

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Prometna smer

Kandidat:

Uroš Maršič

Vpliv parametrov cestne osi na prometno varnost

Diplomska naloga št.: 2978

Mentor:
doc. dr. Alojzij Juvanc

Ljubljana, 25. 10. 2007

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **UROŠ MARŠIČ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»VPLIV PARAMETROV CESTNE OSI NA PROMETNO VARNOST«

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 04.10.2007

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 656.1.08(043.2)
Avtor: Uroš Maršič
Mentor: doc. dr. Alojz Juvanc
Naslov: Vpliv parametrov cestne osi na prometno varnost
Obseg in oprema: 103 str., 24 pregl., 33.sl., 14 en.
Ključne besede: prometna varnost, profil vozne hitrosti, voznodinamična analiza

Izvleček

Medkrajevne dvopasovne ceste izkazujejo relativno velik delež nezgod, katerih vzrok so neprilagojene hitrosti, ki so poleg zunanjih vplivov v večini primerov pogojene z nekonsistentnim sosledjem posameznih elementov cestne osi. Vsako sosledje krožnih lokov vodi v bolj ali manj spreminjajoče se realne hitrosti, kar posledično pomeni tudi različne rezultirajoče dinamične učinke na vozišče, ki pa se na njih odziva z določeno vrednostjo koeficienta drsnega trenja. V kolikor je vrednost KDT prekoračena, se zelo poveča nevarnost za nastanek prometnih nezgod. V pričujočem diplomskem delu so predstavljeni osnovni principi in metode izračuna realnih voznih hitrosti ter modeli Lamm-a, IHSDM in Juvanca za določitev nevarnih mest na cesti. Vsi algoritmi modelov so bili osnova za pripravo računalniškega programa, ki na podlagi geometrijskih parametrov cestne osi omogoča avtomatizirani izris profila vozne hitrosti in spreminjanja rezultirajočih voznodinamičnih količin. Model Juvanca je bil kot najprimernejši uporabljen za določitev odvisnosti pokazatelja varnosti VDK od velikosti posameznega parametra cestne osi. V okviru analize cestnih parametrov so bili zajeti vplivi dolžine krožnega loka, parametra prehodnice, prečnega nagiba, širine vozišča in vzdolžnega naklona. Za vsakega od parametrov je bil izveden primeren graf odvisnosti od pokazatelja varnosti VDK.

BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 656.1.08(043.2)
Author: Uroš Maršič
Supervisor: assist. prof. dr. Alojz Juvanc
Title: Effects of road axis parameters on road safety
Notes: 103 p., 24 tab., 33 fig., 14 eq.
Key words: traffic safety, speed-profile, driving dynamics analysis

Abstract

Researches throat the world has shown that two-way rural highways are the most dangerous among the other types of roads. It was identified that the most notable cause for immerging fatal and other crashes are unbalanced and excessive speeds, which occur mainly in the region of the curve. Every combination of horizontal curves has its own unique distribution of real driving speed, which leads in a verity of resulting dynamics effects. To be able to provide adequate safety, road pavement structure must be able to provide the appropriate skid resistance. In the case when friction coefficient is lower than demanded value, dangerous road conditions occur. In the following paper three methods for predicting road safety are presented: models by Lamm, Juvanc and IHSDM. The algorithms of the models were used to make an automated computer program, which is able to calculate the resulting speed profile and the profile of dynamic parameters. Model proposed by Juvanc was further used to show the link between the driving dynamics characteristic (safety measure) and the parameters of road axis. Length of horizontal curve, parameter of transition curve, grade, driveway width and crossfall rate were analyzed.

ZAHVALA

Za ponujen izziv in požrtvovalno pomoč pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem svojemu mentorju, doc.dr. Alojziju Juvancu. Njegovi neprecenljivi nasveti in želja doseči odličnost, so pomembno vplivali pri nastajanju pričujočega dela.

Zahvala gre tudi mojima staršema, ki sta me med študijem spodbujala in zaupala vame.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Namen in cilji naloge	2
1.2	Postavitev hipotez	2
1.3	Metode dela	3
2	ELEMENTI CESTNE OSI	4
2.1	Prema	4
2.2	Krožni lok	4
2.3	Prehodnica	5
3	PROMETNE NESREČE IN PROMETNA VARNOST	7
3.1	Dejavniki, ki vplivajo na nastanek prometnih nezgod	7
3.2	Vpliv vozne hitrosti	8
3.2.1	Raziskave voznih hitrosti in prometnih nezgod	9
3.2.2	Analiza prometnih nezgod v odvisnosti od hitrosti v Sloveniji	12
3.3	Vpliv kategorije ceste	13
3.3.1	Analiza nezgod v Sloveniji po posameznih kategorijah cest	15
3.4	Vpliv elementov ceste	17
3.5	Vpliv okoljskih razmer	22
3.5.1	Analiza nezgod v Sloveniji zaradi okoljskih razmer	23
4	REALNA VOZNA HITROST	24
4.1	Definicija hitrosti	24
4.1.1	Fizikalne osnove	24
4.1.2	Hitrost kot parameter prometnega toka	25
4.2	Vplivi na vozne hitrosti	29
4.2.1	Vpliv radija krožnega loka	30
4.2.2	Vpliv širine vozišča	34
4.2.3	Vpliv dolžine krožnega loka in pripadajočih prehodnic	35
4.2.4	Vpliv ukrivljenosti trase	38
4.2.4.1	Teorija Köppel-a	39

4.2.4.2	Teorija Lamm-a	40
4.2.5	Zaustavna pregledna razdalja	42
4.2.6	Vzdolžni nagib nivelete	43
4.2.7	Velikost radija vertikalne zaokrožitve	44
4.2.8	Vpliv prečnega naklona	45
4.2.9	Vpliv vremenskih in okoljskih razmer	45
4.3	Odzivi realne hitrosti na trenje	46
4.3.1	Sile in pospeški	46
4.3.2	Trenje na vozišču	49
4.3.2.1	Osnovne definicije	49
4.3.2.2	Največja dopustna vrednost koeficienta drsnega trenja	51
4.3.2.3	Komponentna členitev koeficienta drsnega trenja in zahtevano trenje	51
5	PROFIL VOZNE HITROSTI	54
5.1	Modeli za določitev hitrosti v posameznih elementih	54
5.1.1	Model Köppel-a (1984)	54
5.1.2	Model Krammes-a (1993)	56
5.1.3	Model McLean-a (1981)	56
5.1.4	Model Kerman-a (1982)	57
5.1.5	Model Leins-a	58
5.1.6	Model IHSDM	58
5.2	Modeli za formiranje zveznega profila vozne hitrosti	59
5.2.1	Model Lamm-a (1998)	59
5.2.2	Model IHSDM	62
5.2.3	Model Juvanca (1991)	66
5.2.4	Postopek določitve nevarnih mest na cesti po Juvancu (1991)	68
5.2.4.1	Pojemanje pri uvozu v krožni lok	68
5.2.4.2	Kalibracija modela za vse primere voženj v krožni lok	70
5.3	Interaktivna obravnava hitrosti in dinamičnih učinkov na vozišče	75
5.3.1	Kriterij varnosti 3 po Lamm-u (1997)	75
5.3.2	Interakcija med vozno-dinamičnimi parametri in voziščem po Juvancu	76

6	FORMIRANJE PROFILA VOZNE HITROSTI	79
6.1	Testni primer	79
6.2	Izrednotenje profila vozne hitrosti	80
6.3	Komentar rezultatov	81
7	VPLIV PARAMETROV CESTNE OSI NA PROMETNO VARNOST	83
7.1	Testni primer	83
7.2	Vpliv parametra prehodnice	84
7.3	Vpliv dolžine krožnega loka	89
7.4	Vpliv širine vozišča	92
7.5	Vpliv prečnega nagiba	94
7.6	Vpliv vzdolžnega naklona	95
7.7	Komentar analize	97
8	POVZETEK	98
9	SKLEP	99
	VIRI	101

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 3.1: Vplivi za nastanek prometnih nezgod	7
Preglednica 3.2: Analiza prometnih nezgod po vzroku od leta 1999-2005.	12
Preglednica 3.3: Analiza deleža nezgod s smrtnim izzidom po vzroku od leta 1999-2005.	13
Preglednica 3.4: Analiza nezgod po posameznih kategorijah cest med letoma 1999 in 2005.	15
Preglednica 3.5: Analiza nezgod po kategoriji ceste zaradi neprilagojenih hitrosti med 1999 in 2005.	16
Preglednica 3.6: Analiza nezgod v Sloveniji med letoma 1999 in 2005 zaradi okoljskih dejavnikov.	23
Preglednica 4.1: Seznam enačb za določitev $V_{85\%}$ ob upoštevanju CCR_s .	41
Preglednica 4.2: Zmanjšane vrednosti gravitacijskega pospeška g zaradi konveksne zaokrožitve.	47
Preglednica 4.3: Vplivi na vrednost KDT.	50
Preglednica 5.1: Enačbe za določitev $V_{85\%}$ po modelu IHSDM.	59
Preglednica 5.2: Razvrstitev elementov glede na kriterij varnosti 1 po Lamm-u.	61
Preglednica 5.3: Razvrstitev elementov glede na kriterij varnosti 2 po Lamm-u.	61
Preglednica 5.4: Vrednosti pojerkov in pospeškov po modelu IHSDM.	63
Preglednica 5.5: Primerjava izračuna dolžine L_m pri pojemanju z motorjem.	71
Preglednica 5.6: Razvrstitev elementov glede na kriterij varnosti 3 po Lamm-u.	75
Preglednica 5.7: Vrednost V_{DKM} v odvisnosti od $f_{i50\%}$ in V_i .	77
Preglednica 6.1: Spisek elementov cestne osi za testni primer sosledja krožnih lokov z radiji 350m -180m-270m.	80
Preglednica 7.1: Seznam elementov pri uporabi priporočenega parametra prehodnice A_{prip} za sosledje radijev 350m-180m-270m.	84
Preglednica 7.2: Seznam elementov pri uporabi maksimalno dopustnega parametra prehodnice $A_{max}=180m$ za sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m.	86
Preglednica 7.3: Seznam elementov pri uporabi skrajšane dolžine krožnega loka (29m) s polmerom 180 m za sosledje krožnih lokov 350-180-270m.	90

Preglednica 7.4: Seznam elementov pri uporabi podaljšanega krožnega loka s polmerom 180 m za sosledje elementov 350m-180m-270m.	91
Preglednica 7.5: Seznam elementov pri uporabi skrajnih mejnih vrednosti širine vozišča za sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m.	92
Preglednica 7.6: Seznam elementov z uporabljenimi skrajnimi vrednostmi prečnega nagiba v krožnem loku z radijem 180m za sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m.	94
Preglednica 7.7: Seznam elementov z uporabljenima mejnima vrednostima vzdolžnega naklona za sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m.	96

KAZALO SLIK

Slika 3.1: Prikaz deleža nezgod med avtocestami in dvopasovnicami v Sloveniji med letoma 1999 in 2005.	15
Slika 3.2: Povprečna stopnja nezgod v odvisnosti od povprečnega radija po Krammes-u.	18
Slika 4.1: Grafična primerjava med posameznimi modeli za določitev $V_{85\%}$ v odvisnosti od R .	34
Slika 4.2: Odvisnost med $V_{85\%}$ in dolžino krožnega loka L po enačbi Krammes-a.	36
Slika 4.3: Trajektorija vozila z upoštevanjem nadomestnega radija po enačbi Leinsa.	37
Slika 4.4: Odvisnost nadomestnega radija od velikosti radija in središčnega kota.	37
Slika 4.5: Odvisnost nadomestnega radija R' od središčnega kota α in širine vozišča B .	38
Slika 4.6: Primerjava posameznih enačb po državah za določitev $V_{85\%}$ po Lamm-u.	42
Slika 4.7: Vpliv srednje zaustavne pregledne razdalje ob upoštevanju Ku na $V_{50\%}$.	43
Slika 4.8: Odvisnost med spremembo hitrosti in vzdolžnim nagibom nivelete s po Köppel-u.	43
Slika 4.9: Odvisnost hitrosti od velikosti vzdolžnega nagiba s po Ranftu et.al..	44
Slika 4.10: Koeficient drsnega trenja v odvisnosti od stopnje zdrsa.	50
Slika 4.11: Primerjava vrednosti f_{tmax} po enačbah PIARC in Lamm-a.	51
Slika 5.1: Zaporedje faz pri vožnji v krožni lok po modelu Juvanca.	67
Slika 5.2: Prikaz pozicije L' v profilu vozne hitrosti.	72
Slika 5.3: Pospeševanje v krožni lok, ko je hitrost prihajajočega krožnega loka dosežena.	73
Slika 5.4: Profil vozne hitrosti v primeru pospeševanja ko vozilo ne doseže hitrosti v prihajajočem krožnem loku.	74
Slika 5.5: Končni diagram poteka za določitev voznodinamične usklajenosti elementov po Lamm-u.	76
Slika 5.6: Končni diagram poteka za določitev nevarnih mest na cesti po Juvancu.	78
Slika 6.1: Osnovni diagram poteka za formiranje profila vozne hitrosti.	79
Slika 6.2: Situacijski potek trasnih elementov za testni primer.	80
Slika 6.3: Primerjava profilov vozne hitrosti in spreminjanje koeficienta drsnega trenja f_{tmax} po posameznih modelih avtorjev v smeri naraščajoče stacionaže.	81

- Slika 7.1: Profil vozne hitrosti in spreminjanje *VDK* za sosledje krožnih lokov 350m - 180m - 270m v smeri naraščajoče stacionaže. 83
- Slika 7.2: Situacijski prikaz sosledja krožnih lokov z radiji 350m-180m-270m pri uporabi priporočenega parametra prehodnice $A_{prip}=115m$. 85
- Slika 7.3: Profil vozne hitrosti in spreminjanje *VDK* pri uporabi priporočenega parametra prehodnice $A_{prip}=115m$. 85
- Slika 7.4: Situacijski potek trase pri uporabi maksimalno dopustnega parametra prehodnice $A_{max}=180m$, za sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m. 86
- Slika 7.5: Profil vozne hitrosti in spreminjanje *VDK* pri uporabi maksimalno dopustnega parametra prehodnice $A_{max}=180m$. 87
- Slika 7.6: Maksimalne vrednosti *VDK* pri uvozu v krožni lok z radijem 180m v odvisnosti od parametra uvozne prehodnice za sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m. 88
- Slika 7.7: Profil vozne hitrosti in spreminjanje *VDK* pri zmanjšani dolžini krožnega loka z radijem 180 m(29m) za sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m. 90
- Slika 7.8: Profil vozne hitrosti in spreminjanje *VDK* za primer podaljšane dolžine krožnega loka z radijem 180m pri sosledju elementov 350m-180m-270m. 91
- Slika 7.9: Profil vozne hitrosti in spreminjanje *VDK* za obe mejni vrednosti širin vozišča B pri sosledju krožnih lokov 350m-180m-270m. 93
- Slika 7.10: Profil vozne hitrosti in spreminjanje *VDK* za skrajni meji vrednosti prečnega nagiba pri sosledju krožnih lokov 350m-180m-270m. 95
- Slika 7.11: Profil vozne hitrosti in spreminjanje *VDK* pri obeh skrajnih vrednosti vzdolžnega naklona pri sosledju krožnih lokov 350m-180m-270m. 96

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

a	pospešek (m/s^2)
A	parameter prehodnice (m)
a_k	pospešek zaradi upora pri kotaljenju (m/s^2)
a_m	motorni pojemek (m/s^2)
a_p	motorni pospešek (m/s^2)
a_r	radialni pospešek (m/s^2)
a_s	komponenta pospeška gravitacije (m/s^2)
a_t	tangencialni pospešek (m/s^2)
a_u	pospešek zaradi zračnega upora (m/s^2)
a_V	vertikalni pospešek (m/s^2)
a_w	pospešek zaradi vetra (m/s^2)
a_Z	vertikalni pospešek (m/s^2)
a_z	pojemek z zavorami (m/s^2)
B	širina vozišča (m)
CCR	krivinska karakteristika (gon/km)
f_R	koeficient trenja v radialni smeri (-)
$f_{R,max}$	maksimalni koeficient radialnega drsnega trenja (-)
$f_{R,max}$	maksimalni koeficient radialnega trenja (-)
F_s	statična torna sila (N)
F_t	drsna torna sila (N)
f_T	koeficient trenja v tangencialni sili (-)
f_t	rezultirajoči koeficient trenja v ravnini vozišča (-)
$f_{t,max}$	maksimalni tangencialni koeficient drsnega trenja (-)
$f_{t,zaht}$	zahtevani koeficient drsnega trenja (-)
G	sila teže vozila (N)
g	gravitacijski pospešek (m/s^2)
K	vertikalna ukrivljenost (%/m)
k_s	statični torni koeficient (-)
k_t	drsni torni koeficient (-)
Ku	krivinska karakteristika (gon/km)
L	dolžina krožnega loka (m)
L'	dolžina pojemanja (m)
L_{cl}	dolžina prehodnice (m)
L_{cr}	dolžina krožnega loka (m)
L_i	skupna dolžina trase (m)
L_i	dolžina izvozne prehodnice (m)
L_m	dolžina zaviranja z motorjem (m)
L_p	dolžina namenjena za pospeševanje (m)
L_{pr}	dolžina preme (m)

L_V	vplivna dolžina pri izvozu iz krožnega loka (m)
L_Z	vplivna dolžina pred uvozom v krožnilok (m)
L_z	dolžina zaviranja z zavorami (m)
m	masa vozila
p_q	pospešek zaradi prečnega naklona (m/s^2)
p_R	bočni pospešek v krivini (m/s^2)
Q	gostota prometnega toka (voz/h)
q_{max}	maksimalni prečni nagib (%)
R	radij krožnega loka (m)
R'	nadomestni radij (m)
s	vzdolžni sklon (%)
S_h	pregledna razdalja (m)
T	sila trenja na vozišču (N)
u	specifični upor zraka (N/N)
V	hitrost (km/h)
v	hitrost (m/s)
$V_{50\%}$	srednja hitrost prometnega toka (km/h)
$V_{85\%}$	hitrost vozil v prostem prometnem toku, ki jo dosega 85% vozil (km/h)
V_{amb}	okoljska hitrost, ki jo dosega vozila v neoviranih pogojih (km/h)
V_{DK}	voznodinamična karakteristika (%)
V_{DK_M}	mejna voznodinamična karakteristika (%)
v_o	vstopna hitrost v krožni lok (m/s)
v_o'	navidezna vstopna hitrost (m/s)
v_{op}	hitrost na koncu pospeševanja (m/s)
V_p	projektna hitrost (km/h)
v_R	hitrost v krožnem loku (m/s)
V_{zas}	zasovalna hitrost (km/h)
W_c	centrifugalna sila v krivini (N)
W_k	upor pri kotaljenju (N)
w_k	specifični upor pri kotaljenju (N/N)
W_S	upor zaradi nagiba nivelete (N)
W_v	vztrajnostna sila vozila (N)
W_z	upor zraka (N)
Z_k	zavorna sila motorja (N)
Z_v	vlečna sila motorja (N)
$\Delta\tau_1$	spmemba središčnega kota na dolžini L_Z (°)
$\Delta\tau_2$	spmemba središčnega kota na dolžini L_V (°)
$\Delta\tau_i$	vsota spremembe središčnih kotov (°)
KDT	koeficient drsnega trenja

1 UVOD

Cestna infrastruktura velja že od antičnih časov naprej za nepogrešljivo sredstvo pri vzpostavljanju stabilnega družbeno-gospodarskega sistema. Če so bile nekoč ceste namenjene v uporabo zgolj omejenemu krogu ljudi, so danes del vsakdanjika slehernega človeka. Od iznajdbe modernega avtomobila s konca 19.st., pa vse do danes, je uporaba cest nepogrešljiv dejavnik trajnostnega gospodarskega razvoja, preseganja komunikacijskih ovir in izboljšanja kvalitete življenja. Zaradi naraščajoče globalizacije svetovnih trgov in potrebe po še učinkovitejših povezavah med posameznimi družbami, je smiselno pričakovati da se bo trend potrebe po dodatni cestni infrastrukturi še okrepil. Vsekakor se v prihodnosti lahko nadejamo še višje gospodarske rasti in kvalitetnejšega življenja, vendar pa ob tem ne smemo pozabiti, da vsak tak razvoj prinaša tudi negativne posledice. Kar zadeva cestno infrastrukturo, so to nedvomno prometne nezgode in posledično tudi smrtne žrtve. Z upoštevanjem dejstva, da je človek glavni tvorec družbenega blagostanja in prosperitete, je njemu edina tudi dolžnost, da cestni sistem oblikuje v skladu z načeli varnosti in stabilnosti.

Gledano s konceptualnega gledišča lahko cestni promet zajamemo z upoštevanjem treh osnovnih dejavnikov: voznik-vozilo-okolica(cesta) ali krajše V-V-O (Katanić et.al, 1982). Pri skoraj vseh členih omenjene povezave, igra človek najvidnejšo vlogo. Kot voznik, nastopa v vlogi tako uporabnika vozila in cest, kot tudi v vlogi njunega tvorca. Na videz homogena tvorba dejavnikov, daje vtis o teoretično trdnem sistemu. Vendar se žal vsa teoretična trdnost in homogenost razblini v trenutku, ko sistem postavimo v resnični prostor in čas. Človek, kot voznik in uporabnik cestnega telesa predpostavlja, da mu tako vozilo kot tudi cestno telo zagotavljata in omogočata tehnično brezhibnost, udobnost, hitrost in predvsem varnost. Načeloma je tem zahtevam z upoštevanjem sodobnih standardov načrtovanja in kvalitetne izdelave vozil skoraj v celoti zadoščeno. A temu ni vedno tako. Bodisi so za to krivi vozniki sami s svojim tveganim vedenjem, bodisi so za to krive napake pri načrtovanju oz. izdelavi vozila ali ceste. Ob tem se je potrebno zavedati, da se lahko vsak tak nezadosten odgovor na voznikove zahteve zrcali v nastanku prometne nezgode.

Iluzorno bi bilo pričakovati, da bi ob tako masovni poplavi prometa, načrtovalec in graditelj ceste zagotovila popolno prometno varnost. Možno pa je, da se s poznavanjem realnih vozno-dinamičnih parametrov, predvidi tista kritična mesta na cesti kjer je verjetnost za nastanek

nezgod največja ali pa celo neizogibna. Eden od teh parametrov je nedvomno hitrost, ki je v večini primerov odločilni dejavnik za nastanek prometne nezgode. Ob tem je potrebno poudariti da hitrost sama po sebi ni nevarna. Teoretično lahko vozilo na neskončno dolgem in iztegnjenem odseku doseže neomejeno hitrost, pa kljub temu ne bo prišlo do nezgode. Problem, ki ga predstavlja hitrost je ravno njeno nenehno spreminjanje med posameznimi horizontalnimi in vertikalnimi deli trasnih elementov. Avtoceste, zaradi relativno velikih geometrijskih elementov, omogočajo ugodne vozno-dinamične pogoje in ne predstavljajo problema v smislu hitrosti. Medkrajevne, dvopasovne ceste, pa so zaradi siromašnejših geometrijskih parametrov in večjih nihanj hitrosti z vidika varnosti bolj vprašljive. Vsako nihanje hitrosti ima za posledico rezultirajoče pospeške kar se posledično odraža v spreminjanju potrebe po koeficientu drsnega trenja na vozišču. Na mestih, kjer so ta nihanja prevelika in odstopajo od potrebnih vrednosti, lahko pride do pojava prometnih nezgod. Nevarnost se še poveča s poslabšanjem vremenskih razmer z nastopom dežja, ali pa s poškodbami voziščne konstrukcije.

1.1 Namen in cilji naloge

Primarni namen pričujoče diplomske naloge je osvetliti povezavo med trasnimi elementi cestne osi in dejansko vozno hitrostjo $V_{85\%}$, ki se na teh elementih pojavlja. Na ta način bi bilo omogočeno izpostaviti in karakterizirati tisti nabor parametrov, ki odločujoče vplivajo na rezultirajoče dinamične učinke in s tem tudi na prometno varnost. Analiza bo omejena na obravnavanje zgolj dvopasovnih cest zunaj naselji v pogojih prostega prometnega toka, brez upoštevanje medsebojen interakcije med vozili. Končni cilj je torej vzpostaviti teoretična izhodišča za določevanje vrednosti parametrov cestne osi v odvisnosti od njihovih vplivov na varnost.

1.2 Postavitev hipotez

V pričujoči raziskavi vpliva trasnih elementov na prometno varnost bodo glavno vodilo naslednje hipoteze:

1. dejanske vozne hitrosti s katerimi uporabniki cest vozijo niso konstantne, temveč trasno pogojene
2. prometna varnost ni odvisna zgolj od velikosti krožnega loka, ampak tudi od ostalih parametrov cestne osi

3. prehodnica (klotoida), kot odločilen element, ki omogoča spreminjanje vozno-dinamičnih količin, neposredno odločujoče vpliva na prometno varnost

1.3 Metode dela

Pri izdelavi pričujoče diplomske naloge bodo uporabljene analitične metode s poudarkom na teoretičnih izhodiščih, ki so jih avtorji predstavili pri snovanju svojih modelov. Pri dokazovanju povezave med trasnimi elementi in prometno varnostjo je nujna uporaba primernih informatiziranih algoritmov.

2 ELEMENTI CESTNE OSI

Standardni elementi cestne osi in njihove mejne vrednosti so podane v pravilniku o projektiranju cest, ki je tudi objavljen v uradnem listu Republike Slovenije. V grobem elemente cestne osi ločimo na tri glavne skupine:

- prema
- krožni lok
- prehodnica

2.1 Prema

Uporaba preme je v cestno-prometni stroki dovoljena zgolj izjemoma in večinoma pri cestah nižje kategorije, saj je prema s svojimi značilnostmi nenaravna oblika v prostoru. Zaradi negativnega vpliva na voznika in povzročanja utrujenosti med vožnjo, je njena dolžina omejena na največ 20-kratno vrednost zasnovalne hitrosti. Predpis tudi določa, da se je potrebno izogibati prem krajših od 4 kratne vrednosti zasnovalne hitrosti.

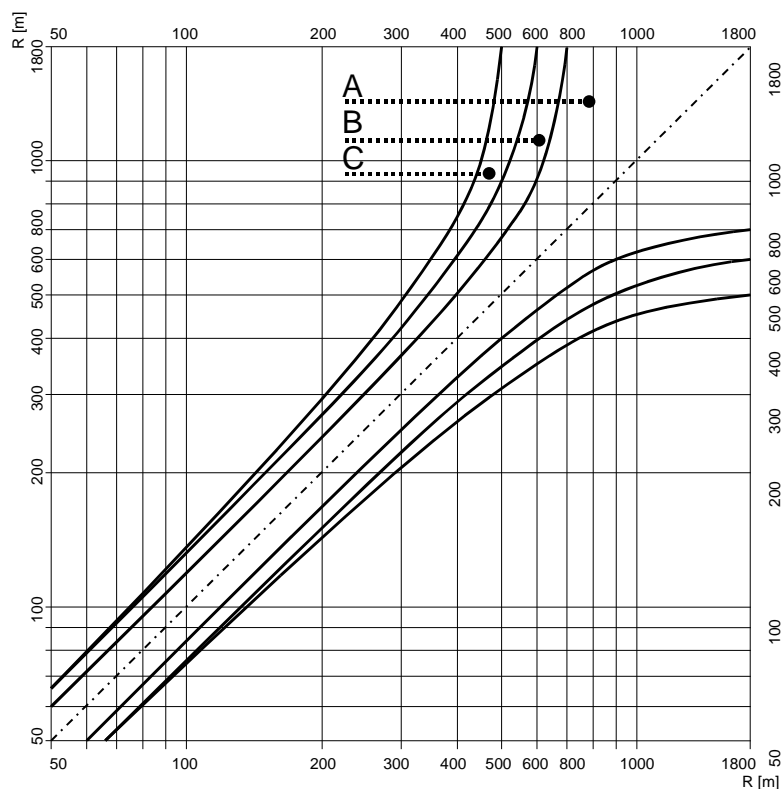
2.2 Krožni lok

Velikost krožnega loka je potrebno izbirati tako, da omogoča pogoje vožnje, ki je najbližja potovalni hitrosti. Dolžino krožnega loka in njegovo umestitev v prostor pogojujejo tudi ostali parametri, kot so preglednost ter usklajenost s topografijo terena in vzdolžnim potekom trase. Dolžino krožnega loka omejuje predvsem potreben čas trajanja vožnje. Za zagotavljanje minimalnih estetskih vrednosti ta čas znaša 5-7 s, minimalni še dopustni čas trajanja vožnje pa ne sme biti manjši od 1,5s. Izbiro primernega polmera krožnega loka pogojuje izbrana zanovalna hitrost, kar je prikazano v spodnji preglednici.

Mejne vrednosti polmerov krožnih lokov za različne tehnične skupine cest (TSC 03/300, 2003).

Tehnična skupina	Zasnovalna hitrost V_{zasn} [km/h]											
	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	
A	R_{min}			125	175	250	350	450	550	700	850	1000
	D_{kl}			35	40	45	50	55	60	65	70	80
B	R_{min} ($q=7\%$)	40	65	100	150	200	275	360				
	R_{min} ($q=5\%$)	50	80	125	180	250	350	475				
	D_{kl}	15	20	25	30	35	40	45				
C	R_{min}	40	65	100	150	225						
	D_{kl}	15	20	25	30	35						

Pri oblikovanju trase ceste je potrebno elemente medsebojno uskladiti glede na radij krožnega loka in tudi glede na dolžino krožnega loka samega. Za vsako od tehničnih skupin cest je potrebno uporabiti ustrezno območje sosledja elementov.



Razmerje sosledja velikosti polmerov krožnih lokov (TSC 03/200, 2003)

2.3 Prehodnica

Prehodnica je trasni element, ki zagotavlja zvezno povezovanje krožnih lokov med seboj ali s premo ter optično in estetsko izvedbo trasiranja. Za izvedbo prehoda se uporablja matematična krivulja klotoida, ki zagotavlja:

- popolno istoležnost tangent na stičnih točkah s krožnim lokom ali premo,
- postopno premosorazmerno spreminjanje zakrivljenosti cestne osi med dvema lokoma,
- postopno premosorazmerno spremembo bočnega pospeška,
- dolžino za izvedbo spremembe prečnega nagiba med dvema lokoma (vijačenje) in
- estetski izgled linij robov vozišča.

Enačba ki opisuje prehodnico je naslednja:

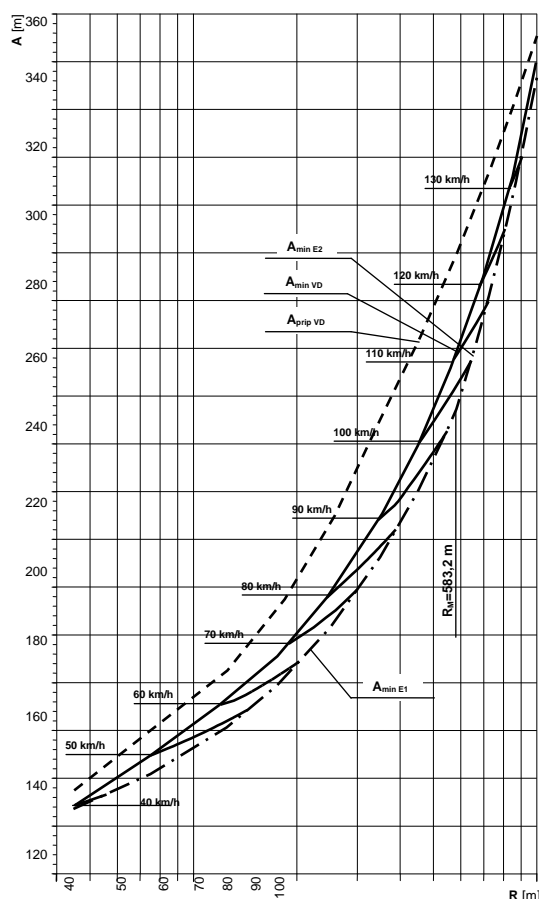
$$A^2 = L \cdot R \text{ (m)}$$

Kjer A pomeni parameter prehodnice v (m), L dolžino prehodnice v (m) in R polmer krožnega loka v (m).

Parameter A predstavlja spremembo ukrivljenosti prehodnice. Velik A pomeni počasno spremembo ukrivljenosti, majhen A pa hitro spremembo ukrivljenosti. Dolžina prehodnice (klotoide) mora zadostiti voznodinamičnim (A_{VD}), konstruktivnim in estetskim (A_E) zahtevam, pri čemer je odločilen tisti kriterij, ki daje večjo vrednost njenega parametra A .

Minimalna vrednost parametra A prehodnice je omejena z estetskim, voznodinamičnim in konstruktivnim pogojem in ne sme biti manjša od $R/3$.

Pri maksimalni vrednosti parametra A je treba upoštevati fiziološki učinek intenzivnosti povečevanja bočnega pospeška (in optično zaznavanje naraščanja ukrivljenosti) ter fizično omejitev možnosti sukanja volana. Parameter A naj nebi bil večji od $A_{\max} = R$, samo izjemoma se lahko uporablja večja vrednost A (pri zelo majhnih radijih v priključkih in v naseljih).



Minimalne velikosti parametra prehodnice (TSC 03/200, 2003).

3 PROMETNE NESREČE IN PROMETNA VARNOST

Po podatkih Svetovne zdravstvene organizacije (Toroyan et.al, 2007), naj bi ceste letno terjale približno 1,2 milijona smrtnih žrtev. Večina, skoraj 90% smrtnih žrtev, se pripeti v srednje in slabo razvitih državah, kjer zaradi slabših gospodarskih razmer trpi kvaliteta cestne infrastrukture. Prognoze niso obetavne. Domneva se, da bodo do leta 2020 smrtne žrtve zaradi prometnih nezgod dosegle tretje mesto med žrtvami povzročenimi zaradi naravnih in drugih nesreč. Veliko večino žrtev še vedno predstavljajo najbolj ranljivi posamezniki v cestnem prometu, kot so mladostniki, pešci, kolesarji, uporabniki javnega prevoza in vozniki motornih koles. Pri tem je najbolj zaskrbljujoč podatek, da so prometne nezgode eden najpogostejših vzrokov smrti med mladostniki starimi manj kot 25 let. Študije v Avstraliji (Toroyan et.al, 2007) so pokazale, da je 17 do 25 let star voznik dvakrat bolj smrtno ogrožen kot njegov nevozeči vrstnik. V ZDA je stanje podobno, saj statistike kažejo da so najbolj ogrožena struktura vozečega prebivalstva mladostniki v starosti med 18 in 20 let, s skoraj 130 smrtnimi žrtvami na milijon voznikov.

3.1 Dejavniki, ki vplivajo na nastanek prometnih nezgod

Z upoštevanjem heterogenosti prometnega toka, različnosti človekovega vedenja in spremenljivosti okolja, lahko dejavnike za nastanek prometnih nezgod smiselno razdelimo v naslednje tri skupine, ki so prikazane v preglednici 3.1.

Preglednica 3.1: Vplivi za nastanek prometnih nezgod

Dejavniki okolja (ceste)	Vplivi vozila	Človeški faktor
Neugodne vremenske razmere	Konstruktivna okvara vozila	Povečana stopnja dojemljivosti za višje hitrosti
Kategorija ceste	Slabo stanje pnevmatik	Alkoholiziranost
Poškodbe in poslabšanje voziščne konstrukcije	Okvara zavornega mehanizma	Vožnja pod vplivom psihoaktivni snovi
Neustrezna vertikalna in horizontalna signalizacija	Okvara krmilnega mehanizma	Upad psihofizičnih sposobnosti
Neustrezno sosledje geometrijskih elementov		Zmanjšan zorni kot vidljivosti
Preglednost		Temperament

Na videz razpršena in heterogena množica vplivov na prometno varnost ima skupni imenovalac, ki je skoraj v vseh primerih vozna hitrost. To tezo še bolj podkrepi podatek, da je v skoraj 30% vseh nesreč s smrtnim izidom, hitrost odločilen parameter (ERSO, 2006). To je

na nek način tudi pričakovano, saj približno 40% do 50% voznikov redno prekoračuje hitrostne omejitve, pri čemer jih 10% do 20% omejitev hitrosti prekorači za več kot 10 km/h. Prekoračitve hitrostnih omejitev same po sebi niso nujno nevarne. Vozniki lahko kljub povišani hitrosti še vedno varno prevozijo zadani odsek. Bolj problematična so povečana nihanja hitrosti med posameznimi deli izbranega odseka, saj se ob zmanjšani učinkovitosti voznikovega reagiranja, povečuje potreba po ugodnejših razmerah na vozišču. Za varno in stabilno vožnjo skozi izbrani odsek bi morale cestno telo v vsakem trenutku nuditi ugodno kompozicijo geometrijskih elementov, visoko kakovost voziščne konstrukcije in vizualno brezhibnost cestnega telesa kot celote. Vse to seveda velja ob ustrezni voznikovi psihofizični motiviranosti. Prav zaradi množice vplivov, ki vsak zase generirajo svojevrsten spekter voznih hitrosti, je praktično nemogoče, da bi jih vse zajeli kot neodvisne parametre v fazi načrtovanja ceste. Edina možnost, ki načrtovalcu ceste preostane je, da s svojimi konstrukcijskimi rešitvami, doseže geometrijsko usklajenost elementov ob upoštevanih okoljskih, pravnih in vozno-dinamičnih omejitvah.

3.2 Vpliv vozne hitrosti

Kot je bilo omenjeno že v predhodnem poglavju, je hitrost eden ključnih dejavnikov za nastanek prometnih nezgod. Fizikalno gledano, hitrost sama po sebi ne predstavlja nevarnosti. Vozilo lahko na zelo dolgem iztegnjenem odseku ceste doseže zelo visoko hitrost, brez nevarnosti za nastanek prometne nezgode. V realnosti je to opaziti na primeru avtocestnega omrežja, kjer kljub razmeroma visokim hitrostim ne prihaja do močnejše povišane stopnje nezgod. Nevarnost se pojavi navadno takrat, ko se hitrosti nenadzorovano spreminjajo. To je v večini primerov rezultat voznikovega obnašanja, stanja cestnega telesa, vremenskih razmer in prometnih obremenitev. Na podlagi teh dejstev, so se osnovali trije glavni teoretični pristopi, ki vsak zase obravnava razmerje med vozno hitrostjo in nevarnostjo nastanka prometnih nezgod (TRB special report, 1998).

Prvi pristop, t.i. informacijsko-procesivni pristop, pravi da vsaka sprememba hitrosti terja od voznika reakcijo, za katero ima na voljo nek določen reakcijski čas t_r . Vrednost t_r ni konstanta, ampak je odvisna od mnogih dejavnikov, prvenstveno pa od voznikovih psihofizičnih sposobnosti. Povprečen reakcijski čas, ugotovljen eksperimentalno znaša med

0,4 – 1,5 s (Katanić et.al., 1983). V tem času mora voznik izvršiti kar štiri zaporedne operacije, ki si smiselno sledijo v zaporedju:

1. Percepcija – psihofizično zaznavanje cestnega telesa
2. Identifikacija – izluščenje kritičnega detajla in spoznanje stopnje nevarnosti
3. Ocena – spoznanje odločitve
4. Realizacija – realiziranje spoznane odločitve

Na prvi pogled zapleten potek reagiranja, vozniki opravljajo podzavestno, kar ima za posledico da v določenih pogojih slabo ocenijo dogajanje na vozišču. Povišana vrednost razlik v vozni hitrosti predstavlja v tem primeru odločilen dejavnik, saj vozniku odvzema možnost do pravočasnega reagiranja in se odlikava v povišani verjetnosti nastanka prometnih nezgod.

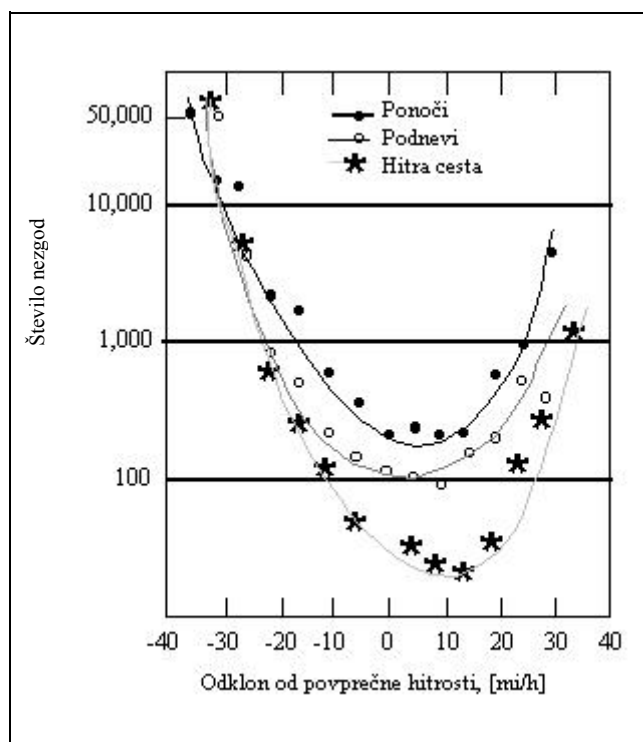
Drugi pristop predpostavlja da na nastanek prometnih nezgod vplivajo nihanja hitrosti v prometnem toku. Vozniki, ki izkazujejo višje deviacije hitrosti od povprečnih, s tem povečujejo nevarnost za nastanek prometnih nezgod. Manjša ko bodo odstopanja od povprečnih hitrosti prometnega toka, manj bo nevarnosti za nastanek prometnih nezgod.

Tretji prestop temelji na predpostavki, da vozniki vozijo v skladu z lastno percepcijo nevarnosti na cesti. To pomeni, da pravzaprav ves čas tvegajo in sicer toliko kot sami ocenijo da si lahko dovolijo. Visoka vozna hitrost sama po sebi zato ni nujno nevarna. Nevarnost nastopi tedaj, ko voznik preceni situacijo in si dovoli višjo stopnjo tveganja glede na realne razmere na cesti. Kljub vsemu pa se lahko zgodi, da voznik privzame relativno nizko stopnjo tveganja pa kljub temu doživi prometno nezgodo. Na tem mestu je potrebno poudariti, da ni več uporabnik ceste tisti od katerega je odvisna varnost, ampak dejansko vozišče s svojimi mehanskimi karakteristikami.

Teoretične pristope razumevanja odvisnosti med hitrostjo in dojemljivosti za prometne nezgode je preučevalo precej avtorjev. Mnogi med njimi so na podlagi empiričnih raziskav podali bolj ali manj zanesljive prognostične modele.

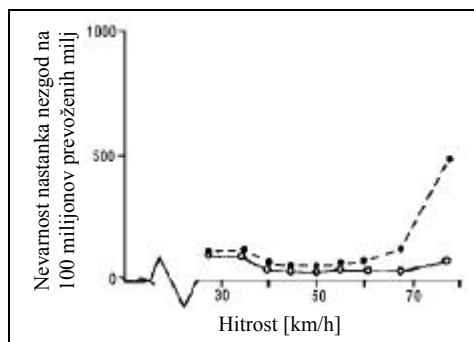
3.2.1 Raziskave voznih hitrosti in prometnih nezgod

Eno prvih raziskav s področja prometne varnosti je leta 1964 v ZDA opravil Salomon (cit. po TRB special report, 1998). Opravil je številna preučevanja prometnih nezgod na 35-ih odsekih medkrajevnih dvopasovnih cest in dognal U-zveze ki so upodobljene na spodnji sliki.



Odvisnost med številom nezgod in odklonom od povprečne hitrosti kot jo je predlagal Solomon leta 1964 (cit. po TRB special report, 1998, str. 47)

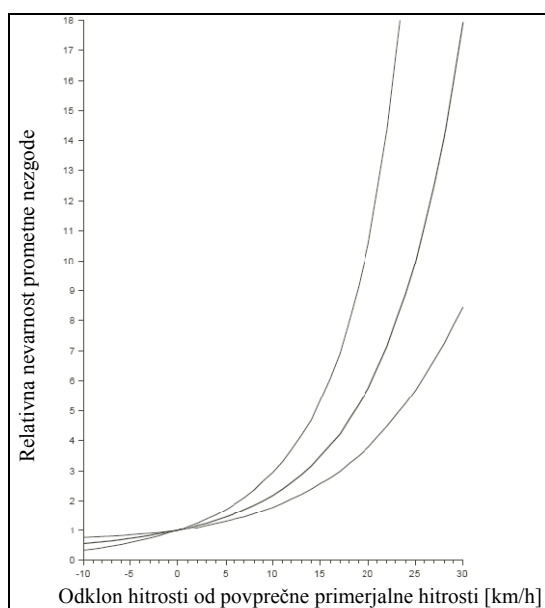
Na zgornji sliki je opaziti nenavadno visoko število nezgod pri hitrostih nižjih od povprečne. To je posledica dejstva je Salomon v svoji raziskavi upošteval tudi nesreče na območju križiščih in ob menjavi voznega pasu. Pri teh vrstah nezgod so bile izkazane hitrosti razmeroma nizke. V ta namen je Cowley leta 1980 (cit. po TRB special report, 1998) preuredil Solomonova empirična dognanja. Za nezgode, kjer pride do zdrsa z vozišča je ugotovil, da se njihovo število močnejše poveča šele pri relativno visokih hitrostih.



Odvisnost med hitrostjo in nezgodami za primer, ko vozilo skrene z vozišča (Cowley, cit. po TRB special report, 1998, str. 50).

Kasnejše raziskave v ZDA so bolj ali manj potrdile Salomonovo U-zvezo med hitrostmi in nezgodami. Avtorja West in Dunn (cit. po TRB special report, 1998) sta leta 1971 objavila raziskavo v kateri nista upoštevala nezgod na križiščih. Prišla sta do sklepa, da U-zveza, kot jo je predlagal Solomon navsezadnje ni tako izrazita. Po njunih izsledkih naj bi bile za voznike najbolj nevarne hitrosti večje od dvakratne standardne deviacije povprečne hitrosti.

Avstralski avtorji (Kloeden et.al., 2001) so se zelo natančno lotili ugotavljanja zveze med hitrostjo in prometnimi nezgodami. Imeli so pomisleke glede Salomonove U-zveze in so zato v ta namen primerjali vozne hitrosti vozil, ki so bila udeležena v nezgodah s hitrostmi tistih, ki so vozila v prostem prometnem toku. Raziskavo so opravili tako na mestnih cestah, kot tudi na medkrajevnih dvopasovnicah. Raziskave so potrdile eksponentno zvezo.



Relativna nevarnost prometne nezgode v odvisnosti od hitrosti (Kloeden et.al., 2001, str. 24)

Povečanje odklona hitrosti za 10km/h je imelo za posledico dvakratno povečanje nevarnosti za nastanek prometnih nezgod. V območju pod povprečno primerjalno hitrostjo niso ugotovili povečane stopnje nezgod in zato podali sklep, da je Salamonova teorija veljavna le pri višjih hitrostih od povprečne.

Predstavljene študije podkrepijo dejstvo, da je pri nastanku prometnih nezgod nihanje hitrosti ključni dejavnik. V raziskavah so bili upoštevani vsi tipi nezgod, tako tisti kjer pride do trčenja dveh vozil, kot tisti kjer je udeleženec nezgode en sam. Kljub temu je možno trditi, da tudi povečan odklon od povprečne hitrosti vodi v povišano tveganje za nastanek nezgod kjer vozilo zdrsne z vozišča. Z upoštevanjem dejstva, da vozne hitrosti bolj ali manj nihajo, so se snovale tudi smernice za projektiranje, ki predvidevajo tako sosledje elementov pri katerem je nihanje hitrosti najmanjše. Žal to velja samo v teoriji. Vozniki se namreč povsem suvereno odločajo o še sprejemljivi stopnji tveganja in vozilo manevrirajo v skladu z informacijskimi ter vozno-dinamičnimi impulzi iz okolice. Rezultat so spremenljive vozne hitrosti in posledično večja nevarnost za nastanek prometnih nezgod.

3.2.2 Analiza prometnih nezgod v odvisnosti od hitrosti v Sloveniji

Za potrebe analize je bila uporabljena baza podatkov prometnih nezgod v formatu zapisa MS Access. Baza podatkov "Nezgode" je vzdrževana s strani Policijske uprave in vsebuje podatke o prometnih nesrečah od leta 1999 do leta 2005 na avtocestah ter glavnih in regionalnih cestah.

Preglednica 3.2: Analiza prometnih nezgod po vzroku od leta 1999-2005.

Opis	Število	Delež
Nepriлагоjena hitrost	25384	22,93%
Neustrezna varnostna razdalja	21256	19,20%
Nepravilna stran/smer vožnje	19427	17,55%
Premiki z vozilom	13157	11,88%
Neupoštevanja pravila o prednosti	13051	11,79%
Ostalo	10382	9,38%
Neppravilno prehitevanje	6179	5,58%
Neppravilnosti na tovoru	1011	0,91%
Neppravilnosti pešca	452	0,41%
Neppravilnosti na cesti	213	0,19%
Neppravilnosti na vozilu	191	0,17%

Kot prikazuje preglednica 3.2, je hitrost najpogostejši vzrok za nastanek prometne nezgode, saj k temu pripomore v skoraj 23%. V ta delež so zajeti vsi tipi prometnih nesreč. V ZDA so te vrednosti nekoliko nižje, kjer ocenjujejo da je neprilagojena hitrost odločilen dejavnik v 12% primerov. Verjetno k temu deloma pripomore svojevrsten temperament slovenskega voznika in dejstvo da je kaznovalna politika v ZDA ostrejša kot pri nas. Podrobnejšo analizo prometnih nezgod s smrtnim izidom prikazuje preglednica 3.3.

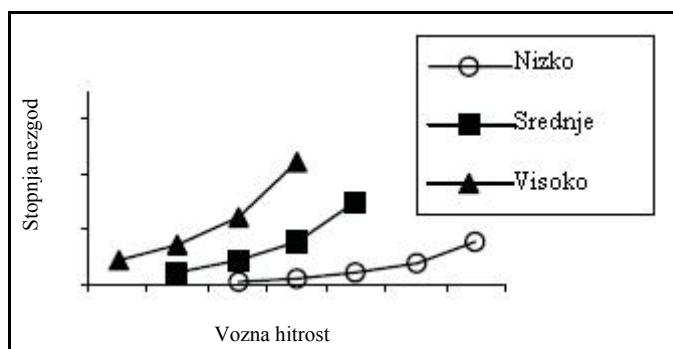
Preglednica 3.3: Analiza deleža nezgod s smrtnim izidom po vzroku od leta 1999-2005.

OPIS	Nezgode s smrtnim izidom	Delež
Neprilagojena hitrost	495	45,00%
Nepravilna smer/stran vožnje	338	30,73%
Neupoštevanje pravil o prednosti	95	8,64%
Nepravilno prehitevanje	73	6,64%
Nepravilnosti pešca	43	3,91%
Ostalo	37	3,36%
Premiki z vozilom	12	1,09%
Nepravilnosti na vozilu	3	0,27%
Nepravilnosti na tovoru	2	0,18%
Neustrezna varnostna razdalja	2	0,18%
<i>Skupaj</i>	<i>1100</i>	<i>100,00%</i>

Tudi zgornja analiza pokaže, da je neprilagojena hitrost eden ključnih dejavnikov pri nastopu nezgod s smrtnim izidom. V Sloveniji je delež takih nezgod še višji kot v ZDA, kjer ocenjujejo da se ta delež suče okoli 30%. Vzrok takemu rezultatu je spet moč iskati v bolj vihravem temperamentu slovenskih voznikov v primerjavi z vozniki iz ZDA.

3.3 Vpliv kategorije ceste

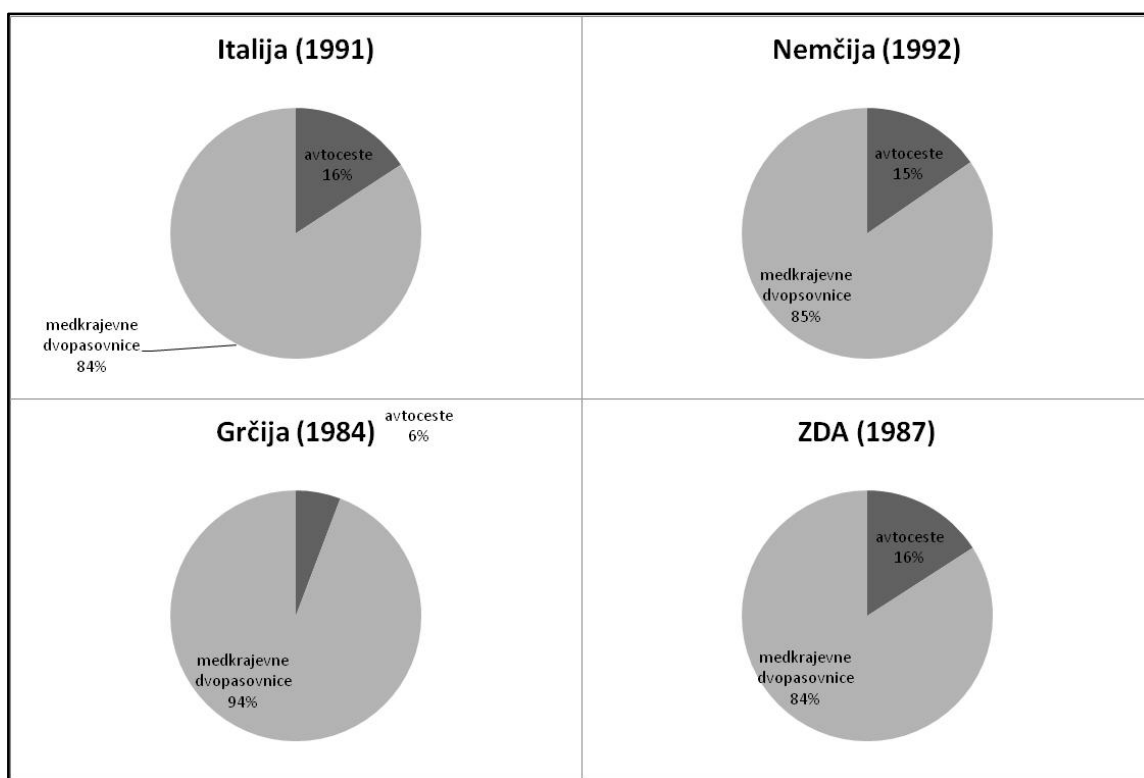
Taylor (cit po. ERSO, 2006), je prišel do zveze ki pravi, da je porast relativne nevarnosti nezgod odvisen od kompleksnosti cestnega omrežja. Pod tem pojmom je opredelil kvalitativno vrednost ceste glede na število informacij, ki jih mora voznik obdelovati med vožnjo. Glede na prometno-tehnično kompleksnost je ceste razdelil v tri glavne skupine, ki si smiselno sledijo kot: nizko, srednje in visoko zahtevne. Pri tem je za vsako od skupin postavil odvisnost med stopnjo nezgod in vozno hitrostjo.



Relativna nevarnost nezdod v odvisnosti od vozne hitrosti in kompleksnosti cestnega omrežja po Taylorju (cit. po ERSO, 2006)

Zgornja slika priča o tem, da so najbolj varne tiste ceste, kjer je količina informacijske zajetnosti najmanjša. Avtoceste (nizko) so z udobnimi, miselno enostavnimi prometno-tehničnimi elementi, razmeroma varne v primerjavi z medkrajevnimi (srednje) in mestnimi cestami (visoko).

Študije po svetu samo potrjujejo zgornje dejstvo. Po raziskavah Lamm-a (1993), so v razvitih državah zahodne Evrope in ZDA, prometno-varnostno najbolj vprašljive medkrajevne dvopasovne ceste.



Nezgode s smrtnim izzidom po posameznih kategorijah cest (Lamm, 1993, str. 9-3)

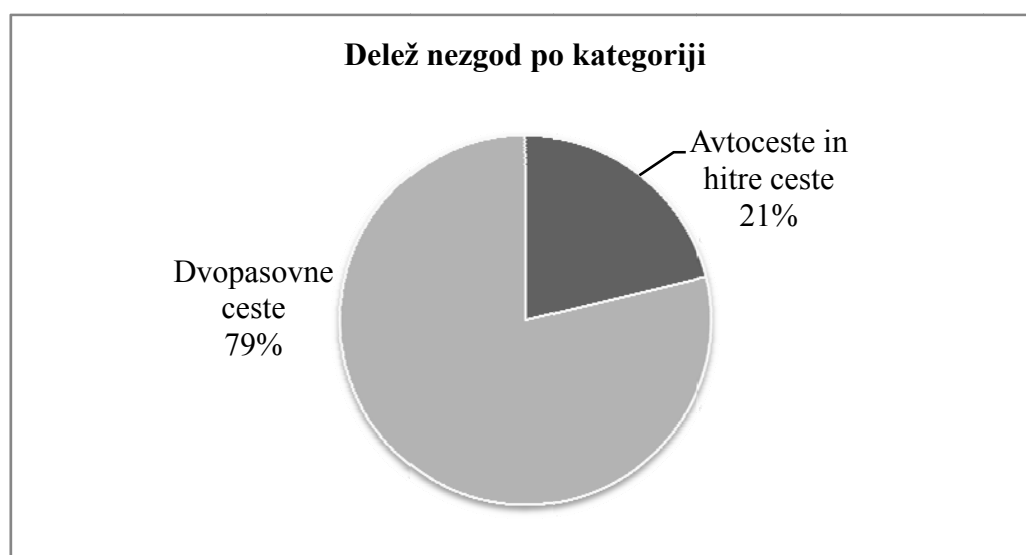
3.3.1 Analiza nezgod v Sloveniji po posameznih kategorijah cest

Slovensko medkrajevno cestno omrežje je sestavljeno iz več kategorij cest, ki skupaj tvorijo tri večje skupine: hitre ceste, glavne ceste in regionalne ceste. Skupna dolžina avtocest in hitrih cest znaša 455 km, medtem ko skupna dolžina glavnih in regionalnih cest znaša 5825 km (DRSC, 2006).

Rezultati krajše analize nezgod po posameznih kategorijah cest so prikazani v preglednici 3.4. Upoštevane so vse nezgode, ki se pripetijo na cestnih odsekih zunaj naselja.

Preglednica 3.4: Analiza nezgod po posameznih kategorijah cest med letoma 1999 in 2005.

Kategorija ceste	Število nezgod	Delež
avtocesta	12729	14,37%
hitra cesta	6085	6,87%
Skupaj	18814	21,24%
glavna cesta 1. reda	17327	19,56%
glavna cesta 2. reda	11471	12,95%
regionalna cesta 1. reda	12567	14,18%
regionalna cesta 2. reda	15457	17,45%
regionalna cesta 3. reda	11959	13,50%
regionalna turistična cesta	999	1,13%
Skupaj	69780	78,76%
<i>Skupaj vse nezgode</i>	<i>88594</i>	<i>100,00%</i>



Slika 3.1: Prikaz deleža nezgod med avtocestami in dvopasovnicami v Sloveniji med letoma 1999 in 2005.

Slika 3.1 še dodatno pojasnjuje analizo prikazano v preglednici 3.4. Medkrajevne dvopasovne ceste izkazujejo več kot $\frac{3}{4}$ vseh nezgod. Delež nezgod na avtocestah pa je primerljiv z deležem v ostalih državah (Lamm, 1993). V Sloveniji (pa tudi drugod) je to pričakovano saj je dolžina dvopasovnih cest veliko daljša v primerjavi z dolžino hitrih cest.

Če analizo omejimo samo na tiste nezgode, ki so nastopile zunaj naselja, zaradi neprilagojenih hitrosti in brez medsebojnega trčenja vozil, dobimo rezultat predstavljen v preglednici 3.5.

Preglednica 3.5: Analiza nezgod po kategoriji ceste zaradi neprilagojenih hitrosti med 1999 in 2005.

Opis	Zaradi neprilagojene hitrosti		Vse nezgode	
	Število nezgod	Delež	Število nezgod	Delež glede na vse nezgode
avtocesta	619	10,09%	12729	4,86%
hitra cesta	193	3,15%	6085	3,17%
Skupaj hitre ceste	812	13,24%	18814	4,32%
glavna cesta 1. reda	781	12,73%	17327	4,51%
glavna cesta 2. reda	815	13,29%	11471	7,10%
regionalna cesta 1. reda	972	15,85%	12567	7,73%
regionalna cesta 2. reda	1424	23,21%	15457	9,21%
regionalna cesta 3. reda	1230	20,05%	11959	10,29%
regionalna turistična cesta	100	1,63%	999	10,01%
Skupaj dvopasovne ceste	5322	86,76%	69780	7,63%
Skupaj	6134	100,00%	88594	6,92%

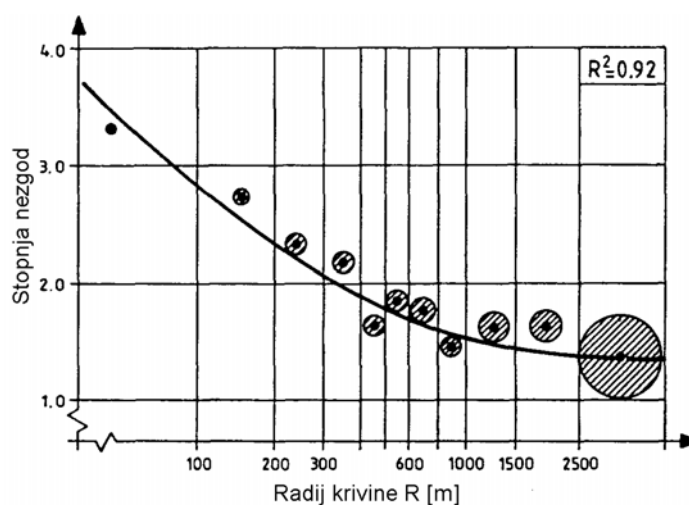
V zgornji analizi so bili upoštevani tudi vozniki pod vplivom alkohola, kar lahko daje nekoliko nerealno višji rezultat. Kljub temu lahko zaključimo, da se na regionalnih cestah nižjega reda skoraj 10% nezgod pripeti zaradi neprilagojene hitrosti in z zdrsom z vozišča. Vzrok takemu deležu je moč iskati v samem tveganem početju voznikov, saj analiza psihofizičnega stanja ni bila opravljena. Kljub temu bi bilo neodgovorno vso krivdo zvaliti na voznike. Marsikje na dvopasovnih cestah nižjega reda ni prometno-tehničnih pogojev, ki zadovoljujejo potrebo po realnih vozno-dinamičnih parametrih. Tudi to je lahko vzrok za izkaz relativno visokega deleža nezgod.

3.4 Vpliv elementov ceste

Zmotno bi bilo razmišljanje, da so za prometno varnost v celoti odgovorni uporabniki ceste. Mnogo nezgod se pripeti tudi zaradi neodgovornega in slabega načrtovanja ceste. Dejstvo, da so medkrajevne dvopasovne ceste najpogostejši vzrok za nastanek nezgod, je razlog, da so se v svetu opravile številne raziskave z namenom osvetliti problematiko nezgod zaradi neustreznosti tehničnih elementov ceste.

Statistične raziskave so pokazale, da ima od vseh geometrijskih dejavnikov, največji vpliv horizontalni krožni lok. Ta element, je bil v večini raziskav tudi najbolj obdelan in analiziran. Novejše raziskave pa kažejo, da poleg horizontalnega krožnega loka pomembno vplivajo tudi ostali elementi prečnega in podolžnega profila. Pri tem izstopajo predvsem vrednosti vzdolžnega in prečnega naklona, širina vozišča, širina bankine (berme) in pregledna razdalja. Vsi ti dejavniki, v kolikor niso medsebojno pravilno usklajeni pomembno povečajo nevarnost na cesti. V ta namen so prilagojene tudi tehnične smernice za projektiranje cest, kjer varnost igra enega glavnih parametrov. Vendar pa dosledna uporaba tehničnih smernic ne pripomore v celoti k varnosti, v kolikor ti elementi ne ustrezajo načelom medsebojne vozno-dinamične usklajenosti. Prav zaradi heterogenosti prometnega toka, spremenljivih okoljskih razmer in različnih voznikovih sposobnosti, je zmotno prepričanje, da doslednost pri upoštevanju tehničnih normativov nujno vodi tudi v zagotavljanje varnosti.

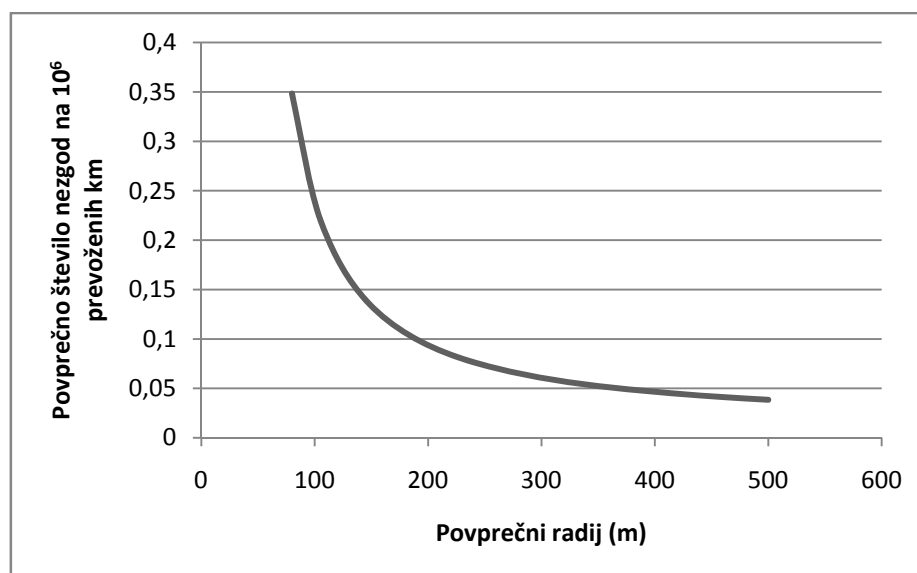
Večina raziskav, tako starejših kot novejših, obravnava horizontalni krožni lok kot najpomembnejši geometrijski dejavnik za nastanek nezgod. Eno novejših zvez je leta 1999 predstavil Lamm in je prikazana na sliki na naslednji strani. Za nastanek nezgod so najnevarnejši krožni loki z majhnim radijem (od 50 do 200 m), pri čemer se z večanjem polmera krožnega loka varnost eksponentno zmanjšuje. Pri polmeru krožnega loka, ki je večji od 1500 m je stopnja nezgod že relativno manjša in ustaljena. Pri medkrajevnih dvopasovnih cestah so v uporabi predvsem manjši radiji, ki redko presegajo vrednosti večje od 1500 m. To je tudi eden izmed razlogov, da so ceste te kategorije tudi prometno varnostno bolj vprašljive.



Prikaz odvisnosti med stopnjo nezgod in polmerom krožnega loka (Lamm,1999).

Poleg Lamm-a je Krammes (1993), na podlagi baze podatkov nezgod in 247 geometrijskih parametrov cestnih odsekov, prišel do zaključka da sta velikost krožnega loka in ukrivljenost pomembna dejavnika za nastanek nezgod. Po opravljeni regresijski analizi je podal naslednjo logaritemsko zvezo:

$$\ln(\text{povprečna stopnja nezgod} + 0,1) = -2,2 + \frac{111,8}{R_{\text{povprečni}} \text{ (m)}} \quad (\text{Krammes et.al., 1998, str. 11-3})$$



Slika 3.2: Povprečna stopnja nezgod v odvisnosti od povprečnega radija po Krammes-u.

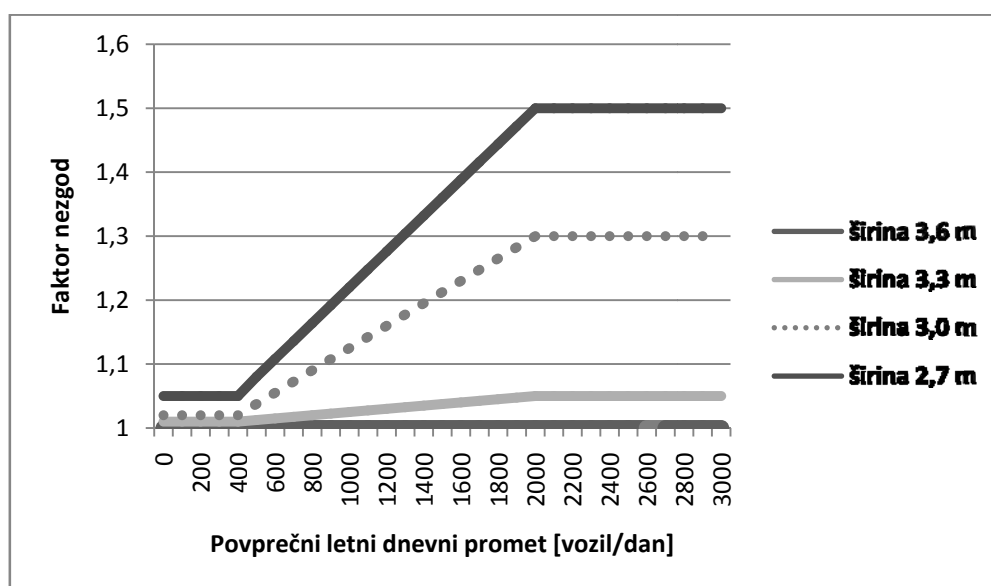
Vrednost povprečnega radija je mišljena kot povprečna vrednost radijev na nekem določen odseku ceste. Odvisnost, ki jo je podal Krammes (1993) v osnovi ustreza razmeram na Ameriških cestah. Kljub temu je možno ob upoštevanju ostalih raziskav predvidevati, da so z

vidika varnosti najbolj vprašljivi relativno majhni krožni loki. Če npr. pri projektiranju dvopasovne medkrajevne ceste, pri zasnovalni hitrosti 70 km/h uporabljamo večinoma minimalni radij velikosti 150 m (UL RS, 1999), lahko približno napovemo da bo povprečna stopnja nezgod na tem odseku dosegla 0,15 nezgod na milijon prevoženih kilometrov. Ta vrednost pa je kar trikrat večja od uporabe radijev velikosti 500 m in več. Ta ugotovitev se sklada z dejstvom, da je delež nezgod na dvopasovnih medkrajevnih cestah približno 3,6 krat večji od deleža nezgod na avtocestnem omrežju.

Ostali geometrijski dejavniki vplivajo na prometne nezgode v nekoliko manjšem obsegu. Če se omejimo na elemente prečnega in podolžnega profila, v največji meri izstopajo:

- širina vozišča
- širina bankine oz.berme
- prečni nagib
- vzdolžni naklon

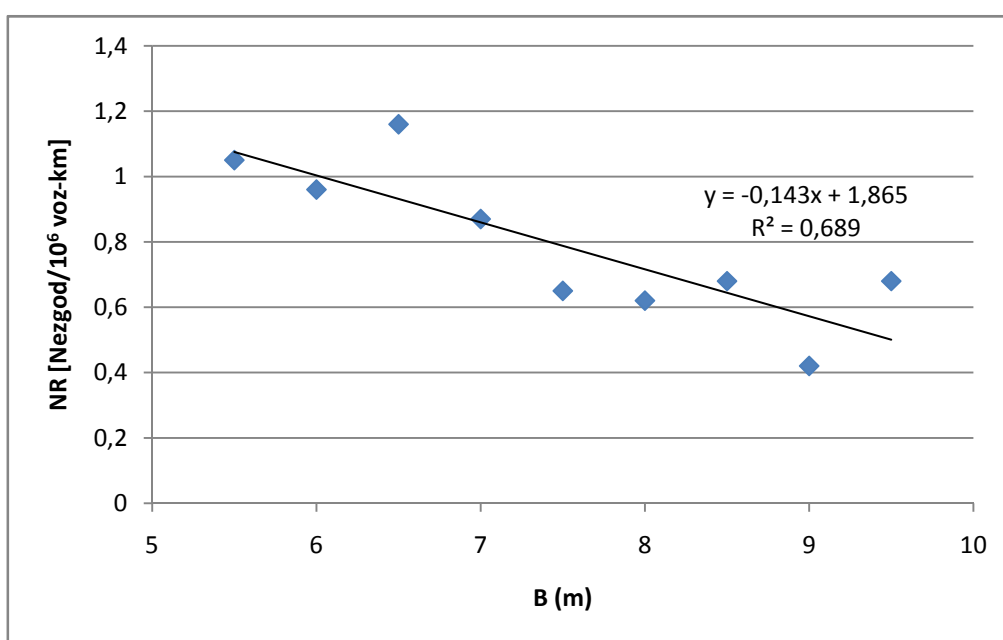
Wooldridge et.al. omenja, da preozka širina voznega pasu vpliva predvsem na pojav čelnega trčenja in zdrsa z vozišča. Prometna varnost je pri tem izražena s faktorjem nezgod. Faktor nezgod je merilo varnosti na cesti in ima osnovno vrednost 1,0. V kolikor se nevarnost poveča, zavzame vrednost večjo od 1,0, v kolikor pa se nevarnost zmanjša pa manjšo od 1,0. Spodnja slika prikazuje odvisnost faktorja nezgod od širina vozišča.



Odvisnost faktorja nezgod od širine voznega pasu (Wooldridge et.al., 2003, str. 13).

Največjo varnost izkazujejo vozišča s širino 3,6 m, najmanjšo pa vozišča s širino 2,7 m. To kaže na to, da je ustrezneje uporabljati večje širine voznega pasu, kar pa ni vedno nujno najboljše. Povečana širina voznega pasu pomeni, da ima voznik na voljo večji manevrski prostor, kar posledično privede do povišanih hitrosti.

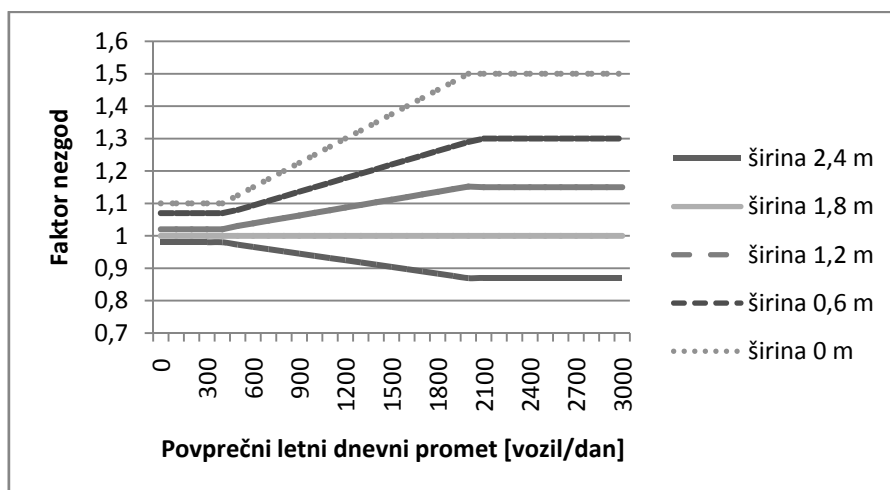
Raziskava stopnje nezgod v odvisnosti od širine vozišča, ki jo je objavil Zemljič (1981), kaže na očitno obratno sorazmerje med tema dvema parametroma. Predvsem je to opazno pri širinah večjih od 6,50m, kar pomeni da večje širine nudijo večjo prometno varnost.



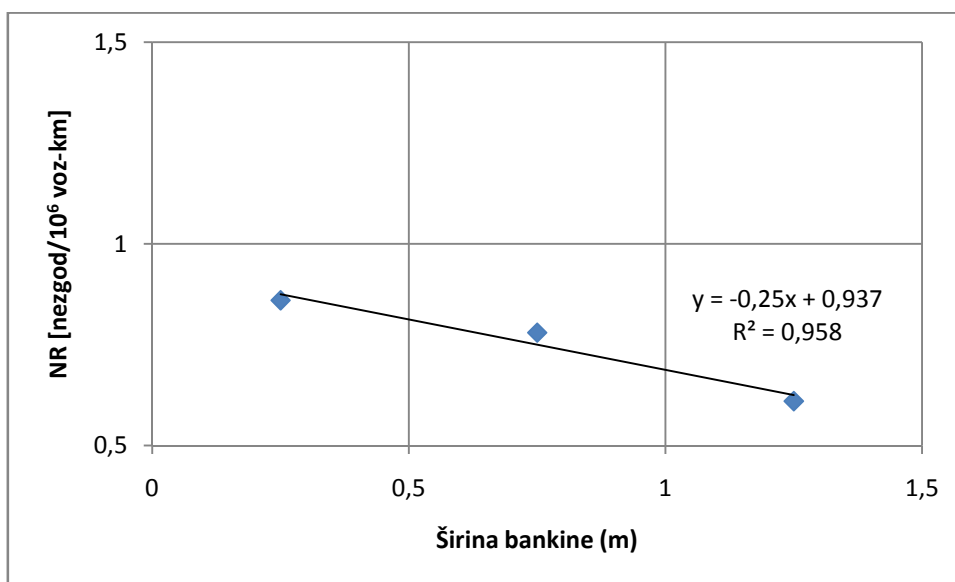
Stopnja nezgod v odvisnosti od širine vozišča (Zemljič, 1981, str.11)

Podoben vpliv na prometno varnost ima tudi širina bankine (berme). Zaradi neustreznih širin ob povečani vrednosti povprečnega letnega prometa, se povečuje verjetnost za nastanek prometnih nezgod.

Širina bankine oz. berme vpliva na voznikovo zaznavanje obcestnega prostora. Voznik namreč med vožnjo v krivino z očmi spremlja obcestni prostor. V kolikor je ta obcestni prostor razmeroma širok, daje vozniku občutek da lahko vozi hitreje in s tem več tvega.



Faktor nezdod v odvisnosti od širine bankine oz. berme (Wooldridge et.al., 2003, str. 14)

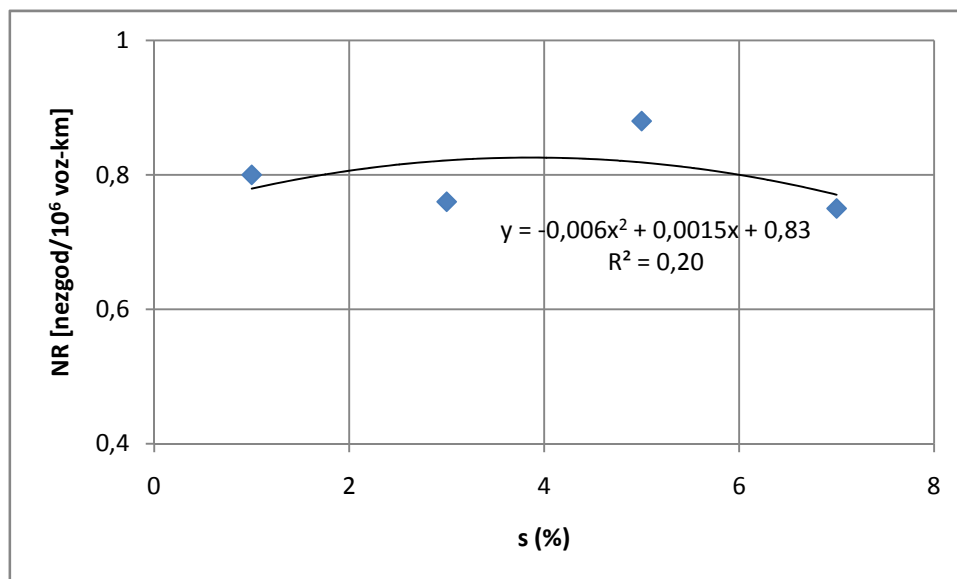


Stopnja nezdod v odvisnosti od širine bankine (Zemljič, 1981, str. 43)

Prečni nagib, kot prvina prečnega profila sam po sebi ne predstavlja nevarnosti. Nevaren je slučaj, ko prečni naklon skupaj s trenjem, zaradi spremenljivih voznih hitrosti, ne uravnoteži nastopajoče centrifugalne sile pri vožnji v krivino. Na problem je med drugimi opozoril Krammes (1993), pojav podrobneje raziskal in prišel do zaključkov, da obstaja statistično trdna zveza med primanjkljajem prečnega nagiba in številom nezdod. Vozne hitrosti, zaradi svoje različne porazdelitve vzdolž odseka, zahtevajo tudi različne vrednosti prečnega nagiba, da lahko ta v povezavi s koeficientom drsnega trenja vozišča tvori zadosten odziv na povečano bočno centrifugalno silo. Zato je primanjkljaj prečnega nagiba v tesni povezavi s potrebnim koeficientom drsnega trenja. V trenutku, ko ta dva parametra ne zmoreta obdržati

vozila na izbrani trajektoriji, lahko pride do zdrsa z vozišča, kar poveča verjetnost za nastanek nezgode.

Nezanemarljiv parameter je tudi vrednost vzdolžnega naklona. Zemljič (1981) je v svoji raziskavi prišel do sklepa, da je možno iz vrednotiti parabolično regresijsko odvisnost med stopnjo nezgod in velikostjo vzdolžnega naklona.



Stopnja nezgod v odvisnosti od vzdolžnega naklona (Zemljič, 1981, str. 34)

3.5 Vpliv okoljskih razmer

Kljub predstavljenim pastem, ki jih generirajo neustrezni elementi ceste, pa ne smemo pozabiti na spremenljivo okolje, ki enakovredno vpliva na nastanek prometnih nezgod. Vpliv okoljskih razmer lahko razvrstimo v naslednje tri skupine:

- stanje na vozišču in z njim povezane trenjske razmere med pnevmatiko in voziščem
- ovire na cestah
- vremenske razmere

Ob tem je potrebno poudariti, da je hitrost spet tisti dejavnik, ki v kombinaciji s prej naštetimi predstavlja nevarnost. Spreminjanje hitrosti in vožnja v krivino generirata sile, ki zahtevajo od vozišča ustrezno reakcijo. Ta reakcija je v osnovi sila trenja, ki pa zaradi variabilnosti okoljskih razmer na vozišču ves čas niha. V trenutku ko sila trenja ne zadosti delovanju aktivnih sil, pride do slučaja povečane prometne nevarnosti.

3.5.1 Analiza nezgod v Sloveniji zaradi okoljskih razmer

Opravljen analiza nezgod med letoma 1999 in 2005 je omejena na obravnavanje primerov na dvopasovnih medkrajevnih cestah zunaj naselji. Izvzete so nezgode, pri katerih je prišlo do trčenja v objekt, povozitve pešca ali trčenja v stoječe vozilo. Kot najpomembnejša vzroka sta bila upoštevana neprilagojena hitrost in nepravilnosti na cesti. Rezultati so prikazani v preglednici 3.6.

Preglednica 3.6: Analiza nezgod v Sloveniji med letoma 1999 in 2005 zaradi okoljskih dejavnikov.

Vremenske razmere	Stanje na površju vozišča							Skupaj	Delež
	Blatno	Mokro	Ostalo	Poledenelo	Sneženo	Spolzko	Suho		
Deževno	0	1389	0	38	5	468	8	1908	17,41%
Jasno	3	319	13	148	28	248	3891	4650	42,43%
Megla	1	63	1	29	1	50	44	189	1,72%
Neznano	0	19	19	3	3	3	22	69	0,63%
Oblačno	0	1395	5	131	80	483	1245	3339	30,47%
Sneg	0	66	1	72	493	145	9	786	7,17%
Toča	0	3	1	0	0	1	0	5	0,05%
Veter	0	1	0	4	2	1	5	13	0,12%
Skupaj	4	3255	40	425	612	1399	5224	10959	
Delež	0,04%	29,70%	0,36%	3,88%	5,58%	12,77%	47,67%		

Rezultati prikazani v preglednici 3.6 kažejo na to, da se večina (42,43%) nezgod zgodi v pogojih suhega in jasnega vremena. S tem se seveda upravičeno sumi da takemu rezultatu botrujejo tudi neugodni in neprimerni pogoji na vozišču. Druga večja skupina nezgod ki predstavlja skoraj tretjino vseh (30,47%), pa se je zgodila v oblačnem vremenu in na mokrem vozišču. To lahko razlagamo z zmanjšanjem koeficienta drsnega trenja na vozišču.

4 REALNA VOZNA HITROST

Izhajajoč iz ugotovitev in analiz prejšnjih poglavij, je možno zaključiti, da je vozna hitrost v kombinaciji z dejavniki okolja in ceste odločujoč vzrok prometne nevarnosti. V ta namen se bom v nadaljevanju pričujočega prispevka omejil na obravnavanje realnih voznih hitrosti v povezavi z dejanskimi stanji vozišča.

4.1 Definicija hitrosti

4.1.1 Fizikalne osnove

Teoretično gledano je hitrost fizikalna količina z določeno smerjo in vrednostjo. Zato jo lahko predstavimo kot vektorsko količino (Kladnik, 1989). Definirana je kot kvocient spremembe krajevnega vektorja masne točke v določeni časovni enoti. Diferencialni zapis hitrosti je naslednji:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (\text{Kladnik, 1989, str. 7})$$

Zgornja enačba predstavlja enakomerno gibanje poljubne točke v prostoru. V splošnem pa se vektorju hitrosti spreminja tako smer kot vrednost, zato pri tem nastopi pospešek. Definiran je kot kvocient spremembe hitrosti in časovnega intervala, v katerem se sprememba zgodi. Diferencialni zapis pospeška je naslednji:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \quad (\text{Kladnik, 1989, str. 8})$$

Pri vožnji na ravnem, iztegnjenem delu trase se v grobem pojavljata vektorja hitrosti in pospeška, katerih smer je enaka smeri vožnje. Pri vožnji v krivini pa ima vektor hitrosti smer tangente na krožni lok, pri čemer se pojavita radialni in tangencialni pospešek. Prvi ima smer pravokotno na smer hitrosti, drugi pa je njej vzporeden. Poleg teh dveh deluje še gravitacijski pospešek, ki pa je načeloma ves čas konstanten. Celoten pospešek lahko zapišemo kot vektorsko vsoto tangentialnega pospeška a_t , radialnega pospeška a_r in vertikalnega pospeška a_z .

$$\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_r + \vec{a}_z \quad (\text{Juvanc, 1990, str. 23})$$

Ker je vertikalni oz. gravitacijski pospešek večinoma nespremenljiv in zanemarljivo malo vpliven je za obravnavo vozno-dinamičnih količin pomembno predvsem stanje v ravnini, ki jo predstavlja vozišče. Tako lahko prejšnjo enačbo zapišemo v nekoliko poenostavljeni obliki z naslednjo zvezo:

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_r^2} \quad (\text{Kladnik, 1989, str. 8})$$

Pri tem lahko oba pospeška izrazimo s preprostima enačbama:

$$a_t = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (\text{Kladnik, 1989, str. 8})$$

$$a_r = \frac{v_r^2}{R} \quad (\text{Kladnik, 1989, str. 21})$$

Pospeševanje ali pojemanje nekega telesa je lahko bodisi enakomerno pospešeno ali neenakomerno pospešeno. Realno gledano je vsako gibanje vozila na cesti zaradi množice posrednih in neposrednih vplivov neenakomerno pospešeno. Modeliranje takega gibanja je praktično nemogoče doseči, zato se privzame načelo, da je gibanje vozila lahko enakomerno, enakomerno pospešeno ali enakomerno pojemajoče. Pri taki vrsti gibanja privzamemo konstantne in časovno neodvisne vrednosti pospeškov.

4.1.2 Hitrost kot parameter prometnega toka

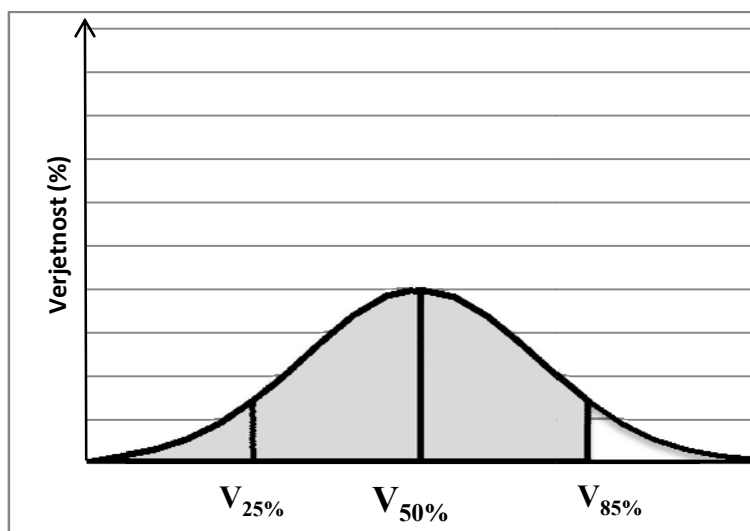
Zaradi množice tako neposrednih kot posrednih vplivov, je vozna hitrost stohastično porazdeljena količina (Katanić et.al., 1982). Zato lahko realne podatke o hitrostih dobimo le z meritvami na terenu in ob pomoči empiričnih raziskav. Dejanska vozna hitrost je skoraj v celoti odvisna gostota prometnega toka, kar lahko zapišemo s poenostavljeno enačbo:

$$V = f(Q) \quad (\text{Katanić et.al., 1982, str. })$$

Pri tem lahko ločimo dva skrajna tipa voznih hitrosti:

- Neovirana vožnja pri relativno nizki gostoti prometnega toka ($Q \approx Q_{\text{prostega toka}}$). Vpliv ostalih vozil je zanemarljiv ali pa ga sploh ni, kar ima za posledico visoke vozne hitrosti.
- Ovirana vožnja v koloni pri relativno gostem prometnem toku. Vpliv ostalih vozil je razmeroma velik, kar pomeni nizke vozne hitrosti ali pa celo zastoje.

Med tema dvema skrajnostima je možnih še vrsta ostalih definicij hitrosti, ki so prvenstveno odvisna od gostote prometnega toka. Večinoma so vsa ta pojmovanja zajeta v pokazateljih nivoja uslug, ki na podlagi gostote prometnega toka določajo različne parametre o udobnosti ceste. Ker je bilo v začetnih poglavjih navedeno da na prometno varnost najbolj vplivajo neprilagojene vozne hitrosti, je smiselno se omejiti na cestne razmere, ki k temu najbolj pripomorejo. Bolj pomembno od poznavanja nivoja uslug je dejstvo, da so vozne hitrosti porazdeljene v skladu z normalno distribucijo.



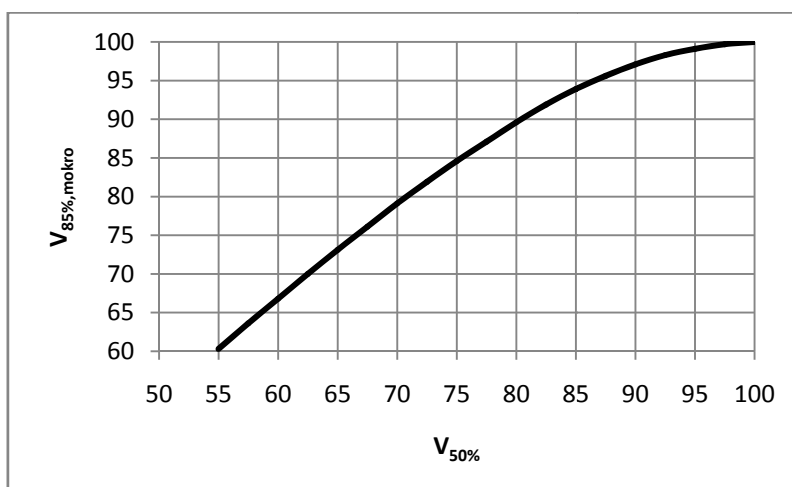
Verjetnostna porazdelitev hitrosti na cesti (Katanić et.al., 1982, str.48).

Med vsemi karakterističnimi vrednostmi hitrosti, sta z vidika prometne varnosti najbolj pomembni (Katanić et.al., 1982):

- $V_{50\%}$, ki predstavlja pogoje odvijanja prometa. To je hkrati tudi srednja hitrost prometnega toka ($V_{50\%} \approx V_{\text{srednja}}$), ki jo dosega 50% vozil.
- $V_{85\%}$, ki predstavlja merodajno hitrost za analizo prometne varnosti na mokrem vozišču. To hitrost v prostem prometnem toku dosega 85% vozil.

Eno redkih teoretičnih odvisnost med $V_{50\%}$ in $V_{85\%}$ podaja naslednja regresijska enačba:

(Köppel, 1984, str. 14)



Grafični prikaz odvisnosti med $V_{50\%}$ in $V_{85\%}$ (Köppel, 1984, str. 11).

V fazi načrtovanja cest se uporablja več karakterističnih tipov hitrosti. Osnovna hitrost V_0 je definirana kot hitrost pri merodajni gostoti prometnega toka (Q_{mer}) in izhaja iz ustrezne kategorije nivoja uslug. V_0 je določena na osnovi merodajnega vozila in prostorskih omejitev, kar pa praktično pomeni da je njena vrednost enaka $V_{50\%}$. Na podlagi tako dobljene osnovne hitrosti je možno določiti projektno hitrost V_{proj} , ki se jo uporablja pri dimenzioniranju geometrijskih parametrov trase. Glede na najnovejše tehnične smernice so karakteristične hitrosti razvrščene v naslednje skupine (TSC 02.300, 2003):

- V_{voz} , je vozna hitrost posameznega vozila v prometnem toku
- $V_{rač}$, je računsko hitrost, ki se uporablja pri izračunu in določanju tehničnih elementov trase.
- V_{dov} , je dovoljena hitrost, ki jo posebej določa cestno-prometna signalizacija
- V_{pot} , je potovalna hitrost, ki jo vozila dosegajo na določeni trasi
- V_{zas} , je zasnovalna hitrost, ki glede na kategorijo ceste in prostorske omejitve v omrežju določa dimenzije geometrijskih in tehničnih elementov ceste. Predstavlja pa tudi garancijo, da uporabljeni elementi ne bodo prepreka pri doseganju zelenega nivoja uslug, zato je navadno ta hitrost višja od osnovne hitrosti V_0 .
- V_{proj} , je projektna hitrost, poznana tudi kot $V_{85\%}$ na mokrem in čistem vozišču, ki se uporablja za analizo udobnosti in varnosti v prostem prometnem toku. Nanjo imajo vpliv predvsem tehnični elementi ceste in se določa naknadno. V osnovi je njena velikost v mejah med posamezno računsko hitrostjo $V_{rač,i}$ in maksimalno hitrostjo $V_{rač,max}$, kar lahko zapišemo z neenačbo kot (Katanič, 1983): $V_{rač,i} \leq V_{proj} \leq V_{rač,max}$.
- V_{rad} , je bočna hitrost in se uporablja kot mera bočnega premika vozila.

Z vidika prometne varnosti je najpomembnejše poznati hitrost $V_{85\%}$. V Slovenskih tehničnih smernicah (TSC 02.300, 2003), so opredeljene naslednje zveze med projektno in zasnovalno hitrostjo:

- za ceste z ločenima smernima voziščema in $V_{zas} \leq V_{dov}$:

$$V_{proj} = V_{zas} + 10 \text{ km/h} \quad (\text{izrazita ukrivljenost})$$

$$V_{proj} = V_{zas} + 20 \text{ km/h} \quad (\text{iztegnjene trase})$$

- za enovoziščne dvopasovne ceste in $V_{zas} \leq V_{dov}$:

$$\max V_{proj} = V_{dov}$$

$$\min V_{proj} = V_{dov}$$

Tak pristop je sicer ustrezen za hitro preveritev vozno-tehničnih pogojev na trasi, ne omogoča pa natančnejših analiz. Velja namreč ob predpostavki, da se vozne hitrosti gibajo v vnaprej določenih mejah. Köppel je leta 1984 v svoji obširni raziskavi pokazal da se realne vozne hitrosti zaradi vpliva trasnih elementov razlikujejo od zasnovalne vozne hitrosti. Dejstvo je, da je razpršitev hitrosti razmeroma velika in zato ni pričakovati, da pristop z upoštevanjem konstantne vozne hitrosti pomeni tudi ustrezno stopnjo prometne varnosti.

Na problem pomanjkljivosti v tehničnih smernicah je opozoril tudi Polus et.al. (1993), ki je opravil raziskavo standardov po posameznih državah. Ugotovil je, da v nekaterih razvitih državah, kot sta ZDA in Kanada, še zmeraj ne upoštevajo projektne hitrosti $V_{85\%}$ pri načrtovanju cest. V teh dveh državah, še vedno velja kot osnovni parameter pri dimenzioniranju zasnovalna hitrost, ki je definirana kot »maksimalna možna hitrost na določenem odseku ceste, ki jo v ugodnih vremenskih pogojih omogočajo elementi ceste«. Tak princip sicer še ustreza določanju avtocestnih geometrijskih elementov, saj je uporabljena zasnovalna hitrost relativno visoka in so zato variacije realne vozne hitrosti relativno majhne. Problem je veliko bolj pereč na medkrajevnih dvopasovnih cest, kjer se navadno uporabljajo nižje zasnovalne hitrosti. Zaradi vse hitrejšega napredka avtomobilske tehnologije in sprememb v voznih sposobnostih voznikov, je bilo s strani mnogih avtorjev (Krammes et.al., 1993) ugotovljeno, da se realne vozne hitrosti na določenih odsekih medkrajevnih cest precej razlikujejo od zasnovalne vozne hitrosti.

V ostalih razvitih državah so se problema razlik med zasnovalnimi in realnimi voznimi hitrostmi zavedali in v tehničnih smernicah tudi uvedli ustrezne popravke, ki temeljijo na upoštevanju $V_{85\%}$.

Nemške tehnične smernice (RAS-L, 1984) nalagajo načrtovalcem upoštevanje tako zasnovalne vozne hitrosti kot tudi $V_{85\%}$. Z uporabo zasnovalne hitrosti se določijo osnovni geometrijski elementi ceste, medtem ko se z upoštevanjem $V_{85\%}$ določijo zaustavitvena razdalja in prečni nagib vozišča. $V_{85\%}$ je določena teoretično, na podlagi empiričnih raziskav z upoštevanjem geometrijskih karakteristik ceste. V kolikor le-ta na določenem delu trase presega zasnovalno hitrost za več kot 20 km/h, je potrebno povečati zasnovalno hitrost ali pa spremeniti sosledje geometrijskih elementov. Postopek se nato ponavlja toliko časa dokler ni zagotovljena popolna usklajenost elementov.

Švicarski tehnični normativi (Polus et.al., 1993) predvidevajo določitev $V_{85\%}$ v vseh elementih horizontalne geometrije. Pri tem določajo primerjanje medsebojnih vrednosti $V_{85\%}$, kar omogoča določitev vseh tistih mest, kjer prihaja do prevelikih hitrostnih razlik.

Britanske tehnične smernice (Polus et.al., 1993) določajo, da so odseki ceste usklajeni glede na primerno dolžino pregledne razdalje. Omogočajo uporabo veliki krožnih lokov s primerno pregledno razdaljo in majhne krožne loke z neprimerno pregledno razdaljo. Na ta način naj bi bili vozniki pravilno obveščeni v kakšen tip krožnega loka vozijo. Zasnovalna in $V_{85\%}$ hitrost sta odvisni od prvin prečnega profila in pregledne razdalje. S tem se za vsak odsek izbere drugačna vrednost zasnovalne hitrosti, kar ima za posledico finančne in okoljske prihranke.

Avstralske tehnične smernice (Polus et.al., 1993) so praktično edine, ki za zasnovalno hitrost upoštevajo dejanske vozne hitrosti iz vzorca $V_{85\%}$. Za vse ceste, kjer je dovoljena hitrost nižja od 90 km/h se uporablja vrednost $V_{85\%}$. Za ostale odseke cest, kjer je dovoljena hitrost višja od 100 km/h pa se uporablja zasnovalna hitrost.

Kar nekaj tehničnih smernic torej aktivno uporablja $V_{85\%}$ pri dimenzioniranju tehničnih elementov ceste, vsi z željo zagotavljanja višje varnosti. Te določbe so sicer dobrodošle in pravzaprav nujne, a ne omogočajo preveritve ustreznosti sosledja elementov, kjer lahko zaradi variacij v realnih voznih hitrostih prihaja do povečane stopnje nezgod. Pri tem velja omeniti tudi starejše odseke cest, kjer so bili upoštevani zastareli tehnični normativi. Za ustrezno vozno-dinamično analizo je nujno poznati dejanske vozne hitrosti $V_{85\%}$ na vseh trasnih elementih.

4.2 Vplivi na vozne hitrosti

Kot je bilo omenjeno v tretjem poglavju je prometna varnost v največji meri odvisna od spreminjajočih se voznih hitrosti. Dejavniki, ki vplivajo na realne vozne hitrosti so v marsičem podobni dejavnikom na nastanek nezgod. Nasploh so se realne hitrosti od leta 1965 v krožnih lokih povečale za približno 12 km/h. Na to sta neposredno vplivala hitrejši avtomobilski razvoj vozil in pnevmatik. Posredne dejavnike pa lahko razvrstimo v naslednje kategorije (Juvanc, 1991):

- radij krožnega loka
- širina vozišča

- dolžina krožnega loka in pridruženih velikosti prehodnic
- ukrivljenosti trase (krivinska karakteristika)
- zaustavna pregledna razdalja
- vzdolžni nagib nivelete
- velikosti radija vertikalne zaokrožitve

Poleg teh pa velja omeniti še:

- prečni nagib vozišča
- vremenske in okoljske razmere
- prometne obremenitve

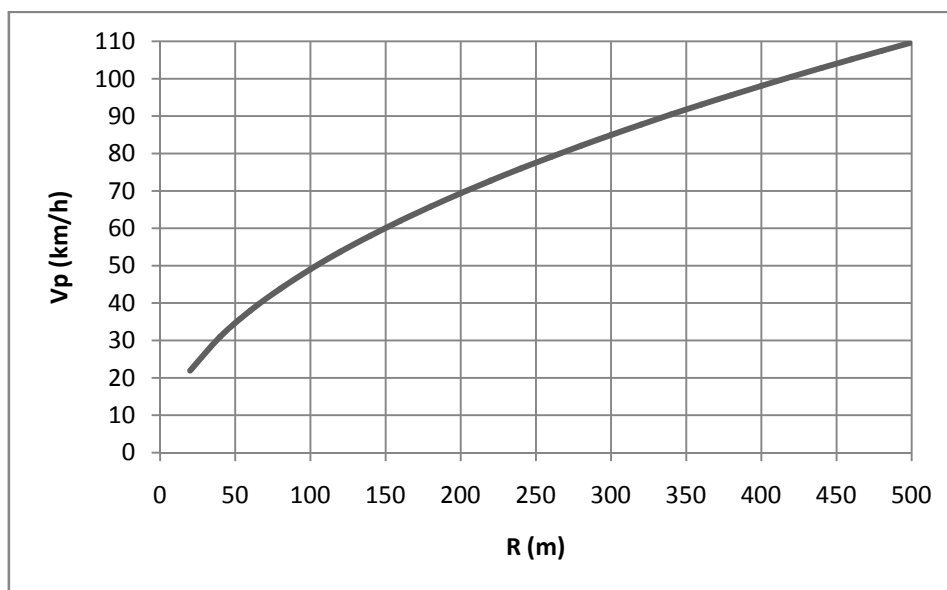
4.2.1 Vpliv radija krožnega loka

Švicarski strokovnjaki so že leta 1965 ugotovili, da so različne vozne hitrosti posledica različnih krožnih lokov (Köppel, 1984). Z rastočo vrednostjo velikosti horizontalnega krožnega loka se povečuje tudi realna vozna hitrost, ki je v tem primeru neodvisna od zasnovalne hitrosti krožnega loka. Vzrok taki zvezi je moč iskati v dejstvu, da se s povečano stopnjo radija krožnega loka zmanjšuje vrednost rezultirajočega bočnega pospeška. Voznik namreč ne pozna dejanske velikosti horizontalnih elementov, zato je edini neposredno dobljeni impulz z vozišča, bočni pospešek. V povprečju se vsi vozniki ravnavajo tako, da v krožni lok vozijo do meje udobnosti, ki jo predstavlja povprečna vrednost bočnega pospeška 0,3g ali 2,94 m/s² (Katanić et.al. 1982).

Teoretična zveza med hitrostjo in radijem je osnovana na predpostavki, da je vožnja v krivini konstantna, pri čemer se upoštevajo mejne vrednosti elementov prečnega profila. Z upoštevanjem dinamičnih učinkov vožnje lahko zapišemo spodnjo enačbo:

$$V_p = \sqrt{127 \cdot R(f_{r,max} + q_{max})} \quad (\text{Spacek, 2004, str. 2})$$

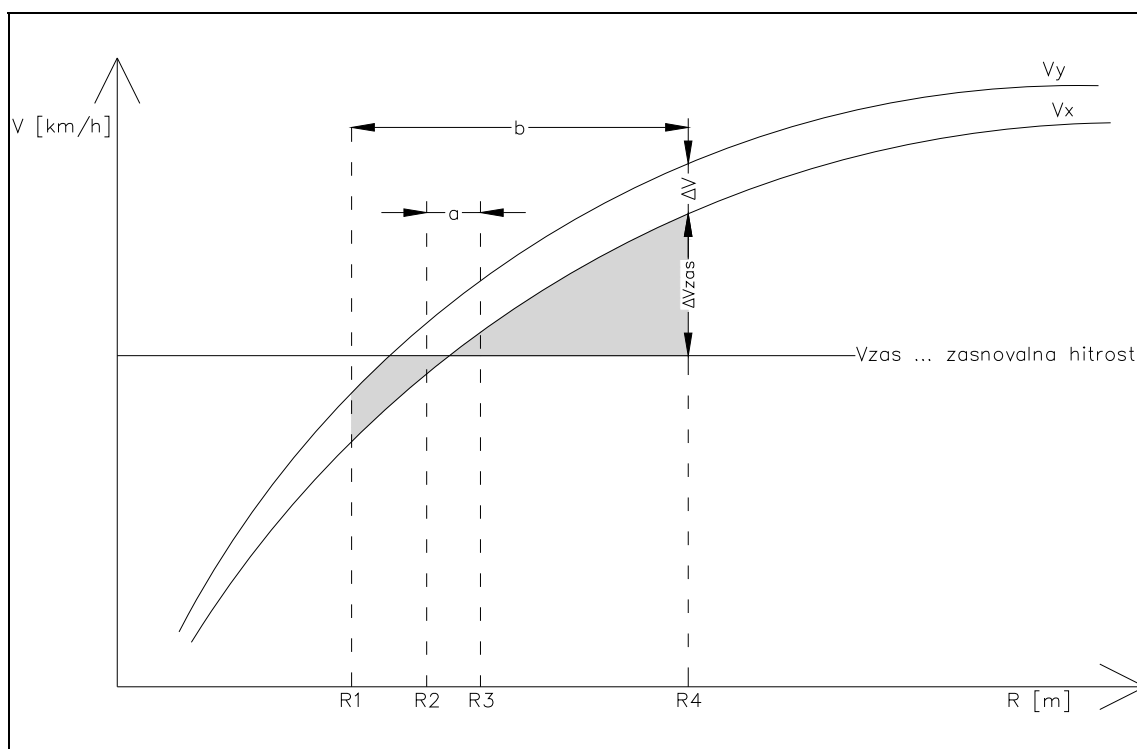
Pri čemer pomenijo V_p projektna hitrost v krožnem loku v (km/h), R velikost radija krožnega loka (m), $f_{r,max}$ maksimalni koeficient radialnega trenja in q_{max} maksimalni prečni nagib v (%). Ob upoštevanju $q_{max} = 7\%$ lahko iz vrednostimo pripadajočo krivuljo odvisnosti $V_p(R)$.



Teoretična zveza med dejansko vozno hitrostjo in radijem krožnega loka (Spacek, 2004, str.2)

Strogo teoretična zveza med hitrostjo in radijem krožnega loka določa, da je vozna hitrost navzgor neomejena. Tega v realnosti seveda ni pričakovati. Že Trapp je leta 1971 ugotovil da obstajajo neke trasno-karakteristične hitrosti (cit. po Juvanc, 1991). Posebno očitna je razlika med realnimi hitrostmi na novogradnjah in starejših cestah. Starejše ceste so bile trasirane po principu vstavljanje krožnih lokov v tangentni poligon, novejše trase pa so navadno trasirane po principu sestavljanja krožnih lokov. Pri starejših cestah zato često prihaja do daljših ali krajših iztegnjenih delov trase kar ima lahko za posledico nihanje hitrosti v krožnih lokih. Empirične raziskave, ki so jih opravili številni avtorji, so pokazale relativno strmo naraščanje hitrosti v območju radijev manjših od 350 m in nato upočasnjeno naraščanje v območju radijev večjih od 350 m (Juvanc, 1991). Zanimivo je bilo, da so te vrednosti v območju relativno majhnih radijev podobne, nakar se postopoma začnejo močneje razlikovati. To kaže na dejstvo, da je radij krožnega loka vpliven parameter samo znotraj omejenega intervalnega razreda krožnih lokov. Pri večjih vrednostih radija pa se veliko bolj izrazito kaže vpliv drugih parametrov.

Eno izmed obširnih raziskav na področju realnih voznih hitrosti je opravil Köppel (1984) in na podlagi empiričnih dognanj postavil osnove za teoretično obravnavo realnih voznih hitrosti. Preiskal je vpliv vseh glavnih geometrijskih elementov in prišel do sklepa, da je velikost radija krožnega loka ena izmed najvplivnejših. Poleg tega je določil tudi zvezo med vozno in zasnovalno hitrostjo ob upoštevanju radija krožnega loka.



Teoretična odvisnost med velikostjo krožnega loka, zasnovalno hitrostjo in realnimi voznimi hitrostmi (Köppel, 1984, str. 8).

Iz zgornje slike lahko razberemo tri osnovne značilnosti kot jih pojmuje Köppel (1984):

- Realne vozne hitrosti za določen radij imajo zgornjo in spodnjo mejo V_x in V_y .
- Rastoča vrednost velikosti krožnega loka botruje naraščanju realnih voznih hitrost V_x in V_y .
- Za različna območja radijev se ob spremembi zasnovalne hitrosti spreminja območje (območje a), kjer so realni vozno-dinamični pogoji enaki oz. v mejah, ki so bile uporabljene pri zasnovah elementov (območje b).

Večina ostalih raziskav po svetu se ujema z dognanji Köppel-a in določa radij krožnega loka kot statistično najvplivnejši. Oblika krivulj je značilno logaritemske oblike, ki se pri razmeroma velikih vrednostih radija asimptotično približuje hitrosti ki jo vozila dosegajo na iztegnjenem delu trase in v pogojih prostega prometnega toka. Neposrednih zvez med tema dvema parametroma je precej. Nekaj od teh je predstavljeno v nadaljevanju.

Raziskave v Franciji (Chrisman et.al., 2003) so prišle do zveze med realno vozno hitrostjo ($V_{85\%}$) in radijem na podlagi števila voznih pasov. Za dvopasovne medkrajevne ceste velja zveza:

$$V_{85\%} = \frac{86}{1+314/R^{1,5}} \quad (\text{Chrisman et.al., 2003, str. 4})$$

V ZDA se je s problemom odvisnosti $V_{85\%}(R)$ ukvarjalo več avtorjev. Vsi so prišli do podobnih ugotovitev (cit. po Fitzpatrick et.al., 2000):

- Taragin je leta 1953, na podlagi merjenih podatkov 35 krivin prišel do zveze:

$$V_{85\%} = 88,87 - \frac{2554,76}{R} \quad (\text{Fitzpatrick et.al., 2000, str. 24})$$

- Glennon in ostali avtorji so leta 1985 na podlagi raziskav na 56 krivinah prišli do naslednje zveze:

$$V_{85\%} = 103,69 - \frac{4524,94}{R} \quad (\text{Fitzpatrick et.al., 2000, str. 24})$$

- Lamm in Choveini sta leta 1986 na podlagi raziskav hitrosti na 261 krožnih lokih prišla do naslednje zveze:

$$V_{85\%} = 94,39 - \frac{3189,94}{R} \quad (\text{Fitzpatrick et.al., 2000, str. 24})$$

- Islam in Senevicty sta leta 1994 odala naslednjo zvezo:

$$V_{85\%} = 103,03 - \frac{4208,76}{R} - \frac{36597,92}{R^2} \quad (\text{Fitzpatrick et.al., 2000, str.24})$$

- Krammes (1993), je na osnovi raziskav opravljenih v ZDA na 247 krožnih lokih prišel do naslednje zveze:

$$V_{85\%} = 103,6 - \frac{3405}{R} \quad (\text{Krammes, 1993, str. 11-3})$$

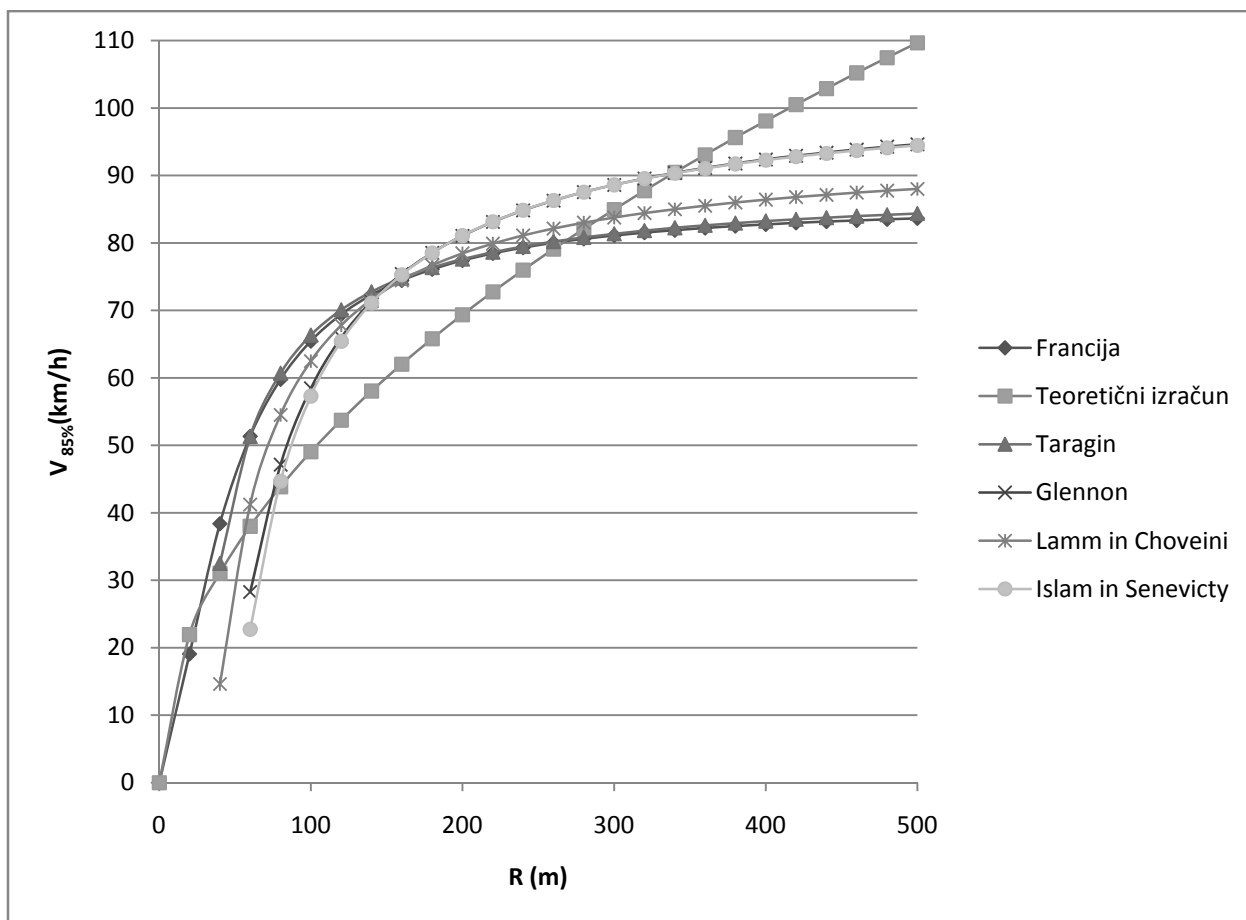
- Ottesen je leta 1993 po raziskavah opravljenih na 8 krivinah v zvezni državi Utah prišel do naslednje zveze:

$$V_{85\%} = 103,64 - \frac{3400}{R} \quad (\text{Fitzpatrick et.al.,2000,str. 24})$$

Švicarska raziskovalca Lindemann in Ranft sta preučevala tako hitrosti $V_{50\%}$ in $V_{85\%}$ in za hitrost $V_{50\%}$ prišla do naslednje zveze (Juvanc, 1991):

$$V_{50\%} = \frac{95}{(1+37,97 \cdot R^{-0,98})} \quad (\text{cit. po Juvanc, 1991, str. 46})$$

Primerjava med posameznimi modeli izračuna dejanske hitrosti $V_{85\%}$ je prikazana na sliki 4.1.



Slika 4.1: Grafična primerjava med posameznimi modeli za določitev $V_{85\%}$ v odvisnosti od R .

4.2.2 Vpliv širine vozišča

Širina vozišča je mišljena kot širina obeh voznih pasov. Splošno znano je, da večja širina voznega pasu rezultira v višjih voznih hitrostih. To je posledica dejstva, da vozniki v širših voziščih izbirajo ugodnejšo linijo vožnje v krožni lok. S tem skušajo omiliti vpliv bočnega pospeška, kot enega najbolj neposredno vplivnih parametrov. Eno redkih zvez s tega področja je podal Köppel (1984). Enačba je naslednja:

$$V_{50\%} = 65,23 + 4,293B \quad (\text{Köppel, 1984, str. 13})$$

V zgornja enačbi predstavlja vrednost $V_{50\%}$, ki odpade na širino vozišča B (m). Hitrost $V_{85\%}$ je možno glede na Köppel-ovo zvezo med $V_{50\%}$ in $V_{85\%}$, določiti enačbo:

$$\Delta V_{85\%} = -0,01(-22,28 + B)(15,23 + B)(20,36 + B) \quad (1)$$

4.2.3 Vpliv dolžine krožnega loka in pripadajočih prehodnic

Pri vožnji v krivino se voznik pravzaprav ne zaveda v kakšen krožni lok vozi. Edina informacija, ki jo dobi o krivini je njena ostrina, ki pa je odvisna od dolžine krožnega loka in pripadajočih prehodnic (Juvanc, 1991). Načeloma je najnižja hitrost v krivini dosežena v območju krožnega loka. Pri tem je značilno, da je zmanjšanje hitrosti na račun dolžine krožnega loka večje pri radijih manjših od 200, medtem ko pa je pri večjih radijih to zmanjšanje manjše ali pa celo zanemarljivo. To tezo potrjujejo tudi dejstva o relativni homogenosti voznih hitrosti na avtocestah, kjer so uporabljeni elementi razmeroma dolgi in veliki.

Vzrok omenjenim dejstvom je moč iskati v dveh dejavnikih (Juvanc, 1991):

- vtis o večji zakrivljenosti trase
- vožnja po nadomestnem radiju

Krammes (1993) in Köppel (1984), sta v svojih raziskavah pokazala, da je hitrost v krožnih lokih neposredno odvisna od dolžine krožnega loka in od pripadajočih vrednosti središčnega kota.

Köppel (1984), je svojo teorijo o določitvi voznih hitrosti osnoval na temelju treh glavnih skupin ki se med seboj ločijo glede na vrednost dolžine krivine. Razložil jih je glede na normirani čas vožnje:

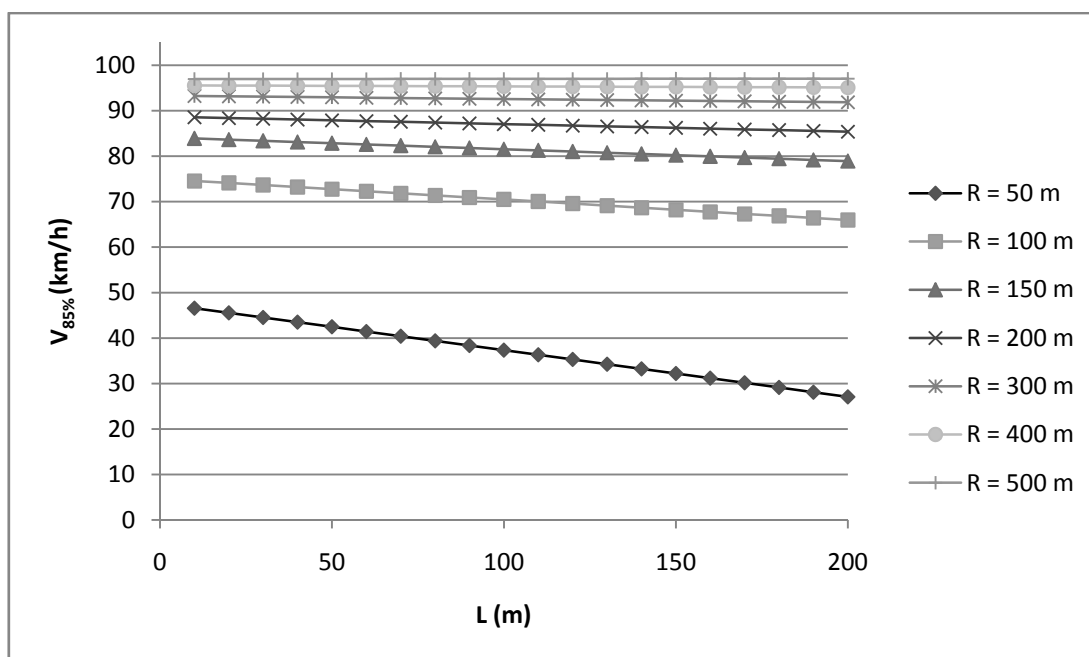
- kratki loki s časom vožnje $D_m = 0$ s
- srednje dolgi loki s časom vožnje $D_{st} = 1,3$ s
- dolgi loki s časom vožnje $D_v \geq 3,0$ s

Pri tem je upošteval tako dolžino krožnega loka kot tudi dolžine njemu pripadajočih prehodnic. Omenjene skupine krožnih lokov je podrobneje statistično obdelal in pri tem ugotovil, da pri vsaki od teh skupin in enaki vrednosti radija krožnega loka, obstaja zgornja in spodnja vrednost hitrosti $V_{85\%}$. Z večanjem vrednosti radija se razlika sicer zmanjšuje a kljub temu to kaže na to, da so hitrosti pri enakih pogojih geometrije lahko različne, kar posredno pomeni, da so se določeni avtorji ki so svoj hitrostni model snovali zgolj na odvisnosti od polmera krožnega loka lahko motili in preveč površno pristopili k obravnavanju dejanskih hitrosti v krožnih lokih.

Krammes je vpliv omenjenih parametrov na $V_{85\%}$ zajel z regresijsko enačbo:

$$V_{85\%} = 102,44 - \frac{2742}{R} + 0,012L - 0,10\Delta \quad (\text{Krammes, 1993, str. 11-3})$$

Kjer pomenijo R – radij krožnega loka v (m), L – dolžino krožnega loka v (m) in Δ - pripadajoč središčni kot v ($^{\circ}$).



Slika 4.2: Odvisnost med $V_{85\%}$ in dolžino krožnega loka L po enačbi Krammes-a.

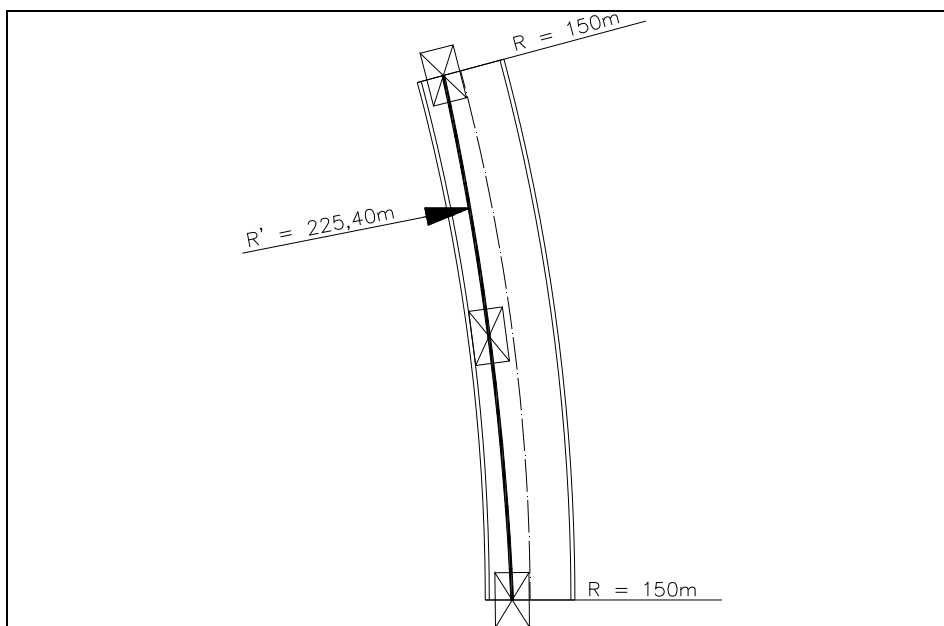
Slika 4.2 prikazuje da pri vrednostih radija večjih od 400 m pride do fenomena, da hitrost z večanjem dolžine krožnega loka celo narašča. Pri radijih manjših od 400 m pa se nasprotno hitrost zmanjšuje. Krammes (1993) navaja da takemu obnašanju hitrosti v največji meri botruje “sekanje” ovinka. Pri razmeroma majhnih dolžinah krožnega loka in radija, vozniki izbirajo “blažjo” krivino, pri čemer ne vozijo po dejanskem radiju, ampak po t.i. nadomestnem radiju. To ima za posledico tudi povečanje vozne hitrosti. Pri večjih dolžinah krožnega loka in radija pa hitrost lahko celo upada. To je posledica tega, da vozniki tako krivino zaznajo kot ostro in podzavestno vozijo z zmanjšano hitrostjo.

Vpliv fenomena nadomestnega radija je podrobneje obdelal Leins (Juvanc, 1991). Osnovna enačba s katero je določil velikost nadomestnega radija je naslednja:

$$R' = R + (0,4 \cdot B - 1,75) \cdot \frac{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\left(1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)} \quad (\text{Leins, cit. po Juvanc, 1991, str. 37})$$

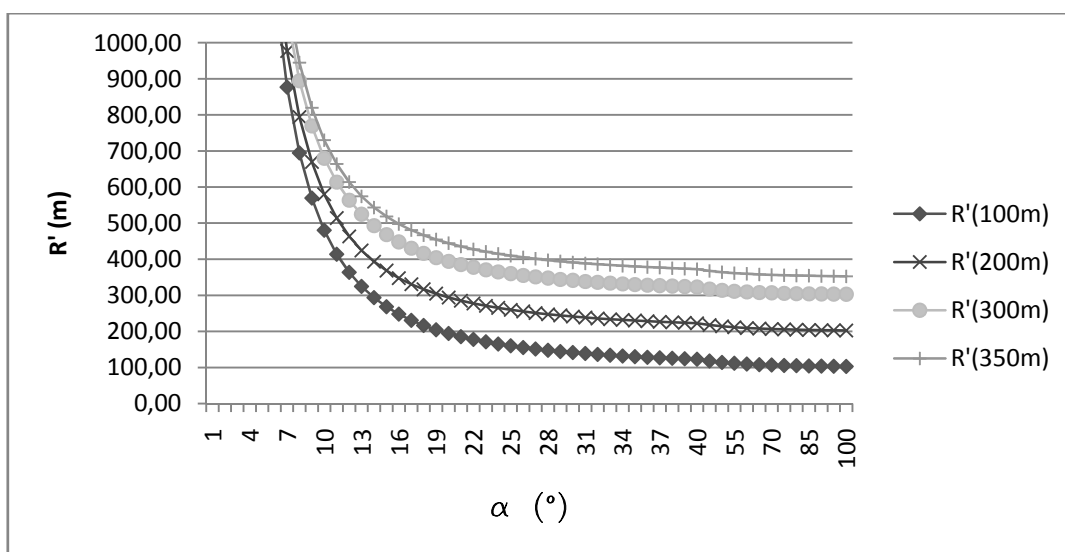
Pri čemer R' pomeni velikost nadomestnega radija v (m) in α središčni kot v ($^{\circ}$).

Nadomestni radij je torej postavljen kot odvisnost med širino vozišča (B), radijem horizontalnega krožnega loka (R) in velikostjo središčnega kota (α). Če v enačbo vstavimo vrednosti $B = 6\text{m}$, $R=150\text{m}$ in $\alpha = 15^{\circ}$, dobimo vrednost $R' = 225,40\text{ m}$. Prikaz medsebojne odvisnosti med R' in R je prikazan na sliki 4.3..

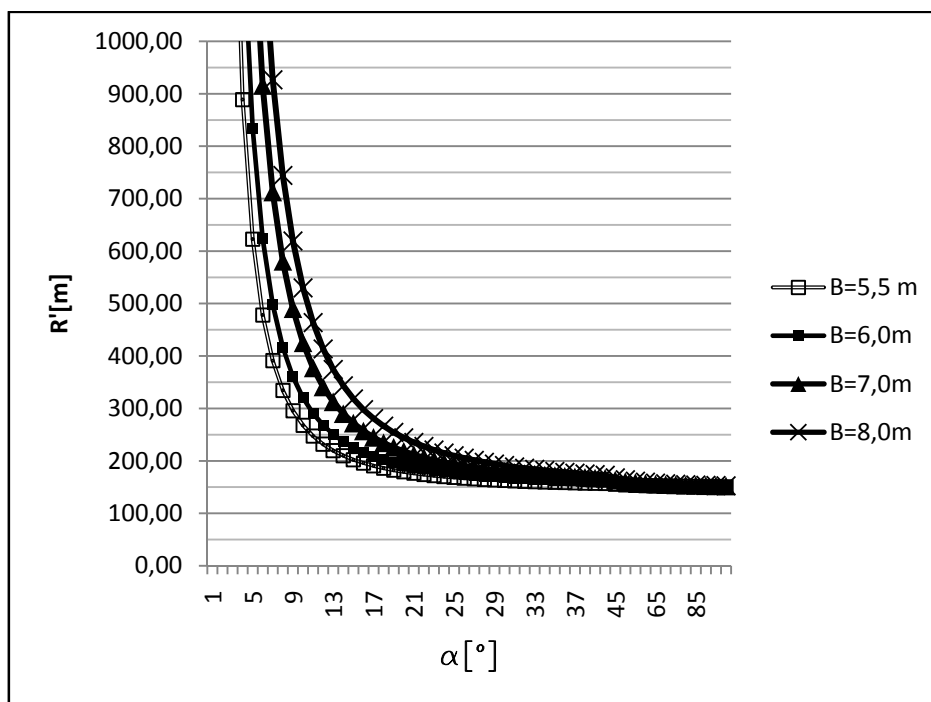


Slika 4.3: Trajektorija vozila z upoštevanjem nadomestnega radija po enačbi Leinsa.

Enačba za izračun nadomestnega radija je v osnovi racionalna funkcija, ki v neskončnosti limitira proti neki končni vrednosti kar prikazujeta slika 4.4 in slika 4.5.



Slika 4.4: Odvisnost nadomestnega radija od velikosti radija in središčnega kota.



Slika 4.5: Odvisnost nadomestnega radija R' od središčnega kota α in širine vozišča B .

Slika 4.4 in slika 4.5 ponazarjata, da se nadomestni radij najbolj razlikuje od dejanskih vrednosti radija pri majhnih vrednosti središčnega kota. Pri relativno ostrih krivinah pa je vpliv nadomestnega radija praktično zanemarljiv.

Pokaže se, da je vožnja v relativno blago krivino (majhen središčni kot in velika širina vozišča), veliko bolj udobnejša kot pa vožnja v ostro krivino. Pri tem ima voznik več manevrskega prostora in tudi možnosti da omili vpliv bočnega pospeška, ki bi ga sicer občutil med vožnjo po dejanskem radiju.

4.2.4 Vpliv ukrivljenosti trase

Mnogo avtorjev je namesto ločenega obravnavanja posameznih krivinskih parametrov, raje vse horizontalne geometrijske vplive zajelo z upoštevanjem krivinske karakteristike ali ukrivljenosti trase. Ta je v splošnem definirana z naslednjo zvezo:

$$K_u = \frac{\sum_i \tau_i}{L_i} \quad (\text{RAS-L, 1984, str.27})$$

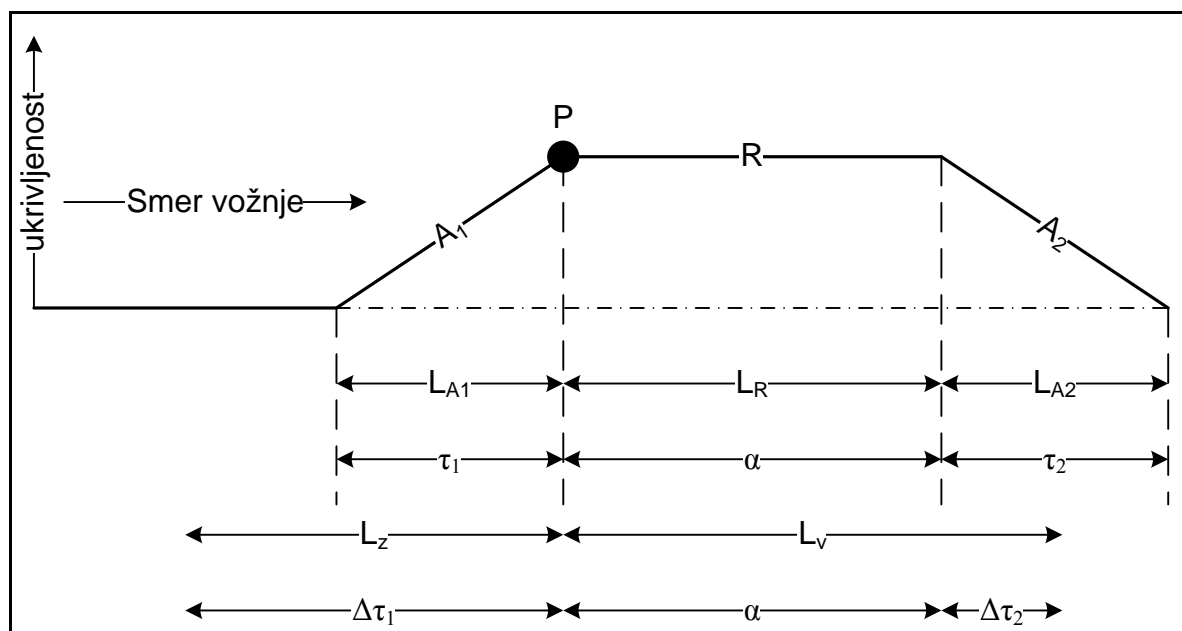
Kjer K_u pomeni krivinsko karakteristiko trase izraženo z [gon/km], $\sum \tau_i$ vsoto središčnih kotov v [gon] in L_i izbrano dolžino trase v [km]. Čisto osnovno gledano, je krivinska

karakteristika torej celotna sprememba središčnih kotov v horizontali na enoto dolžine (Fitzpatrick et.al., 2000).

Lamm (1993) in Köppel (1984) sta podala regresijske odvisnosti med krivinsko karakteristiko in hitrostjo $V_{85\%}$ in $V_{50\%}$. Pri tem sta vsak po svoje definirala vplivno območje trase. Lamm je poleg izračuna za posamezne odseke trase podal tudi izračun $V_{85\%}$ za celotno traso.

4.2.4.1 Teorija Köppel-a

Kot je bilo omenjeno že v prejšnjem poglavju, Köppel-ova teorija sloni na treh različnih tipih krožnih lokov, ki se med seboj razlikujejo po zakrivljenosti. Pri tem se ukrivljenost izračuna za vsako krivino posebej. Upošteva se ukrivljenost tako krožnega loka kot pripadajočih prehodnic. Izračun krivinske karakteristike je postavljen v začetno točko krožnega loka, ki je hkrati tudi referenčna pozicija za izračun vplivnih dolžin. Za vsako vplivno dolžino posebej je potrebno določiti vsoto spremembe središčnih kotov. Kvocijent vsote sprememb središčnih kotov in vsote vplivnih dolžin nam da skupno krivinsko karakteristiko Ku . Grafična upodobitev postopka je podana na spodnji sliki.



Prikaz vplivnih dolžin pri vožnji v krivino (Köppel, 1984, str. 10).

Vplivne dolžine so definirane z enačbami (Köppel, 1984, str. 11):

- $L_Z = 0,3R$ [m] vplivna dolžina pred točko P pri krožnih lokih za $50m < R \leq 500$ m
- $L_Z = 400$ m vplivna dolžina pred točko P pri krožnih lokih za $R > 500$ m

- $L_V = 50 + \frac{R}{10}$ [m] vplivna dolžina za točko P pri krožnih lokih za $50\text{m} < R \leq 500\text{ m}$
- $L_V = 100\text{ m}$ vplivna dolžina za točko P pri krožnih lokih za $R > 500\text{ m}$

Na podlagi teh vrednosti se izračuna skupna krivinska karakteristika odseka po enačbi:

$$Ku = \frac{|\Delta\tau_1| + |\alpha + \Delta\tau_2|}{L_Z + L_V} \quad (\text{Köppel, 1984, str. 11})$$

Pri čemer pomeni $\Delta\tau_1$ spremembo središčnega kota v [gon] na dolžini L_Z in $\Delta\tau_2$ spremembo središčnega kota v [gon] na dolžini L_V .

Pripadajoča odvisnost med hitrostjo in krivinsko karakteristiko je podana z enačbo:

$$V_{50\%} = -59,6 \cdot Ku \cdot 10^{-3} + 25,8 \cdot Ku \cdot 10^{-6} \quad (\text{Köppel, 1984, str.13})$$

4.2.4.2 Teorija Lamm-a

Lamm (1993) je za razliko od Köppel-a krivinsko karakteristiko definiral tako na celotnem odseku trase kot na posameznih krivinah z upoštevanjem krožnega loka in pripadajočih prehodnic. Krivinska karakteristika posamezne krivine je definirana s t.i. parametrom »spremembe ukrivljenosti« CCR_s , ki ga podaja naslednja enačba:

$$CCR_s = \frac{(\frac{L_{cr}}{R} + \frac{L_{cl1}}{2R} + \frac{L_{cl2}}{2R}) \cdot 63700}{L} \quad (\text{Lamm, 1993, str. 9-2})$$

Pri tem pomenijo L_{cr} – dolžina horizontalnega krožnega loka v [m], L_{cl1} – dolžina vstopne prehodnice v [m], L_{cl2} – dolžina izstopne prehodnice v [m] in L – dolžina celotnega odseka ($L_{cl1} + L_{cl2} + L_{cr}$) v [km]. Mera za CCR_s je podobno kot Ku v [gon/km].

Enačba za določitev krivinske karakteristike celotne trase je podobna tisti za določitev hitrosti v samostojni krivini in ima naslednjo obliko:

$$\overline{CCR_s} = \frac{\sum_{i=1}^n (CCR_{Si} \cdot L_i)}{L} \quad (\text{Lamm, 1999, cit. po Perne 2004})$$

Pri tem pomenijo CCR_{Si} – krivinska karakteristika v posamezni krivini, L_i – dolžina posamezne krivine v [km] in L – dolžina celotnega odseka v [km].

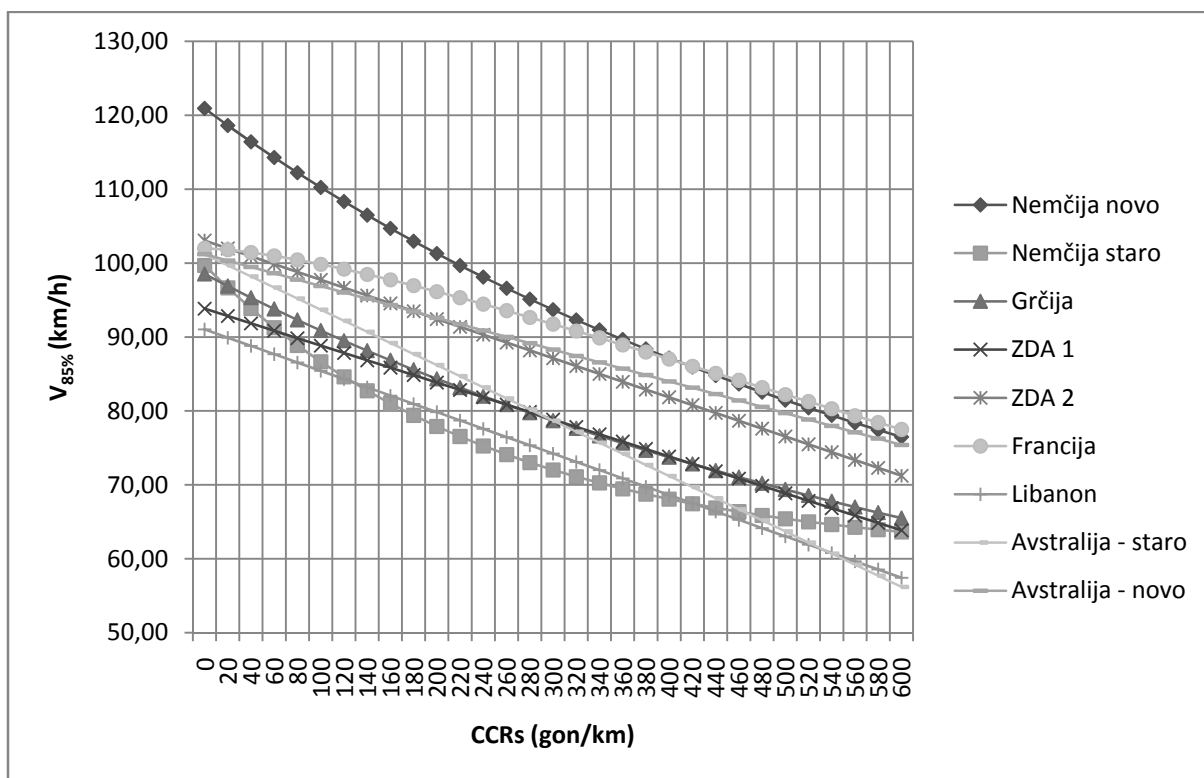
Tako dobljene vrednosti krivinske karakteristike je Lamm uporabil v izračunih hitrosti $V_{85\%}$. Za več različnih držav je v sodelovanju z ostalimi avtorji postavil regresijske zveze, ki se vse podrejajo principu $V_{85\%} = f(CCR_s)$. V preglednici 4.1 je naštetih nekaj izmed teh zvez.

Preglednica 4.1: Seznam enačb za določitev $V_{85\%}$ ob upoštevanju CCR_s .

Država	Enačba (Lamm, 1993, str. 9-6)
Nemčija – novo	$V_{85\%} = \frac{10^6}{8270 + 8,01 * CCR_s}$
Nemčija – staro	$V_{85\%} = 60 + 39,70 * e^{(-3,98 * 10^{-3} * CCR_s)}$
Grčija	$V_{85\%} = \frac{10^6}{10150,1 + 8,529 * CCR_s}$
ZDA 1	$V_{85\%} = 93,85 - 0,05 * CCR_s$
ZDA 2	$V_{85\%} = 103,04 - 0,053 * CCR_s$
Francija	$V_{85\%} = \frac{102}{1 + \frac{346}{(\frac{63700}{CCR_s})^{1,5}}}$
Avstralija - staro	$V_{85\%} = 101,2 - 0,075 * CCR_s$
Avstralija - novo	$V_{85\%} = 101,2 - 0,043 * CCR_s$
Libanon	$V_{85\%} = 91,03 - 0,056 * CCR_s$

Vrednosti $V_{85\%}$ se po posameznih državah kar precej razlikujejo, saj je razpon hitrosti pri enaki vrednosti krivinske karakteristike CCR_s skoraj več kot 20 km/h. To je vsekakor posledica različnih postopkov meritev, navad voznikov in različnih načinov določanja regresijske krivulje. Za razmere v Sloveniji bi bilo najbolj smotno uporabljati staro Nemško enačbo, ki odgovarja dvopasovnih medkrajevnim cestam s širino vozišča 6 m in hitrostno omejitvijo 90 km/h. Ta zveza daje sicer nekoliko visoke vrednosti $V_{85\%}$ in je zaradi tega ugodnejša, saj ostajamo na varni strani izračuna.

Primerjava med posameznimi enačbami za izračun $V_{85\%}$ je podana na sliki 4.6.



Slika 4.6: Primerjava posameznih enačb po državah za določitev $V_{85\%}$ po Lamm-u.

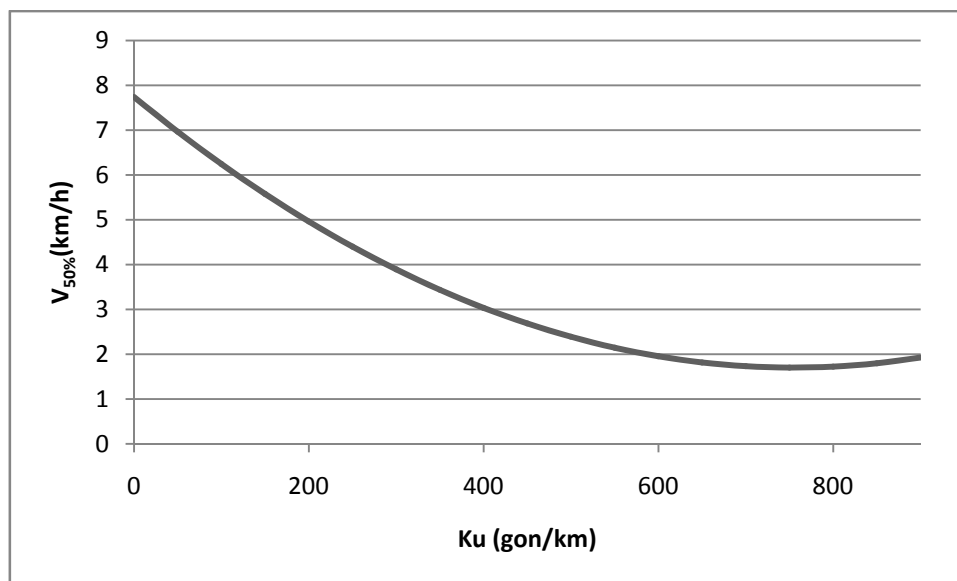
4.2.5 Zaustavna pregledna razdalja

Zaustavna pregledna razdalja je odločilen parameter za zagotavljanje varnosti pri dimenzioniranju mejnih tehničnih elementov trase (horizontalnih in vertikalnih elementov). Po splošni sodbi raziskovalcev, je vpliv pregledne razdalje malo vpliven (Juvanc, 1991). Razlog temu je predvsem v sami naravi voznikov. Ločiti je namreč potrebno med tistimi, ki določen odsek ceste poznajo in med tistimi, ki ga ne. Vozniki, ki vsakodnevno prevozijo isti odsek trase akceptirajo določena tveganja iz naslova geometrijskih in okoljskih značilnosti ceste in načeloma vozijo na »pamet«. Tak način vožnje se odraža predvsem v pogostejših tveganih manevrih, kot je vožnja izven voznega pasu ali pa sunkovite in nenadzorovane reakcije.

Vpliv pregledne razdalje je zaradi stohastičnega značaja tako voznikov, kot tudi hitrosti zelo težko zajeti z učinkovitimi regresijskimi enačbami. Izjema je Köppel (1984), ki je podal zvezo med srednjo vrednostjo pregledne razdalje S_h in hitrostjo $V_{50\%}$ v odvisnosti od ukrivljenosti trase Ku .

$$V_{50\%} = 7,74 - 1,60 \cdot Ku \cdot 10^{-2} + 1,06 \cdot Ku^2 \cdot 10^{-5} \quad (\text{Köppel, 1984, str. 13})$$

Slika 4.7 grafično ponazarja omenjeno odvisnost, ki jo je podal Köppel (1984).

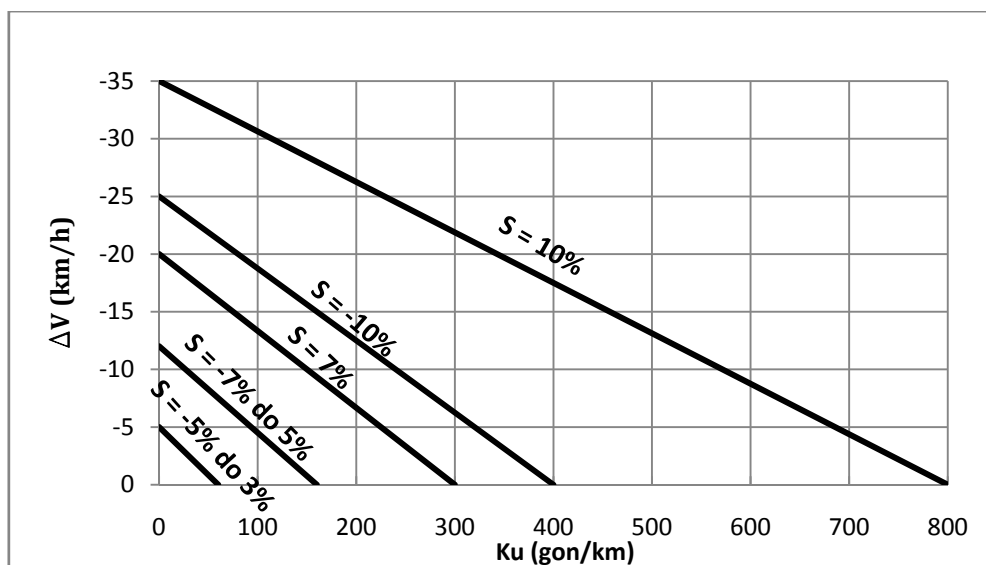


Slika 4.7: Vpliv srednje zaustavne pregledne razdalje ob upoštevanju Ku na $V_{50\%}$.

4.2.6 Vzdolžni nagib nivelete

Vzdolžni nagib nivelete ima pomemben neposredni vpliv na vrednosti hitrosti $V_{85\%}$ (Fitzpatrick, et.al., 2000). Mnogo avtorjev je podalo ločene zveze za določitev hitrosti v horizontalnem in vertikalnem poteku trase.

Köppel (1984) je podal zvezo med vzdolžnim nagibom nivelete, pripadajočo krivinsko karakteristiko Ku in spremembo hitrosti $\Delta V_{85\%}$.



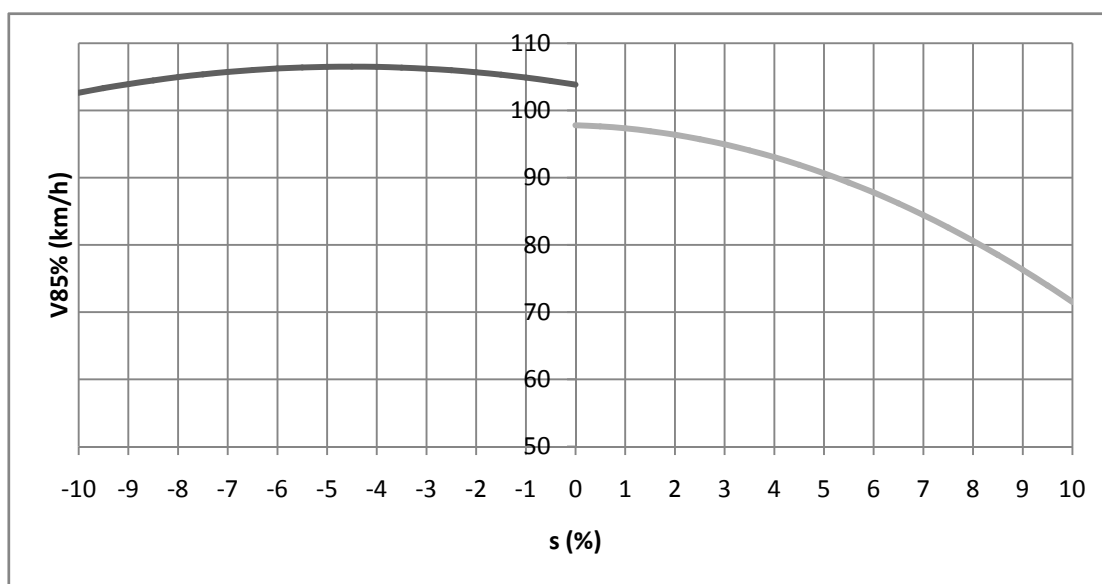
Slika 4.8: Odvisnost med spremembo hitrosti in vzdolžnim nagibom nivelete s po Köppel-u.

Ugotovitve, ki jih je z diagramom prikazal Köppel (1984), kažejo na to, da ima nagib nivelete pri povečani krivinski karakteristiki manjši vpliv. To z drugimi besedami pomeni da pri določeni krivinski karakteristiki ima vzdolžni naklon vozišča zanemarljiv vpliv.

Neposreden vpliv nagiba vozišča na hitrost $V_{85\%}$ so podali tudi Ranft et. al. (cit. po Juvanc, 1991). Enačbi, ki opisujeta zvezo sta naslednji:

- za vzpon: $V_{85\%} = 97,81 - 0,23 \cdot s - 0,24 \cdot s^2$ (Ranft et.al., cit.po Juvanc, 1991, str.42)
- za padec: $V_{85\%} = 103,84 - 1,18 \cdot s - 0,13 \cdot s^2$ (Ranft et.al., cit. po Juvanc, 1991, str.42)

Pri čemer s pomeni vzdolžni nagib vozišča v (%).



Slika 4.9: Odvisnost hitrosti od velikosti vzdolžnega nagiba s po Ranftu et.al..

4.2.7 Velikost radija vertikalne zaokrožitve

Najmočnejši vpliv, ki ga vertikalna zaokrožitev predstavlja na voznika je njen vpliv na pregledno razdalja (Fitzpatrick et.al., 2000). Načeloma vozniki najbolj upoštevajo zaustavitveno pregledno razdaljo, ki je pri konveksnih vertikalnih zaokrožitvah tudi pomemben parameter za dimenzioniranje le-teh. Pri konkavni vertikalni zaokrožitvi je potrebi po pregledni razdalji v celoti zadoščeno, zato ne predstavlja pomembnejšega vpliva na določitev $V_{85\%}$.

Fambro (cit. po Fitzpatrick et.al., 2000) je med prvimi raziskoval odvisnost med voznimi hitrostmi in konveksnimi vertikalnimi zaokrožitvami in prišel do sklepa, da vozne hitrosti na konveksnih vertikalnih zaokrožitvah presegajo zasnovalne hitrosti, ki so bile uporabljene pri

dimenzioniranju teh elementov. Po opravljenih regresijskih analizah je določil naslednjo enačbo:

$$V_{85\%} = 72,74 - 0,47 \cdot V_D \quad (\text{Fambro, cit.po Fitzpatrick et.al., 2000, str. 26})$$

Pri tem V_D pomeni izpeljana zasnovalna hitrost pri dimenzioniranju vertikalne zaokrožitve v (km/h).

V splošnem velja, da so za voznika najbolj neugodne slabo pregledne konveksne vertikalne zaokrožitve. Kljub temu, da nekateri vozniki zaradi zmanjšane stopnje preglednosti v vertikalni ravnini podzavestno in samodejno zavirajo, jih mnogo zanemarja pregledno razdaljo in vozi na »pamet«. Ravno zaradi stohastične narave hitrosti in obnašanja voznika je zelo težko zajeti neposreden vpliv radija vertikalne zaokrožitve na hitrosti iz vzorca $V_{85\%}$ (Juvanc, 1991).

4.2.8 Vpliv prečnega naklona

Krammes (1993) je eden redkih, ki je raziskal vpliv prečnega naklona na vozne hitrosti. S svojo raziskavo, v kateri je variiral vrednosti prečnega naklona, ostale parametre pa ohranil enake, je prišel do naslednje linearne zveze:

$$V_{85\%} = 102,0 - \frac{3632}{R} + 40,33 \cdot q \quad (\text{Krammes, 1998, str. 11-3})$$

Pri čemer q pomeni prečni naklon v (%).

Enačba ponazarja, da se s povečanjem vrednosti prečnega nagiba povečuje tudi hitrost $V_{85\%}$. Vzrok temu je predvsem omiljen bočni pospešek na račun povečane vrednosti prečnega naklona q . Ob manjših vrednostih bočnega pospeška voznik dobi občutek da lahko vozi v krivino hitreje kot sicer. Zato Krammes (1998) navaja, da je potrebno povečanje prečnega naklona ustrezno kalibrirati z vrednostjo drsnega trenja na vozišču.

4.2.9 Vpliv vremenskih in okoljskih razmer

Vremenske in okoljske razmere imajo na voznika neposreden in včasih tudi določen vpliv. Raziskave v ZDA (Kyte et.al., 2000), so pokazale da so izmed vseh vremenskih vplivov najbolj vplivni močan veter, sneg in pojav megle. Pokazalo se je, da omenjeni dejavniki zmanjšajo vozno hitrost tudi do 20 km/h. Raziskava tudi potrjuje domnevo da ima zmanjšana vidljivost zanemarljiv vpliv na zmanjšanje hitrosti, saj le-ta znaša manj kot 1 km/h. Poleg tega se je pokazalo, da ob šibkejšem dežju vozniki bistveno ne zmanjšajo hitrosti (Fitzpatrick et

al., 2000). To dejstvo, ki so ga med drugim potrdili tudi ostali avtorji, je zaskrbljujoče, saj se na mokrem vozišču vrednost koeficienta drsnega trenja precej zmanjša, kar ima lahko za posledico povečanje nevarnosti za nastanek nezgod.

Tudi okoljske razmere imajo minimalen vpliv na zmanjšanje hitrosti. Raziskava Fitzpatricka (2000) je pokazala, da se hitrosti v nočnem in dnevnem času bistveno ne razlikujejo. Prav tako se je pokazalo da ima obcestni prostor majhen vpliv na izbiro hitrosti. Posledico temu je spet moč iskati v samih navadah voznikov, ki med vožnjo sprejemajo različne stopnje tveganja in s tem tudi hitrosti.

4.3 Odzivi realne hitrosti na trenje

V prejšnjih razdelkih je bilo pokazano, da je spreminjajoča se vozna hitrost dejstvo, ki ga ne gre spregledati. Samo nihanje hitrosti ustvarja pospeške, ti pa spreminjajoče sile, ki delujejo na voziščno konstrukcijo. Zahtevam, ki jih pogojujejo te sile, mora v celoti zadostiti torna sposobnost vozišča preko koeficienta drsnega trenja. V ta namen so v nadaljevanju predstavljene osnovne zveze med dinamičnimi vplivi in voziščem.

4.3.1 Sile in pospeški

Med vožnjo na vozilo deluje vrsta sil. Nekatere sile generirajo neposredno rezultirajoči pospeški, medtem ko so ostale sile posledica delovanja ostalih dejavnikov. V grobem lahko sile ločimo na aktivne in pasivne. Aktivne sile so posledica neposrednega delovanja zavor in motorja, medtem ko so pasivne sile posledica raznih dejavnikov upora ki nastopajo med vožnjo. V vzdolžni smeri lahko ločimo naslednje tipe sil (Juvanc, 1991):

- Vlečna sila motorja Z_v (N)
- Zavorna sila vozila Z_k (N)
- Upor pri kotaljenju W_k (N)
- Upor zaradi nagiba nivelete W_s (N)
- Upor zraka W_z (N)
- Vztrajnostna sila vozila W_v (N)
- Sila trenja na vozišču T (N)

V prečni smeri, pa se pojavi še vpliv krožnega loka in sicer v obliki:

- Centrifugalna sila v krivini W_c (N)

Rezultirajoče komponente sil zapišemo posebej za obe glavni smeri: vzdolžno (tangencialno) in radialno. Rezultanto tangencialnih sil lahko zapišemo z enačbo:

$$T = G(w_k + s + u) + m \frac{dv}{dt} \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 105})$$

Pri čemer pomenijo m – masa vozila v (kg) in w_k – specifični upor pri kotaljenju v (N/N), u – specifični upor zraka v (N/N) in G - silo teže vozila v (N).

Rezultanto v prečni smeri, pri vožnji v krivini, pa podaja naslednja enačba:

$$T = G\left(\frac{v^2}{gR} - q\right) \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 105})$$

Pri čemer pomeni g -vertikalni gravitacijski pospešek ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Klasifikacija pospeškov je analogna klasifikaciji silam na vozišču. V poglavju 3.1.1 je bil pospešek opredeljen kot rezultirajoči vektor treh komponent v glavnih smereh. Preprosta vektorska enačba, ki podaja zvezo med posameznimi komponentami je naslednja:

$$\vec{a} = \vec{a}_T + \vec{a}_R + \vec{a}_V \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 106})$$

Pri tem sta \vec{a}_T in \vec{a}_R vektorja v ravnini voziščne konstrukcije, medtem pa ima \vec{a}_V smer pravokotno na ravnino vozišča. Vertikalna komponenta pospeška \vec{a}_V je razmeroma majhna in zanemarljiva ter vpliva samo na vrednost gravitacijskega pospeška. Pri tem je najbolj neugodna situacija zmanjšanje gravitacijskega pospeška v konveksni vertikalni zaokrožitvi, kar podaja naslednja enačba:

$$g' = g - a_v = g - \frac{v^2}{r} \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 107})$$

Pri čemer pomenijo v – hitrost v območju vertikalne zaokrožitve (m/s), r – radij vertikalne zaokrožitve v (m) in g' – zmanjšan gravitacijski pospešek v (m/s^2).

Za nekaj različnih mejnih radijev konveksne vertikalne zaokrožitve (TSC 02.300, 2000) je zmanjšanje gravitacijskega pospeška podano v preglednici 4.2.

Preglednica 4.2: Zmanjšane vrednosti gravitacijskega pospeška g zaradi konveksne zaokrožitve.

V_{meina} (km/h)	V_{zas} (km/h)	R_{vert} (m)	g' (m/s^2)
90	50	850	9,07
90	60	1500	9,39
90	70	2600	9,57
90	80	4250	9,66
90	90	6750	9,72

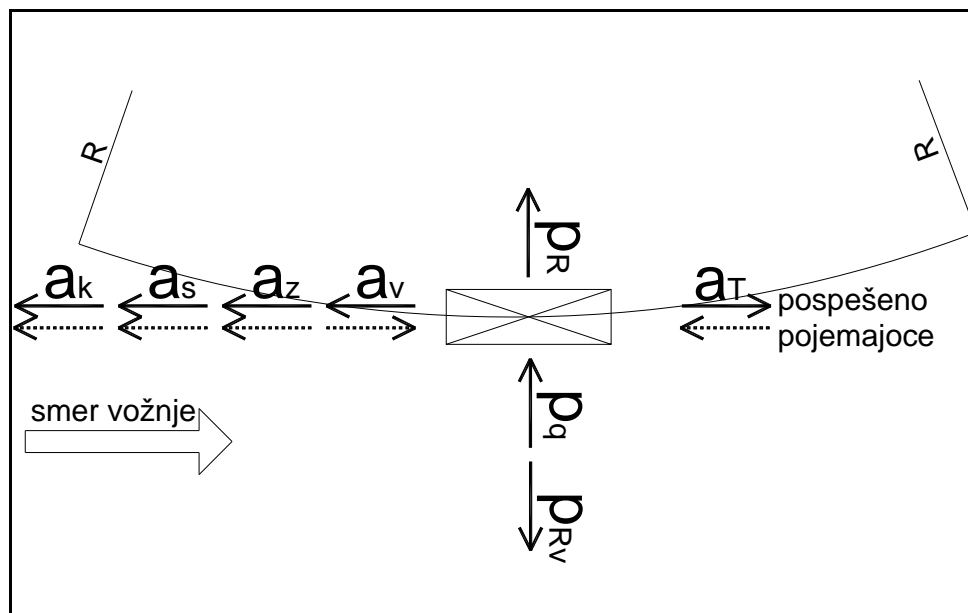
Ker je evidentno, da je vpliv vertikalnega pospeška razmeroma majhen, lahko prostorsko pojmovanje rezultante pospeškov reduciramo na ravninsko obravnavo. V ravnini vozišča, podobno kot pri silah, delujeta tangencialna oz. vzdolžna komponenta pospeška in njej pravokotna radialna komponenta.

Tangencialni pospešek a_T lahko nadalje razdelimo na naslednje komponente (Juvanc, 1991):

- a_p – motorni pospešek v (m/s^2)
- a_m – pospešek zaradi zaviranja z motorjem v (m/s^2)
- a_z – pospešek zaradi zaviranja z zavorami v (m/s^2)
- a_k – pospešek zaradi upora pri kotaljenju v (m/s^2)
- a_s – komponenta pospeška gravitacije v (m/s^2)
- a_u – pospešek zaradi zračnega upora v (m/s^2)
- a_w – pospešek zaradi vetra v (m/s^2)

Radialni pospešek a_R se deli na naslednje komponente (Juvanc, 1991):

- p_{Rv} – bočni pospešek pri vožnji v krivino zaradi hitrosti v (m/s^2)
- p_q – bočni pospešek zaradi prečnega naklona v (m/s^2)
- p_w – pospešek zaradi vetra v (m/s^2)



Shema delovanja pospeškov (Juvanc, 1991).

Z upoštevanjem zvez iz prejšnjih poglavjih, lahko rezultirajoča vektorja p_R in a_T zapišemo z naslednjima enačbama:

$$a_T = (a_k + a_s + a_u) + a_v \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 108})$$

$$p_R = p_{Rv} - p_q \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 108})$$

Za normalno vožnjo velja, da je sila trenja v obeh glavnih smereh večja ali pa vsaj enaka rezultirajočim silam na vozišče. V primeru prekoračitve sile trenja nastopi zelo povečana verjetnost nastanka nezgod. V vzdolžni smeri to ni posebej nevarno, saj pride le do spodrsavanja pod pogonskima paroma koles. Nevarneje je to pri vožnji v krivino, kjer je potreba po sili trenja največja, saj hkrati delujeta tako prečna kot tangencialna sila. Taka prekoračitev sile trenja ima v mnogih primerih za posledico zdrs z vozišča.

4.3.2 Trenje na vozišču

4.3.2.1 Osnovne definicije

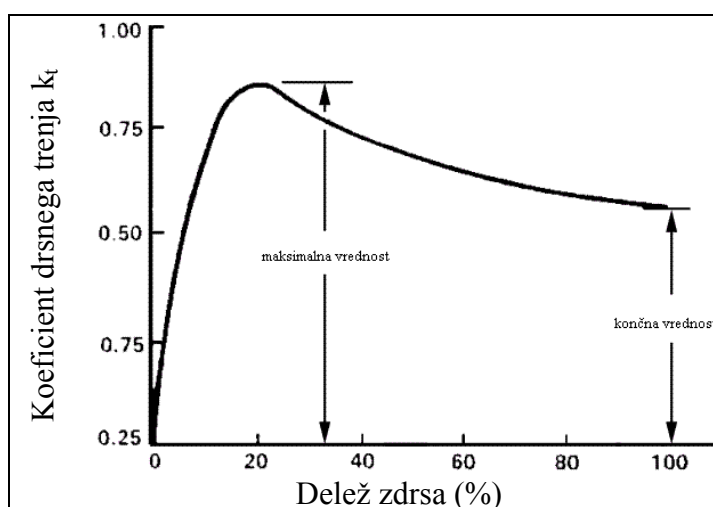
Vsak neposreden stik s telesa s podlago ima za posledico pojav sile podlage. Te sile omogočajo danemu telesu mirovanje ali pa nasprotujejo njegovemu gibanju. Sile podlage poznamo pod skupnim pojmom sil trenja. Pri tem ločimo (Kladnik, 1989):

- Statično torni silo F_s , ki jo definira enačba $F_s = k_s N$ (Kladnik, 1989, str. 38)
- Drsno torni silo F_t , ki jo definira enačba $F_t = k_t N$ (Kladnik, 1989, str. 38)

Pri čemer pomenijo k_s – statični torni koeficient, k_t – koeficient drsnega trenja in N – sila podlage v (N).

Statična drsna sila je poznana kot sila lepenja in je definirana kot merilo trdnosti povezave s podlago. Drsna torna sila ali sila trenja pa deluje ves čas gibanja telesa po podlagi in je ves čas nasprotuje smeri gibanja (Kladnik, 1989).

Ker je vožnja tipično kinematični proces je evidentno, da je najpomembnejši parameter odziva podlage na delujoče sile drsna torna sila oz. koeficient drsnega trenja (KDT). KDT je odvisen od mnogih dejavnikov, prvenstveno pa od obsega zdrsa in hitrosti.



Slika 4.10: Koefficient drsnega trenja v odvisnosti od stopnje zdrsa.

Preglednica 4.3: Vplivi na vrednost KDT.

Vozilo	Vozišče	Vpliv vožnje
<i>Obtežba</i>	<i>Trasa</i>	Hitrost
lastna teža	krivine	Zračni upor
koristna teža	vzdolžni nagib	Veter
adhezijska teža	prečni nagib	Način vožnje
vlečna teža	<i>Vozišče</i>	
obtežba koles	Material	
<i>Vzmetenje</i>	Hrapavost	
Sposobnost umirjanja	Ravnost	
Razporeditev mase	Trdnost	
<i>Pnevmatike</i>	oprijemljivost	
Velikost	<i>Razmere</i>	
Elastičnost	Suho	
Vrsta gumija	Mokro	
Profil	Debelina vodnega filma	
Tlak v zračnici	umazano	
	obrabljeno	

Pri dimenzioniranju geometrijskih elementov trase je posebej pomembno poznati osnovno obratnosorazmerno zvezo med hitrostjo in KDT (Juvanc, 1991). Načeloma velja, da nova vozišča zadostujejo potrebam po KDT. Sčasoma pa se ta vrednost zmanjšuje. Zmanjšanje koeficienta drsnega trenja lahko nastopi iz več razlogov, prvenstveno pa je to posledica zaglajevanja vozišča zaradi delujočih tangencialnih sil, staranja voziščne konstrukcije, obrabljenih pnevmatik in neugodne zasnove trasnih elementov.

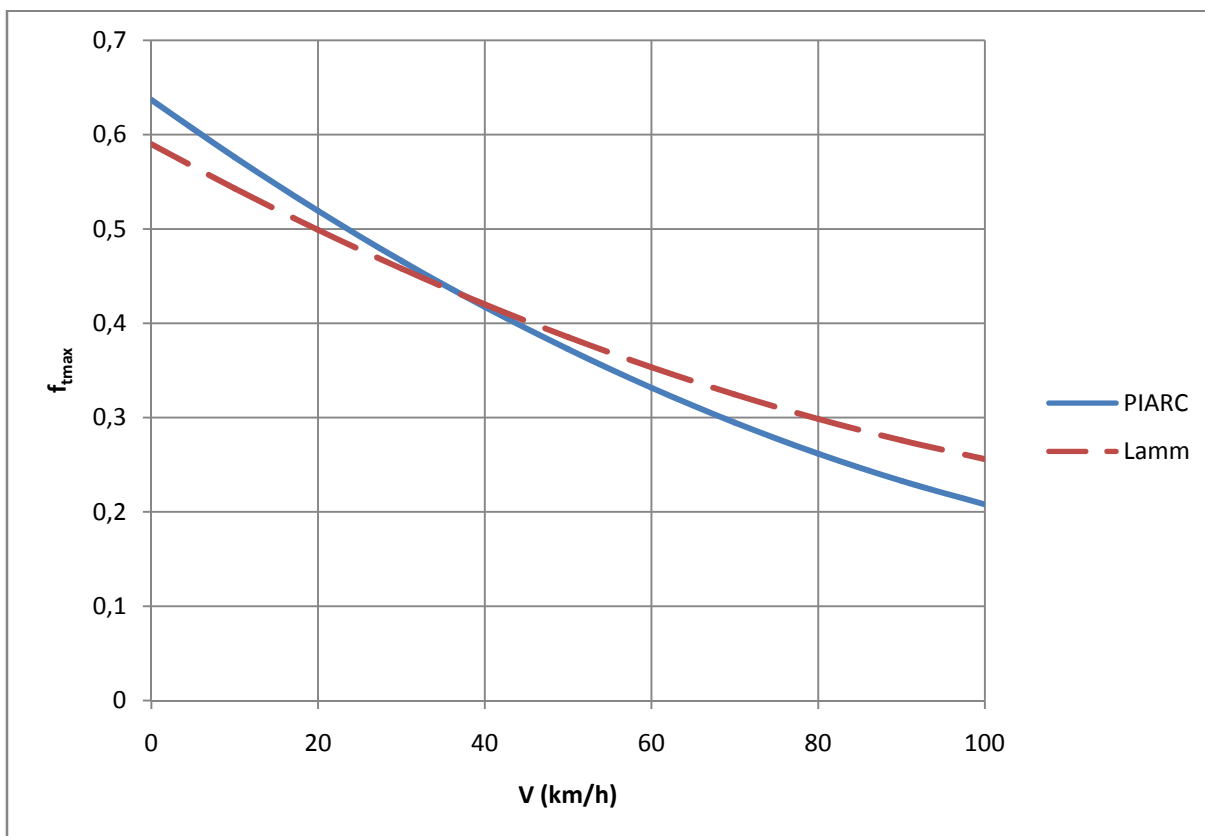
4.3.2.2 Največja dopustna vrednost koeficienta drsnega trenja

Kot je pokazano v preglednici 4.2 je vrednost KDT odvisna od mnogih dejavnikov, zato je analitičen pristop praktično nemogoč. Zato so se raziskave velikosti KDT osredotočile na empirične raziskave in statistično obdelavo dobljenih podatkov. Rezultati raziskav, ki jih je opravila PIARC leta 1980 s standardiziranimi tipi pnevmatik (cit. po Juvanc, 1991), so privedli do naslednje zveze med hitrostjo V (km/h) in koeficientom drsnega trenja f_{Tmax} :

$$f_{Tmax} = 0,200 \cdot (0,01 \cdot V)^2 - 0,629 \cdot (0,01 \cdot V) + 0,637 \quad (\text{PIARC, 1980, cit. po Juvanc, 1991, str. 115})$$

Lamm (1993) je na osnovi raziskav KDT v različnih državah osnoval regresijsko enačbo za izračun f_{Tmax} :

$$f_{Tmax} = 0,59 - 4,85 \cdot 10^{-3} \cdot V_{zas} + 1,51 \cdot 10^{-5} \cdot V_{zas}^2 \quad (\text{Lamm, 1998, str. 9-9})$$



Slika 4.11: Primerjava vrednosti f_{Tmax} po enačbah PIARC in Lamm-a.

4.3.2.3 Komponentna členitev koeficienta drsnega trenja in zahtevano trenje

Koeficient drsnega trenja je po fizikalni definiciji skalar, ki omogoča realizacijo delujočih sil na vozišču. Ker smo že prej obravnavali pospeške in sile v obeh glavnih smereh, je potrebno

tudi KDT obravnavati tako v tangencialni kot tudi v radialni smeri. Zato ločimo (Juvanc, 1991):

- f_T – koeficient trenja v tangencialni smeri
- f_R – koeficient trenja v radialni smeri

Omenjena vrednost f_{tmax} je bila ugotovljena pri poskusu z zavrtim kolesom na iztegnjenem delu trase, zato lahko privzamemo, da je to hkrati tudi maksimalna vrednost trenja v tangencialni smeri f_{Tmax} .

Včasih je za f_R veljalo da ima enako vrednost kot f_T . Novejše raziskave so to ovrgle in pokazale, da je vsled različnih hitrosti in zasuka pnevmatik zveza med koeficientoma f_{Rmax} in f_{Tmax} naslednja (Juvanc, 1991):

$$\frac{f_{Rmax}}{f_{tmax}} = 0,873 + 10,3 \cdot 10^{-3} \cdot V \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 117})$$

Zaradi homogenosti voznih hitrosti je za srednjo vrednost $V = 50\text{km/h}$ privzeta naslednja zveza:

$$f_{Rmax} = 0,925 f_{tmax} \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 118})$$

Vrednosti KDT za različne vrednosti zasovalne hitrosti (UL RS, 91/05: 3896)

V (km/h)	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
f_{Tmax}	0,37	0,33	0,3	0,26	0,23	0,21	0,19	0,17	0,16	0,15
f_{Rmax}	0,345	0,31	0,279	0,25	0,225	0,203	0,187	0,169	0,161	0,151

Vozilo izkoristi KDT izmenično v eni ali drugi glavni smeri, lahko pa v obeh smereh istočasno. Ker f_{Rmax} in f_{Tmax} nimata enakih vrednosti, se zaradi vektorskega načina seštevanja komponent rezultirajči koeficient trenja na vozišču izrazi z enačbo:

$$f_t = \sqrt{1,169 \cdot f_R^2 + f_T^2} \quad (\text{Juvanc, 1991, str.118})$$

Kjer f_t predstavlja rezultirajoči koeficient trenja na vozišču. Z upoštevanjem naslednje ravnotežne enačbe lahko izrazimo zahtevani koeficient drsnega trenja na vozišču, f_{tzaht} :

$$g \cdot f_{tzaht} = \sqrt{a_T^2 + a_R^2} \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 128})$$

Ob upoštevanju zvez iz poglavja 4.1 pa se zgornja enačba lahko poenostavi v obliko:

$$f_{tzaht} = \sqrt{1,169 \cdot \left(\frac{v_R^2}{gR} - q\right)^2 + \left(\frac{w_k + s + u + a_z}{g}\right)^2} \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 128})$$

Če za seštevek koeficientov upora w_k in u upoštevamo konstanto vrednost 0,055 se enačba ustrezno poenostavi:

$$f_{tzaht} = \sqrt{1,169 \cdot \left(\frac{v_R^2}{gR} - q\right)^2 + \left(\frac{0,055 + s + a_z}{g}\right)^2} \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 135})$$

Izraz za f_{tzaht} vsebuje vplive vseh zunanjih dejavnikov, ki jim mora vozišče zadostiti. To ni dejanska lastnost vozišča, ampak teoretično določena vrednost na osnovi katere določamo vozno-dinamično karakteristiko.

5 PROFIL VOZNE HITROSTI

5.1 Modeli za določitev hitrosti v posameznih elementih

Eksperimentalne analize različnih vplivov na hitrost $V_{85\%}$ je večina avtorjev vgradila v modele za določitev realnih voznih hitrosti. Največ modelov je omejenih na ločeno obravnavanje voznih hitrosti v horizontalnem in vertikalnem poteku trase. Pri tem se upoštevajo različni nabori vhodnih parametrov trasnih elementov.

5.1.1 Model Köppel-a (1984)

Köppel (1984) je teoretični model določitve hitrosti v krožnih lokih osnoval na upoštevanju treh glavnih parametrov, ki vplivajo na vožnjo: krivinske karakteristike Ku , širine vozišča B in pregledne razdalje S_h . Pri tem je ločil med tremi tipi krožnih lokov, ki se med seboj ločijo glede na velikost središčnega kot krožnega loka (α).

Izračun se začne z določitvijo vplivnih dolžin, kot je to opisano v poglavju 3.2.4.1. S poznanimi vrednostmi vplivnih dolžin L_Z in L_V lahko določimo spremembo središčnih kotov. Glede na tip krožnega loka ločimo med naslednjimi skupinami enačb:

- **Temenska klotoida:** središčni kot α krožnega loka je enak 0° , zato na izračun Ku vplivata samo vstopna in izvozna prehodnica.

Izračun spremembe središčnega kota $\Delta\tau_1$:

$$\Delta\tau_1 = \frac{31,811}{R^2} A_1^2 ; \quad \text{za } L_Z - \frac{A_1^2}{R} \geq 0 \quad (\text{Köppel, 1984, str.17})$$

$$\Delta\tau_1 = \frac{31,811}{R^2} \left(A_1^2 - \frac{(A_1^2 - 0,3 \cdot R^2)^2}{A_1^2} \right) ; \quad \text{za } L_Z - \frac{A_1^2}{R} < 0 \quad (\text{Köppel, 1984, str.17})$$

Pri čemer pomenijo $\Delta\tau_1$ spremembo središčnega kota na vstopni prehodnici v (gon) in A_1 parameter vstopne prehodnice v (m).

Izračun spremembe središčnega kota $\Delta\tau_2$:

$$\Delta\tau_2 = \frac{31,811}{R^2} A_2^2 ; \quad \text{za } L_V - \frac{A_2^2}{R} \geq 0 \quad (\text{Köppel, 1984, str.17})$$

$$\Delta\tau_2 = \frac{31,811}{R^2} \left(A_2^2 - \frac{(A_2^2 - 50 \cdot R - 0,1 \cdot R^2)^2}{A_2^2} \right) ; \quad \text{za } L_V - \frac{A_2^2}{R} < 0 \quad (\text{Köppel, 1984, str.17})$$

Pri čemer $\Delta\tau_2$ pomeni spremembo središčnega kota na izvozni prehodnici v (gon) in A_2 parameter izvozne prehodnice v (m).

Izračun krivinske karakteristike Ku:

$$Ku = \frac{|\Delta\tau_1| + |\Delta\tau_2|}{L_Z + L_V} \quad (\text{Köppel, 1984, str.17})$$

- **Krožni lok z majhnim središčnim kotom** je definiran kot tisti krožni lok pri katerem vplivna dolžina L_V po velikosti presega dolžino krožnega loka L_R v (m).

Izračun spremembe središčnega kota $\Delta\tau_1$:

$$\Delta\tau_1 = \frac{31,811}{R^2} A_1^2 ; \quad \text{za } L_Z - \frac{A_1^2}{R} \geq 0 \quad (\text{Köppel, 1984, str.17})$$

$$\Delta\tau_1 = \frac{31,811}{R^2} \left(A_1^2 - \frac{(A_1^2 - 0,3 \cdot R^2)^2}{A_1^2} \right) ; \quad \text{za } L_Z - \frac{A_1^2}{R} < 0 \quad (\text{Köppel, 1984, str.17})$$

Izračun spremembe središčnega kota $\Delta\tau_2$:

$$\Delta\tau_2 = \frac{31,811}{R^2} \cdot A_2^2 - \frac{31,811}{A_2^2} \left(\frac{A_2^2}{R} - 50 - 0,1 \cdot R + \frac{\alpha R}{63,622} \right)^2 \quad (\text{Köppel, 1984, str.17})$$

Izračun središčnega kota α :

$$\alpha = \frac{63,622 \cdot L_R}{R} \quad (\text{Köppel, 1984, str.17})$$

Izračun krivinske karakteristike Ku:

$$Ku = \frac{|\Delta\tau_1| + |\alpha + \Delta\tau_2|}{L_Z + L_V} \quad (\text{Köppel, 1984, str.18})$$

- **Krožni lok z velikim središčnim kotom** je definiran kot tisti krožni lok pri katerem vplivna dolžina L_V po velikosti ne presega dolžine krožnega loka L_R .

Izračun spremembe središčnega kota $\Delta\tau_1$:

$$\Delta\tau_1 = \frac{31,811}{R^2} A_1^2 ; \quad \text{za } L_Z - \frac{A_1^2}{R} \geq 0 \quad (\text{Köppel, 1984, str.17})$$

$$\Delta\tau_1 = \frac{31,811}{R^2} \left(A_1^2 - \frac{(A_1^2 - 0,3 \cdot R^2)^2}{A_1^2} \right) ; \quad \text{za } L_Z - \frac{A_1^2}{R} < 0 \quad (\text{Köppel, 1984, str.17})$$

Izračun središčnega kota α :

$$\alpha = \frac{3181,1}{R} + 6,3622 \quad (\text{Köppel, 1984, str.18})$$

Izračun krivinske karakteristike Ku:

$$Ku = \frac{|\Delta\tau_1| + |\alpha|}{L_z + L_v} \quad (\text{Köppel, 1984, str.18})$$

Krivinsko karakteristiko Ku se izračuna za vsak krožni lok posebej. V nadaljevanju sledi izračun za $V_{50\%}$, kar podaja naslednja zveza:

$$V_{50\%} = 65,23 + 4,293 \cdot B - 75,6 \cdot Ku \left(1 - \frac{Ku}{2077}\right) \cdot 10^{-3} \quad (\text{Köppel, 1984, str.14})$$

Izračun še ni zaključen. Hitrost $V_{50\%}$ je potrebno korigirati še glede na vzdolžni sklon. To lahko naredimo z upoštevanjem diagrama na sliki 4.8 iz razdelka 4.2.6. Analitičen izračun je možen z uporabo linearne interpolacije. V primeru vrednosti $Ku = 100$ gon/km in vzdolžnega naklona $s = -8\%$, lahko odbitek $\Delta V_{50\%}$ izračunamo po naslednjem postopku (Köppel, 1984, str.52):

$$\text{za } s = -7\% \text{ je } \Delta V_{50\%} (Ku = 100 \text{ gon/km}) = -4,5 \text{ km/h}$$

$$\text{za } s = -10\% \text{ je } \Delta V_{50\%} (Ku = 100 \text{ gon/km}) = -18,75 \text{ km/h}$$

$$\text{za } s = -8\% \text{ je } \Delta V_{50\%} = -4,5 - (18,75 - 4,5) \cdot \frac{8\% - 7\%}{10\% - 7\%} = -9,25 \text{ km/h}$$

Odbitek $\Delta V_{50\%}$ prištejemo vrednosti $V_{50\%}$, ki smo jo izračunali glede na krivinsko karakteristiko Ku .

Končno hitrost $V_{85\%}$ pa lahko izračunamo z naslednjo enačbo:

$$V_{85\%} = 0,065 + 0,484 \cdot V_{50\%} + 1,869 \cdot V_{50\%}^2 \cdot 10^{-2} - 1,349 \cdot V_{50\%}^3 \cdot 10^{-4} \quad (\text{Köppel, 1984, str.14})$$

5.1.2 Model Krammes-a (1993)

Krammes et.al. (1998) je za izračun hitrosti $V_{85\%}$ postavil enotno linearno regresijsko enačbo s katero je zajel vpliv velikosti radija krožnega loka R , dolžine krožnega loka L , velikost odklonskega kota Δ in velikost prečnega naklona q . Enačba je naslednja:

$$V_{85\%} = 99,6 - \frac{2951}{R} - 0,014 \cdot L - 0,13 \cdot \Delta + 71,82 \cdot q \quad (\text{Krammes et.al., 1998, str.11-3})$$

5.1.3 Model McLean-a (1981)

McLean (1981, cit. po Crisman et.al., 2003) je zasnoval model za določitev $V_{85\%}$ na podlagi velikosti radija horizontalnega krožnega loka in »okoljske« hitrosti V_{amb} (ambient speed) v (km/h). Okoljska hitrost je definirana kot najvišja hitrost na dolgi premi ali na iztegnjenem krožnem loku, ki jo vozniki dosegaajo v pogojih neomejenega prometnega toka. Model je med

drugim vključen tudi v avstralske smernice za načrtovanje. Osnovna regresijska enačba ima obliko:

$$V_{85\%} = 53,8 - 3260 \cdot \left(\frac{1}{R}\right) + 85000 \cdot \left(\frac{1}{R}\right)^2 + 0,464 \cdot V_{amb} \quad (\text{McLean, 1981, cit. po Crisman et.al. 2003, str. 4})$$

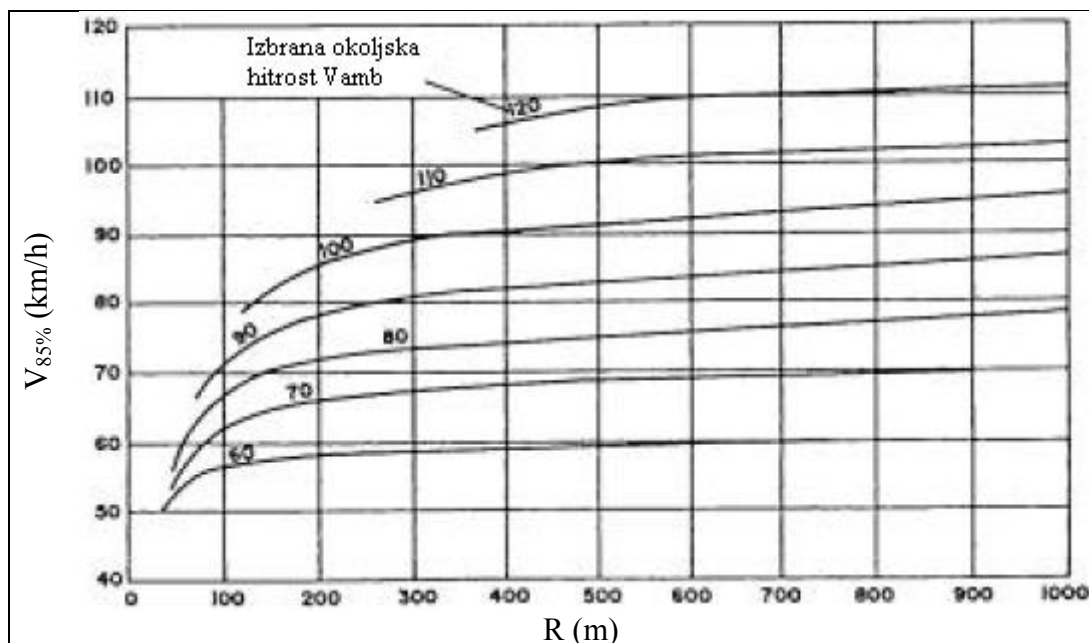


Diagram določitve hitrosti $V_{85\%}$ po Mcleanu (1981, cit. po Crisman et.al., 2003)

Kanellaidis et.al. (1990, cit. po Crisman et.al. 2003, str.4) je potrdil empirično zvezo McLeana, saj se je pokazalo, da je okoljska hitrost pomemben parameter, ki vpliva na zanesljivost modela. Za razmere v Grčiji je podal naslednjo enačbo:

$$V_{85\%} = 32,2 - 2226,9 \cdot \left(\frac{1}{R}\right) - 533,6 \cdot \left(\frac{1}{R}\right)^2 + 0,8393 \cdot V_{amb} \quad (\text{Kanellaidis, 1990, cit. po Crisman et.al. 2003, str. 5})$$

5.1.4 Model Kerman-a (1982)

Kerman (1982, cit. po Crisman et.al. 2003) je zasnoval podoben model kot McLean. Postavil je, da je hitrost $V_{85\%}$ odvisna od velikosti radija krožnega loka R in približevalne hitrosti V_{app} (km/h). Približevalna hitrost je definirana podobno kot okoljska hitrost in pomeni dejansko hitrost, ki jo vozniki dosegajo v neoviranih pogojih. Enačba izračuna je naslednja:

$$V_{85\%} = V_{app} \left(1 - \frac{V_{app}^2}{400 \cdot R}\right) \quad (\text{Kerman, 1982, cit. po Crisman et. al. 2003, str. 5})$$

5.1.5 Model Leins-a

Leins (cit. po Juvanc, 1991) je definiral velikost $V_{50\%}$ v odvisnosti od dejanskega, t.j. nadomestnega, krožnega loka R' , središčnega kota α v ($^{\circ}$) in nadomestnega vzdolžnega nagiba s' (%). Izračun količin določajo naslednje enačbe:

$$R' = R + (0,4 \cdot B - 1,75) \cdot \frac{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\left(1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)} \quad (\text{Leins, cit. po Juvanc, 1991, str. 37})$$

$$s' = \left(1 - e^{-(0,014 \cdot R')^3}\right) \cdot s \quad (\text{Leins, cit. po Juvanc, 1991, str. 47})$$

$$V_{50\%} = (202,33 - 104,70 \cdot \cosh(0,1(s' + 1))) \cdot \tanh\left(\frac{R'}{(64,0 + 0,6 \cdot R'^{0,99})}\right) + 6,375 \cdot \tanh(1,1 \cdot (B - 490))$$

(Leins, cit. po Juvanc, 1991, str. 47)

5.1.6 Model IHSDM

Model IHSDM (Interactive Highway safety design model) je bil razvit pod okriljem Ameriške zvezne administracije za ceste (Fitzpatrick et.al, Federal Highway administration) leta 2000. Sestavljen je iz več modulov, ki vsak zase obravnavajo varnost na cesti. Eden izmed modulov vsebuje tudi določila za ugotavljanje konsistentnosti horizontalnega in vertikalnega poteka trase ob poznavanju realnih voznih hitrosti $V_{85\%}$.

Za namen določitve vpliva realnih voznih hitrosti na konsistentnost poteka trasnih elementov, so bile v štirih ameriških zveznih državah opravljene številne meritve realnih voznih hitrosti. Raziskovalci so prišli do sklepa, da na realno vozno hitrost najbolj vplivajo velikost radija horizontalnega krožnega loka R , vzdolžni naklon s , vertikalna ukrivljenost K v (m/%) in sovpadanje posameznih horizontalnih in vertikalnih elementov trase. Parameter vertikalne ukrivljenosti K je definiran z naslednjo zvezo:

$$K = \frac{L_{ver}}{|s_1 - s_2|} \quad (2)$$

Pri čemer pomenijo L_{ver} – dolžino vertikalne zaokrožitve v m, s_1 – vstopni vzdolžni naklon (%), s_2 – izstopni vzdolžni naklon (%) in K – vertikalna ukrivljenost v (m/%).

Z upoštevanjem vseh parametrov je bilorazvitih deset enačb za določitev $V_{85\%}$, ki so našete v preglednici 5.1.

Preglednica 5.1: Enačbe za določitev $V_{85\%}$ po modelu IHSDM.

<i>id</i>	<i>Trasna situacija</i>	<i>Enačba (Fitzpatrick et al., 2000, str. 162)</i>
1	Horizontalni krožni lok na vzdolžnem naklonu s ; $-9\% < s < -4\%$	$V_{85\%} = 102,10 - \frac{3077,13}{R}$
2	Horizontalni krožni lok na vzdolžnem naklonu s ; $-4\% \leq s < 0\%$	$V_{85\%} = 105,98 - \frac{3709,90}{R}$
3	Horizontalni krožni lok na vzdolžnem naklonu s ; $0\% \leq s < 4\%$	$V_{85\%} = 104,82 - \frac{3574,51}{R}$
4	Horizontalni krožni lok na vzdolžnem naklonu G ; $4\% \leq s < 9\%$	$V_{85\%} = 96,61 - \frac{2752,19}{R}$
5	Horizontalni krožni lok v kombinaciji s konveksno vertikalno zaokrožitvijo	$V_{85\%} = 105,32 - \frac{3438,19}{R}$
6	Horizontalni krožni lok v kombinaciji z blago konkavno vertikalno zaokrožitvijo ($K > 43\text{m}/\%$)	Izberemo najmanjšo hitrost izračunano po enačbah 1-4
7	Horizontalni krožni lok v kombinaciji z ostro konkavno vertikalno zaokrožitvijo ($K < 43\text{m}/\%$)	$V_{85\%} = 103,24 - \frac{3576,51}{R}$
8	Konveksna vertikalna zaokrožitev v kombinaciji s premo	$V_{85\%}$ =predpostavljena je željena hitrost
9	Blaga konkavna vertikalna zaokrožitev v kombinaciji s premo ($K > 43\text{m}/\%$)	$V_{85\%}$ =predpostavljena je željena hitrost
10	Ostra konkavna vertikalna zaokrožitev v kombinaciji s premo ($K < 43\text{m}/\%$)	$V_{85\%} = 105,08 - \frac{149,69}{K}$

Željena hitrost je hitrost, ki jo vozniki dosegaajo na dolgih premah in znaša 100 km/h.

5.2 Modeli za formiranje zveznega profila vozne hitrosti

5.2.1 Model Lamm-a (1998)

Lamm (1998) je svoj model za določitev profila vozne hitrosti in določanja nevarnih mest na dvopasovnih cestah osnoval na temelju treh glavni pokazateljev varnosti. Osnovni vhodni parameter v modelu je vozna hitrost $V_{85\%}$, ki je odvisna od osnovnih horizontalnih

geometrijskih podatkov trase oz. njihove krivinske karakteristike CCR_s . Osnovne enačbe s katerimi določamo vrednost $V_{85\%}$ v krivinah so povzete v preglednici 4.1.

Vpliv iztegnjenih delov trase, ki vozniku omogočajo pospeševanje ali zaviranje, je zajet z upoštevanjem enačb za vezane in nevezane preme (Lamm et.al., 1999).

- *Vezane preme* so po definiciji vse tiste preme, ki s svojo dolžino vozniku omogočajo da pospeši oz. zavira ter pri tem preseže razliko v hitrostih $\Delta V_{85\%}$ za več kot 20 km/h. Pri tem je potrebno kontrolirati sosledje prema-krivina
- *Nevezane preme* so vse tiste preme ki vozniku ne omogočajo da preseže razliko v hitrostih $\Delta V_{85\%}$ za več kot 20km/h.

Lamm je predpostavil, da se pospeševanje dogaja samo na območju prem in je za motorni pospešek in pojemek postavil enotno vrednost $a_p=0,85\text{m/s}^2$. Ugotavljanje ali gre v določenem primeru za vezano ali nevezano premo sloni na predhodnem izračun teoretične dolžine preme, ki jo podaja naslednja enačba:

$$TL = \frac{V_{85\%1}^2 - V_{85\%2}^2}{2 \cdot 3,6^2 \cdot (a + \frac{S \cdot g}{100})} \quad (\text{Lamm et.al., 1999})$$

Pri čemer pomenijo $V_{85\%1}$ in $V_{85\%2}$ – hitrosti v medsebojnih krivinah v (km/h) in TL – teoretična dolžina preme v (m).

Dobljeno teoretično dolžino preme primerjamo z dolžinama za dolgo premo TL_L v (m) in za kratko premo TL_S v (m). Dolžina TL_L je definirana kot dolžina na kateri lahko voznik pospeši do maksimalne hitrosti na premi $V_{85\%max}$ in znaša 100 km/h. Dolžina TL_S pa je definirana kot tista dolžina s katero lahko še karakteriziramo kratko premo. S predstavljenim načinom lahko ločimo med tremi situacijami:

- Teoretična dolžine preme TL je manjša od dolžine kratke preme TL_S , kar pomeni da gre za vezano premo.

$$TL \leq TL_S = \frac{V_{85\%1} - V_{85\%2}}{25,92 \cdot a_p} \rightarrow \text{vezana prema, pri čemer velja da je}$$

- Teoretična dolžina preme TL je daljša od dvakratne dolžine dolge preme TLL , kar pomeni, da gre za nevezano premo.

$$TL > 2TL_L = 2 \cdot \left(\frac{V_{85\%max}^2 - V_{85\%1}^2 (V_{85\%2}^2)}{25,92 \cdot a_p} \right) \rightarrow \text{nevezana prema}$$

- Teoretična dolžina preme TL je krajša od dvakratne dolžine dolge preme TLL a hkrati tudi daljša od dolžine kratke preme TLS, kar pomeni da maksimalna hitrost $V_{85\%max}$ ni dosežena, kljub temu pa voznik doseže končno hitrost V_{85T} , ki je višja od predhodne krivine. Taka vrsta preme je definirana kot nevezana prema.

$$TL_C = \frac{V_{85\%1}^2 - V_{85\%2}^2}{25,92 \cdot a_p} - \text{teoretična razdalja preme pri zaviranju iz krivine 1 v krivino 2}$$

$$\Delta V_{85\%T} = \frac{-2V_{85\%1} + \sqrt{4V_{85\%1}^2 + 44,06 \cdot (TL - TL_C)}}{2} - \text{dodatek hitrosti zaradi pospeševanja}$$

$$V_{85\%T} = V_{85\%1} + \Delta V_{85\%T} - \text{končna hitrost po pospeševanju}$$

S poznanimi vrednostmi hitrosti $V_{85\%}$ v posameznih krivinah in nevezanih premah se z medsebojno primerjavo določi usklajenost trase glede na tri kriterije varnost. V vsakem od kriterijev varnosti se obravnavani odsek razvrsti v enega izmed treh razredov usklajenosti; kot *dober*, *primeren* ali *slab*.

Kriterij varnosti 1 določa usklajenost projektiranih elementov trase. Pri tem medsebojno primerja vrednosti zasnovalne hitrosti V_{zas} s hitrostjo v posamezni krivini ali nevezani premi ($V_{85\%i}$). Razvrstitev elementov po kriteriju varnosti 1 je prikazana v preglednici 5.2.

Preglednica 5.2: Razvrstitev elementov glede na kriterij varnosti 1 po Lamm-u.

DOBRO (Dovoljena odstopanja)	PRIMERNO (Tolerirana odstopanja)	SLABO (Nedovoljena odstopanja)
$ V_{85\%i} - V_{zas} \leq 10\text{km/h}$	$10\text{km/h} < V_{85\%i} - V_{zas} \leq 20\text{km/h}$	$20\text{km/h} < V_{85\%i} - V_{zas} $

Kriterij varnosti 2 določa usklajenost vozni hitrosti $V_{85\%}$ po posameznih elementih trase. V ta namen je potrebno medsebojno primerjati hitrost v elementu i ($V_{85\%i}$) s hitrostjo v naslednjem elementu $i+1$ ($V_{85\%i+1}$). Razvrstitev elementov po kriteriju varnosti 2 je prikazana v preglednici 5.3.

Preglednica 5.3: Razvrstitev elementov glede na kriterij varnosti 2 po Lamm-u.

DOBRO (Dovoljena odstopanja)	PRIMERNO (Tolerirana odstopanja)	SLABO (Nedovoljena odstopanja)
$ V_{85\%i} - V_{85\%i+1} \leq 10\text{km/h}$	$10\text{km/h} < V_{85\%i} - V_{85\%i+1} \leq 20\text{km/h}$	$20\text{km/h} < V_{85\%i} - V_{85\%i+1} $

5.2.2 Model IHSDM

Model IHSDM ("Interactive highway safety design module") je plod raziskave in razvoja pod okriljem Ameriške zvezne administracije za ceste (Fitzpatrick et.al., 2000). Končni rezultat opravljenih analiz je računalniško podprt sistema za določitev varnosti na dvopasovnih medkrajevnih cestah. Celoten računalniški paket obsega 6 modulov od katerih vsak zase obravnava posamezen segment prometne varnosti. Eden izmed njih določa tudi medsebojno usklajenost geometrijskih elementov trase na podlagi določitve vozniških hitrosti $V_{85\%}$.

Na začetku izračuna je potrebno najprej določiti osnovne geometrijske parametre trase, med katerimi so najpomembnejši:

- Radij krožnega loka R v (m)
- Vzdolžni naklon s v (%)
- Vertikalna ukrivljenost K v (%/m)

Poleg tega je potrebno poznati mesta medsebojne interakcije med horizontalnimi (preme, krivine) in vertikalnimi krivinami.

Hitrost $V_{85\%}$ je potrebno določiti za vsak element posebej, pri čemer se poslužujemo 10-ih enačb ki so navedene v preglednici 5.1 v poglavju 5.1.6. Poleg razvoja enačb za hitrost v krožnih lokih so analize pokazale, da je željena hitrost na dolgih premah enaka 100 km/h. To hitrost vozniki redko presegajo in jo navkljub ugodnim razmeram tudi obdržijo. V primeru, da je na isti stacionaži izračunanih več možnih hitrosti, izberemo tisto hitrost, ki je najmanjša. S poznavanjem $V_{85\%}$ za vsak element posebej je možno izvednostiti in grafično prikazati profil vozne hitrosti, ki pa še ni zvezen, saj manjkajo analize segmentov kjer je možno zaviranje in pospeševanje.

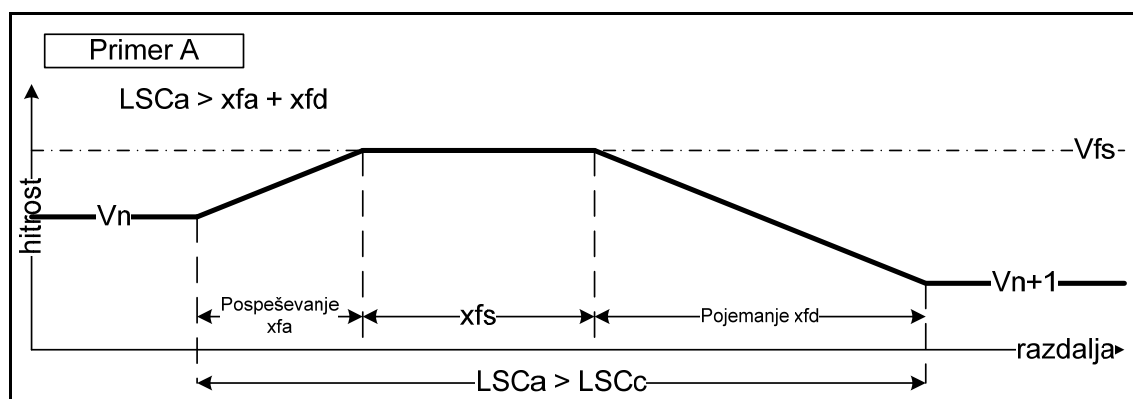
Raziskave (Fitzpatrick et.al., 2000) so pokazale, da sta velikosti pospeška in pojemka odvisni od radija horizontalnega krožnega loka. Vrednosti so glede na posamezno trasno situacijo navedene v preglednici 5.4. Natačnejše definiranje mesta kje pride do pojemanja oz. pospeševanja med posameznimi elementi ni bilo opravljeno.

Preglednica 5.4: Vrednosti pojemkov in pospeškov po modelu IHSDM.

Trasna situacija	Pojemek, d [m/s^2] (Fitzpatrick et.al., 2000)		Pospešek, a [m/s^2]	
	Radij, R [m]	d [m/s^2]	Radij, R [m]	a [m/s^2]
Horizontalni krožni lok na konstantnem nagibu G ; $-9\% < G < 9\%$	$R > 436$	0,00	$R > 875$	0,00
	$175 < R < 436$	$0,6794 - \frac{295,14}{R}$	$436 < R \leq 875$	0,21
			$250 < R \leq 436$	0,43
	$R < 175$	1,00	$175 < R \leq 250$	0,54
Horizontalni krožni lok v kombinaciji s konveksno vertikalno zaokrožitvijo	1,00		0,54	
Horizontalni krožni lok v kombinaciji z blago vertikalno zaokrožitvijo ($K > 43$ m/%)	Uporabimo enaka določila kot za samostojen krožni lok na naklonu		Uporabimo enaka določila kot za krožni lok na naklonu	
Horizontalni krožni lok v kombinaciji z ostro konkavno vertikalno zaokrožitvijo	1,00		0,54	
Konveksna vertikalna zaokrožitev v kombinaciji s premo	//		//	
Blaga konkavna vertikalna zaokrožitev v kombinaciji s premo	//		//	
Ostra konkavna vertikalna zaokrožitev v kombinaciji s premo	1,00		0,54	

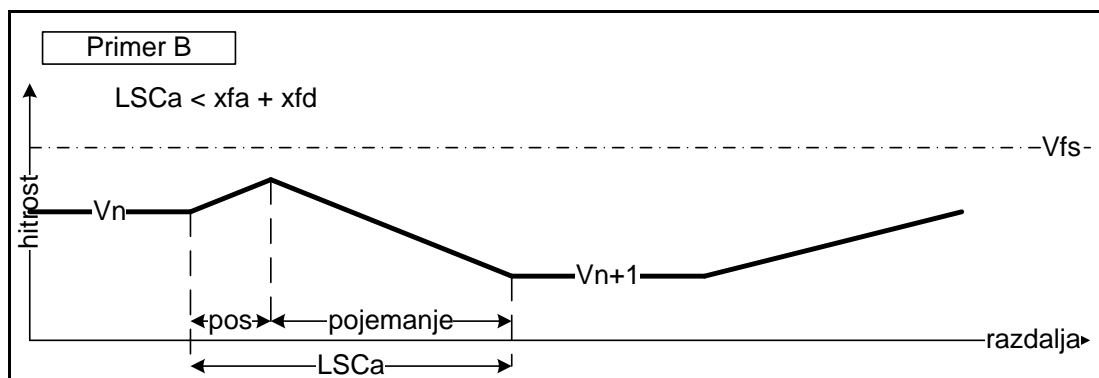
Z dobljenimi podatki za pojemek in pospešek je možno zapolniti manjkajoča mesta v profilu vozne hitrosti. Pri tem ločimo med šestimi možnimi načini pospeševanja in zaviranja:

- 1. Primer A** – Razdalja med krožnima lokoma je dovolj dolga da voznik uspe doseči in zadržati željeno hitrost $V_{fs} = 100$ km/h. Vrednosti pojemkov in pospeškov so navedene v tabeli 5.4.



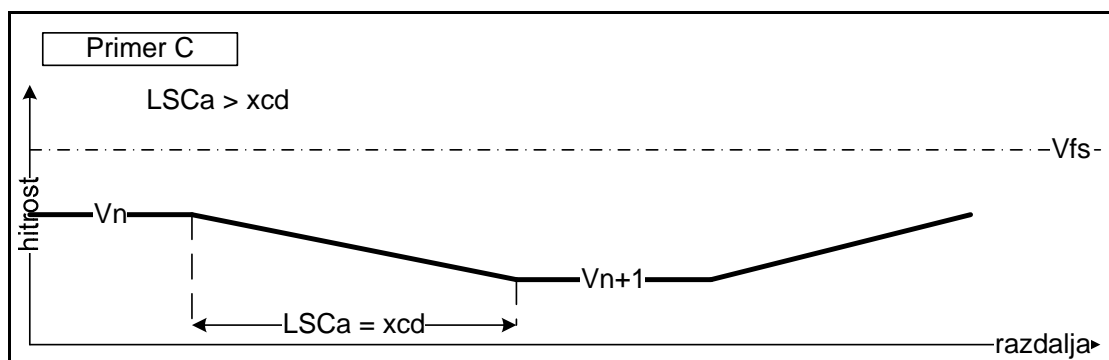
Prikaz pospeševanja in zaviranja za primer A (Fitzpatrick et.al., 2000, str.190)

2. **Primer B** – Voznik ne doseže željene hitrosti $V_{fs} = 100$ km/h. Intenzivnost pospeškov in pojemkov je v skladu z vrednostmi v preglednici 5.4.



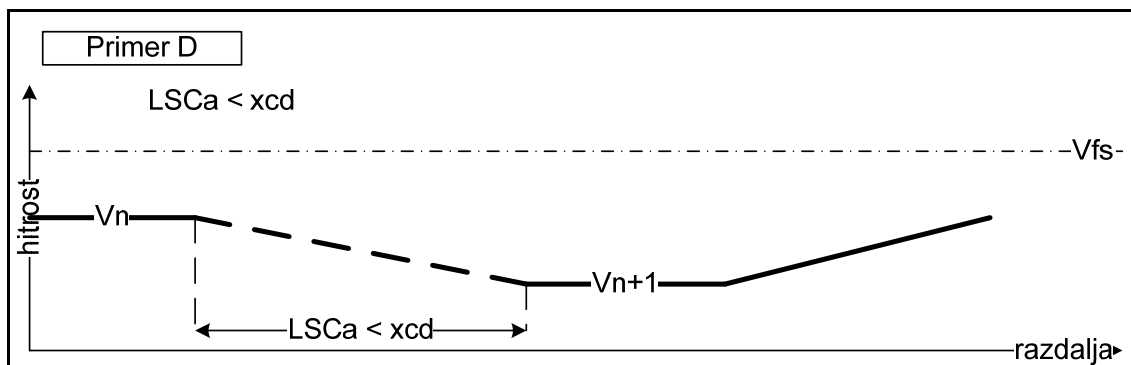
Prikaz pospeševanja in zaviranja za primer B (Fitzpatrick et.al., 2000, str.190).

3. **Primer C** – voznik med krivinama pojema. Razdalja je dovolj dolga da uporabi intenzivnost pojemka, ki je naveden v preglednici 5.4.



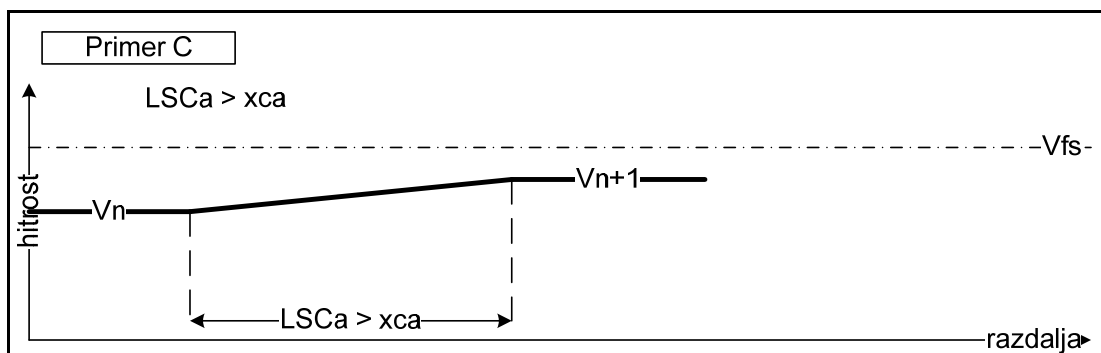
Prikaz pojemanja za primer C (Fitzpatrick et.al., 2000, str. 190)

4. **Primer D** – voznik med krivinama pojema. Razdalja za pojemanja je prekratka za realiziranje pričakovanega pojemka, zato uporabi višjo intenzivnost pojemka.



Prikaz pojemanja za primer D (Fitzpatrick et.al., 2000, str. 191)

5. **Primer E** – voznik med krivinama pospešuje. Razdalja je dovolj dolga da realizira intenzivnost pospeška v skladu z vrednostmi v preglednici 5.4.



Prikaz pospeševanja za primer E (Fitzpatrick et.al., 2000, str. 191)

Z določitvijo celotnega profila voznih hitrosti se določijo pripadajoče vrednosti realiziranih pojemkov in pospeškov. Vrednosti rezultirajočih pojemkov in pospeškov se zavrstijo v tri razrede usklajenosti kot jih je opredelil Lamm; *dobro*, *primerno*, *slabo*.

Usklajenost elementov po modelu IHSDM glede na realizirane vrednosti pospeškov in pojemkov je prikazana v spodnji preglednici.

Usklajenost elementov	Pojemek (m/s^2)	Pospešek (m/s^2)
<i>Dobro</i>	1,00 do 1,48	0,54 do 0,89
<i>Primerno</i>	1,48 do 2,00	0,89 do 1,25
<i>Slabo</i>	več kot 2,00	več kot 1,25

5.2.3 Model Juvanca (1991)

Juvanc (1991) je model za določanje nevarnih mest na cesti osnoval na predpostavki, da je prometno najbolj nevarno zmanjševanje hitrosti pri uvozu v krožni lok. Pristop k analizi je torej drugačen kot pri prejšnjih dveh modelih, saj ne gre za medsebojno primerjavo posameznih hitrosti v trasnih elementih ampak za natančnejšo analizo voznodinamičnih parametrov in njihovo interakcijo z voziščno konstrukcijo. Ustrezna usklajenost trasnih elementov ne izhaja zgolj samo iz predpostavke, da so hitrosti $V_{85\%}$ enakomerno razporejene vzdolž odseka, temveč iz predpostavke, da se pri spreminjanju hitrosti realizirajo sprejemljive vrednosti voznodinamičnih količin, ki potrebujejo ustrezno odzivnost vozišča. Juvanc je zato za najvplivnejši parameter, ki ga voznik neposredno zazna med vožnjo, postavil vrednost bočnega pospeška in glede na njegovo spreminjanje postavil enačbe za določitev hitrosti pri uvozu v krožni lok.

Prometno dogajanje pri uvozu v krivino opredeljujejo 4 faze (Juvanc, 1991):

1. Faza opredeljuje območje reagiranja voznika, pri čemer voznik s percepcijo linije roba vozišča skladno identificira opazovano situacijo in sprejme ustrezno odločitev. Čas trjanja 1. faze je načeloma dolg približno 1,5 s in je lociran na izvozni prehodnici oz. na primerni lokaciji na premi. V primeru S-krivine je privzeto da je začetek 1. faze lociran na polovici izvozne prehodnice. V primeru vožnje po iztegnjeni trasi oz. vožnje po C-krivini pa na oddaljenosti pregledne razdalje pred vstopom v krožni lok. Pri tem je hitrost enaka hitrosti iz predhodnega krožnega loka ali preme.

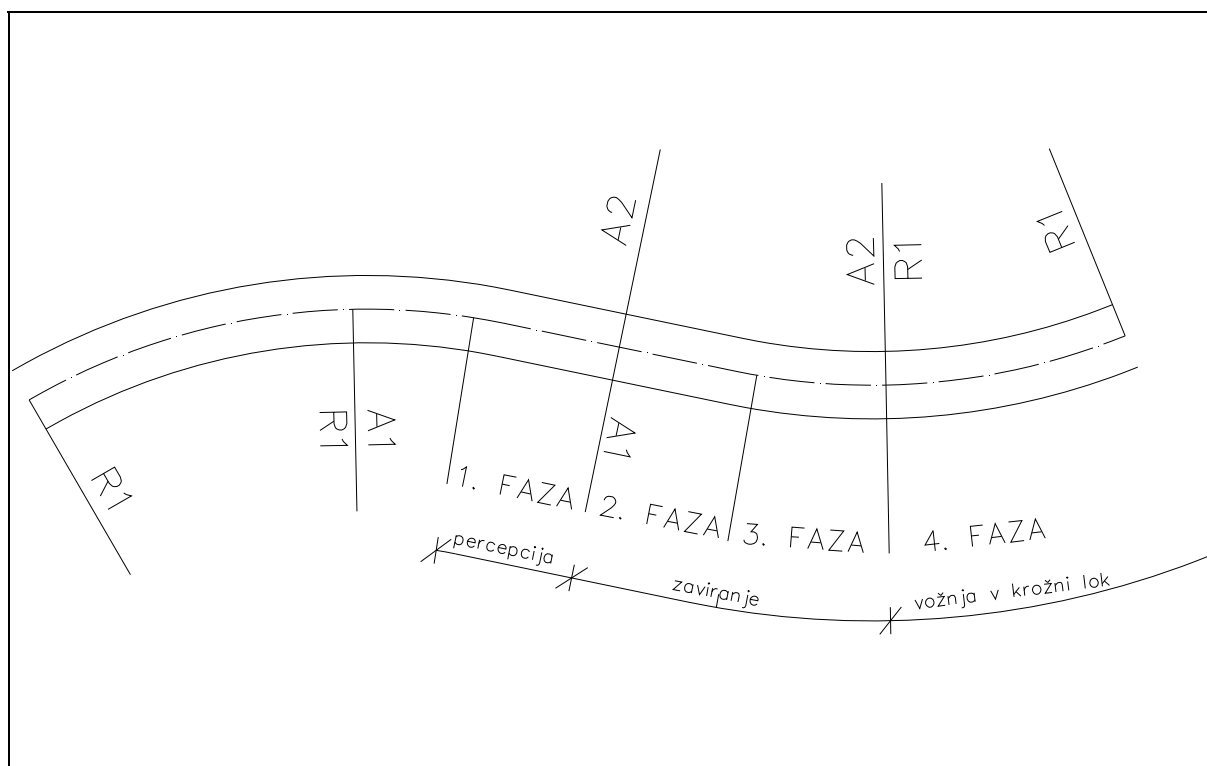
2. Faza opredeljuje območje pasivnega zaviranja, kjer voznik zavira z motornim pojemkom. Začne se na oddaljenosti 90 m na uvozni prehodnici ali pa na koncu izvozne prehodnice v kolikor je dolžina uvozne prehodnice krajša od 90 m. Pojemanje traja toliko časa dokler bočni pospešek ne naraste na tisto vrednost, s katero voznik vozi v prihajajočem krožnem loku. V kolikor so razmere dovolj ugodne, da bočni pospešek ne preseže pričakovane vrednosti, voznik nemoteno nadaljuje vožnjo v prihajajoči krožni lok. Velikost motornega pojemka je odvisna od trenutne vstopne hitrosti v krožni lok in jo podaja naslednja enačba:

$$a_m = 2,96 \cdot 10^{-2} \cdot v_0 \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 58})$$

Pri čemer a_m pomeni pasivni pojemek z motorjem v (m/s^2) in v_0 – vstopno hitrost v krožni lok v (m/s).

3. **Faza** opredeljuje območje aktivnega zaviranja, kjer voznik realizirano motorno pojemanje dopolni z aktivnim zaviranjem z zavorami. Aktivno zaviranje poteka vse od konca pasivnega zaviranja pa vse do začetka krožnega loka. Pri tem se aktivira ustrezna zavorna sila ki ohranja še sprejemljivo udobje in omogoča da voznik zmanjša hitrost do vrednosti, s katero bo potem nadaljeval z vožnjo v krožnem loku.

4. **Faza** opredeljuje vožnjo po krožnem loku. Faze zaviranja so končane in začne se relativno nespremenljiva vožnja skozi krožni lok. Pri tem so možne manjše adaptacije hitrosti glede na vstopno hitrost.



Slika 5.1: Zaporedje faz pri vožnji v krožni lok po modelu Juvanca.

Poleg zaviranja je pomemben manever tudi pospeševanje, do katerega pride ko dobi voznik vtis o iztegnjenosti trase. Juvanc (1991) navaja da se to zgodi v S – krivinah, kjer je med dvema krožnima lokoma postavljena prema ali pa sta dolžini prehodnic dovolj dolgi da dajeta vtis iztegnjenosti. S povzetkom raziskav tujih avtorjev, Juvanc(1991) navaja naslednja kriterija za določitev iztegnjenosti trase:

- Za primer vmesne preme med krožnima lokoma:

$$\frac{L_i}{2} + L_{pr} + \frac{L_u}{2} \geq 130m \rightarrow \text{voznik pospešuje}$$

Pri čemer pomenijo L_i – dolžino izvozne prehodnice v (m), L_{pr} – dolžino vmesne preme v (m) in L_u – dolžino uvozne prehodnice (m).

- Za primer brez vmesne preme med krožnima lokoma:

$$\frac{L_i}{2} + \frac{L_u}{2} \geq 130m \rightarrow \text{voznik pospešuje}$$

Začetek pospeševanja je v obeh primerih postavljen v sredino izvozne prehodnice. Vrednost motornega pospeška je bila ugotovljena eksperimentalno, odvisna je od hitrosti in znaša (Juvanc, 1991):

$$a_p = 0,824 - 0,0061 \cdot V \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 62})$$

5.2.4 Postopek določitve nevarnih mest na cesti po Juvancu (1991)

Postopek določitve spreminjanja hitrosti se najprej začne z določitvijo osnovnih parametrov trase, pri čemer je osnovno poznati geometrijske karakteristike horizontalnih elementov.

V začetku je potrebno za vsak krožni lok posebej določiti njemu pripadajočo vozno hitrost $V_{85\%}$. Juvanc je privzel analitični postopek Köpla (1984), ki je naveden v poglavju 5.1.1. Temu sledi določitev vrednosti bočnega pospeška v posameznih krožnih lokih, kar izvedemo z enačbo:

$$p_R = \frac{V_{85\%R}^2}{R} - qg \quad (4)$$

Pri čemer $V_{85\%R}$ pomeni izračunano hitrost $V_{85\%}$ v krožnem loku po Köplu (1984).

Račun nadaljujemo z zapolnitvijo vrzeli v profilu vozne hitrosti. Najprej je potrebno ugotoviti v kakšnem odnosu sta hitrosti v sosednjih krožnih lokih in kateri od manevrov (pospeševanje, zaviranje) bo nastopil.

Če obravnavamo dva sosednja krožna loka S-kivine in za prvi krožni lok označimo vrednost hitrost z $V_{85\%1}$, za drugi krožni lok pa z $V_{85\%2}$, potem lahko določimo naslednje možne izzide:

5.2.4.1 Pojemanje pri uvozu v krožni lok

$V_{85\%1} > V_{85\%2}$, hitrost v predhodnem krožnem loku je manjša od hitrosti v prihajajočem krožnem loku, zato mora vozilo pojemat. Izračun poteka v skladu z redosledom 4-ih faz vožnje v krožni lok. Začetek 1. faze je lociran na sredini izvozne prehodnice, kar je tudi referenčna točka za izračun. Začetek 2. faze (pojemanje z motorjem) pa je odvisen od dolžine

uvozne prehodnice in pojava morebitne vmesne preme, zato ločimo tri možne situacije začetka 2. faze (Juvanc, 1991):

- 1.) na oddaljenosti 90 m pred začetkom krožnega loka, če je pred njim iztegnjena trasa ($L_u + L_{pr} > 90\text{m}$)
- 2.) na koncu izvozne prehodnice, če ji sledi krajši iztegnjeni del trase ($L_u + L_{pr} < 90\text{m}$).
- 3.) na začetku uvozne prehodnice, katere dolžina je krajša od 90 m.

Poleg položaja, kje se pojemanje z motorjem začne, potrebujemo še podatek o tem kakšna je hitrost na začetku 2. faze. Pojavijo se štiri možne situacije:

- 1.) Pogoj o vtisu iztegnjenosti trase ni izpolnjen, zato vozilo ne pospešuje. Uvozna prehodnica je krajša od 90 m, kar ima za posledico da je vstopna hitrost V_0 enaka hitrosti v predhodnem krožnem loku.
- 2.) Pogoj o vtisu iztegnjenosti trase ni izpolnjen, zato vozilo ne pospešuje. Uvozna prehodnica je daljša od 90 m, kar ima za posledico da se 2. faza začne nekje na uvozni prehodnici. Pri tem preuredimo vhodne podatke tako, da izračunamo navidezno vstopno hitrost v_0' (m/s), ki bi teoretično obstajala na začetku 2. faze.

$$v_0' = \sqrt{(v_0^2 + 2(a_m - sg)(L_u - 90))} \quad (\text{Juvanc, 1991, str.83})$$

- 3.) Pogoj o vtisu iztegnjenosti trase ni izpolnjen, zato vozilo ne pospešuje. Uvozna prehodnica je krajša od 90 m pred njo pa se nahaja prema. Podatke je potrebno spet preurediti, tako da se izračun lahko začne v začetku uvozne prehodnice. To storimo z irračunom navidezne vstopne hitrosti.
- 4.) Izpolnjen je pogoj o iztegnjenosti trase, kar pomeni da ima voznik možnost pospeševanja. Začetek pospeševanja je postavljen v sredino izvozne prehodnice. Razpoložena razdalja za pospeševanje L_p (m) je omejena z začetkom 2. faze in je določena z naslednjima enačbama:

$$\text{za } L_{pr} + L_u > 90\text{m} \rightarrow L_p = \frac{L_i}{2} + L_{pr} + L_u - 90 \quad (\text{Juvanc, 1991, str.82})$$

$$\text{za } L_{pr} + L_u < 90\text{m} \quad L_p = \frac{L_i}{2} \quad (\text{Juvanc, 1991, str.82})$$

Po končanem manevru pospeševanja se z upoštevanjem trenutnega motornega pospeška določi vstopna hitrost v krožni lok v_0 . Zvezo podaja enačba (8):

$$v_0 = \sqrt{(v_{op}^2 + 2L_p(0,824 - 0,022 \cdot v_{op}))} \quad (\text{Juvanc, 1991, str.82})$$

Pri čemer v_{op} predstavlja hitrost v predhodnem krožnem loku v (m/s).

V kolikor se začetek 2. faze nahaja pred ali za uvozno prehodnico, dobljeno hitrost popravimo v skladu z enačbo (5).

Z znanimi vrednostmi vstopne hitrosti V_o (na začetku vstopne prehodnice) in ob pogoju da je $V_o > V_{85\%2}$, račun nadaljujemo z izračunom razdalje L_m na kateri voznik pojema samo z motorjem. Že v predhodnem poglavju je bilo omenjeno da 2. faza traja do mesta na uvozni prehodnici, ko voznik občuti vrednost bočnega pospeška v prihajajočem krožnem loku. Juvanc (1991) je v ta namen z upoštevanjem vrednosti p_R izpeljal naslednjo enačbo:

$$L_m = \frac{(v_o^2 - Rqg) - \sqrt{((v_o^2 - Rqg)^2 + 8(a_m - sg)RLp_R)}}{-4(a_m - sg)} \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 79})$$

3. faza se začne z aktiviranjem potrebnega zavornega pojemka a_z . Pri tem je pomembno omeniti da v primeru imaginarne vrednosti dolžine L_m , ta faza odpade. Za vhodni parameter uporabimo končno hitrost iz 2. faze in preostalo dolžino za realizacijo zavornega pojemka. Preostala dolžina za pojemanje z zavornimi se določi po enačbi:

$$L_z = L - L_m \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 79})$$

Intenzivost zavornega pojemka a'_z je definirana kot:

$$a'_z = \frac{v_{85\%1}^2 - v_m^2}{2L_z} \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 79})$$

Pri tem je potrebno intenzivnost zavornega pojemka popraviti glede na vzdolžni sklon:

$$a_z = a'_z + sg \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 79})$$

Račun se na tej točki zaključuje, saj je hitrost v začetku 4. faze znana in je enaka hitrosti v trenutnem krožnem loku.

5.2.4.2 Kalibracija modela za vse primere voženj v krožni lok

Pojemanje

Analiza enačbe za izračun L_m je pokazala, da velja samo ob določenem naboru parametrov. Pri uvozu v krožne loke z relativno velikim R je L_m zavzel imaginarno vrednost, kar je očitno neuporabno pri nadaljnem izračunu. Z generiranjem nekaj naključnih radijev pri katerih je bila vstopna hitrost vselej 100 km/h je bilo ugotovljeno, da se imaginarne vrednosti L_m pojavljajo pri krožnih lokih z relativno velikim radijem. Vzrok temu je moč iskati v dejstvu,

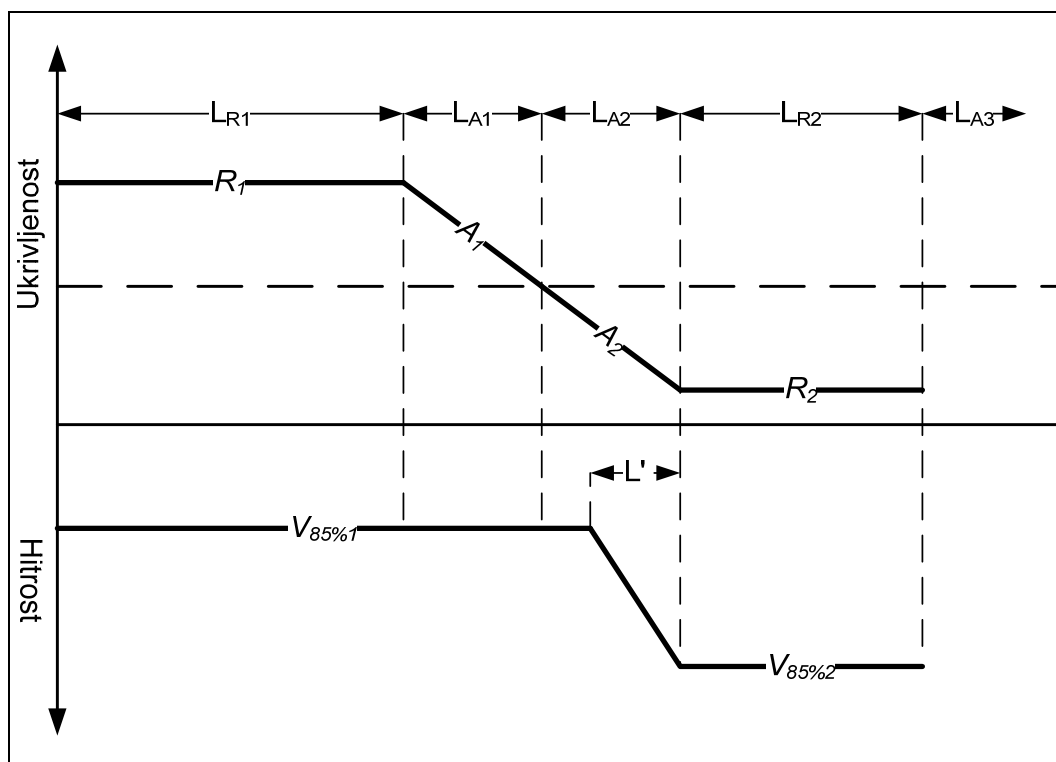
da so v relativno velikih radijih vozne hitrosti razmeroma visoke in zato vozniki ne občutijo potrebe po dodatnem zmanjšanju hitrosti. Pri tem je teoretično potreben pojemek, ki ga voznik potrebuje za spremembo hitrosti od začetka 2. faze pa vse do začetka krožnega loka, manjši od motornega pojemka izračunanega po enačbi (3). To nadalje pomeni, da voznik nikjer na uvozni prehodnici ne občuti potrebe po dodatnem zaviranju z motorjem, saj bočni pospešek, s katerim bo vozil v prihajajočem krožnem loku ni nikjer prekoračen.

Preglednica 5.5: Primerjava izračuna dolžine L_m pri pojemanju z motorjem.

	Param. (m)	Dol. (m)	B (m)	S (%)	Q (%)	V_R (km/h)	p_r (m/s ²)	V_0 (km/h)	a_m (m/s ²)	V_0' (km/h)	L_m (m)	a_{potr} (m/s ²)
Preh.	100	100	6	0								
Lok	100	160	6	0	7	65,45	2,61	100	-0,82	100	41,23	-2,20
Preh.	100	100	6	0								
Preh.	203,3	135,6	6	0								
Lok	305	180,5	6	0	4,5	88,54	1,54	100	-0,82	100	Imag.	-0,62
Preh.	203,3	135,6	6	0								

V preglednici 5.5 kratek izračun nazorno pokaže, da je imaginarna vrednost razdalje L_m posledica prevelike vrednosti pojemka a_m v primerjavi s teoretično potrebnim. V realnosti bi to pomenilo, da voznik pelje v krožni lok z minimalno zmanjšano hitrostjo. Tak manever sicer varnostno ni vprašljiv, saj se realizirajo majhne vrednosti rezultirajočih pospeškov na vozišče. Kljub temu je zaradi zagotavljanja zveznosti profila vozne hitrosti potrebno določiti, kje se tako pojemanje začne. Začetek je postavljen na razdaljo L' pred prihajajočim krožnim lokom. Pri tem se za dejanski pojemek upošteva vrednost pojemanja z motorjem a_m , ki je izračunana na podlagi vstopne hitrosti v krožni lok. Izračun L' je naslednji:

$$L' = \frac{v_0^2 - v_{85\%1}^2}{2a_m} \quad (5)$$



Slika 5.2: Prikaz pozicije L' v profilu vozne hitrosti.

Z definiranjem za kakšen tip pojemanja z motorjem gre, račun nadaljujemo z določitvijo končne hitrosti v_m (m/s) v 2.fazi vožnje po krožnem loku. Glede na vrednost L_m sta določeni dve enačbi:

- Za $L_m = \text{Re}$ (realna vrednost) $v_m = \sqrt{v_0^2 + 2(a_m - sg)L_m}$ (6)

- Za $L_m = \text{Img}$ (imaginarna vrednost) $v_m = v_{85\%2}$ (7)

Pospeševanje

Juvanc (1991) je pospeševanje med krožnimi loki definiral samo v primeru, ko voznik dobi vtis o iztegnjenosti trase ($L_r > 130\text{m}$). Pri tem je kot glavni parameter, kdaj se voznik odloči za pospeševanje definiral preglednost. Za določitev homogenosti profila vozne hitrosti, pa je potrebno objasniti tudi situacije, ko je hitrost iz predhodnega loka nižja od tiste v pričakovanem krožnem loku. Velja torej naslednja zveza $V_{85\%1} < V_{85\%2}$.

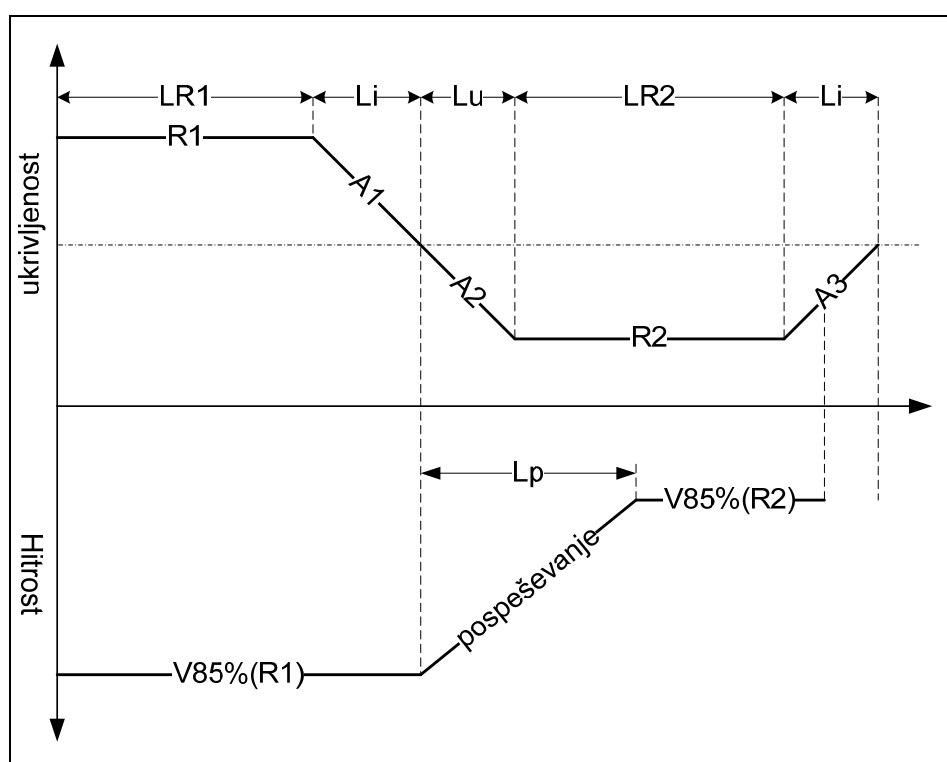
Osnovni princip pospeševanja med krožnimi loki sloni na dejstvu, da je začetek pospeševanja postavljen v začetek 2.faze in traja vse do točke, dokler vozilo ne doseže pričakovane hitrosti v krožnem loku. Začetek 2.faze je smiselno postaviti za začetek pospeševanja, saj v predhodni 1.fazi voznik šele zbira informacije za odločitev o primernem manevru. Pospeševanje je

možno tudi sredi krožnega loka, saj voznik teži k temu da doseže vrednost pričakovanega bočnega pospeška.

Ločimo naslednje možne situacije:

- 1.) Voznik se odloči za pospeševanje, pri čemer doseže hitrost v prihajočem krožnem loku. Ustrezno dolžino pospeševanja L_p določimo z upoštevanjem hitrosti v sosednjih krožnih lokih ob uporabi pospeška a_p :

$$L_p = \frac{v_{58\%2}^2 - v_{85\%1}^2}{2(0,824 - 0,022v_{85\%1})} \quad (8)$$



Slika 5.3: Pospeševanje v krožni lok, ko je hitrost prihajajočega krožnega loka dosežena.

- 2.) Voznik se odloči za pospeševanje, pri čemer je dolžina krožnega loka premajhna, da doseže hitrost v prihajajočem krožnem loku. Pospeševanje se zaključi na sredini izvozne prehodnice prihajajočega krožnega loka. Postopek izračuna pa je naslednji:

Izračun teoretično potrebne razdalje za pospeševanje:

$$L_p = \frac{v_{58\%2}^2 - v_{85\%1}^2}{2(0,824 - 0,022v_{85\%1})} \quad (9)$$

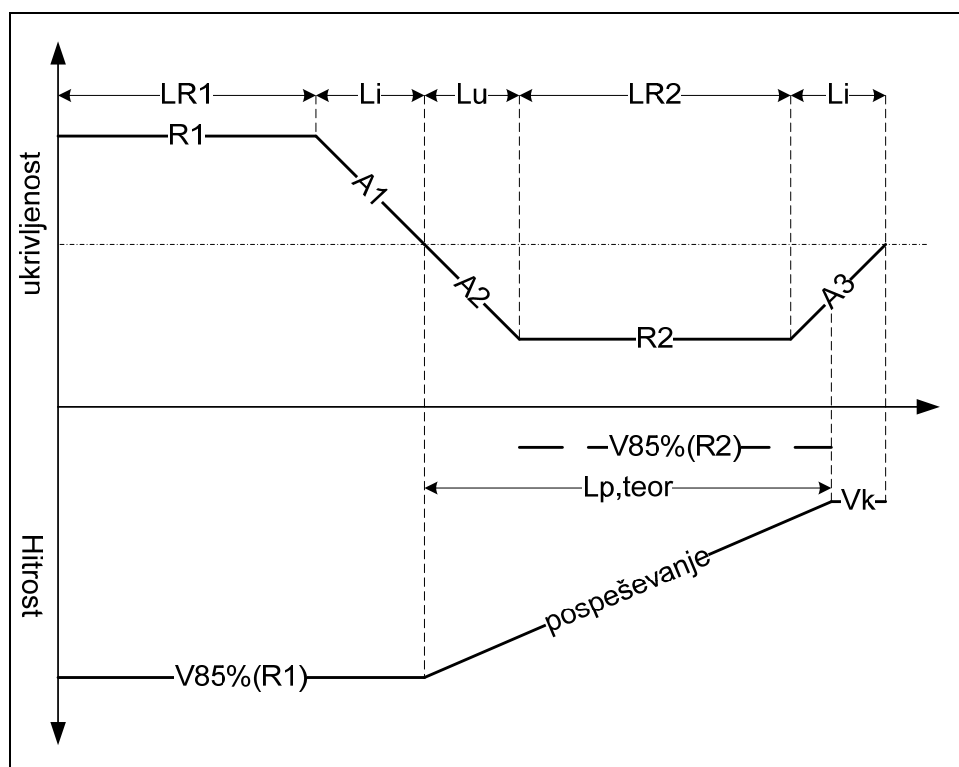
Razpoložljiva celotna razdalja za pospeševanje $L_{p,razp}$ (m):

$$L_{p,razp} = L_u + L_R + \frac{L_i}{2} \quad (10)$$

za $L_p > L_{p, teor}$ -> izračunamo končno hitrost v_k (m/s), glede na razpoložljivo razdaljo za pospeševanje:

$$v_k = \sqrt{2L_{p, razp} a_p + v_{85\%1}^2} \quad (11)$$

Končna hitrost je hkrati tudi vstopna hitrost v naslednji krožni lok.



Slika 5.4: Profil vozne hitrosti v primeru pospeševanja ko vozilo ne doseže hitrosti v prihajajočem krožnem loku.

5.3 Interaktivna obravnava hitrosti in dinamičnih učinkov na vozišče

Kot je bilo omenjeno že v prejšnjih poglavjih, se je mnogo avtorjev ukvarjalo z empirično analizo realnih vozni hitrosti in dinamičnih količin. Redki pa so bili tisti, ki so dosežena spoznanja tudi vgradili v homogen model določanja nevarnih mest na cesti z upoštevanjem profila vozne hitrosti. V nadaljevanju so predstavljeni štirje modeli za analizo voznodinamičnih količin z upoštevanjem prometne varnosti.

5.3.1 Kriterij varnosti 3 po Lamm-u (1997)

Kriterij varnosti 3 po Lamm-u določa varnost na podlagi vozno-dinamičnih količin. Pri tem je potrebno medsebojno primerjati razpoložljivi koeficient radialnega drsnega trenja f_R s potrebnim koeficientom radialnega drsnega trenja f_{RA} . Lamm (1998) je predlagal, da se razpoložljivo vrednost f_R določi kot 70% maksimalne vrednosti koeficienta radialnega trenja ($f_{Rmax} = 0,925f_{Tmax}$). Z regresijsko enačbo, ki jo je Lamm podal za f_{Tmax} , lahko zapišemo:

$$f_R = 0,7 \cdot 0,925 \cdot f_{tmax} = 0,648 \cdot (0,59 - 4,85 \cdot 10^{-3} \cdot V_{zas} + 1,51 \cdot V_{zas}^2) \quad (2)$$

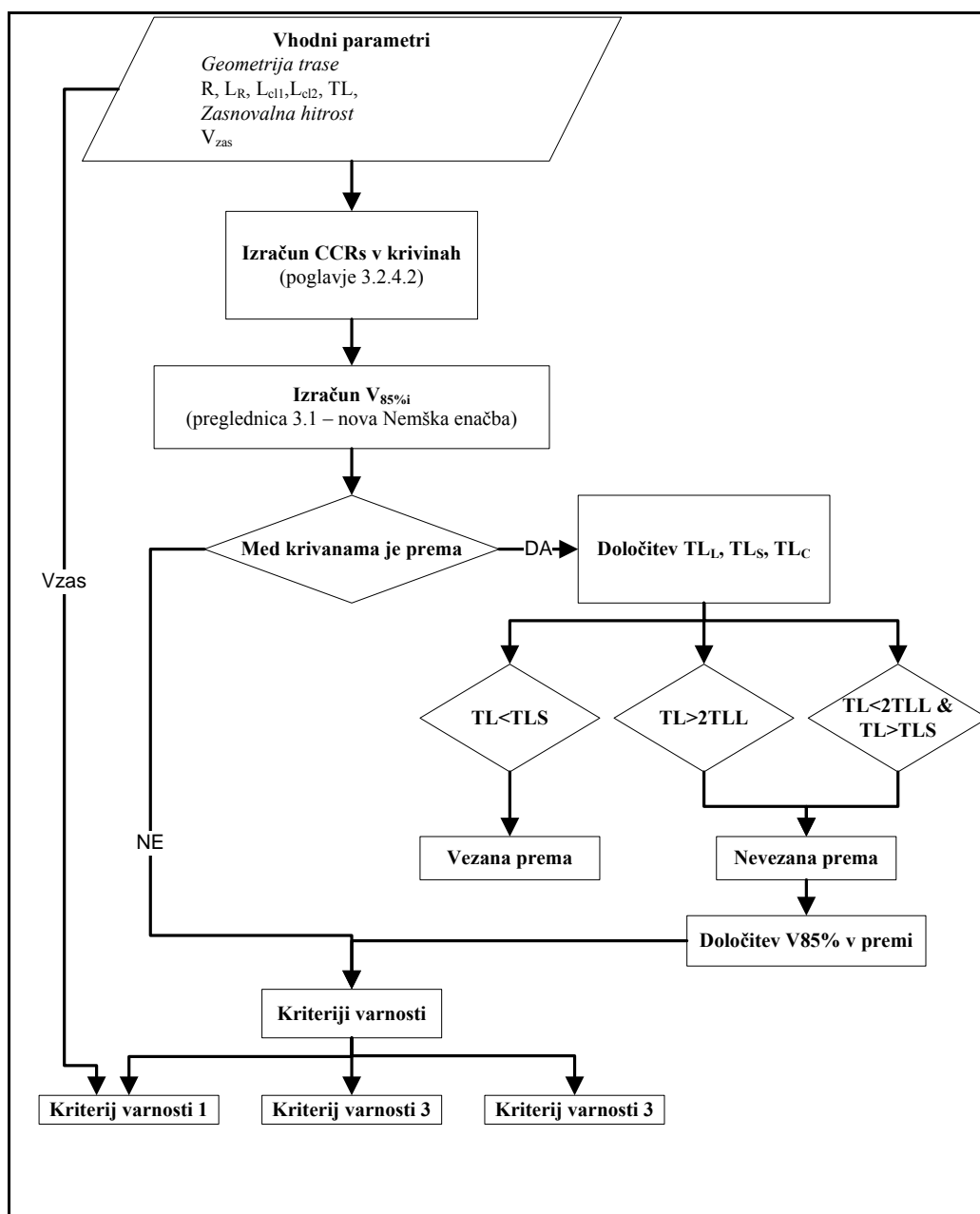
Koeficient potrebnega radialnega drsnega trenja v krivini pa podaja enačba:

$$f_{RA} = \frac{V_{85\%i}^2}{127 \cdot R} - q \quad (\text{Lamm et.al., 1993, str. 9-12})$$

Pri čemer je $V_{85\%i}$ določena na podlagi določil iz poglavja 4.2.4.2.

Preglednica 5.6: Razvrstitev elementov glede na kriterij varnosti 3 po Lamm-u.

DOBRO (Dovoljena odstopanja)	PRIMERNO (Tolerirana odstopanja)	SLABO (Nedovoljena odstopanja)
$f_R - f_{RA} \leq 0,01$	$-0,04 < f_R - f_{RA} \leq 0,01$	$f_R - f_{RA} < -0,04$



Slika 5.5: Končni diagram poteka za določitev voznodinamične usklajenosti elementov po Lamm-u.

5.3.2 Interakcija med vozno-dinamičnimi parametri in voziščem po Juvancu

S konstruiranjem profila vozne hitrosti $V_{85\%}$ lahko določimo kje in v kakšnem iznosu delujejo pospeški na vozišče. Kot je bilo ugotovljeno v poglavju 4.2.3., vsaki spremembi rezultirajočih pospeškov pritiče tudi ustrezna vrednost zahtevanega koeficienta drsnega trenja, ki mora biti v dopustnih mejah. Juvanc (1991) je ta pogoj opisal z enačbo:

$$f_{tzaht} < f_{tmaxdop} \quad (\text{Juvanc, 1991, str. 84})$$

Z upoštevanjem določila o povečanju koeficienta $f_{tmaxdop}$ za 10% in ob poznavanju enačbe za f_{tzaht} (Juvanc, 1991), lahko zgornjo neenačbo ustrezno razširimo:

$$\sqrt{1,169 \cdot \left(\frac{v_R^2}{gR-q}\right)^2 + \left(\frac{0,055+s+a_z}{g}\right)^2} < 1,1 \cdot f_{tmaxdop} \quad (12)$$

Glede na primerjavo med f_{tzaht} in $f_{tmaxdop}$ je Juvanc (1991) osnoval t.i. "Vozno-dinamično karakteristiko" (VDK) in je definirana kot osnovni varnostni pokazatelj. Enačba za izračun VDK je naslednja:

$$VDK = \frac{f_{tzaht}}{1,1 \cdot f_{tmaxdop}} \cdot 100 \quad (13)$$

VDK predstavlja imaginarno merilo varnosti, pri čemer jo izražamo v (%). V kolikor velja da je $VDK \leq 100\%$, potem sledi da so pogoji na vozišču ugodni in ni bojazni nastanka nezgod vsled nekonsistentnosti elementov. Vrednosti $VDK < 100\%$ pa že nakazujejo mesta povečane prometne nevarnosti.

S poznavanjem kje na trasi lahko pride do nezadostne odzivnosti vozišča, je načrtovalcu ceste prepuščeno v odločanje ali bo na omejenem odseku uporabil kvalitetnejši material voziščne konstrukcije ali pa se bo poslužil spremenjenega poteka trase. Odgovor na to, kakšno odločitev naj sprejme, podaja mejna vrednost VDK_M ki jo definira naslednja enačba:

$$VDK_M = \frac{f_{t50\%}}{f_{tmaxdop}} \cdot 100 \quad (14)$$

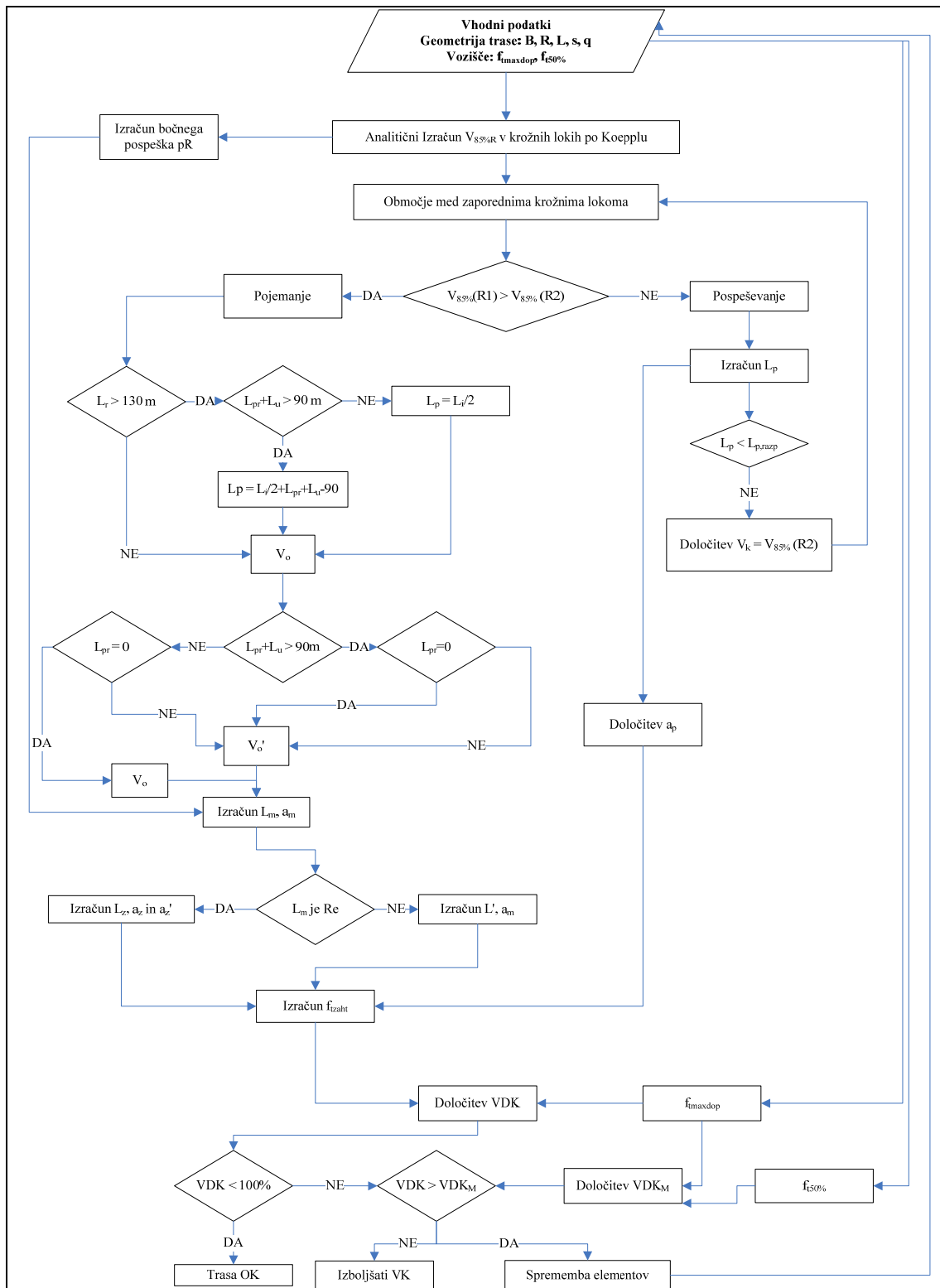
$f_{t50\%}$ v zgornji enačbi predstavlja 50% vzorec merjenih vrednosti koeficienta drsnega trenja f_t in velja kot referenčna vrednost za določanje KDT na voziščih iz eruptivnega agregata.

Preglednica 5.7: Vrednost VDK_M v odvisnosti od $f_{t50\%}$ in V_i .

	Hitrost V_i (km/h)										
	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
f_{Tmax}	0,42	0,37	0,33	0,3	0,26	0,23	0,21	0,19	0,17	0,16	0,15
$f_{T50\%}$	0,51	0,48	0,46	0,43	0,41	0,39	0,37	0,353	0,338	0,325	0,313
VDK_M	121%	130%	139%	143%	158%	170%	176%	186%	199%	203%	209%

VDKM je torej referenčna vrednost VDK, ki pove (Juvanc, 1991):

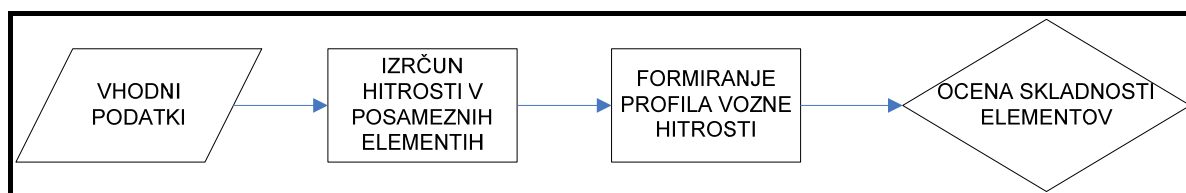
- $100\% < VDK < VDK_M$ uporabiti kvalitetnejši material voziščne konstrukcije
- $VDK > VDK_M$ spremeniti potek trasnih elementov



Slika 5.6: Končni diagram poteka za določitev nevarnih mest na cesti po Juvancu.

6 FORMIRANJE PROFILA VOZNE HITROSTI

V osnovi so vsi prej predstavljeni modeli (poglavje 5) namenjeni določitvi profila vozne hitrosti. Pri tem vsak od njih uporablja svojevrstna teoretična izhodišča in empirične enačbe za določitev hitrosti v posameznih trasnih elementih. Za namen pričujoče diplomske naloge bomo vzeli pod drobnogled tri najbolj dovršene modele za določitev profila vozne hitrosti; model Juvanca, Lamm-a in model IHSDM. Vsi trije modeli se v splošnem podrejajo podobnim principom kot jih posplošeno prikazuje diagram poteka na sliki 6.1.



Slika 6.1: Osnovni diagram poteka za formiranje profila vozne hitrosti.

Algoritmi vseh treh modelov so bili osnova za snovanje računalniškega programa ki omogoča avtomatiziran izračun in izris profila vozne hitrosti po posameznem avtorju. Osnovni algoritem izračuna je prikazan po diagramu na sliki 6.1.

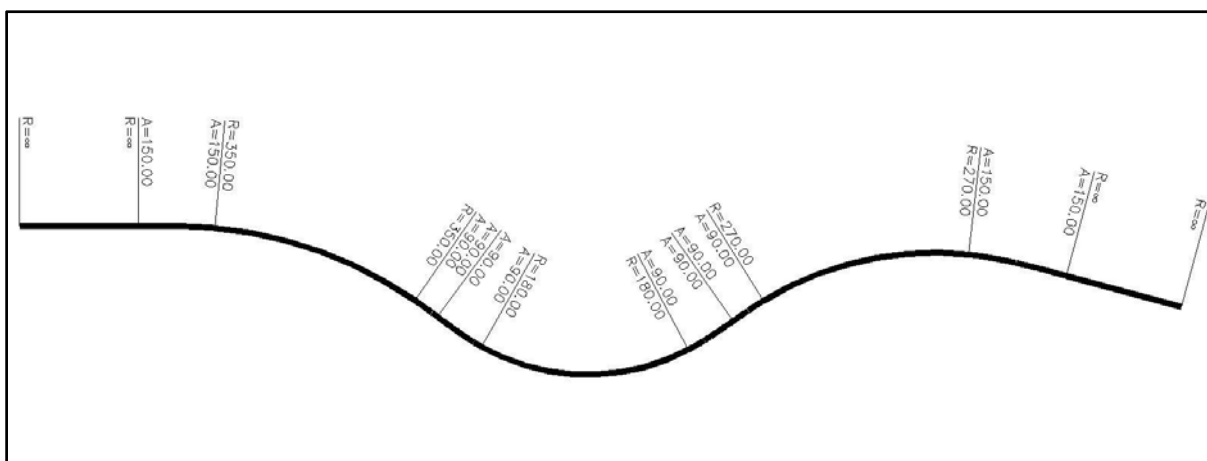
6.1 Testni primer

Za testni primer uporabimo sosledje treh krožnih lokov s pripadajočimi prehodnicami. Namenoma je izbrano sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m (glej poglavje 2.2), ki ne zadostuje pogojem o skladnosti elementov podanih v standardu. Načeloma se je pri projektiranju potrebno posluževati usklajenih krožnih lokov, kjer njihovo razmerje ne prekorači vrednosti 1:1,5. Vendar pa to v danih pogojih ni vselej možno. Omenjeno sosledje krožnih lokov bo zato osnova za kasnejšo analizo vpliva parametrov na prometno varnost.

Celoten odsek leži v horizontali, uporabljene vrednosti prečnih nagibov odgovarjajo vrednostim, ki so podane v pravilniku za projektiranje cest. Zasnovalna hitrost odseka znaša 70 km/h, širina vozišča pa 6 m. Povzetek elementov je prikazan v vpreglednici 6.1 in na sliki 6.2.

Preglednica 6.1: Spisek elementov cestne osi za testni primer sosledja krožnih lokov z radiji 350m -180m-270m.

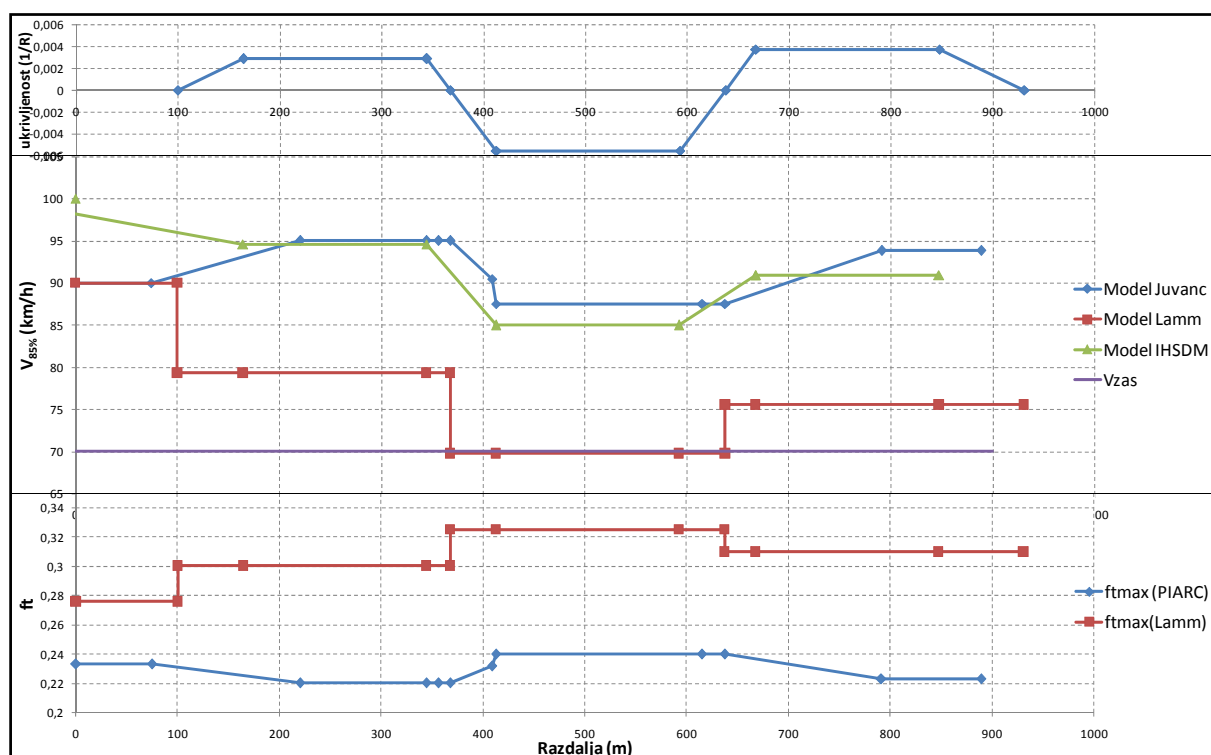
	<i>Element</i>	<i>Parameter (m)</i>	<i>Dolžina (m)</i>	<i>B (m)</i>	<i>s (%)</i>	<i>q (%)</i>
	<i>prema</i>	0	100.00	6	0	2.5
<i>Krivina 1</i>	<i>A1</i>	150	64.29	6	0	0
	<i>R1</i>	350	180.00	6	0	4.5
	<i>A2</i>	90	23.14	6	0	0
<i>Krivina 2</i>	<i>A3</i>	90	45.00	6	0	0
	<i>R2</i>	180	180.00	6	0	6.5
	<i>A4</i>	90	45.00	6	0	0
<i>Krivina 3</i>	<i>A5</i>	90	30.00	6	0	0
	<i>R3</i>	270	180.00	6	0	5.0
	<i>A6</i>	150	83.33	6	0	0
	<i>prema</i>	0	100.04	6	0	2.5



Slika 6.2: Situacijski potek trasnih elementov za testni primer.

6.2 Izvrednotenje profila vozne hitrosti

Izvrednotenje profila vozne hitrosti je bilo opravljeno v skladu z določili modelov avtorjev Lamm-a, Juvanca in modela IHSDM (Fitzpatrick et.al., 2000) predstavljenih v poglavju 5 tega prispevka. Z uporabo računalniškega programa je bilo možno priti do rezultatov na sliki 6.3. Dodatno je bil izvrednoten tudi diagram spreminjanja trenja po metodah PIARC in Lamm-a.



Slika 6.3: Primerjava profilov vozne hitrosti in spreminjanje koeficienta drsnega trenja f_{max} po posameznih modelih avtorjev v smeri naraščajoče stacionaže.

6.3 Komentar rezultatov

Izvrjednjeni in prikazani profili vozne hitrosti na sliki 6.3 kažejo na očitno razlikovanje po posameznih avtorjih. Model Juvanč in model IHSDM poleg izračuna hitrosti v posameznih krožnih lokih, določata tudi razdalje pospeševanja in pojemanja. Model Juvanč je v tem primeru natančnejši, saj pri uvozu v krožni lok 2.krivine pokaže detajlno spreminjanje hitrosti. Lamm v svojem modelu ni predvidel pospeševanja in pojemanja med krožnimi loki, zato je oblika po njem izvrjednjenega profila vozne hitrosti stopničaste oblike in prvenstveno služi kot vhodni podatek za določitev varnosti po enem izmed kriterijev ki jih je podal.

Ker se določanje hitrosti v krožnih lokih po posameznih avtorjih precej razlikuje je njihova medsebojna primerjava praktično nemogoča. Na sliki 6.3 je sicer možno opaziti relativno podobnost rezultatov med modelom Juvanč in modelom IHSDM, a ju je kljub temu težko primerjati saj oba uporabljata različne principe določanja $V_{85\%}$ v krožnih lokih. Izračunane hitrosti po modelu Lamm-a se od ostalih avtorjev precej razlikujejo. Bolj pomembno od ugotovitve, da se modeli medsebojno razlikujejo, je spoznanje da obstaja očitna razlika med zasnovano hitrostjo in izračunanimi hitrosti. Skoraj v vseh primerih se je pokazalo da so

realne vozne hitrosti spremenljive in višje od zasnovalne hitrosti, kar potrди hipotezo da so realne vozne hitrosti spremenljive in v nasprotju s predpostavko v predpisih, ki govori o konstantni vozni hitrosti.

Spreminjanje vozne hitrosti pa ima za posledico tudi spreminjanje dinamičnih učinkov na vozišče. Vsi trije modeli upoštevajo vpliv spremenljivih dinamičnih pojavov in iz tega izpeljujejo kriterije za določanje varnosti. Pri tem model Lamm-a in model IHSDM izkazujeta določene pomankljivosti.

Lamm spreminjanja hitrosti med krožnimi loki sploh ne definira. Stopničasta oblika profila vozne hitrosti je namenjena zgolj preverjanju medsebojne usklajenosti krožnih lokov po kriteriju varnosti 2. Lamm sicer določa tudi izračun potrebnega koeficienta drsnega trenja v posameznih krožnih lokih, ne omogoča pa določitve nevarnega mesta na cesti. V grobem bi lahko rekli da gre zgolj za medsebojno primerjavo voznodinamičnih parametrov krožnega loka in iz tega izhajajoče prometne varnosti.

Model IHSDM omogoča izračun in določitve rezultirajočih pospeškov in pojemkov, ne omogoča pa interakcije dobljenih vplivov z voziščem. Razvrščanje pojemkov in pospeškov v skupine dobro, primerno, slabo je pogojno uporabno, saj je bilo pokazano da niso rezultirajoči pospeški tisti ki povzročajo nevarnost, temveč trenutni primankljaj potrebnega koeficienta drsnega trenja. Ker model IHSDM ne omogoča izračuna drsnega trenja ga lahko zgolj pogojno primerjamo z modeloma Lamm-a in Juvanca.

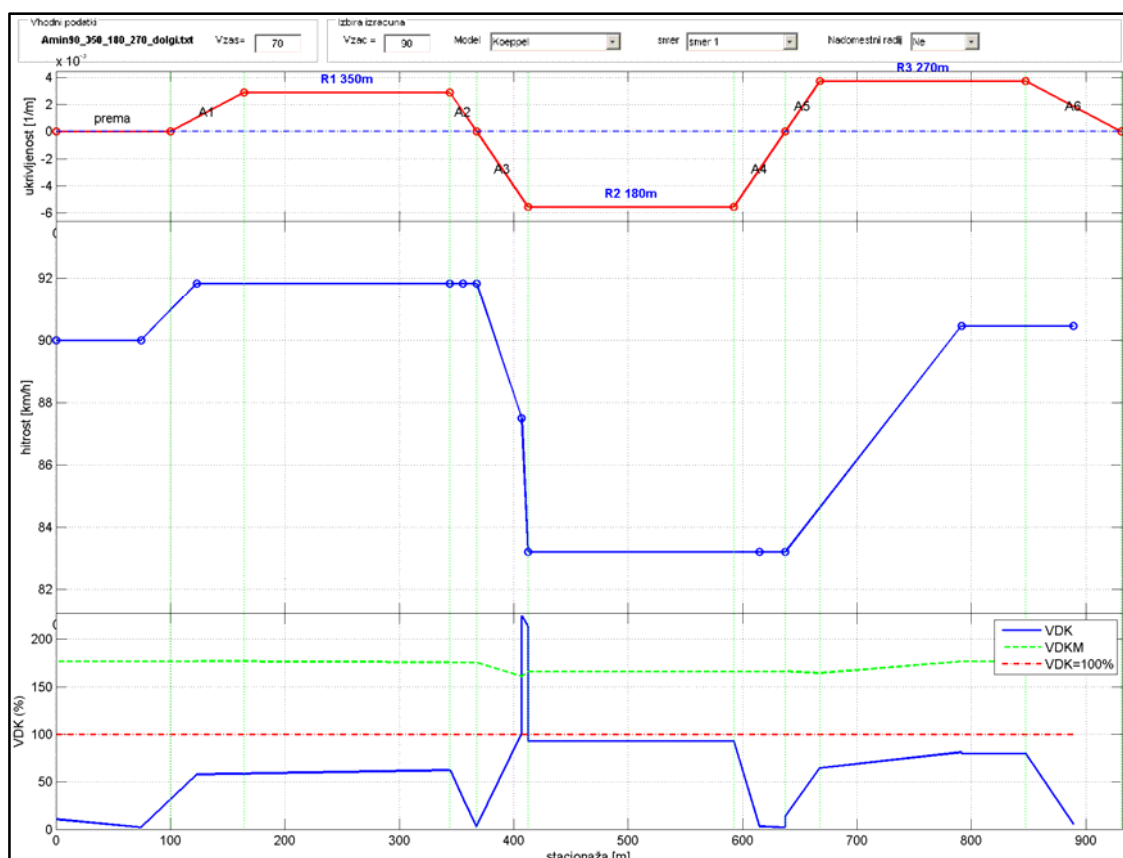
Modela Lamm-a in Juvanca se razlikujeta tudi v izračunu koeficienta drsnega trenja. Rezultati dobljeni po Lamm-ovi enačbi so na račun nižje hitrosti, veliko višji od rezultatov dobljeni po metodi PIARC, ki jo uporablja Juvanc. Lahko zaključimo, da Lamm-ova metoda izkazuje preveč optimistične rezultate, kar je lahko zavjujoče. V nadaljevanju diplomske naloge bo za dokazovanje vpliva posameznih elementov na prometno varnost uporabljena metoda Juvanca. Ta model je namreč tudi edini, ki pri vozno-dinamični analizi upošteva večino parametrov cestne osi.

7 VPLIV PARAMETROV CESTNE OSI NA PROMETNO VARNOST

Na podlagi izvedenega profila vozne hitrosti je možno določiti rezultirajoče dinamične vplive na vozišče. S poznavanjem mehanskih karakteristik voziščne konstrukcije pa je možno določiti in karakterizirati posamezna nevarna mesta. Da bi ugotovili, kako posamezni elementi cestne osi vplivajo na nastanek t.i. nevarnih mest, bodo v nadaljevanju spreminjane njihove vrednosti in izvedena aplikacija modela po Juvancu, ki je tudi bil vgrajen v računalniški program. Namesto določitve KDT, katerega izračun bi bil dolgotrajen in zahteven, bo uporabljen izračun VDK, ki trenje že upošteva ter direktno pokaže rezultat saj so njegove vrednosti bodisi višje ali pa nižje od referenčnih 100% (poglavje 5.6.1.2).

7.1 Testni primer

Testni primer ostane enak kot v poglavju 6.1.1. Z apliciranjem modela po Juvancu lahko izvednotimo spreminjanje varnostnega pokazatelja VDK in identificiramo možna nevarna mesta na cesti (slika 7.1).



Slika 7.1: Profil vozne hitrosti in spreminjanje VDK za sosledje krožnih lokov 350m - 180m - 270m v smeri naraščajoče stacionaže.

Voznodinamična analiza trasnih elementov testnega primera pokaže, da je varnostno najbolj problematičen uvoz v krožni lok z radijem 180 m (krivina 2), saj na tem mestu vrednost VDK za kar dvakrat preseže referenčno vrednost $VDK = 100\%$. To mesto je po napotkih modela identificirano kot nevarno. Sanacija je možna samo s spremembo sosledja elementov, saj je vrednost VDKM na tem mestu prenizka, da bi bilo mogoče ukrepati zgolj z uporabo kvalitetnejšega materiala voziščne konstrukcije.

7.2 Vpliv parametra prehodnice

V modelu za določitev nevarnih mest na cesti po Juvancu je prehodnica odločilen element na katerem se vršijo operacije pospeševanja in pojemanja, zato je možno pričakovati močan vpliv parametra prehodnice na prometno varnost.

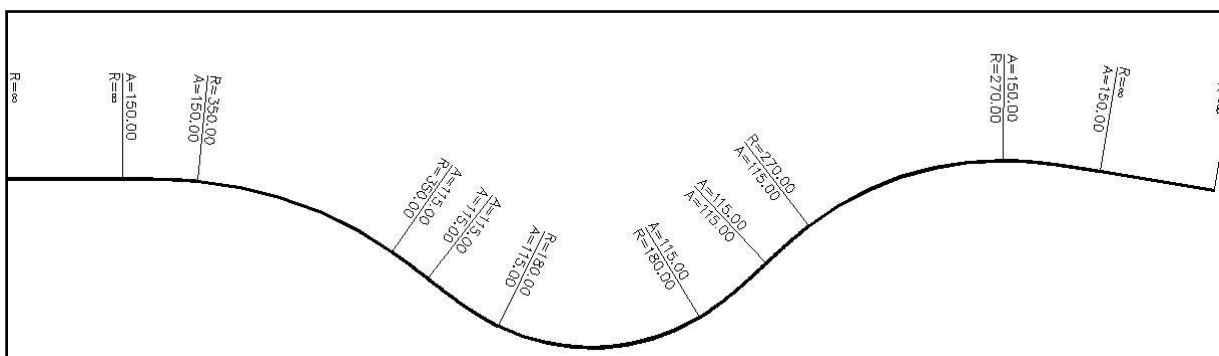
Prehodnica je definirana kot krivulja, ki omogoča zvezno spajanje elementov cestne osi. Uporabljen krivulja je klotoida in je definirana z enačbo: $A^2 = L \cdot R$.

Kjer pomenijo A-parameter prehodnice (m), L-dolžino prehodnice v (m) in R-radij krožnega loka v (m). Kot je razvidno iz enačbe, je dolžina prehodnice v tesni povezavi s polmerom krožnega loka.

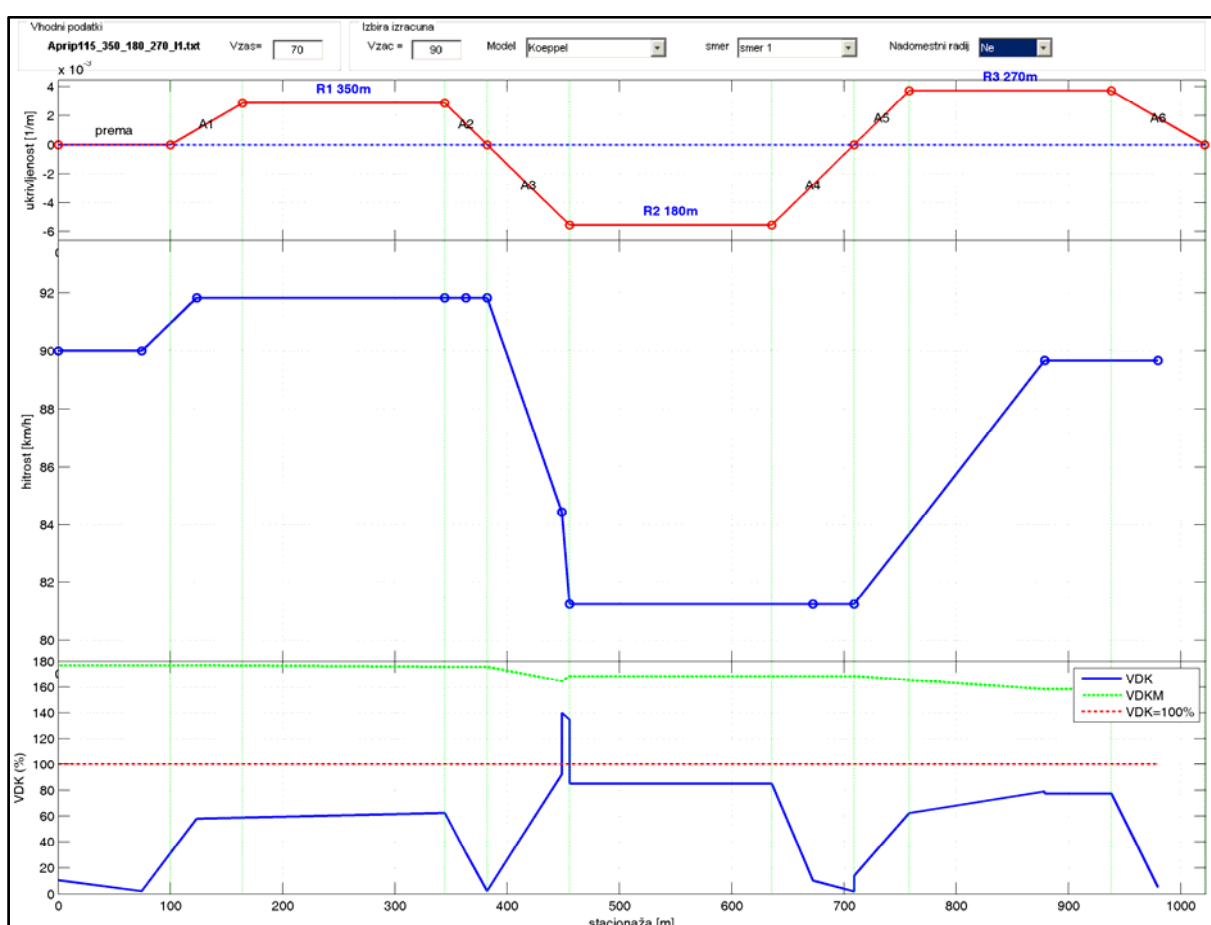
V testnem primeru je bil v krivini 2 uporabljen minimalni možni parameter prehodnice $A_{min} = 90\text{m}$ (TSC 02.300, 2003). Pokazalo se je (Slika 7.1) da je uporaba A_{min} varnostno vprašljiva, zato se poslužimo uporabe priporočenega parametra prehodnice, ki pri zasnovani hitrosti 70km/h znaša $A_{prip} = 115\text{m}$ (TSC 02.300, 2003). Novi seznam elementov je prikazan v preglednici 7.1 in na sliki 7.2.

Preglednica 7.1: Seznam elementov pri uporabi priporočenega parametra prehodnice A_{prip} za sosledje radijev 350m-180m-270m.

	Element	Parameter (m)	Dolžina (m)	B (m)	s (%)	q (%)	$V_{R, 85\%}(\text{km/h})$
	prema	0	100	6	0	2.5	
Krivina 1	A1	150	64.29	6	0	0	91.8
	R1	350	180	6	0	4.5	
	A2	115	37.78	6	0	0	
Krivina 2	A3	115	73.47	6	0	0	81.2
	R2	180	180	6	0	6.5	
	A4	115	73.48	6	0	0	
Krivina 3	A5	115	48.98	6	0	0	89.6
	R3	270	180	6	0	5	
	A6	150	83.33	6	0	0	
	prema	0	100	6	0	2.5	



Slika 7.2: Situacijski prikaz sosledja krožnih lokov z radiji 350m-180m-270m pri uporabi priporočenega parametra prehodnice $A_{prip}=115\text{m}$.



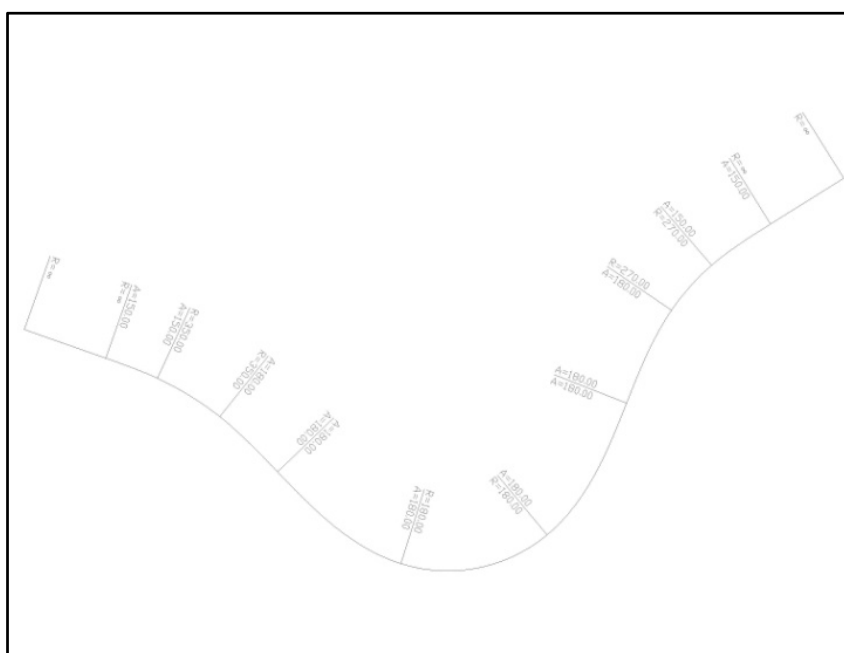
Slika 7.3: Profil vozne hitrosti in spreminjanje VDK pri uporabi priporočenega parametra prehodnice $A_{prip}=115\text{m}$.

Z uporabo priporočenega parametra prehodnice se varnost pri uvozu v krožni lok s polmerom 180 m že precej izboljša. Še vedno je vrednost VDK na tem mestu višja od 100%, vendar je nastalo situacijo možno reševati z vgradnjo kvalitetnejšega materiala voziščne konstrukcije (linija VDK_M).

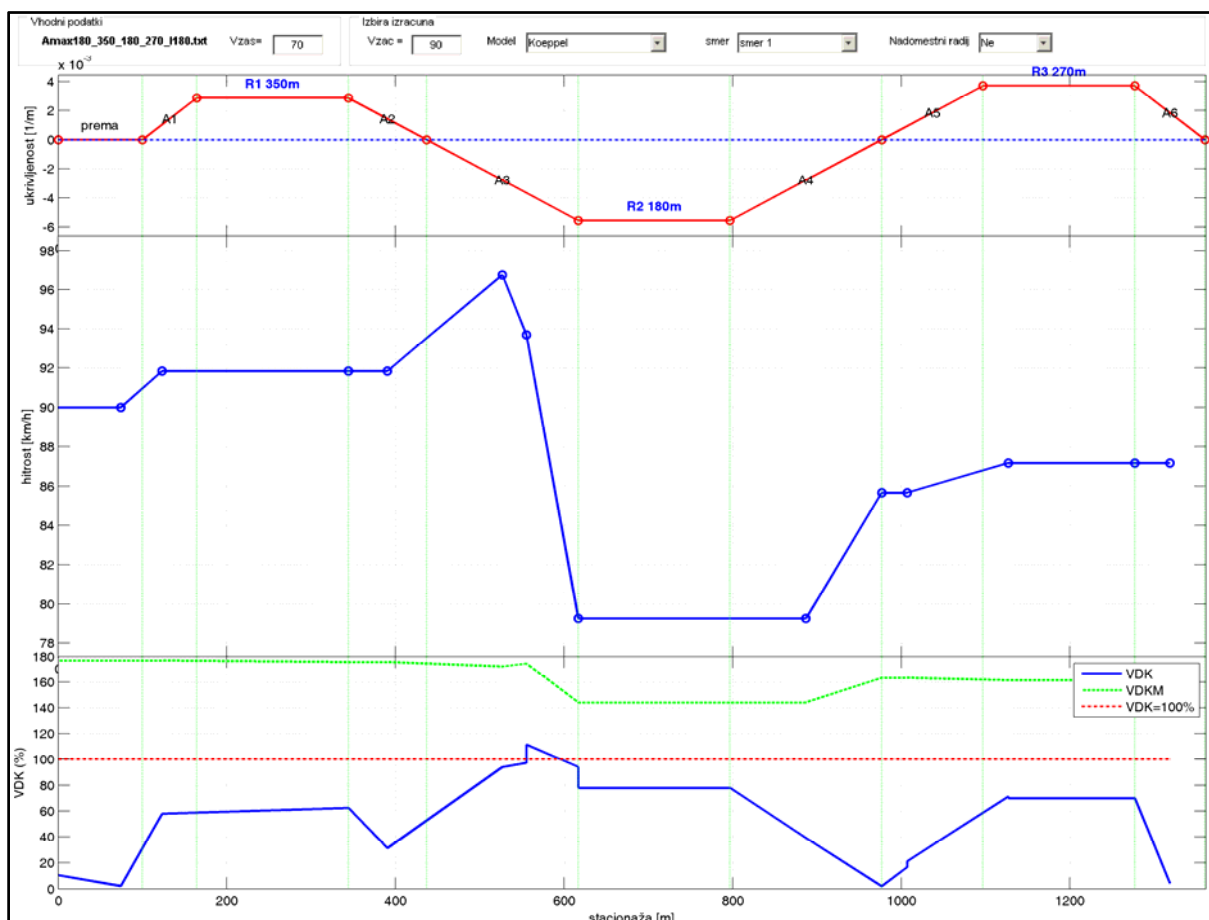
Z uporabo največjega možnega parametra prehodnice je pričakovati še ugodnejše rezultate vrednosti V_{DK} pri uvozu v krožni lok z radijem 180 m . Načeloma je parameter prehodnice navzgor neomejen, a je kljub temu potrebno upoštevati fiziološki učinek povečanja bočnega pritiska na voznika in fizično omejitev sukanja volana. Normativi priporočajo nazgor omejeno vrednost parametra prehodnice, ki je enaka velikosti radija krožnega loka; $A_{max}=R$. V primeru sosledja krožnih lokov 350m-180m-270m je vrednost maksimalno dopustnega parametra prehodnice enaka $A_{max}=180m$. Novi seznam elementov je prikazan v preglednici 7.2 in na sliki 7.4.

Preglednica 7.2: Seznam elementov pri uporabi maksimalno dopustnega parametra prehodnice $A_{max}=180m$ za sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m.

	<i>Element</i>	<i>Parameter (m)</i>	<i>Dolžina (m)</i>	<i>B (m)</i>	<i>s (%)</i>	<i>q (%)</i>	<i>V_{R,85%}(km/h)</i>
	<i>prema</i>	0	100	6	0	2.5	
Krivina 1	<i>A1</i>	150	64.29	6	0	0	91.8
	<i>R1</i>	350	180	6	0	4.5	
	<i>A2</i>	180	92.57	6	0	0	
Krivina 2	<i>A3</i>	180	180	6	0	0	79.2
	<i>R2</i>	180	180	6	0	6.5	
	<i>A4</i>	180	180	6	0	0	
Krivina 3	<i>A5</i>	180	120.04	6	0	0	87.1
	<i>R3</i>	270	180	6	0	5	
	<i>A6</i>	150	83.3	6	0	0	
	<i>prema</i>	0	100	6	0	2.5	



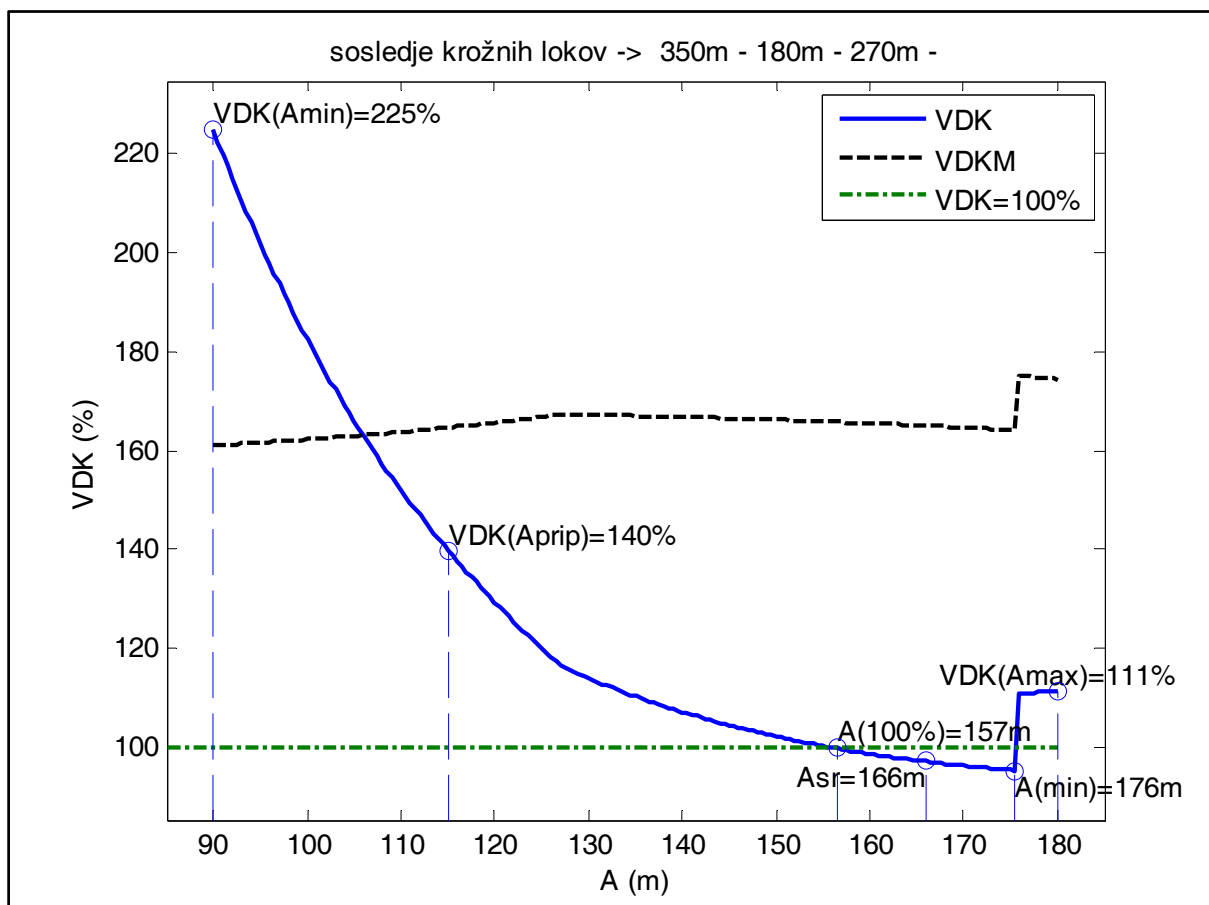
Slika 7.4: Situacijski potek trase pri uporabi maksimalno dopustnega parametra prehodnice $A_{max}=180 m$, za sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m.



Slika 7.5: Profil vozne hitrosti in spreminjanje VDK pri uporabi maksimalno dopustnega parametra prehodnice $A_{max}=180\text{m}$.

Izkaže se, da je uporaba A_{max} v smislu varnosti samo pogojno uporabna (Slika 7.5). Pred uvozom v krožni lok z radijem 180m pride do pospeševanja, kar povzroči povečane vrednosti dinamičnih vlivov na vozišče in s tem tudi stopnje VDK nad mejo 100%. Situacijo je možno rešiti z uporabo kvalitetnejšega materiala voziščne konstrukcije. Kljub temu, je priporočljiveje uporabljati manjše parametre prehodnice, ki ne »zavajajo« voznika k pospeševanju.

Da bi natančneje ugotovili dejanski vpliv velikosti parametra prehodnice na varnost pri uvozu v krožni lok z radijem 180 m, generiramo interval vrednosti parametra prehodnice v mejah med A_{min} in A_{max} . Za vsako vrednost A izvednostimo profil vozne hitrosti in pripadajoči graf VDK. Pri tem določimo maksimalne vrednosti VDK na uvozni prehodnici v krožni lok z radijem 180m. Za sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m so rezultati prikazani na sliki 7.6. Izvrednotenje grafa je bilo opravljeno s pomočjo računalniškega programa ki je avtomatsko izbiral vrednosti parametra prehodnice A iz intervala med 90m in 180m z inkrementom 0,5m.



Slika 7.6: Maksimalne vrednosti VDK pri uvozu v krožni lok z radijem 180m v odvisnosti od parametra uvozne prehodnice za sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m.

Iz vrednotena krivulja odvisnosti $VDK(A)$ (slika 7.6) kaže na to, da je parameter prehodnice izrazito vpliven na vrednost VDK in s tem tudi na varnost. To potrjuje hipotezo in pričakovanja, da je prehodnica eden od odločujočih parametrov pri zagotavljanju vozno-dinamične usklajenosti elementov. Iz prikazanega je možno razbrati, da za dano sosledje krožnih lokov (350m-180m-270m), lahko karakteriziramo nekaj pomembnih značilnih vrednosti parametra prehodnice. Vrednosti A_{max} in A_{prp} , sta pri danem sosledju krožnih lokov neustrezni vrednosti, saj izkazujejo izrazito večjo vrednost VDK od dopustnih 100 %. Še sprejemljiv parameter prehodnice $A(100\%)$ nastopi pri vrednosti 157m, kjer je vrednost VDK enaka 100%. Minimalna vrednost VDK pa nastopi pri parametru prehodnice z velikostjo $A(min)=176m$. Maksimalna vrednost prehodnice ni priporočljiva saj izkazuje za 111% višjo vrednost VDK od dovoljenih 100%. Računalniško je bila določena tudi srednja vrednost še ugodnega parametra prehodnice $A(srednje)$, ki znaša 166m.

Komentar rezultatov

Parameter prehodnice nedvomno izkazuje močan vpliv na velikost in intenziteto dinamičnih učinkov na vozišče. Izkazalo se je, da je možno pri danem sosledju polmerov krožnih lokov s spreminjanjem samo parametra prehodnice zagotoviti ustrezno spreminjanje dinamičnih učinkov na vozišče. S tem je možno zagotavljati ustrezno varnost in odpraviti nenadna presenečenja, ki lahko nastopijo med vožnjo.

Analiza opravljena v poglavju 7.2 je bila opravljena pri danem sosledju krožnih lokov (350m-180m-270m). Pri tem je potrebno poudariti da je za vsak sosledje polmerov krožnih lokov potrebno iz vrednotiti posebno linijo odvisnosti VDK od parametra prehodnice A. Ta ugotovitev je v kontradikciji s splošno uveljavljenimi standardi ki velikost parametra prehodnice pogojujejo zgolj z velikostjo enega izmed polmerov krožnih lokov. Rezultati kažejo na to, da je ugodneje upoštevati celotno sosledje elementov in na podlagi vozno-dinamičnih količin izbrati ustrezen parameter prehodnice.

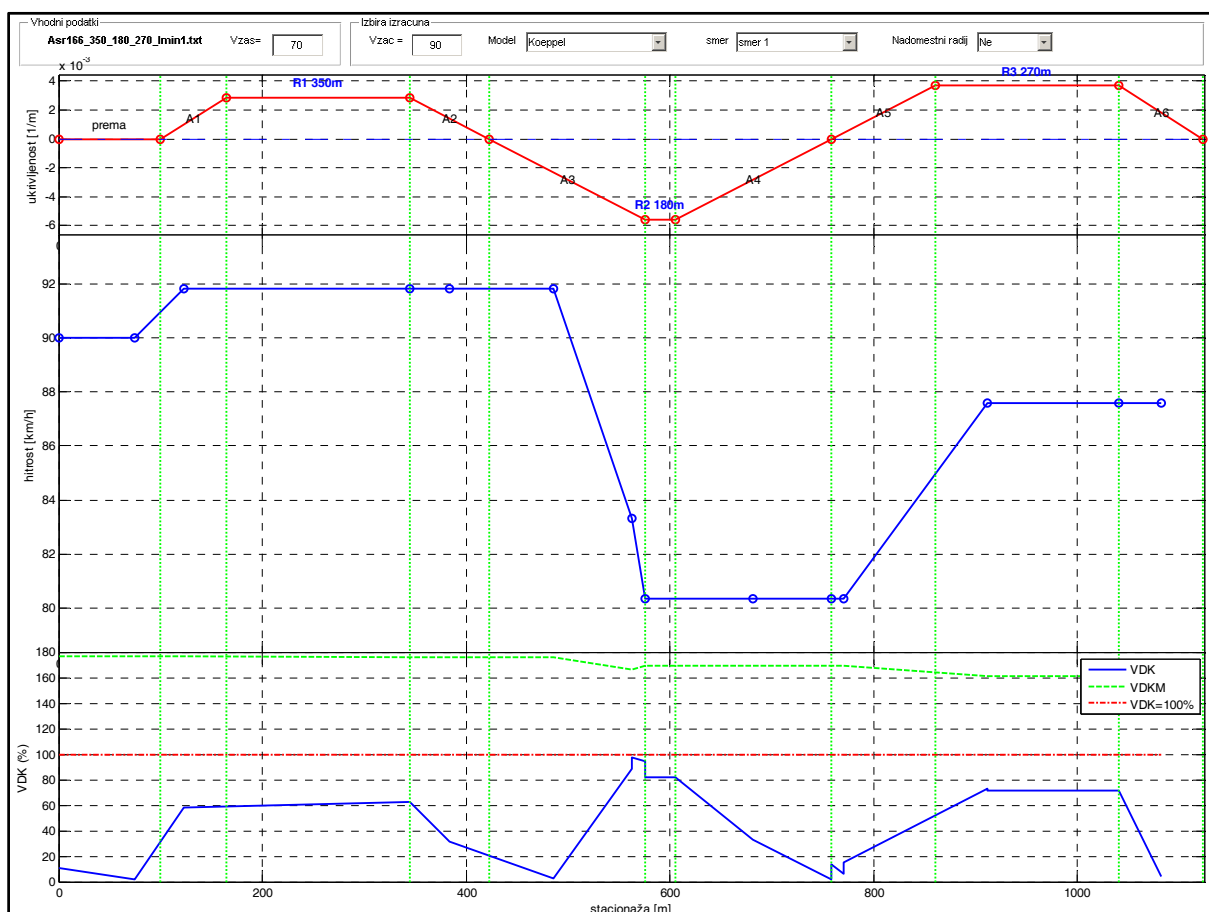
7.3 Vpliv dolžine krožnega loka

Kot je bilo pokazano v poglavju 4.2.3, dolžina krožnega loka pomembno vpliva na hitrost $V_{85\%}$ v krožnem loku. Za namen analize omenjenega vpliva na vrednost spreminjanja vozno-dinamičnih količin (VDK), je bil model Juvanca apliciran na modificiran testni primer, pri čemer so bile upoštevane obe skrajni vrednosti dolžin krožnih lokov. Dolžina krožnega loka je navzdol omejena, saj naj bi njegova najmanjša vrednost ustrezala dolžini ki jo vozilo prevozi v 1,5s vožnje. Z upoštevanjem zasnovalne hitrosti $V_{zas}=70\text{km/h}$, ta dolžina znaša $L_{min}=29\text{m}$. Največja dolžina krožnega loka je načeloma navzgor neomejena in je odvisna od pogojev trasiranja. Za namen analize je dovolj če za to vrednost upoštevamo $L_{max}=250\text{m}$.

V razdelku 7.2 je bilo pokazano da parameter prehodnice močno vpliva na vrednost VDK. Za jasnejši prikaz vpliva dolžine krožnega loka je zato dobro, če testni primer sosledja krožnih lokov preoblikujemo tako, da bo parameter prehodnice pri uvozu in izvozu v krožni lok z radijem 180 m znašal 166m (srednja vrednost A). S tem je omogočeno točneje analizirati vpliv dolžine krožnega loka v pogojih, ki sicer narekujejo ugodno spreminjanje VDK.

Preglednica 7.3: Seznam elementov pri uporabi skrajšane dolžine krožnega loka (29m) s polmerom 180 m za sosledje krožnih lokov 350-180-270m.

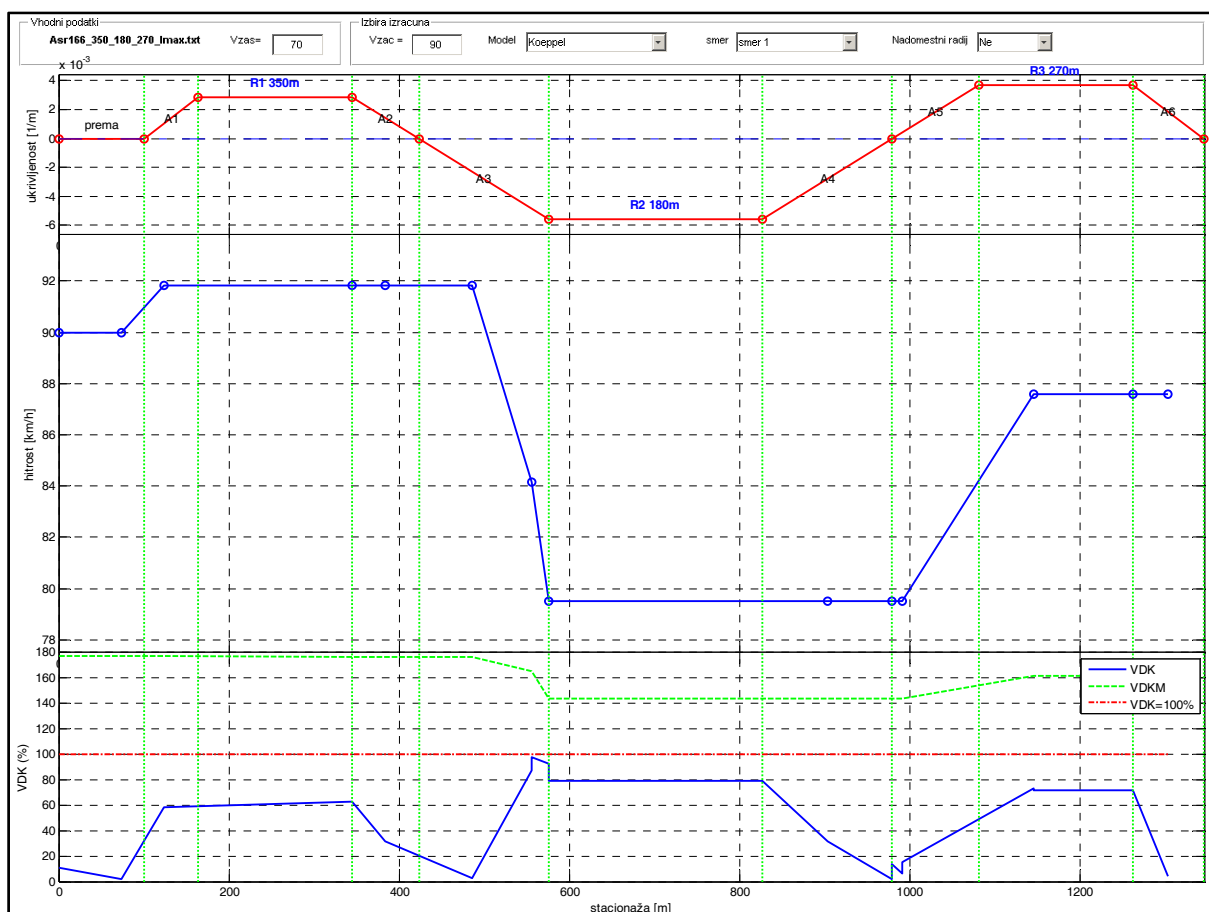
	<i>Element</i>	<i>Parameter (m)</i>	<i>Dolžina (m)</i>	<i>B(m)</i>	<i>s(%)</i>	<i>q(%)</i>	<i>V_{r,85%}(km/h)</i>
	prema	0	100,00	6	0	2,5	
Krivina 1	A1	150	64,29	6	0	0	91,84
	R1	350	180,00	6	0	4,5	
	A2	166	78,73	6	0	0	
Krivina 2	A3	166	153,09	6	0	0	80,33
	R2	180	29,00	6	0	6,5	
	A4	166	153,09	6	0	0	
Krivina 3	A5	166	102,06	6	0	0	87,59
	R3	270	180,00	6	0	5	
	A6	150	83,33	6	0	0	
	prema	0	100,00	6	0	2,5	



Slika 7.7: Profil vozne hitrosti in spreminjanje VDK pri zmanjšani dolžini krožnega loka z radijem 180 m (29m) za sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m.

Preglednica 7.4: Seznam elementov pri uporabi podaljšanega krožnega loka s polmerom 180 mza sosledje elementov 350m-180m-270m.

	<i>Element</i>	<i>Parameter (m)</i>	<i>Dolžina (m)</i>	<i>B(m)</i>	<i>s(%)</i>	<i>q(%)</i>	<i>V_{r,85%}(km/h)</i>
	prema	0	100	6	0	2,5	
Krivina 1	A1	150	64,29	6	0	0	91,84
	R1	350	180	6	0	4,5	
	A2	166	78,73	6	0	0	
Krivina 2	A3	166	153,09	6	0	0	79,50
	R2	180	250	6	0	6,5	
	A4	166	153,09	6	0	0	
Krivina 3	A5	166	102,06	6	0	0	87,59
	R3	270	180	6	0	5	
	A6	150	83,33	6	0	0	
	prema	0	100	6	0	2,5	



Slika 7.8: Profil vozne hitrosti in spreminjanje VDK za primer podaljšane dolžine krožnega loka z radijem 180m pri sosledju elementov 350m-180m-270m.

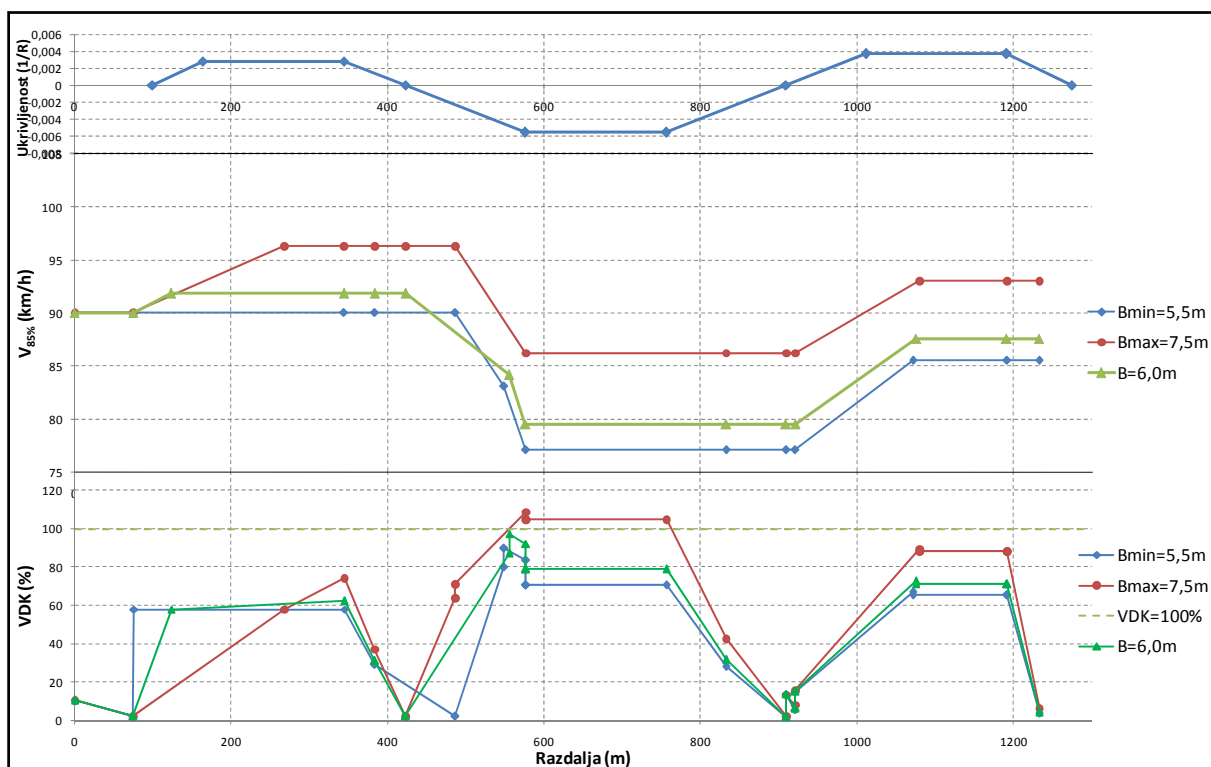
Kot je razvidno iz slik 7.7 in 7.8 je dolžina krožnega loka, pri nespremenjenem parametru prehodnice $A=166\text{m}$ malo vpliven parameter na VDK pri uvozu v krožni lok z radijem 180m. Vseeno je, ali je dolžina krožnega loka večja ali manjša, saj to bistveno ne vpliva na izboljšanje razmer. Pri obeh skrajnih mejah dolžin se izkaže, da je VDK vselej manjši od predpisanih referenčnih 100%, kar daje očitno sporočilo da je prehodnica tista, ki v danem primeru bistveno odloča o vrednosti VDK.

7.4 Vpliv širine vozišča

V poglavju 5 je bilo pokazano, da širina vozišča pomembno vpliva na hitrosti $V_{85\%}$ v krožnih lokih, kar je tudi razlog za možen vpliv na spreminjanje voznodinamičnih parametrov. Standardne širine vozišča varirajo od $B_{min}=5,5$ m za najožje ceste do $B_{max}=7,5$ m za najširše ceste. Za prikaz vpliva širine vozišča na VDK je bil apliciran model Juvanca za obe skrajni vrednosti. Za osnovo je bila vzeta razporeditev elementov iz testnega primera, pri čemer se je spremenil samo parameter uvozne prehodnice ($A_{sr}=166\text{m}$) v krožni lok z radijem 180m. Celoten seznam elementov je predstavljen v preglednici 7.5.

Preglednica 7.5: Seznam elementov pri uporabi skrajnih mejnih vrednosti širine vozišča za sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m.

	<i>Element</i>	<i>Parameter (m)</i>	<i>Dolžina (m)</i>	<i>B_{min}(m)</i>	<i>B_{max}(m)</i>	<i>s(%)</i>	<i>q(%)</i>
	prema	0	100	5,5	7,5	0	2,5
<i>Krivina 1</i>	A1	150	64,29	5,5	7,5	0	0
	R1	350	180	5,5	7,5	0	4,5
	A2	166	78,73	5,5	7,5	0	0
<i>Krivina 2</i>	A3	166	153,09	5,5	7,5	0	0
	R2	180	250	5,5	7,5	0	6,5
	A4	166	153,09	5,5	7,5	0	0
<i>Krivina 3</i>	A5	166	102,06	5,5	7,5	0	0
	R3	270	180	5,5	7,5	0	5
	A6	150	83,33	5,5	7,5	0	0
	prema	0	100	5,5	7,5	0	2,5



Slika 7.9: Profil vozne hitrosti in spreminjanje VDK za obe mejni vrednosti širin vozišča B pri sosledju krožnih lokov 350m-180m-270m.

Komentar rezultatov

Kot je razvidno iz slike 7.9, širina voznega pasu pomembno vpliva na spreminjanje hitrosti in voznodinamičnih količin. Razlog temu je moč najti v postopku ki ga model Koeppla (sestavni del modela po Juvancu) uporablja za izračun hitrosti v posameznih krožnih lokih, saj je širina vozišča neposredno vplivna na hitrost.

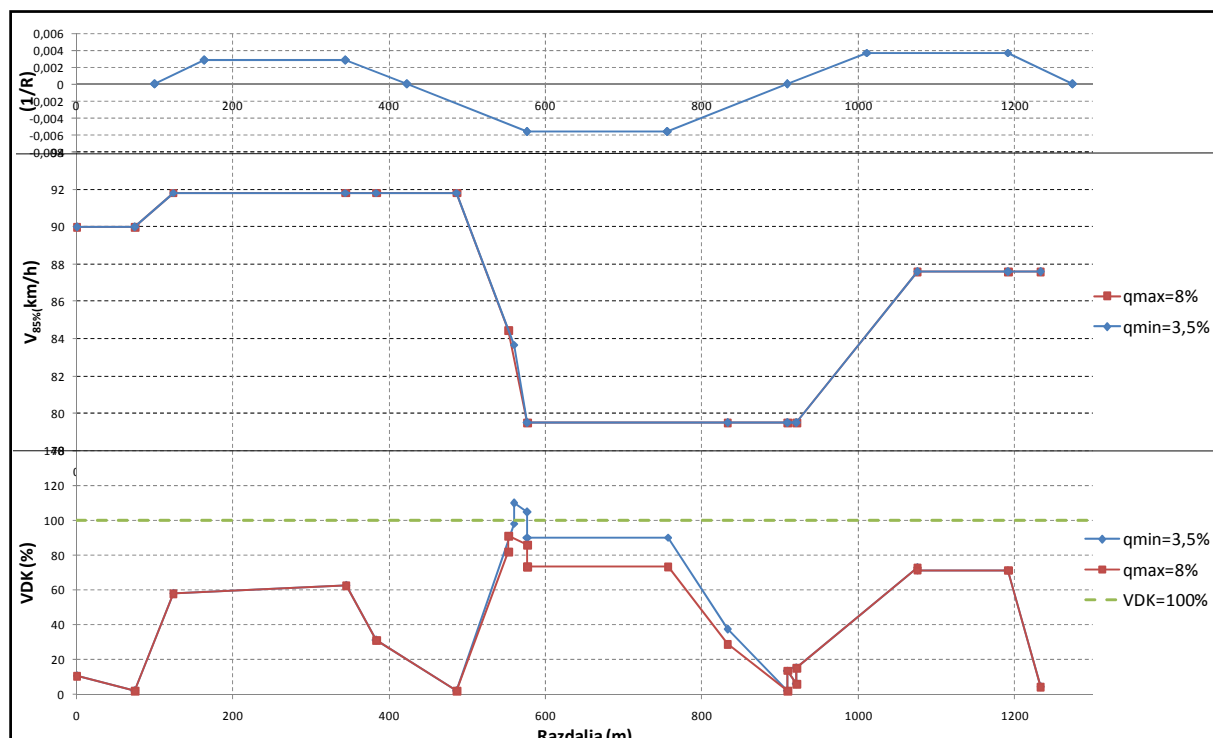
Pri nespremenjeni vrednosti parametra uvozne prehodnice v krožni lok z radijem 180m je opaziti, da ožje vozišče ($B_{min}=5,5m$) rezultira v nižjih vrednostih VDK v primerjavi s testnim primerom ($B=6,0m$). Širše vozišče ($B_{max}=7,5m$) pa ima za posledico povišano vrednost VDK in s tem neugoden vpliv na varnost pri uvozu in tudi pri vožnji v krožni lok z radijem 180m. Iz prikazanega je torej možno zaključiti, da obe skrajni vrednosti širine vozišča pri danem sosledju elementov cestne osi tvorita ovojnico vrednosti VDK. Pri tem se lahko zgodi, da pri višjih vrednostih širine vozišča lahko pride do poslabšanja vozno-dinamičnih razmer na vozišču in s tem tudi do poslabšanja varnosti pri uvozu v krožni lok z radijem 180m.

7.5 Vpliv prečnega nagiba

Prečni nagib pomembno vpliva na zaznavanje ostrine ovinka pri vožnji v krivino, saj je njegov najpomembnejši namen kompenziranje rezultirajočega bočnega pospeška in s tem povečevanje koeficienta radialnega trenja. Velikost prečnega nagiba je navzdol in navzgor omejena. Najnižje vrednosti prečnega nagiba so pogojene z vozno-dinamičnimi pogoji, medtem ko so najvišje vrednosti odvisne od stabilnosti vozila pri vožnji v krivini. Za namen preveritve vpliva omenjenega parametra na vrednost VDK je bilo sosledje elementov modificirano z uporabo največje in najmanjše vrednosti prečnega nagiba v krožnem loku radijem 180m. Za analizo je bil uporabljen model Juvanca. Po določenih tehničnih smernic za načrtovanje cest je za zasnovalno hitrost 70km/h možno uporabiti vrednosti med 3,5% in 8%. Za parameter uvozne prehodnice v krožni lok z radijem 180m je ohranjena vrednost 166m. Seznam elementov je prikazan v preglednici 7.6.

Preglednica 7.6: Seznam elementov z uporabljenimi skrajnimi vrednostmi prečnega nagiba v krožnem loku z radijem 180m za sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m.

	<i>Element</i>	<i>Parameter (m)</i>	<i>Dolžina (m)</i>	<i>B(m)</i>	<i>s(%)</i>	<i>q_{min}(%)</i>	<i>q_{max}(%)</i>
	prema	0	100	6	0	2,5	2,5
<i>Krivina 1</i>	A1	150	64,29	6	0	0	0
	R1	350	180	6	0	4,5	4,5
	A2	166	78,73	6	0	0	0
<i>Krivina 2</i>	A3	166	153,09	6	0	0	0
	R2	180	180	6	0	3,5	8,0
	A4	166	153,09	6	0	0	0
<i>Krivina 3</i>	A5	166	102,06	6	0	0	0
	R3	270	180	6	0	5	5
	A6	150	83,33	6	0	0	0
	prema	0	100	6	0	2,5	2,5



Slika 7.10: Profil vozne hitrosti in spreminjanje VDK za skrajni meji vrednosti prečnega nagiba pri sosledju krožnih lokov 350m-180m-270m.

Komentar rezultatov

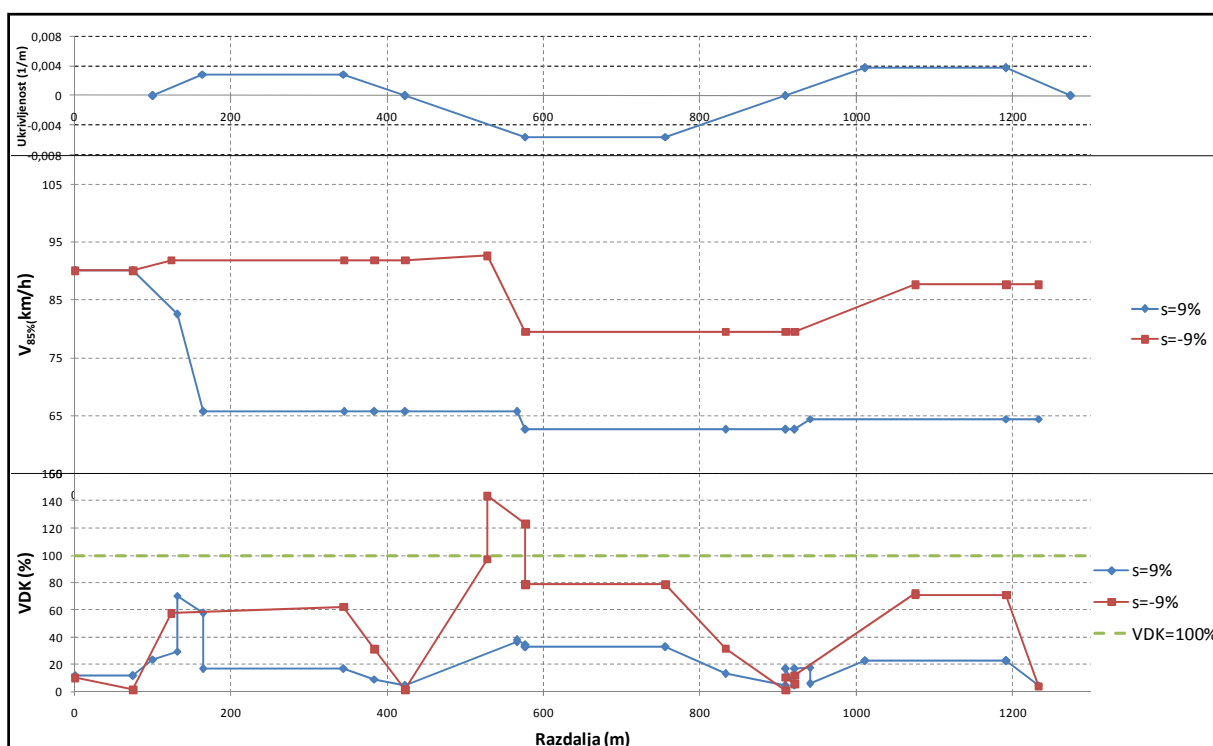
Rezultati prikazani na sliki 7.10 potrjujejo, da ima prečni nagib pomembno vlogo pri zagotavljanju vozno-dinamične ustreznosti trase. Pri uporabi najnižje vrednosti prečnega nagiba $q_{min}=3,5\%$ se izkaže da vrednost VDK naraste nad sprejemljivo mejo 100%. Posledico temu je možno najti v povišani vrednosti bočne centrifugalne sile in s tem povečano potrebo po radialnem koeficientu drsnega trenja. Uporaba $q_{max}=8\%$, ravno nasprotno, pokaže da je vrednost VDK v še sprejemljivih mejah.

7.6 Vpliv vzdolžnega naklona

Vzdolžni naklon je parameter cestne osi, ki je v tesni povezavi z geo-morfološki danostmi terena. Mejne vrednosti so pogojene s stabilnostjo vozila in uporabljeno zanovalno hitrostjo. Standardne vrednosti pri $V_{zas}=70km/h$ se gibljejo do največ $\pm 9\%$. Za namen prikaza vpliva omenjenega elementa na VDK, bo model Juvanca apliciran na modificiran testni primer sosledja elementov, ki so navedeni v preglednici 7.7. Parameter uvozne prehodnice v krivino 2 znaša 166m.

Preglednica 7.7: Seznam elementov z uporabljenima mejnima vrednostima vzdolžnega naklona za sosledje krožnih lokov 350m-180m-270m.

	<i>Element</i>	<i>Parameter (m)</i>	<i>Dolžina (m)</i>	<i>B(m)</i>	<i>s_{vzpon}(%)</i>	<i>s_{min}(%)</i>	<i>q(%)</i>
	prema	0	100	6	9	-9	2,5
<i>Krivina 1</i>	A1	150	64,29	6	9	-9	0
	R1	350	180	6	9	-9	4,5
	A2	166	78,73	6	9	-9	0
<i>Krivina 2</i>	A3	166	153,09	6	9	-9	0
	R2	180	250	6	9	-9	6,5
	A4	166	153,09	6	9	-9	0
<i>Krivina 3</i>	A5	166	102,06	6	9	-9	0
	R3	270	180	6	9	-9	5
	A6	150	83,33	6	9	-9	0
	prema	0	100	6	9	-9	2,5



Slika 7.11: Profil vozne hitrosti in spreminjanje VDK pri obeh skrajnih vrednostih vzdolžnega naklona pri sosledju krožnih lokov 350m-180m-270m.

Komentar rezultatov

Vzdolžni naklon močno vpliva na potek hitrosti in spreminjanje vrednosti VDK (Slika 7.11). Strmi spust $s=-9\%$ je veliko neugodnejši kot pa strmi vzpon $s=9\%$. Pri slednjem je namreč vzdolžni naklon ugoden parameter saj zmanjšuje realiziranje povečanih dinamičnih učinkov,

hkrati pa zmanjšuje tudi hitrost. Ravno obratno pa se dogaja pri strmem spustu, saj le-ta povečuje hitrost in realiziranje povečanih dinamičnih vplivov na vozišče. To kaže na to, da je maksimalne vrednosti vzdolžnega naklona možno uporabljati zgolj izjemoma in se je ugodneje posluževati blažjih vrednosti.

7.7 Komentar analize

V opravljeni analizi vpliva parametrov elementov cestne osi na spreminjanje VDK in prometno varnost, sta bila kot najvplivnejša parametra identificirana parameter prehodnice in vzdolžni naklon. V nekoliko manjši meri vplivata tudi širina vozišča in prečni nagib. Dolžina krožnega loka ima na spreminjanje voznodinamičnih količin pri nespremenjenih ostalih parametrih zanemarljiv vpliv.

Vsak od parametrov cestne osi po svoje vpliva na spreminjanje vozno-dinamičnih količin. Opravljena analiza daje očitni znak da je možno najti tisti nabor parametrov, ki rezultira v najugodnejšem poteku linije VDK in posledično daje najboljše možnosti za zagotavljanje varnosti.

8 POVZETEK

Realne hitrosti ($V_{85\%}$) na medkrajevnih dvopasovnih cestah so nedvomno pogojene s parametri elementov cestne osi (poglavje 4.2). Pri tem je kot najvplivnejši parameter identificirana velikost polmera krožnega loka. Ostale vrednosti parametrov na hitrost v posameznih elementov vplivajo v omejenem obsegu a so kljub temu pomembne.

S poznavanjem vrednosti realnih voznih hitrosti v posameznih elementih je možno iz vrednotiti in sestaviti zvezen profil vozne hitrosti, ki je namenjen nadaljnjemu izračunu vozno-dinamičnih količin (poglavje 5.2). Kot najugodnejši model je bil izbran model Juvanca (poglavje 5.5), saj najbolj natančno določa spreminjanje hitrosti, pospeškov in trenja med posameznimi krožnimi loki (poglavje 6). Za primerjava so bili uporabljeni še modeli Lamm-a in model IHSDM. Vsi trije modeli so bili tudi preneseni v računalniški program, ki omogoča avtomatiziran izris profila vozne hitrosti.

Model Juvanca je bil apliciran na testnem primeru sosledja krožnih lokov z zaporedjem 350m, 180m in 270m (poglavje 6.1.1). S pomočjo računalniškega programa je bilo ugotovljeno, da je najnevarnejše mesto uvoz v krožni lok z radijem 180m (krivina 2). V ta namen so bili analizirani vplivi posameznih parametrov na spreminjanje vozno-dinamičnih količin na tem mestu. Pokazalo se je:

- vpliv parametra prehodnice odločujoče vpliva na spreminjanje VDK in s tem tudi na prometno varnost.
- za dano sosledje krožnih lokov, ki ne ustrezajo določilom o skladnosti in pri katerih se pojavijo prekoračene vrednosti VDK, lahko najdemo omejen interval parametra prehodnice, ki pri nespremenjenih pogojih krožnih lokov zagotovi varnost (slika 7.6).
- na spreminjanje VDK pomembno vplivajo širina vozišča, prečni nagib in vzdolžni naklon. Vpliv dolžine krožnega loka je bil pri dani analizi spoznan kot zanemarljiv.
- tudi z uporabo skladnega sosledja horizontalnih elementov trase (krožni lok in »ugoden« parameter prehodnice), lahko velike širine vozišča, strmi spusti nivelete in primanjkljaj prečnega nagiba povzročijo poslabšanje varnosti.

9 SKLEP

Neprilagojene in nihajoče vozne hitrosti predstavljajo pomemben vpliv na nastanek prometnih nesreč. Pri tem so najbolj ranljivi predvsem uporabniki dvopasovnih medkrajevskih cest, saj so le-te snovane z uporabo siromašnejših trasnih elementov cestne osi. Skrb zbujajoče je predvsem dejstvo da te ceste izkazujejo večino fatalnih prometnih nezgod, pri čemer je vpliv neprilagojene hitrosti najpomembnejši. Vzrok takemu stanju je nedvomno mogoče najti v heterogenosti voznikovega značaja in njegove dojemljivosti za povečano tveganje. Taka ugotovitev je sicer lahko popolnoma legitimna, za strokovnjake cestno-prometne stroke pa površna in netočna, saj pričujoči prispevek dokazuje, da so prometno-tehnični elementi v neposredni zvezi s prometno varnostjo.

Kljub temu, da so tehnične smernice za načrtovanje cest uvedene z namenom poenotenja voznih hitrosti, dejanske razmere na cesti kažejo drugačno sliko. Realne vozne hitrosti $V_{85\%}$ so v večini primerov višje od zasnovanih, pri tem pa še neposredno odvisne od geometrijskih parametrov elementov cestne osi, kar so s svojimi raziskavami potrdili številni avtorji. Vozne hitrosti ves čas vožnje neenakomerno nihajo in s tem ustvarjajo spremenljive dinamične vplive na vozno površino, ki se na njih odziva z ustrežno vrednostjo KDT . Vsako prekoračenje te vrednosti ima za posledico slabši stik s pnevmatiko in povečanje verjetnosti za nastanek prometnih nezgod.

Integralni način upoštevanja tako vozno-dinamičnih količin kot tudi karakteristik vozišča je bil upoštevan v modelih Lamm-a (1993), Juvanca (1991) in delno tudi v modelu IHSDM (Fitzpatrick et.al., 2000). Model Juvanca (1991) je bil še dodatno kalibriran, da je bilo možno pripraviti osnovni algoritem za izdelavo računalniškega programa. Lamm-ov in IHSDM algoritem sta bila tudi vključena v računalniški program, vendar brez dodatne kalibracije. Primerjava modelov pokaže, da model Juvanca (1991) natančneje presodi spreminjanje vozne hitrosti in posledično tudi natančneje precizira nevarno mesto na cesti. Pri tem z definiranimi pokazatelji varnosti VDK in VDK_M določa vrsto ukrepa, ki naj bo sprejeta za zagotovitev varnosti. Model Lamm-a (1997) določa varnost posameznih trasnih elementov na podlagi treh kriterijev varnosti. Izkazalo se je da tak pristop omogoča zgolj načelno definiranje varnosti in ne omogoča natančnejše določitve nevarnega mesta na cesti. Model IHSDM določa varnost na podlagi vrednosti pojemkov in pospeškov, ne omogoča pa interakcije z

vozno površino. Vsi modeli so pokazali da so realne vozne hitrosti višje od zasnovalne hitrosti, kar samo še potrjuje začetno domnevo, da so načrtovalske postavke o konstantni zasnovalni hitrosti lahko varljiva predpostavka.

Pomembno je poudariti da vsi modeli slonijo na empirično izpeljanih zvezah in jih v celoti ne moremo jemati kot reprezentativni model določanja realnih vozni hitrosti. Uporabnik ceste se namreč individualno odloča s kolikšno hitrostjo bo vozil. Te hitrosti so bodisi nižje, lahko pa tudi višje od tistih iz vzorca $V_{85\%}$. Vsi trije modeli, predvsem pa model Juvanca, določajo najbolj neugodne situacije ki lahko vodijo v kritično znižanje prometne varnosti.

Analiza vpliva parametrov na vrednost pokazatelja varnosti VDK potrjuje, da pri dani kombinaciji radijev krožnih lokov lahko nastopajo različne stopnje varnosti. Tudi pri nekonsistentnem zaporedju krožnih lokov je možno določiti tak nabor parametrov, ki daje najnižjo vrednost VDK. Pri tem sta najbolj vplivna parameter prehodnice in vzdolžni naklon. Ker je vzdolžni sklon načeloma težje spreminjati zaradi morfoloških danosti terena je ustrežnejše izbrati primeren parameter prehodnice in s tem zagotoviti večjo varnost.

Snovalci in načrtovalci cest so venomer postavljeni pred izziv kako uskladiti množico parametrov, ki se jim porajajo med snovanjem cest. Optimizacija ni nikoli idealna rešitev, ampak kompromis, sprejet po tehtnem premisleku in strokovni oceni. Prometna varnost, kot parameter odločanja, ne bi smela biti nikoli predmet kompromisa pri načrtovanju. Zato je nujno da se po vzoru avstralskih normativov v tehnične smernice za načrtovanje geometrijskih elementov, aktivneje vključi pomen realne vozne hitrosti $V_{85\%}$. Zaradi heterogenosti navad voznikov po posameznih državah, bi bilo za slovenske razmero potrebno opraviti nove terenske raziskave in na podlagi statističnih regresijskih analiz postaviti lasten model določitve realnih vozni hitrosti v trasnih elementih. Tak pristop bi nedvomno še bolj pripomogel k sodobnemu in predvsem varnemu načrtovanju cest.

VIRI

Cardoso, J.L. 1998. Relations between accident history and speed consistency in portugese two-lane/two-way highways links. V: International symposium on highway geometric design practices. Boston, Massachusetts, 30. Avgust 1995 – 1. September 1995. Washington, D.C., Transportation research record: str. 6-1 – 6-10.

<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec003/> (20.1.2007)

Crisman, B., Fugaro, L., Marcionna, A., Roberti, R. 2003, Modello di prevision delle velocità praticate dagli utenti attraverso la definizione di una velocità ambientale. V: XIII Convegno nazionale s.i.i.v.. Padova, Palazzo del Bo', 30. – 31. Oktober 2003. Ancona, Società italiana infrastrutture varie: str. 13

<http://www.siiv.it/ricerca/siiv2003/mat/convegno/SessioneA/> (30.5.2007)

Fitzpatrick, K., Elefteriadou, L., Harwood, D.W., Collins, M.J., McFadden, J., Anderson, I.B., Krammes, R., Irizarry, N., Parma, K.D., Bauer, K.M., Passetti, K. 2000. Speed prediction for two-lane rural highways. Georgetown Pike, Federal highway administration: 217 str. www.tfhrc.gov/safety/ihsdm/ihsdm.htm (20.1.2007)

Juvanc, A. 1991. Voznodinamična karakteristika cestne trase kot osnova za definiranje neustreznih elementov in oceno voznodinamične kvalitete ceste. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo in geodezijo: 166 f.

Katanić, J., Andjus, V., Maletin, M. 1983. Projektovanje puteva. Beograd, IRO "Građevinska knjiga" Beograd: 428 str.

Kladnik, R. 1989. Visokošolska fizika – 1.del Mehanski in toplotni vplivi. Ljubljana, Državna založba Slovenije: 231 str.

Kloeden, C., McLean, A., Moore, V., Ponte, G., 1997. Travelling speed and the risk of crash involment. NHMRC Road accident research unit, The univeristy of Adelaide, Adelaide: 57 str.

<http://raru.adelaide.edu.au/speed> (21.1.2007)

Köppel, G. 1984. Entwicklung einer Bemessung von Kurvenradius, Kurvenquerneigung und Haltesichtweite in Abhängigkeit von der Fahrbahngeometrie. Bonn-Bad Godesberg, Bundesminister für Verkehr: 127 str.

Krammes, R., Voigt, A. 1998. An operational and safety evaluation of alternative horizontal curve design approaches on rural two-lane highways. V: International symposium on highway geometric design practices. Boston, Massachusetts, 30. Avgust 1995 – 1. September 1995. Washington, D.C., Transportation research record: str. 11-1 – 11-10. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec003/> (20.1.2007)

Lamm, R., Psarianos, B., Choueiri, E., Soilemezoglou, G. 1998. A practical safety approach to highway geometric design international case studies: Germany, Greece, Lebanon and the United States. V: International symposium on highway geometric design practices. Boston, Massachusetts, 30. Avgust 1995 – 1. September 1995. Washington, D.C., Transportation research record: str. 9-1 – 9-10.

<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec003/> (20.1.2007)

Marchionna, A., Crisman, B., Roberti, R., Perco, P., 2001. Verifica della congruenza di un tracciato stradale con il modello most e confronto con altre procedure adottate. V: XI Convegno nazionale s.i.i.v.. Verona, Palazzo del Bo', 28. – 30. November 2001. Ancona, Società italiana infrastrutture varie: str. 19

Marmor, M., Marmor, N. 2006. Slippery road conditions and fatal motor vehicle crashes in the Northeastern United States, 1998–2002. American Journal of Public Health vol. 96, 5: 914-920.

Perme, D. 2004. Profil vozne hitrosti in prometna varnost. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Prometna smer: 93 f.

Polus, A., Poe, C.M., Mason, J.M. 1998. Review of international design speed practices in roadway geometric design. V: International symposium on highway geometric design practices. Boston, Massachusetts, 30. Avgust 1995 – 1. September 1995. Washington, D.C., Transportation research record: str. 5-1 – 5-8.

<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec003/> (20.1.2007)

Pravilnik o projektiranju cest, UL RS št.91/05: 3896.

Richtlinien für die Anlage von Straßen RAS, Linienführung (RAS-L), 1984. Köln, Forschungsgesellschaft für Strassen – und Verkehrswesen: 38 str.

Road planning and design manual – speed parameters 2001. Queensland roads: 35 str.
<http://www.mainroads.qld.gov.au> (20.4.2007)

Spacek P., 2004. Influence of speeds on design standards in Switzerland. Journal of the Transportation research board 1881: 19-26.

Speeding, 2006. European road safety observatory: str. 37
<http://www.erso.eu> (20.1.2007)

Toroyan, T., Peden, M. 2007. Youth and Road Safety. Geneva, World Health Organization: 40 str.

www.who.int/violence_injury_prevention/publications (20.4.2007)

TRB special report: Managing speed – Review current practice for setting and enforcing speed limit, 1998. Washington D.C., Transportation research board, National research council, National academy press: 425 str.

<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr254.pdf> (15.3.2007)

Wooldridge, M.D., Fitzpatrick, K., Harwood, D.W., Potts, I.B., Elefteriadou, L., Torbic, D.J. 2003. NCHRP report 502: Geometric design consistency on high-speed rural two-lane roadways. Washington D.C., Transportation research board: 92 str.

www.trb.org/publications/nchrp (23.1.2007)

Zemljič, V., 1981. Vpliv cestnih elementov na dogajanje nezgod. Ljubljana, Prometnotehniški inštitut: 101 str.