

KORIŠTENJE DEFLEKTOGRAFA S PADAJUĆIM TERETOM I GEORADARA ZA UTVRĐIVANJE POSTOJEĆE I PROJEKTIRANJE POTREBNE NOSIVOSTI KOLNIKA

prof. dr. sc. Tatjana Rukavina, dipl.ing.građ.



Seminar
ASFALTNI KOLNICI
Zagreb, 06.-07. veljače 2014.

Sadržaj

- UVOD
- NOSIVOST KOLNIČKIH KONSTRUKCIJA
- NERAZORNE METODE OCJENE NOSIVOSTI
- FWD – UREĐAJ S PADAJUĆIM TERETOM
- GPR – GEORADAR
- KORIŠTENJE FWD-A I GPR-A ZA
UTVRĐIVANJE POSTOJEĆE I
PROJEKTIRANJE POTREBNE NOSIVOSTI
KOLNIKA - PRIMJER
- ODREĐIVANJE STRUKTURNOG BROJA SN
- ZAKLJUČAK

UVOD

- zahtjevi za rekonstrukcijom ili pojačanjem kolničkih konstrukcija na postojećim prometnicama radi njihovog prilagođavanja sadašnjem i budućem prometu, iziskuju rješavanje niza problema od kojih su najznačajniji:
 - utvrđivanje **nosivosti kolničke konstrukcije** prometnica u eksploataciji i njihove mogućnosti podnošenja opterećenja od prometa;
 - procjena **vijeka trajanja kolničke konstrukcije** određene geometrije i sastava slojeva u funkciji sadašnjeg i budućeg prometnog opterećenja;
 - utvrđivanje **minimalnih potrebnih dimenzija pojačanja** kolničke konstrukcije i pojedinih slojeva s obzirom na svojstva materijala slojeva i posteljice te vanjske utjecajne činioce
 - utvrđivanje **minimalnih zahtjeva za materijale** slojeva kojima se kolnička konstrukcija pojačava i **kriterija za ocjenu kvalitete** njihove pripreme i ugradnje

NOSIVOST KOLNIČKIH KONSTRUKCIJA

- suma pozitivnih karakteristika koje kolničku konstrukciju određenog tipa čine sposobnom da, bez obzira na različite klimatske uvjete, preuzme i prenese na tlo posteljice određeno opterećenje od prometa (dosadašnjeg i budućeg) bilo po intenzitetu ili po težini, bez većih štetnih djelovanja na njenu eksploatacijsku sposobnost (izraženu ravnošću površine kolničkog zastora, udobnošću vožnje, vijekom trajanja ili na neki drugi način)

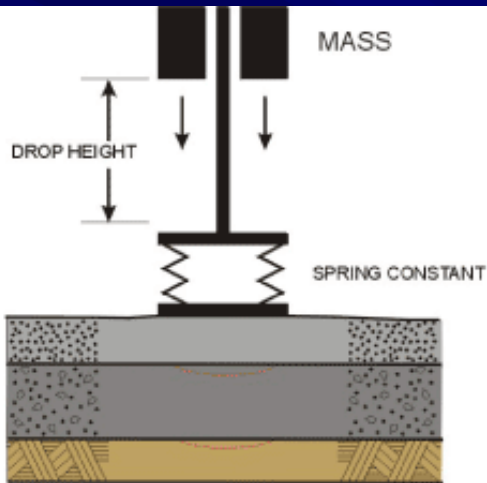
NOSIVOST KOLNIČKIH KONSTRUKCIJA

- složenost problematike i veliki broj različitih činilaca koji utječu na nosivost kolničke konstrukcije onemogućavaju njeno direktno utvrđivanje samo jednom metodom ispitivanja
- pri utvrđivanju nosivosti kolničke konstrukcije odnosno očekivanog vijeka trajanja, koristi se istovremeno nekoliko metoda direktne i indirektno ocjene strukturalnog stanja

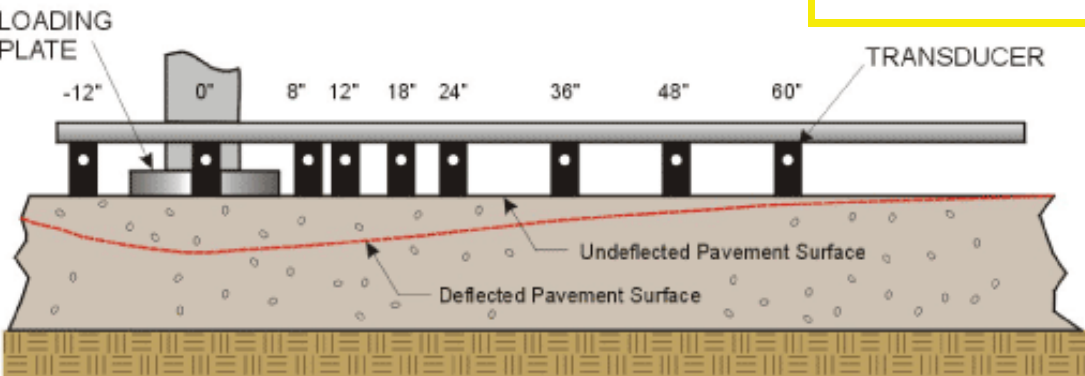
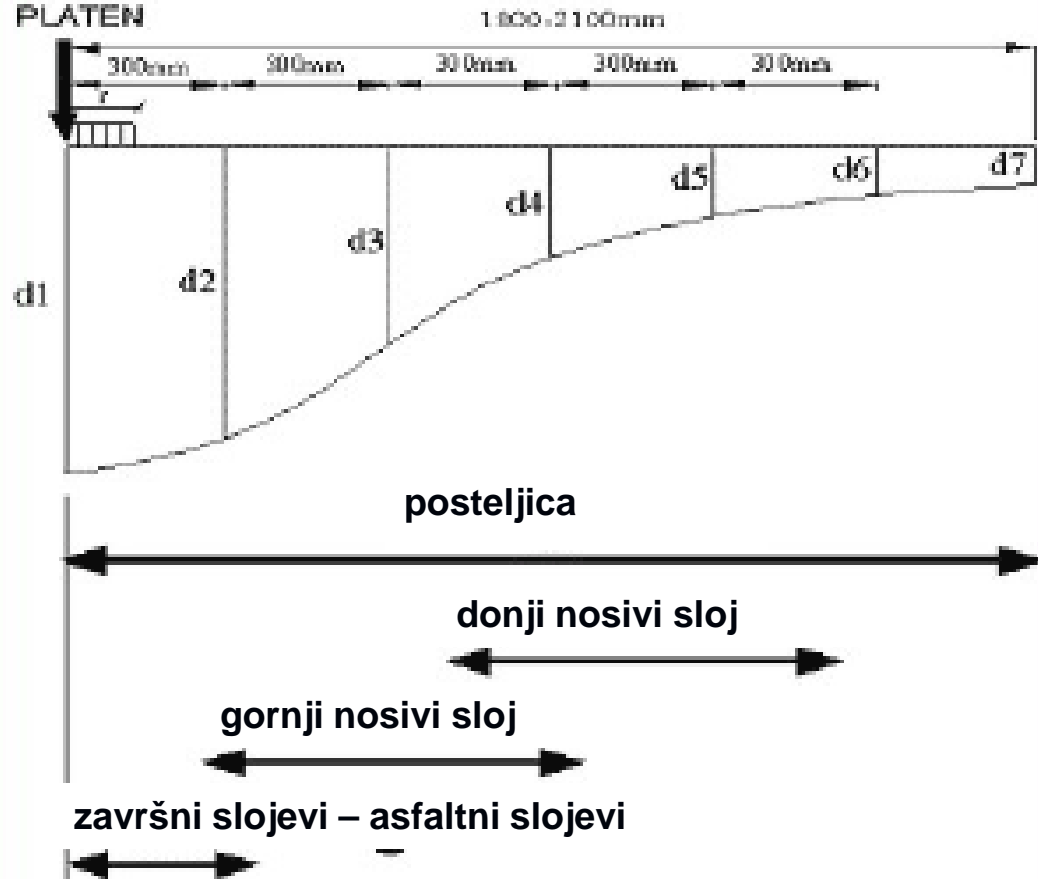
NOSIVOST KOLNIČKIH KONSTRUKCIJA

- ocjena strukturalnog stanja treba dati uvid u ukupnu nosivost kolnika odnosno mogućnost da se ponaša zadovoljavajuće uz minimalnu pojavu deformacija i oštećenja pod djelovanjem prometnog opterećenja (NCHRP)
- nosivost kolnika, obično se određuje kroz ocjenu mehaničkih svojstava svakog sloja kolničke konstrukcije kao primjerice **modula elastičnosti, svojstava umora materijala, uvjeta deformacija i preostalih vlačnih naprezanja**
- dvije uobičajene metode za vrednovanje tih parametara
 - jezgrovanje, pri kojem se jezgre izvađene iz kolnika ispituju u laboratoriju ili
 - nerazorna, terenska ispitivanja

NERAZO OCJENI



CENTRE OF
LOADING
PLATEN



FWD Concept

ovratne defleksije uslijed
ik bazena defleksije

NERAZORNE METODE OCJENE NOSIVOSTI

- opće je prihvaćeno 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 skoro elastični karakter, odnosno po rasterećenju progibna se površina vraća praktički u nedeformirani oblik površine kolnika
 - kod slabih, dotrajalih kolnika defleksija pod opterećenjem je znatno veća, a po rasterećenju se vraća samo dio deformacije (elastična defleksija) dok dio deformacije ostaje (plastična defleksija).

NERAZORNE METODE OCJENE NOSIVOSTI

- defleksije je moguće mjeriti različitim, jednostavnijim ili složenijim uređajima, i to pod statičkim ili dinamičkim opterećenjem
- djelovanje prometa je dinamičko
- razvojem tehnike i mjernih uređaja, uređaji sa statičkim djelovanjem, kao primjerice Benkelmanova greda, putujući deflektometar ili deflektometar La Croix sve su manje u uporabi
- različiti uređaja sa dinamičkim djelovanjem kao što su to laki i teški vibratori, Road Rater, Dynaflect....
- isprofilirao se uređaj s padajućim teretom – falling weight deflectometar - FWD, o kojem će biti više riječi

UREĐAJ S PADAJUĆIM TERETOM FWD

- jedan od najraširenijih nerazornih mjernih uređaja, kojim se određuje strukturalno stanje kolnika
- uređaj koji igra izuzetno važnu ulogu pri odabiru postupaka održavanja i rehabilitacije kolnika
- uređaj kojim je moguće dobiti brzu i ponovljivu terensku karakterizaciju krutosti slojeva kolničke konstrukcije

UREĐAJ S PADAJUĆIM TERETOM FWD

■ može biti:

- sastavni dio specijalnog vozila

- veća pokretljivost - bolje manevarske sposobnosti, manji polumjer okretanja vozila
- smanjena sigurnost vozila zbog preinaka oko ugradnje uređaja, potencijalno veća razina buke za operatere i teže servisiranje uređaja

UREĐAJ S PADAJUĆIM TERETOM FWD

m

a



FWD - Koji su osnovni dijelovi?

- osnovni dijelovi
 - kontrolni sistem
 - uteg i ploča preko koje se prenosi opterećenje
 - hidraulika
 - geofoni



FWD - Kako se provodi ispitivanje?

- poželjno je prije provođenja ispitivanja provesti regulaciju prometa ili osigurati pratnju
- nakon postavljanja na mjernu lokaciju impulsno se opterećenje ponavlja nekoliko puta, **obično četiri**,
- prvo se mjerenje provodi kao pripremno dok su ostala mjerenja ona koja se kasnije razmatraju prilikom interpretacije rezultata
- prilikom mjerenje potrebno je bilježiti **temperaturu zraka i površine kolnika**
- ti se podaci uzimaju u obzir prilikom analiza

FWD - Kako radi?

- dinamičkim se opterećenjem simulira veličina i trajanje opterećenja koje se prenosi preko kotača vozila
- pomoću serije geofona – senzora za mjerenje defleksije mjeri se odgovor kolnika u obliku vertikalne deformacije ili defleksije na različitim udaljenostima od mjesta predaje impulsnog opterećenja
- udaljenost geofona moguće je prilagoditi, ovisno o zahtjevima korisnika - uobičajeno na međusobnoj udaljenosti od 30 cm

FWD - Kako radi?

FWD - Osnovni utjecajni činitelji?

- na rezultate mjerenja prvenstveno utječu
 - debljina slojeva,
 - vrsta materijala slojeva,
 - kvaliteta materijala,
 - nosivost posteljice,
 - utjecaj okoline,
 - diskontinuiteti i varijacije sastava kolničke konstrukcije.

FWD - Zašto ga upotrijebiti?

- uređaj daje izuzetno vrijedne podatke koje je moguće koristiti:
 - prilikom projektiranja pojačanja kolničkih konstrukcija,
 - različite forenzničke studije kolnika,
 - odabira strategije održavanja ili rekonstrukcije,
 - ocjena nosivosti kolnika na razini mreže ili projekta,
 - utvrđivanje zona smanjene nosivosti u trenutku kad još nije došlo do pojave oštećenja koja se mogu vizualno detektirati

FWD - Interpretacija rezultata?

- provodi se postupkom koji se uobičajeno naziva “**backcalculation**” ili **proračun unatrag**
- složeni iterativni postupak u kojem se određuje **modul elastičnosti slojeva E** kolničke konstrukcije
- provodi se pomoću računalnih programa
- kod interpretacije posebnu pažnju treba obratiti na to da pretpostavke uzete u računalnom programu odgovaraju stanju na prometnici na kojoj su izvršena mjerenja, što zahtijeva kalibraciju ili prilagodbu uređaja

FWD - Interpretacija rezultata?

- u Hrvatskoj, GF Zagreb
 - ELMOD6
 - ROAD DOCTOR i PAVERS
- osnovni ulazni parametri za proračun:
 - defleksije,
 - debljina slojeva,
 - Poissonov koeficijent
 - procijenjena početna vrijednost modula elastičnosti

Options Show Calibrate Units

Chainage from 75.5 to 76.001

Contact stress 0.705 Radius 150

From drop 1 to 1

RMS abs % minimize

Use first 9 geophones

Thickness	E	ν_y	N	Emin	Emax
136	<input checked="" type="checkbox"/> 2500	0.35	<input type="checkbox"/> 0	10.0	99999.0
200	<input checked="" type="checkbox"/> 3000	0.35	<input type="checkbox"/> 0	10.0	99999.0
250	<input checked="" type="checkbox"/> 300	0.35	<input type="checkbox"/> 0	10.0	99999.0
	<input checked="" type="checkbox"/> 50	0.35	<input type="checkbox"/> -0.5	10.0	99999.0

Rock

Save seed values

Select point

Fit point Save point

Fit and save all points

Generate FEM mesh with

30 rows/columns

EDGEmesh

FEMmesh

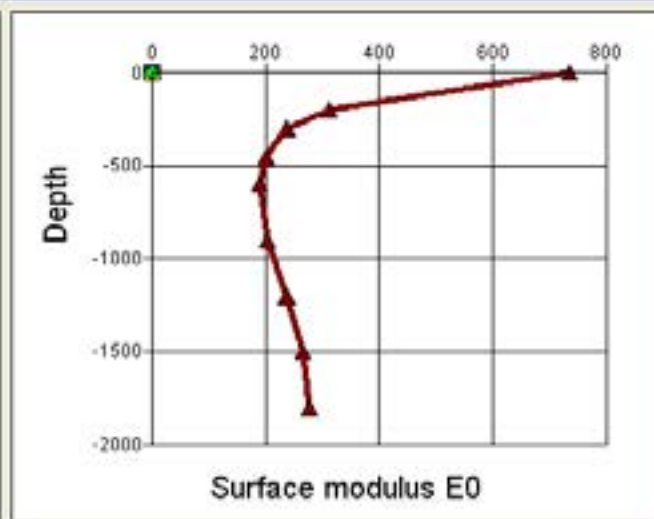
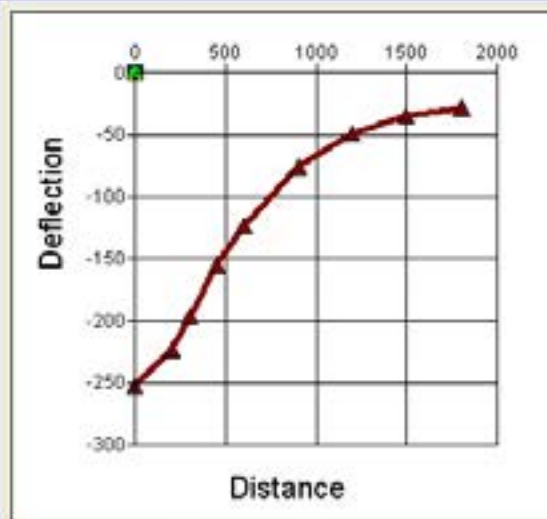
Close FEM/LET/MET

Deflections FEM LET MET

Distance

0	252.0		
200	223.0		
300	196.0		
450	155.0		
600	123.0		
900	76.0		
1200	49.0		
1500	35.0		
1800	28.0		

Surface modulus



Refresh

Clear

Interrupt

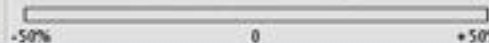
Previous

Next point

Hide graph

Search Procedure

Offset % 10 Steps 1



Temperature Status

Asphalt	Not recorded	°C
Surface	7.2 to 12.6	°C
Air	8.2 to 11.3	°C

Asphalt Temperature

- Use as recorded
- Use surface temperature
- Use BELLIS °C [Link](#)
- Not required

Radius of Curvature

Deflection Basin Fit

FEM/LET/MET

Stop Calculation

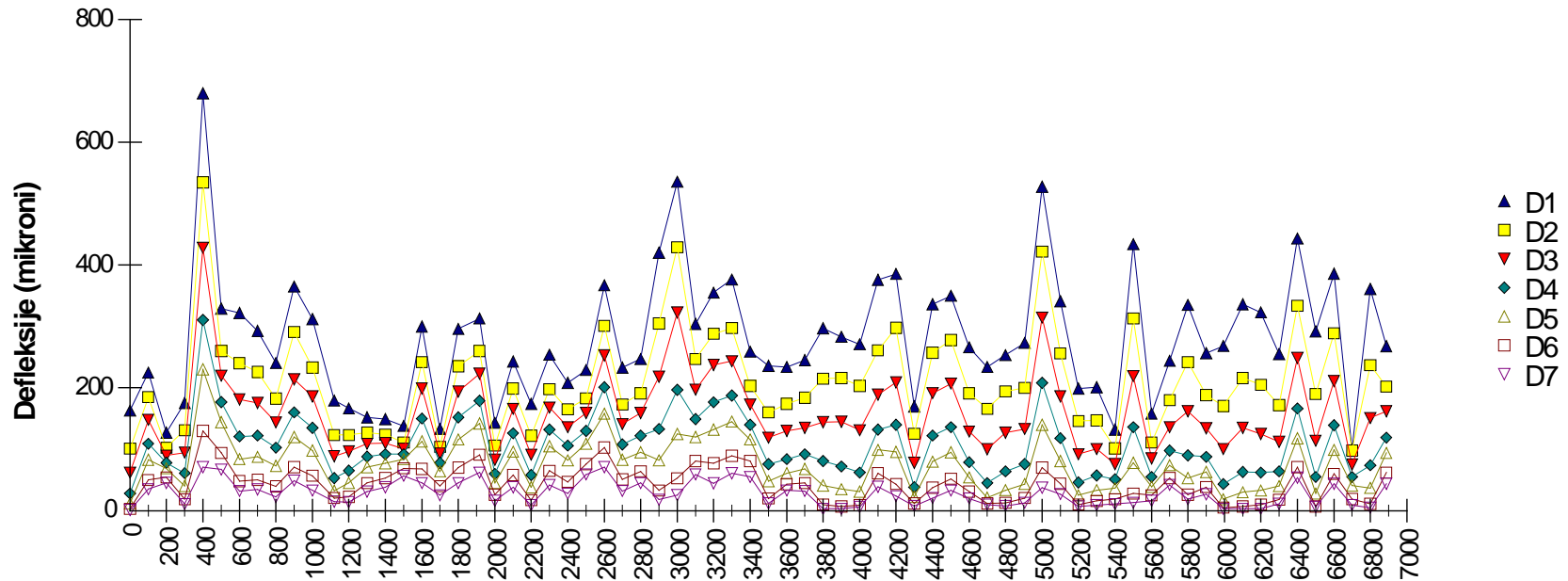
Show modul from to

Reference Modul

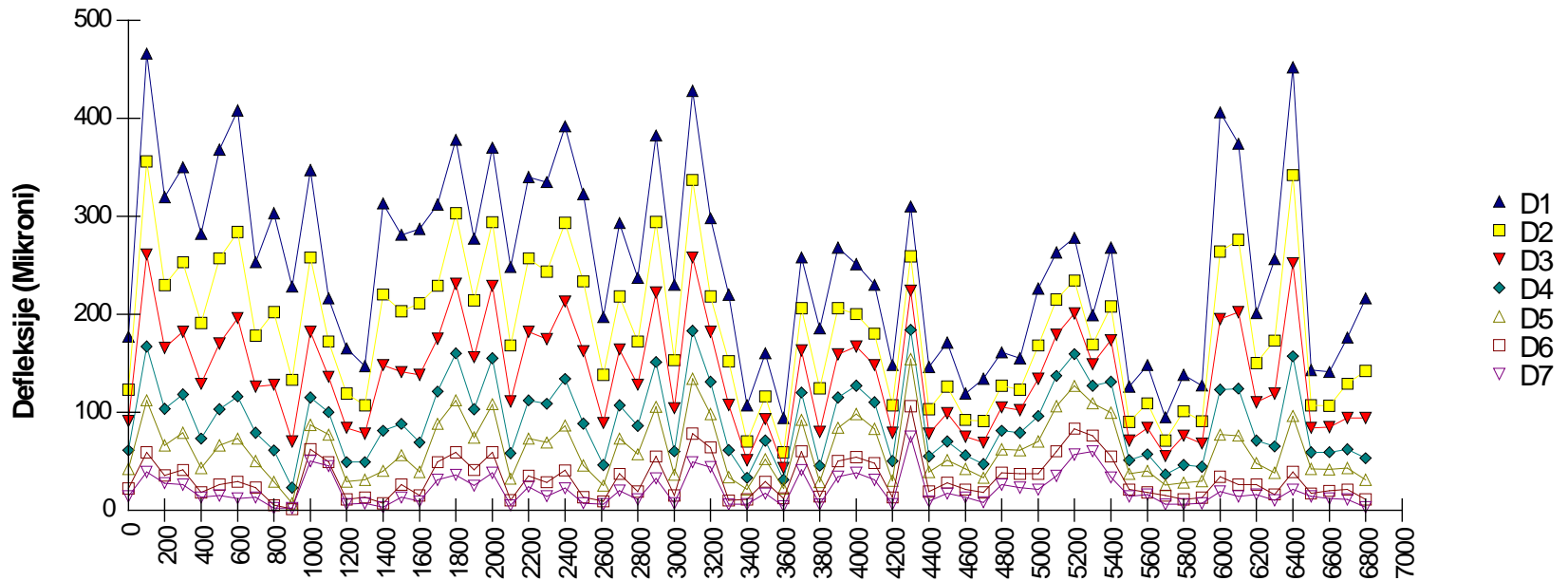
View Plot

Close

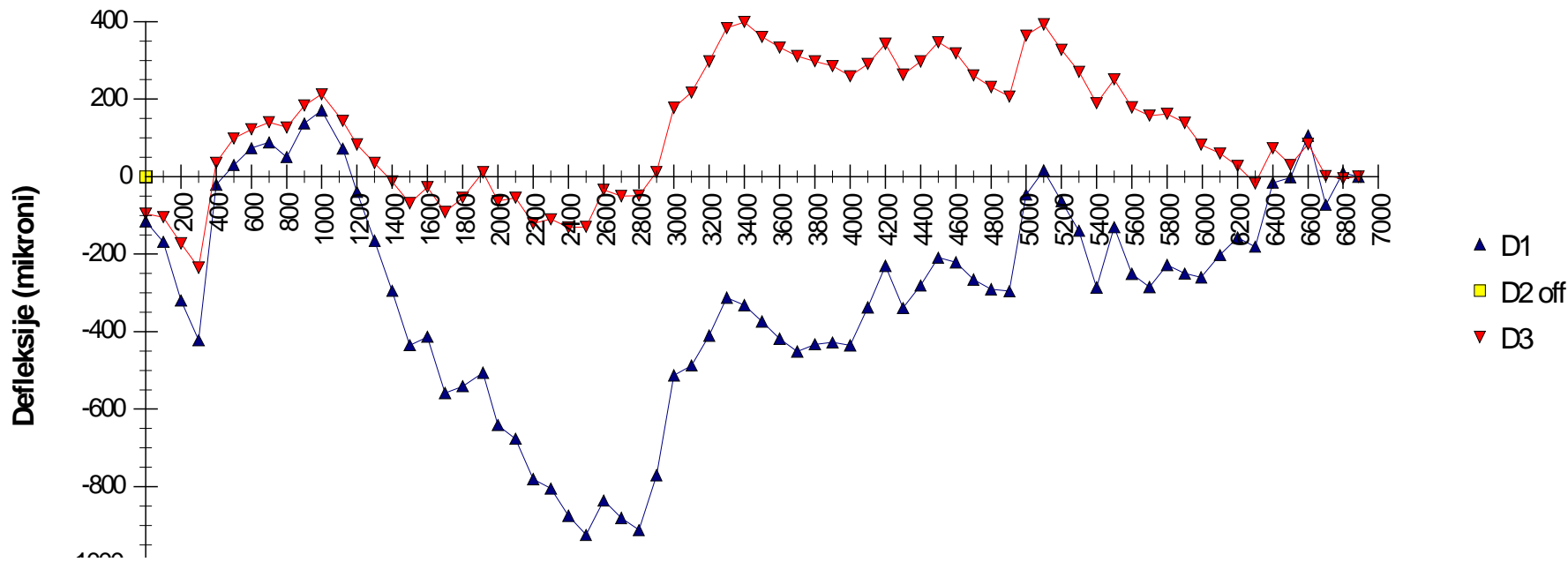
Izmjerene defleksije



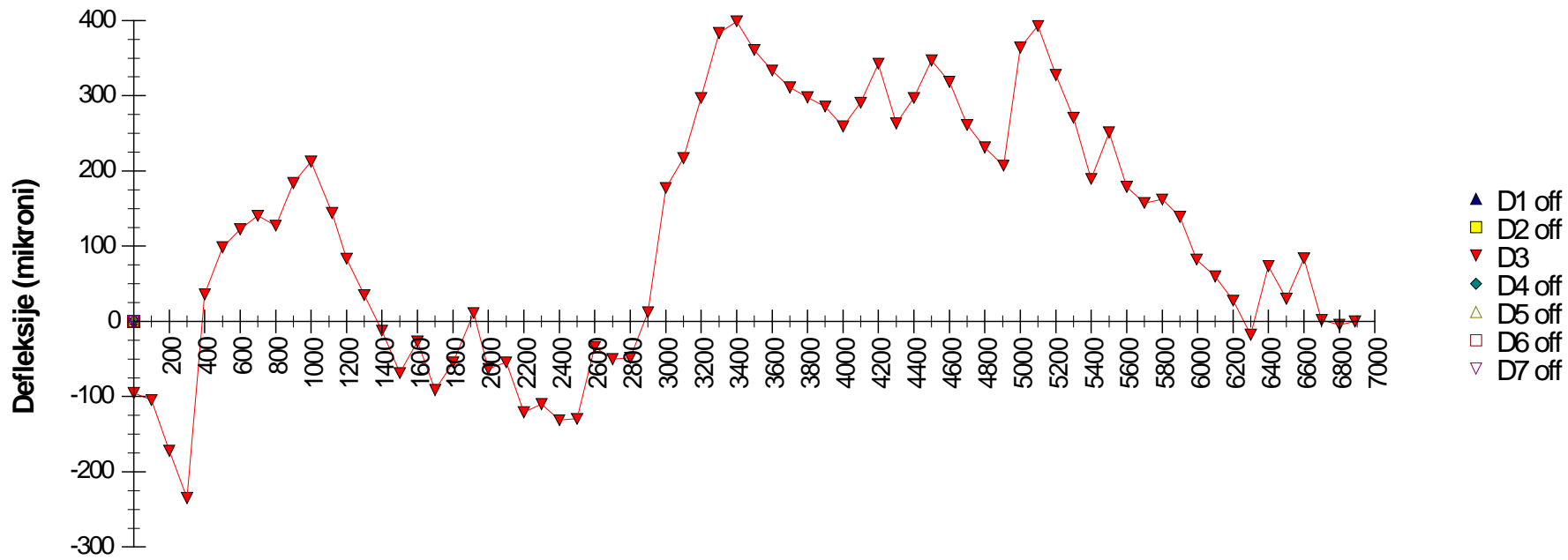
Izmjerene defleksije



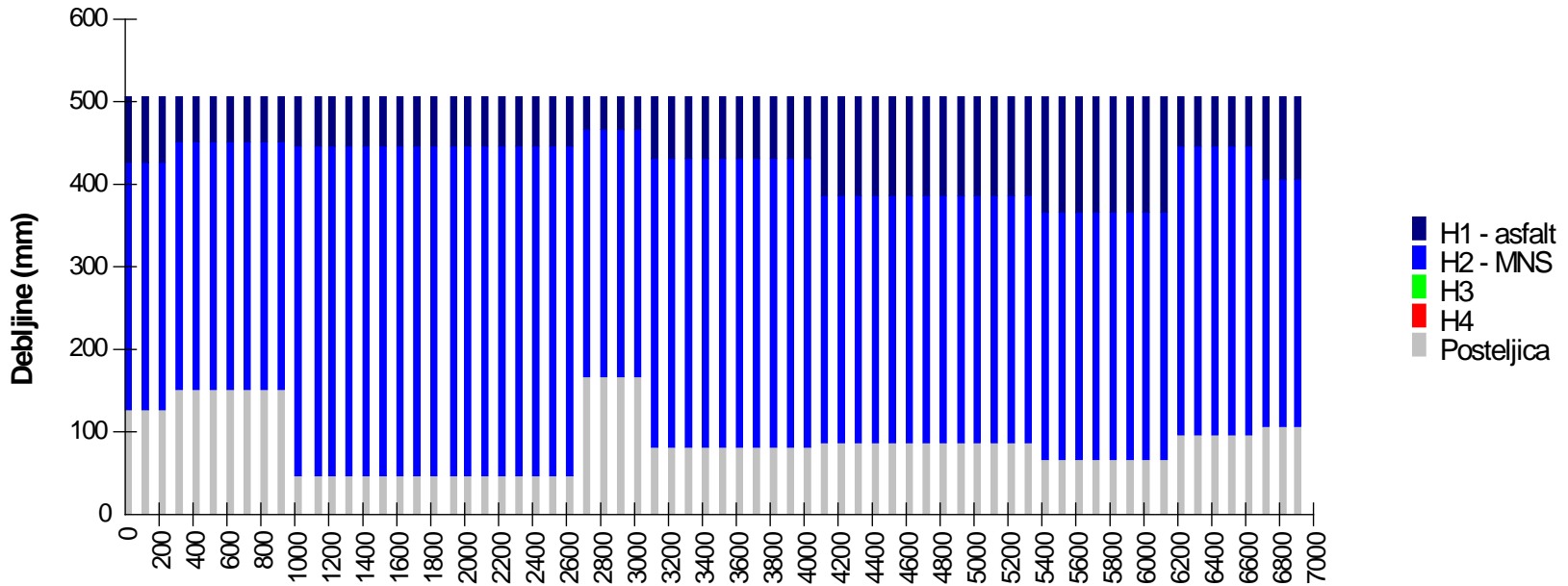
Defleksije, akumulirane razlike, D1 i D3



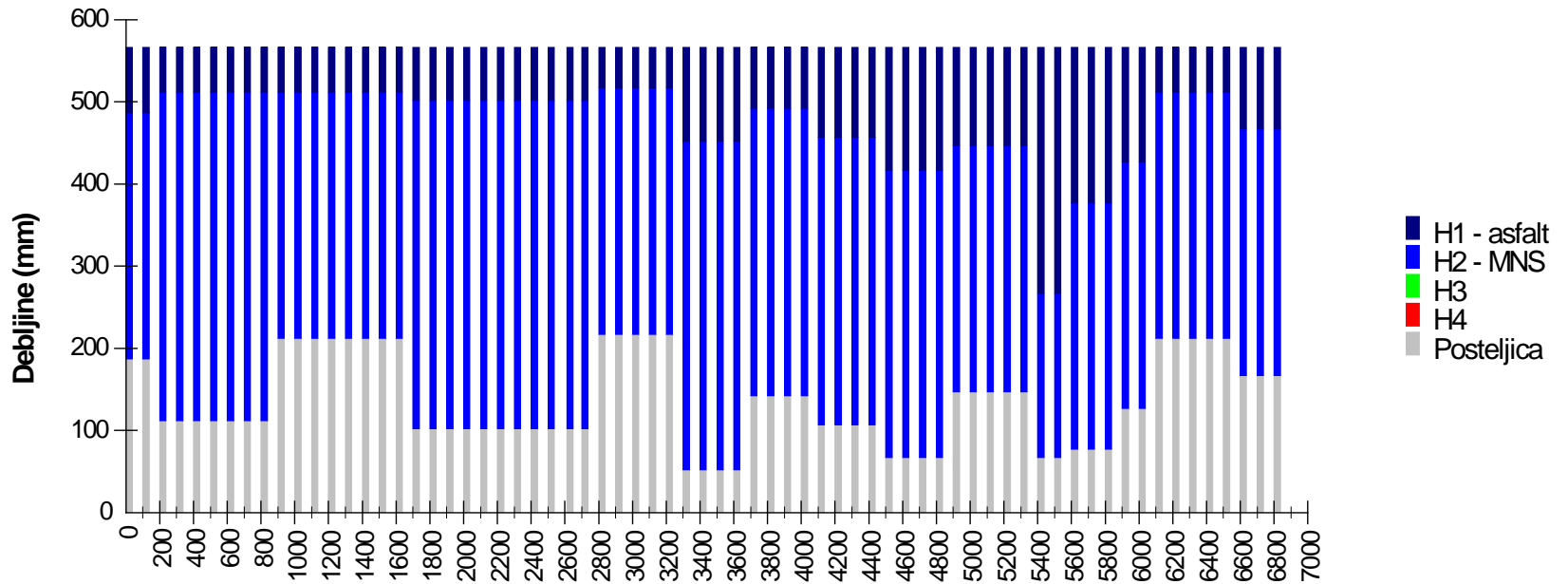
Defleksije, akumulirane razlike, D3



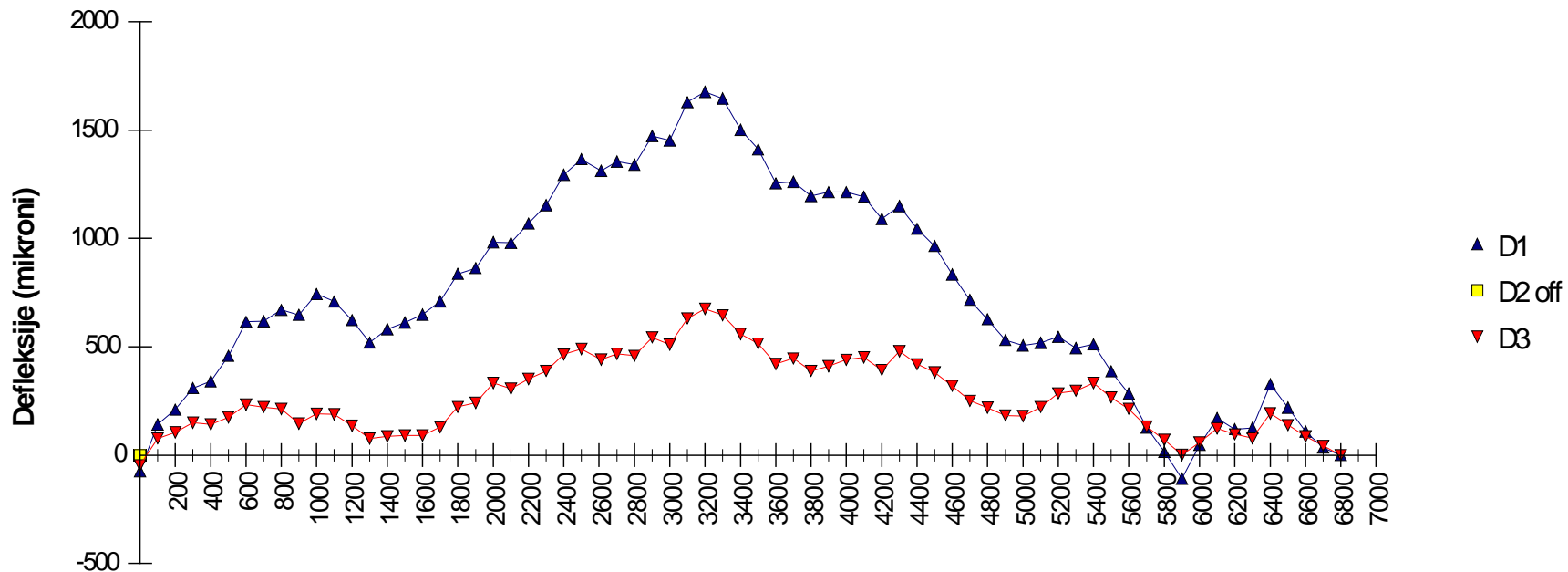
Debljine slojeva



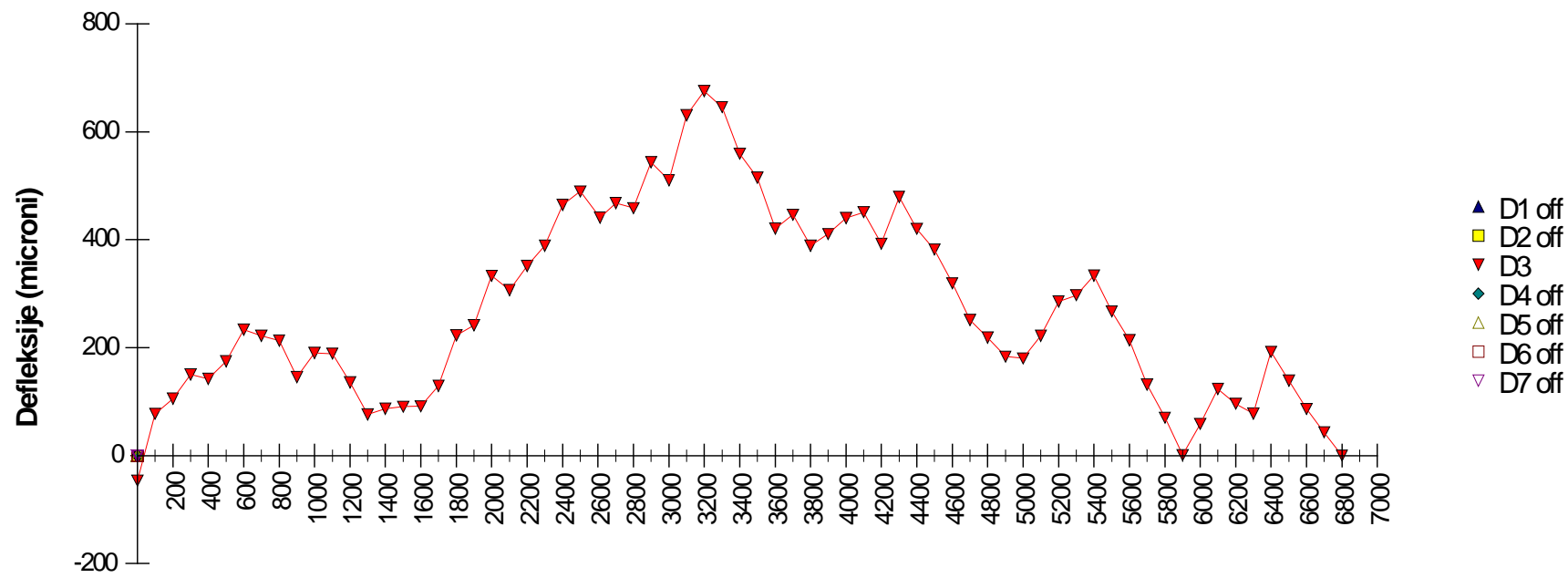
Debljine slojeva



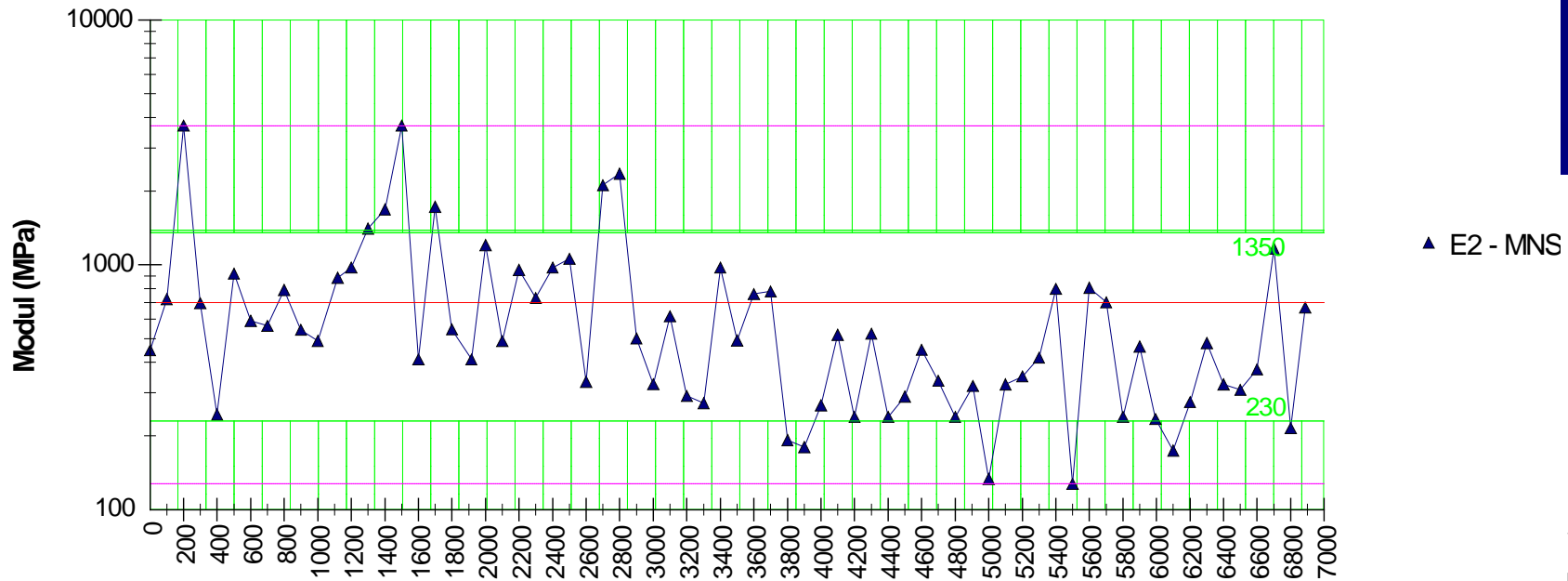
Defleksije, akumulirane razlike, D1 i D3



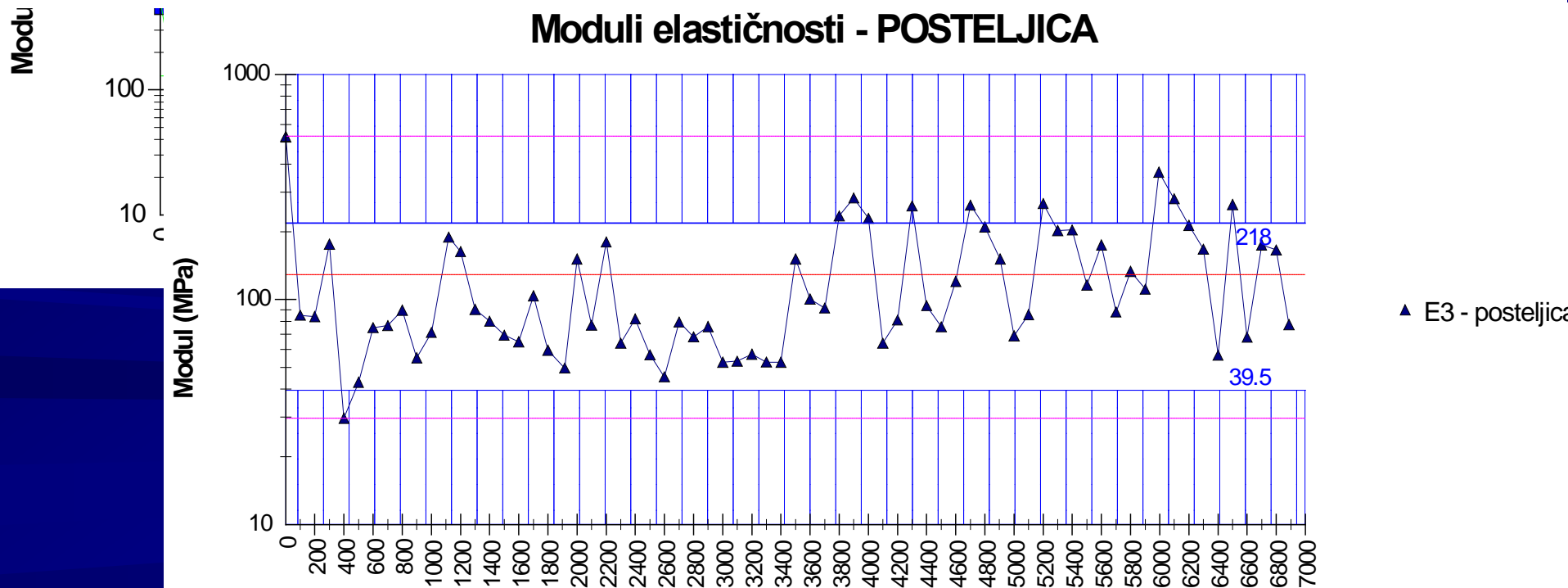
Defleksije, akumulirane razlike, D3



Modul elastičnosti - MNS



Moduli elastičnosti - POSTELJICA



FWD - Interpretacija rezultata?

- pored određivanja vrijednosti modula elastičnosti E slojeva moguće je odrediti i **preostali životni vijek konstrukcije**
- kad se odrede moduli elastičnosti slojeva, moguće je proračunati naprezanja i deformacije u kritičnim presjecima kolničke konstrukcije
 - vertikalno tlačno naprezanje na razini posteljice kao i
 - horizontalna vlačna naprezanja s donje strane asfaltnih slojeva odnosno cementom stabiliziranog nosivog sloja,
- računalnim programima za izračun naprezanja i deformacija - BISAR, CIRCLY, ELMOD, PAVERS

FWD - Interpretacija rezultata?

- izračunata naprezanja i deformacije mogu se upotrijebiti za izračun broja ponavljanja standardnog osovinskog opterećenja koje kolnička konstrukcija još može podnijeti prije nego dođe do pojave umora materijala ili sloma
- preostali životni vijek kolničke konstrukcije izračunava se koristeći podatke o prometu

FWD - Prednosti

- poznavanje trenutnog stanja konstrukcije od velike je važnosti za uspjeh bilo kojeg projekta rehabilitacije ili rekonstrukcije
- FWD ima prijeko potrebnu ulogu u ocjeni strukturalnog stanja kolnika
- cilj - manji troškovi, poboljšana kvaliteta kolnika traže i precizniju odredbu kvalitete slojeva
- određivanje projektnih parametara kao što su krutost i modul neophodnima
- primjenom FWD mjerenja , analiza kolnika i projektiranje provode se na daleko realnijim osnovama od inženjerske procjene - uštede

FWD - Nedostaci

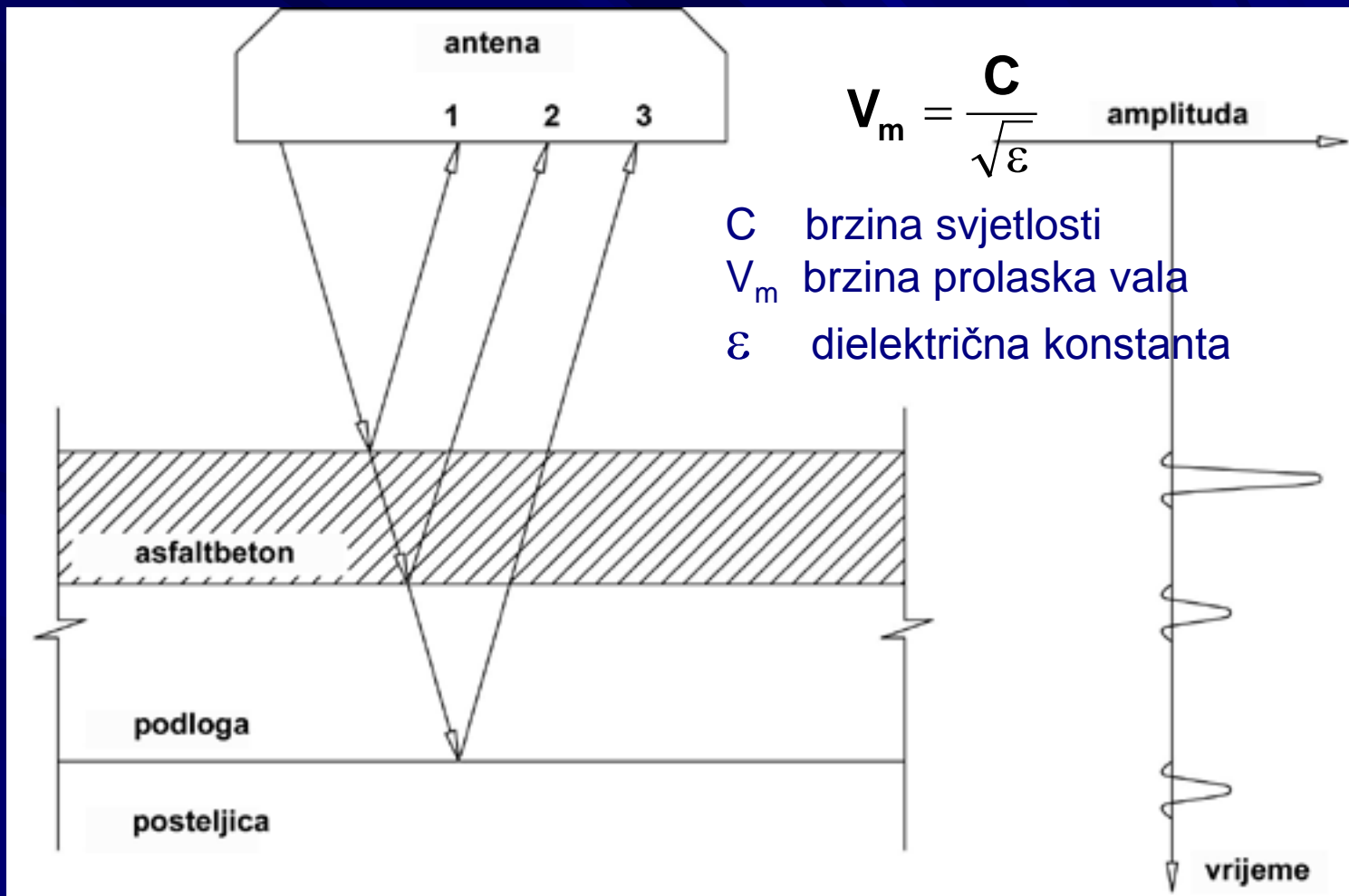
- početni troškovi nabave opreme vrlo su visoki
- veća brzina i točnost mjerenja – ali za potrebe kalibracije i analize dobivenih podataka osoblje koje rukuje uređajem treba biti dobro educirano

Ground Penetrating Radar - GPR

- nerazorna metoda ispitivanja kolničkih konstrukcija
- koristi se za
 - kartiranje,
 - opisivanje i lociranje karakteristika potpovršinskih slojeva kolničkih konstrukcija i mostova,
- može zamijeniti metodu vađenja jezgri ili kopanja sondažnih jama
- snimanje se obavlja kontinuirano, vozilom u pokretu
- brzina snimanja je do 80 km/h (rijetko)
- nije potrebna posebna regulacija ili zatvaranje prometa (poznavajući naše vozače, opasno)

GPR – Kako radi?

- način rada
 - antene odašilju elektromagnetske valove u tlo
 - nerazorno za tlo koje se snima
 - nije štetno za okolinu → snop EM valova je niske energije i usmjeren je u tlo
- frekvencije antena su od 50 MHz do 2 GHz
 - niža frekvencija → manja rezolucija → veća dubina snimanja (cca 9 m antenom od 200 MHz)
 - viša frekvencija → veća rezolucija → manja dubina snimanja (cca 0,75 m antenom od 2 GHz)



- debljina sloja računa se preko vremena potrebnog da signal dođe do površine sloja i vrati se nazaj u antenu
- na mjestima trostruke slabe sile vala povećava amplituda da bi prošao kroz njih i vrata se nazaj u antenu
- povratnog signala

GPR – Kako izgleda sustav?



GPR – Sastavni dijelovi?

- sastavni dijelovi
 - SIR-20 – središnji element sustava-generator EM valova
 - računalo za prikupljanje podataka
 - antena ili sustav antena različite frekvencije



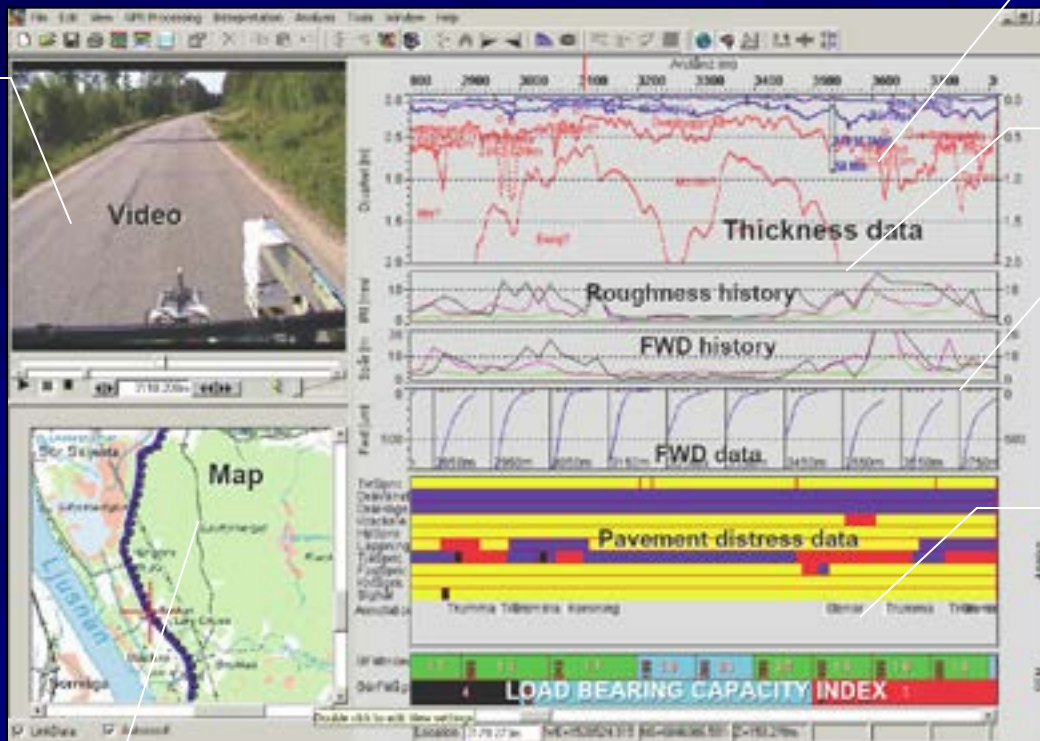
GPR – interpretacija

- računalni programi za obradu podataka
 - proizvođači GPR sustava, uglavnom imaju svoje programske pakete za snimanje i naknadnu obradu podataka
 - na GF posjedujemo sustav proizvođača GSSI, u koji je uključen program RADAN (RADar Data ANalyser) kao i RoadDoctor kojim se također mogu interpretirati podaci mjerenja GPR uređajem
 - neki od raspoloživih programskih paketa mogu se, osim za obradu GPR materijala, koristiti i kao baze podataka, u koje je moguće pohranjivati mnoge druge podatke vezane uz cestovnu infrastrukturu

GPR – interpretacija

■ program Road Doctor

video materijal



GPR podaci

hvatljivost

FWD podaci

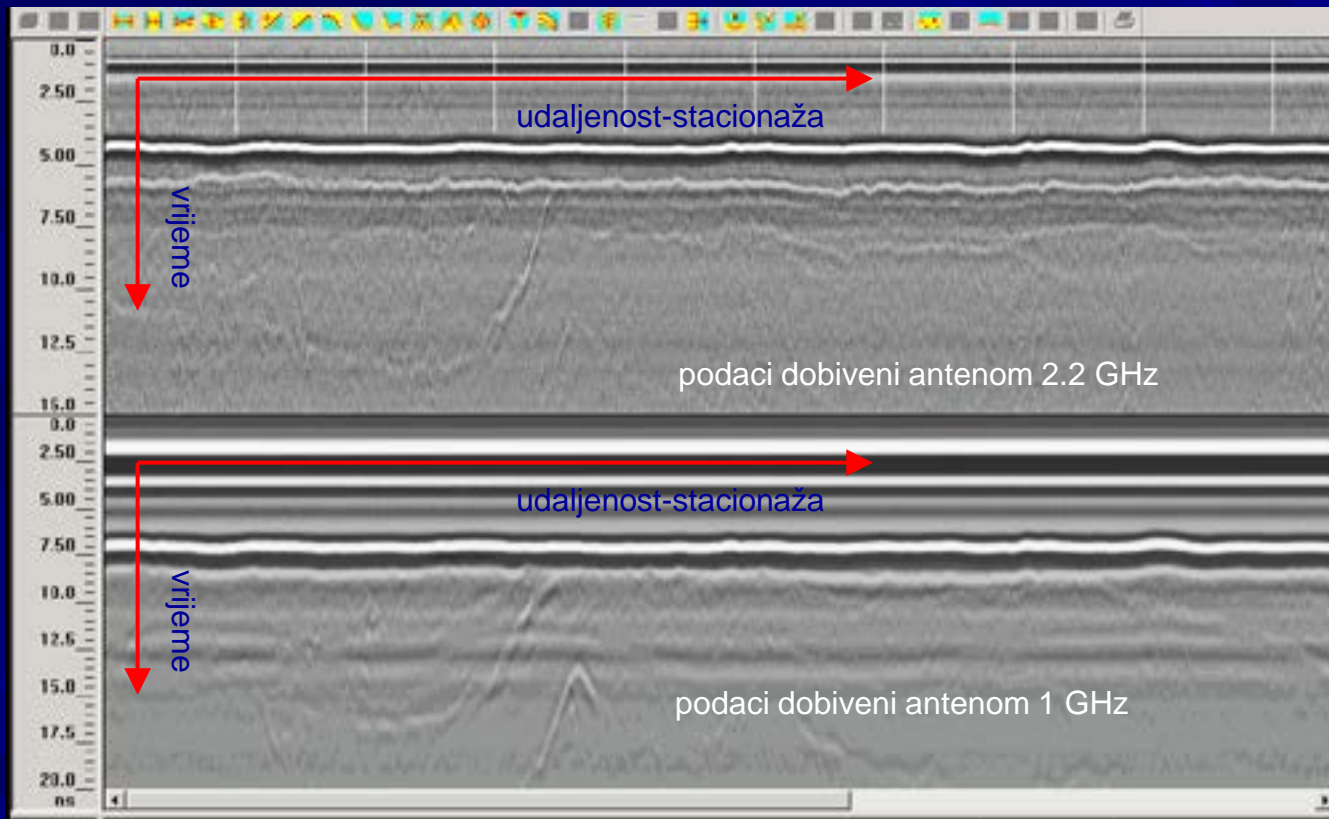
analiza pohranjenog materijala

karta snimljene dionice

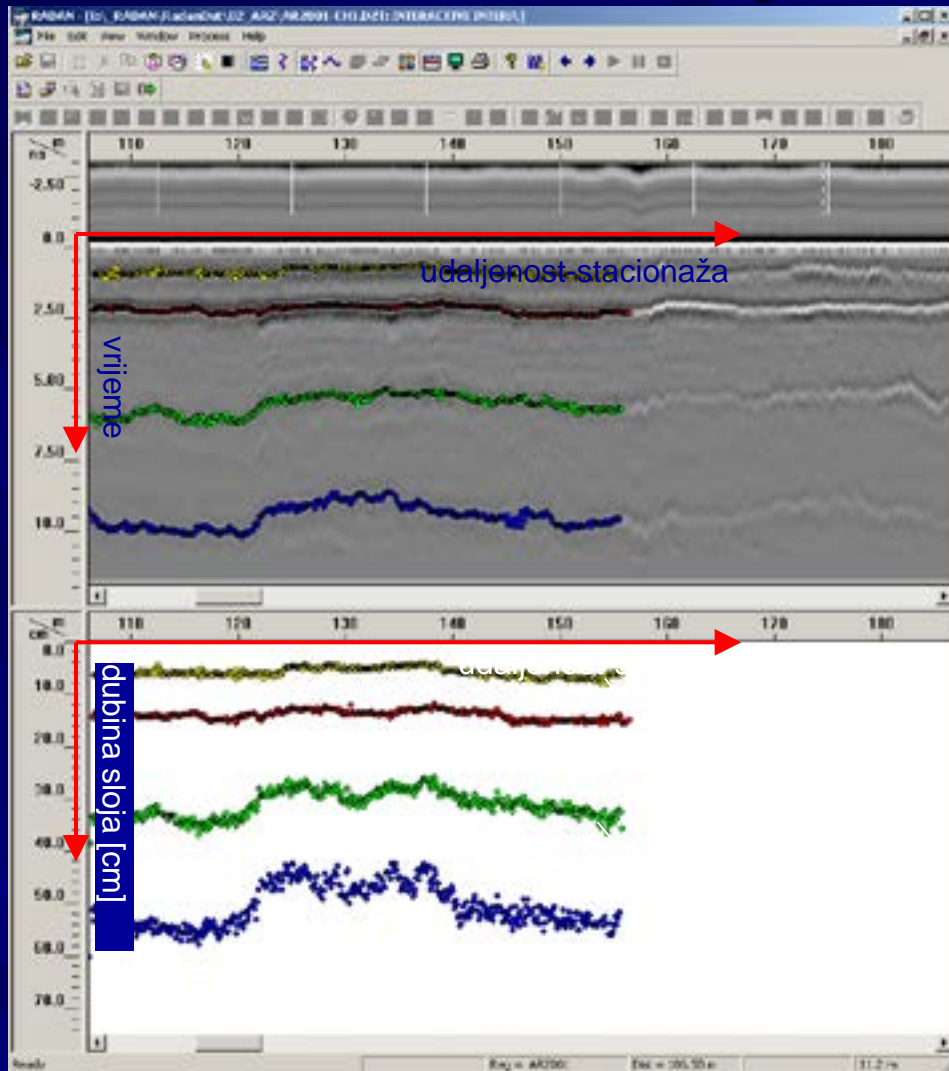
- moguće je pohranjivati video i kartografski materijal, GPR podatke, podatke o ravnosti podiznosti (dobijene raznim metodama određivanja ovisnosti i mjera za FWD-om) i hvatljivosti.....

GPR - podaci

- podaci su kontinuirani uzduž snimane dionice
- neobrađeni podaci dobiveni snimanjem s dvije antene

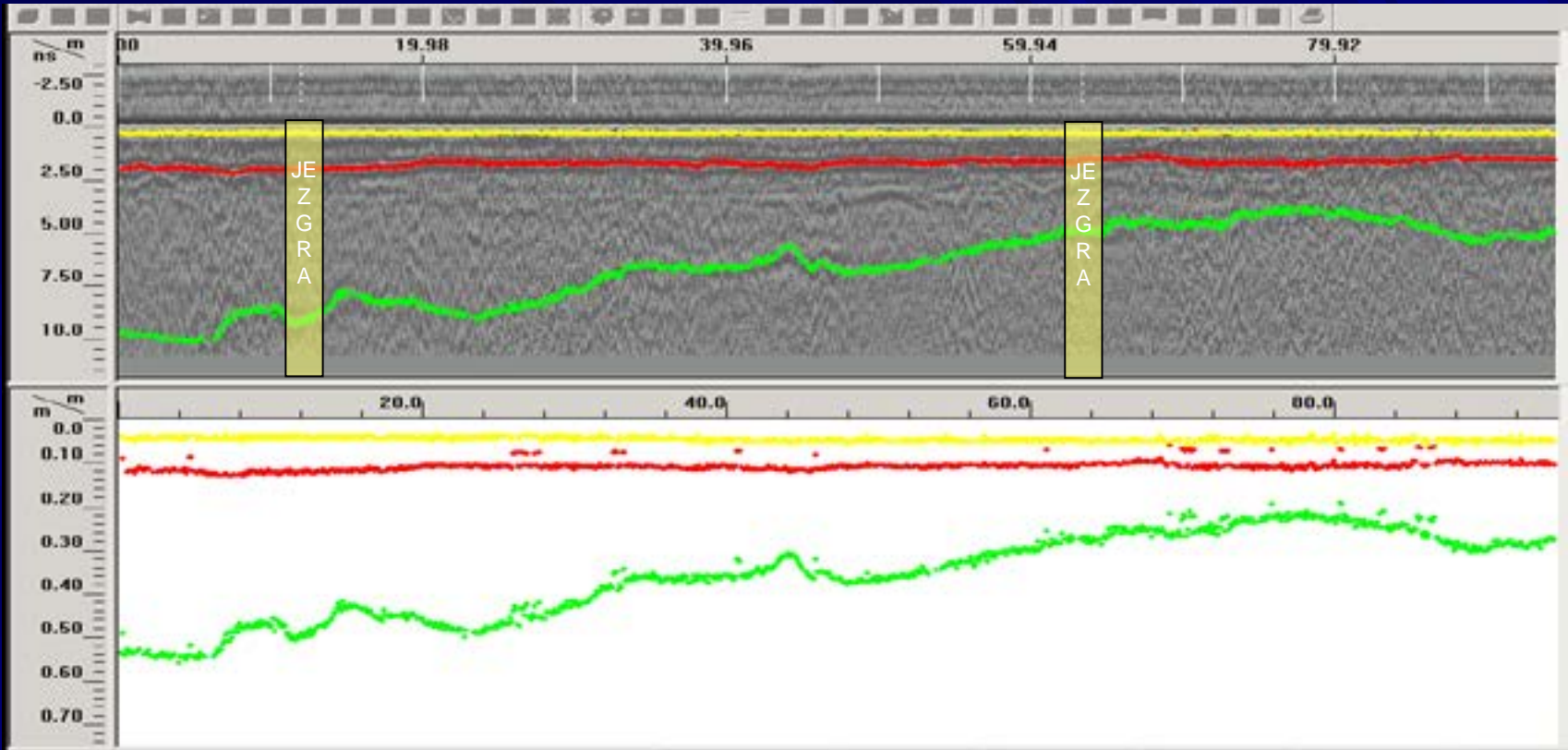


GPR – interpretacija podataka



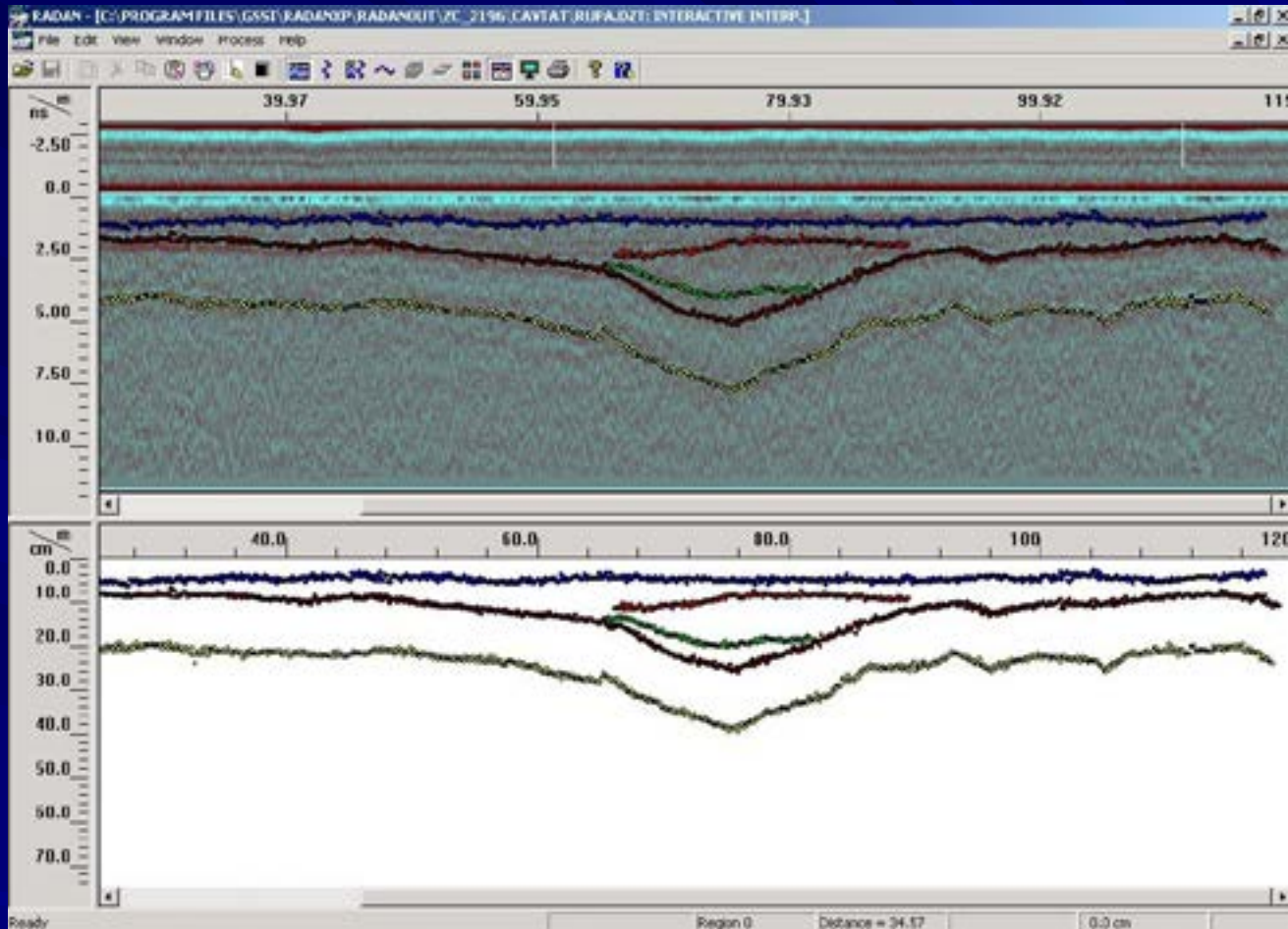
- naknadna obrada GPR podataka (postprocessing) provodi se u uredu
- na gornjem dijelu ekrana operater označava granice slojeva
- računalni program preračunava označene slojeve u dubine slojeva, što se prikazuje na donjem dijelu ekrana
- moguće je očitati debljinu slojeva kolničke konstrukcije

GPR – što se sve može očitati



- ● brzina GPR nastajanje obimne sećkih ploča
- ● obimne slojeva, koji su pojedinačno slojeva
- ● promjene debljina slojeva

GPR – što se sve može očitati

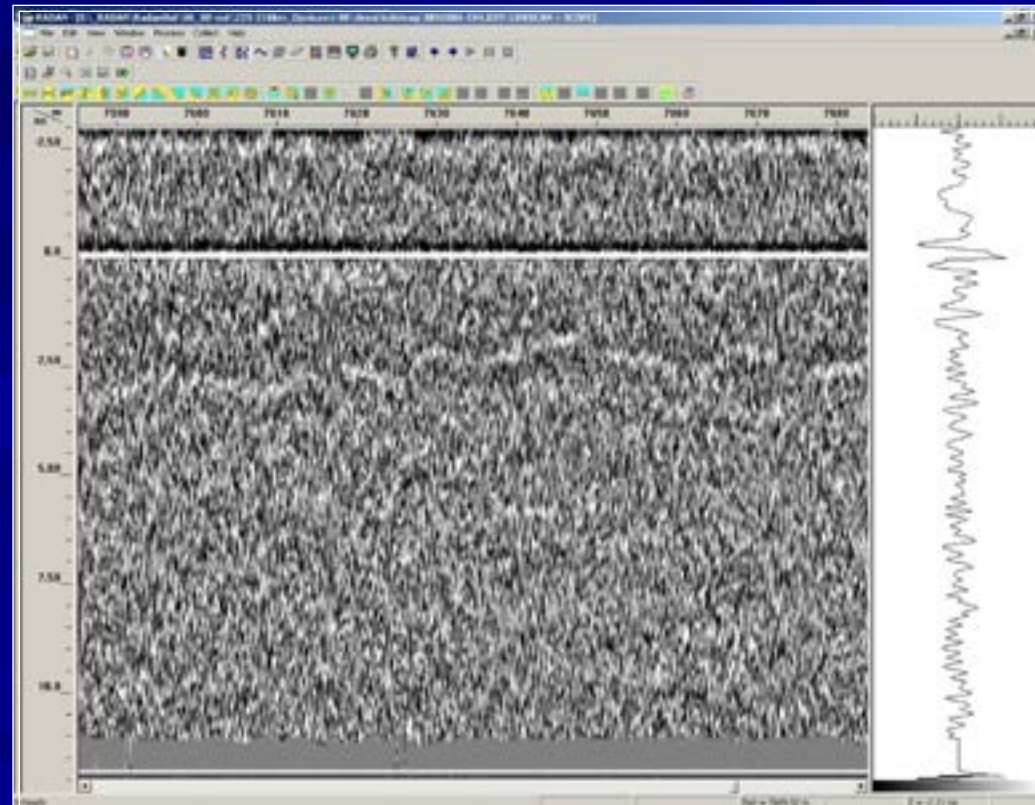


- zona popravka depresije na kolniku

GPR – ograničenja

- ponekad uređaj može doći u interferenciju s EM valovima iz drugih izvora (drugi radarski ili radio valovi)

- signal bez EM "šuma" na kojem se razaznaju slojevi
- signal sa EM "šumom" slojevi se ne razaznaju



**Korištenje FWD-a i GPR-a
za utvrđivanje postojeće i
projektiranje potrebne nosivosti
kolnika - primjer**

**Autocesta Zagreb – Varaždin
dionica Popovec – Breznički Hum**

Mjerenje nosivosti kolničke konstrukcije

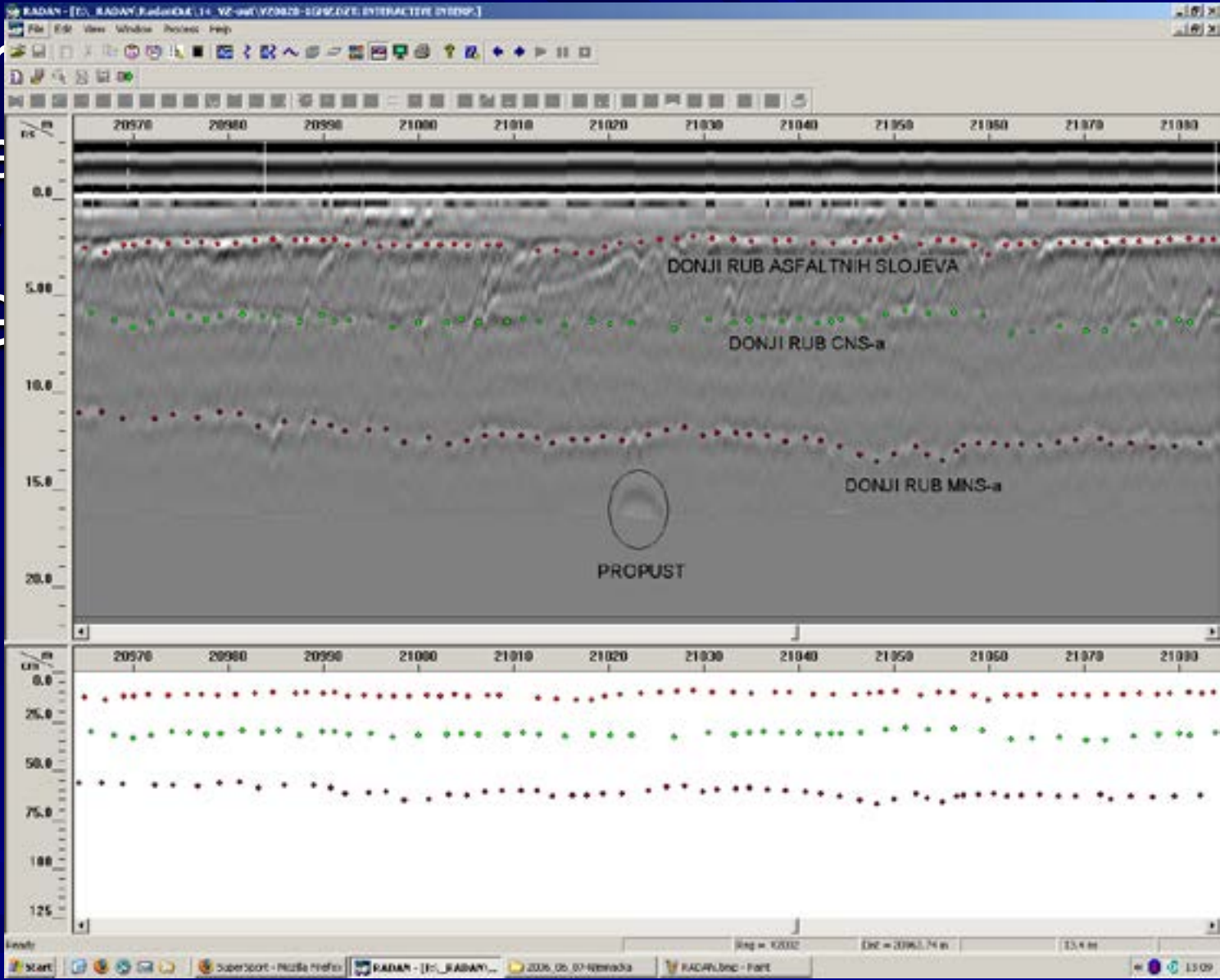
- mjerenje **defleksija** provedeno je uređajem s padajućim teretom (FWD) proizvođača Dynatest od strane TPA (TPA d.o.o. - održavanje kvaliteta i inovacija) u tragu desnog kotača, u najopterećenijem, voznom traku
- mjerenja su u potpunosti provedena u skladu s nalogom navedenim u projektu COST – Report 336 (Falling Weight Deflectometer)
- razmak pojedinačnih mjerenja iznosio je 100 m
- interpretaciju rezultata mjerenja proveo je GF Sveučilišta u Zagrebu

Mjerenje debljina slojeva kolnika



Mjer
je
v
G

a
nja



Mjerenje debljine slojeva asfaltni slojevi

- debljine asfaltnih slojeva (habajućeg sloja i BNS-a)
 - 97 do 185 mm, prosječno 138 mm, na **lijevom** kolniku (smjer Varaždin)
 - 100 do 169 mm, prosječno 136 mm na **desnom** kolniku (smjer Zagreb)

Mjerenje debljine slojeva asfaltni slojevi

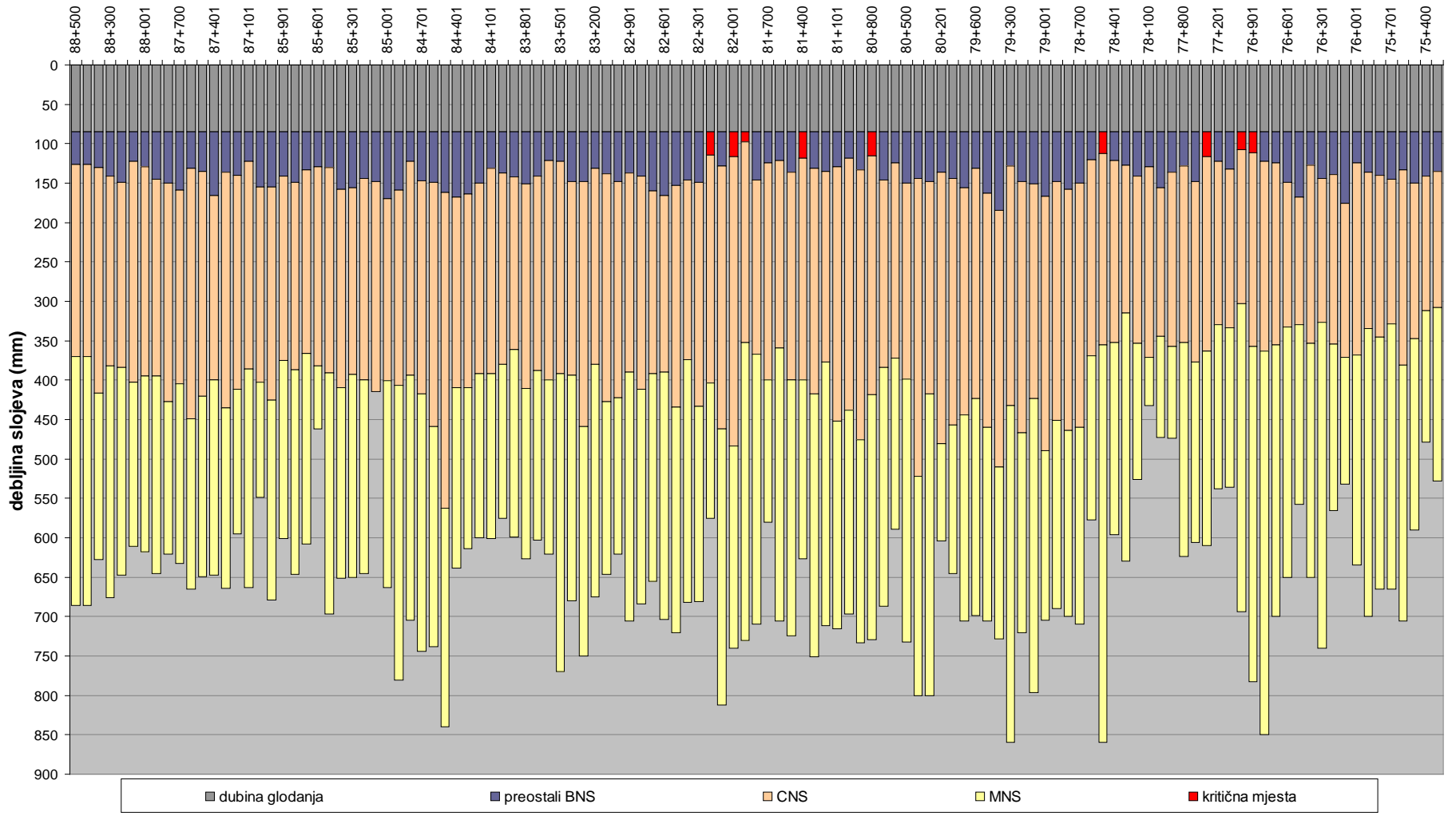
- na dionici Popovec – Breznički Hum (smjer VŽ)
 - verifikacija rezultata kontinuiranog mjerenja GPR-om provedena je usporedbom s rezultatima mjerenja debljine asfaltnih slojeva na 10 jezgri
 - maksimalno odstupanje rezultata kontinuiranog mjerenja iznosilo je 5 mm
- potvrđena točnost mjerenja debljine slojeva GPR-om

Mjerenje debljine slojeva

- na dionici Popovec – Breznički Hum (smjer Zg)
 - mjerenje debljine asfaltnih slojeva provedeno je na ukupno 5 jezgri,
 - maksimalno odstupanje na taj način izmjerenih vrijednosti od onih dobivenih mjerenjem GPR-om bilo ukupno 6 mm

Debljine slojeva - lijevi kolnik

pozicije mjerenja (km)





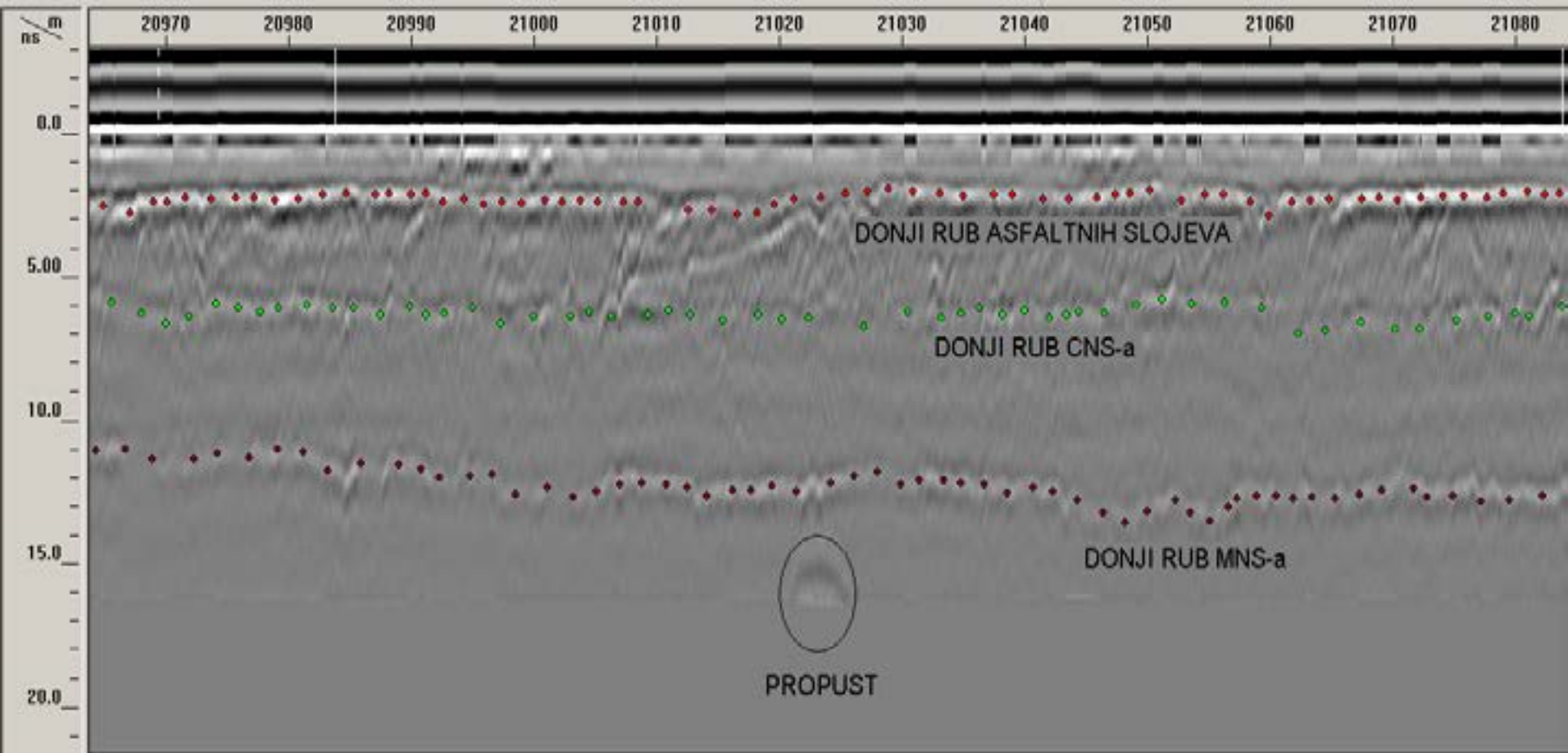
anog nosivog sloja
diti vađenjem jezgri

■ nije bilo moguće napraviti uzorke

temeljem kojih bi
debljina ovog sloja

■ mjestimice, ceme
po svojim je kara
identičan sloju M



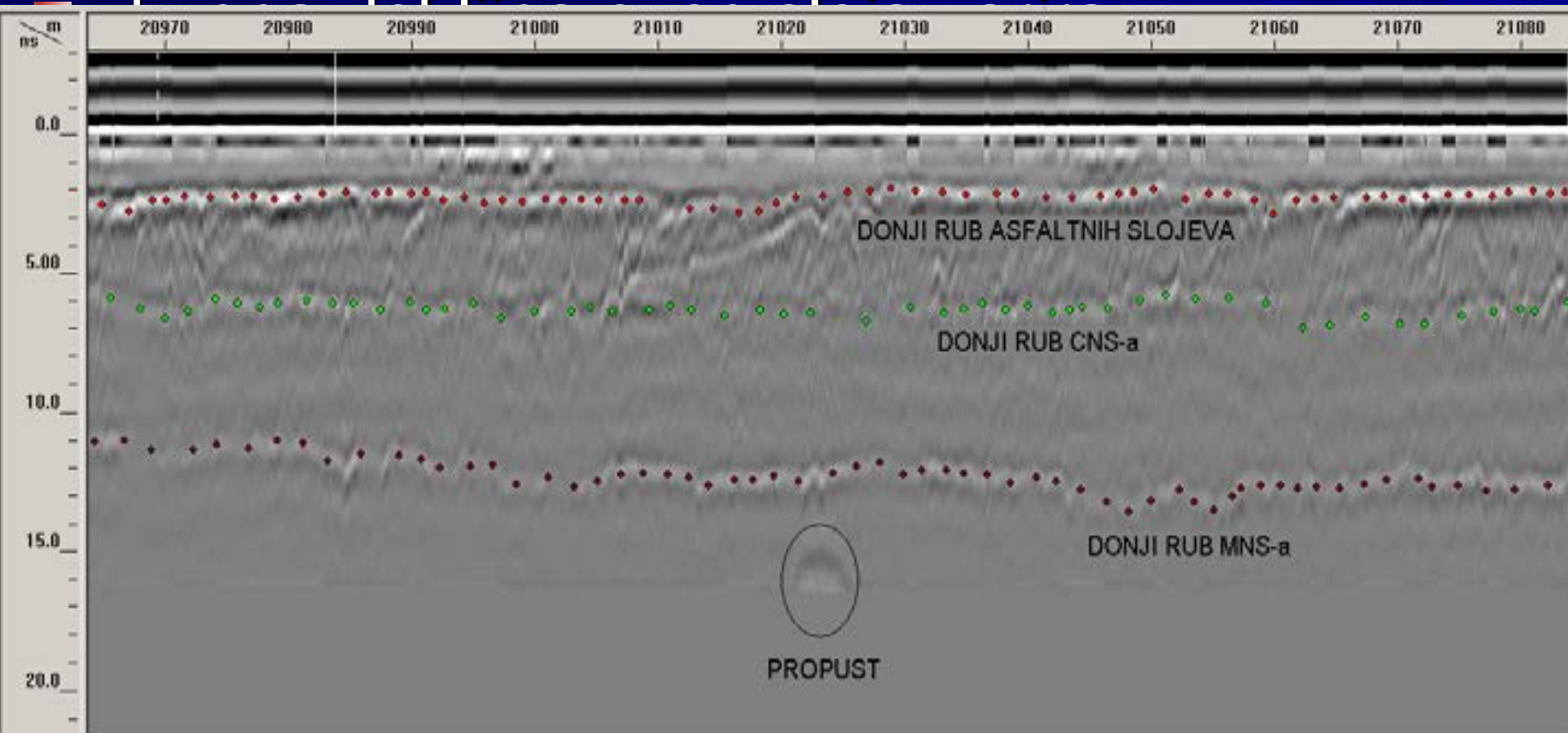


- kretala se

- od 163 do 401 mm, prosječno 260 mm (južni kolnik)
 - od 173 do 302 mm, prosječno 241 mm (sjevorni kolnik)

Mjerenje debljine slojeva - MNS

- ispod sloja CNS-a uočava se sloj mehanički zbijenog zrnatog kamenog materijala (MNS)



Određivanje modula elastičnosti

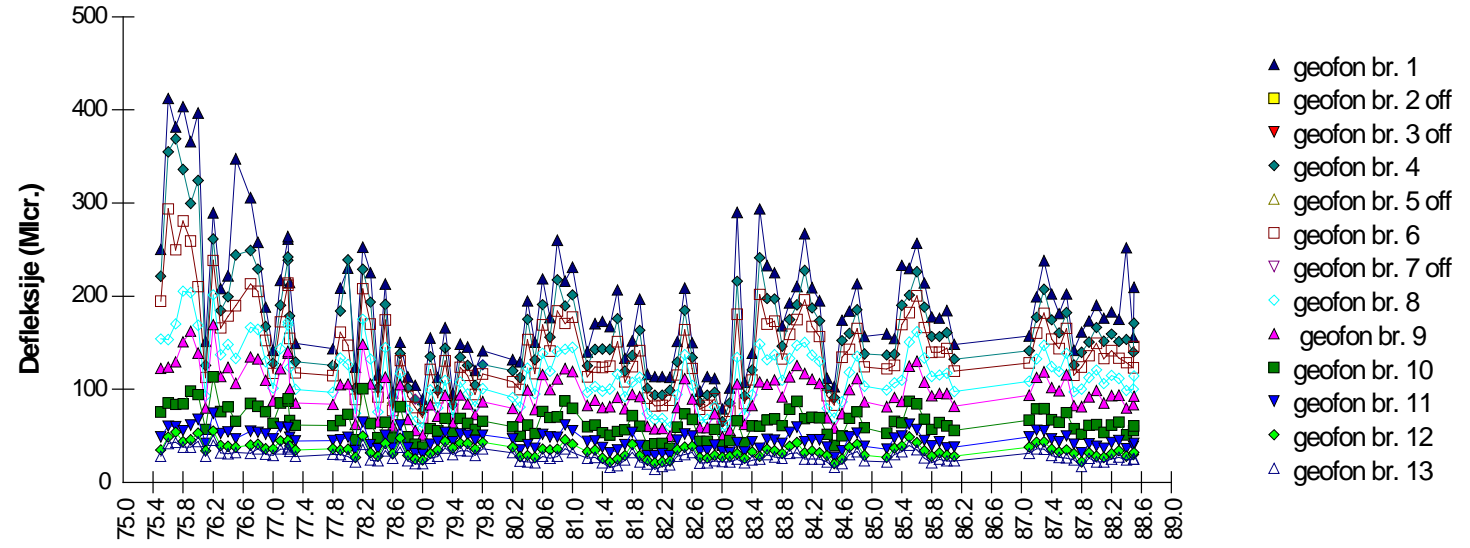
- postupak proračuna unatrag **modula elastičnosti E**, slojeva kolničke konstrukcije proveden je računalnim programom **ELMOD6**
 - sloj 1 – asfaltni slojevi (habajući + bitumenom stabilizirani nosivi slojevi), pri referentnoj temperaturi od 20°C
 - sloj 2 – cementom stabilizirani nosivi sloj
 - sloj 3 – mehanički zbijeni nosivi sloj od zrnatog kamenog materijala
 - sloj 4 – posteljica

Određivanje modula elastičnosti

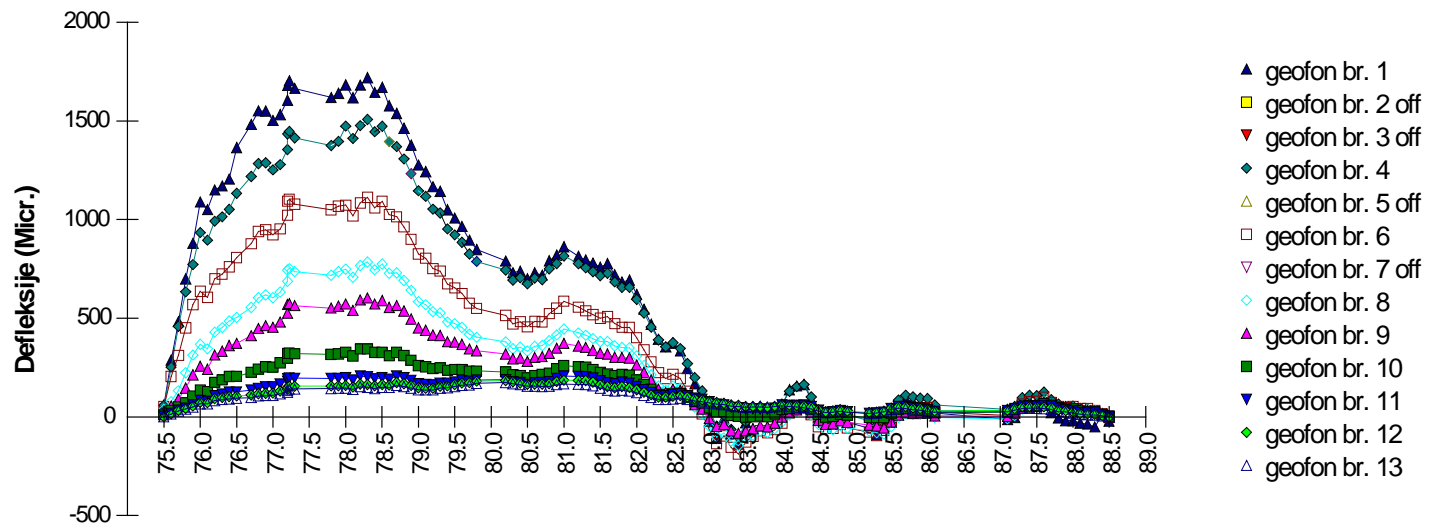
- definirane su homogene poddionice postupkom kumulativnih razlika opisanom u AASHO priručniku za projektiranje kolničkih konstrukcija u dodatku oznake J
- duljine homogenih dionica određene su posebno za lijevi (smjer Varaždin) a posebno za desni (smjer Zagreb) kolnik

Ijevi kolnik, smjer Varaždin

Izmjerene vrijednosti defleksija

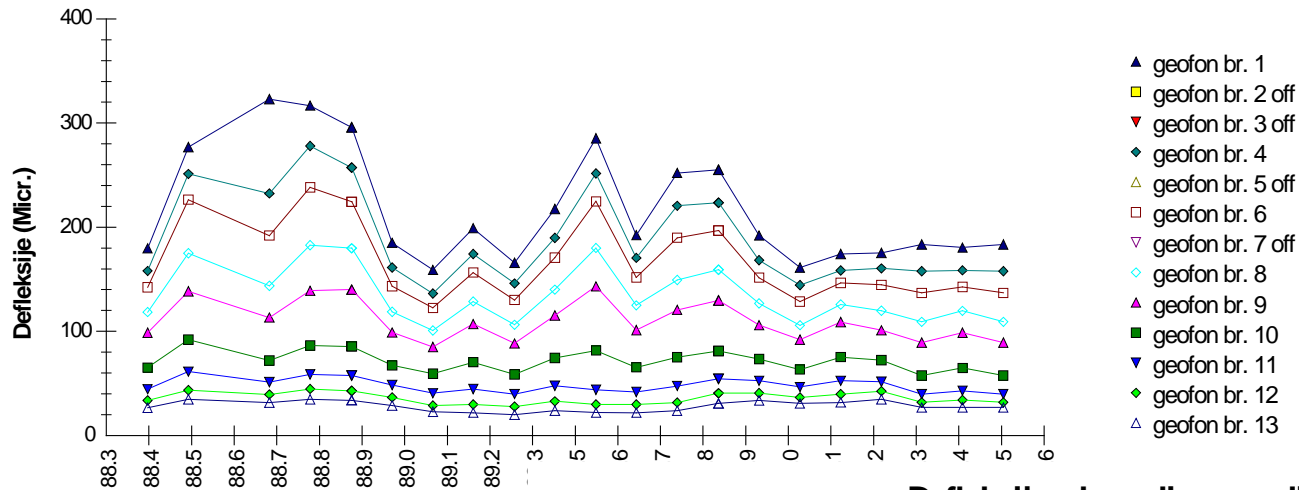


Defleksije, akumulirane razlike

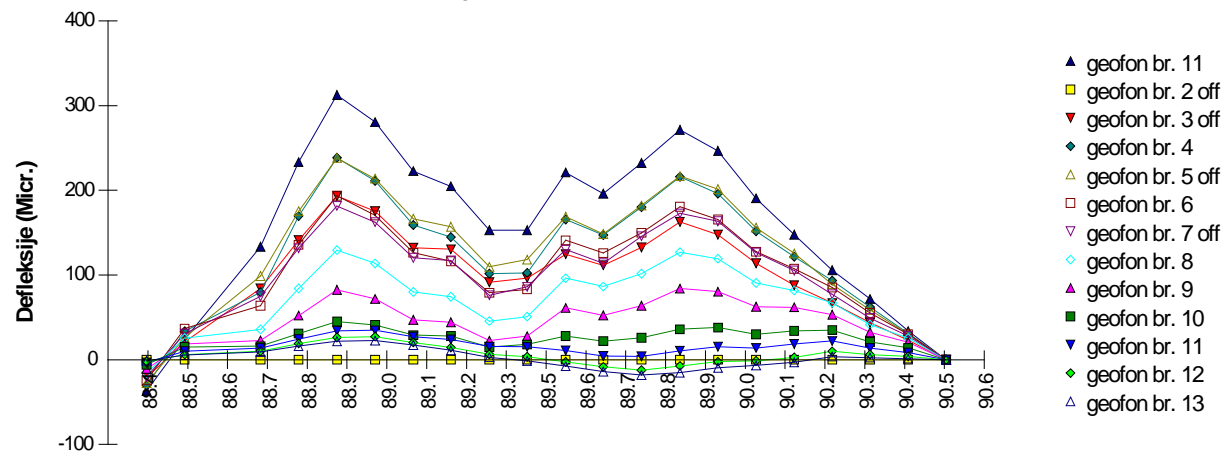


desni kolnik, smjer Zagreb

Izmjerene vrijednosti defleksija



Defleksije, akumulirane razlike



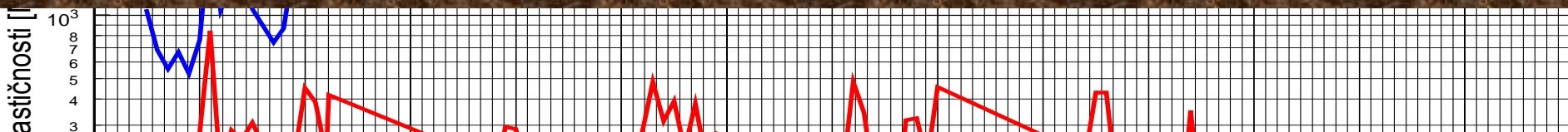
Određivanje modula elastičnosti (E) slojeva kolničke konstrukcije

- **dobiveni moduli elastičnosti ukazuju na probleme koji su rekognoscirani i terenskim istraživanjima**

MNS

- na većem dijelu dionice moduli elastičnosti kreću se u području vrijednosti koje odgovaraju uobičajenim za period godine u kojem su provedena mjerenja (jesen)

MNS što ukazuje na oscilacije razine vode u konstrukciji te upućuje na područja s problematičnom odvodnjom posteljice



Asfaltni slojevi

- vrijednosti modula elastičnosti kreću se u rasponu od 1200 do 41500 MPa, no to je vrijednost dostignuta na samo jednoj

Asfaltni slojevi

- treba u obzir uzeti da prilikom mjerenja nisu birane posebne lokacije dobre ili loše površine kolnika kako bi se dobila neka usporedba već su mjerenja rađena kontinuirano, svakih 100 m

Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

- strukturno propadanje
 - stanje kolnika pri kojemu on više ne može prenositi opterećenje za koje je projektiran
 - tijekom vremena uslijed djelovanja prometnog opterećenja kao i klimatskih okolnosti smanjuje se mogućnost kolnika za preuzimanje opterećenja, pa je potrebno dimenzionirati pojačanje kako bi se povećala sposobnost kolnika da tijekom budućeg projektnog razdoblja preuzima opterećenja

Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

- pojačanje kolničke konstrukcije provodi se kako bi se uklonili strukturni nedostaci kolnika
 - zahtijevana debljina mora biti takva da kolnik nakon pojačanja ima dovoljan strukturni kapacitet za preuzimanje opterećenja od prometa u nekom budućem razdoblju

$$SN_{poj.} = a_{poj.} \cdot D_{poj.} = SN_{potr.} - SN_{post.}$$

Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

- debljina pojačanja kolnika određuje se na temelju koraka koji zahtijevaju opsežno ispitivanje kolnika kako bi se dobili odgovarajući podaci potrebni za dimenzioniranje
1. **određivanje debljinu i vrstu materijala svakog sloja na temelju postojećih informacija** - GPR, sondažne jame, bušotine
 2. **analiza prometa** - broj prijelaza standardnog ekvivalentnog osovinskog opterećenja (80 kN) u prošlom i budućem periodu za određivanje strukturnog broja postojećeg kolnika $SN_{pos.}$ i potrebnog strukturnog broja $SN_{potr.}$

Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

- 3. pregled stanja kolnika** - mjeri se postotak površine sa mrežastim pukotinama, broj poprečnih pukotina na km, srednja dubina kolotraga – podaci se koriste za određivanje koeficijenta zamjene koji ovise o vrsti materijala u pojedinim slojevima konstrukcije
- 4. mjerenje defleksija** - mjere se na razmaku od 30 do 300 m pri čemu se koristi FWD uređaja (impulsno opterećenje 40 kN)

Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

4. mjerenje defleksija

- u centru opterećenja
 - barem na još jednoj udaljenosti od opterećenja
- nakon ispitivanja defleksija određuje se rezidualni modul podloge

$$M_R = \frac{0.24P}{d_r r}$$

M_R rezidualni modul podloge

P primjenjeno opterećenje

d_r izmjerena defleksija na udaljenosti r od centra opterećenja

r udaljenost od centra opterećenja

Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

- temperatura nema nikakav utjecaj u određivanju M_R ako se određuje na temelju deformacije podloge
- deformacija koja se koristi za određivanje M_R mora biti mjerena na dovoljnoj udaljenosti kako bi se mogao dobro procijeniti rezidualni modul neovisno o utjecaju slojeva iznad, ali ujedno dovoljno blizu da bi mjerenje bilo točno

Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

■ minimalna udaljenost

$$r \geq 0.7 a_c$$

a_c radijus krivulje naprezanja između podloge i kolnika

$$a_c = \sqrt{a^2 + \left(D \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}$$

a radijus ploče opterećenja FWD uređaja

D ukupna debljina slojeva kolnika iznad podloge

E_p efektivni modul svih slojeva kolnika iznad podloge

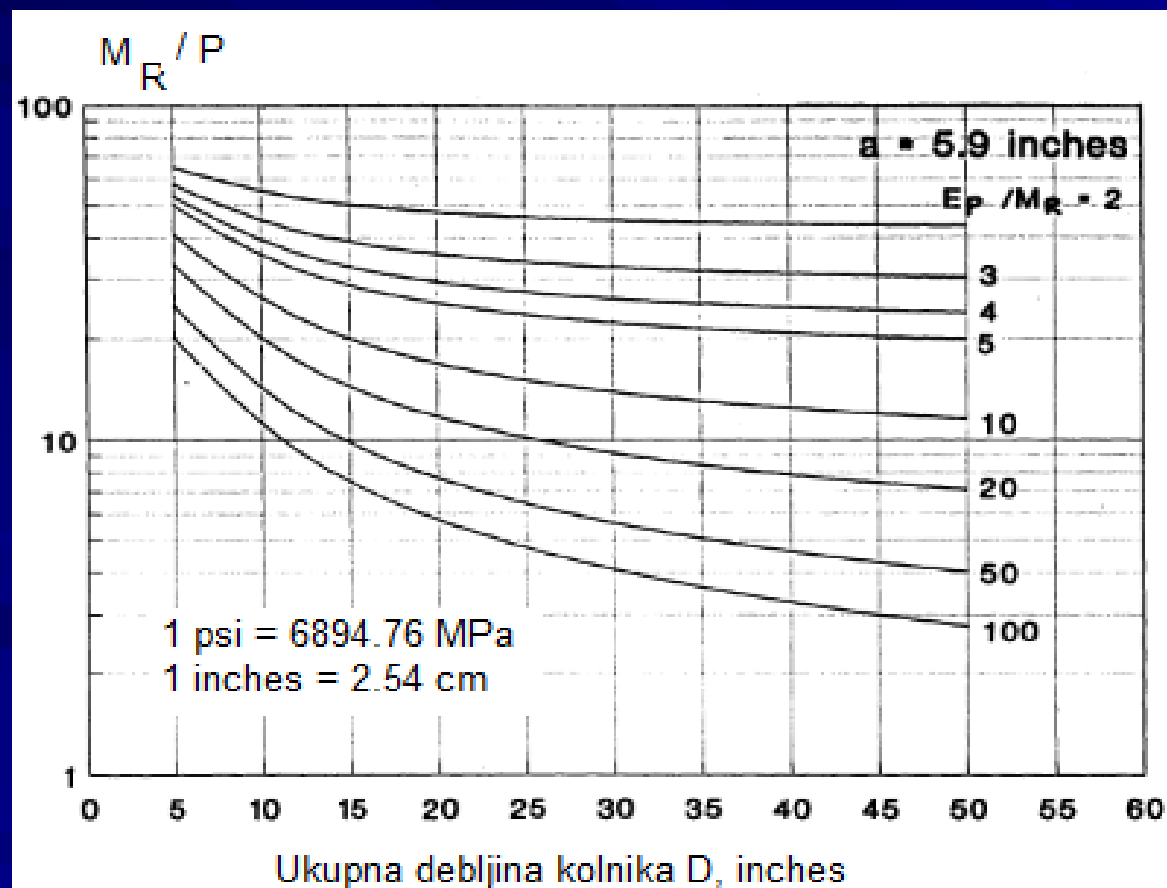
Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

- d_0 deflekcija izmjerena u sredini ploče preko koje se prenosi opterećenje (korigirano na 20°C)
- M_R rezidualni modul podloge
- D odstupna defleksivna količina slojeva iz
- E_p efektivni modul svih slojeva kolnika (bez posteljice)
- p vrijednosti defleksije u sredistu opterećenja

$$d_0 = 1.5pa \left\{ \frac{1}{\sqrt{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^3 \frac{E_p}{M_R}}}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right]}{E_p} \right\}$$

Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

- radij uspona e $e = P_e / P$ određuje se iz 15. tabele među P_e / M_R i e određuje se iz M_R dijagrama



Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

5. jezgrovanje i utvrđivanje svojstava materijala postojeće kolničke konstrukcije

- sastav postojeće konstrukcije - mjerenjem debljine pojedinih slojeva ili GPR-om
- laboratorijsko ispitivanje svojstava materijala
- nosivost tla – može se ispitivati i u laboratoriju pri uvjetima vlažnosti i zbijenosti koji trebaju biti što sličniji onima na terenu (posebno terenski CBR)
- rezidualni modul M_R može se pomoću korelativnih izraza i vrijednosti CBR-a
- procjena rezidualnog modula pomoću izraza $M_R = 10 \cdot \text{CBR}$ može rezultirati prevelikom vrijednošću za potrebe dimenzioniranja

Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

6. određivanje potrebnog strukturnog broja $SN_{potr.}$

- proračun prosječnog godišnjeg prijelaza ekvivalentnog 80 kN osovinskog opterećenja
- na temelju već opisanog ispitivanja određuje se rezidualni modul podloge, preračunavanjem iz dobivenih podataka o defleksiji
- približna procjena može se donijeti i korištenjem dostupnih informacija o tlu i poznavanjem svojstva rezilientnog modula M_R

Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

- rezilijentni modul podloge pri dimenzioniranju mora pokazivati utjecaj varijacija zbog promjena godišnjih doba i mora biti prilagođen rezilijentnom modulu podloge korištenom pri AASHO Road testu (3000 psi \cong 20 MPa) pri dimenzioniranju savitljivih kolnika
- vrijednost M_R ne smije biti prevelika
- teško je odabrati zadovoljavajuću vrijednost koja bi odgovarala debljini pojačanja

Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

- usvajanjem veće vrijednosti od $\cong 20$ MPa pokazuje da je tlo ima bolju nosivost od onog korištenog pri AASHO Road testu
- preporuča se korekcija M_R (množenje korekcijskim faktorom $C=0.33$ pri određivanju vrijednosti SN_{potrebno} kad je opterećenje FWD uređaja 40kN)
- ako je vrijednost M_R prevelika može se množiti i sa manjim korekcijskim faktorom

Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

- vrijednost M_R određuje iz izraza

$$M_R = C \left(\frac{0.24P}{d_r r} \right)$$

M_R rezidualni modul elastičnosti

C korekcijski faktor (preporučeno $C=0.33$)

P primjenjeno opterećenje

d_r defleksija na udaljenosti r od središta opterećenja

r udaljenost od centra opterećenja

Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

- nakon određivanja rezilijentnog modula računa se gubitak **vozne sposobnosti kolnika**

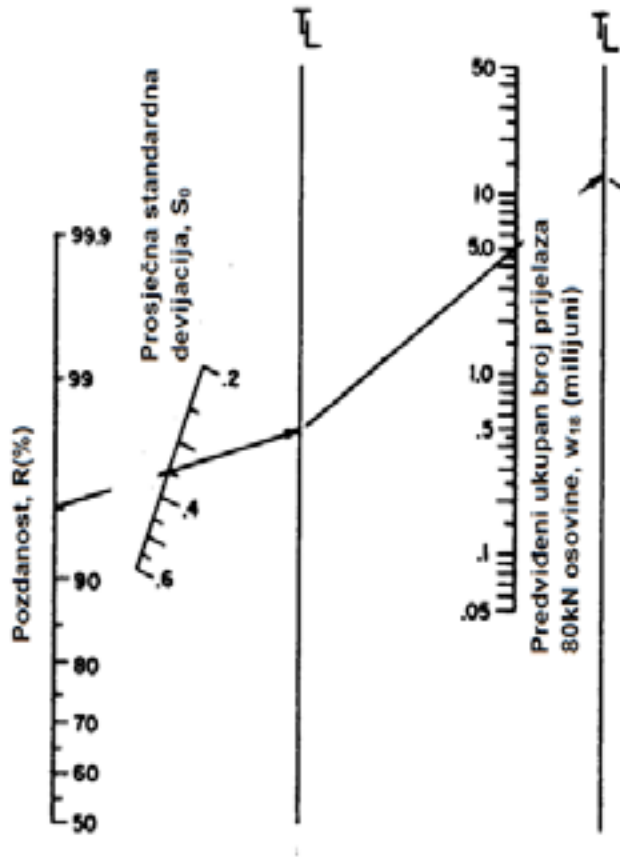
$$\Delta PSI = PSI_1 - PSI_2$$

PSI_1 odmah nakon pojačanja

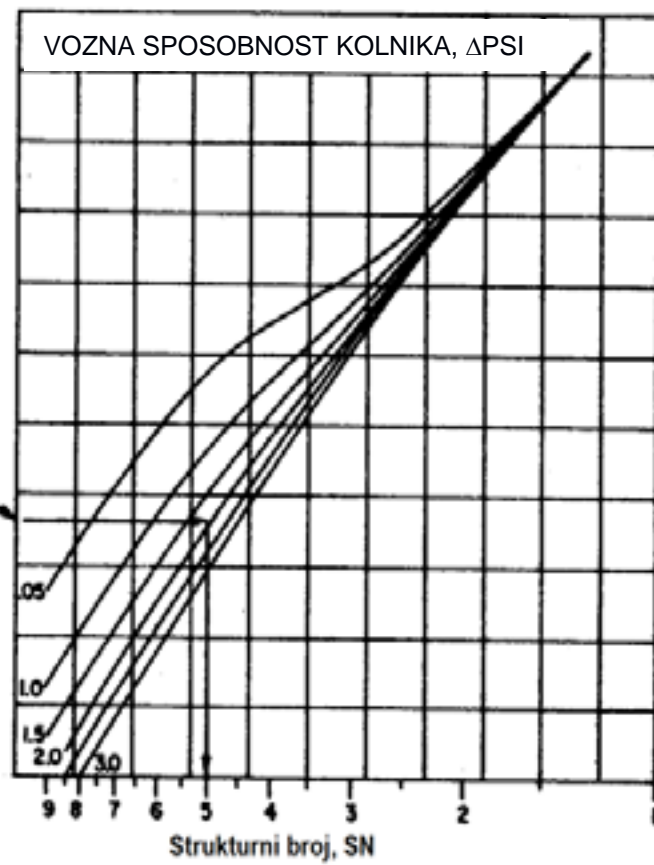
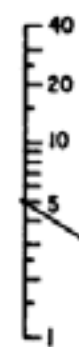
PSI_2 u trenutku sljedeće rehabilitacije

- pri proračunu $SN_{potr.}$ potrebno je usvojiti željene razine
 - pouzdanosti pojačanja R (80 – 99 %)
 - standardne devijacija S_0 (obično 0.49)

■ $SN_{potr.}$ - nomogram



REZILIJENTNI MODUL



Primjer:

$W_{18} = 5 \times 10^6$

$R = 95\%$

$S_0 = 0.35$

$M_R = 5000 \text{ psi}$

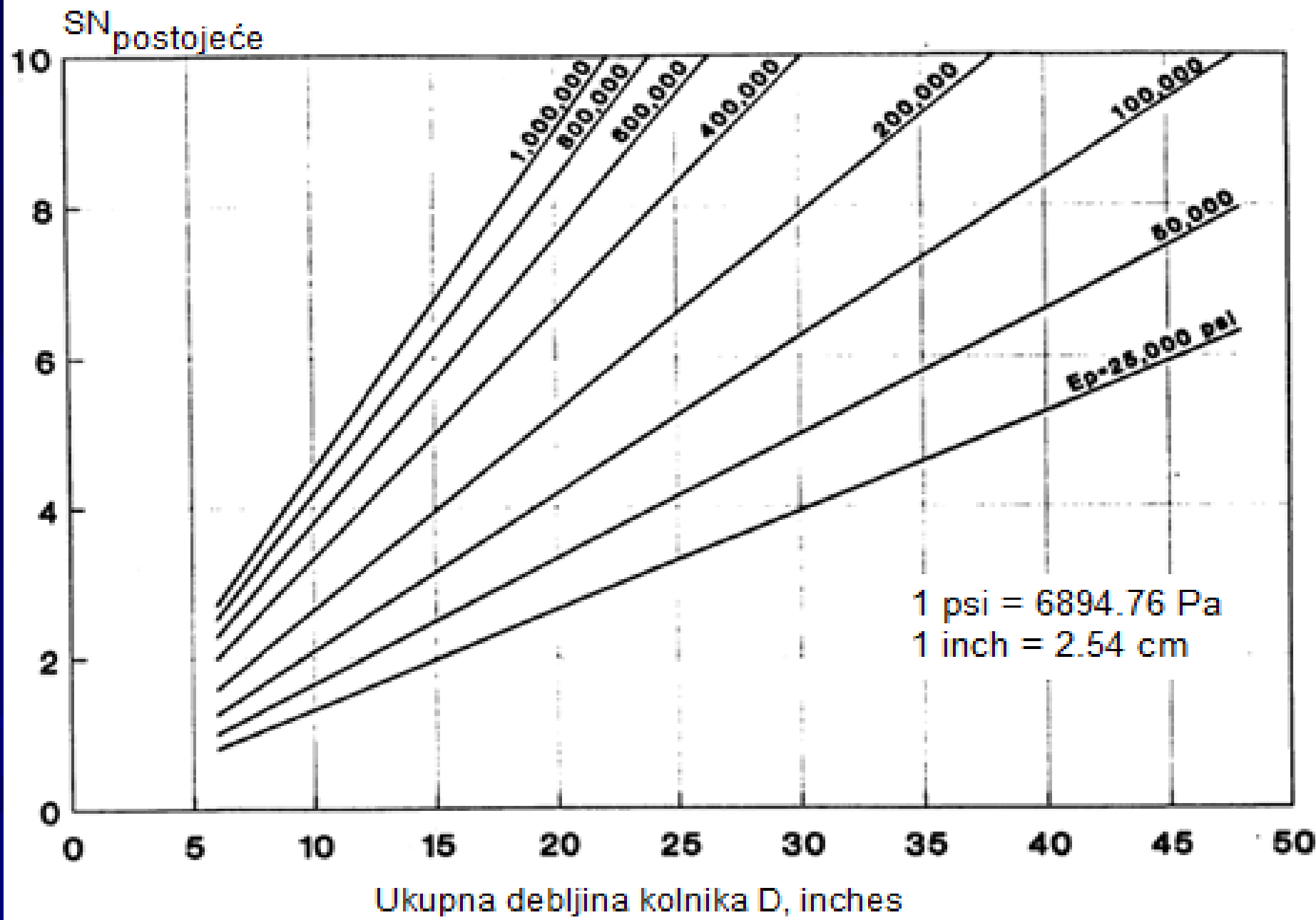
$\Delta PSI = 1.9$

Rješenje: $SN = 5.0$

Određivanje strukturnog broja konstrukcije SN

7. Određivanje strukturnog broja postojeće konstrukcije $S_{n_{post.}}$

- NDT ispitivanje - FWD
- temelji se na pretpostavci da je strukturna sposobnost kolnika funkcija ukupne debljine i krutosti kolnika
- vrijednost E_p efektivnog modula slojeva kolnika možemo odrediti pomoću rezilijentnog modula M_R



8. Određivanje debljine pojačanja

$$D_{\text{pojač.}} = \frac{SN_{\text{pojač.}}}{a_{\text{pojač.}}} =$$
$$= \frac{(SN_{\text{potr.}} - SN_{\text{post.}})}{a_{\text{pojač.}}}$$

$SN_{\text{pojač.}}$ strukturni broj pojačanja

$a_{\text{pojač.}}$ koeficijent zamjene koji ovisi o vrsti materijala u pojedinim slojevima konstrukcije

$D_{\text{pojač.}}$ potrebna debljina pojačanja

ZAKLJUČAK

- prikazane metode predstavljaju u svijetu široko prihvaćene načine određivanja karakteristika materijala i slojeva kolničke konstrukcije
- njihovom primjenom moguće je značajno smanjiti potreban broj terenskih mjerenja (bušenje jezgara, iskop sondažnih jama) a podatke dobiti kontinuirano ili na bitno manjem razmaku (100 m ili manje)
- **pravilno** interpretirani rezultati daju vjernu sliku geometrije i stanja kolničke konstrukcije