

# Analiza stabilnosti kolničkih konstrukcija prema prometnoj podjeli cesta uz pomoć računalnog programskog paketa Plaxis

---

**Bručić, Dominik**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University North / Sveučilište Sjever**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:587817>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-24**



*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

**Završni rad broj. 344/GR/2018**

**Analiza stabilnosti kolničkih konstrukcija prema prometnoj  
podjeli cesta uz pomoć računalnog programskog paketa  
Plaxis**

**Dominik Bručić**

Varaždin, rujan 2018. godine





# Sveučilište Sjever

**Graditeljstvo**

**Završni rad br. 344/GR/2018**

## **Analiza stabilnosti kolničkih konstrukcija prema prometnoj podjeli cesta uz pomoć računalnog programskog paketa Plaxis**

**Student**

Dominik Bručić, 5121/601

**Mentor**

Aleksej Aniskin dr.sc.

Varaždin, rujan 2018. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za graditeljstvo		
PRISTUPNIK	Dominik Bručić	MATIČNI BROJ	5121/601
DATUM	25.09.2018.	KOLEGIJ	Prometnice
NASLOV RADA	Analiza stabilnosti kolničkih konstrukcija prema prometnoj podjeli cesta uz pomoć računalnog programskog paketa Plaxis		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Analysis road construction stability by road traffic classification with the help of Plaxis software		
MENTOR	dr.sc. Aleksej Aniskin	ZVANJE	viši predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. prof.dr.sc. Božo Soldo 2. dr.sc. Matija Orešković, v.pred. 3. dr.sc. Aleksej Aniskin, v.pred. 4. Željko Kos, predavač 5. Predrag Presečki, predavač		

## Zadatak završnog rada

BROJ	344/GR/2018
OPIS	Pristupnik treba u radu općenito opisati razvoj cesta, vrste kolničke konstrukcije, osnove proračuna u demo verziji programskog paketa Plaxis, te uz pomoć spomenutog programa provesti analizu stabilnosti kolničkih konstrukcija prema prometnoj klasifikaciji.  U radu je potrebno obraditi sljedeće teme:  1. Uvod 2. Vrste kolničkih konstrukcija 3. Dimenzioniranje kolničkih konstrukcija 4. Modeliranje u programu PLAXIS 5. Zaključak

ZADATAK URUČEN

23. 09. 2018.



POTPIS MENTORA

## **Sažetak**

Moj zadatak završnog rada je "Analiza stabilnosti kolničkih konstrukcija prema prometnoj podjeli cesta uz pomoć računalnog programskog paketa "Plaxis". Prije samog proračuna u plaxisu, ukratko ću opisati povijesni razvoj cesta, te njihov utjecaj na gospodarski razvoj u cijelom svijetu.

Cilj zadatka je proračun stabilnosti kolničke konstrukcije, a za to je potrebno poznavanje geometrijskih i funkcijskih svojstava dijelova konstrukcije. U poglavlju "Vrste kolničkih konstrukcija; vrste zastora" detaljno su opisani dijelovi kolničke konstrukcije i njihova svojstva. Osim geometrijskih i funkcijskih svojstava kolničke konstrukcije bitno je upoznati se i sa samim proračunom, iako se proračun u plaxisu provodi automatski nije na odmet upoznati se sa osnovnim proračunima. Neki od poznatijih i upotrebljivanih proračuna za stabilnost kolničke konstrukcije opisani su u poglavlju "Proračun kolničkih konstrukcija".

Nakon teorijskog dijela slijedi proračun stabilnosti kolničkih konstrukcija u plaxisu. Proračun se vrši automatski, a nakon proračuna dobijemo numeričke i grafičke vrijednosti za vertikalne deformacije (slijeganja), horizontalne deformacije i za ukupne deformacije (ukupni pomak). Na kraju slijedi usporedba dobivenih rezultata, popraćena sa komentarima.

## **Abstract**

My final assignment is "Analysis of the stability of road structures by road traffic sharing with the help of the computer program " Plaxis ". Prior to the calculation I will briefly describe the historical development of the roads and their impact on economic development around the world.

The objective of the task is to calculate the stability of the road construction, and this requires knowledge of the geometric and functional properties of the structural parts. In the chapter "Types of Road Construction; Types of curtains " parts of the road construction and their properties are described in detail . In addition to the geometric and functional properties of the road construction, it is important to get acquainted with the calculation itself, although the calculation is automatically generated by basic calculations. Some of the more familiar and useful calculations for the stability of the road construction are described in the chapter "Calculation of Road Structures".

After the theoretical part follows the calculation of the stability of the pavement in the plaxis. The calculation is done automatically and after, program shows us numerical and graphical values for vertical deformation, horizontal deformation and total deformation (total displacement). Finally, a comparison of the results obtained, followed by comments.

# Sadržaj

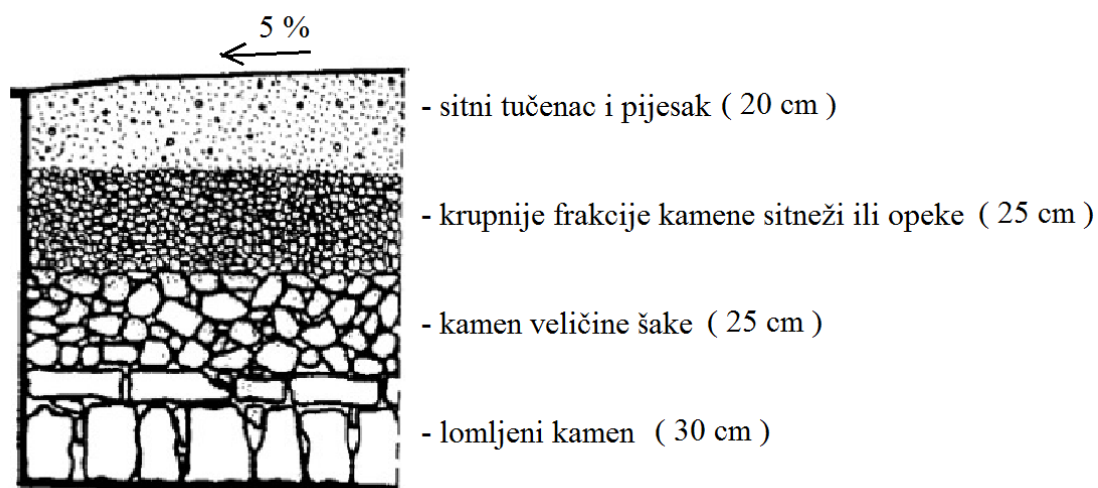
1. Uvod .....	7
2. Vrste kolničkih konstrukcija .....	11
2.1. Zemljani trup .....	11
2.1.1. Nasip .....	11
2.1.2. Usjek.....	12
2.2. Zaštita pokosa.....	13
2.2.1. Zidovi .....	14
2.3. Tuneli .....	15
2.3.1. Cestovni tuneli.....	15
2.3.2. Tuneli za gradske podzemne željeznice .....	15
2.4. Mostovi.....	16
2.5. Gornji ustroj ceste .....	18
2.5.1. Gradiva za izradu kolnika .....	18
2.5.2. Podloge cestovnih zastora.....	19
2.5.3. Cestovni zastori.....	20
3. Dimenzioniranje kolničkih konstrukcija .....	24
3.1. Projektiranje asfaltnih kolničkih konstrukcija.....	26
3.1.1. Metode za dimenzioniranje asfaltnih kolničkih konstrukcija .....	26
3.1.2. AASHO test.....	28
3.1.3. Metoda za dimenzioniranje asfaltnih kolničkih konstrukcija po HRN U.C4.012.....	33
4. Modeliranje u programu PLAXIS .....	36
4.1. Deformacije 1.-3. razred.....	37
4.2. Deformacije 4. i 5. razred.....	40
4.3. Deformacije AC/BC .....	42
5. Zaključak .....	47
6. Popis literature.....	49



# 1. Uvod

Usporedno s razvitkom ljudske civilizacije dolazi do razvoja ceste i cestovnog prometa. U početku ljudi grade staze, putove i ceste koje su im omogućavale razmjenu materijalnih dobara, te presudno pridonosile općem razvitku. Konstrukcijom zaprežnih kola (tri tisuće godina prije Krista) dolazi do velikog preokreta u izgradnji cesta. Da kotači zaprežnih kola ne bi propadali u slabije nosivo tlo, počele su se graditi ceste s čvršćom podlogom.

Najstarije takve ceste, karavanske ceste odnosno putovi javljaju se u starom vijeku u Aziji, sjevernoj Africi i Europi, a te ceste su se uglavnom koristile za prijevoz vojske, poštanski promet, trgovački promet. Veliki napredak u učvršćivanju postojećih cesta i u gradnji novih zabilježen je u Rimskom Carstvu, a neke od tih cesta su se uz redovite rekonstrukcije održale do danas. Cestovna mreža Rimskog carstva pokrivala je gotovo cijelu srednju Europu, te je povezivala Rim sa Sjevernom Afrikom i Azijom. Te su ceste bile građene od nekoliko slojeva kamenog materijala, a debljina kolnika iznosila je 60 do 100 cm (Slika 1.). Ostaci rimskih cesta se i danas nalaze u Engleskoj, Francuskoj, Italiji i drugim europskim zemljama.



*Slika 1: Poprečni presjek rimske ceste*

Raspalom Rimskog carstva 476. Godine u Europi prestaje gotovo svaka djelatnost na gradnji novih cesta sve do 12.st. Tek se nastankom većih naselja i razvitkom trgovine, opet počinju graditi ceste. Pri kraju 18. st. te početkom 19.st. počinje gradnja cesta s kamenom podlogom i šljunčanim zastorom. Prve takve ceste javljaju se u Francuskoj i Engleskoj. Jedan od najpoznatijih graditelja iz tog doba je Mac Adam (1817.) koji gradi ceste s tučencem u nekoliko slojeva različitih veličina zrna. Taj način građenja održao se do danas pod nazivom „makadam“, međutim ti su kolnici dosta brzo propadali jer primitivnim sredstvima nije bilo moguće dobro zbiti slojeve tučenca.

Daljni razvoj cesta događa se krajem 19. st. izumom motora s unutarnjim izgaranjem (Benz, 1886.) koji je pridonio naglom razvoju motornih vozila te su time i ceste dobile veliko značenje. Neučvršćene i neravne ceste nisu više odgovarale automobilskom prometu, pa se počinju graditi ceste različitih kolnika, od asfalta i betona. Takav način gradnje omogućuje gradnju cesta dužih dionica, te je 1921. izgrađena prva autocesta pokraj Berlina, dugačka desetak kilometara, a 1929. godine, autocesta Köln-Bonn. Najveći razvoj cesta događa se u Njemačkoj u razdoblju od 1934. do 1940. godine. Modernizirana je postojeća cestovna mreža i izgrađen je sustav glavnih cesta u duljini 4000 km.

Na područjima Hrvatske su uz određene rekonstrukcije, još uvijek ostale neke ceste koje potječu iz Rimskog Carstva. U srednjem vijeku postojale su u našim krajevima neke ceste koje su po svojoj izvedbi bile znatno lošije od rimskih cesta, kao na primjer, Dubrovačka cesta (Dubrovnik – Trebinje) ili Splitski put (Split – Klis – Sinj). U doba Austro-Ugarske izgrađene su ceste preko Velebita koje si povezivale luke na Jadranu s njegovim zaleđem. To su: Karolinska cesta (kasnije preuređena u Terezijansku cestu) građena od 1730. do 1735. godine (Karlovac – Bosiljevo – Vrbovsko – Mrkopalj – Fužine – Bakar – Rijeka). Nakon toga izgrađena je Jozefinska cesta građena od 1775. do 1779. godine (Senj – Vratnik – Tounj – Karlovac); Lujzinska cesta (1803.-1809.), (Karlovac – Rijeka). Te su ceste nakon potrebnih rekonstrukcija u potrebi i danas. Nakon Prvog svjetskog rata dolazi do naglog razvoja automobilske industrije, zbog čega se javlja potreba za modernizacijom postojećih cesta i gradnje novih suvremenih cesta. Između dva rata izgrađeno je malo suvremenih cesta i to najviše na području Istre, koja je bila pod okupacijom Italije, te u okolici Zagreba, Rijeke, Zadra i Splita.

Cestovna mreža Hrvatske je nakon Drugog svjetskog rata bila zastarjela i teško oštećena. Oko 75% svih mostova bilo je razoreno, a oko 50% cesta bilo je neupotrebljivo za bilo kakav promet. Razdoblje od 1945. do 1990. godine obilježava obnova i modernizacija cestovne mreže, što se podudara s općim gospodarskim oporavkom i ubrzanim porastom motorizacije u svijetu. Tako je 1965. godine izgrađeno 19 169 km javnih cesta, od čega 3553 km sa suvremenim kolnikom, a 1985. godine ukupno 27 474 km, od čega 18 928 km sa suvremenim kolnikom.

U skladu s planom razvoja cestovne mreže u Republici Hrvatskoj, postoje dva uzdužna pravca od kojih je jedan kontinentalni (posavski), a drugi obalni (jadranski) te četiri poprečna pravca koji ih povezuju. Posavski pravac definiran je smjerom Ljubljana – Bregana/Zagreb – Slavonski Brod – Lipovac – Beograd, a jadranski je određen pravcem Trst – Pasjak/Rijeka – Zadar – Split – Dubrovnik/Debeli Brijeg. Četiri su transverzalna pravca:

- Prvi je od mađarske granice (Goričan, Čakovec), preko Varaždina i Zagreba kroz Gorski kotar i grad Rijeku, s vezom na jadranski cestovni pravac te dalje prema Istri i Trstu

- Drugi, od austrijske granice (Šentilj/Maribor) preko Zagreba do Splita i Zadra
- Treći, od mađarke granice (Terezino Polje/Virovitica) preko okučana i Banje luke do Splita
- Četvrti, od mađarske granice (Luč/Beli Manastir) preko Osijeka i Sarajeva do Ploča.

Za daljnji razvoj cestovne mreže u Hrvatskoj bila je potrebna gradnja autocesta i brzih cesta, a prva autocesta u Hrvatskoj izgrađena je 1971. godine na dionici Zagreb – Karlovac. Tek 1977. godine počinje se graditi autocesta Ivanja Reka – Okučani. Do kraja 2005. godine izgrađeno je približno 1100 km autocesta i oko 150 km brzih cesta.

Hrvatska mreža javnih cesta obuhvaća oko 29 000 km cesta. Javne ceste se mogu podijeliti po više osnova. Podjela cesta ima cilj svrstati ceste u ograničen broj jasno definiranih tipova, kako bi se omogućila komunikacija između struke, administracije i javnosti.

Podjela cesta;

**a) prema izrazitijem društveno-gospodarsom značenju:** autoceste (AC), državne ceste (D-ceste), županijske ceste (Ž-ceste), lokalne ceste (L-ceste)

**b) prema vrsti prometa:** ceste za motorni promet, ceste za mješoviti promet;

- ceste za motorni promet dijele se na: autoceste (AC) i brze ceste (BC), te na ostale ceste za motorni promet (C)

**c) prema veličini motornog prometa,** izraženog prosječnim godišnjim dnevnim prometom (PGDP), tj. brojem vozila koja se očekuju na kraju planiranog razdoblja tijekom 24 sata u oba smjera, javne se ceste dijele na autoceste/brze ceste i pet razreda.

Oznaka prema prometnoj podjeli	Oznaka veličine prometa	Ukupan broj vozila u 24 sata (PGDP)
Autoceste/brze ceste	najveći	>14 000
1.razred	vrlo velik	>12 000
2.razred	velik	7000-12 000
3.razred	srednji	3000-7000
4.razred	malen	1000-3000
5.razred	vrlo malen	<1000

**Tablica 1.** Podjela cesta prema veličini motornog prometa

**d) prema vrsti terena odnosno prema konfiguraciji i stupnju ograničenja za trasu:** ceste u nizinskom terenu (bez terenskih ograničenja), ceste u brežuljkastom terenu (nezatna ograničenja), ceste u brdskom terenu (znatna ograničenja), ceste u planinskom terenu (velika ograničenja).

**e) ostali načini podjele cesta; podjela po kriteriju zadaće povezivanja u cestovnoj mreži na autoceste/brze ceste i pet razreda cesta: AC-** autoceste za međudržavno-državno povezivanje, **1.razred** za državno-regionalno povezivanje, **2.razred** za regionalno-županijsko povezivanje, **3.razred** za županijsko-međuopćinsko povezivanje, **4.razred** za međuopćinsko-općinsko povezivanje, **5.razred** za općinsko-lokalno povezivanje

## 2. Vrste kolničkih konstrukcija; vrste zastora

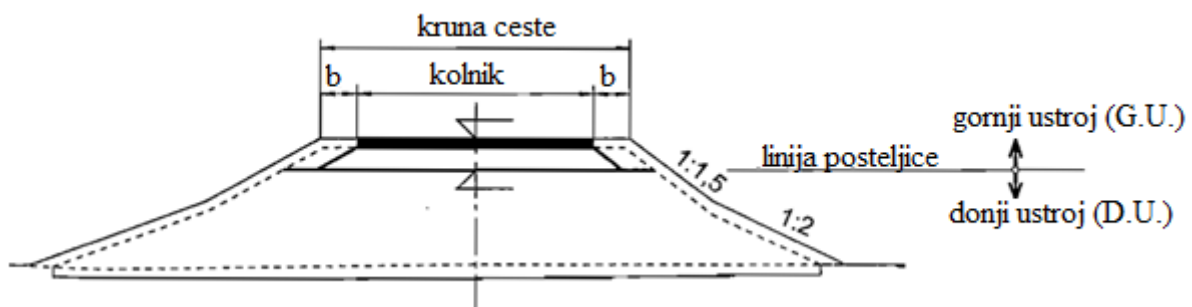
Cesta se kao linijska građevina u prostoru sastoji od gornjeg i donjeg ustroja. Donji ustroj ceste čine zemljani trup i građevine (mostovi, vijadukti, potporni zidovi). Funkcija donjeg ustroja je preuzimanje prometnog opterećenja i čitave konstrukcije gornjeg ustroja.

### 2.1. Zemljani trup

Zemljani trup ceste je dio ceste načinjen od zemlje ili drugog materijala (šljunak, pijesak, kamen). Prema položaju terena, zemljani trup može biti u nasipu, usjeku, isjeku i zasjeku, a jedan od oblika zemljanog trupa može biti i tunel. Kod izvedbe tunela osim iskopa, izvode se i mnogi drugi radovi, pa se stoga tunel smatra posebnom građevinom. Zemljani trup mora biti izgrađen tako da što dulje osigurava dobru stabilnost ceste, da se ne pojave slijeganja i deformacije što bi moglo uzrokovati oštećenje kolničke konstrukcije. Dobro nabijen zemljani trup se s vremenom sliježe do 1%, a nenabijen, čak više od 10%.

#### 2.1.1. Nasip

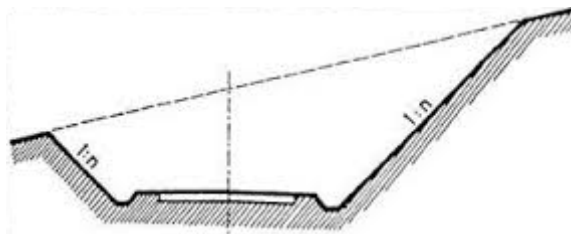
Nasip je jedan od osnovnih oblika trupa ceste, posebno u nizinskim terenima, a izrađuje se od zemljanog, miješanog i kamenog građiva koji moraju zadovoljiti građevinsko-tehničkih svojstva. Nasip se nabija u slojevima na način kao je propisano tehničkim normativima ili po odredbama iz geotehničkih elaborata. Konačni cilj je postići dostatnu nosivost završne plohe nasipa kako bi se položili završni slojevi kolničke konstrukcije. Pokosi nasipa rade se u nagibima 1 : n (n= 1.5, 2, 3, itd.)



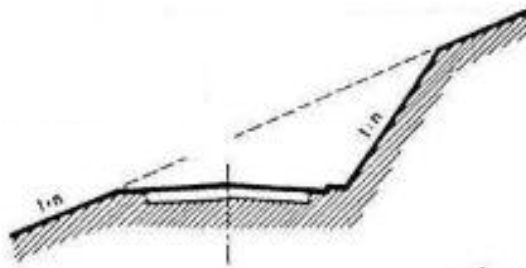
Slika 2.1. Trup ceste na nasipu

## 2.1.2. Usjek

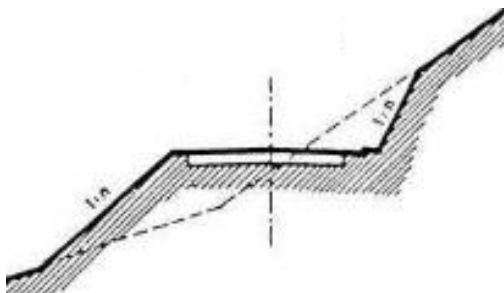
Usjek je zemljani objekt određenog poprečnog profila dobiven iskopom u sraslom tlu. Usjek je građevinski objekt čija je kota nivelete (KN) niža od kote terena (KT). Izrađuju se obično širokim iskopom, pri čemu se primjenjuju različite tehnologije i organizacije građenja, zavisno od načina i dubine usijecanja, odnosno geometrijskog oblika i konfiguracije terena postoji više tipova usjeka. Tako postoji usjek u punom profilu, isjek i zasjek. Usjek s obje strane ima kosine odgovarajućeg nagiba. Isjek je u punom profilu u potpunosti usječen u teren i s niže strane, prema dolini je otvoren. Zasjek je dijelom u usjeku, a dijelom u nasipu. Odnos usjeka i nasipa u poprečnom presjeku ovisi o poprečnom nagibu terena i visinskoj razlici kote terena i kote nivelete.



*Slika 2.2. Usjek u punom profilu*



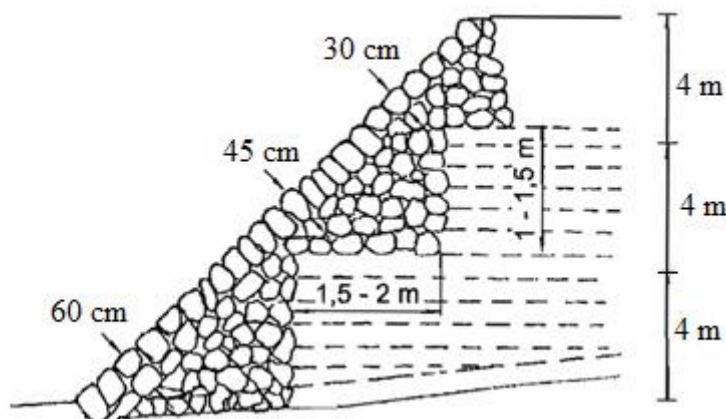
*Slika 2.3. Isjek*



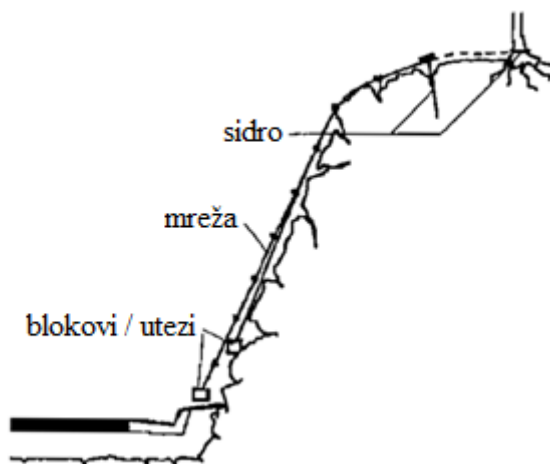
*Slika 2.4. Zasjek*

## 2.2. Zaštita pokosa

Zaštita pokosa radi se zbog toga da ne dođe do erozije i da se pokos zaštiti od vremenskih nepravilnosti, a ovisi o vrsti gradiva nasipa ili usjeka, o nagibima kosina i o prirodnom okruženju, a može biti provedena na više načina. U zemljanim i miješanim gradivima, zaštita pokosa se provodi na način da se sadi trava, grmlje, drveće i hidrosjetvom. Na nasipima od kamenih gradiva u prostorno ograničenom terenu mogu se izvoditi obloge pokosa na principu suhozida od grubo obrađenog kamena. Na stjenovitim kosinama koje su podložne odronima, može se postaviti zaštitna žičana mreža, koja je pri dnu zategnuta betonskim blokovima.



Slika 2.5. Obloga kamenom



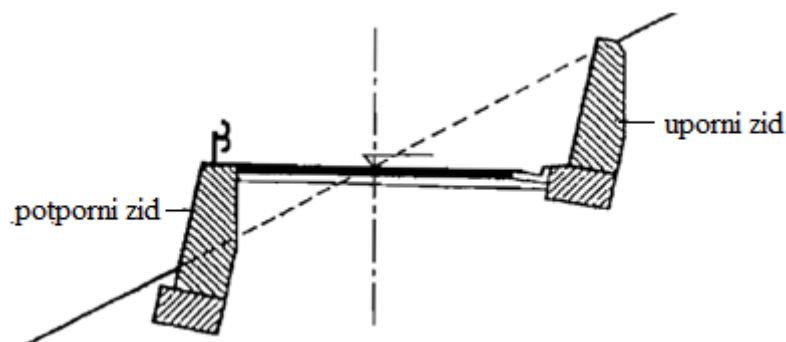
Slika 2.6. Žičana mreža

### 2.2.1. Zidovi

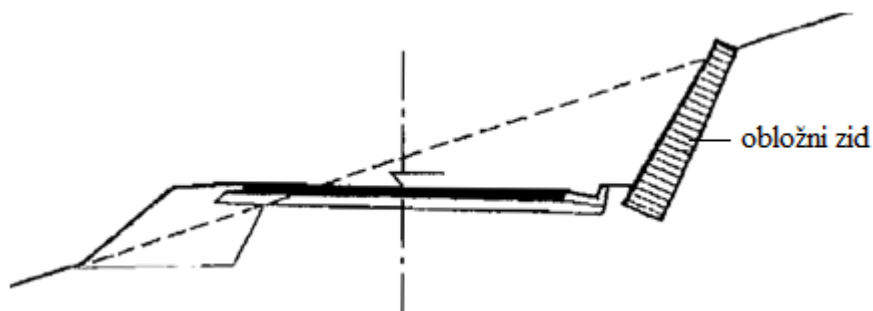
Zidovi su građevine koje osiguravaju stabilnost zemljanog trupa ceste, a izvode se obično prije ili za vrijeme izvedbe donjeg ustroja ceste. Zidovi se prema položaju i funkciji dijele na potporne, uporne i obložne zidove. Potporni zid može biti smješten uz sam kolnik ili podalje od ruba kolnika. Uporni zid, ovisno o sastavu tla i prostornim ograničenjima, može biti izveden u punoj visini ili s pokosom povrh krune zida.

Materijali od kojih se izrađuju zidovi su: beton, armirani beton, kamen, različiti montažni elementi od betona ili armiranog betona i žičane košare ispunjene kamenom (gabioni).

Ovisno o statičko-konstruktivnom ustroju, zidovi se dijele na krute (masivni, monolitni) i fleksibilne (montažne) zidove. Kruti zidovi primjenjuju se na tlima kod kojih neće doći do naknadnih deformacija, a savitljivi zidovi na tlima na kojima se očekuju naknadna umjerena slijeganja, koja će zid slijediti bez većih oštećenja.



*Slika 2.7. Potporni i uporni zid*



*Slika 2.8. Obložni zid*



## **2.3. Tuneli**

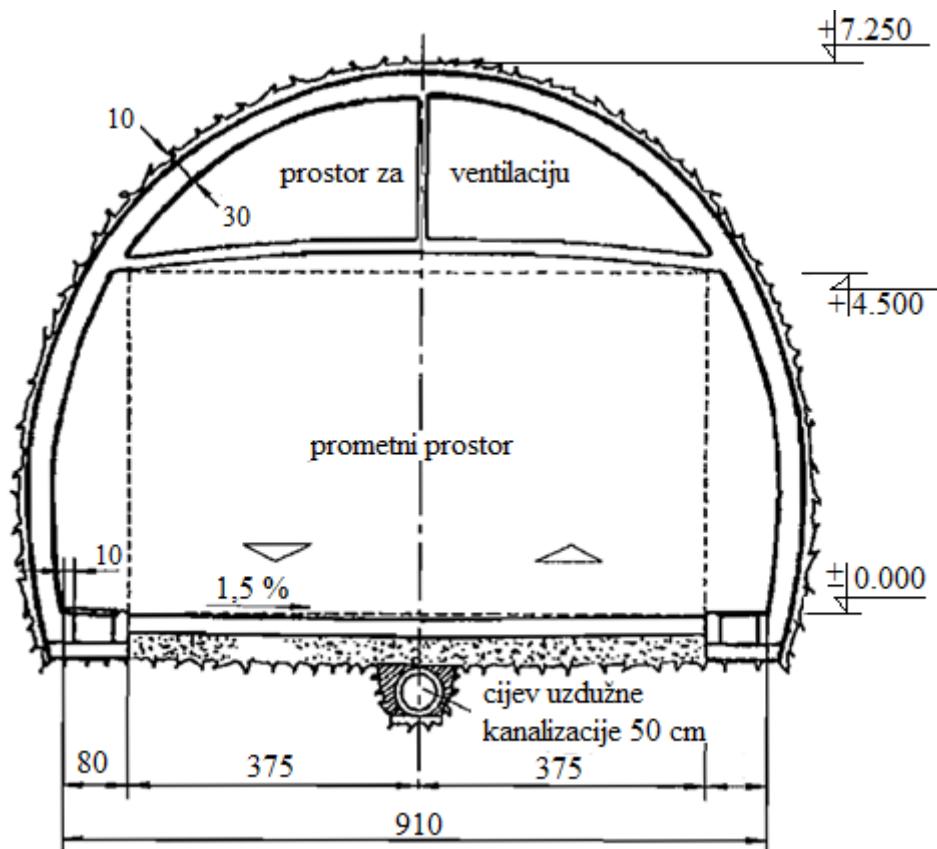
Tuneli su podzemne građevine u terenu, a služe provođenju prometnica, vodovoda itd. Izgradnjom tunela svladavaju se prirodne prepreke da bi se skratila trasa ili duljina putovanja. Prema namjeni tunele dijelimo na prometne, hidrotehničke, gradske, komunalne i tunele za posebne namjene. Prometni tuneli su željeznički, cestovni, brodarski, pješački i tuneli za gradski i javni promet. Tuneli se također dijele po duljini, pa tako postoje kratki tuneli ( $L \leq 500$  m), srednji tuneli ( $500 \text{ m} \leq L \leq 2000$  m) i dugi tuneli ( $L \geq 2000$  m).

### **2.3.1. Cestovni tuneli**

Oblik i veličina poprečnog presjeka cestovnih tunela ovise o razredu ceste, strukturi prometa i o geotehničkim svojstvima. Poprečni presjek mora biti racionalno isprojektiran kako bi bila što manja razlika između prometnog i slobodnog profila ceste unutar tunela. Nagib nivelete ( $s$ ) uvjetovan je duljinom tunela i razredom ceste, pri čemu je za dulje tunele uzdužni nagib uvjetovan zahtjevima koji vladaju unutar građevina. Minimalni nagib mora biti 0,5% ili 0,3%, zbog prirodne odvodnje, a maksimalni 2,5% ili 2,0%, zbog ispušnih plinova.

### **2.3.2. Tuneli za gradske podzemne željeznice**

Građevine ovog tipa specifične su po načinu vođenja linije, normalnom poprečnom profilu i po načinu građenja. Niveleta se zbog prirodnih prepreka i prometno-pogonskih razloga često uzdiže i spušta, mijenja tlocrtni smjer, prolazi ispod rijeka itd.

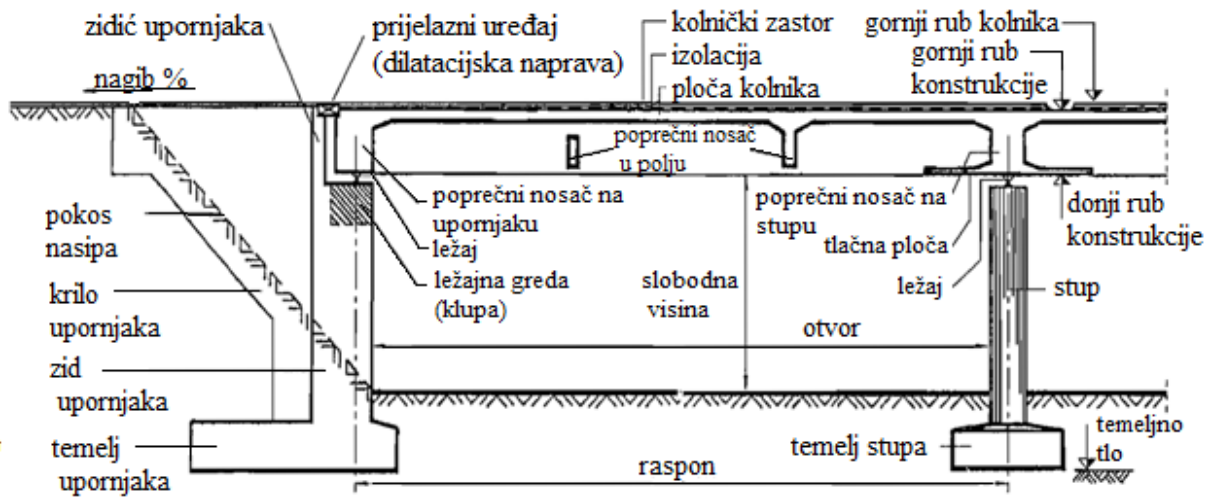


*Slika 2.9. Presjek tunela Mala Kapela*

## 2.4. Mostovi

Most je građevina za prijelaz preko prirodne ili umjetne zapreke (rijeke, potoci, doline, ceste, željeznice). Mostovi moraju udovoljavati određenim zahtjevima kao što su funkcionalnost, ekonomičnost, sigurnost, trajnost i dobro uklapanje u krajolik.

Mostovi dijelimo po vrsti materijala od kojih su građeni, pa tako postoje drveni, masivni (od kamena, opeke, armiranog i prednapregnutog betona), metalni (od lijevanog željeza, čelika, aluminija), te kombinacijom raličitih materijala. Još se dijele po vrsti prirodnih ili umjetnih zapreka koje premošćuju (nadvožnjaci, podvožnjaci, vijadukti), po namjeni, po vrsti sustava nosive konstrukcije (lučni, gredni, viseći).



Slika 2.10. Gredni most rebraste konstrukcije – dio uzdužnog presjeka



Slika 2.11. Gredni most rebraste konstrukcije – poprečni presjek

## **2.5. Gornji ustroj ceste**

Gornji ustroj je dio ceste koji izravno preuzima sva opterećenja od vozila u prometu i prenosi na donji ustroj ceste. Gornji ustroj se često terminološki poistovjećuje s kolničkom konstrukcijom. Suvremeni kolnici su sustavi sastavljeni od raznih materijala, koji su ugrađeni mehaniziranim postupcima u više slojeva. Prema površinskim svojstvima mogu se podijeliti na konstrukcije s asfaltnom i betonskom površinom. Kolnici s betonskom pločom se zbog velike krutosti nazivaju krute kolničke konstrukcije, a kolnici sa asfaltnim površinama svrstavaju se u skupinu savitljivih (fleksibilnih) kolničkih konstrukcija.

Funkcija gornjeg ustroja je prijenos statičkih i dinamičkih opterećenja bez da dođe do deformacija. Završni sloj (zastor) mora biti ravan, vodonepropusan, otporan na habanje i hrapav pod prometom. Geometrijski oblik površine mora osigurati kvalitetnu i učinkovitu odvodnju, a struktura zastora treba imati zahtijevana drenažna i ostala propisana svojstva.

Dimenzioniranje konstrukcije gornjeg ustroja provodi se za propisano prognozirano razdoblje (20 odnosno 10 godina) i za mjerodavne prometne i prirodne prilike (veličinu i strukturu prometa, osovinska opterećenja, nosivost donjeg ustroja te klimatske uvjete).

Gornji ustroj ceste (kolnik) sastoji se od cestovnog zastora i podloge. Cestovni zastor je završni sloj gornjeg ustroja, a najčešće se sastoji od habajućeg površinskog sloja i veznog sloja. Vezni sloj može biti od jednog ili dva sloja. Na cestama sa manjim prometom, cestovni se zastor može sastojati samo od habajućeg sloja.

Podloga se najčešće sastoji od dva ili tri sloja. Izrađuje se od različitih materijala, a kvaliteta pojedinih slojeva opada po dubini. Gornji sloj podloge obično se izvodi od kvalitetnog gradiva uz primjenu veziva. Donji sloj (tamponski sloj) podloge izvodi se kao zaštitni sloj od šljunka i pijeska.

### **2.5.1. Gradiva za izradu kolnika**

U prvom redu kvaliteta izrade podloge ceste i cestovnog zastora ovisi o vrsti materijala i tehnologiji ugradnje. Za izvedbu kolnika koristi se prirodni i umjetni kamen, a kao vezivno sredstvo cement, bitumen, katran itd.

Osnovno gradivo pri građenju cesta je prirodni kamen, a može biti ugrađen u obliku većih komada (kocaka), kao lomljenac u obliku prirodno usitnjenog (pijesak, šljunak) ili umjetno usitnjenog kamena (tučenac, kamena sitnež). Kod izbora kamenog materijala valja uzeti u obzir njegova mehanička svojstva (čvrstoću na pritisak, trošenje, žilavost), krupnoću i oblik zrna, te

njegov mineraloško-petrografski sastav (materijal treba biti otporan na atmosferske i kemijske utjecaje).

Kod izrade kolničkog zastora, za povezivanje zrna kamena koriste se razna veziva, koja mogu biti silikatna i ugljikohidratna. Silikatna veziva su cement i vodeno staklo, dok u ugljikohidratna spadaju bitumen, katran, prirodni asfalt, razrijeđeni bitumen i razne emulzije. Bitumen se dobiva kao derivat nafte. Pri izradi smjese važna je njegova tvrdoća, elastičnost, plastičnost, otpornost na kemijske utjecaje i izgaranje.

### **2.5.2. Podloge cestovnih zastora**

Podloga je dio kolnika na koji se postavlja cestovni zastor. Podloga preuzima sile koje djeluju na zastor (prometno opterećenje) i prenosi ih na zemljani trup. Zemljani trup kod suvremenih cesta sastoji se od koherentnog tla, pa se donji sloj podloge izvodi od šljunka i pijeska (tamponski sloj). Tamponskim slojem povećava se konstrukcija kolnika i omogućuje bolji prijenos prometnog opterećenja na zemljani trup ceste, poboljšava se otjecanje vode, sprečava utiskivanje zemlje u kamenu podlogu i omogućuje zaštita kolnika od štetnog djelovanja mraza.

Prema vrsti materijala, podloge mogu biti od lomljenog kamena, šljunka, tučenca, cementnog betona, stabiliziranog tla (cementom, bitumenom, vapnom), starih betonskih zastora.

Podloga od lomljenog kamena izvodi se od lomljenog kamena, klinastog ili piramidnog oblika, a debljina sloja je 20-25 cm.

Podloga od šljunka se izvodi u više slojeva. Nakon polaganja svakog sloja, šljunak se nabija i valja. Debljina jednog sloja je 15 cm, a ukupna debljina podloge 25-45 cm, ovisno o težini prometa.

Podloga od tučenca može biti od uvaljanog ili vibriranog tučenca. Sastoji se od jednog ili više slojeva tučenca, pri čemu se svaki sloj valja uz prskanje vodom. Ovisno o veličini prometa debljina te podloge je 15-30 cm.

Podloga od cementnog betona debela je 15-30 cm. Ako je debljina veća od 20 cm, onda su to dva sloja. Ta se podloga najviše izvodi za kolnike i pješačke staze gradskih ulica, a na pješačkim stazama njena je debljina 10 cm.

Podloge od stabiliziranog tla izvode se za manje opterećene ceste, a ima ih više vrsta (granularna stabilizacija, stabilizacija cementom, bitumenom ili vapnom).

### 2.5.3. Cestovni zastori

Cestovni zastor je završni površinski sloj kolnika i njegova uloga je preuzimanje opterećenja prometa i prenjeti ga na podlogu. Cestovni zastor mora biti otporan prema meteorološkim utjecajima (promjeni temperature, vjetru, snijegu), te na gornjoj površini preuzima sve vanjske horizontalne i vertikalne sile.. Debljina asfaltnog zastora je 2-5 cm, cementnog 5-7 cm, a zastora od kamenih kocki 8-10 cm. Zastori moraju biti izgrađeni tako da imaju čvrstu, ravnu i dostatno hrapavu površinu.

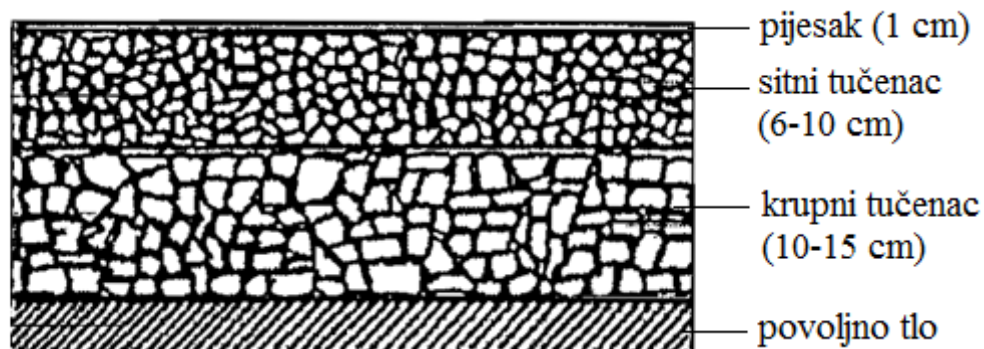
Na izbor cestovnog zastora utječu geometrijsko-tehnički elementi ceste, prometno i osovinsko opterećenje, vrsta prometa, klimatski uvjeti, kvaliteta donjeg ustroja i ekonomičnost gradnje. Prometno opterećenje jedan je od najvažnijih čimbenika koji utječu na izbor vrste cestovnog zastora, te se pritom uzima u obzir povećanje prometa za određeno vrijeme (10-20 godina). Na temelju dobivenog prometnog opterećenja i osovinskog opterećenja obavlja se izbor zastora za laki, srednji, teški i vrlo teški promet.

U zavojitim dijelovima ceste i dijelovima sa velikim uzdužnim nagibom, treba postaviti hrapavi zastor. Na cestama namijenjenim samo motornom prometu izvode se suvremeni zastori od asfalta i cementnog betona. U predjelima s vlažnom klimom i visokim temperaturama ne treba izvoditi zastore od bitumena i katrana jer na višim temperaturama ti zastori postaju plastični zbog čega se oštećuje njihova površina, osobito pri mješovitom prometu. Pri niskim temperaturama ti zastori postaju kruti i pucaju, a pri vlažnom vremenu su klizavi.

Ako je donji ustroj nestabilan, treba paziti na izbor zastora, pa je na takvim terenima najbolje primijeniti kamenu kocku.

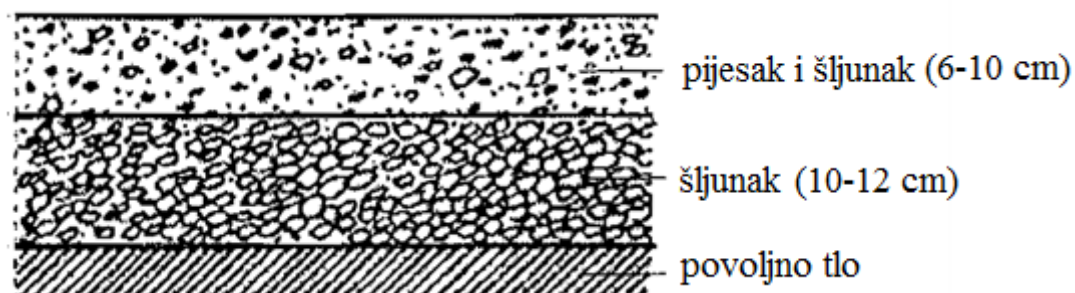
Cestovni zastori se s obzirom na vrstu materijala od kojega su izgrađeni dijele na, zastore od kamena, od umjetnih industrijskih proizvoda te cementnobetonske i tamne zastore uz uporabu bitumena ili katrana. Najčešće upotrebljavani zastori su zastor od tučenca i šljunka, zastor od malih i velikih kocaka, tamni zastori (asfaltbetonski) i cementnobetonski zastori.

**Zastor od tučenca** izvodi se na postojećim podlogama od lomljenog kamena, na koju se postavi sloj tučenca debljine 6-15 cm. Makadam je naziv za zastor od tučenca bez podloge koji se izvodi na čvrstom trupu ceste, gdje prometno opterećenje nije veliko. Njegova je debljina 15-25 cm, a ugrađuje se u dva ili tri sloja valjanjem i dodavanjem kamene sitneži uz prskanje vodom. Za donje slojeve koristi se kamen veće krupnoće, a za gornje slojeve sitniji kamen. Debljina vibriranog tučenca za laki promet je 15 cm, za srednji promet 20 cm, a za teški promet 25 cm.



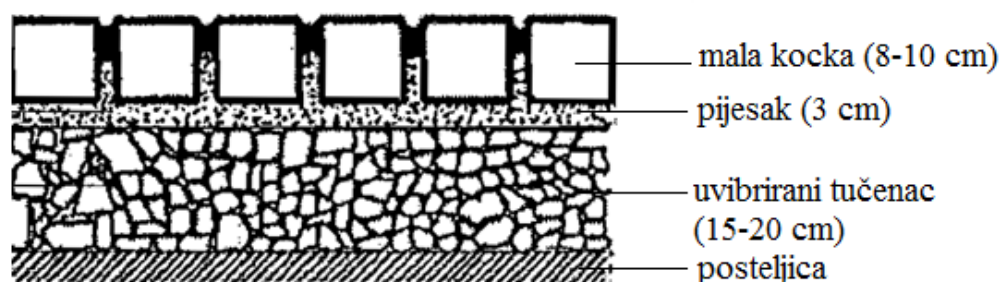
*Slika 2.12. Zastor od tučenca*

**Zastor od šljunka** koristi se na cestama sa slabim prometom, a izrađuje se na jednak način kao i podloga od šljunka, s time što se šljunak nanosi u dva sloja iznad kojih se uvalja sloj pijeska.



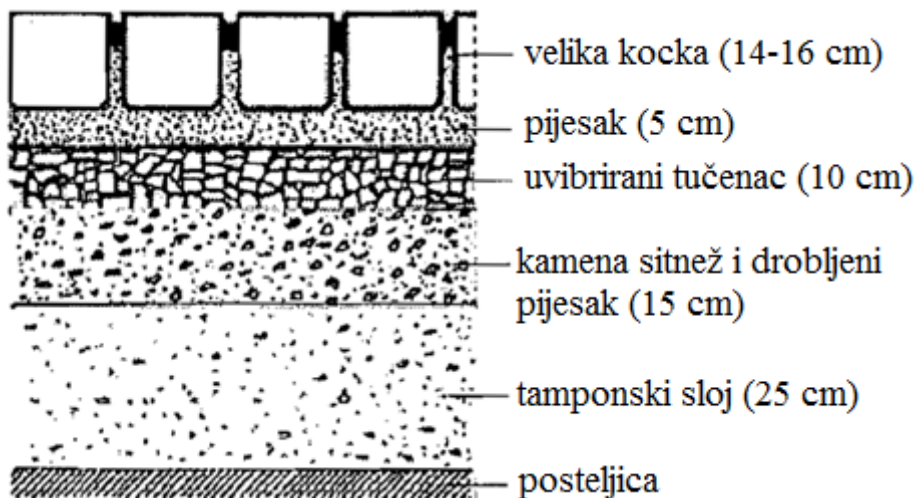
*Slika 2.13. Zastor od šljunka*

**Zastor od malih kocaka** služi za ceste s teškim prometom, a polaže se na podlogu od lomljenog kamena, tučenca ili betona.



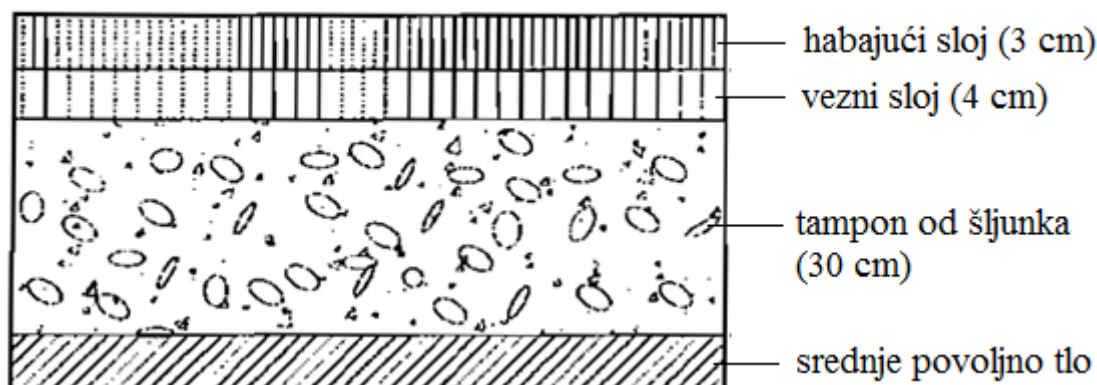
*Slika 2.14. Zastor od malih kocaka*

**Zastor od velikih kocaka** služi za težak promet, a polaže se na podlogu od kamena, betona, šljunka i pijeska.



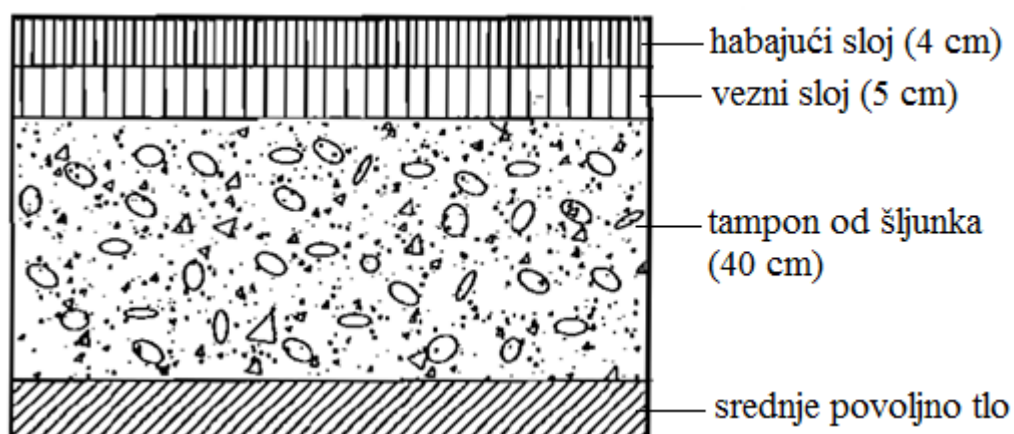
*Slika 2.15. Zastor od velikih kocaka*

**Suvremeni, tzv. tamni zastori**, najviše su u uporabi u modernoj cestogradnji. Izvode se po principu minimuma šupljina, pri čemu je kameni kostur sastavljen od točno odmjerenih količina kamene sitneži, pijeska i kamenog brašna. U mješavini treba biti što manji udio šupljina, čime se postiže manji utrošak asfalta kao veziva. Prema položaju i ulozi u kolničkoj konstrukciji, slojevi asfaltnog betona mogu biti krupnozrnati vezni i sitnozrnati habajući. Vezni sloj se upotrebljava za težak i srednje težak promet, a za lakši promet je dostatan samo habajući zastor. U habajućem sloju za najteži promet, preporučiva je uporaba samo plemenite kamene sitneži (bazalt, diabaz), dok se za lakše opterećene ceste upotrebljavaju i manje zahtjevni agregati.

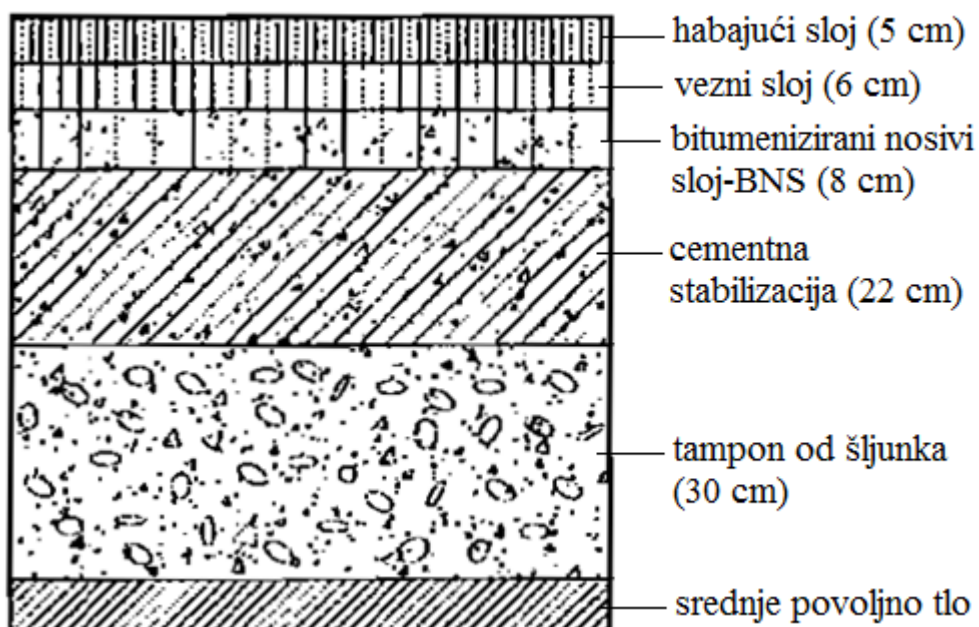


**Slika 2.16. Manji promet (4.razred)**





Slika 2.17. Srednji promet (2.razred)



Slika 2.18. Teški promet (AC/BC)

### 3. Dimenzioniranje kolničkih konstrukcija

U vrijeme kada je automobilski promet bio mali nije bilo nužno proračunavati kolničke konstrukcije, jer su se gradile tipske kolničke konstrukcije uglavnom bez vezanog zastora, koje su zadovoljavale tadašnje uvjete. No međutim naglim razvojem automobilske industrije dolazi do povećanja prometnog opterećenja, a samim time situacija se je počela mijenjati. Javlja se potreba za “oruđem“ pomoću kojega bi se mogle predviđati kolničke konstrukcije primjerene uvjetima i odgovarajućim, jačim, prometnim opterećenjima. U SAD-u pojavom teških vozila za prijevoz tereta na veće udaljenosti, postojeće ceste nisu to mogle izdržati i trebalo ih je opremiti jačim kolničkim konstrukcijama.

Opazanjem oštećenosti na postojećim kolnicima stečena su iskustva o činiteljima koji najviše utječu na njihovo ponašanje. Osim prometnog opterećenja na vijek trajanja kolničke konstrukcije velik utjecaj ima i vrsta tla, pa su se tridesetih godina razvile prve metode za dimenzioniranje kolničkih konstrukcija, koje su u proračun uključivale mali broj utjecajnih činitelja. Kasnije su one usavršavane, ali pravi temelji za izradu pouzdanih metoda postavljeni su tek izradom pokusnih dionica. Nakon razmjerno manjih pokusa na posebno izvedenim i opterećivanim dionicama cestovnih konstrukcija, šezdesetih su godina izvedeni veliki i dobro organizirani terenski pokusi, kao što je AASHO Road Test, iz kojih su dobiveni odgovarajući podaci i razvijene praktične metode za dimenzioniranje asfaltnih i betonskih kolničkih konstrukcija. Te su metode još i danas aktualne i primjerene, a zovu se “empirijskim metodama“. One omogućuju da se odredi pouzdana kolnička konstrukcija, jer je zapravo riječ o reproduciranju prije provjerenih rezultata. Metode su razmjerno jednostavne i vrlo su primjenjive, ali ne daju nikakav uvid o tome što se događa u kolničkim konstrukcijama izloženim vanjskim utjecajima, tj. posve su nepoznata naprezanja, deformacije i pomaci u konstrukcijama koji nastaju uslijed prometnog opterećenja i drugih utjecaja.

U međuvremenu značajan razvoj doživjeli su sustavi kolničkih konstrukcija i materijali, pa se današnji materijali i konstrukcije često razlikuju od onih u AASHO testu, stoga se njihova svojstva moraju procjenjivati, što znači određenu ograničenost.

U novije se vrijeme uvode teorijske metode projektiranja, koje nemaju nikakvih takvih ograničenja i pomoću njih se mogu provjeravati materijali bilo kakvih svojstva i bilo kakve sheme kolničkih konstrukcija. Teorijske se metode zasnivaju na izračunavanju naprezanja ili deformacija u pojedinim kritičnim presjecima konstrukcije i njihovoj usporedbi s nekim dopustivim vrijednostima tih pojava. Taj način analize je vrlo složen, pa su se iz tog razloga te metode razvile i uvele kasnije od empirijskih.

Suvremene kolničke konstrukcije višeslojni su sustavi, koji se sastoje od slojeva različitih materijala. Njihovo ponašanje pod prometnim opterećenjem i drugim utjecajima (temperatura, vlaga) složeno je. Kod novih konstrukcija, kratkotrajnog opterećenja i normalne temperature može se prihvatiti da je ponašanje materijala približno elastično. Tako su za proračune razrađene metode koje se osnivaju na linearnoj teoriji elastičnosti. Burmisterova rješenja i danas su temelj za proračune. Kako su proračuni po izvornim rješenjima vrlo složeni, načinjena su pomoćna sredstva (tablice, nomogrami) za određivanje naprezanja na lakši način. U novije doba načinjen je i niz programa za elektronička računala pomoću kojih je rad još više olakšan, a postignuta je i mnogo veća točnost proračuna.

Što se tiče materijala, njihove značajke (modul elastičnosti i Poissonov koeficijent) također dosta dugo nisu bile dobro istražene. Danas postoje brojna ispitivanja i dobro iskustvo s njima, no problem je u tome što značajke nekih materijala mogu uvelike ovisiti o temperaturi i vlazi, a one su, kad je riječ o cestama, promjenjive i nisu sasvim predvidive u nekom budućem vremenu uporabe ceste. Stanje na tom području sad je takvo da se mogu kontrolirati naprezanja i deformacije u konstrukciji, a na određeni način uzeti u obzir i pojava umora.

Kolničke konstrukcije važnijih cesta se u prvom koraku projektiraju pomoću empirijskih metoda, a zatim kontroliraju teorijskim metodama.

### **3.1. Projektiranje asfaltnih kolničkih konstrukcija**

Kolničke konstrukcije s asfaltnom površinom razvile su se iz cesta s makadamskim zastorima. Makadamski zastori počeli se se presvlačiti presvlakama temeljenim na ugljikovodičnim vezivima, zbog teškog održavanja takvih zastora, stvaranja prašine i nepovoljnih uvjeta vožnje. Između dva svjetska rata u gradovima se počinje koristiti lijevani asfalti, a izvan gradova, razni sustavi tankih presvlaka kao što su površinske obrade, miješani i utisnuti makadami. Osnovna konstrukcija sastojala se od kamena, a asfaltni su slojevi bili posve tanki. Do značajnijih promjena dolazi šezdesetih godina, kada je otkriven tzv. bitumenizirani šljunak. Prirodni pjeskoviti šljunak pomiješan u asfaltnoj bazi s bitumenom i ugrađen finišeom po vrućem postupku pokazao se kao izvrstan materijal za izradu podloga asfaltnih kolničkih konstrukcija.

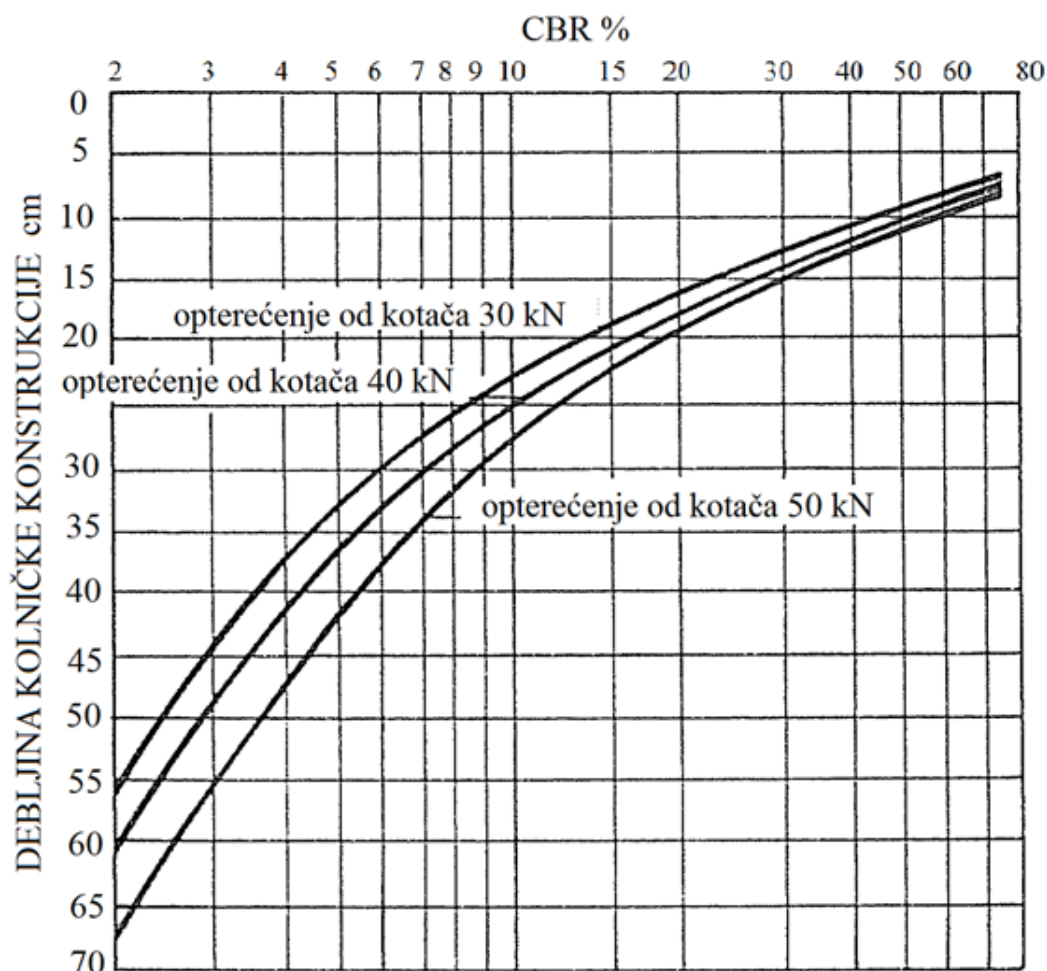
Zbog sve veće prisutnosti bitumeniziranih podloga, uvode se asfaltna postrojenja sve većeg kapaciteta. Kasnije se pokazalo da bitumenizirani šljunak nije dobar izbor kada je riječ o težem prometu jer dolazi do plastičnih deformacija. Bitumenizirani šljunak sastoji se od oblog zrna koji je zbog navedenih razloga zamjenjen drobljenim kamenim materijalom, pa se tako asfaltna kolničke konstrukcije dobile znatno deblji asfaltni dio u svom gornjem dijelu.

Za daljnji razvoj asfaltnih kolničkih konstrukcija za teški promet od velike važnosti bilo je uvođenje zrnatog kamenog materijala stabiliziranog cementom, koji je prvi put uveden 1945. godine u londonskoj zračnoj luci Heathrow, a kasnije se počeo sve više upotrebljavati na cestama.

Današnje asfaltna kolničke konstrukcije sastoje se od jednoslojnog asfaltnog zastora i od debljih nosivih slojeva od zrnatog kamenog materijala vezanog bitumenskim i hidrauličkim vezivima i sloja nevezanog mehanički zbijenog zrnatog materijala.

#### **3.1.1. Metode za dimenzioniranje asfaltnih kolničkih konstrukcija**

Jedna od prvih značajnijih metoda bila je CBR-metoda, koja se temeljila na opažanju ponašanja postojećih cesta izloženih prometu. CBR- metoda osnivala se na nosivosti tla izraženoj pomoću indeksa CBR. Za određeni CBR posteljice i određeno opterećenje kotača iz dijagrama dobivala se potrebna debljina kolničke konstrukcije. Dijagram ne uzima u obzir bitne pokazatelje kao što su intenzitet prometa ili vrsta materijala kolničke konstrukcije.



*Slika 3.1. Dijagram za dimenzioniranje kolničkih konstrukcija po CBR metodi*

Kasnije su napravljene brojne modifikacije i poboljšanja te metode. Slična metoda je metoda grupnog indeksa, koji se izračunavao iz određenih elemenata granulometrijskog sastava i granica konzistencije tla.

Sve te rane metode nastale su na temelju iskustava dobivenih iz promatranja postojećih cesta. Ubrzo se pokazalo da takva zapažanja nisu dovoljna i ne daju dovoljno brzo tražene rezultate, pa se zbog toga prelazi na izradu pokusnih dionica, koje su opterećivane intenzivnim prometom i na njima su obavljana potrebna opažanja. Neke od takvih pokusnih dionica bile su tako dobro planirane i izrađene, da se i dan danas koristimo rezultatima i iskustvima što su dobiveni opažanjima, te materijalima koji su se koristili na tim dionicama.

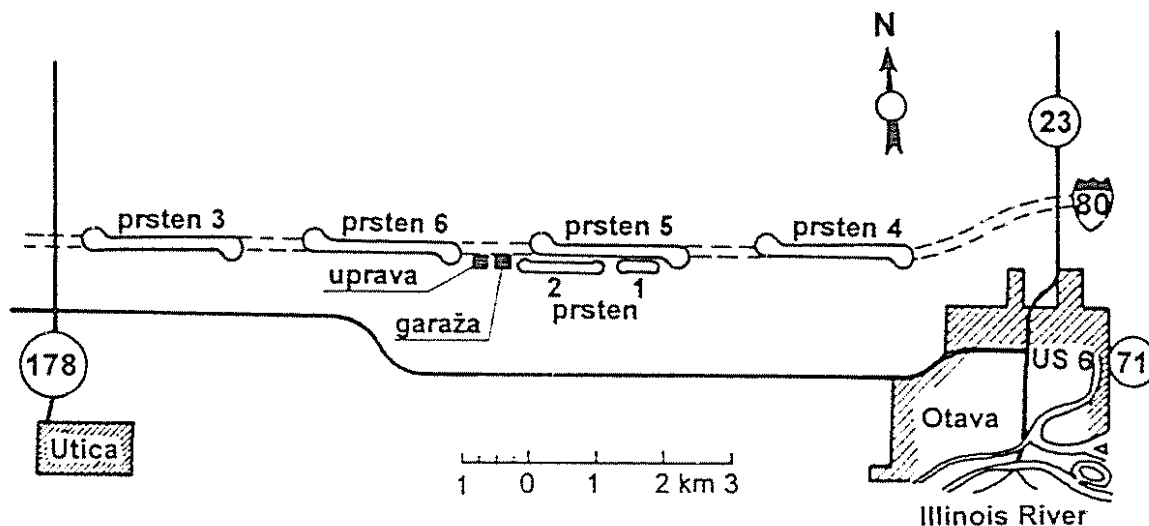
Neki od pokusa temeljenih na pokusnim dionicama su:

- Pokusna dionica kod Braunschweiga u Njemačkoj (1925.)
- WASHO Road Test u SAD (1950.)
- Pokusna dionica kod Alconbury Hilla u Engleskoj (1965.)
- AASHO Road Test, SAD (1957.-1961.)

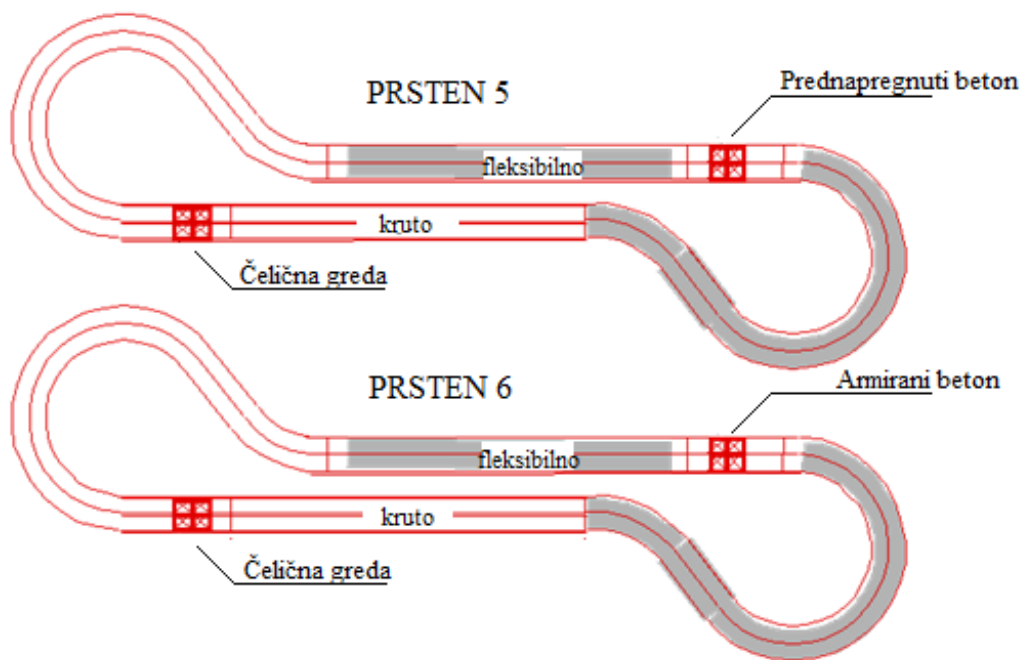
### 3.1.2. AASHO test

AASHO test planiran je na temelju iskustava sa prijašnjih, manjih pokusnih dionica, osobito WASHO Road Test-a. Pokus je obuhvatio izradu mnogo različitih kolničkih konstrukcija odnosno prstenova. Izrađena su četiri velika i dva manja prstena s nekoliko stotina savitljivih i krutih konstrukcija, točnije sjeverne strane prstenova imale su savitljive kolničke konstrukcije, a južne krute. Pokus je rađen u Illinoisu na terenu koji se većinom sastojao od gline i koji je karakterističan za velike dijelove SAD-a. Nastojalo se da tlo u posteljici bude što više ujednačeno. Posteljica kolničkih konstrukcija imala je kalifornijski indeks nosivosti, CBR=3%.











Prsten broj 1 nije bio opterećivan prometom da bi se ustanovio samo utjecaj okoline. Po prstenu 2 kretala su se samo lagana vozila. Glavni prstenovi (3-6), imali su dužinu svaki oko 2,5 km i po njima su se vozili kamioni. Po vanjskim trakama kretala su se vozila s jednostrukim osovinama, a po unutrašnjima trakama vozila s dvostrukim osovinama.



Slika 3.2. Pokusne dionice u okviru AASHO pokusa



*Slika 3.3. Pokusne dionice (prstenovi 5 i 6) u okviru AASHTO pokusa*

PRSTEN	KOLNIK	OPTEREĆENJE [kN]	
		PREDNJA OSOVINA	STRAŽNJA OSOVINA
2	①  prednja stražnja	9	9
	②  prednja stražnja	9	26
3	①  prednja stražnja stražnja	17,6	53
	②  prednja stražnja stražnja	26	107
4	①  prednja stražnja stražnja	27	80
	②  prednja stražnja stražnja	40	142
5	①  prednja stražnja stražnja	27	100
	②  prednja stražnja stražnja	41	177
6	①  prednja stražnja stražnja	41	133
	②  prednja stražnja stražnja	54	214

**Tablica 3.1.** Sheme vozila u AASHO pokusu s osovinskim opterećenjima



Slojevi kolničkih konstrukcija sastojali su se od:

- Za savitljive konstrukcije
  - o Asfaltni zastor
  - o Nosivi sloj od drobljenog kamenog materijala
  - o Nosivi sloj od šljunčanog materijala
- Za krute konstrukcije
  - o Betonska ploča
  - o Šljunčana podloga

Debline slojeva bile su različite. Tako je asfaltni zastor savitljivih konstrukcija bio deo od 2,5 cm do 15 cm, nosivi sloj od drobljenog kamena od 0 do 23 cm i nosivi sloj od šljunka od 0 do 40 cm. Krute konstrukcije imale su nearmiranu i armiranu betonsku ploču debljine 6 do 32 cm i podlogu od šljunka od 0 do 23 cm.

Najvažniji zadatak AASHO pokusa bio je taj da se uspostave empirijski odnosi između ponašanja kolničke konstrukcije, izraženog pomoću indeksa vozne sposobnosti kolnika –  $p$ , faktora opterećenja osovine  $L$ , intenziteta prometa  $W$ , oblika opterećenja  $A$  (jednostruke ili dvostruke osovine) i debljine slojeva  $D_i$ .

$$p = f(L, A, W, D);$$

$$p = p_o - (p_o - p_t) \left( \frac{W}{\rho} \right)^\beta$$

$p$  – indeks vozne sposobnosti kolnika

$p_o$  – početni indeks vozne sposobnosti kolnika (za savitljive kolnike iznosio je 4,2, a za krute 4,5)

$p_t$  – konačni indeks vozne sposobnosti kolnika (u pokusu AASHO išlo se do  $p_t = 1,5$ , a onda je promet obustavljen)

$\beta, \rho$  – funkcije  $L, A, D_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ )

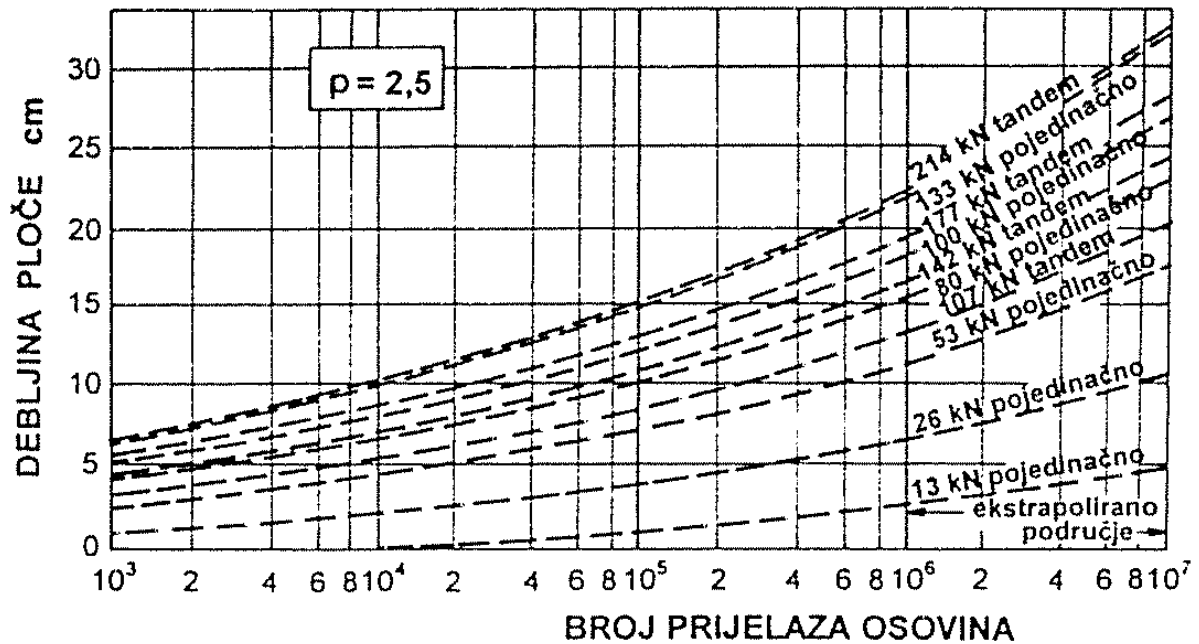
Indeks vozne sposobnosti kolnika dobiva se inače ocjenom stanja kolnika (na osnovi neravnina, pukotina itd.), te je od 5,0 na idealnom, novom kolniku do 0 na potpuno uništenom kolniku.

S obzirom na početne i konačne indekse vozne sposobnosti, jednadžba je glasila:

Za savitljive kolnike:

$$p = 4,2 - 2,7 \left( \frac{W}{\rho} \right)^\beta$$



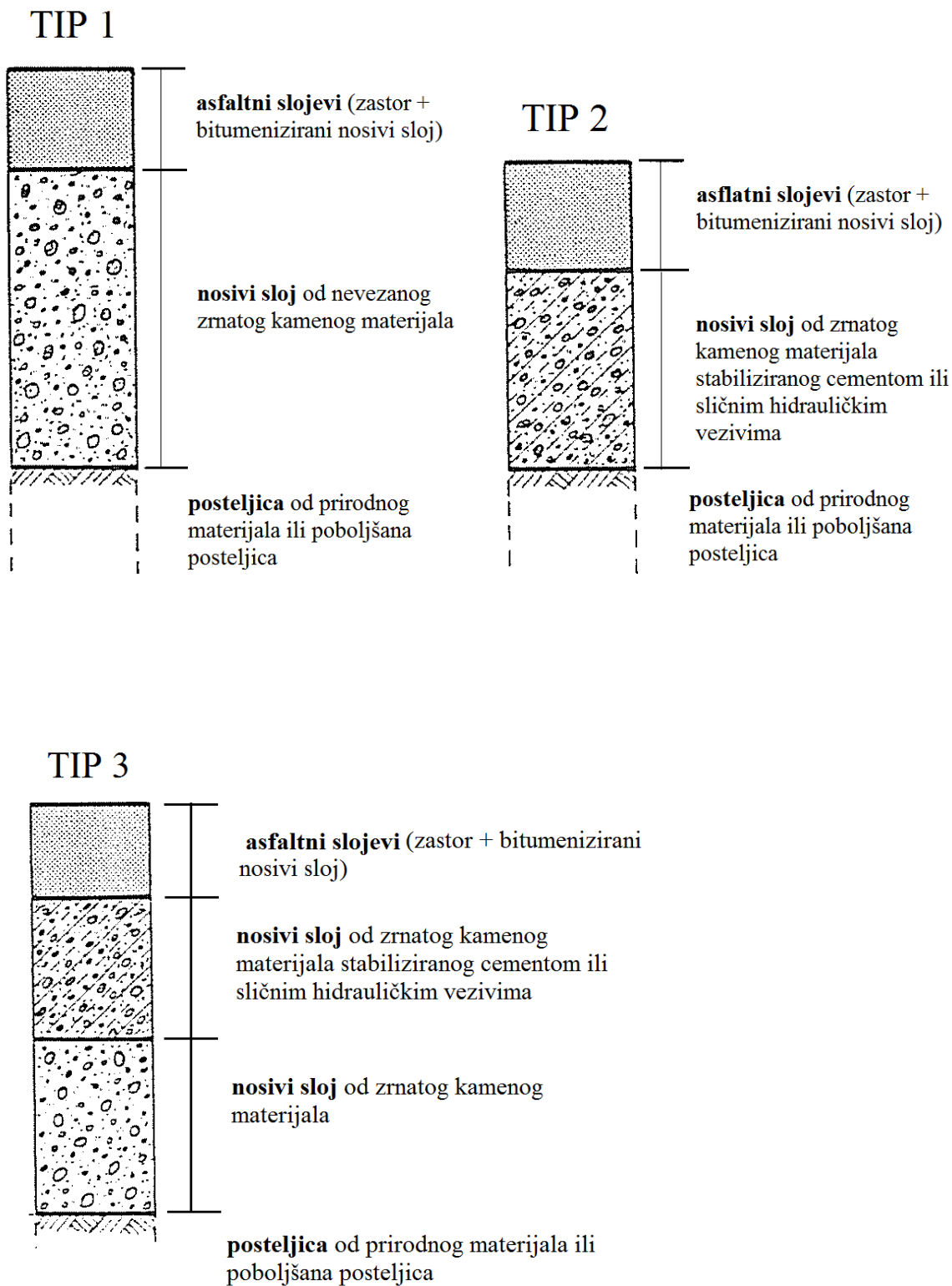


Slika 3.5. Dijagram odnosa debljine betonske ploče i broja prijelaza za betonske kolničke konstrukcije

### 3.1.3. Metoda za dimenzioniranje asfaltnih kolničkih konstrukcija po HRN U.C4.012.

Norma za dimenzioniranje kolničkih konstrukcija s asfaltnom površinom izrađena je sa željom da se što je moguće više ujednači dimenzioniranje kolničkih konstrukcija u našoj zemlji, a kao osnova za izradu ove metode poslužila je metoda AASHO. Norma međutim nije obvezatna, tako da se ne isključuje upotreba drugih metoda, pogotovo teorijskih..

U metodi HRN neki su parametri uzeti konstantni (vozna sposobnost kolnika  $p = 2,5$ ; klimatske prilike  $R = 2$ ). Kao posebnu prednost ove metode treba istaknuti činjenicu da se njome ne provjerava neka unaprijed predviđena konstrukcija, već se potrebne debljine pojedinih slojeva određuju neposredno. Predviđena je mogućnost za dimenzioniranje tri tipa kolničkih konstrukcija.



Slika 3.6., 3.7., 3.8. Tipovi rješenja kolničkih konstrukcija po HRN-metodi

U postupku dimenzioniranja uključeni su ovi parametri:

- Projektno razdoblje (ne preporučuje se kraće od 5 godina, niti duže od 20 godina)
- Prometno opterećenje (određuje se prema normi HRN U.C4.010.)
- Nosivost posteljice (izražava se CBR indeksom)
- Kakvoća materijala u konstrukciji

Što se tiče kakvoće materijala, mogu se primjenjivati svi materijali predviđeni odgovarajućim hrvatskim normama. Vrijednost materijala određuje se pomoću odgovarajućih koeficijenata zamjene.

<b>Vrsta materijala</b>	<b>Prosječni koef. zamjene materijala</b>	<b>Sastav i svojstva prema HRN</b>
Asfaltbeton	0,42	U.E.4.014
Bitumenizirani drobljeni kameni materijal	0,35	U.E.9.021
Bitumenizirani šljunak s dodatkom kamene sitneži (min 30 %)	0,33	U.E.9.021
Bitumenizirani šljunak	0,28	U.E.9.021
Bitumenizirani materijal za donje nosive slojeve	0,24	U.E.9.028
Stabilizacija cementom	0,20	U.E.9.024
Stabilizacija vapnom	0,17	U.E.9.026
Tucanik	0,14	U.E.9.020
Drobljeni kameni materijal	0,12	U.E.9.020
Pjeskoviti prirodni šljunak	0,11	U.E.9.020
Drobljeni prirodni šljunak	0,11	
Prirodni šljunkoviti pijesak	0,07	

**Tablica 3.2.** Prosječni koeficijenti zamjene materijala

## 4. Modeliranje u programu PLAXIS

Plaxis je program, koji se isključivo koristi za analizu deformacija i stabilnosti u geotehničkim projektima. Jednostavan grafički unos (input) omogućava brzi proračun kompleksnih modela. Proračun podataka je automatiziran i sastoji se od većeg broja operacija, dok izlaz (output), grafički detaljno prikazuje dobivene rezultate.

MATERIJAL	MODEL	ZAPREMINSKA TEŽINA	KARAKTERISTIKE	POISONOV KOEFICIJENT
ASFALT	Lin.-el.	$\gamma_{\text{usat}} = 22 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{\text{sat}} = 24 \text{ kN/m}^3$	$E_{\text{ref}} = 2000 \text{ MPa}$	0,30
POSTELJICA	Mohr-Coulomb	$\gamma_{\text{usat}} = 17 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{\text{sat}} = 19 \text{ kN/m}^3$	$E_{\text{ref}} = 150 \text{ Mpa}$ $c = 0,1$ $f_i = 45$	0,35
NASIP	Lin.-el.	$\gamma_{\text{usat}} = 17 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{\text{sat}} = 20 \text{ kN/m}^3$	$E_{\text{ref}} = 100 \text{ MPa}$	0,40
TEMELJNO TLO	Lin.-el.	$\gamma_{\text{usat}} = 18 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{\text{sat}} = 20 \text{ kN/m}^3$	$E_{\text{ref}} = 20 \text{ MPa}$	0,45
HUMUS	Lin.-el.	$\gamma_{\text{usat}} = 13 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{\text{sat}} = 15 \text{ kN/m}^3$	$E_{\text{ref}} = 10 \text{ MPa}$	0,50

*Tablica 3.3. Svojstva materijala korištena kod proračuna u Plaxisu*

## 4.1. Deformacije 1.-3. razred

Ceste od prvog do trećeg razreda su po kvaliteti i po načinu izrade vrlo slične, zbog približno jednakih veličina prometa, pa sam iz tog razloga u plaxisu napravio zajednički model za ceste iz prvog, drugog i trećeg razreda.

Zbog sličnosti cesta od 1. do 3. razreda, pretpostavimo da su dimenzije osnovnih elemenata poprečnog presjeka ceste jednake.

Prometni trak – 3,25 m

Rubni trak – 0,30 m

Bankina – 1,20 m

Dimenzije kolničke konstrukcije za 1.-3. razred su sljedeće:

Posteljica – 0,40 m

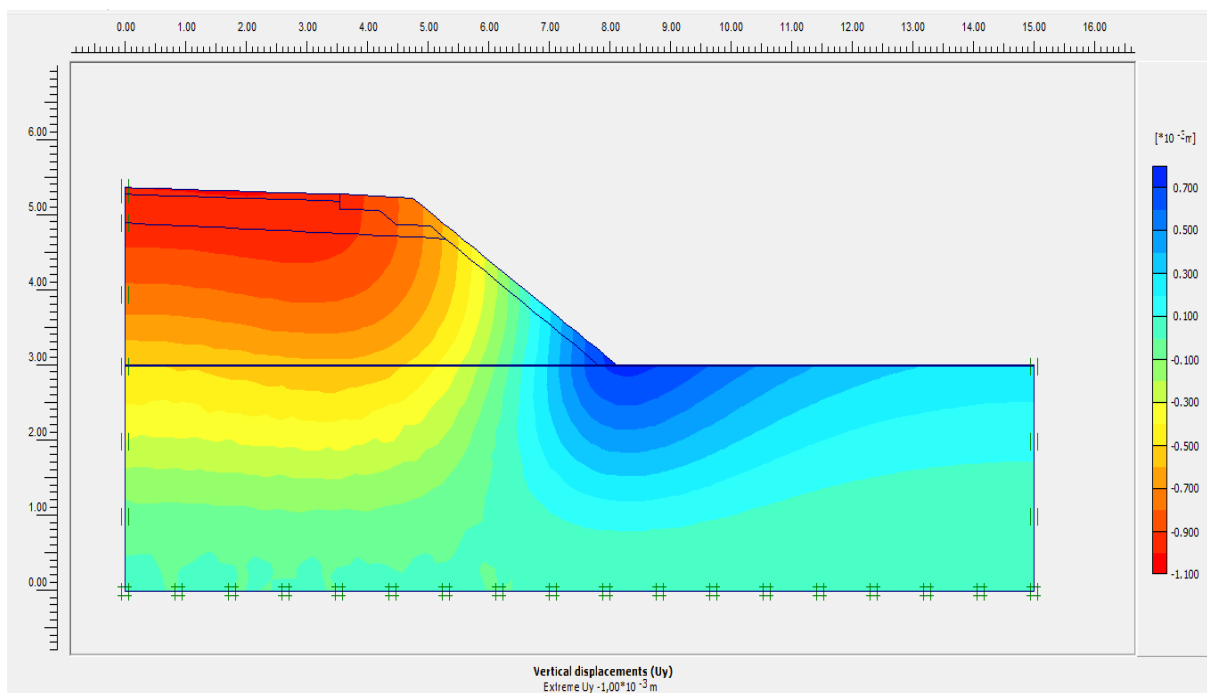
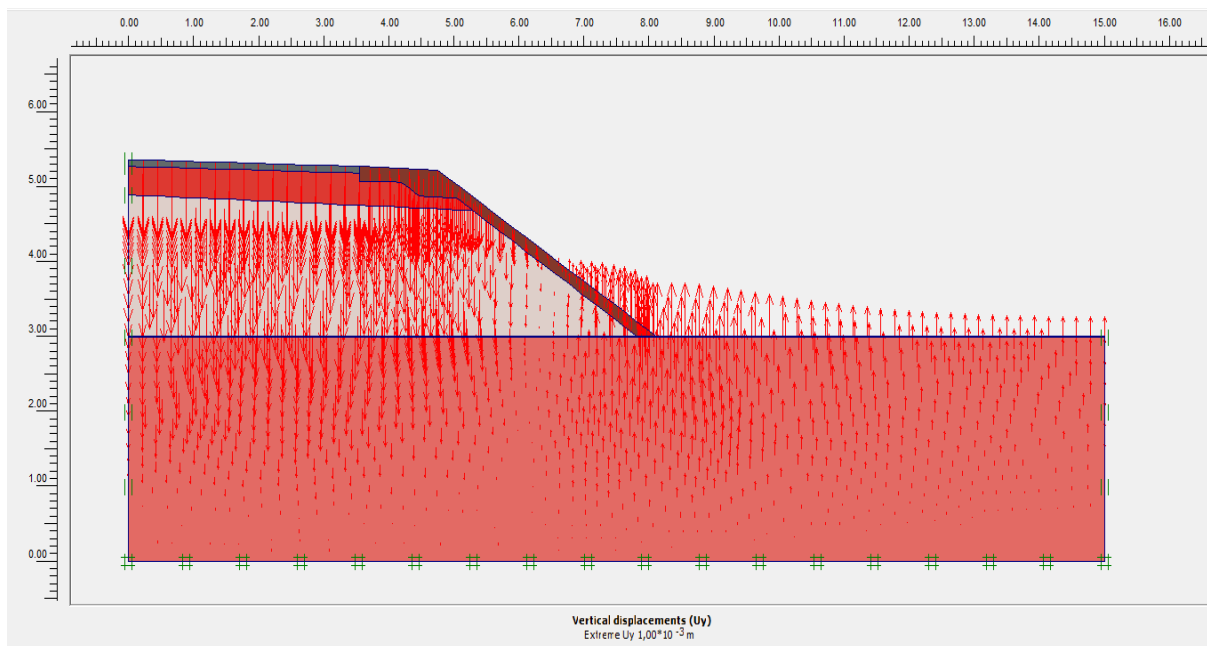
Vezivni sloj – 0,05 m

Habajući sloj – 0,04 m

Kod proračuna deformacija u plaxisu, najviše pozornosti sam posvetio grafičkom prikazu ukupnih i vertikalnih deformacija.

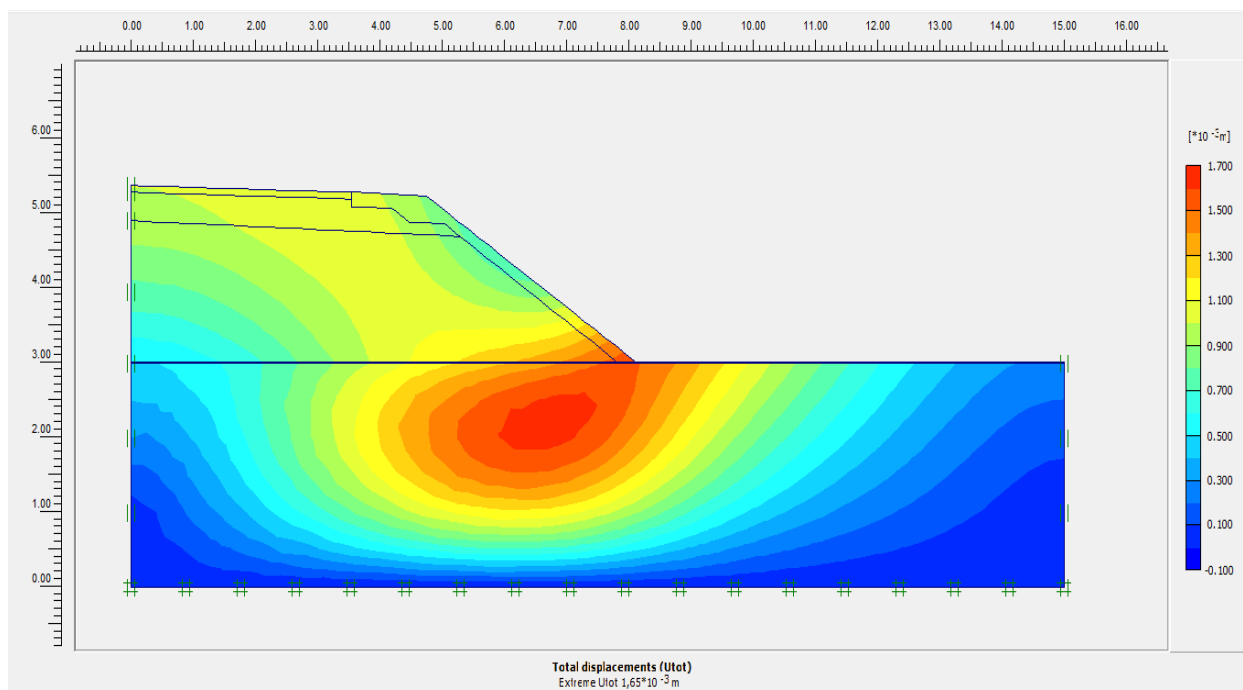
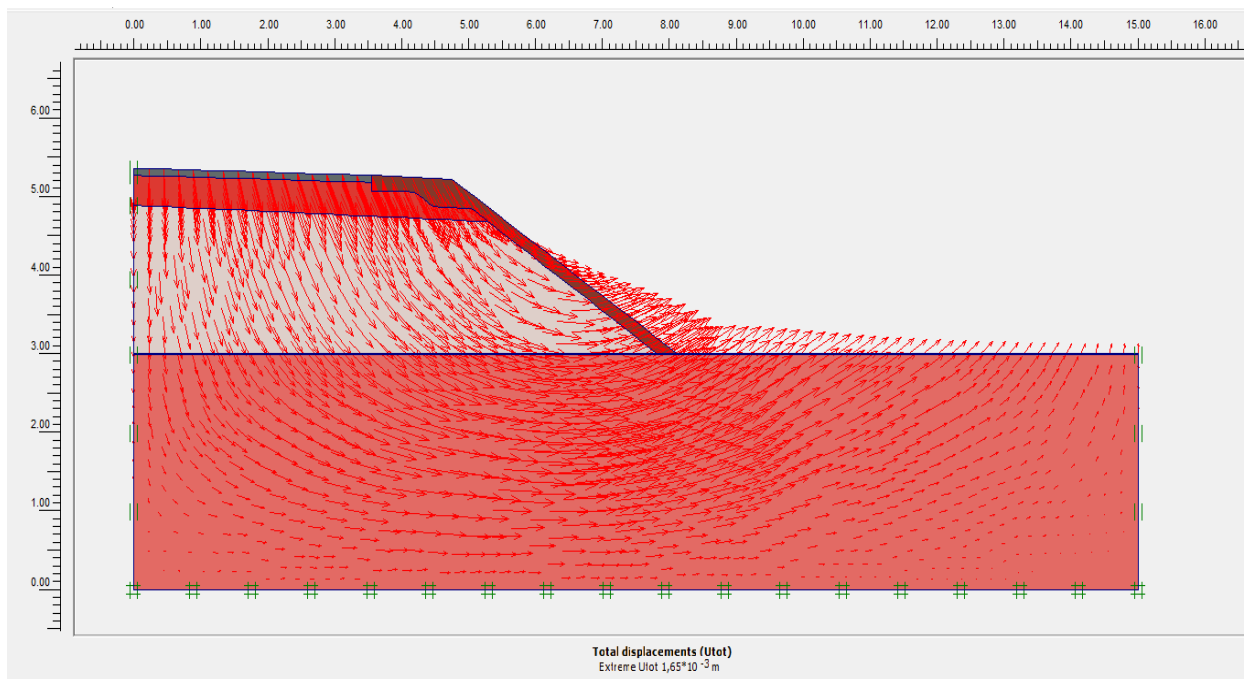
Grafički prikaz ceste u nasipu (slika 4.1. i 4.2.) prikazuje vertikalne deformacije (slijeganja), kao posljedicu vlastite težine gornjeg ustroja ceste. Kod prvog razreda slijeganja (prometno opterećenje) bi bila najmanja zbog kvalitetnije izrade kolničke konstrukcije. S druge strane slijeganja do kojih dolazi zbog utjecaja vlastite težine gornjeg ustroja ceste, će biti veća nego npr. za ceste iz 4. ili 5. Razreda.

Izradi ovih modela pristupio sam s pretpostavkom da ceste od prvog do trećeg razreda imaju približno jednaka svojstva nosivosti. Uz grafički prikaz (slika 4.1. i 4.2.) ispisane su maksimalne vrijednosti slijeganja (vlastita težina gornjeg ustroja ceste) za 1.-3. razred te iznose 0.001m.



*Slika 4.1. i 4.2. Vertikalni pomak tla (slijeganje); 1.-3. Razred*





*Slika 4.3. i 4.4. Ukupni pomak tla 1.-3.razred*

Iz grafičkog prikaza za ukupni pomak, jasno je vidljivo da će se pomak dogoditi u podnožju nasipa (utjecaj vastite težine gornjeg ustroja ceste) i to za  $1,65 \cdot 10^{-3}$  metara ili 1,65 milimetara.

## 4.2. Deformacije 4. i 5. razred

Ceste 4. i 5. razreda su ceste koje se koriste kod malog i vrlo malog prometa. Kod izrade takvih cesta dimenzije kolničkih konstrukcija su manje i samim time je i nosivost manja, nego kod cesta 1.-3. razreda. Ceste 4. i 5. razreda su po kvaliteti i po načinu izrade vrlo slične, pa sam u plaxisu napravio zajednički model.

Pretpostavimo da su dimenzije osnovnih elemenata poprečnog presjeka ceste jednake.

Prometni trak – 2,75 m

Rubni trak – 0,20 m

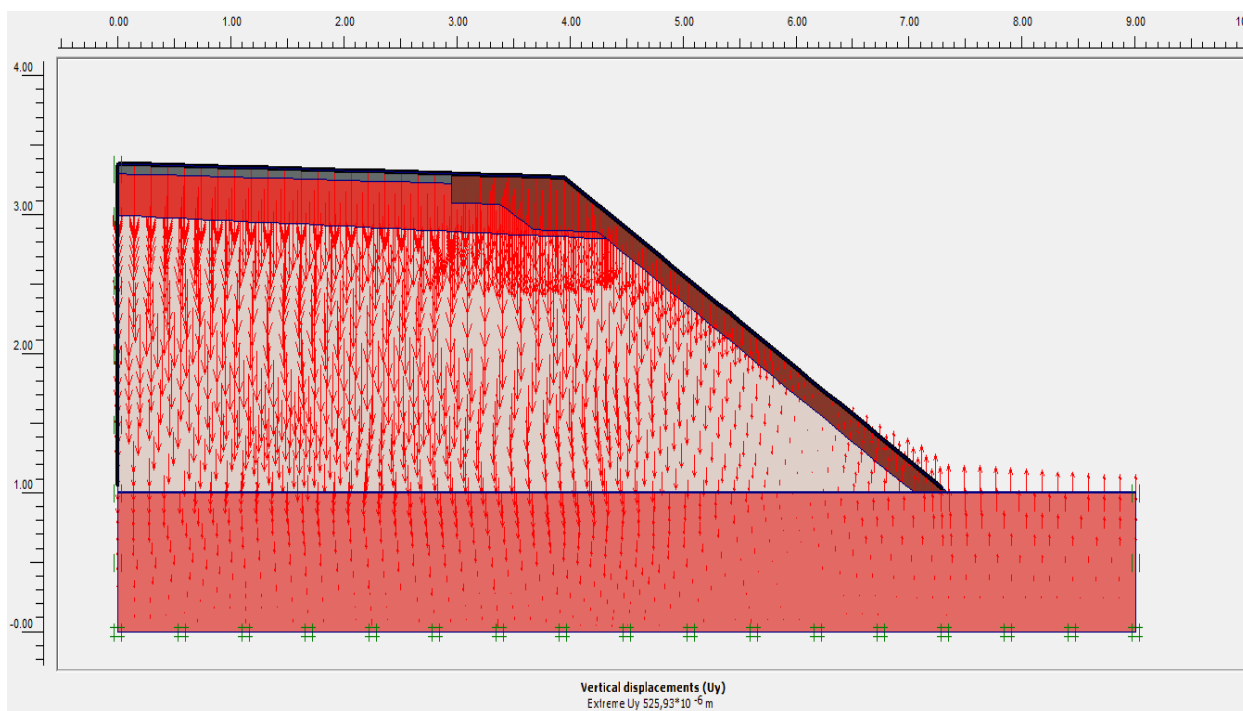
Bankina – 1,00 m

Dimenzije kolničke konstrukcije za 4. i 5. razred su sljedeće:

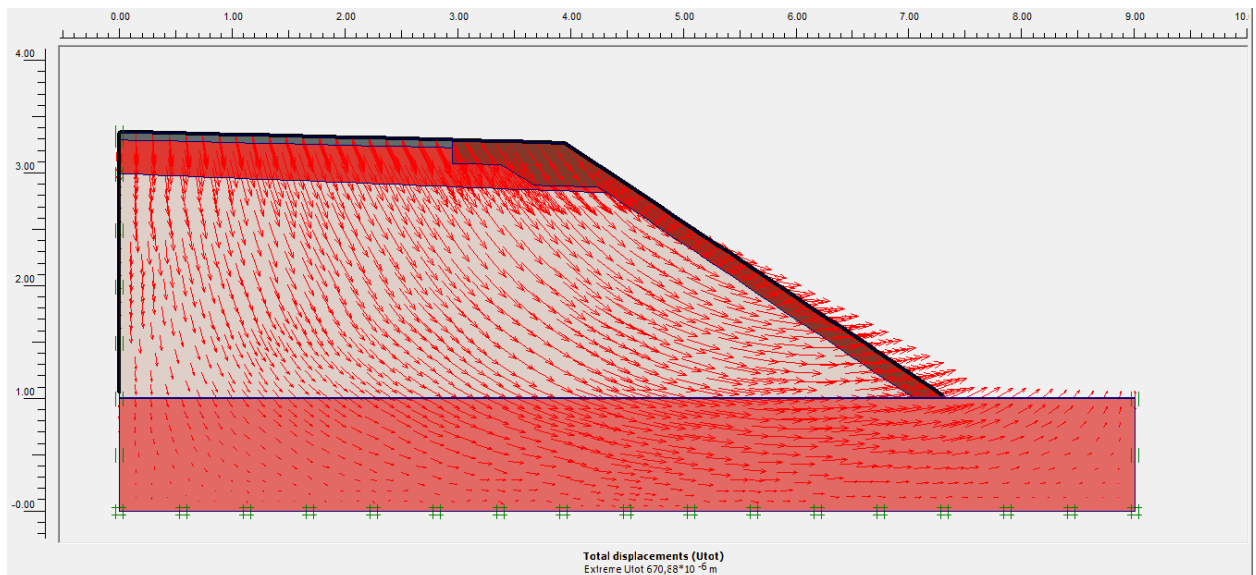
Posteljica – 0,30 m

Veživni sloj – 0,04 m

Habajući sloj – 0,03 m



*Slika 4.5. Vertikalni pomak tla (slijeganje) 4. i 5. razred*



**Slika 4.6.** Ukupni pomak tla 4. i 5. razred

Po veličini prometa, ceste 4. i 5. razreda su ceste za mali i vrlo mali promet. Naravno po kvaliteti i svojstvima nosivosti ceste 5. razreda su najlošije. Ali kod izrade modela koristio sam se pretpostavkom da su ta dva razreda cesta jednaka. Nakon unosa geometrijskih vrijednosti i vrijednosti čvrstoće tla, svojstva tla i svojstva materijala u program plaxis, program automatski proračunava i daje vrijednosti slijeganja, uslijed vlastite težine gornjeg ustroja ceste. Za 4. i 5. razred slijeganje iznosi  $525,93 * 10^{-6}$  metara (slika 4.5.).

Također sam dobio rezultate za ukupni pomak koji iznosi  $670,88 * 10^{-6}$  metara (slika 4.6.)

### 4.3. Deformacije AC/BC

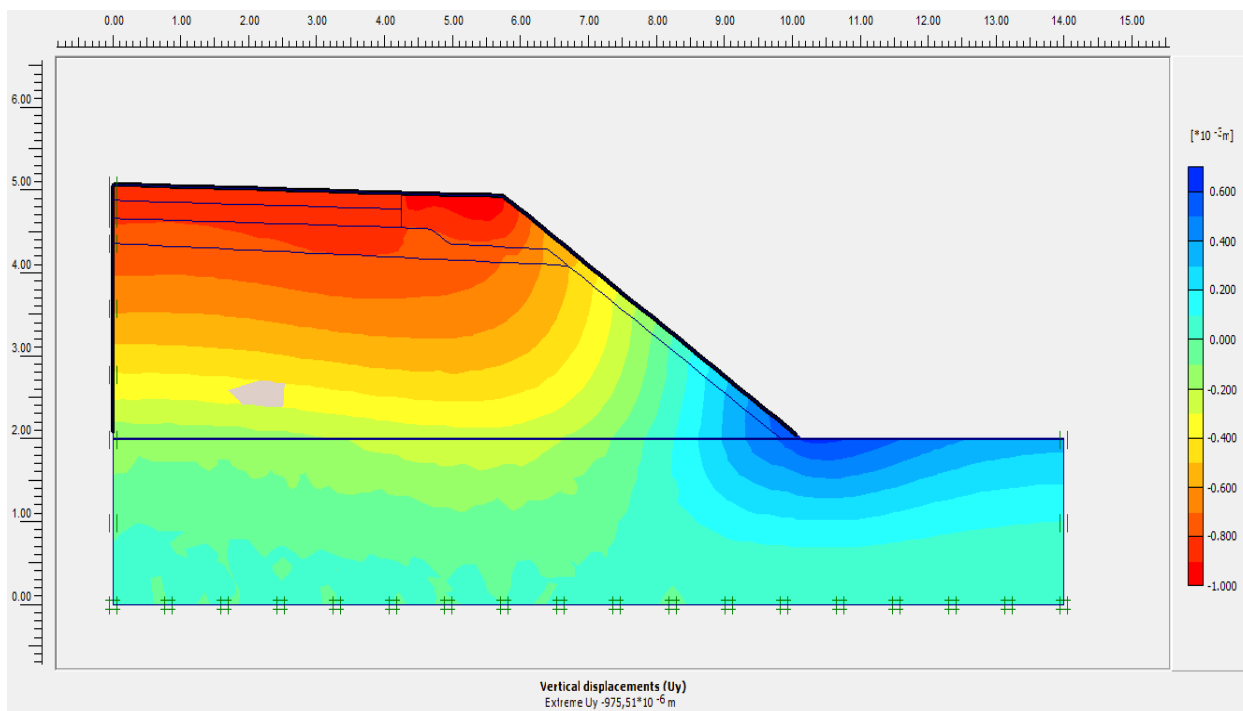
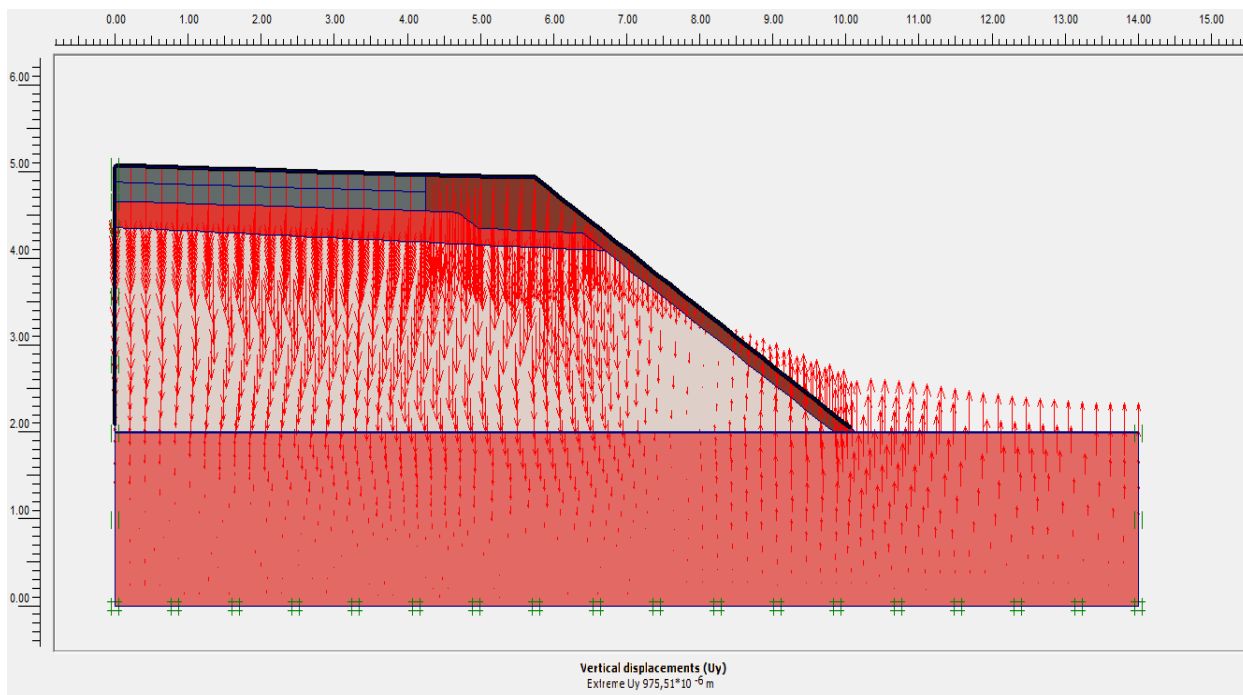
Prema prometnoj podjeli, auto ceste i brze ceste su ceste s najvećim prometom koji je dobiven na temelju PGDP-a. PGDP – prosječni godišnji dnevni promet je broj motornih vozila koji se na kraju planskog razdoblja od 20 godina očekuje na cesti u toku 24 sata.

Autoceste i brze ceste su ceste kod kojih je potrebno kolničku konstrukciju “pojačati“ (cementna stabilizacija i deblji slojevi vezivnog i habajućeg sloja), zbog velikog prometnog opterećenja, a samim time slijeganja (prometno opterećenje) kod takvih kolničkih konstrukcija su svedena na minimum upravo zbog toga da bi se produljio vijek trajanja autocesta i brzih cesta.

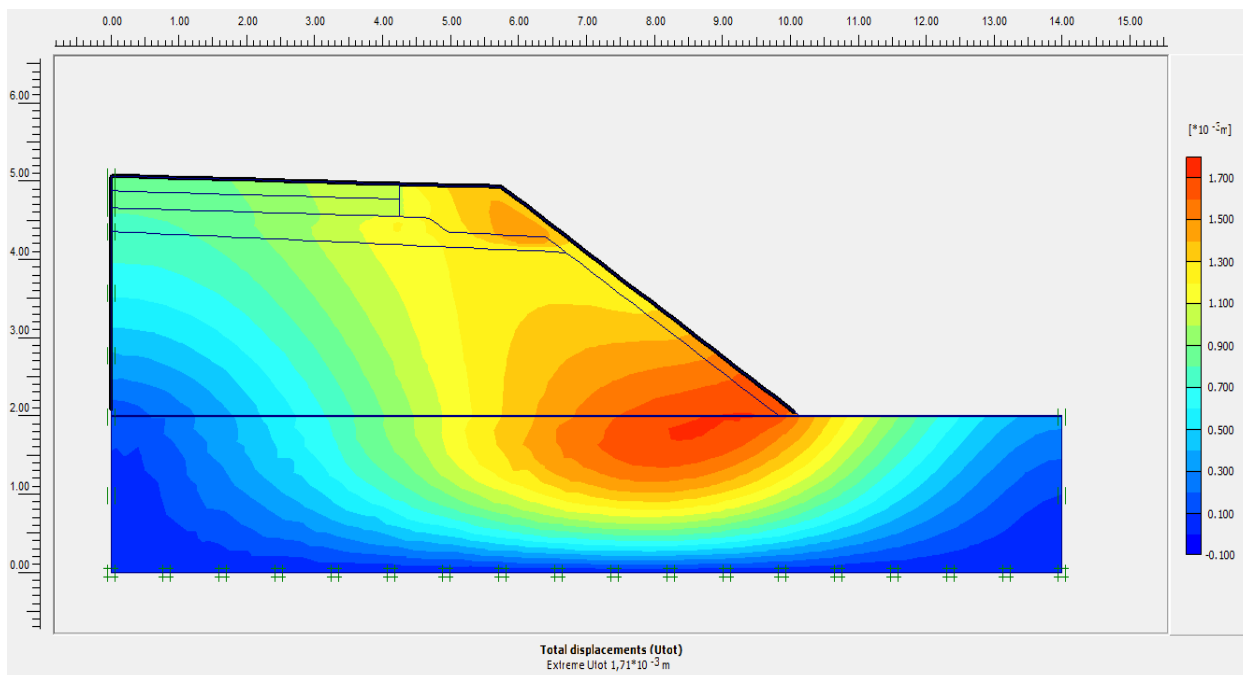
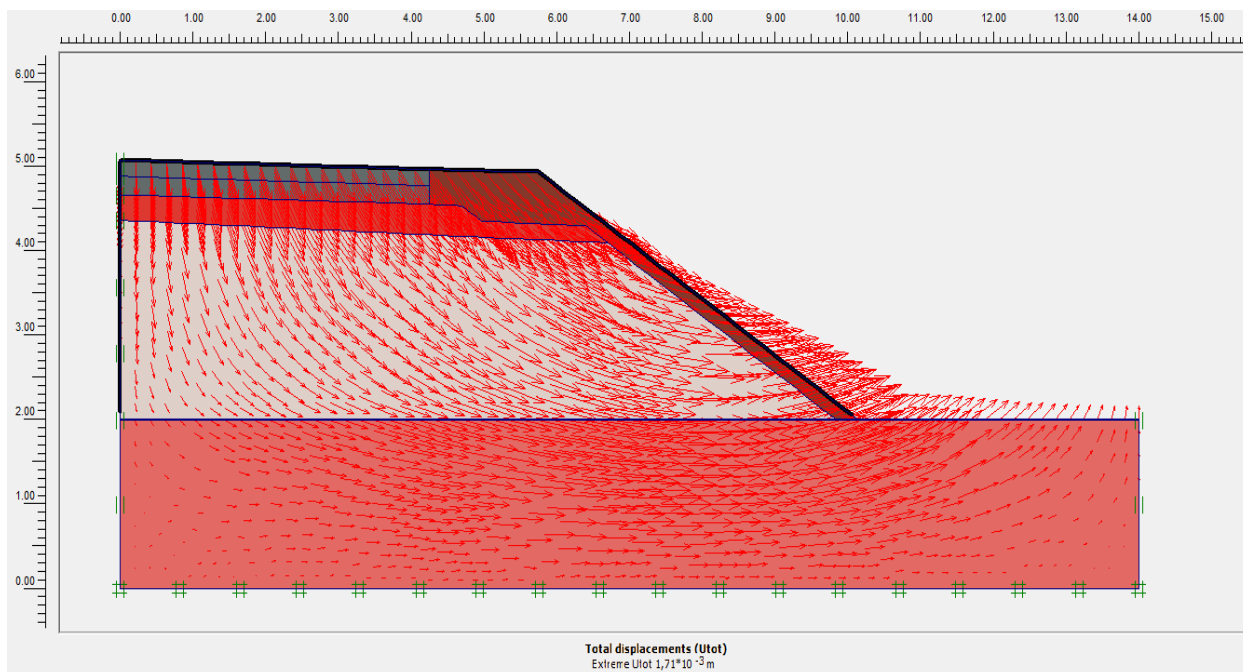
Zbog velikog prometnog opterećenja kod izrade autocesta i brzih cesta, kolnička konstrukcija mora biti “pojačana“. Gornji ustroj ceste, cestovni zastori moraju biti deblji, točnije cestovni zastor izgrađen je u tri sloja. Sastoji se od bitumeniziranog nosivog sloja (8 cm), vezivnog sloja (6 cm) i habajućeg sloja (5 cm). Da bi kolnička konstrukcija bila još stabilnija, između cestovnog zastora i posteljice potrebno je izraditi stabilizaciju, koja se najčešće izrađuje od cementa i naziva se cementna stabilizacija ( 22 cm ).

Kada bi usporedili autoceste i brze ceste sa cestama iz prvog razreda, vidljivo je da je gornji ustroj ( kod usporedbe cementnu stabilizaciju smatramo gornjim ustrojem ceste ), znatno deblji kod AC i BC.

Grafički prikaz ceste u nasipu (slika 4.7. i 4.8.) prikazuje vertikalne deformacije (slijeganja) nastale zbog težine gornjeg ustroja ceste. Kod autocesta i brzih cesta slijeganja uzrokovana prometnim opterećenjem, bi bila najmanja zbog kvalitetnije izrade kolničke konstrukcije, točnije gornjeg ustroja ceste koji je pojačan cementnom stabilizacijom. Izvedbom cementne stabilizacije u kombinaciji sa bitumeniziranim, habajućim i vezivnim slojem, debljina gornjeg ustroja korištena u ovom proračunu iznosi 41 cm, pa je samim time i nosivost veća. Izradi ovih modela pristupio sam s pretpostavkom da autoceste i brze ceste imaju približno jednaka svojstva nosivosti. Uz grafički prikaz ispisane su maksimalne vrijednosti slijeganja (težina gornjeg ustroja) za autoceste i brze ceste, a iznose 0,00097551 m, odnosno 0,97551 mm.



*Slike 4.7. i 4.8. Vertikalni pomak tla (slijeganja) AC/BC*



*Slike 4.9. i 4.10. Ukupni pomak tla AC/BC*

Nakon proračuna u plaxisu i na temelju grafičkog prikaza, jasno je vidljivo da je zbog znatno veće debljine gornjeg ustroja ceste (41 cm), a samim time i veće težine koja opterećuje nasip i posteljicu, došlo do većeg ukupnog pomaka, nego što je to bio slučaj za ceste iz ostalih razreda.

Ukupni pomak za AC/BC iznosi  $1,71 \cdot 10^{-3}$  metara, odnosno 1,7 milimetara.

RAZRED	MAKSIMALNE DEFORMACIJE (UKUPNI POMAK) [m]	KOMENTARI
AC/BC	$1,71 \cdot 10^{-3}$	- najveći ukupni pomak (bez prometnog opterećenja), zbog debljeg, a samim time i težeg, gornjeg ustroja ceste
1. – 3.	$1,65 \cdot 10^{-3}$	- nešto manji pomak nego kod AC/BC, upravo zbog toga jer nije korištena cem. stabilizacija; manja debljina gornjeg ustroja=manja težina=manji pomak
4. – 5.	$0,67 \cdot 10^{-3}$	- najmanji ukupni pomak zbog znatno manje debljine gornjeg ustroja ceste

**Tablica 4.1.** *Maksimalne deformacije (ukupni pomak) sa komentarima*

U tablici su opisane maksimalne deformacije, odnosno maksimalni ukupni pomaci za sve razrede cesta, koje sam podjelio u tri kategorije.

Prva kategorija su autoceste i brze ceste. Kod izrade tih cesta koristi se dodatna stabilizacija, točnije cementna stabilizacija, koja omogućava dugotrajniju stabilnost tim cestama. Zbog toga dolazi do najvećih početnih deformacija jer gornji ustroj ceste ima veću težinu nego što je to slučaj kod cesta iz drugih razreda. No s druge strane primjenom cementne stabilizacije, autoceste i brze ceste su dugotrajnije i mogu podneti puno veća prometna opterećenja, bez da dođe do ozbiljnijih deformacija.

Druga kategorija su ceste iz 1., 2. i 3. razreda. Izradom zajedničkog modela za prva tri razreda cesta, došao sam do rezultata za ukupni pomak, koji je očekivano, manji nego kod autocesta i brzih cesta. Razlog tome je što je cestovni zastor tanji, a samim time, ceste iz druge kategorije mogu podneti puno manja prometna opterećenja od autocesta ili brzih cesta.

U treću kategoriju sam svrstao ceste iz 4. i 5. razreda. Po kvaliteti ceste iz 4. i 5. razreda smatramo najlošijim cestama po pitanju stabilnosti, funkcionalnosti i vijeku trajanja. Kod izvedbe cestovnih zastora koristi se znatno manje materijala, pa je gornji ustroj ceste znatno tanji

od gornjeg ustroja iz prethodne dvije kategorije. Zbog tanjeg zastora, ukupni pomak za ovu kategoriju cesta je znatno manji od ukupnih pomaka cesta iz druge dvije kategorije. No zbog tanjeg cestovnog zastora, ceste iz ove kategorije mogu podnijeti puno manja prometna opterećenja i zbog toga te ceste budu često oštećene i zahtjevaju česte popravke.



## 5. Zaključak

Razvojem ljudske civilizacije, počinju se razvijati i ceste. Prve ceste, odnosno putevi i staze služile su za razmjenu materijalnih dobara. Izumom prvih zaprežnih kola događa se prijelomni trenutak u razvoju cestogradnje. Da kotači zaprežnih kola ne bi propadali u slabije nosivo tlo, počele su se graditi ceste s čvršćom podlogom. Kasnije, pojavom željeznice, ceste gube na značenju budući da se parni strojevi nisu mogli djelotvorno koristiti na cestovnim vozilima, ali izum motora s unutarnjim izgaranjem (Benz, 1886.) pridonio je naglom razvoju motornih vozila te su time i ceste dobile veliko značenje. Neučvršćene i neravne ceste nisu više odgovarale automobilskom prometu, pa se počinju graditi ceste različitih kolnika, od asfalta i betona.

Kvaliteta izrade podloge ceste i cestovnog zastora u prvom redu ovisi o gradivu i tehnologiji ugradnje. Za izvedbu kolnika rabi se prirodni i umjetni kamen, a kao vezno sredstvo cement, bitumen, katran itd. Prema vrsti materijala, podloge mogu biti od lomljenog kamena, šljunka, tučenca, cementnog betona, stabiliziranog tla (cementom, bitumenom, vapnom), starih betonskih zastora. Cestovni zastor je završni površinski sloj kolnika, koji izravno preuzima opterećenje prometa i prenosi ga na podlogu.

Cestovno tijelo se kao linijska građevina u prostoru sastoji od gornjeg i donjeg ustroja. Pod donjim ustrojem ceste podrazumijevaju se zemljani trup i građevine (mostovi, vijadukti, potporni zidovi). Donji ustroj ima zadaću preuzeti prometno opterećenje i čitavu konstrukciju gornjeg ustroja. Gornji ustroj je dio ceste koji izravno preuzima sva opterećenja od vozila u prometu i prenosi na donji ustroj ceste. U širem značenju, gornji ustroj se često terminološki poistovjećuje s kolničkom konstrukcijom.

Da bi kolnička konstrukcija zadovoljavala kriterije stabilnosti i nosivosti, potrebno je provesti proračune. Jedan od najpoznatijih proračuna za stabilnost kolničke konstrukcije je AASHO test, koji je uvelike unaprijedio gradnju cesta. AASHO test se provodio na 6 testnih dionica, te su se sva zapažanja bilježila i koristila kod gradnje novih cesta. Moglo bi se reći da je AASHO test, temelj kod gradnje novih cesta jer se primjenom takvog načina gradnje cesta uvelike poboljšala stabilnost kolničke konstrukcije, te se vijek trajanja cesta znatno povećao.

U današnje vrijeme proračun stabilnosti kolničkih konstrukcija obavljaju kompjuterski programi, a jedan od njih je Plaxis. Plaxis nam daje numeričke i grafičke rezultate, na temelju kojih možemo pristupiti gradnji cesta. Prije proračuna u plaxisu, razrede cesta podijelo sam na tri kategorije. Prva kategorija su autoceste i brze ceste (AC/BC), druga kategorija su ceste iz prvog, drugog i trećeg razreda, a treća kategorija su ceste iz četvrtog i petog razreda. Proračun je obuhvaćao vertikalne deformacije (slijeganja), te ukupne deformacije (ukupni pomak), koje se

javljaju uslijed djelovanja gornjeg ustroja ceste na donji ustroj, bez djelovanja prometnog opterećenja. Dobiveni rezultati pokazuju da će početne deformacije koje se javljaju u kolničkoj konstrukciji biti najveće kod AC/BC, a najmanje kod cesta iz 4. i 5. razreda.

Stabilnost kolničke konstrukcije ovisi o načinu gradnje i količini prometnog opterećenja na tu konstrukciju. Iako se kod AC/BC dogodio najveći pomak, to ne znači da su te ceste po pitanju stabilnosti najlošije. Naprotiv zbog načina gradnje (cementna stabilizacija), te ceste mogu podneti najveća prometna opterećenja i imaju nešto dulji vijek trajanja, nego ceste iz ostalih razreda.

Kod cesta iz 4. i 5. razreda, jasno je vidljivo iz proračuna da je došlo do najmanjih deformacija uslijed djelovanja gornjeg ustroja (znatno tanji zastor). Međutim ceste 4. i 5. razreda mogu podneti namanja prometna opterećenja i često budu oštećene.

U Varaždinu 02.11.2018.

## 6. Literatura

Knjige:

[1] Prof. dr. sc. Ivan Legac: Cestovne prometnice i javne ceste, Zagreb 2006.

[2] Institut Građevinara Hrvatske: Opći tehnički uvjeti za radove na cestama, Zagreb 2001.

[3] Branimir Babić: Projektiranje kolničkih konstrukcija, Zagreb 1997.

Internet izvori:

[4] [https://en.wikipedia.org/wiki/AASHO\\_Road\\_Test](https://en.wikipedia.org/wiki/AASHO_Road_Test)



## IZJAVA O AUTORSTVU

### I

## SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Dominik Bručić pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog Analiza stabilnosti kolničkih konstrukcija prema prometnoj podjeli cesta uz pomoć računalnog programskog paketa Plaxis, te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:  
Dominik Bručić

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Dominik Bručić neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom Analiza stabilnosti kolničkih konstrukcija prema prometnoj podjeli cesta uz pomoć računalnog programskog paketa Plaxis čiji sam autor.

Student:  
Dominik Bručić

(vlastoručni potpis)