloměry vypuklých výškových (vrcholových) oblouků ve vztahu k návrhové rychlosti. **Tabulka 5** uvádí nejmenší poloměry vydutých výškových (údolnicových) oblouků opět ve vztahu k návrhové rychlosti. Návrhová rychlost je důležitá veličina pro určení nejmenších poloměrů směrových i výškových oblouků pozemní komunikace. Na běžné dálniční síti a rychlostních silnicích se volí v přijatelném rozmezí 80 až 120 km/h, na silnicích nižších tříd pak v rozmezí 30 až 100 km/h. V tabulkách je také uváděna směrodatná rychlost, což je předpokládaná (očekávaná) rychlost osobních vozidel, která je dána stavem konkrétního úseku silniční nebo dálniční sítě, jež však nepřekračuje 85 % řidičů na mokré vozovce.

**Tabulka 4:** Nejmenší poloměry vypuklých výškových (vrcholových) oblouků [39]

$R_v$ v m	při směrodatné rychlosti ( $v_s$ ) / návrhové rychlosti ( $v_n$ ) km/h									
	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40
nejmenší dovolený pro zastavení	15 000	12 000	10 000	7 500	5 000	4 000	3 200	2 000	1 000	500
nejmenší doporučený pro předjíždění	-	-	-	-	37 000	31 000	25 000	20 000	11 000	5 000

**Tabulka 5:** Nejmenší poloměry vydutých výškových (údolnicových) oblouků [39]

$R_u$ v m	při návrhové rychlosti ( $v_n$ ) / směrodatné rychlosti ( $v_s$ ) km/h									
	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40
nejmenší doporučený	7 000	6 000	5 000	4 200	3 500	2 800	2 000	1 500	1 200	1 000
nejmenší dovolený	6 000	5 000	4 000	3 400	2 700	2 100	1 500	1 000	700	400

## 5 Definování systému podstatných veličin ve vyšetřovaném ději

Systémem podstatných veličin rozumíme podle literatury [1] množinu podstatných veličin vč. potenciálního vztahu mezi veličinami, které souvisejí s řešením problému na zkoumaném objektu.

Mezi podstatné veličiny z hlediska analytického řešení problému spojeného s hledáním mezní rychlosti vozidla v oblouku lze zařadit geometrické parametry vozovky (viz **Obr. 10** a **Obr. 11**) a součinitel adheze v příčném směru, který z hlediska systémového pojetí představuje tzv. vazební prvek objektu (vozidla) a okolí (povrchu vozovky). Geometrické parametry vozovky jsou obvykle známy, ale neznámou zkoumanou podstatnou veličinou pro analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v oblouku zůstává využitelný součinitel adheze v příčném směru, jenž není v případě jízdní dynamiky vozidla se stabilizačním systémem přesně znám.

Z hlediska modelování pohybu vozidla v počítačových simulačních programech budou podstatnými veličinami nejprve taktéž geometrické parametry vozovky, součinitel adheze, technické parametry nastaveného modelu vozidla (rozměry, hmotnost, poloha těžiště, model pneumatik, směrová úchylka kola v případě lineárního modelu pneumatiky, systém odpružení, rozdělení brzdných sil, systém ABS a v neposlední řadě aktivovaný numerický model stabilizačního systému ESP) a parametry ovládání vozidla řidičem (rychlost jízdy, jízdní režim, úhel a rychlost natočení volantu, poloha pedálu akcelerace a poloha brzdového pedálu). Zkoumanou podstatnou veličinou z hlediska jízdní dynamiky vozidla bude nastavení systému ESP v počítačovém simulačním programu. Ostatní podstatné veličiny budou pro analyzované případy v simulačním programu definovány, ale považovány za neměnné, resp. jejich vliv nebude zkoumán.

V rámci této dizertační práce není reálné ani účelné, aby byl zkoumán vliv všech podstatných veličin na jízdní dynamiku vozidla, proto bude systém hledání podstatných veličin zúžen do dvou směrů. Nejprve bude při experimentálním měření jízdní dynamiky zkoumán vliv rychlosti jízdy obloukem na chování vozidla se stabilizačním systémem, resp. bude hledána podstatná veličina ovlivňující pohyb vozidla v oblouku, a to využitelný součinitel adheze v příčném směru. Následně budou při ověřování experimentálního průjezdu vozidla se stabilizačním systémem prostřednictvím simulačního programu hledány všechny podstatné veličiny numerického modelu počítačového simulačního programu ESP, aby

při ostatních definovaných (neměnných) parametrech získaných z reálných jízdních testů bylo docíleno shodných výsledků simulace jako při jízdních zkouškách na polygonu.

Následující **Tabulka 6** přehledně shrnuje podstatné veličiny pro řešení pohybu vozidla v oblouku mezní rychlostí s využitím analytického přístupu, experimentálního a simulačního modelování podle barevného vyznačení buněk. Zeleně vyznačené buňky v **Tabulka 6** představují zahrnutí vlivu určité veličiny uvedené v prvním sloupci tabulky při dané metodě řešení, naopak červené buňky symbolizují nezohlednění příslušné veličiny danou metodou. Z posledního sloupce **Tabulka 6** je zřejmé, které podstatné veličiny budou zkoumány v rámci této dizertační práce, a které budou považovány za neměnné (konstantní), jejichž vliv nebude zkoumán.

**Tabulka 6:** Podstatné veličiny ve vztahu k metodě řešení problémové situace a problému

Podstatná veličina \ metoda řešení	Analytický přístup	Experiment	Simulace	Vliv
<b>Součinitel adheze</b>				<b>zkoumán</b>
Geometrické parametry vozovky				konst.
Technické parametry vozidla, technický stav				konst.
Model pneumatiky				konst.
Model odpružení				konst.
Asistenční systémy vozidla - <b>elektronický stabilizační systém (ESP)</b>				<b>zkoumán</b>
Způsob ovládání a řízení vozidla (vliv řidiče)				konst.

## 6 Metody k dosažení stanovených cílů

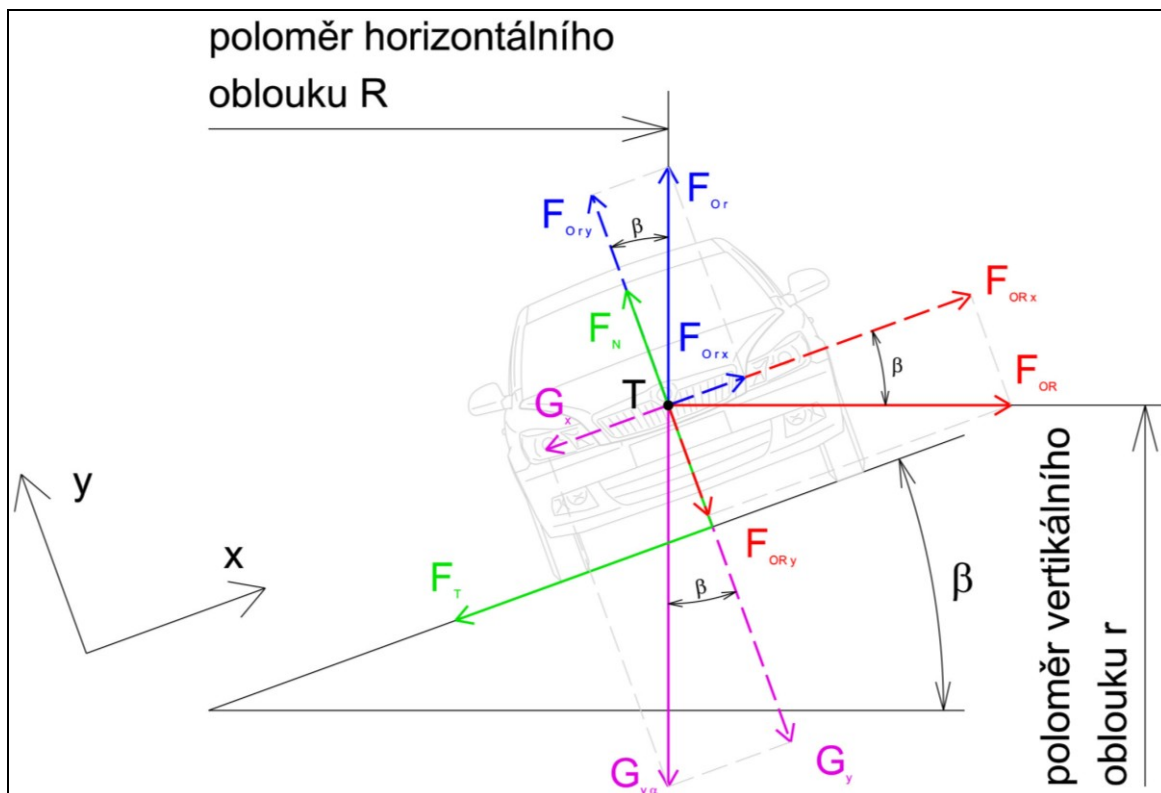
S ohledem na formulovanou problémovou situaci, problém a vytvořený systém podstatných veličin je jedinou možnou metodou pro splnění stanovených cílů této dizertační práce experimentální modelování (tj. experiment). Experimentálně budou tedy dále měřeny parametry jízdní dynamiky vozidla a zjišťovány možné rychlosti průjezdu vozidla definovanými oblouky, ze kterých bude následně hledán součinitel adheze v příčném směru. Na základě zjištěného součinitele adheze v příčném směru bude stanovena mezní rychlost vozidla v definovaném oblouku analytickým výpočtem. Experimentálně zjištěné parametry jízdní dynamiky vozidla vybaveného stabilizačním systémem budou sloužit k hledání takového nastavení numerického modelu stabilizačního systému v počítačovém simulačním programu, aby modelovaný pohyb počítačovou simulací co nejlépe odpovídal experimentálně zjištěnému průjezdu vozidla definovaným obloukem.

## 6.1 Analytický přístup k vyšetřovanému pohybu vozidla v oblouku

Úkolem této dílčí podkapitoly dizertační práce je odvodit vztah pro výpočet mezní rychlosti vozidla v obecném prostorovém oblouku. S ohledem na obsah normy ČSN 73 6101 lze z pohledu výškového členění oblouků rozdělit obecný prostorový oblouk podle jeho geometrických parametrů na dva případy:

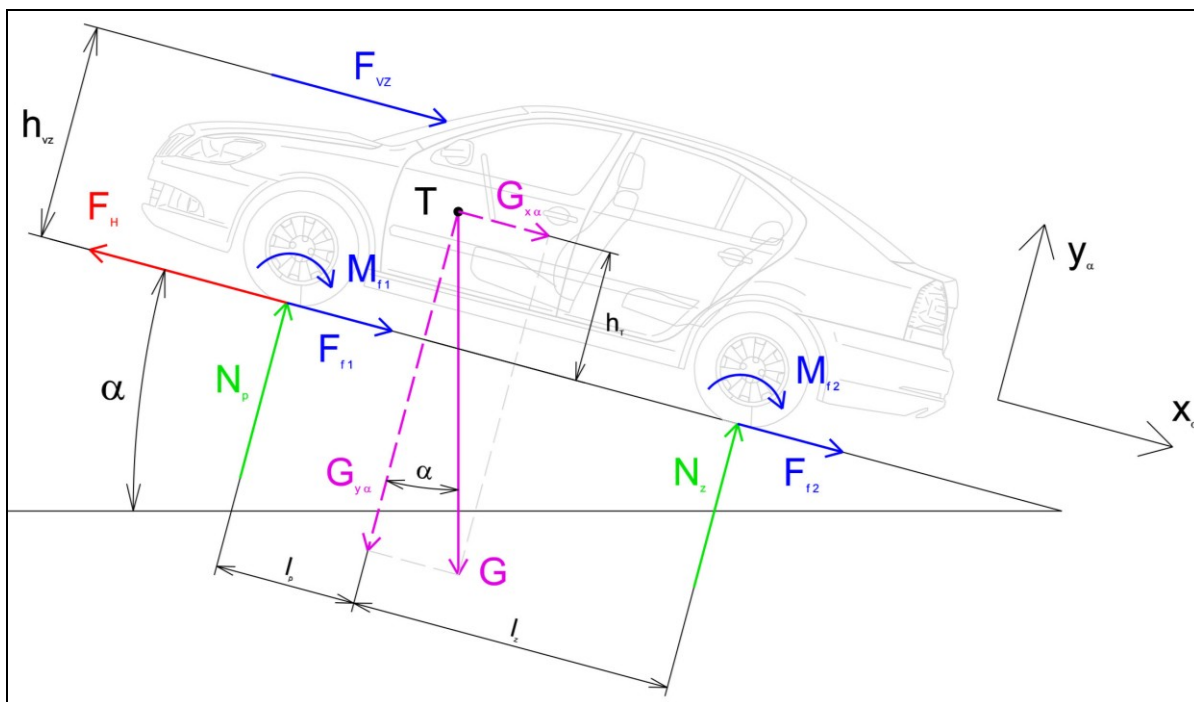
- obecný prostorový oblouk *vrcholový* (norma ČSN 73 6101 uvádí tento oblouk jako vypuklý), kde poloměr vertikálního oblouku způsobí vertikální odstředivou sílu, která působí proti síle tíhové, v případě jízdy do svahu proti příslušné složce tíhové síly (viz **Obr. 10**);
- obecný prostorový oblouk *údolnicový* (norma ČSN 73 6101 uvádí tento oblouk jako vydutý), kde poloměr vertikálního oblouku způsobí vertikální odstředivou sílu, která působí ve směru tíhové síly, v případě jízdy do svahu ve směru příslušné složky tíhové síly. Vozidlo je tedy touto odstředivou silou přitlačováno k vozovce.

Na vozidlo pohybující se po obecném prostorovém oblouku vrcholovém působí síly, které jsou vyznačeny na **Obr. 10**, resp. **Obr. 11**, včetně jejich rozložení na příslušné složky ve směrech osy  $x$  a  $y$ .



**Obr. 10:** Síly působící na vozidlo pohybující se po vrcholovém prostorovém oblouku (čelní pohled)





**Obr. 11:** Síly působící na vozidlo pohybující se konstantní rychlostí po vrcholovém prostorovém oblouku (boční pohled)

Legenda k **Obr. 10** a **Obr. 11** (ostatní viz *Seznam zkratek a symbolů* na str. 185 a 186):

- G – tíhová síla [N];
- $F_{OR}$  – odstředivá síla vzniklá vlivem horizontálního oblouku [N];
- $F_{Or}$  – odstředivá síla vzniklá vlivem vertikálního oblouku [N];
- $F_T$  – třecí síla [N];
- $F_N$  – normálová síla [N];
- r – poloměr vertikálního oblouku [m],  
 $r > 0 \rightarrow$  vrcholový oblouk,  $r < 0 \rightarrow$  údolnicový oblouk;
- R – poloměr horizontálního oblouku [m];
- $\alpha$  – podélný sklon vozovky [°],  
 $\alpha > 0 \rightarrow$  jízda do svahu,  $\alpha < 0 \rightarrow$  jízda ze svahu;
- $\beta$  – příčný sklon vozovky [°],  
 $\beta > 0 \rightarrow$  dostředivý sklon,  $\beta < 0 \rightarrow$  odstředivý sklon.

Na základě vyznačených silových účinků působících na vozidlo dle **Obr. 10** a **Obr. 11** jsou sestaveny rovnice statické rovnováhy ve směru osy  $x$  a  $y$  podle **Obr. 10**:

$$\Sigma F_x = 0 : F_{oRx} + F_{orx} - G_x - F_T = 0 \quad (1)$$

$$\Sigma F_y = 0 : F_N + F_{ory} - F_{oRy} - G_y = 0 \quad (2)$$


---

V sestavených rovnicích (1) a (2) jsou dále rozepsány jednotlivé síly:

$$\Sigma F_x = 0 : F_{oR} \cdot \cos\beta + F_{or} \cdot \sin\beta - G \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta - F_T = 0 \quad (3)$$

$$\Sigma F_y = 0 : F_N + F_{or} \cdot \cos\beta - F_{oR} \cdot \sin\beta - G \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta = 0 \quad (4)$$


---

Vyjádření vztahů pro odstředivé síly  $F_{oR}$ ,  $F_{or}$  a třecí sílu v příčném směru  $F_T$ :

$$F_{oR} = m \cdot \frac{v^2}{R} \quad (5) \qquad F_{or} = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (6) \qquad F_T = F_N \cdot \mu_y \quad (7)$$

Z rovnice (2) platí:

$$F_N = F_{oR} \cdot \sin\beta + G \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta - F_{or} \cdot \cos\beta \quad (8)$$

Do rovnice (3) je dosazena třecí síla  $F_T$  podle vztahu (7):

$$F_{oR} \cdot \cos\beta + F_{or} \cdot \sin\beta - G \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta - F_N \cdot \mu_y = 0 \quad (9)$$

Do rovnice (9) je za normálovou sílu  $F_N$  podle vztahu (8):

$$F_{oR} \cdot \cos\beta + F_{or} \cdot \sin\beta - G \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta - (F_{oR} \cdot \sin\beta + G \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta - F_{or} \cdot \cos\beta) \cdot \mu_y = 0 \quad (10)$$

Do rovnice (10) jsou dosazeny odstředivé síly od horizontálního oblouku  $F_{oR}$  dle vztahu (5) i vertikálního oblouku  $F_{or}$  dle vztahu (6), následuje aplikace vhodných matematických úprav za účelem vyjádření rychlosti vozidla v oblouku:

$$m \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \cos\beta + m \cdot \frac{v^2}{r} \cdot \sin\beta - m \cdot g \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta - m \cdot \frac{v^2}{R} \cdot \mu_y \cdot \sin\beta - m \cdot g \cdot \mu_y \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta + m \cdot \frac{v^2}{r} \cdot \mu_y \cdot \cos\beta = 0 \quad (11)$$

$$\frac{v^2}{R} \cdot \cos\beta + \frac{v^2}{r} \cdot \sin\beta - g \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta - \frac{v^2}{R} \cdot \mu_y \cdot \sin\beta - g \cdot \mu_y \cdot \cos\alpha \cdot \cos\beta + \frac{v^2}{r} \cdot \mu_y \cdot \cos\beta = 0$$

(12)

$$v^2 \cdot \left( \frac{1}{R} \cdot \cos \beta + \frac{1}{r} \cdot \sin \beta - \frac{1}{R} \cdot \mu_y \cdot \sin \beta + \frac{1}{r} \cdot \mu_y \cdot \cos \beta \right) = g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta + g \cdot \mu_y \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta$$

(13)

$$v = \sqrt{\frac{g \cdot \cos \alpha \cdot (\sin \beta + \mu_y \cdot \cos \beta)}{\frac{1}{R} \cdot (\cos \beta - \mu_y \cdot \sin \beta) + \frac{1}{r} \cdot (\sin \beta + \mu_y \cdot \cos \beta)}}$$

(14)

$$v = \sqrt{\frac{g \cdot r \cdot R \cdot \cos \alpha \cdot (\sin \beta + \mu_y \cdot \cos \beta)}{r \cdot (\cos \beta - \mu_y \cdot \sin \beta) + R \cdot (\sin \beta + \mu_y \cdot \cos \beta)}}$$

(15)

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

(16)

Výše provedeným postupem s aplikací vhodných matematických úprav byl odvozen vztah (16) pro výpočet rychlosti průjezdu vozidla vrcholovým prostorovým obloukem. Pokud bude vozidlo obecným prostorovým obloukem projíždět s využitím maximálního dostředivého zrychlení, pak se bude jednat o průjezd obloukem tzv. *mezní rychlostí*. V odvozeném vztahu (16) pak bude součinitel adheze v příčném směru  $\mu_y$  nabývat maximální hodnoty omezené adhezí v příčném směru, tj. bude platit  $\mu_y = \mu_{y \max}$ . Mezní rychlost vozidla pohybujícího se po vrcholovém prostorovém oblouku lze tedy stanovit dle vztahu:

$$v_{\text{mezní}} = \sqrt{\frac{g \cdot r \cdot R \cdot (\mu_{y \max} + \operatorname{tg} \beta) \cdot \cos \alpha}{r \cdot (1 - \mu_{y \max} \cdot \operatorname{tg} \beta) + R \cdot (\mu_{y \max} + \operatorname{tg} \beta)}}$$

(17)

V případě, že se bude vozidlo pohybovat po údolnicovém prostorovém oblouku, pak poloměr tohoto vertikálního oblouku způsobí vertikální odstředivou sílu, která působí ve směru tíhové síly (v případě, že se bude vozidlo navíc pohybovat do svahu, pak ve směru příslušné složky tíhové síly), je vozidlo odstředivou silou generovanou údolnicovým obloukem přitlačováno k vozovce. Po analogickém odvození vztahu pro výpočet rychlosti vozidla pohybujícího se údolnicovým prostorovým obloukem se smysl působení vertikální odstředivé síly projeví ve vztahu (17) změnou jmenovatele následovně:

$$v_{\text{mezní}} = \sqrt{\frac{g \cdot r \cdot R \cdot (\mu_{y \max} + \operatorname{tg} \beta) \cdot \cos \alpha}{r \cdot (1 - \mu_{y \max} \cdot \operatorname{tg} \beta) - R \cdot (\mu_{y \max} + \operatorname{tg} \beta)}}$$

(18)

Na základě znalosti vztahů (17) a (18) lze dovodit tzv. univerzální vztah pro výpočet mezní rychlosti vozidla v obecném prostorovém oblouku:

$$v_{mezni} = \sqrt{\frac{g \cdot r \cdot R \cdot (\mu_{y \max} + \operatorname{tg} \beta) \cdot \cos \alpha}{r \cdot (1 - \mu_{y \max} \cdot \operatorname{tg} \beta) \pm R \cdot (\mu_{y \max} + \operatorname{tg} \beta)}}, \text{ kde symbol ve jmenovateli "}\pm\text{" (19)}$$

má následující význam:

- znaménko "+" platí v případě, že se jedná o oblouk vrcholový;
- znaménko "-" platí v případě, že se jedná o oblouk údolnicový.

V této dizertační práci právě odvozený obecný vztah pro výpočet mezní rychlosti vozidla v obecném prostorovém oblouku se při specifických případech geometrických parametrů vozovky značně zjednoduší. Nejjednodušším případem obecného prostorového oblouku je rovinná zatáčka, kdy se vztah pro výpočet mezní rychlosti průjezdu vozidla obloukem zjednoduší do následující podoby:

$$v_{mezni} = \sqrt{\mu_{y \max} \cdot g \cdot R} \quad (20)$$

## 6.2 Experimentální měření

S ohledem na formulované cíle této dizertační práce je v rámci této rozsáhlé podkapitoly mj. vyšetřen vzájemný vztah mezi mezní rychlostí vozidla v oblouku stanovenou analytickým výpočtem a experimentálně zjištěnou rychlostí vozidla v oblouku experimentálním měřením parametrů jízdní dynamiky vozidla vybaveného elektronickým stabilizačním systémem.

Vyšetřování problematiky jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku je v následujících podkapitolách této práce provedeno prostřednictvím experimentálních měření dynamických parametrů vozidla při jízdách zkouškách, které byly z důvodu objektivnosti, opakovatelnosti měření a zejména bezpečnosti uskutečнены na zkušební dráze (polygonu), tedy nikoli v běžném silničním provozu. Naměřené parametry jízdní dynamiky vozidla jsou dále podrobně analyzovány a porovnány s výsledky získanými odvozeným analytickým výpočtem mezní rychlosti vozidla v oblouku podle vztahu (19), resp. (20).

Při systémovém pojetí experimentu je nejprve nutné se podrobně zabývat jednotlivými prvky obecně známého systému „člověk – stroj – prostředí“, resp. „řidič – vozidlo – vozovka“.

Objekt měření – tj. vozidlo představuje prvek soustavy označený v systémovém pojetí jako „stroj“, který je u každé sestavy měření identifikovaný veškerými technickými parametry se zaměřením zejména na charakteristiku podvozkových skupin vč. vybavení jejich řídicí elektronikou (ABS, ESP, DSTC, aj.) či použité pneumatiky.

Zkušební dráha (polygon), dle systémového pojetí označena jako „prostředí“, musí být charakterizována zejména svými geometrickými parametry, jež byly podrobně zaměřeny totální stanicí, kterou má Ústav soudního inženýrství VUT v Brně k dispozici a popisem povrchu této dráhy (beton - asfalt, suchý - mokrá, teplota), příp. fotodokumentací stavu povrchu vozovky zkušebního polygonu.

Aby bylo dosaženo dostatečného množství porovnatelných experimentálních měření, bude třeba co nejvíce eliminovat vliv lidského faktoru, tedy prvku, jenž je v systémovém pojetí definovaný jako „člověk“. Touto eliminací lidského faktoru na průběh a výsledky měření se velice podrobně zabývali, a jistě stále intenzivně zabývají, technici a konstruktéři společností produkujících elektronické systémy podvozkových částí v úzké spolupráci s výrobcí vozidel a dospěli k závěru, že jediným schopným členem pro dodržení přesně stanovených instrukcí při prováděných experimentálních měřeních na místě řidiče je robot. Pro všechna experimentální měření, která proběhla v rámci této dizertační práce, byl pro jednotlivé průjezdy oblouky eliminován vliv lidského faktoru způsobem, kdy řidič před každým specifickým měřeným průjezdem absolvoval měřicí úsek opakovaně, aby byla zaručena jednotnost a opakovatelnost dalšího průjezdu. Ostatní chování řidiče bylo rovněž sledováno a jeho vliv eliminován požadovaným standardním způsobem jízdy. Autor této práce absolvoval většinu provedených měření ve zkoušených vozidlech jako spolujezdec obsluhující též měřicí techniku a v případě nestandardního či nějakým nežádoucím způsobem ovlivněného průjezdu vozidla stanoveným obloukem, nebylo takovéto měření zahrnuto do naměřených výsledků a nebylo podrobno vyhodnoceno, příp. byla takováto nestandardní jízda včas zastavena.

K úspěšnému průběhu experimentálních měření jízdních parametrů vozidel bylo třeba využít měřicí a záznamovou techniku. Jednotlivé průjezdy vozidla oblouky byly zaznamenávány záznamovou technikou (kamerami, fotoaparáty), přičemž zpravidla jedna kamera byla umístěna mimo vozidlo v blízkosti zkušební dráhy a druhá instalována ve vozidle. Tyto videozáznamy stejně tak jako vnější a vnitřní pozorovatel (spolujezdec) byly prostředkem k hodnocení způsobu jízdy, např. zda byla překročena mezní rychlost a vozidlo

se dostalo do směrově nestabilního stavu. Konkrétní měřicí a záznamové prostředky jsou uvedeny vždy u jednotlivých sestav provedených experimentálních měření.

### **6.2.1 Experimentální měření na letišti Vyškov**

Za účelem splnění jednoho z dílčích cílů této dizertační práce, tj. zejména zjištění vlivu elektronických stabilizačních systémů podvozku na pohyb vozidla ve vyšetřovaném ději v oblouku, byla ve dnech 13.05. až 19.05.2011 uskutečněna série měření jízdních parametrů vozidla VW Golf V. generace v oblouku – resp. rovinné zatáčky na betonové letištní ploše o využitelném rozměru 300 x 50 m ve Vyškově. Některá naměřená data z provedených jízdních zkoušek uvedeného vozidla byla rovněž využita v rámci diplomové práce s názvem Možnosti zjišťování vlivu elektronických stabilizačních systémů podvozku na jízdní dynamiku vozidla [55], jejíž téma autor této dizertační práce vypsál, diplomovou práci vedl a aktivně se zúčastnil všech provedených měření na místě spolujezdce vozidla a jako obsluha měřicí techniky. Měření proběhla za přímé účinné spolupráce autora této práce s diplomantem. Nutno doplnit, že z pohledu veškerých experimentálních měření uskutečněných v rámci této dizertační práce bylo měření ve Vyškově pouze vstupním pilotním experimentem do vyšetřované problematiky, z důvodu bezpečnosti a rozměrových možností letištní plochy bylo provedeno při nižších rychlostech jízdy vozidla.

Aby mohl být objektivně zjištěn vliv elektronického stabilizačního systému podvozku vozidla na jeho jízdní dynamiku je třeba předmětný stabilizační systém podvozku iniciovat do aktivního provozního stavu při současném měření jízdních parametrů vozidla. Tato žádoucí iniciace provozního stavu stabilizačního systému byla při experimentálních měřeních vyvolána vhodným záměrným jízdním manévrem zkoušeného vozidla v oblouku (zejména zvýšením nájezdové rychlosti do oblouku). Srovnáním ekvivalentních jízdních stavů bez aktivovaného elektronického stabilizačního systému se stavem, kdy je zkoumaný stabilizační systém podvozku v činnosti (aktivován), bylo zjištěno ovlivnění jízdní dynamiky zkoušeného vozidla předmětným systémem stabilizace podvozku.

#### **6.2.1.1 Metodika jízdních zkoušek v oblouku**

Princip dynamické jízdní zkoušky spočívá v záměrném pohybu s vozidlem na vyznačeném poloměru v blízkosti analyticky předem stanovené mezní rychlosti průjezdu vozidla daným obloukem podle vztahu (20). Vyvozená jízdní situace je zdokumentována videozáznamem a měřené dynamické parametry pohybu vozidla byly uloženy k následné

analýze a vyhodnocení. Pohyb vozidla s aktivovaným stabilizačním systémem na hranici jízdní stability vyvolá žádoucí zásah elektronického stabilizačního systému podvozku.

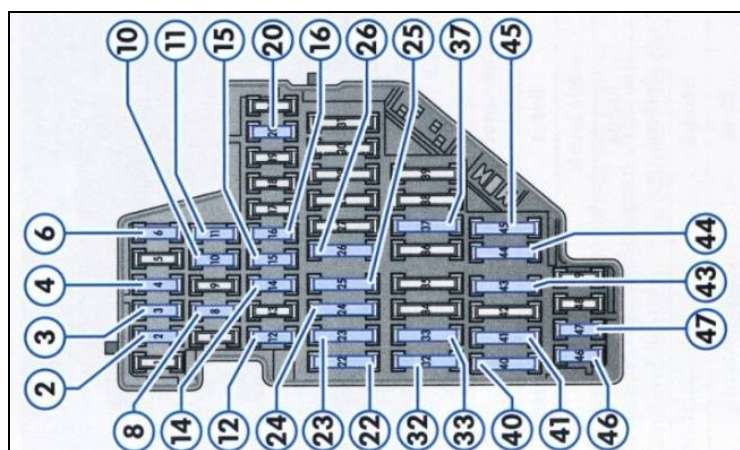
#### Způsoby sběru dat z dynamických zkoušek:

a) Sériový systém – jednotlivé parametry jízdní dynamiky vozidla jsou získávány a ukládány z údajů jednotlivých snímačů továrně instalovaných ve vozidle, které jsou odesílány elektronické řídicí jednotce stabilizačního systému, z nichž tato jednotka rozpozná a vyhodnotí příp. kritickou jízdní situaci. Na základě těchto dat vyše elektronická řídicí jednotka stabilizačního systému instrukce akčním členům, které zabezpečí zásah stabilizačního systému. Údaje z továrních snímačů vozidla byly snímány prostřednictvím diagnostické zásuvky vozidla, diagnostického kabelu HEXA-CAN a diagnostické sady VAG-COM PROFI, kterou má ÚSI VUT v Brně s příslušnou licencí k dispozici.

b) Paralelní systém – parametry jízdní dynamiky vozidla jsou získávány a ukládány z měřicích přístrojů rozmístěných ve zkoušeném vozidle. Jednalo se o dále podrobně popsaná měřicí zařízení MBox, XL metr a kameru zabírající úhel natočení volantu. Statická kamera umístěná mimo vozidlo dokumentovala průběh jízdní zkoušky vnějším pozorovatelem.

#### Pilotní měření za účelem zjištění součinitele adheze mezi pneumatikou a povrchem vozovky

Součinitel adheze byl zjištěn prostřednictvím brzděné zkoušky vozidla z výchozí rychlosti 50 km/h. Pro provedení brzděné zkoušky s předmětným vozidlem byl deaktivován systém ABS. U vozidla Volkswagen Golf V. generace lze systém deaktivovat vyřazením pojistky č. 2 dle následujícího schématu uvedeného na **Obr. 12** výrobce vozidla.



**Obr. 12:** Schéma uspořádání pojistek vozidla VW Golf V. generace<sup>3</sup> [55]

<sup>3</sup> Uživatelská příručka VW Golf V. generace, sešit 3.2. str. 54

## Jednotlivé fáze dynamické jízdní zkoušky vozidla VW Golf

### *1. Průjezd daným obloukem rychlostí nižší než mezní*

Z důvodu udržení konstantní rychlosti průjezdu vozidla obloukem byl využit tempomat. U předmětného vozidla lze tempomat aktivovat při rychlostech vyšších než 30 km/h. Přibližně stejný úhel natočení volantu bude kontrolován pomocí stupnice s vyznačenými ryskami. V této jízdní fázi zkoušek by nemělo dojít k aktivaci systému ESP.

### *2. Průjezd daným obloukem rychlostí mezní*

Opět jako v předchozí fázi bude zajištěno udržení konstantní rychlosti průjezdu vozidla obloukem, tak konstantní natočení volantu. Bude dosaženo hranice jízdní stability a v případě aktivovaného systému ESP může již dojít k jeho zásahu.

### *3. Průjezd daným obloukem rychlostí vyšší než mezní*

Stejně jako v předchozích fázích budou zajištěny podmínky konstantního natočení volantu a konstantní rychlosti průjezdu vozidla obloukem. Lze očekávat, že při jízdě obloukem s deaktivovaným ESP dojde k nestabilnímu stavu vozidla, k přetáčivému či nedotáčivému smyku. S aktivovaným systémem ESP by nemělo dojít k nestabilnímu chování vozidla v oblouku. Systém ESP by měl svými zásahy směřem k akčním členům, zejména kolovým brzdám, zajistit stabilní průjezd vozidla obloukem.

Analýzou, zejména pak vzájemným porovnáním trajektorií, průběhů rychlosti a zrychlení byly dále identifikovány skutečné zásahy systému ESP a prokazatelně tak zjištěn vliv elektronického stabilizačního systému podvozku na jízdní dynamiku zkoušeného vozidla.

## Stav deaktivace elektronického stabilizačního systému pomocí tlačítka "ESP OFF"

Tlačítko umístěné v interiéru předmětného vozidla umožňuje deaktivovat systém ESP. Tato deaktivace systému bývá doporučována pouze v určitých specifických jízdních situacích, jakou je např. jízda se sněhovými řetězy. Při standardním silničním provozu by měl systém ESP být zvolen v aktivním módu. Deaktivaci systému ESP je současně vyřazen z provozu také systém ASR a EDS.<sup>4</sup> Tedy ani tyto systémy pak nebudou při jízdní zkoušce s vozidlem bez ESP využity. Systém ESP bude při jízdních zkouškách deaktivován tlačítkem ESP OFF.

### **6.2.1.2 Měřený objekt – vozidlo VW Golf**

Měřeným objektem bylo moderní vozidlo VW Golf V. generace, jehož parametry jsou uvedeny v **Tabulce 7**. Podrobný popis výbavy předmětného vozidla je uveden v **příloze č. 1** této práce.

---

<sup>4</sup> Uživatelská příručka VW Golf V. generace, sešit 3.1 str. 99





**Obr. 13:** Zkoušené vozidlo Volkswagen Golf V. generace



**Obr. 14:** Datový štítek vozidla (červená elipsa: kód výbavy „1AT“ = výbava systémem ESP) [55]

**Tabulka 7: Identifikace a technické parametry vozidla VW Golf V. generace<sup>5</sup>[55]**

Druh vozidla:	Osobní automobil, kategorie M1	
Rok výroby:	2005	Uvedení do provozu: 07.10.2005
VIN, číslo TP:	WVWZZZ1KZ5B066665	BF770517
Karoserie:	Hatchback	
Motor:	Palivo	Natural 95
	Zdvihový objem	1390 ccm
	Výkon	55 kW
	Maximální točivý moment	130 Nm při 3750 ot./min
	Převodovka	5 st. ručně řazená (manuální)
Jízdní výkony:	Maximální rychlost	174 km/h
	Zrychlení 0 - 80 km/h	8,7 s
	Zrychlení 0 - 100 km/h	12,9 s
Hmotnosti:	Přípustná celková hmotnost	1 790 kg
	Provozní hmotnost	1 278 kg
Rozměry:	Délka	4 204 mm
	Šířka	1 759 mm
	Výška při provozní hmotnosti	1 485 mm
	Rozvor náprav	2 578 mm
	Minimální průměr zatáčení	10,9 m
	Rozchod kol vpředu / vzadu	1 539 mm / 1 528 mm
Pneumatiky:	Michelin Energy Saver	rozměr: 195/65 R 15
	Tlak předních pneumatik	2,3 bar (zkontrolován)
	Tlak zadních pneumatik	2,0 bar (zkontrolován)
Asistenční systémy:	ABS, ASR, ESP	Viz datový štítek vozidla na <b>Obr. 14</b>

<sup>5</sup> Uživatelská příručka VW Golf V. generace, sešit 3.3. str. 9-10

### 6.2.1.3 Měřicí přístroje

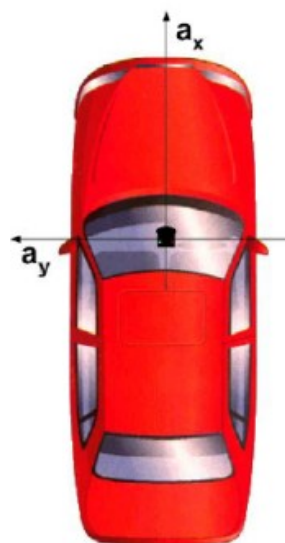
Z důvodu výše popsaného paralelního sběru dat bylo pro získávání hodnot parametrů jízdní dynamiky využito několik měřicích a záznamových zařízení, které budou popsány v této podkapitole:

#### a) Memory Box 2

Tento přístroj (zkráceně MBox, viz **Obr. 15**) byl vyvinut a vyroben za spolupráce pracovníků Fakulty strojního inženýrství a Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Přístroj měří ve třech osách pravoúhlého souřadného systému translační zrychlení i stáčivou rychlost. Tím jsou určeny parametry všech šesti stupňů volnosti vozidla jakožto objektu v prostoru. Rozměry přístroje jsou přibližně 150 x 120 x 300 mm. Pro spolehlivé měření je třeba přístroj ve vozidle dosti pevně usadit a zamezit jeho případnému pohybu při jízdě zkoušce. Před spuštěním měření je třeba přístroj zkalibrovat, což lze provést průjezdem přímého úseku vozovky definovanou rychlostí. MBox při měření ukládá data na paměťovou kartu Compact Flash typ I. Naměřená data jsou uložena v binárním formátu. Pro zpracování dat z MBoxu je třeba využít program v prostředí MS Excel, jenž umožňuje jejich zobrazení a výstup.



**Obr. 15:** MBox2<sup>6</sup>



**Obr. 16:** Pozice XL Meteru při měření<sup>7</sup>

<sup>6</sup> [http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz\\_soubor.php?id=478](http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=478)

<sup>7</sup> <http://www.nehodar.cz/docs/XLMPUSRCZ.pdf>

### b) XL Meter

XL Meter je univerzální přístroj s LCD displejem, který měří zrychlení či zpomalení ve dvou navzájem kolmých osách ( $x$ ,  $y$ ). K přístroji je dodáváno CD obsahující software XL Vision pro vyhodnocení naměřených dat. Pro komunikaci s počítačem je využíván příslušný kabel s rozhraním RS-232, který je součástí dodávané sady s přístrojem.

Přístroj se skládá z jednotky obsahující elektronickou část, vakuové přísavky a kloubového ramene umožňujícího variabilní připevnění. Přístroj umožňuje měření zrychlení až  $\pm 2g$ , využívá kapacitní senzor zrychlení.

Směry měření (navzájem kolmé osy  $x$  a  $y$ ) přístrojem (viz **Obr. 16**) je možno zaměnit při nastavení přístroje.

### c) Videokamery

Jako záznamová zařízení byly použity tři kamery. První statická (mimo vozidlo) Full HD kamera Canon. Druhá shodná kamera Full HD Canon byla umístěna na bočním okénku řidiče uvnitř vozidla, tato kamera zaznamenávala palubní desku s přístroji se zaměřením na stupnici úhlu natočení volantu. Třetí kamera, vybavena GPS modulem a G-senzorem, byla tak jako XL Meter umístěna na čelním skle vozidla a zaznamenávala situaci před vozidlem (viz **Obr. 17**).



**Obr. 17:** Full HD kamera Cannon a HD kamera Funbeat <sup>8</sup>

### d) Diagnostická sada VAG-COM PROFI

Pomocí diagnostické sady VAG-COM PROFI lze prostřednictvím notebooku načíst všechny dnešní řídicí jednotky vozidel koncernu Volkswagen. Funkce sady jsou kompatibilní s diagnostikou VAG 1552 a VAS 5052 plně využívanými v autorizovaných servisech.

---

<sup>8</sup> [www.tsbohemia.cz](http://www.tsbohemia.cz)

Sada obsahuje software VAG-COM, diagnostický kabel HEX-CAN a diagnostickou příručku VIS (viz **Obr. 18** a **Obr. 19**). S využitím diagnostické sady je možné online vyčítat údaje ze snímačů, které jsou dostupné jednotlivým řídicím jednotkám vozidla. V případě těchto experimentálních měření byla ukládána data z řídicí jednotky brzd, konkrétně hodnoty příčného zrychlení, stáčivé rychlosti a rychlosti jednotlivých kol předmětného vozidla při průjezdech oblouky. Data lze uložit do programového prostředí MS Excel. Rychlost ukládání jednotlivých dat přímo úměrně závisí na počtu ukládaných (logovaných) hodnot. Maximální počet ukládaných hodnot ze snímačů provozních stavů je 12 synchronizovaných hodnot při jednom měření.



**Obr. 18:** Diagnostická sada VAG-COM PROFÍ<sup>9</sup>



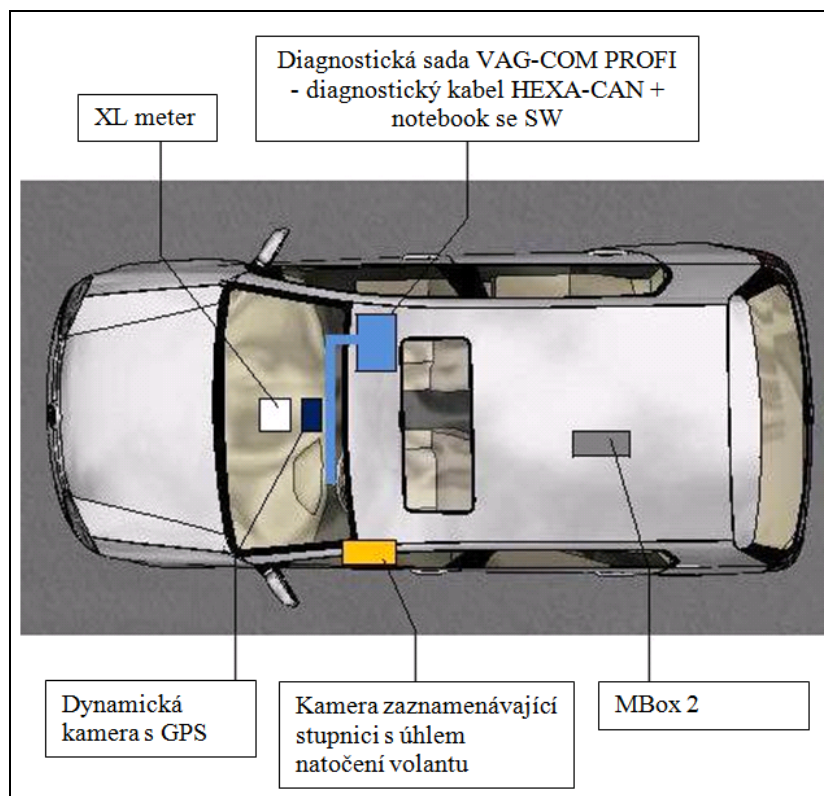
**Obr. 19:** Diagnostický kabel HEX-CAN a SW prostředí programu VAG-COM<sup>10</sup>

<sup>9</sup> <http://www.pc-autodiagnostika.cz/zbozi/vag-com-profi>

<sup>10</sup> <http://www.pc-autodiagnostika.cz/zbozi/vag-com-profi>

### Rozložení techniky pro měření parametrů jízdní dynamiky uvnitř vozidla

Rozmístění prostředků měřicí a záznamové techniky je zřejmé z **Obr. 20**. Vozidlo bylo při měřeních zatíženo zejména řidičem - Bc. Martin Bilík (hmotnost cca 90 kg) a spolujezdcem vpředu - Ing. Vladimír Panáček (hmotnost cca 90 kg) a měřicí a záznamovou technikou umístěnou v interiéru vozidla (hmotnost cca 20 kg).

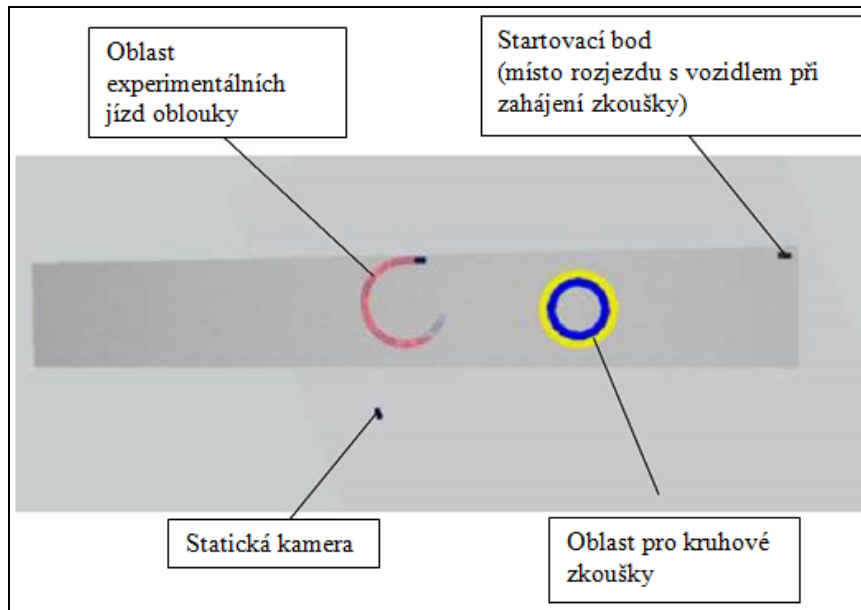


**Obr. 20:** Poloha měřicí a záznamové techniky ve vozidle [55]

#### **6.2.1.4 Měřicí plocha – letiště Vyškov**

Jak již bylo uvedeno v úvodu této podkapitoly práce, všechny jízdní experimenty byly provedeny na letištní ploše ve Vyškově, která byla zaměřena totální stanicí TOPCON 212 (viz **Obr. 21**) a zaměřením bylo zjištěno, že se jedná o povrch bez významných spádových poměrů a jízdní zkoušky budou tedy probíhat v rovinné zatáčce (oblouku) bez vlivu vertikálního zakřivení. Zjištěný součinitel adheze mezi pneumatikou a vozovkou byl měřením při brzděné zkoušce zjištěn v hodnotě  $0,82 \text{ m/s}^2$ , podrobně k brzděné zkoušce viz následující podkapitola, část pilotní měření.





**Obr. 21:** Místo měření - polygon letiště s vyznačenými významnými body [55]

(Pozn. autora této práce: na **Obr. 21** je na ploše polygonu vyznačeno místo pro kruhové zkoušky, jejichž výsledky nejsou součástí této práce z důvodu technicky umožněného poloměru oblouku pouze 10 a 13 m, kde nebylo možné dosáhnout vyšší rychlosti vozidla).

### 6.2.1.5 Provedená a analyzovaná experimentální měření

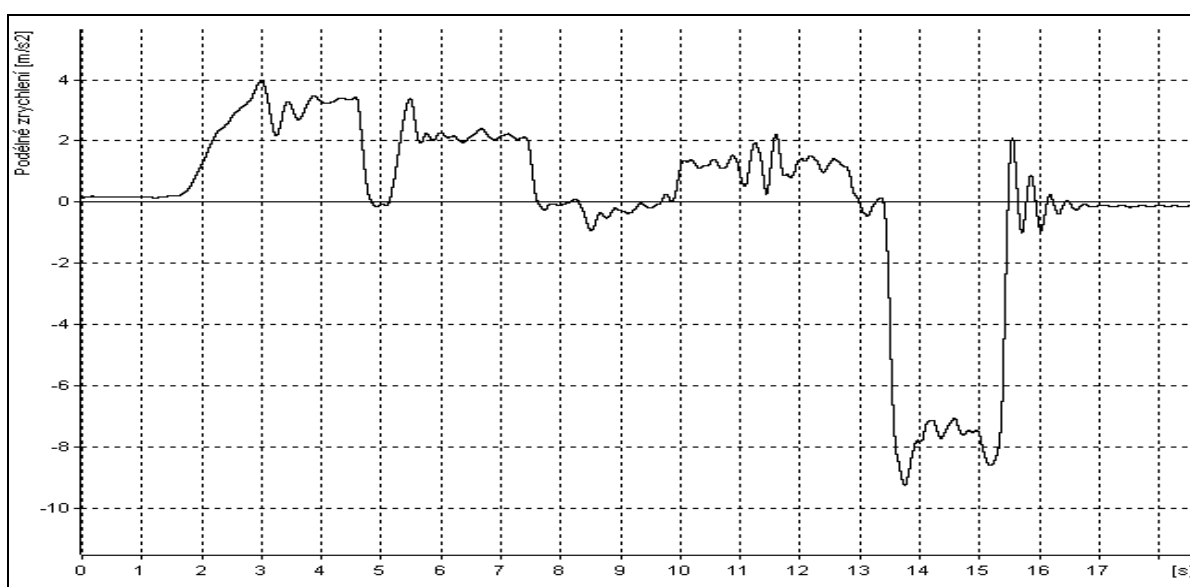
#### a) Pilotní (ověřovací) měření

Pilotní měření probíhalo ve dnech 13.05. a 14.05.2011 s cílem ověření zvolené metodiky měření a sběru dat, především online ukládání údajů z továrních snímačů vozidla pomocí diagnostické sady VAG-COM. Byla vyzkoušena popsaná možnost deaktivace systému ESP tlačítkem na desce palubních přístrojů.

Protože dle již vizuálního zjištění měl betonový povrch letiště odlišnou konturu povrchu v příčném a podélném směru jízdní dráhy, byla provedena brzdná zkouška pro zjištění součinitele adheze v obou směrech (viz **Obr. 22** a **Obr. 23**). V podélném směru jízdní dráhy byl brzdou zkouškou zjištěn součinitel adheze 0,87 a v příčném směru dráhy pak 0,76. Pro zjednodušený výpočet mezní rychlosti vozidla v oblouku byl použit aritmetický průměr těchto hodnot, tedy hodnota součinitele adheze 0,82. Analyticky vypočítaná mezní rychlost dle vztahu (20) je 40,8 km/h.



**Obr. 22:** Kontrolní přímé měření brzdné dráhy měřicím kolečkem (změřena délka brzdné stopy 13,5 m)



**Obr. 23:** Brzdná zkouška vozidla s odpojeným systémem ABS z rychlosti cca 55 km/h, sucho [55]

Pro první pilotní měření v oblouku byla na ploše vyznačena trať šířky cca 3 m se středním poloměrem 16 m. V úvodní fázi pilotního měření bylo provedeno několik nácvikových jízd na suchém povrchu nejprve s aktivovaným a následně deaktivovaným systémem ESP pro zjištění chování vozidla v oblouku. Při rychlostech průjezdu obloukem nižších než mezní rychlost 40,8 km/h nebyl zaznamenán rozdíl v jízdě stabilitě a chování vozidla s aktivovaným a deaktivovaným systémem ESP. Při nájezdové rychlosti do oblouku 45 km/h s deaktivovaným systémem ESP byla překročena hranice stability vozidla a došlo k identifikovatelnému mírnému přetáčivému smyku. Vozidlo se pohybovalo mimo vyznačenou oblast oblouku při udržování přibližně konstantního úhlu natočení volantu. Poté bylo do vyznačeného oblouku s vozidlem najeto rychlostí opět 45 km/h, ale s aktivovaným



systemem ESP a přibližně stejným úhlem natočení volantu. Tento průjezd byl plynulý po vyznačené trase, bez ztráty stability. Zásah systému ESP při této jízdě by byl pro posádku bez znalosti efektu zásahu téměř nezaznamatelný. Rozebranými jízdami manévry byl ověřen jízdní stav a chování vozidla s aktivovaným a deaktivovaným systémem ESP běžným způsobem.

V průběhu dalších pilotních jízd byla ověřena spolehlivost online ukládání dat s pomocí palubní diagnostiky a diagnostické sady VAG-COM. Online měření a ukládání dat ze snímačů fungovalo spolehlivě při průjezdech oblouky nižší než mezní rychlosti. Při průjezdech oblouky rychlostí blízkou mezní rychlosti však došlo hned k několika výpadkům komunikace mezi notebookem a řídicí jednotkou brzd, spojenými prostřednictvím diagnostické zásuvky vozidla. Autor této práce kontaktoval dodavatele diagnostické sady firmu Autocomsoft s identifikací problému. Obratem bylo autorovi této práce sděleno, že důvodem výpadku komunikace mezi ukládáním dat a řídicí jednotkou brzd je skutečnost, že došlo k akčnímu zásahu systému ESP. V okamžiku zásahu systému ESP, kdy reálně nastává kritická jízdní situace, řídicí jednotka automaticky deaktivuje komunikaci s diagnostickým online zařízením a využije veškeré kapacity pro řešení vzniklé kritické jízdní situace, tj. veškerá činnost elektronického systému je zaměřena primárně na stabilizaci vozidla. Stejně tak může docházet k výpadkům komunikace při logování parametrů jízdní dynamiky vozidla a řídicí jednotkou brzd při rychlosti vozidla nad 40 km/h, kdy je jednotka primárně připravena k funkčnímu zásahu stabilizačního systému a plně je připravena na potenciální zásah systému ESP.

#### *Výsledky pilotních měření*

Pilotními měřeními byla úspěšně ověřena navržená metodika pro sběr dat uvedená v kapitole 6.2.1.1 této práce. U parametrů jízdní dynamiky obdržných z továrních snímačů vozidla prostřednictvím palubní diagnostiky bylo experimenty zjištěno, že čím větší množství dat je ukládáno do notebooku přes diagnostickou zásuvku vozidla, tím klesá rychlost a četnost ukládání dat v čase. Jízdami experimenty byl vyvozen zásah systému ESP překročením mezní rychlosti pro zvolený oblouk. Z prvotních naměřených hodnot bočního zrychlení pomocí XL meteru byly zřejmé určité typické diference v průběhu bočního zrychlení pro jízdu s aktivovaným a deaktivovaným systémem ESP, z čehož bylo možné určit okamžik zásahu systému ESP.

Na **Obr. 24** je uveden jeden z dynamických průjezdů vozidla VW Golf obloukem při pilotním měření, ze kterého je zřejmý úhel klopení karoserie vozidla cca 3,5 °. Měřicí přístroje umístěné uvnitř karoserie vozidla, která se v průběhu jízdní zkoušky obloukem naklápí vlivem působící odstředivé síly. Úhel naklopení karoserie je závislý na velikosti odstředivé síly, výšce těžiště vozidla a konstrukci systému odpružení vozidla. Proto tedy měřicími přístroji měříme tzv. boční zrychlení vozidla, které je na rozdíl od zrychlení příčného ovlivněno úhlem naklopení karoserie. Přesná hodnota příčného zrychlení vozidla by měla zahrnovat úhel naklopení karoserie při jízdní zkoušce. Pro výpočet příčného zrychlení ze známého (změřeného) bočního zrychlení platí vztah:

$$a_{pr} = a_{boč} \cdot \cos \chi, \text{ kde } \chi \text{ je úhel naklopení karoserie.} \quad (21)$$

Vzhledem ke známému průběhu goniometrické funkce kosinus lze konstatovat, že pro malé úhly naklopení karoserie cca do 8 °, kdy hodnota kosinu nabývá hodnoty 0,99, můžeme považovat hodnotu bočního zrychlení vozidla rovnu hodnotě příčného zrychlení. Proto se můžeme v textu této práce setkat s oběma označeními s tím, že si je autor této práce vědom rozdílnosti veličin, ale vzhledem k malému naklopení karoserie během jízdních zkoušek, lze velikost změřeného bočního zrychlení považovat za shodnou s velikostí zrychlení příčného získaného výpočtem podle vztahu (21).



**Obr. 24:** Dynamický průjezd vozidla VW Golf obloukem o poloměru 16 m

#### b) Analyzovaná experimentální měření

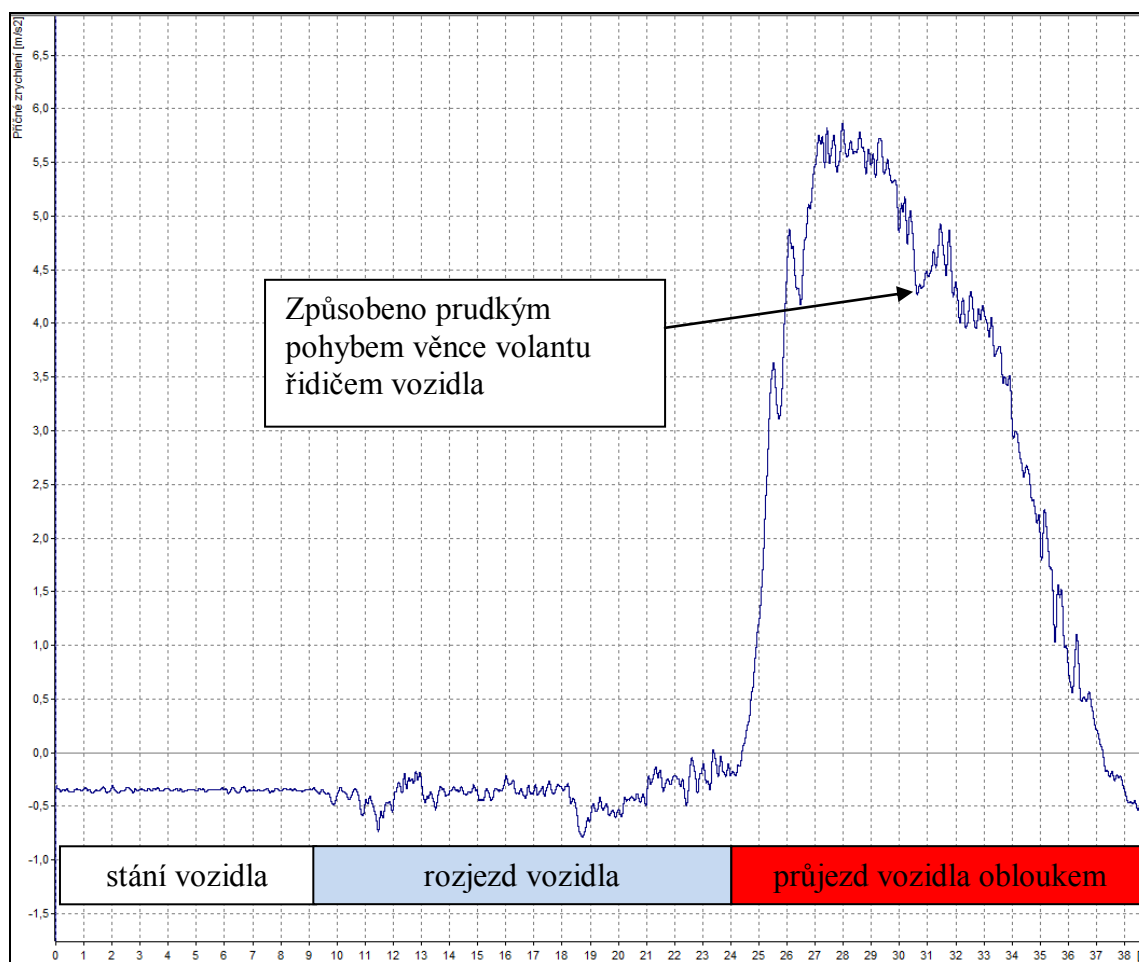
Další měření byla uskutečněna v časovém rozmezí od 15.05. do 19.05.2011. V rámci měřicích dní bylo provedeno celkem 27 jízdních experimentů jízdy vozidla v oblouku, u kterých bylo možné provést vyhodnocení. Celkem osm měření bylo vyřazeno z důvodu buď kolize (selhání) měřicí techniky nebo její obsluhy či nutnosti zkoušku přerušit z důvodu

nestandardního zásahu řidiče do řízení vozidla. Zjištěné parametry jízdní dynamiky vozidla a podmínky měření jsou uvedeny v **příloze č. 2** této práce a na datovém nosiči DVD k této práci.

### 1. Experimentální průjezd obloukem o poloměru 16 m rychlostí 33 km/h s ESP, sucho

Dle **přílohy č. 2** této práce se jedná o měření č. 6 (M6). Střední poloměr pohybu těžiště vozidla 16 m, nájezdová rychlost do oblouku 33 km/h, aktivovaný systém ESP.

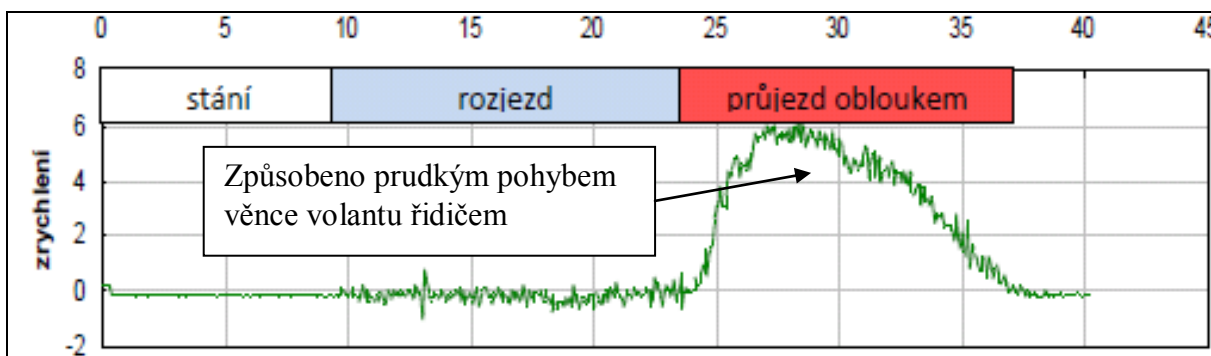
Průběh příčného zrychlení je patrný z **Obr. 25** (ze zařízení XL meter), **Obr. 26** (ze zařízení MBox) a **Obr. 27** (prostřednictvím palubní diagnostiky). Maximální hodnota příčného zrychlení byla v průběhu zkoušky: MFDD dle XL meteru  $6,16 \text{ m/s}^2$ , pomocí MBoxu  $6,18 \text{ m/s}^2$ , pomocí palubní diagnostiky  $6,06 \text{ m/s}^2$ .



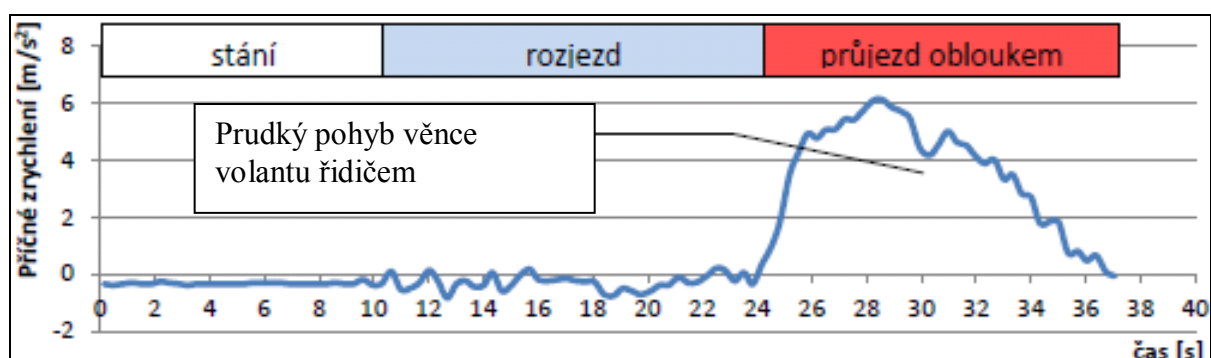
**Obr. 25:** Průběh příčného zrychlení při měření č. 6 (rychlost 33 km/h, oblouk 16 m) s ESP

Příčné zrychlení odpovídá plynulému dosažení maximální hodnoty v oblouku a následuje vcelku plynulý pokles. Což plně koresponduje se způsobem průjezdu obloukem – jednalo se o plynulé zatáčení do oblouku o středním poloměru 16 m, následný průjezd konstantní rychlostí obloukem bez zásahu ESP při konstantním úhlu natočení volantu,

vyjma okamžiku mezi 30 a 31 s, kdy řidič vykonal prudký pohyb věnce volantu z důvodu nedokonalého odhadnutí nájezdu a průjezdu obloukem. Jednalo se v podstatě o reakci řidiče, aby nedošlo k poražení kuželů vyznačujících hranice oblouku. Následoval výjezd z oblouku.



**Obr. 26:** Průběh příčného zrychlení při měření č. 6 z hodnot MBoxu [55]



**Obr. 27:** Průběh příčného zrychlení při měření č. 6 z hodnot palubní diagnostiky [55]

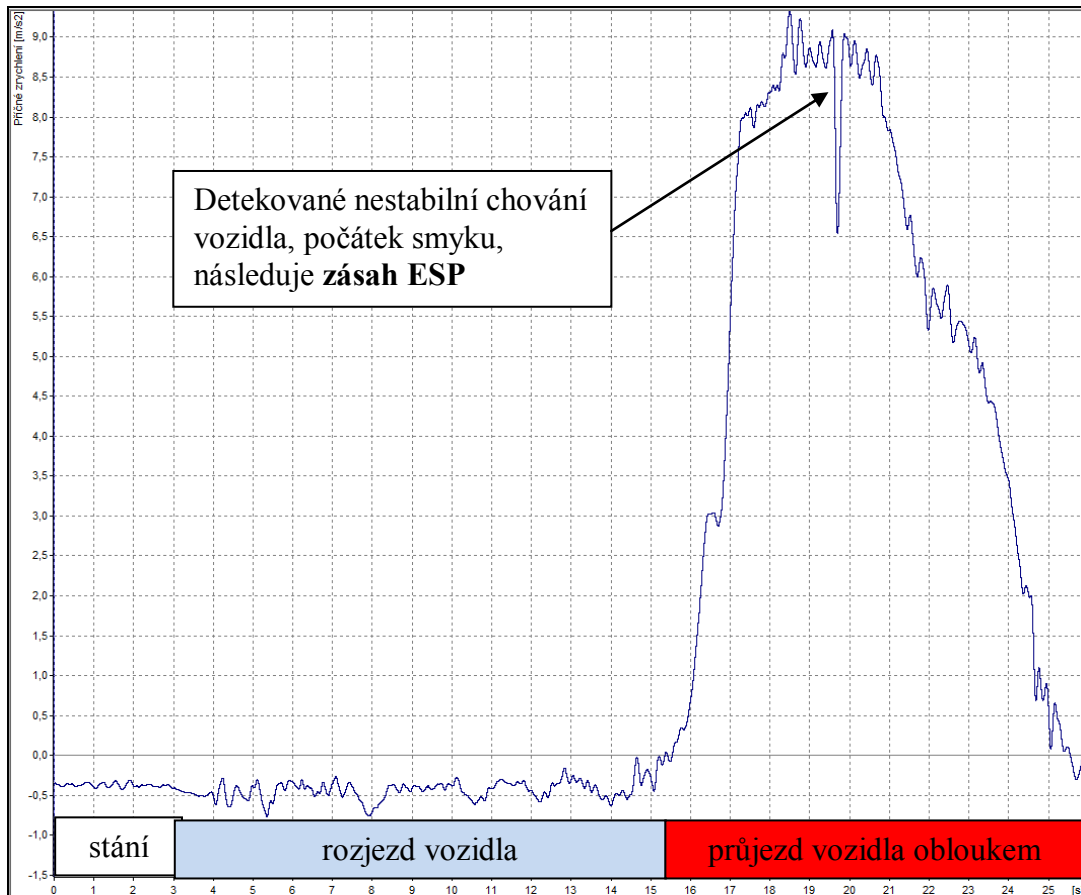
## 2. Experimentální průjezd obloukem o poloměru 16 m rychlostí 41 km/h s ESP, sucho

Dle přílohy č. 2 této práce se jedná o měření č. 7 (M7). Střední poloměr pohybu těžiště vozidla 16 m, nájezdová rychlost do oblouku 41 km/h, aktivovaný systém ESP.

Průběh příčného zrychlení je patrný z **Obr. 28**. Maximální hodnota příčného zrychlení byla v průběhu zkoušky: MFDD dle XL meteru 11,04 m/s<sup>2</sup>, pomocí MBoxu 10,36 m/s<sup>2</sup>, pomocí diagnostiky se nepodařilo data uložit, protože při rychlosti cca 40 km/h byla ukončena komunikace z důvodu funkčního zásahu systému ESP do jízdní dynamiky vozidla.

Dle **Obr. 28** je zřejmé, že v časovém intervalu 18,5 s až cca 19,5 s hodnota příčného zrychlení osciluje kolem 9,0 m/s<sup>2</sup>. Analýzou videozáznamu ze statické kamery (viz **Obr. 29**) bylo po synchronizaci videozáznamu s hodnotami bočního zrychlení z XL meteru zjištěno, že tento časový úsek odpovídá přerušovanému hluku smýkající se pneumatik po povrchu vozovky. Posádka vozidla rozpoznala zásah systému ESP. Sekvence videozáznamu z tohoto průjezdu obloukem jsou zobrazeny na **Obr. 29**. Je tedy zřejmé, že při průjezdu obloukem došlo k vyvození nestabilního jízdního stavu a následnému funkčnímu zásahu systému ESP.

Pokles příčného zrychlení přibližně v čase cca 19,7 s je způsoben mírným smykem, který byl vnímán řidičem i spolujezdcem ve vozidle.



**Obr. 28:** Průběh příčného zrychlení při měření č. 7 (rychlost 41 km/h, oblouk 16 m) s ESP

### Časové sekvence průjezdu obloukem z kamery mimo vozidlo (statická kamera)



Čas 13 s – rozjezd



Čas 15 s – vjezd do oblouku 16 m

**Obr. 29:** Sekvence průjezdu vozidla obloukem o poloměru 16 m, rychlost 41 km/h, zásah ESP [54]  
(první část obrázku; pokračuje na druhé straně)





Čas 16 s – jízda obloukem



Čas 17 s – jízda obloukem



Čas 18 s – jízda obloukem



Čas 20 s – detekovaný zásah systému ESP



Čas 21 s – dokončení průjezdu obloukem



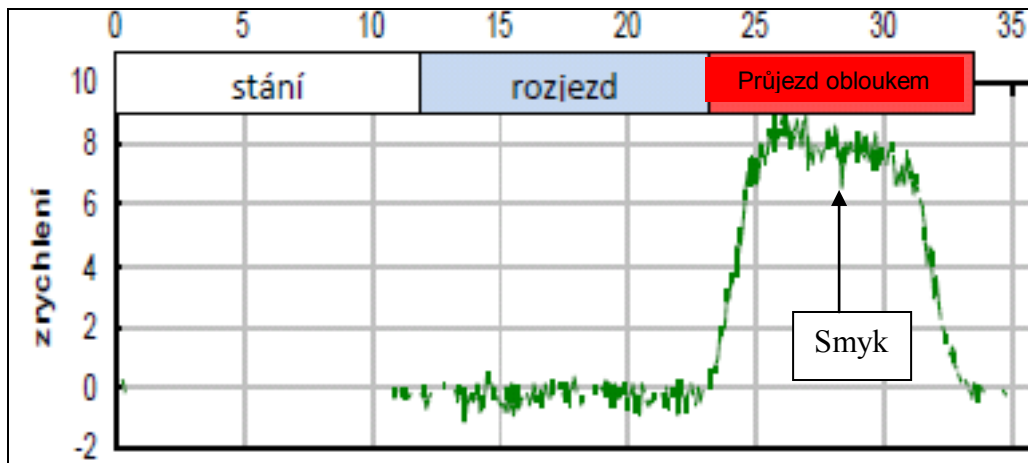
Čas 23 s – výjezd z oblouku

**Obr. 29:** Sekvence průjezdu vozidla obloukem o poloměru 16 m, rychlost 41 km/h, zásah ESP [54]

### 3. Experimentální průjezd obloukem o poloměru 16 m rychlostí 40 km/h bez ESP, sucho

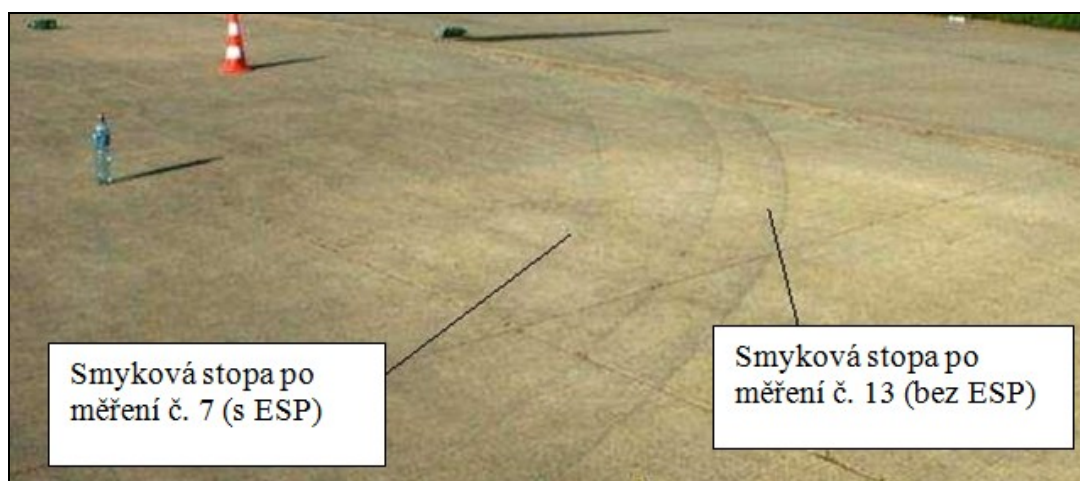
Dle přílohy č. 2 této práce se jedná o měření č. 13 (M13). Střední poloměr pohybu těžiště vozidla 16 m, nájezdová rychlost do oblouku 40 km/h, aktivovaný systém ESP.

Na **Obr. 30** je patrný průběh příčného zrychlení zrekonstruovaný z hodnot naměřených zařízením MBox. Maximální hodnota příčného zrychlení byla v průběhu průjezdu vozidla obloukem zjištěna pomocí XL meteru  $9,07 \text{ m/s}^2$ , pomocí MBoxu  $9,12 \text{ m/s}^2$ , pomocí diagnostiky se nepodařilo data z továrních snímačů vozidla uložit, protože při rozjezdu před najetím vozidla do oblouku byla překročena rychlosti 40 km/h a byla ukončena komunikace s připojeným notebookem k OBD zásuvce vozidla.



**Obr. 30:** Průběh příčného zrychlení při měření č. 6 z hodnot MBoxu [55]

Při průjezdu obloukem posádka vozidla pocitově zaznamenala pohyb na hranici stability vozidla a následný mírný smyk přibližně v čase cca 28 s. Analýzou pořízeného videozáznamu z dynamického záznamu kamery umístěné na čelním skle vozidla bylo zjištěno, že při průjezdu obloukem bylo reálně dosahováno hranice stability vozidla v příčném směru. V analyzovaném videozáznamu je rovněž patrný konstantní nepřerušovaný hluk („pískání“) pneumatik. Smykové stopy po analyzovaném průjezdu vozidla obloukem jsou patrné z **Obr. 31**. Z technického pohledu analytika silničních nehod je si třeba na předmětných smykových stopách povšimnout, že v případě zanechaných smykových stop bez funkčního systému ESP se jedná o identifikovatelnou, nepřerušovanou, výraznou, ale „rozmazanou“ smykovou stopu bez rozpoznání dezénu pneumatiky. V případě měření č. 7 (M7), kdy došlo při průjezdu obloukem k zásahu systému ESP (viz předchozí průjezd obloukem), byly zaznamenány smykové stopy méně výrazné, ale velmi ostré s rozpoznatelným dezénem běhounu pneumatiky (viz **Obr. 31**). Systém ESP tedy zajišťuje stabilní průjezd obloukem při stále se odvalující pneumatice.



**Obr. 31:** Zdokumentované smykové stopy z měření č. 7 (s ESP) a měření č. 13 (bez ESP) [55]

## Časové sekvence záznamu průjezdu obloukem z kamery ve vozidle

Na **Obr. 32** jsou uvedeny časové sekvence průjezdu zkušebního vozidla vyznačeným obloukem.



Čas 15 s – startovní poloha (rozjezd)



Čas 23 s – počátek nájezdu do oblouku



Čas 24 s – průjezd obloukem



Čas 25 s – průjezd obloukem



Čas 26 s – průjezd obloukem



Čas 27 s – detekovaný mírný smyk



Čas 29 s – průjezd obloukem



Čas 32 s – výjezd z oblouku

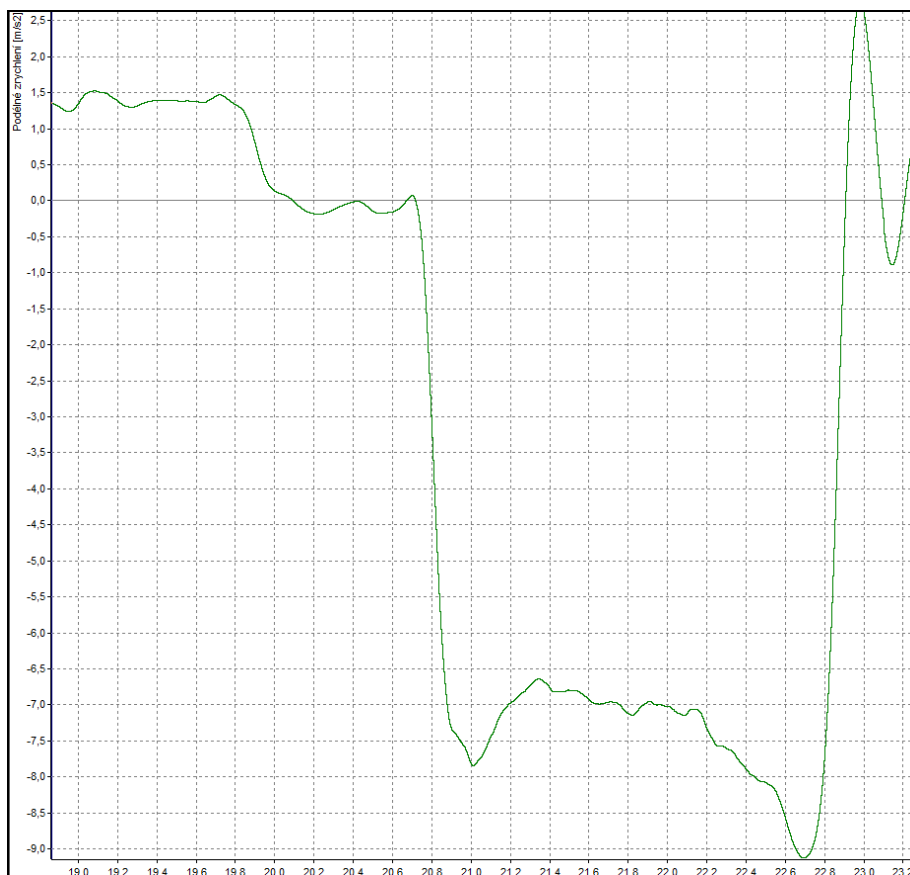
**Obr. 32:** Sekvence průjezdu vozidla obloukem o poloměru 16 m, rychlost 39 km/h, bez ESP [54]



#### 4. Experimentální průjezd obloukem o poloměru 16 m rychlostí 40 km/h s ESP, mokrý povrch vozovky

Dle přílohy č. 2 této práce byla provedená měření č. 15 až 32 (M15 až M32) uskutečněna na mokrém povrchu oblouku letištní plochy. Betonový povrch byl pokropen mýdlovou vodou za účelem snížení součinitele adheze, čímž bude mezní rychlost průjezdu vozidla obloukem nižší.

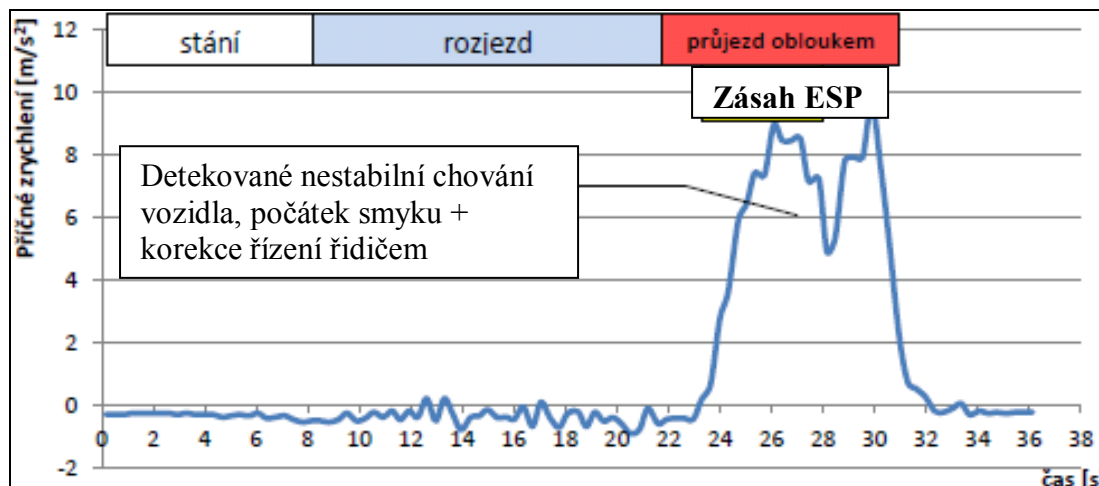
Nejprve byla experimentem č. 14 provedena brzdná zkouška vozidla VW Golf na mokrém povrchu letištní plochy z výchozí rychlosti cca 56 km/h. Průběh brzdného zpomalení je uveden na Obr. 33, ze kterého byla zjištěna střední hodnota brzdného zpomalení  $7,16 \text{ m/s}^2$ , tj. součinitel adheze na mokrém povrchu letištní plochy byl 0,73. Analyticky vypočítaná mezní rychlost dle odvozeného vztahu (20) pro oblouk o poloměru 16 m nabývá hodnoty 38,5 km/h.



**Obr. 33:** Brzdná zkouška vozidla s odpojeným systémem ABS z rychlosti cca 56 km/h, mokro

Proto mohly začít experimenty – průjezdy obloukem na mokrém povrchu. Dle přílohy č. 2 této práce bylo provedeno mj. měření č. 19 (M19). Střední poloměr pohybu těžiště vozidla 16 m, nájezdová rychlost do oblouku 40 km/h, aktivovaný systém ESP.

Na **Obr. 34** je patrný průběh příčného zrychlení zrekonstruovaný z hodnot naměřených palubní diagnostikou. Maximální hodnota příčného zrychlení byla v průběhu průjezdu vozidla obloukem zjištěna XL meterem  $9,33 \text{ m/s}^2$ , pomocí MBoxu  $9,47 \text{ m/s}^2$ , pomocí diagnostiky  $9,62 \text{ m/s}^2$ .



**Obr. 34:** Průběh příčného zrychlení při měření č. 19 z hodnot palubní diagnostiky [55]

Ze zrekonstruovaného průběhu příčného zpomalení na **Obr. 34** je zřejmá detekce nestabilního chování vozidla a následný smyk vozidla v čase 28 s od zahájení zkoušky. Řidič i spolujezdec vozidla rozpoznali výrazný smyk přetáčivého charakteru. Řidič provedl korekci směrového řízení vozidla natočením volantu z důvodu udržení požadovaného průjezdu obloukem. Analýzou pořízeného videozáznamu z měření č. 19 z dynamického záznamu kamery umístěné na čelním skle vozidla bylo zjištěno, že při průjezdu obloukem bylo reálně dosahováno hranice stability vozidla v příčném směru.

#### Časové sekvence záznamu průjezdu obloukem z kamery ve vozidle

Na **Obr. 35** jsou uvedeny časové sekvence průjezdu zkoušeného vozidla vyznačeným obloukem při měření č. 19 na mokřem povrchu letištní plochy.



Čas 20 s – startovní poloha (rozjezd)

Čas 22 s – počátek nájezdu do oblouku

**Obr. 35:** Sekvence průjezdu vozidla obloukem o poloměru 16 m, rychlost 40 km/h, s ESP [54] (první část obrázku; pokračuje na druhé straně)



Čas 23 s – průjezd obloukem



Čas 24 s – průjezd obloukem



Čas 25 s – průjezd obloukem



Čas 26 s – průjezd obloukem, zásah ESP



Čas 27 s – průjezd obloukem, korekce řízení



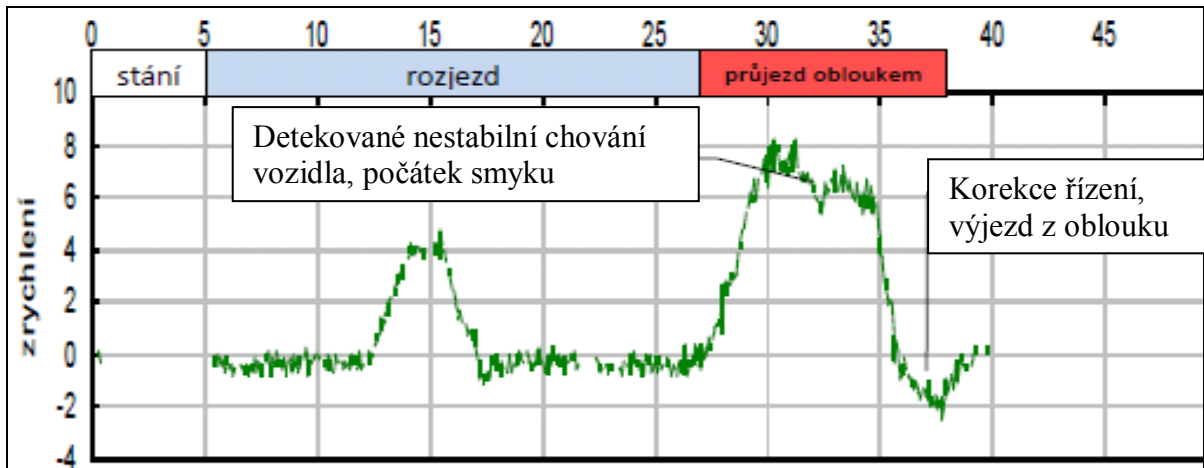
Čas 30 s – výjezd z oblouku

**Obr. 35:** Sekvence průjezdu vozidla obloukem o poloměru 16 m, rychlost 40 km/h, s ESP [54]

## 5. Experimentální průjezd obloukem o poloměru 16 m rychlostí 40 km/h bez ESP, mokrá povrch vozovky

Dle přílohy č. 2 této práce bylo provedeno mj. měření č. 26 (M26). Střední poloměr pohybu těžiště vozidla 16 m, nájezdová rychlost do oblouku 40 km/h, deaktivovaný systém ESP, tj. srovnatelný průjezd obloukem jako při měření č. 19 s rozdílem ve stavu systému ESP.

Na Obr. 36 je patrný průběh příčného zrychlení zrekonstruovaný z hodnot naměřených MBoxem. Maximální hodnota příčného zrychlení byla v průběhu průjezdu vozidla obloukem zjištěna XL meterem 8,24 m/s<sup>2</sup>, pomocí MBoxu 8,39 m/s<sup>2</sup>, pomocí diagnostiky 8,62 m/s<sup>2</sup>.



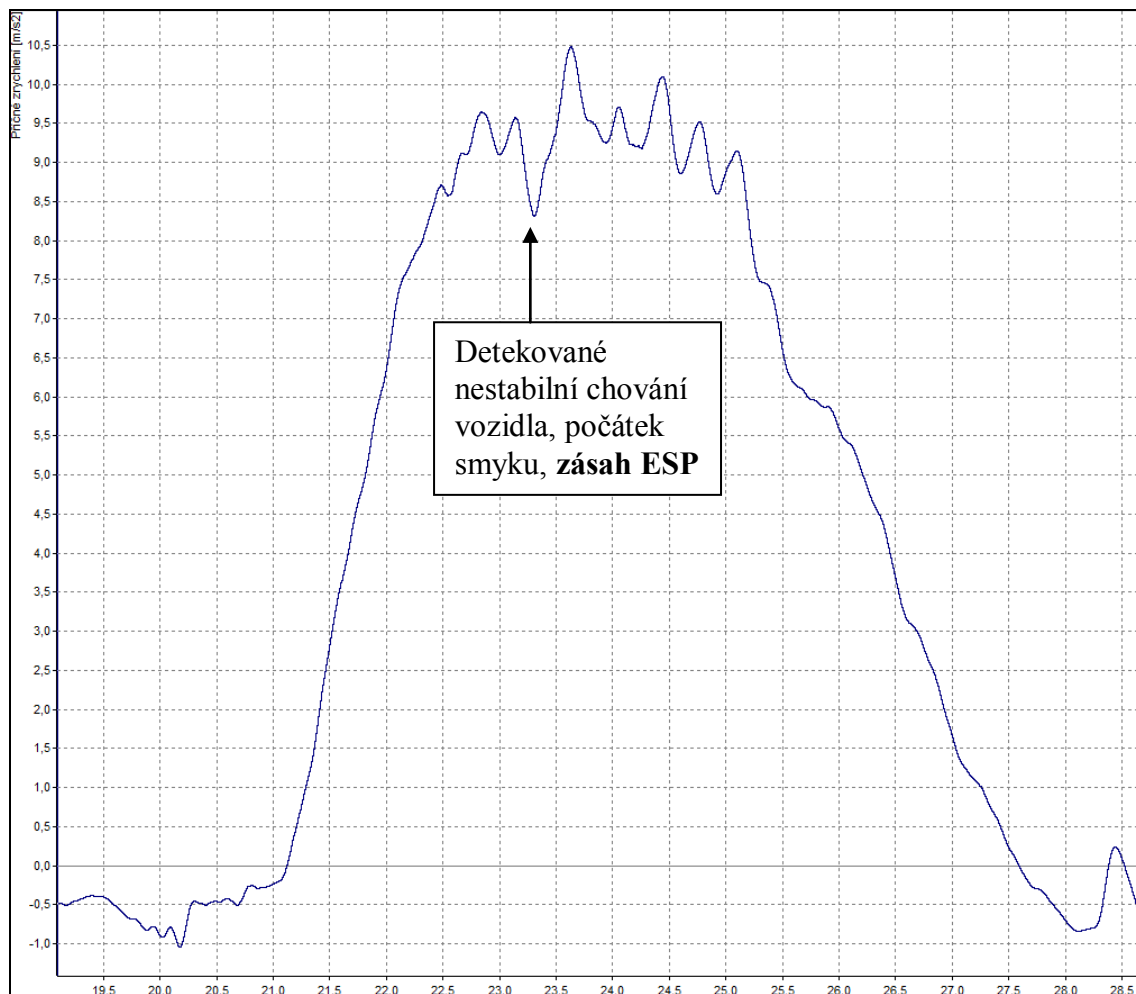
**Obr. 36:** Průběh příčného zrychlení při měření č. 26 z hodnot MBoxu [55]

Na **Obr. 36** je zřejmé, že startovní bod měření č. 26 byl v jiném místě letištní plochy, z důvodu potřeby časově delšího rozjezdu před najetím do měřicího oblouku pro plynulé nastavení tempomatu na požadovanou rychlost 40 km/h. Proto je tedy v čase cca 12,5 s až 17,5 s od rozjezdu vozidla zjevný průjezd neměřicím obloukem a následné směřování vozidla pro najetí do měřicího oblouku, které nastalo v čase cca 26 s. Z průběhu příčného zrychlení vozidla při průjezdu měřicím obloukem je patrná detekce nestabilního chování vozidla a následný smyk nedotáčivého charakteru v čase cca 32,5 s od zahájení zkoušky. Řidič na vzniklý nedotáčivý smyk nereagoval korekcí řízení a vozidlo se dále pohybovalo k vnějšímu okraji oblouku, který opustilo s příčnou vzdáleností cca 0,5 m vně oblouku, čímž byly poraženy kužely umístěné na vnějším okraji oblouku.

## 6. Experimentální průjezd obloukem o poloměru 16 m rychlostí 52 km/h s ESP, mokrá povrch vozovky

Dle **přílohy č. 2** této práce bylo provedeno mj. měření č. 30 (M30). Střední poloměr pohybu těžiště vozidla 16 m, nájezdová rychlost do oblouku 52 km/h, aktivovaný systém ESP.

Na **Obr. 37** je patrný průběh příčného zrychlení zrekonstruovaný z hodnot naměřených XL meterem. Maximální hodnota příčného zrychlení byla v průběhu průjezdu vozidla obloukem zjištěna XL meterem 11,18 m/s<sup>2</sup>, pomocí MBoxu 10,8 m/s<sup>2</sup>, pomocí diagnostiky se data nepodařilo zaznamenat z důvodu výpadku komunikace mezi ukládáním dat do notebooku a řídicí jednotkou brzd, spojených přes diagnostickou zásuvku vozidla.



**Obr. 37:** Průběh příčného zrychlení při měření č. 30 z hodnot XL meteru

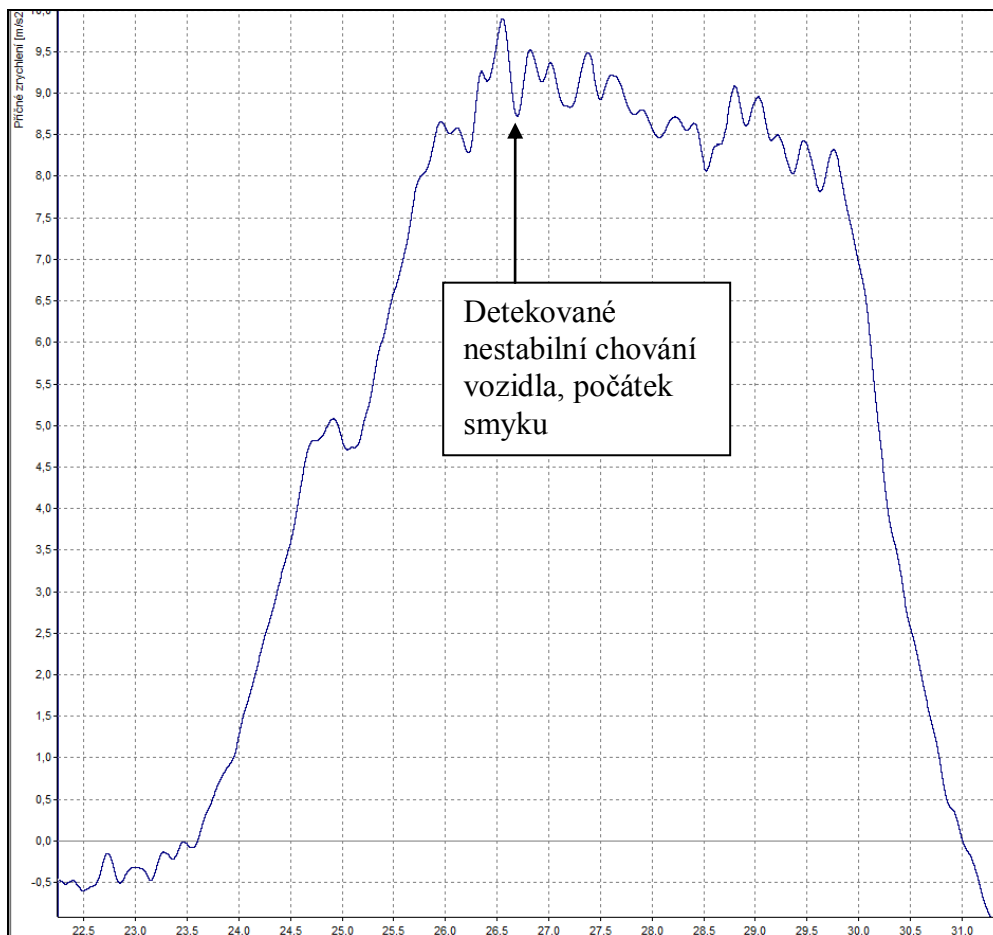
Z průběhu příčného zrychlení vozidla při průjezdu obloukem je patrná detekce nestabilního chování vozidla a následný přetáčivý smyk vozidla v čase cca 23,3 s od zahájení zkoušky. Zásahem systému ESP byl vytvořen stabilizující moment vozidla, který zřetelně rozpoznal řidič i spolujezdec. Řidič na vzniklý smyk nereagoval korekcí řízení a vozidlo se dále pohybovalo k vnějšímu okraji oblouku, který opustilo s příčnou vzdáleností cca 1,0 m vně oblouku, čímž byly poraženy kužely umístěné na vnějším okraji oblouku.

### **7. Experimentální průjezd obloukem o poloměru 16 m rychlostí 50 km/h bez ESP, mokrá povrch vozovky**

Dle **přílohy č. 2** této práce bylo provedeno mj. měření č. 31 (M31). Střední poloměr pohybu těžiště vozidla 16 m, nájezdová rychlost do oblouku 50 km/h, deaktivovaný systém ESP.

Na **Obr. 38** je patrný průběh příčného zrychlení zrekonstruovaný z hodnot naměřených XL meterem. Maximální hodnota příčného zrychlení byla v průběhu průjezdu

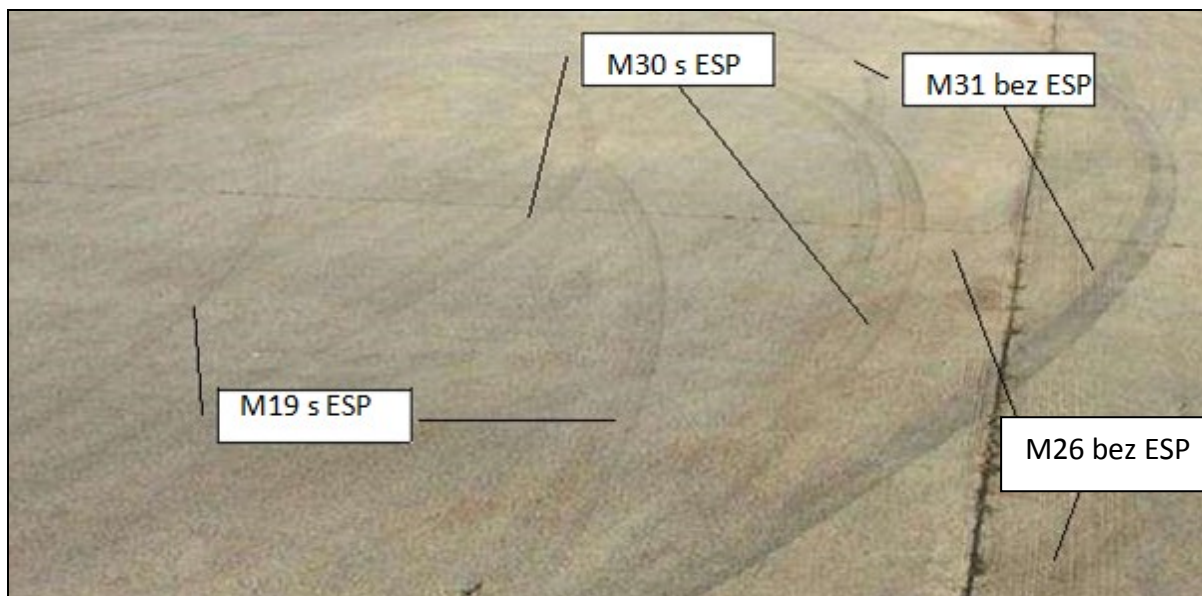
vozidla obloukem zjištěna XL meterem  $10,31 \text{ m/s}^2$ , pomocí MBoxu  $10,22 \text{ m/s}^2$ , pomocí diagnostiky se data nepodařilo zaznamenat z důvodu výpadku komunikace mezi ukládáním dat a řídicí jednotkou brzd. S využitím palubní diagnostiky byla přes řídicí jednotku vozidla kontrolována rychlost vozidla v oblouku.



**Obr. 38:** Průběh příčného zrychlení při měření č. 31 z hodnot XL meteru

Z průběhu příčného zrychlení vozidla při průjezdu obloukem je patrná detekce nestabilního chování vozidla a následný přetáčivý smyk vozidla v čase cca 28,5 s od zahájení zkoušky. Řidič byl na vznik smyk připraven, nereagoval korekcí řízení a vozidlo se dále pohybovalo k vnějšímu okraji oblouku, který opustilo s příčnou vzdáleností cca 0,8 m vně oblouku, čímž byly poraženy kužely umístěné na vnějším okraji oblouku. Na povrchu letištní plochy byly zanechány smykové stopy po jednotlivých průjezdech vozidla obloukem. Po oschnutí povrchu vozovky byly zdokumentovány zanechané smykové stopy na **Obr. 39**.





**Obr. 39:** Zanechané smykové stopy po jednotlivých průjezdech oblouky (popisky označují číslo měření a aktivaci/deaktivaci systému ESP) [55]

#### 6.2.1.6 Vyhodnocení provedených experimentálních měření na letišti Vyškov

Provedenými a následně analyzovanými průjezdy vozidla v oblouku o poloměru 16 m byla na suchém povrchu zjištěna hodnota příčného zrychlení cca  $8,0 \text{ m/s}^2$  při rychlosti okolo 40 km/h (tj. velmi blízko mezní rychlosti), kdy se vozidlo s deaktivovaným systémem ESP nacházelo na hranici stability při jízdě v oblouku, byly zaznamenány zanechané smykové stopy po průjezdu obloukem (viz měření č. 13). Okolo hodnoty příčného zrychlení cca  $9,0 \text{ m/s}^2$  při rychlosti okolo 41 km/h (tj. při mezní rychlosti) byly zaznamenány výrazné zásahy stabilizačního systému ESP (viz měření č. 7). Analyzovanými průjezdy vozidla v oblouku byla na mokřem povrchu zjištěna hodnota příčného zrychlení cca  $9,5 \text{ m/s}^2$  při nájezdové rychlosti do oblouku okolo 52 km/h, kdy byly detekovány zásahy systému ESP a následně i mírné nedotáčení vozidla v oblouku (viz měření č. 30). Ztráta směrové stability (smyk) vozidla při deaktivovaném systému ESP nastala při nájezdové rychlosti 50 km/h a příčném zrychlení  $9,0 \text{ m/s}^2$  (viz měření č. 31).

Z provedených a vyhodnocených jízd vozidla VW Golf V. generace v definovaném oblouku je zjevný významný vliv elektronického stabilizačního systému ESP na jízdní dynamiku vozidla. Stabilizační systém umožní vozidlu pohyb obloukem s vyšším využitím součinitele adheze v příčném směru, než odpovídá mezní rychlosti vozidla stanovené analytickým výpočtem, což je patrné ze zjištěných průběhů příčného zrychlení vozidla v oblouku. Tento výrok bude ověřen dalšími rozsáhlými experimenty provedenými v rámci této dizertační práce.

Při vzniku kritické jízdní situace řídicí jednotka systému ESP vyhodnotí nestabilní jízdní stav na základě poskytnutých údajů o aktuální jízdní dynamice z továrních snímačů vozidla a vydá pokyn akčním členům - zejména kolovým brzdám (podrobně viz **kapitola 4.3.2** této práce), jejichž prostřednictvím je následně eliminován stáčivý moment vozidla vzniklý vlivem vytvořené jízdní situace. Zásah akčních členů systému ESP vytvoří v konečném důsledku stáčivý moment stejné velikosti jaký je generován kritickou jízdní situací. Protože oba tyto momenty působí v opačném směru, eliminují se, čímž je vozidlo směrově stabilizováno. Vozidlo se pak dále pohybuje ve směru natočených kol (resp. směru směrových úchylek kol) bez možnosti akcelerace (řídicí jednotka motoru omezí výkon přenášený na kola) z důvodu zachování stability průjezdu obloukem.

Významným poznatkem, např. pro analýzu zdokumentovaných stop po skutečné dopravní nehodě, zjištěným v rámci provedených experimentálních měření je stav zanechaných smykových stop po průjezdech vozidla obloukem. Z **Obr. 39** je na zanechaných smykových stopách zřetelný významný rozdíl, pokud byl aktivován, resp. deaktivován systém ESP. Smykové stopy po měřeních č. 19 a 30 s aktivovaným systémem ESP byly ostré s rozpoznatelným dezénem běhounu pneumatiky, ale méně výrazné, tedy hůře dohledatelné na povrchu vozovky např. při ohledání místa dopravní nehody policií. Zatímco smykové stopy po měřeních č. 26 a 31 s deaktivovaným systémem ESP byly podstatně výraznější, ale bez možnosti rozpoznat dezén pneumatiky (smyková stopa byla „slita“ v jeden výrazně viditelný a jednoduše dohledatelný celek).

## **6.2.2 Experimentální měření na polygonu společnosti Škoda auto a.s.**

V rámci sběru dat pro splnění stanovených cílů této dizertační práce proběhly v roce 2011 a 2012 dvě série experimentálních měření na polygonu společnosti Škoda Auto a.s. v Úhelnici u Mladé Boleslavi. Účelem prvního měření bylo analyzovat chování vozidla při příčném přemístění dvěma oblouky při vysoké rychlosti průjezdu s aktivovaným a deaktivovaným systémem jízdní stability ESP se zaměřením na dosažitelné zrychlení vozidla a adhezi v příčném směru. Experimentální měření v dubnu roku 2012 byla primárně zaměřena na analýzu pohybu vozidla v definovaném oblouku s ohledem na zjištění dosažitelného zrychlení vozidla v příčném směru při aktivovaném a deaktivovaném systému jízdní stability označovaného zkratkou ESP.

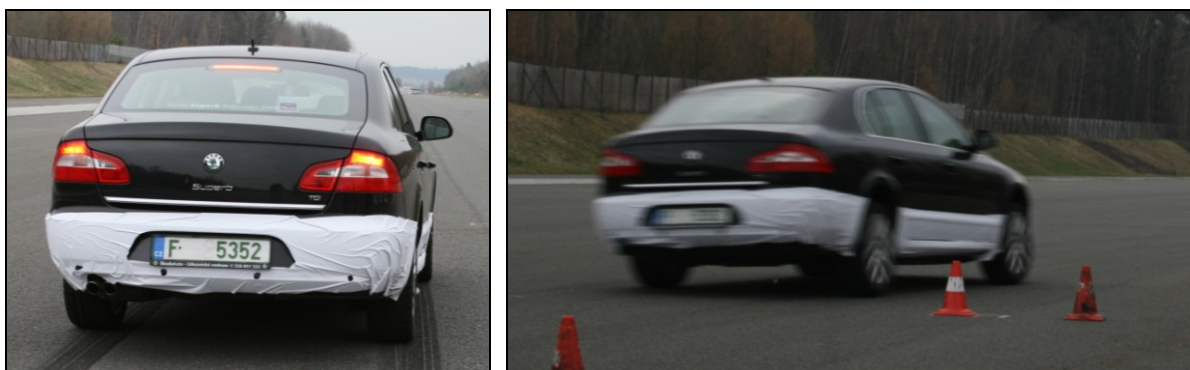


### 6.2.2.1 Analýza příčného přemístění vozidla Škoda Superb II dvěma oblouky

V rámci zkoumané analýzy chování vozidla v oblouku bylo dne 06.04.2011 provedeno experimentální měření jízdních parametrů vozidla Škoda Superb II 2.0 TDI PD při příčném přemístění dvěma oblouky při vysoké rychlosti průjezdu definovanou trasou s aktivovaným a následně deaktivovaným stabilizačním systémem ESP se zaměřením na dosažitelné zrychlení vozidla v příčném směru. Primárním cílem měření bylo ověřit dosažitelné příčné zrychlení vozidla Škoda Superb II při příčném přemístění dvěma oblouky posuzovaného v rámci znalecké činnosti ÚSI VUT v Brně, podrobně viz článek [40].

#### 6.2.2.1.1 Měřený objekt – vozidlo Škoda Superb II

Podrobné technické parametry zkoušeného vozidla Škoda Superb II 2.0 TDI PD jsou uvedeny v **příloze č. 3** této práce. Vozidlo bylo osazeno pneumatikami Pirelli Sottozero 225/45 R 17 94 V M+S s výškou dezénu 8,0 mm na všech kolech s huštěním na předepsaný tlak výrobcem vozidla. Předmětné vozidlo po celý průběh experimentálních jízdních zkoušek řídil zkušený testovací řidič výrobce vozidla, čímž byla zaručena vysoká spolehlivost a přesnost opakovaných průjezdů definovaným jízdním koridorem.



*Obr. 40: Měřený objekt - vozidlo Škoda Superb II*

#### 6.2.2.1.2 Měřicí přístroje

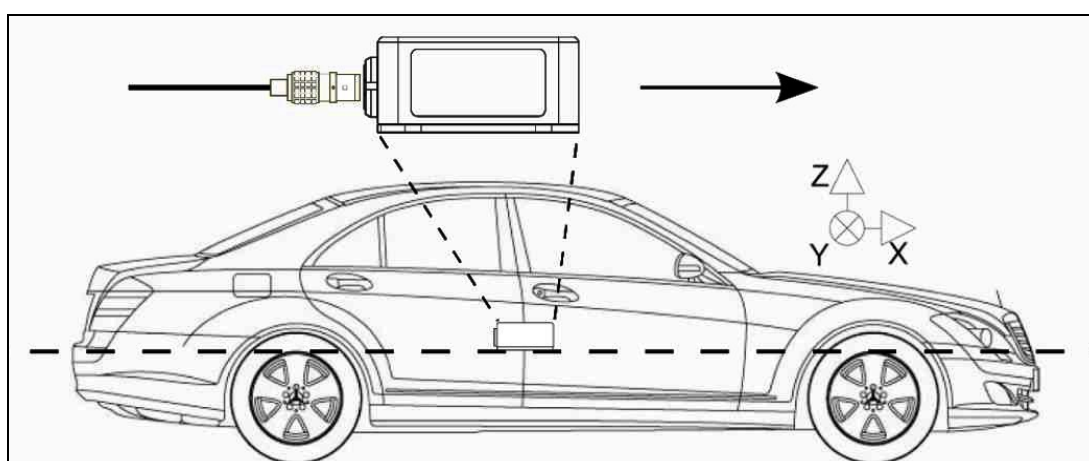
Pro zjišťování parametrů jízdní dynamiky vozidla Škoda Superb při příčném přemístění bylo využito zařízení Racelogic, typ MFD RLVBDSP03 od anglického výrobce Racelogic UK, jehož zobrazovací a ovládací jednotka (multifunkční displej MFD) byla umístěna přísavkou na čelním skle vozidla (viz **Obr. 41**). Externí měřicí jednotka IMU zařízení Racelogic byla pevně umístěna na středním tunelu vozidla v podélné ose vozidla (viz **Obr. 42**). Montážní poloha měřicí jednotky ve vozidle je zřejmá z **Obr. 43**. Měřenými a ukládanými parametry jízdní dynamiky vozidla byla ujetá dráha, rychlost vozidla (pomocí GPS modulu), úhel natočení volantu, stáčivá rychlost vozidla, podélné a příčné zrychlení.



*Obr. 41: Zobrazovací jednotka zařízení Racelogic*



*Obr. 42: Měřicí jednotka zařízení Racelogic*



*Obr. 43: Montážní poloha měřicí jednotky zařízení Racelogic v ilustrativním vozidle [41]*

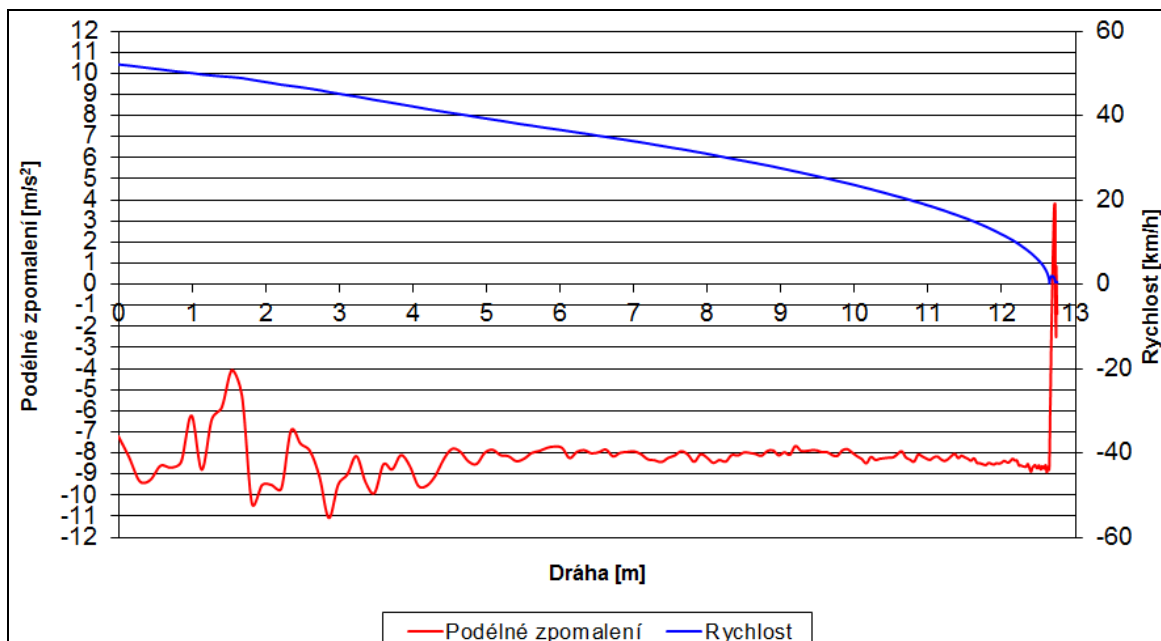
### 6.2.2.1.3 Měřicí plocha – parametry polygonu

Testovací polygon má celkovou délku 3000 m, základní šířku 15 m, v úseku 700 až 1400 m je rozšířen na 38 m. Povrch polygonu je tvořen kvalitní asfaltovou vrstvou (viz **Obr. 44**).

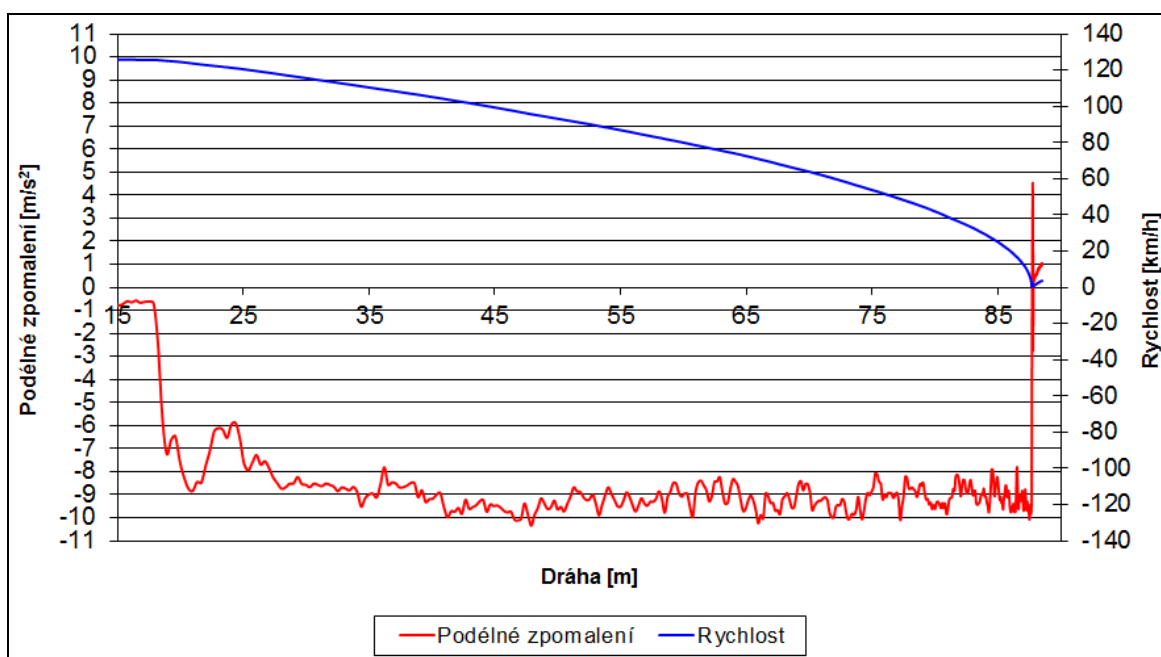


***Obr. 44:** Polygon společnosti Škoda Auto a.s. v Úhelnici vč. vyznačení místa provedení jízdních zkoušek [42]*

Experimentální měření bylo za účelem zjištění součinitele adheze mezi pneumatikou a vozovkou polygonu zahájeno brzdou zkouškou z rychlosti 50 km/h s odpojeným systémem ABS. Brzdou zkouškou bylo na suchém povrchu polygonu naměřeno již popsaným zařízením Racelogic podélné zpomalení vozidla ve střední hodnotě  $8,2 \text{ m/s}^2$  (viz **Obr. 45**). Následně byla provedena brzdou zkouška z rychlosti 130 km/h s připojeným systémem ABS, při které bylo naměřeno podélné zpomalení ve střední hodnotě  $8,7 \text{ m/s}^2$  (viz **Obr. 46**). Součinitel adheze mezi pneumatikou a vozovkou se tedy nacházel v technicky přijatelném rozmezí 0,84 až 0,90.



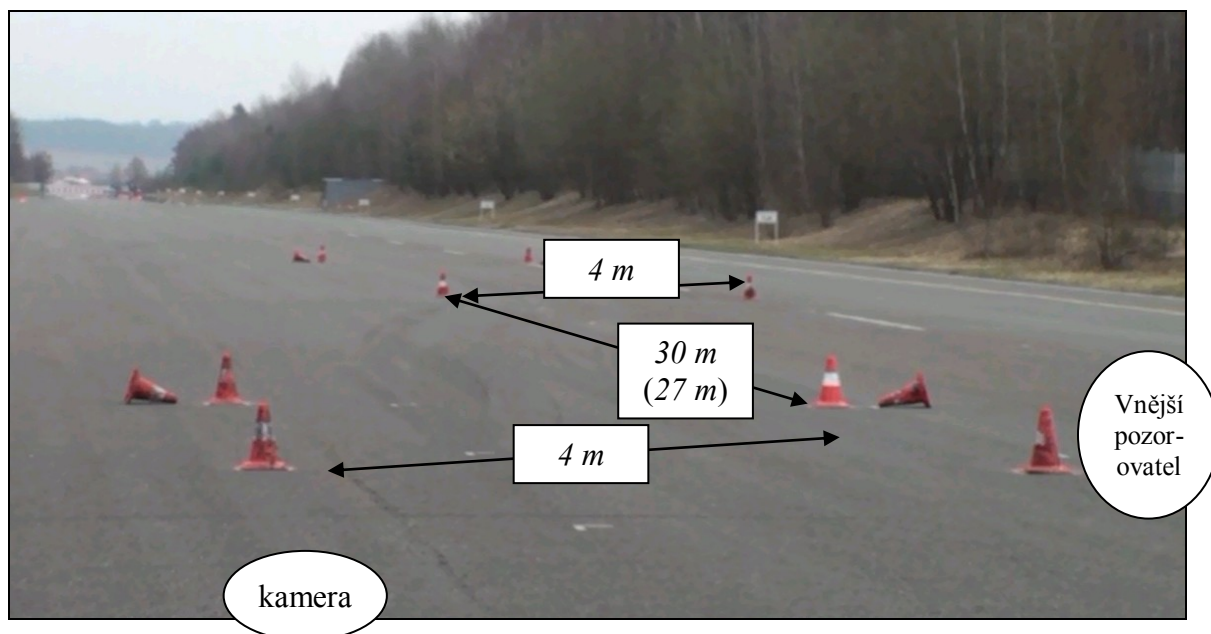
**Obr. 45:** Brzdná zkouška z rychlosti 50 km/h bez ABS



**Obr. 46:** Brzdná zkouška z rychlosti 130 km/h s ABS

Po provedených brzdných zkouškách byla na měřicí části polygonu postavena zkušební jízdní dráha s vymezením koridoru pohybu vozidla při příčném přemístění dvěma oblouky pomocí kuželů (viz **Obr. 47**). Šířka jízdního koridoru byla 4 m, volná podélná vzdálenost potřebná na příčné přemístění byla nejprve 30 m, poté při dalších průjezdech snížena na 27 m.





**Obr. 47:** Zkušební dráha určená pro příčné přemístění vozidla dvěma oblouky

#### 6.2.2.1.4 Provedená a analyzovaná experimentální měření

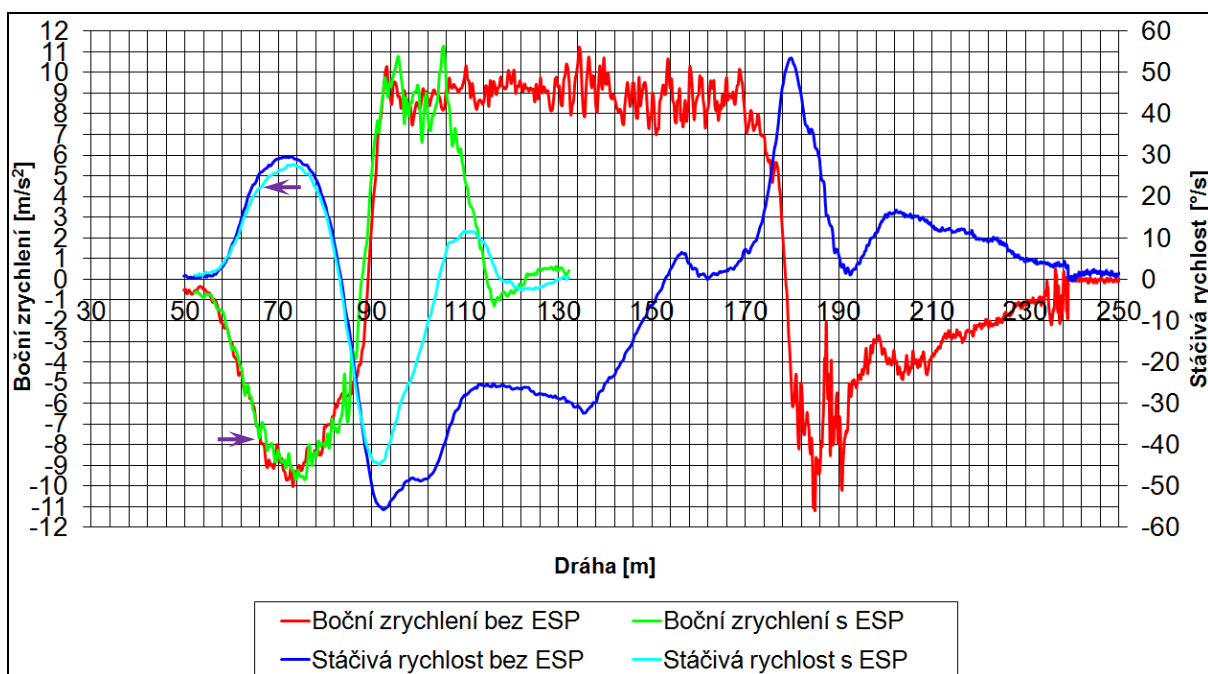
V rámci uskutečněných experimentů bylo provedeno celkem šest průjezdů předmětného vozidla Škoda Superb II definovaným jízdním koridorem dvěma oblouky podle **Obr. 47** při vysoké rychlosti v rozmezí od 95 km/h do 130 km/h. Souhrnné parametry jednotlivých průjezdů předmětného vozidla Škoda Superb jsou uvedeny v následující **Tabulka 8**. Naměřené parametry jízdní dynamiky vozidla jsou graficky zobrazeny a okomentovány v textu dále (viz **Obr. 48** až **Obr. 57**).

**Tabulka 8:** Parametry jednotlivých zkušebních jízd vozidla vyznačeným koridorem

Číslo jízdy	Rychlost vozidla [km/h]	Podélná vzdálenost pro příčné přemístění dvěma oblouky [m]	Stav ESP
1	122	30	aktivované
2	124	30	deaktivované
3	122	27	aktivované
4	116	27	deaktivované
5	107	27	deaktivované
6	95	27	deaktivované

Z **Tabulka 8** je zjevné, že nejporovnatelnější jízdy z hlediska parametrů jízdní dynamiky vozidla s aktivovaným a deaktivovaným systémem ESP jsou průjezdy oblouky č. 1 a 2. Podélná vzdálenost potřebná pro příčné přemístění vozidla dvěma oblouky byla pro obě jízdy 30 m. Vyznačeným jízdním koridorem projelo předmětné vozidlo nejprve rychlostí 122 km/h s aktivovaným systémem ESP, přičemž systém ESP musel pro zachování požadovaného jízdního směru zasáhnout. Detekované zásahy systému ESP jsou zřejmé z průběhu bočního zrychlení (zelená křivka) na **Obr. 48** a zásahy nastaly zejména při průjezdu druhého oblouku.

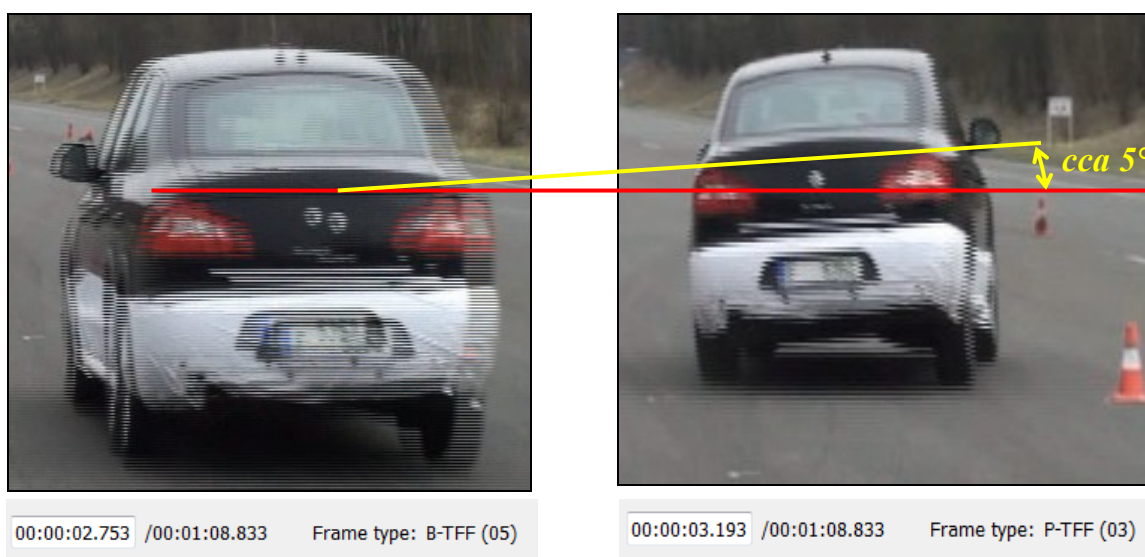
Následně byl shodný průjezd vozidla dvěma oblouky opakován s tím, že systém ESP byl deaktivován. Nájezdová rychlost vozidla byla 124 km/h. Ani zkušený řidič však nedokázal při této rychlosti projet vyznačeným jízdním koridorem bez ztráty směrové stability vozidla. Nestabilní stav vozidla (smyk) nastal hned po průjezdu prvním obloukem na počátku příčného přemístění. Extrémně nestabilní jízdní stav je zjevný z průběhu stáčivé rychlosti vozidla (modrá křivka) a bočního zrychlení (červená křivka) na **Obr. 48**. Vozidlo se dále pohybovalo několika smyky do zastavení, což je patrné z průběhu bočního zrychlení a stáčivé rychlosti bez ESP, viz červená, resp. modrá křivka na **Obr. 48**. Běžný i zkušený řidič by v silničním provozu stěží takovouto jízdní situaci zvládl bez důsledku dopravní nehody.



**Obr. 48:** Porovnání bočního zrychlení a stáčivé rychlosti při příčném přemístění vozidla Škoda Superb dvěma oblouky na podélné vzdálenosti 30 m při rychlosti 124 km/h bez ESP a 122 km/h s ESP (fialovými šipkami vyznačen již výrazný zásah ESP patrný z průběhu stáčivé rychlosti i bočního zrychlení)

Na **Obr. 48** je fialovými šipkami vyznačen již zřetelný zásah stabilizačního systému ESP do jízdní dynamiky vozidla při prvním oblouku příčného přemístění, kdy boční zrychlení vozidla dosáhlo hodnoty cca  $7,8 \text{ m/s}^2$  a hodnota stáčivé rychlosti  $22 \text{ }^\circ/\text{s}$ , resp.  $0,4 \text{ rad/s}$ .

Na **Obr. 49** a **Obr. 50** jsou zobrazeny dva dynamické stavy vozidla při jízdě č. 1. Ze vzájemného porovnání polohy karoserie při příčném přemístění prvním obloukem je zřejmý úhel naklonění karoserie vlivem dynamického jízdního manévru o velikosti cca  $5 \text{ }^\circ$ . Tato hodnota úhlu naklonění karoserie odpovídá i jízdě č. 2, tj. z pohledu jízdní dynamiky nejdynamičtějším jízdním stavům během provedeného jízdního experimentu.



**Obr. 49:** Počátek příčného přemístění prvním obloukem při rychlosti  $122 \text{ km/h}$  s ESP (nulové naklonění karoserie)

**Obr. 50:** Max. naklonění karoserie vozidla při příčném přemístění prvním obloukem při rychlosti  $122 \text{ km/h}$  s ESP

Hodnota příčného zrychlení vozidla by měla zahrnovat úhel naklonění karoserie při příčném přemístění dvěma oblouky. Pro výpočet příčného zrychlení ze známého (změřeného) bočního zrychlení platí vztah (21):

$$a_{př} = a_{boč} \cdot \cos \chi, \text{ kde } \chi \text{ je úhel naklonění karoserie.} \quad (22)$$

Z hodnot bočního zrychlení vozidla s aktivovaným systémem ESP při průjezdu prvním obloukem je z **Obr. 48** zřejmé, že dosažitelná hodnota příčného zrychlení byla cca  $9,0 \text{ m/s}^2$ , ve druhém oblouku byla hodnota příčného zrychlení opět cca  $9,0 \text{ m/s}^2$ , která však byla při překročení hodnoty  $10 \text{ m/s}^2$  regulována zřetelnými zásahy systému ESP z důvodu zajištění směrové stability vozidla (viz zelená křivka na **Obr. 48** při ujeté dráze cca 95 až 105 m od začátku jízdní zkoušky).

Po aplikaci vztahu pro výpočet příčného zrychlení na základě známého bočního zrychlení a úhlu naklonění karoserie pro průjezd prvním obloukem jízdy č. 1 dostaneme:

$$a_{př1} = a_{boč1} \cdot \cos \chi = 9,0 \cdot \cos 5^\circ = 8,97 \text{ m/s}^2. \quad (23)$$

Proto můžeme zopakovat, že pro malé úhly naklonění karoserie cca do  $8^\circ$ , kdy hodnota kosinu nabývá hodnoty 0,99, můžeme považovat hodnotu bočního zrychlení vozidla rovnu hodnotě příčného zrychlení. Proto se můžeme v textu této práce setkat s oběma označeními s tím, že si je autor této práce vědom rozdílnosti veličin, ale vzhledem k malému naklonění karoserie během jízdních zkoušek, lze velikost změřeného bočního zrychlení považovat za shodnou s velikostí zrychlení příčného získaného výpočtem podle vztahu (22).

#### Stanovení nového koeficientu pro výpočet minimální doby potřebné pro příčné přemístění vozidla vybaveného elektronickým stabilizačním systémem jízdní dynamiky

Nyní z hlediska komplexnosti řešení problematiky specifického pohybu vozidla dvěma oblouky při jízdním manévru příčného přemístění bude nalezen nový koeficient tzv. Kovaříkova vzorce v Bradáčově úpravě pro výpočet nejmenší doby potřebné pro příčné přemístění vozidla vybaveného elektronickým stabilizačním systémem.

Kovaříkův vzorec v Bradáčově úpravě:

$$t_y \geq k \cdot \sqrt{\frac{y}{a_{y,\max}}}, \text{ kde pro přemístění dvěma oblouky s přechodnicemi platí } k = 3,13. \quad (24)$$

Z provedeného experimentu - jízdy č. 1 byly získány tyto vstupní hodnoty pro výpočet:

- čas na počátku příčného přemístění vozidla Škoda Superb je 00:00:02:753 (ve formátu hh:mm:ss:mss), viz **Obr. 51a**,
- čas na konci příčného přemístění vozidla Škoda Superb je 00:00:04:553, viz **Obr. 51b**,
- příčná vzdálenost přemístění vozidla 4,0 m (viz **Obr. 47**),
- maximální příčné zrychlení vozidla s ESP 9,0 m/s<sup>2</sup> (viz obr. **Obr. 48**).





00:00:02.753 /00:01:08.833

a) počátek příčného přemístění



00:00:04.553 /00:01:08.833

b) konec příčného přemístění

**Obr. 51:** Počátek a konec příčného přemístění dvěma oblouky při rychlosti 122 km/h s ESP

Z Kovaříkova vzorce vyjádříme výpočet koeficientu  $k$  pro vozidlo vybavené systémem ESP:

$$k \leq t_y \cdot \sqrt{\frac{a_{y \max}}{y}} = 1,8 \cdot \sqrt{\frac{(8,5 \text{ až } 9,0)}{4,0}} = 2,6 \text{ až } 2,7 \quad (25)$$

Na základě opakovaně provedených experimentálních měření lze stanovit nový koeficient pro výpočet nejkratší doby příčného přemístění dvěma oblouky pro vozidla vybavená elektronickými stabilizačními systémy v rozmezí hodnot 2,6 až 2,7.

Ověření nového koeficientu znaleckou praxí, resp. skutečným provozem vozidel

Na **Obr. 52** a **Obr. 53** jsou z kamerového záznamu z mýtné brány s uvedeným časem zřetelné polohy vozidla Škoda Superb vybaveného stabilizačním systémem ESP při příčném přemístění dvěma oblouky z reálného silničního provozu. Příčné přemísťování vozidla do pravého jízdního pruhu započalo přibližně v čase 17,953 s (viz **Obr. 52**). Vozidlo se přemístilo k pravému okraji vozovky v čase cca 20,109 s (viz **Obr. 53**), tedy za dobu cca 2,16 s od počátku příčného přemísťování. Příčné přemístění vozidla činilo cca 4 m.

Využitý součinitel adheze v příčném směru lze vypočítat ze vztahu (26) určeného pro výpočet doby potřebné na příčné přemístění vozidla dvěma oblouky s přechodnicemi:

$$t_y = 1,0 \cdot \sqrt{\frac{y}{\mu_y}} \quad (26)$$

$$\mu_y = \frac{y}{t^2} = \frac{4,0}{2,16^2} = 0,86 \quad (27)$$

Dosažením zjištěného součinitele adheze v příčném směru ze vztahu (27) v hodnotě 0,86 do vztahu (25) nyní ověřím nový koeficient pro výpočet nejkratší doby příčného přemístění dvěma oblouky pro vozidla vybavená elektronickými stabilizačními systémy ve stanoveném rozmezí 2,6 až 2,7.

$$k \leq t_y \cdot \sqrt{\frac{a_{y\max}}{y}} = 2,16 \cdot \sqrt{\frac{(0,86 \cdot 9,81)}{4,0}} = 2,61 \quad (28)$$

Z praktického ověření nového koeficientu pro výpočet nejkratší doby příčného přemístění dvěma oblouky podle (28) pro vozidla vybavená elektronickými stabilizačními systémy lze usoudit jeho vhodnost pro výpočet nejkratší doby příčného přemístění dvěma oblouky vozidel vybavených elektronickými stabilizačními systémy ve znalecké praxi.

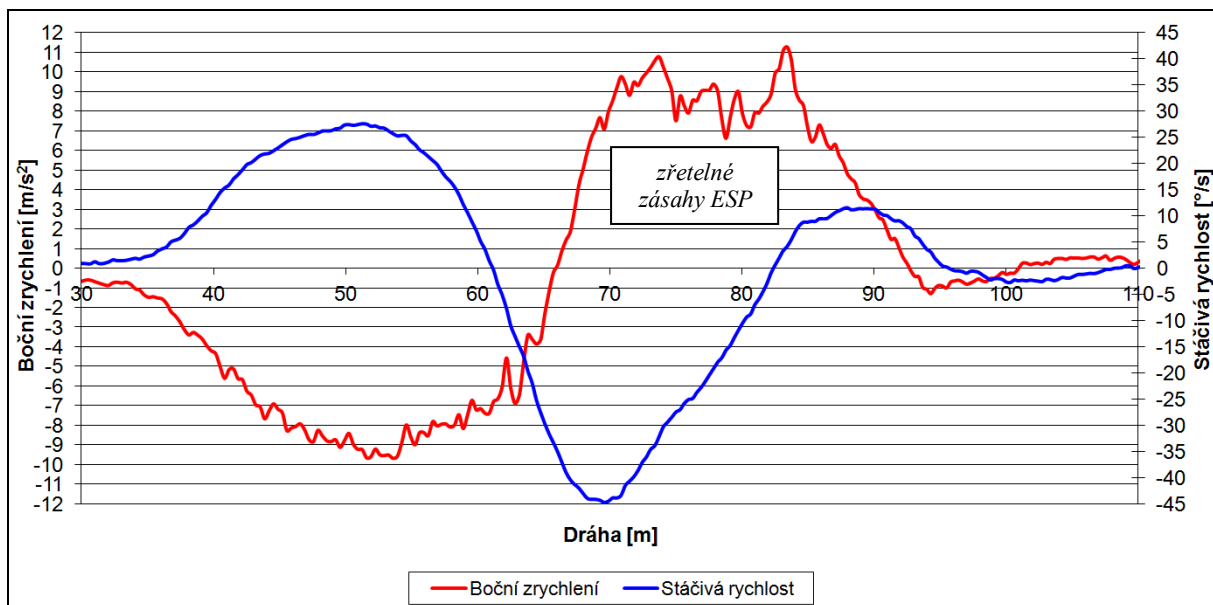


**Obr. 52:** Čas 17,953 s - vozidlo Škoda Superb s ESP (žlutá elipsa) v levém jízdním pruhu bezprostředně před okamžikem zahájení příčného přemístění [54]



**Obr. 53:** Čas 20,109 s – vozidlo Škoda Superb s ESP (žlutá elipsa) v pravém jízdním pruhu po dokončení manévru příčného přemístění dvěma oblouky [54]

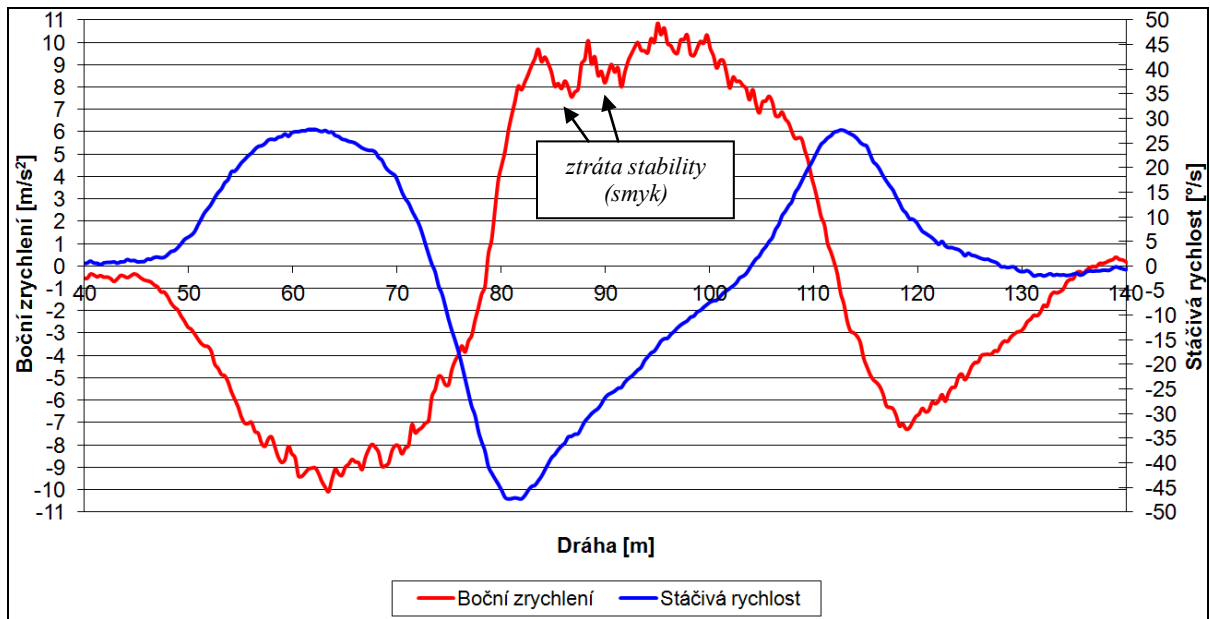
V dalších provedených experimentech na polygonu došlo ke zkrácení volné podélné vzdálenosti pro příčné přemístění vozidla na 27 m. Na **Obr. 54** je uvedena závislost bočního zrychlení a stáčivé rychlosti na ujeté dráze při příčném přemístění vozidla Škoda Superb s aktivovaným systémem ESP dvěma oblouky rychlostí 122 km/h na volné podélné vzdálenosti vyznačené kužely 27 m (jízda č. 3 podle **Tabulka 8**). Z hodnot bočního zrychlení vozidla s aktivovaným systémem ESP při průjezdu prvním obloukem je z **Obr. 54** zřejmé, že dosažitelná hodnota bočního zrychlení byla cca 9,0 m/s<sup>2</sup>, ve druhém oblouku byla hodnota bočního zrychlení opět cca 9,0 m/s<sup>2</sup>, která však byla opět při překročení hodnoty nad 10 m/s<sup>2</sup> regulována zřetelnými zásahy systému ESP z důvodu zajištění směrové stability vozidla (viz červená křivka na **Obr. 54** při ujeté dráze cca 73 až 80 m od začátku jízdní zkoušky).



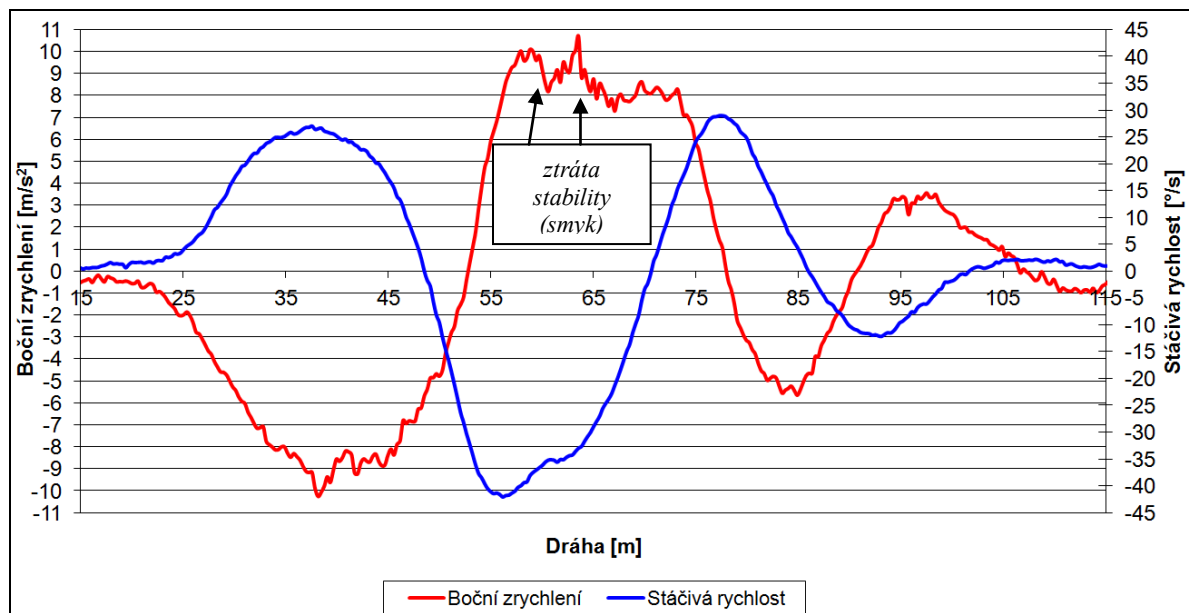
**Obr. 54:** Závislost bočního zrychlení a stáčivé rychlosti na ujeté dráze při příčném přemístění vozidla Škoda Superb dvěma oblouky rychlostí 122 km/h s ESP na podélné vzdálenosti 27 m

Na **Obr. 55** je uvedena závislost bočního zrychlení a stáčivé rychlosti na ujeté dráze při příčném přemístění vozidla Škoda Superb s deaktivovaným systémem ESP dvěma oblouky rychlostí 116 km/h na volné podélné vzdálenosti vyznačené kužely 27 m (jízda č. 4 podle **Tabulka 8**). Z hodnot bočního zrychlení vozidla s deaktivovaným systémem ESP při průjezdu prvním obloukem je z **Obr. 55** zřejmé, že dosažitelná hodnota bočního zrychlení byla krátkodobě dokonce  $10,0 \text{ m/s}^2$ , vozidlo se v tomto okamžiku z pohledu vnějšího pozorovatele pohybovalo výrazně na hranici stability. Ve druhém oblouku byly zaznamenány dvě ztráty směrové stability (viz **Obr. 55**), vozidlo se již pohybovalo řízeným smykem. Ztráta směrové stability nastala po překročení hodnoty bočního zrychlení  $9,0 \text{ m/s}^2$  (viz červená křivka na **Obr. 55** při ujeté dráze cca 83 až 92 m od začátku jízdní zkoušky).

Na **Obr. 56** je uvedena závislost bočního zrychlení a stáčivé rychlosti na ujeté dráze při příčném přemístění vozidla Škoda Superb s deaktivovaným systémem ESP dvěma oblouky rychlostí 107 km/h na volné podélné vzdálenosti vyznačené kužely 27 m (jízda č. 5 podle **Tabulka 8**). Z hodnot bočního zrychlení vozidla s deaktivovaným systémem ESP při průjezdu prvním obloukem je na **Obr. 56** při překročení hodnoty příčného zrychlení  $10 \text{ m/s}^2$  zřejmá ztráta směrové stability a vyrovnávání smyku při nájezdu do druhého oblouku. Ve druhém oblouku byly zaznamenány opět dvě ztráty směrové stability (viz **Obr. 56**). Ztráta směrové stability nastala po překročení hodnoty bočního zrychlení  $10,0 \text{ m/s}^2$  (viz červená křivka na **Obr. 56** při ujeté dráze cca 59 a 63 m od začátku jízdní zkoušky).



**Obr. 55:** Závislost bočního zrychlení a stáčivé rychlosti na ujeté dráze při příčném přemístění vozidla Škoda Superb dvěma oblouky rychlostí 116 km/h bez ESP na podélné vzdálenosti 27 m

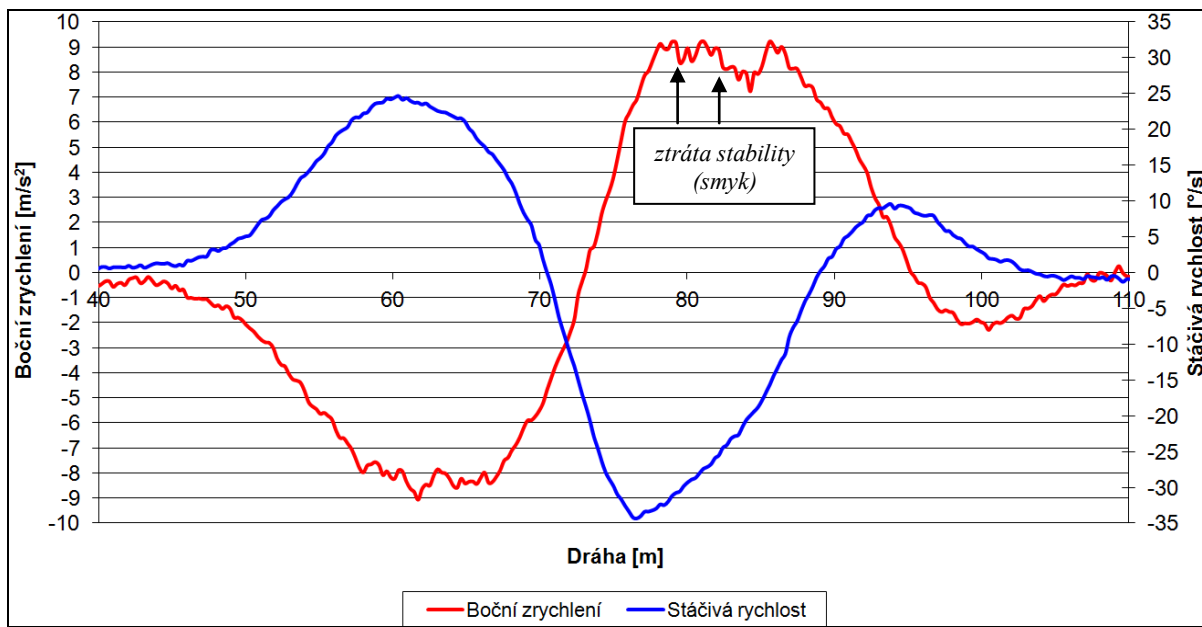


**Obr. 56:** Závislost bočního zrychlení a stáčivé rychlosti na ujeté dráze při příčném přemístění vozidla Škoda Superb dvěma oblouky rychlostí 107 km/h bez ESP na podélné vzdálenosti 27 m

Na **Obr. 57** je uvedena závislost bočního zrychlení a stáčivé rychlosti na ujeté dráze při příčném přemístění vozidla Škoda Superb s deaktivovaným systémem ESP dvěma oblouky rychlostí 95 km/h na volné podélné vzdálenosti vyznačené kužely 27 m (jízda č. 6 podle **Tabulka 8**). Z hodnot příčného zrychlení vozidla s deaktivovaným systémem ESP při průjezdu prvním obloukem je při překročení hodnoty příčného zrychlení  $9,0 \text{ m/s}^2$  na **Obr. 57** zřejmá dosažená hranice směrové stability pohybu vozidla obloukem (spatřena i vnějším

pozorovatelem). Ve druhém oblouku byl okolo dosažené hodnoty bočního zrychlení  $9,0 \text{ m/s}^2$  zaznamenán rovněž pohyb na hranici směrové stability vozidla zřejmý z **Obr. 57** i podle vnějšího pozorovatele.

Jednotlivé videozáznamy z provedených experimentálních jízd s vloženým popisem identifikující příslušné měření jsou uvedeny na datovém nosiči DVD k této dizertační práci.



**Obr. 57:** Závislost příčného zrychlení a stáčivé rychlosti na ujeté dráze při příčném přemístění vozidla Škoda Superb dvěma oblouky rychlostí  $95 \text{ km/h}$  bez ESP na podélné vzdálenosti  $27 \text{ m}$

#### 6.2.2.1.5 Vyhodnocení provedených experimentálních měření příčného přemístění oblouky

Na základě provedených experimentálních jízd s vozidlem Škoda Superb II byly zjištěny dosažitelné hodnoty příčného zrychlení vozidla cca  $9,0 \text{ m/s}^2$ . Jak je zřejmé z komentářů k jednotlivým průjezdům oblouky při příčném přemístění (viz komentáře k **Obr. 48** až **Obr. 57**) lze hodnotu příčného zrychlení vozidla  $9,0 \text{ m/s}^2$  spatřovat jako hodnotu dosažitelnou na hranici stability vozidla, tedy odpovídající pohybu vozidla v daném oblouku maximální hodnotou dostředivého zrychlení. Proto lze z této hodnoty určit hodnotu součinitele v příčném směru jako podíl dosažené hodnoty příčného zrychlení ku hodnotě tíhového zrychlení. Tímto výpočtem získáme max. hodnotu součinitele adheze v příčném směru  $0,90$ , která svojí velikostí odpovídá hodnotě zjištěné i v podélném směru brzdou zkouškou (viz **Obr. 46**). Tedy využitelná adheze v podélném směru je rovna adhezi ve směru příčném a ze známé adhezní elipsy se pak stává kružnice přilnavosti.

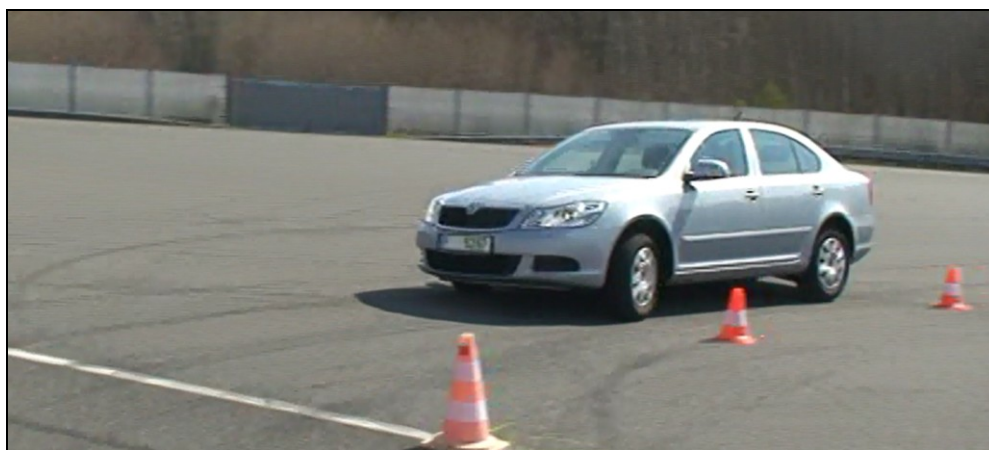
Z dynamicky nejextrémnějších průjezdů při příčném přemístění vozidla Škoda Superb s aktivovaným systémem ESP dvěma oblouky jsou z grafických průběhů zřejmé maximální hodnoty stáčivé rychlosti, které nepřekročí  $45 \text{ }^\circ/\text{s}$ , což odpovídá hodnotě  $0,8 \text{ rad/s}$  (viz **Obr. 48** a **Obr. 54**). Na **Obr. 48** je fialovými šipkami vyznačen okamžik již zřetelného zásahu stabilizačního systému ESP do jízdní dynamiky vozidla při prvním oblouku příčného přemístění, kdy boční zrychlení vozidla dosáhlo hodnoty cca  $7,8 \text{ m/s}^2$  a hodnota stáčivé rychlosti  $22 \text{ }^\circ/\text{s}$ , resp.  $0,4 \text{ rad/s}$ .

#### **6.2.2.2 Analýza pohybu vozidla Škoda Octavia II v rovinném oblouku - kruhové zkoušky**

V rámci zkoumané analýzy pohybu vozidla v obecném prostorovém oblouku byla dne 11.04.2012 uskutečněna série osmi experimentálních měření jízdních parametrů vozidla Škoda Octavia II 1.6 TDI CR při průjezdech definovaným obloukem o poloměru 51 m při rychlosti jízdy vyšší než  $50 \text{ km/h}$  s aktivovaným a následně uživatelsky běžným způsobem deaktivovaným systémem jízdní stability ESP. Předmětem následujících experimentálních měření bylo zjistit parametry jízdní dynamiky zkoušeného vozidla při kruhové zkoušce.

##### **6.2.2.2.1 Měřený objekt – vozidlo Škoda Octavia II**

Podrobné technické parametry zkoušeného vozidla jsou uvedeny v **příloze č. 4** této práce. Vozidlo bylo osazeno pneumatikami Continental ContiEcoContact 195/65 R 15 91 H s výškou dezénu 6,0 mm na všech kolech s huštěním na předepsaný tlak výrobcem vozidla. Vozidlo bylo vybaveno pohonem kol přední nápravy, elektronickým stabilizačním systémem ESP, samozřejmě vč. podřízených systémů ABS a ASR. Předmětné vozidlo po celý průběh experimentálních jízdních zkoušek řídil zkušený testovací řidič výrobce vozidla, čímž byla zaručena vysoká spolehlivost a přesnost opakovaných průjezdů obloukem.



***Obr. 58: Měřený objekt - vozidlo Škoda Octavia II***

#### 6.2.2.2.2 Měřicí přístroje

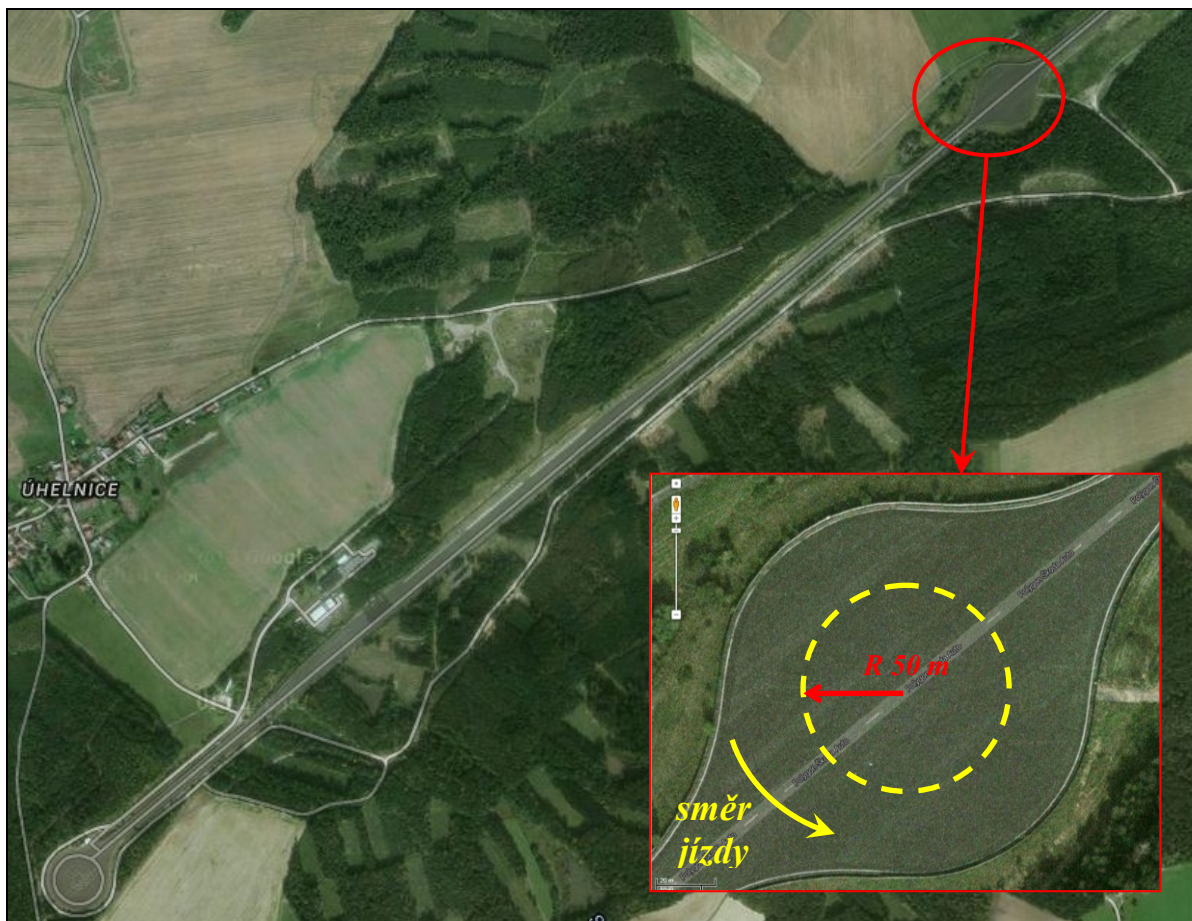
Pro zjišťování parametrů jízdní dynamiky vozidla Škoda Octavia II při provedených kruhových zkouškách bylo využito shodné zařízení Racelogic, typ MFD RLVBDSP03, uvedené v **kapitole 6.2.2.1.2** této práce. Zobrazovací a ovládací jednotka zařízení (multifunkční display MFD) byla umístěna přísavkou na čelním skle vozidla. Externí měřicí jednotka IMU zařízení Racelogic byla pevně umístěna opět na středovém tunelu podlahy za předními sedadly vozidla v montážní poloze v souladu s **Obr. 43** v podélné ose vozidla. Měřenými a ukládanými parametry jízdní dynamiky vozidla byly čas od začátku jízdní zkoušky, okamžik zásahu systému ESP, stav kontrolky ABS, stav kontrolky ASR, obvodové rychlosti jednotlivých kol vozidla, tlak v hydraulické jednotce brzd, rychlost vozidla, úhel natočení volantu, stáčivá rychlost vozidla, podélné a příčné zrychlení. Parametry jízdní dynamiky byly měřeny jednak externí měřicí jednotkou Racelogic IMU, dále byly v jednotném čase zaznamenávány údaje ze snímačů standardně instalovaných ve vozidle prostřednictvím dat řídicí jednotky vozidla.

#### 6.2.2.2.3 Měřicí plocha – točna polygonu

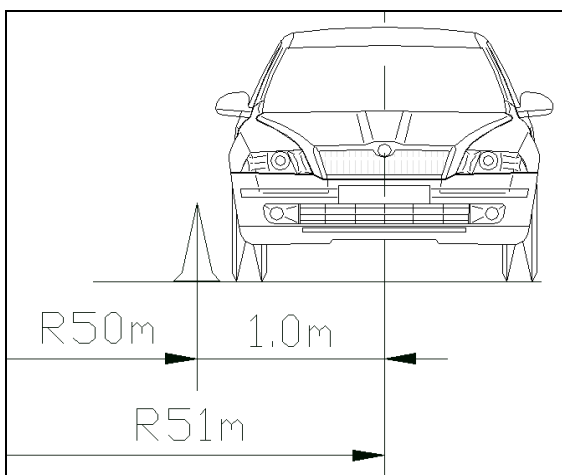
Byl využit shodný zkušební polygon jako v **kapitole 6.2.2.1.3** této práce. Testovací polygon má celkovou délku 3000 m, základní šířku 15 m, v úseku 700 až 1400 m je rozšířen na 38 m. Dále je polygon vybaven točnami o průměru 40 m a 120 m. Povrch polygonu je tvořen kvalitní asfaltovou vrstvou (viz **Obr. 59**).

Na velké měřicí točně polygonu o průměru 120 m byl kužely vyznačen kruh o poloměru 50 m (viz **Obr. 59**). Zkoušené vozidlo Škoda Octavia II se při provedených experimentálních měřeních parametrů jízdní dynamiky pohybovalo vnitřními koly v těsné blízkosti kuželů podle **Obr. 60**, ze kterého je tedy zřejmé, že skutečný poloměr rovinného oblouku, po kterém se zkoušené vozidlo pohybovalo, byl 51 m. Směr jízdy obloukem při jednotlivých kruhových zkouškách je vyznačen na **Obr. 59**.

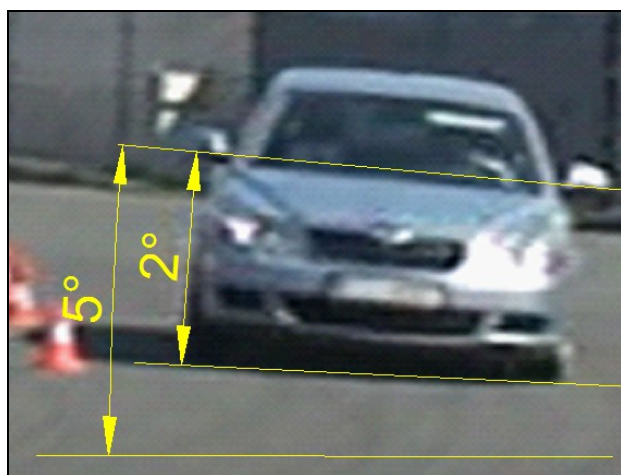




**Obr. 59:** Polygon společnosti Škoda Auto a.s. v Úhelnici vč. detailu zkušební části polygonu, kde byly provedeny průjezdy obloukem (žlutě čárkovaně vyznačena poloha kuželů) [43]



**Obr. 60:** Poloha vozidla při experimentálních jízdách obloukem



**Obr. 61:** Naklonění karoserie vozidla během pilotního testu před zahájením měření, rychlost jízdy 70 km/h (jízda v opačném směru kruhu)

S ohledem na **Obr. 61**, text uvedený na str. 54, resp. 76 této práce platí, že pro malé úhly naklonění karoserie cca do  $8^\circ$ , kdy hodnota kosinu nabývá hodnoty 0,99, můžeme



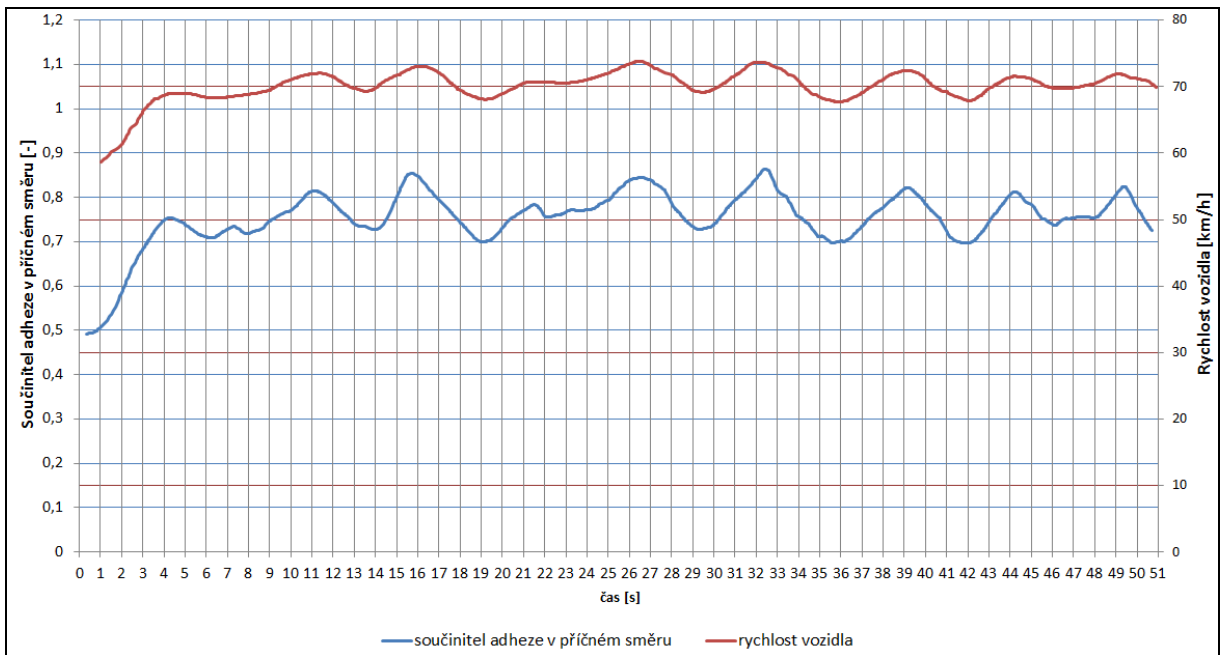
považovat hodnotu bočního zrychlení vozidla rovnu hodnotě příčného zrychlení. Proto lze velikost změřeného bočního zrychlení považovat za shodnou s velikostí zrychlení příčného získaného výpočtem podle vztahu (22).

#### 6.2.2.2.4 Provedená a analyzovaná experimentální měření – kruhové zkoušky

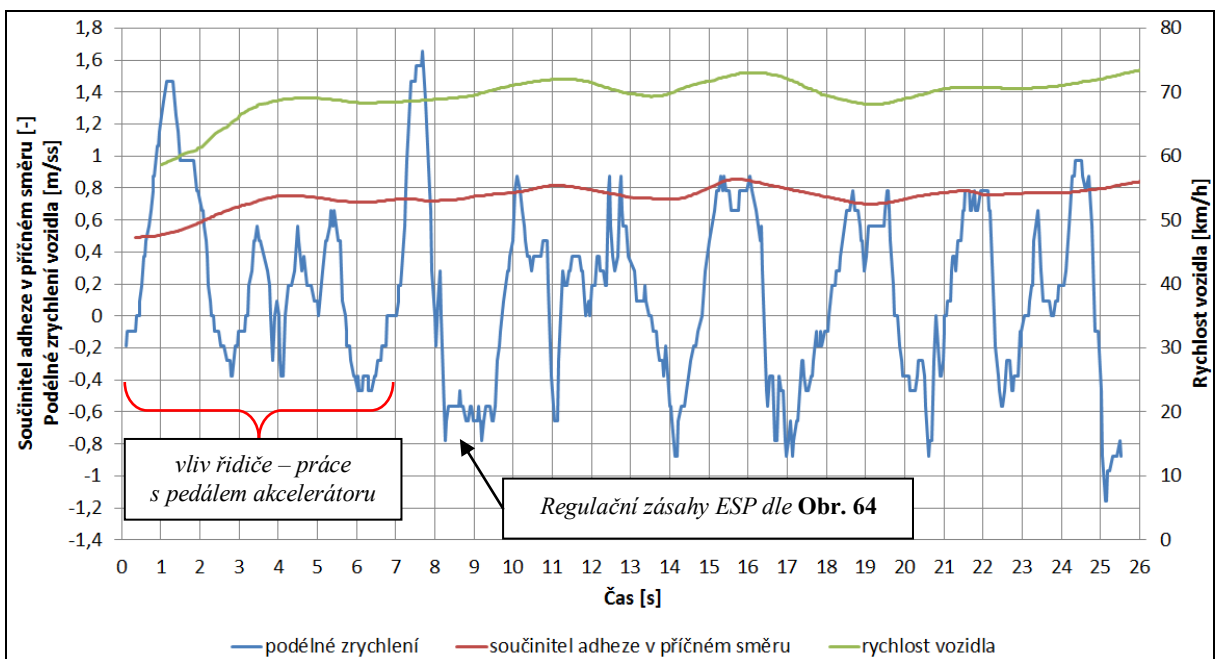
V rámci uskutečněných experimentů bylo provedeno celkem osm kruhových zkoušek se zkoušeným vozidlem Škoda Octavia II definovaným obloukem o poloměru 51 m s aktivovaným a deaktivovaným stabilizačním systémem ESP. Naměřené parametry jízdní dynamiky vozidla jsou graficky zobrazeny a okomentovány v textu této podkapitoly dále.

##### 1. Kruhová zkouška č. M1

Jednalo se o kruhovou zkoušku jízdy obloukem s aktivovaným systémem ESP na hranici zásahu systému ESP. Zkušební řidič se s vozidlem snažil pohybovat obloukem takovou rychlostí vozidla, která se nacházela velmi blízko referenční rychlosti zásahu systému ESP, což se podle **Obr. 64** podařilo. Průběh rychlosti vozidla při kruhové zkoušce a využívaného součinitele adheze v příčném směru v závislosti na čase jízdní zkoušky dokumentuje **Obr. 62**. Souhrnný průběh rychlosti vozidla při kruhové zkoušce, využívaného součinitele adheze v příčném směru a podélného zpomalení v závislosti na čase jízdní zkoušky dokumentuje **Obr. 63**. Z měřených parametrů při jízdní zkoušce je možné určit okamžiky zásahu systému ESP dle **Obr. 64**. Z tabulky na **Obr. 64** jsou zřejmé jednotlivé zásahy stabilizačního systému ESP regulujícího jízdní dynamiku vozidla při kruhové zkoušce. Např. v čase kruhové zkoušky 8,34419 s došlo k zásahu systému ESP přibrzděním levého zadního kola, čímž bylo vozidlo stabilizováno do požadovaného průjezdu obloukem (viz řádek 2 tabulky na **Obr. 64**). Tyto regulační zásahy systému ESP odpovídají podélnému zrychlení na **Obr. 63**. Nutno uvést, že ne všechny výrazné nárůsty či poklesy křivky podélného zrychlení na **Obr. 63** jsou způsobeny zásahem systému ESP. Protože se řidič snažil s vozidlem pohybovat na hranici zásahu systému ESP, jsou některé nárůsty a poklesy podélného zrychlení důsledkem ovládní vozidla řidičem, zejména práce řidiče s pedálem akcelérátoru (viz **Obr. 63**). Z **Obr. 62** je patrné, že během kruhové zkoušky v blízkosti mezní rychlosti průjezdu obloukem se hodnota součinitele adheze v příčném směru pohybovala v rozmezí 0,70 až 0,86 (pozn. v čase 0 až 4 s probíhalo zrychlování vozidla na rychlost blízkou mezní hodnotě v oblouku, což se projevilo i na průběhu křivky součinitele adheze v příčném směru, kdy rychlosti vozidla cca 60 km/h v oblouku odpovídá hodnota součinitele adheze v příčném směru cca 0,5).



**Obr. 62:** Kruhová zkouška č. M1 – trvalá jízda obloukem při počáteční zásahu systému ESP (závislost rychlosti jízdy a součiniteli adheze v příčném směru na čase)

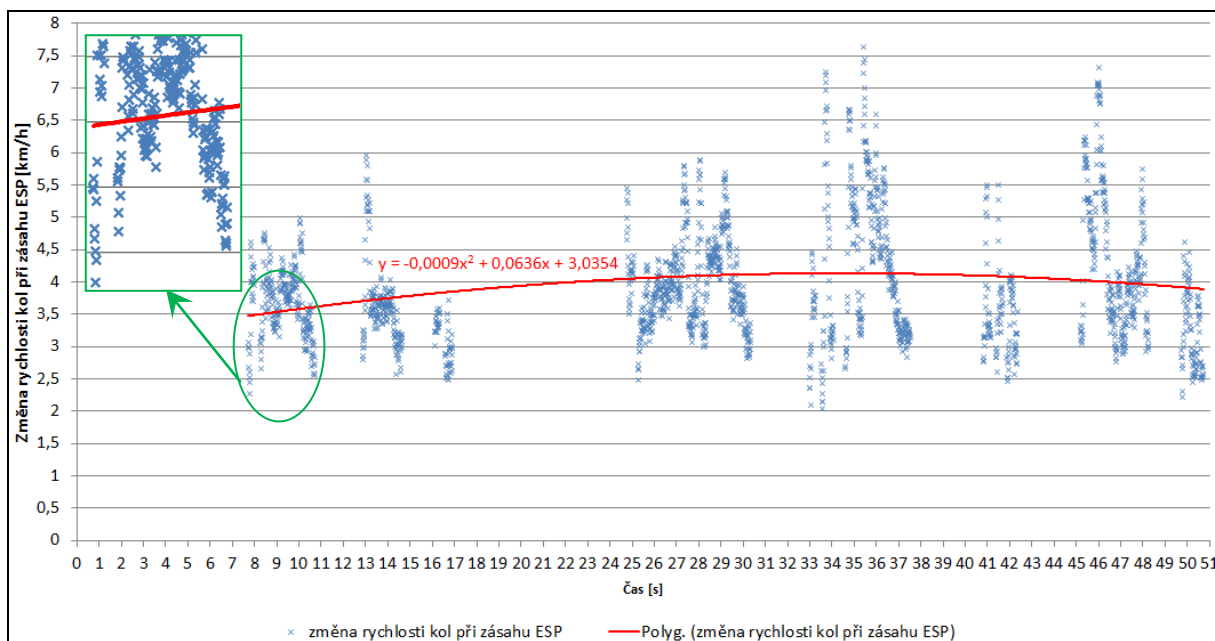


**Obr. 63:** Kruhová zkouška č. M1 – trvalá jízda obloukem při počáteční zásahu systému ESP (závislost rychlosti jízdy, součiniteli adheze v příčném směru a podélného zrychlení na čase)

Čas s	Zásah ESP	LZ kolo km/h	PZ kolo km/h	LP kolo km/h	PP kolo km/h	Brzdný tlak bar	Podélné zrychlení m/ss	Stáčivá rychlost °/s	Úhel natočení volantu °
8,33386	1	66,53	69,14	69,64	69,67	0	-0,5625	20,75	108,5875
8,34419	1	66,43	68,99	69,61	69,67	0,5	-0,5625	20,15	108,5875
8,35397	1	66,24	69,17	69,45	69,62	0	-0,5625	21,43	108,5875
8,36424	1	66,13	69,07	69,74	69,61	0,5	-0,46875	21,21	107,1
8,37393	1	66,05	69,4	69,96	69,67	0	-0,5625	20,93	107,1
8,3842	1	65,87	69,42	69,83	69,79	0,3	-0,46875	21,47	107,1
8,39389	1	65,77	69,35	69,64	69,76	0,5	-0,5625	20,22	107,1
8,40424	1	65,47	69,28	69,67	69,79	0,1	-0,5625	21,28	107,1
8,41397	1	65,08	69,19	69,73	69,72	0,3	-0,5625	21,21	107,1

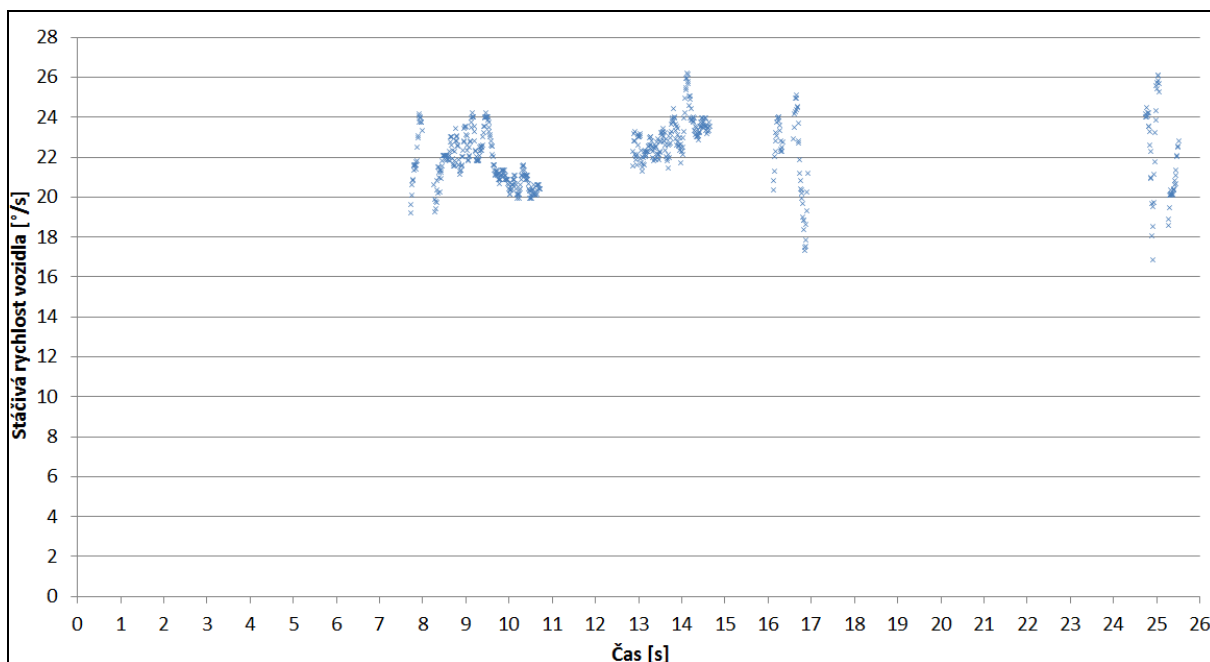
**Obr. 64:** Kruhová zkouška č. M1 – zaznamenané údaje při kruhové zkoušce (viz sloupce tabulky)

Z tabulky na **Obr. 64** je zjevné, že při zásazích elektronického stabilizačního systému ESP dochází vždy ke změně obvodové rychlosti otáčení jednotlivých kol vozidla. Proto byla na **Obr. 65** vynesena závislost změny obvodové rychlosti kol vozidla na čase v průběhu kruhové zkoušky č. M1. Červená křivka na **Obr. 65** vznikla proložením polynomu druhého řádu průběhem bodů změny obvodové rychlosti kol na čase. Rovnice polynomu je na **Obr. 65** uvedena červeně. Z polohy jednotlivých bodů změny obvodové rychlosti kol je zřejmé, že změna rychlosti kol vozidla při zásazích systému ESP se v průběhu zkoušky pohybovala v rozmezí 2,0 až 7,6 km/h. Zjištěné rozmezí je relativně nízké, což však odpovídá metodice průběhu kruhové zkoušky č. M1, kdy se řidič s vozidlem snažil pohybovat obloukem pouze takovou rychlostí vozidla, která se nacházela velmi blízko referenční rychlosti zásahu systému ESP.



**Obr. 65:** Kruhová zkouška č. M1 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky vč. detailu (zeleně), ze kterého je patrný shluk množství jednotlivých bodů

Z experimentálně naměřených parametrů jízdní dynamiky vozidla je zřejmé, že k zásahu elektronického stabilizačního systému ESP dochází pouze při určitých hodnotách stáčivé rychlosti vozidla. Proto byly na **Obr. 66** vyneseny hodnoty stáčivé rychlosti vozidla v závislosti na čase při zásazích systému ESP v průběhu kruhové zkoušky č. M1. Z polohy vnesených jednotlivých hodnot stáčivých rychlostí vozidla při detekovaných zásazích systému ESP je zřejmé, že stabilizační systém aktivně zasáhl do jízdní dynamiky vozidla v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti cca 17 až 26 °/s.



**Obr. 66:** Kruhová zkouška č. M1 – hodnoty stáčivé rychlosti vozidla při zásazích ESP

Analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v definovaném oblouku o poloměru 51 m:

Využitelný součinitel adheze v příčném směru byl z grafů na **Obr. 62** a **Obr. 63** zjištěn v rozmezí 0,70 až 0,86. Mezní rychlost zkoušeného vozidla v definovaném oblouku o poloměru 51 m vypočteme z odvozeného vztahu pro zjednodušený případ vyplývající s geometrických parametrů polygonu:

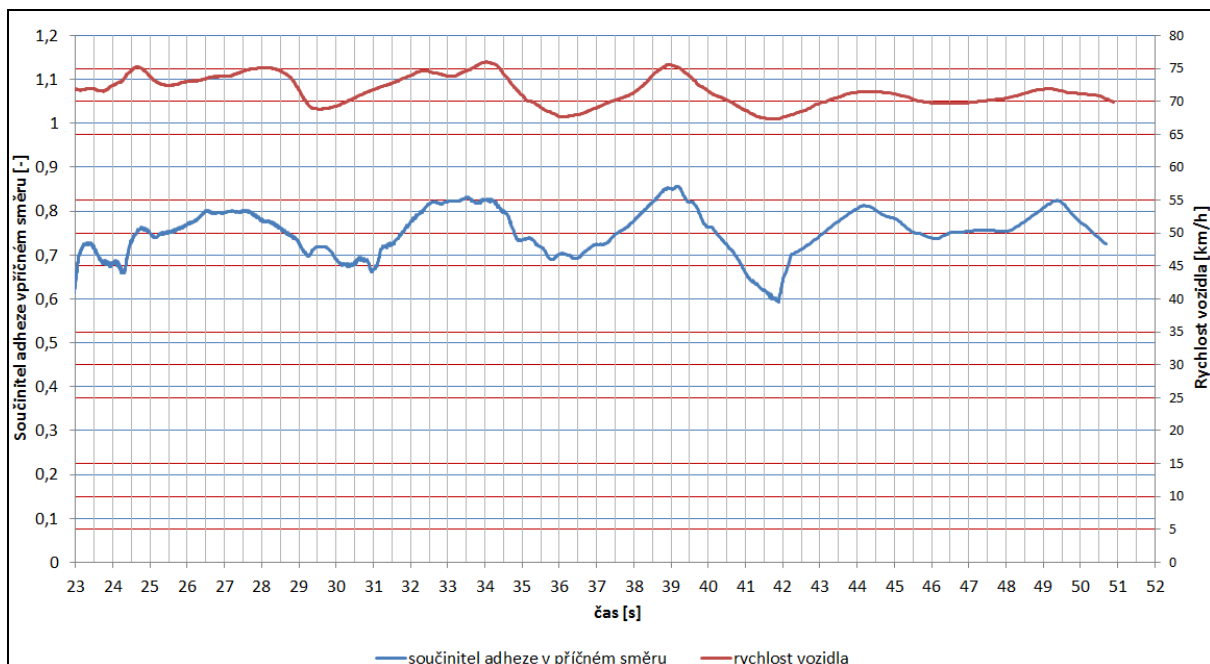
$$v_{mez} = \sqrt{\mu_{pr} \cdot g \cdot R} = \sqrt{(0,70 \text{ až } 0,86) \cdot 9,81 \cdot 51} = 18,7 \text{ až } 20,7 \text{ m/s} = 67 \text{ až } 75 \text{ km/h} \quad (29)$$

Experimentálně zjištěná rychlost vozidla v oblouku (viz **Obr. 62** a **Obr. 63**) se nacházela v rozmezí 68 až 74 km/h, které spadá do analyticky stanoveného rozmezí mezní rychlosti vozidla 67 až 75 km/h při experimentálně zjištěném využitelném součiniteli adheze v příčném směru v rozmezí 0,70 až 0,86. Obvodová rychlost jednotlivých kol vozidla se např. při zásazích systému ESP v časovém rozmezí 8,33386 s až 8,41397 s kruhové zkoušky

č. M1 nacházela v rozmezí cca 65 až 70 km/h (viz **Obr. 64**). Nutno dodat, že řidič se s vozidlem nesnažil obloukem pohybovat s maximálním využitím adheze v příčném směru se zasahujícím systémem ESP, ale pouze hledal hranici, kdy začne zasahovat systém ESP. Hranice zásahů systému ESP byla evidentně nalezena, protože systém ESP již začal mírně do jízdní dynamiky zasahovat. Tvrzení, že se jednalo pouze o mírnější zásahy systému ESP lze dovodit z **Obr. 65**, ze kterého je zřejmé rozmezí změny obvodové rychlosti jednotlivých kol vozidla při zásazích systému ESP pouze 2,0 až 7,6 km/h. Z pohledu vnějších pozorovatelů i posádky se vozidlo v oblouku chovalo velmi stabilně bez zřetelného náznaku ztráty směrové stability. Školená posádka zaznamenala mírné zásahy systému ESP do jízdní dynamiky.

## **2. Kruhová zkouška č. M2**

Jednalo se o kruhovou zkoušku jízdy obloukem s aktivovaným systémem ESP s maximálně možným výkonem vozidla v oblouku. Zkušební řidič se s vozidlem snažil pohybovat obloukem maximální rychlostí vozidla, kterou systém ESP vozidlu umožnil. Průběh rychlosti vozidla při kruhové zkoušce a využívaného součinitele adheze v příčném směru v závislosti na čase jízdní zkoušky dokumentuje **Obr. 67**. Z **Obr. 67** a **Obr. 68** je zřejmé, že při plném využití systému ESP, jehož zásahy při průjezdu obloukem pocítovala posádka vozidla zřetelně a jež jsou zřejmé z tabulky na **Obr. 68**, se mezní rychlost průjezdu vozidla obloukem dostává dokonce krátkodobě nad 75 km/h. V čase 39,0 s se rychlost vozidla při kruhové zkoušce dostala nad 75 km/h při hodnotě adheze v příčném směru cca 0,85 (viz **Obr. 67**). Z **Obr. 67** je patrné, že během kruhové zkoušky při maximální rychlosti průjezdu obloukem se hodnota součinitele adheze v příčném směru pohybovala v rozmezí 0,60 až 0,85.



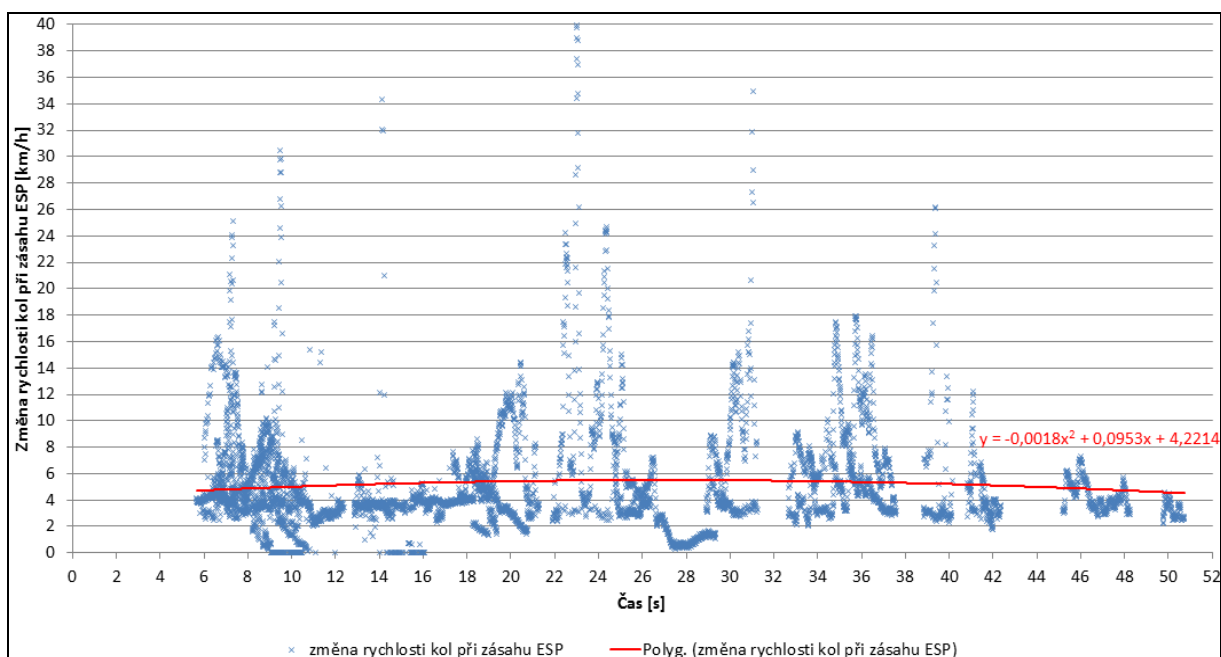
**Obr. 67:** Kruhová zkouška č. M2 – trvalá jízda obloukem maximální rychlostí se systémem ESP (závislost rychlosti jízdy a součinitele adheze v příčném směru na čase)

čas s	zásah ESP	ABS	ASR	LZ kolo km/h	PZ kolo km/h	LP kolo km/h	PP kolo km/h
38,9916	1	0	0	71	75,5	77,83	77,1
38,9925	0	0	0	71,1	75,53	78,37	77,02
39,0021	1	0	0	71	73,38	73,78	74,07
39,0027	0	0	0	71	73,33	73,7	73,91
39,0116	1	0	0	71,02	75,61	78,4	77,07
39,0124	0	0	0	70,85	75,69	78,86	76,99
39,0221	1	0	0	70,91	73,25	73,99	73,93
39,0226	0	0	0	70,83	73,16	74,01	73,88
39,0317	1	0	1	70,9	75,55	78,61	76,83

**Obr. 68:** Kruhová zkouška č. M2 – zásah ESP, obvodové rychlosti kol v čase cca 39 s

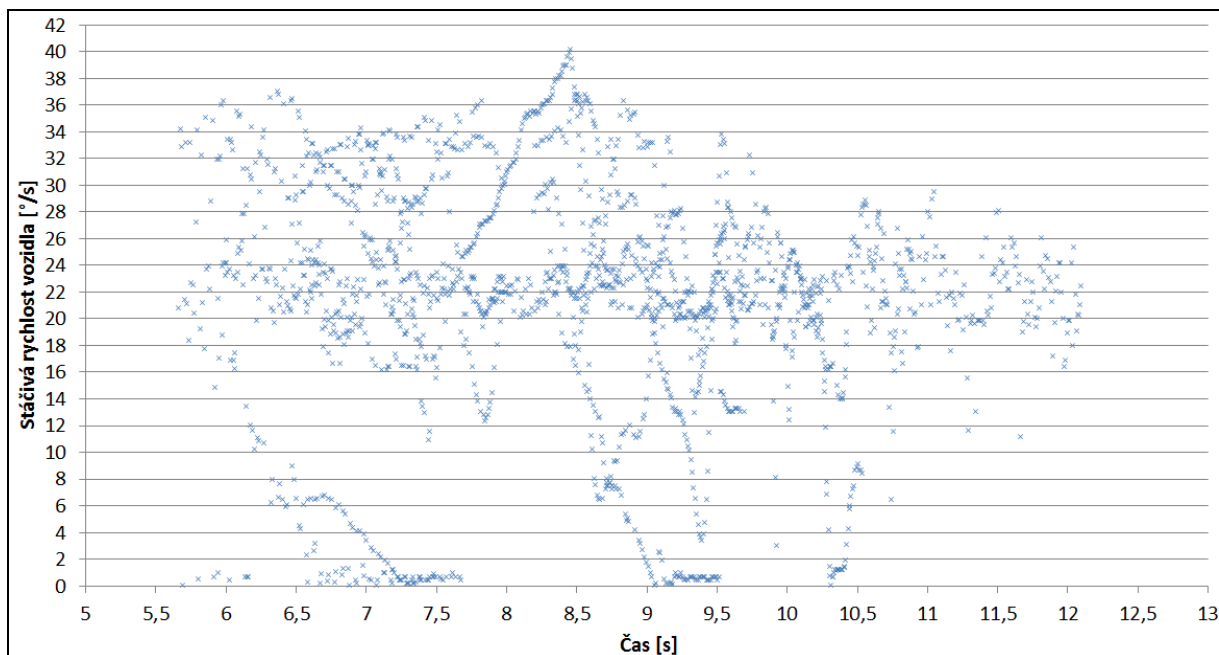
Z tabulky na **Obr. 68** je zjevné, že při zásazích elektronického stabilizačního systému ESP dochází vždy ke změně obvodové rychlosti jednotlivých kol vozidla. Proto byla na **Obr. 69** vynesena závislost změny obvodové rychlosti kol vozidla na čase v průběhu kruhové zkoušky č. M2. Červená křivka na **Obr. 69** vznikla proložením polynomu druhého řádu průběhem bodů změny obvodové rychlosti kol na čase. Rovnice polynomu je na **Obr. 69** uvedena červeně. Z polohy jednotlivých bodů změny obvodové rychlosti kol je zřejmé, že změna rychlosti kol vozidla při zásazích systému ESP se v průběhu zkoušky pohybovala v rozmezí 0 až 40 km/h. Zjištěné rozmezí je podstatně širší oproti rozmezí z kruhové zkoušky č. M1, což však opět odpovídá metodice průběhu kruhové zkoušky č. M2, kdy se řidič s vozidlem snažil pohybovat obloukem maximální rychlostí vozidla, kterou systém ESP

vozidlu umožnil. V čase zkoušky cca 23 s dokonce vnější pozorovatel rozpoznal výrazné zpomalení levého zadního kola vozidla při zásahu ESP (tj. v okamžiku, kdy byly změna obvodové rychlosti kol nejvyšší).



**Obr. 69:** Kruhová zkouška č. M2 – změna rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky

Z experimentálně naměřených parametrů jízdní dynamiky vozidla je zřejmé, že k zásahu elektronického stabilizačního systému ESP dochází pouze při určitých hodnotách stáčivé rychlosti vozidla. Proto byly na **Obr. 70** vyneseny hodnoty stáčivé rychlosti vozidla v závislosti na čase při zásazích systému ESP v průběhu kruhové zkoušky č. M2. Z polohy vnesených jednotlivých hodnot stáčivých rychlostí vozidla při detekovaných zásazích systému ESP je zřejmé, že stabilizační systém aktivně zasáhl do jízdní dynamiky vozidla v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti cca 1 až 40 %/s. Zjištěné rozmezí hodnot stáčivé rychlosti je podstatně širší oproti rozmezí z kruhové zkoušky č. M1, což však opět odpovídá metodice průběhu kruhové zkoušky č. M2, kdy se řidič s vozidlem snažil pohybovat obloukem maximální rychlostí vozidla, kterou systém ESP vozidlu umožnil. Nutno dodat, že největší množství zásahů systému ESP do jízdní dynamiky se při kruhové zkoušce č. M2 nachází v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti 20 až 26 %/s. Nejvyšší dosažená hodnota stáčivé rychlosti vozidla byla zaznamenána v čase cca 8,5 s, kdy dosáhla hodnota stáčivé rychlosti vozidla až 40 %/s, což odpovídá hodnotě 0,7 rad/s, kdy se vozidlo při kruhové zkoušce již pohybovalo na hranici smyku se zanecháním smykových stop "pískajících" pneumatik.

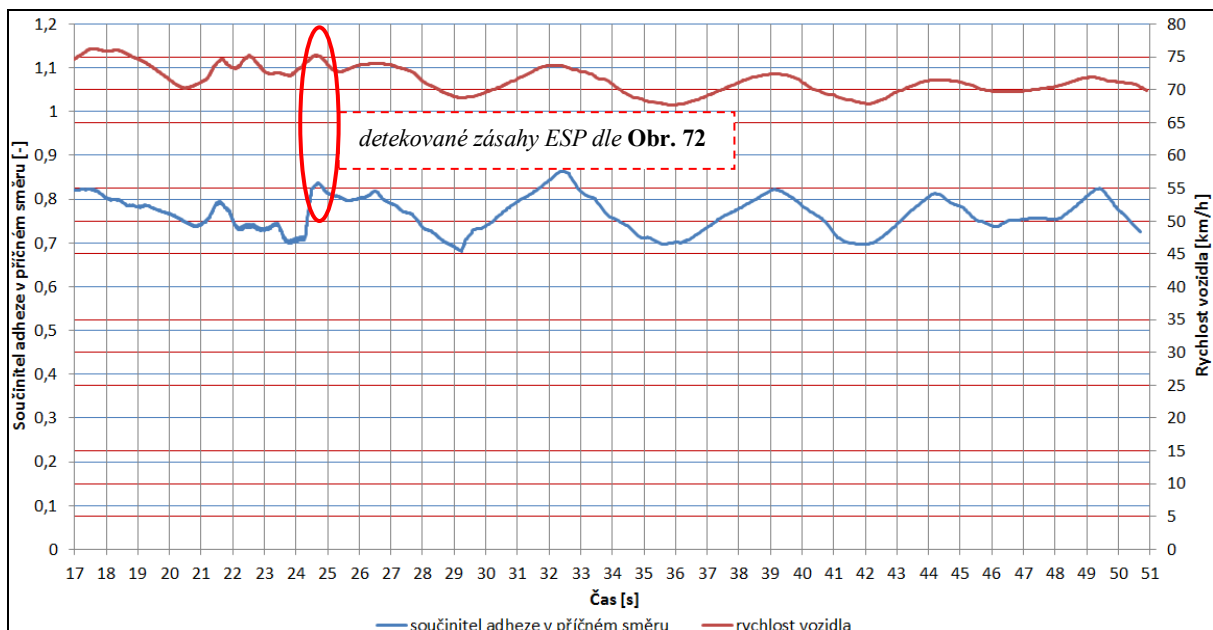


**Obr. 70:** Kruhová zkouška č. M2 – hodnoty stáčívé rychlosti vozidla při zásazích ESP

### 3. Kruhová zkouška č. M3

Jednalo se o kruhovou zkoušku jízdy obloukem, před kterou byl tlačítkem na desce přístrojů v interiéru vozidla deaktivován systém ESP. Zkušební řidič se s vozidlem snažil pohybovat obloukem mezní rychlostí, tj. rychlostí na hranici směrové stability vozidla v oblouku. Průběh rychlosti vozidla při kruhové zkoušce a využívaného součinitele adheze v příčném směru v závislosti na čase jízdní zkoušky dokumentuje **Obr. 71**. Zásadním zjištěním při analýze naměřených dat byly detekované zásahy systému ESP do jízdní dynamiky pohybu vozidla, ačkoliv byl systém ESP před kruhovou zkouškou řidičem běžným způsobem (tlačítkem) deaktivován. V okamžiku vyhodnocení kritické jízdní situace řídicí jednotkou stabilizačního systému, kdy se vozidlo již dlouhodoběji pohybovalo na hranici stability, byl v čase 24,7634 s systém ESP automaticky (tj. bez vlivu řidiče) aktivován. Z tabulky na **Obr. 72** jsou zřejmé jednotlivé zásahy stabilizačního systému ESP regulujícího jízdní dynamiku vozidla při kruhové zkoušce. Např. v čase kruhové zkoušky 24,7634 s došlo k zásahu systému ESP přibrzděním levého zadního kola, čímž bylo vozidlo stabilizováno do požadovaného průjezdu obloukem (viz řádek 1 tabulky na **Obr. 72**). Hodnota součinitele adheze v příčném směru se během zkoušky pohybovala v rozmezí 0,68 až 0,82 (vyjma okamžiku v čase cca 32,5 s, kdy byl opět detekován zásah systému ESP, vzrostla hodnota součinitele adheze v příčném směru na 0,86). Z pohledu vnějšího pozorovatele byl stejně jako při kruhové zkoušce č. M2 zřetelný hluk („pískání“) pneumatik.



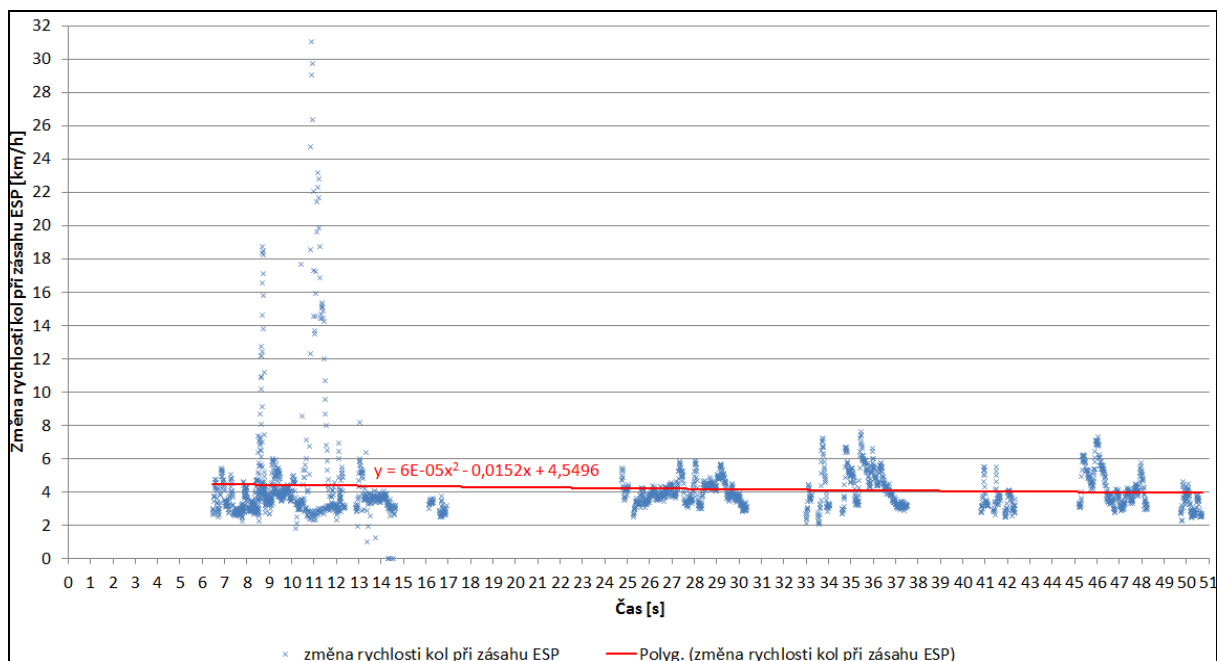


**Obr. 71:** Kruhová zkouška č. M3 – jízda obloukem s deaktivovaným systémem ESP (závislost rychlosti jízdy a součiniteli adheze v příčném směru na čase)

čas s	zásah ESP	ABS	ASR	LZ kolo km/h	PZ kolo km/h	LP kolo km/h	PP kolo km/h
24,7634	1	0	0	69,83	72,29	74,48	72,44
24,7663	0	0	1	72	74,78	78,86	76,04
24,7731	1	0	0	69,99	72,05	74,97	72,52
24,7756	0	0	1	72,1	74,86	78,52	76,18
24,7834	1	0	0	69,98	71,93	75,25	72,6
24,7863	0	0	1	72,03	74,91	78,31	76
24,793	1	0	0	69,61	71,73	74,99	72,34
24,7958	0	0	1	71,95	74,8	77,86	76,1
24,8032	1	0	0	69,03	71,7	74,24	72,2
24,8063	0	0	1	71,8	74,72	77,65	76,15
24,8129	1	0	0	68,58	71,66	73,43	72,2
24,816	0	0	1	71,98	74,67	77,36	75,83
24,8231	1	0	0	68,44	71,45	72,83	72,71

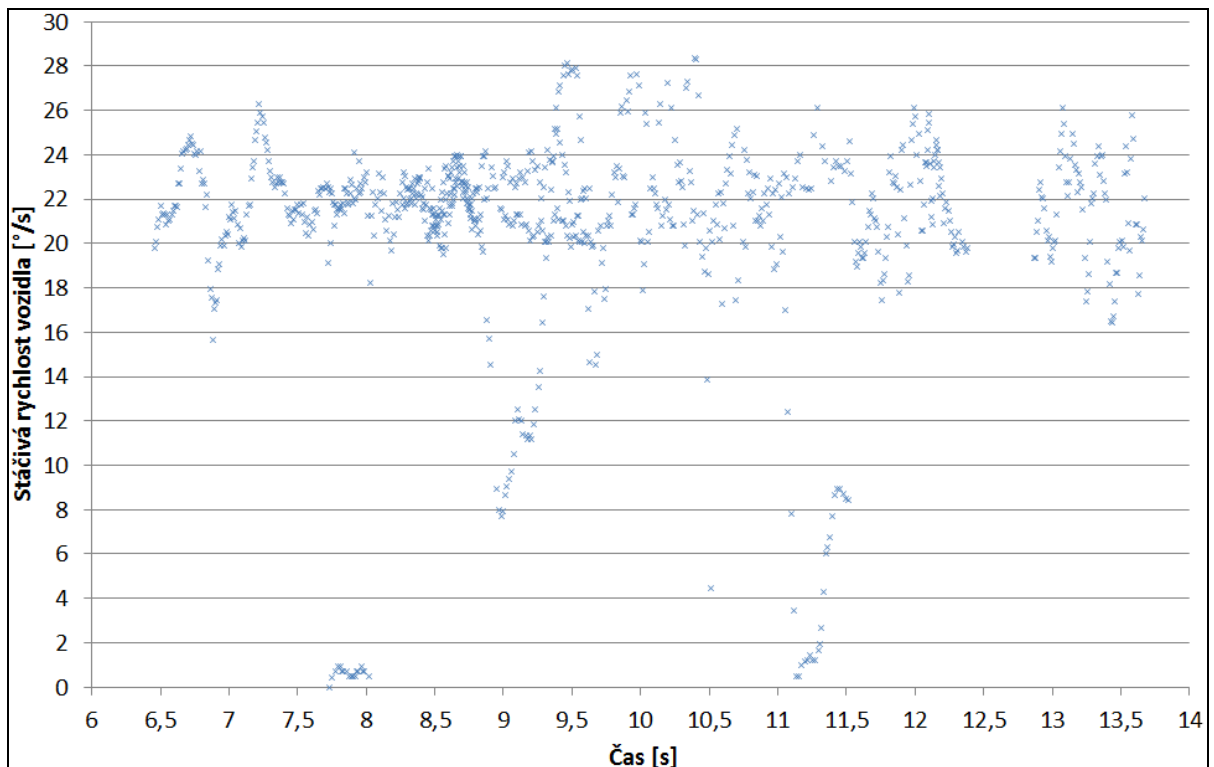
**Obr. 72:** Kruhová zkouška č. M3 – tlačítkem deaktivované ESP; v čase 24,7634 s první zásahy systému ESP (systém automaticky aktivován bez zásahu posádky)

Z tabulky na **Obr. 72** je zřejmé, že při zásazích elektronického stabilizačního systému ESP dochází vždy ke změně obvodové rychlosti jednotlivých kol vozidla. Proto byla na **Obr. 73** vynesena závislost změny obvodové rychlosti kol vozidla na čase v průběhu kruhové zkoušky č. M3. Červená křivka na **Obr. 73** vznikla proložením polynomu druhého řádu průběhem bodů změny obvodové rychlosti kol na čase. Rovnice polynomu je na **Obr. 73** uvedena červeně. Z polohy jednotlivých bodů změny obvodové rychlosti otáčení kol je zřejmé, že změna rychlosti kol vozidla při zásazích systému ESP se v průběhu zkoušky pohybovala v rozmezí 0 až 31 km/h.



**Obr. 73:** Kruhová zkouška č. M3 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky

Z experimentálně naměřených parametrů jízdní dynamiky vozidla je zřejmé, že k zásahu elektronického stabilizačního systému ESP dochází pouze při určitých hodnotách stáčivé rychlosti vozidla. Proto byly na **Obr. 74** vyneseny hodnoty stáčivé rychlosti vozidla v závislosti na čase při zásazích systému ESP v průběhu kruhové zkoušky č. M3. Z polohy vynesených jednotlivých hodnot stáčivých rychlostí vozidla při detekovaných zásazích systému ESP je zřejmé, že stabilizační systém aktivně zasáhl do jízdní dynamiky vozidla v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti cca 1 až 28 °/s. Nutno dodat, že největší množství zásahů systému ESP do jízdní dynamiky se při kruhové zkoušce č. M3 nachází v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti 20 až 26 °/s.

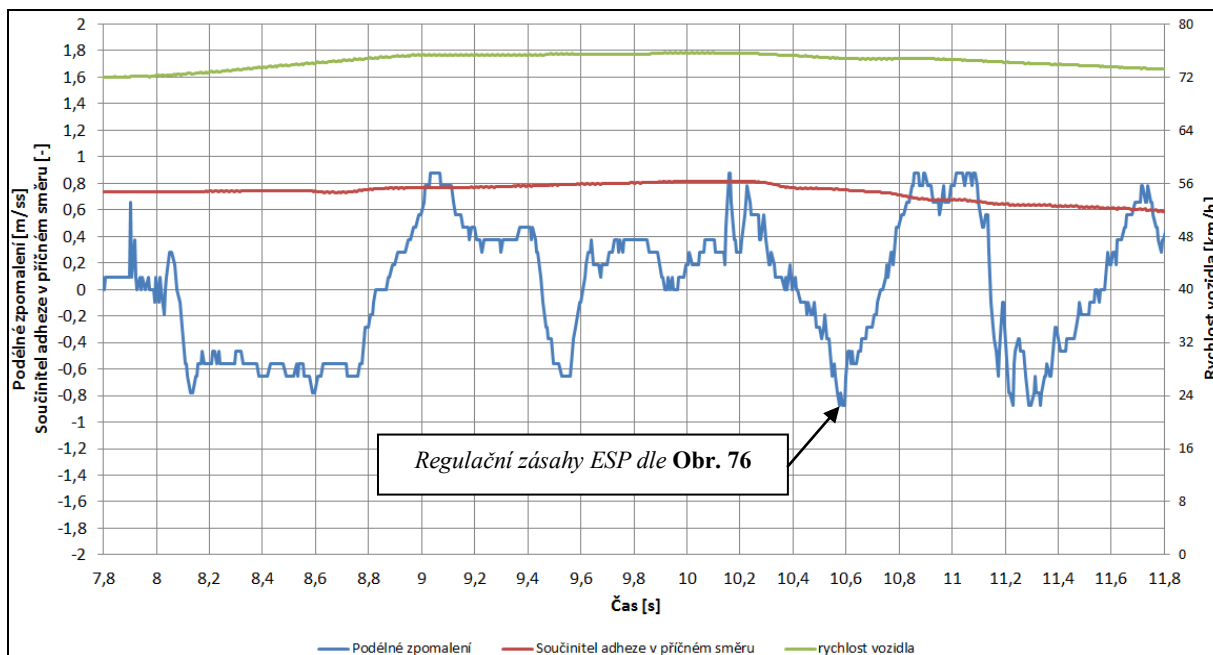


*Obr. 74: Kruhová zkouška č. M3 – hodnoty stáčívé rychlosti vozidla při zásazích ESP*

#### 4. Kruhová zkouška č. M4

Jednalo se o kruhovou zkoušku jízdy obloukem s deaktivovaným systémem ESP (tlačítkem) mezní rychlostí vozidla v oblouku. Zkušební řidič se s vozidlem snažil pohybovat obloukem s maximálním využitím adheze v příčném směru. Průběh rychlosti vozidla při kruhové zkoušce, podélného zpomalení/zrychlení a využívaného součinitele adheze v příčném směru v závislosti na čase jízdní zkoušky dokumentuje **Obr. 75**. Opakovaným zjištěním při analýze naměřených dat byly detekované zásahy systému ESP do jízdní dynamiky pohybu vozidla, ačkoliv byl systém ESP před kruhovou zkouškou řidičem běžným způsobem (tlačítkem) deaktivován. Významné zásahy systému ESP do jízdní dynamiky vozidla nastaly např. v čase 10,5737 s (viz **Obr. 75** a **Obr. 76**). Z tabulky na **Obr. 76** jsou zřejmé jednotlivé jednak zásahy stabilizačního systému ESP regulujícího jízdní dynamiku vozidla při kruhové zkoušce, tak jsou z tabulky patrné i zásahy asistenčního systému regulující prokluz jednotlivých kol (ASR - viz např. řádek 3 tabulky na **Obr. 76**). Např. v již uvedeném čase kruhové zkoušky 10,5737 s došlo k zásahu systému ESP přibrzděním levého zadního kola, čímž bylo zkoušené vozidlo při vyhodnoceném nestabilním stavu směrově stabilizováno do požadovaného průjezdu obloukem (viz řádek 1 tabulky na **Obr. 76**). Střední hodnota součinitele adheze v příčném směru se během zkoušky

pohybovala v rozmezí 0,59 až 0,81. Z pohledu vnějšího pozorovatele byl stejně jako při kruhové zkoušce č. M2 a M3 zřetelný hluk („pískání“) pneumatik.

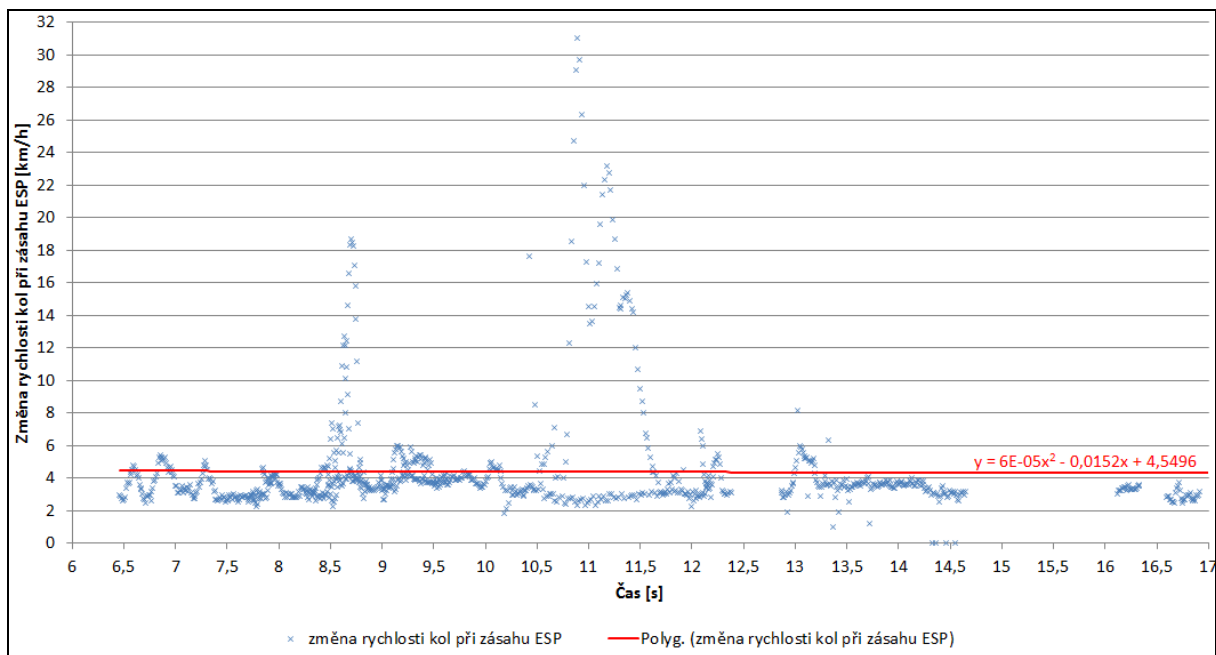


**Obr. 75:** Kruhová zkouška č. M4 – jízda obloukem s deaktivovaným systémem ESP (závislost rychlosti jízdy, podélného zpomalení/zrychlení a součiniteli adheze v příčném směru na čase)

čas s	zásah ESP	ABS	ASR	LZ kolo km/h	PZ kolo km/h	LP kolo km/h	PP kolo km/h	brzdný tlak bar	podélné zpom. m/s <sup>2</sup>	stáčivá rychlost °/s
10,5737	1	0	0	70,09	72,34	72,88	72,78	0,3	-0,875	25,89
10,5745	0	0	0	67,87	62,84	64,95	63,31	0	-0,875	26,13
10,5782	0	0	1	73,85	71,24	76	84,63	0,1	-0,78125	26,11
10,5803	0	0	0	68,77	63,85	69,17	63,07	0	-0,875	25,71
10,5839	1	0	0	67,77	62,48	65	63,07	0,3	-0,875	25,65
10,5841	0	0	0	70,14	72,34	72,83	72,72	0	-0,875	24,99
10,5879	0	0	1	73,91	71,12	76,04	84,7	0,1	-0,875	24,56
10,5901	0	0	0	68,73	64,16	69,13	62,72	0	-0,65625	24,99
10,5936	1	0	0	69,93	72,2	72,65	72,8	0,3	-0,875	23,91

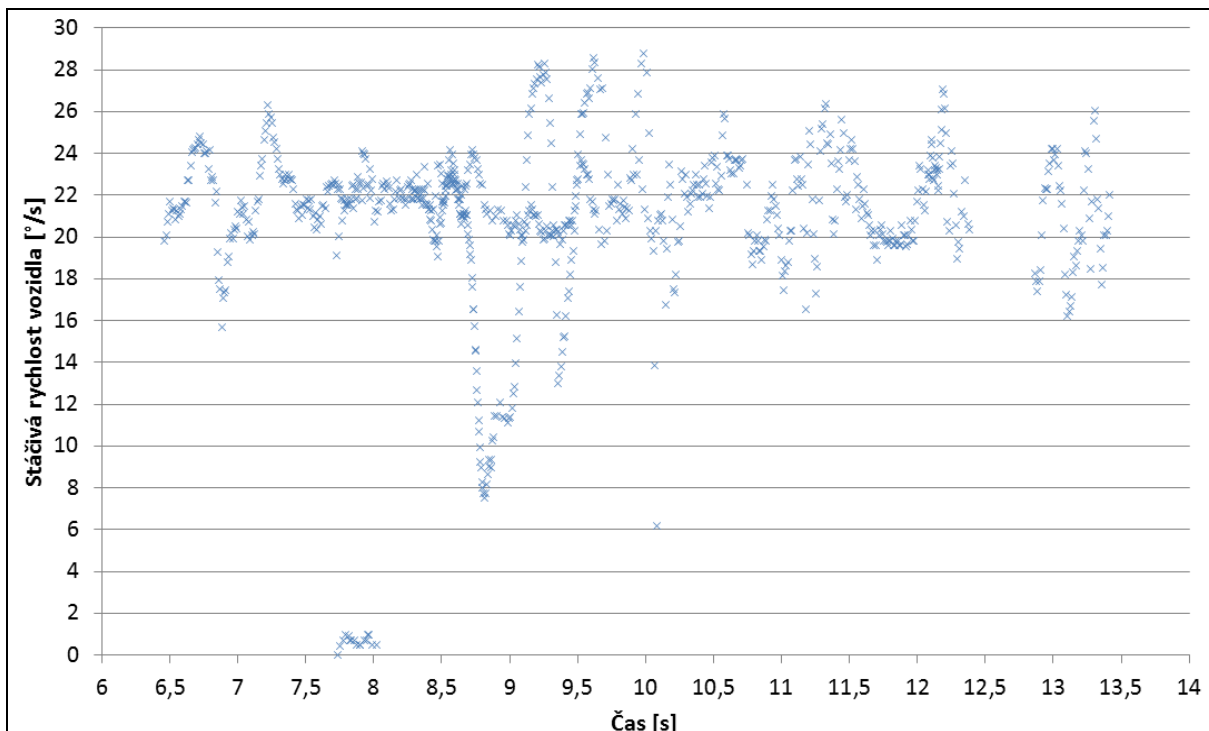
**Obr. 76:** Kruhová zkouška č. M4 – tlačítkem deaktivované ESP; v čase 10,5737 s zásahy systému ESP (systém automaticky aktivován bez zásahu posádky)

Z tabulky na **Obr. 76** je zjevné, že při zásazích elektronického stabilizačního systému ESP dochází vždy ke změně obvodové rychlosti jednotlivých kol vozidla. Proto byla na **Obr. 77** vynesena závislost změny obvodové rychlosti kol vozidla na čase v průběhu kruhové zkoušky č. M4. Červená křivka na **Obr. 77** vznikla proložením polynomu druhého řádu průběhem bodů změny obvodové rychlosti kol na čase. Rovnice polynomu je na **Obr. 77** uvedena červeně. Z polohy jednotlivých bodů změny obvodové rychlosti kol je zřejmé, že změna rychlosti kol vozidla při zásazích systému ESP se v průběhu zkoušky pohybovala v rozmezí 0 až 31 km/h, tedy ve stejném rozmezí jako při kruhové zkoušce č. M3.



**Obr. 77:** Kruhová zkouška č. M4 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky

Z experimentálně naměřených parametrů jízdní dynamiky vozidla je zřejmé, že k zásahu elektronického stabilizačního systému ESP dochází pouze při určitých hodnotách stáčivé rychlosti vozidla. Proto byly na **Obr. 78** vyneseny hodnoty stáčivé rychlosti vozidla v závislosti na čase při zásazích systému ESP v průběhu kruhové zkoušky č. M4. Z polohy vnesených jednotlivých hodnot stáčivých rychlostí vozidla při detekovaných zásazích systému ESP je zřejmé, že stabilizační systém aktivně zasáhl do jízdní dynamiky vozidla v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti cca 1 až 29 °/s. Nutno dodat, že největší množství zásahů systému ESP do jízdní dynamiky se při kruhové zkoušce č. M4 nachází v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti 19 až 26 °/s.



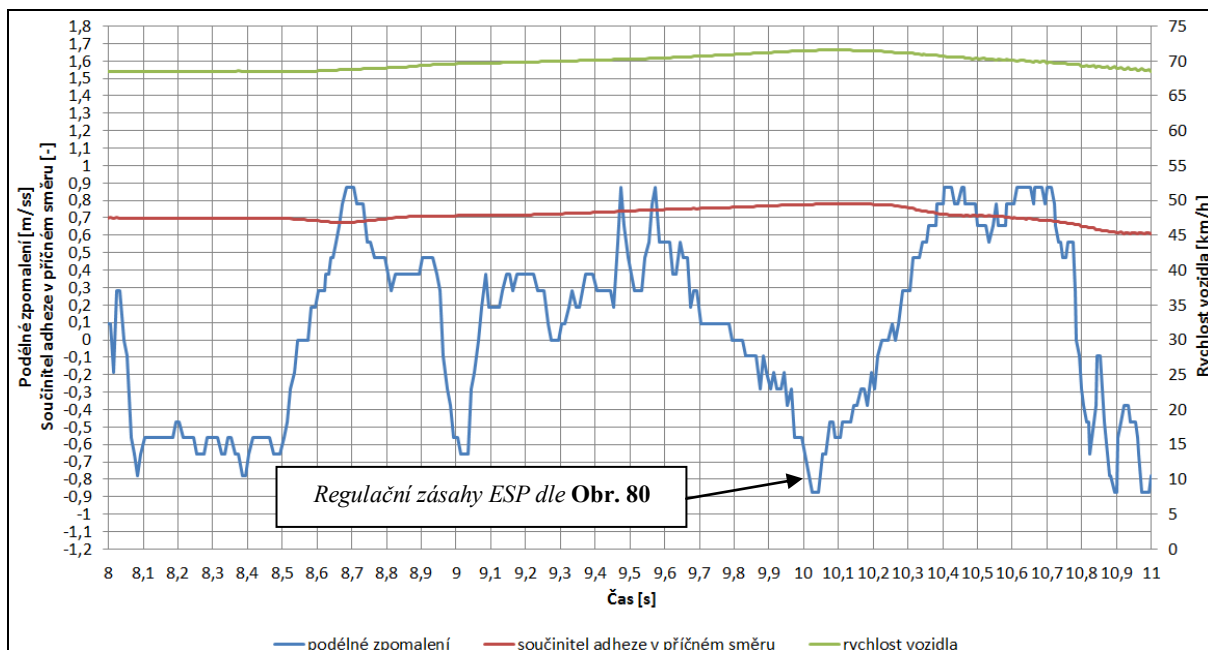
*Obr. 78: Kruhová zkouška č. M4 – hodnoty stáčivé rychlosti vozidla při zásazích ESP*

## 5. Kruhová zkouška č. M5

Jelikož bylo provedenými experimenty prokázáno, že při deaktivaci stabilizačního systému ESP běžným uživatelským způsobem se systém v okamžiku vyhodnocení kritické jízdní situace automaticky aktivuje a snaží se nastalou kritickou jízdní situací odvrátit a vozidlo směrově stabilizovat, proto budou další kruhové zkoušky provedeny s aktivovaným systémem ESP i s ohledem na situaci, že u dnešních moderních vozidel není možné systém běžně řidičem deaktivovat, pouze lze u určitých typů vozidel pouze měnit provozní režimy stabilizačního systému (např. režim sportovní a režim normální).

V případě kruhové zkoušky č. M5 se jednalo o jízdu definovaným obloukem s aktivovaným systémem ESP. Zkušební řidič se s vozidlem snažil pohybovat obloukem mezní rychlostí. Průjezd obloukem se vnějšímu pozorovateli jevil jako jízda na hranici stability. Řidič se plně věnoval průjezdu po stanovené trajektorii oblouku. Průběh rychlosti vozidla při kruhové zkoušce, podélného zpomalení/zrychlení a využívaného součinitele adheze v příčném směru v závislosti na čase jízdní zkoušky dokumentuje **Obr. 79**. Již z křivky průběhu podélného zpomalení jsou zřejmé okamžiky vyhodnocení kritické jízdní situace řídicí jednotkou stabilizačního systému ESP. Z tabulky na **Obr. 80** jsou zřejmé jednotlivé jednak zásahy stabilizačního systému ESP regulujícího jízdní dynamiku vozidla při kruhové zkoušce, tak jsou z tabulky patrné i zásahy asistenčního systému regulující

prokluz jednotlivých kol (ASR - viz např. řádek 2 tabulky na **Obr. 80**). Např. v čase kruhové zkoušky 10,0041 s došlo k zásahu systému ESP přibrzděním levého zadního kola, čímž bylo vozidlo stabilizováno do požadovaného průjezdu obloukem (viz řádek 1 tabulky na **Obr. 80**). Střední hodnota součinitele adheze v příčném směru se během zkoušky pohybovala v rozmezí 0,61 až 0,78.



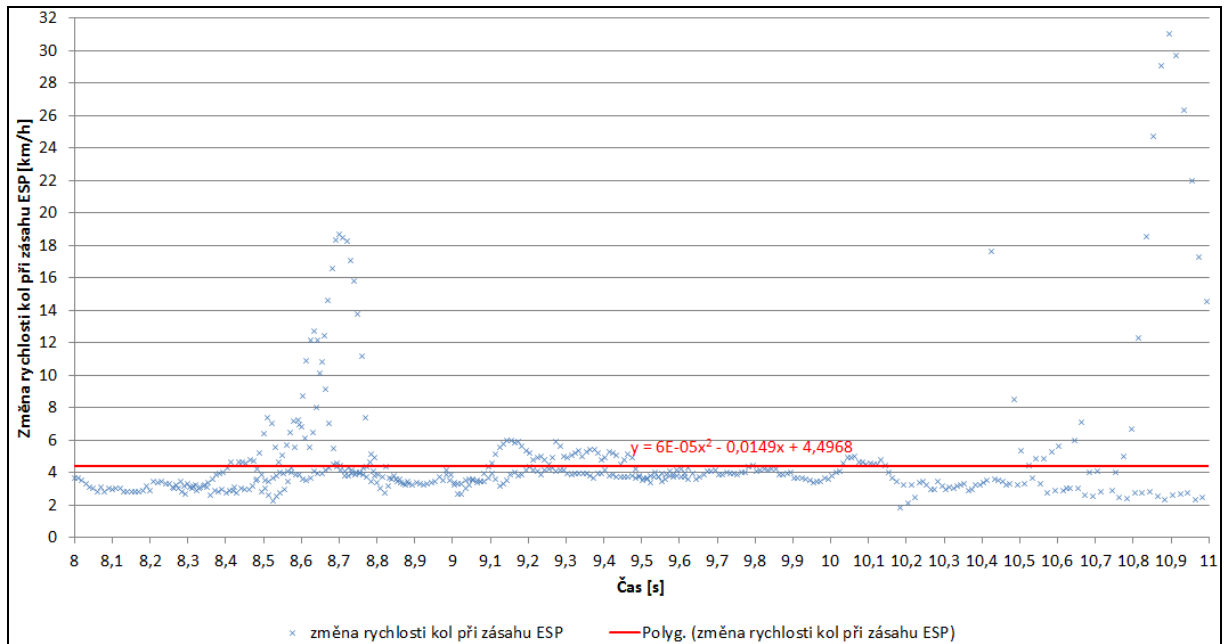
**Obr. 79:** Kruhová zkouška č. M5 – jízda obloukem s aktivovaným systémem ESP (závislost rychlosti jízdy, podélného zpomalení/zrychlení a součiniteli adheze v příčném směru na čase)

čas s	zásah ESP	ABS	ASR	LZ kolo km/h	PZ kolo km/h	LP kolo km/h	PP kolo km/h	brzdný tlak bar	podélné zpom m/s <sup>2</sup>	stáčivá rychlost °/s
10,0003	0	0	0	70,51	69,07	71,1	71,1	0	-0,5625	22,92
10,0038	0	0	1	71,7	69,76	72,54	72,78	0,1	-0,65625	23,23
10,0041	1	0	0	68,12	71,27	71,7	71,9	0,3	-0,65625	23,92
10,01	0	0	0	70,56	69	71,17	71,02	0	-0,65625	24,17
10,0139	1	0	0	67,93	71,17	71,56	71,95	0,5	-0,65625	24,88
10,0142	0	0	1	71,58	69,83	72,57	73,03	0,8	-0,78125	25,34
10,0202	0	0	0	70,51	68,96	71,24	71,28	0	-0,78125	25,41
10,0241	0	0	1	71,63	69,73	72,65	73,33	0,1	-0,875	25,89
10,0241	1	0	0	67,66	71,09	71,6	71,78	0,3	-0,875	25,89
10,03	0	0	0	70,56	68,84	71,18	71,15	0	-0,875	26,13
10,0338	1	0	0	67,25	71,27	71,68	71,85	0,5	-0,78125	26,11
10,0342	0	0	1	71,55	69,72	72,83	73,03	0	-0,875	25,71
10,0402	0	0	0	70,54	68,84	71,2	71,07	0	-0,875	25,65
10,0437	0	0	1	71,58	69,73	72,67	72,96	0	-0,875	24,99
10,0441	1	0	0	67,1	71,32	71,65	72	0,7	-0,875	24,56

**Obr. 80:** Kruhová zkouška č. M5 – aktivované ESP; v čase 10,0041 s detekované zásahy systému ESP a ASR

Z tabulky na **Obr. 80** je zřejmé, že při zásazích elektronického stabilizačního systému ESP dochází vždy ke změně obvodové rychlosti jednotlivých kol vozidla. Proto byla na **Obr. 81** vynesena závislost změny obvodové rychlosti kol vozidla na čase v průběhu kruhové

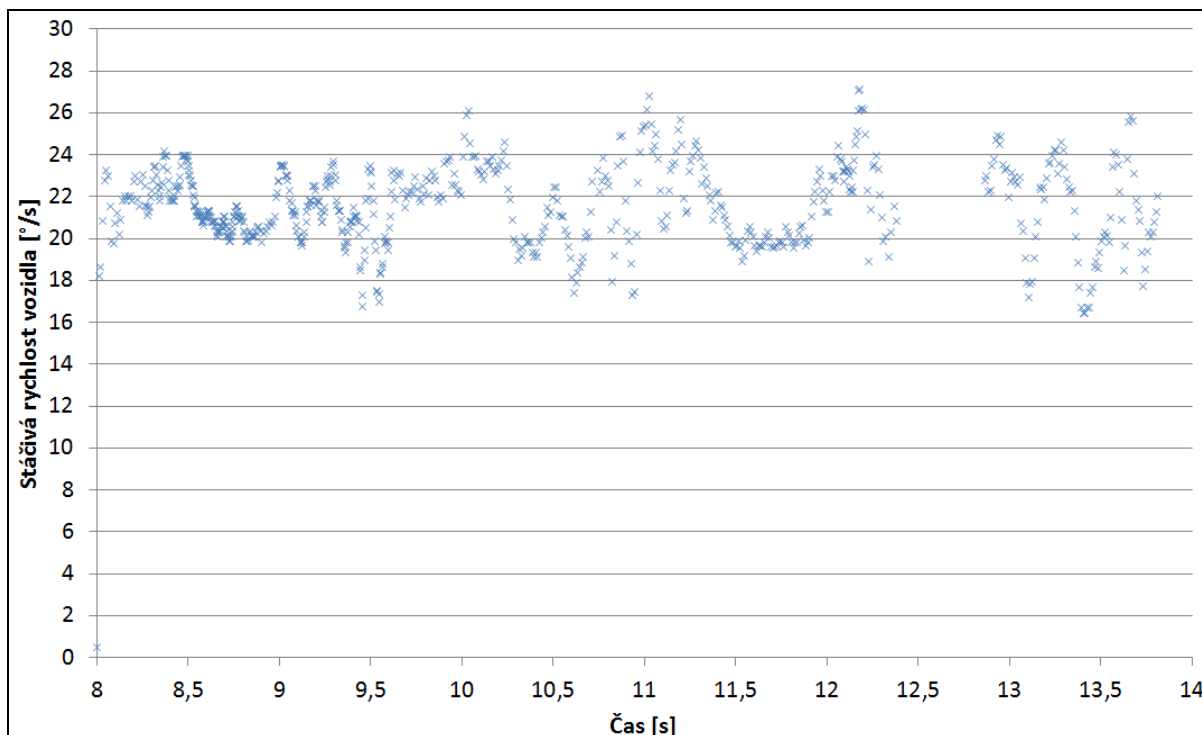
zkoušky č. M5. Červená křivka na **Obr. 81** vznikla proložením polynomu druhého řádu průběhem bodů změny obvodové rychlosti kol na čase. Rovnice polynomu je na **Obr. 81** uvedena červeně. Z polohy jednotlivých bodů změny obvodové rychlosti kol je zřejmé, že změna rychlosti kol vozidla při zásazích systému ESP se v průběhu zkoušky pohybovala v rozmezí 0 až 31 km/h, tedy ve stejném rozmezí jako při kruhové zkoušky č. M3 a M4.



**Obr. 81:** Kruhová zkouška č. M5 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky

Z experimentálně naměřených parametrů jízdní dynamiky vozidla je zřejmé, že k zásahu elektronického stabilizačního systému ESP dochází pouze při určitých hodnotách stáčivé rychlosti vozidla. Proto byly na **Obr. 82** vyneseny hodnoty stáčivé rychlosti vozidla v závislosti na čase při zásazích systému ESP v průběhu kruhové zkoušky č. M5. Z polohy vnesených jednotlivých hodnot stáčivých rychlostí vozidla při detekovaných zásazích systému ESP je zřejmé, že stabilizační systém aktivně zasáhl do jízdní dynamiky vozidla v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti cca 17 až 27 %.



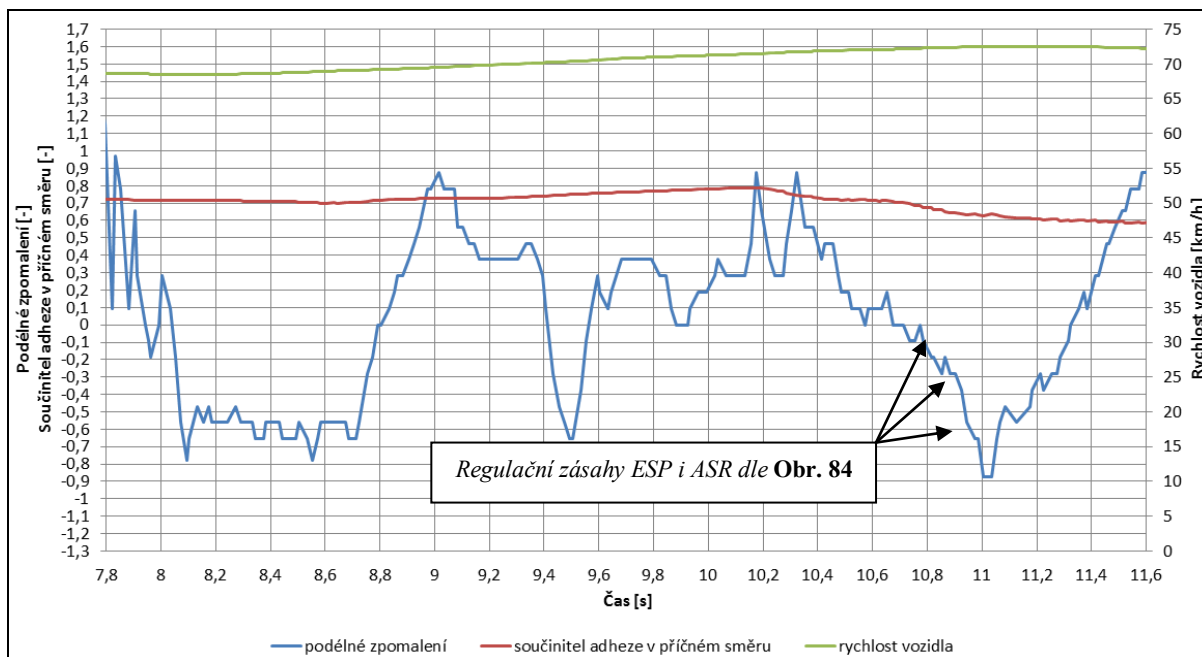


**Obr. 82:** Kruhová zkouška č. M5 – hodnoty stáčívé rychlosti vozidla při zásazích ESP

## 6. Kruhová zkouška č. M6

Při této zkoušce se jednalo o jízdu definovaným obloukem s aktivovaným systémem ESP. Zkušební řidič se s vozidlem snažil pohybovat obloukem opět blízko mezní rychlosti. Průjezd obloukem se vnějšímu pozorovateli jevil jako jízda na hranici stability, podobně jako v případě kruhové zkoušky č. M5. Řidič se plně věnoval plynulému průjezdu po stanovené trajektorii oblouku, čímž byl zaručen přibližně konstantní úhel natočení volantu. Průběh rychlosti vozidla při kruhové zkoušce, podélného zpomalení/zrychlení a využívaného součinitele adheze v příčném směru v závislosti na čase jízdní zkoušky dokumentuje **Obr. 83**. Opět z křivky průběhu podélného zpomalení jsou zřejmé časté okamžiky vyhodnocení kritické jízdní situace řídicí jednotkou stabilizačního systému ESP. Z tabulky na **Obr. 84** jsou zřejmé jednotlivé jednak zásahy stabilizačního systému ESP regulujícího jízdní dynamiku vozidla při kruhové zkoušce, tak jsou z tabulky patrné i zásahy asistenčního systému regulující prokluz jednotlivých kol (ASR - viz např. řádek 2 tabulky na **Obr. 84**). Např. v čase kruhové zkoušky 10,804 s došlo k zásahu systému ESP přibrzděním levého zadního kola, čímž bylo vozidlo stabilizováno do požadovaného průjezdu obloukem (viz řádek 3 tabulky na **Obr. 84**). Z regulačních zásahů systému ESP je zřejmé (např. viz **Obr. 83**), že od okamžiku počínajících zásahů systému dochází k mírnému nárůstu rychlosti vozidla v oblouku nad hodnotu analyticky vypočtené mezní rychlosti cca 67 km/h při uvažovaném součiniteli

adheze v příčném směru 0,7. Střední hodnota součinitele adheze v příčném směru se během zkoušky pohybovala v rozmezí 0,58 až 0,79.

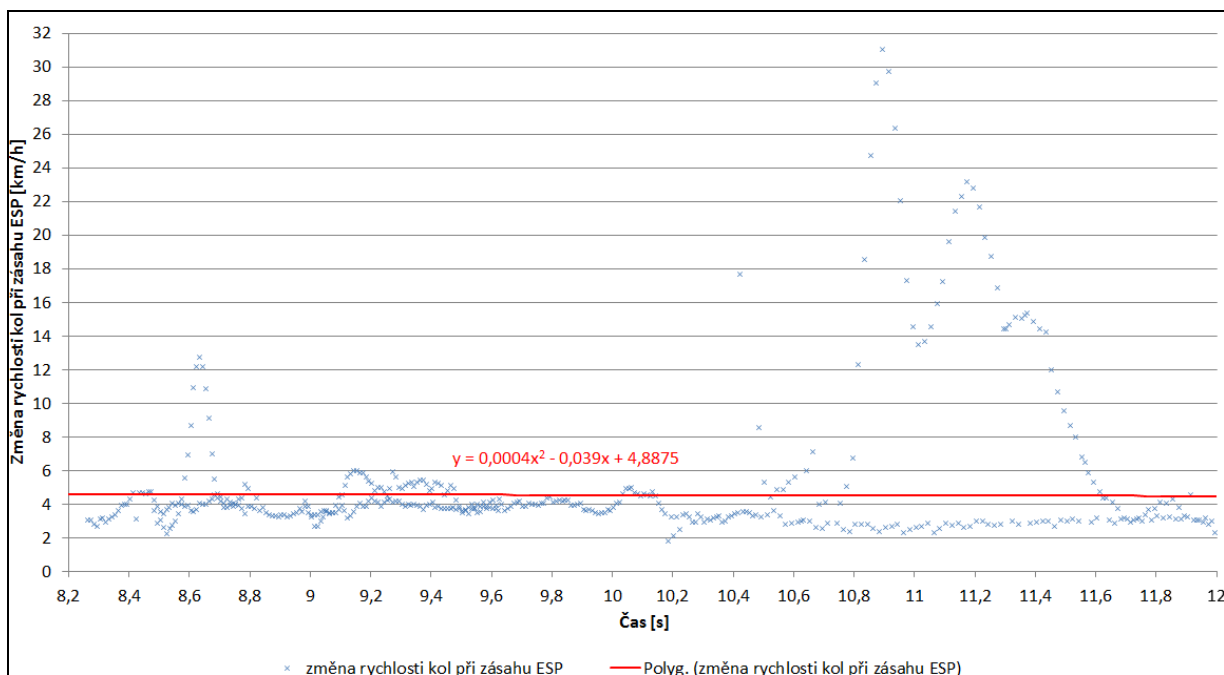


**Obr. 83:** Kruhová zkouška č. M6 – jízda obloukem s aktivovaným systémem ESP (závislost rychlosti jízdy, podélného zpomalení/zrychlení a součiniteli adheze v příčném směru na čase)

čas s	zásah ESP	ABS	ASR	LZ kolo km/h	PZ kolo km/h	LP kolo km/h	PP kolo km/h	brzdný tlak bar	podélné zpom. m/s <sup>2</sup>	stáčivá rychlost °/s	úhel natočení volantu °
10,7945	1	0	0	64,56	57,85	60,58	60,36	0,7	-0,1875	22,09	98,175
10,804	0	0	1	64,26	55,02	62,27	61,22	0,6	-0,09375	22,59	99,055
10,804	1	0	0	70,51	72,75	73,16	73,3	0,5	-0,1875	21,91	98,1355
10,8137	0	0	1	70,63	72,83	72,93	73,41	0,3	-0,1875	22,94	97,675
10,8145	1	0	0	64,01	51,69	62,34	61,63	0,3	-0,09375	23,14	98,185
10,8239	0	0	1	63,75	48,4	61,86	61,58	0,1	-0,28125	22,63	96,5755
10,8243	1	0	0	70,76	72,75	73,06	73,54	0,3	-0,1875	23,58	97,9755
10,8336	0	0	1	70,82	72,8	73,14	73,33	0,5	-0,28125	23,21	98,325
10,8345	1	0	0	63,68	45,16	62,1	61,4	0,1	-0,28125	23,71	98,625
10,8439	0	0	1	63,5	41,83	61,75	61,03	0,1	-0,1875	23,9	98,795
10,844	1	0	0	70,66	72,88	73,03	73,49	0,3	-0,28125	23,78	97,6455
10,8537	0	0	1	70,76	73,19	73,11	73,41	0	-0,28125	24,4	99,6875

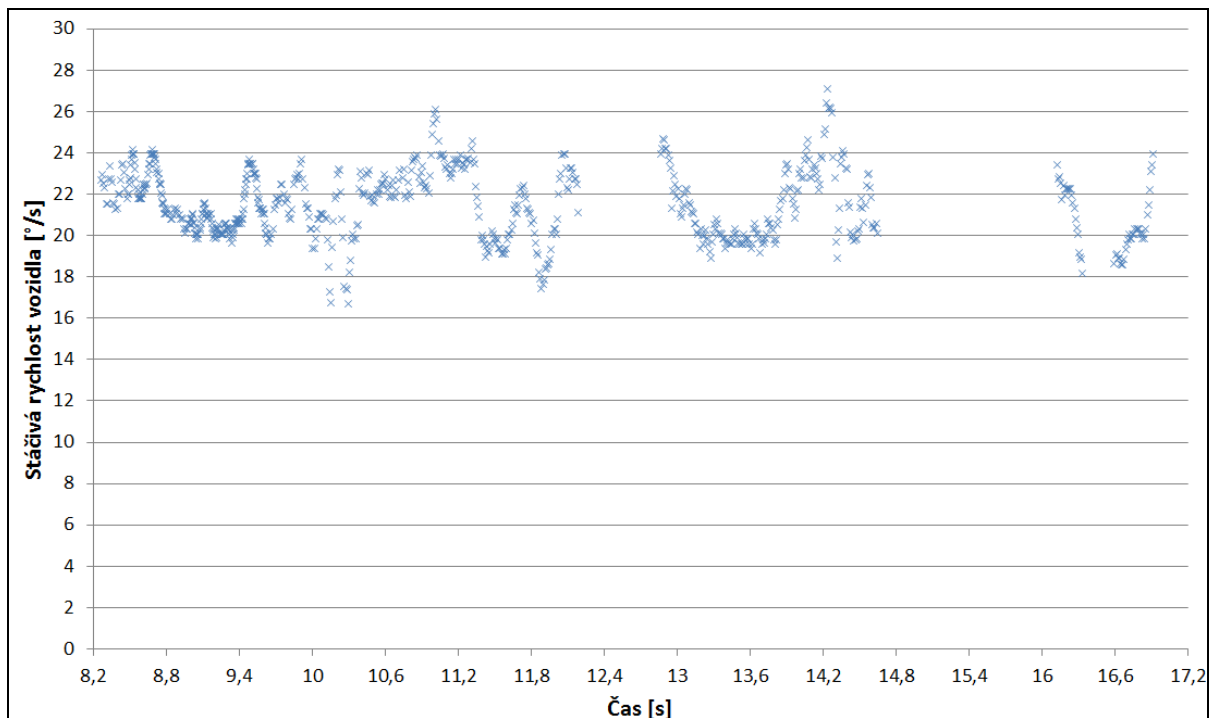
**Obr. 84:** Kruhová zkouška č. M6 – aktivované ESP; v čase 10,7945 s detekované zásahy systému ESP a následně v čase 10,8137 s i systémem ASR

Z tabulky na **Obr. 84** je zjevné, že při zásazích elektronického stabilizačního systému ESP dochází vždy ke změně obvodové rychlosti jednotlivých kol vozidla. Proto byla na **Obr. 85** vynesena závislost změny obvodové rychlosti kol vozidla na čase v průběhu kruhové zkoušky č. M6. Červená křivka na **Obr. 85** vznikla proložením polynomu druhého řádu průběhem bodů změny obvodové rychlosti kol na čase. Rovnice polynomu je na **Obr. 85** uvedena červeně. Z polohy jednotlivých bodů změny obvodové rychlosti kol je zřejmé, že změna rychlosti kol vozidla při zásazích systému ESP se v průběhu zkoušky pohybovala v rozmezí 1,9 až 31 km/h.



**Obr. 85:** Kruhová zkouška č. M6 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky

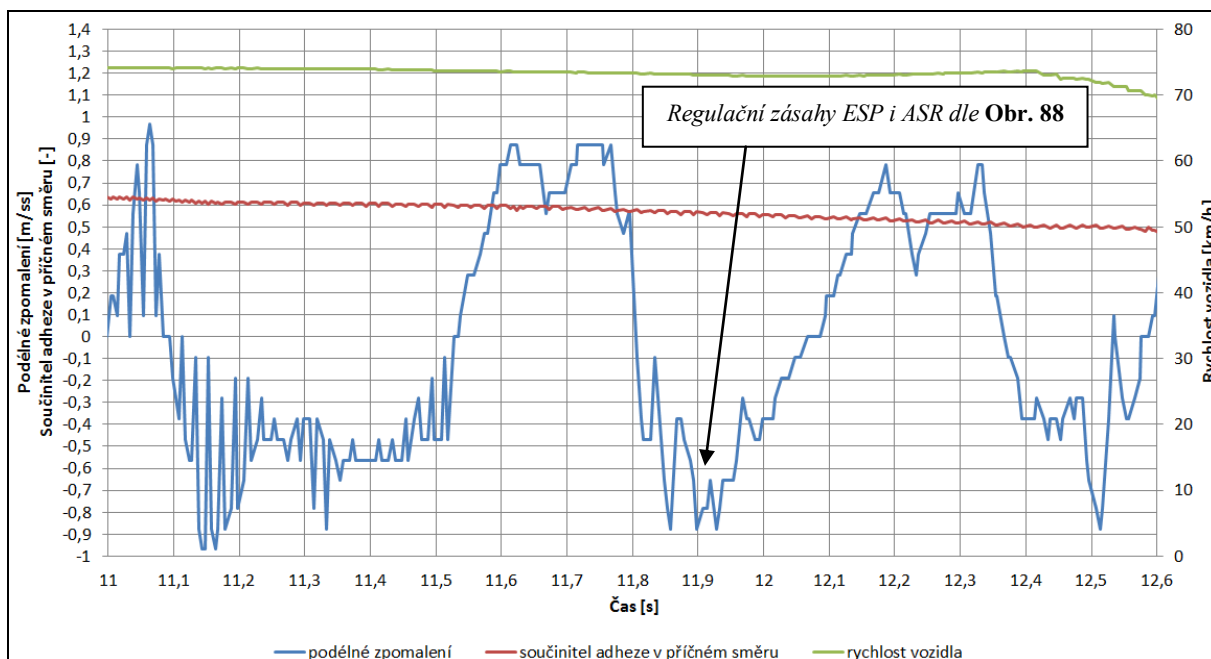
Z experimentálně naměřených parametrů jízdní dynamiky vozidla je zřejmé, že k zásahu elektronického stabilizačního systému ESP dochází pouze při určitých hodnotách stáčivé rychlosti vozidla. Proto byly na **Obr. 86** vyneseny hodnoty stáčivé rychlosti vozidla v závislosti na čase při zásazích systému ESP v průběhu kruhové zkoušky č. M6. Z polohy vnesených jednotlivých hodnot stáčivých rychlostí vozidla při detekovaných zásazích systému ESP je zřejmé, že stabilizační systém aktivně zasáhl do jízdní dynamiky vozidla v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti cca 17 až 27 °/s.



*Obr. 86: Kruhová zkouška č. M6 – hodnoty stáčivé rychlosti vozidla při zásazích ESP*

## 7. Kruhová zkouška č. M7

Z důvodu opakovatelnosti provedených experimentálních měření se opět jednalo o jízdu definovaným obloukem s aktivovaným systémem ESP, kdy se zkušební řidič s vozidlem snažil pohybovat obloukem opět blízko mezní rychlosti vozidla v oblouku. Průjezd obloukem se vnějšímu pozorovateli jevil jako jízda na hranici stability, podobně jako v případě kruhové zkoušky č. M5 a M6. Řidič se plně věnoval plynulému průjezdu po stanovené trajektorii oblouku, čímž byl zaručen přibližně konstantní úhel natočení volantu. Průběh rychlosti vozidla při kruhové zkoušce, podélného zpomalení/zrychlení a využívaného součinitele adheze v příčném směru v závislosti na čase jízdní zkoušky dokumentuje **Obr. 87**. Opět z křivky průběhu podélného zpomalení jsou zřejmé časté okamžiky vyhodnocení kritické jízdní situace řídicí jednotkou stabilizačního systému ESP. Z tabulky na **Obr. 88** jsou zřejmé jednotlivé jednak zásahy stabilizačního systému ESP regulujícího jízdní dynamiku vozidla při kruhové zkoušce, tak jsou z tabulky patrné i zásahy asistenčního systému regulující prokluz jednotlivých kol (ASR - viz např. řádek 2,3 a 6 tabulky na **Obr. 88**). Např. v čase kruhové zkoušky 11,9144 s došlo k zásahu systému ESP přibrzděním levého zadního kola, čímž bylo vozidlo stabilizováno do požadovaného průjezdu obloukem (viz řádek 5 tabulky na **Obr. 88**). Střední hodnota součinitele adheze v příčném směru se během zkoušky pohybovala v rozmezí 0,48 až 0,64.

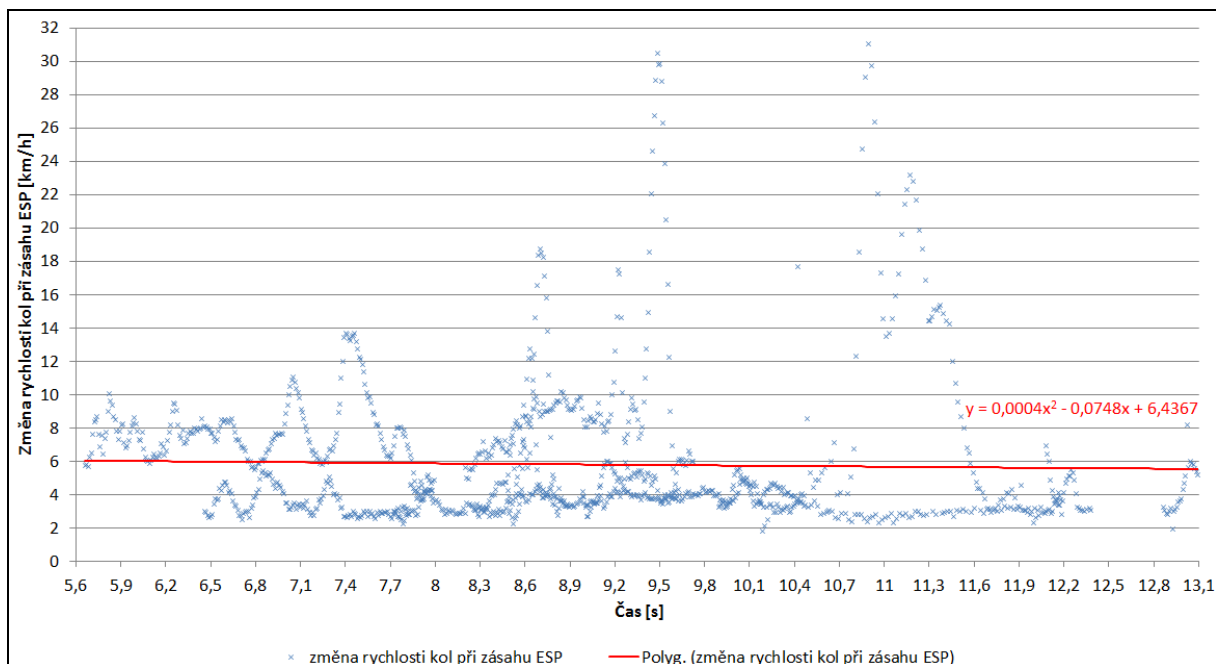


**Obr. 87:** Kruhová zkouška č. M7 – jízda obloukem s aktivovaným systémem ESP (závislost rychlosti jízdy, podélného zpomalení/zrychlení a součiniteli adheze v příčném směru na čase)

čas s	zásah ESP	ABS	ASR	LZ kolo km/h	PZ kolo km/h	LP kolo km/h	PP kolo km/h	brzdný tlak bar	podélné zpom. m/s <sup>2</sup>	stáčivá rychlost °/s	úhel natočení volantu °
11,9039	0	0	0	69,64	72,7	71,58	72,75	0	-0,875	25,17	96,6875
11,9068	0	0	1	71,2	73,75	74,09	74,26	0	-0,875	24,96	99,1635
11,9079	0	0	1	70,72	68,21	74,18	81,34	0	-0,78125	25,37	96,9225
11,9136	0	0	0	69,64	72,75	71,5	72,6	0	-0,78125	25,38	98,1675
11,9144	1	0	0	69,6	72,67	71,75	72,62	0,3	-0,78125	25,59	96,775
11,9162	0	0	1	71,2	73,96	74,21	73,93	0	-0,65625	26,07	102,6375

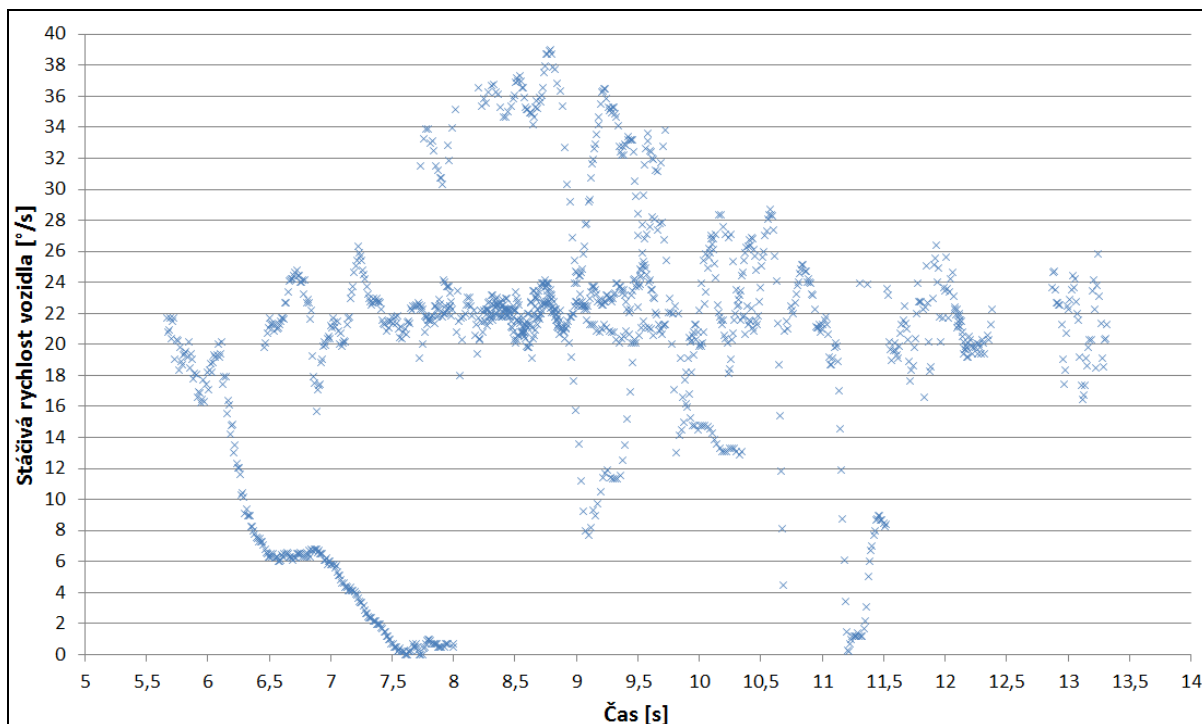
**Obr. 88:** Kruhová zkouška č. M7 – aktivované ESP; v čase 11,9144 s detekované zásahy systému ESP a následně v čase 11,9162 s i systému ASR

Z tabulky na **Obr. 88** je zjevné, že při zásazích elektronického stabilizačního systému ESP dochází vždy ke změně obvodové rychlosti jednotlivých kol vozidla. Proto byla na **Obr. 89** vynesena závislost změny obvodové rychlosti kol vozidla na čase v průběhu kruhové zkoušky č. M7. Červená křivka na **Obr. 89** vznikla proložením polynomu druhého řádu průběhem bodů změny obvodové rychlosti kol na čase. Rovnice polynomu je na **Obr. 89** uvedena červeně. Z polohy jednotlivých bodů změny obvodové rychlosti kol je zřejmé, že změna rychlosti kol vozidla při zásazích systému ESP se v průběhu zkoušky pohybovala v rozmezí 2 až 31 km/h.



**Obr. 89:** Kruhová zkouška č. M7 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky

Z experimentálně naměřených parametrů jízdní dynamiky vozidla je zřejmé, že k zásahu elektronického stabilizačního systému ESP dochází pouze při určitých hodnotách stáčivé rychlosti vozidla. Proto byly na **Obr. 90** vyneseny hodnoty stáčivé rychlosti vozidla v závislosti na čase při zásazích systému ESP v průběhu kruhové zkoušky č. M7. Z polohy vnesených jednotlivých hodnot stáčivých rychlostí vozidla při detekovaných zásazích systému ESP je zřejmé, že stabilizační systém aktivně zasáhl do jízdní dynamiky vozidla v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti cca 0 až 39 ‰/s. Nutno dodat, že největší množství zásahů systému ESP do jízdní dynamiky se při kruhové zkoušce č. M7 nachází v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti 17 až 27 ‰/s.

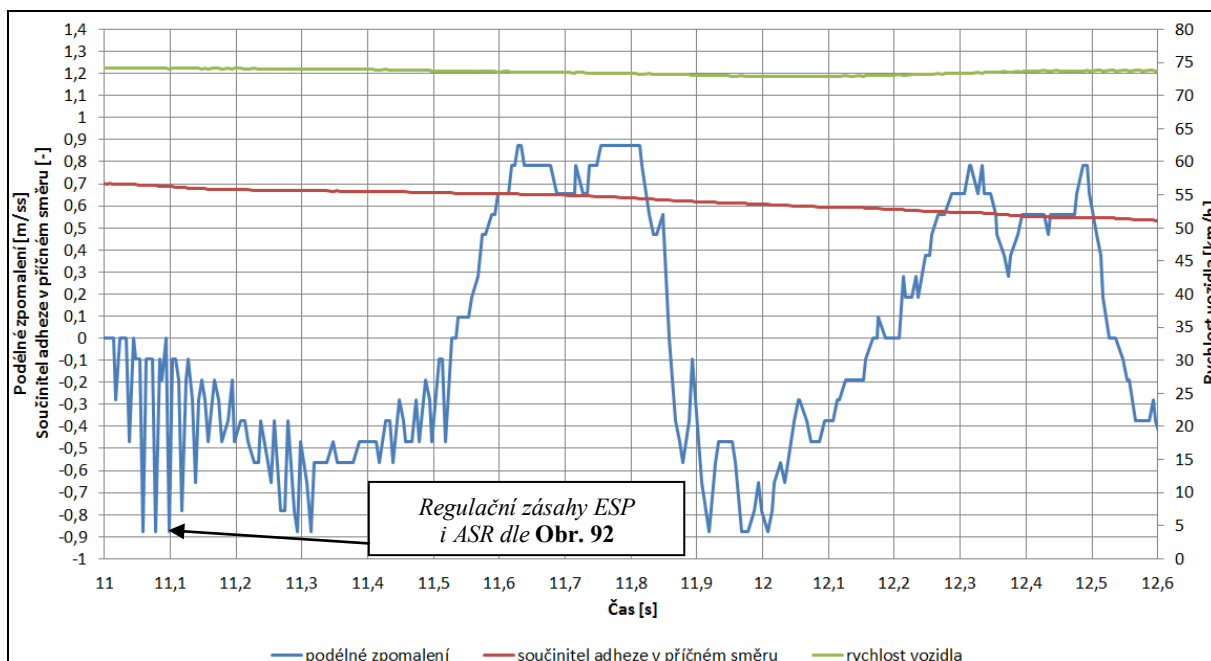


*Obr. 90: Kruhová zkouška č. M7 – hodnoty stáčívé rychlosti vozidla při zásazích ESP*

## 8. Kruhová zkouška č. M8

Metodika průběhu poslední kruhové zkoušky byla shodná jako v případě kruhové zkoušky č. M5, M6 a M7. Řidič se plně a soustředěně věnoval plynulému průjezdu po stanovené trajektorii oblouku, čímž byl zaručen přibližně konstantní úhel natočení volantu. Průběh rychlosti vozidla při kruhové zkoušce, podélného zpomalení/zrychlení a využívaného součinitele adheze v příčném směru v závislosti na čase jízdní zkoušky dokumentuje **Obr. 91**. Opět z křivky průběhu podélného zpomalení jsou zřejmé časté okamžiky vyhodnocení kritické jízdní situace řídicí jednotkou stabilizačního systému ESP. Z tabulky na **Obr. 92** jsou zřejmé jednotlivé jednak zásahy stabilizačního systému ESP regulujícího jízdní dynamiku vozidla při kruhové zkoušce, tak jsou z tabulky patrné i zásahy asistenčního systému regulující prokluz jednotlivých kol (ASR - viz např. řádek 2 až 4 tabulky na **Obr. 92**). Např. v čase kruhové zkoušky 11,084 s došlo k zásahu systému ESP mírným přibrzděním levého zadního kola, čímž bylo vozidlo stabilizováno do požadovaného průjezdu obloukem (viz řádek 1 tabulky na **Obr. 92**). Střední hodnota součinitele adheze v příčném směru se během zkoušky pohybovala v rozmezí 0,53 až 0,70.



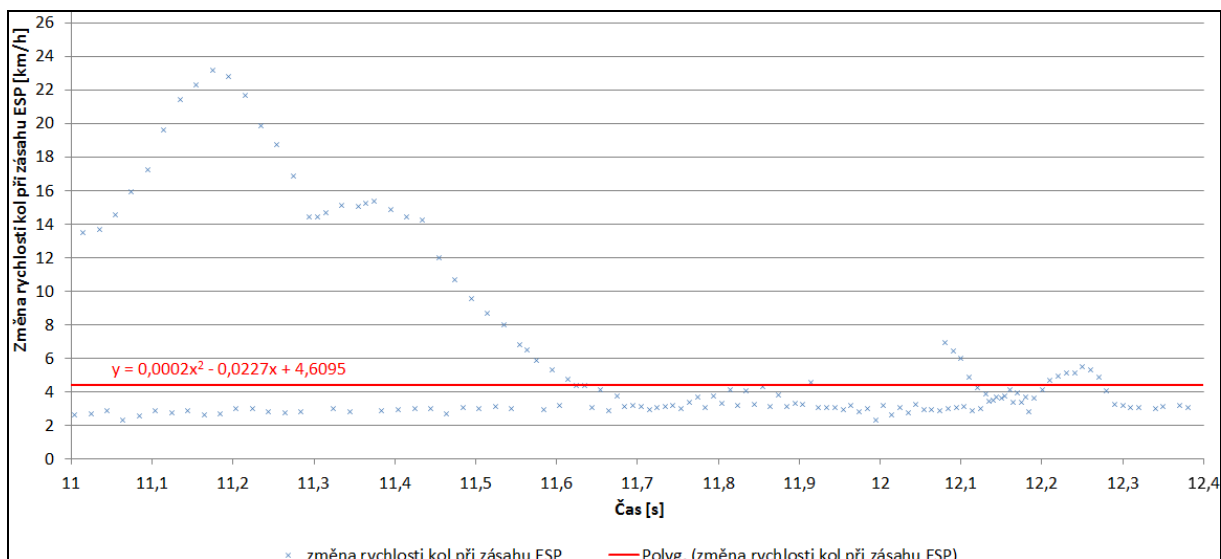


**Obr. 91:** Kruhová zkouška č. M8 – jízda obloukem s aktivovaným systémem ESP (závislost rychlosti jízdy, podélného zpomalení/zrychlení a součiniteli adheze v příčném směru na čase)

čas	zásah ESP	ABS	ASR	LZ kolo	PZ kolo	LP kolo	PP kolo	brzdný tlak	podélné zpom.
11,084	1	0	0	71,22	73,16	73,06	73,8	0,1	-0,09375
11,0869	0	0	1	68,7	72	75,39	73,21	0,3	-0,96875
11,0879	0	0	1	72,37	69,87	74,99	85,08	0	-0,1875
11,09	0	0	1	62,25	58,58	62,91	53,09	0,3	-0,96875
11,0937	0	0	0	71,1	73,28	72,8	73,78	0	0

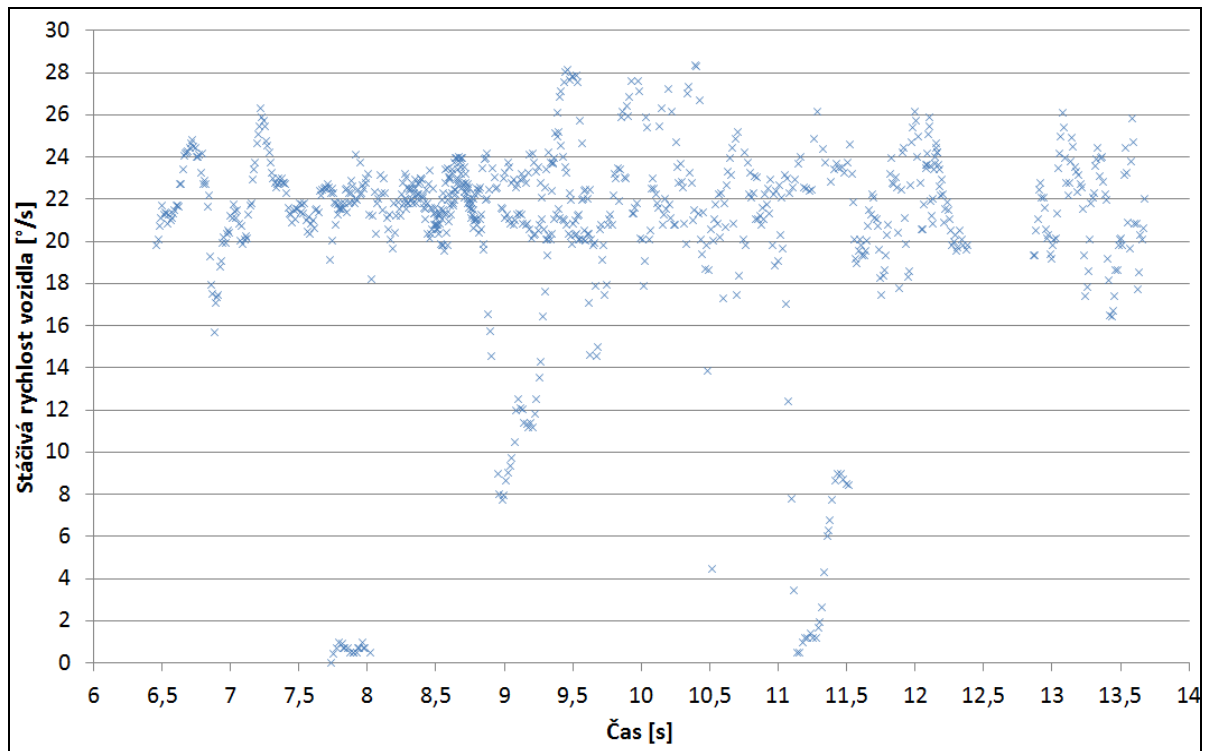
**Obr. 92:** Kruhová zkouška č. M8 – aktivované ESP; v čase 11,084 s detekované zásahy systému ESP a následně v čase 11,0869 s i systému ASR (pozn. rychlosti otáčení kol v [km/h], brzdný tlak v [bar], podélné zpomalení v [m/s<sup>2</sup>])

Z tabulky na **Obr. 92** je zřejmé, že při zásazích elektronického stabilizačního systému ESP dochází vždy ke změně obvodové rychlosti jednotlivých kol vozidla. Proto byla na **Obr. 93** vynesena závislost změny obvodové rychlosti kol vozidla na čase v průběhu kruhové zkoušky č. M8. Červená křivka na **Obr. 93** vznikla proložením polynomu druhého řádu průběhem bodů změny obvodové rychlosti kol na čase. Rovnice polynomu je na **Obr. 93** uvedena červeně. Z polohy jednotlivých bodů změny obvodové rychlosti kol je zřejmé, že změna rychlosti kol vozidla při zásazích systému ESP se v průběhu zkoušky pohybovala v rozmezí 2 až 23 km/h.



**Obr. 93:** Kruhová zkouška č. M8 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky

Z experimentálně naměřených parametrů jízdní dynamiky vozidla je zřejmé, že k zásahu elektronického stabilizačního systému ESP dochází pouze při určitých hodnotách stáčivé rychlosti vozidla. Proto byly na **Obr. 94** vyneseny hodnoty stáčivé rychlosti vozidla v závislosti na čase při zásazích systému ESP v průběhu kruhové zkoušky č. M8. Z polohy vnesených jednotlivých hodnot stáčivých rychlostí vozidla při detekovaných zásazích systému ESP je zřejmé, že stabilizační systém aktivně zasáhl do jízdní dynamiky vozidla v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti cca 1 až 28 °/s. Nutno dodat, že největší množství zásahů systému ESP do jízdní dynamiky se při kruhové zkoušce č. M8 nachází v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti 18 až 26 °/s.



*Obr. 94: Kruhová zkouška č. M8 – hodnoty stáčivé rychlosti vozidla při zásazích ESP*

#### 6.2.2.2.5 Shrnutí výsledků a vyhodnocení provedených kruhových zkoušek

V rámci uskutečněných experimentálních měření bylo provedeno celkem osm kruhových zkoušek č. M1 až M8 s vozidlem Škoda Octavia II definovaným obloukem o poloměru 51 m s tlačítkem v interiéru aktivovaným a deaktivovaným stabilizačním systémem ESP. Provedenými experimenty - kruhovými zkouškami č. M3 a M4 bylo prokázáno, že při deaktivaci stabilizačního systému ESP běžným uživatelským způsobem, tj. tlačítkem v interiéru vozidla, se systém v okamžiku vyhodnocení kritické jízdní situace automaticky aktivuje a snaží se vzniklou kritickou jízdní situaci odvrátit a vozidlo směrově stabilizovat (viz **Obr. 71**, **Obr. 72**, **Obr. 75** a **Obr. 76**). Tedy prakticky při všech uskutečněných kruhových zkouškách byl v jejich průběhu zaznamenán zásah stabilizačního systému ESP. Nutno dodat, že u dnešních moderních vozidel vybavených asistenčními systémy není možné elektronický stabilizační systém běžně řidičem deaktivovat, pouze lze u určitých typů vozidel např. měnit provozní režimy stabilizačního systému (režim sportovní a režim normální).

Naměřené parametry jízdní dynamiky vozidla při provedených kruhových zkouškách se zásahy systému ESP jsou souhrnně uvedeny v **Tabulka 9**.

**Tabulka 9: Shrnutí výsledků z kruhových zkoušek č. M1 až M8**

Podmínky měření			Naměřené hodnoty					
Číslo kruhové zkoušky	Poloměr oblouku [m]	Zásahy ESP	Rychlost vozidla v oblouku [km/h]		Součinitel adheze v příčném směru [-]		Změna obvodové rychlosti kol $\Delta v_{kol}$ [km/h]	
			min.	max.	min.	max.	min.	max.
M1	51	Ano	68	74	0,70	0,86	2	7,6
M2	51	Ano	67	76	0,60	0,85	0	40
M3	51	Ano	68	76	0,68	0,86	0	31
M4	51	Ano	72	76	0,59	0,81	0	31
M5	51	Ano	68	72	0,61	0,78	0	31
M6	51	Ano	69	73	0,58	0,79	1,9	31
M7	51	Ano	70	74	0,48	0,64	2	31
M8	51	Ano	73	74	0,53	0,70	2	23
Celkové rozmezí hodnot:			67	76	0,48	0,86	0	40

Z **Tabulka 9** je zřejmé rozmezí využívaného součinitele adheze v příčném směru 0,48 až 0,86 při rychlosti vozidla v oblouku v rozmezí 67 až 76 km/h. Analyticky stanovené rozmezí mezní rychlosti vozidla 67 až 75 km/h při experimentálně zjištěném součiniteli adheze v příčném směru v rozmezí 0,70 až 0,86 je téměř shodné s experimentálně zjištěným rozmezím mezní rychlostí vozidla 67 až 76 km/h. Po dosažení správné hodnoty součinitele adheze v příčném směru lze objektivně pro výpočet mezní rychlosti vozidla v oblouku použít analyticky odvozený vztah (19), resp. (20).

Změna obvodové rychlosti jednotlivých kol se při zásazích systému ESP pohybovala v rozmezí od 0 až do 40 km/h. Z jednotlivých změn obvodové rychlosti kol vozidla při kruhových zkouškách je patrné, že převážná většina hodnot změny rychlosti kol při zásazích ESP se nacházela v rozmezí 2 až 8 km/h (viz **Obr. 65, Obr. 73, Obr. 77, Obr. 81, Obr. 85, Obr. 89 a Obr. 93**), vyjma kruhové zkoušky č. M2, kdy se řidič s vozidlem snažil pohybovat obloukem maximální rychlostí, kterou systém ESP vozidlu umožnil, při které se hodnoty změny obvodové rychlosti kol vozidla pohybovaly v širším rozmezí 2,0 až 18 km/h (viz **Obr. 69**).

Hodnoty stáčivé rychlosti vozidla se při zásazích elektronického stabilizačního systému ESP pohybovaly nejčastěji v rozmezí 17 až 27 %/s (viz **Obr. 66, Obr. 70, Obr. 74, Obr. 78, Obr. 82, Obr. 86 a Obr. 90 a Obr. 94**), což odpovídá rozmezí cca 0,3 až 0,5 rad/s. Nejvyšší

dosazená hodnota stáčívé rychlosti vozidla byla zaznamenána při nejdynamičtějším průjezdu při měření č. M2, kdy v čase cca 8,5 s dosáhla hodnota stáčívé rychlosti vozidla až 40 °/s, což odpovídá hodnotě 0,7 rad/s, kdy se vozidlo při kruhové zkoušce již pohybovalo na hranici smyku se zanecháním smykových stop "pískajících" pneumatik.

### 6.2.3 Experimentální měření na polygonu společnosti DSD v Rakousku

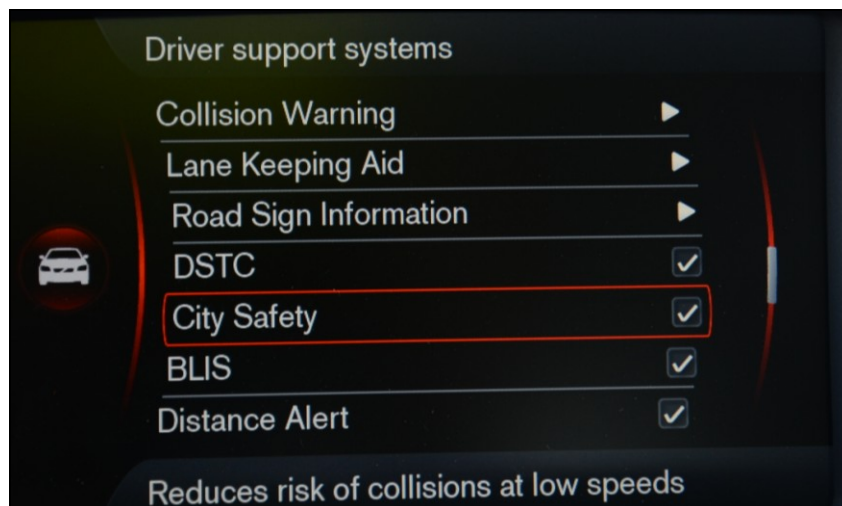
V rámci zahraniční stáže autora této dizertační práce na Technische Universität Graz proběhlo ve dnech 26.07.2013 až 05.08.2013 na testovacím polygonu DSD v katastru rakouské obce Allhaming měření jízdních parametrů velmi moderního vozidla Volvo V40 T5 AWD Cross Country s důrazem na zjišťování chování vozidla při jízdě a brzdění v oblouku při vyšších rychlostech nad 50 km/h.

#### 6.2.3.1 Měřený objekt – vozidlo Volvo V40 T5 AWD Cross Country

Objektem pro jízdní zkoušky, resp. zjišťování parametrů jízdní dynamiky bylo moderní vozidlo Volvo V40 T5 AWD Cross Country vybavené asistenčními systémy stability podvozku (ABS, ASR, DSTC). Zkoušené vozidlo bylo dále mj. vybaveno silným zážehovým motorem s automatickou převodovkou, pohonem všech kol AWD, asymetrickými pneumatikami Pirelli PZERO o rozměru 225/45 R18 95 W s hloubkou dezénu 8,0 mm v oblasti hlavních drážek na všech kolech. DOT kód pneumatik byl 3012, který určuje datum výroby pneumatiky, tj. v našem případě se jedná o 30. týden roku 2012. Technické parametry vozidla jsou uvedeny v příloze č. 5 této práce.



*Obr. 95: Objekt měření – vozidlo Volvo V40 T5 AWD Cross Country*



**Obr. 96:** Asistenční systémy testovaného vozidla Volvo V40

### Asistenční systém vozidla DSTC - Dynamic Stability and Traction Control

Z pohledu vyšetřování jízdní dynamiky vozidla Volvo je z hlediska asistenčních systémů třeba podrobně popsat systém DSTC (Dynamic Stability and Traction Control). Systém DSTC prostřednictvím zejména systému brzd a regulace prokluzu kol zajišťuje bezpečnost vozidla v provozu. Systém využívá snímačů popsaných v **kapitole 4.3.2** této práce, ze kterých řídicí jednotka DSTC rozpozná nestabilní chování vozidla a vydá pokyny akčním členům (řízení motoru, brzd, převodovce) za účelem dosažení směrově stabilního pohybu vozidla. Systém DSTC zahrnuje dva volitelné provozní režimy, normální a sportovní režim.

*Normální režim DSTC (DSTC "N"):*

- je aktivován při každém zapnutí zapalování;
- je deaktivován, pokud řidič ručně změní režim na ovládací obrazovce v ICM menu.

*Sportovní režim DSTC (DSTC "S"):*

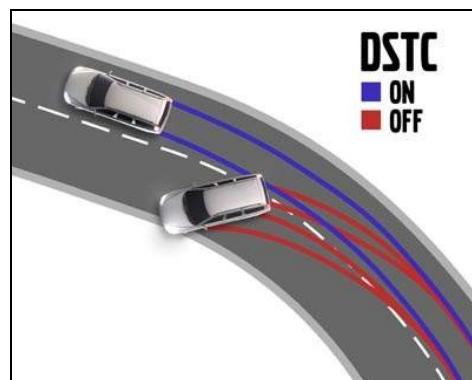
- je aktivován, pokud řidič deaktivuje normální režim na ovládací obrazovce v ICM menu;
- režim umožňuje řidiči sportovní a dynamický jízdní styl tak, že systém nesníží v dynamické jízdní situaci výkon motoru a dovolí tak více zadní části vozidla dostat se k hranici smyku;
- pokud řidič pracuje s pedálem akcelérátoru a volantem, pak systém DSTC umožní vozidlu dostat se více do smyku, než systém DSTC převeze kontrolu nad směrovou stabilitou vozidla;

- jestliže řidič uvolní při jízdě v zatáčce či při smyku pedál akcelérátoru, pak systém DSTC převezme kontrolu nad směrovou stabilitou vozidla jako při normálním režimu;
- režim může být řidičem zvolen během řízení kontroly DSTC, tj. pak se lze z normálního režimu opět přiblížit hranici stability vozidla (smyku).

**Tabulka 10:** Aktivní funkce, které jsou součástí systému DSTC při nastaveném režimu

Zkratka funkce	Normální režim DSTC	Sportovní režim DSTC	Vlastnost
SC	Řízení prokluzu kol	-	-
TC	Řízení trakce (pohonu)	Řízení trakce (pohonu)	-
AYC	Aktivní řízení stáčení	Aktivní řízení stáčení	Sportovní
ASC	Pokročilé řízení stability	Pokročilé řízení stability	Sportovní
TSA	Řízení stability přívěsu	-	-
EDC	Řízení výkonu motoru	-	-
CTC	Řízení trakce v zatáčce	Řízení trakce v zatáčce	-

Systém DSTC je tedy schopen v případě detekce směrově nestabilního chování vozidlo stabilizovat (viz **Obr. 97**) stejně jako systém ESP, který je podrobně popsán v **kapitole 4.3.2** této práce. Oproti standardnímu systému ESP však systém DSTC obsahuje celou řadu dalších funkcí, které jsou aktivní v závislosti na zvoleném provozním režimu systému (viz **Tabulka 10**). Systém DSTC je mj. schopen kontrolovat prokluz hnacích kol při akceleraci vozidla (stejně jako např. známý systém ASR), dále systém DSTC umožňuje kontrolovat trakci při nízkých rychlostech vozidla tak, že v případě detekce prokluzu kola přenese hnací sílu z prokluzujícího kola na kolo neprokluzující.



**Obr. 97:** Funkce systému DSTC [44]



### 6.2.3.2 Měřicí přístroje a záznamová technika

Pro zjišťování parametrů jízdní dynamiky byly využity následující měřicí přístroje a zařízení zapůjčené ÚSI VUT v Brně a TU Graz (Diferenciální GPS):

#### a) PicDAQ

Jedná se o kompaktní zařízení pro měření parametrů jízdní dynamiky vozidel vybavené GPS senzorem. Pomocí tohoto zařízení byly zjišťovány zejména tyto dynamické parametry vozidla:

- zrychlení ve třech osách x, y, z;
- úhlová (stáčivá) rychlost x, y, z;
- rychlost vozidla - GPS senzor;
- úhel stáčení vozidla.

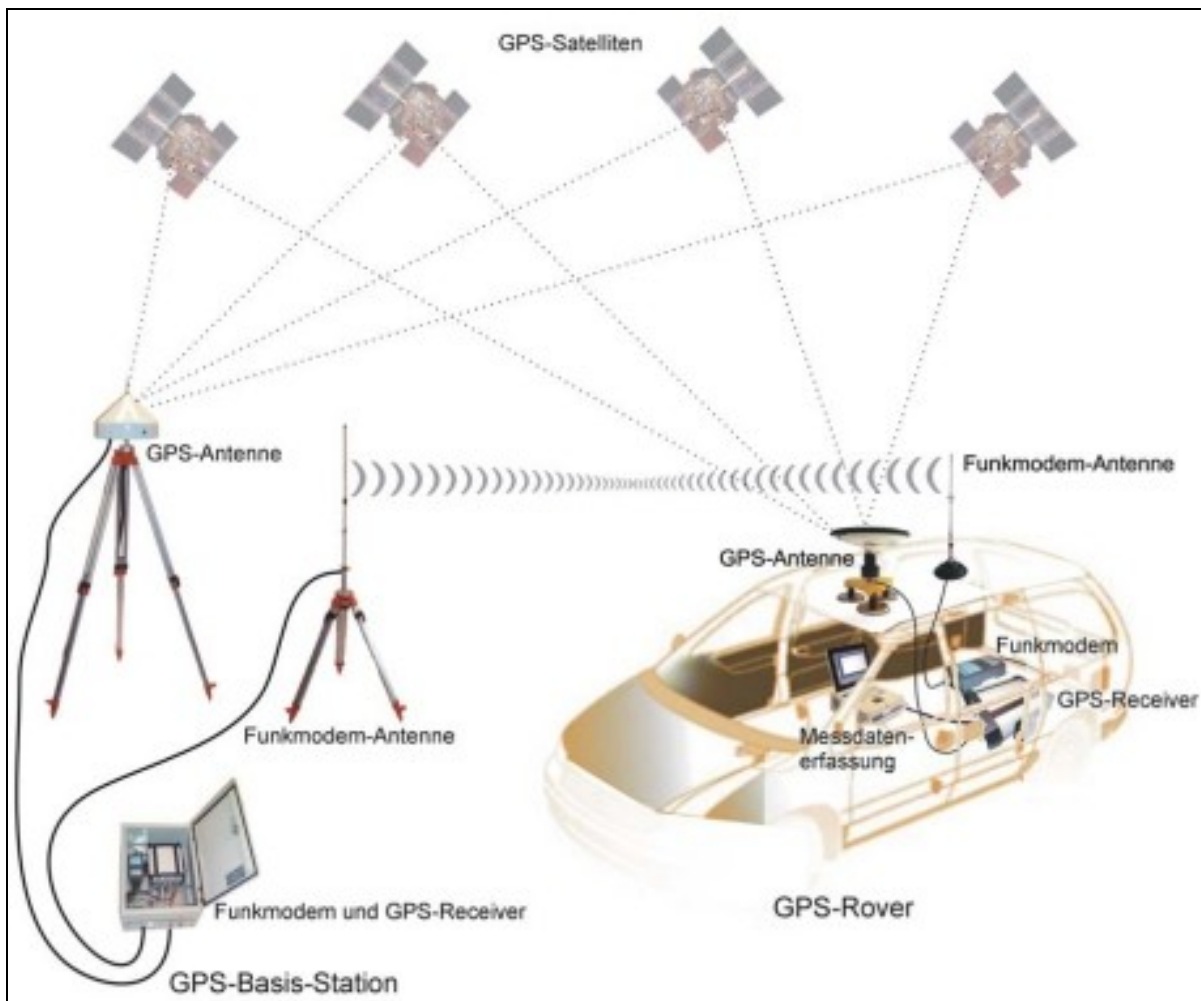


**Obr. 98:** Zařízení PicDAQ [45]

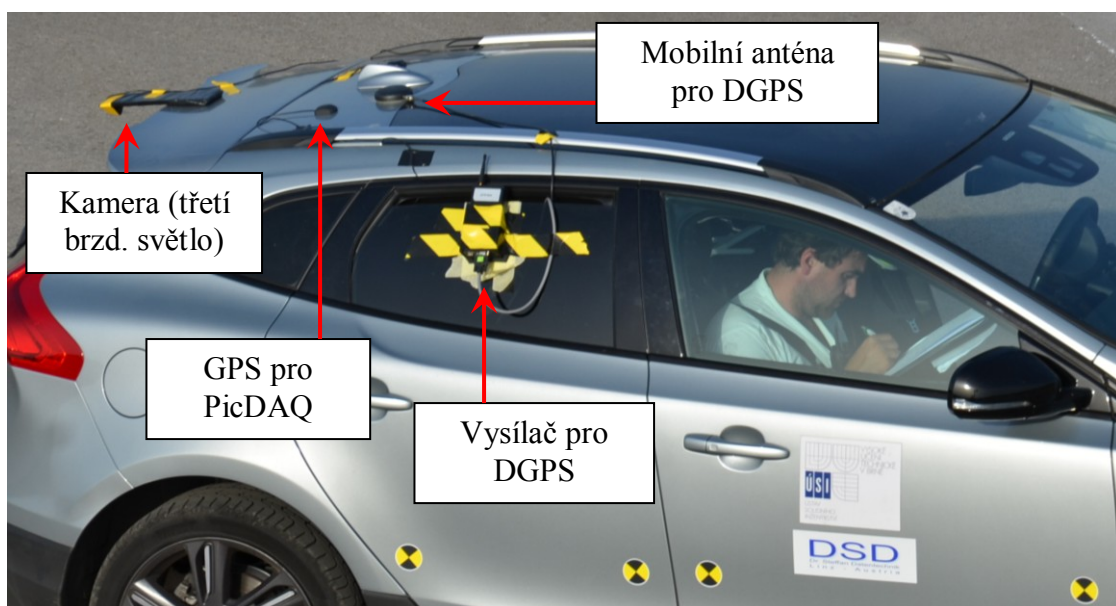
#### b) Diferenciální GPS

Jedná se o komplexní zařízení pro měření přesné polohy vozidla. Zařízení se skládá ze základní stanice (GPS Basis station), vysílací stanice (GPS Rover station), GPS referenční antény (umístěna pevně na střeše budovy), mobilní antény, která byla umístěna na střeše vozidla a dvou funkčních modulů (vysílačů).

Při všech dále uvedených průjezdech vozidla definovanými oblouky na polygonu DSD byly zaznamenávány a ukládány okamžité polohy vozidla s přesností  $\pm 1,0$  cm prostřednictvím údajů z DGPS, ze kterých bylo dále možné zrekonstruovat přesnou trajektorii průjezdu a brzdění vozidla v oblouku. S ohledem na rozsah této dizertační práce jsou úplná data z DGPS součástí této práce na přiloženém datovém nosiči DVD.



*Obr. 99: Sestava Diferenciální GPS [46]*



*Obr. 100: Vnější osazení vozidla měřicí technikou*

*c) Black Box*

Jedná se o soustavu kamer snímajících interiér i exteriér vozidla. Kamery byly umístěny se zaměřením na snímání digitálního ukazatele rychlosti vozidla, prostoru před vozidlem (umístěna na čelním skle), třetího brzdového světla. Poslední čtvrtá kamera byla umístěna na zadním nárazníku vozidla z důvodu snímání ujeté trajektorie vozidla podle značek na jízdni dráze (kontrolní kamera ujeté vzdálenosti).

*d) Notebook pro ukládání přesné polohy vozidla z dat DGPS*

Spolujezdec vozidla vpředu (autor této práce) spouštěl všechna záznamová zařízení, tj. PicDAQ, kamery a ukládání dat o přesné poloze DGPS do notebooku, který byl připojen k Rover stanici, resp. GPS receiveru. Z uložených dat bylo možné zrekonstruovat přesnou trajektorii průjezdu s vynikající přesností DGPS  $\pm 1$  cm.

*e) Světelná brána (Light Gate)*

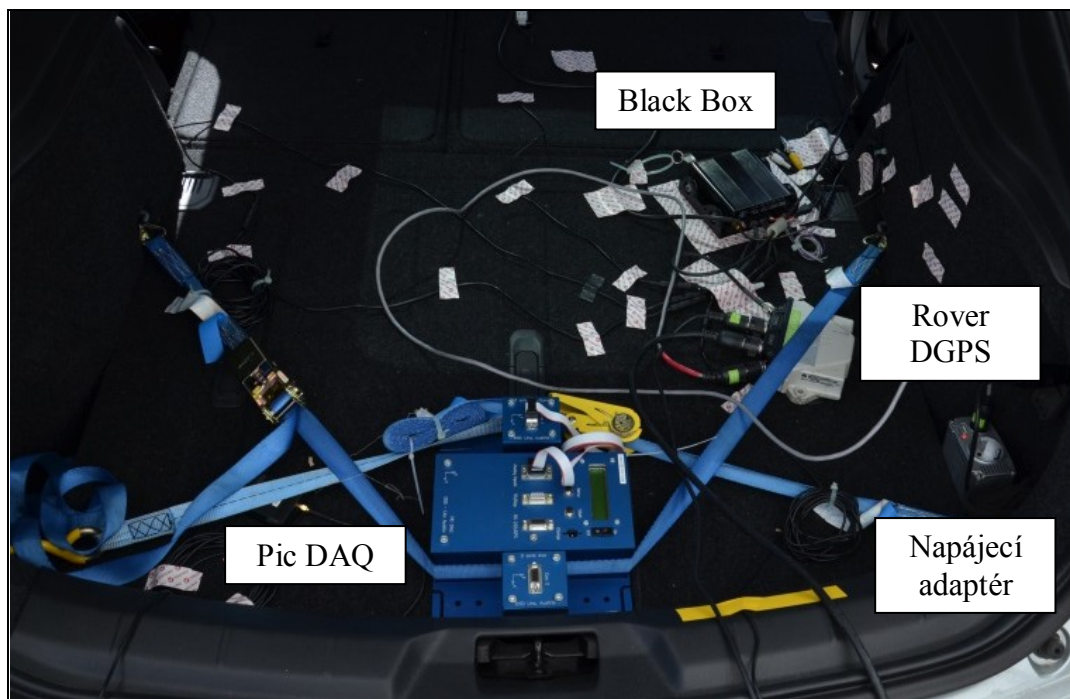
Na počátku vyznačeného oblouku byla umístěna světelná brána za účelem zjištění nájezdového rychlosti vozidla do příslušného oblouku.

*f) Záznamová technika*

Pohyb zkoušeného vozidla v oblouku byl snímán dvěma vysokorychlostními kamerami značky Casio umístěnými vedle plochy polygonu (viz **Obr. 107**). Dynamická kamera Sony byla umístěna uvnitř vozidla Volvo (viz **Obr. 103**). Čtvrtá kamera značky Nikon byla umístěna na vysokozdvizné plošině a snímala pohyb vozidla v oblouku z perspektivy (**Obr. 104**).



**Obr. 101:** Světelná brána (obrázek vlevo - poloha brány v oblouku, vpravo - detail na ovládací panel brány)



*Obr. 102: Zavazadlový prostor vozidla Volvo osazený měřicí technikou*



*Obr. 103: Poloha kamery ve vozidle*

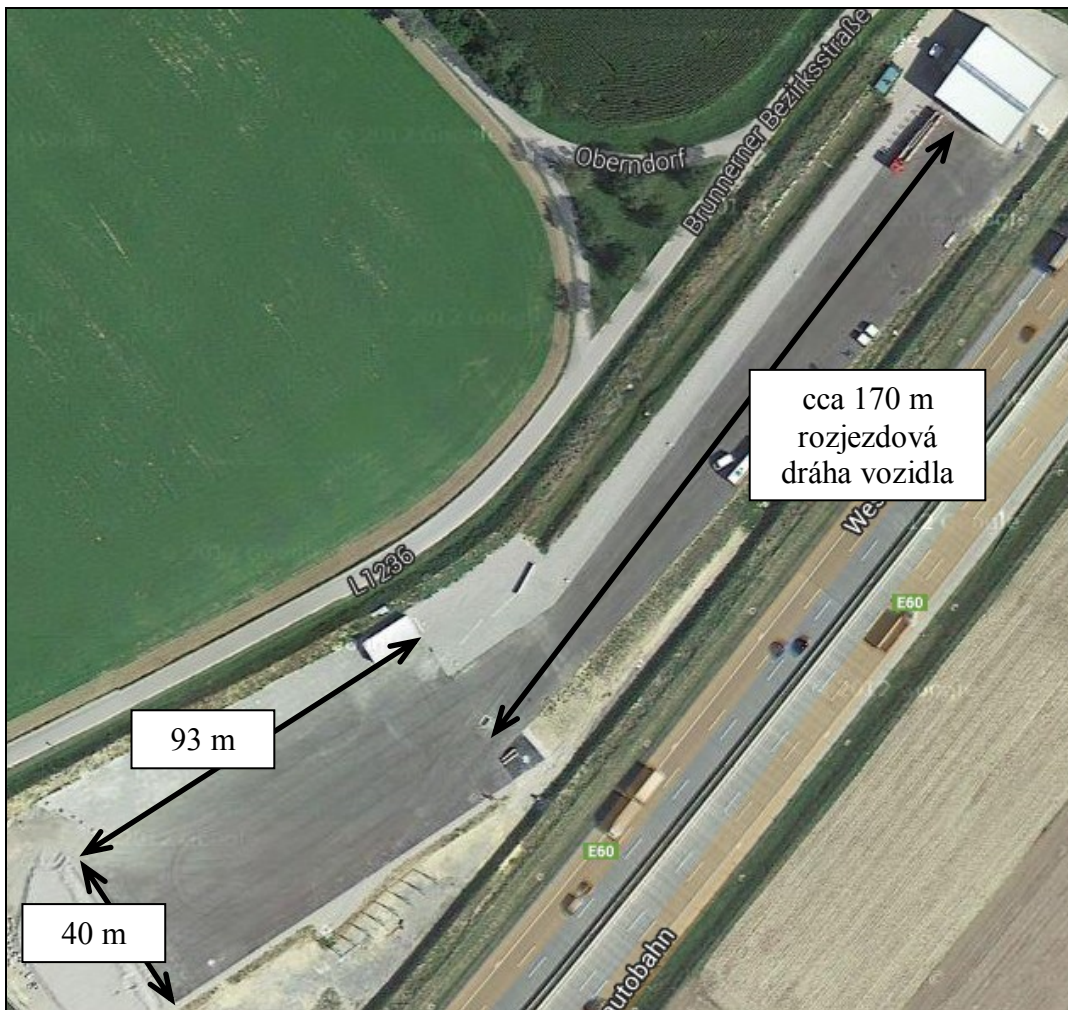


*Obr. 104: Kamera na vysokozdvížečné plošině*

### 6.2.3.3 Měřicí plocha – polygon DSD

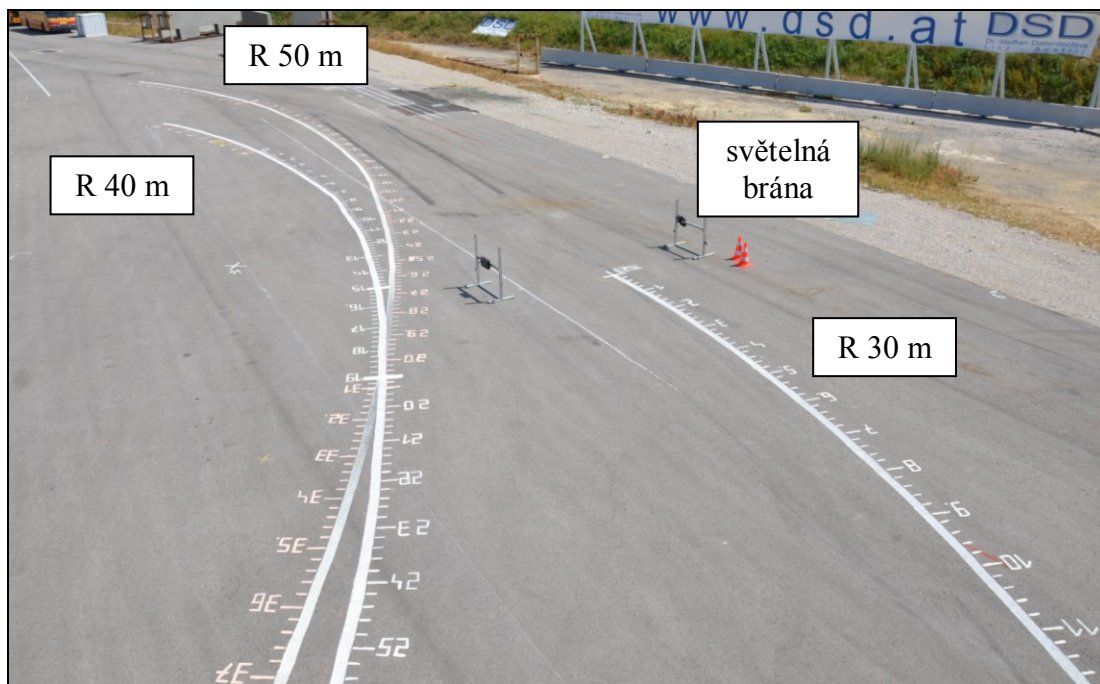
Všechna experimentální měření parametrů jízdní dynamiky vozidla Volvo proběhla na speciální zkušební ploše – polygonu rakouské společnosti DSD. Rozměry polygonu jsou uvedeny na **Obr. 105**. Na asfaltovém povrchu polygonu v prostoru s rozměry 40 x 93 m byly malířskou barvou vyznačeny tři oblouky o poloměrech 30 m, 40 m a 50 m (viz **Obr. 106**).





*Obr. 105: Rozměry polygonu DSD s vyznačením prostoru pro jízdu a brzdění v oblouku [47]*

Na **Obr. 108** a **Obr. 109** je kužely zobrazena poloha brzdného bodu na vyznačeném oblouku o poloměru 30, resp. 40 m. **Tabulka 11** uvádí polohu brzdných bodů v jednotlivých obloucích od světelné brány umístěné v nájezdu do příslušného oblouku. Nutno dodat, že poloha kuželů byla pouze orientačním místem pro řidiče, aby dokázal správně odhadnout, ve kterém místě je přibližně třeba začít brzdit i s ohledem na minimální únikovou zónu na konci oblouků. Při vyhodnocení experimentů byl samozřejmě uvažován přesný okamžik počátku brzdění dobře patrný z grafických průběhů nárůstu podélného zpomalení při brzdění v oblouku.



**Obr. 106:** Vyznačení oblouků o poloměru 30, 40 a 50 m na povrchu polygonu



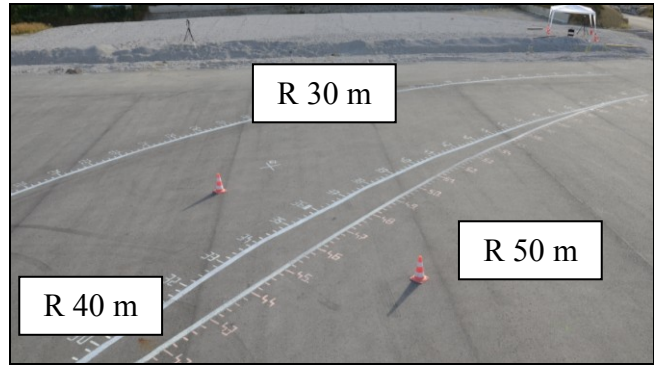
**Obr. 107:** Poloha vysokorychlostních statických kamer snímajících pohyb a brzdění vozidla v obloucích (poloha kamer vyznačena červeně)

**Tabulka 11:** Poloha brzdných bodů od začátku oblouku

Poloměr oblouku [m]	Vzdálenost brzdného bodu od začátku oblouku, tj. od umístění světelné brány [m]
30	30
40	35
50	41

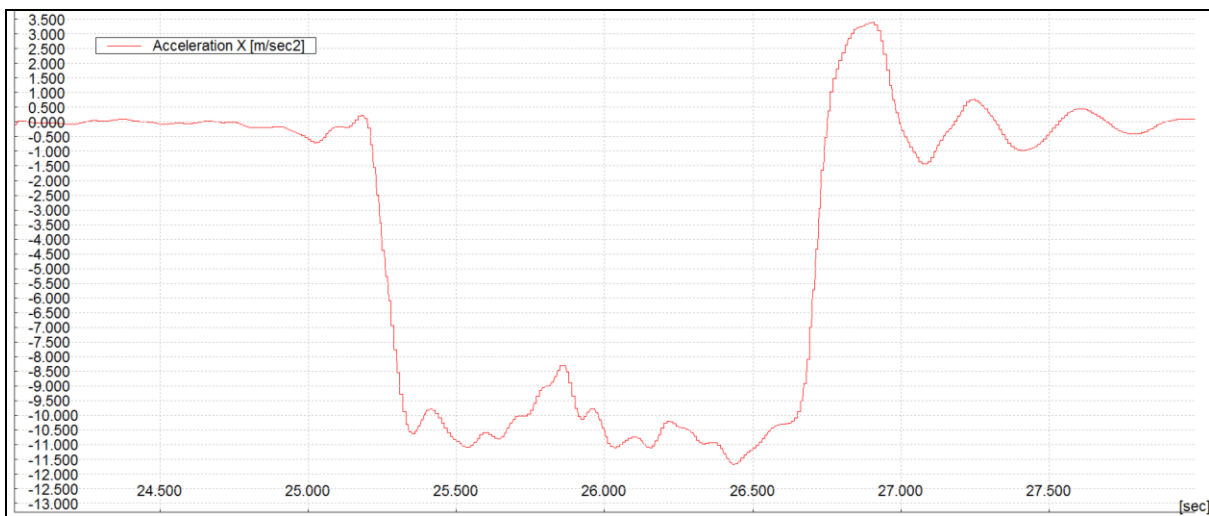


**Obr. 108:** Poloha brzdného bodu na poloměru oblouku R 30 (kužely)



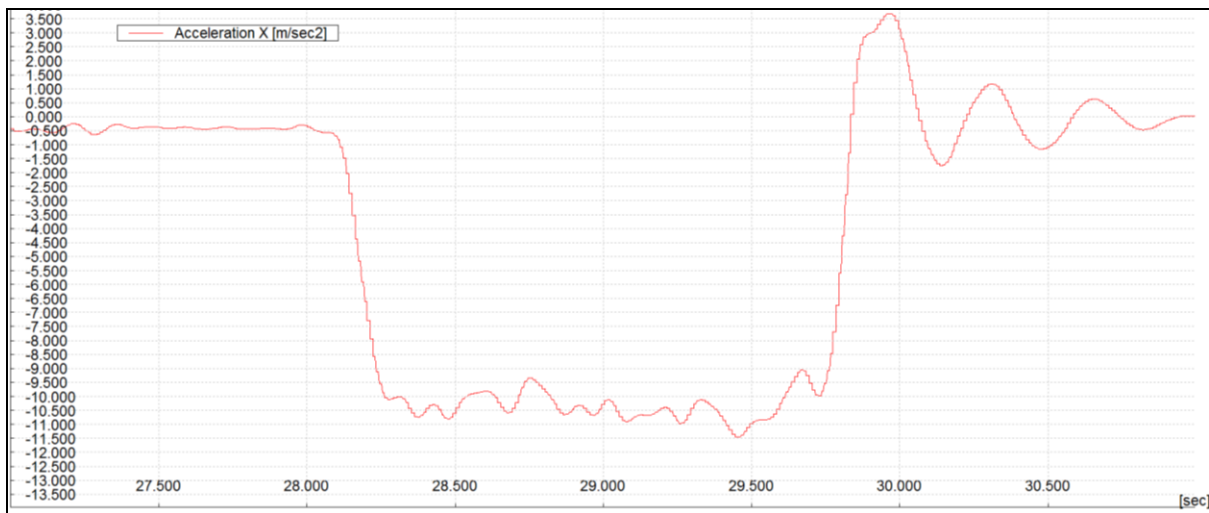
**Obr. 109:** Poloha brzdného bodu na poloměru oblouku R 40 (vyznačena kužely)

Podstatnou veličinou pro analýzu chování vozidla v obecném prostorovém oblouku je součinitel adheze mezi pneumatikou a vozovkou. Za účelem zjištění hodnoty součinitele adheze v podélném směru byly s vozidlem Volvo s aktivním asistenčním systémem DSTC v normálním režimu provedeny brzdné zkoušky na suchém i mokrém povrchu z různých výchozích rychlostí brzdění. Výsledky brzdných zkoušek na suchém povrchu polygonu jsou uvedeny na **Obr. 110** až **Obr. 112**.

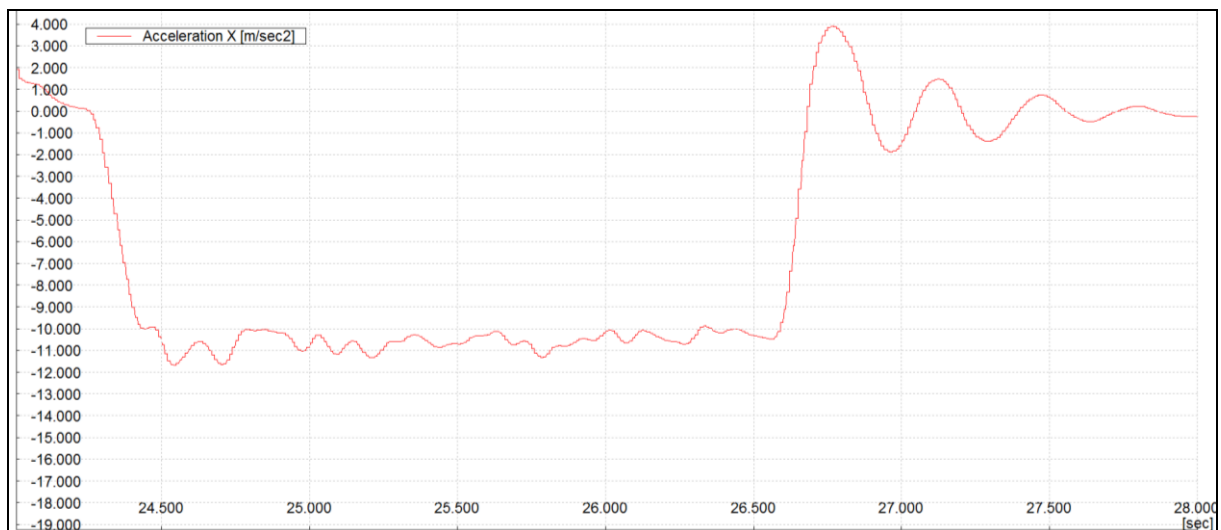


**Obr. 110:** Brzdná zkouška z výchozí rychlosti brzdění 50 km/h na suchém povrchu polygonu





**Obr. 111:** Brzdná zkouška z výchozí rychlosti brzdění 60 km/h na suchém povrchu polygonu



**Obr. 112:** Brzdná zkouška z výchozí rychlosti brzdění 80 km/h na suchém povrchu polygonu

Zjištěné rozmezí hodnot dosažitelného podélného zpomalení vozidla při brzdných zkouškách na suchém povrchu polygonu z výchozích rychlostí 50 km/h, 60 km/h a 80 km/h uvádí **Tabulka 12**.

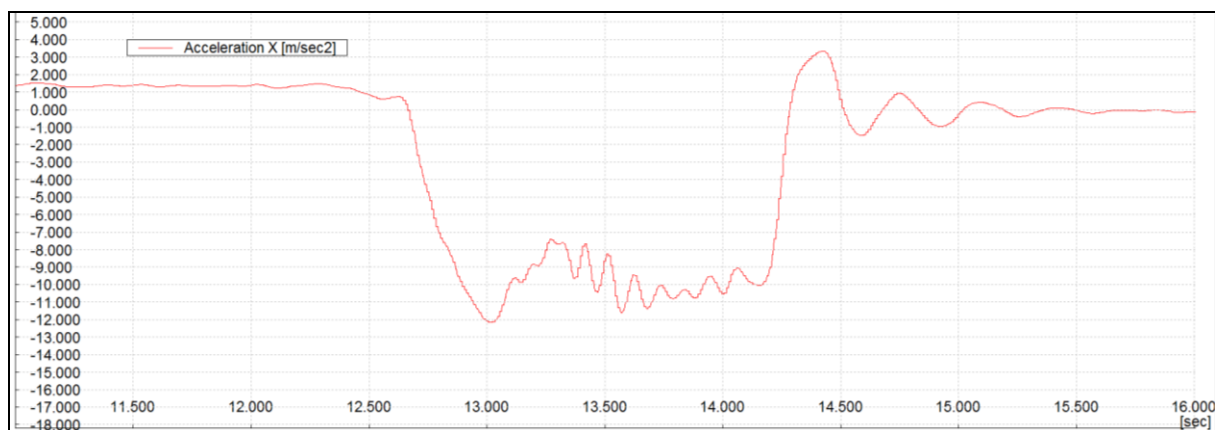
Z **Tabulka 12** je patrné, že brzdnými zkouškami s vozidlem Volvo na suchém povrchu polygonu bylo zjištěno dosažitelné podélné zpomalení vozidla v rozmezí cca 8,3 až 11,6 m/s<sup>2</sup>, čemuž odpovídá rozmezí hodnot součinitele adheze v podélném směru 0,85 až 1,18.

*(Pozn. autora této práce: pro doplnění problematiky dnes dosahovaných hodnot podélného zpomalení vozidel při brzdných zkouškách je v příloze č. 7 této práce uveden graf hodnot max. podélného zpomalení u vybraných 63 typů vozidel).*

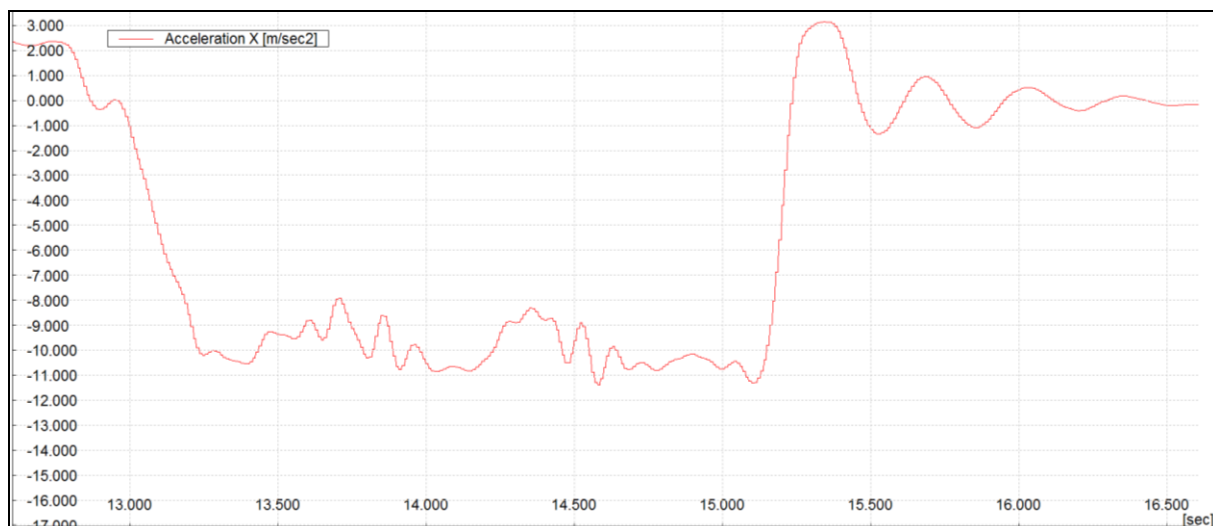
**Tabulka 12:** Výsledky brzdných zkoušek na suchém povrchu polygonu

Číslo měření	Výchozí rychlost brzdění [km/h]	Zjištěné rozmezí podélného zpomalení [m/s <sup>2</sup> ]		Rozmezí hodnot součinitele adheze v podélném směru	
		min.	max.	min.	max.
61	50	8,3	11,6	0,85	1,18
59	60	9,0	11,5	0,92	1,17
62	80	9,9	11,6	1,01	1,18
Celkové rozmezí hodnot:		8,3	11,6	0,85	1,18

Protože na závěr prvního měřicího dne začalo v podvečer mírně pršet, mohly být s vozidlem Volvo s asistenčním systémem DSTC v normálním režimu provedeny brzdné zkoušky na mokřém asfaltovém povrchu polygonu z výchozích rychlostí 48 km/h a 68 km/h. Výsledky brzdných zkoušek na mokřém povrchu polygonu jsou uvedeny na **Obr. 113** až **Obr. 114**.



**Obr. 113:** Brzdná zkouška z výchozí rychlosti brzdění 48 km/h na mokřém povrchu polygonu



**Obr. 114:** Brzdná zkouška z výchozí rychlosti brzdění 68 km/h na mokrém povrchu polygonu

Zjištěné rozmezí hodnot dosažitelného podélného zpomalení vozidla při brzdných zkouškách na mokrém povrchu polygonu z výchozích rychlostí 48 km/h a 68 km/h uvádí následující **Tabulka 13**.

**Tabulka 13:** Výsledky brzdných zkoušek na mokrém povrchu polygonu

Číslo měření	Výchozí rychlost brzdění [km/h]	Zjištěné rozmezí podélného zpomalení [m/s <sup>2</sup> ]		Rozmezí hodnot součinitele adheze v podélném směru	
		min.	max.	min.	max.
64	48	7,5	12,1	0,76	1,23
65	68	7,9	11,3	0,81	1,15
Celkové rozmezí hodnot:		7,5	12,1	0,76	1,23

Z **Tabulka 13** je patrné, že brzdnými zkouškami s vozidlem Volvo na mokrém povrchu polygonu bylo zjištěno dosažitelné podélné zpomalení vozidla v rozmezí cca 7,5 až 12,1 m/s<sup>2</sup>, čemuž odpovídá rozmezí hodnot součinitele adheze v podélném směru 0,76 až 1,23.

S ohledem na **Obr. 115**, text na str. 54, 76 a 84 této práce platí, že pro malé úhly naklonění karoserie cca do 8 °, kdy hodnota kosinu nabývá hodnoty 0,99, můžeme považovat hodnotu bočního zrychlení vozidla rovnu hodnotě příčného zrychlení. Proto lze velikost změřeného bočního zrychlení považovat za shodnou s velikostí zrychlení příčného získaného výpočtem podle vztahu (22).



***Obr. 115:** Naklopení karoserie vozidla Volvo během pilotního testu před zahájením měření, rychlost jízdy 70 km/h, oblouk o poloměru 40 m*

#### **6.2.3.4 Analýza experimentálních měření parametrů jízdní dynamiky v oblouku**

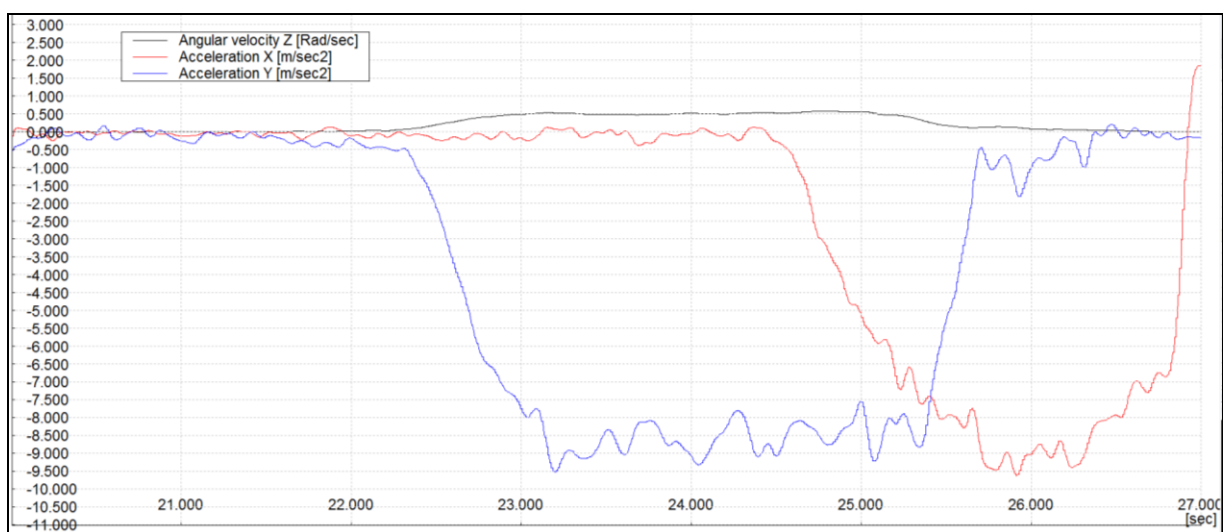
V rámci uskutečněných experimentálních měření na polygonu společnosti DSD v katastru rakouské obce Allhaming bylo provedeno celkem 65 experimentů, z toho 2 pilotní testy a následných 53 vyhodnocených jízd a brzdění vozidla v oblouku (nyní nezapočtené měření č. 52 nemohlo být vyhodnoceno z důvodu zastavení testu s ohledem na pohyb osob na ploše polygonu), dále byly provedeny dvě kruhové zkoušky, jedno příčné přemístění vozidla dvěma oblouky a šest brzdných zkoušek. Výsledky experimentálních měření jsou uvedeny v **příloze č. 6** této práce, vyjma brzdných zkoušek, které jsou podrobně vyhodnoceny v předchozí podkapitole této práce. Souhrnný protokol ze všech provedených experimentálních měření s tabulkově uvedenými naměřenými hodnotami je uveden v **příloze č. 6**, listu 1 této práce.

V následující části této práce se zaměřím na výsledky jednotlivých jízd a brzdění vozidla v definovaných obloucích na suchém povrchu polygonu.

##### **6.2.3.4.1 Jízda a brzdění vozidla Volvo v oblouku o poloměru 30 m**

Podle souhrnného protokolu ze všech provedených experimentálních měření (viz **příloha č. 6**, list 1 této práce) bylo provedeno celkem 24 jízd a brzdění vozidla Volvo v oblouku o poloměru 30 m, z toho 14 jízd a brzdění s asistenčním systémem DSTC v normálním režimu (označen dále také jako režim "N"), zbylých 10 jízd a brzdění bylo provedeno s asistenčním systémem DSTC v režimu sportovním (označen dále také jako režim "S"). Nyní bude pro každý režim asistenčního systému DSTC vybráno a okomentováno jedno reprezentativní měření jízdy a brzdění vozidla v oblouku na hranici stability, další měření jsou součástí **přílohy č. 6** této práce.

Na **Obr. 116** jsou uvedeny výsledky měření jízdy a brzdění vozidla v oblouku o poloměru 30 m při nájezdové rychlosti do oblouku 60 km/h, rychlosti v okamžiku náběhu brzd 55 km/h při aktivovaném normálním režimu systému DSTC. Z **Obr. 116** jsou zřejmá rozmezí hodnot dosažitelného příčného zrychlení 7,7 až 9,5 m/s<sup>2</sup> při jízdě obloukem a následně v důsledku brzdění v oblouku rozmezí hodnot podélného zpomalení 6,0 až 9,6 m/s<sup>2</sup>. Třeba si v čase cca 25,4 s jízdního experimentu povšimnout průsečíku křivek příčného zrychlení a podélného zpomalení, který určuje okamžik, kdy je velikost boční vodící síly pneumatik rovna velikosti brzděné síly. V tomto charakteristickém okamžiku v čase cca 25,4 s je velikost brzděného zpomalení rovna velikosti příčného zrychlení a odpovídá hodnotě cca 7,5 m/s<sup>2</sup>.



**Obr. 116:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 15,  $R = 30 \text{ m}$ ,  $v_n = 60 \text{ km/h}$  (nájezdová rychlost do oblouku),  $v_{nb} = 55 \text{ km/h}$  (rychlost na počátku náběhu brzd)

V **Tabulka 14** jsou souhrnně uvedeny výsledky experimentálních měření parametrů jízdní dynamiky vozidla při jízdě a brzdění v oblouku o poloměru 30 m s aktivovaným asistenčním systémem DSTC v normálním režimu. Z tabelárně uspořádaných hodnot je mj. zřejmé rozmezí hodnot dosaženého příčného zrychlení 2,8 až 10,2 m/s<sup>2</sup> při jízdě obloukem a následně v důsledku brzdění v oblouku rozmezí hodnot podélného zpomalení 3,5 až 9,6 m/s<sup>2</sup>.

**Tabulka 14:** Parametry jízdní dynamiky při jízdě a brzdění v oblouku R 30 m s DSTC "N"

Číslo měření	Nájezdová rychlost do oblouku dle GPS [km/h]	Rychlost v okamžiku brzdění dle GPS [km/h]	Příčné zrychlení v oblouku [m/s <sup>2</sup> ]		Podélné zpomalení v oblouku [m/s <sup>2</sup> ]	
			min.	max.	min.	max.
3	52,0	45,5	3,6	6,6	6,0	9,5
4	52,0	44,0	3,7	7,7	6,8	9,4
5	53,0	45,0	2,8	6,4	5,0	7,5
6	57,0	47,0	5,1	7,6	6,5	8,1
7	57,0	49,0	5,6	7,7	4,5	8,2
8	58,0	53,0	5,2	8,8	4,5	8,3
9	59,0	57,0	4,5	10,2	8,0	9,4
10	56,0	51,0	3,7	8,2	4,0	8,5
11	61,0	56,0	6,0	9,4	5,5	9,2
12	60,0	56,0	7,5	9,5	4,5	8,5
13	62,0	58,0	5,7	10,0	4,0	9,0
14	62,0	59,0	7,2	9,8	3,5	7,0
15	60,0	55,0	7,7	9,5	6,0	9,6
16	60,0	55,0	6,6	9,8	7,0	9,2
Celkové rozmezí hodnot:			2,8	10,2	3,5	9,6
Aritmetický průměr hodnot:			5,35	8,66	5,41	8,67

Analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v definovaném oblouku R 30 m, DSTC "N":

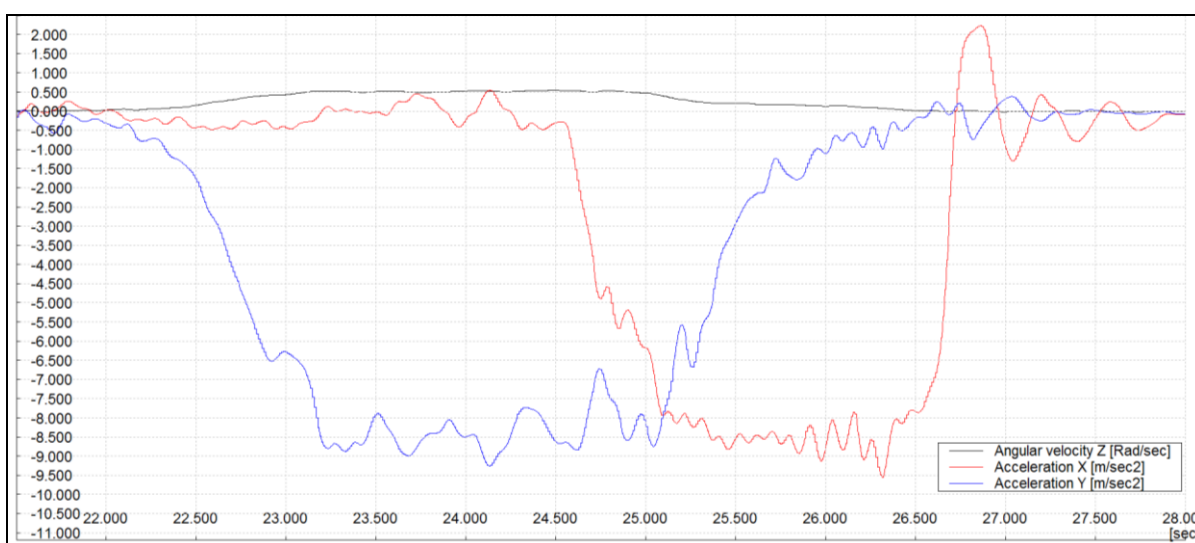
Podle přílohy č. 6 této práce byla měření č. 13 a 14 hodnocena posádkou i vnějším pozorovatelem jako jízdy v oblouku na hranici bezpečnosti. Proto bude pro tato měření analytickým výpočtem stanovena mezní rychlost vozidla v oblouku při experimentálně zjištěném maximálně využitém součiniteli adheze v příčném směru. Mezní rychlost zkoušeného vozidla v definovaném oblouku o poloměru 30 m vypočteme z odvozeného vztahu (20) pro zjednodušený případ vyplývající z geometrických parametrů polygonu:

$$v_{mez13} = \sqrt{\mu_{př13} \cdot g \cdot R} = \sqrt{1,02 \cdot 9,81 \cdot 30} = 17,3 \text{ m/s} = 62,4 \text{ km/h} \quad (30)$$

$$v_{mez14} = \sqrt{\mu_{př14} \cdot g \cdot R} = \sqrt{0,99 \cdot 9,81 \cdot 30} = 17,1 \text{ m/s} = 61,7 \text{ km/h} \quad (31)$$

Po dosažení správné hodnoty využitého součinitele adheze v příčném směru do vztahu (20) pro analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v oblouku odpovídá experimentálně zjištěná rychlost vozidla při jízdě v oblouku analyticky stanovené mezní rychlosti s dobrou přesností.

Na **Obr. 117** jsou uvedeny výsledky měření jízdy a brzdění vozidla v oblouku o poloměru 30 m při nájezdové rychlosti do oblouku 59 km/h, rychlosti v okamžiku náběhu brzd 57 km/h při aktivovaném sportovním režimu systému DSTC. Z **Obr. 117** jsou zřejmá rozmezí hodnot dosažitelného příčného zrychlení 6,3 až 9,3 m/s<sup>2</sup> při jízdě obloukem a následně v důsledku brzdění v oblouku rozmezí hodnot podélného zpomalení 5,5 až 9,5 m/s<sup>2</sup>. Třeba si v čase cca 25,1 s jízdního experimentu povšimnout průsečíku křivek příčného zrychlení a podélného zpomalení, který určuje okamžik, kdy je velikost boční vodící síly pneumatik rovna velikosti brzdné síly. V tomto charakteristickém okamžiku v čase cca 25,1 s je velikost brzdného zpomalení rovna velikosti příčného zrychlení a odpovídá hodnotě cca 7,9 m/s<sup>2</sup>.



**Obr. 117:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 25,  $R\ 30\ m$ ,  $v_n = 59\ km/h$ ,  $v_{nb} = 57\ km/h$

V **Tabulka 15** jsou souhrnně uvedeny výsledky experimentálních měření parametrů jízdní dynamiky vozidla při jízdě a brzdění v oblouku o poloměru 30 m s aktivovaným asistenčním systémem DSTC ve sportovním režimu. Z tabelárně uspořádaných hodnot je mj. zřejmé rozmezí hodnot dosaženého příčného zrychlení 2,6 až 10,2 m/s<sup>2</sup> při jízdě obloukem a následně v důsledku brzdění v oblouku rozmezí hodnot podélného zpomalení 3,9 až 10,3 m/s<sup>2</sup>.



**Tabulka 15: Parametry jízdní dynamiky při jízdě a brzdění v oblouku R 30 m s DSTC "S"**

Číslo měření	Nájezdová rychlost do oblouku dle GPS [km/h]	Rychlost v okamžiku brzdění dle GPS [km/h]	Příčné zrychlení v oblouku [m/s <sup>2</sup> ]		Podélné zpomalení v oblouku [m/s <sup>2</sup> ]	
			min.	max.	min.	max.
17	47,0	41,0	2,6	5,4	3,9	6,0
18	53,0	50,0	4,2	8,6	6,5	9,0
19	52,0	48,0	5,1	7,4	4,0	8,0
20	55,0	50,0	5,8	7,9	7,0	9,7
21	52,0	49,0	3,5	8,4	5,6	6,8
22	56,0	52,0	5,9	9,1	7,0	9,0
23	58,0	54,0	5,3	9,1	5,5	9,5
24	58,0	55,0	5,2	9,2	8,0	10,3
25	59,0	57,0	6,3	9,3	5,5	9,5
26	59,0	56,0	6,5	10,2	5,5	9,2
Celkové rozmezí hodnot:			2,6	10,2	3,9	10,3
Aritmetický průměr hodnot:			5,04	8,46	5,85	8,7

Analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v definovaném oblouku R 30 m, DSTC "S":

Podle přílohy č. 6 této práce bylo měření č. 25 hodnoceno posádkou i vnějším pozorovatelem jako kritická jízda v oblouku. Proto bude pro toto měření analytickým výpočtem stanovena mezní rychlost vozidla v oblouku při experimentálně zjištěném maximálně využitém součiniteli adheze v příčném směru. Mezní rychlost zkoušeného vozidla v definovaném oblouku o poloměru 30 m vypočteme z odvozeného vztahu (20) pro zjednodušený případ vyplývající z geometrických parametrů polygonu:

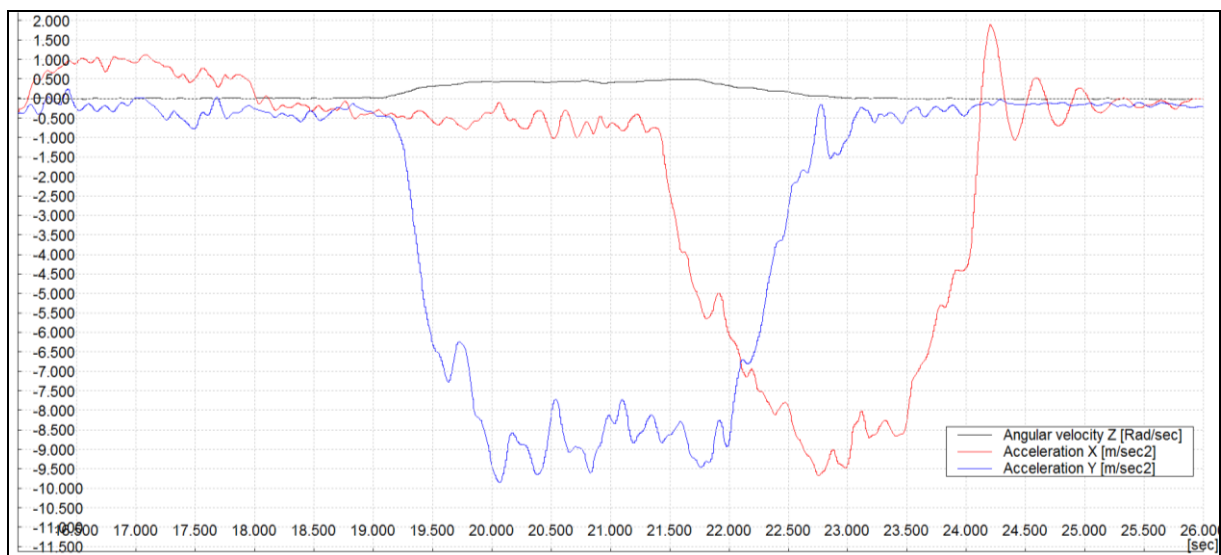
$$v_{mez25} = \sqrt{\mu_{pr25} \cdot g \cdot R} = \sqrt{0,95 \cdot 9,81 \cdot 30} = 16,7 \text{ m/s} = 60,1 \text{ km/h} \quad (32)$$

Po dosažení správné hodnoty využitého součinitele adheze v příčném směru do vztahu (20) pro analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v oblouku odpovídá experimentálně zjištěná rychlost vozidla při jízdě v oblouku analyticky stanovené mezní rychlosti s dobrou přesností (cca + 1,0 km/h).

#### 6.2.3.4.2 Jízda a brzdění vozidla Volvo v oblouku o poloměru 40 m

Podle souhrnného protokolu ze všech provedených experimentálních měření (viz **příloha č. 6**, list 1 této práce) bylo provedeno celkem 16 jízd a brzdění vozidla Volvo v oblouku o poloměru 40 m, z toho 8 jízd a brzdění s asistenčním systémem DSTC v normálním režimu, zbylých 8 jízd a brzdění bylo provedeno s asistenčním systémem DSTC v režimu sportovním. Nyní bude pro každý režim asistenčního systému DSTC vybráno a okomentováno jedno reprezentativní měření jízdy a brzdění vozidla v oblouku na hranici stability, další měření jsou součástí **přílohy č. 6** této práce.

Na **Obr. 118** jsou uvedeny výsledky měření jízdy a brzdění vozidla v oblouku o poloměru 40 m při nájezdové rychlosti do oblouku 72 km/h, rychlosti v okamžiku náběhu brzd 69 km/h při aktivovaném normálním režimu systému DSTC. Z **Obr. 118** jsou zřejmá rozmezí hodnot dosažitelného příčného zrychlení 6,5 až 9,8 m/s<sup>2</sup> při jízdě obloukem a následně v důsledku brzdění v oblouku rozmezí hodnot podélného zpomalení 5,5 až 9,6 m/s<sup>2</sup>. Třeba si v čase cca 22,1 s jízdního experimentu povšimnout průsečíku křivek příčného zrychlení a podélného zpomalení, který určuje okamžik, kdy je velikost boční vodící síly pneumatik rovna velikosti brzděné síly. V tomto charakteristickém okamžiku v čase cca 22,1 s je velikost brzděného zpomalení rovna velikosti příčného zrychlení a odpovídá hodnotě cca 6,7 m/s<sup>2</sup>.



**Obr. 118:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 34,  $R = 40$  m,  $v_n = 72$  km/h,  $v_{nb} = 69$  km/h

V **Tabulka 16** jsou souhrnně uvedeny výsledky experimentálních měření parametrů jízdní dynamiky vozidla při jízdě a brzdění v oblouku o poloměru 40 m s aktivovaným asistenčním systémem DSTC v normálním režimu. Z tabelárně uspořádaných hodnot

je mj. zřejmé rozmezí hodnot dosaženého příčného zrychlení 3,7 až 10,1 m/s<sup>2</sup> při jízdě obloukem a následně v důsledku brzdění v oblouku rozmezí hodnot podélného zpomalení 4,0 až 10,8 m/s<sup>2</sup>.

**Tabulka 16:** Parametry jízdní dynamiky při jízdě a brzdění v oblouku R 40 m s DSTC "N"

Číslo měření	Nájezdová rychlost do oblouku dle GPS [km/h]	Rychlost v okamžiku brzdění dle GPS [km/h]	Příčné zrychlení v oblouku [m/s <sup>2</sup> ]		Podélné zpomalení v oblouku [m/s <sup>2</sup> ]	
			min.	max.	min.	max.
27	57,0	57,0	4,8	7,6	4,0	7,0
28	67,0	65,0	5,0	9,1	5,5	8,1
29	67,0	64,0	3,7	8,8	5,5	9,3
30	67,0	65,0	5,9	9,1	6,3	9,1
31	70,0	67,0	6,7	9,7	7,2	10,2
32	72,0	69,0	6,1	10,1	6,0	8,7
33	72,0	68,0	6,6	9,6	5,0	10,8
34	72,0	69,0	6,5	9,8	5,5	9,6
Celkové rozmezí hodnot:			3,7	10,1	4,0	10,8
Aritmetický průměr hodnot:			5,66	9,23	5,63	9,1

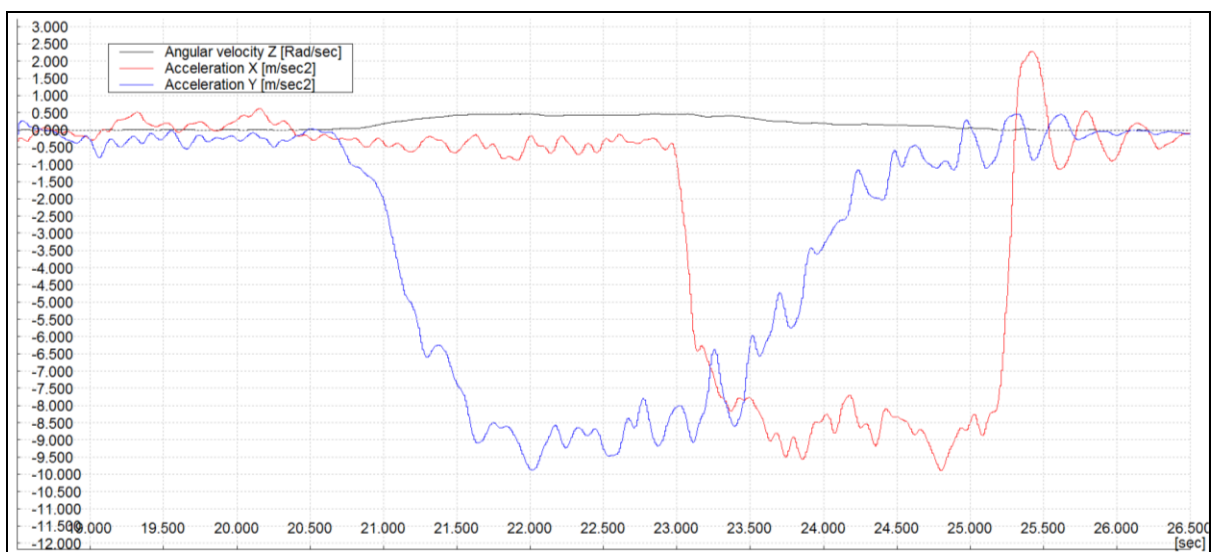
Analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v definovaném oblouku R 40 m, DSTC "N":

Podle přílohy č. 6 této práce bylo měření č. 34 hodnoceno posádkou i vnějším pozorovatelem jako jízda v oblouku na hranici bezpečnosti. Proto bude pro toto měření analytickým výpočtem stanovena mezní rychlost vozidla v oblouku při experimentálně zjištěném maximálně využitém součiniteli adheze v příčném směru. Mezní rychlost zkoušeného vozidla v definovaném oblouku o poloměru 40 m vypočteme z odvozeného vztahu (20) pro zjednodušený případ vyplývající z geometrických parametrů polygonu:

$$v_{mez34} = \sqrt{\mu_{pr34} \cdot g \cdot R} = \sqrt{0,99 \cdot 9,81 \cdot 40} = 19,8 \text{ m/s} = 71,3 \text{ km/h} \quad (33)$$

Po dosazení správné hodnoty využitého součinitele adheze v příčném směru do vztahu (20) pro analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v oblouku odpovídá experimentálně zjištěná rychlost vozidla při jízdě v oblouku analyticky stanovené mezní rychlosti s dobrou přesností (cca + 1,0 km/h).

Na **Obr. 119** jsou uvedeny výsledky měření jízdy a brzdění vozidla v oblouku o poloměru 40 m při nájezdové rychlosti do oblouku 70 km/h, rychlosti v okamžiku náběhu brzd 67 km/h při aktivovaném sportovním režimu systému DSTC. Z **Obr. 119** jsou zřejmá rozmezí hodnot dosažitelného příčného zrychlení 6,3 až 9,8 m/s<sup>2</sup> při jízdě obloukem a následně v důsledku brzdění v oblouku rozmezí hodnot podélného zpomalení 7,7 až 9,8 m/s<sup>2</sup>. Třeba si v čase cca 23,25 s jízdního experimentu povšimnout průsečíku křivek příčného zrychlení a podélného zpomalení, který určuje okamžik, kdy je velikost boční vodící síly pneumatik rovna velikosti brzděné síly. V tomto charakteristickém okamžiku v čase cca 23,25 s je velikost brzděného zpomalení rovna velikosti příčného zrychlení a odpovídá hodnotě cca 6,8 m/s<sup>2</sup>.



**Obr. 119:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 41,  $R = 40$  m,  $v_n = 70$  km/h,  $v_{nb} = 67$  km/h

V **Tabulka 17** jsou souhrnně uvedeny výsledky experimentálních měření parametrů jízdní dynamiky vozidla při jízdě a brzdění v oblouku o poloměru 40 m s aktivovaným asistenčním systémem DSTC ve sportovním režimu. Z tabelárně uspořádaných hodnot je mj. zřejmé rozmezí hodnot dosaženého příčného zrychlení 4,8 až 10,0 m/s<sup>2</sup> při jízdě obloukem a následně v důsledku brzdění v oblouku rozmezí hodnot podélného zpomalení 6,0 až 10,1 m/s<sup>2</sup>.

**Tabulka 17: Parametry jízdní dynamiky při jízdě a brzdění v oblouku R 40 m s DSTC "S"**

Číslo měření	Nájezdová rychlost do oblouku dle GPS [km/h]	Rychlost v okamžiku brzdění dle GPS [km/h]	Příčné zrychlení v oblouku [m/s <sup>2</sup> ]		Podélné zpomalení v oblouku [m/s <sup>2</sup> ]	
			min.	max.	min.	max.
35	63,0	60,0	4,8	7,5	7,2	9,4
36	66,0	63,0	5,0	9,3	6,5	8,7
37	67,0	64,0	5,5	9,5	6,0	8,2
38	68,0	65,0	6,1	10,0	7,5	9,9
39	67,0	63,0	5,1	9,3	6,7	9,5
40	69,0	65,0	5,5	9,5	7,5	9,7
41	70,0	67,0	6,3	9,8	7,7	9,8
42	70,0	67,0	6,4	9,8	7,5	10,1
Celkové rozmezí hodnot:			4,8	10,0	6,0	10,1
Aritmetický průměr hodnot:			5,59	9,34	7,08	9,41

Analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v definovaném oblouku R 40 m, DSTC "S":

Podle **přílohy č. 6** této práce bylo měření č. 41 hodnoceno posádkou i vnějším pozorovatelem jako jízda v oblouku na hranici bezpečnosti. Proto bude pro toto měření analytickým výpočtem stanovena mezní rychlost vozidla v oblouku při experimentálně zjištěném maximálně využitém součiniteli adheze v příčném směru. Mezní rychlost zkoušeného vozidla v definovaném oblouku o poloměru 40 m vypočteme z odvozeného vztahu (20) pro zjednodušený případ vyplývající z geometrických parametrů polygonu:

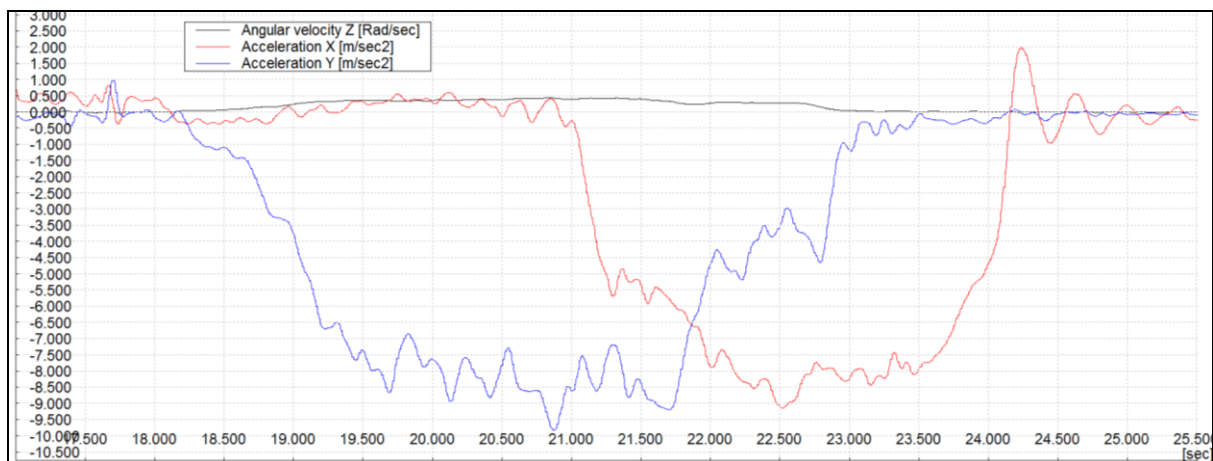
$$v_{mez41} = \sqrt{\mu_{př41} \cdot g \cdot R} = \sqrt{0,99 \cdot 9,81 \cdot 40} = 19,8 \text{ m/s} = 71,3 \text{ km/h} \quad (34)$$

Po dosažení správné hodnoty využitého součinitele adheze v příčném směru do vztahu (20) pro analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v oblouku odpovídá experimentálně zjištěná rychlost vozidla při jízdě v oblouku analyticky stanovené mezní rychlosti s dobrou přesností (cca + 1,0 km/h).

### 6.2.3.4.3 Jízda a brzdění vozidla Volvo v oblouku o poloměru 50 m

Podle souhrnného protokolu ze všech provedených experimentálních měření (viz **příloha č. 6**, list 1 této práce) bylo provedeno celkem 13 následně vyhodnocených jízd a brzdění vozidla Volvo v oblouku o poloměru 50 m, z toho 7 jízd a brzdění s asistenčním systémem DSTC v normálním režimu, zbylých 6 jízd a brzdění bylo provedeno s asistenčním systémem DSTC v režimu sportovním. Nyní bude pro každý režim asistenčního systému DSTC vybráno a okomentováno jedno reprezentativní měření jízdy a brzdění vozidla v oblouku na hranici stability, další měření jsou součástí **přílohy č. 6** této práce.

Na **Obr. 120** jsou uvedeny výsledky měření jízdy a brzdění vozidla v oblouku o poloměru 50 m při nájezdové rychlosti do oblouku 76 km/h, rychlosti v okamžiku náběhu brzd 72 km/h při aktivovaném normálním režimu systému DSTC. Z **Obr. 120** jsou zřejmá rozmezí hodnot dosažitelného příčného zrychlení 6,5 až 9,7 m/s<sup>2</sup> při jízdě obloukem a následně v důsledku brzdění v oblouku rozmezí hodnot podélného zpomalení 5,0 až 9,1 m/s<sup>2</sup>. Třeba si v čase cca 21,8 s jízdního experimentu povšimnout průsečíku křivek příčného zrychlení a podélného zpomalení, který určuje okamžik, kdy je velikost boční vodící síly pneumatik rovna velikosti brzdné síly. V tomto charakteristickém okamžiku v čase cca 21,8 s je velikost brzdného zpomalení rovna velikosti příčného zrychlení a odpovídá hodnotě cca 6,6 m/s<sup>2</sup>.



**Obr. 120:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 47,  $R = 50 \text{ m}$ ,  $v_n = 76 \text{ km/h}$ ,  $v_{nb} = 72 \text{ km/h}$

V **Tabulka 18** jsou souhrnně uvedeny výsledky experimentálních měření parametrů jízdní dynamiky vozidla při jízdě a brzdění v oblouku o poloměru 50 m s aktivovaným asistenčním systémem DSTC v normálním režimu. Z tabelárně uspořádaných hodnot je mj. zřejmé rozmezí hodnot dosaženého příčného zrychlení 5,0 až 10,4 m/s<sup>2</sup> při jízdě

obloukem a následně v důsledku brzdění v oblouku rozmezí hodnot podélného zpomalení 4,7 až 9,8 m/s<sup>2</sup>.

**Tabulka 18:** Parametry jízdní dynamiky při jízdě a brzdění v oblouku R 50 m s DSTC "N"

Číslo měření	Nájezdová rychlost do oblouku dle GPS [km/h]	Rychlost v okamžiku brzdění dle GPS [km/h]	Příčné zrychlení v oblouku [m/s <sup>2</sup> ]		Podélné zpomalení v oblouku [m/s <sup>2</sup> ]	
			min.	max.	min.	max.
43	72,0	69,0	5,6	8,9	4,8	7,7
44	72,0	69,0	5,0	8,4	6,0	9,4
45	71,0	68,0	5,6	9,6	5,7	9,5
46	75,0	71,0	7,2	9,5	7,2	9,3
47	76,0	72,0	6,5	9,7	5,0	9,1
48	77,0	73,0	7,7	10,4	5,6	9,8
49	81,0	74	6,3	9,5	4,7	9,8
Celkové rozmezí hodnot:			5,0	10,4	4,7	9,8
Aritmetický průměr hodnot:			6,27	9,43	5,57	9,23

Analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v definovaném oblouku R 50 m, DSTC "N":

Podle přílohy č. 6 této práce bylo měření č. 47 hodnoceno posádkou i vnějším pozorovatelem jako jízda v oblouku na hranici bezpečnosti. Proto bude pro toto měření analytickým výpočtem stanovena mezní rychlost vozidla v oblouku při experimentálně zjištěném maximálně využitém součiniteli adheze v příčném směru. Mezní rychlost zkoušeného vozidla v definovaném oblouku o poloměru 50 m vypočteme z odvozeného vztahu (20) pro zjednodušený případ vyplývající z geometrických parametrů polygonu:

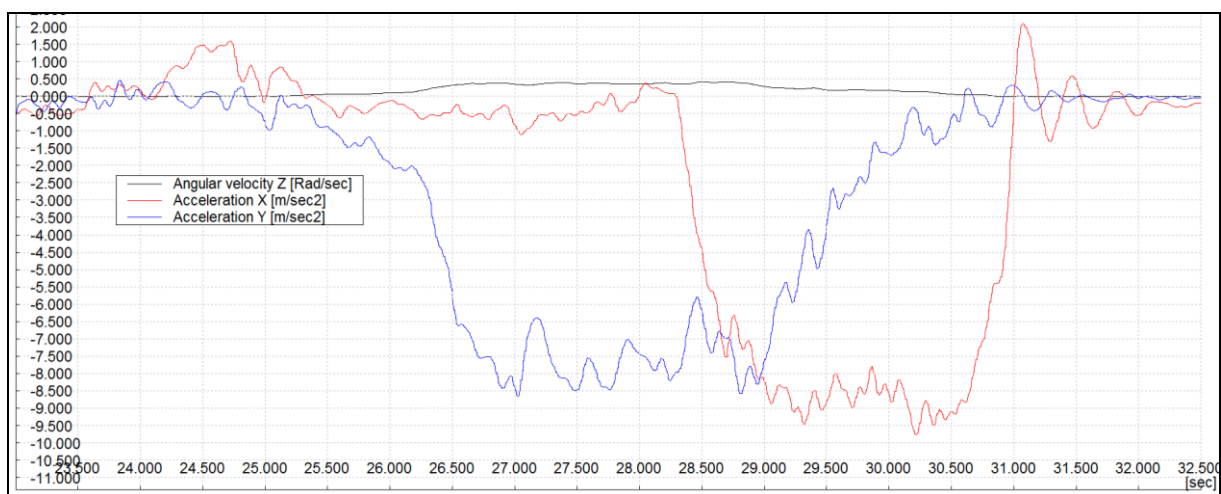
$$v_{mez47} = \sqrt{\mu_{pr47} \cdot g \cdot R} = \sqrt{0,99 \cdot 9,81 \cdot 50} = 22 \text{ m/s} = 79,3 \text{ km/h} \quad (35)$$

Po dosažení správné hodnoty využitého součinitele adheze v příčném směru do vztahu (20) pro analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v oblouku je experimentálně zjištěná rychlost vozidla při jízdě v oblouku mírně nižší než analyticky stanovená mezní rychlost (cca o 3,0 km/h).

Na Obr. 121 jsou uvedeny výsledky měření jízdy a brzdění vozidla v oblouku o poloměru 50 m při nájezdové rychlosti do oblouku 75 km/h, rychlosti v okamžiku náběhu



brzd 67 km/h při aktivovaném sportovním režimu systému DSTC. Z **Obr. 121** jsou zřejmá rozmezí hodnot dosažitelného příčného zrychlení  $6,4$  až  $8,6 \text{ m/s}^2$  při jízdě obloukem a následně v důsledku brzdění v oblouku rozmezí hodnot podélného zpomalení  $6,3$  až  $9,7 \text{ m/s}^2$ . Třeba si v čase cca 28,7 s jízdního experimentu povšimnout průsečíku křivek příčného zrychlení a podélného zpomalení, který určuje okamžik, kdy je velikost boční vodící síly pneumatik rovna velikosti brzděné síly. V tomto charakteristickém okamžiku v čase cca 28,7 s je velikost brzděného zpomalení rovna velikosti příčného zrychlení a odpovídá hodnotě cca  $6,8 \text{ m/s}^2$ .



**Obr. 121:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 55,  $R = 50 \text{ m}$ ,  $v_n = 75 \text{ km/h}$ ,  $v_{nb} = 67 \text{ km/h}$

V **Tabulka 19** jsou souhrnně uvedeny výsledky experimentálních měření parametrů jízdní dynamiky vozidla při jízdě a brzdění v oblouku o poloměru 50 m s aktivovaným asistenčním systémem DSTC ve sportovním režimu. Z tabelárně uspořádaných hodnot je mj. zřejmé rozmezí hodnot dosaženého příčného zrychlení  $5,5$  až  $9,8 \text{ m/s}^2$  při jízdě obloukem a následně v důsledku brzdění v oblouku rozmezí hodnot podélného zpomalení  $3,5$  až  $9,9 \text{ m/s}^2$ .

**Tabulka 19: Parametry jízdní dynamiky při jízdě a brzdění v oblouku R 50 m s DSTC "S"**

Číslo měření	Nájezdová rychlost do oblouku dle GPS [km/h]	Rychlost v okamžiku brzdění dle GPS [km/h]	Příčné zrychlení v oblouku [m/s <sup>2</sup> ]		Podélné zpomalení v oblouku [m/s <sup>2</sup> ]	
			min.	max.	min.	max.
50	72,0	66,0	5,5	8,6	5,8	9,7
51	74,0	70,0	5,5	8,9	4,6	9,8
52	-	-	-	-	-	-
53	75,0	69,0	5,8	9,0	4,3	9,7
54	72,0	66,0	6,6	8,9	7,3	9,4
55	75,0	67,0	6,4	8,6	6,3	9,7
56	75,0	72,0	5,5	9,8	3,5	9,9
Celkové rozmezí hodnot:			5,5	9,8	3,5	9,9
Aritmetický průměr hodnot:			5,88	8,97	5,3	9,7

Analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v definovaném oblouku R 50 m, DSTC "S":

Podle přílohy č. 6 této práce bylo měření č. 55 hodnoceno posádkou i vnějším pozorovatelem jako kritická jízda v oblouku. Proto bude pro toto měření analytickým výpočtem stanovena mezní rychlost vozidla v oblouku při experimentálně zjištěném maximálně využitím součinitele adheze v příčném směru. Mezní rychlost zkoušeného vozidla v definovaném oblouku o poloměru 50 m vypočteme z odvozeného vztahu (20) pro zjednodušený případ vyplývající z geometrických parametrů polygonu:

$$v_{mez55} = \sqrt{\mu_{př55} \cdot g \cdot R} = \sqrt{0,88 \cdot 9,81 \cdot 50} = 20,7 \text{ m/s} = 74,7 \text{ km/h} \quad (36)$$

Po dosažení správné hodnoty využitého součinitele adheze v příčném směru do vztahu (20) pro analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v oblouku odpovídá experimentálně zjištěná rychlost vozidla při jízdě v oblouku analyticky stanovené mezní rychlosti s dobrou přesností (cca + 0,3 km/h).

### 6.2.3.5 Kruhové zkoušky provedené s vozidlem Volvo

V rámci uskutečněných experimentálních měření na polygonu v katastru rakouské obce Allhaming byly provedeny kromě jízd a brzdění vozidla v oblouku mj. i dvě kruhové zkoušky, které se lišily zejména nastavením režimu asistenčního systému DSTC.

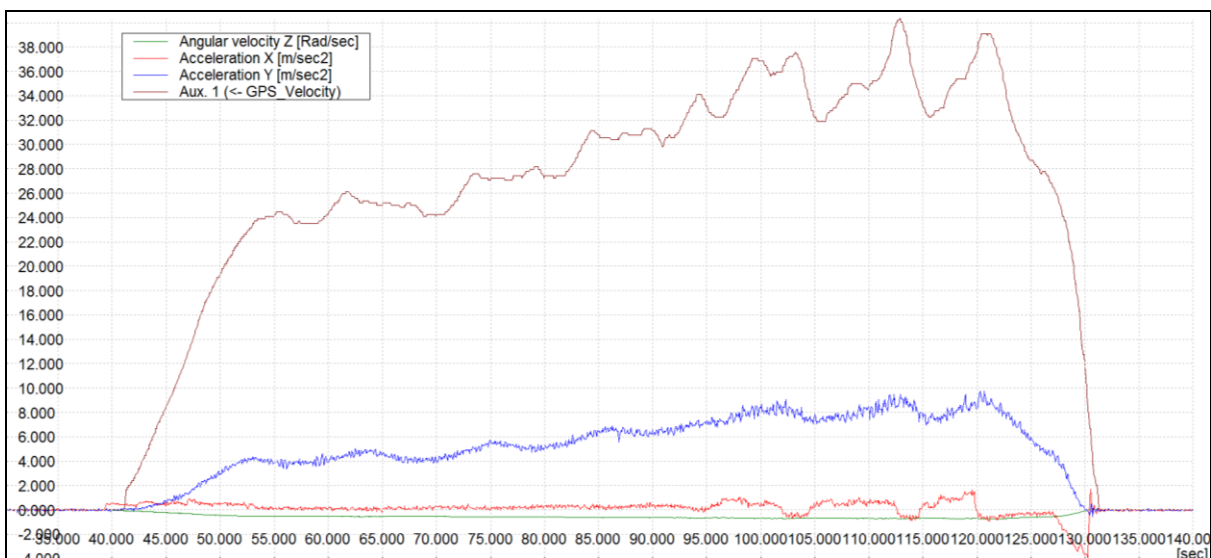
Bylo zkoumáno, jak se vozidlo Volvo chová při normálním a sportovním režimu systému DSTC při jízdě v kruhu.

Na **Obr. 122** je zrekonstruovaná trajektorie průběhu kruhových zkoušek z dat DGPS o poloměru oblouku 14 m (poloměr nemohl být větší z důvodu omezení volným prostorem polygonu).



**Obr. 122:** Zrekonstruovaná trajektorie průjezdů při kruhové zkoušce z dat DGPS

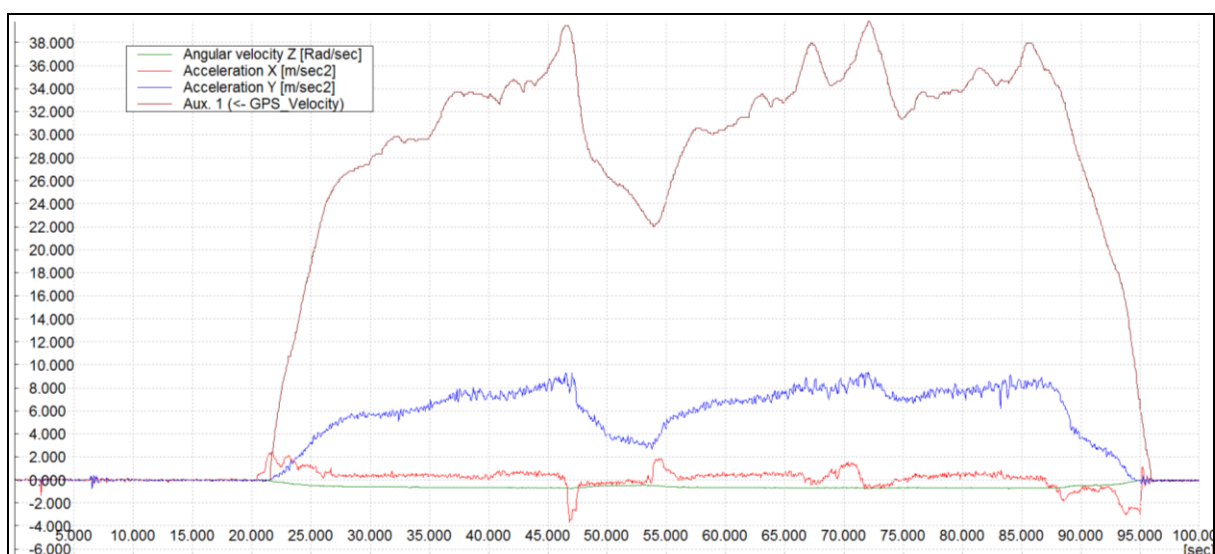
Na **Obr. 123** jsou souhrnně uvedeny změřené parametry jízdní dynamiky při kruhové zkoušce se systémem DSTC v normálním režimu. V čase cca 113 s od začátku kruhové zkoušky byla dosažena maximální rychlost průjezdu obloukem cca 41 km/h při maximálním příčném zrychlení vozidla  $9,0 \text{ m/s}^2$ .



**Obr. 123:** Parametry jízdní dynamiky vozidla při kruhové zkoušce s DSTC “N“

Na **Obr. 124** jsou souhrnně uvedeny změřené parametry jízdní dynamiky při kruhové zkoušce se systémem DSTC ve sportovním režimu. V čase cca 72 s od začátku kruhové zkoušky byla dosažena maximální rychlost průjezdu obloukem cca 40 km/h při maximálním příčném zrychlení vozidla  $9,0 \text{ m/s}^2$ .

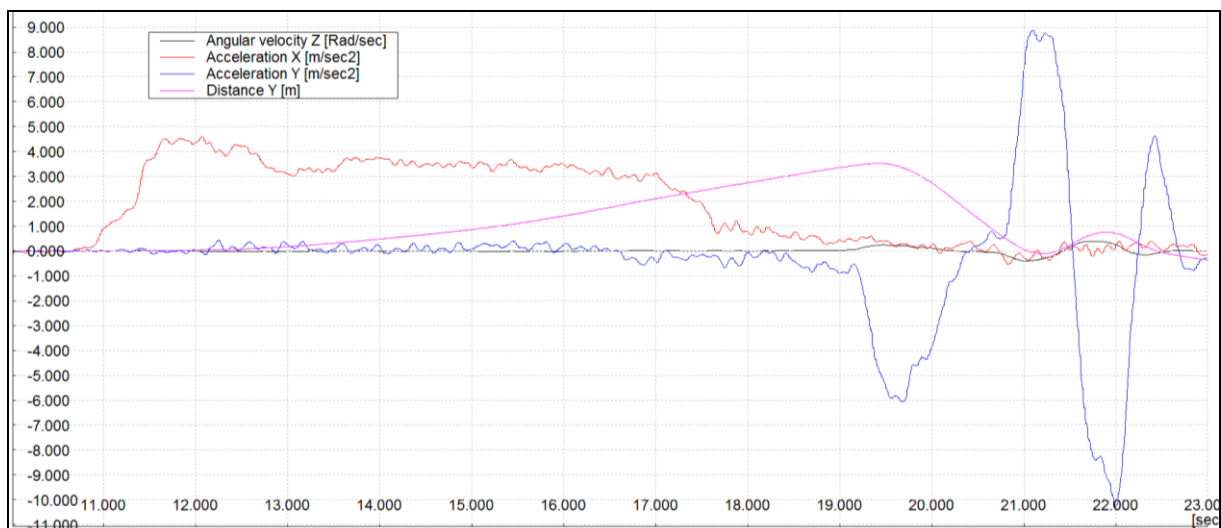
Při provedených kruhových zkouškách se vozidlo Volvo chovalo stabilně, ačkoliv se pohybovalo velmi blízko mezní rychlosti cca 40,5 km/h při využitelném součiniteli adheze v příčném směru 0,92.



**Obr. 124:** Parametry jízdní dynamiky vozidla při kruhové zkoušce s DSTC “S”

### 6.2.3.6 Příčné přemístění dvěma oblouky s vozidlem Volvo

Na závěr experimentálních měření bylo s vozidlem Volvo s asistenčním systémem DSTC v normálním režimu provedeno příčné přemístění o příčnou vzdálenost 3,5 m na volné podélné vzdálenosti cca 30 m při rychlosti jízdy 78 km/h (z důvodu krátké rozjezdové plochy nemohl být jízdní manévr proveden při vyšší rychlosti). Na tento jízdní manévr navázalo při shodné rychlosti 78 km/h druhé příčné přemístění o příčnou vzdálenost již pouze 0,8 m před blížícím se závěrem jízdní zkoušky. V prvním oblouku prvního příčného přemístění byla zjištěna maximální hodnota příčného zrychlení  $6,0 \text{ m/s}^2$ , v druhém navazujícím oblouku pak  $8,9 \text{ m/s}^2$  a při druhém návazném manévru příčného přemístění o příčnou vzdálenost pouze 0,8 m pak byla zjištěna hodnota příčného zrychlení  $10 \text{ m/s}^2$  (viz **Obr. 125**). Nutno dodat, že posádka vozidla při uvedených dvou jízdních manévrech nezaznamenala žádné nestabilní chování vozidla a nepovažovala jízdní manévr se zkoušeným vozidlem za kritickou jízdní situaci stejně jako vnější pozorovatel. Při popsání příčného přemístění zkoušeného vozidla oblouky byl zjištěn využívaný součinitel adheze v příčném směru v rozmezí cca 0,6 až 1,0.

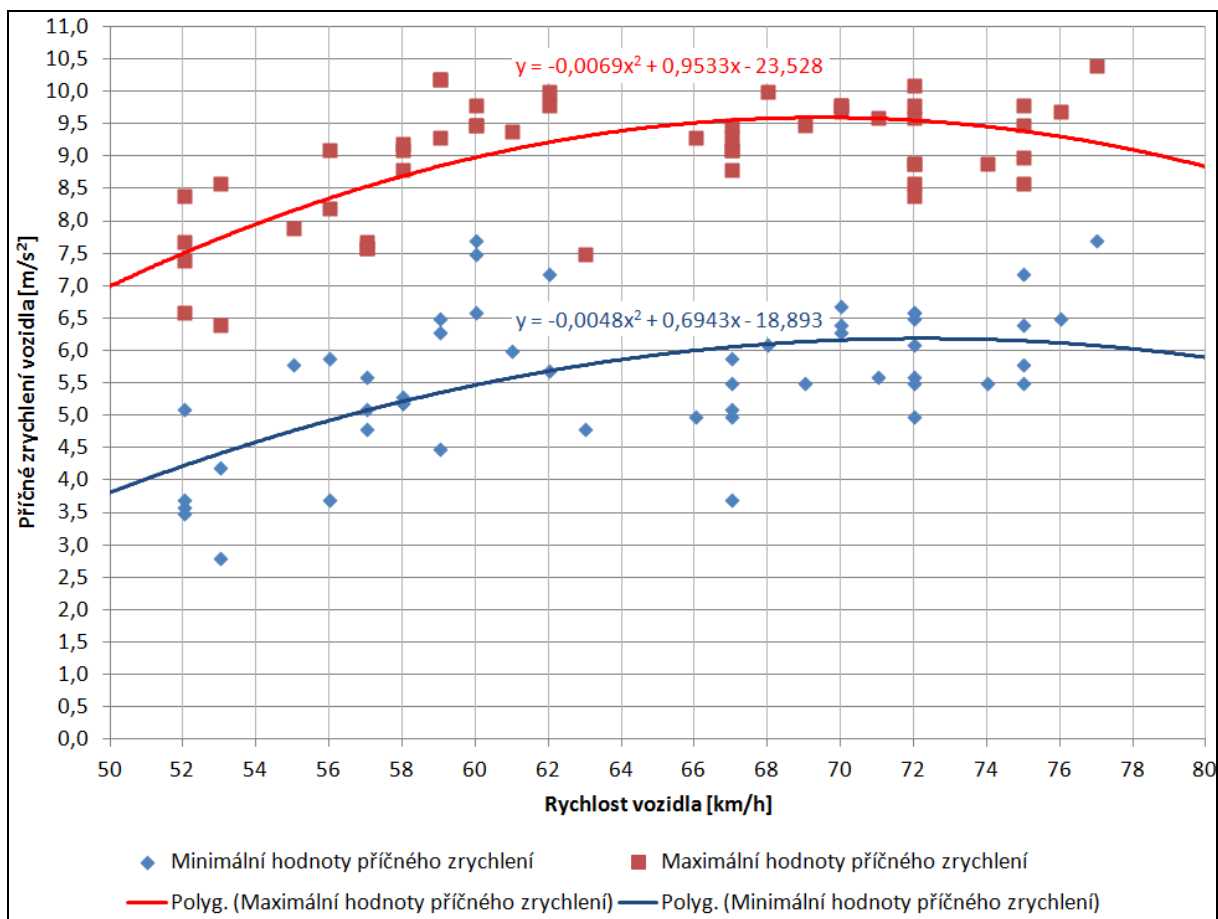


**Obr. 125:** Parametry jízdní dynamiky vozidla při příčném přemístění s DSTC "N"

### 6.2.3.7 Shrnutí výsledků a vyhodnocení provedených jízd a brzdění vozidla v oblouku

V rámci uskutečněných experimentálních měření na polygonu v katastru rakouské obce Allhaming bylo provedeno celkem 65 experimentů, z toho 53 vyhodnocených jízd a brzdění vozidla v oblouku. Dále byly na polygonu provedeny také dvě kruhové zkoušky, příčné přemístění vozidla a šest brzdných zkoušek, které byly podrobně vyhodnoceny v předchozím textu této práce. Kompletní výsledky experimentálních měření jsou nejprve tabelárně uspořádány a následně jsou jednotlivé jízdy a brzdění v definovaných obloucích graficky zobrazeny v příloze č. 6 této práce.

Z naměřených parametrů jízdní dynamiky vozidla, které jsou tabelárně uspořádány v příloze č. 6, listu 1 je na Obr. 126 vyneseno rozmezí minimálního a maximálního příčného zrychlení vozidla vybaveného asistenčním systémem jízdní stability v závislosti na rychlosti jízdy. Prostor v grafu na Obr. 126 mezi červenou a modrou křivkou vymezuje dosažitelné hodnoty příčného zrychlení v závislosti na rychlosti jízdy vozidla vybaveného asistenčním systémem kontroly jízdní stability. Obr. 126 může být ihned využíván ve znalecké praxi.



**Obr. 126:** Dosažitelné hodnoty příčného zrychlení v závislosti na rychlosti jízdy vozidla vybaveného asistenčním systémem kontroly jízdní stability na suchém asfaltovém povrchu

V příloze č. 6, listu 1 této práce je pro každý průjezd obloukem analyticky vypočtena mezní rychlost při zjištěném maximálně využitém součiniteli adheze v příčném směru. Z porovnání experimentálně zjištěné rychlosti průjezdu vozidla obloukem s analyticky stanovenou mezní rychlostí je zřejmá dobrá shoda ( $\pm 10\%$ ) obou použitých metod, tj. experimentu a analytického výpočtu, za nutné podmínky dosažení správné hodnoty součinitele adheze v příčném směru do odvozeného vztahu (20) pro analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v oblouku.

Z provedených experimentů vyplynulo, že moderní vozidlo vybavené stabilizačním systémem, pohonem všech kol a v neposlední řadě kvalitními pneumatikami se v definovaných obloucích dokázalo pohybovat s poměrně vysokou hodnotou využitého součinitele adheze v příčném směru. Vozidlo se stabilizačním systémem dokáže podstatně více využít součinitel adheze v příčném směru než je tomu u vozidla bez stabilizačního systému. Z výsledků provedených experimentů (viz příloha č. 6 této práce), resp. ze zjištěných hodnot příčného zrychlení vozidla se stabilizačním systémem byla

vytvořena **Tabulka 20**, která podle hodnoceného způsobu jízdy posádkou i vnějšího pozorovatele definuje využitelný součinitel adheze v příčném směru. Tato tabulka může být ihned efektivně aplikována ve znalecké praxi.

**Tabulka 20:** *Využitelné hodnoty součinitele adheze v příčném směru podle způsobu jízdy vozidla se stabilizačním systémem jízdní dynamiky*

Způsob jízdy	Součinitel adheze v příčném směru
Rychlá jízda	0,50 až 0,60
Sportovní jízda	0,70 až 0,80
Kritická jízda	0,85 až 0,95
Hranice bezpečnosti	1,0

Z analyzovaných jízdních experimentů provedených na polygonu DSD a **přílohy č. 6** této práce je patrné, že při všech experimentálních měřeních parametrů jízdní dynamiky se stáčivá rychlost vozidla Volvo vybaveného stabilizačním systémem DSTC pohybovala v rozmezí hodnot 0,4 až 0,6 rad/s. Je tedy zřejmé, že stabilizační systém vozidla pracoval tak, aby se vozidlo při jízdních experimentech nedostalo do hodnot stáčivé rychlosti vyšších než 0,6 rad/s. Experimentálně zjištěná hodnota stáčivé rychlosti vozidla vybaveného stabilizačním systémem bude jednou z podstatných vstupních veličin pro nastavení numerického modelu ESP v počítačovém simulačním programu.

Z analyzovaných průběhů podélného zpomalení při brzdění vozidla v jednotlivých obloucích (viz **Obr. 116** až **Obr. 121** a **příloha č. 6** této práce) je zřejmé, že dosahované využitelné hodnoty podélného zpomalení při brzdění v oblouku přibližně odpovídají hodnotám dosahovaného příčného zrychlení v daném oblouku, z adhezni elipsy se v podstatě stává kružnice přilnavosti. Z experimentálních měření vyplynulo, že využitelný součinitel adheze v příčném směru se velmi přibližuje hodnotě součinitele adheze ve směru podélném.

### **6.3 Simulační modelování pohybu vozidla ve vyšetřovaném ději v oblouku**

Na základě výsledků experimentálních měření parametrů jízdní dynamiky vozidla Volvo V40 T5 AWD v oblouku provedených na polygonu společnosti DSD v Rakousku jsou v této části práce vybrané jízdní experimenty simulačně modelovány s podporou počítačových simulačních programů. Cílem simulačního modelování je stanovit rozsah vstupních údajů podstatných veličin odpovídající výsledkům experimentálních měření u vozidel vybavených elektronickými stabilizačními systémy pro získávání vstupních



parametrů a využívání výpočtových modelů při analýze a rekonstrukci pohybu vozidla v nehodovém ději.

Při výkonu znalecké činnosti se stále častěji setkáváme s využitím moderní výpočetní techniky, především s počítačovou podporou, kterou bychom mohli rozdělit do dvou úrovní. První úroveň může zahrnovat případy, kdy zpracovatel znaleckého posudku využívá pro naplnění svého úkolu počítačový program, zejména za účelem dodržení formální stránky znaleckého posudku (např. balíček programů MS Office). Druhá, jakási vyšší úroveň, může být splněna v případě, že zpracovatel využívá pro vypracování znaleckého posudku podpory simulačního počítačového programu, např. PC-Crash nebo Virtual CRASH. Znalec na základě zadaných vstupních údajů získá řešení vyšetřovaného nehodového děje, které však ještě nemusí být správným a technicky přijatelným závěrem.

Počítačové simulační programy Virtual CRASH a PC-Crash pracují s různými matematickými modely. Řešení pomocí kinetického výpočtu bývá využíváno např. při řešení střetu a pohybu vozidel do konečných poloh. Na takové řešení pak bývá obvykle navázáno řešení pohybu vozidel před střetem pomocí zpětného kinematického výpočtu. Z nyní uvedeného je zřejmé, že problematiku jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku je třeba řešit pomocí kinetického výpočtu (dynamicky).

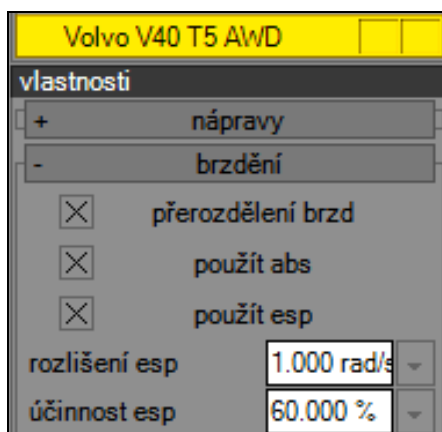
Výsledky řešení simulačních programů je možné po proběhnutí simulace jednoduše zobrazit či tisknout např. formou protokolu, který by měl tvořit nedílnou součást znaleckého posudku vypracovaného s podporou simulačního programu. Pro řešení problematiky jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku je výhodou, že simulační programy umožňují importovat reálný polygon, jehož geometrické parametry byly zaměřeny geodetickou totální stanicí a řešení tak proběhlo na skutečné zkušební dráze s možností nastavení součinitele adheze mezi pneumatikou a vozovkou ze znalosti výsledků provedených brzdňích zkoušek. Simulační programy rovněž poskytují širokou databázi vozidel, u kterých pak můžeme v projektu editovat mj. vlastnosti odpružení a tlumení (měkké, střední, tvrdé, definované uživatelem), hodnoty směrových úchylek kol v případě lineárního modelu pneumatiky, z hlediska brzdění pak aktivaci či deaktivaci ABS, rozdělení brzdňích sil a v neposlední řadě dnes i aktivaci modelu ESP, což analyticky odvozené vztahy, např. (19) a (20), nemohou zohlednit. Pro výpočet pohybu vozidla počítačovou simulací je možné mj. zadat také základní parametry pneumatik, především jejich rozměr či vybrat model pneumatiky, který bude ve všech v této práci provedených simulacích nastaven jako lineární se směrovou úchylkou kola 5 °. Mezi další nespornou výhodou simulačních programů patří

nejen snadné odečítání parametrů zkušební dráhy (podélný a příčný sklon, poloměry, aj.), ale také dynamických parametrů při pohybu vozidla (např. úhly klonění a klopení vozidla, úhlové rychlosti, aj.), stejně tak jako možnost exportovat grafické závislosti parametrů jízdní dynamiky vozidla.

### 6.3.1 Simulační modelování v počítačovém programu Virtual Crash verze 3.0

Provedené jízdní experimenty na polygonu DSD v Rakousku rozebrané v kapitole 6.2.3 této práce, tj. experimentální měření parametrů jízdní dynamiky vozidla v oblouku č. 15, 25, 34, 41, 47 a 55 byly při známých vstupních parametrech vozidla Volvo (viz příloha č. 5 této práce) a polygonu (viz kapitola 6.2.3.3 této práce) simulačně modelována v příslušných obloucích o poloměru 30, 40 a 50 m. Cílem provedených simulací bylo nalézt takové vstupní parametry numerického modelu stabilizačního systému ESP v simulačním programu, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla.

Před rozborem provedených simulací pohybu vozidla v oblouku je třeba nejprve uvést, jaké vstupní podstatné veličiny je třeba uživatelem (znalcem) zadat do výpočtového modelu ESP v simulačním programu Virtual Crash verze 3.0 (pozn.: verze 2.2 numerickým modelem ESP nedisponuje). Vliv instalovaného stabilizačního systému skutečného vozidla lze v počítačovém simulačním programu zohlednit v editaci vozidla - vlastnostech vozidla, záložce brzdění (viz Obr. 127). V simulačním programu Virtual Crash v. 3.0 jsou standardně přednastaveny dvě vstupní veličiny modelu ESP. Jedná se o hodnotu stáčivé rychlosti vozidla v [rad/s] (v programu označeno jako „rozlišení ESP“) a „účinnost ESP“ v [%]. Standardně jsou tyto hodnoty autorem programu přednastaveny tak, že hodnota stáčivé rychlosti vozidla je nastavena na 1,0 rad/s a účinnost ESP 60 %. Při užití těchto standardně přednastavených hodnot nebylo možné po zadání všech reálných vstupních parametrů simulace dosáhnout experimentálně zjištěného průběhu jízdní dynamiky vozidla při jízdě a brzdění zejména v obloucích o poloměru 30 a 40 m. Proto bylo třeba hledat takové vstupní veličiny modelu ESP v simulačním programu, které by odpovídaly reálnému pohybu vozidla ve vyšetřovaném ději v oblouku.



**Obr. 127:** Standardní nastavení systému ESP v programu Virtual CRASH v. 3.0

### 6.3.1.1 Simulační modelování pohybu vozidla v oblouku o poloměru 30 m

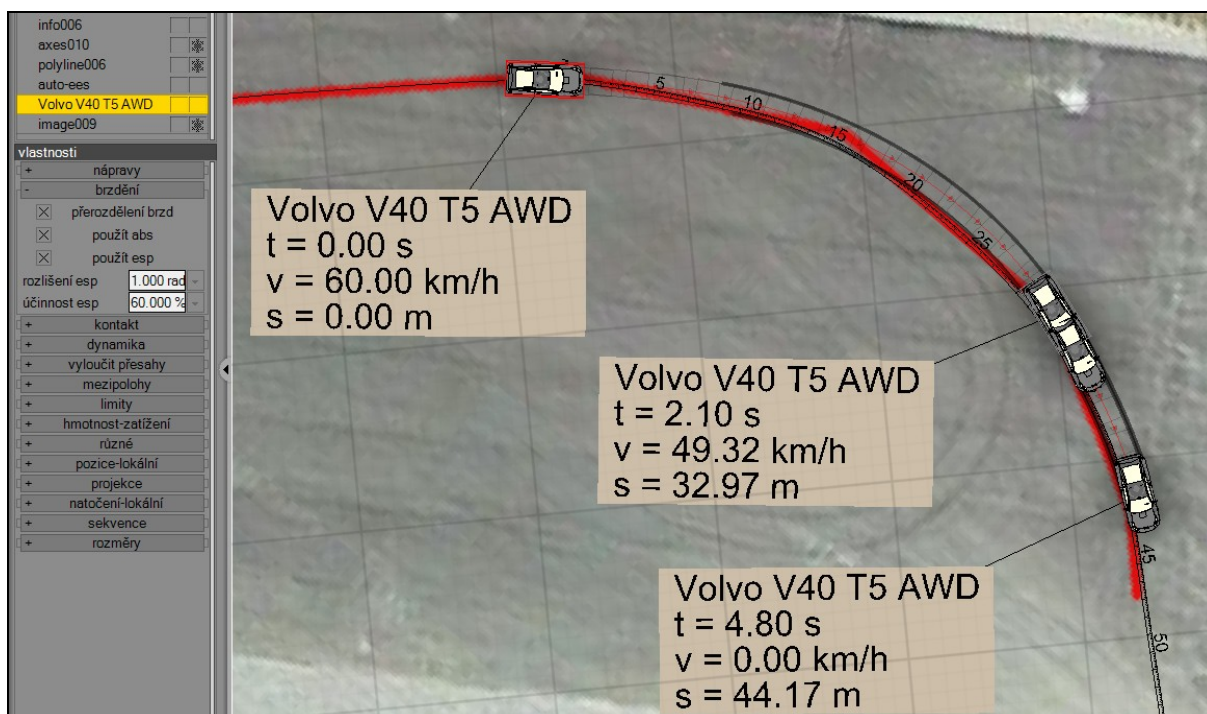
Počítačovou simulací byl na skutečném jízdním poloměru zrekonstruovaném z údajů DGPS simulačně modelován pohyb vozidla Volvo obloukem o poloměru 30 m na základě známých vstupních parametrů vozidla, polygonu a změřené jízdní dynamiky. Simulačně byla modelována měření č. 15 a č. 25. Pro každé vybrané měření byly simulačně modelovány dvě varianty pohybu vozidla v oblouku se zapnutým numerickým modelem systému ESP v simulačním programu. První varianta představovala pohyb vozidla daným obloukem při standardně přednastavených hodnotách numerického modelu ESP (viz **Obr. 127**). Při druhé variantě modelování bylo cílem několikanásobně opakovaných simulací nalézt takové vstupní parametry numerického modelu stabilizačního systému ESP v simulačním programu, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla.

#### **Simulační modelování experimentu č. 15 provedeného na polygonu DSD**

*a) se standardně přednastavenými hodnotami numerického modelu ESP*

Na **Obr. 128** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 15, kdy v numerickém modelu ESP zůstaly standardně přednastavené hodnoty patrné z obrázku. V čase 0,0 s a rychlosti 60 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,1 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdit ale pouze z rychlosti cca 49 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Vozidlo zastaví cca 4,2 m před skutečnou konečnou polohou (konec oblouku červenou čarou). Od okamžiku brzdění se vozidlo paradoxně vlivem zásahů systému ESP se standardně programem nastavenou vysokou účinností pohybuje mírně ven

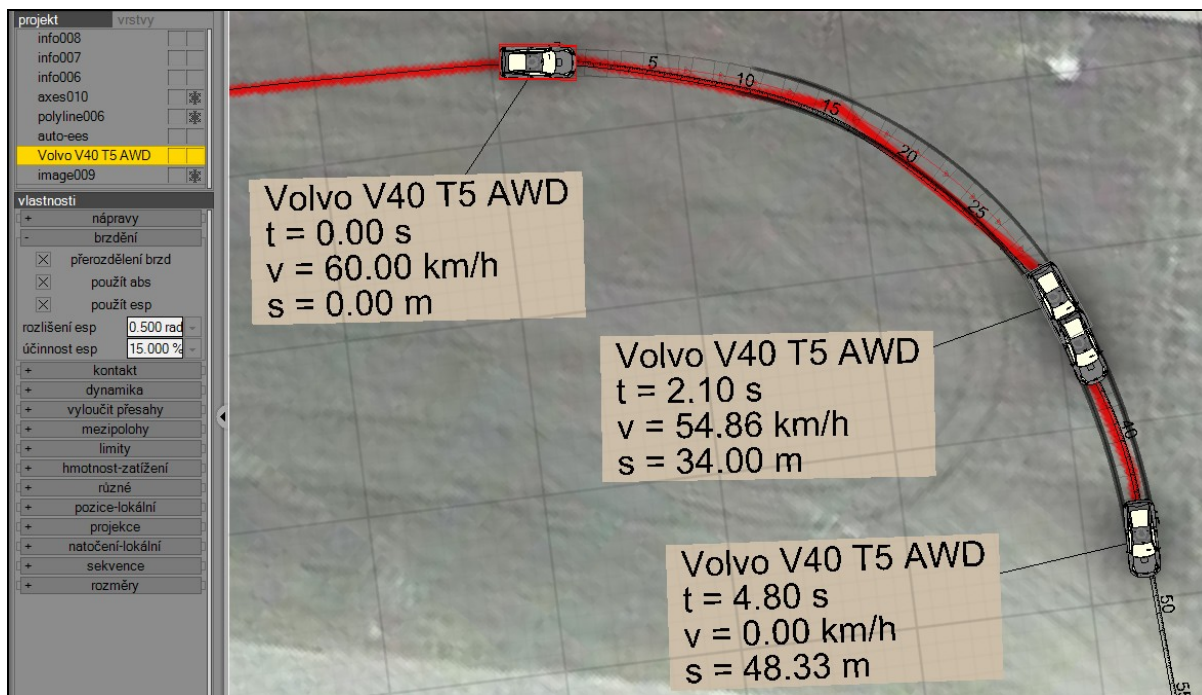
z oblouku (cca o polovinu šířky vozidla). Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 8**, listu 1 až 8 této práce.



**Obr. 128:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 15, model ESP standardně přednastaven

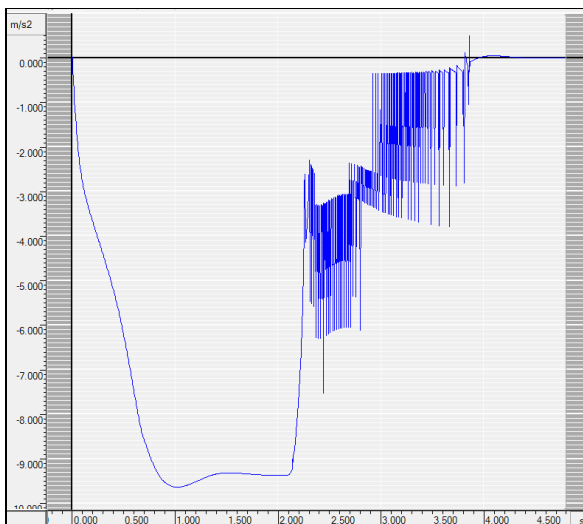
*b) s nově nalezenými hodnotami vstupních parametrů numerického modelu ESP*

Na **Obr. 129** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 15, kdy byly několikanásobně opakovanou simulací hledány nové hodnoty vstupních parametrů nastavení v numerickém modelu ESP, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla. V čase 0,0 s a rychlosti 60 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,1 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdit ze skutečné rychlosti cca 55 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Vozidlo na konci simulace zastaví ve skutečně experimentálně zjištěné konečné poloze. Několikanásobně opakovanou simulací byly nalezeny nové hodnoty vstupních parametrů nastavení numerického modelu ESP, a to hodnota stáčivé rychlosti 0,5 rad/s (tj. rozlišení ESP) a účinnost ESP 15 %. S novými hodnotami vstupních parametrů modelu ESP si vozidlo zachovává velmi dobrou směrovou stabilitu na rozdíl od předešlého jízdního stavu se standardně přednastavenými hodnotami programem. Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 8**, listu 8 až 15 této práce.

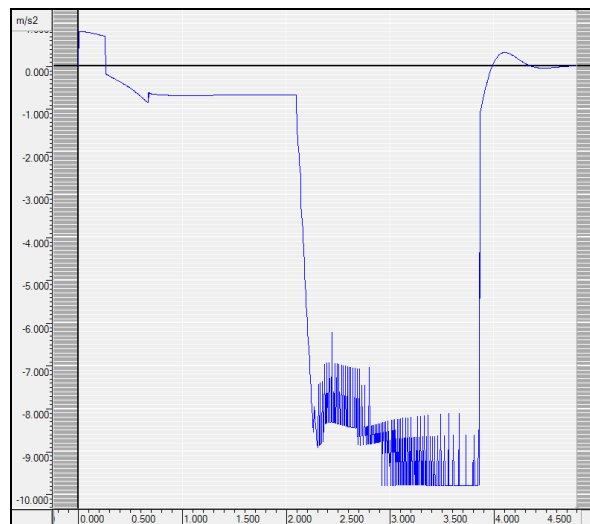


**Obr. 129:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 15, model ESP s novými hodnotami parametrů

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny průběhy příčného zrychlení (viz **Obr. 130**) a podélného zpomalení (viz **Obr. 131**) zjištěné simulačním modelováním pohybu vozidla při měření č. 15, které svými hodnotami odpovídají provedenému experimentu.



**Obr. 130:** Průběh příčného zrychlení v čase



**Obr. 131:** Průběh podélného zpomalení v čase

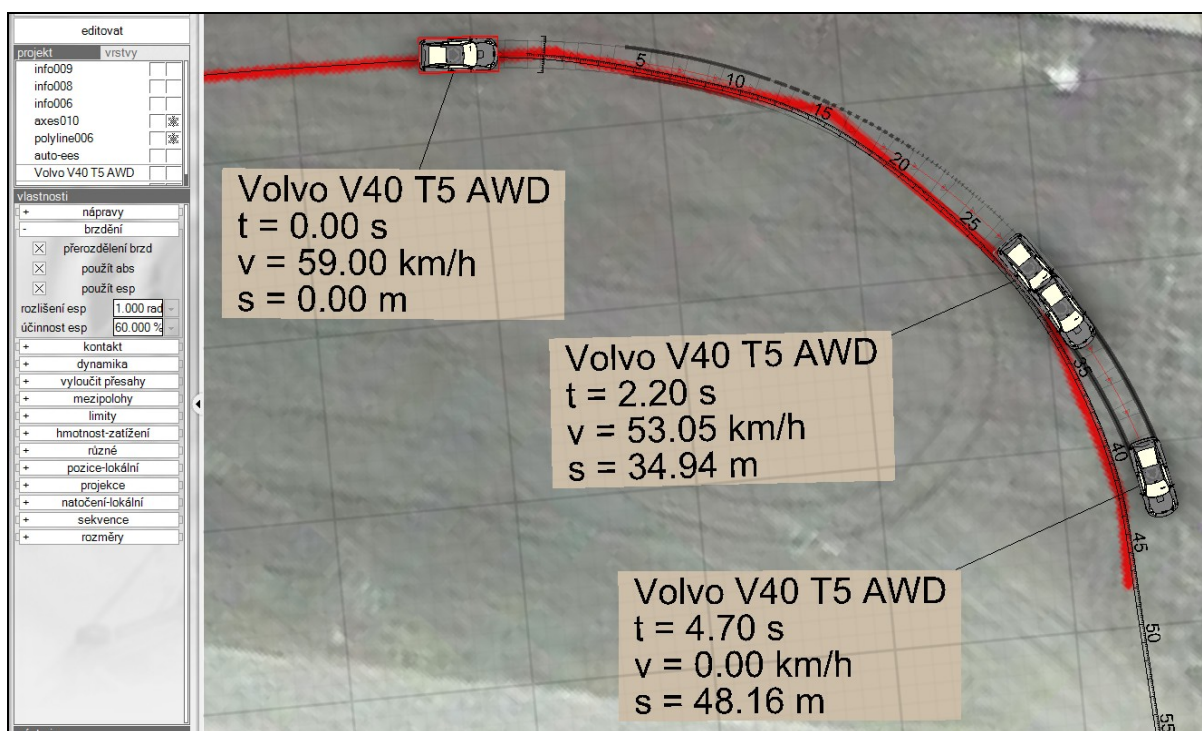
### **Simulační modelování experimentu č. 25 provedeného na polygonu DSD**

a) se standardně přednastavenými hodnotami numerického modelu ESP

Na **Obr. 132** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 25, kdy v numerickém modelu ESP zůstaly standardně přednastavené hodnoty patrné z obrázku.



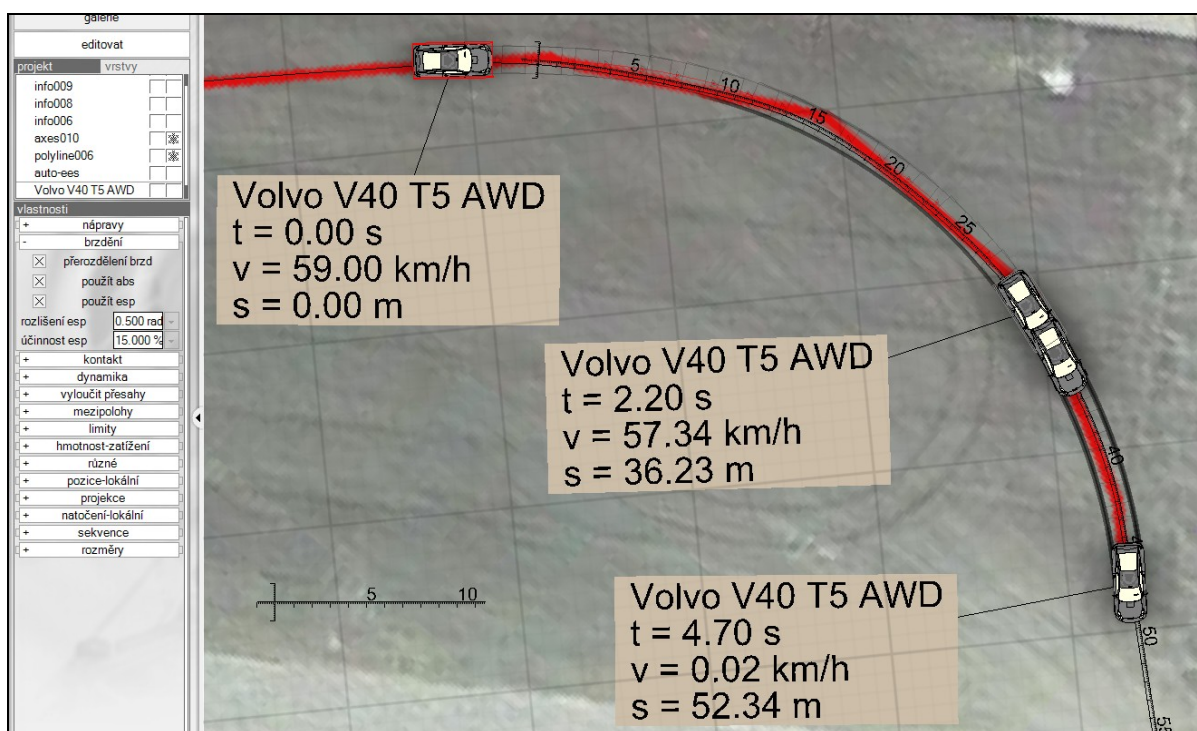
V čase 0,0 s a rychlosti 59 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,2 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdít ale pouze z rychlosti cca 53 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Od okamžiku brzdění začíná vozidlo ztrácet směrovou stabilitu, a proto skončí v konečné poloze mimo skutečnou (experimentální) trajektorii pohybu vozidla, která je vyznačena červenou čarou. Vozidlo sice zastaví o cca 4,0 m před skutečným zastavením při experimentu, ale za cenu ztráty směrové stability, která výrazně vzrostla v okamžiku intenzivního brzdění vozidla v čase 2,2 s od nájezdu do oblouku. Vlivem ztráty směrové stability se vozidlo od okamžiku brzdění příčně přemístilo o přibližně celou svoji šířku vlevo, tj. v případě silničního provozu by došlo k vyjetí vozidla do protisměrné části vozovky. Nutno dodat, že v okamžiku ztráty směrové stability nebyly provedeny žádné korekce řízení. Vozidlo se paradoxně vlivem zásahů systému ESP se standardně programem nastavenou vysokou účinností pohybuje ven z oblouku. Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 8**, listu 15 až 21 této práce.



**Obr. 132:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 25, model ESP standardně přednastaven  
*b) s nově nalezenými hodnotami vstupních parametrů numerického modelu ESP*

Na **Obr. 133** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 25, kdy byly několiknásobně opakovanou simulací hledány nové hodnoty vstupních parametrů nastavení v numerickém modelu ESP, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla. V čase 0,0 s a rychlosti 59 km/h

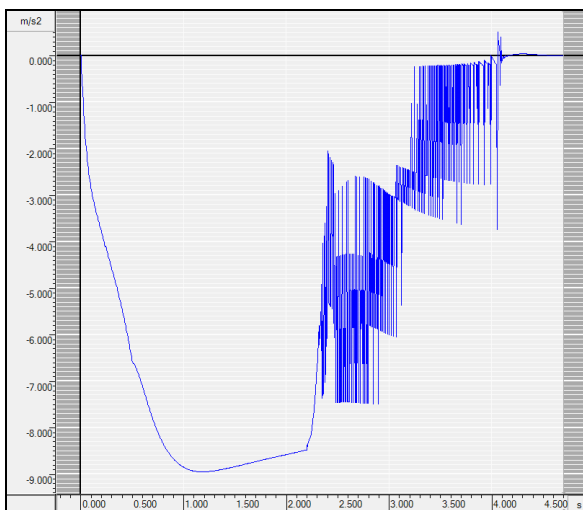
najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,2 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdit ze skutečné rychlosti cca 57 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Vozidlo na konci simulace zastaví ve skutečné experimentálně zjištěné konečné poloze. Několikanásobně opakovanou simulací byly nalezeny nové hodnoty vstupních parametrů nastavení numerického modelu ESP, a to hodnota stáčivé rychlosti 0,5 rad/s (tj. rozlišení ESP) a účinnost ESP 15 %. S novými hodnotami vstupních parametrů modelu ESP si vozidlo zachovává velmi dobrou směrovou stabilitu na rozdíl od předešlého jízdního stavu se standardně přednastavenými hodnotami programem. Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 8**, listu 22 až 28 této práce.



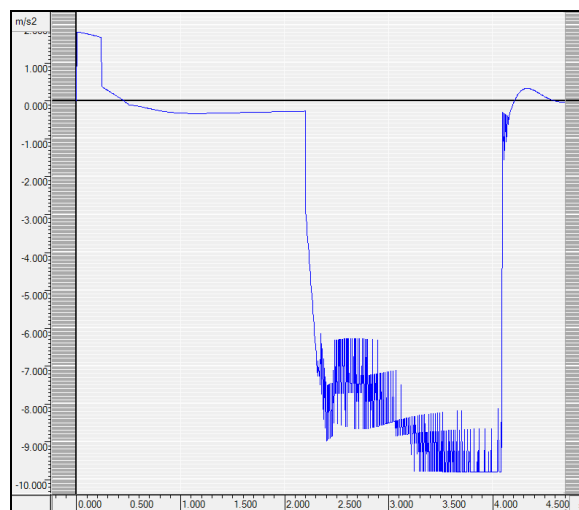
**Obr. 133:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 25, model ESP s novými hodnotami parametrů

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny průběhy příčného zrychlení (viz **Obr. 134**) a podélného zpomalení (viz **Obr. 135**) zjištěné simulačním modelováním pohybu vozidla při měření č. 25, které svými hodnotami odpovídají provedenému experimentu.





**Obr. 134:** Průběh příčného zrychlení v čase



**Obr. 135:** Průběh podélného zpomalení v čase

### 6.3.1.2 Simulační modelování pohybu vozidla v oblouku o poloměru 40 m

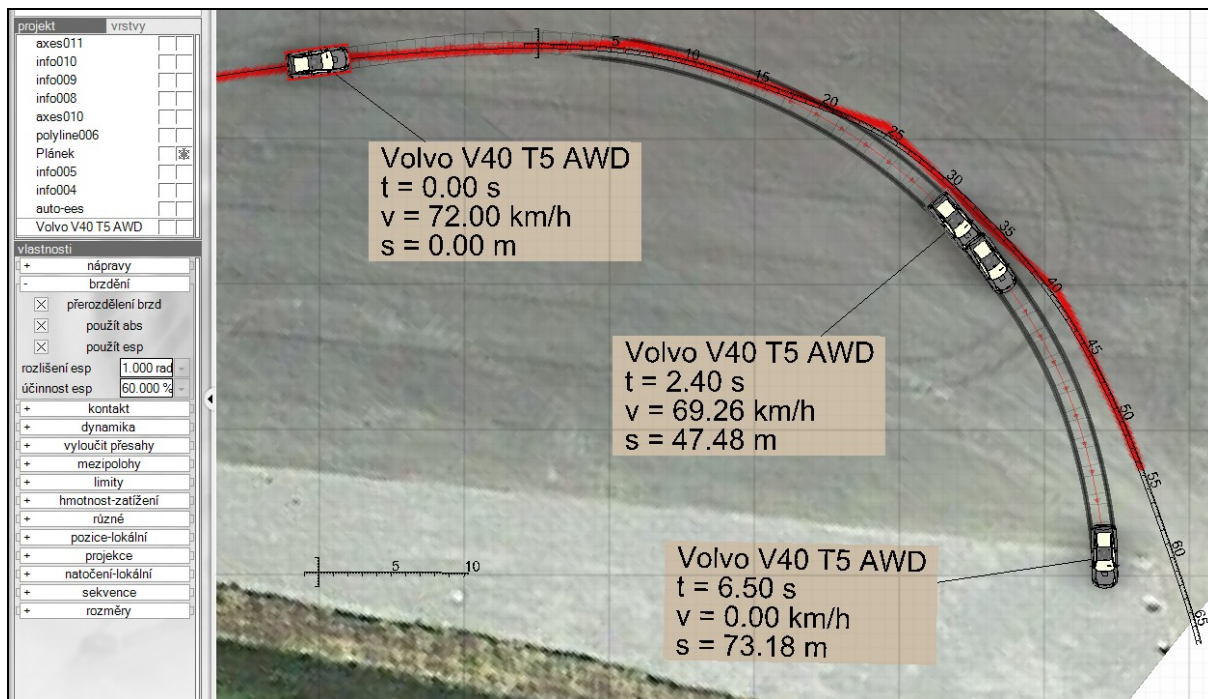
Počítačovou simulací byl na skutečném jízdním poloměru zrekonstruovaném z údajů DGPS simulačně modelován pohyb vozidla Volvo obloukem o poloměru 40 m na základě známých vstupních parametrů vozidla, polygonu a změřené jízdní dynamiky. Simulačně byla modelována měření č. 34 a č. 41. Pro každé vybrané měření byly simulačně modelovány dvě varianty pohybu vozidla v oblouku se zapnutým numerickým modelem systému ESP v simulačním programu. První varianta představovala pohyb vozidla daným obloukem při standardně přednastavených hodnotách numerického modelu ESP (viz **Obr. 127**). Při druhé variantě modelování bylo cílem několikanásobně opakovaných simulací nalézt takové vstupní parametry numerického modelu stabilizačního systému ESP v simulačním programu, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla.

#### ***Simulační modelování experimentu č. 34 provedeného na polygonu DSD***

*a) se standardně přednastavenými hodnotami numerického modelu ESP*

Na **Obr. 136** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 34, kdy v numerickém modelu ESP zůstaly standardně přednastavené hodnoty patrné z obrázku. V čase 0,0 s a rychlosti 72 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,4 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdit z rychlosti cca 69 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Ze simulace je zřejmé, že vozidlo začíná ztrácet požadovaný směr jízdy

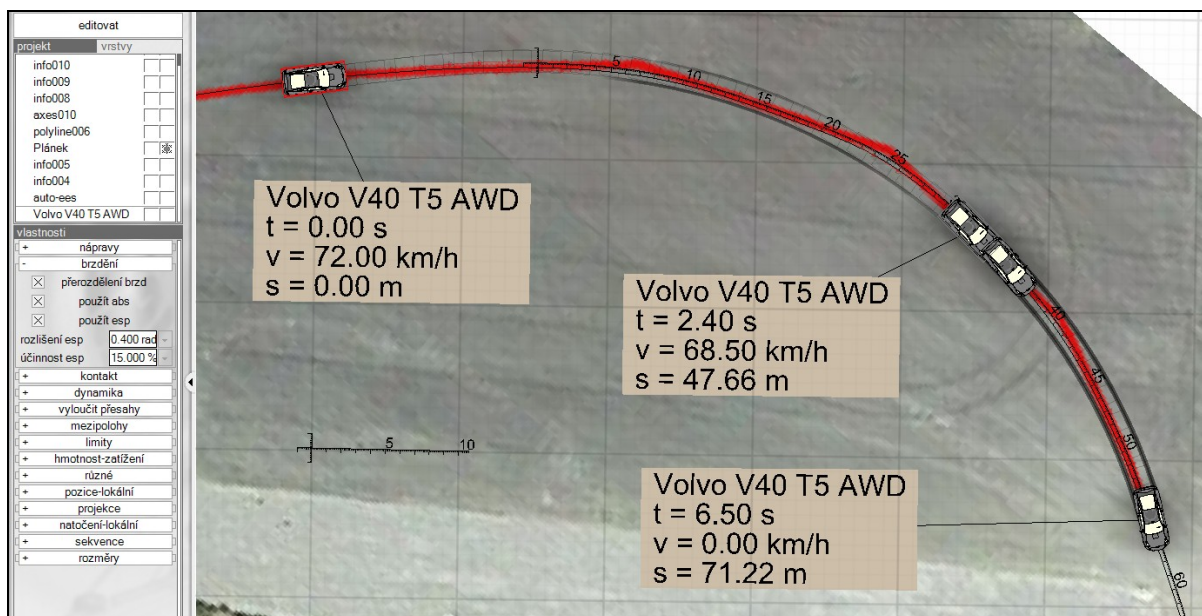
a pohybuje se více ke středu oblouku. Nutno dodat, že pokud by bylo v simulaci korigováno řízení, směr jízdy obloukem by bylo možné dodržet, ale přesto by vozidlo skončilo cca 2,0 m za skutečnou konečnou polohou (konec oblouku červenou čarou). Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 8**, listu 29 až 37 této práce.



**Obr. 136:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 34, model ESP standardně přednastaven

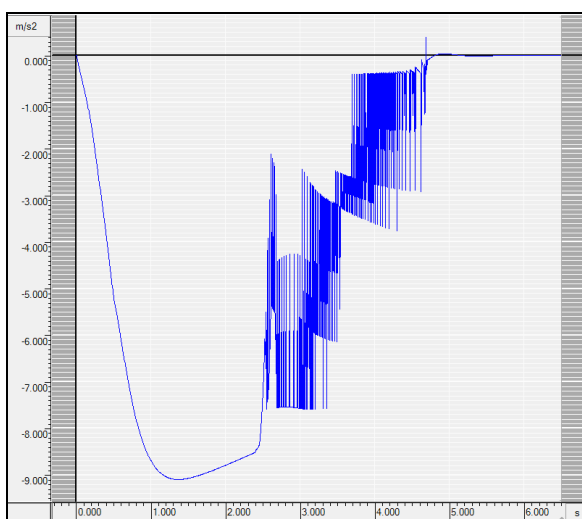
*b) s nově nalezenými hodnotami vstupních parametrů numerického modelu ESP*

Na **Obr. 137** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 34, kdy byly několikanásobně opakovanou simulací hledány nové hodnoty vstupních parametrů nastavení v numerickém modelu ESP, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla. V čase 0,0 s a rychlosti 72 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,4 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdít ze skutečné rychlosti cca 69 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Vozidlo na konci simulace zastaví ve skutečně experimentálně zjištěné konečné poloze. Několikanásobně opakovanou simulací byly nalezeny nové hodnoty vstupních parametrů nastavení numerického modelu ESP, a to hodnota stáčívé rychlosti 0,4 rad/s (tj. rozlišení ESP) a účinnost ESP 15 %. Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 8**, listu 37 až 45 této práce.

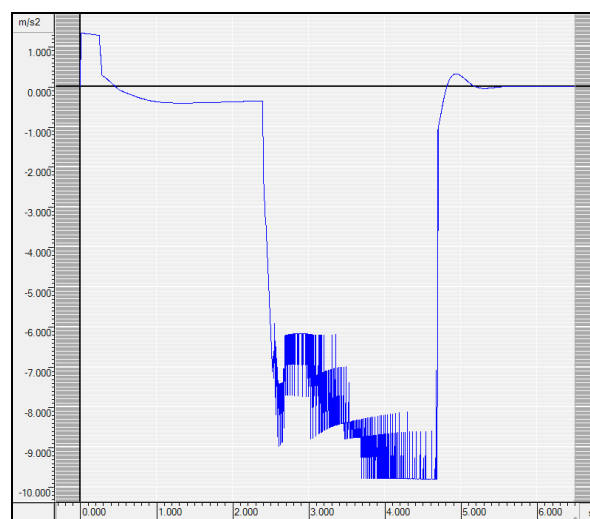


**Obr. 137:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 34, model ESP s novými hodnotami parametrů

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny průběhy příčného zrychlení (viz **Obr. 138**) a podélného zpomalení (viz **Obr. 139**) zjištěné simulačním modelováním pohybu vozidla při měření č. 34, které svými hodnotami odpovídají provedenému experimentu.



**Obr. 138:** Průběh příčného zrychlení v čase



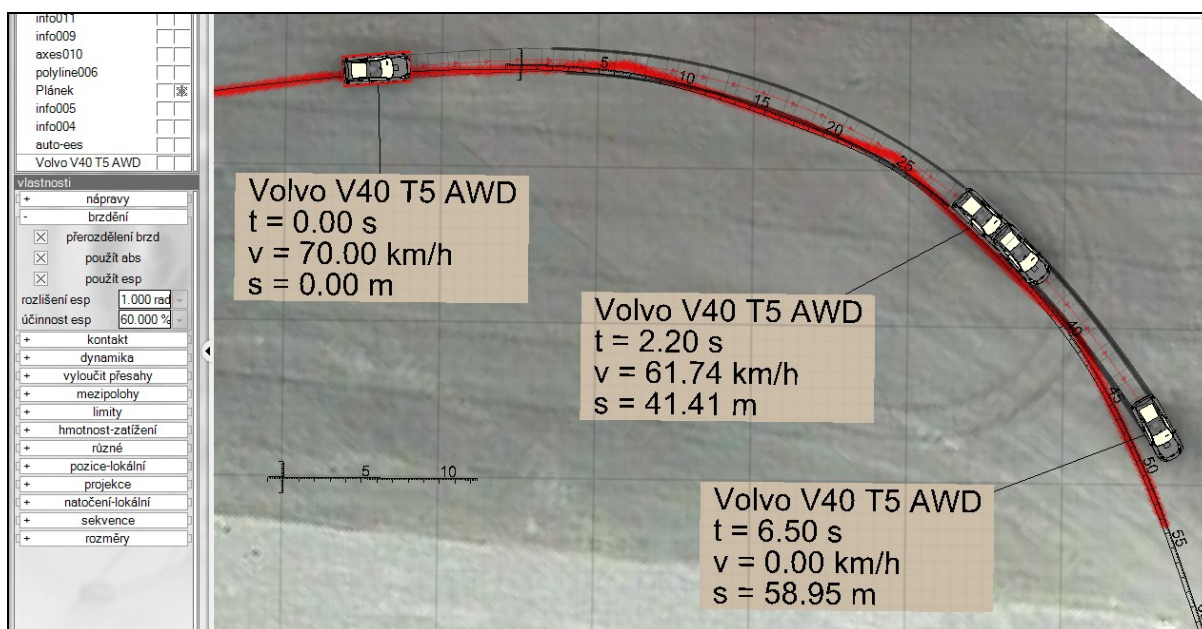
**Obr. 139:** Průběh podélného zpomalení v čase

### **Simulační modelování experimentu č. 41 provedeného na polygonu DSD**

a) se standardně přednastavenými hodnotami numerického modelu ESP

Na **Obr. 140** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 41, kdy v numerickém modelu ESP zůstaly standardně přednastavené hodnoty patrné z obrázku. V čase 0,0 s a rychlosti 70 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,2 s od nájezdu

do oblouku začíná vozidlo brzdit z rychlosti pouze cca 62 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Již před okamžikem náběhu brzdění začíná vozidlo ztrácet směrovou stabilitu, která se dále zvyšuje při brzdění v oblouku, a proto vozidlo skončí v konečné poloze mimo skutečnou (experimentální) trajektorii pohybu vozidla, která je vyznačena červenou čarou. Vozidlo sice zastaví o cca 6,0 m před skutečným zastavením při experimentu, ale za cenu ztráty směrové stability, která výrazně vzrostla v okamžiku intenzivního brzdění vozidla v čase 2,2 s od nájezdu do oblouku. Vlivem ztráty směrové stability se vozidlo od okamžiku brzdění příčně přemístilo o přibližně celou svoji šířku vlevo, tj. v případě silničního provozu by došlo k vyjetí vozidla do protisměrné části vozovky. Od okamžiku brzdění se tedy vozidlo paradoxně vlivem zásahů systému ESP se standardně programem nastavenou vysokou účinností pohybuje již výrazně ven z oblouku (cca o celou šířku vozidla). Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 8**, listu 45 až 53 této práce.



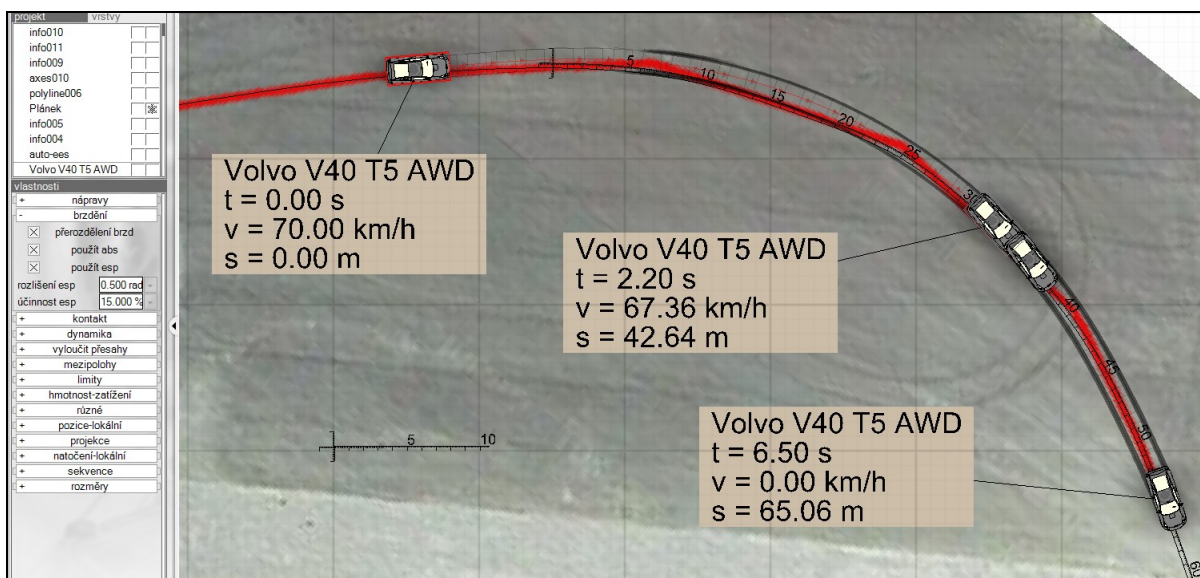
**Obr. 140:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 41, model ESP standardně přednastaven

*b) s nově nalezenými hodnotami vstupních parametrů numerického modelu ESP*

Na **Obr. 141** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 41, kdy byly několikanásobně opakovanou simulací hledány nové hodnoty vstupních parametrů nastavení v numerickém modelu ESP, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla. V čase 0,0 s a rychlosti 70 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,2 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdit ze skutečné rychlosti cca 67 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Vozidlo na konci simulace zastaví ve skutečně experimentálně zjištěné konečné poloze. Několikanásobně

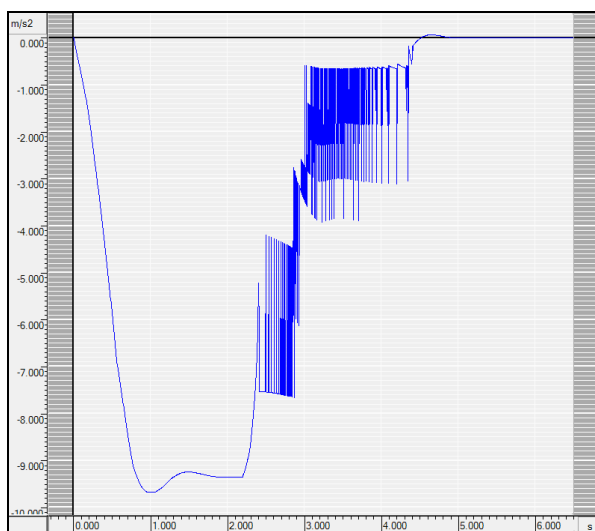


opakovanou simulací byly nalezeny nové hodnoty vstupních parametrů nastavení numerického modelu ESP, a to hodnota stáčivé rychlosti 0,5 rad/s (tj. rozlišení ESP) a účinnost ESP 15 %. S novými hodnotami vstupních parametrů modelu ESP si vozidlo zachovává velmi dobrou směrovou stabilitu na rozdíl od předešlého jízdního stavu se standardně přednastavenými hodnotami programem. Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 8**, listu 53 až 60 této práce.

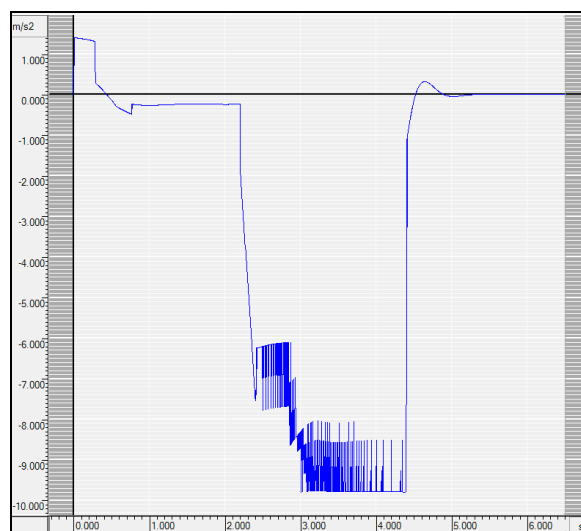


**Obr. 141:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 41, model ESP s novými hodnotami parametrů

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny průběhy příčného zrychlení (viz **Obr. 142**) a podélného zpomalení (viz **Obr. 143**) zjištěné simulačním modelováním pohybu vozidla při měření č. 41, které svými hodnotami odpovídají provedenému experimentu.



**Obr. 142:** Průběh příčného zrychlení v čase



**Obr. 143:** Průběh podélného zpomalení v čase

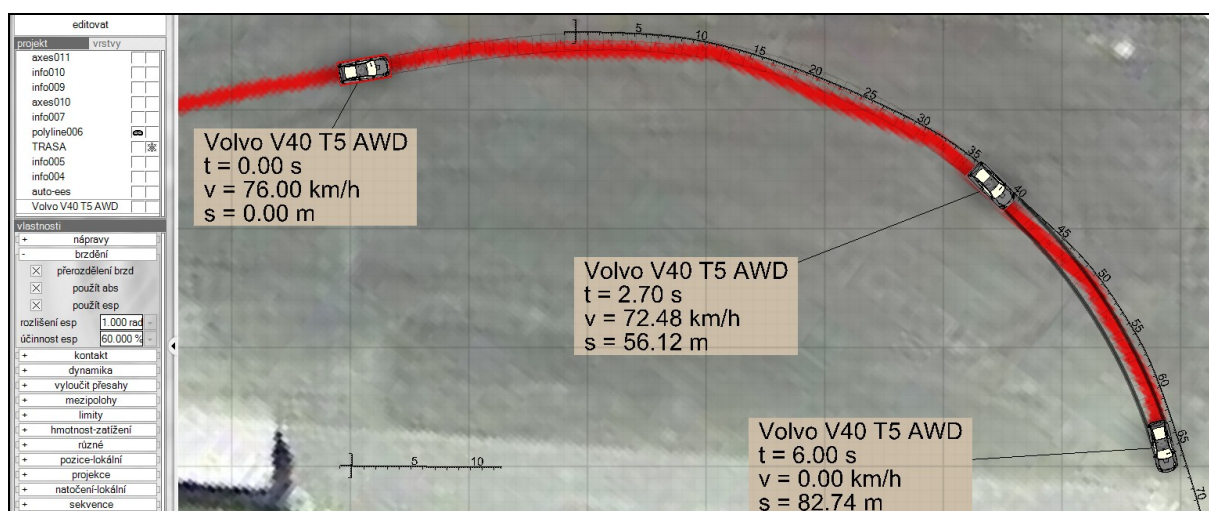
### 6.3.1.3 Simulační modelování pohybu vozidla v oblouku o poloměru 50 m

Počítačovou simulací byl na skutečném jízdním poloměru zrekonstruovaném z údajů DGPS simulačně modelován pohyb vozidla Volvo obloukem o poloměru 50 m na základě známých vstupních parametrů vozidla, polygonu a změřené jízdní dynamiky. Simulačně byla modelována měření č. 47 a č. 55. Pro každé vybrané měření byly simulačně modelovány dvě varianty pohybu vozidla v oblouku se zapnutým numerickým modelem systému ESP v simulačním programu. První varianta představovala pohyb vozidla daným obloukem při standardně přednastavených hodnotách numerického modelu ESP (viz **Obr. 127**). Při druhé variantě modelování bylo cílem několikanásobně opakovaných simulací nalézt takové vstupní parametry numerického modelu stabilizačního systému ESP v simulačním programu, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla.

#### ***Simulační modelování experimentu č. 47 provedeného na polygonu DSD***

*a) se standardně přednastavenými hodnotami numerického modelu ESP*

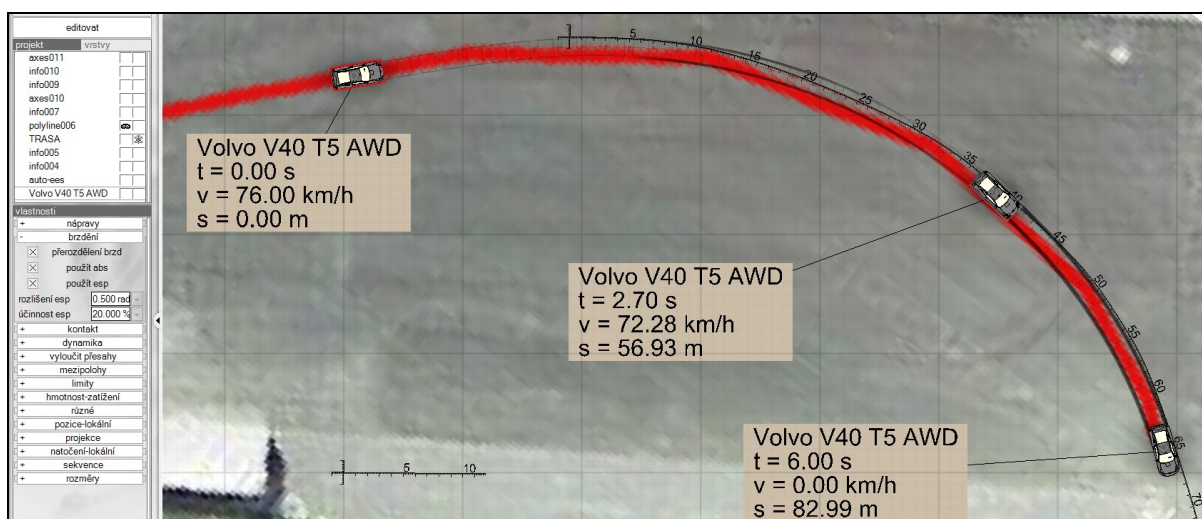
Na **Obr. 144** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 47, kdy v numerickém modelu ESP zůstaly standardně přednastavené hodnoty patrné z obrázku. V čase 0,0 s a rychlosti 76 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,7 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdit z rychlosti cca 72 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Po minimální korekci směru nastaveného řízení (pouze 0,5 °) je ze simulace zřejmé, že vozidlo dobře udržuje požadovaný směr jízdy a pohybuje se do experimentálně zjištěné konečné polohy. Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 8**, listu 61 až 69 této práce.



**Obr. 144:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 47, model ESP standardně přednastaven

b) s ověřením nově nalezených hodnot vstupních parametrů numerického modelu ESP

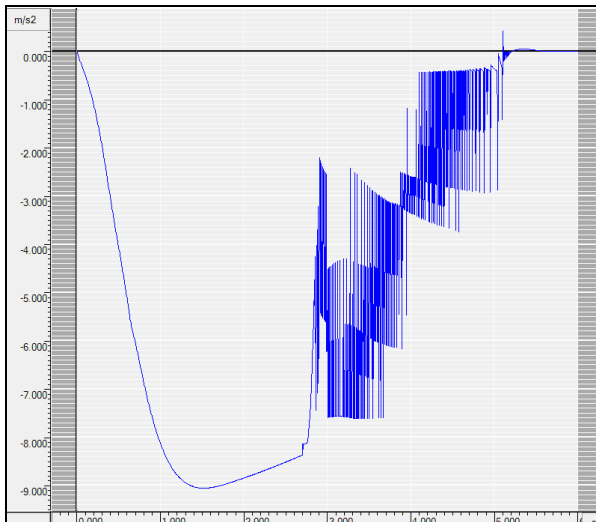
Na **Obr. 145** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 47, kdy byly několikanásobně opakovanou simulací ověřovány nové hodnoty vstupních parametrů nastavení v numerickém modelu ESP, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla. V čase 0,0 s a rychlosti 76 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,7 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdit ze skutečné rychlosti cca 72 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Vozidlo na konci simulace zastaví ve skutečně experimentálně zjištěné konečné poloze. Několikanásobně opakovanou simulací byly ověřeny nové hodnoty vstupních parametrů nastavení numerického modelu ESP, a to hodnota stáčivé rychlosti 0,5 rad/s (tj. rozlišení ESP) a účinnost ESP 20 %. Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 8**, listu 69 až 77 této práce.



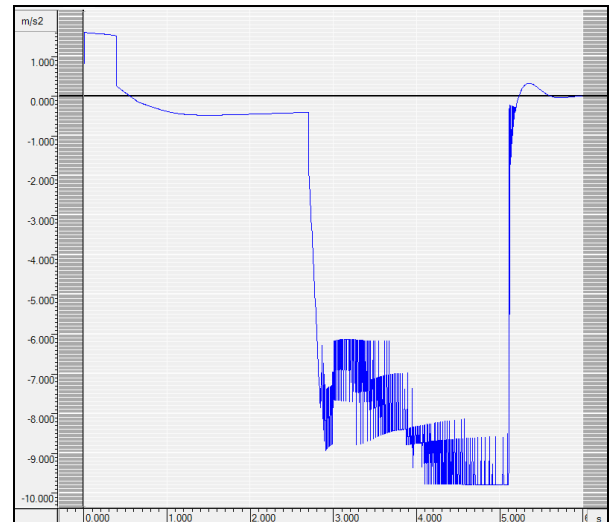
**Obr. 145:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 47, model ESP s novými hodnotami parametrů

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny průběhy příčného zrychlení (viz **Obr. 146**) a podélného zpomalení (viz **Obr. 147**) zjištěné simulačním modelováním pohybu vozidla při měření č. 47, které svými hodnotami odpovídají provedenému experimentu.





**Obr. 146:** Průběh příčného zrychlení v čase

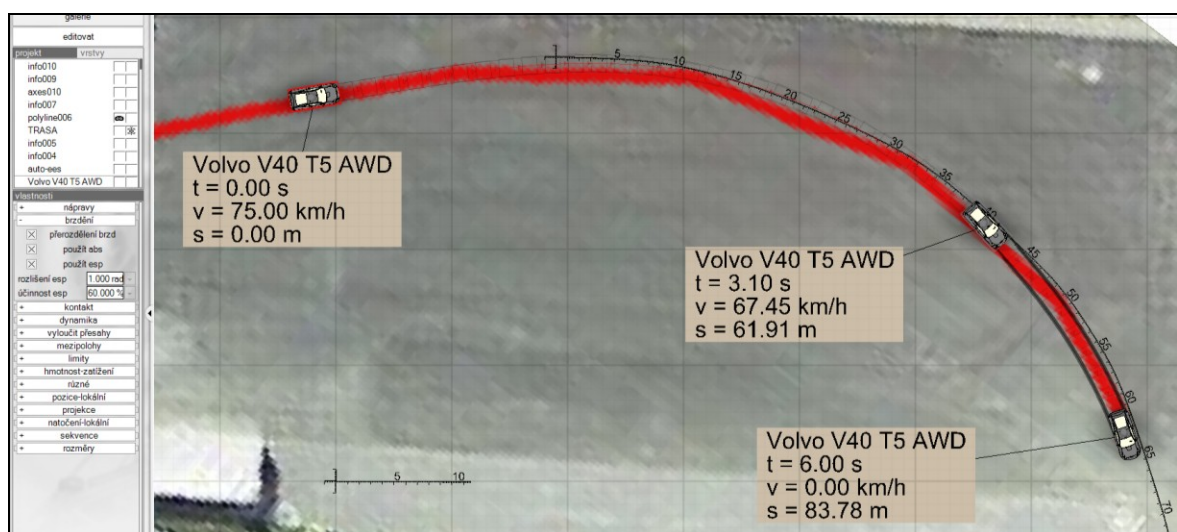


**Obr. 147:** Průběh podélného zpomalení v čase

### Simulační modelování experimentu č. 55 provedeného na polygonu DSD

a) se standardně přednastavenými hodnotami numerického modelu ESP

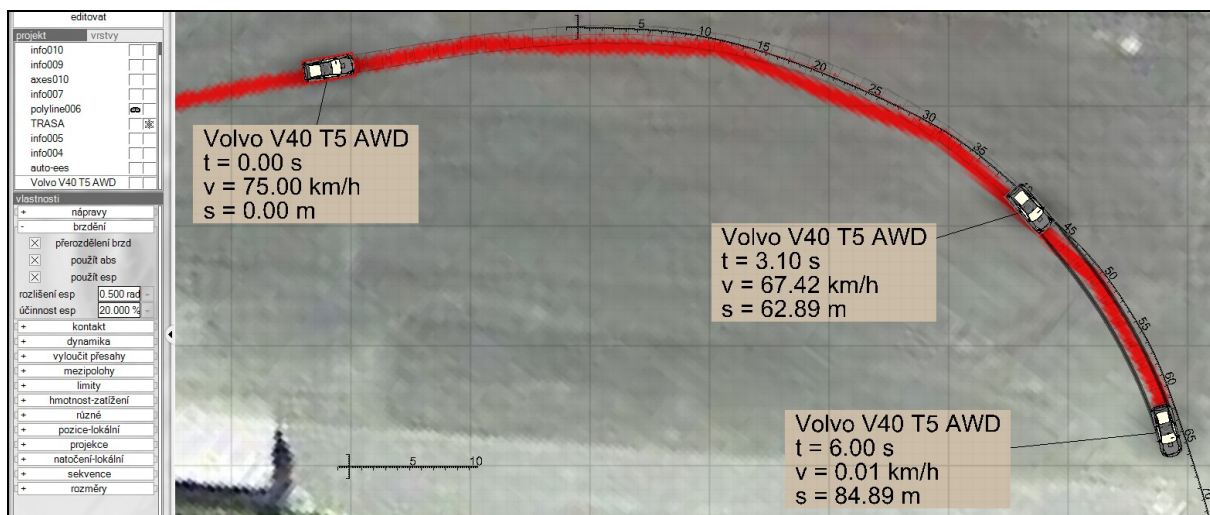
Na **Obr. 148** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 55, kdy v numerickém modelu ESP zůstaly standardně přednastavené hodnoty patrné z obrázku. V čase 0,0 s a rychlosti 75 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 3,1 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdit z rychlosti cca 67 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Po minimální korekci směru nastaveného řízení (pouze 0,5 °) a přidáním minimálního zpomalení vozidla (cca 0,3 m/s<sup>2</sup>) z výchozí polohy (tj. od času 0,0 s) je ze simulace zřejmé, že vozidlo dobře udržuje požadovaný směr jízdy a pohybuje se do experimentálně zjištěné konečné polohy. Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 8**, listu 77 až 85 této práce.



**Obr. 148:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 55, model ESP standardně přednastaven

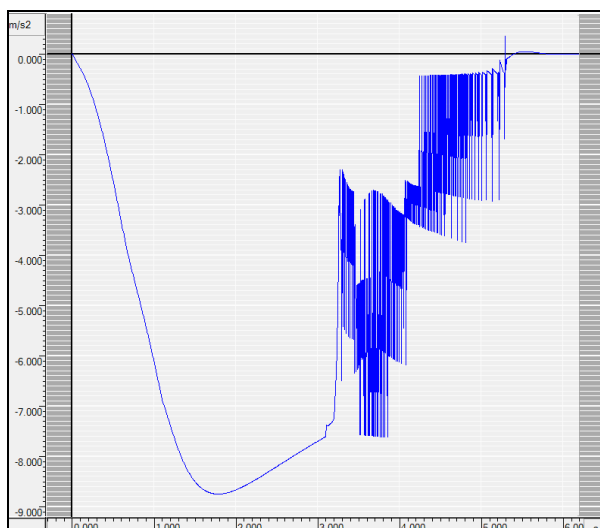
b) s ověřením nově nalezených hodnot vstupních parametrů numerického modelu ESP

Na **Obr. 149** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 55, kdy byly několikanásobně opakovanou simulací ověřovány nové hodnoty vstupních parametrů nastavení v numerickém modelu ESP, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla. V čase 0,0 s a rychlosti 75 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 3,1 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdit ze skutečné rychlosti cca 67 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Vozidlo na konci simulace zastaví ve skutečně experimentálně zjištěné konečné poloze. Několikanásobně opakovanou simulací byly ověřeny nové hodnoty vstupních parametrů nastavení numerického modelu ESP, a to hodnota stáčivé rychlosti 0,5 rad/s (tj. rozlišení ESP) a účinnost ESP 20 %. Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 8**, listu 86 až 93 této práce.

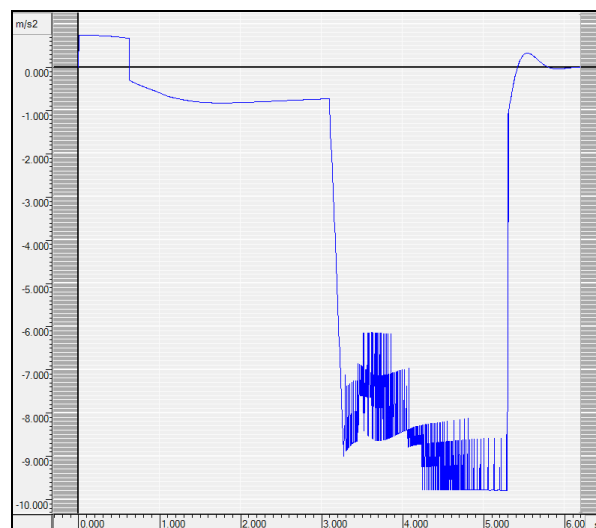


**Obr. 149:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 55, model ESP s novými hodnotami parametrů

Na následujících obrázcích jsou zobrazeny průběhy příčného zrychlení (viz **Obr. 150**) a podélného zpomalení (viz **Obr. 151**) zjištěné simulačním modelováním pohybu vozidla při měření č. 47, které svými hodnotami odpovídají provedenému experimentu.



**Obr. 150:** Průběh příčného zrychlení v čase



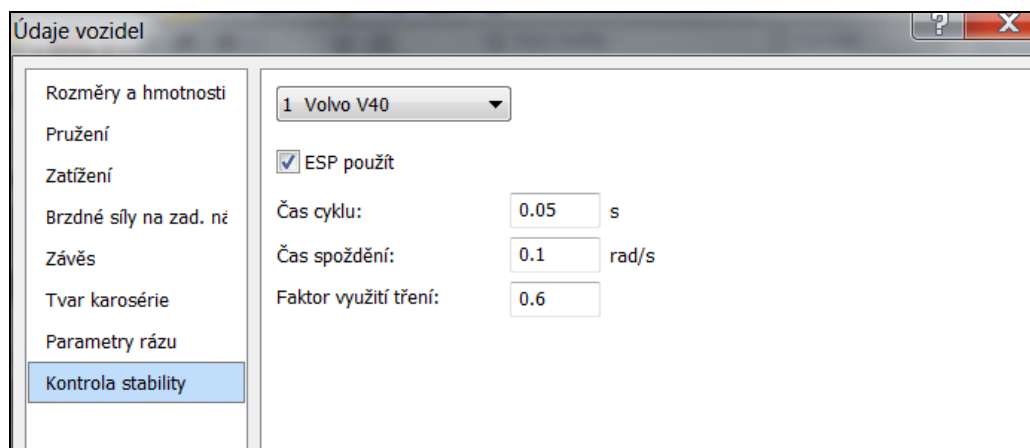
**Obr. 151:** Průběh podélného zpomalení v čase

### 6.3.2 Simulační modelování v počítačovém programu PC-Crash verze 9.1

Provedené jízdní experimenty na polygonu DSD v Rakousku rozebrané v kapitole 6.3.2 této práce, tj. experimentální měření parametrů jízdní dynamiky vozidla v oblouku č. 15, 34 a 47 byly při známých vstupních parametrech vozidla Volvo (viz příloha č. 5 této práce) a polygonu (viz kapitola 6.2.3.3 této práce) simulačně modelována v příslušných obloucích o poloměru 30, 40 a 50 m. Cílem provedených simulací bylo nalézt takové vstupní parametry numerického modelu stabilizačního systému ESP v simulačním programu, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla.

Před rozborem provedených simulací pohybu vozidla v oblouku je třeba nejprve uvést, jaké vstupní podstatné veličiny je třeba uživatelem (znalcem) zadat do výpočtového modelu ESP v simulačním programu PC-Crash verze 9.1. Vliv instalovaného stabilizačního systému skutečného vozidla lze v počítačovém simulačním programu zohlednit v záložce údaje vozidel, kontrola stability a zde je třeba zaškrtnout „ESP použít“ (viz Obr. 152). V simulačním programu PC-Crash verze 9.1 jsou standardně přednastaveny tři vstupní veličiny modelu ESP. Jedná se o hodnotu stáčivé rychlosti vozidla v [rad/s] (v programu označeno jako „čas zpoždění“), dále „čas cyklu“ [s] a „faktor využití tření“ [-]. Standardně jsou tyto hodnoty autorem programu přednastaveny tak, že hodnota stáčivé rychlosti vozidla („čas zpoždění“) je nastavena na 0,1 rad/s, čas cyklu 0,05 s a faktor využití tření 0,6. Při užití

těchto standardně přednastavených hodnot nebylo možno po zadání všech reálných vstupních parametrů simulace dosáhnout experimentálně zjištěného průběhu jízdní dynamiky vozidla při jízdě a brzdění v oblouku. Proto bylo třeba hledat takové vstupní veličiny modelu ESP v simulačním programu, které by odpovídaly reálnému pohybu vozidla ve vyšetřovaném ději v oblouku.



**Obr. 152:** Standardní nastavení systému ESP v programu PC-Crash verze 9.1

### 6.3.2.1 Simulační modelování pohybu vozidla v oblouku o poloměru 30 m

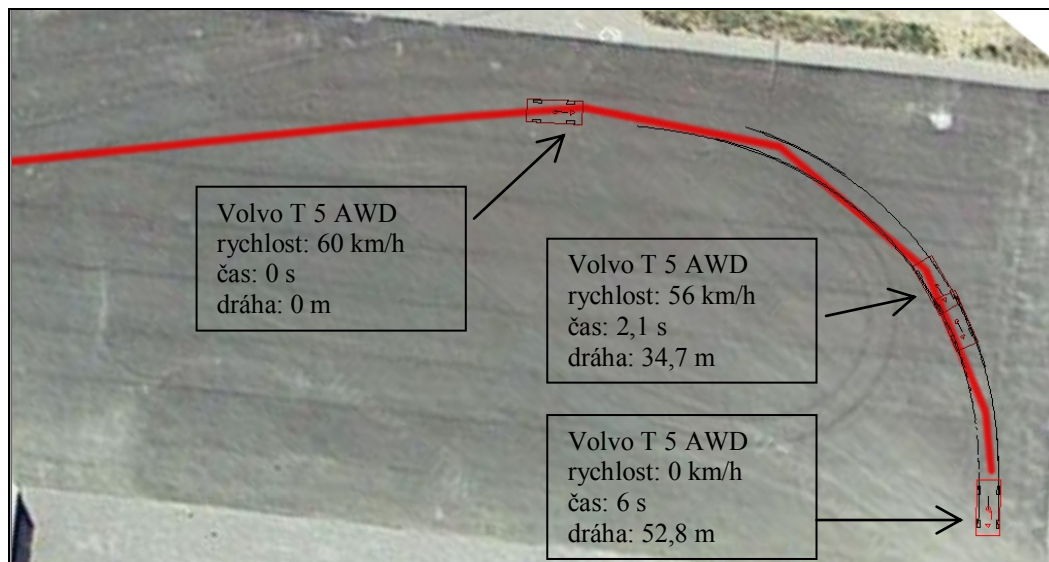
Počítačovou simulací byl na skutečném jízdním poloměru zrekonstruovaném z údajů DGPS simulačně modelován pohyb vozidla Volvo obloukem o poloměru 30 m na základě známých vstupních parametrů vozidla, polygonu a změřené jízdní dynamiky. Simulačně bylo modelováno měření č. 15. Pro vybrané měření byly simulačně modelovány dvě varianty pohybu vozidla v oblouku se zapnutým numerickým modelem systému ESP v simulačním programu. První varianta představovala pohyb vozidla daným obloukem při standardně přednastavených hodnotách numerického modelu ESP (viz **Obr. 152**). Při druhé variantě modelování bylo cílem několikanásobně opakovaných simulací nalézt takové vstupní parametry numerického modelu stabilizačního systému ESP v simulačním programu, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla.

#### **Simulační modelování experimentu č. 15 provedeného na polygonu DSD**

*a) se standardně přednastavenými hodnotami numerického modelu ESP*

Na **Obr. 153** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 15, kdy v numerickém modelu ESP zůstaly standardně přednastavené hodnoty. V čase 0,0 s a rychlosti 60 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,1 s od nájezdu do oblouku

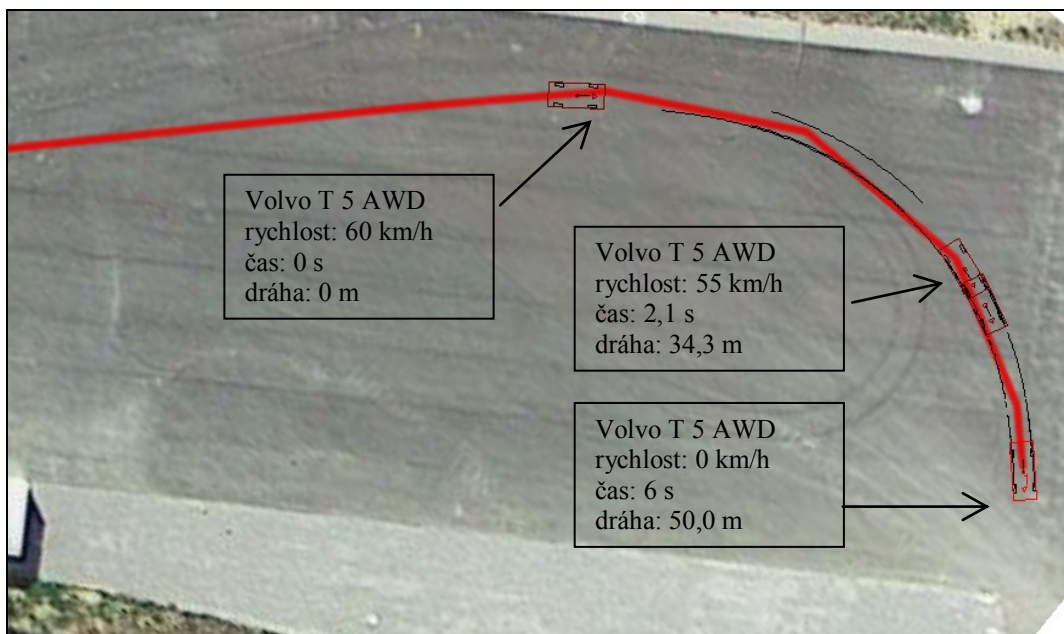
začíná vozidlo brzdit z rychlosti cca 56 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Vozidlo zastaví cca 3,0 m za skutečnou konečnou polohou (konec oblouku červenou čarou). Vozidlo udržuje dobrou směrovou stabilitu. Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 9**, listu 1 až 3 této práce.



**Obr. 153:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 15, model ESP standardně přednastaven  
b) s nově nalezenými hodnotami vstupních parametrů numerického modelu ESP

Na **Obr. 154** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 15, kdy byly několikanásobně opakovanou simulací hledány nové hodnoty vstupních parametrů nastavení v numerickém modelu ESP, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla. V čase 0,0 s a rychlosti 60 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,1 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdit ze skutečné rychlosti cca 55 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Vozidlo na konci simulace zastaví ve skutečně experimentálně zjištěné konečné poloze. Několikanásobně opakovanou simulací byly nalezeny nové hodnoty vstupních parametrů nastavení numerického modelu ESP, a to hodnota stáčivé rychlosti 0,1 rad/s (tj. čas zpoždění), čas cyklu 0,01 s a faktor využití tření 1,0. Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 9**, listu 4 až 6 této práce.



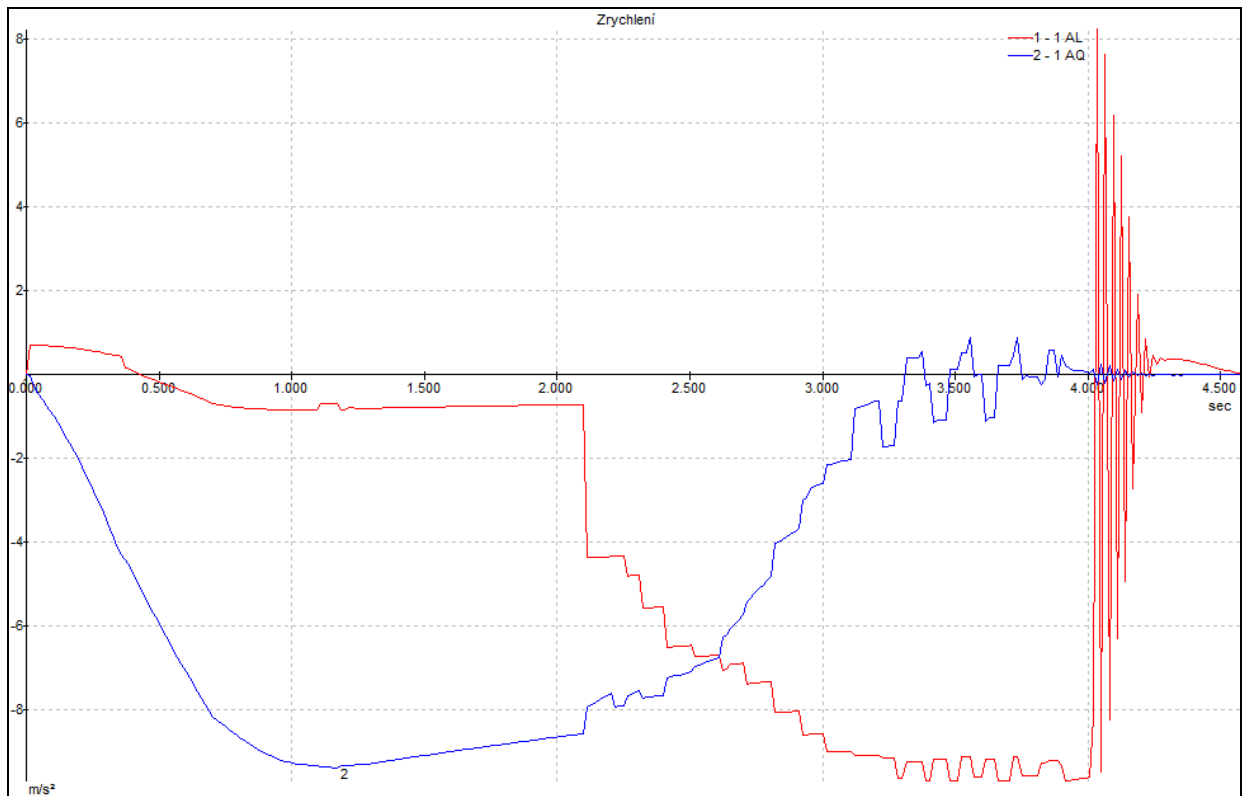


**Obr. 154:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 15, model ESP s novými hodnotami parametrů

Údaje vozidel	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Rozměry a hmotnosti</li> <li>Pružení</li> <li>Zatížení</li> <li>Brzdné síly na zad. nář.</li> <li>Závěs</li> <li>Tvar karosérie</li> <li>Parametry rázu</li> <li><b>Kontrola stability</b></li> </ul>	<p>1 Volvo V40</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> ESP použit</p> <p>Čas cyklu: 0.01 s</p> <p>Čas spoždění: 0.1 rad/s</p> <p>Faktor využití tření: 1</p>

**Obr. 155:** Nové hodnoty pro nastavení numerického modelu ESP v programu PC-Crash v. 9.1

Na následujícím **Obr. 156** jsou zobrazeny průběhy příčného zrychlení (modře) a podélného zpomalení (červeně) zjištěné simulačním modelováním pohybu vozidla při měření č. 15, které svými hodnotami odpovídají provedenému experimentu.



**Obr. 156:** Průběh příčného zrychlení (modře) a podélného zpomalení (červeně) v čase

### 6.3.2.2 Simulační modelování pohybu vozidla v oblouku o poloměru 40 m

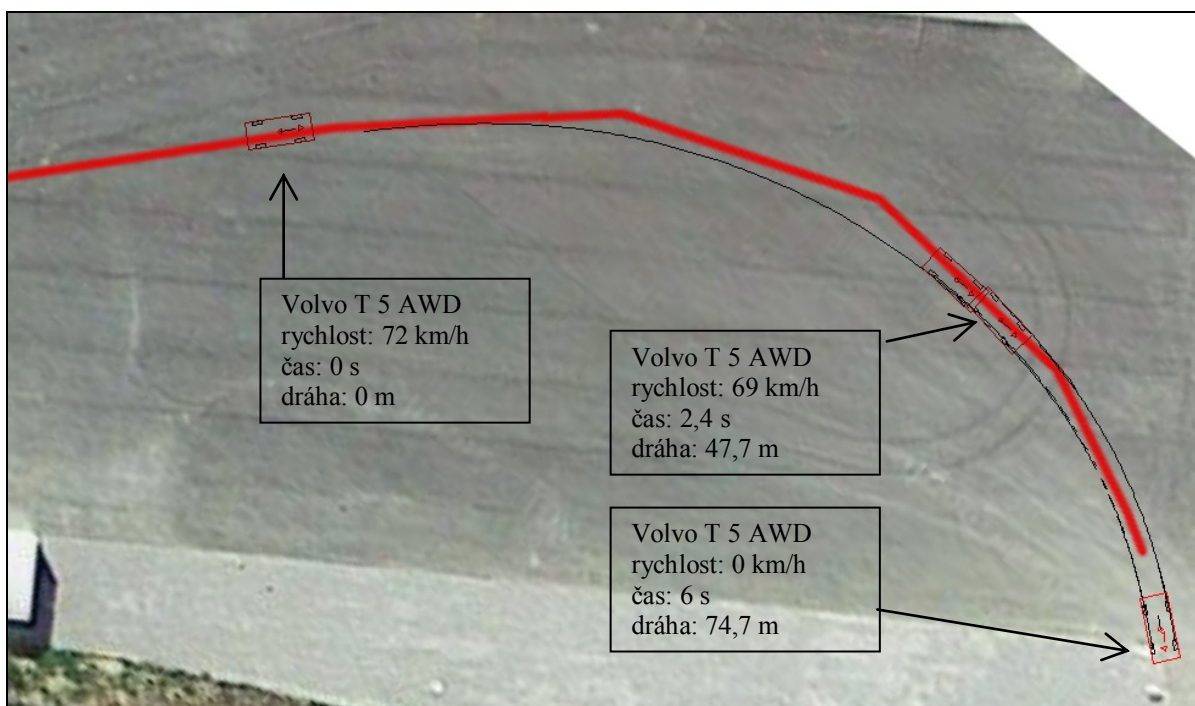
Počítačovou simulací byl na skutečném jízdním poloměru zrekonstruovaném z údajů DGPS simulačně modelován pohyb vozidla Volvo obloukem o poloměru 40 m na základě známých vstupních parametrů vozidla, polygonu a změřené jízdní dynamiky. Simulačně bylo modelováno měření č. 34. Pro vybrané měření byly simulačně modelovány dvě varianty pohybu vozidla v oblouku se zapnutým numerickým modelem systému ESP v simulačním programu. První varianta představovala pohyb vozidla daným obloukem při standardně přednastavených hodnotách numerického modelu ESP (viz **Obr. 152**). Při druhé variantě modelování bylo cílem několikanásobně opakovaných simulací nalézt takové vstupní parametry numerického modelu stabilizačního systému ESP v simulačním programu, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla.



### **Simulační modelování experimentu č. 34 provedeného na polygonu DSD**

*a) se standardně přednastavenými hodnotami numerického modelu ESP*

Na **Obr. 157** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 34, kdy v numerickém modelu ESP zůstaly standardně přednastavené hodnoty. V čase 0,0 s a rychlosti 72 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,4 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdit z rychlosti cca 69 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Vozidlo zastaví cca 5,0 m za skutečnou konečnou polohou (konec oblouku červenou čarou), ale udržuje dobrou směrovou stabilitu. Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 9**, listu 7 až 9 této práce.

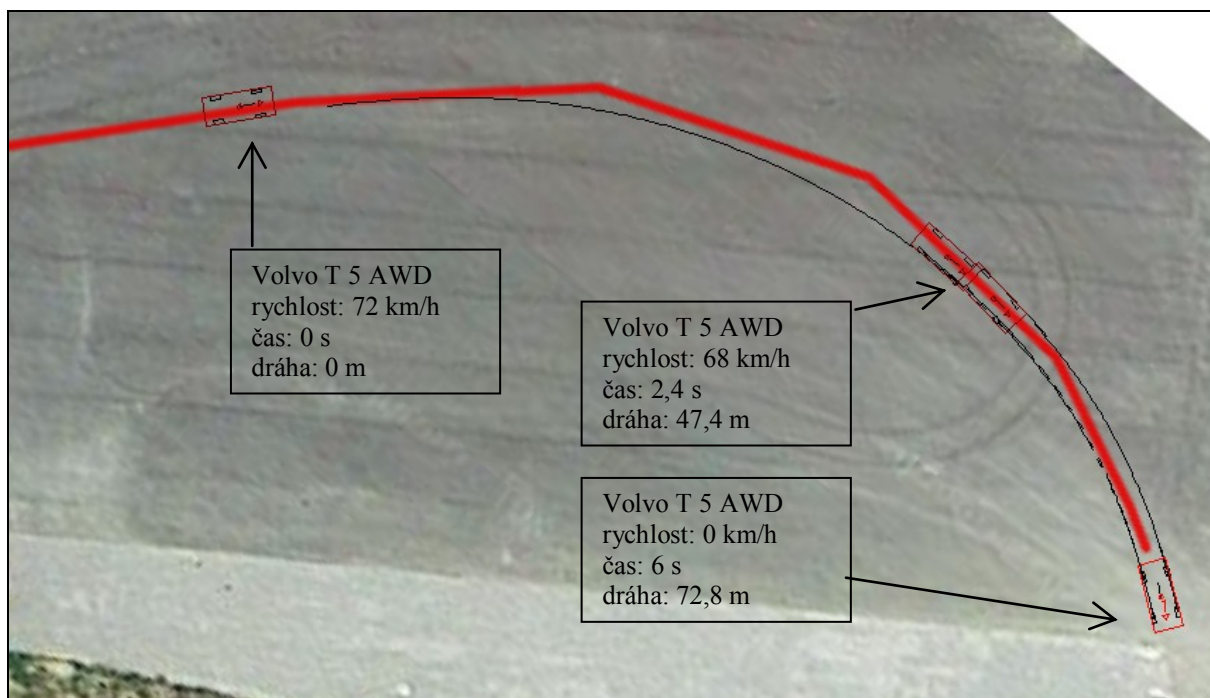


**Obr. 157:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 34, model ESP standardně přednastaven

*b) s nově nalezenými hodnotami vstupních parametrů numerického modelu ESP*

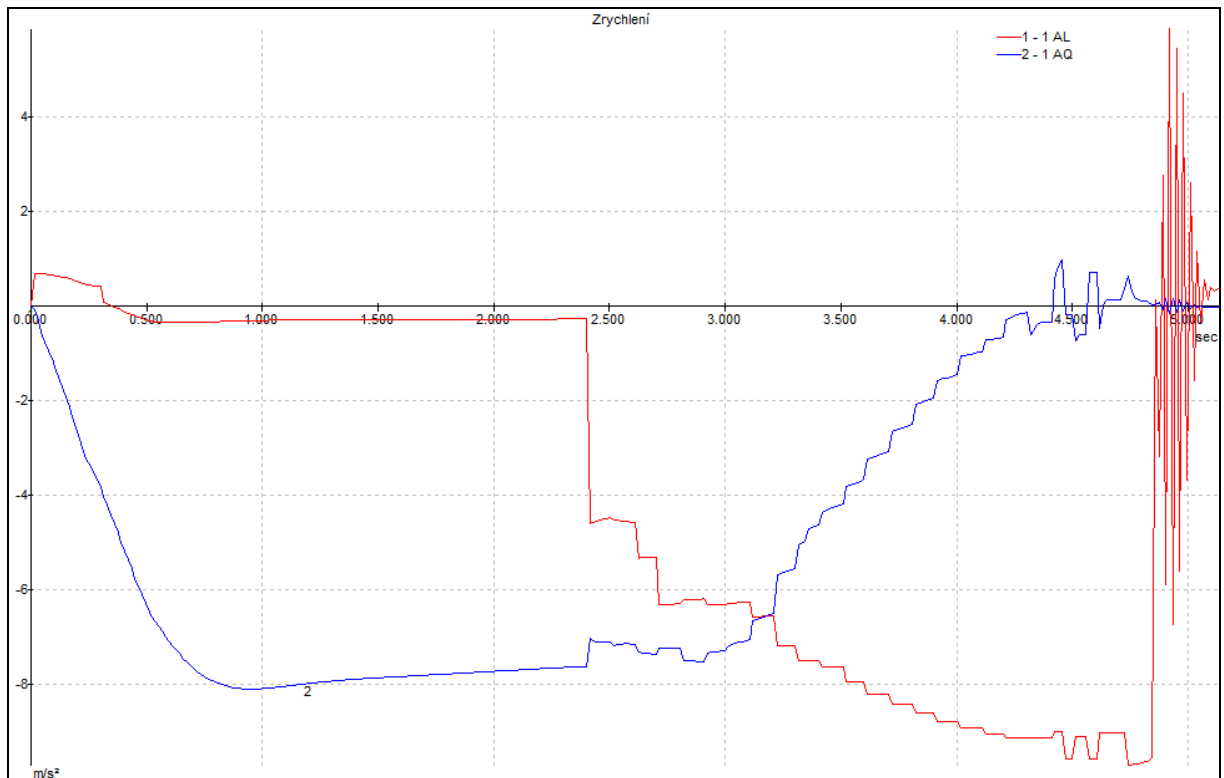
Na **Obr. 158** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 34, kdy byly několikanásobně opakovanou simulací hledány nové hodnoty vstupních parametrů nastavení v numerickém modelu ESP, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla. V čase 0,0 s a rychlosti 72 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,4 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdit z rychlosti cca 68 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Vozidlo na konci simulace zastaví ve skutečně experimentálně zjištěné konečné poloze. Několikanásobně opakovanou simulací byly nalezeny nové hodnoty vstupních parametrů nastavení numerického modelu

ESP, a to hodnota stáčívé rychlosti 0,1 rad/s (tj. čas zpoždění), čas cyklu 0,01 s a faktor využití tření 1,0. Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 9**, listu 10 až 12 této práce.



**Obr. 158:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 34, model ESP s novými hodnotami parametrů

Na následujícím **Obr. 159** jsou zobrazeny průběhy příčného zrychlení (modře) a podélného zpomalení (červeně) zjištěné simulačním modelováním pohybu vozidla při měření č. 34, které svými hodnotami odpovídají provedenému experimentu.



**Obr. 159:** Průběh příčného zrychlení (modře) a podélného zpomalení (červeně) v čase

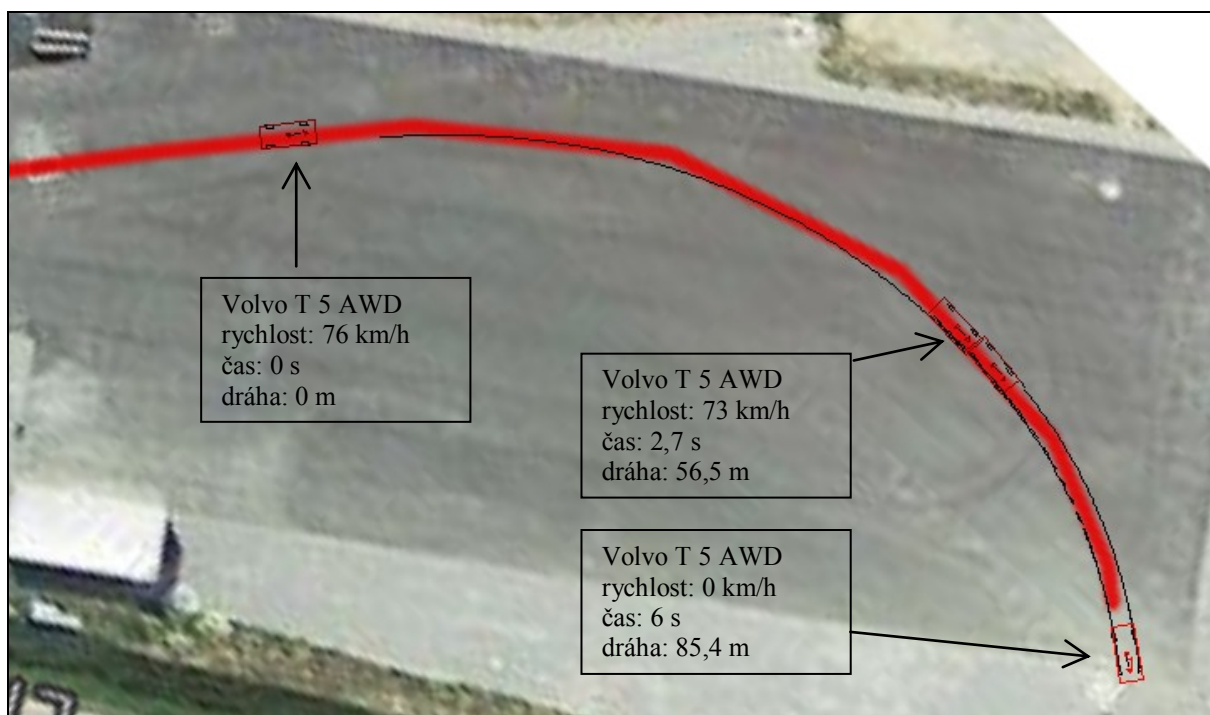
### 6.3.2.3 Simulační modelování pohybu vozidla v oblouku o poloměru 50 m

Počítačovou simulací byl na skutečném jízdním poloměru zrekonstruovaném z údajů DGPS simulačně modelován pohyb vozidla Volvo obloukem o poloměru 50 m na základě známých vstupních parametrů vozidla, polygonu a změřené jízdní dynamiky. Simulačně bylo modelováno měření č. 47. Pro vybrané měření byly simulačně modelovány dvě varianty pohybu vozidla v oblouku se zapnutým numerickým modelem systému ESP v simulačním programu. První varianta představovala pohyb vozidla daným obloukem při standardně přednastavených hodnotách numerického modelu ESP (viz **Obr. 152**). Při druhé variantě modelování bylo cílem několikanásobně opakovaných simulací nalézt takové vstupní parametry numerického modelu stabilizačního systému ESP v simulačním programu, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla.

### **Simulační modelování experimentu č. 47 provedeného na polygonu DSD**

a) se standardně přednastavenými hodnotami numerického modelu ESP

Na **Obr. 160** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 47, kdy v numerickém modelu ESP zůstaly standardně přednastavené hodnoty. V čase 0,0 s a rychlosti 76 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,7 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdit z rychlosti cca 73 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Vozidlo zastaví cca 4,0 m za skutečnou konečnou polohou (konec oblouku červenou čarou), ale udržuje dobrou směrovou stabilitu. Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v **příloze č. 9**, listu 13 až 15 této práce.

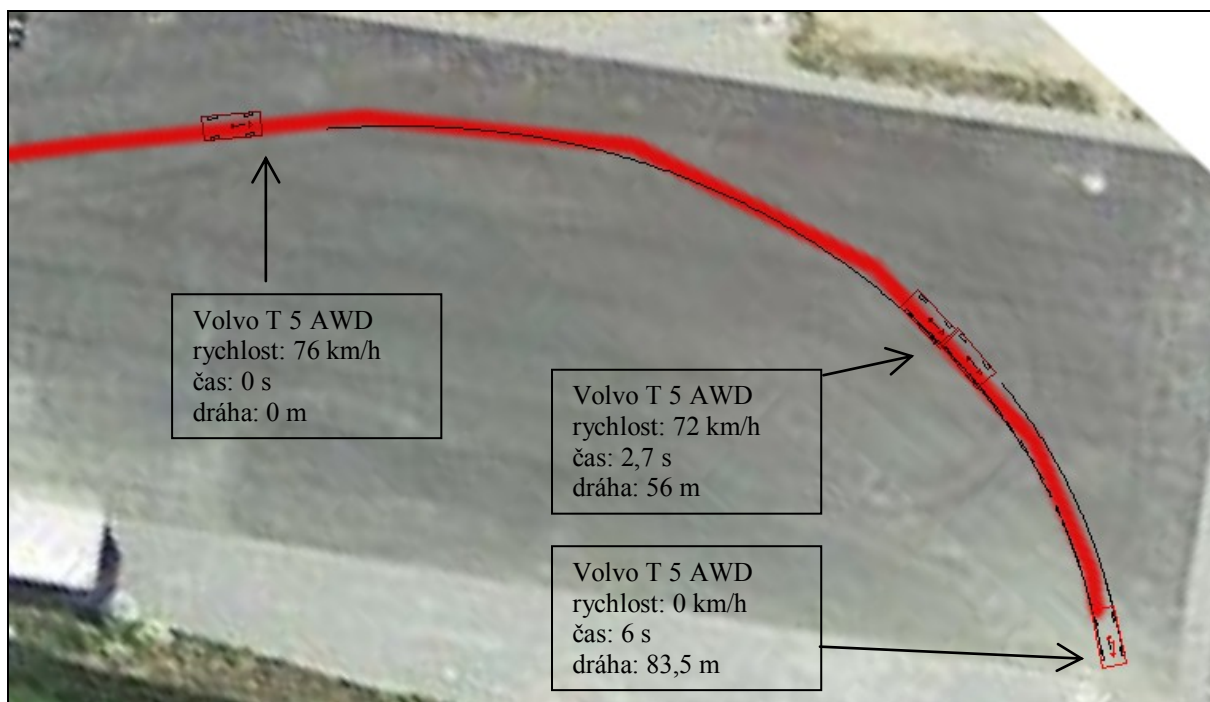


**Obr. 160:** Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 47, model ESP standardně přednastaven

b) s nově nalezenými hodnotami vstupních parametrů numerického modelu ESP

Na **Obr. 161** je uvedena jízda a brzdění vozidla v oblouku při experimentu č. 47, kdy byly několikanásobně opakovanou simulací hledány nové hodnoty vstupních parametrů nastavení v numerickém modelu ESP, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla. V čase 0,0 s a rychlosti 76 km/h najíždí vozidlo do oblouku. V čase cca 2,7 s od nájezdu do oblouku začíná vozidlo brzdit z rychlosti cca 72 km/h s maximálním zpomalením do zastavení. Vozidlo na konci simulace zastaví ve skutečně experimentálně zjištěné konečné poloze. Několikanásobně opakovanou simulací byly nalezeny nové hodnoty vstupních parametrů nastavení numerického modelu

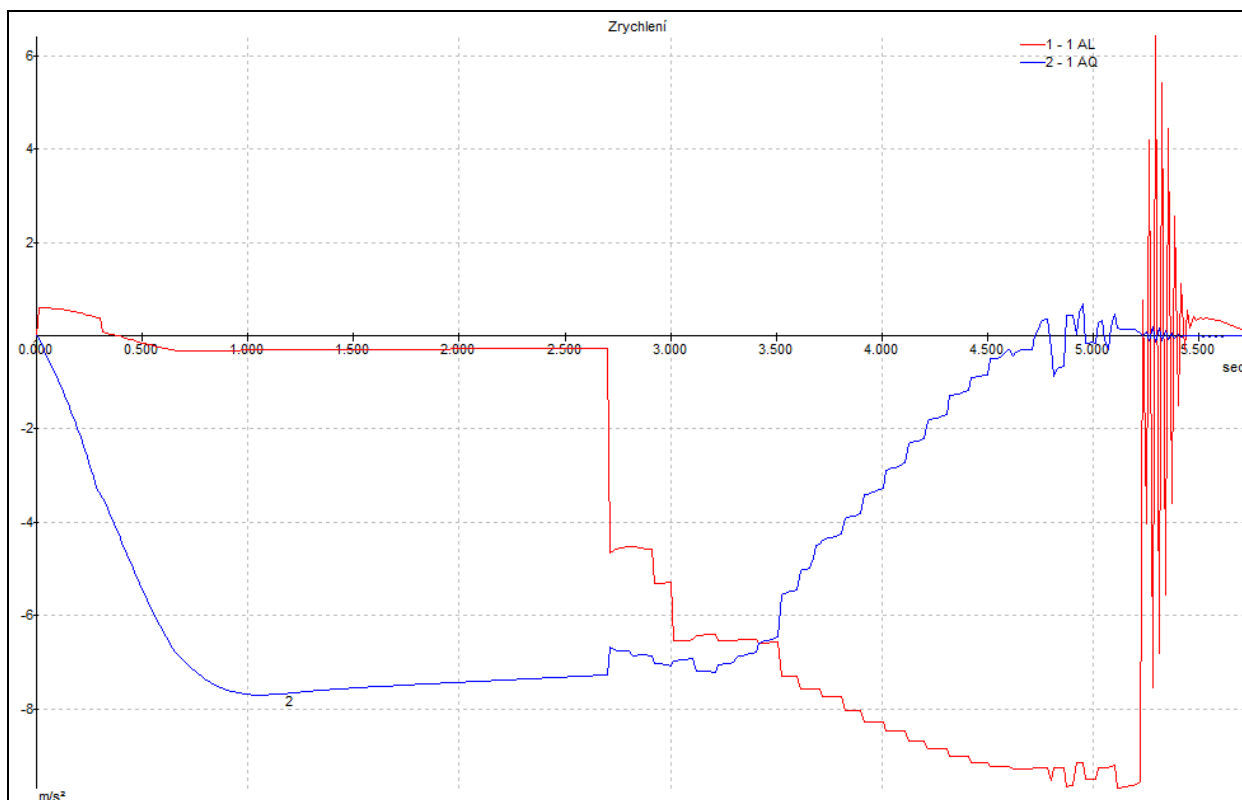
ESP, a to hodnota stáčívé rychlosti 0,1 rad/s (tj. čas zpoždění), čas cyklu 0,01 s a faktor využití tření 1,0. Parametry výpočtu počítačové simulace jsou uvedeny v příloze č. 9, listu 16 až 18 této práce.



*Obr. 161: Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 47, model ESP s novými hodnotami parametrů*

Na následujícím **Obr. 162** jsou zobrazeny průběhy příčného zrychlení (modře) a podélného zpomalení (červeně) zjištěné simulačním modelováním pohybu vozidla při měření č. 47, které svými hodnotami odpovídají provedenému experimentu.





**Obr. 162:** Průběh příčného zrychlení (modře) a podélného zpomalení (červeně) v čase

### 6.3.3 Shrnutí a vyhodnocení výsledků simulačního modelování

V předchozích dvou podkapitolách této práce byly simulačně modelovány experimenty provedené s vozidlem Volvo na polygonu v Rakousku. V počítačovém simulačním programu Virtual CRASH v. 3.0 bylo simulačně modelováno celkem 12 experimentálních měření, z čehož 6 měření bylo modelováno se standardně přednastavenými hodnotami vstupních parametrů numerického modelu ESP. V dalších simulačně modelovaných průjezdech vozidla oblouky byly nalezeny takové vstupní parametry numerického modelu stabilizačního systému ESP v simulačním programu, aby simulačně modelovaný pohyb vozidla v oblouku odpovídal skutečně experimentálně zjištěnému průjezdu a brzdění vozidla Volvo v oblouku při odpovídajících parametrech jízdní dynamiky vozidla. Nutno dodat, že i s ohledem na okomentované výsledky vyhodnocených experimentálních měření, zřejmě nebyla s vozidlem Volvo v oblouku o poloměru 50 m nalezena úplná hranice stability, kdy by stabilizační systém musel velmi intenzívně zasahovat, jako v obloucích o poloměru 30 a 40 m. Proto se vozidlo Volvo při jízdách v oblouku o poloměru 50 m chovalo velmi stabilně.

Na základě provedených simulačně modelovaných průjezdů a brzdění vozidla Volvo definovanými oblouky byla zjištěna vysoká citlivost numerického modelu ESP simulačního

programu Virtual CRASH v. 3.0 na nastavení hodnoty „účinnosti ESP“. V případě standardně přednastavené hodnoty 60 % se vozidlo v okamžicích intenzivních zásahů ESP na hranici stability dostává spíše do smyku a paradoxně ztrácí směrovou stabilitu a pohybuje se po tečně ven z oblouku. Několikanásobně opakovanými simulacemi byly nalezeny a ověřeny nové hodnoty vstupních parametrů nastavení numerického modelu ESP pro dané průjezdy oblouky, a to hodnota stáčivé rychlosti v rozmezí 0,4 až 0,5 rad/s (tj. rozlišení ESP) a účinnost ESP v rozmezí 15 až 20 % (viz **Tabulka 21**).

**Tabulka 21:** Standardní a nové nastavení modelu ESP v programu Virtual CRASH v. 3.0

Vstupní veličina modelu ESP v simulačním programu	Standardní nastavení modelu ESP autorem programu	Nové nastavení pro definované průjezdy oblouky
Rozlišení ESP [rad/s] (stáčivá rychlost)	1,0	0,4 až 0,5
Účinnost ESP [%]	60	15 až 20

Simulačně modelovanými experimenty v počítačovém programu PC-Crash v. 9.1 bylo zjištěno velmi dobré směrové chování vozidla při jízdě a brzdění definovanými oblouky. Se standardně přednastavenými hodnotami vstupních parametrů numerického modelu ESP pro dané průjezdy oblouky byly zjištěny zejména delší dráhy pro zastavení vozidla, jinak se vozidlo chovalo směrově stabilně. Několikanásobně opakovanými simulacemi byly nalezeny a ověřeny nové hodnoty vstupních parametrů nastavení numerického modelu ESP, a to hodnota stáčivé rychlosti 0,1 rad/s (tj. „čas zpoždění“), dále „čas cyklu“ 0,01 s a „faktor využití tření“ 1,0 (viz **Tabulka 22**).

**Tabulka 22:** Standardní a nové nastavení modelu ESP v programu PC-Crash v. 9.1

Vstupní veličina modelu ESP v simulačním programu	Standardní nastavení modelu ESP autorem programu	Nové nastavení pro definované průjezdy oblouky
Čas cyklu [s]	0,05	0,01
Čas zpoždění [rad/s] (stáčivá rychlost)	0,1	0,1
Faktor využití tření [-]	0,6	1,0



## 7 Závěr a přínos práce pro vědní obor Soudní inženýrství

Za prvotní přínos této práce lze označit analyzovaný a kvantifikovaný vliv elektronického stabilizačního systému na jízdní dynamiku všech zkoušených vozidel, tj. VW Golf V., Škoda Superb II, Škoda Octavia II a Volvo V40 T5 AWD ve vyšetřovaném ději v oblouku.

Při dynamicky nejextrémnějších průjezdech při příčném přemístění vozidla Škoda Superb II s aktivovaným systémem ESP dvěma oblouky byly zjištěny maximální hodnoty stáčivé rychlosti nepřekračující 45 °/s, resp. 0,8 rad/s. První zřetelný okamžik zásahu stabilizačního systému ESP do jízdní dynamiky vozidla byl zjištěn při bočním zrychlení vozidla cca 7,8 m/s<sup>2</sup> a stáčivé rychlosti 22 °/s, resp. 0,4 rad/s. Při hodnotách stáčivé rychlosti vozidla Škoda Superb od 22 do 45 °/s, resp. 0,4 do 0,8 rad/s a bočního zrychlení 7,8 až 9,0 m/s<sup>2</sup> docházelo k intenzívním zásahům systému ESP do jízdní dynamiky vozidla za účelem zachování jízdní stability a zaručení požadovaného směru jízdy řidičem.

Při kruhových zkouškách vozidla Škoda Octavia II se hodnoty stáčivé rychlosti vozidla při zásazích elektronického stabilizačního systému ESP pohybovaly nejčastěji v rozmezí 17 až 27 °/s, resp. 0,3 až 0,5 rad/s. Nejvyšší dosažená hodnota stáčivé rychlosti 40 °/s, resp. 0,7 rad/s vozidla Škoda Octavia II byla zaznamenána při nejdynamičtějším průjezdu při měření č. M2, kdy se vozidlo při kruhové zkoušce již pohybovalo na hranici smyku se zanecháním smykových stop „pískajících“ pneumatik.

Z analyzovaných experimentů jízdy a brzdění vozidla Volvo V40 v definovaných obloucích vyplynulo, že při všech experimentálních měřeních parametrů jízdní dynamiky se stáčivá rychlost vozidla Volvo vybaveného stabilizačním systémem DSTC pohybovala v rozmezí hodnot 0,4 až 0,6 rad/s. Je tedy zřejmé, že stabilizační systém vozidla pracoval tak, aby se stáčivá rychlost vozidla nedostala do hodnot vyšších než 0,6 rad/s.

Ze všech analyzovaných experimentálních měření v rámci této dizertační práce vyplynulo, že hodnota stáčivé rychlosti vozidla vybaveného stabilizačním systémem jízdní dynamiky nepřekročí 0,8 rad/s. První zásahy stabilizačního systému do jízdní dynamiky byly experimentálně vyšetřeny při hodnotě stáčivé rychlosti 0,3 rad/s. Největší četnost zásahů stabilizačního systému byla zjištěna v rozmezí hodnot stáčivé rychlosti 0,4 až 0,6 rad/s. **Tabulka 23** shrnuje zjištěné hodnoty stáčivé rychlosti u zkoušených vozidel v okamžicích detekce zásahů ESP s tím, že horní hranice rozmezí je zároveň hodnotou stáčivé rychlosti,

kterou stabilizační systém vozidlu již „nedovolí“ překonat z důvodu zajištění jeho směrové stability.

**Tabulka 23:** Zjištěné rozmezí hodnot stáčivé rychlosti vozidla při zásahu ESP

Parametr \ vozidlo	Škoda Superb II	Škoda Octavia II	Volvo V40 T5 AWD
Stáčivá rychlost [rad/s]	0,4 až 0,8	0,3 až 0,7	0,4 až 0,6

Experimentálně zjištěná hodnota stáčivé rychlosti vozidla vybaveného stabilizačním systémem je přínosem této práce, protože se jedná o nově nalezenou hodnotu podstatné veličiny pro nastavení numerického modelu ESP v počítačových simulačních programech.

Vliv elektronického stabilizačního systému na jízdní dynamiku vozidla Škoda Octavia II v oblouku byl také zřetelně prokázán experimentálně zjištěnou změnou obvodové rychlosti jednotlivých kol při zásazích systému ESP v rozmezí od 0 až do 40 km/h. Z jednotlivých změn obvodové rychlosti kol vozidla při kruhových zkouškách vozidla Škoda Octavia II je patrné, že převážná většina hodnot změny obvodové rychlosti kol při zásazích ESP se nacházela v rozmezí od 2 do 8 km/h, vyjma kruhové zkoušky č. M2, kdy se řidič s vozidlem snažil pohybovat obloukem maximální rychlostí, kterou systém ESP vozidlu umožnil, a proto se hodnoty změny rychlosti otáčení kol vozidla pohybovaly v širším rozmezí od 2 do 18 km/h. Popsanými zásahy elektronického stabilizačního systému prostřednictvím přibrzdění příslušných kol do jízdní dynamiky vozidla docházelo vždy k zajištění směrové stability vozidla v oblouku.

Pro technickou analýzu silničních nehod za účasti vozidel vybavených elektronickými stabilizačními systémy lze za významný přínos této práce považovat stanovení nového koeficientu tzv. Kovaříkova vzorce pro výpočet nejkratší doby příčného přemístění dvěma oblouky pro vozidla vybavená elektronickými stabilizačními systémy v rozmezí hodnot 2,6 až 2,7 (podrobně viz kapitola 6.2.2.1.4 této práce). Z praktického ověření, experimentem i reálným provozem, nového koeficientu podle vztahu (28) byla prokázána jeho vhodnost použití pro výpočet nejkratší doby příčného přemístění dvěma oblouky vozidel vybavených elektronickými stabilizačními systémy. Tento nový koeficient může být ihned využíván ve znalecké praxi při analýze příčného přemístění dvěma oblouky vozidla vybaveného stabilizačním systémem.

Analýzou experimentálně zjištěné rychlosti průjezdu vozidla obloukem a analyticky stanovenou mezní rychlostí byla zjištěna dobrá shoda ( $\pm 10\%$ ) obou použitých metod řešení problematiky pohybu vozidla v oblouku, tj. experimentu a analytického výpočtu, za nutné podmínky dosažení správné hodnoty součinitele adheze v příčném směru do odvozeného vztahu (20) pro analytický výpočet mezní rychlosti vozidla v oblouku. Z provedených experimentů vyplynulo, že moderní vozidlo vybavené stabilizačním systémem, pohonem všech kol a v neposlední řadě kvalitními pneumatikami se v definovaných obloucích dokázalo pohybovat s poměrně vysokou hodnotou využitelného součinitele adheze v příčném směru. Z výsledků provedených experimentů, resp. ze zjištěných hodnot příčného zrychlení vozidla se stabilizačním systémem byly stanoveny podle hodnoceného způsobu jízdy posádkou i vnějším pozorovatelem hodnoty využitelného součinitele adheze v příčném směru pro rychlou jízdu 0,50 až 0,60, pro sportovní jízdu 0,70 až 0,80 a pro kritickou jízdu 0,85 až 0,95. Tyto hodnoty využitelného součinitele adheze v příčném směru mohou být ihned efektivně aplikovány ve znalecké praxi při řešení pohybu vozidla se stabilizačním systémem v oblouku.

Z analyzovaných průběhů podélného zpomalení při brzdění vozidla Volvo V40 v jednotlivých obloucích je zřejmé, že dosahované využitelné hodnoty podélného zpomalení při brzdění v oblouku přibližně odpovídají hodnotám dosahovaného příčného zrychlení v daném oblouku, z adhezní elipsy se v podstatě stává kružnice přilnavosti. Z experimentálních měření vyplynulo, že využitelný součinitel adheze v příčném směru se u vozidla vybaveného stabilizačním systémem velmi přibližuje využitelné hodnotě součinitele adheze ve směru podélném při jízdě a brzdění vozidla v oblouku.

Simulačně modelovanými průjezdy a brzdění vozidla Volvo definovanými oblouky byla zjištěna vysoká citlivost numerického modelu ESP simulačního programu Virtual CRASH v. 3.0 na nastavení hodnoty „účinnosti ESP“. V případě standardně přednastavené hodnoty 60 % se vozidlo v okamžicích intenzivních zásahů ESP na hranici stability dostává spíše do smyku a paradoxně ztrácí směrovou stabilitu a pohybuje se po tečně ven z oblouku. Několikanásobně opakovanými simulacemi byly nalezeny a ověřeny nové hodnoty vstupních parametrů nastavení numerického modelu ESP pro dané průjezdy oblouky, a to hodnota stáčivé rychlosti v rozmezí 0,4 až 0,5 rad/s (tj. „rozlišení ESP“) a „účinnost ESP“ v rozmezí 15 až 20 % (viz **Tabulka 21**). Tyto nové vstupní hodnoty pro nastavení numerického modelu ESP jsou přínosem zejména pro znalce z oboru doprava využívající

počítačový simulační program Virtual CRASH v. 3.0 jako podpůrný nástroj komplexní analýzy nehodového děje.

Simulačně modelovanými experimenty v počítačovém programu PC-Crash v. 9.1 bylo zjištěno velmi dobré směrové chování vozidla při jízdě a brzdění definovanými oblouky. Se standardně přednastavenými hodnotami vstupních parametrů numerického modelu ESP pro dané průjezdy oblouky byly zjištěny zejména delší dráhy pro zastavení vozidla, jinak se vozidlo chovalo vcelku směrově stabilně. Za další přínos této práce lze tedy považovat nalezení a ověření několikanásobně opakovanými simulacemi nových hodnot vstupních parametrů nastavení numerického modelu ESP programu PC-Crash, a to hodnoty stáčivé rychlosti 0,1 rad/s (tj. „čas zpoždění“), dále „času cyklu“ 0,01 s a „faktoru využití tření“ 1,0 (viz **Tabulka 22**). Tyto nové vstupní hodnoty pro nastavení numerického modelu ESP jsou přínosem zejména pro znalce z oboru doprava využívající počítačový simulační program PC-Crash jako podpůrný nástroj komplexní analýzy nehodového děje.

Diskutované výsledky této dizertační práce, podložené experimentálními měřeními a analytickými výpočty, jsou nenahraditelným přínosem pro vědní obor Soudní inženýrství, zjevně rozšiřují vědní poznání v oblasti jízdy a brzdění vozidla v oblouku.

Výsledky této práce jsou také neopomenutelným přínosem pro pedagogickou činnost, již dnes jsou využívány při výuce v navazujícím magisterském studijním programu Soudní inženýrství, oboru Expertní inženýrství v dopravě, v předmětech Teorie vozidel a Zkoušení vozidel a dále v kurzech CŽV na Ústavu soudního inženýrství VUT v Brně při výuce budoucích znalců v oboru doprava.

Závěrem je třeba doplnit, že nesprávnou reakcí řidiče na zásah asistenčního systému vozidla (např. ABS, ESP) se může řidič s vozidlem kritické jízdní situaci svévolně přibližovat. Proto je z aktuálního pohledu výuky a výcviku budoucích řidičů v autoškolách nutné začínající řidiče nejen teoreticky proškolit o funkci a významu asistenčních systémů vozidla, ale prakticky při jízdách zkoušek nejlépe na zkušební dráze budoucí řidiče s těmito systémy podvozku a jejich chováním (zásahy) seznámit.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] JANIČEK, Přemysl. *Systémová metodologie: Brána do řešení problémů*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014, 1 sv. ISBN 978-80-7204-887-8.
- [2] BURG, Heinz, RAU, Hartmut. *Handbuch der Verkehrsunfall-Rekonstruktion*, Verlag INFORMATION Ambs GmbH, Kippenheim: 1981. ISBN 3 88550 020 5.
- [3] BURG, Heinz, MOSER, Andreas. *Handbuch Verkehrsunfall-rekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation*. 2. vyd. Wiesbaden: Vieweg Teubner, 2009. 1032 s. ISBN 978-3-8348-0546-1.
- [4] BURG, Heinz, MOSER, Andreas. *Handbuch Verkehrsunfall-rekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation*. 1. vyd. Wiesbaden: Vieweg Teubner, 2007. 952 s. ISBN 978-3-8348-0172-2.
- [5] BURG, Heinz, MOSER, Andreas. *Handbook of Accident Reconstruction: Accident investigation, Vehicle dynamics, Simulation*. 1st ed. Washington: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014. 475 s. ISBN 978-149-2328-421.
- [6] WEN-XING ZHU, LI-DONG ZHANG. *Friction coefficient and radius of curvature effects upon traffic flow on a curved Road*. In *Physica A* 391, p.4597–4605. 2012.
- [7] GEETIMUKTA MAHAPATRA, AKHILESH KUMAR MAURYA. *Study of vehicles lateral movement in non-lane discipline traffic stream on a straight road*. In *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. No.104, p. 352 – 359. 2013.
- [8] MALCOLM L. RITCHIE, WILLIAM K. MCCOY, AND WILLIAM L. WELDE. *A Study of the Relation between Forward velocity and Lateral Acceleration in Curves during Normal Driving*. In *The Journal of Human Factors and Ergonomics Society*. 1968.
- [9] BRANDON P. STODART, ERIC T. DONNELL. *Speed and Lateral Vehicle Position Models from Controlled Nighttime Driving Experiment*. In *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 134, No.11. 2008.
- [10] DANIEL WESEMEIER, ROLF ISERMANN. *Identification of vehicle parameters using stationary driving maneuvers*. In *Control Engineering Practice*, p. 1426–1431. 17/2009.
- [11] BRADLEY E. HEINRICHS, BOYD D. ALLIN, JAMES J. BOWLER, GUNTER P. SIEGMUND. *Vehicle speed affects both pre-skid braking kinematics and average tire/roadway friction*. In *Accident Analysis and Prevention*, p. 829–840. 36/2004.
- [12] ESKO LEHTONEN, OTTO LAPPI, IIVO KOIRIKIVI, HEIKKI SUMMALA. *Effect of driving experience on anticipatory look-ahead fixations in real curve driving*. In *Accident Analysis and Prevention*, p. 195–208. 70/2014.
- [13] KIM, J. *Identification of lateral tyre force dynamics using an extended Kalman filter from experimental road test data*. In *Control Engineering Practice*, p. 357–367. 17/2009.
- [14] CÉCILE COUTTON-JEAN, DANIEL R. MESTRE, CÉDRIC GOULON, REINOUD J. BOOTSMA. *The role of edge lines in curve driving*. In *Transportation Research*, part F, p. 483–493. 12/2009.

- [15] MEDUNA, J. *Aplikovaná mechanika*, učební text postgraduálního studia technického znanectví. Brno: VUT v Brně, ÚSI. 1984.
- [16] BRADÁČ, A. *Analytika silničních nehod II*. Ostrava: Dům techniky ČSVTS. 1985.
- [17] KASANICKÝ, G., KOHÚT, P., LUKÁŠIK, M. *Teória pohybu a rázu pri analýze a simulácii nehodového deja*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilíně. 2001. ISBN 80-7100-597-5.
- [18] KASANICKÝ, Gustáv. *Súčasná a perpektívne možnosti analýzy dopravných nehod*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilíně. 1999.
- [19] BRADÁČ, Albert. *Soudní inženýrství*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 1999. ISBN 80-7204-057-X.
- [20] KLEDUS, Robert. *Modelování pohybu vozidla při analýze silničních nehod – vyhybací manévr, dizertační práce*. Brno: VUT v Brně, ÚSI. 2003.
- [21] BRADÁČ, Albert. *Příčné přemístění vozidel při analýze silniční nehody, dizertační práce*. Brno: VUT v Brně, ÚSI. 2003.
- [22] ŽIŽLAVSKÝ Petr, JANIŠ, Radek, GAJA, Antonín. *Analýza podélného zpomalení a příčného zrychlení v oblouku na mokřém povrchu, závěrečná práce v kurzu CŽV*. Brno: VUT v Brně, ÚSI. 2000.
- [23] VÉMOLA, A. *Problematika znalecké analýzy jízdy a brzdění vozidla v obecném prostorovém oblouku, dizertační práce*. Brno: VUT v Brně, ÚSI. 2005.
- [24] YIANNIS E. PAPELIS, GINGER S.WATSON, TIMOTHY L. BROWN: *An empirical study of the effectiveness of electronic stability control system in reducing loss of vehicle control*. In Accident Analysis and Prevention p. 929–934. 42/2010.
- [25] ANNA VADEBY, MATS WIKLUND, SONJA FORWARD. *Car drivers' perceptions of electronic stability control (ESC) systems*. In Accident Analysis and Prevention, p. 706–713. 43/2011.
- [26] ALENA ERKE. *Effects of electronic stability control (ESC) on accidents: A review of empirical evidence*. In Accident Analysis and Prevention, p. 167–173. 40/2008.
- [27] JIM SCULLY, STUART NEWSTEAD. *Evaluation of electronic stability control effectiveness in Australasia*. In Accident Analysis and Prevention, p. 2050–2057. 40/2008.
- [28] T.K. BERA, K. BHATTACHARYA, A.K. SAMANTARAY. *Evaluation of antilock braking system with an integrated model of full vehicle system dynamics*. In Simulation Modelling Practice and Theory, p. 2131–2150. 19/2011.
- [29] PAUL E. GREEN, JOHN WOODROOFFE. *The estimated reduction in the odds of loss-of-control type crashes for sport utility vehicles equipped with electronic stability control*. In Journal of Safety Research, p. 493–499. 37/2006.
- [30] RUDIN-BROWN, C.M., NOY, Y.I. *Investigation of behavioral adaptation to lane departure warnings*. In Transportation Research Record 1803, p. 30–37. 2002.
- [31] MARKVOLLRATH, SUSANNE SCHLEICHER, CHRISTHARD GELAU. *The influence of Cruise Control and Adaptive Cruise Control on driving behaviour – A driving simulator study*. In Accident Analysis & Prevention Volume 43, Issue 3, May p. 1134–1139. 2011.

- [32] ABENDROTH, B. *Gestaltungspotenziale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen*. In Ergonomia Verlag, Stuttgart. 2001.
- [33] HOEDEMAEKER, M., ANDRIESEN, J.H., WIETHOFF, M., BROOKHUIS, K.A. *Effects of driving style on headway preference and acceptance of an adaptive cruise control (ACC)*. In Journal of International Association of Traffic and Safety Sciences 22, p. 29–36. 1998.
- [34] TÖRNROS, J., NILSSON, L., ÖSTLUND, J., KIRCHER, A. *Effects of ACC on Driver Behaviour, Workload and Acceptance in Relation to Minimum Time Headway*. In 9th World Congress on Intelligent Transport Systems, Chicago. 2002.
- [35] STANTON, N.A., YOUNG, M.S. *Driver behaviour with adaptive cruise control*. In Ergonomics, p.1294–1313. No. 48 (10). 2005.
- [36] YOUNG, M.S., STANTON, N.A. *Taking the load off: investigations of how adaptive cruise control affects mental workload*. In Ergonomics, p. 1014–1035. 47 (9) 2004.
- [37] GIULIO FRANCESCO BIANCHI PICCININI, CARLOS MANUEL RODRIGUES, MIGUEL LEITÃO, ANABELA SIMÕES. *Reaction to a critical situation during driving with Adaptive Cruise Control for users and non-users of the system*. In Safety Science, p. 116–126. 72/2015.
- [38] VLK, František. *Elektronické systémy motorových vozidel 2*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství VLK. 2002. ISBN 80-238-7282-6.
- [39] PAVLÍČEK, JAN, RADIMSKÝ MICHAL. *Projektování silnic a dálnic, 4. seminář k tematickému bloku Plánování a projektování pozemních komunikací (studijní materiál pro seminář)*. 2010-2012. Reg. č. projektu CZ.1.07/3.2.13/01.0018.
- [40] VÉMOLA, Aleš; ROCHLA, Tomáš. *Nehoda z dálnice D1 Brno - Praha*. In Soudní inženýrství, 2011, roč. 22- 2011, č. 4, s. 161-175. ISSN: 1211- 443X.
- [41] [http://www.racelogic.co.uk/\\_downloads/vbox/Manuals/Data\\_Loggers/RLVB3i\\_Manual%20-%20English.pdf](http://www.racelogic.co.uk/_downloads/vbox/Manuals/Data_Loggers/RLVB3i_Manual%20-%20English.pdf)
- [42] <https://www.google.cz/maps/@50.4503199,15.0208721,2695m/data=!3m1!1e3>
- [43] <https://www.google.cz/maps/@50.4503199,15.0208721,2695m/data=!3m1!1e3>
- [44] <http://volvocars.spx-car.cz/bezpecnostni-prvky-volvo/>
- [45] [http://www.dsd.at/index.php?option=com\\_content&view=article&id=16:pic-daq&catid=37&Itemid=159&lang=en](http://www.dsd.at/index.php?option=com_content&view=article&id=16:pic-daq&catid=37&Itemid=159&lang=en)
- [46] [http://genesys-adma.de/img/content/gps\\_explained\\_1.jpg](http://genesys-adma.de/img/content/gps_explained_1.jpg)
- [47] <https://www.google.cz/maps/place/Allhaming,+Rakousko/@48.1442399,14.1448171,758m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x4773eb36c5e9cbef:0x40097572de64cd0>
- [48] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství VLK. 2005. ISBN 80-239-0024-2.
- [49] BRADÁČ, A., KREJČÍŘ, P., GLIER, L. *Znalecký standard č. III a IV*. Ministerstvo spravedlnosti. 1991.
- [50] KASANICKÝ, G., ROZINA, A.: *Vplyv zmeny veľkosti technických parametrov na priebeh simulácie*. Žilinská univerzita v Žilíně, Znalectvo č. 3-4 1998, ročník III.



- [51] Virtual CRASH. Technical Manual. VIZI 2007.
- [52] <http://vcrash3.com>
- [53] [http://www.dsd.at/index.php?option=com\\_content&view=article&id=268:pc-crash-10-0-english-manual&catid=34&Itemid=207&lang=en](http://www.dsd.at/index.php?option=com_content&view=article&id=268:pc-crash-10-0-english-manual&catid=34&Itemid=207&lang=en)
- [54] Archiv ÚSI VUT v Brně.
- [55] BILÍK, M. *Možnosti zjišťování vlivu elektronických stabilizačních systémů podvozku na jízdní dynamiku vozidla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, 2011. 103 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vladimír Panáček.

## Seznam obrázků

<b>Obr. 1:</b> Závislosti rychlosti jízdy vozidla na poloměru oblouku při určitém dostředivém zrychlení.....	15
<b>Obr. 2:</b> Závislost příčného zrychlení na rychlosti jízdy vozidla.....	15
<b>Obr. 3:</b> Závislost využitelného příčného zrychlení na rychlosti vozidla.....	20
<b>Obr. 4:</b> Kolová kotoučová brzda s prvky systému ABS.....	26
<b>Obr. 5:</b> Vznik stáčivého momentu.....	27
<b>Obr. 6:</b> Brzdění vozidla v rovinné zatáčce při rychlostech blízkých jejich mezní hodnotě.....	27
<b>Obr. 7:</b> Chování nedotáčivého a přetáčivého vozidla při průjezdu zatáčkou.....	29
<b>Obr. 8:</b> Struktura regulační soustavy ESP.....	30
<b>Obr. 9:</b> Trajektorie pohybu vozidla v rovinné zatáčce.....	31
<b>Obr. 10:</b> Síly působící na vozidlo pohybující se po vrcholovém prostorovém oblouku.....	36
<b>Obr. 11:</b> Síly působící na vozidlo pohybující se konstantní rychlostí po vrcholovém prostorovém oblouku (boční pohled).....	37
<b>Obr. 12:</b> Schéma uspořádání pojistek vozidla VW Golf V. generace.....	43
<b>Obr. 13:</b> Zkoušené vozidlo Volkswagen Golf V. generace.....	45
<b>Obr. 14:</b> Datový štítek vozidla.....	45
<b>Obr. 15:</b> MBox2.....	47
<b>Obr. 16:</b> Pozice XL Meteru při měření.....	47
<b>Obr. 17:</b> Full HD kamera Cannon a HD kamera Funbeat.....	48
<b>Obr. 18:</b> Diagnostická sada VAG-COM PROFI.....	49
<b>Obr. 19:</b> Diagnostický kabel HEX-CAN a SW prostředí programu VAG-COM.....	49
<b>Obr. 20:</b> Poloha měřicí a záznamové techniky ve vozidle.....	50
<b>Obr. 21:</b> Místo měření - polygon letiště s vyznačenými významnými body.....	51
<b>Obr. 22:</b> Kontrolní přímé měření brzdné dráhy měřícím kolečkem.....	52
<b>Obr. 23:</b> Brzdná zkouška vozidla s odpojeným systémem ABS z rychlosti cca 55 km/h, sucho.....	52
<b>Obr. 24:</b> Dynamický průjezd vozidla VW Golf obloukem o poloměru 16 m.....	54
<b>Obr. 25:</b> Průběh příčného zrychlení při měření č. 6 (rychlost 33 km/h, oblouk 16 m) s ESP.....	55
<b>Obr. 26:</b> Průběh příčného zrychlení při měření č. 6 z hodnot MBoxu.....	56
<b>Obr. 27:</b> Průběh příčného zrychlení při měření č. 6 z hodnot palubní diagnostiky.....	56
<b>Obr. 28:</b> Průběh příčného zrychlení při měření č. 7 (rychlost 41 km/h, oblouk 16 m) s ESP.....	57
<b>Obr. 29:</b> Sekvence průjezdu vozidla obloukem o poloměru 16 m, rychlost 41 km/h, zásah ESP.....	57
<b>Obr. 30:</b> Průběh příčného zrychlení při měření č. 6 z hodnot MBoxu.....	59
<b>Obr. 31:</b> Zdokumentované smykové stopy z měření č. 7 (s ESP) a měření č. 13 (bez ESP).....	59
<b>Obr. 32:</b> Sekvence průjezdu vozidla obloukem o poloměru 16 m, rychlost 39 km/h, bez ESP.....	60
<b>Obr. 33:</b> Brzdná zkouška vozidla s odpojeným systémem ABS z rychlosti cca 56 km/h, mokro.....	61
<b>Obr. 34:</b> Průběh příčného zrychlení při měření č. 19 z hodnot palubní diagnostiky.....	62
<b>Obr. 35:</b> Sekvence průjezdu vozidla obloukem o poloměru 16 m, rychlost 40 km/h, s ESP.....	62
<b>Obr. 36:</b> Průběh příčného zrychlení při měření č. 26 z hodnot MBoxu.....	64

<b>Obr. 37:</b> Průběh příčného zrychlení při měření č. 30 z hodnot XL meteru .....	65
<b>Obr. 38:</b> Průběh příčného zrychlení při měření č. 31 z hodnot XL meteru .....	66
<b>Obr. 39:</b> Zanechané smykové stopy po jednotlivých průjezdech oblouky.....	67
<b>Obr. 40:</b> Měřený objekt - vozidlo Škoda Superb II.....	69
<b>Obr. 41:</b> Zobrazovací jednotka zařízení Racelogic .....	70
<b>Obr. 42:</b> Měřicí jednotka zařízení Racelogic .....	70
<b>Obr. 43:</b> Montážní poloha měřicí jednotky zařízení Racelogic v ilustrativním vozidle.....	70
<b>Obr. 44:</b> Polygon společnosti Škoda Auto a.s. v Úhelnici vč. vyznačení místa provedení jízdních zkoušek.....	71
<b>Obr. 45:</b> Brzdná zkouška z rychlosti 50 km/h bez ABS.....	72
<b>Obr. 46:</b> Brzdná zkouška z rychlosti 130 km/h s ABS.....	72
<b>Obr. 47:</b> Zkušební dráha určená pro příčné přemístění vozidla dvěma oblouky.....	73
<b>Obr. 48:</b> Porovnání bočního zrychlení a stáčivé rychlosti při příčném přemístění vozidla Škoda Superb dvěma oblouky na podélné vzdálenosti 30 m při rychlosti 124 km/h bez ESP a 122 km/h s ESP .....	74
<b>Obr. 49:</b> Počátek příčného přemístění prvním obloukem při rychlosti 122 km/h s ESP.....	75
<b>Obr. 50:</b> Max. naklopení karoserie vozidla při příčném přemístění prvním obloukem při rychlosti 122 km/h s ESP.....	75
<b>Obr. 51:</b> Počátek a konec příčného přemístění dvěma oblouky při rychlosti 122 km/h s ESP	77
<b>Obr. 52:</b> Čas 17,953 s - vozidlo Škoda Superb s ESP (žlutá elipsa) v levém jízdním pruhu bezprostředně před okamžikem zahájení příčného přemístění .....	78
<b>Obr. 53:</b> Čas 20,109 s – vozidlo Škoda Superb s ESP (žlutá elipsa) v pravém jízdním pruhu po dokončení manévru příčného přemístění dvěma oblouky.....	78
<b>Obr. 54:</b> Závislost bočního zrychlení a stáčivé rychlosti na ujeté dráze při příčném přemístění vozidla Škoda Superb dvěma oblouky rychlostí 122 km/h s ESP.....	79
<b>Obr. 55:</b> Závislost bočního zrychlení a stáčivé rychlosti na ujeté dráze při příčném přemístění vozidla Škoda Superb dvěma oblouky rychlostí 116 km/h bez ESP .....	80
<b>Obr. 56:</b> Závislost bočního zrychlení a stáčivé rychlosti na ujeté dráze při příčném přemístění vozidla Škoda Superb dvěma oblouky rychlostí 107 km/h bez ESP .....	80
<b>Obr. 57:</b> Závislost příčného zrychlení a stáčivé rychlosti na ujeté dráze při příčném přemístění vozidla Škoda Superb dvěma oblouky rychlostí 95 km/h bez ESP.....	81
<b>Obr. 58:</b> Měřený objekt - vozidlo Škoda Octavia II.....	82
<b>Obr. 59:</b> Polygon společnosti Škoda Auto a.s. v Úhelnici vč. detailu zkušební části polygonu, kde byly provedeny průjezdy obloukem .....	84
<b>Obr. 60:</b> Poloha vozidla při experimentálních jízdách obloukem.....	84
<b>Obr. 61:</b> Naklopení karoserie vozidla během pilotního testu před zahájením měření, rychlost jízdy 70 km/h (jízda v opačném směru kruhu).....	84
<b>Obr. 62:</b> Kruhová zkouška č. M1 – trvalá jízda obloukem při počátcích zásahu systému ESP (závislost rychlosti jízdy a součiniteli adheze v příčném směru na čase).....	86
<b>Obr. 63:</b> Kruhová zkouška č. M1 – trvalá jízda obloukem při počátcích zásahu systému ESP (závislost rychlosti jízdy, součiniteli adheze v příčném směru a podélného zrychlení na čase).....	86
<b>Obr. 64:</b> Kruhová zkouška č. M1 – zaznamenané údaje při kruhové zkoušce.....	87

<b>Obr. 65:</b> Kruhová zkouška č. M1 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky.....	87
<b>Obr. 66:</b> Kruhová zkouška č. M1 – hodnoty stáčivé rychlosti vozidla při zásazích ESP .....	88
<b>Obr. 67:</b> Kruhová zkouška č. M2 – trvalá jízda obloukem maximální rychlostí se systémem ESP (závislost rychlosti jízdy a součinitele adheze v příčném směru na čase) .....	90
<b>Obr. 68:</b> Kruhová zkouška č. M2 – zásah ESP, obvodové rychlosti kol v čase cca 39 s.....	90
<b>Obr. 69:</b> Kruhová zkouška č. M2 – změna rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky	91
<b>Obr. 70:</b> Kruhová zkouška č. M2 – hodnoty stáčivé rychlosti vozidla při zásazích ESP .....	92
<b>Obr. 71:</b> Kruhová zkouška č. M3 – jízda obloukem s deaktivovaným systémem ESP.....	93
<b>Obr. 72:</b> Kruhová zkouška č. M3 – tlačítkem deaktivované ESP.....	93
<b>Obr. 73:</b> Kruhová zkouška č. M3 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky.....	94
<b>Obr. 74:</b> Kruhová zkouška č. M3 – hodnoty stáčivé rychlosti vozidla při zásazích ESP .....	95
<b>Obr. 75:</b> Kruhová zkouška č. M4 – jízda obloukem s deaktivovaným systémem ESP.....	96
<b>Obr. 76:</b> Kruhová zkouška č. M4 – tlačítkem deaktivované ESP; v čase 10,5737 s .....	96
<b>Obr. 77:</b> Kruhová zkouška č. M4 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky.....	97
<b>Obr. 78:</b> Kruhová zkouška č. M4 – hodnoty stáčivé rychlosti vozidla při zásazích ESP .....	98
<b>Obr. 79:</b> Kruhová zkouška č. M5 – jízda obloukem s aktivovaným systémem ESP .....	99
<b>Obr. 80:</b> Kruhová zkouška č. M5 – aktivované ESP; v čase 10,0041 s detekované zásahy systému ESP a ASR.....	99
<b>Obr. 81:</b> Kruhová zkouška č. M5 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky.....	100
<b>Obr. 82:</b> Kruhová zkouška č. M5 – hodnoty stáčivé rychlosti vozidla při zásazích ESP .....	101
<b>Obr. 83:</b> Kruhová zkouška č. M6 – jízda obloukem s aktivovaným systémem ESP .....	102
<b>Obr. 84:</b> Kruhová zkouška č. M6 – aktivované ESP; v čase 10,7945 s detekované zásahy systému ESP a následně v čase 10,8137 s i systému ASR .....	102
<b>Obr. 85:</b> Kruhová zkouška č. M6 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky.....	103
<b>Obr. 86:</b> Kruhová zkouška č. M6 – hodnoty stáčivé rychlosti vozidla při zásazích ESP .....	104
<b>Obr. 87:</b> Kruhová zkouška č. M7 – jízda obloukem s aktivovaným systémem ESP .....	105
<b>Obr. 88:</b> Kruhová zkouška č. M7 – aktivované ESP; v čase 11,9144 s detekované zásahy systému ESP a následně v čase 11,9162 s i systému ASR .....	105
<b>Obr. 89:</b> Kruhová zkouška č. M7 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky.....	106
<b>Obr. 90:</b> Kruhová zkouška č. M7 – hodnoty stáčivé rychlosti vozidla při zásazích ESP .....	107
<b>Obr. 91:</b> Kruhová zkouška č. M8 – jízda obloukem s aktivovaným systémem ESP .....	108
<b>Obr. 92:</b> Kruhová zkouška č. M8 – aktivované ESP; v čase 11,084 s detekované zásahy systému ESP a následně v čase 11,0869 s i systému ASR .....	108
<b>Obr. 93:</b> Kruhová zkouška č. M8 – změna obvodové rychlosti kol při zásazích ESP v průběhu zkoušky.....	109
<b>Obr. 94:</b> Kruhová zkouška č. M8 – hodnoty stáčivé rychlosti vozidla při zásazích ESP .....	110
<b>Obr. 95:</b> Objekt měření – vozidlo Volvo V40 T5 AWD Cross Country .....	112
<b>Obr. 96:</b> Asistenční systémy testovaného vozidla Volvo V40.....	113

<b>Obr. 97:</b> Funkce systému DSTC .....	114
<b>Obr. 98:</b> Zařízení PicDAQ .....	115
<b>Obr. 99:</b> Sestava Diferenciální GPS.....	116
<b>Obr. 100:</b> Vnější osazení vozidla měřicí technikou .....	116
<b>Obr. 101:</b> Světelná brána.....	117
<b>Obr. 102:</b> Zavazadlový prostor vozidla Volvo osazený měřicí technikou.....	118
<b>Obr. 103:</b> Poloha kamery ve vozidle.....	118
<b>Obr. 104:</b> Kamera na vysokozdvížné plošině .....	118
<b>Obr. 105:</b> Rozměry polygonu DSD s vyznačením prostoru pro jízdu a brzdění v oblouku ...	119
<b>Obr. 106:</b> Vyznačení oblouků o poloměru 30, 40 a 50 m na povrchu polygonu.....	120
<b>Obr. 107:</b> Poloha vysokorychlostních statických kamer snímajících pohyb a brzdění vozidla v obloucích .....	120
<b>Obr. 108:</b> Poloha brzdného bodu na poloměru oblouku R 30 (kužely) .....	121
<b>Obr. 109:</b> Poloha brzdného bodu na poloměru oblouku R 40 (vyznačena kužely) .....	121
<b>Obr. 110:</b> Brzdná zkouška z výchozí rychlosti brzdění 50 km/h na suchém povrchu .....	121
<b>Obr. 111:</b> Brzdná zkouška z výchozí rychlosti brzdění 60 km/h na suchém povrchu .....	122
<b>Obr. 112:</b> Brzdná zkouška z výchozí rychlosti brzdění 80 km/h na suchém povrchu.....	122
<b>Obr. 113:</b> Brzdná zkouška z výchozí rychlosti brzdění 48 km/h na mokřém povrchu .....	123
<b>Obr. 114:</b> Brzdná zkouška z výchozí rychlosti brzdění 68 km/h na mokřém povrchu .....	124
<b>Obr. 115:</b> Naklopení karoserie vozidla Volvo během pilotního .....	125
<b>Obr. 116:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 15, R 30 m, $v_n = 60$ km/h, $v_{nb} = 55$ km/h ...	126
<b>Obr. 117:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 25, R 30 m, $v_n = 59$ km/h, $v_{nb} = 57$ km/h....	128
<b>Obr. 118:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 34, R 40 m, $v_n = 72$ km/h, $v_{nb} = 69$ km/h ...	130
<b>Obr. 119:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 41, R 40 m, $v_n = 70$ km/h, $v_{nb} = 67$ km/h....	132
<b>Obr. 120:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 47, R 50 m, $v_n = 76$ km/h, $v_{nb} = 72$ km/h ...	134
<b>Obr. 121:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 55, R 50 m, $v_n = 75$ km/h, $v_{nb} = 67$ km/h ...	136
<b>Obr. 122:</b> Zrekonstruovaná trajektorie průjezdů při kruhové zkoušce z dat DGPS .....	138
<b>Obr. 123:</b> Parametry jízdní dynamiky vozidla při kruhové zkoušce s DSTC "N" .....	138
<b>Obr. 124:</b> Parametry jízdní dynamiky vozidla při kruhové zkoušce s DSTC "S".....	139
<b>Obr. 125:</b> Parametry jízdní dynamiky vozidla při příčném přemístění s DSTC "N" .....	140
<b>Obr. 126:</b> Dosažitelné hodnoty příčného zrychlení v závislosti na rychlosti jízdy vozidla vybaveného asistenčním systémem kontroly jízdní stability na suchém asfaltovém povrchu .....	141
<b>Obr. 127:</b> Standardní nastavení systému ESP v programu Virtual CRASH v. 3.0 .....	145
<b>Obr. 128:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 15, model ESP standardně přednastaven .....	146
<b>Obr. 129:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 15, model ESP s novými hodnotami parametrů.....	147
<b>Obr. 130:</b> Průběh příčného zrychlení v čase.....	147
<b>Obr. 131:</b> Průběh podélného zpomalení v čase.....	147
<b>Obr. 132:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 25, model ESP standardně přednastaven .....	148
<b>Obr. 133:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 25, model ESP s novými hodnotami parametrů.....	149

<b>Obr. 134:</b> Průběh příčného zrychlení v čase.....	150
<b>Obr. 135:</b> Průběh podélného zpomalení v čase.....	150
<b>Obr. 136:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 34, model ESP standardně přednastaven .....	151
<b>Obr. 137:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 34, model ESP s novými hodnotami parametrů.....	152
<b>Obr. 138:</b> Průběh příčného zrychlení v čase.....	152
<b>Obr. 139:</b> Průběh podélného zpomalení v čase.....	152
<b>Obr. 140:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 41, model ESP standardně přednastaven .....	153
<b>Obr. 141:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 41, model ESP s novými hodnotami parametrů.....	154
<b>Obr. 142:</b> Průběh příčného zrychlení v čase.....	154
<b>Obr. 143:</b> Průběh podélného zpomalení v čase.....	154
<b>Obr. 144:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 47, model ESP standardně přednastaven .....	155
<b>Obr. 145:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 47, model ESP s novými hodnotami parametrů.....	156
<b>Obr. 146:</b> Průběh příčného zrychlení v čase.....	157
<b>Obr. 147:</b> Průběh podélného zpomalení v čase.....	157
<b>Obr. 148:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 55, model ESP standardně přednastaven .....	157
<b>Obr. 149:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 55, model ESP s novými hodnotami parametrů.....	158
<b>Obr. 150:</b> Průběh příčného zrychlení v čase.....	159
<b>Obr. 151:</b> Průběh podélného zpomalení v čase.....	159
<b>Obr. 152:</b> Standardní nastavení systému ESP v programu PC-Crash verze 9.1 .....	160
<b>Obr. 153:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 15, model ESP standardně přednastaven .....	161
<b>Obr. 154:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 15, model ESP s novými hodnotami parametrů.....	162
<b>Obr. 155:</b> Nové hodnoty pro nastavení numerického modelu ESP v programu PC-Crash v. 9.1 .....	162
<b>Obr. 156:</b> Průběh příčného zrychlení (modře) a podélného zpomalení (červeně) v čase .....	163
<b>Obr. 157:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 34, model ESP standardně přednastaven .....	164
<b>Obr. 158:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 34, model ESP s novými hodnotami parametrů.....	165
<b>Obr. 159:</b> Průběh příčného zrychlení (modře) a podélného zpomalení (červeně) v čase .....	166
<b>Obr. 160:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 47, model ESP standardně přednastaven .....	167
<b>Obr. 161:</b> Jízda a brzdění v oblouku při měření č. 47, model ESP s novými hodnotami parametrů.....	168
<b>Obr. 162:</b> Průběh příčného zrychlení (modře) a podélného zpomalení (červeně) v čase .....	169

## Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Součinitele adheze v příčném směru v závislosti na pohybu vozidla.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabulka 2: Vybrané stabilizační systémy označené dle výrobců vozidel .....</i>	<i>28</i>
<i>Tabulka 3: Nejmenší dovolené poloměry směrových kružnicových oblouků ve vztahu k návrhové rychlosti a dostředivému sklonu.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 4: Nejmenší poloměry vypuklých výškových (vrcholových) oblouků.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 5: Nejmenší poloměry vydutých výškových (údolnicových) oblouků.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 6: Podstatné veličiny ve vztahu k metodě řešení problémové situace a problému....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 7: Identifikace a technické parametry vozidla WV Golf V. generace.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 8: Parametry jednotlivých zkušebních jízd vozidla vyznačeným koridorem.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabulka 9: Shrnutí výsledků z kruhových zkoušek č. M1 až M8.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabulka 10: Aktivní funkce, které jsou součástí systému DSTC při nastaveném režimu .....</i>	<i>114</i>
<i>Tabulka 11: Poloha brzdných bodů od začátku oblouku .....</i>	<i>120</i>
<i>Tabulka 12: Výsledky brzdných zkoušek na suchém povrchu polygonu .....</i>	<i>123</i>
<i>Tabulka 13: Výsledky brzdných zkoušek na mokřém povrchu polygonu .....</i>	<i>124</i>
<i>Tabulka 14: Parametry jízdní dynamiky při jízdě a brzdění v oblouku R 30 m s DSTC "N" ..</i>	<i>127</i>
<i>Tabulka 15: Parametry jízdní dynamiky při jízdě a brzdění v oblouku R 30 m s DSTC "S" ...</i>	<i>129</i>
<i>Tabulka 16: Parametry jízdní dynamiky při jízdě a brzdění v oblouku R 40 m s DSTC "N" ..</i>	<i>131</i>
<i>Tabulka 17: Parametry jízdní dynamiky při jízdě a brzdění v oblouku R 40 m s DSTC "S" ...</i>	<i>133</i>
<i>Tabulka 18: Parametry jízdní dynamiky při jízdě a brzdění v oblouku R 50 m s DSTC "N" ..</i>	<i>135</i>
<i>Tabulka 19: Parametry jízdní dynamiky při jízdě a brzdění v oblouku R 50 m s DSTC "S" ...</i>	<i>137</i>
<i>Tabulka 20: Využitelné hodnoty součinitele adheze v příčném směru podle způsobu jízdy vozidla se stabilizačním systémem jízdní dynamiky .....</i>	<i>142</i>
<i>Tabulka 21: Standardní a nové nastavení modelu ESP v programu Virtual CRASH v. 3.0. ....</i>	<i>170</i>
<i>Tabulka 22: Standardní a nové nastavení modelu ESP v programu PC-Crash v. 9.1 .....</i>	<i>170</i>
<i>Tabulka 23: Zjištěné rozmezí hodnot stáčivé rychlosti vozidla při zásahu ESP .....</i>	<i>172</i>



## Seznam vybraných zkratek a symbolů

Zkratka / symbol	Jednotky	Název
a	$m/s^2$	Zrychlení / zpomalení (obecně)
$a_{boč}$	$m/s^2$	Boční zrychlení
$a_{př}$ , $a_y$	$m/s^2$	Příčné zrychlení
$a_{ymax}$	$m/s^2$	Maximální příčné zrychlení vozidla
ABS	---	Protiblokovací systém vozidla
ASR	---	Protiprokluzový systém vozidla
DGPS	---	Diferenciální GPS
DSTC	---	Stabilizační systém jízdní dynamiky vozidla Volvo
DSTC „N“	---	Normální režim systému DSTC
DSTC „S“	---	Sportovní režim systému DSTC
ESP	---	Elektronický stabilizační program
g	$m/s^2$	Tíhové zrychlení
GPS	---	Globálně polohový systém
$F_H$	N	Hnací síla
$F_{OR}$	N	Odstředivá síla vzniklá vlivem horizontálního oblouku
$F_{Or}$	N	Odstředivá síla vzniklá vlivem vertikálního oblouku
$F_T$	N	Třecí síla
$F_N$	N	Normálová síla
$F_f$	N	Valivý odpor
$F_{vz}$	N	Vzdušný odpor
G	N	Tíhová síla
$G_{y\alpha}$	N	Složka tíhové síly v souřadném systému $x_\alpha - y_\alpha$ (viz <b>obr. 11</b> )
GMA	---	Opoždění nárůstu stáčivého momentu
$h_T$	m	Výška těžiště vozidla
$h_{vz}$	m	Výška působíště vzdušného odporu
ICM	---	Informační a ovládací modul vozidla Volvo

Zkratka / symbol	Jednotky	Název
k	---	Koeficient tzv. Kovaříkova vzorce pro výpočet minimální doby potřebné pro příčné přemístění vozidla oblouky
l	m	Rozvor náprav
$l_p$	m	Vzdálenost těžiště od osy přední nápravy
$l_z$	m	Vzdálenost těžiště od osy zadní nápravy
LP	---	Levé přední kolo
LZ	---	Levé zadní kolo
$M_{f1}$	Nm	Moment valivého odporu přední nápravy
$M_{f2}$	Nm	Moment valivého odporu zadní nápravy
$N_p$	N	Radiální reakce přední nápravy
$N_z$	N	Radiální reakce zadní nápravy
PP	---	Pravé přední kolo
PZ	---	Pravé zadní kolo
r	m	Poloměr vertikálního oblouku (viz <b>obr. 11</b> )
R	m	Poloměr horizontálního oblouku (viz <b>obr. 11</b> )
SUV	---	Sportovně užitkové vozidlo
$t_y$	s	Doba potřebná pro příčné přemístění vozidla
v	m/s	Rychlost vozidla
$v_{mez}, v_{mezni}$	m/s, km/h	Mezní rychlost vozidla
$v_n$	km/h	Nájezdová rychlost vozidla do oblouku
$v_{nb}$	km/h	Rychlost vozidla na počátku náběhu brzd
$\Delta v_{kol}$	km/h	Změna obvodové rychlosti kol
y	m	Příčná vzdálenost při příčném přemístění vozidla
$\alpha$	°	Podélný sklon vozovky
$\beta$	°	Příčný sklon vozovky
$\mu$	---	Součinitel adheze
$\mu_y, \mu_{př}$	---	Součinitel adheze v příčném směru
$\mu_{ymax}$	---	Maximální součinitel adheze v příčném směru
$\chi$	°	Úhel naklopení karoserie vozidla

## Seznam příloh

- Příloha č. 1:** Technické parametry zkoušeného vozidla VW Golf V. generace (4 listy).
- Příloha č. 2:** Souhrnný protokol z měření parametrů jízdní dynamiky vozidla VW Golf (1 list).
- Příloha č. 3:** Technické parametry zkoušeného vozidla Škoda Superb 2.0 TDI PD (6 listů).
- Příloha č. 4:** Technické parametry zkoušeného vozidla Škoda Octavia 1.6 TDI CR (5 listů).
- Příloha č. 5:** Technické parametry zkoušeného vozidla Volvo V40 T5 AWD Cross Country (5 listů).
- Příloha č. 6:** Výsledky experimentálních měření jízdy a brzdění vozidla Volvo V40 v obloucích o poloměru 30 m, 40 m a 50 m (19 listů).
- Příloha č. 7:** Hodnoty max. dosažitelného podélného zpomalení vybraných vozidel (1 list).
- Příloha č. 8:** Výsledky simulačního modelování v programu Virtual CRASH v. 3.0 (93 listů).
- Příloha č. 9:** Výsledky simulačního modelování v programu PC-Crash v. 9.1 (18 listů).