

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:

David Prauhart

Določanje velikosti polmera vertikalne zaokrožitve s koeficientom "K"

Diplomska naloga št.: 2918

Mentor:

doc. dr. Alojzij Juvanc

Somentor:

viš. pred. dr. Peter Lipar

Ljubljana, 24. 10. 2006

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **DAVID PRAUHART** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
" **DOLOČANJE VELIKOSTI POLMERA VERTIKALNE ZAOKROŽITVE S
KOEFIČIENTOM »K«** "

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

Ljubljana,

(podpis)

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 625.72(043.2)
AVTOR: David Prauhart
Mentor: doc. dr. Alojzij Juvanc
Somentor: asist. dr. Peter Lipar
Naslov: Določanje velikosti polmera vertikalne zaokrožitve s koeficientom »K«
Obseg in oprema: 65 str., 13 pregl., 51 sl., 4 graf., 37 en.
Ključne besede: Niveleta, vertikalna zaokrožitve, koeficient »K«, radij
Izvleček

Pri določanju nivelete ceste uporabljamo tangente in vertikalne zaokrožitve. Naša naloga je poiskati primerno ravnotežje med naravnimi možnostmi in ustrezno tehnično rešitvijo. Prvi del obsega opis minimalnih in maksimalnih vrednosti nagibov ter vertikalnih zaokrožitvev s prikazom izračuna velikosti vertikalne zaokrožitve. Nadaljevanje naloge opisuje probleme s katerimi se soočamo pri iskanju primernega radija vertikalne zaokrožitve in kombiniranju vertikalnega ter horizontalnega poteka cestne trase. V tretjem delu definiramo koeficient »K« – horizontalna razdalja, ki je potrebna, da premagamo 1% spremembo nagiba vzdolž zaokrožitve. Ta koeficient je odvisen od nekaterih pogojev, ki so v nalogi podrobneje opisani (projektna hitrost, zaustavitvena pregledna razdalja, prehitevalna pregledna razdalja, kriterij udobnosti). Sledi prikaz možnosti izračuna radija vertikalne zaokrožitve nivelete s pomočjo koeficienta »K«. Zadnji del naloge obsega 3D animacijo izvedeno s pomočjo računalniškega programa CESTA. Prikazuje pa vpliv koeficienta »K« na elemente nivelete ter prednosti in slabosti, ki jih prinaša uporaba različnih vrednosti koeficienta »K« na primeru konveksnih oziroma konkavnih zaokrožitvev

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 625.72 (043.2)
Author: David Prauhart
Supervisor: doc. dr. Alojzij Juvanc
Co Supervisor: assist. dr. Peter Lipar
Title: Defining vertical alignment using koeficient »K«
Notes: 65 p., 37 tab., 51 fig., 4 graph., 37 eq.
Key words: vertical alignment, vertical curve, »K« factor, radius
Abstract:

When defining vertical road alignment tangents and vertical curves are employed. Our research goal is to find the balance between the topography and the technical solution. The first part of the present work describes minimal and maximal values of grades and vertical curves with computation of the vertical curvature. The next part describes coordination of vertical and horizontal alignment with the main emphasis on the radius of vertical curvature. In the third part 'K' factor denoting horizontal distance needed to produce a 1% change in gradient is defined. Above-mentioned factor depends on some conditions that are fully described in this research project (design speed, stopping side distance, passing side distance, comfort criteria). The relationship between the radius of vertical curvature and the 'K' factor is further analysed. The last part includes 3D-animation that was created using 'CESTA' computer software. Results clearly show great influence of the 'K' factor on the vertical alignment elements. By changing 'K' factor values important benefits and weaknesses are obtained showing sag and crest of the vertical curve.

ZAHVALA

Za strokovno pomoč se zahvaljujem mentorju doc. dr. Alojziju Juvancu in somentorju asist. dr. Petru Lipar.

Posebna zahvala moji družini in Andreji za vso vzpodbudo, ki ste mi jo dajali med študijem.
Brez vas bi bilo težje. Hvala

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Elementi nivelete	1
1.1.1	Vzdolžni nagib nivelete	1
1.1.1.1	Naraščajoči nagibi (Vožnja navzgor)	2
1.1.1.2	Padajoči nagibi (Vožnja navzdol)	2
1.1.1.3	Minimalni nagib nivelete s_{min}	4
1.1.1.4	Maksimalni nagib nivelete s_{max}	4
1.1.1.5	Prelom tangente nivelete	8
1.1.2	Vertikalne zaokrožitve	8
1.1.2.1	Prekinjene/sestavljene vertikalne zaokrožitve	9
1.1.2.2	Izračun velikosti vertikalne zaokrožitve	10
1.1.2.3	Elementi vertikalne zaokrožitve	11
2	USKLADITEV HORIZONTALNEGA IN VERTIKALNEGA POTEKA	15
2.1	Vodenje nivelete ali višinski potek trase	15
2.2	Splošna načela pri višinskem poteku trase	16
2.3	Vpliv elementov nivelete na estetiko cestne trase	24
3	VPLIV KOEFICIENTA »K« NA ELEMENTE NIVELETE	32
3.1	Pomen koeficienta K	32
3.1.1	Izračun radija konveksne zaokrožitve s pomočjo koeficienta »K«	34
3.2	Konkavne vertikalne zaokrožitve	35
3.2.1	Minimalne dolžine konkavne vertikalne zaokrožitve	36
3.2.2	Vrednost koeficienta K glede na pogoj zaustavitvene pregledne razdalje	37
3.2.2.1	Vrednosti koeficienta K za osebne avtomobile z upoštevanjem vpliva nagiba	38
3.2.3	Vrednost koeficienta K glede na kriterij udobnosti	39

3.2.3.1	Minimalni radij konkavne vertikalne zaokrožitve po kriteriju udobnosti	42
3.2.3.2	Dolžina vertikalne zaokrožitve pri podvozih	42
3.3	Konveksne vertikalne zaokrožitve	44
3.3.1	Minimalne dolžine konveksne vertikalne zaokrožitve	45
3.3.2	Vrednost koeficienta K glede na pogoj zaustavitvene pregledne razdalje	45
3.3.2.1	Vrednost koeficienta K za osebne avtomobile glede na stopnjo nagiba	46
3.3.3	Vrednosti koeficienta K glede na pogoj prehitevalne pregledne razdalje	46
4	3D - ANIMACIJA CESTNE TRASE Z UPORABO RAZLIČNIH VREDNOSTI FAKTORJA K	50
4.1	Animacija konveksnih vertikalnih zaokrožitvev z vrednostjo K=11 in K=95	51
4.2	Animacija trase , ki poteka v horizontalni krivini in konveksni zaokrožitvi nivelete, če uporabimo K=11 in K=95	56
4.3	Animacija trase , ki poteka v premi in konkavni zaokrožitvi nivelete, če uporabimo K=18 in K=63	60
4.4	Animacija trase, ki poteka v konkavni vertikalni zaokrožitvi s koeficientom K=18 in K=63 ter horizontalni krivini	61
5	SKLEPNE UGOTOVITVE	62
	VIRI	64

KAZALO SLIK

<i>Slika 1: Primeri nagibov</i>	<i>2</i>
<i>Slika 2: Primerna maksimalna dolžina nagiba</i>	<i>6</i>
<i>Slika 3: Kritična dolžina nagiba.....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 4: primer sestavljene konveksne vertikalne zaokrožitve.....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 5: Primer sestavljene konkavne vertikalne zaokrožitve.....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 6: Dolžina vertikalne zaokrožitve</i>	<i>10</i>
<i>Slika 7: Pregledna razdalja.....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 8: Elementi izračuna vertikalne zaokrožitve</i>	<i>11</i>
<i>Slika : 9 Izračun razlike med nagiboma - primera 1 in 2.....</i>	<i>14</i>
<i>Slika : 10 Izračun razlike med nagiboma - primera 3 in 4.....</i>	<i>14</i>
<i>Slika : 11 Izračun razlike med nagiboma - primera 5 in 6.....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 12: Kombinacija elementov nivelete s horizontalno krivino</i>	<i>16</i>
<i>Slika 13: Kombinacija elementa nivelete s premo v tlorisu</i>	<i>17</i>
<i>Slika 14: Podaljšanje vertikalnih zaokrožitev</i>	<i>19</i>
<i>Slika 15 : Uporaba minimalnih elementov nivelete.....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 16 : Valovit profil – »oblika tobogana«</i>	<i>20</i>
<i>Slika 17: Primer »zlomljene« zaokrožitve in »enakomerne-nepretrgane« zaokrožitve</i>	<i>21</i>
<i>Slika 18: Vzporedno vodenje trase</i>	<i>22</i>
<i>Slika 19: Neodvisno vodenje trase.....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 20: Primerna skladnost med elementi horizontalnega vodenja trase in konkavnimi zaokrožitvami</i>	<i>23</i>
<i>Slika 21: Neprimerna skladnost – vertikalne in horizontalne zaokrožitve niso usklajene, uporabljene so minimalne vrednosti</i>	<i>23</i>
<i>Slika 22: Uporaba konkavnih vertikalnih zaokrožitev</i>	<i>24</i>
<i>Slika 23: Uporaba konkavnih vertikalnih zaokrožitev v premi</i>	<i>24</i>
<i>Slika 24: Uporaba konkavnih vertikalnih zaokrožitev v horizontalni krivini.....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 25: Učinek optične nepovezanosti</i>	<i>25</i>
<i>Slika 26: Začetek horizontalne krivine skrit za konveksno zaokrožitvijo</i>	<i>26</i>
<i>Slika 27: Konkavno zaokrožitev odstranimo z izvedbo nasipa.....</i>	<i>26</i>
<i>Slika 28: Povezanost trase.....</i>	<i>26</i>

<i>Slika 29: Kratka konveksna in konkavna zaokrožitev pred horizontalno krivino</i>	<i>27</i>
<i>Slika 30: Dolga konkavna zaokrožitev spojena v horizontalno krivino</i>	<i>27</i>
<i>Slika 31: Primer uporabe minimalnih dolžin zaokrožitve in izboljšana rešitev.....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 32: Kratke konkavne in konveksne zaokrožitve na dolgi horizontalni krivini.....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 33: Odstranitev konkavne vertikalne zaokrožitve z izvedbo nasipa</i>	<i>28</i>
<i>Slika 34 : Primer slabega vodenja trase: začetek horizontalne krivine sovpada s konkavno vertikalno zaokrožitvijo.....</i>	<i>29</i>
<i>Slika 35 : Horizontalna zaokrožitev daje videz ostrega kota</i>	<i>29</i>
<i>Slika 36 : Nagib nivelete in prema v tlorisu</i>	<i>29</i>
<i>Slika 37 : Dviganje in spuščanje trase – valovanje.....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 38 : Ohranjanje konstantnega nagiba.....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 39: Kratke tangente med dvema horizontalnima zaokrožitvama sovpadajo s konveksno vertikalno zaokrožitvijo.....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 40: Koncept vrednosti faktorja K z detajli.....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 40a: Razmerje stranic podobnih trikotnikov</i>	<i>34</i>
<i>Slika 41: Elementi konkavne vertikalne zaokrožitve</i>	<i>35</i>
<i>Slika 42: Razmerje pregledna razdalja - dolžina</i>	<i>36</i>
<i>Slika 43: Elementi konveksne vertikalne zaokrožitve</i>	<i>44</i>
<i>Slika 44 : Izmerljivi deli prehitevalne pregledne razdalje</i>	<i>48</i>
<i>Slika 45: Prečni profil cestne trase z uporabo faktorja $K=11$</i>	<i>52</i>
<i>Slika 46: Prečni profil cestne trase z uporabo faktorja $K=95$</i>	<i>52</i>
<i>Slika 47: Horizontalni potek cestne trase pri izvedbi animacije 2.....</i>	<i>56</i>
<i>Slika 48: Dolžina konkavne vertikalne zaokrožitve v premi z uporabo faktorja $K=18$.....</i>	<i>60</i>
<i>Slika 49: Dolžina konkavne vertikalne zaokrožitve v premi z uporabo faktorja $K=63$.....</i>	<i>60</i>
<i>Slika 50: Dolžina konkavne vertikalne zaokrožitve v horizontalni krivini z uporabo faktorja $K=18$</i>	<i>61</i>
<i>Slika 51: Dolžina konkavne vertikalne zaokrožitve v horizontalni krivini z uporabo faktorja $K=63$</i>	<i>61</i>

KAZALO PREGLEDNIC

<i>Preglednica 1: Sprememba hitrosti vozil v primerjavi z velikostjo nagiba.....</i>	<i>3</i>
<i>Preglednica 2: Povezava med maksimalnim nagibom in projektno hitrostjo na državnih cestah.....</i>	<i>4</i>
<i>Preglednica 3: Povezava med maksimalnim nagibom in projektno hitrostjo na mestnih cestah</i>	<i>5</i>
<i>Preglednica 4 : Primerna maksimalna dolžina nagiba nivelete</i>	<i>6</i>
<i>Preglednica 5: Dolžina vertikalne zaokrožitve – kriterij udobnosti.....</i>	<i>8</i>
<i>Preglednica 6: Vrednosti faktorja K za konkavne vertikalne zaokrožitve, glede na pogoj zaustavitvene pregledne razdalje</i>	<i>38</i>
<i>Preglednica 7: Vrednosti faktorja K za konkavne vertikalne zaokrožitve, glede na pogoj zaustavitvene pregledne razdalje z upoštevanjem nagiba nivelete</i>	<i>39</i>
<i>Preglednica 8: Vrednosti faktorja K in minimalnega radija za konkavne vertikalne zaokrožitve, glede na pogoj udobnosti</i>	<i>40</i>
<i>Preglednica 9: Vrednosti faktorja K za konveksne vertikalne zaokrožitve, glede na pogoj zaustavitvene pregledne razdalje</i>	<i>45</i>
<i>Preglednica 10: Vrednosti faktorja K za konveksne vertikalne zaokrožitve, glede na pogoj zaustavitvene pregledne razdalje z upoštevanjem nagiba nivelete</i>	<i>46</i>
<i>Preglednica 11: Vrednosti faktorja K za osebne avtomobile z uporabo prehitevalne preglednosti</i>	<i>48</i>
<i>Preglednica 12 : Primerjava Radij-koeficient »K« pri konveksnih vertikalnih zaokrožitvah..</i>	<i>62</i>
<i>Preglednica 13 : Primerjava Radij-koeficient »K« pri konkavnih vertikalnih zaokrožitvah...</i>	<i>62</i>

KAZALO GRAFIKONOV

<i>Grafikon 1: Vrednost faktorja K glede na projektno hitrost</i>	<i>33</i>
<i>Grafikon 2 : Pregledna razdalja po kriteriju udobnosti.....</i>	<i>41</i>
<i>Grafikon 3: Dolžina konkavne vertikalne zaokrožitve</i>	<i>43</i>
<i>Grafikon 4: Dolžina konveksne vertikalne zaokrožitve</i>	<i>49</i>

1 UVOD

Niveleta je prostorska krivulja, s katero se definirajo višinski odnosi ceste. Tvori jo presek ravnine vozišča in vertikalne ravnine po osi ceste ali vzporedno z njo. Višinski potek nivelete mora biti v projektu izvršen in prikazan kot vertikalna projekcija in to s tangentami (preme) in vertikalnimi zaokrožitvami med njimi (krožni loki). Za izvedbo vertikalne zaokrožitve so sprejemljive tudi druge geometrijske funkcije (parabole, klotoida ipd.).

(Povzeto po: Alojz Juvanc; november 2006; Smernice za določitev tehničnih elementov cest)

1.1 Elementi nivelete

1.1.1 Vzdolžni nagib nivelete

Nagib je mera nagnjenosti, strmine ali padca ceste. Definiran je kot vzpenjanje ali spuščanje med vožnjo. Z drugimi besedami 10% nagib pomeni; višina ceste naraste na 10 m na vsakih 100 m horizontalne razdalje. Rezultat takega načrtovanja vzpenjanja ali spuščanja je ugotovitev, ki se navezuje na varnost in raven storitev (level of service) za določeno cesto.

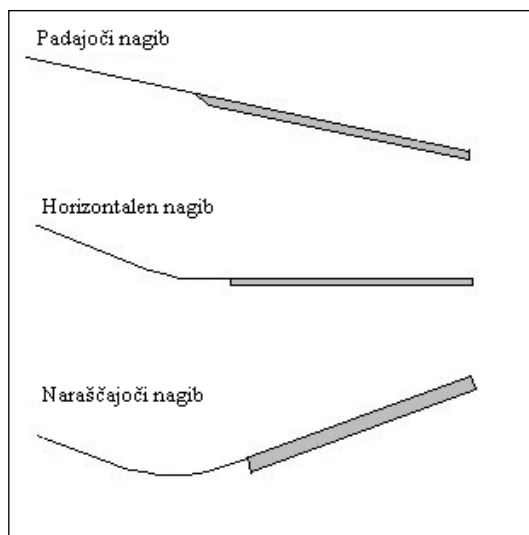
Velikost nagibov nivelete odločilno vpliva na nastanek investicijskih stroškov in stroškov uporabnikov. V splošnem naj bi bili nagibi čim manjši, skladno z ekonomičnostjo. Bolj blagi nagibi omogočajo vsem vozilom, da vozijo s podobno hitrostjo, medtem ko pri strmih nagibih nivelete (tako pri vožnji navzgor kot navzdol) pride do razlik v hitrost med osebnimi in tovornimi (težjimi) avtomobili. Ta razlika v hitrosti ima za posledico kolone in potrebe po prehitevanju, kar posledično vodi do problemov pri varnosti (trki med vozili), zlasti pri velikih kapacitetah prometa. Skladno z manjšo hitrostjo pa naraščajo tudi stroški, zlasti pri tovornih vozilih.

Preglednica 1 na strani 3 prikazuje vpliv nagiba na učinek vozila in seznam tipov cest, ki so primerni za posamezne nagibe nivelete. Odvisno od namena izvedemo:

- ali čimbolj blage nagibe: večja varnost prometa, prihranek energije, manjši obratovalni stroški, manjše emisije izpušnih plinov in hrupa, večja prometna prepustnost, ugodni psihološki učinki na voznika;
- ali večje nagibe: manjši gradbeni stroški, splošna ekonomičnost investicije, manjši posegi v naravni prostor.

Če se s tem bistveno ne posega v ekonomiko investicije, je treba projektirati elemente nivelete za projektno hitrost, ki jo omogočajo horizontalni geometrijski elementi.

- V splošnem maksimalni nagib s_{max} ne sme presegati 6% (na avtocestah 5%) in s_{min} naj ne bi bil manjši kot 0.2%



Slika 1: Primeri nagibov

1.1.1.1 Naraščajoči nagibi (Vožnja navzgor)

Pri načrtovanju naraščajočih nagibov je potrebno posebej paziti na učinkovitost in varnost prometa. Raziskave kažejo, da pogostost trkov med vozili zaskrbnjuječe narašča, kadar vozila vozijo več kot 15km/h pod povprečno vozno hitrostjo tekočega prometnega toka. Ta sprememba 15km/h je torej meja pri projektiranju nagibov v vzponu. Na podlagi rezultatov preiskav je dokazano, da nagibi od 4 do 5% osebnih vozil skoraj ne prizadenejo. Na drugi strani pa so tovorna in rekreacijska vozila zelo občutljiva na spremembo nagiba.

1.1.1.2 Padajoči nagibi (Vožnja navzdol)

Padajoči nagibi predstavljajo za projektanta popolnoma nov problem. Namesto skrbi zaradi zmanjšanja hitrosti, mora projektanta skrbeti nenadzorovano povečanje hitrosti. Potencialne posledice za prehitra vozila so značilne tam, kjer upoštevamo gosto naseljena območja, ki so locirana ob vznožju dolgih strmih nagibov. Da se izognemo nesrečam, ki jih povzročajo potujoča vozila, izvajamo na vseh ključnih lokacijah vzdolž nagiba klančine (rampe). Lokacija klančin (ramp) za vozila je odvisna od geometrije ceste in topografije pripadajočega terena. Klančina-rampa lahko obstaja pred vsakim zavojem, ki ne pogojuje hitrosti, lahko jih

umestimo tudi vzdolž premih razponov, kjerkoli je lahko dosežena previsoka hitrost.

Postavljamo jih na desno stran ceste. Normalno so projektirane tako, da lahko tovornjak, ki se giblje s hitrostjo najmanj 120 km/h, na njih normalno ustavi. Rampe naj bi bile dovolj velike, da služijo več kot enemu vozilu naenkrat. Poznamo več različnih tipov ramp, ki lahko služijo za zaustavljanje vozil. Posebno pozornost je potrebno nameniti tudi vključevanju pasu za počasna vozila pri spustih. Tovorna vozila pogosto uporabljajo nižje prestave in vozijo počasneje, da uporabo zavor zmanjšajo na minimum. Pas za počasna vozila torej zagotovi hitrejši promet, varno pot za prehitevanje počasnejših vozil in nemoteno vključevanje vozil, ki vidijo v vzvratnem ogledalu hitrejše vozilo.

Preglednica 1: Sprememba hitrosti vozil v primerjavi z velikostjo nagiba
 (Road planning and design manual; July 2002)

Nagib [%]	Sprememba hitrosti vozil v primerjavi z velikostjo nagiba				Uporabnost za posamezen tip ceste
	Vzpon (vožnja navzgor)		Padec (vožnja navzdol)		
	Osebna vozila	Tovorna vozila	Osebna vozila	Tovorna vozila	
0-3	minimalna	minimalna	minimalna	minimalna	Na vseh tipih cest
3-6	minimalna	zmanjšanje na cestah z višjimi hitrostmi	minimalna	minimalna	Na vseh tipih cest, tudi na cestah z veliko prometa
6-9	hitrost v veliki meri nespremenjena	bistveno počasnejša	minimalna	minimalna v premih delih, bistvena v trasi z veliko zaokrožitvami	Ceste v hribovitem terenu, pri veliki kapaciteti prometa zagotovimo dodatne
9-12	Počasneje	Veliko počasneje	Počasneje	bistveno počasneje v premih delih trase, zelo počasi v delih trase z veliko zaokrožitvami	ceste z zagotovljenimi dodatnimi pasovi za počasnejša vozila
12-15	10-15 km/h počasneje	15% maksimalnega učinka	10-15 km/h počasneje	ekstremno počasi	ceste z malo prometa

1.1.1.3 Minimalni nagib nivelete s_{min}

Potreben je zaradi odvodnjavanja, omogočati mora prost odtok vode z vozišča. Možno je projektirati tudi cesto s horizontalno niveleto ($s_{min} = 0$), če je mogoče ustvariti odvod površinskih voda samo s prečnim nagibom ceste. To je mogoče na odsekih, grajenih v nasipu, kjer ni ovirano bočno odtekanje vode s ceste. Nikakor pa taka rešitev ni primerna, kadar leži trasa ceste v vkopu. Zelo položni nagibi ne omogočajo vzdolžnega odtoka površinske vode ter odvodnjavanja ob robnikih, žlebovih in v srednjih pasovih, kjer so ti vzporedni z nagibom ceste. Nevarnost predstavlja blag nagib nivelete v kombinaciji s horizontalno ukrivljenostjo – lahko pride do zastajanja vode na cestišču in s tem posledično do aquaplaning-a. Do problema pri odvajanju vode pride tudi v primeru kombinacije strmih nagibov s postopnimi zavoji v nasprotnih smereh.

Pomembno je, da pogoji odvodnjavanja ne narekujejo nagiba ceste, ampak da elemente odvodnjavanja postavimo prilagojeno z nagibom. Posledica zgornje trditve je velika pazljivost pri odtoku vode v nižjih plasteh (drenažni sistemi).

1.1.1.4 Maksimalni nagib nivelete s_{max}

Največji dopustni nagib nivelete označuje nagib njene tangente v poljubni točki. Kriterij za določitev maksimalnega nagiba temelji na študiji pogonskih karakteristik tovornih vozil, investicijskih stroškov in stroškov gradnje. Čeprav so projektne vrednosti določene in se skladajo s temeljnimi cestnimi značilnostmi (zunanja oblika), lahko določene rezultate dobimo tudi z zvezo med nagibom ceste in projektno hitrostjo. Te vrednosti so priporočljive in ne končno določene, torej lahko služijo predvsem kot orientacija pri projektiranju.

Preglednica 2: Povezava med maksimalnim nagibom in projektno hitrostjo na državnih cestah
(Road design manual: chapter 6)

Tip terena	Projektna hitrost (km/h)							
	60	70	80	90	100	110	120	130
	Maksimalni nagib (%)							
Ravninski	5	5	4	4	3	3	3	3
Valovit	6	6	5	5	4	4	4	4
Hribovit	8	7	7	6	6	5	5	5

Preglednica 3: Povezava med maksimalnim nagibom in projektno hitrostjo na mestnih cestah
(Road design manual: chapter 6)

Tip terena	Projektna hitrost (km/h)					
	50	60	70	80	90	100
	Maksimalni nagib (%)					
Ravninski	8	7	6	6	5	5
Valovit	9	8	7	7	6	6
Gorati	11	10	9	9	8	8

Strmejši nagib od dovoljenega lahko privzamemo samo v izjemnih primerih ;

- na relativno kratkih odsekih, ki pomembno vplivajo na zmanjšanje gradbenih stroškov;
- na težkem terenu, kjer nagibi nivelete, manjši od maksimalnega, niso izvedljivi

⇒ Maksimalne dolžine strmih nagibov

Za vsak nagib obstaja kritična dolžina, pri kateri določena vozila dosežejo spremembo 15km/h, kar nam kaže preglednica 4, ki jo lahko uporabimo pri iskanju kritične dolžine za nekatere vrednosti nagibov. Dolžina vzpona, ki je manjša od kritične, nam mora omogočati, da ohranimo razumno in sprejemljivo stopnjo varnosti, prav tako pa težja ter daljša vozila ne smejo poslabšati karakteristik prometnega toka. Splošen postopek načrtovanja maksimalne dolžine nagibov : projektirati cesto tako, da z naraščajočimi nagibi premagamo razliko v višini, ne prekršimo pa maksimalnega nagiba in ne zmanjšamo hitrosti tovornih vozil za več kot 15 km/h pod povprečno hitrost prometnega toka.

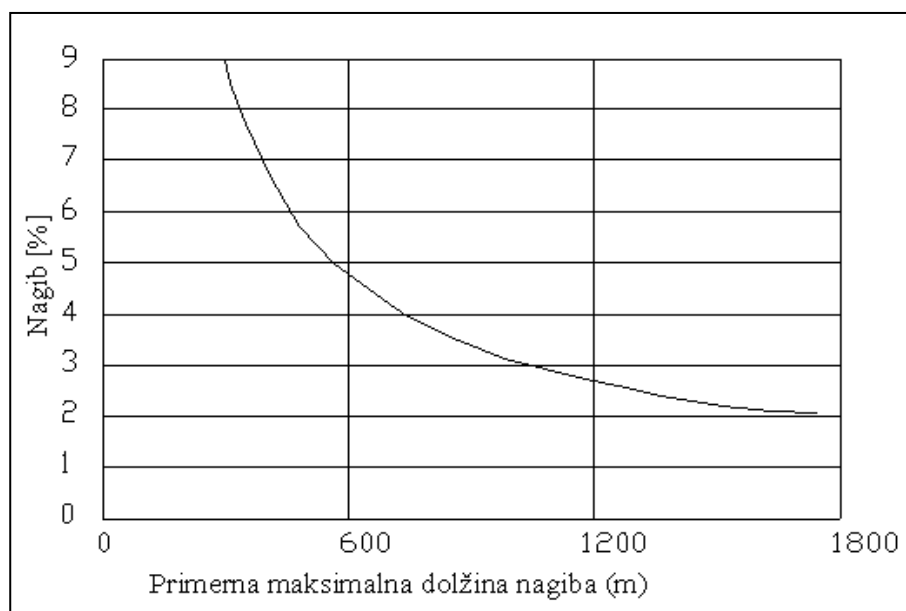
Dolgih, strmih nagibov se izogibamo, ne glede na to, ali je niveleta v vzponu ali padcu, ker se na račun zmanjšanja hitrosti tovornih vozil zmanjša potovalna hitrost celotnega prometnega toka.

V primeru, da je zmanjšanje dolžine nagiba neizvedljivo, je potrebno zagotoviti dodatne pasove, rezervirane za počasna vozila, tako za vožnjo navzgor kot navzdol. Ti pasovi omogočajo hitrejšim vozilom, da varno prehitijo počasnejša, s tem pa narašča raven storitev (level of service) za določeno cesto. Predpisi zahtevajo, da kombinacija različnih vrst vozil vzdržuje hitrost prometnega toka 70km/h pri 1% nagibu. Dolžina nagiba ima pri tem pomembno vlogo.

Preglednica 4 : Primerna maksimalna dolžina nagiba nivelete
(Bureau of Design and Environment Manual; Vertical alignment; Illinois; December 2002)

Primerna maksimalna dolžina nagiba	
Nagib [%]	Dolžina [m]
2-3	1800
3-4	900
4-5	600
5-6	450
>6	300

Za nagibe, ki so daljši od primernih preučimo možnost uporabe pomožnih (dodatnih) pasov

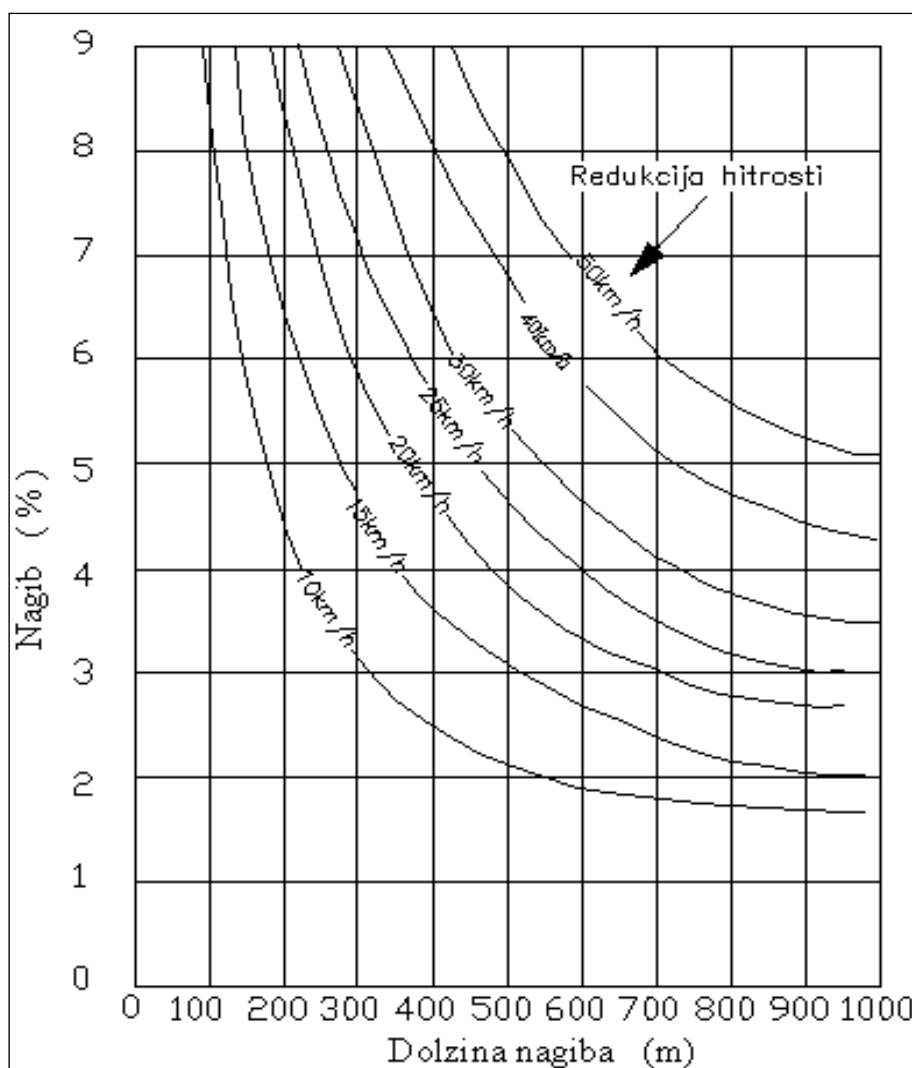


Slika 2: Primerna maksimalna dolžina nagiba

Pomembno je projektirati tako obliko trase, ki odpravi ostre horizontalne zaokrožitve na dnu strmih nagibov nivelete, kjer so možne velike hitrosti vozil. Pri tem se moramo zavedati, da lahko tovorna vozila na dolgih nagibih, tudi manjših kot 3%, neovirano dosežejo prekomerno hitrost. V takih primerih ob trasi zagotovimo izogibališča. Smotrno je, da povečamo projektno hitrost na posameznih geometrijskih elementih postopoma proti dnu nagiba. Kjer je to neizvedljivo in je procent tovornih vozil visok, je hitrejšim vozilom potrebno omogočiti tako traso, da je možno varno prehitevanje.

V primeru zelo velikih nagibov tangent nivelete (nad 5%), ki jih iz kateregakoli razloga ne moremo ublažiti, je priporočljivo na dnu nagiba nivelete povečati horizontalne geometrijske elemente in jih prilagoditi voznim hitrostim, ki so posledica strme nivelete (projektna hitrost

V_{proj}). Pomemben faktor pa predstavlja tudi dolžina poti na kateri vlada ta nagib. S stališča vpliva nagiba na prometni tok se tolerira uvedba s_{max} samo na relativno kratkih cestnih odsekih. V praksi se je pokazalo, da vsak vzdolžni nagib, večji kot 2.5%, privede do padca potovalne hitrosti, kar ima negativne posledice na propustnost prometnega toka in udobnost voznikov. Še sprejemljiva vrednost relativnega zmanjšanja hitrosti $\Delta V=25\text{km/h}$ v intervalu $80\text{km/h} \leq V \leq 120\text{km/h}$, to pomeni, da je $V=55\text{km/h}$ mejna vrednost hitrosti, pri kateri lahko vzdržujemo načrtovano stanje prometnega toka.



Slika 3: Kritična dolžina nagiba
(Boreau of design and environment manual; December 2002)

Pri izboru zgornje meje nagiba nivelete gre za kompleksen problem, zaradi tega so vrednosti samo orientacijske, naloga projektanta pa je, da dokaže upravičenost izbranega nagiba

1.1.1.5 Prelom tangente nivelete

Maksimalni prelom nivelete, ki je dovoljen brez uporabe vertikalne zaokrožitve, je zasnovan na kriteriju udobnosti v povezavi s projektno hitrostjo.

Preglednica 5: Dolžina vertikalne zaokrožitve – kriterij udobnosti
(Road design and location; vertical curves control)

Projektna hitrost (km/h)	Maksimalna sprememba nagiba brez vertikalne zaokrožitve (%) *	Minimalna dolžina vertikalne zaokrožitve za zadovoljiv kriterij udobnosti (m)
40	1.0	20-30
60	0.8	40-50
80	0.6	60-80
100	0.4	80-100
120	0.2	100-150

* V praksi običajno pri vsaki spremembi naklona izvajamo vertikalne zaokrožitve.

Ločimo:

- konveksno zaokrožitev (razlika velikosti nagibov sosednjih tangent je pozitivna) in
- konkavno zaokrožitev (razlika velikosti nagibov sosednjih tangent je negativna).

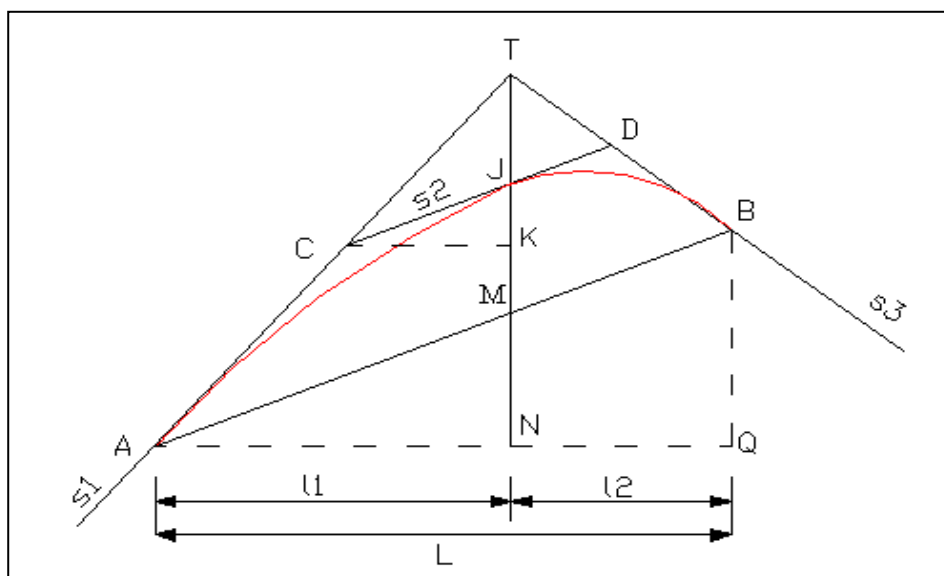
Mejne vrednosti za oba tipa preloma nivelete izhajajo iz vozno-dinamičnih pogojev in pogojev preglednosti

1.1.2 Vertikalne zaokrožitve

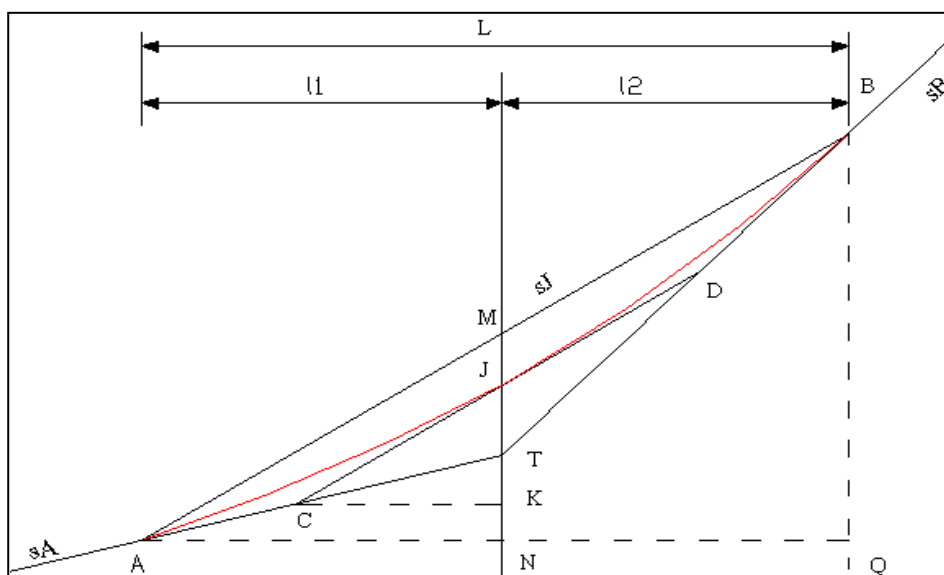
Pri projektiranju cest je večina vertikalnih zaokrožitev simetričnih, kar pomeni, da je horizontalna razdalja od središča zaokrožitve do konca zaokrožitve identična v obeh smereh. (slika 6, stran 10). Pri uporabi nesimetričnih vertikalnih zaokrožitev, kar pa v praksi ni pogosto, uporabimo enostavno simetrične, priključene druga na drugo (slika 4 in slika 5). Vertikalne zaokrožitve, kakršnekoli, tudi neznatne, so bolj zapletene od nagibov. Najboljša oblika vertikalne zaokrožitve je tista, ki ne zahteva spremembe cestnega odseka. Iz tega pogleda je načrtovanje vertikalnih zaokrožitev lažje kot načrtovanje horizontalnih zaokrožitev. Na drugi strani pa imajo vertikalne zaokrožitve parbolično obliko namesto enostavne krožnice pri horizontalni zaokrožitvi in zaradi tega so določeni računi bolj zapleteni.

1.1.2.1 Prekinjene/sestavljene vertikalne zaokrožitve

Sestavljene so iz dveh zaokrožitvev, ki so ali konkavne ali konveksne, ponavadi različnih radijev in združene s kratko vmesno premo. V primeru konkavnih zaokrožitvev se jih izogibamo. Tam, kjer dolžina preme presega $0,4V[m]$ (V ...projektna hitrost [km/h]), zaokrožitve niso mišljene kot prekinjene. V primeru, da ni vmesne preme, so zaokrožitve sestavljene in niso prekinjene ter so dovoljene. Primer sestavljene zaokrožitve predstavlja nesimetrična konveksna ali konkavna vertikalna zaokrožitvev.



Slika 4: primer sestavljene konveksne vertikalne zaokrožitve

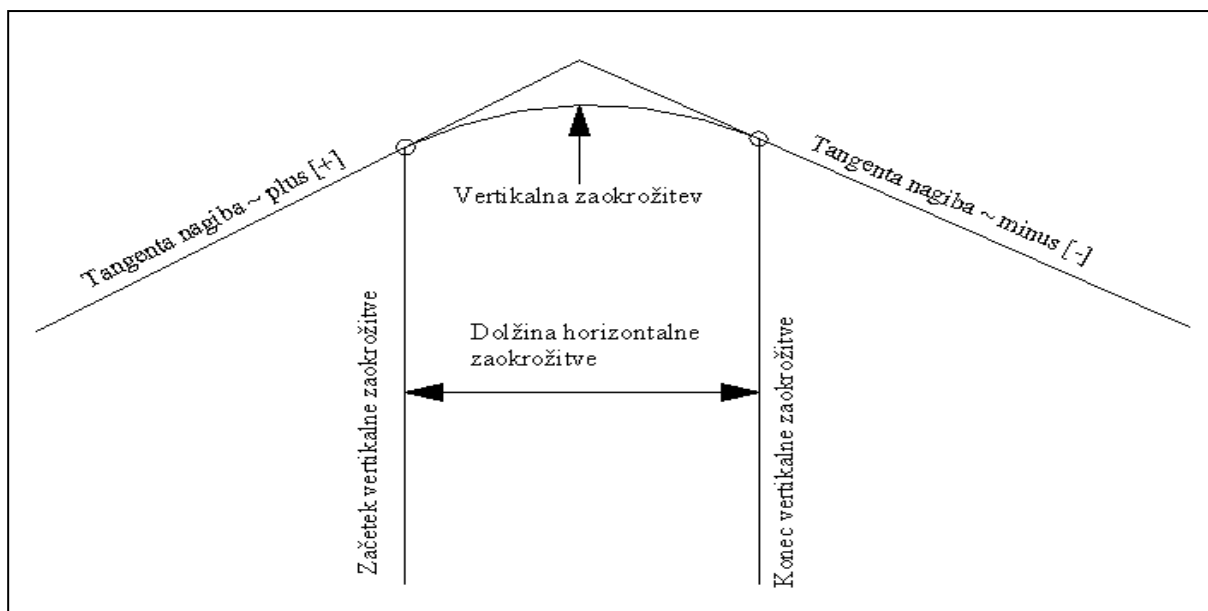


Slika 5: Primer sestavljene konkavne vertikalne zaokrožitve

1.1.2.2 Izračun velikosti vertikalne zaokrožitve

Medtem ko potekajo horizontalne krivine levo in desno po trasi in imajo obliko krožnice, pa je potek vertikalnih zaokrožitev gor in dol po terenu, uporablja pa se geometrijski element parabola. Parabolo uporabljamo predvsem zaradi tega, ker njihova oblika določa prehod iz enega nagiba v drugega, prav tako so enostavne tudi računske metode za določanje zaokrožitev. Načrtovanje vertikalnih zaokrožitev predstavlja predvsem določitev primerne dolžine zaokrožitve, oziroma primerne radija zaokrožitve.

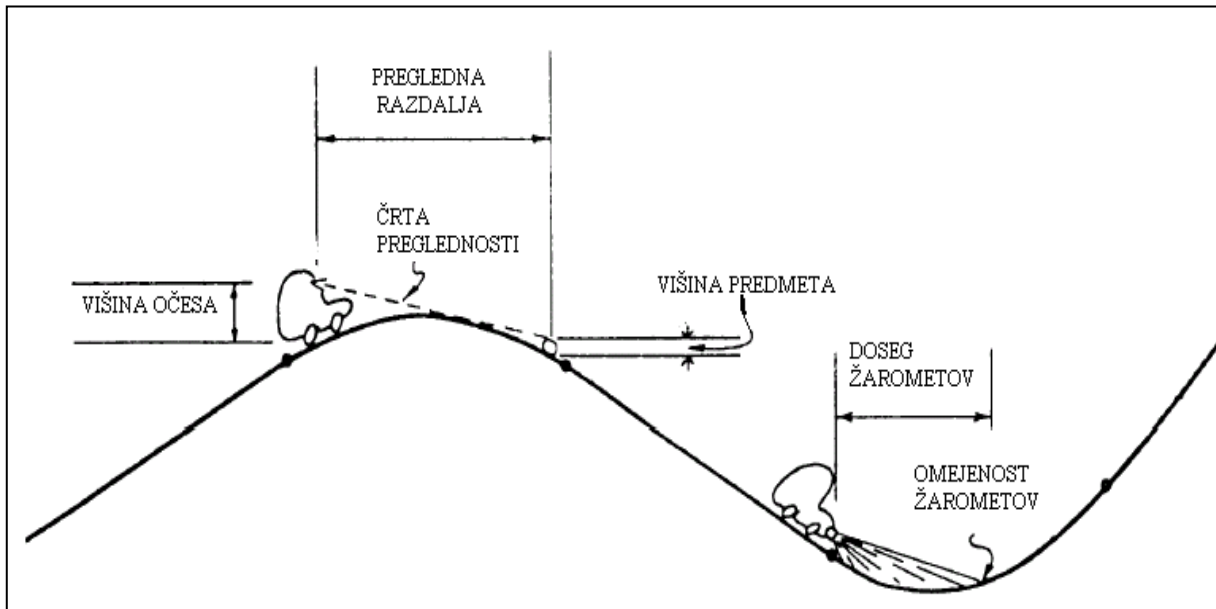
Kot prikazuje slika 6, je dolžina vertikalne zaokrožitve horizontalna razdalja med začetkom in koncem zaokrožitve, torej ni enaka dolžini parabole.



Slika 6: Dolžina vertikalne zaokrožitve

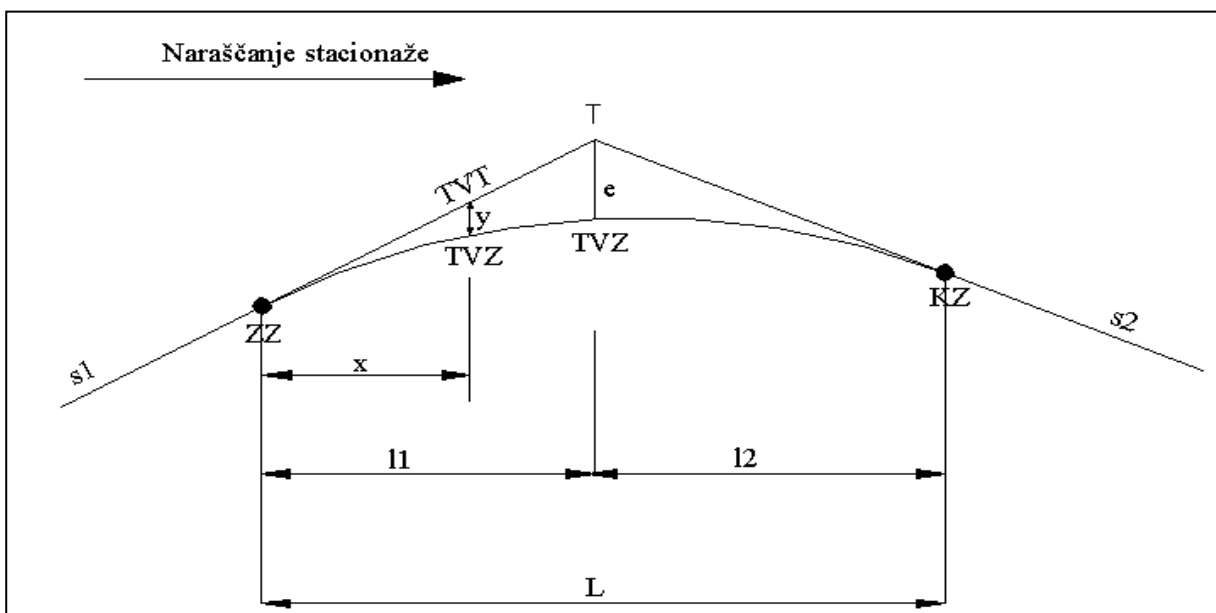
Daljša kot je zaokrožitev, bolj postopen je prehod iz enega nagiba v drugega in krajša kot je zaokrožitev, bolj strm oz. odsekan je prehod. Pomembno je, da je prehod dovolj postopen, da je zagotovljena potrebna pregledna razdalja. Pregledna razdalja pa je odvisna od hitrosti, za katero je cesta projektirana, potrebne razdalje za prehitevanje (prehitevalne razdalje), reakcijskega časa, zavornega časa, zaustavitvene razdalje, višine voznikovega očesa in višine objekta (ovire) na cesti.

Za konkavne zaokrožitve je pregledna razdalja ponoči pomembnejša kot pregledna razdalja v pogojih dnevne vožnje. Preglednost v pogojih nočne vožnje mora upoštevati, kdaj je doseg žarometov omejen z nagibom zaokrožitve.



Slika 7: Pregledna razdalja

1.1.2.3 Elementi vertikalne zaokrožitve



Slika 8: Elementi izračuna vertikalne zaokrožitve

Pomen simbolov in enot, ki jih določajo :

- ZZ ; točka vertikalne ukrivljenosti, mesto kjer se zaokrožitev začne;
- T ; točka vertikalnega presečišča, mesto kjer se sekajo tangente nagibov, temenska točka;
- KT ; točka vertikalnega dotikališča, mesto kjer se zaokrožitev zaključi;
- TVZ ; točka na vertikalni zaokrožitvi, položena na katerokoli točko parabole;
- TVT ; točka na tangenti, položena na katerokoli točko ali na drugo tangento;
- s₁ ; nagib tangente na kateri je locirana točka ZZ, merjen v [%];
- s₂ ; nagib tangente na kateri je locirana točka KZ, merjen v [%];
- A ; algebraična razlika nagibov, pri čemer pozitivne vrednosti + predstavljajo nagibe navzgor, negativne vrednosti – pa nagibe navzdol;

$$A = s_2 - s_1 \quad (1)$$

- L ; dolžina zaokrožitve, horizontalna razdalja merjena od ZZ do KZ. To dolžino lahko izračunamo z uporabo spodnje formule, kjer je K večinoma podan v standardih.

$$L = K * A \quad (2)$$

Kadar pa K ni podan , lahko približno dolžino L izračunamo po spodnjih formulah, dobljene vrednosti pa zaokrožimo na najbližje večje celo število ;

Za konveksne zaokrožitve

Za konkavne zaokrožitve

$$L = 125 * \frac{A}{4} \quad (3)$$

$$L = 100 * \frac{A}{4} \quad (4)$$

- l₁ ; horizontalna razdalja dela zaokrožitve od ZZ do T, merjena v metrih [m];
- l₂ ; horizontalna razdalja dela zaokrožitve od T do KZ, merjena v metrih [m];
- e ; vertikalna zunanja razdalja od T do zaokrožitve merjena v metrih [m]. to razdaljo izračunamo s pomočjo formule :

$$e = \frac{L * A}{8} \quad (5)$$

- x ; horizontalna razdalja od ZZ naprej do katerekoli točke TVT ali TVZ do T, oziroma razdalja od KZ nazaj do katerekoli točke TVT ali TVZ do T;
- y ; vertikalna razdalja (ordinata) od katerekoli točke TVT do ustrezne TVZ merjena v metrih [m], kar je enačba parabole, ki dopušča primerne kalkulacije vertikalnih razdalj.

$$y = \left(\frac{x}{e} \right)^2 * e \quad (6)$$

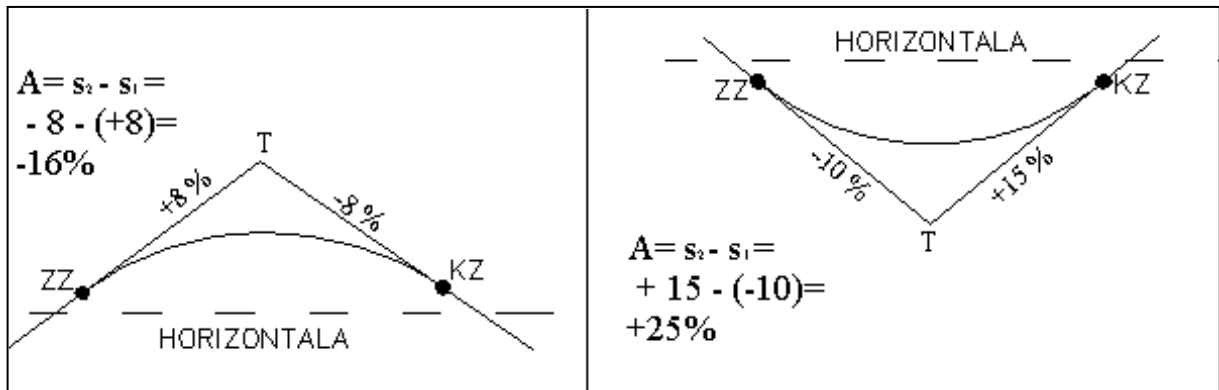
Z izračunom vertikalne zaokrožitve pričnemo, ko imamo predpisane nagibe s_1, s_2 , podatke načrtovane zaokrožitve l_1, l_2 in L ter višino točke T. Izračunati moramo višino določenih TVT in potem z uporabiti zgornje formule A, e, in y, ki ustrezajo izbranim TVT. Ko y seštejemo ali odštejemo od višine TVT, nam rezultat poda višino TVZ, ki je končna višina ceste. Na sliki »elementi vertikalne zaokrožitve« vrednosti y odštejemo od TVT, da dobimo višino zaokrožitve, v primeru konkavnih zaokrožitev pa vrednosti y prištejemo k višini TVT in dobimo višino TVZ.

Pri izračunu razlike med nagiboma A moramo paziti na predznak s_1, s_2 . Vertikalne zaokrožitve uporabljamo za spremembo nagiba, drugače na vrhu ali na dnu hriba. Primer : nagib navzgor, ki prehaja v strmejši nagib, ublažimo z vertikalno zaokrožitvijo.

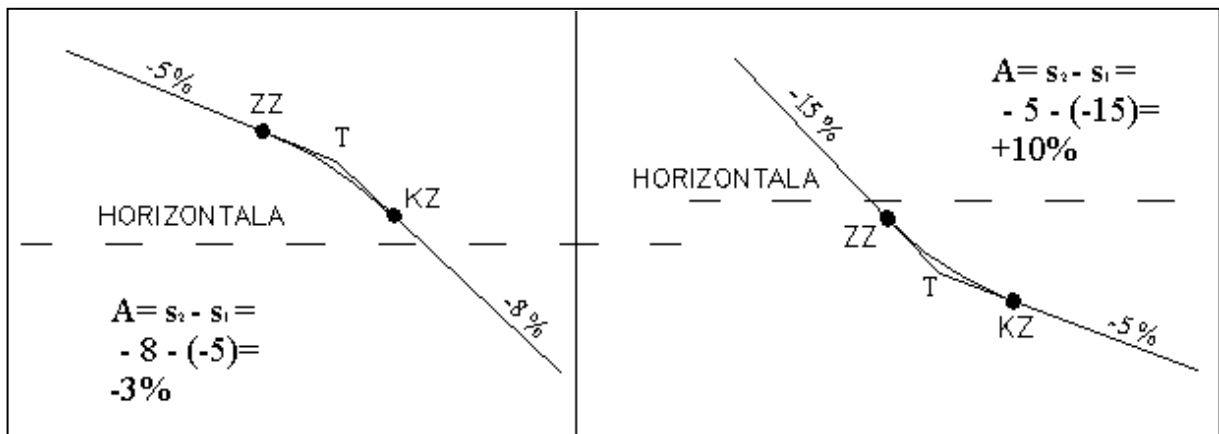
Šest možnih kombinacij nagibov navzgor ali navzdol, združenih z enostavnim izračunom vrednosti A je prikazanih na spodnjih slikah.

Predznak A nam indicira ali vrednost y od vrednosti TVT seštejemo ali odštejemo.

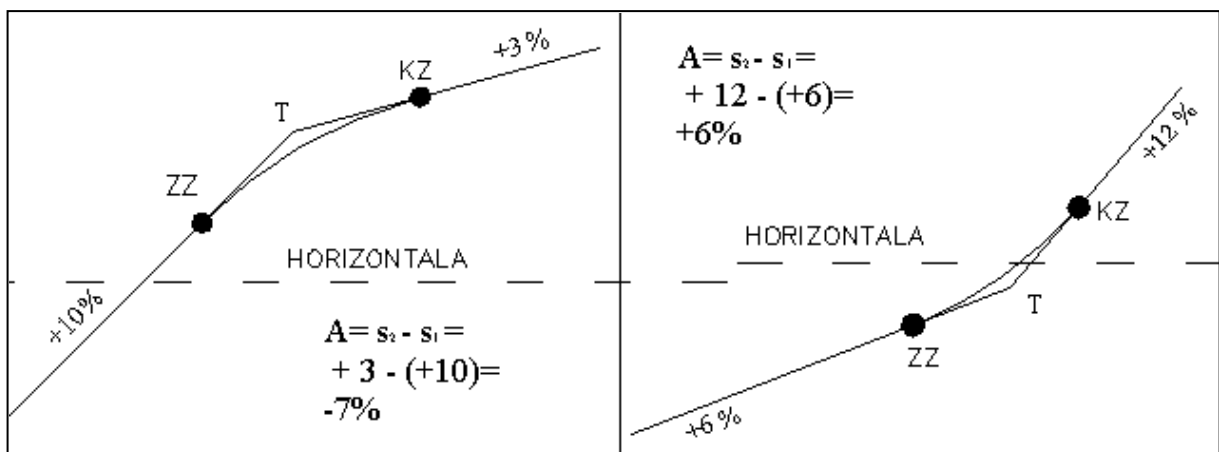
Minimalna dolžina vertikalnih zaokrožitev je v glavnem določena s pogoji pregledne razdalje. Te dolžine so v splošnem zadovoljive s stališča varnosti udobnosti in prikladnosti. Do izjem lahko pride v določenih področjih; npr. dvigajočih se zavojih, kjer zadostna pregledna razdalja zahteva daljše dolžine vertikalne zaokrožitve. V splošnem dolžina vertikalnih zaokrožitev naj ne bi bila manjša kot 240 m, tudi če kriterij pregledne razdalje dopušča krajše zaokrožitve, da se izognemo pojavu prisiljenega zaviranja v področju trase. Predolge vertikalne zaokrožitve pogosto zmanjšujejo dolžino možnosti za prehitevanje na sosednji strani konveksnih vertikalnih zaokrožitev in zaradi tega dolžina naj ne bi preseгла 600 m.



Slika : 9 Izračun razlike med nagiboma - primera 1 in 2



Slika : 10 Izračun razlike med nagiboma - primera 3 in 4



Slika : 11 Izračun razlike med nagiboma - primera 5 in 6

2 USKLADITEV HORIZONTALNEGA IN VERTIKALNEGA POTEKA

2.1 Vodenje nivelete ali višinski potek trase

Višinski potek trase ali vodenje nivelete je grafični prikaz zaporednih vzdolžnih nagibov ceste (vzponov in padcev) in zaokrožitev s katerimi se povezujejo (konveksne in konkavne) na razviti trasi. Da se razlikujejo s horizontalnimi zaokrožitvami jih definiramo z dvema parametroma :

- faktor udobnosti, ki zagotavlja miren prehod iz enega nagiba v drugega;
- faktor varnosti, ki zagotavlja vozniku varno pregledno razdaljo skozi celotno dolžino vertikalne zaokrožitve

Niveleta mora v vsaki točki vodenja trase zagotavljati ustrezne pogoje t.j. ustrezno projektno hitrost in pregledno razdaljo.

Višinski potek trase v glavnem kontroliramo z :

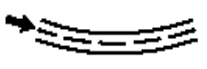
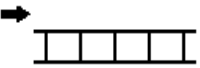


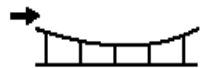


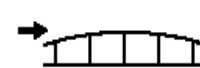

- topografijo (prilagajanje naravnemu terenu);
- razredom ceste, volumnom prometa;
- horizontalnim potekom trase;
- varnostjo;
- pregledno razdaljo;
- stroški gradnje, ekonomiko;
- odvodnjavanjem;
- uporabo dodatnih pasov;
- voznimi karakteristikami;
- estetiko;
- klimatskimi pogoji.

Lokacijo nivelete prilagajamo naravnemu terenu kolikor je mogoče, paziti pa moramo pri vgrajevanju maksimalnih dopustnih nagibov, minimalnih radijev vertikalnih zaokrožitev, ekonomski bilanci zemeljskih del, videzu, vplivu okolja in koordinaciji s horizontalnim potekom trase.

Odločitev, kateri projektni kriterij bo prevladoval pri izbiri višinskega poteka trase, se razlikuje glede na tip in pomembnost ceste.

Pri manj pomembnih cestah bo ekonomika projekta in vpliv sosednjih elementov prevladal nad videzom ceste, čeprav se estetiki ceste in dobrega občutka pri vožnji po cesti ne sme zanemariti. Velikokrat se izkaže, da se stroški ne spremenijo bistveno, če poskušamo dober občutek vožnje doseči že v prvih korakih projektiranja. Obratno pa pri glavnih cestah, kjer je na prvem mestu občutek pri vožnji po cesti, prevlada tudi nad zemeljsko bilanco, čeprav ekonomskega vidika seveda ne smemo zanemariti. Vse te pogoje se da doseči s primernim načrtom in koordinacijo s horizontalnim potekom trase. Projektna hitrost vertikalnega vodenja trase, ki je 10-15km/h večja kot projektna hitrost horizontalnega vodenja trase, zagotavlja večjo varnost prometa.

2.2 Splošna načela pri višinskem poteku trase

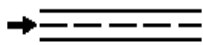
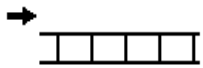




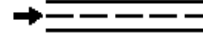
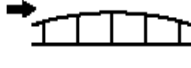
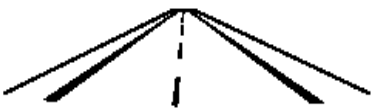
Elementi cestne trase v tlorisu	Elementi cestne trase v niveletih	Elementi cestne trase v prostoru
 <p>Horizontalna krivina</p>	 <p>Prema</p>	 <p>Horizontalna zaokrožitev s konstantnim nagibom</p>
 <p>Horizontalna krivina</p>	 <p>Konkavna zaokrožitev</p>	 <p>Horizontalna krivina s konkavno vertikalno zaokrožitvijo</p>
 <p>Horizontalna krivina</p>	 <p>Konveksna zaokrožitev</p>	 <p>Horizontalna krivina s konveksno vertikalno zaokrožitvijo</p>

Slika 12: Kombinacija elementov nivelete s horizontalno krivino
 (Povzeto po: Lipar P. doktorska disertacija. november 1998)

Kot geometrijske elemente uporabljamo preme-tangente, horizontalne krivine, prehodnice, nagibe in vertikalne zaokrožitve. Kombinacija teh elementov je lahko:

- skladna ali neskladna;
- ekonomična ali pa so stroški visoki;
- varna ali nevarna.

Ovisno od velikosti posameznih elementov in od razmerji med geometrijskimi elementi

Elementi cestne trase v tlorisu	Elementi cestne trase v niveleti	Elementi cestne trase v prostoru
 <p>Prema</p>	 <p>Prema</p>	 <p>Prema s konstantno linijo</p>
 <p>Prema</p>	 <p>Konkavna zaokrožitev</p>	 <p>Prema s konkavno vertikalno zaokrožitvijo</p>
 <p>Prema</p>	 <p>Konveksna zaokrožitev</p>	 <p>Prema s konveksno vertikalno zaokrožitvijo</p>

Slika 13: Kombinacija elementa nivelete s premo v tlorisu
 (Povzeto po: Lipar P. doktorska disertacija. november 1998)

Najbolj pomembna faktorja, ki vodita potek ceste, sta namembnost in položaj ceste v prostoru. Horizontalni in vertikalni potek ceste vedno načrtujemo hkrati. Elementi se morajo med sabo dopolnjevati. To je posebej pomembno pri novogradnjah. Slaba usklajenost zmanjša prednosti in poudari pomanjkljivosti posameznih odsekov poteka trase. Potrebna je natančna študija vertikalnega in horizontalnega poteka trase. Vodenje ceste v tlorisu in vodenje nivelete ceste sta med najpomembnejšimi projektnimi zahtevami. Popolnost v projektiranju in usklajenost sta glavna predpogoja za izgled ceste posledično tudi za prometno

varnost. To ponavadi dosežemo z razmeroma majhnimi dodatnimi stroški, še posebej, če usklajenost horizontalnega in vertikalnega poteka cestne trase dosežena v zgodnjih fazah projekta. Vodenje cestne trase načrtujemo tako, da stopnjujemo atraktivne poglede na naravo, na urbano okolje, na reke, gore, parke in na atraktivne zgradbe. Projekt višinskega poteka cestne trase obsega obširno področje, pogojujejo pa ga specifične omejitve, ki obsegajo maksimalne in minimalne nagibe nivelete, pregledno razdaljo v območju vertikalnih zaokrožitev in vertikalni prosti profil.

Projektant se mora ravnati po splošnih načelih in predpisih, ki določajo prometno varnost ter izboljšujejo estetiko cestne trase.

Vodenje vertikalnega poteka trase razdelimo v dve kategoriji:

- načrtovanje cestnih odsekov, ki imajo nagibe v vzponu ali padcu;
- načrtovanje vertikalnih zaokrožitev, ki povezujejo odseke vzpenjajočih in padajočih nagibov.

- RAVNOTEŽJE

Pomembno je, da projektant poišče ravnotežje med elementi horizontalnega in vertikalnega poteka trase. Poznamo dva primera slabega načrtovanja:

- ⇒ uporaba strmih nagibov-z namenom doseči bolj preme odseke;
- ⇒ uporaba prekomerne zakrivljenosti v želji doseči položnejšo traso.

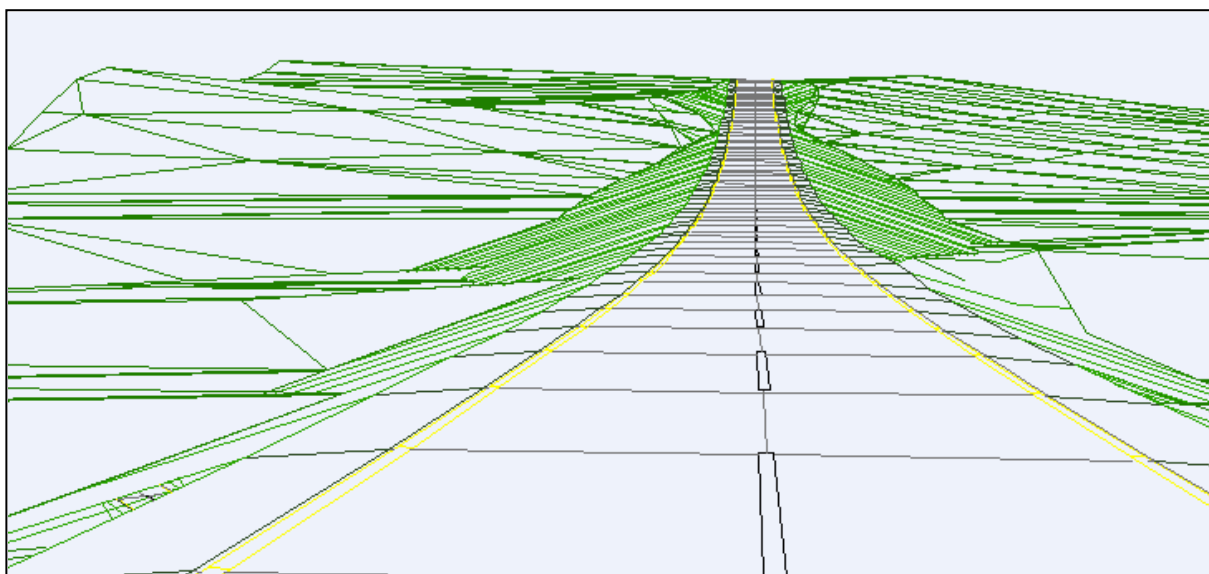
Uporaba vmesne poti med obema skrajnostma nam da najboljšo rešitev glede na varnost, pretok prometa, udobnost in estetiko.

- SKLADNOST

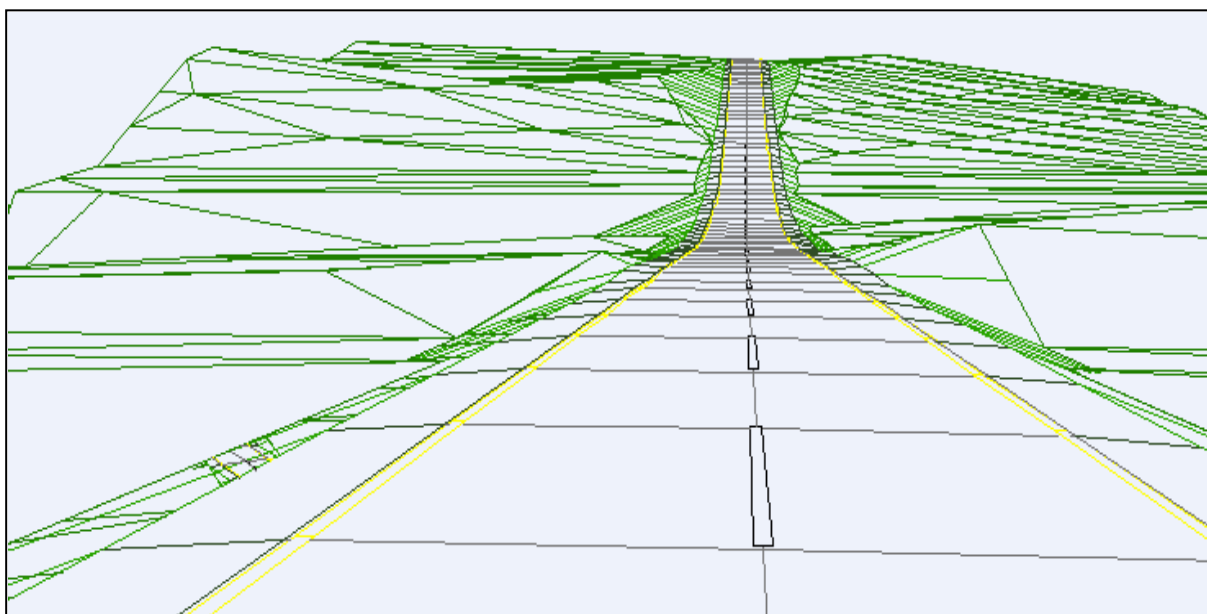
Zaokrožitve nivelete, ki so položene na horizontalne krivine (približno na enakih odsekih), v splošnem vzbujajo prijeten videz in zmanjšajo število odsekov z omejeno pregledno razdaljo (ponavadi so horizontalni zavoji daljši od vertikalnih zaokrožitev). Na drugi strani pa nenehne spremembe v niveleti, ki niso usklajene s horizontalnimi zaokrožitvami, povzročajo vrsto grbin (jam), ki jih voznik med vožnjo le težko opazi.

- DOSLEDNOST

Uporabljati je potrebno enakomerne linije s postopnimi spremembami, skladno s tipom ceste in karakteristikami terena, izogibamo pa se trasi s številnimi prekinitvami in kratkimi dolžinami tangent.



Slika 14: Podaljšanje vertikalnih zaokrožitvev



Slika 15 : Uporaba minimalnih elementov nivelete

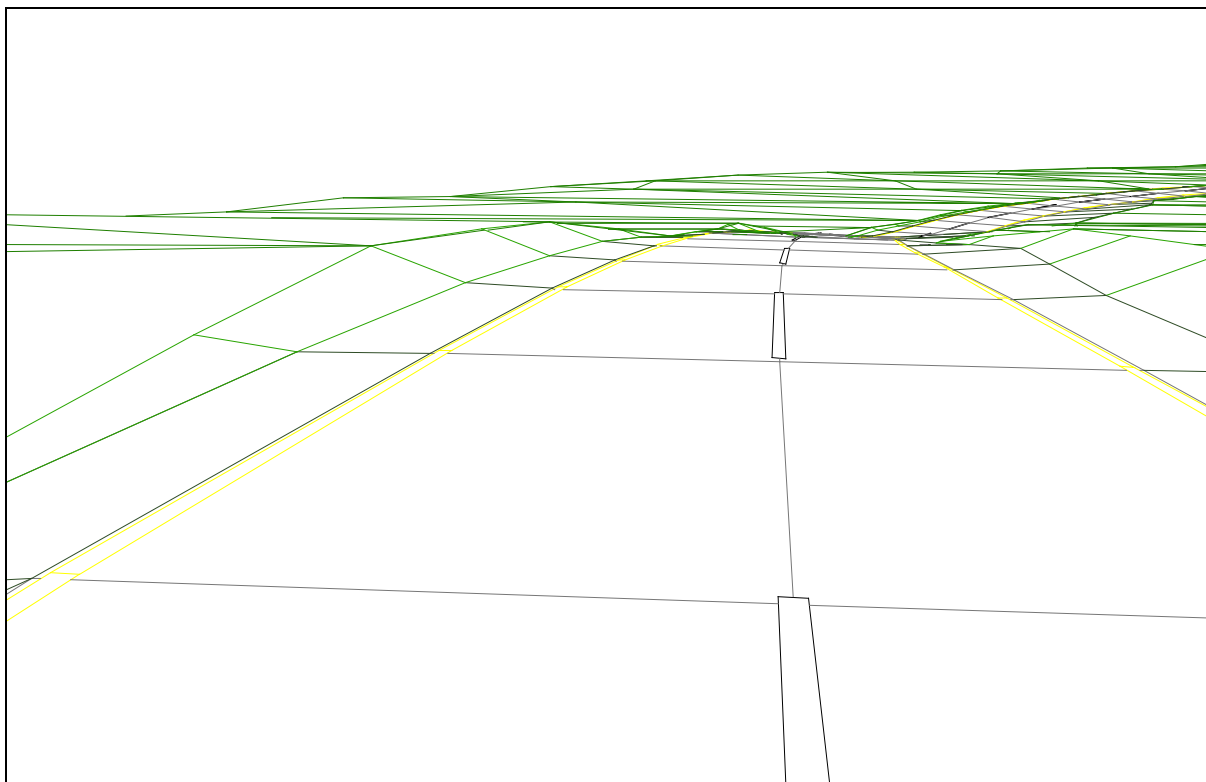
- USKLADITEV Z NARAVNIMI MOŽNOSTMI

Višinski potek naj bo primerno usklajen s topografijo terena in prednostmi(koristmi), ki jih tak teren nudi. Cestni rob naj bo razviden in prilagojen naravnim oziroma umetnim modelom odvodnjavanja. Še posebej je to pomembno v neravni-gričevnati pokrajini.

- VALOVIT PROFIL (OBLIKA TOBOGANA)

Valovitemu profilu se izogibamo, še posebej tam, kjer je horizontalni potek sorazmerno prem. Tak tip profila planiramo v interesu ekonomičnosti investicije, v estetskem smislu pa je

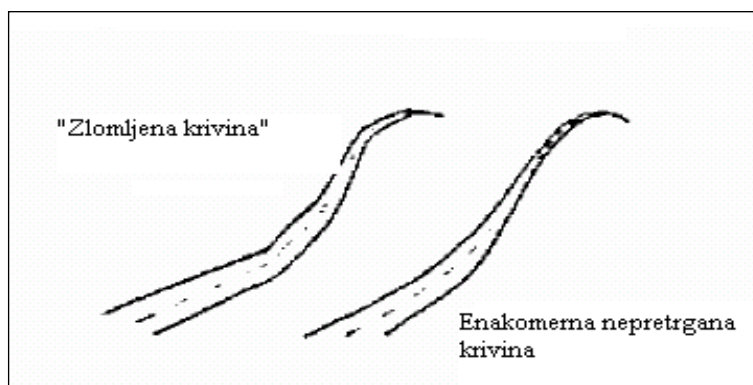
nezaželen in nevaren. Z namenom, da se mu izognemo vključimo v načrtovanje trase horizontalno ukrivljenost in nagibe, ki potrebujejo večje poglobitve (vkope) oziroma višje nasipe.



Slika 16 : Valovit profil – »oblika tobogana«

- ZLOMLJENE KRIVINE

Tak tip trase predstavljajo dve zaporedni konveksni ali konkavni krivini, ločeni s kratko premo in se jim je potrebno izogniti. Posebej opazne in neprijetne za pogled so zlomljene krivine pri konkavnih zaokrožitvah, ki predstavljajo nevarnost, predvsem na cestah z ločenimi pasovi. Bolj priporočljivo je uporabljati eno dolgo zaokrožitev. Na regionalnih cestah vsaka razdalja, krajša kot 500 m med temenskimi točkami zahteva posebno pozornost in natančnejšo študijo. V primeru, da je izvedba zlomljene krivine neizbežna, je ustrezna dolžina tangente med dvema zaokrožitvama vsaj 120 m.



Slika 17: Primer »zlomljene« zaokrožitve in »enakomerne-nepretrgane« zaokrožitve
(Vir: <http://www.sddot.com/pe/roaddesign/docs/rdmanual/rdmch06.pdf/> (4.3.2006))

- DOLGI NAGIBI

Pri izvedbi dolgih nagibov (vzponov) je priporočljivo uporabiti strmejši nagib pri vznožju in položnejši pri vrhu. Smiselno je tudi, da daljši vzpon prekinemo s kratkimi intervali položnejšega nagiba. Dolžina nagiba pomembno vpliva na funkcije prometnega toka.

- KONKAVNE VERTIKALNE ZAOKROŽITVE

Izogibamo se jih, če ni zagotovljeno primerno odvodnjavanje, kadar trasa poteka v vkopih. Da se izognemo problemom, ki nastanejo pri odvodnjavanju na mostovih, najnižjo točko konkavne vertikalne zaokrožitve ne umeščamo na most. Skladnost horizontalnega in vertikalnega poteka trase zahteva, da ostrih zavojev v tlorisu ne vpeljujemo zraven ali na dno izrazitih konkavnih zaokrožitev v niveleti, prav tako jih ne smemo locirati ob vznožje strmih nagibov, ker je tam vozna hitrost pogosto višja, kar pogosto vodi do nevarnih situacij, posledično tudi do trčenj, posebej ponoči in na spolzkem, poledenem vozišču. Rešitev je večji radij horizontalne zaokrožitve, ki povzroči, da se zaokrožitev začne prej.

- KONVEKSNE VERTIKALNE ZAOKROŽITVE

Horizontalnih zaokrožitev ne lociramo na vrh izrazitih konveksnih vertikalnih zaokrožitev. To je neprijetno, ker voznik ne zazna spremembe v horizontalnem vodenju trase, problem pa je še izrazitejši pri nočni vožnji. Odpravimo ga tako, da horizontalni potek trase vodi niveleto, to pomeni, da so horizontalni zavoji daljši kot vertikalne zaokrožitve, ali če uporabljamo projektne vrednosti, ki presegajo minimalne.

- PREHITEVALNA PREGLEDNA RAZDALJA

Kadar se pojavi potreba po pogostem prehitevanju, kar posledično zahteva višji procent prehitevalne pregledne razdalje, je pomembno zagotoviti daljše preme odseke, ki omogočajo zadostno preglednost za prehitevanje.

- KRIŽIŠČA

Na območju križišč naj bosta horizontalni potek ceste in niveleta čim bolj ravna in položna (nagibi naj ne presežejo vrednosti 4%), da zagotovimo traso, ki zagotavlja zadostno pregledno razdaljo in nagibe, ki omogočajo upočasnitev, ustavljanje in obračanje.

- CESTE Z LOČENIMI PASOVI

Na cestah z ločenimi pasovi s širokim srednjim-vmesnim pasom, je prednostno zagotoviti neodvisno vodenje trase za oba pasova ceste. Kjer kapaciteta prometa opravičuje ločena pasova in tam kjer je teren hribovit, neodvisno vodenje trase pogosto izboljša projekt.



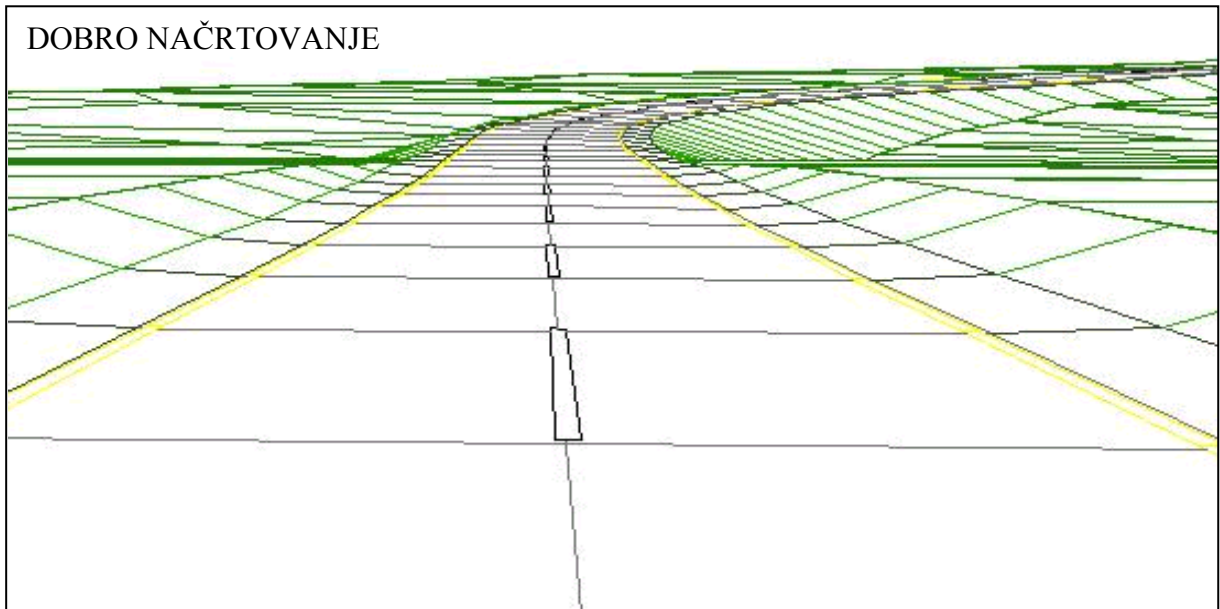
Slika 18: Vzporedno vodenje trase



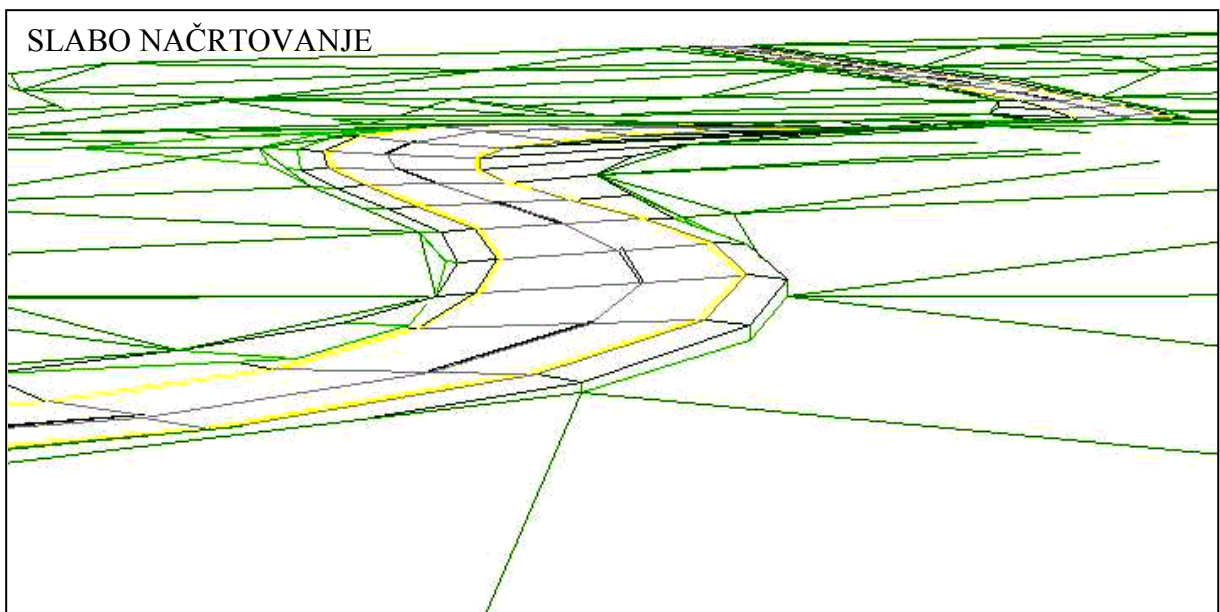
Slika 19: Neodvisno vodenje trase

- VPLIV OKOLJA

Višinski potek trase je potrebno primerno koordinirati z vplivi okolja, tako da varnost na cesti ni v nobenem primeru ogrožena.



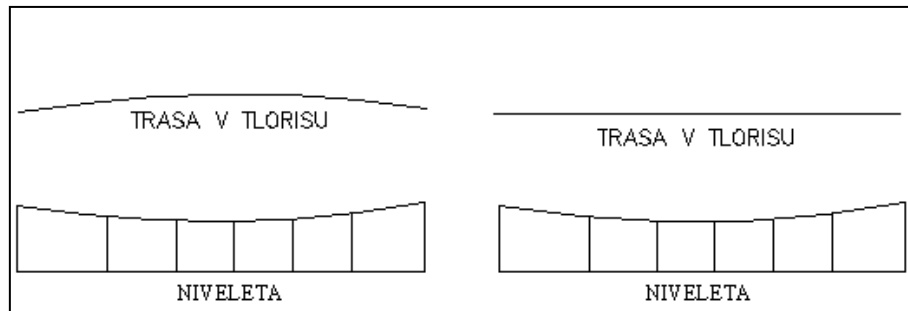
Slika 20: Primerna skladnost med elementi horizontalnega vodenja trase in konkavnimi zaokrožitvami



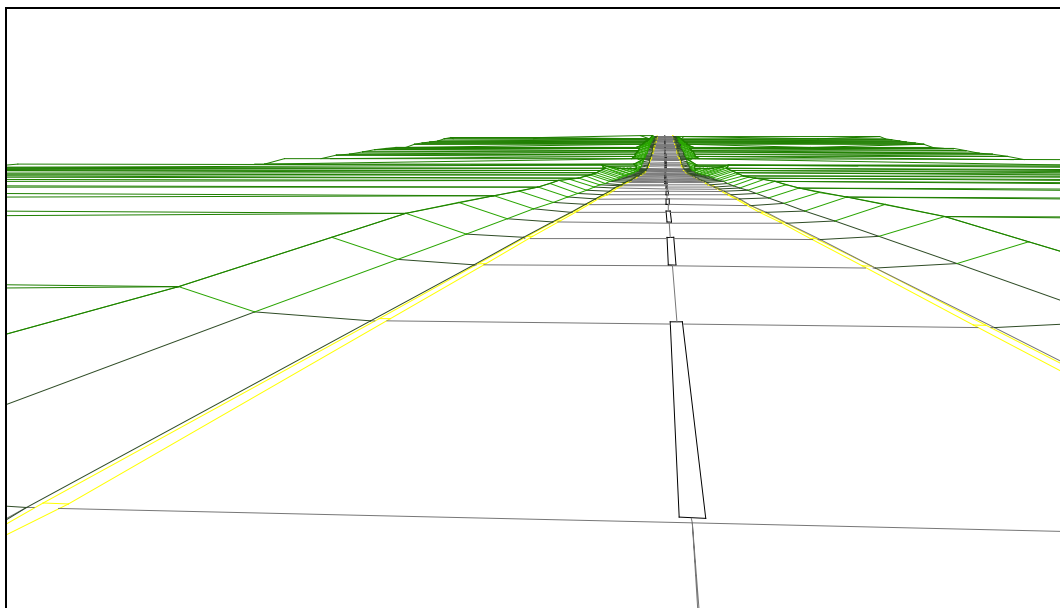
Slika 21: Neprimerna skladnost – vertikalne in horizontalne zaokrožitve niso usklajene, uporabljene so minimalne vrednosti

2.3 Vpliv elementov nivelete na estetiko cestne trase

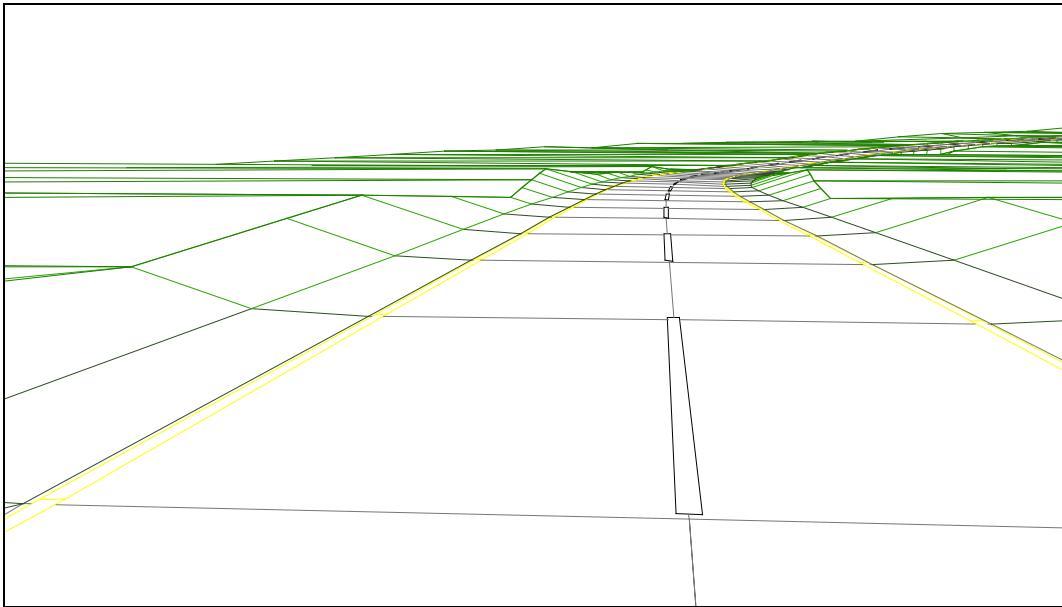
- Estetika cestne trase se bistveno izboljša, če konkavne vertikalne zaokrožitve lociramo znotraj horizontalne krivine in ne na premih odsekih ceste v bližini začetka horizontalne krivine.



Slika 22: Uporaba konkavnih vertikalnih zaokrožitev

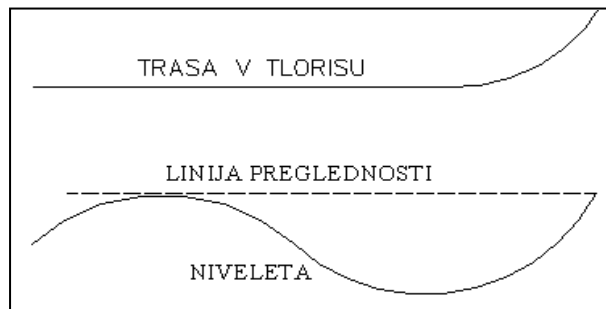


Slika 23: Uporaba konkavnih vertikalnih zaokrožitev v premi

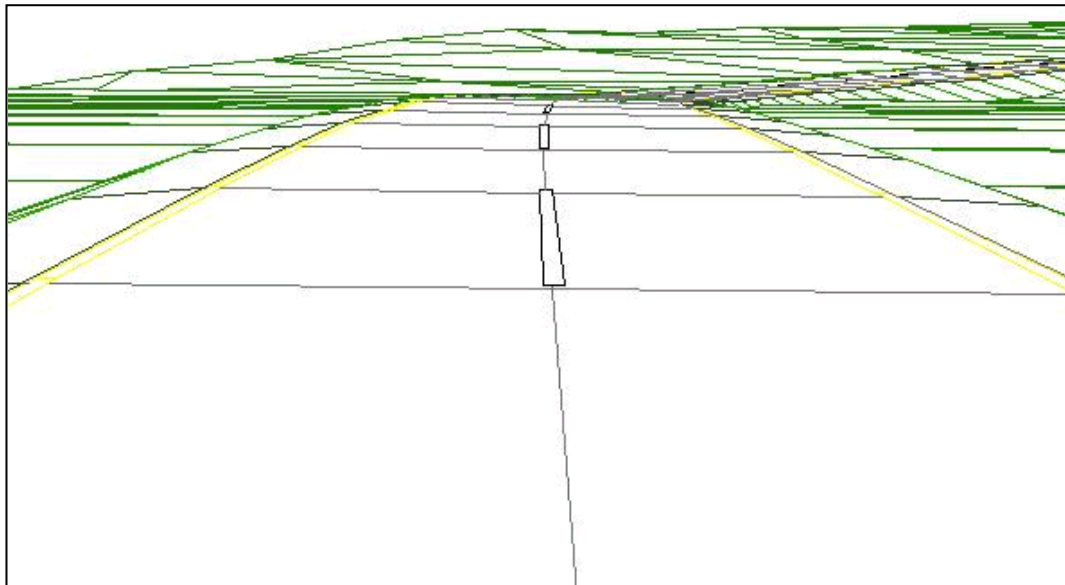


Slika 24: Uporaba konkavnih vertikalnih zaokrožitvev v horizontalni krivini

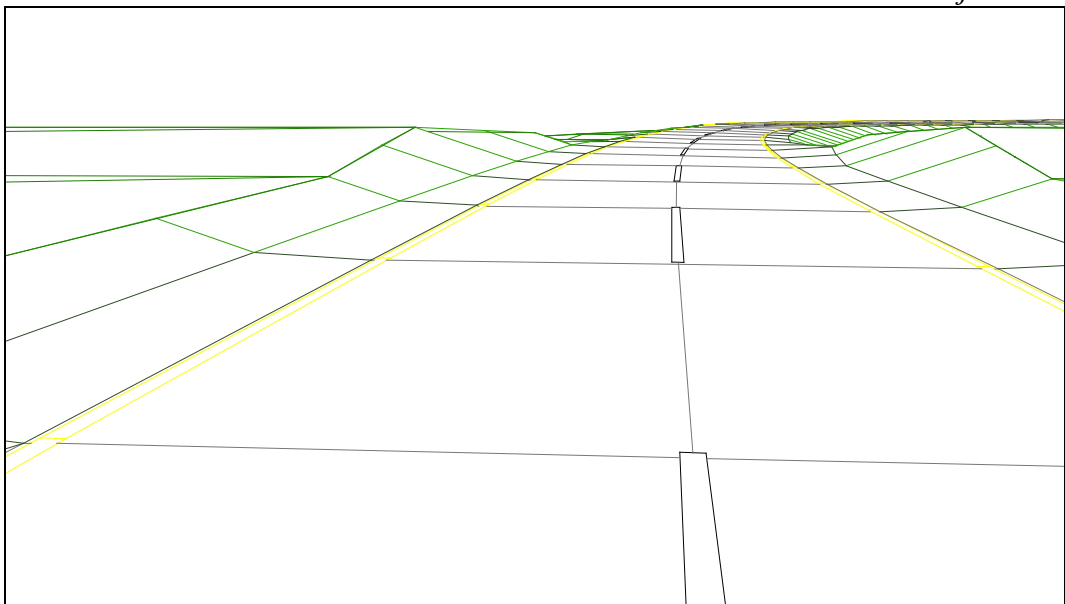
- Kratke vertikalne zaokrožitve znotraj dolgih horizontalnih krivin ustvarjajo slab estetski učinek, prav tako kot kratek prem odsek med sosednjima konkavnima ali konveksnima vertikalnima zaokrožitvama.
- Do učinka optične nepovezanosti pride, kadar je začetek zavoja v tlorisu zakrit z konveksno vertikalno zaokrožitvijo, medtem ko je nadaljevanje ceste vidno v daljavi.



Slika 25: Učinek optične nepovezanosti

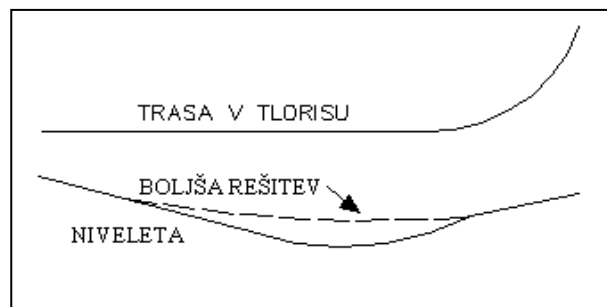


Slika 26: Začetek horizontalne krivine skrit za konveksno zaokrožitvijo

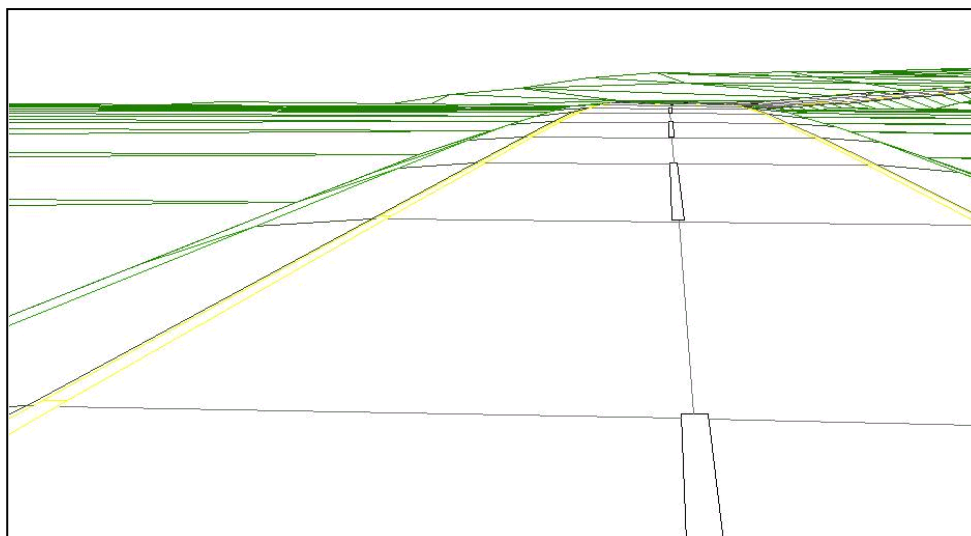


Slika 27: Konkavno zaokrožitev odstranimo z izvedbo nasipa

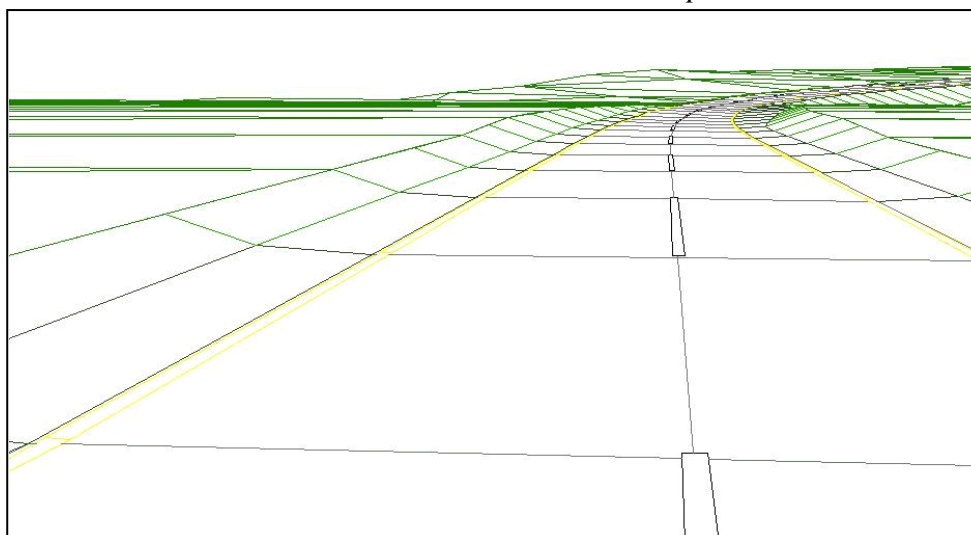
- Tam, kjer je to možno, namesto kratkih uporabljamo dolge konkavne zaokrožitve, ker zagotavljajo vizualno povezanost trase.



Slika 28: Povezanost trase

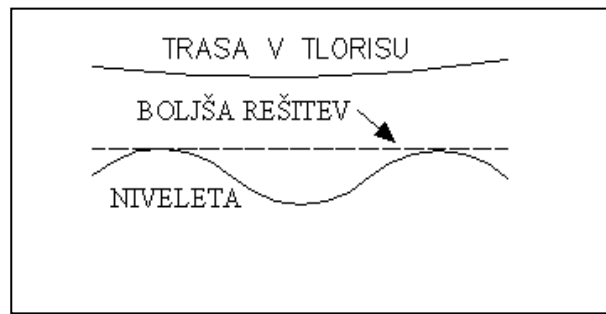


Slika 29: Kratka konveksna in konkavna zaokrožitev pred horizontalno krivino

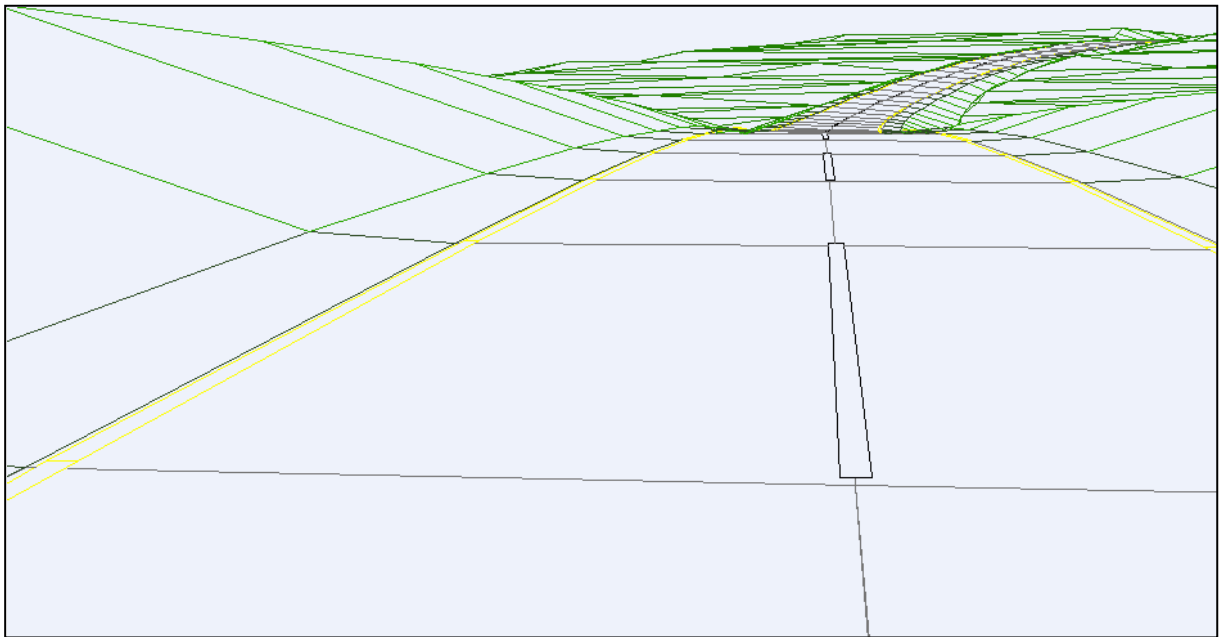


Slika 30: Dolga konkavna zaokrožitev spojena v horizontalno krivino

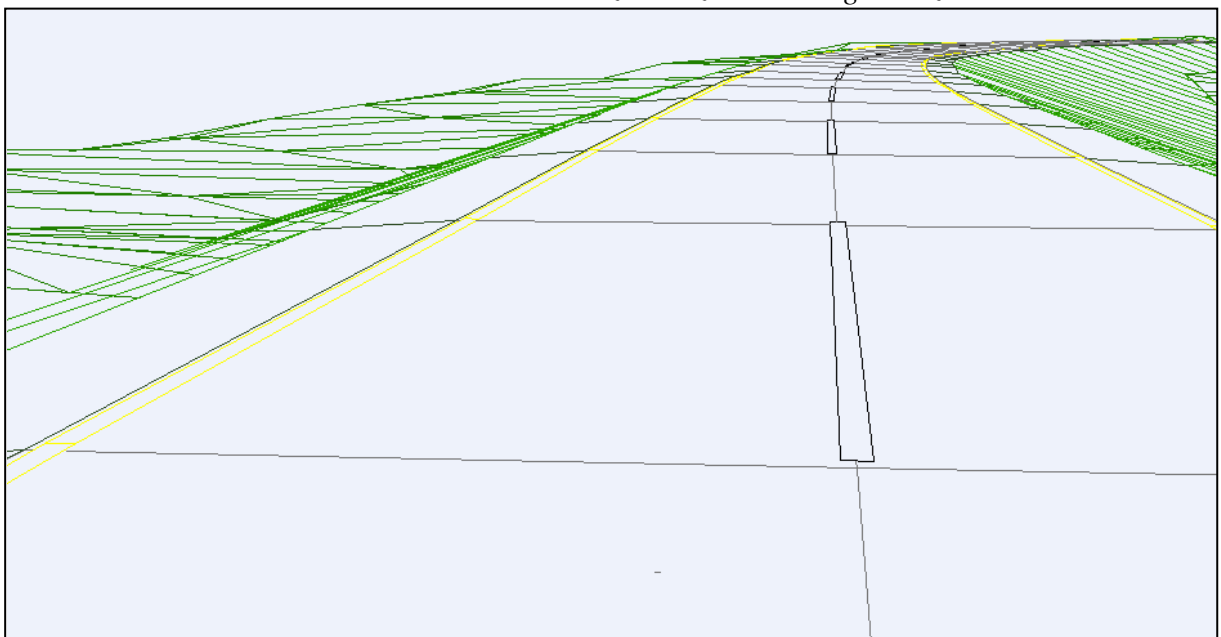
- Kratkim konveksnim in konkavnim vertikalnim zaokrožitvam se izogibamo na območju, kjer potekajo daljše krivine v tlorisu. Glavna naloga projektanta je ohranjanje konstantnega nagiba, tudi če ima to za posledico večje stroške. Horizontalne krivine na koncu dolge preme lahko izgledajo bolj ostre kot so v resnici. V takih situacijah je priporočljivo uporabiti večje radije od minimalno predpisanih.



Slika 31: Primer uporabe minimalnih dolžin zaokrožitve in izboljšana rešitev

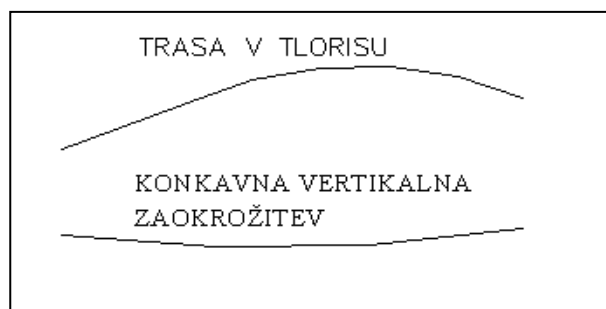


Slika 32: Kratke konkavne in konveksne zaokrožitve na dolgi horizontalni krivini

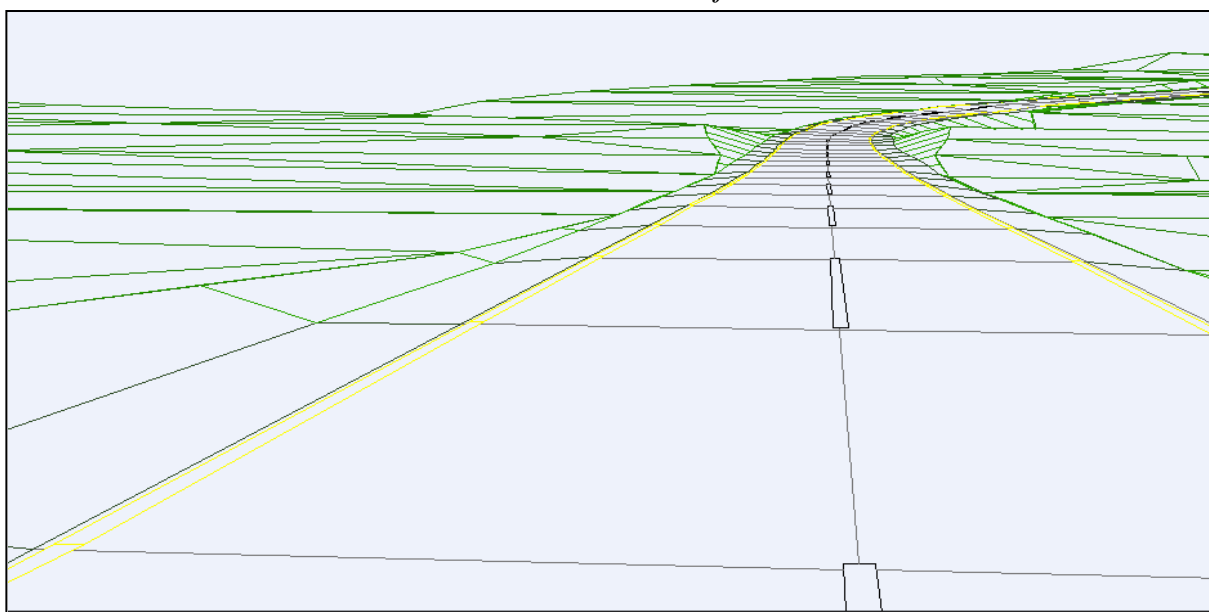


Slika 33: Odstranitev konkavne vertikalne zaokrožitve z izvedbo nasipa

- Estetsko izredno slab videz trase predstavlja primer, ko se horizontalna krivina začne v ali ob sredini konkavne vertikalne zaokrožitve.

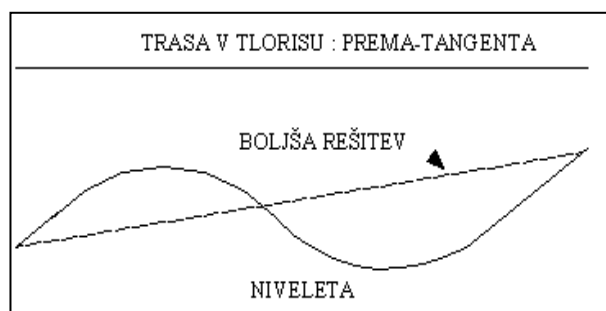


Slika 34 : Primer slabega vodenja trase: začetek horizontalne krivine sovpada s konkavno vertikalno zaokrožitvijo

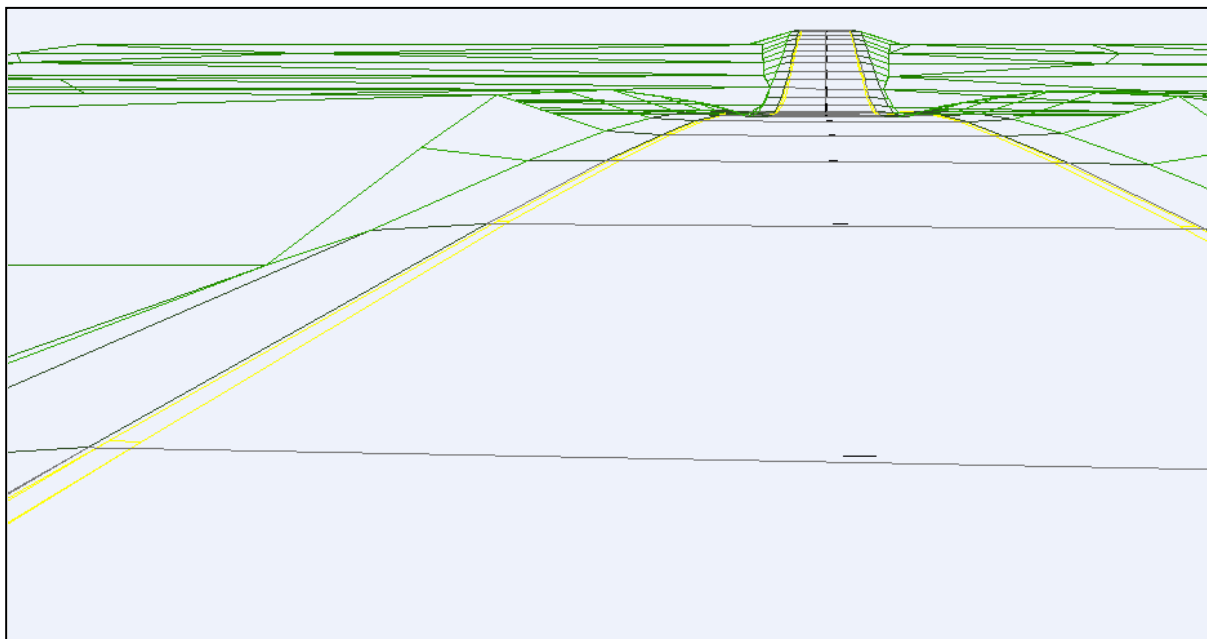


Slika 35 : Horizontalna zaokrožitev daje videz ostrega kota

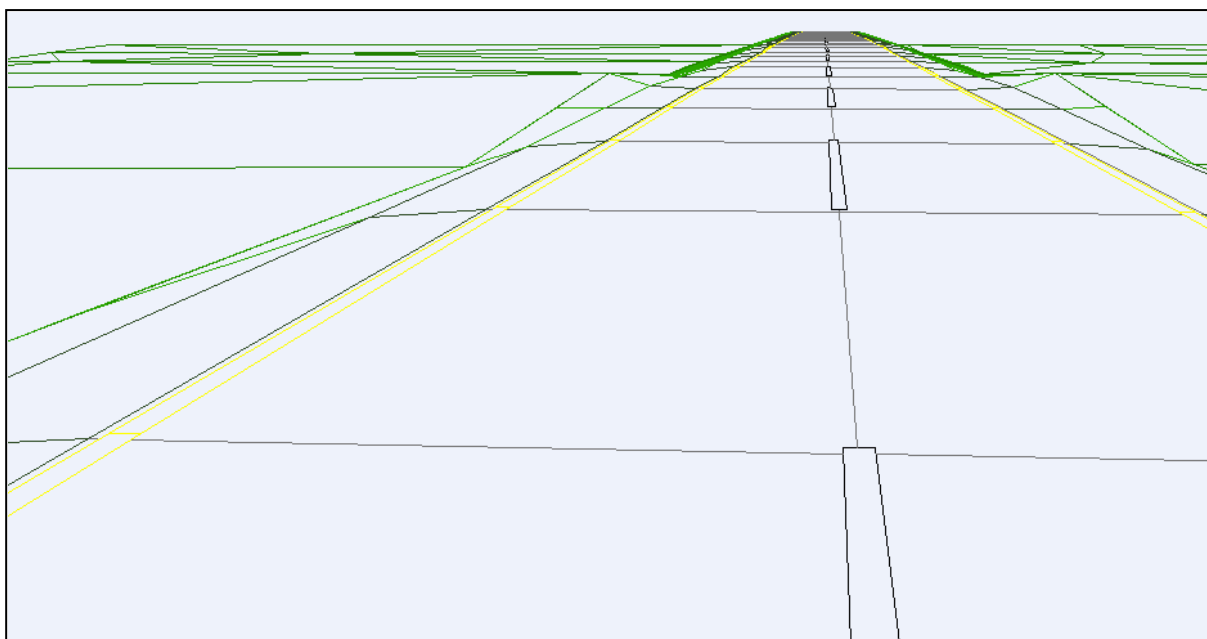
- Pri načrtovanju trase ceste se je potrebno izogibati »vijuganju« na sicer dolgih enoličnih naklonih, ohranjati je potrebno konstanten nagib. Dviganje in spuščanje trase, zaradi zmanjšanja stroškov zemeljskih del, ima za posledico nezaželene učinke na trasi.



Slika 36 : Nagib nivelete in prema v tlorisu

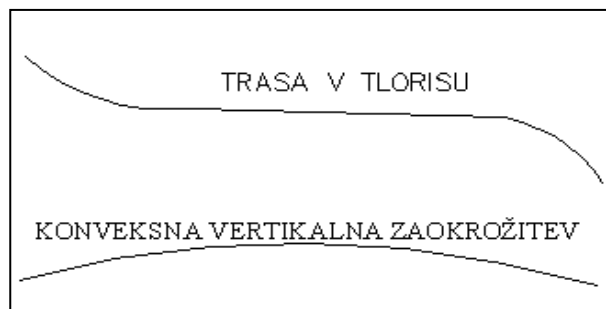


Slika 37 : Dviganje in spuščanje trase – valovanje



Slika 38 : Ohranjanje konstantnega nagiba

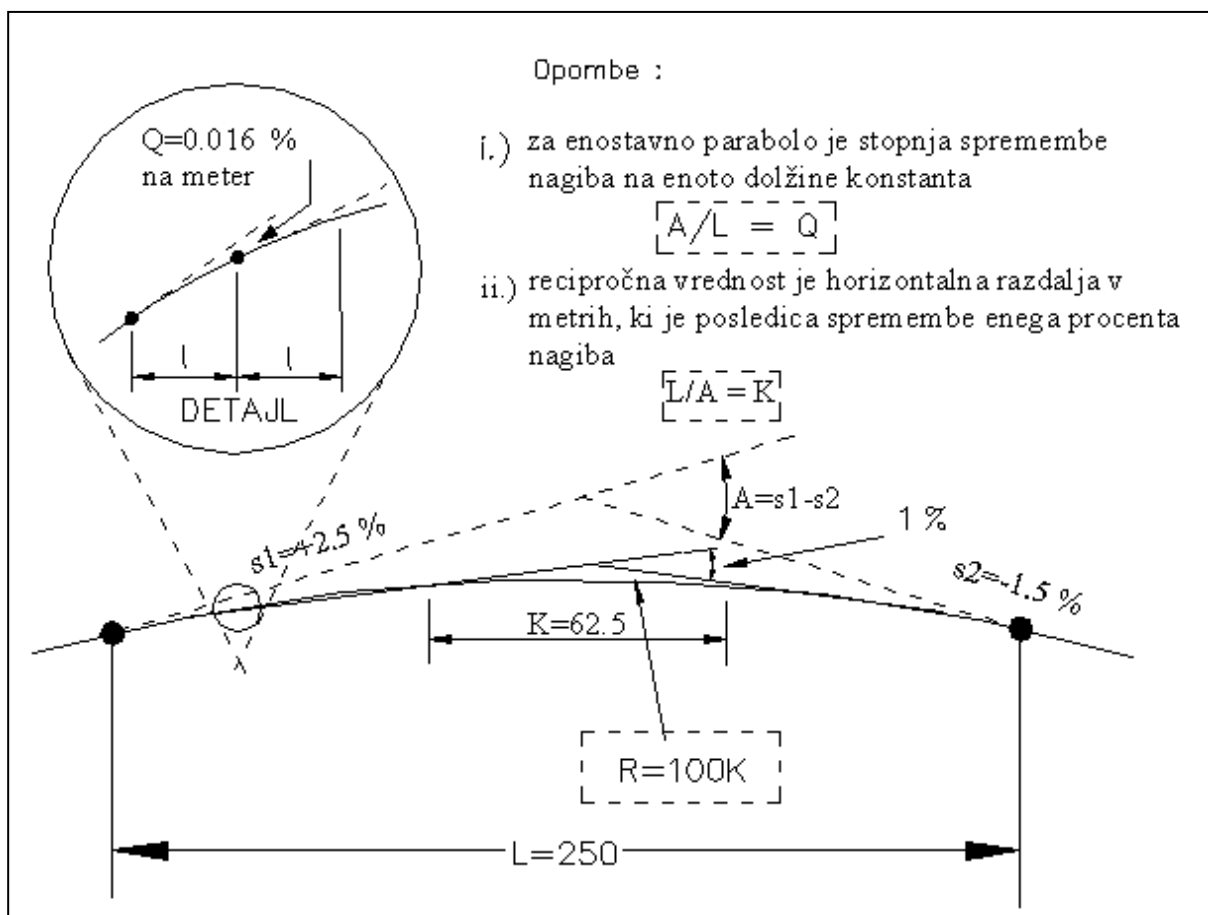
- Kratke tangente med dvema horizontalnima zaokrožitvama sovpadajo s konveksno vertikalno zaokrožitvijo. Ta kombinacija ima precej pomanjkljivosti;
- Obračanje horizontalne zaokrožitve v področju konveksne vertikalne zaokrožitve povzroči, da je naslednja horizontalna zaokrožitev manj vidna.
- Tangenta je prekratka za izvedbo prehoda nadvišanja v krivini.



Slika 39: Kratke tangente med dvema horizontalnima zaokrožitvama sovpadajo s konveksno vertikalno zaokrožitvijo

3 VPLIV KOEFICIENTA »K« NA ELEMENTE NIVELETE

3.1 Pomen koeficienta K



Slika 40: Koncept vrednosti faktorja K z detajli
 (State highway Geometric design, section 5:January 2002)

$$Q = \frac{A}{L} = \frac{4,0}{250} = 0,016 \frac{\%}{meter} \quad (7)$$

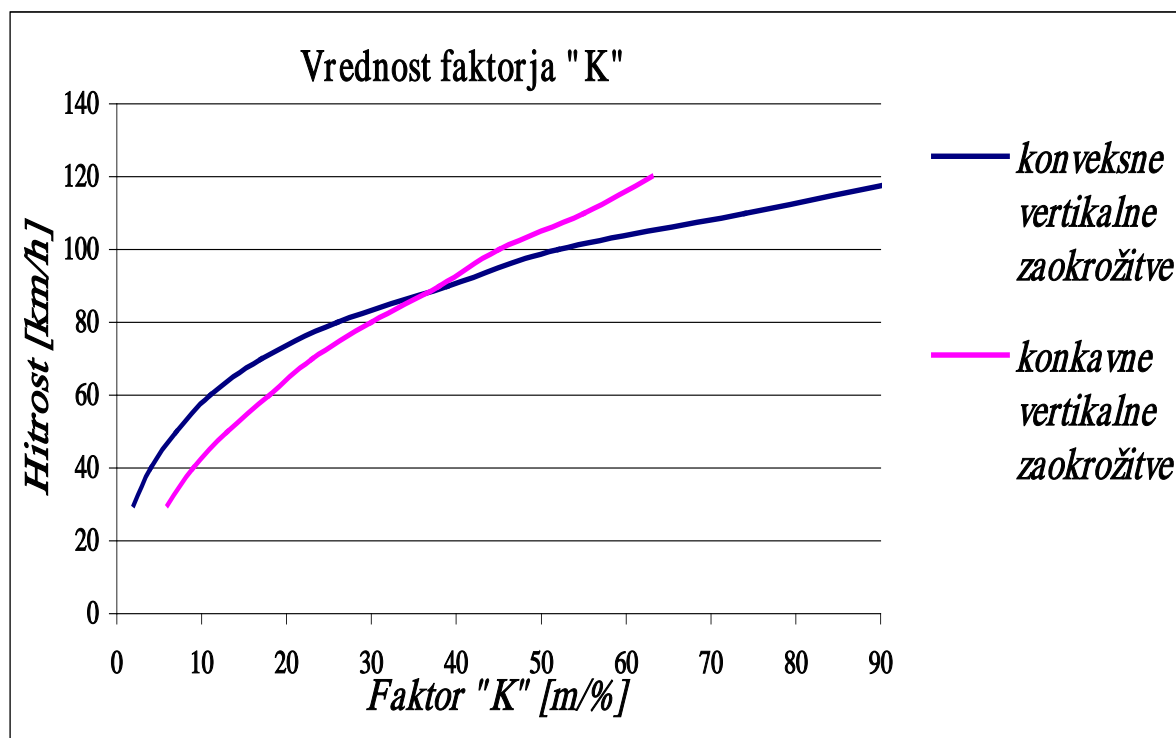
$$K = \frac{L}{A} = \frac{250}{4,0} = 62,5 \frac{meter}{\%} \quad (8)$$

$$L = K * A = 62,5 * 4,0 = 250m \quad (9)$$

$$R = 100K = 6250m \quad (10)$$

Uporablamo ga za določitev dolžine vertikalne zaokrožitve. Pri krožnem loku je stopnja spreminjanja naklona zaporednih točk na krožnici konstantna za enak prirastek horizontalne razdalje. Stopnjo spreminjanja naklona zaporednih točk na krožnici merimo z razmerjem algebraične razlike med nagiboma (A) in dolžino zaokrožitve (L). Ta količnik $A/L = Q$ [%/m]

nam poda procent spremembe nagiba za horizontalno razdaljo zaokrožitve. Recipročna vrednost tega količnika L/A predstavlja horizontalno razdaljo, ki je potrebna, da premagamo 1% spremembo naklona vzdolž zaokrožitve. Izraz L/A imenujemo $K[m/\%]$ in je uporaben za določitev minimalne dolžine vertikalne zaokrožitve. Temelji na geometrijskih pogojih in predpostavkah vsake pregledne razdalje, rezultati, dobljeni po formulah, predstavljajo vrednosti K za vsako projektno hitrost. Koncept vrednosti K je enostavna in ustrezna metoda določevanja velikosti vertikalne zaokrožitve. Vsaki projektni hitrosti in različnim zahtevam pregledne razdalje pripada posamezna vrednost K , ki definira dolžino zaokrožitve za vse vrednosti A . Za potrebe dimenzioniranja vertikalnih zaokrožitve uporabimo krožnico z radijem R , ki zelo natančno aproksimira parabolično zaokrožitve s povezavo $R=100K$.



Grafikon 1: Vrednost faktorja K glede na projektno hitrost

3.1.1 Izračun radija konveksne zaokrožitve s pomočjo koeficienta »K«

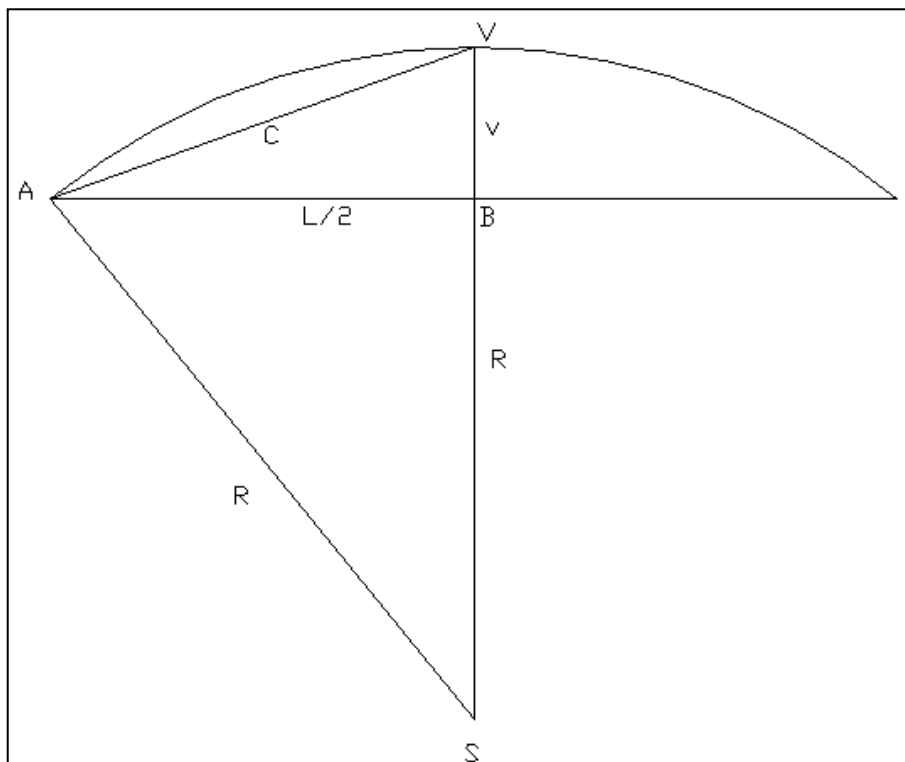
Izhodišče je, da poznamo faktor »K«, posledično poznamo tudi horizontalno razdaljo, ki je potrebna, da premagamo 1% spremembo naklona vzdolž zaokrožitve. Ta podatek nam služi, da izračunamo dolžino stranice $VB=v$.

$$K = 62,5 \Rightarrow Q = 0,016 \Rightarrow v = 2,5m \quad (11)$$

Uporabimo Pitagorov izrek in dobimo dolžino stranice c .

$$c = \sqrt{v^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} = \sqrt{2,5^2 + \left(\frac{250}{2}\right)^2} = 125,025m \quad (12)$$

Na osnovi slike 40a predpostavimo (ker sta dolžini stranic $C \gg v$ in $L/2 \gg v$), da sta trikotnika ΔABV in ΔSVA podobna. Določimo razmerje stranic in izračunamo R .



Slika 40a: Razmerje stranic podobnih trikotnikov

$$\frac{C}{v} = \frac{R}{C} \Rightarrow R = \frac{C^2}{v} = \frac{125,025^2}{2,5} = 6252,5m \quad (13)$$

3.2 Konkavne vertikalne zaokrožitve

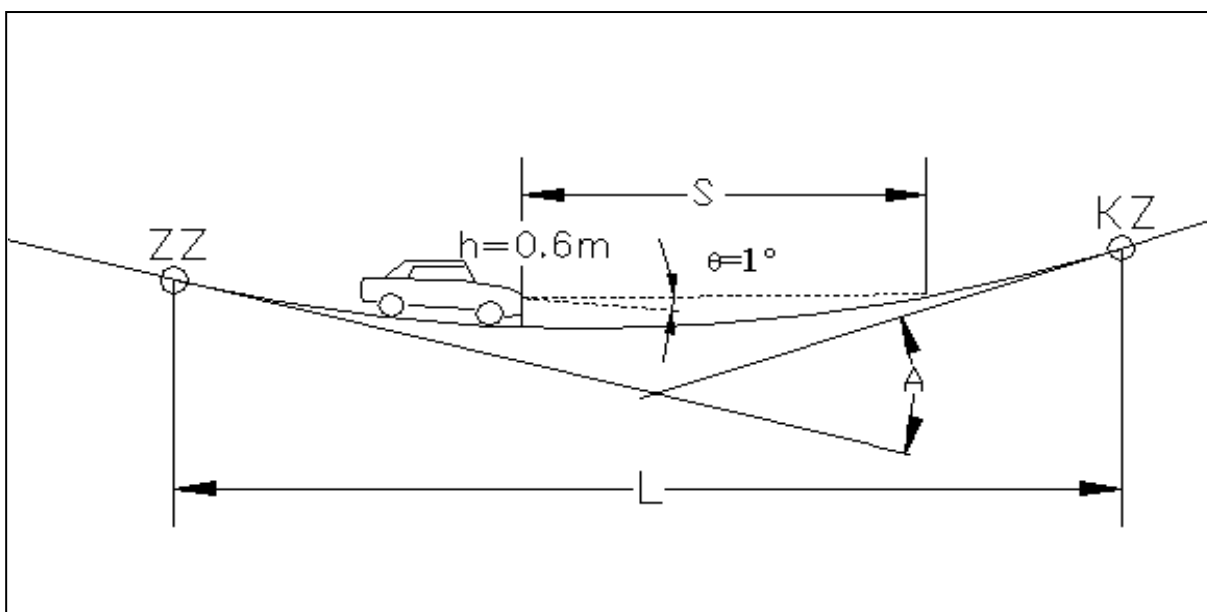
Povezujejo padajoče nagibe, tako da formirajo obliko udrtosti. Način projektiranja je podoben kot pri konveksnih vertikalnih zaokrožitvah, pregledna razdalja je parameter, ki najbolj vpliva na dolžino zaokrožitve. Posebno pozornost je potrebno nameniti udobju voznika. Konkavne vertikalne zaokrožitve so določene s pozitivno spremembo v nagibu, kar pomeni, da vozilom, ki potujejo čez tako zaokrožitev, narašča pospešek. Zaradi inercije voznikovega telesa ta dvig pospeška zaznamo kot sunek navzdol. Kadar sta ta to zaznavanje sunka in gravitacije v kombinaciji, zaznamo neudobnost. Estetski pogoji in voznikovo udobje je zadovoljivo, če je zaokrožitev projektirana z upoštevanjem zadovoljive pregledne razdalje. Voznikovo udobje zahteva dolžino zaokrožitve, ki je približno 50% dolžina zaokrožitve, ki jo zahteva pregledna razdalja. Problem je lahko tudi odvodnjavanje pri dolgih blagih zaokrožitvah, ali če je konkava znotraj vkopa.

Imajo obliko parabole. Pri projektiranju je potrebno omogočiti, da žarometi vozila razsvetlijo cestno površino za dano razdaljo S . Pri tem je lahko svetlobni žarek obrnjen za 1° navzgor od podolžne osi vozila. Te predpostavke temeljijo na osnovnih enačbah za določitev minimalne dolžine konkavnih vertikalnih zaokrožitev.

$$L = \frac{AS^2}{200(h_3 + S(\tan 1^\circ))} = \frac{AS^2}{200h_3 + 3.5S} \quad (14)$$

$$K = \frac{S^2}{200h_3 + 3.5S} \quad (15)$$

$$L = KA \quad (16)$$

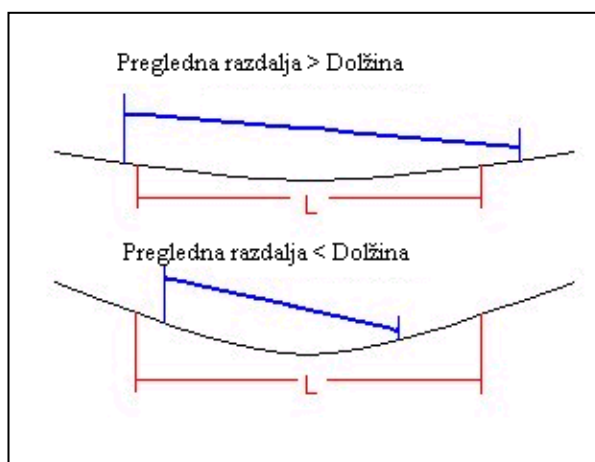


Slika 41: Elementi konkavne vertikalne zaokrožitve

Veličina	Simbol	Osnovna enota
Dolžina vertikalne zaokrožitve	L	Meter [m]
Razlika naklonov sosednjih tangent	A	Procent [%]
Pregledna razdalja	S	Meter [m]
Višina žarometov nad voziščem [0,6m]	h_3	Meter [m]
Horizontalna razdalja, ki je potrebna, da premagamo 1% naklona	K	Faktor »K« [m/%]
Svetlobni žarek žarometov nad vodoravno linijo	φ	Kot [°]

Dolžina vertikalne zaokrožitve je odvisna od »A« za določene krivulje, od izbrane pregledne razdalje in od višine žarometov. Izbrane vrednosti K so določene na osnovi zgornjih enačb in na podlagi trditve, da je pregledna razdalja manjša kot dolžina vertikalne zaokrožitve. Brez prevelikih napak pa jih lahko upoštevamo tudi na delih, kjer je pregledna razdalja večja kot dolžina vertikalne zaokrožitve in nam literatura podaja naslednjo enačbo (enačba 17).

$$L = 2 * S - \frac{200(h_3 + S * tg\varphi)}{A} \quad (17)$$



Slika 42: Razmerje pregledna razdalja - dolžina

3.2.1 Minimalne dolžine konkavne vertikalne zaokrožitve

Za projektne hitrosti 100km/h ali manj naj bo minimalna dolžina konkavne vertikalne zaokrožitve $0.6V$, pri čemer je V-projektna hitrost v km/h. Za hitrosti večje kot 100km/h dolžino določimo iz pogoja $L=1V$. Pri estetskem vodenju trase je minimalna dolžina odvisna

od voznikovega pogleda na cesto. Daljši kot je del trase, ki jo voznik vidi pred seboj, večje vertikalne zaokrožitve je potrebno uporabiti.

3.3.2 Vrednost koeficienta K glede na pogoj zaustavitvene pregledne razdalje

Zaustavitvena preglednost je najkrajša dolžina vizure, na kateri voznik opazi oviro, da bi lahko do nje popolnoma zaustavil vozilo v pogojih dopustne vrednosti koeficienta drsnega trenja. Odvisna je torej od začetne hitrosti vozila, zaznavnega in reakcijskega časa voznika in od koeficienta trenja med pnevmatikami in cestiščem za prevladujoče pogoje. Je vsota zavorne razdalje in razdalje, prepotovane med zavornim reakcijskim časom. Je dolžina ceste, ki jo voznik vidi pred seboj in zagotavlja, da lahko na njej varno ustavi, če je to potrebno. Reakcijski čas je čas, ki ga voznik potrebuje, da zazna nevarnost na cesti in tudi primerno reagira. Temelji na opazovanjih in raziskavah, večina voznikov pa lahko reagira v manj kot 2,5 s. (ta vrednost velja za starejše voznike na območju križišč, drugače pa je trajanje reakcijskega časa krajše).

Primer : premagujemo horizontalno zaokrožitev na cesti, ko na cesti 85m pred seboj opazimo oviro. Če je razdalja, ki jo prepotujemo v reakcijskem času 45m in zavorna razdalja 50 m, nam trčenja ne bo uspelo preprečiti. Torej v primeru, da ne bi uporabili minimalne horizontalne zaokrožitve , bi oviro opazili na razdalji 100 m pred seboj, kar pomeni, da bi se zaustavili 5m pred oviro. Pravilno dimenzionirane ceste zagotavljajo minimalno zaustavitveno razdaljo v vsaki točki vzdolž njene dolžine.

Enačbe za izračun zaustavitvene pregledne razdalje:

$$ZPR = R_t \cdot v + \frac{v^2}{2 \cdot g(d + 0,01 \cdot s)} \quad (18)$$

- prvi del enačbe $R_t \cdot v$ predstavlja razdaljo prepotovano med reakcijskim časom
- drugi del enačbe pa predstavlja razdaljo prepotovano med zavornim časom od projektne hitrosti do zaustavitve vozila.

$$ZPR = R_t \cdot v + \frac{v^2}{2 \cdot g(d + 0,01 \cdot s)} = \frac{R_t \cdot V}{3,6} + \frac{V^2}{254(d + 0,01 \cdot s)} \quad (19)$$

Veličina	Simbol	Osnovna enota
Zaustavitvena pregledna razdalja	ZPR	meter [m]
Koeficient trenja med pnevmatikami in voziščem	d	brez dimenzijska vrednost
Gravitacijski pospešek	g	[9,8m/s ²]
Reakcijski čas voznika	R _t	sekunda [s]
Začetna hitrost vozila	V	[km/h]
Začetna hitrost vozila	v	[m/s]
Vzdolžni nagib (+)navzgor, (-)navzdol	s	[%]

Da vključimo zaustavitveno pregledno razdaljo v našo nalogo, jo računamo za potujoče vozilo na cesti s projektno hitrostjo in se prepričamo, da je dejanska pregledna razdalja najmanj takšna kot največja zaustavitvena pregledna razdalja.

Tovorna vozila in avtobusi potrebujejo daljšo zavorno razdaljo kot osebni avtomobili, toda njihove zaustavitvene pregledne razdalje v večini primerov niso upoštevane. Višina voznikovega očesa je višje kot pri osebnih avtomobilih in zaradi tega pregledna razdalja narašča. Vozniki teh vozil pa so tudi bolj izkušeni in jih ne moremo primerjati z vozniki osebnih avtomobilov. Iz tega sledi, da se daljša vozila lahko izogibajo oviram, čeprav cesta ni posebej dimenzionirana zanje. Projektant se mora odločiti kdaj daljša vozila potrebujejo dodatno pregledno razdaljo in jo tudi zagotoviti, če je to potrebno.

Preglednica 6: Vrednosti faktorja K za konkavne vertikalne zaokrožitve glede na pogoj zaustavitvene pregledne razdalje
 (Povzeto po: Bureau of design and environment manual. december 2002)

Projektna hitrost (km/h)	Zaustavitvena preglednostna razdalja (m)	Vrednost faktorja K	
		Izračunana (m)	Projektna (m)
50	64	11,9	12
60	83	16,8	17
70	105	22,6	23
80	129	29,1	30
90	156	36,5	37
100	185	44,6	45

3.2.2.1 Vrednosti koeficienta K za osebne avtomobile z upoštevanjem vpliva nagiba

Vrednosti K so izračunane s pomočjo vrednosti za $h_3=0.6\text{m}$ in S = zaustavitvena preglednostna razdalja iz osnovne enačbe. Zaradi velikega vpliva konveksnih vertikalnih

zaokrožitev na estetiko cestne trase, uporabljamo večje razdalje kot so minimalno predpisane, da zagotovimo bolj prijetno estetsko vodenje trase.

Za določeno hitrost je varna razdalja zaustavitvene preglednosti na padcih večja kot na vodoravnih delih ceste. Za konkavne vertikalne zaokrožitve je potrebno preučiti vpliv velikosti naklona samo kadar je zaokrožitev med dvema padcema ali če je padec večji kot – 3%. Naslednja tabela prikazuje vrednosti K z upoštevanjem vpliva nagiba.

Preglednica 7: Vrednosti faktorja K za konkavne vertikalne zaokrožitve glede na pogoj zaustavitvene pregledne razdalje z upoštevanjem nagiba nivelete
(Povzeto po: Bureau of design and environment manual, december 2002)

Projektna hitrost	[3%]	[4%]	[5%]	[6%]	[7%]	[8%]	[9%]	[10%]
50	13	13	13	14	14	14	15	15
60	18	19	19	20	20	20	21	22
70	24	25	26	26	27	28	28	29
80	32	32	33	34	35	36	26	38
90	39	40	41	42	43	45	46	47
100	48	49	50	51	53	54	56	58
110	57	58	60	61	63	65	67	69

3.2.3 Vrednost koeficienta K glede na kriterij udobnosti

Nenadna sprememba vertikalnega pospeška pri ljudeh povzroča neudobnost. Vertikalni pospešek postane kritičen pri projektiranju ostrih, strmih konkavnih zaokrožitev, ker povečajo efekt gravitacijskih in centrifugalnih sil, ki delujejo na voznika. Vertikalni pospešek povzroča prehod iz enega nagiba v drug nagib in je pri normalnem projektiranju v splošnem omejen z maksimalno vrednostjo 0.05g, kjer je g gravitacijski pospešek (9.8 m/s^2). Tam, kjer so hitrosti manjše in v križiščih, lahko, če je to potrebno uporabimo vertikalni pospešek 0.10g. Kadar prevozimo pot vertikalne zaokrožitve s konstantno hitrostjo, lahko vertikalno komponento pospeška pravokotno (normalno) na zaokrožitev izračunamo po enačbi :

- a vertikalna komponenta radialnega pospeška (m/s^2);
- V hitrost (km/h);
- razmerje vertikalne zaokrožitve (m/1% sprememba nagiba).

Vrednosti K za specifične projektne hitrosti in vertikalni pospeški so prikazani v preglednici 8 na strani 40. Ta kriterij je subjektiven, vrednosti pa so zaokrožene.

Preglednica 8: Vrednosti faktorja K in minimalnega radija za konkavne vertikalne zaokrožitve glede na pogoj udobnosti
 (Povzeto po: Bureau of design and environment manual. december 2002)

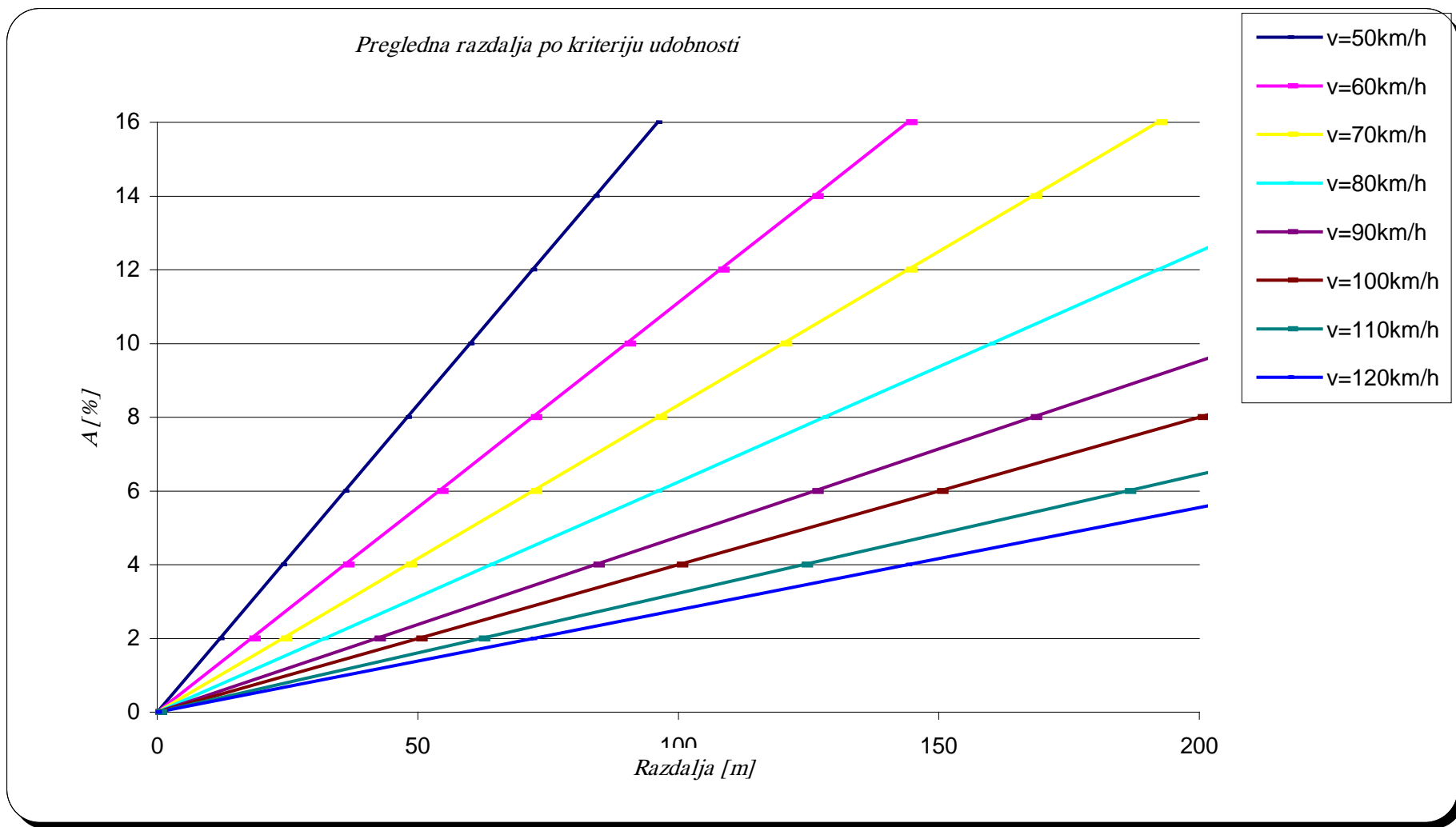
Projektna hitrost [km/h]	Vrednosti K		Minimalni radij [m]	
	a=0.05g	a=0.10g	a=0.05g	a=0.10g
40	3	1,5		
50	4	2	390	200
60	6	3	570	280
70	8	4	770	390
80	10	5	1000	500
90	13	7	1300	640
100	16	8	1600	790
110	19	10	1900	950

Dolžino zaokrožitve izračunamo po enačbi kriterija udobnosti:

$$L = \frac{AV^2}{395} \quad (20)$$

Veličina	Simbol	Osnovna enota
Dolžina vertikalne zaokrožitve	L	meter [m]
Razlika naklonov sosednjih tangent	A	Procent [%]
Projektna hitrost	V	[km/h]
Gravitacijski (težnostni) pospešek	g	[m/s ²]

Grafikon 2 : Pregledna razdalja po kriteriju udobnosti



3.2.3.1 Minimalni radij konkavne vertikalne zaokrožitve po kriteriju udobnosti

Za določitev minimalnega radija uporabimo enačbo :

$$R = \frac{V^2}{12,96a} \quad (21)$$

Veličina	Simbol	Osnovna enota
Radij konkavne vertikalne zaokrožitve	R	meter [m]
Projektna hitrost	V	[km/h]
vertikalni pospešek	a	[m/s ²]

Vrednosti minimalnega radija za določeno hitrost in vrednost vertikalnega pospeška so podane v preglednici 8 na strani 40

(Vir: Road Planning and Design Manual. Chapter 12. Verical Alignment. july 2002

<http://www.mainroads.qld.gov.au/>)

Ker gre za subjektivni kriterij, so vrednosti zaokrožene in niso upoštevane kot natančen pogoj.

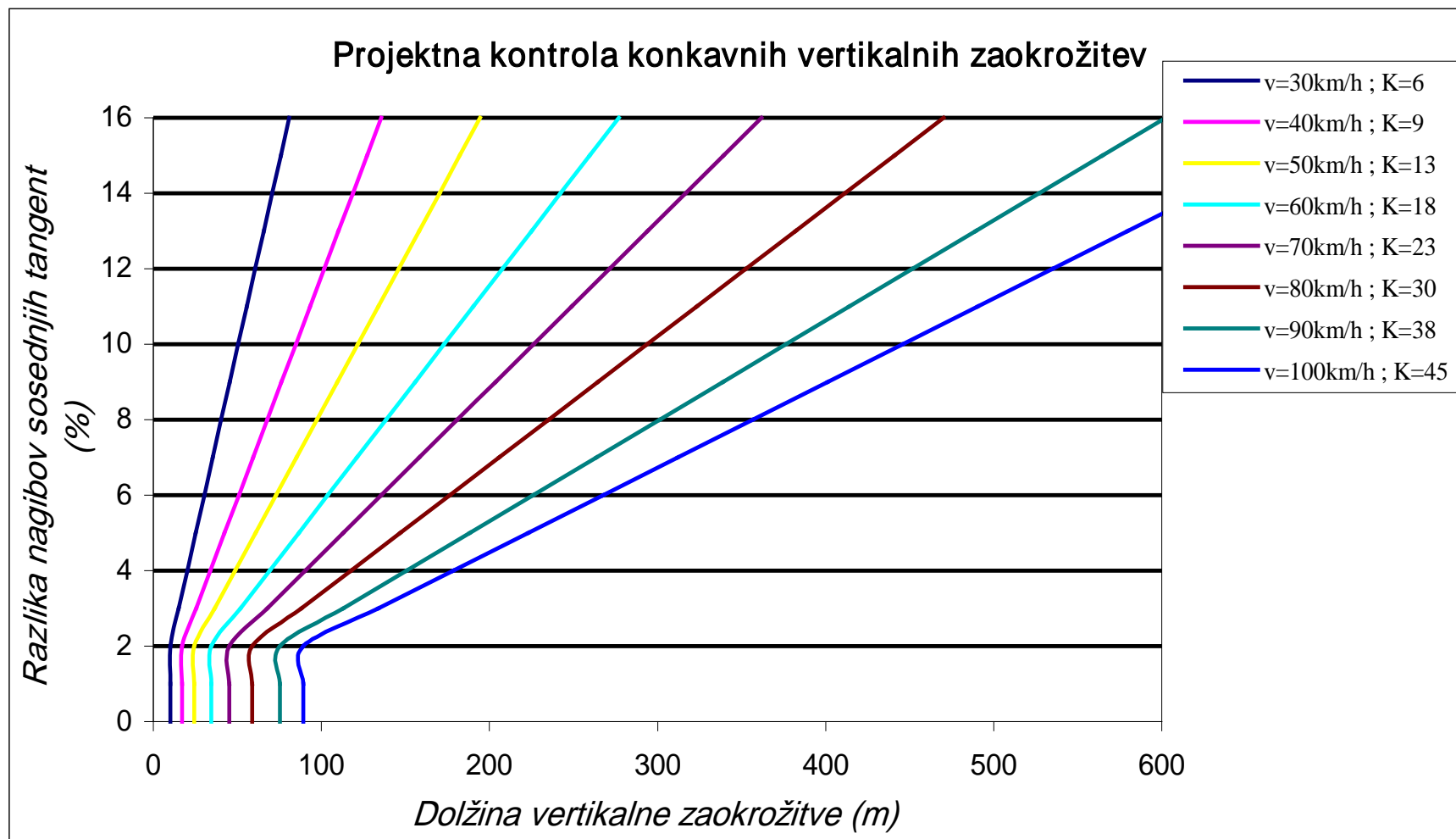
3.2.3.2 Dolžina vertikalne zaokrožitve pri podvozih

Dolžine konkavnih zaokrožitev, uporabljene pri podvozih, morajo biti izvedene tako, da podvoz ne ovira voznikove preglednosti. Izračunamo jo po naslednji enačbi:

$$L = \frac{AS^2}{80(C-1,3)} \quad (22)$$

Veličina	Simbol	Osnovna enota
Dolžina vertikalne zaokrožitve	L	Meter [m]
Razlika naklonov sosednjih tangent	A	Procent [%]
Prosti prometni profil za podvoze	C	Meter [m]
Pregledna razdalja	S	Meter [m]

Grafikon 3: Dolžina konkavne vertikalne zaokrožitve
(Podatki iz legende so privzeti iz Boreau of local roads&streets; Jan 2006)



3.3 Konveksne vertikalne zaokrožitve

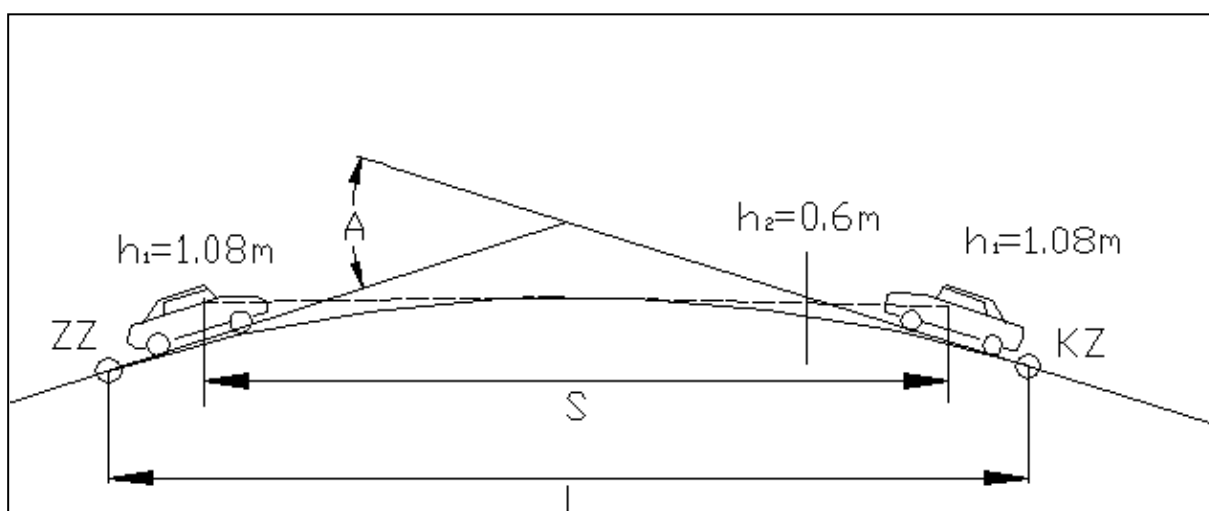
Povezujejo nagnjene odseke ceste, tako da tvorijo obliko grebena in so relativno enostavne za projektiranje. Zaustavitvena pregledna razdalja je najbolj pogosto uporabljena kontrolna preglednost, če želimo, pa lahko upoštevamo tudi prehitevalno preglednost, vendar le ta zahteva dolge in blage zaokrožitve, ki pa so drage in težje izvedljive. Imajo obliko parabole.

Osnovne enačbe za določitev dolžine vertikalne zaokrožitve :

$$L = \frac{AS^2}{200(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2} \quad (23)$$

$$K = \frac{S^2}{200(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2} \quad (24)$$

$$L = KA \quad (25)$$



Slika 43: Elementi konveksne vertikalne zaokrožitve

Veličina	Simbol	Osnovna enota
Dolžina vertikalne zaokrožitve	L	Meter [m]
Razlika naklonov sosednjih tangent	A	Procent [%]
Pregledna razdalja	S	Meter [m]
Višina očesa nad voziščem [1,080m]	h_1	Meter [m]
Višina predmeta nad voziščem [0,6m]	h_3	Meter [m]
Horizontalna razdalja, ki je potrebna, da premagamo 1% naklona	K	Faktor »K« [m/%]
Svetlobni žarek žarometov nad vodoravno linijo	φ	Kot [°]

Dolžina vertikalne zaokrožitve je odvisna od »A« in temelji na izbrani pregledni razdalji, višini oči in višini predmeta. Enačbe in vrednosti parametra K izhajajo iz trditve, da je dolžina pregledne razdalje krajša kot dolžina zaokrožitve. Brez prevelikih napak pa jih lahko uporabljamo tudi v primerih, kjer je pregledna razdalja večja kot dolžina zaokrožitve in nam literatura sicer podaja naslednjo formulo:

3.3.1 Minimalne dolžine konveksne vertikalne zaokrožitve

Za projektne hitrosti 100km/h ali manj naj bo minimalna dolžina konveksne vertikalne zaokrožitve $0.6V$, pri čemer je V -projektna hitrost v km/h. Za hitrosti, večje kot 100km/h, dolžino določimo iz pogoja $L=1V$. Te vrednosti se uporabljajo ne glede na izračunano dolžino vertikalne zaokrožitve. Za estetsko oblikovano zaokrožitev je predlagana dolžina na glavnih cestah 300m

$$L_{\min} = 2S - \frac{200(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}{A} \quad (26)$$

3.3.2 Vrednost koeficienta K glede na pogoj zaustavitvene pregledne razdalje

Osnova pri projektiranju konveksnih vertikalnih zaokrožitev je zagotoviti, da je minimalna zaustavitvena preglednostna razdalja zadostna preko celotne zaokrožitve. Naslednje točke govorijo o uporabi vrednosti K za različne pogoje :

Preglednica 9: Vrednosti faktorja K za konveksne vertikalne zaokrožitve glede na pogoj zaustavitvene pregledne razdalje

(Povzet po: Boreau of design and environment manual; december 2002)

Projektna hitrost (km/h)	Zaustavitvena preglednostna razdalja (m)	Vrednost faktorja K	
		Izračunana (m)	Projektna (m)
50	65	6,4	7
60	85	11	11
70	105	16,8	17
80	130	25,7	26
90	160	38,9	39
100	185	52	52
110	216	70,9	71

-Maksimalna vrednost faktorja K zaradi pogojev odvodnjavanja na glavnih cestah z robniki je 51.

3.3.2.1 Vrednost koeficienta K za osebne avtomobile glede na stopnjo nagiba

Spodnja tabela nam podaja vrednosti K za osebne avtomobile glede na stopnjo naklona. Te vrednosti ne veljajo tam, kjer je naklon na drugi strani vertikalne zaokrožitve manjši kot 3%. S = zaustavitvena pregledna razdalja v osnovnih enačbah za konveksno vertikalno zaokrožitev. Vrednosti predstavljajo najnižjo sprejemljivo preglednostno razdaljo. Tam, kjer nam finančna sredstva omogočajo, je boljše izbrati večje vrednosti zaustavitvenih preglednih razdalj.

Za določeno hitrost je razdalja zaustavitvene preglednosti na padcih večja kot na vodoravnih delih ceste. Tam, kjer so nakloni na nasprotni strani konkavne vertikalne zaokrožitve večji kot -3% projektiramo dolžino zaokrožitve z uporabo vrednosti K, ki so prilagojene večjim zaustavitvenim razdaljam, ki so posledice padcev. Prilagoditev ni potrebna za naklone manjše kot 3% in za vzpone. Naslednja tabela prikazuje minimalne in zaželene vrednosti faktorja, prilagojene osebnim avtomobilom in prilagojene naklonu. Na vsak način je spodnje podatke nujno upoštevati pri naklonih večjih kot 3%.

Preglednica 10: Vrednosti faktorja K za konveksne vertikalne zaokrožitve, glede na pogoj zaustavitvene pregledne razdalje z upoštevanjem nagiba nivelete

(Bureau of design and environment manual; December 2002)

Projektna hitrost	[3%]	[4%]	[5%]	[6%]	[7%]	[8%]	[9%]	[10%]
50	7	7	7	8	8	8	9	9
60	12	12	13	13	14	14	15	16
70	19	20	20	21	22	23	24	25
80	29	29	31	32	33	35	36	38
90	41	43	45	46	49	51	54	56
100	58	60	63	66	69	73	76	81

- Vrednosti K so določene na osnovi zaustavitvene preglednostne razdalje uporabljene za projektiranje.
- Za naklone manjše kot 3% uporabimo vrednosti K iz preglednice 9.

Za vmesne vrednosti naklonov uporabimo linearno interpolacijo.

3.3.3 Vrednosti koeficienta K glede na pogoj prehitevalne pregledne razdalje

Na nekaterih odsekih je pri projektiranju konkavnih vertikalnih zaokrožitev primerno zagotoviti prehitevalno preglednost. To je razdalja, ki ju prevozita prehitevajoče in nasproti

vozeče vozilo v času, ki omogoča, da prehitevajoče vozilo opazi situacijo (reakcijski čas), pospeši na prehitevalno hitrost, prehitijo vozilo, ki ga prehiteva in se varno vrne na svoj vozni pas.

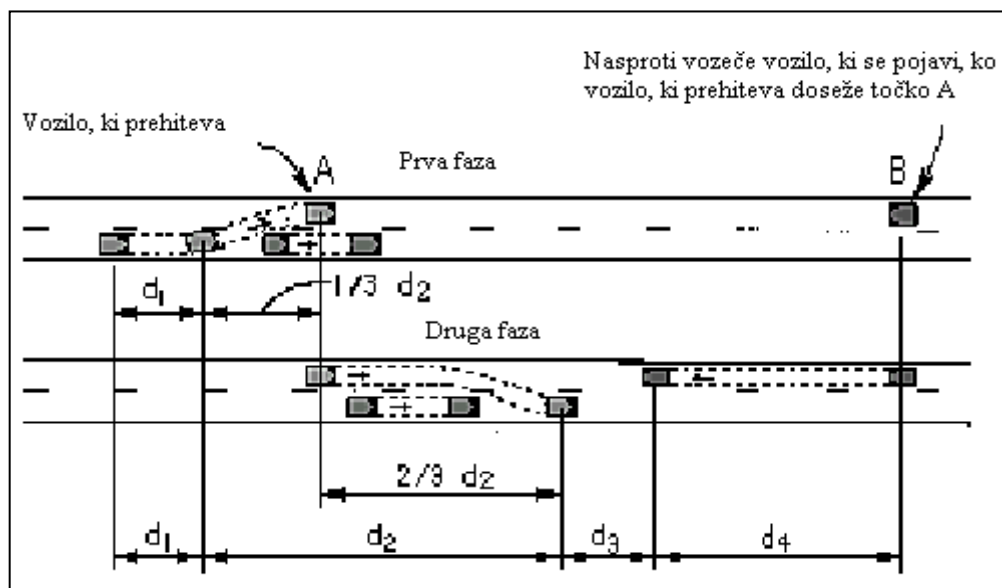
Čas prehitevanja ni najpomembnejši element pri dimenzioniranju avtocest, je pa kritična komponenta pri projektiranju dvopasovnih cest. Kapaciteta take ceste se zelo poveča, če velik procent cestne dolžine omogoča prehitevanje. Na drugi strani pa zagotavljanje zadovoljive prehitevalne preglednosti na večjem delu cestnega odseka pogojuje velike stroške. Bistvo je zagotoviti večini voznikom pregledno razdaljo, ki jim daje občutek varnosti in jim omogoča, da prehitijo počasnejša vozila.

Računanje prehitevalne pregledne razdalje zahteva za podano cesto izpopolnjeno uporabo enostavnega modela. Ta model vključuje tri vozila in temelji na šestih predpostavkah:

- prehitevano vozilo vozi s konstantno hitrostjo ves čas manevra prehitevanja;
- vozilo, ki prehiteva, sledi počasnejšemu vozilu v predel prehitevanja;
- na osnovi vhoda v predel prehitevanja vozilo, ki prehiteva potrebuje nekaj časa, da opazi ali je nasprotni pas prazen in da začne prehitevati;
- med vožnjo po levem pasu je povprečna hitrost vozila, ki prehiteva, 15km/h večja kot hitrost prehitevanega vozila;
- vozilo, ki vozi v nasprotni smeri (nasproti vozeče) vozila, ki prehiteva;
- primerna razdalja med nasproti vozečim vozilom in vozilom, ki prehiteva, ko se slednje vrača na desni pas.

Poleg teh predpostavk pa prehitevalno pregledno razdaljo razdelimo na štiri izmerljive dele :

- d_1 razdalja-del, ki ga vozilo, ki namerava prehiteti prevozi med odločitvijo o izvedbi prehitevanja in pospeševanjem do točke poseganja na levi pas;
- d_2 dolžina ceste, ki jo prevozi vozilo, ki prehiteva, medtem ko zaseda levi pas;
- d_3 razdalja med nasproti vozečim vozilom in vozilom, ki prehiteva med vračanjem slednjega na desni pas;
- d_4 razdalja, ki jo prevozi nasproti vozeče vozilo v zadnjih 2/3 poti, ki jih prevozi vozilo, ki prehiteva prevozi na levem pasu.



Slika 44 : Izmerljivi deli prehitevalne pregledne razdalje

Vrednosti K so izračunane s pomočjo vrednosti :

h_1 ...višina očesa nad voziščem = 1,080m;

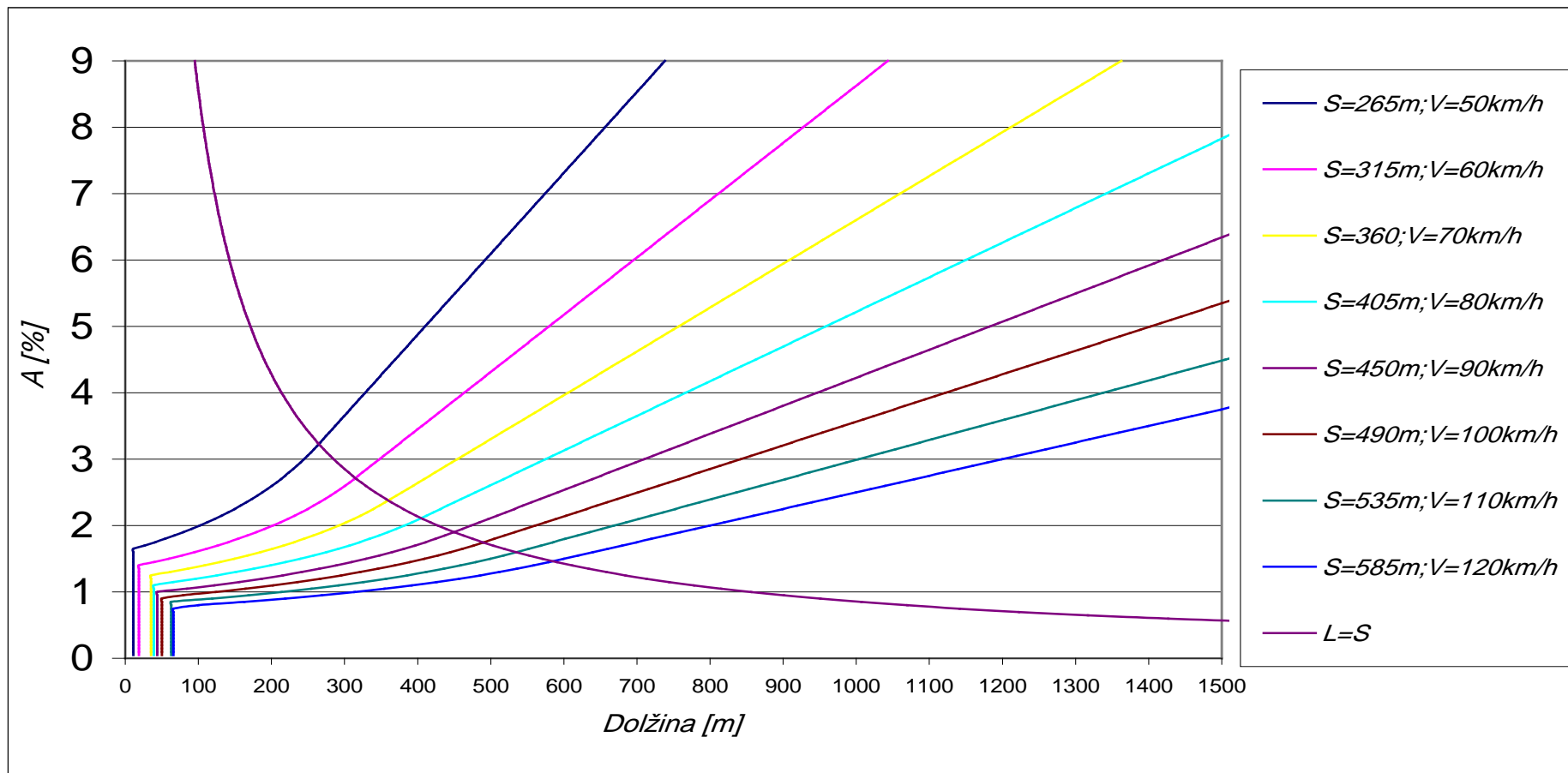
h_2 ...višina predmeta nad voziščem = 0,6m.

Preglednica 11: Vrednosti faktorja K za osebne avtomobile z uporabo prehitevalne preglednosti

Projektna hitrost (km/h)	Prehitevalna pregledna razdalja (m)	Projektna vrednost faktorja K
50	345	138
60	410	195
70	485	272
80	540	338
90	615	738
100	670	520

Grafikon 4: Dolžina konveksne vertikalne zaokrožitve

Podatki iz legende so privzeti iz (Road Design Manual (Metric);October 1999; page 3-4(10))



4 3D - ANIMACIJA CESTNE TRASE Z UPORABO RAZLIČNIH VREDNOSTI FAKTORJA K

Različne variante sem izvajal s programom CESTA, ki omogoča kreiranje projekta in račun elementov cestne trase. Animacijo, ki nam služi za vizualno predstavo trase, pa sam program CESTA ne omogoča, je pa le ta možna z uporabo ACAD-a.

Obravnaval sem traso v premi in horizontalni krivini z uporabo različnih vrednosti faktorja K, za primer konveksne in konkavne vertikalne zaokrožitve. Različne vrednosti faktorja K, ob predpostavki, da je razlika nagibov sosednjih tangent enaka, predstavljajo različne dolžine zaokrožitve za primere konkavnih in konveksnih vertikalnih zaokrožitev.

Vizualni vpliv faktorja K za različne primere je prikazan v spodnjih tabelah in slikah.

Pri izvedbi animacije sem uporabljal nastavitve, ki prikazujejo pogled na cesto kot jo vidi voznik (pogled s ceste):

- korak 10 metrov;
- smerni kot 355° ;
- oddaljenost pogleda 8 metrov;
- kot pogleda 7 metrov;
- maksimalna globina 1000 metrov.

Z namenom raziskati pomen koeficienta K na niveleto ceste sem izvedel štiri enostavne primere animacij. Pri tem sem kombiniral različne elemente ceste:

- horizontalni potek ceste v premi in konveksna vertikalna zaokrožitev;
- horizontalni potek ceste v krivini in konveksna vertikalna zaokrožitev;
- horizontalni potek ceste v premi in konkavna vertikalna zaokrožitev;
- horizontalni potek ceste v krivini in konkavna vertikalna zaokrožitev.

Dolžina izbrane trase je okoli 700m, razlika nagibov sosednjih tangent pa 3.5%.

4.1 Animacija konveksnih vertikalnih zaokrožitev z vrednostjo K=11 in K=95

Izračun posameznih parametrov vertikalne zaokrožitve

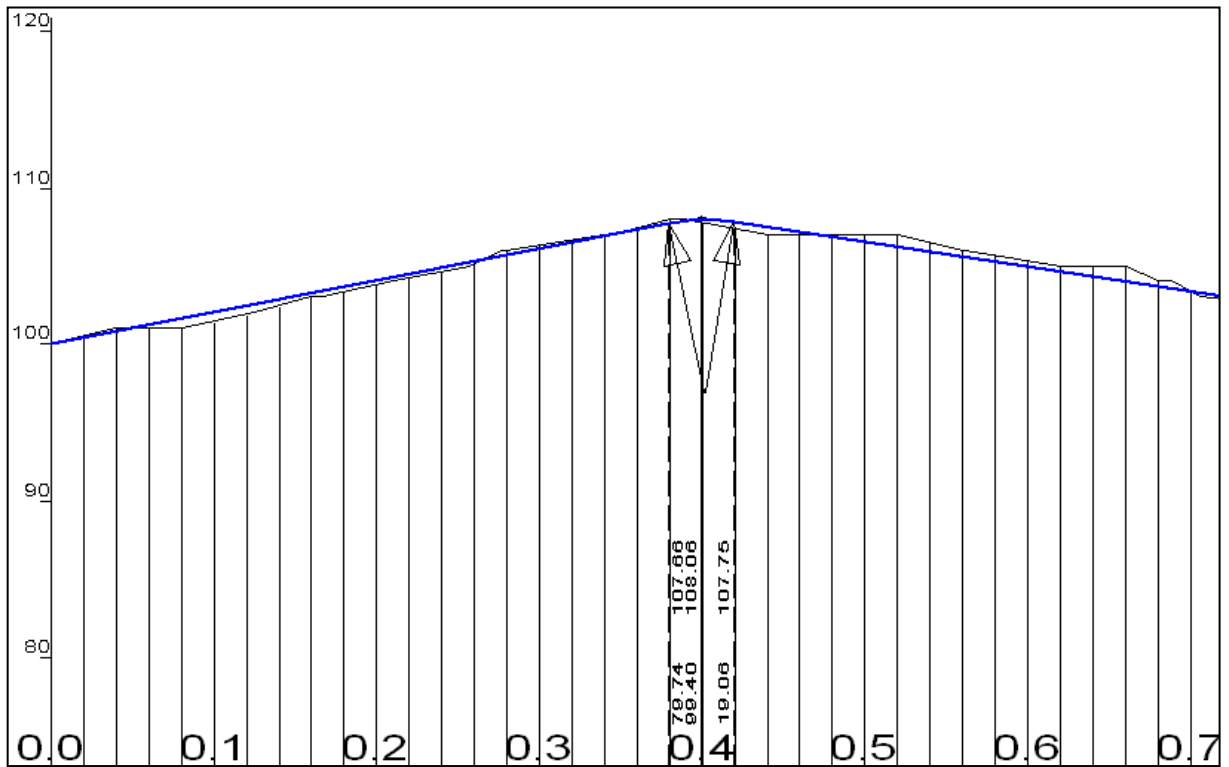
K=95	K=11
$A = s_1 - s_2 = +2 - (-1,5) = 3,5\%$ ⁽²⁷⁾	$A = s_1 - s_2 = +2 - (-1,5) = 3,5\%$ ⁽³²⁾
$L = K * A = 95 * 3,5 = 332,5m$ ⁽²⁸⁾	$L = K * A = 11 * 3,5 = 38,5m$ ⁽³³⁾
$Q = \frac{A}{L} = \frac{3,5}{332,5} = 0,010 \frac{\%}{meter}$ ⁽²⁹⁾	$Q = \frac{A}{L} = \frac{3,5}{38,5} = 0,091 \frac{\%}{meter}$ ⁽³⁴⁾
$K = \frac{L}{A} = \frac{332,5}{3,5} = 95 \frac{meter}{\%}$ ⁽³⁰⁾	$K = \frac{L}{A} = \frac{38,5}{3,5} = 11 \frac{meter}{\%}$ ⁽³⁵⁾
$R \cong 100 * K \cong 9500m$ ⁽³¹⁾	$R \cong 100 * K \cong 1100m$ ⁽³⁷⁾

1. Primerjava parametrov vertikalne zaokrožitve, če uporabimo različne vrednosti faktorja K

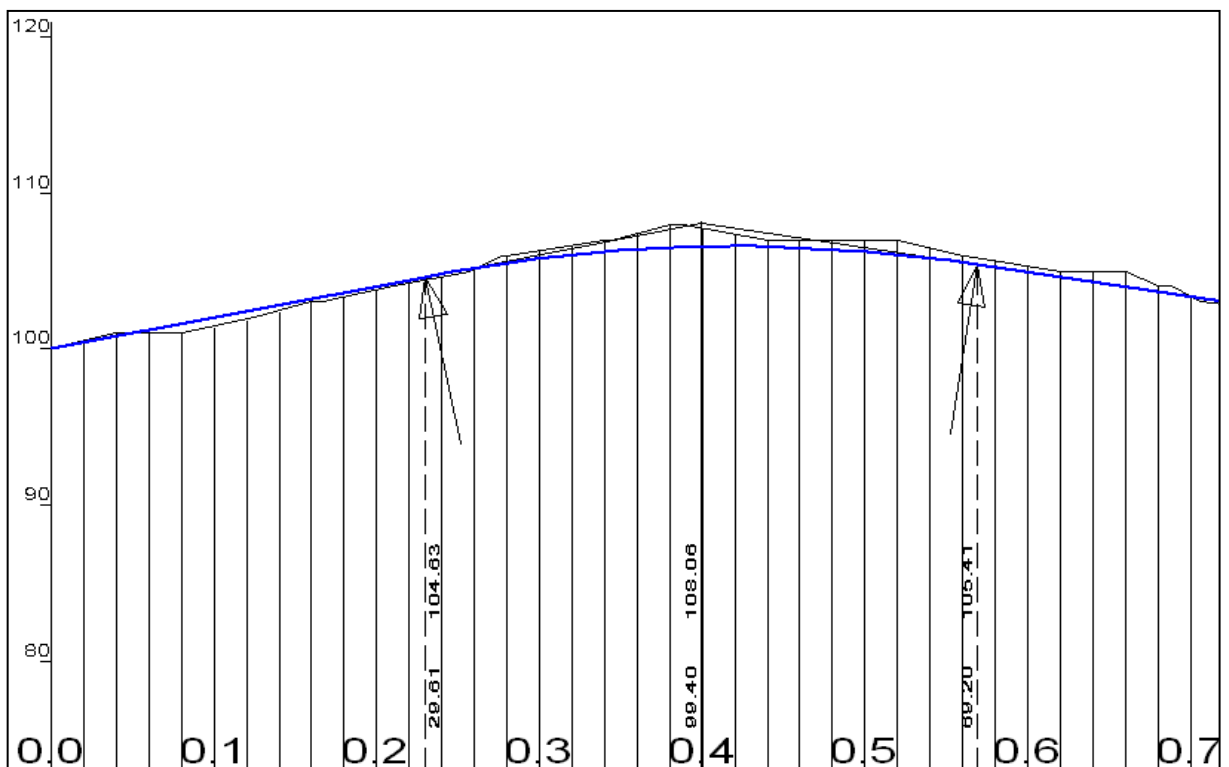
Veličina	Simbol	K=11	K=95
Razlika naklonov sosednjih tangent	A [%]	3,5	3,5
Dolžina zaokrožitve	L [m]	38,5	332,5
Procent spremembe nagiba za horizontalno razdaljo zaokrožitve	Q [%/m]	0,091	0,010
Horizontalna razdalja, ki je potrebna, da premagamo 1% naklona	K [m/%]	11	95
Približna vrednost radija zaokrožitve	R [m]	1100	9500

S pomočjo animacije sem prikazal, kako horizontalna razdalja, ki je potrebna, da premagamo 1% naklona (faktor K) vpliva na cestno traso, na dimenzije elementov nivelete in na udobnost voznika. Izbrana vrednost K=11 predstavlja primer, ki se ga je potrebno pri projektiranju cest izogniti zaradi:

- elementi nivelete so prekratki (vertikalna zaokrožitve);
- pregledna razdalja ni zagotovljena;
- neudobno in nevarno za voznika, ker ne vidi poteka ceste v nadaljevanju.

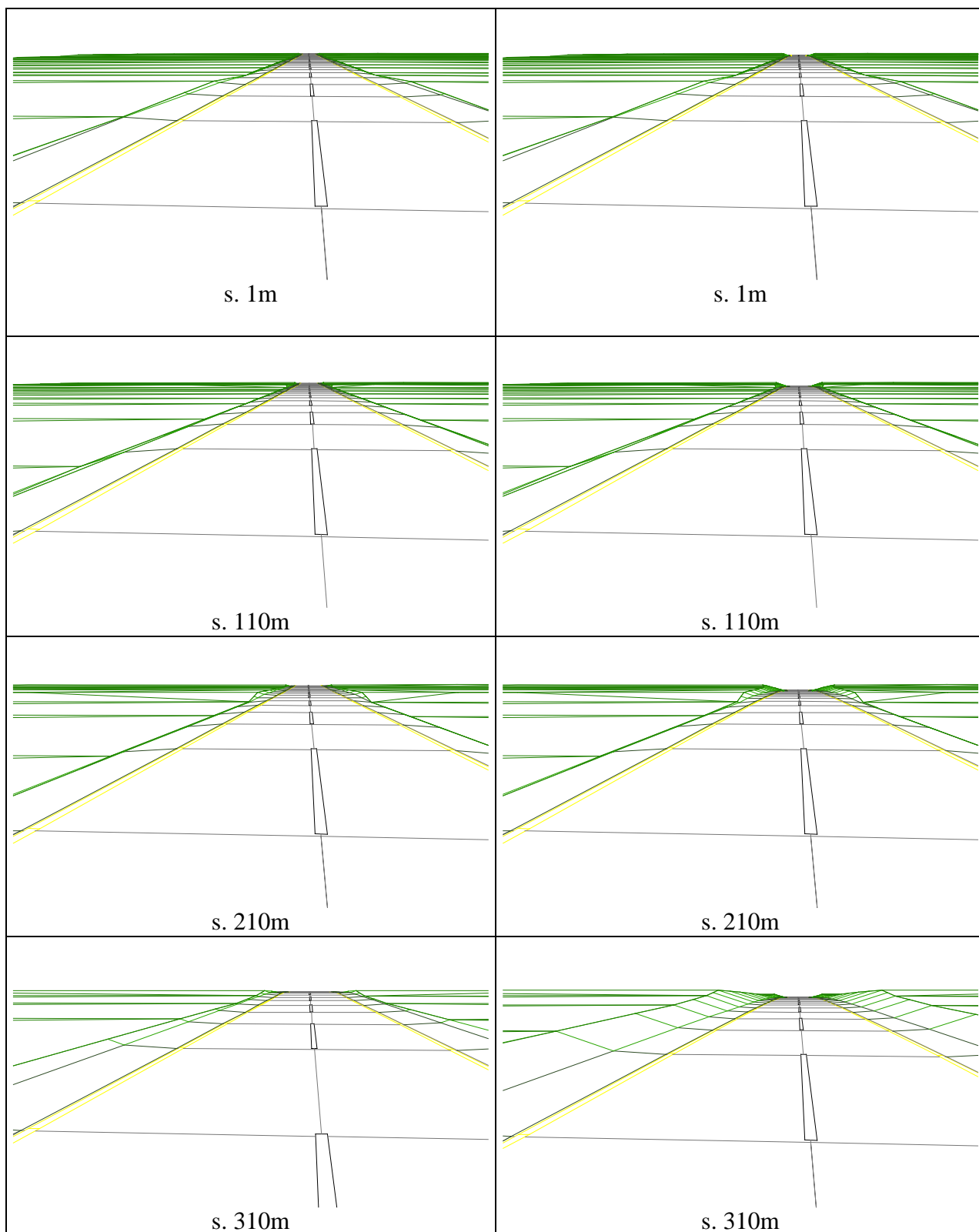


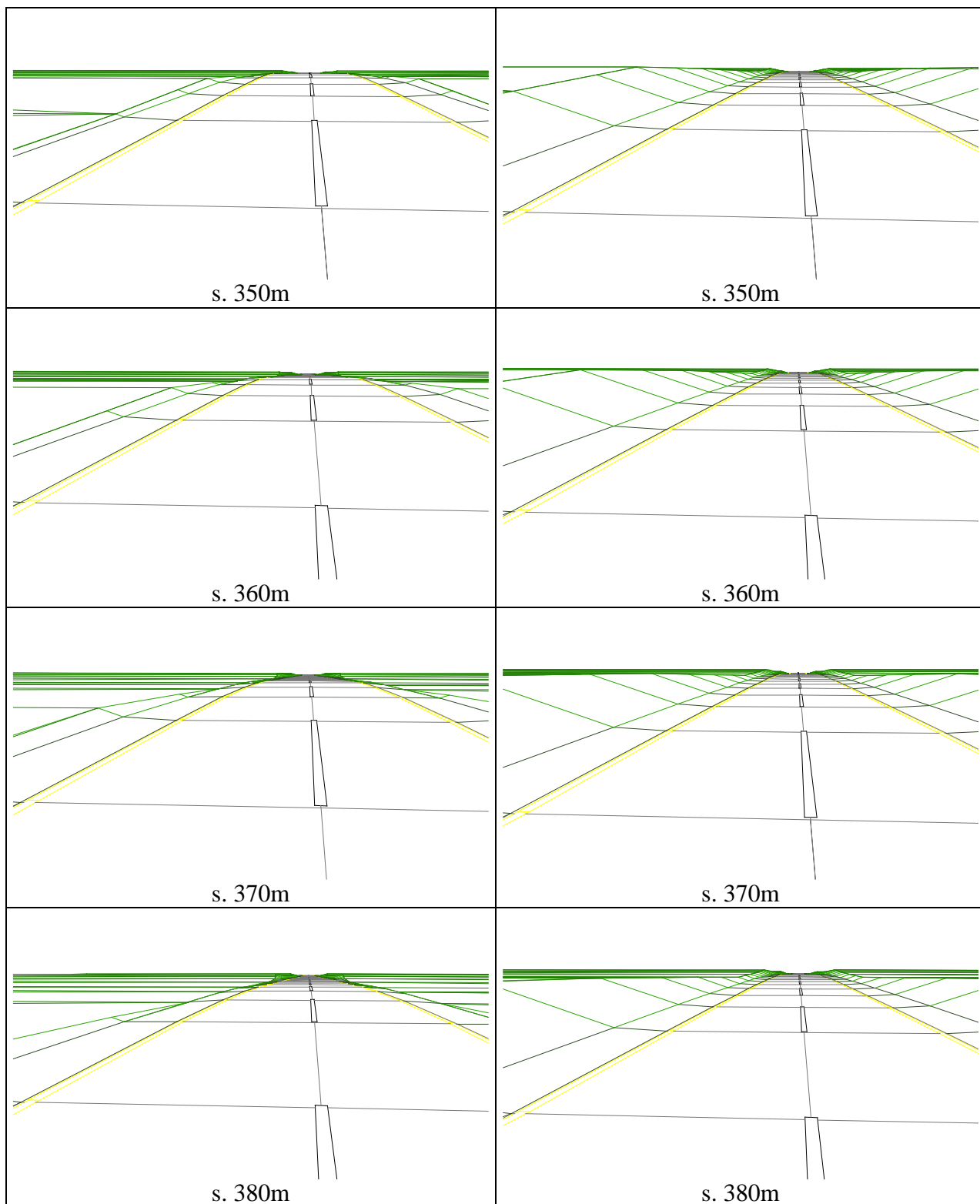
Slika 45: Vzdolžni profil cestne trase z uporabo faktorja $K=11$

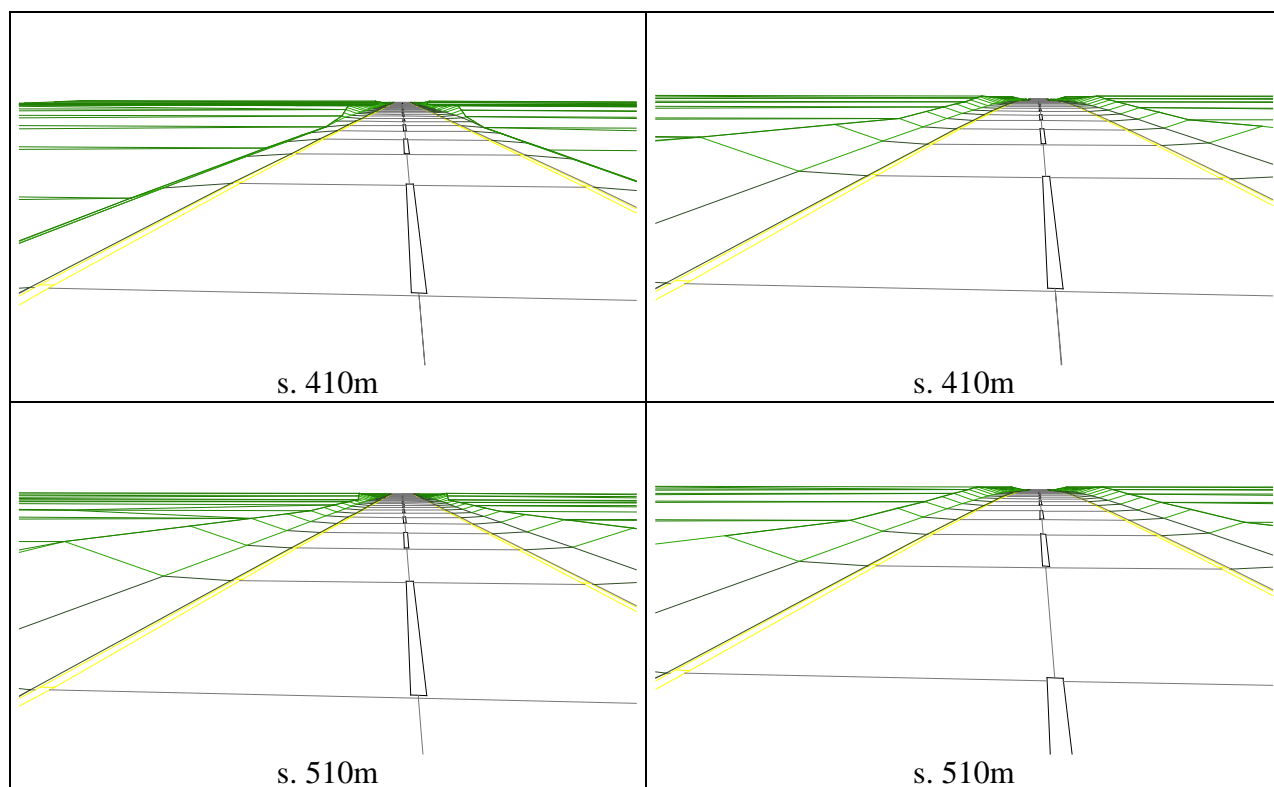


Slika 46: Vzdolžni profil cestne trase z uporabo faktorja $K=95$

Leva stran predstavlja pogled na cesto na različnih stacionažah trase z uporabo faktorja $K=11$, desna stran pa z uporabo faktorja $K=95$





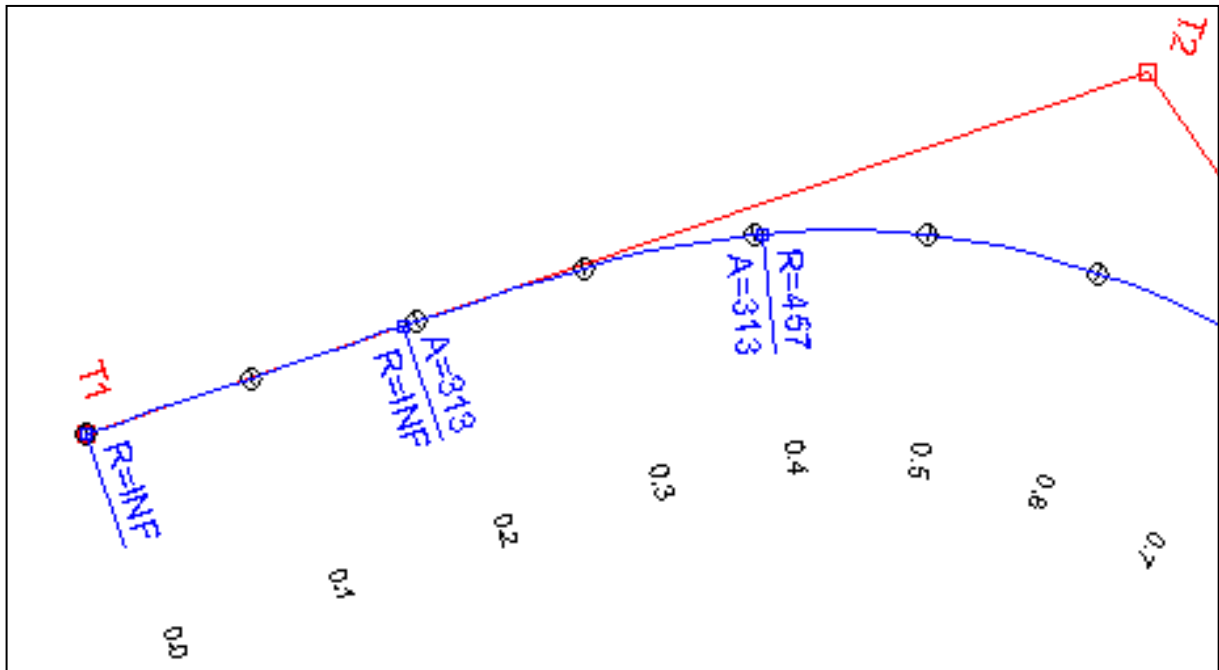


Na drugi strani pa zadostna vertikalna zaokrožitev, kar dosežemo z uporabo faktorja $K=95$ omogoča:

- ustrezno dolžino preglednosti in s tem boljši učinek na voznika, na izgled cestne trase ter na varnost prometa;
- usklajenost vertikalnih elementov s horizontalnimi (skladnost).

4.2 Animacija trase , ki poteka v horizontalni krivini in konveksni zaokrožitvi nivelete, če uporabimo $K=11$ in $K=95$

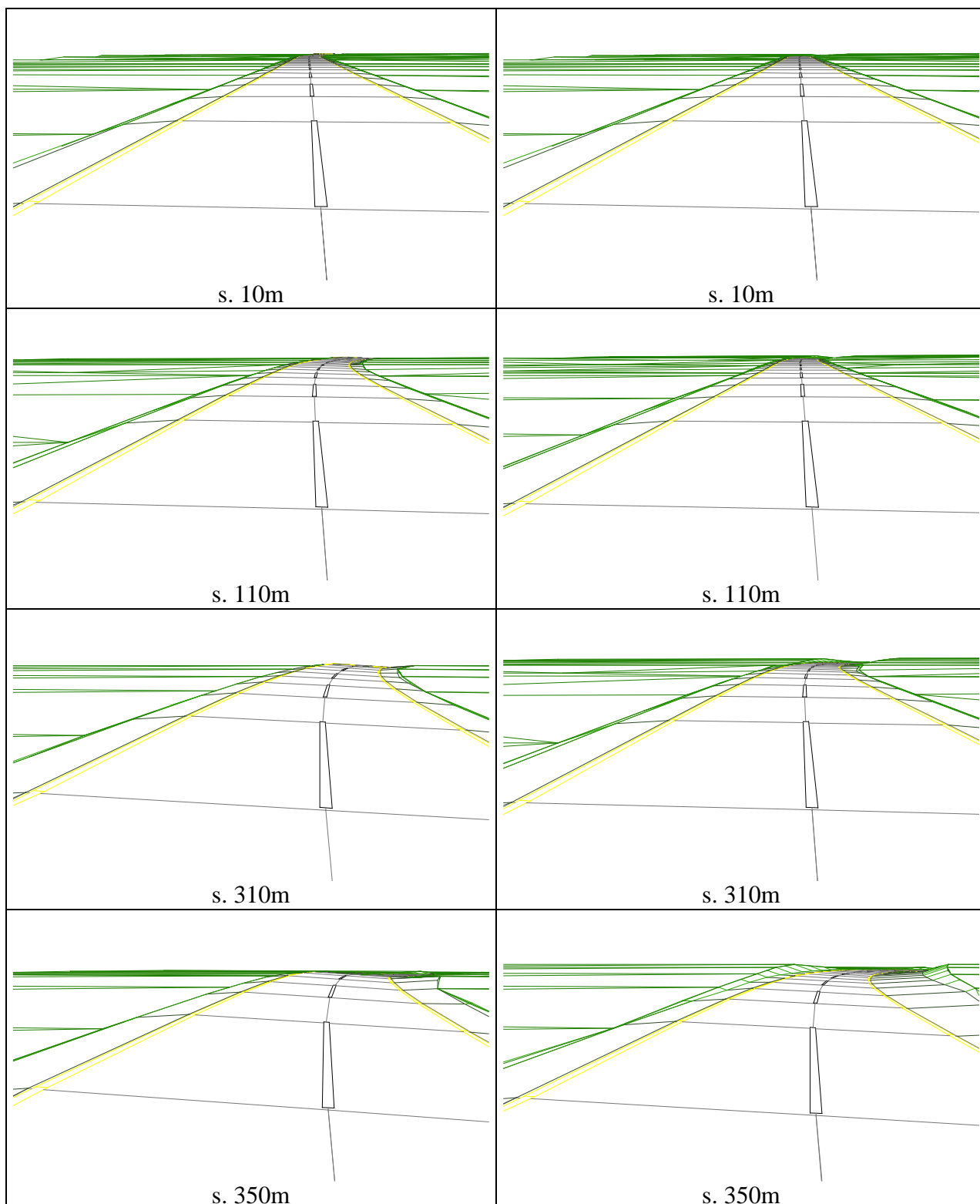
Druga animacija predstavlja identičen primer, le da horizontalni potek trase ne poteka v celoti v premi ampak prehaja v krivino.

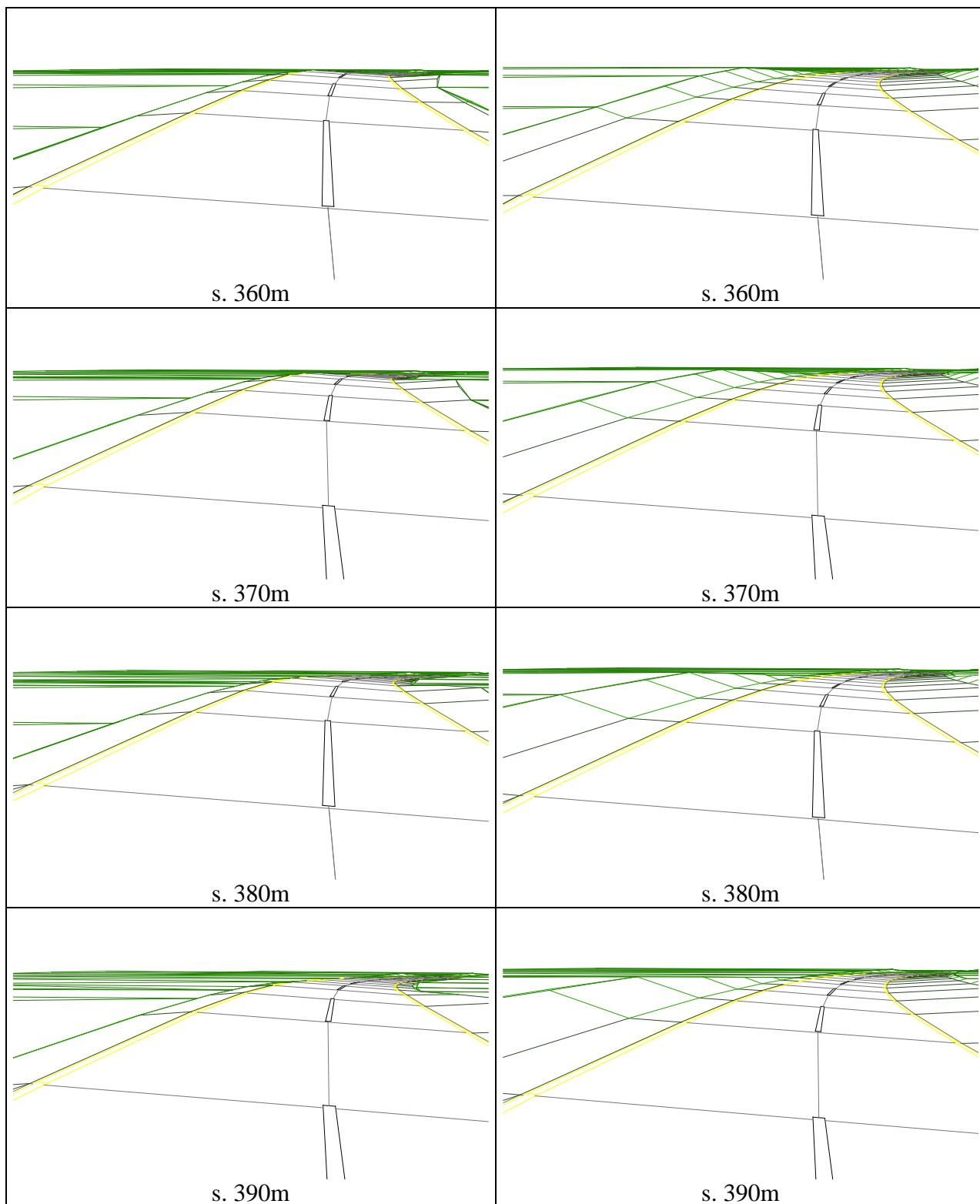


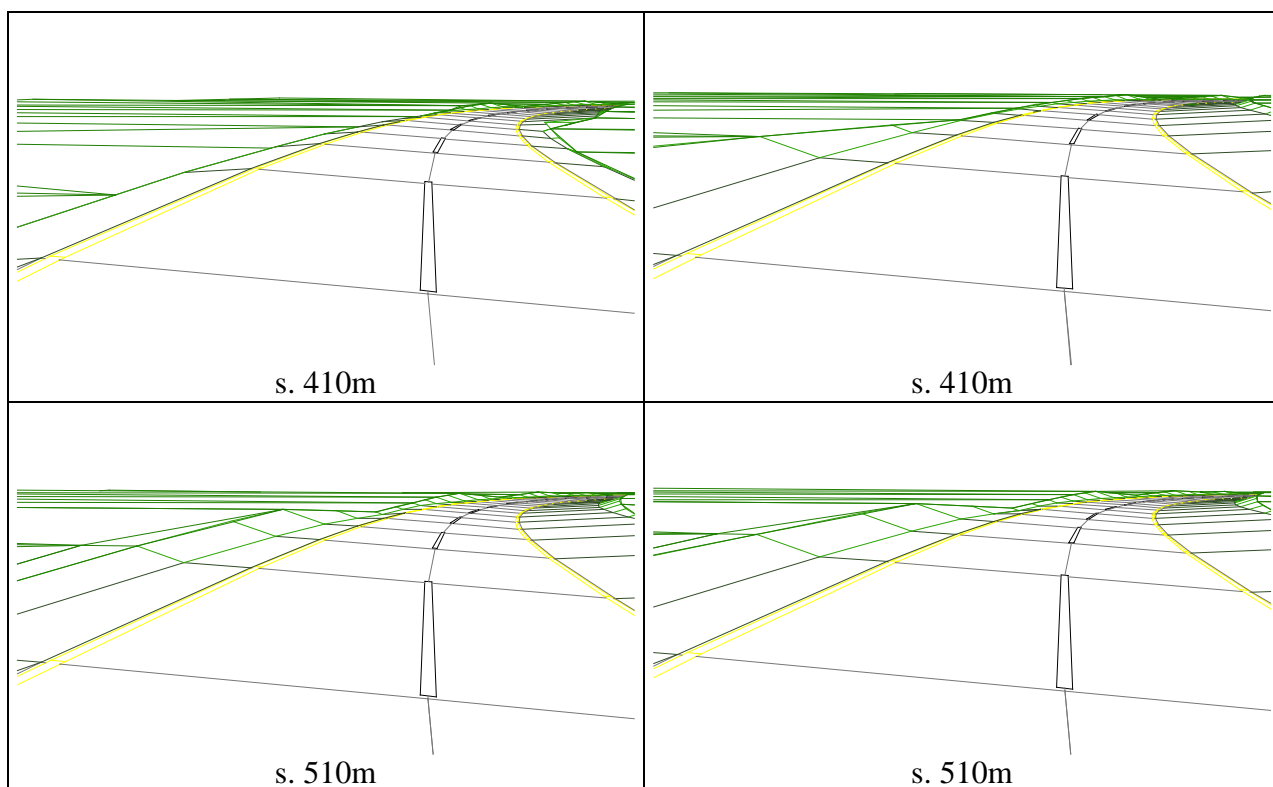
Slika 47: Horizontalni potek cestne trase pri izvedbi animacije 2

Pri tej animaciji so pomanjkljivosti, ki jih povzroča, uporaba premajhne vrednosti faktorja »K«, še bolj izrazite.

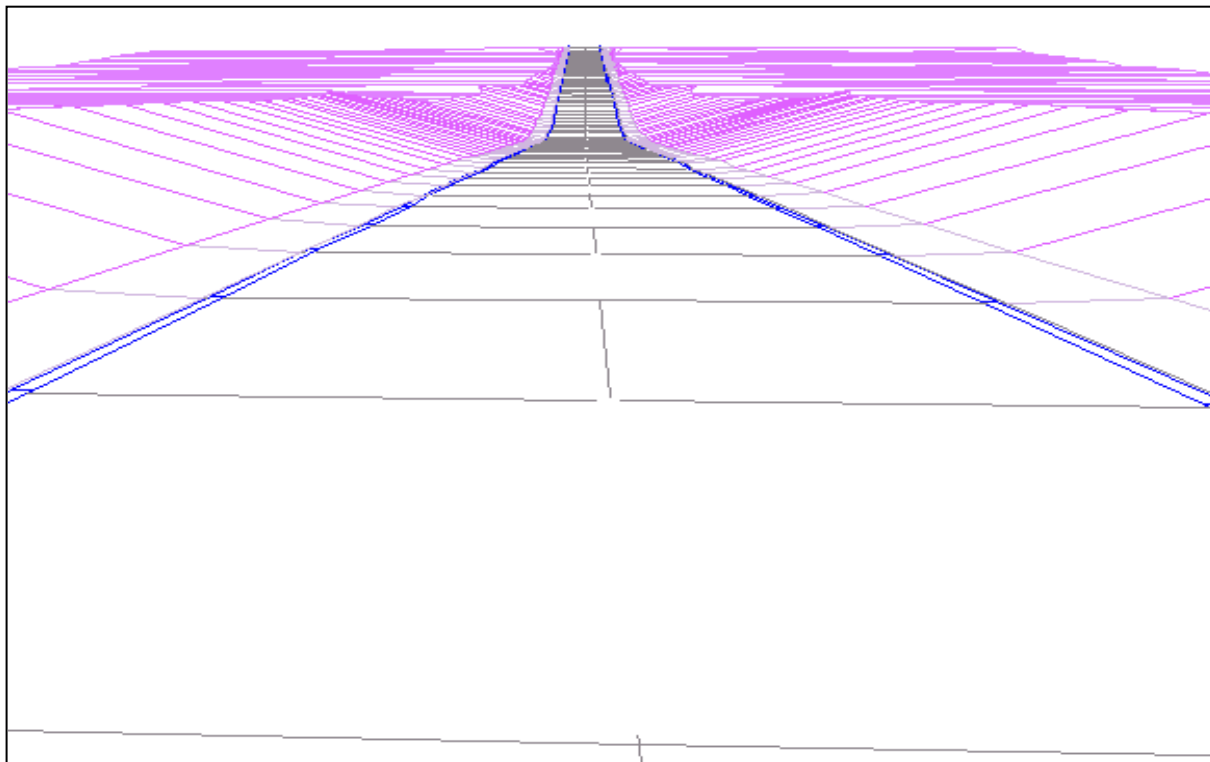
Leva stran predstavlja pogled na cesto na različnih stacionažah trase z uporabo faktorja $K=11$, desna stran pa z uporabo faktorja $K=95$



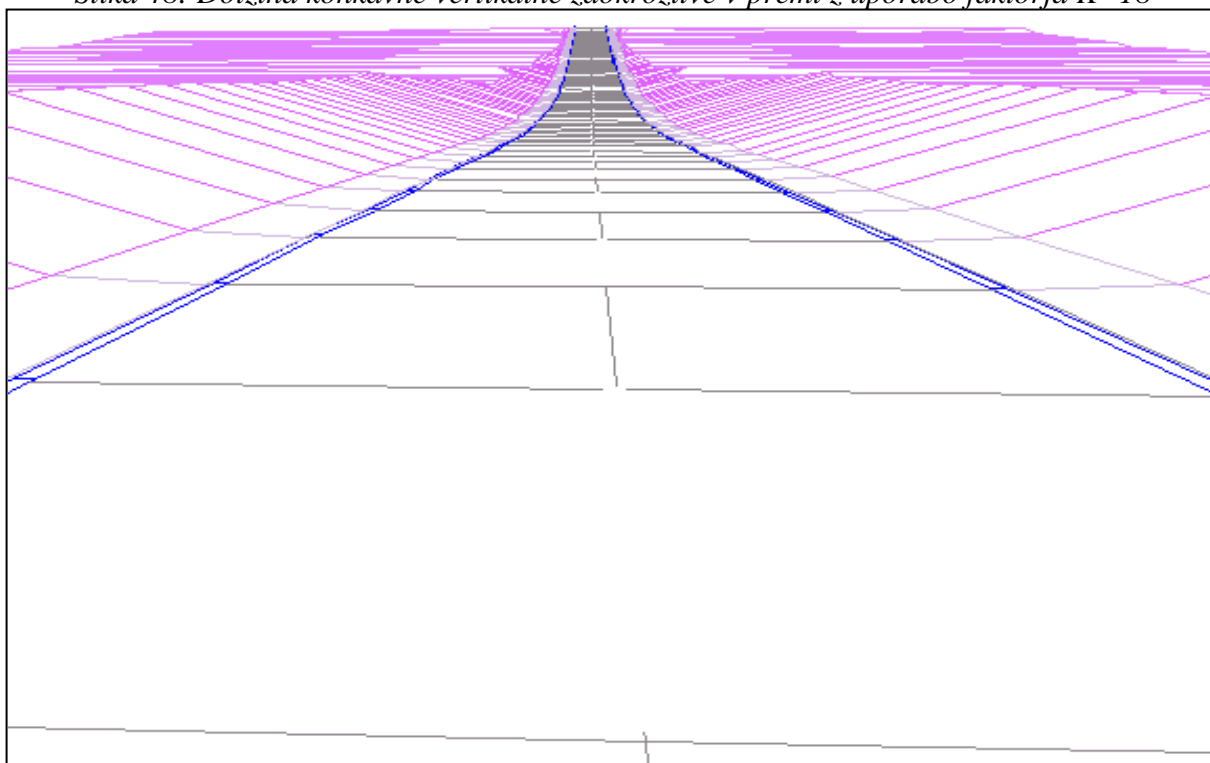




4.3 Animacija trase , ki poteka v premi in konkavni zaokrožitvi nivelete, če uporabimo $K=18$ in $K=63$

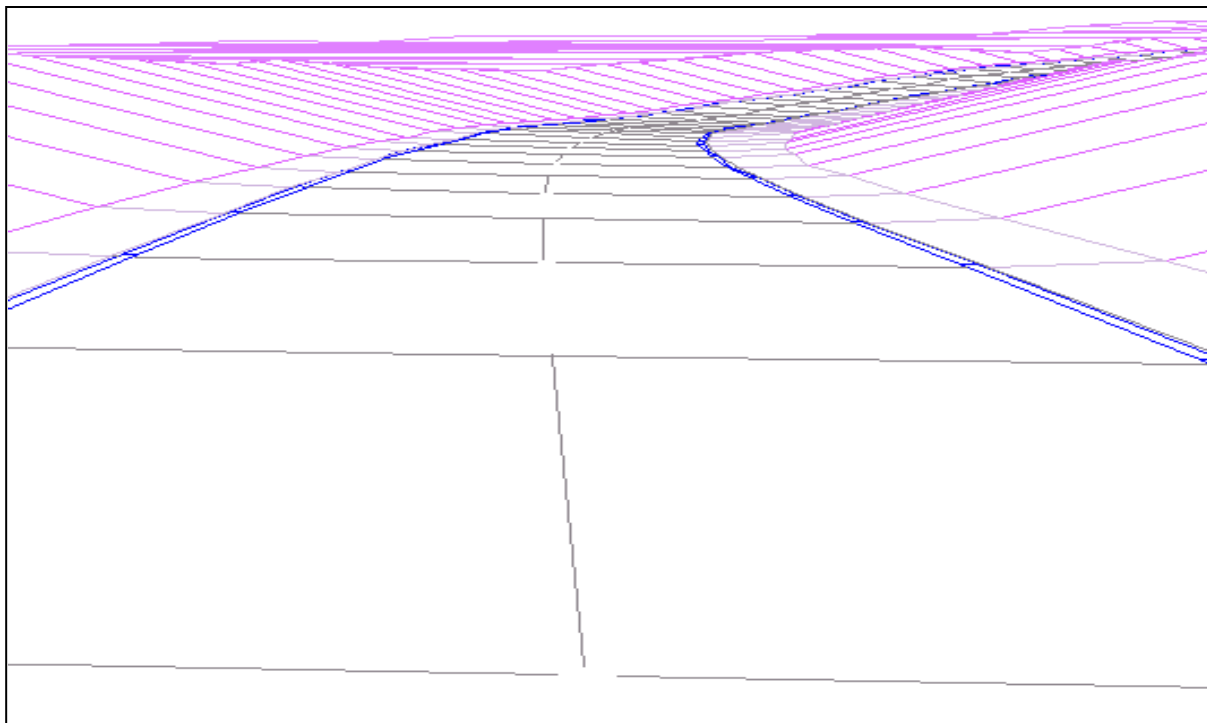


Slika 48: Dolžina konkavne vertikalne zaokrožitve v premi z uporabo faktorja $K=18$

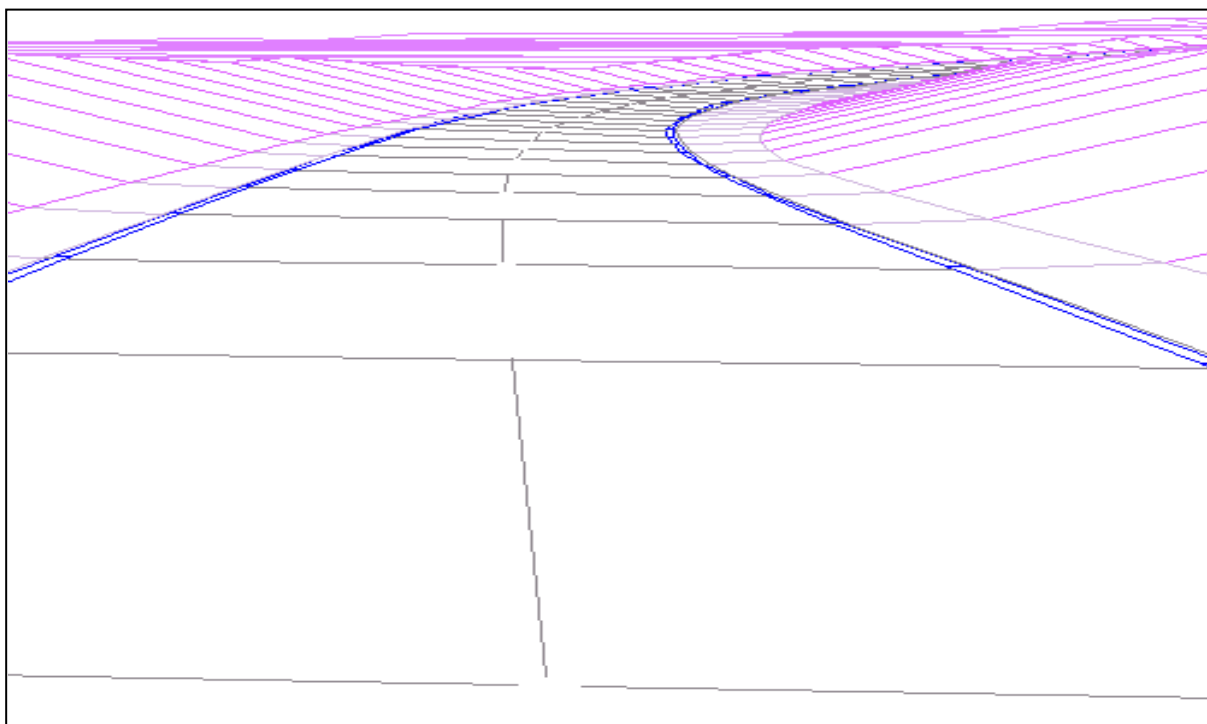


Slika 49: Dolžina konkavne vertikalne zaokrožitve v premi z uporabo faktorja $K=63$

4.4 Animacija trase, ki poteka v konkavni vertikalni zaokrožitvi s koeficientom $K=18$ in $K=63$ ter horizontalni krivini



Slika 50: Dolžina konkavne vertikalne zaokrožitve v horizontalni krivini z uporabo faktorja $K=18$



Slika 51: Dolžina konkavne vertikalne zaokrožitve v horizontalni krivini z uporabo faktorja $K=63$

5 SKLEPNE UGOTOVITVE

Ugotovil sem, da je vertikalna zaokrožitve v naših predpisih določena z radijem, medtem ko se v tuji literaturi uporablja koeficient »K«, na podlagi katerega je izračunana dolžina vertikalne zaokrožitve. Kot je razbrati iz naloge, je odvisna od mnogih dejavnikov, na podlagi katerih je določen faktor »K« (horizontalna razdalja, ki je potrebna da premagamo 1% spremembo nagiba vzdolž zaokrožitve). Določitev tega faktorja pa je zapletena in nas lahko pripelje do napačnih ugotovitev, ki rezultirajo neprimerno obliko nivelete, kar je prikazano v poglavju 4. te naloge. Radij vertikalne zaokrožitve s pomočjo faktorja »K«, ob predpostavki, da poznamo razliko nagibov sosednjih tangent, enostavno določimo s pomočjo razmerja stranic podobnih trikotnikov (poglavje 3).

Za boljšo predstavbo sem izračunal radij konveksne in konkavne vertikalne zaokrožitve s pomočjo faktorja »K«, dobljenega na osnovi zaustavitvene pregledne razdalje, ob predpostavki, da je nagib tangente na drugi strani zaokrožitve manjši kot 3%.

Preglednica 12 : Primerjava Radij-koeficient »K« pri konveksnih vertikalnih zaokrožitvah

KONVEKSNE VERTIKALNE ZAOKROŽITVE			
Projektna hitrost [km/h]	Zaust. pregledna razdalja [m]	K [m/%]	Radij [m]
50	65	7	700,28
60	85	11	1100,44
70	105	17	1700,68
80	130	26	2601,04
90	160	39	3901,56
100	185	52	5202,08
110	216	71	7102,84

Preglednica 13 : Primerjava Radij-koeficient »K« pri konkavnih vertikalnih zaokrožitvah

KONKAVNE VERTIKALNE ZAOKROŽITVE			
Projektna hitrost [km/h]	Zaust. pregledna razdalja [m]	K [m/%]	Radij [m]
50	64	12	1200,48
60	83	17	1700,68
70	105	23	2300,92
80	129	30	3001,2
90	156	37	3701,48
100	185	45	4501,8
110	216	54	5402,16

Ko načrtujemo vertikalno zaokrožitev, moramo upoštevati vse pogoje, ki jih določena tehnična skupina ceste zahteva in na podlagi teh pogojev skrbno izračunati faktor »K«.

Naslednji korak je izračun radija vertikalne zaokrožitve, na podlagi določenega koeficienta »K«. Vse to pa nam še vedno ne zadostuje, da bi tako določena trasa ceste zadovoljila zahteve voznika po preglednosti, funkcionalnosti, udobnosti in varnosti. Vedno je potrebno imeti pred seboj tudi potek cestne trase v tlorisu in le primerna skladnost vertikalnega in horizontalnega poteka nam lahko da končen odgovor na to ali smo traso dimenzionirali pravilno oziroma v našem primeru ali je radij vertikalne zaokrožitve primeren.

VIRI

Juvanc, A. 2003. Geometrijski in tehnični elementi osi ceste. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, prometna smer: 102 str.

Lipar, P. 1998. Vizualno vodenje cestne osi in geometrijsko oblikovanje obcestja. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo: 143 str.

Ahlin, M., Bokal, L., Gložančev, A., et al. 1998. Slovar slovenskega knjižnega jezika. Ljubljana, DZS: 1714 str.

Lorenc, H. 1971, Trassierung und gestaltung von strassen und autobahnen, Bauerlag GMBH, Wiesbaden und Berlin: 440 str.

Design Manual 22-01. January 2005. Geometric Plan Elements. Chapter 620. 8 str.
<http://www.wsdot.wa.gov/EESC/Design/DesignManual/desEnglish/620-E.pdf>(1.3.2006)

Design Manual. May 2004. Geometric Profile Elements; Chapter 630. 8str.
<http://www.wsdot.wa.gov/EESC/Design/DesignManual/desEnglish/630-E.pdf> (29.12.2005)

Mass Highway. January 2006. Chapter 4. Horizontal and Vertical alignment: 49 str
http://www.apc.org/.../Highway_Design_Guidelines/DesignGuidelinesRevised_9-05web/CH_4_Horiz&VertAlignment.pdf(11.3.2006)

Bureau of Design and Environment Manual. December 2002. Vertical alignment. Illinois. Chapter Thirty-Three. Vertical alignment: 92 str.
<http://www.dot.state.il.us/desenv/BDE%20Manual/BDE/pdf/chap33.pdf>(29.12.2005)

Road Planning and Design Manual. July 2002. Chapter 12. Vertical alignment: 34 str
[http://www.mainroads.qld.gov.au/.../Content.nsf/0/b95a18e80fa85bce4a256a4f002895d3/\\$FILE/ATT4Q09V/Chapter%2012.pdf](http://www.mainroads.qld.gov.au/.../Content.nsf/0/b95a18e80fa85bce4a256a4f002895d3/$FILE/ATT4Q09V/Chapter%2012.pdf)(29.12.2005)

Road Design Manual . Chapter 6. Vertical alignment: 29 str.

<http://www.sddot.com/pe/roaddesign/docs/rdmanual/rdmch06.pdf>(4.3.2006)

State Highway Geometric Design Manual. December 2000. Section 3. Design Form: 8 str.

http://www.transit.govt.nz/content_files/technical/Amendment26_PDFFile.pdf(25.4.2006)

State Highway Geometric Design Manual. January 2002. Section 5. Vertical alignment: 16 str.

http://www.transit.govt.nz/content_files/technical/Amendment28_PDFFile.pdf(27.3.2006)

Bureau of Local Roads and Streets Manual. January 2006. Chapter Thirty. Vertical alignment: 20 str.

<http://www.dot.state.il.us/blr/manuals/Chapter%2030.pdf>(22.3.2006)

Geometric Design Guide. Chapter 4. Road Design Elements. Chapter 5. Alignment Design. 30 str.

<http://www.nra.co.za/documents/Geometric%20Design4.pdf>(18.4.2006)

Road Planning and Design Manual. January 2002. Chapter 9. Sight distance. 19 str.

<http://www.mainroads.qld.gov.au/MRWEB/Prod/Content.nsf/1b117feddff9cdb4a2569f10019412f/63f7bba2b0daf98d4a256a500013029c!> (29.4.2006))