

Primljen / Received: 11.11.2024.

Ispravljen / Corrected: 16.3.2025.

Prihvaćen / Accepted: 28.3.2025.

Dostupno online / Available online: 10.5.2025.

Ocjena stanja nosivosti kolničke konstrukcije državne ceste

Autori:



Karolina Vukelić, mag.ing.aedif.

Hidroregulacija d.o.o., Bjelovar, Hrvatska
kvukelic@hidroregulacija.hr

Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Miroslav Šimun**, dipl.ing.građ.

Tehničko veleučilište u Zagrebu
Graditeljski odjel
msimun@tvz.hr



Prof.dr.sc. **Sanja Dimter**, dipl.ing.građ.

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek
sdimter@gfos.hr



Dr.sc. **Dean Čizmar**, dipl.ing.građ.

Tehničko veleučilište u Zagrebu
Graditeljski odjel
dcizmar@tvz.hr

Pregledni rad

Karolina Vukelić, Miroslav Šimun, Sanja Dimter, Dean Čizmar

Ocjena stanja nosivosti kolničke konstrukcije državne ceste

Za sustav gospodarenja suvremenim kolnicima neophodni su podaci o stanju nosivosti kolnika koji se odnose na njegovo stanje tijekom eksploatacije i na kraju projektnog perioda. Nakon isteka projektnog razdoblja od 20 godina potrebno je donijeti odluku o rekonstrukciji ili ojačanju kolničke konstrukcije na temelju parametara o stanju nosivosti kolnika. Na primjeru dionice državne ceste D28, sjeverne bjelovarske obilaznice koja je izgrađena i puštena u promet 2002., uspoređeni su podaci projektiranih debljina slojeva kolničke konstrukcije i onih koji su nakon 20 godina eksploatacije utvrđeni na uzorcima iz sondažnih jama. Analizirani su rezultati defleksije izmjereni uređajem s padajućim teretom (FWD) na poddionicama kolnika koje su vizualnim pregledom utvrđene kao najkritičnije. Na temelju rezultata proračunanog modula elastičnosti kolnička konstrukcija dimenzionirana je izvođenjem dodatnoga nosivog sloja od hladno reciklirane mješavine s upjenjenim bitumenom. Na primjeru državne ceste D28 istaknuta je važnost pravodobnog poduzimanja odgovarajućih mjera održavanja te su opisane uočene posljedice kašnjenja u ojačanju kolničke konstrukcije jer je prošao projektni period od 20 godina.

Ključne riječi:

sustav gospodarenja kolnicima, ojačanje asfaltnoga kolnika, debljina slojeva kolničke konstrukcije, defleksija, modul elastičnosti

Subject review

Karolina Vukelić, Miroslav Šimun, Sanja Dimter, Dean Čizmar

Assessment of the load-bearing capacity of the state road pavement structure

For the management system of modern pavements, data on the condition of the bearing capacity of the pavement, which refer to its condition during exploitation and at the end of the project period, are necessary. After the end of the project period of 20 years, it is necessary to plan reconstruction or strengthening of the pavement structure based on the parameters of the bearing capacity of the pavement. The data of the projected pavement layer thickness structures and those determined after 20 years of exploitation on samples from boreholes were compared. An example is the section of the state road D28, the northern bypass of Bjelovar, which was built and put into traffic in 2002. The deflection results of the measured falling weight deflectometer (FWD) on the subsections of the pavement, which were determined to be the most critical by visual inspection, were analysed. Based on the results of the calculated modulus of elasticity, the pavement structure was dimensioned by performing an additional cold recycled base layer with foamed bitumen. The importance of the pavement management procedure was emphasized on the example of the state road, as well as the delay in strengthening the pavement structure because the project period of 20 years has passed.

Key words:

pavement management system, asphalt pavement reinforcement, pavement structure layer thickness, deflection, modulus of elasticity

1. Uvod

Sustav gospodarenja kolnicima jest sustav koji uključuje prepoznavanje optimalnih strategija na pojedinim razinama gospodarenja u održavanju kolnika na odgovarajućoj razini služnosti, a što uključuje sustavne aktivnosti održavanja i sanacije zasnovane na optimiranju koristi i troškova [1].

Kako bi kolnik tijekom svojega projektnog vijeka zadržao odgovarajuću nosivost te površinska svojstva koja omogućuju ponajprije sigurnu i udobnu vožnju, potrebno je redovito provoditi jednostavnije ili složenije mjere održavanja kolnika.

Životni vijek kolnika može se produljiti ako se pravodobno, prije nastanka većih oštećenja, kolnik održava sustavno [2]. Što se kolnik više približava kraju svojega projektnog vijeka, to je veća mogućnost da će se uslijed djelovanja prometnog opterećenja i klimatskih utjecaja okoline pojaviti znatnija oštećenja na njegovoj površini. Oštećenja na površini kolnika mogu imati različite uzroke, a oni se moraju pouzdano odrediti prije poduzimanja bilo kakvih popravaka. Vidljivo površinsko iskazivanje problema ne mora automatski usmjeriti na ispravno rješenje. Drugim riječima, ako se želi postići to da sanacija vozne površine bude uspješna, potrebno je analizirati ponašanje i utvrditi moguće uzroke takvog ponašanja kolnika te pronaći pravi uzrok nastalog problema. Ispravno uočavanje oštećenja kolnika i određivanje uzroka oštećenja od ključne su važnosti za odabir odgovarajućih mjera i strategija održavanja. Osim toga važno je znati da različiti tipovi kolnika ne propadaju jednakom brzinom. Na propadanje kolnika utječu različiti čimbenici poput prometnog opterećenja, vremenskih prilika, materijala i debljine slojeva kolničke konstrukcije, ali i kvaliteta izvođenja i učinkovitost prethodnih mjera održavanja. Može se reći da brzina propadanja kolnika raste usporedno s intenzitetom njegove uporabe te sa starošću kolnika [3], a posebno je važno prepoznati i definirati pravo vrijeme za poduzimanje odgovarajućih mjera održavanja. Sve aktivnosti održavanja kolnika potrebno je provoditi planski i sustavno kako bi sigurnost i udobnost vožnje bili na zadovoljavajućoj razini.

Važno je pratiti i poznavati stanje kolnika, kako strukturalno tako i funkcionalno, od trenutka puštanja ceste u promet pa do trenutka u kojemu se kolnik razmatra. Dok funkcionalna ocjena stanja daje informacije o površinskim svojstvima koja izravno utječu na sigurnost i udobnost korisnika ili uporabivost, strukturalna ocjena stanja daje informacije o tome ponaša li se kolnička konstrukcija zadovoljavajuće pod djelovanjem prometa i okolišnih uvjeta. Podatke o stanju kolnika može se prikupiti različitim načinima: vizualnim pregledom stanja kolnika te nerazornim ili razornim ispitivanjima. Vizualni pregled može se provesti na više načina, od onog koji se obavlja pješice do suvremenih automatiziranih načina prikupljanja podataka [4], a iznimno je važno odabrati postupak vizualne klasifikacije stanja kolnika koji je objektivan i ponovljiv. Nerazorna ispitivanja uključuju metode ocjene stanja kolnika kojima se ni na koji način ne oštećuje kolnik i zato su popularnije od razornih metoda koje se primjenjuju za ocjenu stanja kolnika poput vađenja jezgri,

bušenja i iskopa sondažnih jama. O nerazornim metodama ispitivanja kolničke konstrukcije, njihovim posebnostima i mogućnostima usporedne primjene više nerazornih metoda u cilju međusobnog nadopunjavanja odnosno dobivanja potpunije slike nosivosti kolničke konstrukcije izvještavali su brojni autori [5-18].

Važan pokazatelj strukturalne nosivosti kolnika jest defleksija koja predstavlja elastičnu deformaciju kolničke konstrukcije. Veličinu defleksije moguće je utvrditi teorijski, primjenom zakonitosti teorije elastičnosti i poznavanjem svojstava materijala kolničke konstrukcije, ili empirijski, mjerenjem elastične deformacije generirane poznatim statičkim ili dinamičkim opterećenjem na površini kolnika. Defleksiju je moguće određivati različitim uređajima, no u tu se svrhu najčešće upotrebljava uređaj s padajućim teretom (FWD uređaj). Dinamičkim se opterećenjem simuliraju veličina i trajanje opterećenja koje se prenosi preko kotača vozila pomoću serije geofona, odnosno senzora za mjerenje defleksije. Mjeri se odgovor kolnika u obliku vertikalne deformacije ili defleksije na različitim udaljenostima od mjesta predaje impulsnog opterećenja [4]. Na temelju utvrđenih deformacija mogu se izračunati moduli elastičnosti pojedinih slojeva kolničke konstrukcije odnosno donositi zaključci o životnome vijeku kolničke konstrukcije [5-7].

Procedura ispitivanja uređajem s padajućim teretom uspostavljena je godinama i navedena u nacionalnim propisima. Međutim, primijenjene metode evaluacije mogu se razlikovati od zemlje do zemlje [7-14]. Njemački propisi (AP Trag) pružaju dvije mogućnosti za analizu rezultata mjerenja uređajem s padajućim teretom: metodom procjene temeljene na geometriji i mehanicističkim pristupom poznatim kao Darmstadt FWD metoda procjene [7]. Kako ističu autori Čičković i Bald [8], tom metodom moguće je predvidjeti i kvalitetu veze između različitih asfaltnih slojeva.

Istraživači Qian i drugi [9] koristili su uređaj s padajućim teretom kao usporednu metodu pri određivanju nosivosti asfaltnih kolničkih konstrukcija različitih sastava na pokusnoj dionici. U svaki od slojeva kolničke konstrukcije bili su ugrađeni senzori za mjerenje temperature. Uspoređivali su vrijednosti dinamičkih modula dobivenih u laboratoriju i dinamičkih modula dobivenih mjerenjem defleksija na pokusnoj dionici te utvrdili kako se taj odnos dinamičkih modula za različite asfaltnje kolnike kreće od 0,7 do 0,9. Kako je opisano u studiji [10], za prikupljanje podataka o nosivosti autoceste u Japanu koristio se FWD uređaj s padajućim teretom. Prikupljene podatke upravitelj autoceste pohranjuje digitalno i statistički kontinuirano te na temelju njih izrađuje modele ponašanja i prognoze pogoršanja nosivosti kolnika autoceste. Ta studija također obrađuje statistički procijenjeni preostali životni vijek kolničke konstrukcije, razmatra različite tipove kolnika i evidentirane popravke, a koje potom koristi pri donošenju odluke o izradi projekata popravka i obnove.

Autori Karbočius i Vaitkus [11] u svojem su radu opisali istraživanje provedeno uređajem s padajućim teretom (FWD) na cestama s malim volumenom kolnika u Litvi. Odabrano

je devet cestovnih dionica s malim opsegom prometa i s tipičnim strukturama asfaltnih kolničkih konstrukcija kako bi se demonstrirala učinkovitost metodologije procjene stanja konstrukcije koja se koristi u Litvi. Izabrane dionice su s obzirom na stanje kolnika bile podijeljene u tri skupine: dionice u dobrom stanju, dionice u zadovoljavajućem stanju i dionice s uznapredovalim stupnjem oštećenja kolnika (mrežaste pukotine, kolotrazi). Analiza je pokazala primjenjivost te metodologije na cestama s malim opsegom prometa, no i disperziju rezultata. Zaključno su autori istaknuli kako bi trebalo obuhvatiti veći broj reprezentativnih cestovnih dionica izvedenih različitim materijalima te detaljno odrediti stvarne debljine slojeva kolničke konstrukcije primjenom georadara i razornih ispitivanja. O rezultatima usporedne primjene dviju nerazornih metoda uređaja s padajućim teretom (FWD) i georadara (GPR) pri procjeni nosivosti asfaltnoga kolnika autoceste izvijestili su autori Marecos i drugi [12]. Strukturni modeli uspostavljeni su na temelju defleksije dobivene ispitivanjem uređajem s padajućim teretom FWD-a i korištenjem projektirane debljine slojeva i debljine slojeva izmjerene georadarom. Moduli elastičnosti slojeva određeni su na temelju defleksija postupkom proračuna unatrag. Rezultati su pokazali da je varijabilnost debljina slojeva bila velika i zato je glavni fokus bio na osjetljivosti vrijednosti modula elastičnosti na debljine slojeva. Zaključeno je da debljina veznih slojeva asfalta ima velik utjecaj na procijenjene module elastičnosti asfaltnih slojeva. Istaknuta je važnost korištenja georadara (GPR) za kontinuiranu procjenu debljine sloja zajedno s uređajem s padajućim teretom (FWD) za točnu strukturalnu procjenu postojećih kolnika. Slično istraživanje primjenom dviju istih nerazornih metoda, GPR-a i FWD-a, na trima cestama u Novom Meksiku proveli su Ahmed i Tarefder [13]. Uočeno je da je debljina asfaltnog sloja određena georadarom (GPR) konzistentnija od debljine nosivog sloja kolničke konstrukcije. FWD test proveden je na istim lokacijama, a poput GPR-a rezultati naknadno izračunanih modula elastičnosti pokazali su nedosljednosti u različitim slojevima kolničke konstrukcije. Debljine slojeva i moduli elastičnosti poslužili su kao ulazni parametri u računalnome programu za određivanje oštećenja povezanih s prometnim opterećenjem poput reflektivnih pukotina i kolotraga. Autori su preporučili implementaciju te metodologije koja uključuje GPR i FWD metode za procjenu kvalitete kolnika na razini projekta i na razini mreže. Metode GPR i FWD ne primjenjuju se isključivo za procjenu nosivosti u asfaltnim kolnicima kako je to opisano do sada, već i u betonskim kolnicima. Tako su procjenu stanja konstrukcije i analizu naprezanja od zamora cementnoga betonskog kolnika primjenom georadara (GPR) i uređaja s padajućim teretom (FWD) opisali autori Zhao i drugi [15].

Autori Liu i drugi [16] opisuju analizu deformacije kolnika kako bi se izračunale ključne vrijednosti mehaničkog indeksa pod različitim radnim uvjetima i prognozirao vijek trajanja asfalta i nosivih slojeva do zamora. Zatim, uporabom georadara koji prodire kroz kolničku konstrukciju (GPR) kvantitativno je definiran indeks stanja strukture kolnika. Rezultati istraživanja potvrdili

su da postoji dobra korelacija između indeksa unutarnjeg stanja kolnika (IPCI) i preostalog životnog vijek kolničke konstrukcije. Bez obzira na primijenjenu metodu ili uređaj za utvrđivanje stanja kolnika svi autori ističu važnost potpunih i relevantnih podataka nosivosti koji jamče razumijevanje stanja kolničke konstrukcije te izbor pravilnog rješenja za ojačanje konstrukcije. U ovome radu analizirano je stanje kolnika sjeverne obilaznice grada Bjelovara, dionice državne ceste D28 Predavac – Letićani, duge 8,6 kilometara. To je dionica kojom se obilazi središte grada Bjelovara te je u širem smislu dio cestovne rute od Zagreba do Osijeka. Puštena je u promet 2002. U trenutku terenskih istražnih radova i ispitivanja defleksija projektirani životni vijek od 20 godina bio je na samome kraju te su provedena mjerenja i ispitivanja za procjenu stanja, odnosno za prijedlog ojačanja ili rekonstrukciju kolničke konstrukcije. Iako je glavni projekt sanacije kolnika izrađen 2020., zbog financijskih aspekata početak izvođenja očekuje se najranije u 2025. S obzirom na važnost podataka na temelju kojih se utvrđuje funkcionalno i strukturalno stanje kolnika, u nastavku rada ukratko su opisani načini prikupljanja podataka te posebno nerazorna metoda primjenom uređaja s padajućim teretom (FWD) koja je primijenjena pri analiziranju stanja kolnika sjeverne obilaznice grada Bjelovara.

2. Prikupljanje podataka za ocjenu stanja kolnika

Strukturalno ocjenjivanje stanja kolnika primjenjuje se za utvrđivanje sposobnosti kolničke konstrukcije za prihvrat i prijenos prometnog opterećenja, a zahtijeva detaljne podatke o debljinama slojeva kolničke konstrukcije, svojstvima ugrađenih materijala, stanju podloge i prometnome opterećenju. Pri donošenju odluke o prikupljanju podataka o cestovnim kolnicima potrebno je prikupljati točno određene podatke, i to s visokom razinom detalja dovoljnom za donošenje odgovarajuće odluke [19]. Postoji nekoliko razloga za strukturalnu procjenu stanja kolnika kao i više metoda za navedenu procjenu. Kada se želi odrediti zahtjev za strukturalni kapacitet kolnika, tada prvo treba pratiti i izmjeriti karakteristike vozne površine. To uključuje analizu dobivenih rezultata, bilo da se radi o teorijskoj bilo o empirijskoj analizi, kako bi se mogli ocijeniti nosivost kolničke konstrukcije i životni vijek kolnika pri očekivanim prometnim uvjetima [20].

Integracija baze podataka o kolniku s drugim elementima cestovnog sustava olakšana je upotrebom široko rasprostranjene tehnologije referenciranja i relacijske baze podataka kao što je to geografski informacijski sustav (GIS). S obzirom na prostornu komponentu podataka o cestovnoj infrastrukturi, GIS se nameće kao idealno rješenje za vođenje baza podataka o cestama, kao podloga za donošenje odluka i upravljanje kolnicima [21]. Podatke o stanju kolnika moguće je prikupljati vizualnim pregledom i/ili mjernom opremom ili pak automatizirano, posebno opremljenim vozilima. Pri vizualnome prikupljanju podataka obično se koriste tzv. katalozi oštećenja kolnika kako bi se oštećenja mogla pravilno klasificirati i kako

bi postupak utvrđivanja stanja kolnika u svim okolnostima bio ujednačen [22]. Podaci koje je potrebno poznavati jesu:

- podaci o prometu: prometno opterećenje izmjereno za ceste višeg ranga, odnosno tipski pretpostavljeno za ceste nižeg ranga, ako ne postoje točni podaci (brojač osovina)
- godina izgradnje odnosno veće rekonstrukcije
- broj, vrsta i širina prometnih trakova
- struktura kolničke konstrukcije (vrste i debljine slojeva).

Jedan od važnijih elemenata utvrđivanja prometnog opterećenja jest brojenje prometa na cestovnome pravcu. Iz podataka o broju vozila određenih kategorija u neke proteklom nizu moguće je odrediti trend njihova kretanja za razdoblje u kojemu se predviđa uporaba ceste nakon njezine rekonstrukcije odnosno izgradnje (projektno razdoblje) [23].

Dok su podaci o voznoj površini kolnika relativno lako dostupni, podaci o sastavu, nosivosti i debljini slojeva kolničke konstrukcije znatno su zahtjevniji za prikupljanje. Njih je moguće prikupljati raznim i neraznim metodama [24].

2.1. Vizualni pregled

Vizualnim pregledom ceste uočavaju se različita oštećenja i deformacije, koji se bilježe u katalog oštećenja te saniraju ovisno o intenzitetu oštećenja. Vizualni pregled jednostavna je metoda pregleda kolnika koja zahtijeva pedantno i sustavno prikupljanje podataka o stanju kolnika. Potrebno je prepoznati uzrok zapaženog oštećenja te moguće rješenje. Nedostatak te metode jest subjektivnost osobe koja obavlja vizualni pregled kolnika [25]. Tipična oštećenja kolničke konstrukcije primarno se odnose na pukotine, deformacije i površinska oštećenja. Svaka vrsta oštećenja očituje se na površini kolnika na razne načine. Pukotine na kolniku uobičajen su problem koji se pojavljuje pri eksploataciji ceste. Ovisno o smjeru i uzrocima nastanka pukotina dijele se na uzdužne pukotine, poprečne pukotine, umrežene pukotine i pukotine koje dijele sloj na velike blokove [26].

2.2. Metode ispitivanja stanja kolnika

Metode ispitivanja stanja kolnika klasificiraju se kao razorne i nerazorne. Za kolnike je razorna metoda ispitivanja ona koja obuhvaća vađenje jezgri iz kolnika, otvaranje sondažnih jama te uzorkovanje i laboratorijsko ispitivanje materijala za kompletno ispitivanje pojedinog sloja. Mnoge učinkovite tehnike ispitivanja stanja kolnika uključuju mjerenje defleksija u kombinaciji s bušenjem malih jezgri ($\varnothing$ 100 mm) kako bi se dobile debljine i uzorci materijala za osnovna laboratorijska ispitivanja. One se promatraju kao nerazorne metode ispitivanja jer se ne događaju veća fizička oštećenja kolnika [20], ali to je točnije kombinirana metoda.

2.2.1. Razorne metode ispitivanja kolnika

Iako se stanje kolnika može procijeniti mjerenjem površinskih nepravilnosti ili nedostataka, povremeno treba ukloniti dijelove

kolničke konstrukcije kako bi se utvrdilo gdje se pojavljuju problemi i zašto.

Izraz „razorne metode“ primjenjuje se na metode ispitivanja jer je izvorna struktura kompletnoga kolnika narušena s obzirom na buduća ispitivanja na tome određenome mjestu. Uglavnom su takvi postupci ocjenjivanja ograničeni na kolnike koji pokazuju površinske nepravilnosti. Tehnike koje se primjenjuje pri toj metodi ovise o podacima koje se želi dobiti, ali uglavnom uključuju rezanje pojedinog sloja kolnika i uzimanje uzorka sloja za laboratorijsko ispitivanje. Stvarni presjek svakog sloja savitljive kolničke konstrukcije može se analizirati kako bi se odredilo ponašanje sloja i funkcioniranje sustava u cjelini [20]. Raznim se metodama iz kolničke konstrukcije vade jezgre ili kopaju sondažne jame te se utvrđuju sastav i debljina slojeva. Nedostatak je tih metoda to što su točkaste, a samim time i približne [24].

2.2.2. Nerazorne metode ispitivanja stanja kolnika - deflektometar s padajućim teretom (FWD)

Kako ističu autori [6], procjena strukturalnoga kapaciteta kolnika izazov je za svakog inženjera. Mjerenja se provode bitno različitim uređajima, od onih tipa grede do uređaja s padajućim teretom, ali bez obzira na upotrijebljenu vrstu uređaja odnosno mjernu metodu strukturalna svojstva kolnika određuju se neizravno mjerenjem defleksije kolnika.

Kako je već istaknuto u tekstu, nerazorna ispitivanja uključuju metode ocjene stanja kolnika kojima se ni na koji način ne oštećuje kolnik i zato su popularnije od razornih metoda.

Rezultati defleksije mogu se koristiti za proračun strukturalnog indeksa nosivosti koji je integriran u sustav gospodarenja kolnicima, za predviđanje preostalog životnog vijeka kolnika te potrebe za ojačanjima kolnika ili sanacijom [27]. Tehnike mjerenja defleksije općepoznata su metoda mjerenja koja se primjenjuje za ocjenu nosivosti kolnika. Imaju prednost u odnosu na razorne metode zbog niže cijene, kraćeg prekida prometa, manjeg oštećivanja kolnika i mogućnosti provođenja dovoljnog broja mjerenja za kvantificiranje varijabilnosti. Općeprihvaćeno je načelo da je nosivost kolničke konstrukcije obrnuto proporcionalna defleksiji - deformaciji površine kolnika pod djelovanjem određenog opterećenja. Kod ispravno projektirane i izvedene konstrukcije defleksija nije velika i ima gotovo elastičan karakter, odnosno po rasterećenju progibna površina vraća se praktički u nedeformirani oblik. Kod slabih, dotrajalih kolnika defleksija pod opterećenjem znatno je veća, a po rasterećenju vraća se samo dio deformacije (elastična defleksija), dok dio deformacije ostaje (plastična defleksija) [28]. Deflektometar s padajućim teretom (FWD) jedan je od popularnih uređaja za utvrđivanje i razumijevanje strukturalnog ponašanja kolnika. Mjerenje defleksije kolnika tim uređajem nije cilj sam za sebe, nego jedna od dostupnih metoda za procjenu stanja kolnika. Rezultati trebaju biti interpretirani tako da se mogu koristiti za ocjenu stanja kolnika. Izmjerene defleksije mogu se koristiti za određivanje modula elastičnosti različitih slojeva kolnika:

asfaltnih slojeva, nosivih slojeva stabiliziranih vezivom, nosivih slojeva od nevezanih materijala te posteljice [29].

Ispitivanje se temelji na principu dinamičkog opterećenja i mjerenja defleksija kolnika, bilo da se radi o krutim kolničkim konstrukcijama bilo o onim savitljivima. Opterećenje se primjenjuje na površinu kolnika koristeći padajući teret, a rezultati defleksije dobiju se pomoću senzora koji su postavljeni na određenoj udaljenosti. Tako dobiveni rezultati defleksije primjenjuju se za izračun krutosti kolnika te ostala strukturalna svojstva kao što je modul elastičnosti slojeva kolnika. Primjenjujući rezultate defleksije ispitane uređajem s padajućim teretom potrebno je proračunati modul elastičnosti odgovarajućom metodom kako bi se odredila krutost postojećih slojeva [30].

Više je čimbenika koji utječu na veličinu izmjerenih defleksija te je samim time interpretacija rezultata otežana. Glavni čimbenici koji utječu na defleksije mogu se grupirati u sljedeće kategorije: debljina kolnika, opterećenje kolnika (veličina i vrsta) i klima (temperatura i sezonski utjecaji) [31].

Iz krivulje defleksija određuju se parametri koji služe kao smjernice za procjenu strukturalnog stanja pojedinih slojeva kolničke konstrukcije. Uporaba parametara jednostavna je i ne zahtijeva veću količinu ulaznih podataka, što omogućuje učinkovito i brzo donošenje ocjene stanja kolnika kao smjernice za daljnju procjenu čvrstoće pojedinih slojeva. Najčešće se primjenjuju sljedeći parametri:

- SCI (engl. *Surface curvature index*) koji predstavlja razliku između središnje defleksije i defleksije mjerene na udaljenosti od 30 cm (d30) od centralnog opterećenja. Navedeni parametar definira stanje kvalitete površinskih asfaltnih slojeva.
- BDI (engl. *Base damage index*) koji predstavlja razliku defleksije mjerene na udaljenosti od 30 cm (d30) i defleksije mjerene na udaljenosti od 60 cm (d60) od centralnog opterećenja. Navedeni parametar definira stanje donjih nosivih slojeva kolnika.
- BCI (engl. *Base curvature index*) koji predstavlja razliku defleksije mjerene na udaljenosti od 60 cm (d60) i defleksije mjerene na udaljenosti od 90 cm (d90) od centralnog opterećenja. Navedeni parametar definira stanje podloge kolničke konstrukcije.

Indeks d0 predstavlja nultu defleksiju, odnosno defleksiju izmjerenu ispod centralnog opterećenja [32]. Preporučuje se promatrati vrijednost indeksa BDI kako bi se reflektivne pukotine razlikovale od onih temperaturnih [33].

U višeslojnom elastičnom modelu kolnička konstrukcija smatra se linearno elastičnom, u kojoj su materijali karakterizirani Youngovim modulom elastičnosti (E) i Poissonovim koeficijentom (ν). Pretpostavlja se da su materijali homogeni i izotropni, a da slojevi imaju horizontalno beskonačne dimenzije. Slično kao i kod tehnike konačnih elemenata, izlazni rezultati ovise o točnosti rezultata koji su uneseni kao ulazni. Podaci koji su potrebni za izračun uključuju vršne defleksije i njihove lokacije, vrijednosti vršnog opterećenja, broj slojeva u kolničkoj

konstrukciji i njihove debljine. Svrha je tog postupka procijeniti postojeće strukturalno stanje kolnika tako što se odredi *in situ* modul elastičnosti svih slojeva kolničke konstrukcije [34].

3. Mjerenja i ispitivanja stanja kolničke konstrukcije državne ceste D28

Dionica državne ceste D28 Predavac - Letićani, duga 8,6 kilometara, koja je predmeta analize u ovome radu, dio je cestovne relacije od Zagreba do Osijeka, a ujedno sjeverna obilaznica grada Bjelovara. Kako bi se dobili potpuni podaci o stanju te dionice potrebni za izbor odgovarajućeg rješenja ojačanja, primijenjeni su vizualna metoda za određivanje oštećenja i deformacija vozne površine, nerazorna metoda utvrđivanja defleksija (deflektograf s padajućim teretom) te terenski iskopi. Na preglednoj karti na slici 1. prikazani su položaj državne ceste D28 i duljina zahvata.

3.1. Prometno opterećenje

Zahvaljujući postavljenim brojačima prometa poznati su podaci o strukturi i broju vozila prema skupinama vozila na promatranoj dionici. Brojači osovina na navedenoj dionici nalaze se u neposrednoj blizini planirane zone zahvata (slika 1.). Dva su brojačka mjesta s automatskim neprekidnim brojanjem, i to brojačko mjesto oznake 2102 Predavac (zapadno od zahvata, udaljeno oko 350 m od početka trase) s PDGP-om (prosječni dnevni godišnji promet) od 8883 vozila i brojačko mjesto oznake 2140 Kupinovac (istočno od zahvata, udaljeno oko 500 m od kraja promatrane trase) s PDGP-om od 5140 vozila. Osim navedenih podataka relevantan je i onaj s brojačkog mjesta oznake 2123, koji je smješten na županijskoj cesti Ž3300 u Klokočevcu, s PGDP-om od 5402 vozila (slika 1.).



Slika 1. Pregledna karta uže područja D28, bjelovarske obilaznice, s pozicijama brojača prometa [35]

Na temelju analize prometa po skupinama vozila, odnosno promatrajući teška teretna vozila, teška teretna vozila s prikolicom i tegljače, može se zaključiti da na promatranoj dionici prevladava tranzitni promet na prometnome pravcu



Slika 2. Strukturalne pukotine na D28, bjelovarskoj obilaznici, od km 0+800 do km 2+100

D10 (čvor Gradec) - Sv. Ivan Žabno - Bjelovar - Hampovica - D2 (Đurđevac).

Ulazni podatak za dimenzioniranje ojačanja kolničke konstrukcije s brojačkog mjesta Predavac umanjen je za polovicu, a vrijednosti prometa s brojačkog mjesta u Klokočevcu također su ulazni podatak te su u analizi prometnog opterećenja uzete za dimenzioniranje ojačanja postojeće kolničke konstrukcije [35].

3.2. Vizualni pregled dionice

Vizualnim pregledom vozne površine kolnika državne ceste D28 i pojedinih poddionica uočena su tipična oštećenja u obliku strukturalnih pukotina, kolotraga i temperaturnih pukotina te popravak lokalnih oštećenja kolnika.

Od km 0+800 do km 2+100 na D28, bjelovarskoj obilaznici, izražene su strukturalne pukotine koje se pojavljuju u pravilnome razmaku, na otprilike svakih deset metara (slika 2.). Procjenjuje se da je osnovni uzrok nastanka uočenih strukturalnih pukotina u cementom stabiliziranome nosivom sloju, u kojemu tijekom hidratacije cementa, a uslijed prometnog opterećenja i temperaturnih oscilacija, nastaju poprečne pukotine koje se šire na gornje slojeve [36].

Kolotrasi su nastali zbog posmičnog loma u asfaltnome sloju na mjestima putanje kotača (slika 3). Takva vrsta loma prepoznaje se prema grebenima koji su nastali uz udubljenje [37].



Slika 3. Kolotrasi na D28, bjelovarskoj obilaznici, od km 2+900 do km 3+300



Slika 4. Temperaturne pukotine na D28, bjelovarskoj obilaznici, od km 7+000 do km 7+500

Na slici 4. prikazan je tipičan primjer temperaturnih pukotina nastalih uslijed zamora asfaltnog sloja na državnoj cesti D28, bjelovarskoj obilaznici. U zimskim mjesecima asfaltbeton se zbog niskih temperatura želi skupiti, što u principu nije moguće i vlačna naprezanja nastaju kao posljedica pada temperature. Veličina vlačnih naprezanja ovisi o brzini hlađenja i vrsti asfaltna mješavine, osobito o reološkim svojstvima bitumena. Ako vlačna naprezanja postanu previsoka, kolnik će puknuti u najslabijoj točki. Daljnje hlađenje kolnika dovest će do dodatnog pucanja i povećanja postojećih pukotina. Niskotemperaturne pukotine mogu biti glavni uzrok održavanja kolnika zalijevanjem pukotina. Kada vozilo velikog tereta kotačem prijeđe preko pukotine, stvaraju se velika vlačna naprezanja na rubovima pukotine jer nema prijenosa opterećenja. Taj se problem može povećati tijekom proljeća, kada vlaga ulazi u pukotine i oslabljuju se nosivi

slojevi. Navedeno svjedoči o tome da promet može uzrokovati ubrzano širenje postojećih pukotina, iako pukotine povezane s prometnim opterećenjem nisu primaran problem [37].

Tijekom redovitog održavanja kolnika na dijelovima kolnika D28 izveden je novi tanki asfaltni sloj umjesto postojećega habajućeg sloja kolnika degradiranog temperaturnim mikropukotinama i vozne površine loše hvatljivosti te izražajnih kolotruga. Nakon postavljanja novoga tankog asfaltnog sloja u manjim segmentima umjesto sloja staroga kolnika degradiranog strukturnim pukotinama i loše uzdužne ravnosti te izražajnih kolotruga nova asfaltna vozna površina u kratkome roku razvije deformacije istovjetnog uzorka kao na sloju ispod nje (slika 5.).



Slika 5. Popravlak lokalnih oštećenja kolnika D28, bjelovarske obilaznice, od km 5+000 do km 5+500

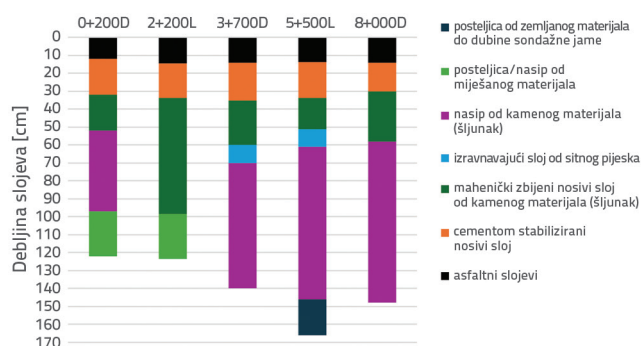


Slika 6. Fotodokumentacija istražnih iskopa na državnoj cesti [38]

3.3. Istražni radovi - terensko uzorkovanje i laboratorijska ispitivanja

3.3.1. Terenska uzorkovanja - sondažne jame

Kako bi se utvrdilo stvarno stanje slojeva kolničke konstrukcije na analiziranoj dionici, prema planu izvedeni su istražni radovi. Sondažne jame su u skladu s elaboratom [38] izvedene u vanjskome tragu kotača na pet pozicija (slika 6.) duž trase kako bi se odredile vrsta i debljina slojeva. Iskop se izvodio do posteljice. Utvrđeno je da se debljina asfaltnih slojeva kreće od 12,5 do 14,5 cm, dok je cementom stabilizirani sloj u prosjeku debljine 19 cm, odnosno od 16 do 21 cm. Na dijagramu na slici 7. vidljivo je da je debljina mehanički zbijenoga nosivog sloja i posteljice od kamenih materijala promjenjiva, prema čemu se može zaključiti da su nasip i posteljica rađeni od istoga šljunčanog materijala, a i nosivi sloj (MNS) izveden je od šljunka.



Slika 7. Grafički prikaz debljina slojeva i sastav kolničke konstrukcije [38]

3.3.2. Laboratorijska ispitivanja

Prilikom iskopa sondažnih jama uzeti su uzorci nosivog sloja MNS-a da bi se odredili granulometrijski sastav zrnatog materijala i muljevitost. Sastav materijala treba zadovoljiti uvjete za stupanj neravnomjernosti zrna, promjer najvećeg zrna i udio zrna manjih od 0,02 mm, a sve prema uvjetima iz Općih tehničkih uvjeta za radove na cestama [39]. Da bi se izvelo uzorkovanje MNS, trebalo je ukloniti asfaltni slojeve i CNS kolničke konstrukcije.

Da bi se odredili optimalna vlaga i maksimalna suha prostorna masa, uzorak zrnatoga kamenog materijala izvađen iz istražnih bušotina zbija se energijom modificiranoga Proctorova postupka. Rezultat ispitivanja jest optimalna vlaga, tj. ona količina vode u uzorku koja omogućuje maksimalnu zbijenost materijala uz navedenu energiju pri kojoj se dobiva maksimalna suha prostorna masa. Važno je da se zrnati kameni materijal (odgovarajuće granulometrije) ugrađuje u nosivi sloj pri optimalnoj vlazi. Nosivost sloja MNS-a ocjenjuje se na temelju laboratorijski određenoga kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR). CBR se određuje na pokusnim tijelima zbijenima uz optimalnu vlagu prema normi HRN EN 13286-47:2012 [40].

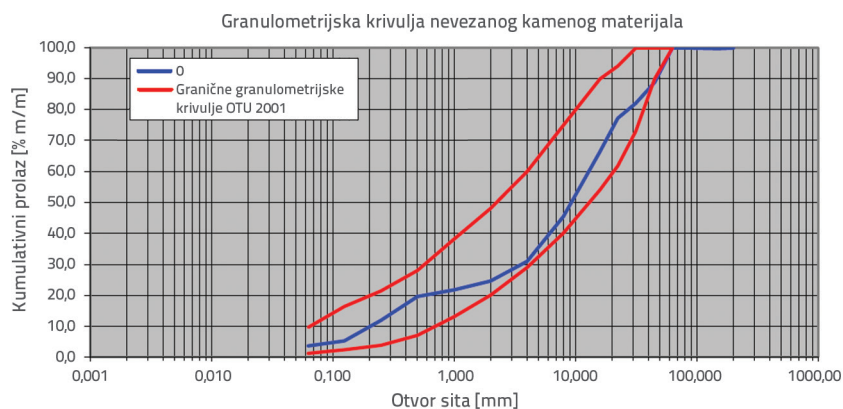
Na temelju rezultata ispitivanja i zadanih uvjeta iz Općih tehničkih uvjeta za radove na cestama (OTU) donosi se zaključak o pogodnosti svakoga pojedinog sloja postojeće kolničke konstrukcije za njegovo daljnje korištenje [19].

4. Rezultati mjerenja i ispitivanja slojeva kolničke konstrukcije D28

4.1. Granulometrijski sastav

Na uzorcima šljunčanoga kamenog materijala ispitivan je granulometrijski sastav i određen kalifornijski indeks nosivosti (CBR) mehanički zbijenoga nosivog sloja i nasipa od kamenih materijala.

Ispitivanje granulometrijskog sastava provedeno je prema HRN EN 933-1:2012 [41] te je uspoređen s graničnim vrijednostima prema OTU-u [39]. Granulometrijska krivulja mehanički zbijenoga nosivog sloja MNS nalazi se unutar propisanog graničnog područja (slika 8.).



Slika 8. Grafički prikaz granulometrijskog sastava MNS-a, km 2+200 lijevo [38]

Tablica 1. Određivanje kalifornijskog indeksa nosivosti (CBR) sloja MNS-a [38]

Prodor [mm]	Referentna sila [kN]	Standardna sila [kN]	CBR [%]	Minimalni CBR [%] prema OTU
2,5	11,5	13,2	87,4	80,0
5,0	18,2	20,0	91,0	

Tablica 2. Analizirane poddionice A, B, C i D

Naziv poddionice	Stacionaža	Vizualni pregled	Defleksije
A	0+800-2+100	strukturne pukotine	visoke
B	2+300-2+900	strukturne pukotine	niske
C	2+900-3+300	kolotrazi	visoke
D	7+000-7+500	temperатурne pukotine	visoke

4.2. Vrijednosti kalifornijskoga indeksa nosivosti (CBR)

Optimalan udio vlage i maksimalna suha gustoća prema modificiranome Proctoru na dva uzorka MNS-a ispitani su prema HRN EN 13286-2:2013 [42]. Rezultat optimalne vlažnosti iznosi 7,7 %, a najveća suha prostorna masa 2,24 t/m³. Nastavno na dobivene rezultate određen je CBR prema normi HRN EN 13286-47:2012 [40]. Rezultati su zadovoljili uvjete iz Općih tehničkih uvjeta za radove na cestama (tablica 1.).

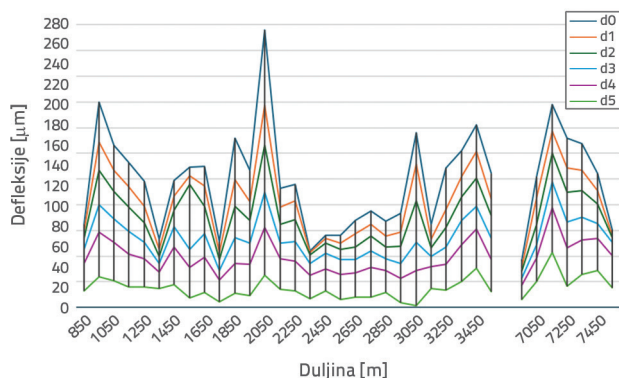
4.3. Interpretacija rezultata defleksije

Da bi se odredio modul elastičnosti, primijenjena je nerazorna metoda ispitivanja defleksije uređajem s padajućim teretom (FWD) marke KUAB. Ispitivanje se provodilo u tragu desnog kotača za lijevi i desni smjer vožnje. Udaljenost pojedinačnih mjerenja jednog smjera iznosila je 100 m, a mjerenja suprotnog smjera izmahnuta su za 50 m. Senzori su postavljeni na razmaku od 20(d1), 30(d2), 45(d3), 60(d4), 90(d5) i 120(d6) cm u odnosu na centralno opterećenje.

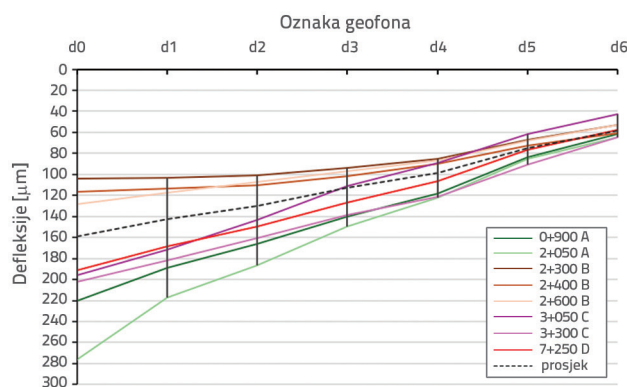
Na D28, bjelovarskoj obilaznici, analizirane su četiri tipične poddionice na kojima su vizualno zapažena znatna oštećenja u vidu kolotraga, temperатурnih i strukturnih pukotina te jedna dionica s vrlo niskim defleksijama (tablica 2.). Iz dijagrama na slici 9. uočavaju se područja s izraženim visokim rezultatima defleksije (km 0+900, 2+050, 3+050, 3+300). Izrazito niske razine defleksija primjećuju se na dionici od km 2+300 do km 2+900.

Na temelju analize poddionice A na kojoj su zapažene poprečne odnosno reflektirajuće i niskotemperатурne pukotine, pomoću parametara SCI, BDI i BCI opisanih u (2.2.2.), može se zaključiti da su na mjestima visokih defleksija (d0 iznad 160 μm) i parametri viši

nego na ostatku promatrane poddionice (slika 10.). Parametar SCI koji je viši od ostatka dionice upućuje na prisutnost mikropukotina u asfaltu, što je uočeno i vizualno, te se one prenose i na ostale slojeve i nosivost kolničke konstrukcije smanjena je. Na poddionici A povećan je i parametar BDI, što znači da je i nosivi sloj oslabljen, što upućuje na moguću prisutnost aktivnih pukotina koje će se vrlo brzo reflektirati na asfaltni sloj. O stacionažama s većim defleksijama (d_0 iznad $160 \mu\text{m}$, d_2 iznad $135 \mu\text{m}$) može se zaključiti da su to mjesta na kojima se nalaze reflektirajuće pukotine. Mjesta reflektirajućih pukotina imaju više rezultate defleksija nego ona prožeta temperaturnim pukotinama.

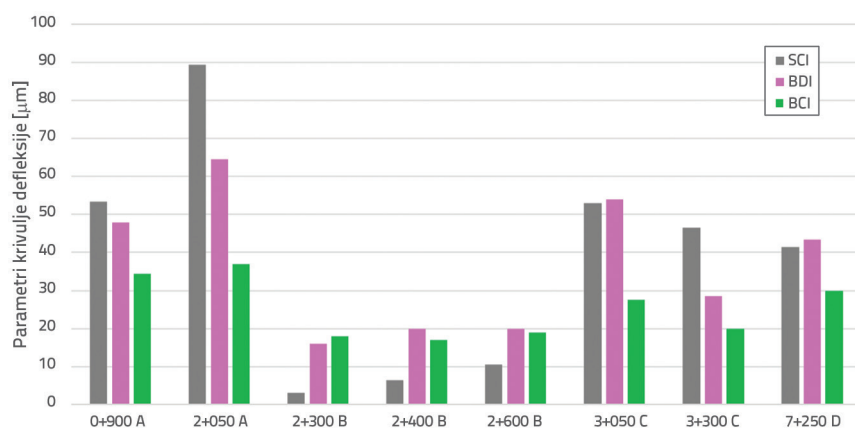


Slika 9. Prikaz rezultata defleksije za lijevi prometni trak, u smjeru Zagreba



Slika 10. Vrijednosti izraženih visokih i niskih defleksija na analiziranim poddionicama (A, B, C i D)

Parametri na poddionici B vrlo su niski kao i defleksije (d_0 ispod $120 \mu\text{m}$, d_2 ispod $105 \mu\text{m}$, d_4 ispod $90 \mu\text{m}$), a na trasi uočene su poprečne pukotine. Odnos između BDI-ova upućuje na to da je nosivi sloj oslabljen strukturnim pukotinama. Postoji



Slika 11. Parametri krivulje defleksije visokih i niskih defleksije na analiziranim poddionicama (A, B, C i D)

mogućnost da je pri samoj izvedbi slojeva kolnika došlo do određenih odstupanja u kvaliteti.

Na poddionici C uočene su trajne deformacije, odnosno kolotrazi. To se može pripisati povećanom udjelu vozila teškoga prometnog opterećenja koja na tome dijelu usporavaju vožnju zbog nailaska na kružno raskrižje te je logično da je parametar SCI povećan (d_0 iznad $160 \mu\text{m}$, d_2 iznad $140 \mu\text{m}$). Prema rezultatima, oslabljen je i nosivi sloj CNS.

Poddionica D prožeta je temperaturnim pukotinama, a na temelju rezultata defleksije (d_0 iznad $160 \mu\text{m}$, d_2 iznad $135 \mu\text{m}$, d_4 iznad $105 \mu\text{m}$) uočena je moguća smanjena nosivost nosivih slojeva konstrukcije koja nastaju u asfaltnim slojevima te se s vremenom šire u donje nosive slojeve.

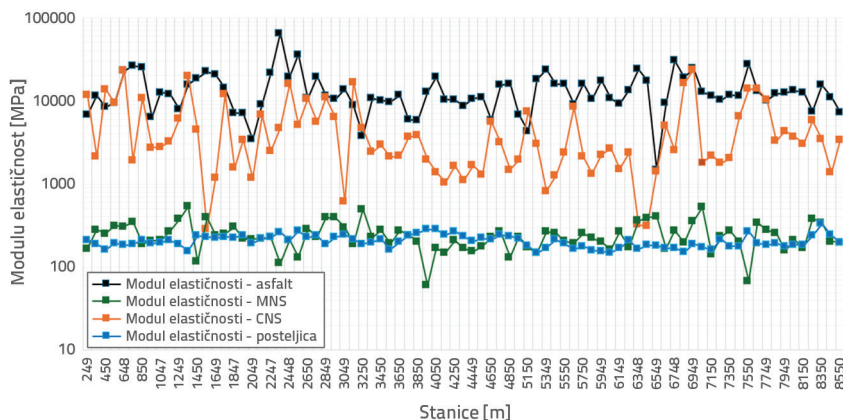
Na slici 11. prikazani su parametri defleksije iz kojih je vidljiva razlika u poddionicama (A, B, C i D) u promatranim stacionažama prema indeksima SCI, BDI i BCI (poglavlje 2.2.2.).

Nakon što su obrađeni podaci o defleksijama i debljinama slojeva (iz sondažnih bušotina i izvađenih jezgri), utvrđene su ujednačene homogene dionice kolnika (prema AASHO-u, dodatku J) za asfaltno slojeve, cementom stabilizirani nosivi sloj (CNS) i nosivi sloj od nevezanih mješavina (MNS) [43].

5. Određivanje modula elastičnosti pomoću računalnog programa ELMOD

Izračun modula elastičnosti proveden je pomoću računalnog programa ELMOD, koji automatski proračunava module elastičnosti postupkom proračuna unatrag. Proračun se obavlja na temelju rezultata defleksije koji su dobiveni ispitivanjem FWD uređajem postupkom kumulativnih razlika. Homogene dionice usklađuju se s dionicama podjednake debljine slojeva. Pri određivanju homogenih dionica one trebaju imati približno jednaku nosivost te biti usklađene s podacima o debljini slojeva jer oni variraju duž trase [45].

Nakon što se izračunaju moduli elastičnosti za svaku pojedinačnu homogenu dionicu, moguće je proračunati naprezanja i deformacije kolničke konstrukcije u kritičnim



Slika 12. Moduli elastičnosti kolnika D28 [37]

točkama. Na dijagramu (slika 12.) vidljivi su moduli elastičnosti cijele dionice D28, bjelovarske obilaznice, za asfaltne slojeve, CNS, MNS i posteljicu. Vrijednosti modula elastičnosti posteljice svih poddionica (A-D) kreću se od 150 do 270 MPa.

Poddionica A: Moduli elastičnosti MNS-a kreću se od 115 do 230 Mpa, a moduli elastičnosti CNS-a od 300 do 19.000 Mpa, što je izuzetno velik raspon kao i raspon modula elastičnosti asfaltnih slojeva od 3500 do 22.000 Mpa. Dionica je prožeta poprečnim pukotinama, a u pojedinim točkama visokih defleksija niski su moduli elastičnosti u asfaltnim slojevima i slojem CNS-a.

Poddionica B: Na temelju analize poddionice B s izrazito niskim defleksijama primijećeno je da su moduli elastičnosti izuzetno visokih vrijednosti u slojevima asfalta (10.500 - 36.000 Mpa) i CNS-a (5000 - 11.000 Mpa). Ponavlja se obrazac da su na svakih 200 metara moduli CNS-a i asfaltnih slojeva gotovo jednakih vrijednosti.

Poddionica C: Na poddionici C s izraženim kolotrazima u kritičnim točkama defleksija primijećeni su niži moduli elastičnosti CNS-a (600 - 4600 Mpa) i niži moduli asfaltnih slojeva u odnosu na ostatak te dionice, a s obzirom na postojanje trajnih deformacija u asfaltnim slojevima.

Poddionica D: Obilježena je temperaturnim pukotinama te ima niske module elastičnosti CNS-a (1600 - 2000 Mpa) u odnosu na ostatak dionice, što upućuje na to da je sloj stabilizacije u lošijem stanju te da ga treba sanirati prije bilo kakvih izvedbi slojeva iznad njega.

Na temelju rezultata modula elastičnosti svakoga pojedinog sloja može se zaključiti da je kritični sloj na analiziranim dionicama kolničke konstrukcije CNS i da ga treba ojačati, a što potvrđuju oscilacije vrijednosti modula elastičnosti CNS-a (vidljivo na slici 12.).

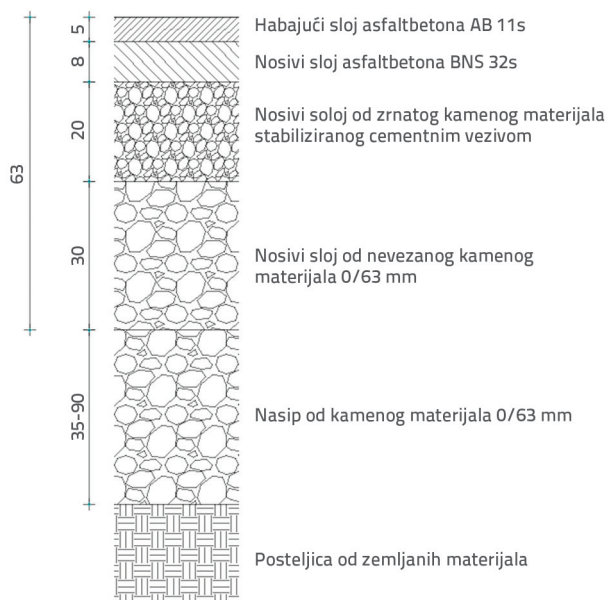
Glavni razlog lošeg stanja CNS-a jest šljunak kao sastavni materijal. Uporabom drobljenoga kamenog materijala sloja dulje zadržava svojstva u eksploatacijskim uvjetima, unatoč oscilacijama početnih tlačnih čvrstoća.

6. Ojačanje kolničke konstrukcije

Kolnička konstrukcija državne ceste D28 sastoji se od habajućeg i nosivog sloja asfaltbetona, cementom stabiliziranoga nosivog sloja (CNS) te mehanički zbijenoga nosivog sloja od nevezanoga kamenog materijala (MNS).

Tijekom izgradnje trase državne ceste odnosno njezina kolnika u razdoblju od studenoga 2001. do prosinca 2002. obavljan je tehnološki nadzor izvođenja radova te su provedena sva potrebna kontrolna, investitorska ispitivanja te tekuća, izvođačka uzorkovanja i mjerenja

prema zahtjevima glavnog projekta i Općih tehničkih uvjeta za radove na cestama (OTU) [39]. Prema izvješću o kontrolnim ispitivanjima asfalta [38], projektirana debljina habajućeg sloja AB 11s iznosi 5 cm, nosivog sloja BNS 32s 8 cm, cementom stabiliziranog sloja 20 cm, a MNS-a 30 cm (slika 13.).



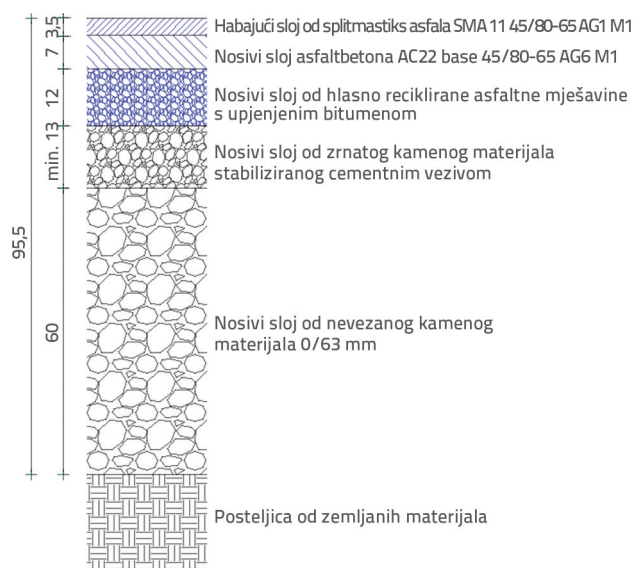
Slika 13. Slojevi postojeće kolničke konstrukcije državne ceste D28 [35]

Na temelju rezultata mjerenja i laboratorijskih ispitivanja obavljenih u sklopu kontrolnih ispitivanja donesen je zaključak da su sastav i fizičko-mehanička svojstva nosivog sloja asfalta (BNS 32s) i habajućeg sloja asfalta (AB 11s) u skladu s propisanim zahtjevima prema OTU-u i zahtjevima projekta, uz odstupanja u granicama tolerancije koja se ne bi trebala odražavati na zahtjeve važne za građevinu.

Projekti izgradnje državnih cesta i kontrolna ispitivanja izvedenih slojeva trebali bi biti arhivirani i dostupni u postupku utvrđivanja nosivosti kolnika. Projektirano stanje trebalo bi

usporediti s onim postojećim da bi se s točnijim informacijama o vrsti asfaltnih slojeva i debljinama ulazilo u daljnje proračune i projektiranje ojačanja. Jednostavnije bi se došlo do zaključaka o tome zašto su neke od poddionica oštećenije od ostalih te je li tijekom izgradnje bilo određenih odstupanja.

U svibnju 2020. na bjelovarskoj su obilaznici izvedeni terenski istražni radovi, u sklopu kojih su određene debljine i vrsta slojeva te ispitani uzorci nevezanih mješavina. Kroz ocjenu nosivosti kolničke konstrukcije obrađeni su rezultati defleksije izmjerene uređajem s padajućim teretom (FWD), dobiveni su moduli elastičnosti te je izrađen prijedlog rješenja sanacije, odnosno ojačanja kolnika državne ceste D28.



Slika 14. Slojevi ojačane kolničke konstrukcije državne ceste D28, bjelovarske obilaznice [35]

Laboratorijskim ispitivanjima zaključeno je da nosivi sloj od kamenog materijala (šljunka) zadovoljava uvjete zadane za navedeni sloj. Isto su pokazala i ispitivanja defleksije provedena nerazornom metodom ispitivanja FWD uređajem. Vizualnim pregledom uočene su deformacije i pukotine na poddionicama koje bi mogle imati smanjenu nosivost. U slojevima stabiliziranim cementom očekivano je da se nakon određenog vremena zbog vlačnih naprezanja i deformacija uzrokovanih prometnim opterećenjem pojave pukotine na dnu sloja te da se one šire do površine kolnika. Područja sa strukturnim pukotinama imaju više rezultate defleksije nego mjesta s temperaturnim pukotinama. Na temelju navedenih podataka i poznavanja materijala korištenih u slojevima za određivanje modula elastičnosti i Poissonova koeficijenta izračunani su moduli elastičnosti svih slojeva kolničke konstrukcije. Na temelju rezultata te izračuna naprezanja i deformacija u slojevima postojeće kolničke konstrukcije utvrđena je potrebna debljina ojačanja kolnika. Određeno je da će se u prethodno uređen sloj CNS-a ugraditi nosivi sloj od hladno reciklirane mješavine s upjenjenim bitumenom u debljini od 12 cm. Prije toga postojeći

će asfaltni slojevi biti frezani te će se koristiti kao agregat u nosivome recikliranom sloju.

U sklopu izvedbenog projekta [35] izrađen je proračun elemenata osi, nivelete, rubova kolnika i osi ceste na razmacima od 5 m te dimenzioniranja ojačanja kolničke konstrukcije (slika 14.). Određivanje ukupnog ekvivalentnog prometnog opterećenja provedeno je sukladno HRN U.C4.010., a pristup je obrađen u potpoglavlju 3.1. ovoga članka. Utvrđeno je teško prometno opterećenje, dimenzioniranje slojeva kolničke konstrukcije je provedeno po AASHTO metodi, a proračunati slojevi rekonstruirane kolničke konstrukcije prikazani su na slici 14. Zbog činjenice da se radi o normiranom principu proračuna te zbog prostornih ograničenja, numerički izračun nije sastavni dio članka. Projektni period promatrane dionice je 20 godina. Pri određivanju ukupnoga ekvivalentnog prometnog opterećenja predviđena je stopa rasta opsega prometa od 4 % prema podacima iz 2. poglavlja te je utvrđeno teško prometno opterećenje. Projektantska odluka da se primijeni ojačanje kolničke konstrukcije recikliranim nosivim slojem ekološki je i ekonomski opravdano, a što potvrđuju i istraživanja [46].

7. Zaključak

Godine 2020. na dionici državne ceste D28 izgrađene 2001./2002. provedena su terenska snimanja i uzorkovanja te laboratorijska ispitivanja kako bi se ocijenila nosivost kolnika i donijela odluka o sanaciji kolničke konstrukcije. Dionica je prožeta pukotinama te su na nekim dijelovima izraženi kolotrazi, što smanjuje udobnost vožnje i utječe na sigurnost prometovanja. Izvedeni su sondažni iskopi kako bi se odredili sastav i debljina slojeva te ispitivanje defleksija koje su primarni alat za određivanje ocjene nosivosti kolnika.

Utvrđeno je da je kritičan sloj CNS te i same lokacije gdje je on izgubio svoju nosivost, a na to su uputili rezultati ispitivanja defleksije (d_2 ispod $105 \mu m$) i proračunani moduli elastičnosti ($600 - 4600 MPa$). Oštećeni sloj CNS-a na mjestima gdje je u cijelosti uništen, odnosno raspucao, sanirat će se tako da će se ugraditi novi sloj odnosno sanirati geomrežama.

Dionica državne ceste D28 obrađena u ovome radu može biti dobar primjer pristupa gospodarenju kolnicima, jer je postupak projektiranja sanacije pokrenut prije kraja projektnog perioda od 20 godina. Međutim, bez obzira na provedene istražne radove, laboratorijska ispitivanja i izradu projektne dokumentacije, početak radova na ojačanju kolnika očekuje se tek za nekoliko godina. U pet godina otkako su provedena ispitivanja stanje kolnika znatno se promijenilo. Te informacije sugeriraju kako se, bez obzira na pravodobno postupanje u vezi procedure ispitivanja stanja kolnika na kraju projektnog razdoblja, ipak radi o odstupanju od pravodobne sanacije u sklopu suvremenoga gospodarenja cestama.

Samo rješenje ojačanja kolničke konstrukcije zadovoljava prema današnjim prioritetima uštedom novih materijala i recikliranjem postojećeg materijala, jer se frezani asfaltni slojevi koriste u udjelu do 60 % za novi nosivi sloj od hladno reciklirane mješavine.

LITERATURA

- [1] Sršen, M.: Terminološki četverojezični rječnik cestovnog inženjerstva s pojmovnikom, 1. izdanje Zagreb: AspeCta - Udruga za promicanje socijalnih i okolišnih aspekata održivog razvoja cesta, 2011.
- [2] Asphalt in pavement maintenance Asphalt institute ISBN 10: 0614232945 ISBN 13: 9780614232943, 1996.
- [3] Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.Y., Kennedy, T.W.: Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction, 2nd ed., NAPA Education Foundation: Lanham, MD, USA, (1996), pp. 286-304. ISBN 953-6686-07-5.
- [4] Rukavina, T., Ožbolt, M.: Sustav gospodarenja kolnicima - prikupljanje podataka // Gospodarenje prometnom infrastrukturom. Zagreb: Zavod za prometnice Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, (2009), pp. 95-176
- [5] Domitrović, J., Rukavina, T.: Application of GPR and FWD in assessing pavement bearing capacity Romanian Journal of Transport Infrastructure, 2 (2013), pp. 11-21, <https://doi.org/10.1515/rjti-2015-0015>
- [6] Cuculić, M., Pranjic, I., Deluka Tibljaš, A., Stanić, I.: Analiza asfaltnih kolničkih konstrukcija na temelju podataka strukturalne nosivosti, GF - Zbornik radova UDK 625.7, <https://doi.org/10.32762/zr.23.1.3>, 2020.
- [7] Scheidig, M., Uzara, K., Kempfa, D., Harriesa, L., Böhma, S., Liu, J.: Load-Bearing Capacity Assessment of Traffic Superstructures for Roads and Tramways, SMAR 2024 - 7th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, ScienceDirect Procedia Structural Integrity, 64 (2024), pp. 301-310, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.251>
- [8] Čičković, M., Bald, J.S.: Rückrechnung der charakteristischen mechanischen Parameter von Verkehrsbefestigungen aus FWD Messungen, In: Straße und Autobahn, 68 (2017) 12, pp. 950-957.
- [9] Qian, F., Shanqiang, L., Xinquan X.: Bearing capacity evaluation of asphalt pavement based on dynamic deflection equivalent, REES2019, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 300-052041, IOP Publishing, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/300/5/052041>, 2019.
- [10] Araki, S., Kazato, T., Kaito, K., Kobayashi, K., Akihiro Tanaka, A.: Evaluation for Load Bearing Capacity of Each Layer of Pavement in Japan Expressway, Internet Journal of Society for Social Management Systems, 11 (2017) 1, sms17-8813.
- [11] Karboćius, M., Vaitkus, A.: Falling-weight-deflectometer-based structural condition assessment of low-volume road pavements: practices and challenges, 8th International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2024, pp. 709-716, <https://doi.org/10.5592/CO/cetra.2024.1613>
- [12] Marecos, V., Simona Fontul, M., de Lurdes, A., Solla, M.: Evaluation of a highway pavement using non-destructive tests: Falling Weight Deflectometer and Ground Penetrating Radar, Construction and Building Materials, 154 (2017), pp. 1164-1172, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.034>.
- [13] Mesbah, U.A., Rafiqul, A.: Tarefder. Incorporation of GPR and FWD into pavement Mechanistic-Empirical design, Construction and Building Materials, 154 (2017), pp. 1272-1282, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.105>.
- [14] Zhao, M., Liu, Y., Wu, C., Xu, X., Pei, Y., Zhang, C.: Pavement bearing capacity evaluation during pavement-fracturing using falling-weight impact acceleration, ScienceDirect Case Studies in Construction Materials, 21 (2024) 12, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04002>.
- [15] Zhao, M., Yang, Q., Wu, W., Liu, J.: Structural condition assessment and fatigue stress analysis of cement concrete pavement based on the GPR and FWD, Construction and Building Materials, 328 (2022), 127044, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127044>
- [16] Liu, Z., Yang, Q., Gu, X.: Assessment of Pavement Structural Conditions and Remaining Life Combining Accelerated Pavement Testing and Ground-Penetrating Radar, Remote Sens., 15.
- [17] Rasol, M., Pais, J., Pérez-Gracia, V.: Solla, M., Fernandes F.M., Fontul, S. David Ayala-Cabrera, D. Schmidt, F. Hossein Assadolahi, H, GPR monitoring for road transport infrastructure: A systematic review and machine learning insights, Construction and Building Materials, 324 (2022), 126686, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126686>.
- [18] Domitrović, J., Bezina, Š., Stančerić, I., Rukavina, T.: 3D modelling of asphalt concrete overlay based on GPR data. International Journal of Pavement Engineering, 24 (2021) 1, <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.2004413>
- [19] Keller, M.: Gospodarenje cestovnim kolnicima, Zbornik radova: Četvrto hrvatsko savjetovanje o održavanju cesta, pp. 41-52, 2009.
- [20] Haas, R., Hudson, W.R., Zaniewski, J.P.: Modern Pavement Management. Malabar, Florida, USA: Krieger Publishing Company, 1994.
- [21] Zagvozda, M., Dimter, S., Moser, V., Barišić, I.: Application of GIS technology in Pavement Management Systems, Građevinar, 71 (2017) 4, pp. 297-304. <https://doi.org/10.14256/JCE.1980.2017>
- [22] Moser, V., Barišić, I., Rajle, D., Dimter, S.: Comparison of different survey methods data accuracy for road design and construction , 4th International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2016, pp. 847-852, 23-25 May, 2016, Šibenik, Croatia.
- [23] Babić, B.: Projektiranje kolničkih konstrukcija. Zagreb: Hrvatsko društvo građevinskih inženjera, 1997.
- [24] Kuvačić, B., Rukavina, T.: Sustav gospodarenja kolnicima na hrvatskim prometnicama - postavke i principi, Zbornik radova: Četvrto hrvatsko savjetovanje o održavanju cesta, Šibenik, pp. 33-44, 2009.
- [25] Zekušić, M., Črljenko, M.: Vizualni pregled, istražni radovi i varijante rješenja obnove kolnika, Seminar: Projektiranje obnove asfaltnih kolnika, Zagreb, 2017.
- [26] Sun, L.: Structural Behaviour of Asphalt Pavements. Imprint Butterworth-Heinemann, ISBN 978-0-12-849908-5, 2016.
- [27] Buttlar, W.G.: Mechanisms of Cracking and Debonding in Asphalt and Composite Pavements, vol. 28. Springer Cham, Hardcover ISBN 978-3-319-76848-9 Published: 05 June 2018 <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76849-6>
- [28] Rukavina, T.: Korištenje deflektografa s padajućim teretom i georadara za utvrđivanje postojeće i projektiranje potrebne nosivosti kolnika, Zagreb: Seminar Asfaltni kolnici, 2014.
- [29] COST 336 Use of Falling Weight Deflectometers in Pavement Evaluation, Final Report of the Action, European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research, The Netherlands, Apr. 2005.
- [30] Harshdutta I. Pandya, Ayman A. Ali, Yusuf A. Mehta. Enhancing Falling Weight Deflectometer (FWD) Testing: Comprehensive Review and Development of Robust Procedure in the United States, J Test. Eval, 52 (2024) 4, pp. 2039-2054, <https://doi.org/10.1520/JTE20230389>.

- [31] Enhanced Analysis of Falling Weight Deflectometer Data for Use With Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design and Analysis and Recommendations for Improvements to Falling Weight Deflectometers, Research Development and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Georgetown Pike, Mar. 2017.
- [32] Talvik, O., Aavik, A.: Use of FWD deflection basin parameters (SCI, BDI, BCI) for pavement condition assessment, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 4 (2009), pp. 196-202. <https://doi.org/10.3846/1822-427X.2009.4.196-202>.
- [33] Fu, G., Zhao, Y., Wang, G., Wei, J.: Evaluation of the effects of transverse cracking on the falling weight deflectometer data of asphalt pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 23 (2021) 5, pp. 1-14, <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1886295>.
- [34] Drenth, K.P.: ELMOD 6: The design and structural evaluation package for road, airport and industrial pavements, San Francisco: 8th International Conference on Concrete Block Paving, pp. 721-730, 2006.
- [35] Izvedbeni projekt izvanrednog održavanja asfaltnog kolnika D28 sjeverna obilaznica Bjelovara, Labos Varaždin, studeni 2020.
- [36] Zvonarić, M., Dimter, S.: Mjere prevencije i sanacije reflektirajućih pukotina u savitljivim kolnicima, *Građevinar*, 74 (2022) 3, pp. 189-197. <https://doi.org/10.14256/JCE.3427, 2021>.
- [37] Molenaar, A.: Lecture Notes: Design of Flexible Pavements. Nootdorp https://www.asphalt.de/fileadmin/user_upload/downloads/EAPA-Brosch%C3%BCren/17-Flexible-Pavement-Design.pdf, pristup 3.11.2024, 2018.
- [38] Privremeni elaborat o provedenim terenskim istražnim radovima i laboratorijskim ispitivanjima materijala iz kolničke konstrukcije s prometnice D28, poddionica 3, svibanj 2020.
- [39] Opći tehnički uvjeti za radove na cestama: Knjiga III - Kolnička konstrukcija, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, 2001.
- [40] HRN EN 13286-47:2012: Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 47: Test method for the determination of California bearing ratio, immediate bearing index and linear swelling (EN 13286-47:2012), Brussel, Belgium 2012.
- [41] HRN EN 933-1:2012: Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method (EN 933-1:2012), Brussel, Belgium 2012.
- [42] HRN EN 13286-2:2010/Ispr.1:2013: Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 2: Test methods for laboratory reference density and water content - Proctor compaction (EN 13286-2:2010/AC:2012), Brussel, Belgium 2012.
- [43] American Association of State Highway and Transportation Officials: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. Washington D.C., 1993.
- [44] Izvještaj - ocjena nosivosti kolničke konstrukcije (strukturnalnih kapacitet) državna cesta D28, poddionica 003, obilaznica Bjelovara od km 0 + 000,00 m do km 8 + 600,00 m, TRIKprojekt j.d.o.o., Zagreb, 2020.
- [45] Izvješće o kontrolnim ispitivanjima asfalta i hidroizolacije na sjevernoj zaobilaznici grada Bjelovara, Institut građevinarstva Hrvatske d.d. Zavod za prometnice Cestograđevni laboratorij - Odjel za tehnološki nadzor, Zagreb, 2002.
- [46] Vaitkus, A., Gražulyte, J., Kravcovas, I., Mickevici, R.: Comparison of the Bearing Capacity of Pavement Structures with Unbound and Cold Central-Plant Recycled Base Courses Based on FWD Data, *Sustainability*, 13 (2021), 6310. <https://doi.org/10.3390/su13116310>, MDPI 2021.