

UTJECAJ PREOPTEREĆENIH VOZILA NA DIMENZIONIRAJUĆE KOLNIČKE KONSTRUKCIJE

Fable, Borna

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:862436>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

ZAVOD ZA PROMETNICE



**UTJECAJ PREOPTEREĆENIH VOZILA NA
DIMENZIONIRANJE KOLNIČKE KONSTRUKCIJE**

Diplomski rad

BORNA FABLE

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

ZAVOD ZA PROMETNICE



**UTJECAJ PREOPTEREĆENIH VOZILA NA
DIMENZIONIRANJE KOLNIČKE KONSTRUKCIJE**

**INFLUENCE OF OVERLOADED VEHICLES ON THE
DIMENSIONING OF ROAD STRUCTURES**

Diplomski rad

Borna Fable, 0082059243

Mentor: prof. dr. sc. Tatjana Rukavina

Zagreb, 2024.

Sažetak

Preopterećenje vozila smatra se jednim od najvećih problema u cestovnom prometu zbog mogućeg oštećenja površine ceste. Mogućnost kolničke konstrukcije za ispunjavanje svoje funkcije smanjuje se u skladu s povećanjem prometnog opterećenja, posebice ako cestom prometuju preopterećena teška vozila. Ovaj rad istražuje utjecaj preopterećenih vozila na dimenzioniranje kolničke konstrukcije te na koji se način navedeni problem može riješiti. Glavni cilj ovog rada je ispitati promjene u dimenzijama i sastavu kolničkih konstrukcija na temelju različitih količina prometnog opterećenja, koristeći izraze iz norme HRN U.C4.010.

Ključne riječi: Preopterećenje vozila, Kolnik, Dimenzije

Summary

Vehicle overloading is considered one of the biggest problems in road traffic due to possible damage to the road surface. The ability of the pavement structure to fulfill its function decrease in accordance with the increase in traffic load, especially if overloaded heavy vehicles travel on the road. This paper investigates the impact of overloaded vehicles on the dimensioning of the pavement structure and how the stated problem can be solved. The main goal of this paper is to examine changes in the dimensions and composition of pavement structures based on different amounts of traffic load, using expressions from the HRN U.C4.010 standard.

Keywords: Vehicle Overloading, Pavement, Dimensions

Sadržaj:

Sažetak	3
Summary	4
Popis slika	7
Popis tablica	9
1. Uvod.....	10
2. Metodologija.....	12
3. Kolnik	13
3.1. Utjecaj konfiguracije vozila	17
3.2. Utjecaj karakteristika kolničke konstrukcije.....	22
3.3. Utjecaj okolišnih uvjeta.....	24
4. Sigurnost	27
4.1. Hvatljivost	31
4.2. Praćenje	31
4.3. Stabilnost	32
4.4. Kočenje	33
5. Ekonomski čimbenici	35
5.1. Utjecaj na troškove	35
5.2. Utjecaj na kompetitivnost unutar industrije.....	37
6. Regulatorna i direktiva Europske Unije za preopterećena vozila	38
7. Rješenje problema (načini smanjenja)	42
8. Praktični dio	44
8.1. Uvod.....	44
8.2. Postupak proračuna.....	45
8.3. Proračun	48
1) Kneginec Donji	48
2) Prolaz za divljač	58

8.4. Zaključak proračuna	66
9. Zaključak	66
10. Literatura	68

Popis slika

Slika 1. Djelatnost prijevoza tereta, 1990-2030 (EK 2008.) [2]	11
Slika 2. Tipično širenje opterećenja u kolničkoj konstrukciji	16
Slika 3. Utjecaj oštećenja preopterećenih vozila na fleksibilne kolnike [1]	16
Slika 4. Pad cestovne usluge [7].....	17
Slika 5. Utjecaj prema referentnoj osovini od 10 t prema zakonu četvrte potencije, prilagođeno iz (OECD ITF, 2011.).....	18
Slika 6. Tri skupine teških vozila s jednakim štetnim učinkom [5]	19
Slika 7. Razina štete od trostrukih osovina [1]	20
Slika 8. Jednostruki kotač (lijevo) i dvostruki kotač (desno) [1]	21
Slika 9. Scenarij smanjenja uporabivosti ceste zbog preopterećenja vozila [6]	24
Slika 10. Odnos između osovinskog opterećenja i omjera oštećenja uslijed zamora s temperaturom (Musbah, 2017.) [1]	25
Slika 11. Odnos između osovinskog opterećenja i omjera oštećenja od kolotruga s temperaturom (Musbah, 2017.) [1]	26
Slika 12. Varijacije brzina kamiona ovisno o razini preopterećenosti.....	29
Slika 13. Postotak smrtnih slučajeva vozača i putnika kamiona (izvor podataka SZO, 2018.) [1]	30
Slika 14. Mjere koje čine osnovu za standarde [2].....	31
Slika 15. Učinak bruto težine vozila na zaustavni put za različite tipove kamiona [4]	34
Slika 16. Učinak broja osovina na zaustavni put [4]	34
Slika 17. Utjecaj parametara na razine troškova transporta [1].....	36
Slika 18. Odnos troškova transporta i izgubljenog vremena [1].....	37
Slika 19. Razvrstane javne ceste Republike Hrvatske s položajem mjernog mjesta 1265 - Knežinec Donji [8].....	44
Slika 20. Karta s položajem mjernog mjesta WIM003 – Varaždin jug [9]	45
Slika 21. Primjer prijenosnog SiWIM uređaja [9].....	47
Slika 22. Dnevni promet u 2022. godini na dionici 1265 - Knežinec Donji [8].....	48
Slika 23. Dijagram za dimenzioniranje kolničkih konstrukcija od asfaltnih slojeva i mehanički zbijenog zrnatog kamenog materijala	53

Slika 24. Koeficijenti zamjene za asfaltne slojeve	54
Slika 25. Odabrana kolnička konstrukcija	55
Slika 26. Nomogram za dimenzioniranje asfaltnih kolničkih konstrukcija prema AASHO – metodi, za konačnu voznu sposobnost kolnika $pt = 2,5$	57
Slika 27. Podaci o mjernom mjestu SW0161 – Prolaz za divljač [9]	58
Slika 28. Dijagram za dimenzioniranje kolničkih konstrukcija od asfaltnih slojeva I cementom stabiliziranog zrnatog kamenog materijala	61
Slika 29. Koeficijenti zamjene za asfaltne slojeve	62
Slika 30. Odabrana kolnička konstrukcija	63
Slika 31. Nomogram za dimenzioniranje asfaltnih kolničkih konstrukcija prema AASHO – metodi, za konačnu voznu sposobnost kolnika $pt = 2,5$	65

Popis tablica

Tablica 1. Razmatrane vrste vozila [1]	39
Tablica 2. Maksimalne dopuštene težine kamiona u Europi (u tonama), prilagođeno iz Međunarodnog transportnog foruma [1]	40
Tablica 3. Struktura po vrstama vozila za brojačko mjesto 1265 – Knežinec Donji [8]	49
Tablica 4. Izračun faktora ekvivalencije reprezentativnih vrsta vozila.....	50
Tablica 5. Prosječni godišnji dnevni promet teretnih vozila za brojačko mjesto Donji Knežinec [8] ..	51
Tablica 6. Proračun ukupnog broja prijelaza ekvivalentnih osovina u projektnom razdoblju za brojačko mjesto Donji Knežinec	51
Tablica 7. Prosječni godišnji dnevni promet vozila za brojačko mjesto Prolaz za divljač [9].....	58
Tablica 8. Procjena prosječnog godišnjeg dnevnog prometa vozila za 2022. godinu brojačkog mjesta Prolaz za divljač	59
Tablica 9. Proračun ukupnog broja prijelaza ekvivalentnih osovina u projektnom razdoblju za brojačko mjesto Varaždin jug	59

1. Uvod

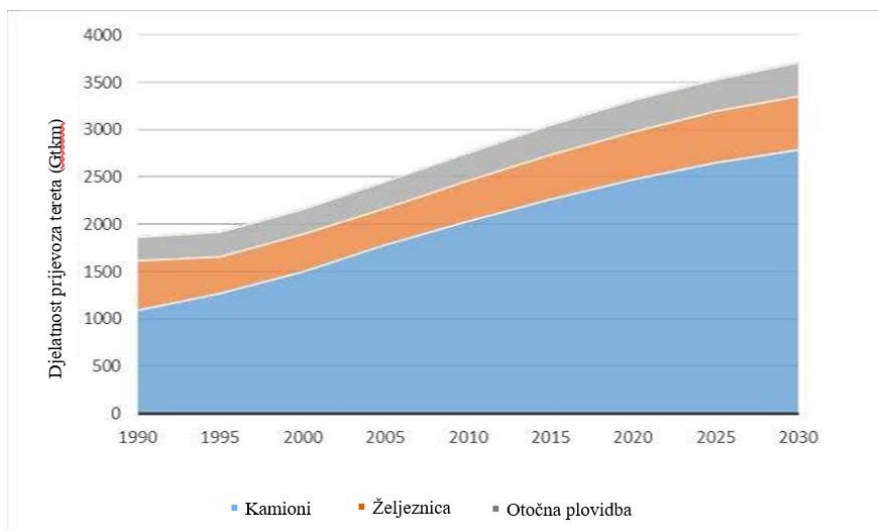
Ceste su od vitalnog značaja za ekonomski razvoj države. Izgradnjom cestovne mreže visoke kvalitete izravno se potiče razvitak gospodarstva kao posljedica smanjenja vremena putovanja, operativnih troškova vozila i olakšanja mobilnosti ljudi i dobara.

Suvremene kolničke konstrukcije višeslojni su sustavi, koji se sastoje od različitih materijala. Njihovo ponašanje pod prometnim opterećenjem i različitim utjecajima je složeno. Asfaltne kolničke konstrukcije sastoje se od asfaltnog zastora i nosivih slojeva vezanih nekim vezivom ili mehaničkim načinom ugradnje. Uobičajeno je da je kakvoća materijala ugrađenih u konstrukciju većinom bolja u višim slojevima, a lošija u nižim slojevima konstrukcije.

Projektiranje kolničke konstrukcije složen je posao jer ovisi o mnoštvu činitelja, od kojih je prometno opterećenje jedan od utjecajnijih. Odrediti prometno opterećenje, temeljem kojega će se projektirati kolnička konstrukcija, tzv. projektno prometno opterećenje, posebno je teško jer je posrijedi nešto što se treba tek dogoditi u budućnosti, dakle, mora se (što je moguće bolje) predvidjeti.

Projektiranje kolničkih konstrukcija provodi se uzimajući u obzir različite čimbenike kao što su podaci o prometu, stopa rasta, raspodjela vozila u prometnim trakama i faktor oštećenja vozila.

Osnovni uzroci pojave oštećenja kolnika mogu biti loša kvaliteta upotrijebljenih materijala, loša građevinska praksa, temperaturne varijacije, vremenski uvjeti, promjene u okolišu i slično, no jedan od važnijih čimbenika je pojava preopterećenih teretnih vozila i učinci preopterećenja uzrokovani povećanim obimom kamionskog prometa. Na slici 1 prikazani su pojedinačni udjeli različitih sredstva za transport tereta u ukupnom transportu. Vidljivo je da ceste preuzimaju najveću količinu prijevoza tereta koja je u konstantnom rastu kroz zadnjih tridesetak godina.



Slika 1. Djelatnost prijevoza tereta, 1990-2030 (EK 2008.) [2]

Države diljem svijeta postavile su ograničenja opterećenja osovina cestovnih vozila. Glavni ciljevi ovih ograničenja su očuvanje cestovne infrastrukture te odgovarajuća svojstva vozila tijekom vožnje. Ograničenja su postavljena za cijelo vozilo (ukupna masa vozila), ali i za svaki kotač, osovinu i/ili skupinu osovina vozila (osovinsko opterećenje).

Preopterećeni kamioni uzrokuju veće opterećenje na kolničku konstrukciju ceste od opterećenja za koje je ona projektirana. Time se drastično smanjuje vijek trajanja kolnika koji iz tog razloga propada prije kraja projektiranog vijeka trajanja. Glavni čimbenici odgovorni za pojavu oštećenja kolnika pod utjecajem teških vozila su dinamičko osovinsko opterećenje, broj i vrsta osovina (npr. jednostruka, tandem), svojstva guma (npr. širokoprofilne, uskoprofilne) i svojstva kolnika (npr. vrsta kolnika, debljina slojeva, temperatura i hrapavost).

Preopterećenje vozila se definira kao teret koji premašuje zakonsko ograničenje ukupne mase vozila. Utvrđeno je da porast pojava preopterećenja uzrokuje zamjetno povećanje oštećenja na kolnicima. Zbog nedostatka provedbe kontrola težina vozila, ova zakonska ograničenja se većinom vremena krše. Kako bi ostvarili što veću zaradu u što kraćem vremenu, vlasnici kamiona preopterećuju svoje kamione tako da premašuju njihovu maksimalnu dopuštenu nosivost, pritom zanemarujući i zakonski definiranu dozvoljenu ukupnu masu vozila. Budući da je sve veći postotak cestovnog prijevoza tereta u odnosu na ostale vrste transporta (slika 1), očekuje se da će teška vozila i u dogledno vrijeme ostati česta pojava na našim cestama.

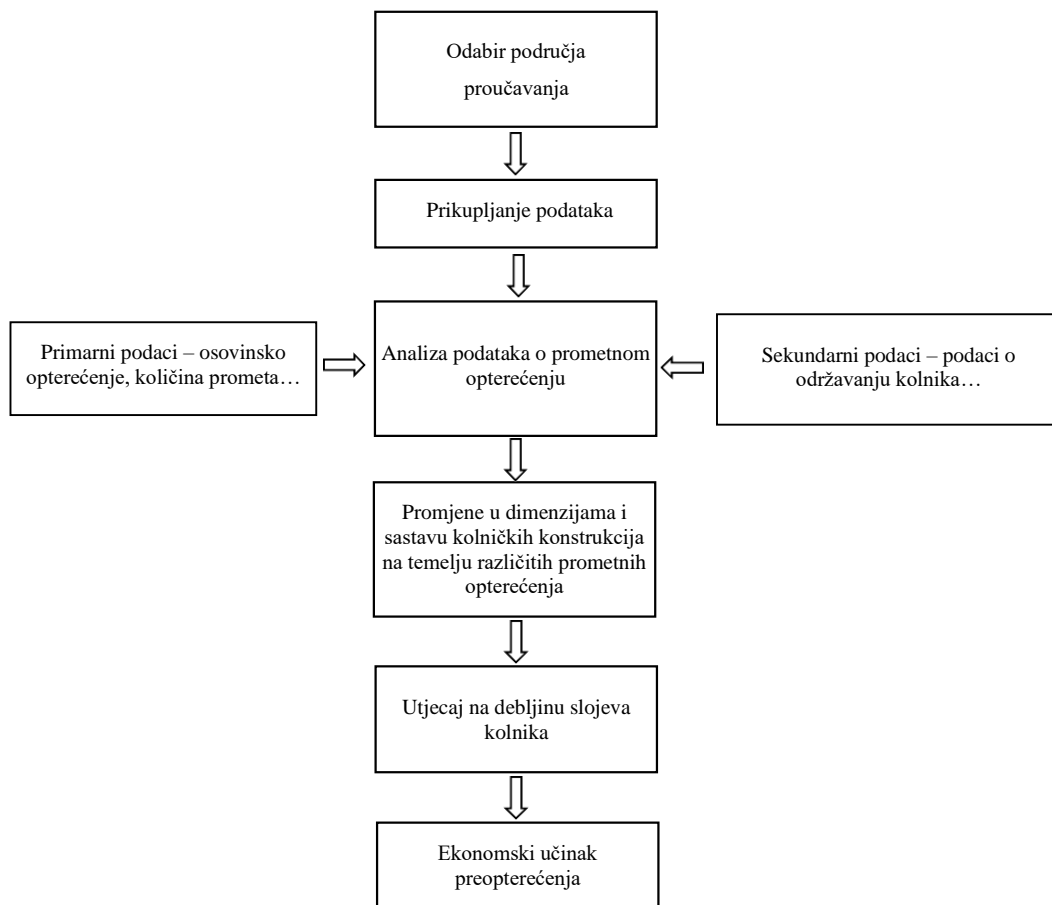
Preopterećena vozila također ugrožavaju i živote sudionika u prometu. Ova vozila su teška za upravljanje, manje su stabilna i zahtijevaju duži zaustavni put; što ih čini vrlo opasnima osobito u oštrim zavojima i na strmim padinama. Osim toga, degradacijom kolničke konstrukcije dolazi do pojava oštećenja koja mogu dovesti do nesreća.

Stoga, glavni ciljevi ovog rada su:

- Proučiti ponašanje preopterećenih kamiona na kolnicima.
- Istražiti utjecaj preopterećenih vozila na životni vijek kolnika.
- Analizirati utjecaj preopterećenih vozila na varijacije u debljini slojeva kolničke konstrukcije.

2. Metodologija

Metodologija usvojena za ovaj rad prikazana je dijagramom toka procesa izrade rada.



Korištenjem domaće i strane stručne i znanstvene literature iz područja prometnica prikupljena su saznanja korištena pri izradi za teoretski dio vezan uz kolničke konstrukcije te promet vozila na njima. Provedeni su određeni izračuni i određene dimenzije dvije nove kolničke konstrukcije za unaprijed određene dionice. Prikazan je postupak projektiranja kolničkih konstrukcija te su odabrane optimalne vrijednosti slojeva kolničkih konstrukcija kako bi se udovoljilo svim potrebnim zahtjevima pri projektiranju. Usporedbom rezultata izvučeni su zaključci utjecaja prometnog opterećenja na potrebe dimenzioniranja kolničke konstrukcije.

3. Kolnik

U ovoj cjelini razmatra se utjecaj vozila s prekomjernom težinom na kolničke konstrukcije cesta, daje se osvrt na glavne utjecajne čimbenike koji na to utječu i njihovu važnost. Razmatraju se čimbenici i svojstva vozila koji utječu na strukturu slojeva kolničke konstrukcije.

Dvije glavne funkcije kolničke konstrukcije su osigurati prikladnu voznu površinu za kretanje vozila te djelovati kao sredstvo za smanjenje vrijednosti pritiska kotača teških vozila na vrijednost koju posteljica ispod kolničke konstrukcije može podnijeti.

Kolnička konstrukcija je tijekom cjelokupnog životnog vijeka izložena prometnom opterećenju i utjecaju okoliša koji uzrokuju stvaranje naprezanja i deformacija. Odziv kolničke konstrukcije na ova opterećenja ovisi o krutosti podloge, vrsti kolnika, debljini kolnika i vrsti prometa koji kolnička konstrukcija nosi. Stupanj oštećenja ovisi o konfiguraciji osovina (jednostruka, tandem ili tridem), broju osovina vozila (veći broj osovina osigurava raspodjelu opterećenja osovina na većoj duljini odnosno površini kolnika), sustavu ovjesa, tlaku u gumama i veličini preopterećenja. Ipak, najvažniji parametar je osovinsko opterećenje.

Većina kolničkih konstrukcija projektirane su s obzirom na zakonsko ograničenje nosivosti vozila, međutim, budući da prijevozna poduzeća žele minimizirati troškove prijevoza, teretna vozila su preopterećena te na taj način uzrokuju oštećenja na kolničkoj konstrukciji. To u konačnici dovodi do povećanja troškova održavanja i sanacije. Doprinos strukturnom oštećenju kolničke konstrukcije od vozila s manjom ukupnom masom (kao što su npr. automobili) je vrlo mali u usporedbi s vozilima veće ukupne mase (kao što su npr. teška teretna vozila), stoga je prosječni godišnji dnevni promet (PGDP) svake klase vozila ključni ulazni parametar prilikom izrade projekta nove kolničke konstrukcije, plana održavanja ili obnove kolničke konstrukcije. Savitljive kolničke konstrukcije projektiraju se za projektni period od dvadeset godina, što uključuje redovito održavanje i sanaciju.

Može se zaključiti da preopterećena vozila na cesti značajno utječu na smanjenje životnog vijeka kolnika i potrebu za većim dimenzijama slojeva kolničke konstrukcije. Štetni učinak preopterećenih osovina kamiona obuhvaća pojavu zamora, koji smanjuje projektirani životni vijek kolničke konstrukcije te pojavu kolotraga, koje smanjuju uporabivost kolničke konstrukcije. Do potpune degradacije kolničke konstrukcije može doći ako teška teretna vozila prometuju kolnicima koji nisu predviđeni za njihova opterećenja. Na primjer, kada je glavna cesta privremeno zatvorena i teretna vozila, umjesto alternativa koje daje uprava za ceste, koriste prečace i prolaze sporednim (lokalnim) cestama manje nosivosti.

Ponašanje kolničke konstrukcije također uvelike ovisi o korištenim materijalima i obimu prometa za koji je projektirana. Tijekom projektiranja, prolazak svakog tipa vozila pretvara se u standardno ekvivalentno osovinsko opterećenje (ESAL) kako bi se uzeo u obzir njihov utjecaj na strukturu kolničke konstrukcije. Ova metodologija sastoji se od određivanja broja standardnih osovina koje bi imale isti utjecaj na dionicu kolnika kao prolazak grupe stvarnih osovina sa stvarnim opterećenjem koje treba procijeniti. Nakon što se izračuna opterećenje svake skupine osovina, ukupno opterećenje vozila može se izraziti brojem standardnih osovina koji predstavlja sve pojedinačne skupine osovina ugrađenih u vozilo koje se razmatra. Vrijednost osovinskog opterećenja koja se obično koristi za definiranje standardne osovine je između 80 i 130 kN po osovini, ovisno o državi i vrsti kolnika koji se razmatra. ESAL metodologija omogućuje samo individualni izračun faktora ekvivalencije za svaku osovinu. Utjecaj osovine može se procijeniti pomoću "faktora ekvivalencije" koji predstavlja prosječne štetne utjecaje pojedinih osovinskih opterećenja vozila na kolničku konstrukciju u odnosu na utjecaj standardne osovine od 80 kN ili bilo kojeg drugog osovinskog opterećenja.

$$f_e = \left(\frac{p_x}{p_{ref}} \right)^n \quad (1)$$

Gdje su :

f_e – faktor ekvivalencije

P_x – stvarno opterećenje proizvoljne osovine

P_{ref} – ekvivalentno referentno standardno osovinsko opterećenje (80 kN)

n – faktor oštećenja, zakon potencije (općenito 4, "četvrta potencija" za asfaltne kolnike)

Faktori ekvivalencije F_e za reprezentativne vrste teretnih vozila dobivaju se zbrajanjem faktora ekvivalencije f_e svih osovina pojedinog vozila unutar reprezentativne vrste prema izrazu:

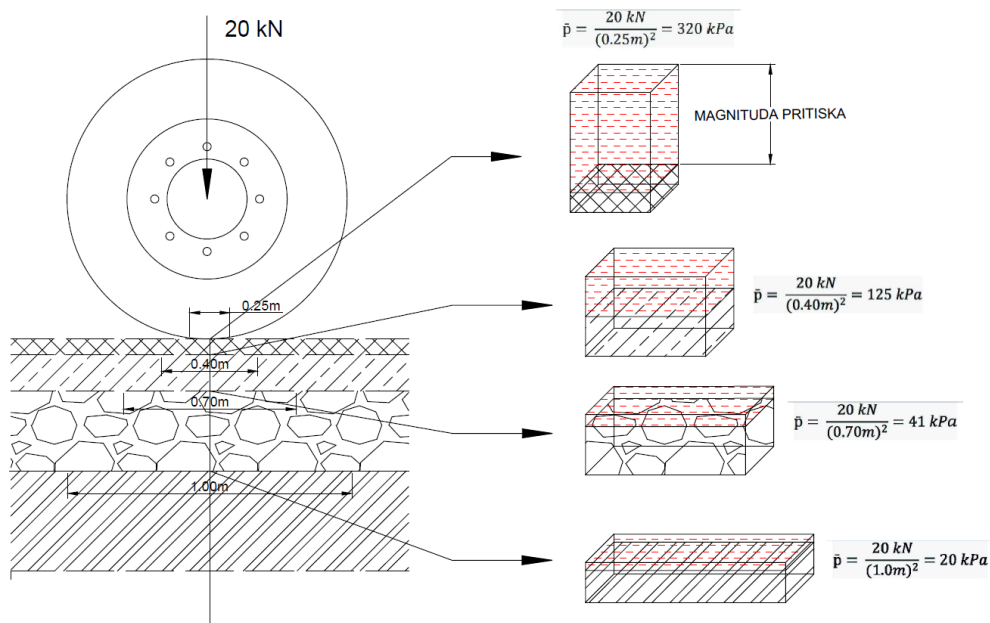
$$F_e = \sum_{i=1}^k f_e^i \quad (2)$$

Preopterećeni kamioni uzrokuju netočnu procjenu ukupnog ekvivalentnog opterećenja pojedinačne osovine (ESAL) budući da se pri izračunu ne uzimaju u obzir nelegalno natovareni tereti. Stoga je potreba za održavanjem i obnovom unutar perioda održavanja povećana preopterećenim kamionskim prometom.

Druga područja projektiranja ceste, kao što su širina i broj prometnih traka, također se moraju uzeti u obzir, jer:

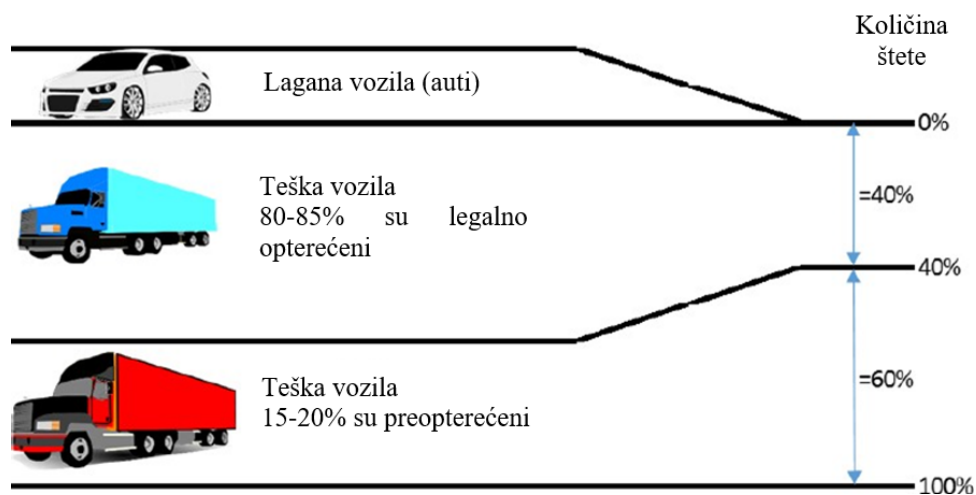
- Broj traka utječe na broj kamiona koje treba uzeti u obzir.
- Mala širina traka usmjerava sve kamione u jednaku putanju na prometnoj traci, čime se povećava njihov kumulativan utjecaj.

Propadanje kolničke konstrukcije tijekom vremena uzrokovano je kombinacijom čimbenika, međutim, osovinska opterećenja igraju ključnu ulogu u smanjenju životnog vijeka kolničke konstrukcije. Kotači kamiona u mirovanju vrše izravan pritisak na malu površinu kontakta između pneumatika i površine kolnika. Kada se vozilo kreće, dolazi do dodatnog dinamičkog naprezanja ("učinak udaranja") zbog pomicanja gore-dolje uzrokovano malim neravninama na površini. Intenzitet pritiska je najveći na površini kolnika i širi se piramidalno kroz slojeve kolničke konstrukcije i posteljicu. Kako se područje utjecaja širi, intenzitet se smanjuje sve dok nije dovoljno malen da konstrukcija može podnijeti prometno opterećenje bez deformacija i oštećenja.



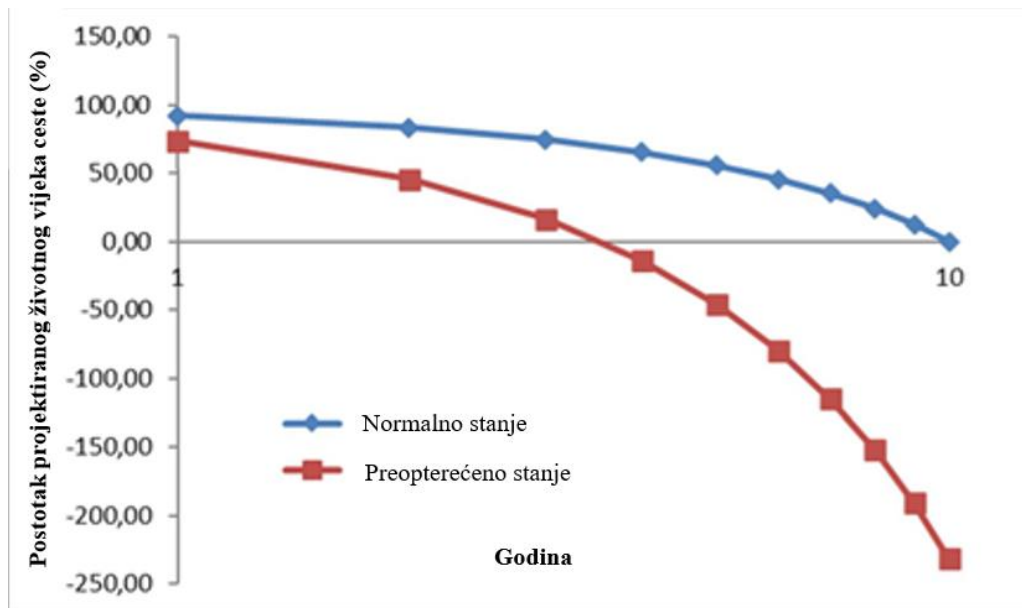
Slika 2. Tipično širenje opterećenja u kolničkoj konstrukciji

Jedna od provedenih studija, (PIARC, 2022) pokazala je da je na savitljivim kolnicima utjecaj od samo 20% preopterećenih vozila odgovoran za veće oštećenje od ostatka kamiona opterećenih unutar dopuštenih granica, kao što je prikazano na slici 3.



Slika 3. Utjecaj oštećenja preopterećenih vozila na fleksibilne kolnike [1]

Istrošenost ili oštećenje cestovne kolničke konstrukcije nije isključivo funkcija količine prometa, već i opterećenja osovina vozila u prometu. Američka udruga državnih službenika za autoceste i transport (AASHTO) provela je ispitivanja cesta tijekom godina 1959. – 1961. te utvrdila da je životni vijek određene ceste približno proporcionalan četvrtoj potenciji osovinskog opterećenja za isti broj prolazaka. (AASHTO, 1993). Ovaj se izraz koristi i danas.



Slika 4. Pad cestovne usluge [7]

Istraživanje ICATEAS-a prikazuje postotak smanjenja projektiranog životnog vijeka ceste pod utjecajem preopterećenih vozila. Pokazuje da je prilikom preopterećenja teretnih vozila moguće smanjenje projektiranog životnog vijeka kolničke konstrukcije veće od 50%, tako da pojedine ceste više nisu u stanju preuzeti opterećenja vozila već unutar prvih pet godina svojeg projektiranog životnog vijeka. Kolnička konstrukcija tada više nema mogućnost preuzimanja opterećenja koja su se očekivala u vrijeme projektiranja i potrebno je provoditi redovito održavanje. Prijevremeno propadanje kolničke konstrukcije ne događa se samo na relativno novim cestama, već se pojavljuje i na cestama koje su tek popravljene.

3.1. Utjecaj konfiguracije vozila

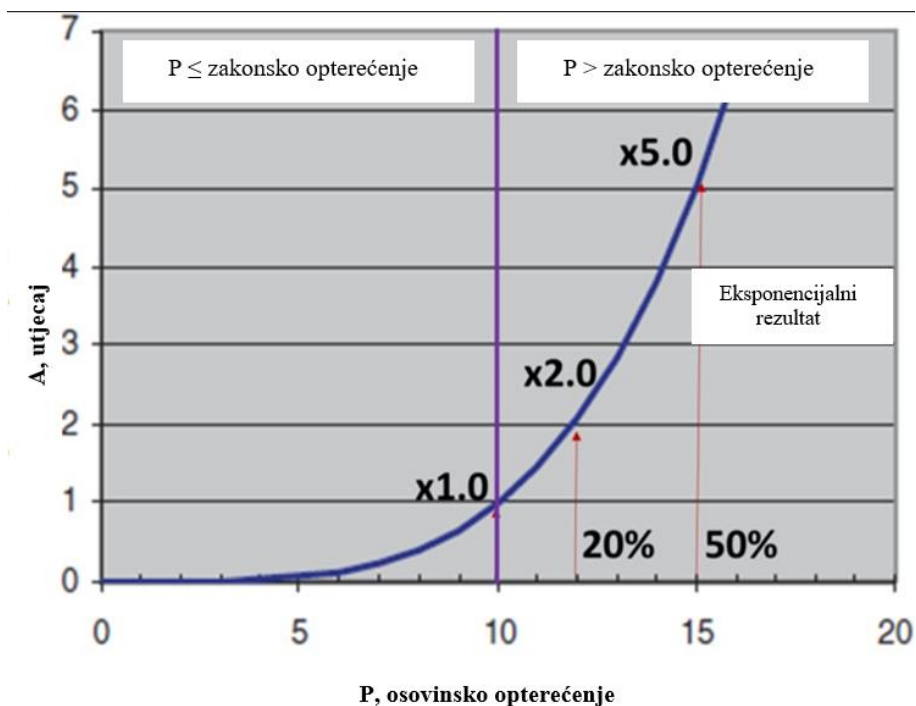
Za procjenu mehaničkih utjecaja kamiona na infrastrukturu u cjelini, potrebno je razmotriti:

- Djelovanja primijenjena na konstrukciju, tj. prometna opterećenja, koja uključuju opterećenja kotača, osovinska opterećenja, opterećenja skupine osovine (okretnog postolja), bruto težine vozila.
- Učinke opterećenja koji se javljaju u konstrukciji kao posljedica djelovanja koja se na nju primjenjuju. To je funkcija prometnih opterećenja i mehaničkog ponašanja konstrukcije. Analiza ovih učinaka zahtijeva poznavanje naprezanja i deformacija koja se javljaju u slojevima kolničke konstrukcije kao i svojstava materijala kao što su Youngov modul elastičnosti i Poissonov koeficijent.

Sa stajališta vozila i kotača, opseg oštećenja ovisi o:

- opterećenju kotača
- broju i položaju osovina i raspodjeli opterećenja
- vrsti guma, tlaku u gumama i balansiranosti guma¹
- vrsti ovjesa

Slika 5 prikazuje porast utjecaja na oštećenje kolničke konstrukcije s rastom osovinskog opterećenja. Može se uočiti da dodavanje 2 tona na osovinu od 10 tona udvostručuje utjecaj osovine, smanjujući životni vijek kolnika za 50%.



Slika 5. Utjecaj prema referentnoj osovini od 10 t prema zakonu četvrte potencije, prilagođeno iz (OECD ITF, 2011.)

Najpoznatiji projekt istraživanja cesta u modernoj povijesti je “AASHO Road Test“ proveden u Illinoisu između 1958. i 1960. godine. Jedan od glavnih ciljeva ovog ispitivanja bilo je proučavanje štetnog učinka teških teretnih vozila na različite vrste kolnika.

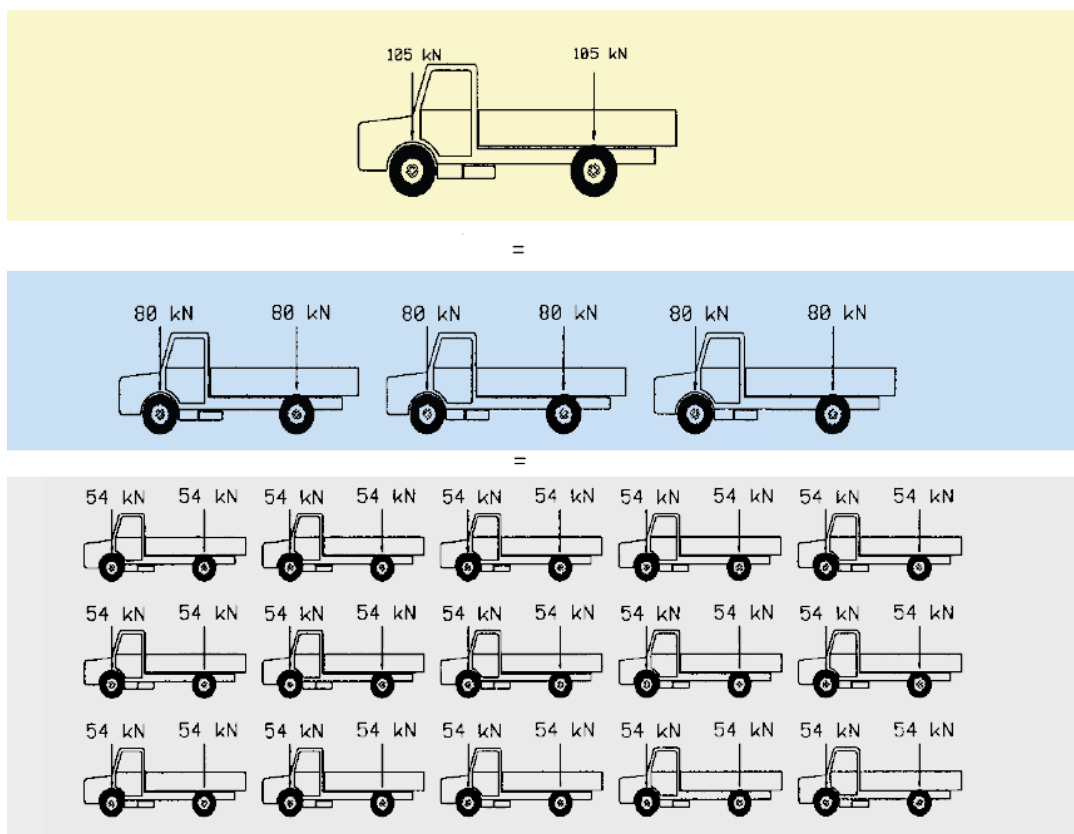
¹ Vozila kojima gume nisu balansirane teško je držati u ravnoj liniji, vozač stalno mora podešavati upravljač kako bi se kretala u ravnoj liniji.

Najčešće zakonsko ograničenje osovine u SAD-u u vrijeme ispitivanja bilo je 8200 kg za jednu osovinu s dvostrukim kotačima i 75 psi (517.1068 kPa) tlaka u gumama. Stoga je ova osovina korištena kao referentna pri usporedbi štetnih učinaka različitih konfiguracija osovina s različitim opterećenjem osovine.

Jedan od najvažnijih nalaza AASHO testa bio je da se štetni učinak osovine, s danim osovinskim opterećenjem P , može povezati s onim referentne osovine, s osovinskim opterećenjem P_r , i faktorom ekvivalencije opterećenja (F_e) prema sljedećoj jednadžbi:

$$F_e = (P/P_r)^{4,5} \quad (3)$$

Taj se odnos može ilustrirati sljedećim primjerom: Povećanje osovinskog opterećenja za 32 % s 80 kN na 105 kN utrostručit će štetni učinak, a smanjenje osovinskog opterećenja za 32 % s 80 kN na 54 kN smanjit će štetni učinak na 20 %.



Slika 6. Tri skupine teških vozila s jednakim štetnim učinkom [5]

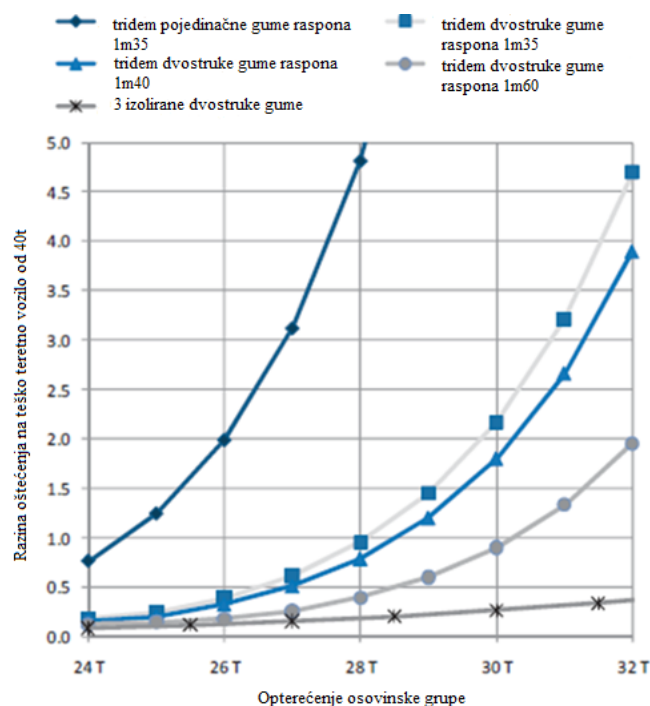
Izražen u broju prolaza vozila ovaj će odnos glasiti: Za projektno opterećenje od 1×10^6 prolaza osovinskog opterećenja od 80 kN izazvao bi se isti obim oštećenja nakon samo $3,33 \times 10^5$ prolaza osovina od 105 kN, odnosno 5×10^6 prolaza osovina od 54 kN.

Različiti materijali imaju različite odgovore zamorom na kumulativna opterećenja, pa će se različite cestovne površine ponašati različito obzirom na promjenu osovinskog opterećenja.

Učinak preopterećenja može se ublažiti na sljedeće načine:

- Pravilnim projektiranjem, odnosno projektiranjem za stvarno opterećenje koje će kolnička konstrukcija preuzimati. Ako je kolnička konstrukcija projektirana za opterećenje od 80 kN, imat će smanjen životni vijek trajanja ukoliko je opterećenje 100 kN.
- Smanjenjem učestalosti i/ili veličine preopterećenih vozila.

Razmak između osovina ima važan utjecaj na obim opterećenja. Na slici 7 prikazan je primjer učinka razmaka trostrukih osovina i vrste kotača. Trostruka osovina znači bilo koje tri osovine raspoređene zajedno s razmakom između osovina od 1,2 m do 2,5 m i međusobno povezane na način da se svako opterećenje kojem su izložene automatski raspoređi u omjerima unaprijed određenom konfiguracijom sustava ovjesa bez obzira na profil ili stanje ceste. Kada su osovine postavljene blizu jedna drugoj, učinak na cestu je veći nego ako su izolirane.



Slika 7. Razina štete od trostrukih osovina [1]

Način prijenosa opterećenja s kotača na cestu, također je važan. Studije su pokazale da dvostruki kotači imaju znatno manji utjecaj na oštećenje kolnika od pojedinačnih jer je dodirna površina gume veća. Stoga postoje dva načina na koje se teret raspoređuje:

- jedno područje za širokoprofilne jednostruke (pojedinačne) kotače, i
- dva međusobno udaljena područja za dvostruke kotače.

Udaljenost između kotača kod dvostrukih kotača rezultira povećanjem površine za raspodjelu opterećenja, smanjujući naprezanja i deformacije u kolniku (slika 8).



Slika 8. Jednostruki kotač (lijevo) i dvostruki kotač (desno) [1]

Vrsta osovina također ima veliki utjecaj na razinu/brzinu oštećivanja kolnika. Teška teretna vozila imaju različite vrste osovina, od standardne jednostruke do standardne dvostruke i trostruke. Raspodjela opterećenja između ovih osovina može uvelike utjecati na brzinu degradacije kolničke konstrukcije.

U okviru studije koju je OECD proveo za Europsku komisiju zaključeno je da čak i kada su vozila unutar dopuštenih ograničenja bruto težine, najgori slučaj raspodjele opterećenja imao je četiri puta veći utjecaj od slučaja u kojem je teret ravnomjerno raspoređen između osovina. Razlike u raspodjeli statičkog opterećenja uzrokuju povećanje pojave zamora od jače opterećene osovine. Studija koju je proveo Ying (2008) koju citira (Milne, 2015) navodi da višestruke osovine uzrokuju manje oštećenje od pojedinačnih za istu ukupnu težinu. Važno je imati izražena ograničenja težine za svaku vrstu osovine kako bi se izbjegla loša raspodjela opterećenja čime bi se povećao utjecaj preopterećenja.

Analiza osjetljivosti i faktori oštećenja vozila (VDF) korišteni su za mjerenje utjecaja preopterećenja na razinu oštećenja ceste. Ulazni podaci izračuna temeljili su se na 150% opterećenja kamiona s jednom, dvije i tri osovine, što je prouzročilo oko 500% oštećenja za jednu, 135% za dvije te 122% oštećenja za tri osovine. Rezultati proračuna korištenjem VDF-a također imaju sličan rezultat, odnosno 47,20, 10,30 i 7,99 puta veći kapacitet propadanja kolnika. Štetni učinak puno je veći preopterećenjem jednoosovinske poluprikolice od oštećenja pri preopterećenju dvoosovinske ili troosovinske poluprikolice.

3.2. Utjecaj karakteristika kolničke konstrukcije

Savitljivi kolnici čine većinu izgrađenih kolnika te su široko rasprostranjeni. Tijekom projektiranog životnog vijeka kolnika dolazi do različitih razina oštećenja uzrokovanih djelovanjem čimbenika, od kojih je najvažnije prometno opterećenje te okolišni uvjeti. Uslijed pojave oštećenja dolazi do smanjenja kvalitete, uporabivosti i nosivosti kolničke konstrukcije zbog čega se ubrzava njezino propadanje tijekom vremena.

Ponašanje kolničke konstrukcije pod preopterećenim vozilima ovisi o nizu čimbenika:

- vrsti kolnika
- debljini
- kvaliteti posteljice
- kvaliteti materijala
- geometriji i širini ceste
- drenaži
- održavanju

U savitljivom kolniku sa slojevima od bitumenskih mješavina debljine veće od 15 cm do pojave oštećenja dolazi tek nakon velikog broja prolaza. S druge strane, oštećenja u slučaju debljine sloja mješavine manje od 15 cm, cesta bez vezanog zastora, slabe nosivosti posteljice ili prisutnosti vode u podlozi su znatno brža. Tada može doći do pojave kolotraženja nakon manje od deset prolaza preopterećenog prometa.

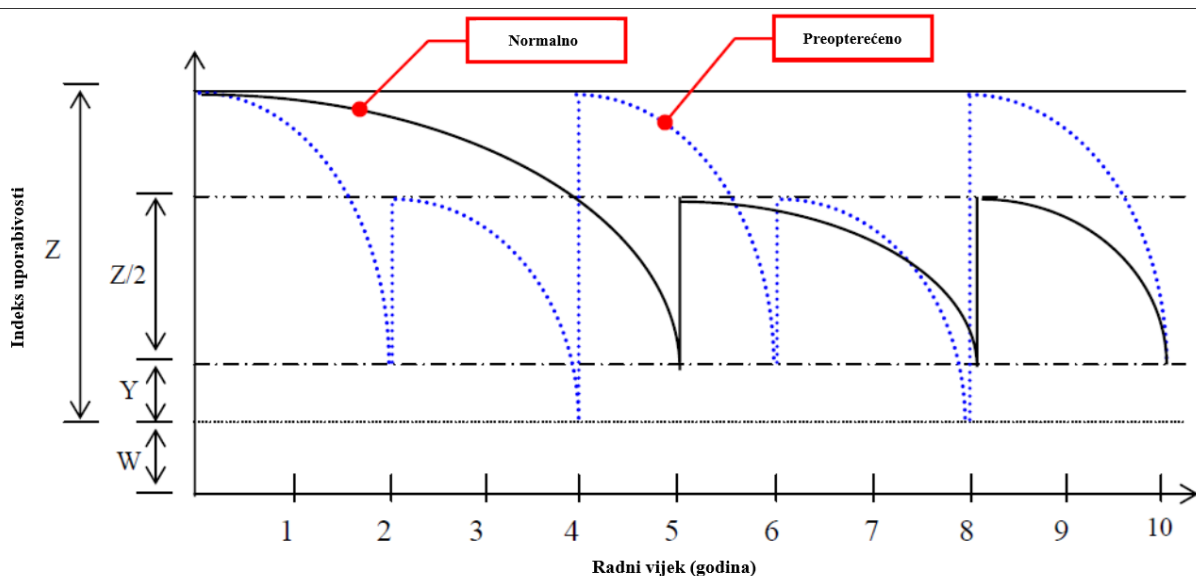
Većina metoda projektiranja savitljivih kolničkih konstrukcija temelji se na sprječavanju pojave pukotina uslijed zamora i kolotraženja. Kolotraženje može postati dominantan problem u slučaju debljih slojeva kolničke konstrukcije i/ili neadekvatnog projekta bitumenske mješavine za određene uvjete okoliša. Da bi se to izbjeglo provode se laboratorijska ispitivanja bitumenskih mješavina kako bi se utvrdila njihova otpornost na pojavu kolotruga. Do pojave pukotina može doći pod utjecajem bilo kakvih razlika u distribuciji kontaktnog naprezanja između raznih vrsta guma. Ove vrste poteškoća nisu detaljno proučavane jer su od manjeg praktičnog značaja i jer njihovi mehanizmi nisu u potpunosti shvaćeni.

Neravna površina izaziva dinamičke utjecaje u prometu koji se kreće preko te površine. Dodatno opterećenje ovisit će o veličini smetnje (npr. visini neravnine), njenom profilu (koliko se strmo osovina mora penjati uz neravninu) i brzini vozila. To bi vrijedilo za potpuno kruto vozilo. Međutim, stvarna vozila također imaju ovjes i gume koji mogu amortizirati te na taj način dodatno povećati ili smanjiti dinamički učinak opterećenja i povezanog pogoršanja kolnika. Projekt DIVINE (OECD, 1998.) pokazao je da neravna površina ceste može rezultirati dinamičkim opterećenjem osovine koje je 20% veće od statičkog opterećenja osovine. Teža vozila imaju veću inerciju, pa se očekuje da će se faktor povećanja dinamičkog opterećenja u odnosu na statičko opterećenje smanjiti. Međutim, budući da preopterećeno vozilo ima veće osnovno statičko opterećenje, očekuje se da će ukupno povećanje njegovog negativnog utjecaja na neravnim površinama ostati veće nego na ravnim površinama. Ovaj se fenomen proučava desetljećima, ali njegov učinak još nije uzet u obzir tijekom projektiranja kolničkih konstrukcija.

Osim neravnina i naboranosti koje nastaju neodržavanjem kolnika, pojavljuju se pukotine koje omogućuju prodor vode u slojeve kolničke konstrukcije.

Ukupni troškovi upravljanja cestovnim prometnim sustavom, uključujući troškove izgradnje i održavanja svih cesta obično su vrlo visoki, stoga su pojedine vlade uvele ograničenja osovinskog opterećenja kako bi regulirale nosivost cestovnih vozila te na taj način smanjile propadanje cestovne mreže zbog preopterećenja i održale učinkovitost cestovnog prometa (Musbah, 2017.). Prisutnost preopterećenih vozila može povećati troškove održavanja kolnika za više od 100% u usporedbi s troškovima održavanja s dozvoljenim opterećenjem (Pais & Minhoto, 2013.). Preopterećenjem kolnika ubrzava se njegovo propadanje (slika 9) te je potrebna sanacija kolnika prije nego što se postigne očekivani projektirani životni vijek kolnika što rezultira povećanim troškovima za cestovnu upravu.

Još jedan čimbenik koji je značajan za učinak preopterećenja je stanje kolnika: stari neodržavani kolnik sa pukotinama bit će osjetljiviji na djelovanje preopterećenih vozila od novijeg bolje održavanog kolnika.



Slika 9. Scenarij smanjenja uporabivosti ceste zbog preopterećenja vozila [6]

Gdje su:

W = stanje najniže uporabivosti koje zahtijeva sanaciju

Y = stanje najniže uporabivosti koje zahtijeva periodično održavanje

Z = ciljano stanje uporabivosti pri obnovi.

3.3. Utjecaj okolišnih uvjeta

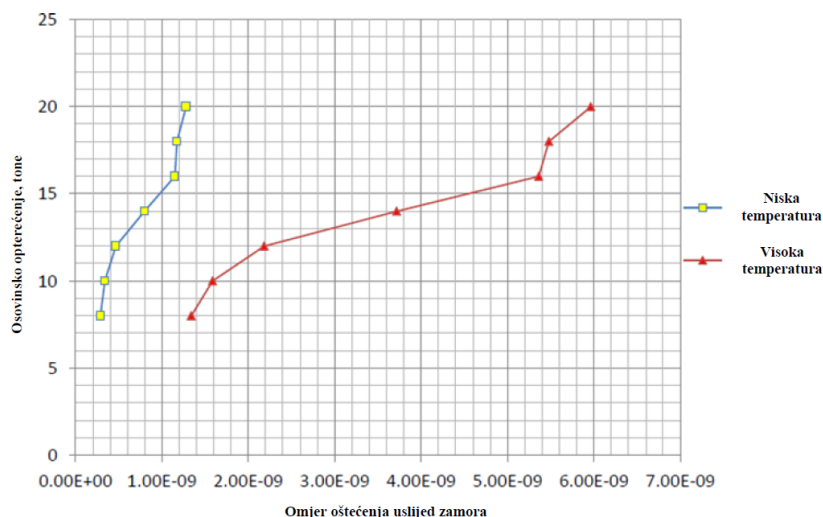
Što se tiče okoliša, dva su glavna uvjeta koji snažno utječu na stupanj oštećenja kolničke konstrukcije:

- temperatura slojeva kolničke konstrukcije, uglavnom za slojeve asfalta
- prisutnost vode, bilo na površini u nevezanim slojevima kolničke konstrukcije (uzrokovana lošom drenažom) ili infiltracijom kroz pukotine

Temperatura ima značajan utjecaj na asfaltne slojeve, jer se moduli krutosti značajno smanjuju s porastom temperature. Visoka temperatura u kombinaciji sa sporom vožnjom dovodi do pojave kolotraga na određenim mjestima na cestama, npr. pristup rampama, prijelazima i kružnim tokovima.

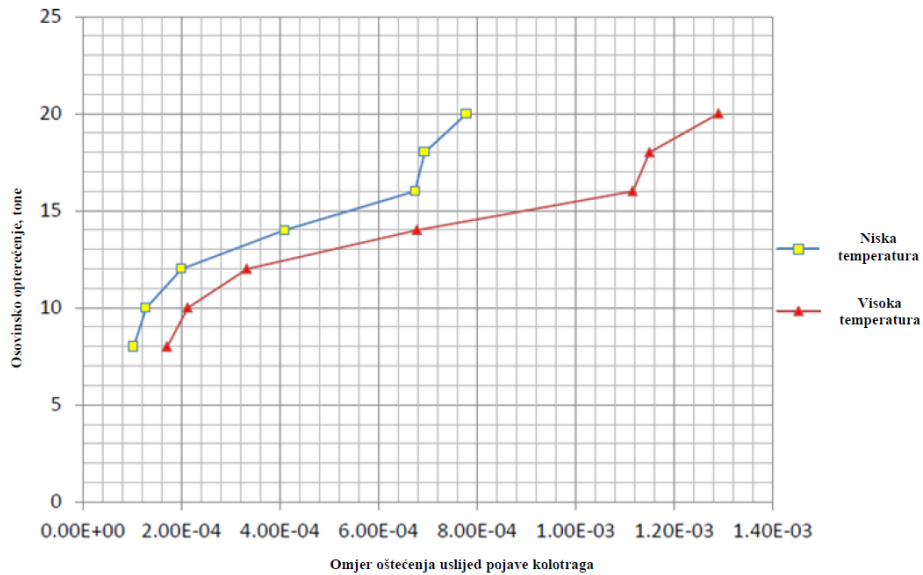
Kako povećanje temperature rezultira smanjenjem modula krutosti asfaltnog sloja, učinak preopterećenja se povećava. Posljedično, deformacije i naprezanja se povećavaju, što rezultira povećanjem zamora i kolotruga. Na slici 10 prikazano je povećanje razine oštećenja kolničke konstrukcije povećanjem intenziteta opterećenja. Međutim, opseg oštećenja će varirati ovisno o različitim modulima elastičnosti asfalta. Iz grafikona na slici 10 vidljivo je da je niska temperatura povezana je s visokim modulom elastičnosti asfaltbetona, a visoka temperatura povezana je s niskim modulom elastičnosti asfaltbetona. Povećanje osovinskog opterećenja kada se modul elastičnosti asfalta smanjuje zbog visoke temperature rezultat će većom vlačnom deformacijom na dnu asfaltnog sloja, uzrokujući zamor, i većom tlačnom deformacijom na vrhu posteljice, uzrokujući kolotraženje.

Slika 10 pokazuje da se oštećenje od zamora povećava s povećanjem osovinskog opterećenja. Pri nižim osovinskim opterećenjima utjecaj temperature na zamor je minimalan, dok se pri velikom osovinskom opterećenju (preopterećenju) oštećenje od zamora značajno povećava.



Slika 10. Odnos između osovinskog opterećenja i omjera oštećenja uslijed zamora s temperaturom (Musbah, 2017.) [1]

Grafikon na slici 11 prikazuje porast oštećenja u obliku kolotruga koja se povećavaju s povećanjem osovinskog opterećenja za obje situacije krutosti kolnika, odnosno pri niskim i visokim temperaturama. Može se primijetiti da temperatura nema značajan utjecaj na oštećenja od kolotruga do granice opterećenja od 15 tona, ali nakon 15 tona učinak se povećava zbog varijacije krutosti (Musbah, 2017.).



Slika 11. Odnos između osovinskog opterećenja i omjera oštećenja od kolotruga s temperaturom (Musbah, 2017.) [1]

Može se zaključiti da temperatura ima značajan utjecaj na deformaciju kolnika pri preopterećenju.

Prisutnost vode na i u kolničkoj konstrukciji imat će različite učinke (ovisno o zahvaćenom sloju) na ubrzanje degradacije kolnika pod preopterećenim kamionima (OECD ITF, 2011.):

- U slučaju mokrog površinskog sloja, težak teretni promet generira progresivno raspadanje površine kolnika kao rezultat pomicanja čestica agregata, što dovodi do rupa i ljuštenja. U šljunčanim kolnicima, propadanje površine je ubrzano zbog prisutnosti vode.
- U slučaju prisutnosti vode u nevezanom sloju ispod asfaltnog sloja, bilo zbog loše drenaže ili infiltracije vode kroz pukotine na površini kolnika, nosivi sloj postaje slabiji te će se posljedično ubrzano pojaviti i određeni oblici oštećenja nastalih kao posljedica zamora materijala.
- U slučaju prisutnosti vode na razini posteljice, uglavnom zbog manjkavih sustava odvodnje, koltrazi će se pojaviti ranije jer prisutnost vode smanjuje čvrstoću posteljice. Ova pojava je još značajnija u slučaju neasfaltiranih cesta.

4. Sigurnost

Pregled utjecaja vozila s prekomjernom težinom na sigurnost u cestovnom prometu ima za cilj pružiti jasne, razumljive i dobro dokazane informacije o specifičnim učincima preopterećenja.

Učinak mase na dinamiku vozila jedan je od temeljnih fizikalnih utjecaja. Određene osnovne karakteristike bit će primjenjive na sve vrste vozila u različitim državama diljem svijeta. Međutim, učinak mase značajno će utjecati na oblikovanje vozila te se tako oni mogu značajno razlikovati.

Također, važno je napomenuti da učinci preopterećenja na ponašanje vozila nisu isti za različite aspekte svojstva vozila. U nekim će područjima učinak biti izravno proporcionalan (npr. što je veći teret, veće je smanjenje u performansama vozila), međutim, u drugima će biti daleko od linearnog. Proizvođači teže oblikovanju vozila prema valjanom standardu, koja se zatim mogu prodavati u što većem broju različitih država (s različitim ograničenjima mase). To dovodi do koncepta najveće dozvoljene bruto mase vozila od strane proizvođača i, u većini zemalja, ta masa bit će znatno veća od najveće koju će isto vozilo moći nositi prema nacionalnom ili lokalnom zakonodavstvu. Drugim riječima, to je maksimalna masa pri kojoj se natovareno vozilo može sigurno voziti cestom, odnosno za koju ga je projektirao proizvođač. U nekim područjima svojstva vozila prekoračenje nacionalnog ograničenja mase za skroman iznos neće negativno utjecati na sigurnost jer, iako je protuzakonito, ostaje unutar maksimalne mase za koju je vozilo dizajnirano.

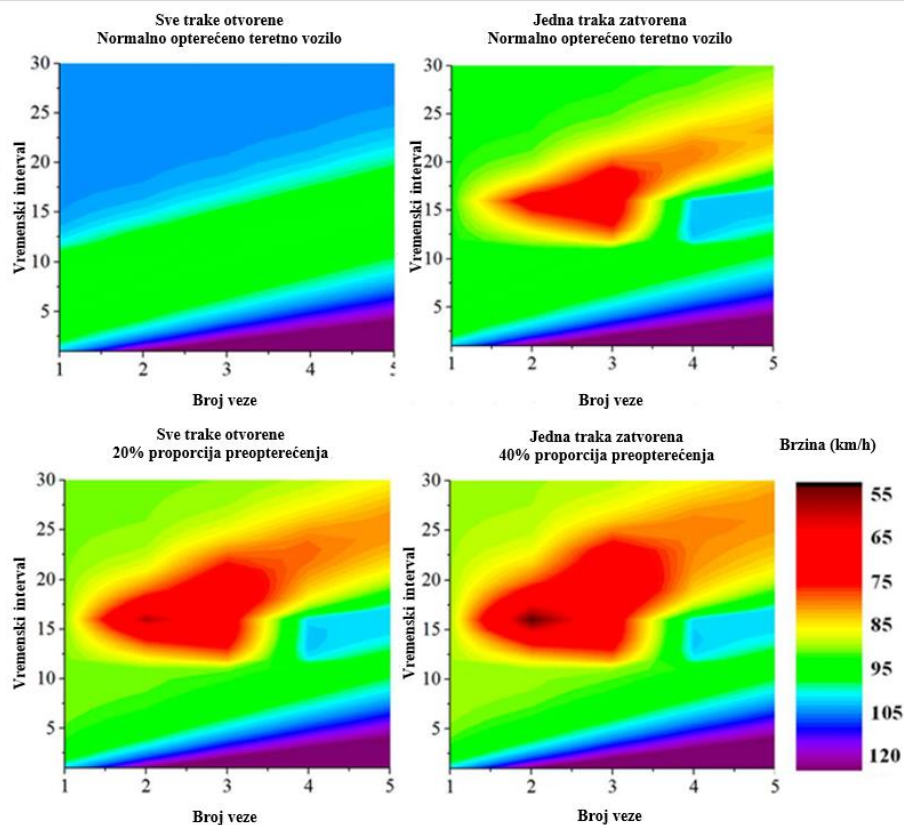
Dakle, u stvarnosti je učinak preopterećenja na sigurnost prilično složen. Nasuprot, većina smjernica koje definiraju preopterećenje usmjerenih na operatere i prijevoznike vrlo je jednostavna. Na primjer, smjernice u Ujedinjenom Kraljevstvu navode da preopterećenje „vozilo čini manje stabilnim, teškim za upravljanje te mu produžuje zaustavni „put“. Vozila različito reagiraju kada se prekorače maksimalna opterećenja za koje su namijenjena. Posljedice mogu biti fatalne.” (DVSA, 2012.). [1]

Stabilnost vozila te otpornost na prevrtanje općenito će se postupno pogoršavati s povećanjem opterećenja (i preopterećenja). Međutim, veličina učinka varirat će ovisno o vrsti opterećenja i, posebno, njegovoj gustoći. Ukoliko se prevoze vrlo gusti tereti, preopterećenje možda neće jako povećati visinu težišta tako da se može očekivati samo relativno malo pogoršanje stabilnosti pri prevrtanju. Kada se prevozi roba vrlo niske gustoće, vozilo će vjerojatno biti potpuno natovareno prije nego što se dosegnu ograničenja mase tako da preopterećenje nije moguće.

Kod tereta srednje gustoće gdje bi, na primjer, preopterećenje od 20% mase rezultiralo potpunom popunjenošću volumena tereta do velike visine, očekivali bi se najveći učinci na prevrtanje. Loše raspoređen teret (na primjer teži predmeti na vrhu) također će imati značajan utjecaj na prevrtanje.

Jačina sudara je područje u kojem bi se rizik postupno povećavao s povećanjem preopterećenja. Međutim, jednostavno gledište bi bilo da je to slučaj za sve sudare, a to nije točno. Važan čimbenik u razmatranju učinka mase na jačinu sudara je omjer masa između uključenih strana. Činjenica je da je većina legalno opterećenih i potpuno usklađenih teških teretnih vozila već mnogo teža od ostalih sudionika u prometu. U konkretnom primjeru, ishod vjerojatno neće biti bitno drugačiji ako je pješak od 75 kg udaren legalno natovarenim kamionom od 40 tona ili ako je taj kamion preopterećen za 10 tona na ukupnu masu od 50 tona. Omjer mase veći je od 500 naprema 1 već kada je kamion natovaren unutar zakonski dopuštenih granica. Promjena jačine udara u ovisnosti o promjenama u masi postaje zanemariva nakon što omjer masa postane veći od 10 naprema 1. Dakle, ozbiljnost sudara se postupno pogoršava s povećanjem preopterećenja, ali samo u relativno uskom rasponu sudara gdje teretno vozilo udara u druga gospodarska vozila usporedive mase ili u određenim sudarima gdje teretno vozilo udara u uglavnom krute objekte kao što su npr. nosači mostova.

Što je teret veći, to je veća vjerojatnost pogoršanja učinkovitosti kočnica kao posljedice pregrijavanja kočnica bilo kod opetovanog kočenja ili kod korištenja kočnica za održavanje konstantne brzine na dugoj nizbrdici. Ovo je poznato kao izbljeđivanje kočnice. Iako će učinci biti progresivni s preopterećenjem, stupanj izbljeđivanja može se znatno pogoršati nakon što se prekorači najveća dopuštena bruto masa vozila.

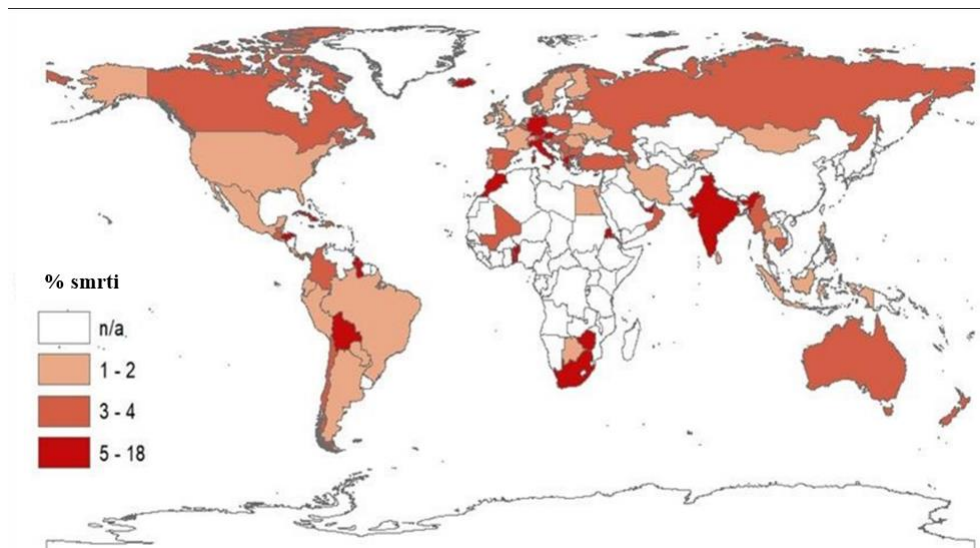


Slika 12. Varijacije brzina kamiona ovisno o razini preopterećenosti

Strukturalni kvarovi na kotačima, ovjesu, pa čak i dijelovima šasije mogu rezultirati katastrofalnim ishodima. Međutim, ako je vozilo dobro održavano i preopterećenje je još uvijek unutar najveće dopuštene ukupne mase vozila (i vjerojatno margine iznad najveće dopuštene bruto mase od strane proizvođača jer proizvođači dopuštaju određeni faktor sigurnosti), tada će ti kvarovi biti izuzetno rijetki. Oni će postati vjerojatni tek nakon što se projektirana težina znatno premaši.

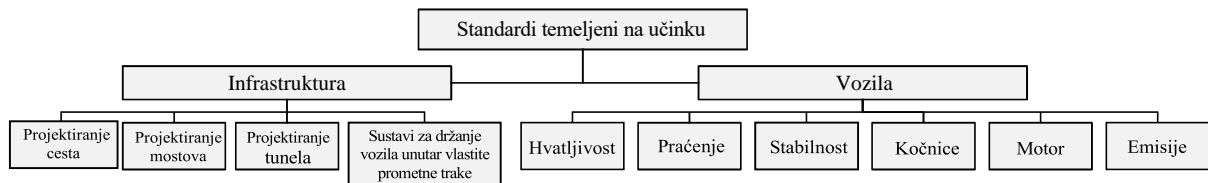
Pitanja raspodjele težine i interakcije s konstrukcijom vozila uvelike kompliciraju razmatranje učinaka opterećenja na upravljanje i, posebno, put zaustavljanja u nuždi pri kočenju. Preopterećenje doista može otežati upravljanje vozilom. Kada je upravljana osovina preopterećena, može biti potrebna veća sila za okretanje upravljača. Međutim, kada je preopterećenje usmjereno prema stražnjem dijelu vozila, ono može smanjiti masu koju nosi upravljana osovina i smanjiti silu potrebnu za okretanje kotača.

Slika 13 prikazuje broj smrtnih slučajeva vozača, suvozača te ostalih sudionika kamionskog prometa u 2016. godini kao postotak svih smrtnih slučajeva u prometu u državama širom svijeta (Svjetska zdravstvena organizacija, 2018.). Iako smrtni slučajevi sudionika kamionskog prometa pokrivaju samo mali udio ukupnih smrtnih slučajeva proizašlih iz sudara u kojima su sudjelovali kamioni, to ukazuje na očekivane varijacije diljem svijeta. Uočeno je da oko 23% zemalja ima postotak smrtnih slučajeva niži od 1%, što pokazuje da ove vrste korisnika nisu posebno rizične u tim zemljama. Srednjerizične skupine od 1-2% smrtnih slučajeva i 2-4% smrtnih slučajeva zastupljene su u 19 odnosno 34% zemalja. Kritična skupina s najvećim postotkom smrtnosti obuhvaća oko 24% zemalja, što zaslužuje posebnu pozornost kako bi se smanjio veći rizik od smrti. [1]



Slika 13. Postotak smrtnih slučajeva vozača i putnika kamiona (izvor podataka SZO, 2018.) [1]

Kada se istražuju svojstva teških vozila s obzirom na mjere sigurnosti i upravljivosti, treba uzeti u obzir i oblikovanje vozila te način projektiranja infrastrukture jer su usko povezani (slika 14). Ako se na određenoj cestovnoj mreži dopuštaju teška vozila, karakteristike ceste imaju važan utjecaj na potrebnu razinu učinka vozila. Isto tako, kada se gradi nova cesta, karakteristike teških vozila koja će njome voziti postavljaju zahtjeve za projektiranje ceste. Ove mjere mogu se podijeliti u četiri skupine na temelju praktičnih ciljeva kojima se bave: hvatljivost, praćenje, stabilnost i kočenje. Svaka od ovih kategorija je prikazana u zasebnom odjeljku u nastavku.



Slika 14. Mjere koje čine osnovu za standarde [2]

4.1. Hvatljivost

Hvatljivost je svojstvo površine kolnika koje je preduvjet za pokretanje, kočenje i zaustavljanje cestovnih vozila. Teška vozila trebala bi se moći pokrenuti, održati kretanje i postići željenu razinu ubrzanja.

Svojstva koja se odnose na hvatljivost teških teretnih vozila su:

- **Startnost** - Mjera sposobnosti vozila da krene iz stanja mirovanja na cesti pod nagibom.
- **Mogućnost vozila da održi prihvatljivu brzinu na cesti pod nagibom**
- **Sposobnost ubrzanja** - Mjera sposobnosti vozila da ubrza iz stanja mirovanja prihvatljivom razinom ubrzanja.

Utjecajne značajke infrastrukture su:

- **Nadmorska visina ceste**
- **Učestalost zimskog održavanja**

4.2. Praćenje

Stražnji dio vozila i svi dijelovi mogućih kombinacija vozila trebaju slijediti putanju prednjeg kraja vozila unutar odgovarajućih granica.

Svojstva koja se odnose na praćenje teških teretnih vozila su:

- **Sposobnost praćenja na ravnoj cesti pod nagibom** - Mjera odstupanja vučenih jedinica od propisane putanje na neujednačenoj ravnoj cesti s poprečnim nagibom.
- **Frontalni zamah vučenih jedinica** - Mjera odstupanja prednjeg vanjskog kuta vozila od propisane putanje u uskom zavoju pri malim brzinama.
- **Stražnji zamah vučenih jedinica** - Mjera odstupanja stražnjeg vanjskog kuta jedinica vozila od propisane putanje u uskom zavoju pri malim brzinama.

- **Skretanje pri maloj brzini** - Mjera odstupanja vučenih jedinica od propisane putanje u uskom zavoju pri malim brzinama.
- **Skretanje pri velikoj brzini** - Mjera odstupanja vučenih jedinica od propisane putanje u zavoju pri velikim brzinama.
- **Naglo skretanje pri velikoj brzini** - Mjera odstupanja vučenih jedinica od propisane putanje pri naglom manevru pri velikim brzinama.

Hvatljivost površine ceste također je važno za ovaj segment, ali se ne ponavlja.

Utjecajne značajke infrastrukture su:

- **Širina trake**
- **Poprečni nagib**
- **Referentne dimenzije kružnog raskrižja**
- **Referentne dimenzije križanja**
- **Zakrivljenost ceste**

4.3. Stabilnost

Vozilo bi trebalo biti stabilno, imati kontrolu nad smjerom i ostati uspravno tijekom manevriranja. Relevantne mjere svojstva vozila koje se odnose na stabilnost nisu tako blisko povezane s infrastrukturnim značajkama kao prethodne kategorije. Međutim, hvatljivost površine ceste također igra važnu ulogu u mjerama koje se odnose na stabilnost.

Svojstva koja se odnose na stabilnost teških teretnih vozila su:

- **Prag prevrtanja** - Mjera najveće težine ravnomjernog skretanja, tj. bočnog ubrzanja, koje vozilo može izdržati bez prevrtanja.
- **Omjer prijenosa opterećenja** - Mjera blizine podizanja kotača pri iznenadnom manevru.
- **Stražnje pojačanje** - Mjera pojačanja količine kretanja (npr. brzine skretanja ili bočnog ubrzanja) u krajnjoj stražnjoj jedinici u iznenadnom manevru.
- **Koeficijent prigušenja skretanja** - Mjera brzine raspadanja slobodnih oscilacija tegljenih jedinica nakon naglog manevra.²

² Između okretnog postolja i karoserije ugrađeni su prigušivači skretanja, koji raspršuju mehaničku energiju svojim principom prigušnice s rupom. Ovi prigušivači skretanja mogu smanjiti bočne vibracije sustava vozila.

- **Zahtjev hvatljivosti pogonskih guma za prevladavanje otpora drugih osovina** - Potrebna hvatljivost na pogonskim gumama, kako bi se prevladao otpor drugih osovina, u uskom zavoju pri malim brzinama.
- **Zahtjev hvatljivosti pogonskih guma za prevladavanje otpora osovina prikolice** - Mjera potrebne hvatljivosti na pogonskim gumama, za prevladavanje otpora osovina prikolice, u uskom zavoju pri malim brzinama.

4.4. Kočenje

Kočenje vozila je proces čiji je cilj usporavanje ili zaustavljanje vozila. Vozilo bi trebalo sigurno postići željenu razinu usporenja tijekom kočenja.

Svojstva koja se odnose na kočenje teških teretnih vozila su:

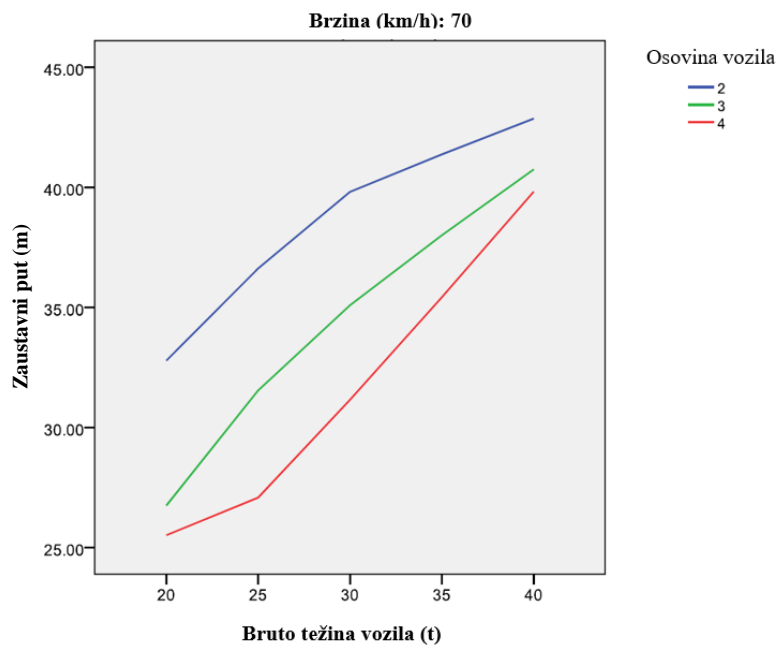
- **Put kočenja** - Mjera zaustavnog puta.
- **Učinkovitost kočenja** - Omjer mogućeg usporenja i idealnog usporenja potpomognutog hvatljivosti gume i kolnika.
- **Put intenzivnog kočenja** - Mjera potrebnog prostora tijekom jakog kočenja.
- **Put intenzivnog kočenja u zavoju** - Mjera potrebnog prostora tijekom snažnog kočenja u zavoju.
- **Stupanj djelotvornosti kočenja na površini s različitim razinama hvatljivosti** - Mjera upravljivosti vozila od strane vozača kada se koči na cesti s podijeljenim razinama hvatljivosti.³
- **Mogućnost parkiranja na nagibu** - Mjera sposobnosti vozila da ostane mirno na cesti s nagibom.

Utjecajne značajke infrastrukture su:

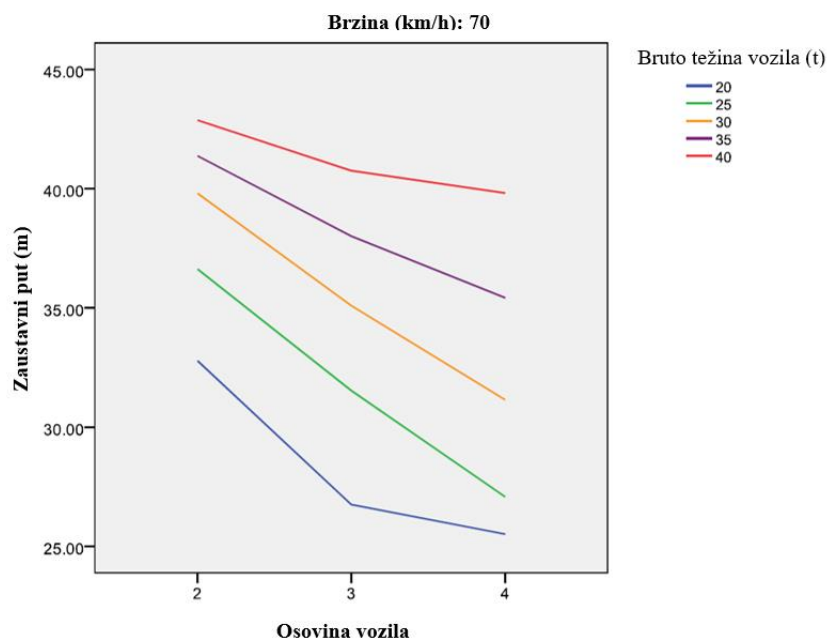
- **Hvatljivost**
- **Širina trake**
- **Zakrivljenost ceste**
- **Razina ceste**

³ Podijeljena razina hvatljivosti je stanje na cesti koje se javlja kada se hvatljivost značajno razlikuje između lijevog i desnog kotača vozila. Takvi su uvjeti na cestama tipični za hladna podneblja kada je jedna strana cestovne trake prekrivena snijegom ili ledom, a druga nije.

Na slikama 15 i 16 vidljivo je kako značajke vozila kao što bruto težina i broj osovina vozila utječu na zaustavni put pri brzini od 70 km/h.



Slika 15. Učinak bruto težine vozila na zaustavni put za različite tipove kamiona [4]



Slika 16. Učinak broja osovina na zaustavni put [4]

5. Ekonomski čimbenici

5.1. Utjecaj na troškove

Budući da je cestovni teretni prijevoz jako raznolik, njegova ekonomska struktura pogoduje tržišnoj organizaciji koja je vrlo raščlanjena, s mnogim malim tvrtkama (često vlasnicima/operatorima s malom flotom od samo jednog ili dva vozila) koje se natječu u cijenama kako bi privukle kupce. Iako postoje i veće prijevoznice tvrtke, one često također rade s kombinacijom vlastitih vozila i vozača s podizvođačima, tj. istim malim tvrtkama koje također rade na otvorenom tržištu. Veće tvrtke imaju prednost jače organizacijske strukture koja može dovesti do nižih troškova i veće investicijske sposobnosti, ali sve u svemu, struktura troškova i prihoda tvrtki za cestovni prijevoz tereta ne razlikuje se značajno s veličinom voznog parka u vlasništvu.

Troškovi cestovnih prijevoznika obično se mogu podijeliti u 4 komponente:

- Varijabilni troškovi prijevoza
- Polufiksni troškovi prijevoza
- Fiksni troškovi prijevoza
- Režijski troškovi

Tri glavne troškovne komponente su gorivo, rad i oprema (amortizacija), koji otprilike čine 90% ukupnog iznosa. Iako pravilo kaže da svaki predstavlja oko 30% ukupnih troškova, to može varirati ovisno o okolnostima.

Među nefiksnim troškovima prijevoza postoji više parametara koji mogu utjecati na razinu troškova: vrsta tereta, udaljenost i vrijeme putovanja, nacionalnost vozača, vrsta ceste, ali ukupna težina vozila je među najvažnijima, jer snažno utječe na potrošnju goriva kao i na trošenje vozila.

U [3] predstavljen je troškovni model (\$/tkm) za cestovni teretni promet, koji uzima u obzir najrelevantnije parametre:

$$C_t = X \cdot [Y \cdot C_f \cdot (Z + F) + Z \cdot C_v] \quad (3)$$

Gdje su:

C_t = ukupni troškovi prijevoza;

C_f = fiksni troškovi prijevoza;

C_v = varijabilni troškovi prijevoza.

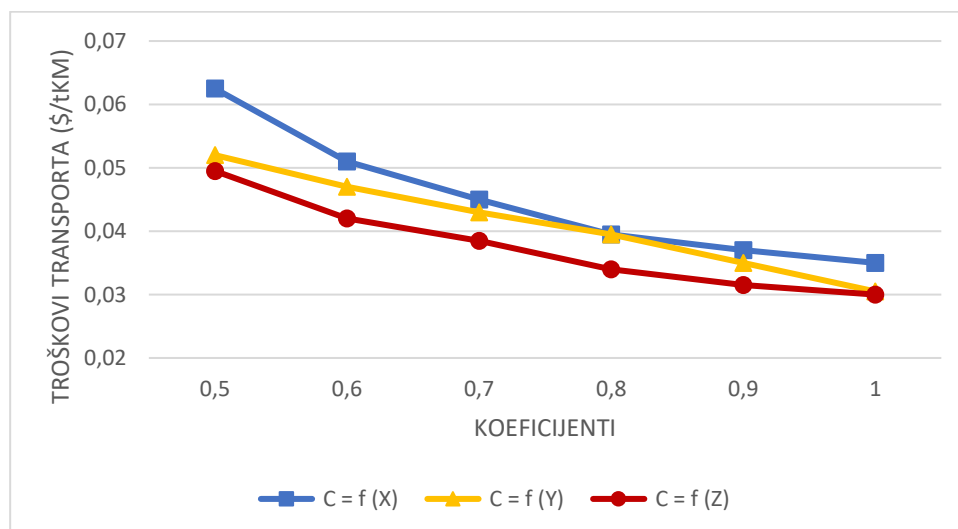
X je faktor koji izražava utjecaj nosivosti vozila i njegove iskorištenosti.

$$X = 1/\varepsilon \cdot q$$

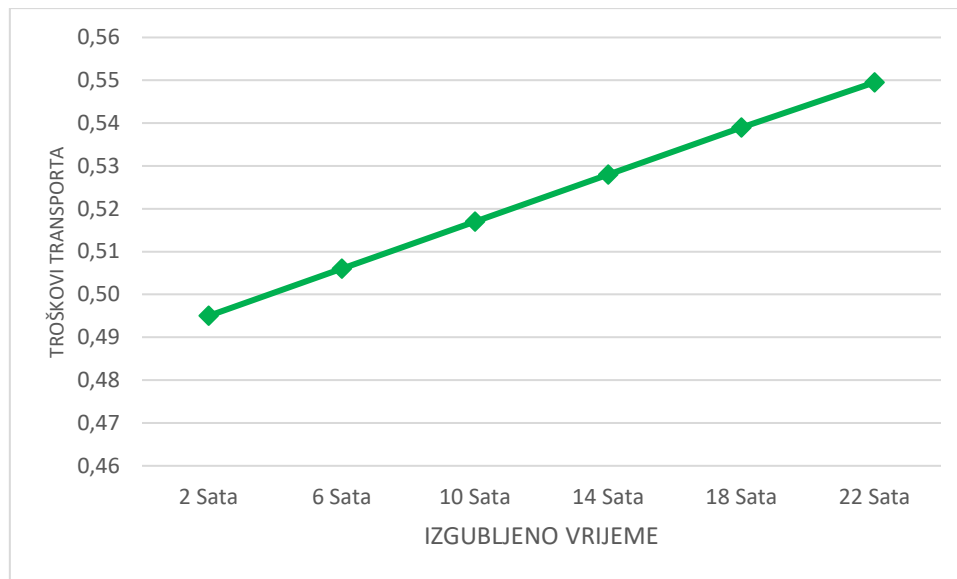
gdje je ε = koeficijent iskorištenja kapaciteta vozila; q = nosivost vozila (u tonama). Ovdje se pokazuje težina tereta i utjecaj preopterećenja.

Ostali parametri odražavaju relativnu dostupnost vozila tijekom cijele godine (Y), pojavu praznog vozila, cestovne i prometne uvjete (Z) te udio i učinkovitost operacija utovara/istovara u ukupnom vremenu putovanja (F).

Slika 17 prikazuje relativni utjecaj različitih parametara na troškove prijevoza za referentni slučaj. Jasno je da je utjecaj težine i faktora opterećenja dominantan u glavnom grafikonu, što naglašava važnost maksimiziranja količine tereta koji se prevozi po putovanju za operatere cestovnog prijevoza. Na slici 18 vidljiv je odnos troškova transporta i izgubljenog vremena.



Slika 17. Utjecaj parametara na razine troškova transporta [1]



Slika 18. Odnos troškova transporta i izgubljenog vremena [1]

5.2. Utjecaj na kompetitivnost unutar industrije

Drugi član jednadžbe dobiti/gubitka su prihodi: iako je često određivanje cijene za cestovni teretni prijevoz nelinearno, veća težina tereta će gotovo uvijek značiti višu cijenu. Međutim, povećanje cijene prijevoza nije nužno proporcionalno povećanju troškova operatera, budući da su pod utjecajem (u određenoj mjeri) samo varijabilni troškovi. To bi značilo da bi preuzimanje više tereta na putovanje dovelo do veće dobiti za operatere, stvarajući poticaj za maksimiziranje tereta po putovanju, u nekim slučajevima i preko zakonskih ograničenja odnosno prekomjerne težine.

U slučaju da operater odluči preopteretiti svoje vozilo, postoji treći izraz u izračunu dobiti: rizik da će ga policija uhvatiti i kazniti kada se otkrije preopterećenje. Ovaj se pojam sastoji od dva elementa: rizika i kazne. Rizik da budete uhvaćeni jako varira od zemlje do regije. Nadležna tijela mogu primijeniti tehnologiju kako bi poboljšala otkrivanje, ali to također može biti pitanje radne snage koja je dostupna za provođenje zakona ili prioriteta politike koje su službeno ili neformalno postavili kreatori politike kako bi utjecali na mogućnost da operateri cestovnog prijevoza s prekomjernom težinom prođu nekažnjeno. Visina novčanih kazni povezanih s prekomjernom težinom također će utjecati na odluke prijevoznika. Vrlo je moguće da se, unatoč velikoj vjerojatnosti otkrivanja, ipak donese svjesna odluka o preopterećenju kada kazna nije razmjerna dodatnoj koristi od preopterećenja.

Drugi element koji treba uzeti u obzir, a koji je relevantan u mnogim zemljama, je vjerojatnost da je osoblje za provedbu zakona korumpirano odnosno spremno prihvatiti mito određene razine kako bi zanemarilo prekršaj u slučaju da se otkrije. Osim izravnog podmićivanja, mogli bi postojati i drugi načini da se izbjegnu kazne.

Preopterećenje također utječe na ostale komponente troškova, jer povećava opterećenje vozila i ubrzava starenje, s većim brojem kvarova koji se mogu pojaviti i većim troškovima održavanja kao rezultat. U slučaju da samo vozilo nije preopterećeno, kršenja ograničenja osovinskog opterećenja općenito su nenamjerna i prije su posljedica nepravilnih postupaka utovara. Jedan od najvažnijih zaključaka vezan uz utjecaj preopterećenja na poslovni model upravitelja cestovne infrastrukture jest da iako preopterećenje uzrokuje kvazi-linearno poboljšanje dobiti prijevoznika, troškovi upravitelja infrastrukture (a time i društva u cjelini) se izuzetno povećavaju. Ako su vozila u prosjeku 20% preopterećena, životni vijek kolnika se prepolovi, a troškovi održavanja cesta udvostruče.

Uzimajući u obzir činjenicu da većina vozila prometuje s osovinskim opterećenjima znatno manjim od najveće dopuštene vrijednosti, preopterećenje bi moglo uzrokovati još veće skokove u troškovima održavanja i zamjene. Samo održavanje također dolazi s ekološkim troškovima koji bi mogli donekle poništiti sve ekološke koristi većeg opterećenja vozila.

6. Regulatorna i direktiva Europske Unije za preopterećena vozila


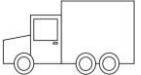







Životni vijek cesta ovisi o odnosu njihovih projektiranih parametara i njihove učinkovite uporabe. Projektiraju se uz određenu toleranciju na prometne tokove odnosno na strani sigurnosti pri zadanim opterećenjima. Prečesto i/ili pretjerano prekoračenje ovih proračunskih težina uzrokovat će smanjenje životnog vijeka infrastrukture (vidi slike 4 i 9).

U Europi su težine i dimenzije vozila regulirane kako u pogledu homologacije tako i u prometu na europskim cestama. Postoji širok raspon europskih propisa i direktiva koje reguliraju razine određenih svojstva za vozila, ali samo mali broj europskih direktiva koje reguliraju razine određenih svojstva za infrastrukturu. Uobičajeni pristup je postavljanje maksimalnih ograničenja težine i dimenzija vozila (kombinacija) kako bi se osigurala sigurnost i zaštitila infrastruktura. Nadalje, za teška teretna vozila nametnuta su ograničenja pristupa cestovnoj mreži. Takva ograničenja uključuju zabrane vožnje, namjenske rute i ekološke zone. Ova prometna ograničenja nisu usklađena za Europu i mogu se regulirati na nacionalnoj, regionalnoj ili lokalnoj razini.

S obzirom na različitu gospodarsku organizaciju zemalja, projektni zahtjevi za ceste razlikuju se među zemljama i kontinentima, a prilagođavaju se s vremenom, kako se mijenjaju zahtjevi tržišta. Trošak je još jedan važan čimbenik, budući da se višim tolerancijama ceste prouzrokuju viši troškovi izgradnje i održavanja. Proračun dostupan za upravljanje cestovnom infrastrukturom također će utjecati na kvalitetu koja se može pružiti korisnicima cesta. Ovo poglavlje prikazuje dostupne informacije o ograničenjima težine za vozila, osovine i grupe osovina. Međunarodni transportni forum daje ovaj popis ograničenja težine na svojoj web stranici (OECD-ITF, 2019.). Sljedeće tablice prikazuju težine po vozilu i po osovini za uzorak zemalja Europe. Najveća dopuštena težina prikazana je prema:

- tipu osovine: nepogonska i pogonska; singl, tandem i tridem
- tipu vozila: solo kamion, tandem/tegljač (kamion + prikolica) i šleper (tegljač + poluprikolica(e))
- broju osovina: 2, 3, 4 i 5 ili više osovina.

Tablica 1. Razmatrane vrste vozila [1]

Slika vozila	Opis vozila
	2 krute osovine
	3 krute osovine
	4 krute osovine
	T2S2 (2-osovinski tegljač i poluprikolica s tandemom)
	T2S3 (2-osovinski tegljač i poluprikolica s tridemom)
	T3S2 (3-osovinski tegljač i poluprikolica s tandemom)
	T3S3 (3-osovinski tegljač i poluprikolica s tridemom)
	2+2 (Kruti kamion i prikolica s rudom)
	2+3 (Kruti kamion i prikolica s rudom)

Tablica 2. Maksimalne dopuštene težine kamiona u Europi (u tonama), prilagođeno iz Međunarodnog transportnog foruma [1]

Država	Težina po nepogonskoj osovini	Težina po pogonskoj osovini	Kamion 2 osovine	Kamion 3 osovine	Cestovni vlak 4 osovine	Cestovni vlak 5 osovina i više	Zglobna vozila 5 osovina i više
Albanija	10	11.5 (1)	18	26 (2,3)	36	40	44
Armenija	10	10	18	22	36 (4)	36 (4)	36 (4)
Austrija	10	11.5	18	26	36	40 (5)	40 (5)
Azerbajdžan	10	10	18	24	36	42	44
Bjelorusija	10	10 / 11.5	18 / 20	25	38 / 40	40 / 42	42 / 44
Belgija	10	12	19 (6)	26 (6)	39 (7,8,9)	44 (10,11,12,13,14)	44 (10,14,15)
Bosna i Hercegovina	10	11.5	18	25 / 26	36 / 38	40 / 42	42 / 44 (16,17)
Bugarska	10	11.5	18	26 (2)	36	40	40
Hrvatska	10	11.5	18	25 (18)	36	40	40 (5)
Češka Republika	10	11.5	18	26 (2)	32	48	48
Danska (19)	10	11.5	18	24 (20)	38	44 (21)	44 (21)
Estonija	10	11.5	18	26 (2)	36 (22)	40 (23)	40 (23,24)
Finska (25)	10	11.5	18	28 (2)	36	44 (26)	44 (26)
Francuska	12 (27)	12 (27)	19	26	38 (28)	40 / 44 (29)	40 / 44 (29)
Georgia	10	11.5	18	25 / 26 (30)	36	40	40 / 42 (16) (17)
Njemačka	10	11.5	18 (31)	26 (31)	36	40 (32)	40 (32)
Grčka	7/10	13	19	26	38 (33,34)	40 / 42 (35)	40 / 42 (24)
Mađarska	10 (36)	11.5 (36)	18 (37)	25 (38)	36 (39)	40	40 / 42 (16) (17)
Irska	10	11.5 (40)	18	26 (41)	36 (42)	42 (2,43,44,45)	44 (45,46,47,48)
Italija	12	12	18	26 (2)	40	44	44
Latvija	10	11.5	18	25 / 26 (30)	36	40	40 (24,49)
Lihtenštajn	10	11.5	18	26 (2)	36	40	40
Litva	10	11.5	18	25 (18,50,51)	36	40 (49)	40 (24)
Luxemburg	10	12 (52)	19	26	44	44	44
Malta	10	11.5	18	25	36	40	40 (53)
Moldova	10	11.5	18	25 (18)	36	40	40 (53)
Crna Gora	10	11.5	18	26 (54)	36	40	40 (53)
Nizozemska (19)	10	11.5	21.5	21.5-30.5 (55)	40	50	50
Sjeverna Makedonija	10	11.5	18	25	36 (22)	40	40
Norveška (19,56)	10	11.5	19	26 (57)	39	46-50 (58)	46-50 (59)
Poljska	10	11.5	18	26 (2)	36	40	40
Portugal (19)	10 (60)	12	19	26	37 (61)	44 (60)	44 (62)
Rumunjska	10	11.5	18	25 / 26 (30)	36	40	40 / 42 (16) (17)
Rusija	10	10 (63)	18	25 (64)	36 (28)	40 (65)	40 (65)
Srbija	10	11.5	18 (66)	25 (18,67)	36 (68)	40	40 / 42 (16)(17)

Slovačka	10	11.5	18	26 (2)	40	40	40
Slovenija	10	11.5	18	25 (18,50)	36	40	40 / 44 (16,69)
Španjolska	10	11.5	18	25 (18)	36 (68)	40	42 (49) / 44 (24)
Švedska	10	11.5	18	25 / 28 (30)	38	40 (70)	44 (53)
Švicarska	10	11.5	18	26 (71)	36	40	40
Turska	10	11.5	18	25 (72)	36 (28,73)	40	40 (74)
Ukrajina	11	11	16 (75)	22 (76)	38 (77)	40 (77)	40 (77)
Ujedinjeno Kraljevstvo	10	11.5	18	26 (78)	36 (79)	40 / 44 (80)	40 / 44 (80)

Općenito, ograničenja težine u Europi dosljedna su zbog zajedničke zakonske osnove. Za države članice EU-a trenutno relevantno zakonodavstvo je (još uvijek) Direktiva 96/53/EC.

Direktiva 96/53/EC ostavlja prostor pojedinim državama da na vlastitom teritoriju odstupe od dogovorenih maksimalnih težina i, u određenoj mjeri, dimenzija. Mnoge države članice iskoristile su ili planiraju iskoristiti ovu mogućnost, dok druge drže da se ograničenja navedena u direktivi ne smiju prekoračiti. Rezultat toga je da se zakonodavstvo o težinama i dimenzijama jako razlikuje od zemlje do zemlje i od regije do regije unutar Europe. To je djelomično zbog različitih infrastrukturnih preduvjeta koji prirodno ograničavaju mogućnost dopuštanja duljih ili težih vozila, a djelomično zbog tekuće rasprave o učincima na promjenu načina prijevoza. Pitanje je i dalje politički osjetljivo, uključuje mnoge sukobljene interese i planove, kao što pokazuje kontroverza izazvana uvođenjem dužih vozila u Njemačkoj. Države koje nisu članice EU-a uglavnom su usklađene s ovom uredbom, osobito za vozila koja obično prometuju u međunarodnom kontekstu. Iz navedenih tablica, doneseni su sljedeći zaključci:

- S izuzetkom Italije i Francuske, ograničenje težine za nepogonsku jednostruku osovinu je 10 tona. Za pogonske osovine, opće pravilo je 11,5 tona, iako su iznimke češće.
- Kamioni s 2 osovine općenito imaju ograničenje od 18 tona. Za 3-osovinske krute kamione, ograničenje zemlji EU je 26 tona.
- Većina zemalja EU ima ograničenje od 36 tona za cestovna vozila s 4 osovine, iako neke idu do 38 ili čak 40 tona.
- Zglobna vozila s 5 osovina imaju opće ograničenje od 40 tona (44 t za vozila u intermodalnom transportu). Veća vozila do 8 osovina kao EMS (European Modular System) kombinacija obično su ograničena na 60 tona, iako zemlje poput Švedske (71 tona) i Finske (76 tona) još uvijek imaju viša ograničenja.
- Zemlje koje nisu članice EU općenito imaju niže limite od zemalja EU, iako su limiti za vozila koja su uglavnom aktivna u međunarodnom prometu usklađeni s limitima EU.

- Nizozemska ima ograničenje od 50 tona za zglobna vozila s 5 osovina i dopušta EMS kombinacije do 60 tona.

Moguće je izdavanje posebne dozvole za izvanredni prijevoz odnosno za vozila koja prelaze normalnu težinu i/ili veličinu. Ove su dozvole vremenski i lokacijski ograničene, dotična vozila mogu slijediti samo određenu odobrenu rutu određenog datuma tako da se mogu poduzeti mjere opreza za ostali promet. Ta su vozila tehnički preopterećena, ali kada se prijevoz smatra potrebnim, još uvijek mogu pristupiti cestovnoj mreži pod strogim uvjetima, koji također mogu uključivati da mogu prometovati samo u koloni vozila za navođenje i/ili pri određenom maksimalnom ograničenju brzine. U gornjem pregledu razmatrane su 2 vrste ograničenja težine: ukupna težina vozila i osovinsko opterećenje. Bruto težine vozila uvelike se razlikuju među državama i kontinentima. Viša ograničenja težine općenito su postavljena u državama koje teže maksimalnom povećanju potencijala svoje flote, iako motivi za to mogu biti različiti: u razvijenim zemljama cilj je maksimiziranje produktivnosti i smanjenje troškova, dok se u zemljama u razvoju možda više radi o ispunjavanju potražnje s postojećim voznim parkom jer se nova vozila možda neće lako kupiti.

7. Rješenje problema (načini smanjenja)

Kako bi se mogao apsorbirati rast cestovnog prijevoza tereta i ispuniti društvene potrebe (zdravlje, sigurnost,...) i ambiciozni ciljevi emisija, cestovni prijevoz tereta trebao bi postati učinkovitiji. Jedan od načina rješavanja ovog problema je promatranje razlika u politikama pristupa europskih zemalja. Postoji izravna veza između ograničenja težine i dimenzija te slobodnog prometa teških teretnih vozila s jedne strane i učinkovitosti cestovnog prijevoza tereta s druge strane. Ograničenja su nametnuta teškim teretnim vozilima iz vrlo razumnih razloga: radi zaštite infrastrukture, povećanja sigurnosti prometa, poboljšanja kvalitete zraka, iz razloga povezanih s projektiranjem cesta itd. Ipak, rezultati svih ovih lokalnih, regionalnih i nacionalnih mjera mogli bi biti neučinkoviti cestovni teretni prijevoz jer dovode do većeg broja teških teretnih vozila na cestama i dodatnih kilometara.

U prethodnom poglavlju dat je pregled postojećih ograničenja o teškim vozilima u nizu europskih zemalja. Ovi se propisi odnose na konvencionalna teška vozila s ograničenom duljinom i težinom (18,75 m/44 t u EU i 25,25 m/60 t u Švedskoj, Norveškoj i Nizozemskoj). To znači da su potrebni dodatni zahtjevi kako bi se osigurala sigurnost i sposobnost manevriranja duljih i težih vozila (ako su dopušteni na cesti). Jedan mogući pristup je korištenje standarda temeljenih na performansama (PBS).

Prema PBS pristupu regulaciji, standardi bi specificirali razine svojstva koje se zahtijevaju od vozila, a ne nalagali kako bi se te razine trebale postići postavljanjem ograničenja na duljinu ili težinu vozila. Navedeni standardi implementirani su u Australiji, Kanadi i Novom Zelandu.

Usredotočujući se na mehanizam oštećenja uslijed zamora, zaključci koji se mogu donijeti su sljedeći:

1) Preopterećenje osovina je mehanizam koji rezultira neproporcionalnom razinom oštećenja ceste od preopterećenih kamiona. Posljedice toga mogu se ublažiti na različite načine koji su nabrojani u nastavku.

- Bolja praksa vozila:
 - Uklanjanje izvora preopterećenja vozila (tj. ugradnjom ovjesa na tandem ili tridem osovine koje ravnomjerno raspoređuju opterećenje među osovinama)
 - Smanjenje učestalosti preopterećenja i njegove veličine (putem mjera, poticaja itd.)
- Projektiranje ceste uzimajući u obzir veća opterećenja:
 - Kolnici s debljim slojevima

2) Zatim, postoji niz dobrih praksi projektiranja kolničke konstrukcije i održavanja koje će općenito smanjiti obim oštećenja od legalno opterećenih i preopterećenih vozila. To uključuje:

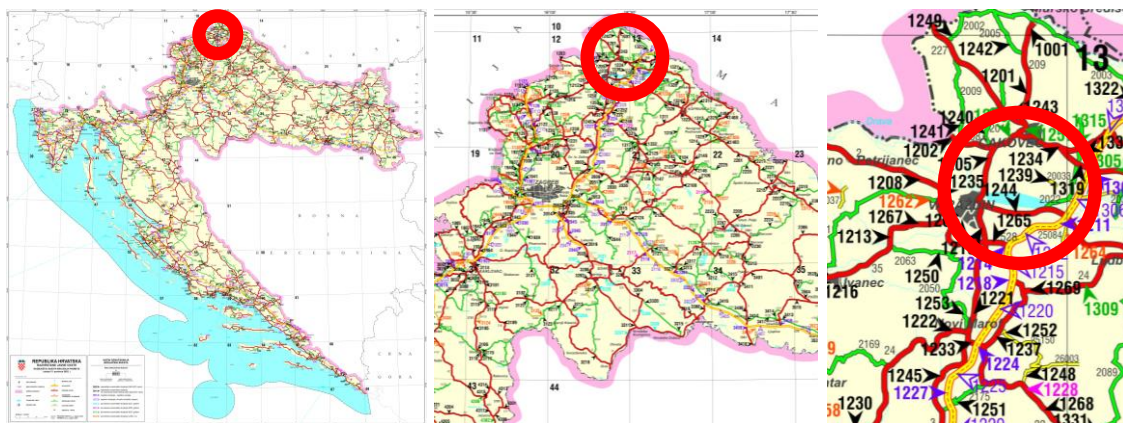
- Vozila:
 - Pravilan raspored tereta na vozilu
 - Korištenje 'road friendly' ovjesa i osovina s dvostrukim kotačima
- Kolnici:
 - Ispravno projektiranje za određene temperaturne uvjete

Vodeće načelo u projektiranju cestovne infrastrukture trebalo bi biti uzimanje u obzir situacije u stvarnom svijetu, a ne hipotetske "idealne" situacije sa savršenom usklađenošću. To naravno zahtijeva dobro razumijevanje stvarnog opterećenja vozila, a time i odgovarajuće prakse praćenja istog.

8. Praktični dio

8.1. Uvod

Sustavno prikupljanje podataka o značajkama cestovnog prometa na što većem dijelu cestovne mreže osnovni je cilj brojenja cestovnog prometa. Projekt prikupljanja, obrade i prezentacije ogromne količine prometnih podataka u nas uspješno usmjeravaju i koordiniraju "Hrvatske ceste d.o.o.". Za praktični dio diplomskog rada korištena su dva izvora podataka. Prva publikacija je "Brojenje prometa na cestama Republike Hrvatske godine 2022." koja svojim podacima i analizama daje važan doprinos ostvarenju učinkovitog gospodarenja hrvatskim prometom i cestovnom infrastrukturom. Iz navedenog izvora [8] uzeto je razmatranje brojačkog mjesta 1265 – Kneginec Donji prikazanog na slici 19 te je iz navedenih podataka izračunato ukupno projektno prometno opterećenje izraženo brojem prijelaza standardnog ekvivalentnog osovinskog opterećenja. Podaci o prometnom opterećenju postaju potpuni tek kada se nadopune podacima o osovinskom opterećenju i ukupnoj masi vozila, posebice osovinskom opterećenju pojedinih vrsta reprezentativnih vozila. U drugoj publikaciji pod naslovom "Mjerenje osovinskih opterećenja i ukupne mase vozila u prometu na cestama Republike Hrvatske" iskazani su sistematizirani podaci o provedenim mjerenjima osovinskih opterećenja i ukupne mase teretnih vozila u prometu na cestama Republike Hrvatske. Iz navedenog izvora [9] u razmatranje uzeto je mjerno mjesto SW0161 – Prolaz za divljač prikazano na slici 20. Zatim su za oba slučaja dimenzionirane nove kolničke konstrukcije. Dimenzioniranje je provedeno prema normi HRN U.C4.012 i "Tehničkim uvjetima za asfaltne kolnike", Zagreb, 2015.



Slika 19. Razvrstane javne ceste Republike Hrvatske s položajem mjernog mjesta 1265 - Kneginec Donji [8]



Slika 20. Karta s položajem mjernog mjesta WIM003 – Varaždin jug [9]

8.2. Postupak proračuna

Osnovni cilj dimenzioniranja kolničke konstrukcije sastoji se u odabiru vrste i debljine pojedinih slojeva tako da se osigura odgovarajuća razina uporabivosti. Ovisno o veličini prometnog opterećenja i kategoriji prometnice u okviru postupka dimenzioniranja provodi se izbor kolničke konstrukcije u cjelini, a posebno završnih asfaltnih slojeva. U okviru postupka dimenzioniranja potrebno je definirati geometriju i sastav kolničke konstrukcije koja je dovoljno otporna na utjecaje prometnih opterećenja.

U ovom je projektu dimenzioniranje kolničkih konstrukcija za promatrane dionice provedeno za projektni period od 20 godina.

Vozna sposobnost površine kolnika procjenjuje se preko indeksa vozne sposobnosti “p” čija je vrijednost 5,0 za nove i idealno ravne kolnike, a $p = 0$ za potpuno uništene kolnike po kojima vožnja više nije moguća. Prema standardu za dimenzioniranje, usvojena je najmanja vrijednost vozne sposobnosti površine kolnika pri kraju projektnog perioda $p_t = 2,5$.

Utjecaj klimatsko-hidroloških uvjeta na nosivost kolničke konstrukcije uzima se u obzir preko regionalnog faktora “R”. Njegove vrijednosti kreću se od 0,5 do 5,0 pri čemu su veće vrijednosti nepovoljnije. U ova dva konkretna slučaja uzeta je veličina regionalnog faktora $R = 2,0$, što odgovara kontinentalnoj klimi promatranih područja.

Jedan od najvažnijih parametara koji utječe na geometriju kolničke konstrukcije je nosivost tla posteljice. Nosivost tla pak ovisi o vrsti tla, sadržaju vlage u njemu i stupnju zbijenosti (gustoći) postignutom tijekom građenja.

Prilikom dimenzioniranja kolničke konstrukcije za oba slučaja kao reprezentativna vrijednost kalifornijskog indeksa nosivosti tla posteljice uzeta je vrijednost CBR = 6%.

Promet se prilikom brojanja razvrstava u pet kategorija vrsti vozila kako bi se mogao izračunati ukupni broj prijelaza standardnog ekvivalentnog osovinskog opterećenja, prema skupinama vozila za koje su definirani faktori ekvivalencije dobiveni prethodno navedenom jednadžbom (2).

Poznavanje faktora ekvivalencije reprezentativne skupine teretnih vozila omogućava izračun prosječnog godišnjeg dnevnog ekvivalentnog opterećenja najopterećenijeg prometnog traka prema izrazu:

$$T_d = \sum_{i=1}^j (F_e^i \cdot n_i) \quad (4)$$

u kojem je F_e^i faktor ekvivalencije reprezentativnog vozila, n_i prosječni godišnji dnevni broj vozila pojedine skupine teretnih vozila na najopterećenijem prometnom traku, a j broj skupina vozila.

Za 20-godišnji projektni period te predviđeni faktor rasta prometa $q = 25$, za potrebe proračuna kolničkih konstrukcija promatranih dionica 1265 - Kneginec Donji i WIM003 – Varaždin jug proračunati su brojevi ukupnog ekvivalentnog opterećenja teretnih vozila na sljedeći način:

$$T_u = T_g \cdot q \cdot u = T_d \cdot 365 \cdot q \cdot u \quad (5)$$

u kojem je T_g označeno ukupno ekvivalentno prometno opterećenje, q faktor rasta prometa, a u faktor raspodjele prometnog opterećenja teretnih vozila po prometnim trakovima.

Na predmetnoj dionici SW0161 – Prolaz za divljač postoje podaci prosječnog dnevnog prometa ekvivalentnih osovina od 82 kN. U okviru ove dionice korišteni su interpretirani podaci dobiveni koristeći uređaj za vaganje vozila u pokretu tzv. WIM (eng. Weight in motion) uređajem. To je uređaj za vaganje kod kojega su senzori ugrađeni na, u ili ispod kolnika. Senzori mjere dinamičku vertikalnu komponentu sile pneumatika svakog kotača vozila dok prolazi preko senzora uređaja. Izmjerene sile, zajedno s drugim parametrima kao što su brzina i uzdužni položaj vozila na prometnoj traci, koriste se za procjenu opterećenja kotača, osovine, grupe osovina i ukupne mase odgovarajućeg statičkog vozila.

Na promatranoj dionici mjerenje je izvršeno prijenosnim SiWIM uređajem (slika 21), uređajem koji se na relativno brz i jednostavan način može prenijeti s jedne na drugu lokaciju i ponovno staviti u funkciju.



Slika 21. Primjer prijenosnog SiWIM uređaja [9]

Zadaci projektnog zadatka:

- Odrediti ukupni broj prijelaza ekvivalentnih osovina (W_{80}) u projektnom razdoblju prema normi **HRN U.C4.010**, koristeći podatke s brojačkog mjesta te izračunati ukupno projektno prometno opterećenje.
- Dimenzionirati novu asfaltnu kolničku konstrukciju na osnovi zadanih elemenata prema normi **HRN U.C4.012**, a zatim provjeriti njene dimenzije prema metodi **AASHO-Road Testa**.

Odabrani podaci za oba slučaja dimenzioniranja prema AASHO ili HRN U.C4.012 metodi

Projektni period (eksploatacijsko razdoblje ceste)	n = 20 godina
Projektna vrijednost kalifornijskog indeksa nosivosti tla posteljice (CBR)	CBR = 6,0%
Regionalni faktor	R = 2,0
Vozna sposobnost površine kolnika (indeks služnosti) na kraju projektnog perioda	$p_t = 2,5$
Ukupan broj prijelaza ekvivalentnih 80 kN osovina	izračunati

Svojstva materijala primijenjenih u pojedinim slojevima kolničke konstrukcije

Asfaltbeton – **AC surf**

Marshallov stabilitet, **SM = 7,2 kN**

Bitumenom stabilizirani nosivi sloj – **AC base**

Marshallov stabilitet, **SM = 6,5 kN**

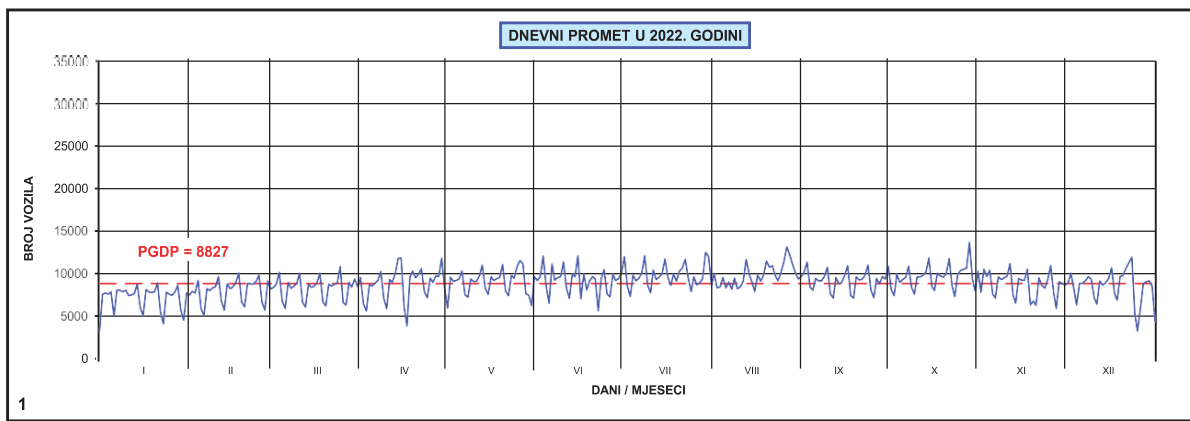
Mehanički stabilizirani nosivi sloj – **MNS**

kalifornijski indeks nosivosti, **CBR = 6%**

8.3. Proračun

1) Kneginec Donji

Budući da je često nedovoljno poznavati samo PGDP i PLDP bez spoznaja o strukturi prometa (slika 22), predočuju se podatci o PGDP-u i PLDP-u po vrstama i skupinama vozila. Uz podatke u apsolutnim iznosima, sustavno su predočeni i postotni udjeli pojedinih vrsta ili skupina vozila.



Slika 22. Dnevni promet u 2022. godini na dionici 1265 - Kneginec Donji [8]

U tablici 3 su po vrstama vozila predočeni podatci o PGDP-u i PLDP-u prikupljeni s brojačkog mjesta neprekidnog automatskog brojenja prometa na toj državnoj cesti.

Tablica 3. Struktura po vrstama vozila za brojačko mjesto 1265 – Knežinec Donji [8]

BROJAČKO MJESTO OZNAKA IME	Oznaka ceste	PGDP 100% PLDP 100%	A1 motocikli	A2 Osobna vozila	A3 Kombi vozila	B1 Manja teretna vozila	B2 Srednja teretna vozila	B3 Teška teretna vozila	B4 Teška teretna + prikolica	B5 Tegljači	C1 Autobusi
1265 Knežinec Donji	528	8827	16	6798	567	155	191	139	173	754	34
		100%	1,19	77,01	6,42	1,76	2,16	1,57	1,96	8,54	0,39
		9771	35	7730	607	149	183	135	160	739	33
		100%	0,36	79,11	6,21	1,53	1,87	1,38	1,64	7,56	0,34

Vrijednosti faktora ekvivalencije (F_e) za reprezentativne vrste vozila prema normi **HRN U.C4.010.** prikazane su u Tablici 4.

Tablica 4. Izračun faktora ekvivalencije reprezentativnih vrsta vozila

VRSTA VOZILA	POZICIJA OSOVINE	TIP OSOVINE	VLASTITA MASA [kN]	KORISTAN TERET [kN]	KORISTAN TERET*70% [kN]	OPTEREĆENJE PO OSOVINI [kN]	f_e	F_e
autobus (A_2)	prednja	jednostruka	33	14	9,8	42,8	0,08	1,368
	stražnja	jednostruka	67	26	18,2	85,2	1,29	
lagano ter. <30 kN (LT_2)	prednja	jednostruka	14	3	2,1	16,1	0	0,011
	stražnja	jednostruka	13	17	11,9	24,9	0,01	
srednje teško ter. 30-70 kN (ST_2)	prednja	jednostruka	29	6	4,2	33,2	0,03	0,205
	stražnja	jednostruka	21	44	30,8	51,8	0,18	
teško ter. >70 kN (TT_2)	prednja	jednostruka	30	20	14	44	0,09	0,906*
	stražnja	jednostruka	20	80	56	76	0,81	
teško ter. >70 kN (TT_3)	prednja	jednostruka	37	25	17,5	54,5	0,22	0,639
	stražnja	dvostruka	37	120	84	121	0,42	
teško ter. + prikolica ($TT_2 + PR_3$)	prednja	jednostruka	30	20	14	44	0,09	1,268*
	stražnja	jednostruka	20	80	56	76	0,81	
	prednja	jednostruka	17	59	41,3	58,3	0,28	
	stražnja	dvostruka	23	81	56,7	79,7	0,08	
teško ter. + prikolica ($TT_3 + PR_2$)	prednja	jednostruka	37	25	17,5	54,5	0,22	1,085
	stražnja	dvostruka	37	120	84	121	0,42	
	prednja	jednostruka	20	50	35	55	0,22	
	stražnja	jednostruka	20	50	35	55	0,22	
tegljač + prikolica ($TTV_3 + PPR_2$)	prednja	jednostruka	40	20	14	54	0,21	1,339
	srednja	dvostruka	70	90	63	133	0,62	
	stražnja	dvostruka	50	110	77	127	0,51	

*Između dvije vrijednosti faktora ekvivalencije za teško teretno vozilo TT_2 i TT_3 te teško teretno vozilo s prikolicom TT_2+PR_3 i TT_3+PR_2 , kao mjerodavan je odabran veći faktor ekvivalencije.

Vrijednost ekvivalentnog prometnog opterećenja u projektom razdoblju od 20 godina proračunata je za prosječan godišnji dnevni promet (PGDP) teretnih vozila za brojačko mjesto **1265 Kneginec Donji** na državnoj cesti D528 (dva prometna traka; dvosmjernan promet).

Tablica 5. Prosječni godišnji dnevni promet teretnih vozila za brojačko mjesto Donji Kneginec [8]

Vrsta vozila	Manja teretna	Srednja teretna	Teška teretna	Teška teretna s prikolicom	Tegljači	Autobusi
PGDP	155	191	139	173	754	34

Proračun ukupnog broja prijelaza ekvivalentnih osovina u projektom periodu prikazan je u Tablici 6. Prilikom proračuna u obzir je uzet prosječan godišnji dnevni broj pojedinih teških teretnih vozila u početnoj godini eksploatacije na najopterećenijem prometnom traku (n_i) i faktor rasta prometa, $q = 25$.

Tablica 6. Proračun ukupnog broja prijelaza ekvivalentnih osovina u projektom razdoblju za brojačko mjesto Donji Kneginec

Vrsta vozila	F_{ei}	** n_i	** T_{di}
Manja teretna	0,011	78	1
Srednja teretna	0,205	96	20
Teška teretna	0,906	70	64
Teška teretna s prikolicom	1,268	87	111
Tegljači	1,339	372	499
Autobusi	1,368	17	24
Prosječno godišnje dnevno ekvivalentno prometno opterećenje, T_a			719
Ekvivalentno prometno opterećenje u početnoj godini uporabe ceste, T_g			262 435
Ekvivalentno prometno opterećenje u projektom razdoblju, T_u			6 560 875
Skupina prometnog opterećenja:			TEŠKO

** n_i , T_{di} – zaokruženo na cijeli veći broj

U skladu s predviđenim prometnim opterećenjem za projektno razdoblje od 20 godina na predmetnoj dionici predviđa se izgradnja nove asfaltne kolničke konstrukcije sljedeće kombinacije slojeva:

Habajući sloj: asfaltbeton

Nosivi slojevi: bitumenom stabilizirani nosiv sloj
mehanički zbijeni nosivi sloj

Prilikom dimenzioniranja kolničke konstrukcije korišteni su sljedeći ulazni parametri:

Kolnička konstrukcija:

TIP 1

Ukupni broj prijelaza ekvivalentnih osovina u projektnom razdoblju:

Tu = 6,56*10⁶

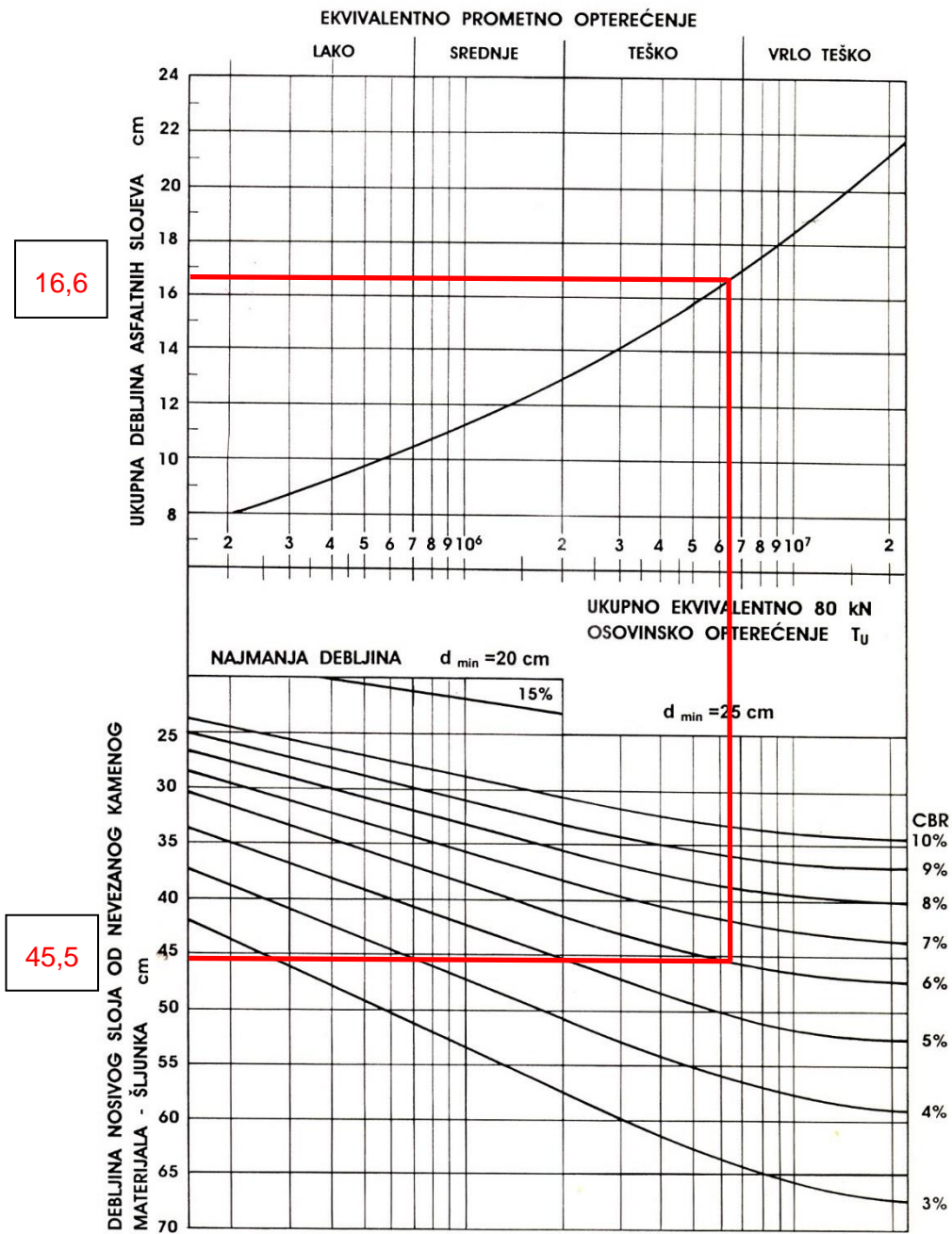
Skupina prometnog opterećenja:

TEŠKO

Klimatsko –hidrološki uvjeti:

KONTINENTALNA KLIMA

Ukupna debljina asfaltnih slojeva te mehanički zbijenog nosivog sloja za usvojene ulazne parametre očitana je iz dijagrama prikazanog na slici 22.



Slika 3.14. Dijagram za dimenzioniranje kolničkih konstrukcija koje se sastoje od asfaltnih slojeva i nosivih slojeva od nevezanih, mehanički zbijenih zrnatih kamenih materijala po HRN- metodi (tip 1)

Slika 23. Dijagram za dimenzioniranje kolničkih konstrukcija od asfaltnih slojeva i mehanički zbijenog zrnatog kamenog materijala

Očitane ukupne debljine slojeva:

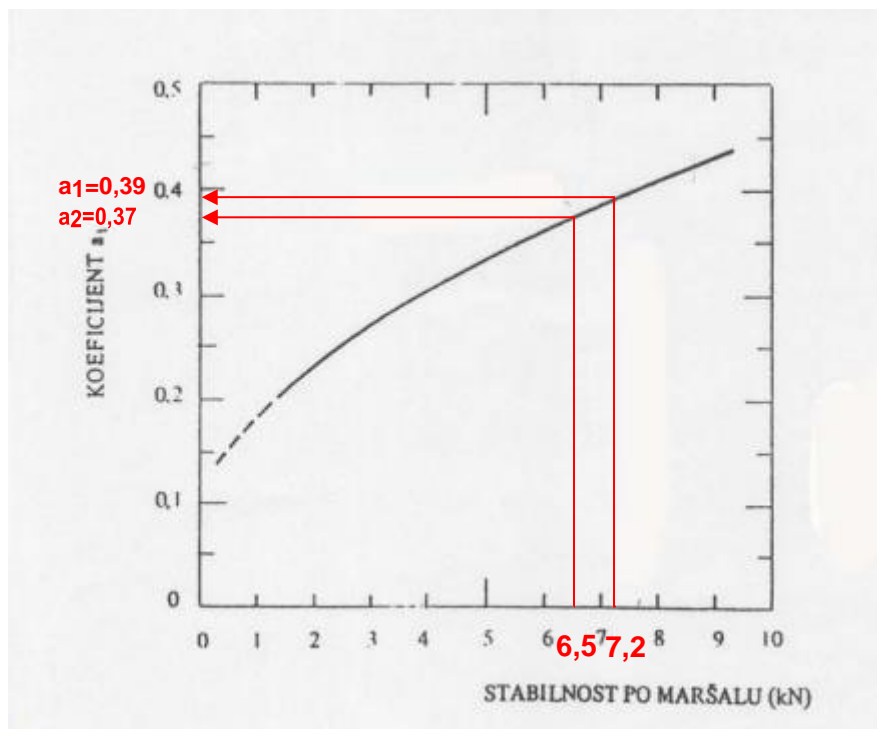
$$d_1 = 16,6 \text{ cm}$$

$$d_2 = 45,5 \text{ cm}$$

Ukupna debljina asfaltnih slojeva, određena iz dijagrama na slici 23, odnosi se na odabranu asfaltnu mješavinu prosječne kvalitete između standardne asfaltbetonske mješavine i mješavine od bitumenizirane kamene sitneži, a za koju koeficijent zamjene iznosi 0,38.

Debljine pojedinih slojeva od odabranih mješavina proračunate su iz ukupne debljine asfaltnih slojeva i vrijednostima koeficijenata zamjene s obzirom na projektnim zadatkom predviđene vrijednosti Mashallovog stabiliteta (slika 24).

Debljina habajućeg sloja je odabrana prema Tablici 2, Dodatka B, Tehničkih uvjeta za asfaltne kolnike, 2015. Pri odabiru debljina habajućeg i nosivog sloja vodilo se računa o najmanjim i najvećim tehnološkim debljinama mogućnosti izvedbe slojeva.



Slika 24. Koeficijenti zamjene za asfaltne slojeve

Temeljem navedenog, za teško prometno opterećenje, kontinentalnu klimu i podlogu od nevezanog materijala, odabrana je debljina habajućeg sloja (AC 11 surf 45/80-65, AG1 M1) :

$d_{\text{Acsurf}} = 4,0 \text{ cm}$.

Debljina bitumenom stabiliziranog nosivog sloja određena je pomoću izraza:

$$d_1 \cdot a_{\text{asfalt}} = d_{\text{Acsurf}} \cdot a_1 + d_{\text{ACbase}} \cdot a_2$$

$$16,6 \cdot 0,38 = 4,0 \cdot 0,39 + d_{\text{ACbase}} \cdot 0,37$$

$d_{\text{ACbase}} = 12,83 \text{ cm}$.

S obzirom na dobivenu vrijednost debljine bitumenom stabiliziranog nosivog sloja, odabrana je asfaltne mješavine AC 32 base 50/70 AG6 M1 i debljina sloja:

$d_{\text{ACbase}} = 13,0 \text{ cm}$.

Debljina mehanički zbijenog nosivog sloja određena je iz dijagrama te zaokružena na prvih većih cijelih 5 cm (slika 22).

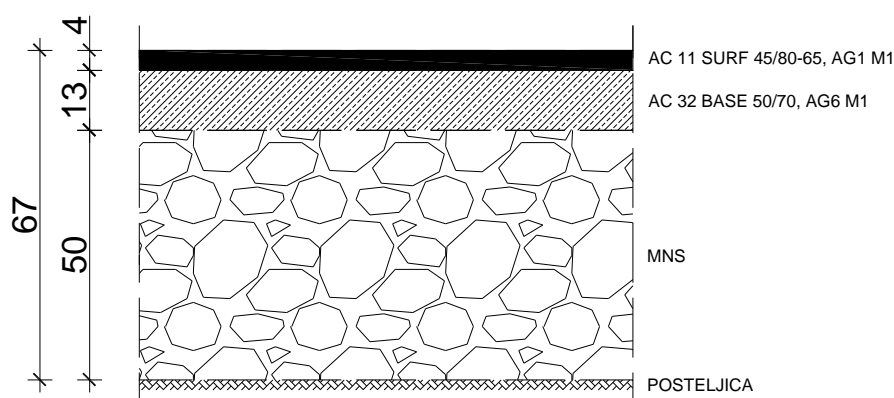
$d_2 = 45,5 \text{ cm}$

$d_{\text{MNS}} = 50 \text{ cm}$.

Imajući u vidu minimalne tehnološke debljine izvedbe sloja od nevezanog zrnatog kamenog materijala propisane normom HRN U.C4.012 usvojena je debljina nevezanog nosivog sloja određena dijagramom.

$\text{mind}_{\text{MNS}} = 25,0 \text{ cm} < 50 \text{ cm}$.

Odabrana kolnička konstrukcija dimenzionirana u skladu s HRN U.C4.012 prikazana je na slici 25.



Slika 25. Odabrana kolnička konstrukcija

Provjera dimenzija prema metodi AASHO Road Testa

Proračun strukturnog broja odabrane kolničke konstrukcije, SN_k

$$SN_k = d_{ACsurf} \cdot a_1 + d_{ACbase} \cdot a_2 + d_{CNS} \cdot a_3 + d_{MNS} \cdot a_4$$

$$SN_k = 4 \cdot 0,39 + 13,0 \cdot 0,37 + 50 \cdot 0,11$$

$$SN_k = 11,87 \text{ cm}$$

Određivanje potrebnog strukturnog broja, SN_p

Ulazni parametri:

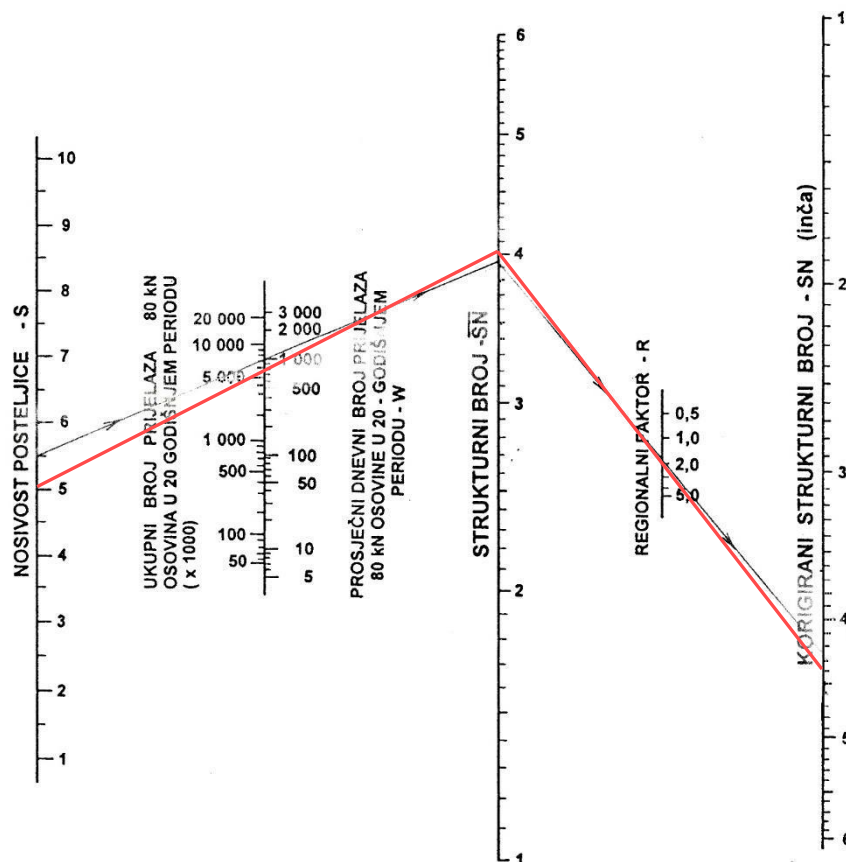
Prometno opterećenje: $T_u = 6,56 \cdot 10^6$

Indeks nosivosti posteljice: $S = 4,308 \log CBR_{posteljice} + 1,673$

$$S = 5,03$$

Konačna vozna sposobnost kolnika: $p_t = 2,5$

Regionalni faktor: $R = 2,0$



Slika 3.8. Nomogram za dimenzioniranje asfaltnih kolničkih konstrukcija prema AASHTO - metodi, za konačnu voznu sposobnost kolnika $p_t = 2,5$

Slika 26. Nomogram za dimenzioniranje asfaltnih kolničkih konstrukcija prema AASHTO – metodi, za konačnu voznu sposobnost kolnika $p_t = 2,5$

Očitano:

$$SN_p = 4,4 \text{ in} = 11,18 \text{ cm}$$

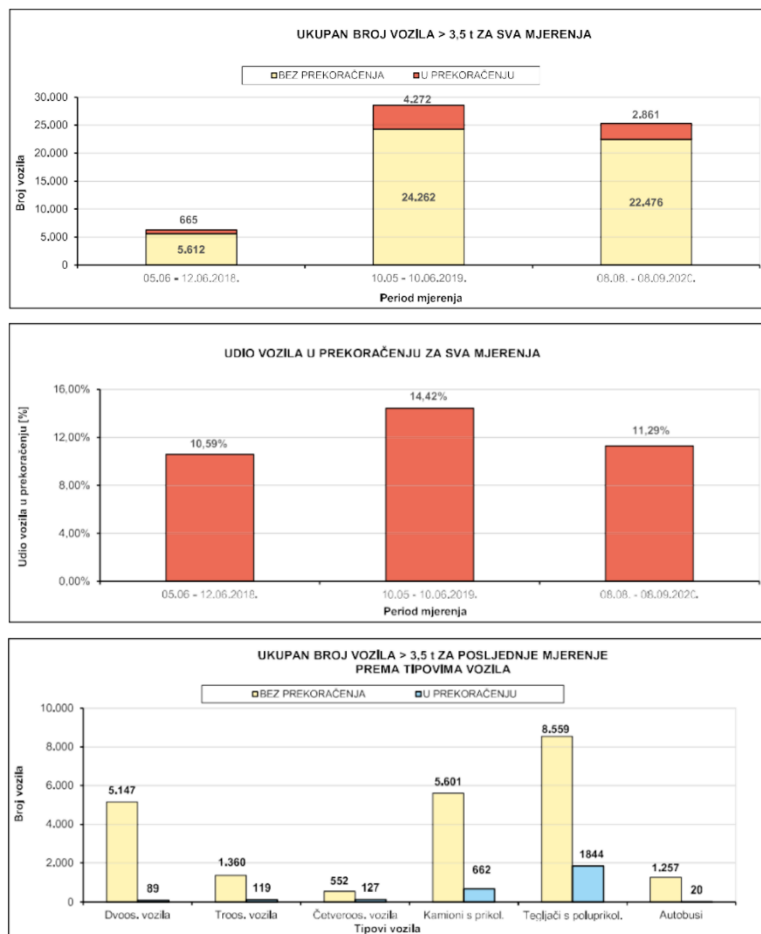
Strukturalni broj kolničke konstrukcije, odabranih debljina i sastava slojeva veći je od potrebnog,

$$SN_k > SN_p \text{ (11,87 cm} > \text{11,18 cm).}$$

Kolnička konstrukcija dimenzionirana prema normi HRN U.C4.012 zadovoljava uvjete provjere prema metodi AASHTO Road Testa.

2) Prolaz za divljač

Na slici 27 prikazani su ulazni podaci navedenog mjernog mjesta.



Slika 27. Podaci o mjernom mjestu SW0161 – Prolaz za divljač [9]

Tablica 7. Prosječni godišnji dnevni promet vozila za brojačko mjesto Prolaz za divljač [9]

Mjerno mjesto SW0161 – Prolaz za divljač	$T_{d(WIM)}$
Smjer 1	463,98
Smjer 2	755,96

Na osnovu podataka iz Tablice 7, prema napatku norme, dimenzioniranje kolničke konstrukcije provodi se za opterećeniji prometni trak te se kao mjerodavno prosječno dnevno prometno opterećenje odabralo prometno opterećenje smjera 2 koje iznosi $T_{d(WIM)} = 755,96$ prijelaza ekvivalentnog 82 kN osovinskog opterećenja.

Navedeni podaci se odnose za 2019. godinu te se procjenjuje prosječna godišnja stopa rasta broja teških teretnih vozila od 1% na godinu (Tablica 8).

Tablica 8. Procjena prosječnog godišnjeg dnevnog prometa vozila za 2022. godinu brojačkog mjesta Prolaz za divljač

2019.	755,96
2020.	763,52
2021.	771,16
2022.	778,87

Proračun ukupnog broja prijelaza ekvivalentnih osovina u projektom periodu prikazan je u Tablici 9. Prilikom proračuna u obzir je uzet prosječan godišnji dnevni broj pojedinih teških teretnih vozila u početnoj godini eksploatacije na najopterećenijem prometnom traku (n_i) i faktor rasta prometa, $q = 25$.

Tablica 9. Proračun ukupnog broja prijelaza ekvivalentnih osovina u projektom razdoblju za brojačko mjesto Varaždin jug

Prosječno godišnje dnevno ekvivalentno prometno opterećenje, T_a	779
Ekvivalentno prometno opterećenje u početnoj godini uporabe ceste, T_g	284 335
Ekvivalentno prometno opterećenje u projektom razdoblju, T_u	7 108 375
Skupina prometnog opterećenja:	VRLO TEŠKO

** n_i , T_{di} – zaokruženo na cijeli veći broj

U skladu s predviđenim prometnim opterećenjem za projektno razdoblje od 20 godina na predmetnoj dionici predviđa se izgradnja nove asfaltne kolničke konstrukcije sljedeće kombinacije slojeva:

Habajući sloj: asfaltbeton

Nosivi slojevi: bitumenom stabilizirani nosiv sloj
mehanički zbijeni nosivi sloj

Prilikom dimenzioniranja kolničke konstrukcije korišteni su sljedeći ulazni parametri:

Kolnička konstrukcija:

TIP 1

Ukupni broj prijelaza ekvivalentnih osovina u projektom razdoblju:

Tu = 7,11*10⁶

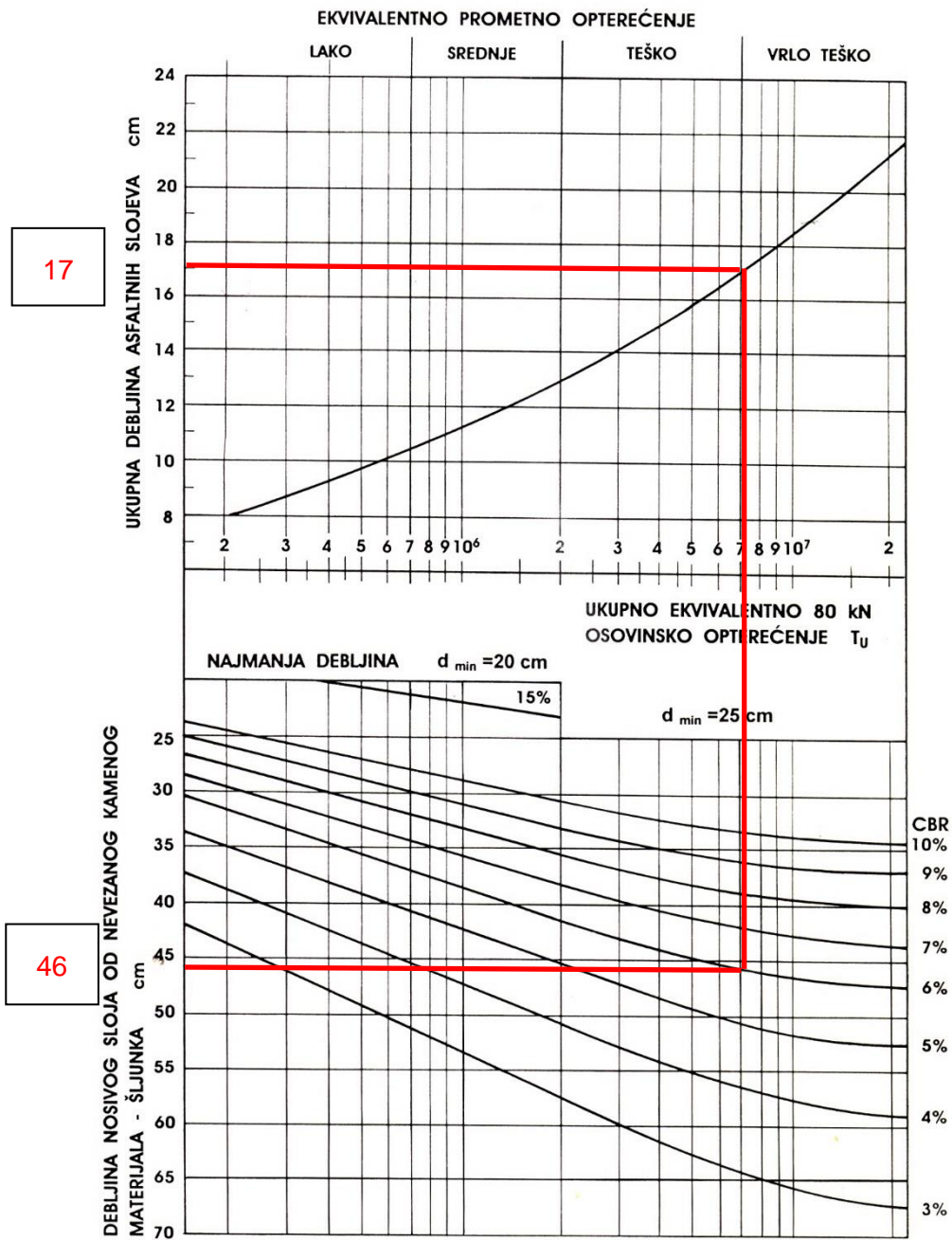
Skupina prometnog opterećenja:

VRLO TEŠKO

Klimatsko –hidrološki uvjeti:

KONTINENTALNA KLIMA

Ukupna debljina asfaltnih slojeva te mehanički zbijenog nosivog sloja za usvojene ulazne parametre očitana je iz dijagrama prikazanog na slici 28.



Slika 3.14. Dijagram za dimenzioniranje kolničkih konstrukcija koje se sastoje od asfaltnih slojeva i nosivih slojeva od nevezanih, mehanički zbijenih zrnatih kamenih materijala po HRN- metodi (tip 1)

Slika 28. Dijagram za dimenzioniranje kolničkih konstrukcija od asfaltnih slojeva i cementom stabiliziranog zrnatog kamenog materijala

Očitane ukupne debljine slojeva:

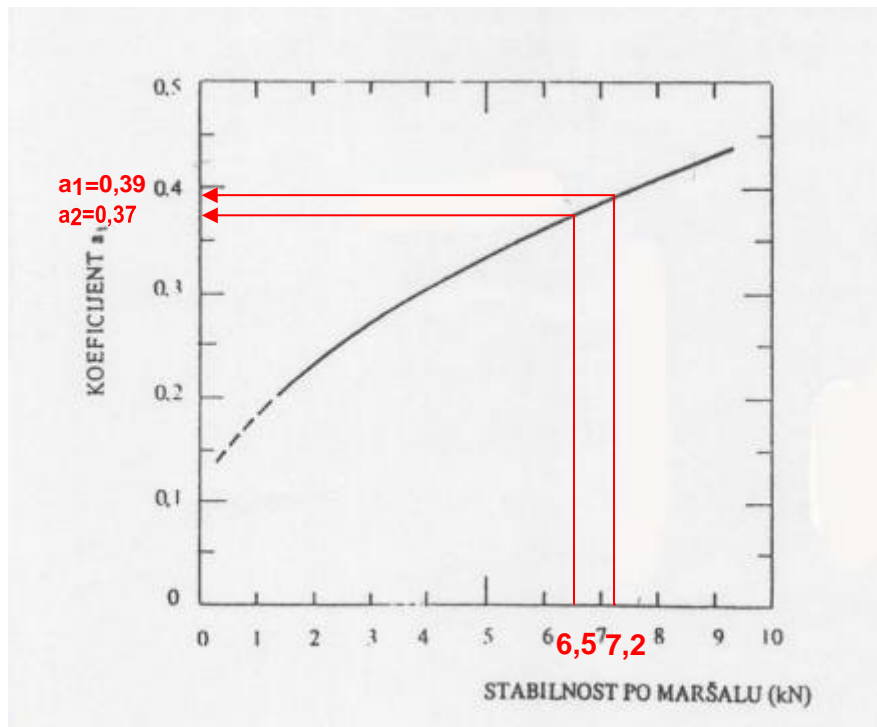
$$d_1 = 17 \text{ cm}$$

$$d_2 = 46 \text{ cm}$$

Ukupna debljina asfaltnih slojeva, određena iz dijagrama na slici 28, odnosi se na odabranu asfaltnu mješavinu prosječne kvalitete između standardne asfaltbetonske mješavine i mješavine od bitumenizirane kamene sitneži, a za koju koeficijent zamjene iznosi 0,38.

Debljine pojedinih slojeva od odabranih mješavina proračunate su iz ukupne debljine asfaltnih slojeva i vrijednostima koeficijenata zamjene s obzirom na projektnim zadatkom predviđene vrijednosti Mashallovog stabiliteta (slika 29).

Debljina habajućeg sloja je odabrana prema Tablici 2, Dodatka B, Tehničkih uvjeta za asfaltne kolnike, 2015. Pri odabiru debljina habajućeg i nosivog sloja vodilo se računa o najmanjim i najvećim tehnološkim debljinama mogućnosti izvedbe slojeva.



Slika 29. Koeficijenti zamjene za asfaltne slojeve

Temeljem navedenog, za teško prometno opterećenje, kontinentalnu klimu i podlogu od nevezanog materijala, odabrana je debljina habajućeg sloja (AC 11 surf 45/80-65, AG1 M1) :

$d_{\text{Acsurf}} = 4,0 \text{ cm}$.

Debljina bitumenom stabiliziranog nosivog sloja određena je pomoću izraza:

$$d_1 \cdot a_{\text{asfalt}} = d_{\text{Acsurf}} \cdot a_1 + d_{\text{ACbase}} \cdot a_2$$

$$17 \cdot 0,38 = 4,0 \cdot 0,39 + d_{\text{ACbase}} \cdot 0,37$$

$d_{\text{ACbase}} = 13,2 \text{ cm}$.

S obzirom na dobivenu vrijednost debljine bitumenom stabiliziranog nosivog sloja, odabrana je asfaltne mješavine AC 32 base 50/70 AG6 M1 i debljina sloja:

$d_{\text{ACbase}} = 13,5 \text{ cm}$.

Debljina mehanički zbijenog nosivog sloja određena je iz dijagrama te zaokružena na prvih većih cijelih 5 cm (slika 28).

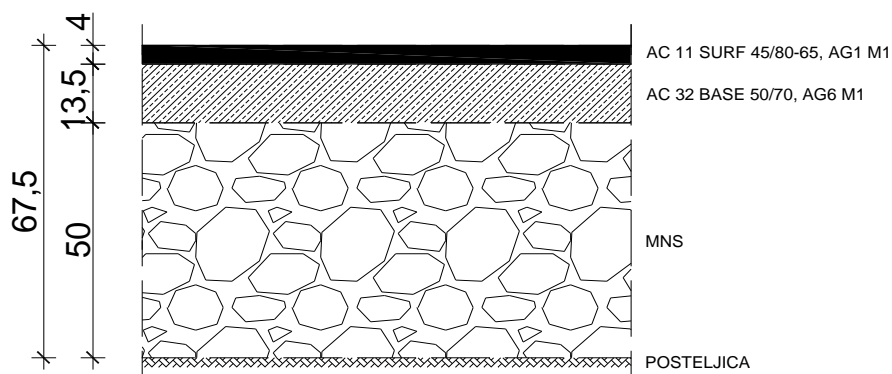
$d_2 = 46 \text{ cm}$

$d_{\text{MNS}} = 50 \text{ cm}$.

Imajući u vidu minimalne tehnološke debljine izvedbe sloja od nevezanog zrnatog kamenog materijala propisane normom HRN U.C4.012 usvojena je debljina nevezanog nosivog sloja određena dijagramom.

$\text{mind}_{\text{MNS}} = 25,0 \text{ cm} < 50 \text{ cm}$.

Odabrana kolnička konstrukcija dimenzionirana u skladu s HRN U.C4.012 prikazana je na slici 30.



Slika 30. Odabrana kolnička konstrukcija

Provjera dimenzija prema metodi AASHO Road Testa

Proračun strukturnog broja odabrane kolničke konstrukcije, SN_k

$$SN_k = d_{ACsurf} \cdot a_1 + d_{ACbase} \cdot a_2 + d_{CNS} \cdot a_3 + d_{MNS} \cdot a_4$$

$$SN_k = 4 \cdot 0,39 + 13,5 \cdot 0,37 + 50 \cdot 0,11$$

$$SN_k = 12,06cm$$

Određivanje potrebnog strukturnog broja, SN_p

Ulazni parametri:

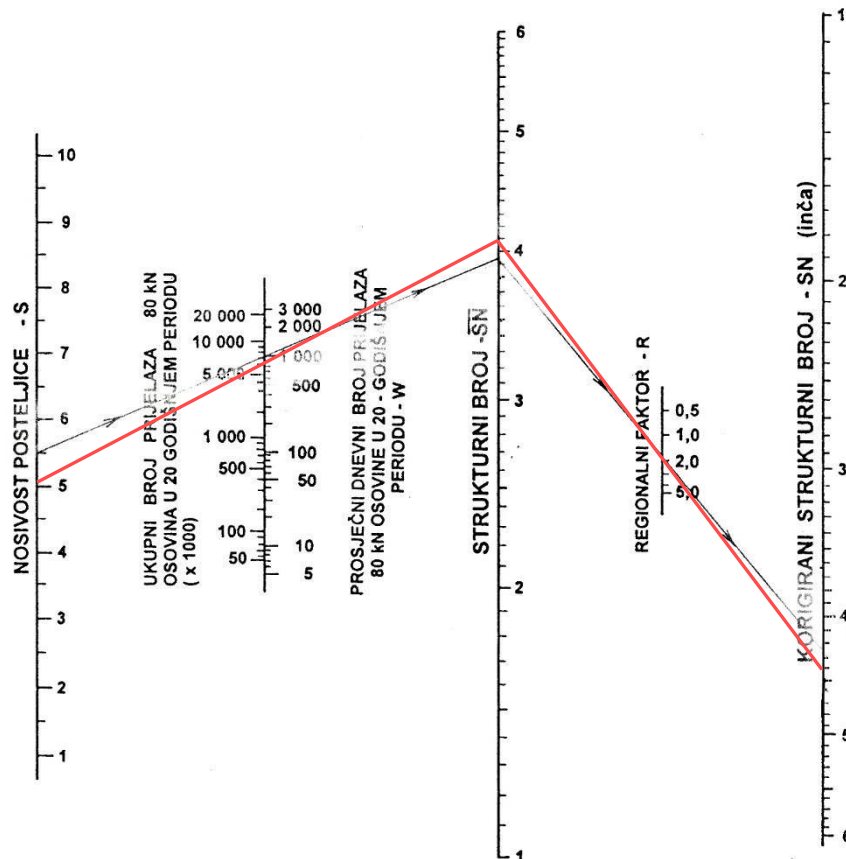
Prometno opterećenje: $T_u = 7,11 \cdot 10^6$

Indeks nosivosti posteljice: $S = 4,308 \log CBR_{posteljice} + 1,673$

$$S = 5,03$$

Konačna vozna sposobnost kolnika: $p_t = 2,5$

Regionalni faktor: $R = 2,0$



Slika 3.8. Nomogram za dimenzioniranje asfaltnih kolničkih konstrukcija prema AASHTO - metodi, za konačnu voznu sposobnost kolnika $p_t = 2,5$

Slika 31. Nomogram za dimenzioniranje asfaltnih kolničkih konstrukcija prema AASHTO – metodi, za konačnu voznu sposobnost kolnika $p_t = 2,5$

Očitano:

$$SN_p = 4,4 \text{ in} = 11,176 \text{ cm}$$

Strukturni broj kolničke konstrukcije, odabranih debljina i sastava slojeva veći je od potrebnog,

$$SN_k > SN_p (12,06 \text{ cm} > 11,176 \text{ cm}).$$

Kolnička konstrukcija dimenzionirana prema normi HRN U.C4.012 zadovoljava uvjete provjere prema metodi AASHTO Road Testa.

8.4. Zaključak proračuna

Kod proračuna kolničke konstrukcije dionice 1265 - Knjeginec Donji prvo su određene debljine pojedinih slojeva od odabranih asfaltnih mješavina. Debljina habajućeg sloja iznosi 4 cm dok je debljina nosivog sloja 13 cm. Zatim je grafički određena debljina mehanički zbijenog nosivog sloja, iz dijagrama danog u HRN U.C4.012. te iznosi 50 cm.

Proračunom kolničke konstrukcije dionice SW0161 – Prolaz za divljač odabrane su debljine pojedinih slojeva od asfaltnih mješavina koje iznose 4 cm za habajući sloj te 13,5 cm za nosivi sloj. Debljina mehanički zbijenog nosivog sloja također je određena grafički, iz dijagrama danog u HRN U.C4.012. te iznosi 50 cm.

Kolničke konstrukcije su dobro dimenzionirane u smislu njihove mehaničke otpornosti i stabilnosti prema djelovanju prometnog opterećenja odnosno imaju dostatnu debljinu slojeva kojom je zajamčena njihova otpornost na djelovanje opterećenja.

9. Zaključak

U ovom radu provedeno je detaljno istraživanje o preopterećenju kamiona i njegovom utjecaju na kolničku konstrukciju i ekonomičnost.

Preopterećena teretna vozila doprinose prijevremenom oštećivanju kolničke konstrukcije cesta, ubrzavajući trošenje površine kolnika kao i pojavu oštećenja u obliku pukotina i kolotraga. Ovakva ubrzana degradacija kolnika može predstavljati prijetnju sigurnosti prometovanja. Općeprihvaćeno je da je stopa kojom cestovno vozilo uništava kolničku konstrukciju proporcionalna četvrtoj potenciji njegove težine. Na ovaj način uzrokuje se manja udobnost putovanja i smanjenje životnog vijeka kolničke konstrukcije cesta, a samim time i povećanje troškova održavanja.

Posljedice preopterećenosti teretnih vozila mogu biti i ekonomske prirode. Naime, korištenje preopterećenih teretnih vozila dovodi do značajnih poremećaja konkurentnosti prijevoza tereta, kako između vrste prijevoza tako i između pojedinih prijevoznika, odnosno operatera cestovnog prijevoza.

Uzimajući u obzir prethodne navode, postaje jasno da je potrebno uvesti zakonsku regulativu koja propisuje učestalost kontrole težine, ali i dimenzije vozila, jer je to vjerojatno jedini način minimizacije broja preopterećenih i/ili vozila neodgovarajućih dimenzija.

Podaci o prometnom opterećenju postaju potpuni tek kada se nadopune podacima o ukupnoj masi i osovinskom opterećenju vozila, posebice osovinskom opterećenju pojedinih vrsta reprezentativnih vozila.

Mjerenjem opterećenja vozila u stvarnom vremenu moguće je dobiti vrijedne informacije za racionalno upravljanje cestovnom infrastrukturom.

U okviru ovog rada, prikazan je postupak proračuna dimenzija nove kolničke konstrukcije na temelju dostupnih rezultata mjerenja provedenih mobilnim sustavom SiWIM za mjerenje ukupne mase i osovinskog opterećenja vozila s utvrđenim prekoračenjima, razvrstanim prema tipovima vozila i učestalosti prekoračenja.

Osnovni cilj dimenzioniranja kolničke konstrukcije sastoji se u odabiru vrste i debljine pojedinih slojeva tako da se osigura zadovoljavajuća razina uporabivosti kolničkog zastora za predviđeni projektni period i planirano prometno opterećenje.

U usporedbi s razvijenim državama broj opterećenih vozila u Republici Hrvatskoj još uvijek je iznad prosjeka.

10. Literatura

- [1] PIARC (World Road Association), Overweight Vehicles: Impact on Road Infrastructure and Safety, 2022
- [2] CEDR report 2017/05 – Conditions for efficient road transport in Europe
- [3] Kulovic, M. (2004). Freight Transport Costs Model Based on Truck Fleet Operational Parameters . Technology and Management of Traffic Review.
- [4] Mohamed Rehan Karim, Ahmad Saifizul Abdullah, Hideo Yamanaka, Airul Sharizli Abdullah, Rahizar Ramli: Degree of Vehicle Overloading and its Implication on Road Safety in Developing Countries
- [5] Ministry of Works, Transport & Communications, Roads Department: Axle Load Surveys, Gaborone, Botswana
- [6] Miftah Musbah: Impact of truck overloading on pavement service life (a case in awash – mille road), Addis Ababa Science and Technology University, March, 2017
- [7] Alfian Saleh, Muthia Anggraini and Roki Hardianto: Analysis of the Impact of Overloading Goods Transportation on the Design Life of Flexible Pavemnet, Universitas Lancang Kuning, Pekanbaru, Indonesia, February 2023
- [8] Hrvatske ceste d.o.o.: Brojenje prometa na cestama Republike Hrvatske godine 2022, Zagreb, 2023
- [9] Hrvatske ceste d.o.o.: Mjerenje osovinskih opterećenja i ukupne mase vozila u prometu na cestama Republike Hrvatske, Zagreb, 2023
- [10] Babić, Branimir: Projektiranje kolničkih konstrukcija, Zagreb: Hrvatski savez građevinskih inženjera (HSGI), 1997.

Zahvale

Osobito se zahvaljujem svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Tatjani Rukavini na stručnoj pomoći, strpljenju te korisnim savjetima koji su me vodili tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima na podršci tijekom studiranja.

Zahvaljujem se gradu Zagrebu na dobrom studentskom životu.

Borna Fable