

Damjan Želodec, mag. inž. prom.
damjan.zelodec@dri.si
DRI upravljanje investicij, d. o. o.,
Kotnikova ulica 40, 1000 Ljubljana



prof. dr. Bojan Žlender, univ. dipl. inž. grad.
bojan.zlender@um.si
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno
inženirstvo in arhitekturo, Katedra za geotekniko,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor



izr. prof. dr. Marko Renčelj, univ. dipl. inž. grad.
marko.rencelj@um.si
Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo, prometno
inženirstvo in arhitekturo, Katedra za prometne gradnje,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor



Znanstveni članek
UDK 625.033.38:656.11(1-88)

NOV PRISTOP OCENJEVANJA NOSILNOSTI VOZIŠČNIH KONSTRUKCIJ NA PODLAGI NEPORUŠNE METODE Z DEFLEKTOMETROM S PADAJOČO UTEŽJO (FWD)

A NEW APPROACH TO THE ASSESSMENT OF THE BEARING CAPACITY OF PAVEMENT STRUCTURES BASED ON NON-DESTRUCTIVE METHOD WITH A FALLING WEIGHT DEFLECTOMETER (FWD)

Povzetek

V večini razvitih držav po svetu imajo razvit monitoring stanja nosilnosti voziščnih konstrukcij za potrebe gospodarjenja s prometno infrastrukturo ali pa zgolj za pregled nad obstoječim stanjem. Z naraščanjem prometnih obremenitev se zvišujejo tudi zahteve po zagotavljanju ustrezne nosilnosti voziščnih konstrukcij. Le-te zagotovimo s pravilno izbiro materialov, vgrajenih v voziščne konstrukcije, in pogostostjo izvedbe meritev nosilnosti z ustrezno merilno opremo (sprotno odkrivanje slabo nosilnih mest). V ta namen se najpogosteje uporablja merilna oprema deflektometer s padajočo utežjo (FWD), ki z neporušno metodo meri podajnost voziščne konstrukcije. Surove podatke, ki jih dobimo z meritvami podajnosti (neposredno pod obremenilno ploščo in na različnih oddaljenostih od nje), lahko interpretiramo na različne načine. Pri tem imamo na voljo programska orodja za analize nosilnosti ali pa uporabimo zgolj surove podatke meritev podajnosti s terena. Na ta način z minimalnim številom vhodnih podatkov dobimo ustrezno oceno stanja voziščne konstrukcije. V okviru projektne naloge smo izvedli meritve podajnosti na izbranih odsekih različnih kategorij cest ter na podlagi surovih podatkov meritev podajnosti, naredili oceno stanja posameznih plasti v voziščni konstrukciji. Ocena stanja je bila zasnovana po metodologiji tujih avtorjev in je vključevala ocenjevalne lestvice, ki so bile narejene na osnovi irskih smernic in po »južnoafriški« metodologiji (v Južni Afriki razvita polmehanska in polempirična analitična tehnika za ocenjevanje strukturnega stanja vozišča) ter prilagojene na simulacijo prehoda obremenitve 50 kN na kolo. Ugotovljena so bila precejšna odstopanja pri vrednostih podajnosti za posamezni ocenjevalni razred in izbrani parameter kljub prilagoditvi na zahtevane osne obremenitve za državne ceste v Sloveniji. Po podrobni analizi obravnavanih metodologij je bilo ugotovljeno, da se določene vrednosti podajnosti posameznih parametrov znotraj ocenjevalne lestvice sicer lahko uporabijo v praksi, vendar bodo potrebne še dodatne prilagoditve. Noviteta prispevka je predstavitev novega pristopa ocenjevanja nosilnosti voziščnih konstrukcij po surovih podatkih meritev podajnosti in hkrati dopolnitev obstoječe metodologije, ki je trenutno v uporabi na državnem cestnem omrežju v upravljanju Direkcije RS za infrastrukturo.

Ključne besede: podajnost, deflektometer s padajočo utežjo (FWD), neporušna metoda, parametri krivulj podajnosti, nosilnost, monitoring

Summary

Most developed countries in the world have developed monitoring of the bearing capacity of pavement structures for the purpose of pavement management system (PMS) or simply to get an overview of the existing situation. As traffic loads increase, so do the requirements to ensure adequate bearing capacity of pavement structures. Bearing capacity is ensured with correct choice of materials incorporated into the pavement structure and the frequency of bearing capacity measurements using suitable measuring equipment (detection of weak bearing capacity points). For the detection of weak bearing capacity points, the most commonly used measuring equipment is the Falling Weight Deflectometer (FWD), which measures the deflections in the pavement structure with a non-destructive method. The raw data obtained from the deflection measurements (directly under the load plate and at different distances from the load plate) can be interpreted in various ways. The raw measurement data can be interpreted using load analysis software tools or only the raw deflection measurement data from the field. In this way, an adequate assessment of the condition of the pavement structure can be made with a minimum number of inputs. As part of the project assignment, deflection measurements were carried out on selected sections of different road categories. Based on the raw deflection measurement data, an assessment of the condition of the individual layers in the pavement structure was made. The pavement condition assessment was based on the methodology of foreign authors. It included assessment scales based on Irish guidelines and the 'South African' methodology (a semi-mechanical and semi-empirical analytical method developed in South Africa to assess the structural condition of road pavements). The assessment scales were adjusted to simulate the passage of a load of 50 kN per wheel. Significant variations were found in the deflection values of the assessment scales for each assessment class and selected parameter. Despite the adaptation of the assessment scales to the required axle loads for national roads in Slovenia, they can be used only partially. After a thorough analysis of the methodologies considered, it was found that certain values for the deflections of individual parameters, within the assessment scale, can be used in practice, but further adjustments are needed. The novelty of the paper is the presentation of a new approach for the assessment of the bearing capacity of pavement structures using raw deflection measurement data. The new approach will complement the existing methodology currently in use on the national road network managed by the Slovenian Infrastructure Agency.

Key words: deflections, falling weight deflectometer (FWD), non-destructive method, deflection basin parameters, bearing capacity, monitoring

1 UVOD

Deflektometer s padajočo utežjo (v nadaljevanju FWD) je ena izmed najbolj uveljavljenih naprav v svetu, ki z neporušno metodo meri podajnost voziščnih konstrukcij. Podatki meritev nosilnosti služijo za načrtovanje novih in obnovo obstoječih voziščnih konstrukcij, hkrati so tudi vhodni podatek pri gospodarjenju s prometno infrastrukturo. Poleg naštetega se vse več upravljavcev prometne infrastrukture odloča tudi za monitoring obstoječih vozišč, ki bodo služile kot transportne poti za potrebe gradbišč. Dodatno se lahko uporablja tudi za spremljanje stanja letališke infrastrukture [Kovačič, 2020].

Znano je, da prometne obremenitve pogojujejo v voziščni konstrukciji časovno ponavljajoče se prostorsko napetostno stanje, izraženo s komponentami normalne in strižne napetosti. Spособnost voziščne konstrukcije, da v celoti prevzame omenjene napetosti, imenujemo nosilnost. Optimalna nosilnost je zagotovljena, če voziščna konstrukcija prevzame predvideno prometno obremenitev [Jamnik, 2000].

Kot merilo nosilnosti vozniških površin se je uveljavila podajnost. Ta mora, odvisno od lastnosti vgrajenih materialov, ostati v določenih mejah. Zagotovimo jo lahko z izbiro materialov in debelinami plasti tako, da je zagotovljen tolikšen raznos obremenitve, da je podajanje vozne površine v čim večji meri elastično. Začetek pojavljanja plastičnih deformacij pri fleksibilnih voziških konstrukcijah je znak, da vozna površina nastopajočih obremenitev ni sposobna prevzemati predvsem zaradi zunanjih vplivov (zmanjšana deformacijska stabilnost oz. odpornost vgrajenih materialov proti preoblikovanju) ali že nastalih faz utrujenosti (porušitev notranje zgradbe) zaradi prevzetih obremenitev [Jamnik, 2000].

Podatke, ki jih dobimo pri meritvah nosilnosti, lahko analiziramo na različne načine. Interpretirajo se lahko kot surovi podatki meritev nosilnosti (podajnost pod obremenilno ploščo in na različnih oddaljenostih od nje) ali se uporabijo programska orodja, ki omogočajo različne možnosti analiziranja in preračunavanja le-teh. Za kakovostne izračune želenih parametrov oz. analize rezultatov meritev nosilnosti pri preračunih potrebujemo čim natančnejše vhodne podatke (debeline posameznih plasti v voziščno konstrukcijo vgrajenih materialov, temperatura asfaltne plasti, prometne obremenitve). V kolikor vhodni podatki niso dovolj natančni in nimamo izbranih ustreznih metod preračunov znotraj programskih orodij, lahko pride do odstopanj ter težav pri interpretaciji rezultatov meritev podajnosti. S to težavo se v praksi pogosto srečujemo, saj na analize rezultatov meritev vplivajo številni dejavniki in vhodni podatki. Da se izognemo kompleksnim izračunom s programskimi orodji, lahko za interpretacijo stanja nosilnosti uporabimo surove podatke meritev. Podajnostno krivuljo sestavljajo povezane vrednosti izmerjenih podajnosti pod obremenilno ploščo in na določenih razdaljah od nje. Parametri so izračunani iz izmerjenih podajnosti. Da lahko ocenimo stanje nosilnosti posamezne plasti, je treba narediti ocenjevalno lestvico, ki bo temeljila na izbranih parametrih (stanje celotne voziščne konstrukcije (D_0), površinski indeks ukrivljenosti (SCI_{200} oz. SCI_{300}), indeks ukrivljenosti vmesnih plasti MLI/BDI (D_{300} - D_{600}), indeks ukrivljenosti spodnjih plasti LLI/BCI (D_{600} - D_{900}), stanje togosti podlage $D_{1800'}$, parametri RoC, AREA in CBR) in na ustrezno zastavljenih razredih. Različni (tuji) avtorji so naredili ocenjevalne lestvice za obremenitev 40 kN na kolo, ki pa je nižja od predpisane kolesne obremenitve (50 kN na kolo) za omrežje cest v Sloveniji. Za rešitev zastav-

ljenegega problema in dosego cilja je treba odgovoriti na nekaj pomembnih vprašanj: »Katere podajnostne razrede po ocenjevalni lestvici uporabiti za posamezno kategorijo cest?«, »Katera testna polja izbrati, glede na raznoliko geografsko lego cest v RS?«, »Ali bomo zbrali zadostno število meritev nosilnosti na izbrani kategoriji ceste, da bomo imeli ustrezen oz. dovolj velik vzorec?«, »Kakšne pozitivne učinke bo imel nov pristop ocenjevanja stanja vozišča na obstoječo metodologijo?«, »Ali bo nov model ocenjevanja stanja vozišč uporaben tudi z drugimi neporušnimi metodami?« Prav tako je cilj, da lahko omenjen novi pristop za ocenjevanje nosilnosti vozišč po surovih podatkih podajnosti uporabimo z ostalimi neporušnimi metodami (z georadarsko metodo, kjer določamo debeline posameznih plasti v voziščno konstrukcijo vgrajene materiale, z metodo vizualnega ocenjevanja stanja vozišč po modificiranem švicarskem indeksu MSI, z metodo določanja tornih karakteristik vozišča itd.).

Na podlagi dosedanjih izkušenj interpretacije meritev nosilnosti (izračunane preostale življenjske dobe vozišča ali surovih podatkov meritev) in s pomočjo tujih raziskav smo izdelali lestvico z opisi stanja posamezne plasti v voziščni konstrukciji, prilagojeno na simulirano obremenitev 50 kN na kolo.

Izdelano lestvico smo nato povezali z vrednostmi podajnosti, ki smo jih dobili na izbranih testnih poljih oz. odsekih. Na ta način smo naredili pomemben korak k razvoju dodatnega orodja za interpretacijo rezultatov meritev nosilnosti, kadar razpolagamo z minimalnim številom vhodnih podatkov.

2 DEFLEKTOMETER S PADAJOČO UTEŽJO (FWD)

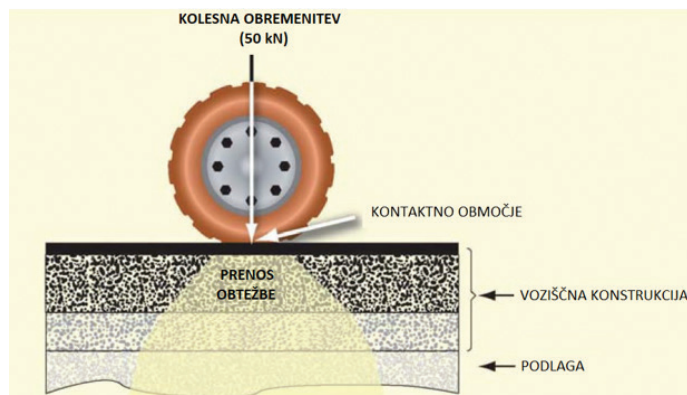
Deflektometer s padajočo utežjo (FWD) je merilna aparatura (slika 1), ki z neporušno metodo meri podajnost voziščnih konstrukcij. Merilni sklop je sestavljen iz vlečnega vozila, prikolice (naprave FWD), računalnika s programom za kontrolo izvajanja meritev in beleženje rezultatov v kabini vlečnega vozila [Želoddec, 2020].

Meritve podajnosti potekajo na naslednji način: operater iz kabine vlečnega vozila (preko računalniškega programa) spusti obremenilno ploščo na površino vozišča v desni kolesnici. Uteži se dvignejo na takšno višino, da s prostim padom simulirajo



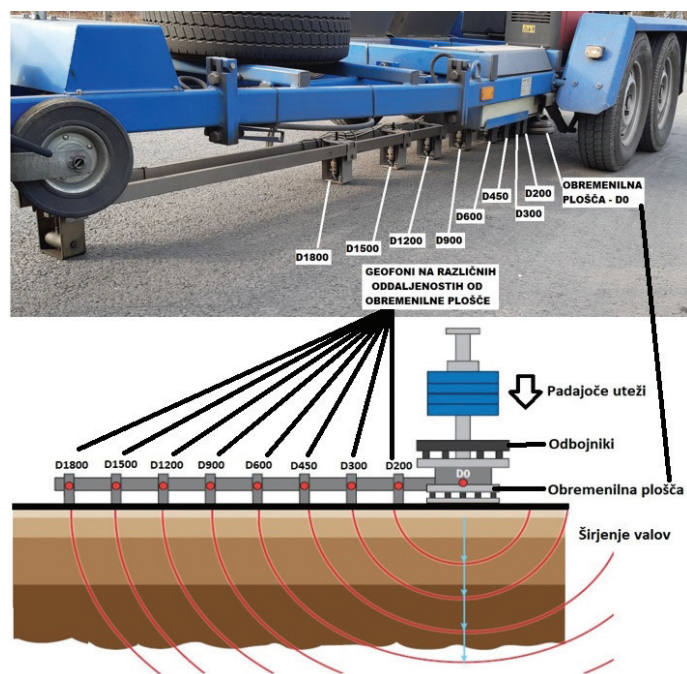
Slika 1. Merilna oprema FWD.

dinamično silo 50 kN (slika 2), ki povzroči, z upoštevanjem površine obremenilne plošče, napetost pod obremenilno ploščo 707 kN/m². Izvedejo se trije udarci, kot merodajen podatek se vzame tretji udarec. FWD zabeleži podajnosti pri vsakem udarcu na vsakem od devetih geofonov, ki so locirani na različnih razdaljah od središča obremenilne plošče: 0 mm, 200 mm, 300 mm, 450 mm, 600 mm, 900 mm, 1200 mm, 1500 mm in 1800 mm. Operater naknadno izmeri še temperaturo vozišča in jo vnese v program za zajem podatkov meritev [Jamnik, 2000]. Meritve se lahko izvajajo na različnih razdaljah med eno in drugo merilno točko, razdalje se določijo glede na namen meritev (projektni ali mrežni nivo meritev) [Želodec, 2015].



Slika 2. Prikaz kolesnih obremenitev na voziščno konstrukcijo [SADC, 2022].

Shematski prikaz t. i. »širjenja vibracij«, ki nastanajo pri izvedbi meritev ter posledično zajema podajnosti pod geofonih, je prikazan na sliki 3.



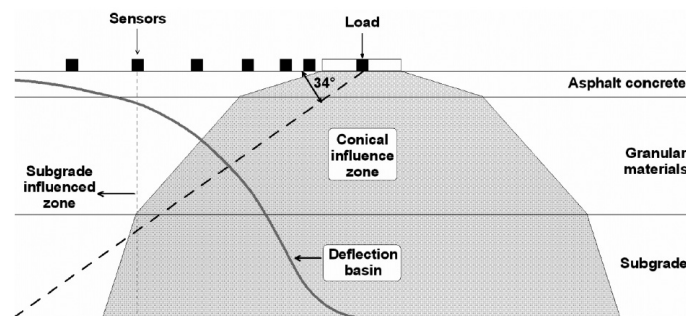
Slika 3. Shematski prikaz principa meritev podajnosti [Borecky, 2019].

3 METODE RAČUNANJA IN OCENJEVANJE STANJA NOSILNOSTI ASFALTNIH VOZIŠČNIH KONSTRUKCIJ NA PODLAGI NEPORUŠNE METODE

Z merilno aparaturo FWD lahko izvajamo meritve asfaltnih ali betonskih vozišč, ob zamenjavi obremenilne plošče tudi makadamskih/gramoznih voziščih. V nadaljevanju so predstavljene različne metodologije analize podatkov meritev na voziščnih konstrukcijah, ki so sestavljene iz vezanih (asfaltnih) plasti, nevezanih nosilnih plasti (v nadaljevanju: tampon) in postelji-ce/nasipa (iz kamnitega materiala).

3.1 Meritve asfaltnih vozišč

Na asfaltnih voziščih deluje naprava po naslednjem principu: obtežba in posledično deformacija se v nižje ležeče plasti prenašata pod določenim kotom. V stroki se je uveljavilo Irwinovo pravilo, ki pravi, da je 95 % podajnosti, izmerjenih na površini, posledica deformacij v plasteh, ki ležijo pod linijo nagiba 34° od mesta vnosa obtežbe. Iz podajnosti najbolj oddaljenega geofona lahko tako ocenimo, kakšna je togost plasti na globini pribl. 150 mm–200 mm (ob predpostavki kota prenosa obtežbe 45°). Če med seboj odštejemo podajnosti, dobljene pod geofoni, na različnih oddaljenostih od obremenilne plošče, dobimo podatek o togosti posameznih plasti, vgrajenih v voziščno konstrukcijo. Iz podatka o podajnosti, neposredno pod obremenilno ploščo, ocenimo togost celotne voziščne konstrukcije. Princip delovanja je shematsko prikazan na sliki 4 [Jurgele, 2018].



Slika 4. Raztros obtežbe v nižje ležeče plasti [Deblais, 2010].

3.2 Ocena strukturne kapacitete voziščne konstrukcije glede na parameter D_0

Najenostavnejši način ocene strukturne kapacitete sta vrednotenje in primerjava temperaturno korigiranih glavnih podajnosti. Glavna (ali tudi maksimalna) podajnost je posedek neposredno pod mestom vnosa obtežbe. Izmed različnih načinov ocenjevanja strukturne kapacitete je ta način najpreprostejši in tudi najbolj robusten, saj zahteva le minimalno število vhodnih podatkov. Zaradi neupoštevanja lastnosti podlage je tudi najmanj natančen, še posebej pri voziščnih konstrukcijah z debelejšimi nosilnimi plastmi [Jurgele, 2018].

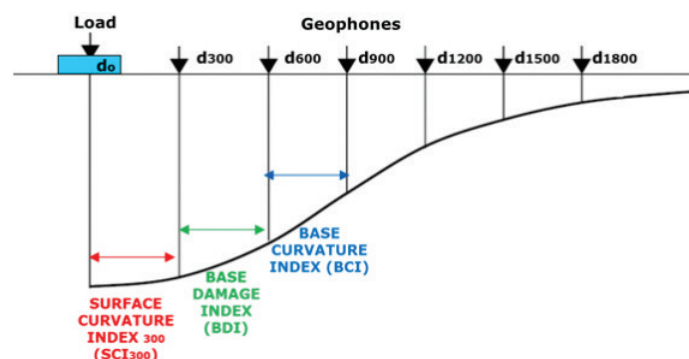
3.3 Meritve podajnosti in izračun vrednosti parametrov krivulj podajnosti

Rezultati meritev z merilno aparaturο FWD so izmerjene podajnosti na različnih oddaljenostih od obremenitve, ki simulira prehod kolesa tovornega vozila. Indeksi ukrivljenosti so izračunani kot razlike med izmerjenimi podajnostmi na posameznih odmikih od mesta obtežbe. Dobljeni rezultat izraža le spremembo deformacije v območju med višjo in nižjo globino ter na določeni razdalji med mestom obtežbe in geofoni, ki so nameščeni na različnih oddaljenostih od obremenilne plošče.

Glavni kazalniki stanja vozišča oz. parametri krivulj podajnosti so [Jurgele, 2018]:

- stanje celotne voziščne konstrukcije ali posedek pod obremenilno ploščo (D_0),
- površinski indeks ukrivljenosti SCI_{200} oz. SCI_{300} (Surface Curvature Index), ki prikazuje razliko podajnosti v oddaljenosti 200 mm (oz. 300 mm) od mesta obtežbe in je kazalnik togosti asfaltnih plasti,
- indeks ukrivljenosti vmesnih plasti MLI/BDI ($D_{300}-D_{600}$, Middle Layer Index/Base Damage Index), ki prikazuje razliko podajnosti med geofoni D_{300} in D_{600} ter je kazalnik togosti nevezanih nosilnih plasti in posteljice,
- LLI/BCI ($D_{600}-D_{900}$, Lower Layer Indeks/Base Curvature Index), ki prikazuje razliko podajnosti med geofoni D_{600} in D_{900} ter je kazalnik togosti temeljnih tal/nasipa,
- podajnost pod geofonom D_{1800} , ki je kazalnik togosti podlage.

Na spodnji sliki (slika 5) lahko vidimo, kako se določijo zgoraj omenjeni površinski indeksi ukrivljenosti glede na različne oddaljenosti geofonov od obremenilne plošče.



Slika 5. Prikaz zajema podajnosti na različnih oddaljenostih od obremenilne plošče [Bateman, 2016].

V nadaljevanju so v preglednicah (preglednici 1 in 2) prikazani parametri krivulj podajnosti z opisi na osnovi irskih smernic. Slednji imajo za osnovo obtežbo 40 kN na kolo in je nižja kot v Sloveniji, kjer imamo obtežbo 50 kN na kolo. Navedeni preglednici prikazujeta podajnosti pod obremenilno ploščo (D_0) (stanje celotne voziščne konstrukcije), indeks SCI_{300} (stanje asfaltnih plasti) in D_{2100} (stanje podlage).

UPORABA FWD-ja NA DRŽAVNIH/REGIONALNIH CESTAH Opomba: Vse podajnosti so normalizirane na obtežbo 40 kN na kolo		
D_0 (μm)	SCI_{300} ($D_0 - D_{300}$) (μm)	Opis
< 100	< 40	Zelo toga asfaltna plast
100 - 200	40 - 80	Toga asfaltna plast
200 - 350	80 - 140	Dokaj toga asfaltna plast - lahko zahtevamo asfaltno nadgradnjo, ki je odvisna od količine prometa.
350 - 500	140 - 200	Zmerno toga asfaltna plast - predvideva se asfaltna nadgradnja, ki je odvisna od količine prometa.
500 - 700	200 - 300	Zmerno toga do slaba asfaltna plast - zahteva se asfaltna nadgradnja (možnost tudi zamenjava zrnate plasti - tampona).
> 700	> 300	Slaba asfaltna plast - potrebna je zamenjava tampona ali rekonstrukcija.

Preglednica 1. Vrednosti parametrov D_0 in SCI_{300} z opisi na osnovi irskih smernic [TII, 2000].

UPORABA FWD-ja NA DRŽAVNIH/REGIONALNIH CESTAH Opomba: Vse podajnosti so normalizirane na obtežbo 40 kN na kolo	
D_9 ali D_{2100} – kriterij za stanje podlage (μm)	Opis
< 10	Zelo toga podlaga
10 – 20	Toga podlaga
20 – 30	Toga do zmerno močna podlaga
30 – 40	Zmerno močna do slaba podlaga
40 – 50	Slaba podlaga
> 50	Zelo slaba podlaga

Preglednica 2. Vrednosti parametra D_{2100} z opisom na osnovi irskih smernic [TII, 2000].

3.3.1 Metoda območja (metoda AREA)

Poleg zgoraj naštetih parametrov se lahko pri analizi stanja vozišča uporabi tudi metoda območja (metoda AREA). Metoda AREA (v nadaljevanju AREA) predstavlja normalizirano območje navpično prerezane krivulje podajnosti med mestom obremenitve in na različnih razdaljah od obremenitvene plošče. Izračun AREA, kjer so uporabljene vrednosti štirih geofonov, je prikazan v spodnji enačbi [Pierce, 2017]:

$$AREA_{900} = 6 * (1 + 2 * \frac{D_{300}}{D_0} + 2 * \frac{D_{600}}{D_0} + \frac{D_{900}}{D_0}) \text{ (mm)}, \quad (1)$$

kjer je D_0 podajnost pod obremenilno ploščo, D_{300} je podajnost, izmerjena na oddaljenosti 300 mm od mesta obremenitve oz. od centra obremenilne plošče, D_{600} je podajnost, izmerjena na oddaljenosti 600 mm od mesta obremenitve oz. od centra obremenilne plošče, D_{900} je podajnost, izmerjena na oddaljenosti 900 mm od mesta obremenitve oz. od centra obremenilne plošče.

izračunamo maksimalno vrednost $AREA$ [Pavement Interactive, 2022]:

$$maksAREA = 6 * (1 + 2 + 2 + 1) = 36 \text{ inč. ali } 915 \text{ mm} \quad (3)$$

Tipične vrednosti metode $AREA$ (konfiguracija s štirimi geofoni) in parametra D_0 (podajnost pod obremenilno ploščo) v mm in mikrometrih so prikazane v preglednicah (preglednici 3 in 4) v nadaljevanju [Pierce, 2017].

Tip vozišča	AREA vrednost (mm)	D_0 (μm)
Betonsko vozišče	740 – 810	250 – 500
Asfaltno vozišče, debelina ≥ 200 mm	530 – 760	500 – 1000
Asfaltno vozišče, debelina ≤ 200 mm	410 – 530	760 – 1200
Asfaltna tankoslojna prevleka	380 – 430	760 – 1200
Asfaltna tankoslojna prevleka (šibka)	300 – 380	1.000 – 1500

Preglednica 3. Tipične vrednosti parametra $AREA$ in D_0 [Pierce, 2017].

AREA vrednost	Maksimalna centralna podajnost D_0 (μm)	Splošni zaključki
Nizka	Nizka	Šibka voziščna konstrukcija / močna podlaga
Nizka	Visoka	Šibka voziščna konstrukcija / šibka podlaga
Visoka	Nizka	Močna voziščna konstrukcija / močna podlaga
Visoka	Visoka	Močna voziščna konstrukcija / šibka podlaga

Preglednica 4. Opisi parametra $AREA$ in D_0 [Pierce, 2017].

Najnižja vrednost $AREA$ ne more biti manjša od 11,1 inč. ali 280 mm (pojavl se takrat, kadar imajo vse plasti voziščne konstrukcije enak modul elastičnosti). Nizke vrednosti $AREA$ kažejo, da ni bistvene razlike med sestavo voziščne konstrukcije in osnovnim materialom v podlagi oz. nosilnostjo voziščne konstrukcije in podlage (kar sicer ni slabo, če je podlaga zelo toga, vendar se to redko dogaja). Kadar so moduli elastičnosti enaki (lahko izračunamo minimalno vrednost $AREA$), je razmerje med parametri D_{300} , D_{600} in D_{900} ter D_0 naslednje [Pavement Interactive, 2022]:

$$\min AREA = 6 * (1 + 2 * (0,26) + 2 * (0,125) + 0,083) = 11,1 \text{ inč. ali } 280 \text{ mm} \quad (2)$$

Najvišja vrednost $AREA$ znaša 36 inč. ali 915 mm in se pojavi takrat, kadar so vse štiri izmerjene deformacije enake. Da so vse štiri izmerjene deformacije enake, bi morala biti voziščna konstrukcija zelo toga (betonska ali s cementom stabilizirana nosilna plast v voziščni konstrukciji) ali imeti zelo debelo asfaltno plast. To pomeni, da so vrednosti parametrov D_0 , D_{300} , D_{600} in D_{900} enake in lahko po enačbi (3)

3.4 Metoda krivinskih radijev (Radius of Curvature metoda - RoC)

Metoda krivinskih radijev (Radius of Curvature metoda – v nadaljevanju RoC) je bila razvita v Južni Afriki in prikazuje strukturo stanja asfaltne in tamponske plasti. Zaradi bližine (200 mm) geofona do roba obremenilne plošče in s tem povezanih ter opaženih površinskih motenj/odstopanj je metoda RoC manj zanesljiva. Za izračun vrednosti po metodi RoC se uporablja naslednja enačba [Pierce, 2017]:

$$RoC = \frac{L^2}{2D_0(1 - \frac{D_{200}}{D_0})} \text{ (μm)}, \quad (4)$$

kjer je L – 200 mm in D_{200} je podajnost, izmerjena na oddaljenosti 200 mm od mesta obremenitve oz. od centra obremenilne plošče.

V preglednici 5 so povzete vrednosti posameznega parametra krivulj podajnosti z opisi strukturnega stanja in tipa vozišča. Posebej so obravnavane vrednosti klasične (fleksibilne) voziščne konstrukcije, ki je sestavljena iz asfaltne in nevezane nosilne plasti, glede na obnašanje vozišča in števila prometnih obremenitev na njem (preglednica 6).

Tip vozišča	Ocena strukturnega stanja	Parametri krivulj podajnosti (Deflection Bowl Parameters)				
		D_0 (μm)	RoC (μm)	SCI/BLI (μm)	BDI/MLI (μm)	BCI/LLI (μm)
Vozišče z nevezano nosilno plastjo	Zadovoljivo stanje	< 500	> 100	< 200	< 100	< 50
	Opozorilno stanje	500 – 750	50 – 100	200 – 400	100 – 200	50 – 100
	Slabo stanje	> 750	< 50	> 400	> 200	> 100
Vozišče s cementno stabilizirano nosilno plastjo	Zadovoljivo stanje	< 200	> 150	< 100	< 50	< 40
	Opozorilno stanje	200 – 400	80 – 150	100 – 300	50 – 100	40 – 80
	Slabo stanje	> 400	< 80	> 300	> 100	> 80
Vozišče z bitumnom stabilizirano nosilno plastjo	Zadovoljivo stanje	< 400	> 250	< 200	< 100	< 50
	Opozorilno stanje	400 – 600	100 – 250	200 – 400	100 – 150	50 – 80
	Slabo stanje	> 600	< 100	> 400	> 150	> 80

Preglednica 5. Ocene vrednosti za parametre krivulj podajnosti (D_0 , BLI, MLI, LLI in RoC) za različne tipe voziščne konstrukcije pri simulaciji obremenitve 40 kN na kolo [Horak, 2008].

Obnašanje vozišča	Prometna obremenitev pri obtežbi 80 kN/os (v milijonih prehodov NOO 80 kN)	Maksimalna D_0 (mm)	SCI/BLI (mm)	MLI/BDI (mm)	LLI/BCI (mm)
Zelo togo	12 do 50	< 0,3	< 0,08	< 0,05	< 0,04
Togo	3 do 8	0,3 do 0,5	0,08 do 0,25	0,05 to 0,15	0,04 do 0,08
Fleksibilno	0,8 do 3	0,5 do 0,75	0,25 do 0,50	0,15 to 0,20	0,08 do 0,10
Zelo fleksibilno	< 0,8	> 0,75	> 0,5	> 0,20	> 0,10

Preglednica 6. Obnašanje voziščne konstrukcije (z nevezano nosilno plastjo iz zrnatega materiala) glede na prometne obremenitve pri simulaciji obremenitve 40 kN na kolo [Horak, 2008].

3.5 Izračun debelinskega indeksa (Structural Number - SN_{eff}) iz meritev podajnosti

Poznamo več metod za izračun debelinskega indeksa in nosilnosti podlage (kalifornijskega indeksa nosilnosti oz. California Bearing Ratio - CBR) neposredno iz izmerjenih vrednosti podajnosti, ki smo jih korigirali glede na izmerjeno temperaturo asfalta ob meritvah. Glede na zahtevane vhodne podatke jih delimo na [Jurgele, 2018]:

- metode, ki ne potrebujejo podatkov o debelini voziščne konstrukcije,
- metode, ki potrebujejo poznavanje skupne debeline plasti v voziščno konstrukcijo vgrajenih materialov.

Zadnja izmed zgoraj naštetih metod je sestavni del smernic za načrtovanje voziščnih konstrukcij AASHTO (Guide for Design of Pavement Structures 1993). Te temeljijo na enakih principih dimenzioniranja voziščnih konstrukcij, kot so uporabljeni v slovenski tehnični specifikaciji TSC 06.520:2009 Projektiranje – Dimenzioniranje novih asfaltnih voziščnih konstrukcij [TSC, 2009]. V našem primeru najpogosteje uporabljamo naslednjo metodo izračuna SN_{eff} enačba (5) [Jameson, 1993]:

$$SN_{eff} = 1,69 + \frac{842,8}{(D_0 - D_{1500})} + \frac{42,94}{D_{900}}, \quad (5)$$

kjer je D_0 podajnost pod obremenilno ploščo, D_{900} je podajnost, izmerjena na oddaljenosti 900 mm od mesta obremenitve oz. od centra obremenilne plošče, in D_{1500} je podajnost, izmerjena na oddaljenosti 1500 mm od mesta obremenitve oz. od centra obremenilne plošče.

3.6 Izračun vrednosti parametra CBR glede na vrednosti krivulj podajnosti

Pri izračunu parametra CBR si lahko pomagamo z grobimi podatki podajnosti in ga izračunamo na več načinov. V praksi se najpogosteje uporablja izračun CBR po metodi iz smernic za načrtovanje voziščnih konstrukcij AASHTO (v nadaljevanju: metoda AASHTO) in po avtorju metode Jamsona (v nadaljevanju: metoda Jameson). Obstajajo tudi druge metode izračunov, ki jih lahko uporabimo in prilagodimo.

a) Izračun CBR po metodi Jameson [Jameson, 1993]:

$$CBR_{subgrade} = 1836,54 * (D_{900})^{-1,018} (\%), \quad (6)$$

kjer je D_{900} podajnost, izmerjena na oddaljenosti 900 mm od mesta obremenitve oz. od centra obremenilne plošče, in $CBR_{subgrade}$ je kalifornijski indeks nosilnosti podlage v %.

b) Izračun CBR po metodi Roberts [Roberts, 2006]:

$$CBR_{subgrade} = 850 * (D_{900})^{-1} (\%), \quad (7)$$

kjer je D_{900} podajnost, izmerjena na oddaljenosti 900 mm od mesta obremenitve oz. od centra obremenilne plošče, in $CBR_{subgrade}$ je kalifornijski indeks nosilnosti podlage v %.

c) Izračun CBR po metodi AASHTO [AASHTO, 2022]:

$$Mr = \frac{0,24 * P}{\delta r * r} (\text{psi}), \quad (8)$$

$$CBR_{subgrade} = \frac{Mr}{1500} (\%), \quad (9)$$

kjer je Mr modul nosilnosti podlage (psi) ali pretvorjeno v bare (1 psi = 0,069 bara), P = magnituda obremenitve (9.000 lb ali 4082,3 kg), δr = izmerjena podajnost pri odmiku za radij (inčih) ali pretvorjeno v mm (1 inč = 25,4 mm) in r = radialni odmik (inči) ali pretvorjeno v mm (1 inč = 25,4 mm). Omenjeni izračuni CBR in dobljene vrednosti le-teh (na podlagi meritev podajnosti) se lahko razlikujejo od dejanskih izračunov v laboratoriju. Pri tem si pomagamo z vzporedno izvedbo porušnih raziskav, in sicer z vrtnami ali izkopi na terenu.

4 IZVEDBA MERITEV FWD NA IZBRANIH ODSEKIH

Meritve podajnosti z merilno aparaturo FWD temeljijo na neporušni metodi, kjer ne posegamo v strukturo voziščne konstrukcije, ampak zgolj s simuliranjem prehoda kolesne obremenitve 50 kN na kolo merimo podajnost voziščne konstrukcije. Na podlagi teoretičnih izhodišč, obrazloženih v predhodnih poglavjih, smo obravnavali cestne odseke različnih

kategorij. Izbrani odseki so bili analizirani na krajših razdaljah med posameznima merilnima točkama (projektna raven). Nekateri izbrani odseki so bili izmerjeni v smeri naraščajoče in padajoče vrednosti stacionaže, nekateri pa samo v smeri naraščajoče vrednosti stacionaže. V večini primerov je šlo za meritve podajnosti za potrebe obnov, rekonstrukcij ali preverbe stanja po izgradnji. Vsi obravnavani odseki so bili izmerjeni z dinamično obremenitvijo, ekvivalentno prehodu NOO 100 kN na merjenem mestu.

Sledijo si v naslednjem vrstnem redu:

- glavna cesta prvega reda (G1); Črnova-Arja vas, odsek 1262 (v naraščajoči in padajoči smeri stacionaže);
- glavna cesta drugega reda (G2); Ljubljana (Rudnik)-Škofljica, odsek 0215 (v naraščajoči in padajoči smeri stacionaže);
- regionalna cesta prvega reda (R1); Obvoznica Škofja Loka, odsek 1392 (v naraščajoči smeri stacionaže);
- regionalna cesta prvega reda (R2); Razdrto-Manče, odsek 0344 (v naraščajoči smeri stacionaže);
- regionalna cesta tretjega reda (R3); Spodnja Pohanca-Kapele, odsek 2204 (v naraščajoči in padajoči smeri stacionaže);
- občinska cesta (LC); Šikole-Stražgonjca-Zupančičeva ulica, odsek LC 165011 (v naraščajoči smeri stacionaže);
- občinska cesta (JP); Dobro Polje-Mošnje, odsek JP 849171 (v naraščajoči smeri stacionaže).

V preglednici 7 so zbrani rezultati meritev po različnih parametrih (D_0 , parametri podajnostne krivulje in ostali) kot povprečne vrednosti meritev na celotnem izbranem odseku in kot 85 % vrednosti meritev »85 % kvantil«.

IVRC	IZVEDBA MERITVE	OPIS	D_0 (T) (μm)	SCI_{300} (D_0-D_{300}) (μm)	BDI/MLI ($D_{300}-D_{600}$) (μm)	BCI/LLI ($D_{600}-D_{900}$) (μm)	D_{1800} (μm)	AREA (mm)	S_{Neff}	CBR (%) (JAMESON)	CBR (%) (AASHTO)
G1	G1-1a	Poprečna vrednost	248	59	70	39	30	587	8	9	7
	G1-1b	85% kvantil	423	120	131	70	51	686	12	14	14
	G1-2a	Poprečna vrednost	237	43	74	40	31	619	8	8	8
	G1-2b	85% kvantil	407	99	142	69	51	736	14	14	19
G2	G2-1a	Poprečna vrednost	366	84	110	61	46	570	5	5	5
	G2-1b	85% kvantil	479	128	155	81	64	631	6	8	7
	G2-2a	Poprečna vrednost	270	64	83	44	32	560	6	8	7
	G2-2b	85% kvantil	375	105	119	63	55	645	8	14	14
R1	R1-1a	Poprečna vrednost	175	65	55	23	15	456	9	17	20
	R1-1b	85% kvantil	243	84	76	35	28	514	11	23	39
R2	R2-1a	Poprečna vrednost	203	73	58	28	15	490	9	14	14
	R2-1b	85% kvantil	343	129	106	50	26	583	13	21	27

R3	R3-1a	Poprečna vrednost	204	45	45	30	37	650	10	7	6
	R3-1b	85% kvantil	380	103	103	60	52	749	17	11	8
	R3-2a	Poprečna vrednost	204	38	43	30	42	672	10	7	5
	R3-2b	85% kvantil	373	95	105	60	60	787	16	10	8
LC	LC-1a	Poprečna vrednost	479	112	154	79	51	552	4	5	5
	LC-1b	85% kvantil	660	158	217	117	80	620	5	10	10
JP	JP-1a	Poprečna vrednost	365	162	103	46	16	422	5	11	11
	JP-1b	85% kvantil	433	195	118	52	21	459	6	14	14

Pomen oznak:

1 – število ponazarja izvedbo meritev v naraščajoči smeri stacionaže

2 – število ponazarja izvedbo meritev v padajoči smeri stacionaže

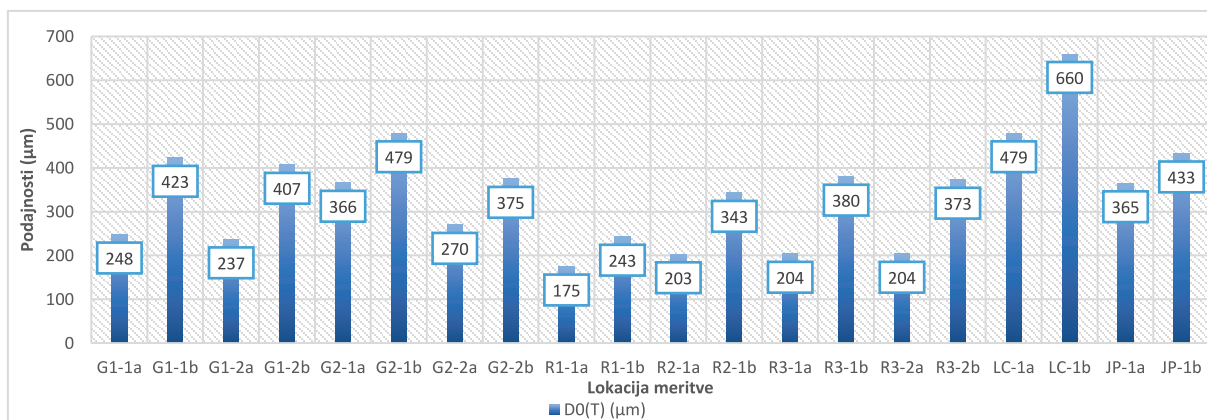
a – oznaka za povprečno vrednost rezultatov meritev

b – oznaka za 85% kvantil rezultatov meritev

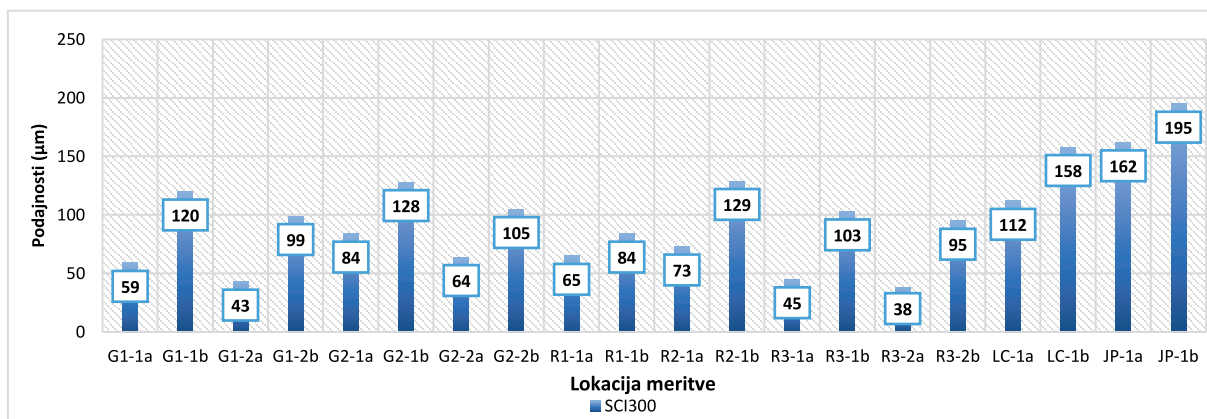
Preglednica 7. Povprečne vrednosti parametrov glede na posamezni odsek ceste.

Na slikah v nadaljevanju so prikazani rezultati meritev podajnosti pri simulaciji obremenitve 50 kN na kolo na izbranih odsekih za nekaj od zgoraj naštetih parametrov. Stanje celotne

voziščne konstrukcije je prikazano na sliki 6 s parametrom $D_0(T)$. Slika 7 prikazuje stanje voziščne konstrukcije po parametru SCI_{300} , iz katerega je razvidno stanje asfaltnih plasti.



Slika 6. Vrednosti podajnosti pod obremenilno ploščo $D_0(T)$ (μm) med posameznimi lokacijami meritev.



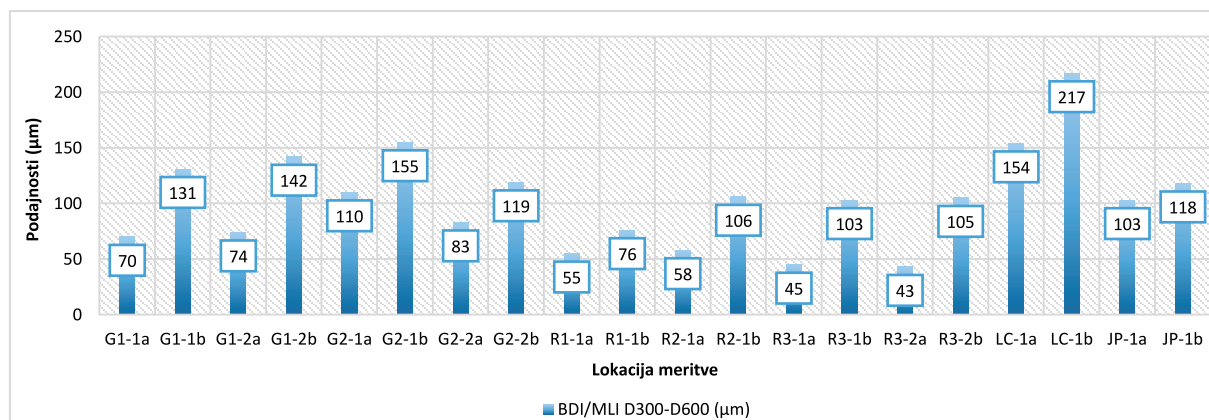
Slika 7. Vrednosti podajnosti po parametru SCI_{300} (μm) med posameznimi lokacijami meritev.

Na sliki 8 je po parametru BDI/MLI (D_{300} - D_{600}) vidno stanje nevezane nosilne plasti in posteljice.

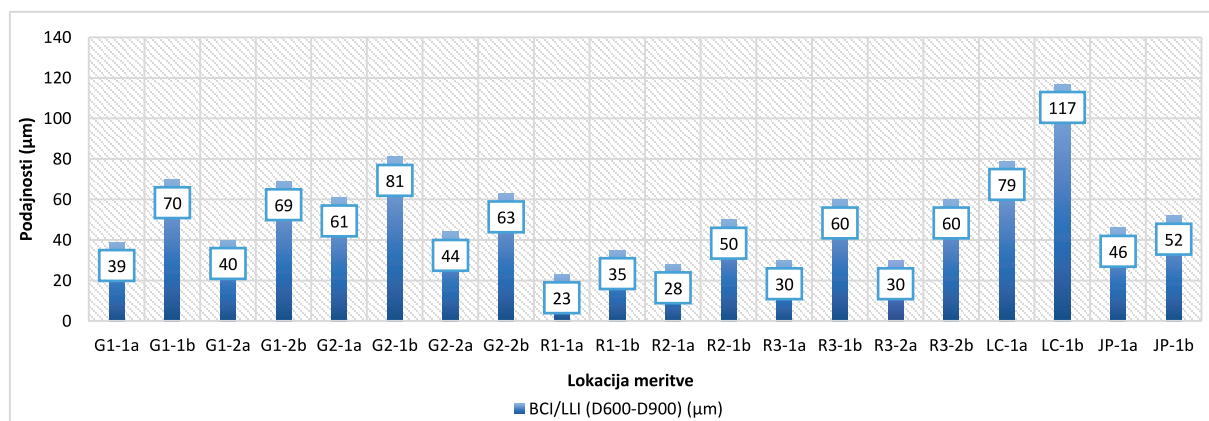
Poleg stanja asfaltnih plasti in nevezanih plasti se velikokrat uporablja podatek o stanju temeljnih tal oz. nasipa (slika 9). To je parameter BCI/LLI (D_{600} - D_{900}).

Slika 10 prikazuje stanje podlage po parametru D_{1800} .

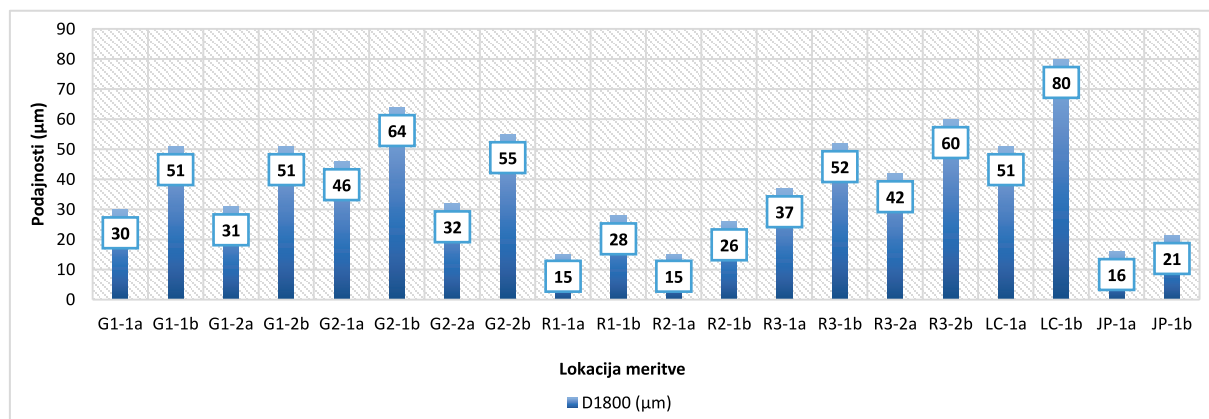
Poleg ostalih parametrov krivulje podajnosti smo zajeli še stanje voziščne konstrukcije in podlage. To opisujeta parametra $AREA$ (mm) in $D_0(T)$ (μm), ki sta prikazana na sliki 11.



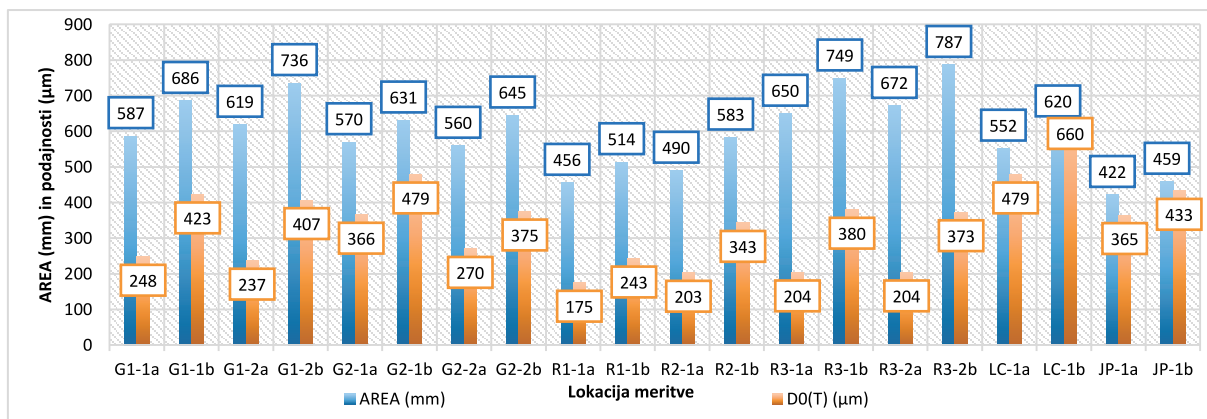
Slika 8. Vrednosti podajnosti po parametru BDI/MLI (D_{300} - D_{600}) (μm) med posameznimi lokacijami meritev.



Slika 9. Vrednosti podajnosti po parametru BCI/LLI (D_{600} - D_{900}) (μm) med posameznimi lokacijami meritev.



Slika 10. Vrednosti podajnosti po parametru D_{1800} (μm) med posameznimi lokacijami meritev.



Slika 11. Vrednosti podajnosti po parametru $D_0(T)$ (μm) in AREA (mm) med posameznimi lokacijami meritev.

5 PREDLOG NOVEGA PRISTOPA OCENJEVANJA STANJA VOZIŠČ GLEDE NA NOSILNOST

V praksi se uporabljajo različni načini interpretacije meritev podajnosti, bodisi s posebnimi programskimi orodji ali z neposredno uporabo surovih podatkov meritev. V Sloveniji za

analize nosilnosti uporabljamo programsko orodje ELMOD (Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design – določitev elastičnih modulov plasti in dimenzioniranje nadgradnje). Uporaben je na fleksibilnih voziščnih konstrukcijah, kjer nimamo togih plasti oz. ga lahko izjemoma uporabimo tudi na poltogh voziščnih konstrukcijah (s posebno obravnavo). Podatka, ki ju dobimo v interpretacijo, sta preostala življenjska doba (PŽD) in potrebna debelina ojačitve (za doseganje planirane

Razlika med simuliranjem obtežbe 50 kN in 70 kN na kolo (sredina vzletno pristajalne steze)									
Geofoni	DO	D200	D300	D450	D600	D900	D1200	D1500	D1800
Povprečna vrednost podajnosti	29 %	30 %	30 %	30 %	30 %	31 %	32 %	32 %	33 %
85 % vrednosti podajnosti	31 %	31 %	32 %	32 %	32 %	33 %	34 %	34 %	35 %
Razlika med simuliranjem obtežbe 50 kN in 70 kN na kolo (desna robna stran vzletno pristajalne steze)									
Geofoni	DO	D200	D300	D450	D600	D900	D1200	D1500	D1800
Povprečna vrednost podajnosti	30 %	31 %	31 %	31 %	31 %	32 %	33 %	33 %	33 %
85 % vrednosti podajnosti	31 %	31 %	32 %	32 %	32 %	33 %	34 %	35 %	36 %
Razlika med simuliranjem obtežbe 50 kN in 70 kN na kolo (leva robna stran vzletno pristajalne steze)									
Geofoni	DO	D200	D300	D450	D600	D900	D1200	D1500	D1800
Povprečna vrednost podajnosti	30 %	30 %	30 %	31 %	31 %	31 %	32 %	32 %	32 %
85 % vrednosti podajnosti	31 %	31 %	31 %	32 %	32 %	33 %	34 %	33 %	33 %
Vrednosti podajnosti pri razliki simuliranja prehoda 20 kN na kolo									
Geofoni	DO	D200	D300	D450	D600	D900	D1200	D1500	D1800
Povprečna vrednost podajnosti	30 %	30 %	30 %	31 %	31 %	32 %	32 %	33 %	33 %
85 % vrednosti podajnosti	30 %	31 %	31 %	31 %	31 %	32 %	32 %	33 %	33 %
Vrednosti podajnosti pri razliki 10 kN									
Geofoni	DO	D200	D300	D450	D600	D900	D1200	D1500	D1800
Povprečna vrednost podajnosti	15 %	15 %	15 %	15 %	15 %	16 %	16 %	16 %	16 %
85 % vrednosti podajnosti	15 %	15 %	15 %	15 %	16 %	16 %	16 %	16 %	17 %

Preglednica 8. Razlike med surovimi podatki meritev podajnosti pri simulaciji obtežbe 50 kN in 70 kN na kolo na vzletno-pristajalni stezi na letališču Maribor.

življenjske dobe vozišča 20 let) za vsako merilno točko. Ker na izračun obeh parametrov vpliva veliko dejavnikov (debeline posameznih plasti, prometne obremenitve, temperatura asfalta itd.) lahko pride do odstopanj pri interpretaciji z ostalimi kazalniki.

Z namenom priprave novega načina interpretacije dobljenih rezultatov meritev nosilnosti smo v članku predstavili izvedeno raziskavo uporabnosti surovih podatkov meritev podajnosti (parametrov krivulj podajnosti) na izbranih odsekih glavnih, regionalnih ter tudi občinskih cest. Pri tem smo uporabili literaturo tujih avtorjev, ki so svoje ugotovitve strnili v različnih raziskavah ([Horak, 2008], [Til, 2000]) in naredili nove ocenjevalne lestvice nosilnosti z opisi stanj v voziščno konstrukcijo vgrajenih plasti ali celotne voziščne konstrukcije. Slednje smo

Po analizi surovih podatkov meritev podajnosti, izmerjenih na vzletno-pristajalni stezi na letališču Maribor, je bilo ugotovljeno, da je med simulacijo prehoda obremenitve 50 kN in 70 kN na kolo razlika v podajnostih 30 %. Če to razliko razdelimo na manjše vrednosti (na simulacijo kolesne obremenitve 10 kN na kolo), ugotovimo, da moramo vrednosti parametrov z opisi v preglednicah za simulacijo obremenitev 40 kN na kolo povečati vrednosti za 15 % (preglednica 8). Omenjene povečane vrednosti in meje za posamezno strukturno stanje so zajete v preglednicah v nadaljevanju (preglednice 9–11).

V preglednici 9 so prikazani razredi z opisi parametrov (obstoječimi in predlaganimi) in vrednostmi za celotno voziščno konstrukcijo ter asfaltno plast (D_0 in D_{300}), prilagojenimi na simulirano obremenitev 50 kN na kolo.

D_0 (μm)	$SCI_{300}(D_0-D_{300})$ (μm)	Opis parametrov	Nov predlog opisa parametrov
< 115	< 46	Zelo toga asfaltna plast	Zelo dobro stanje vozišča
115 - 230	46 - 92	Toga asfaltna plast	Dobro stanje vozišča
230 - 405	92 - 161	Dokaj toga asfaltna plast - lahko zahtevamo asfaltno nadgradnjo, ki je odvisna od količine prometa.	Zadovoljivo stanje vozišča
405 - 575	161 - 230	Zmerno toga asfaltna plast - predvideva se asfaltna nadgradnja, ki je odvisna od količine prometa.	Mejno stanja vozišča
575 - 805	230 - 345	Zmerno toga do slaba asfaltna plast - zahteva se asfaltna nadgradnja (možnost tudi zamenjava zrnate plasti - tampona).	Slabo stanje vozišča
> 805	> 345	Slaba asfaltna plast (potrebna je zamenjava tampona ali rekonstrukcija).	Zelo slabo stanje vozišča

Preglednica 9. Lestvica in opis parametrov D_0 in D_{300} pri simulaciji obremenitve, enakovredni 50 kN na kolo.

uporabili v raziskavi in jih uporabili v naših primerih. Pojavila se je težava neposredne primerjave/uporabe različnih lestvic – v tujini so lestvice prilagojene dinamični obremenitvi, primerljivi obremenitvi voziščne konstrukcije z obtežbo 40 kN na kolo, v Sloveniji pa s 50 kN na kolo. V našem primeru smo torej morali lestvice parametrov, ki so jih obravnavali tuji avtorji, prilagoditi na obremenitev, ki jo uporabljamo v Sloveniji.

Pri prilagoditvi parametrov smo si pomagali z rezultati meritev na letališču Maribor, kjer smo s tremi različnimi obtežbami (50 kN, 70 kN in 120 kN na kolo) merili podajnost vzletno-pristajalne steze z merilno aparatur FWD. Voziščna konstrukcija vzletno-pristajalne steze je sestavljena iz asfaltna plasti debeline 16 cm in nevezane nosilne plasti debeline 40 cm, kar predstavlja približek debelinam voziščnih konstrukcij (po banki cestnih podatkov se debeline asfaltnih plasti v povprečju gibljejo med 10 cm in 14 cm, debeline nevezanih nosilnih plasti pa med 30 cm in 40 cm) na državnem cestnem omrežju [Kovačič, 2020]. S tem smo zadostili pogoju, da gre za skoraj klasično voziščno konstrukcijo (fleksibilna voziščna konstrukcija) in da imamo zadostno število meritev (skupaj je bila narejena 101 meritev podajnosti na treh različnih mestih, in sicer na sredini, desni in levi strani vzletno-pristajalne steze).

Poleg zgoraj omenjenih kazalnikov smo prilagodili tudi lestvico z opisi parametrov za stanje podlage. V spodnji preglednici (preglednica 10) so navedene vrednosti, ki so jih tuji avtorji navajali za parameter D_{2100} (D_{2100} je podajnost, izmerjena na oddaljenosti 2100 mm od mesta obremenitve oz. od centra

D_0 ali D_{1800}	Opis parametrov	Nov predlog opisa parametrov
< 10	Zelo toga podlaga	Zelo dobro stanje podlage
10 - 20	Toga podlaga	Dobro stanje podlage
20 - 30	Toga do zmerno močna podlaga	Zadovoljivo stanje podlage
30 - 40	Zmerno močna do slaba podlaga	Mejno stanje podlage
40 - 50	Slaba podlaga	Slabo stanje podlage
> 50	Zelo slaba podlaga	Zelo slabo stanje podlage

Preglednica 10. Lestvica in opis parametra D_{1800} pri simulaciji obremenitve 50 kN na kolo.

obremenilne plošče) [TII, 2000]. Zaradi različne oddaljenosti geofonov od obremenilne plošče (naš geofon je lociran na oddaljenosti 1800 mm, na osnovi irskih smernic pa je lociran na oddaljenosti 2100 mm od obremenilne plošče) in spremembe simulacije prenosa obtežbe s 40 kN na 50 kN na kolo se vrednosti parametrov primerjalne lestvice irskih smernic in v našem primeru ne spreminjajo (na podlagi linearnega padanja vrednosti podajnosti pri izvedbi meritve). S tem smo ohranili enake vrednosti, kot jih imajo tuji avtorji v svoji primerjalni lestvici.

Narejena je bila tudi prilagoditev lestvice s parametri na podlagi »južnoafriške« metodologije. Glede na tip vozišča lestvico sestavljajo po tri strukturna stanja s po petimi različnimi parametri. Primerjava je imela poudarek na fleksibilni voziščni konstrukciji (vozišče s tamponsko plastjo). Preračun vrednosti

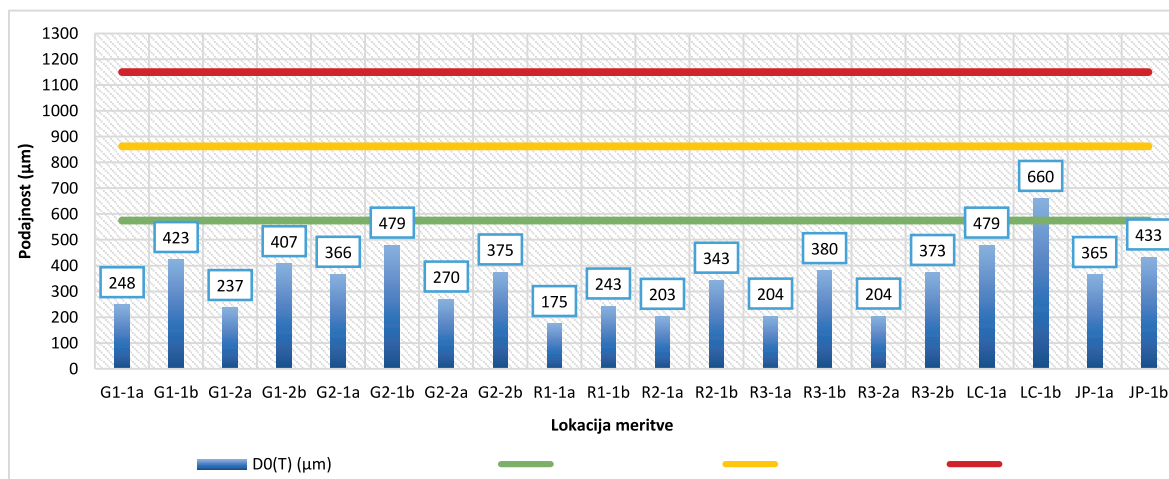
parametrov je bil narejen na enak način kot na primeru irskih smernic. S tem smo spremenili meje za oceno strukturnega stanja po posameznem tipu vozišča.

Na slikah v nadaljevanju primerjamo obravnavane parametre med merjenimi odseki. Vidna so vsa tri strukturna stanja vozišča glede na posamezni parameter za izbrano lokacijo meritve. Za lažjo predstavbo smo jih obarvali z barvami od zelene do rdeče. Z zeleno je označeno zadovoljivo, rumeno opozorilno in z rdečo slabo stanje (meje so določene glede na preglednico 11).

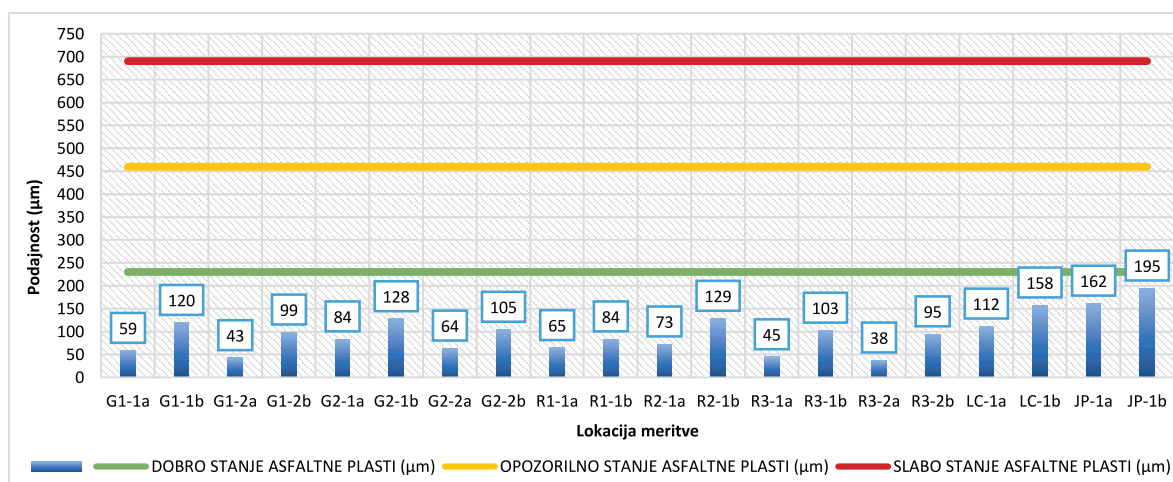
Primerjava je bila narejena tudi na podlagi prilagojene lestvice z opisi parametrov na osnovi irskih smernic. Vse vrednosti parametrov za posamezno lokacijo meritve so prikazane v nadaljevanju. Prav tako smo jih označili od zelene do rdeče barve, in sicer od zelo dobrega stanja do zelo slabega stanja.

Tip vozišča	Ocena strukturnega stanja	Parametri krivulj podajnosti (Deflection Bowl Parameters)				
		D_0 (μm)	RoC (μm)	SCI/BLI (μm)	BDI/MLI (μm)	BCI/LLI (μm)
Vozišče z nevezano nosilno pastjo	Zadovoljivo stanje	< 575	> 115	< 230	< 115	< 57,5
	Opozorilno stanje	575 – 862,5	57,5 – 115	230 – 460	115 – 230	57,5 – 115
	Slabo stanje	> 862,5	< 57,5	> 460	> 230	> 115
Vozišče s cementno stabilizirano nosilno plastjo	Zadovoljivo stanje	< 230	> 172,5	< 115	< 57,5	< 46
	Opozorilno stanje	230 – 460	92 – 172,5	115 – 345	57,5 – 115	46 – 92
	Slabo stanje	> 460	< 92	> 345	> 115	> 92
Vozišče z bitumnom stabilizirano nosilno plastjo	Zadovoljivo stanje	< 460	> 287,5	< 230	< 115	< 57,5
	Opozorilno stanje	460 – 690	115 – 287,5	230 – 460	115 – 172,5	57,5 – 92
	Slabo stanje	> 690	< 115	> 460	> 172,5	> 92

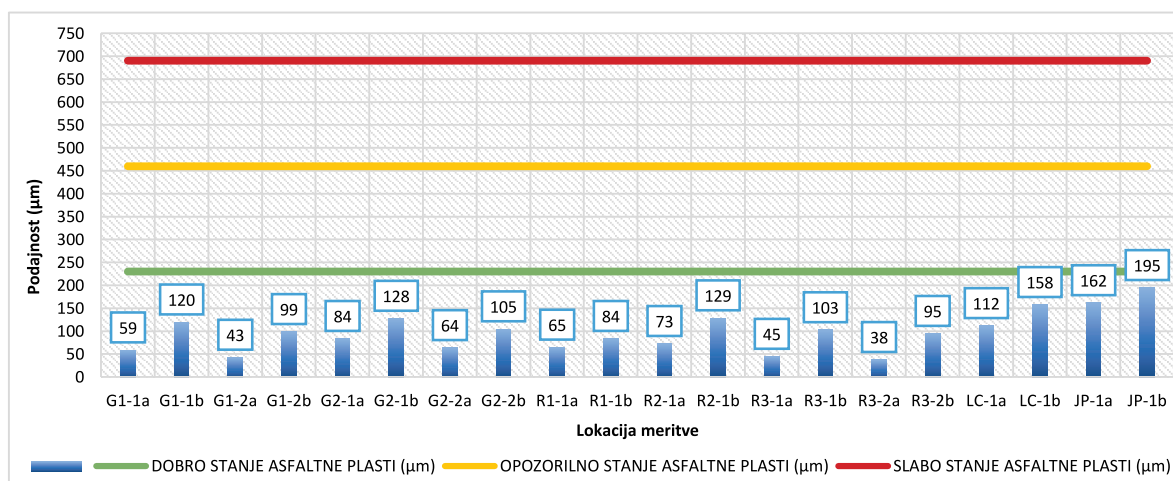
Preglednica 11. Ocene vrednosti za parametre krivulj podajnosti (D_0 , BLI, MLI, LLI in RoC) za različne tipe voziščne konstrukcije, prilagojene na simulacijo obremenitve 50 kN na kolo.



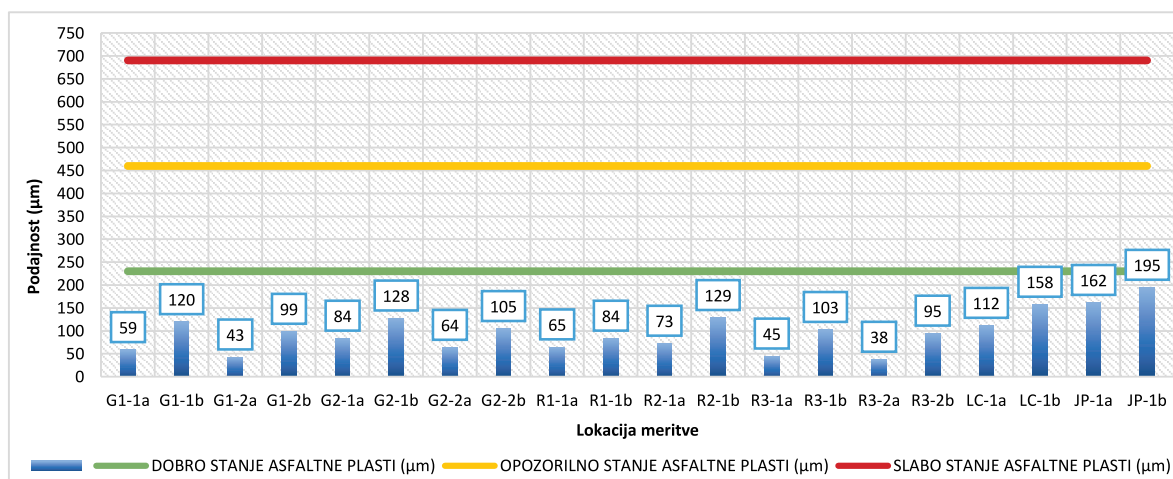
Slika 12. Vrednosti podajnosti za parameter $D_0(T)$ (μm) med posameznimi lokacijami meritev za opise stanja pri simulaciji obremenitve 50 kN na kolo.



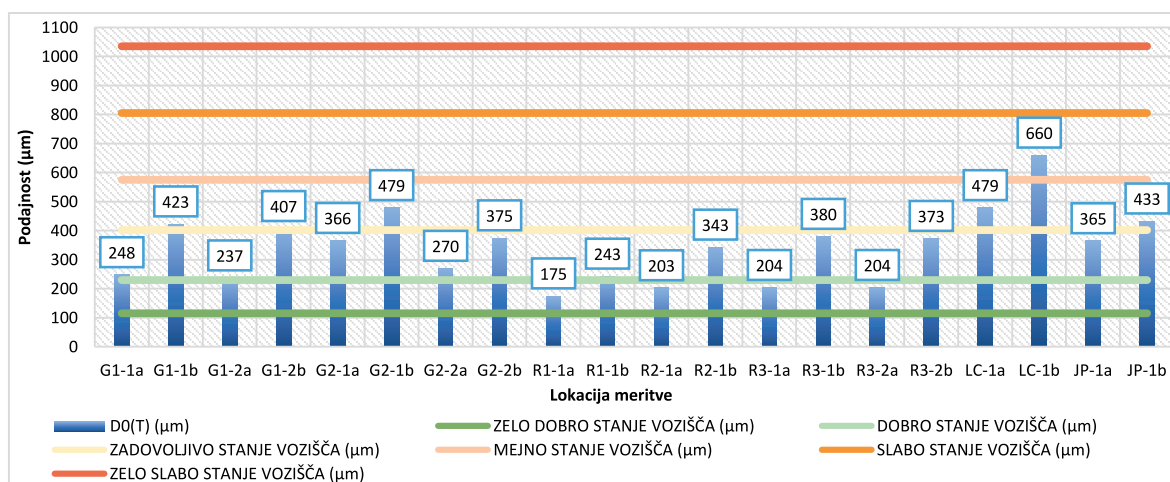
Slika 13. Vrednosti podajnosti za parameter SCI_{300} (µm) med posameznimi lokacijami meritev za opise stanja pri simulaciji obremenitve 50 kN na kolo.



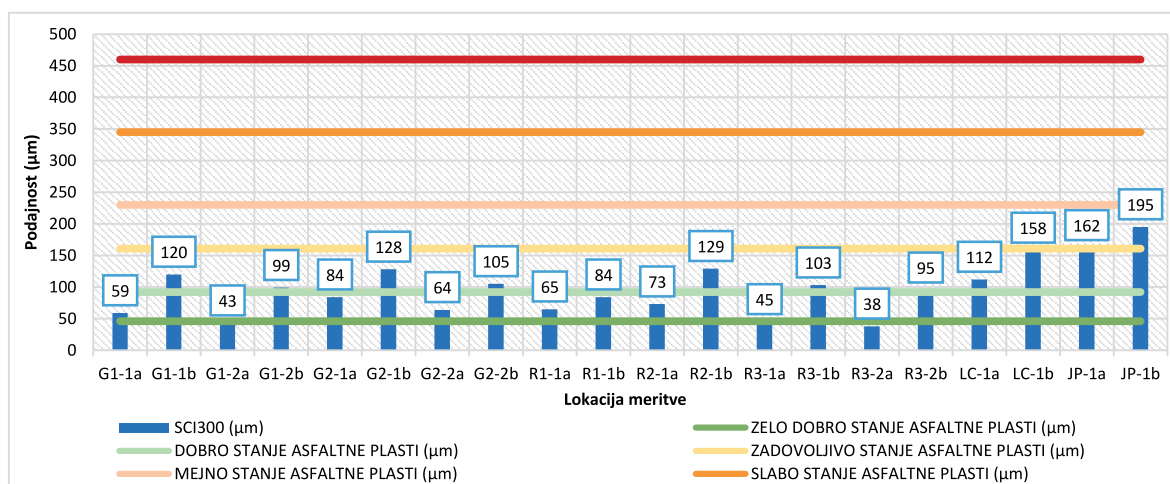
Slika 14. Vrednosti podajnosti za parameter $BDI/MLI (D_{300}-D_{600})$ (µm) med posameznimi lokacijami meritev za opise stanja pri simulaciji obremenitve 50 kN na kolo.



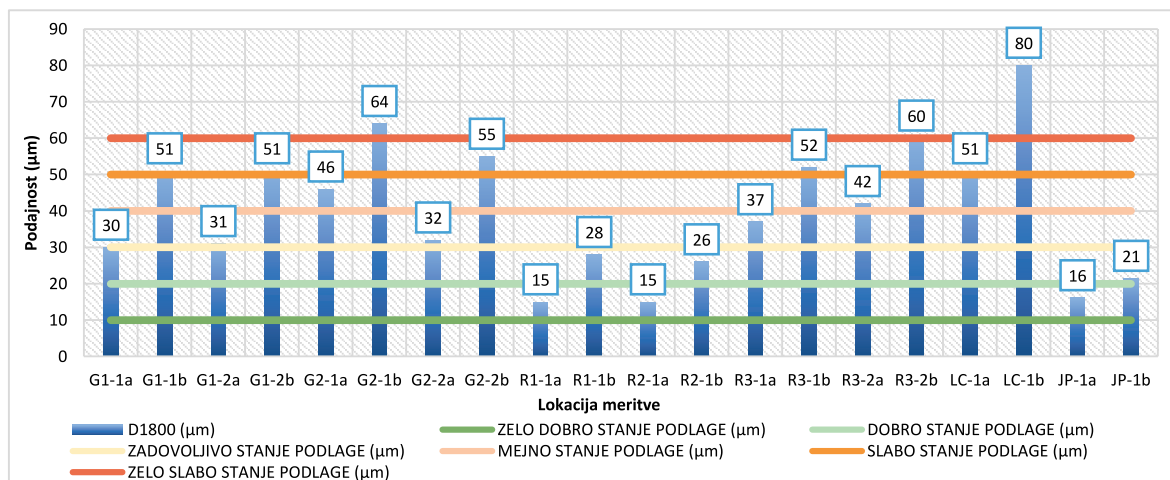
Slika 15. Vrednosti podajnosti za parameter $BCI/LLI (D_{600}-D_{900})$ (µm) med posameznimi lokacijami meritev za opise stanja pri simulaciji obremenitve 50 kN na kolo.



Slika 16. Vrednosti podajnosti za parameter $D_0(T)$ (µm) na osnovi irskih smernic med posameznimi lokacijami meritev za opise pri simulaciji obremenitve 50 kN na kolo.



Slika 17. Vrednosti podajnosti za parameter SCI_{300} (µm) na osnovi irskih smernic med posameznimi lokacijami meritev za opise pri simulaciji obremenitve 50 kN na kolo.



Slika 18. Vrednosti podajnosti za parameter D_{1800} (µm) med posameznimi lokacijami meritev za opise pri simulaciji obremenitve 50 kN na kolo.

Pri interpretaciji meritev podajnosti je treba pojasniti, da višje vrednosti parametrov predstavljajo slabše stanje voziščne konstrukcije in obratno. Po uporabi »južnoafriške« metodologije prihaja do precejšnjega odstopanja pri vrednostih podajnosti v primerjavi z meritvami, ki smo jih dobili na naših obravnavanih odsekih (slike 12–15). Meje parametrov po »južnoafriški« metodologiji so zastavljene previsoko. Po naših izkušnjah meritev podajnosti je parameter $D_0(T)$ (μm) z opisom zadovoljivo stanje bolj primeren za opis slabo stanje. Ocenjujemo, da je omenjena metodologija primernejša za uporabo na cestah, ki je dimenzionirana za manjše prometne obremenitve (regionalno turistične in lokalne ceste, javne poti, gradbiščne ceste itd.). Sledila je obravnava podatkov meritev podajnosti po posameznih parametrih na osnovi irskih smernic. Primerjalna lestvica z razredi posameznih parametrov prikazuje približek rezultatom meritev, ki jih dobivamo v praksi oz. na terenu (slike 16–18). Vrednosti podajnosti za parameter D_{1800} (μm) se v veliki meri ujemajo z našim trenutnim vrednotenjem, tako da ne bo potrebnih večjih sprememb. Po pregledu vrednosti podajnosti po parametru $D_0(T)$ (μm) bomo morali meje posameznih razredov prestaviti višje, saj so trenutne vrednosti podajnosti bolj primerne za avtoceste, kjer je drugačna sestava voziščne konstrukcije.

6 SKLEP

Vse več upravljalcev prometne infrastrukture uporablja neporušne metode za preverjanje oz. ocenjevanje stanja nosilnosti voziščnih konstrukcij. Pri tem je govor o letalski infrastrukturi ter cestni infrastrukturi (javne ceste različnih kategorij). Vsaka od naštetih infrastruktur ima svoje specifičnosti zaradi različnih vgrajenih materialov v voziščne konstrukcije (beton, bitumen ali cement v stabilizirani nosilni plasti, reciklirani materiali, lomljeni kamen) in potrebuje posebno obravnavo. V raziskavo smo zajeli različne odseke cest, na katerih izvajamo meritve na mrežnem in občasno tudi projektnem nivoju. Za omenjene ceste nimamo ocenjevalne lestvice stanja voziščne konstrukcije po surovih podatkih podajnostih, kar včasih predstavlja oteženo delo pri interpretaciji rezultatov meritev. V ta namen smo v raziskavi uporabili dva pristopa ocenjevanja stanja voziščnih konstrukcij, in sicer na osnovi irskih smernic in po »južnoafriški« metodologiji. Prvo smo prilagodili ocenjevalno lestvico, ki temelji po »južnoafriški« metodologiji (preglednica 10) in prikazuje oceno stanja vozišča pri simulaciji obremenitve 50 kN kolo. Ugotovljeno je bilo, da vrednosti podajnosti po posameznem razredu dosegajo opise stanja vozišča za kategorijo cest z nižjimi prometnimi obremenitvami (regionalne ceste tretjega reda ali turistične ceste) ali ceste v upravljanju občin (lokalne ceste in javne poti). Sledila je prilagoditev ocenjevalne lestvice, ki temelji na osnovi irskih smernic, na simuliranje prometne obremenitve 50 kN na kolo. Vrednosti podajnosti, ki so zajete v preglednicah 8 in 9, predstavljajo približek vrednostim podajnosti, ki jih dobimo pri meritvah nosilnosti v Sloveniji na omrežju državnih cest. Po primerjavi obeh ocenjevalnih lestvic po vrednostih podajnosti za posamezni opisani razred je bilo ugotovljeno, da bi lahko z ustrezno prilagoditvijo obe lestvici združili v eno. S tem bi dobili eno primerjalno lestvico za več parametrov in imeli več kazalnikov stanja voziščne konstrukcije ter širšo uporabnost.

Poleg pokazateljev stanja voziščne konstrukcije po surovih podatkih podajnosti smo v preglednici 7 prikazali še parameter $AREA$ (mm), debelinski indeks SN_{eff} in kalifornijski indeks nosilnosti CBR (%) (v nadaljevanju: CBR) po metodi Jameson in AASHTO. Parameter $AREA$ je skupaj z vrednostmi DO (μm) zajet v preglednici 3 in odraža stanje med voziščno konstrukcijo in podlago. Če pogledamo tipične vrednosti za oba parametra v preglednici 3, lahko ugotovimo, da so meje vrednosti podajnosti po parametru DO (μm) za asfaltna (za debelejša od 200 mm) in betonska vozišča precej visoke. Ostale tri vrste tipov vozišč iz preglednice 3 pa bi lahko uporabili na malo prometnih cestah, kjer imamo šibke voziščne konstrukcije.

Debelinski indeks SN_{eff} in CBR (%) sta namenjena za preveritev obstoječega stanja voziščne konstrukcije. Po pregledu meritev je vidno, da so tam, kjer imamo togo podlago, vrednosti indeksa CBR (%) visoke in obratno, pri vmesnih rezultatih pa lahko pride do večjih odstopanj. V našem primeru sta bila omenjena indikatorja izračunana zgolj za predstavitev možnosti uporabe surovih podatkov meritev podajnosti. Oba indikatorja običajno interpretiramo skupaj s porušnimi preiskavami (razkopi in vrtinami) in z rezultati laboratorijskih testov.

Nadaljnje bomo naredili dodatne raziskave z meritvami nosilnosti na odsekih, ki bodo predmet rekonstrukcij, novogradenj in obnov. S tem bomo zadostili pogoju o dovolj kakovostnih vhodnih podatkih glede vgrajenih materialov in debelinah plasti, številu meritev in želene voziščne konstrukcije (t. i. testno polje). Ostale odseke bomo izbrali glede na geografsko lego, kategorijo ceste in glede na prometne obremenitve.

Natančneje bo treba razdelati tudi posamezne razrede z opisi in podajnostmi znotraj ocenjevalnih lestvic ter narediti primerjavo med ostalimi kazalniki stanja voziščnih konstrukcij (izračunanimi moduli elastičnosti posameznih plasti in posledično tudi PŽD).

7 LITERATURA

AASHTO, Guide for Design of Pavement Structures, Spletna stran portala AASHTO Structure, Strategic Plan and More – <https://habib00ugm.files.wordpress.com/2010/05/aashto1993.pdf>, American Association of State Highway and Transportation Officials, datum vpogleda 1. 11. 2022, 2022.

Borecky, V., Haburaj, F., Artagan, S. S., & Routil, L. Analysis of GPR and FWD data dependency based on road test field surveys. *Materials Evaluation*, 77(2), 214–225, 2019.

Bateman, D., Carswell, I., Caudwell, L., James, D., Ferne, B., Meitei, B., Jones, C., Practical verification of the theory behind long-life asphalt pavements, 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague, 2016.

Deblois, K., Bilodeau, J. P., Doré, G. Use of falling weight deflectionometer time history data for the analysis of seasonal variation in pavement response. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37, 1224–1231. 10.1139/L10-069, 2010

Horak, E., Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters, *Journal of the South African Institution of Civil Engineers*, 50, 1-9, 2008.

Jameson, G., Development of procedures to predict structural number and subgrade strength from falling weight deflectometer deflections. ARRB Transport Research, Vermont, South Victoria, 1993.

Jamnik, J., Lipoglavšek, B., Bajec, J., Marinko, B., Cezar, J., Žmavc, J., Podgoršek, F., Stock, T., Prosen, J., Meritve nosilnosti voziščnih konstrukcij z deflektometrom s padajočo utežjo (FWD – Falling Weight Deflectometer) kot osnova za dimenzioniranje obstoječih voziščnih konstrukcij, Razvojno raziskovalni projekt, Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste (DRSC), 2000.

Jurgele, M., Želodec, D., Deflektometer s padajočo utežjo – princip delovanja in primeri uporabe v praksi, 14. Slovenski kongres o prometu in prometni infrastrukturi, Portorož, 2018.

Kovačič, B., Želodec, D., Doler, D. Prototype of the Runway Monitoring Process at Smaller Airports: Edvard Rusjan Airport Maribor, *Processes*, 8(12). doi: 10.3390/pr8121689, 2020.

Pavement Interactive, Spletna stran portala Pavement Interactive - <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-evaluation/fwd-area-parameter/>, Pavement Interactive - free online knowledge base for the paving industry, datum vpogleda 1. 11. 2022, 2022.

Pierce, L., Bruinsma, J., Smith, K. D., Wade, M., Chatti, K., Vandenbossche, J., Using Falling Weight Deflectometer Data With Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for Deflection Testing, Analysis, and Interpretation, Final Report October 2006–December 2010, Federal Highway Administration, 2017.

Roberts, J., Michel, N., Paine, D. STEP: A New Estimation of Flexible Pavement Configuration & Remaining Structural Life, *Road and Transport Research Vol. 15 No. 4*, 2006.

SADC, Guideline on Low-Volume Sealed Roads, Spletna stran portala gTKP - <https://www.gtkp.com/assets/uploads/20100103-131139-9347-SADC%20Guideline-Part2.pdf>, The Global Transport Knowledge Partnership (gTKP), datum vpogleda 1. 11. 2022, 2022.

TII, Guidelines for the Use of the Falling Weight Deflectometer in Ireland, Transport Infrastructure Ireland, 2000.

TSC 06.520:2009, Projektiranje dimenzioniranje novih asfaltnih voziščnih konstrukcij, Ljubljana: Ministrstvo za promet, Direkcija republike Slovenije za ceste, 2009.

Želodec, D., Jurgele, M., Poročilo o meritvah podajnosti in analizah nosilnosti voziščnih konstrukcij na omrežju avtocest, Poročilo projektne ravni meritev, Družba za avtoceste v Republiki Sloveniji (DARS), d. d., 2015.

Želodec, D., Poročilo o meritvah podajnosti in analizah nosilnosti voziščnih konstrukcij na omrežju državnih cest v upravljanju DRSI, Redno letno poročilo meritev mrežne ravni, Direkcija Republike Slovenije za infrastrukturo (DRSI), 2020.