



**HRVATSKA KOMORA INŽENJERA GRAĐEVINARSTVA**  
**Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva 2020.**

# Primjena FRP-a u pojačanju prednapetih rasponskih konstrukcija mostova

**Tomislav Brozović**  
**Tomislav Kišiček**

Tomislav Brozović, dipl.ing.građ., Institut IGH d.d.

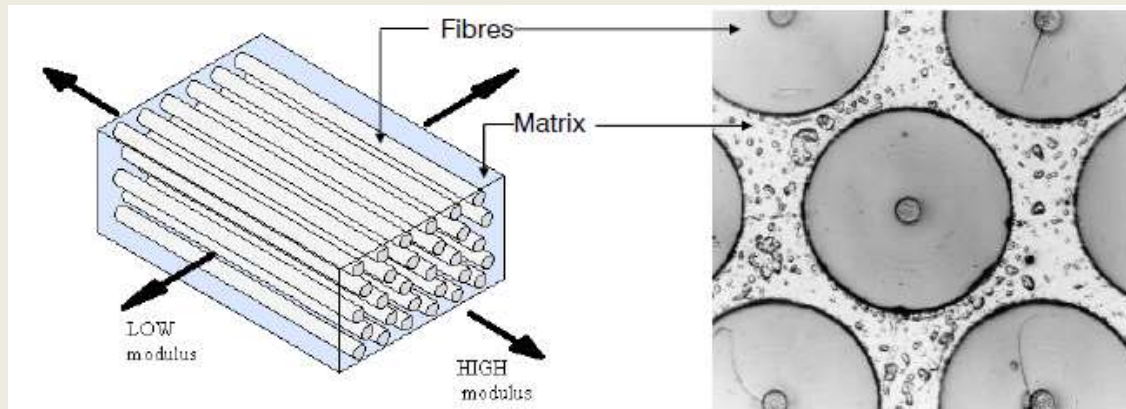
Prof.dr.sc. Tomislav Kišiček, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

# UVOD

FRP - engl.: Fiber Reinforced Polymer

HRV: Vlakena Armirani Polimeri

- kompozitni materijal načinjen od finih vlakana povezanih polimernom smolom



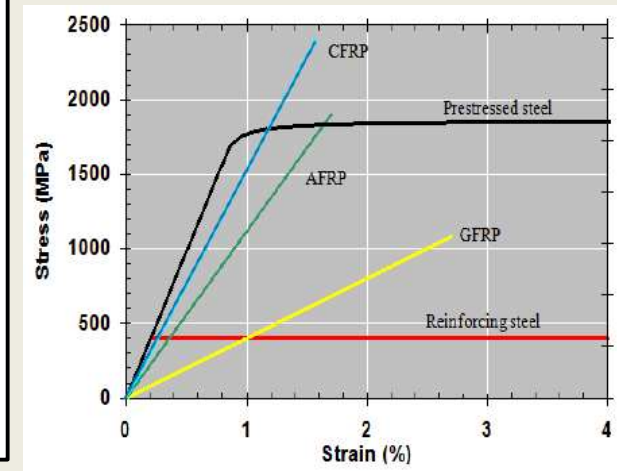
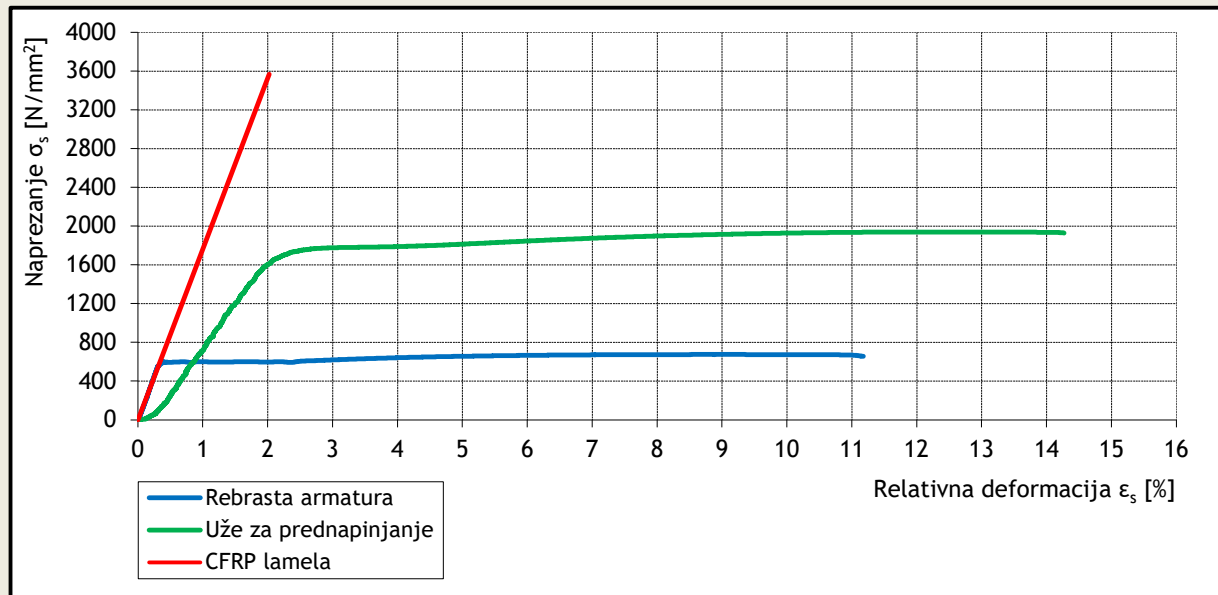
- Vlakna: ugljična, staklena, aramidna ili bazaltna
- Polimerna matrica: epoksidna, poliesterska, vinilesterska i dr.



# UVOD

## Karakteristike FRP-a:

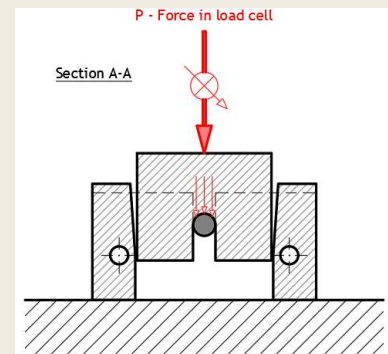
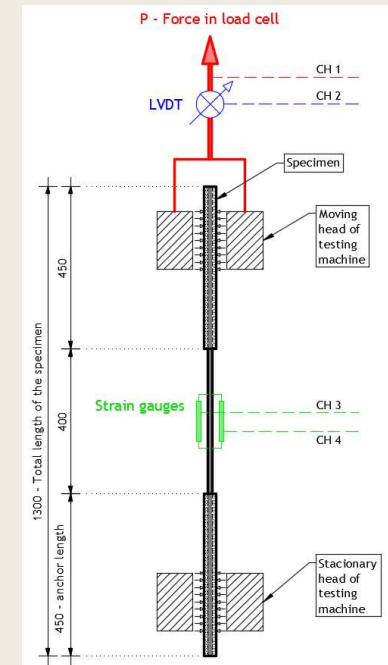
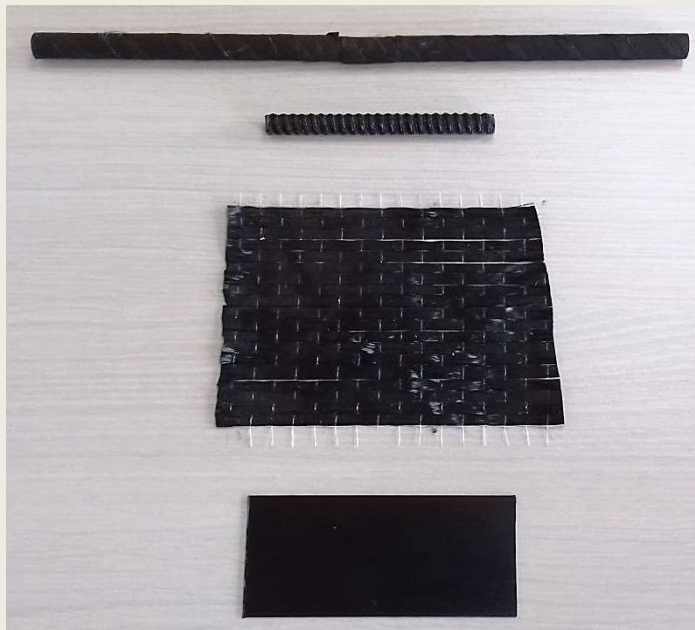
- velika vlačna čvrstoća
- ne korodira
- mala vlastita težina
- elastično ponašanje do sloma bez duktilnog popuštanja
- viša cijena u odnosu na čeličnu armaturu



# UVOD

## Proizvodi od FRP-a:

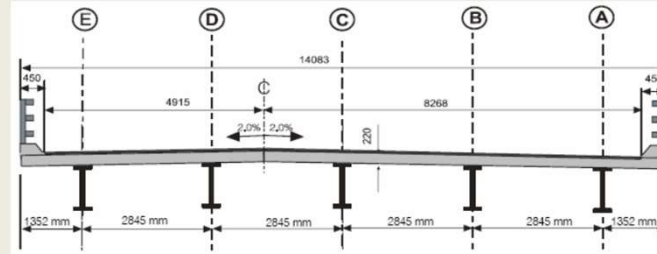
- Šipke i mreže za armiranje
- Profili
- Trake i lamele za pojačanje





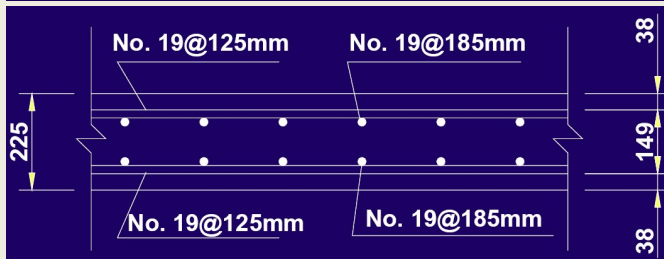
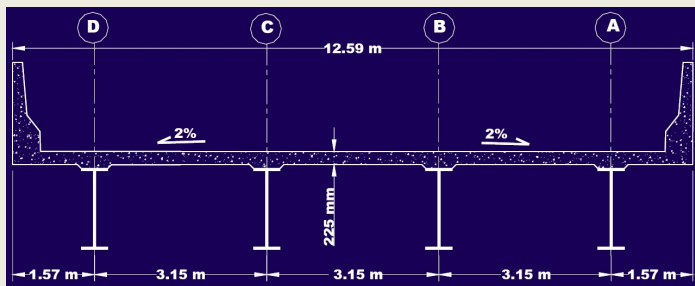
# UVOD

## Mogućnosti primjene FRP armature u izgradnji novih AB konstrukcija mostova



**Magog bridge, Kanada:**

Čelični nosači spregnuti sa AB pločom armiranom FRP armaturom



**Val-Alain bridge, Kanada:**

Čelični nosači spregnuti sa AB pločom armiranom FRP armaturom

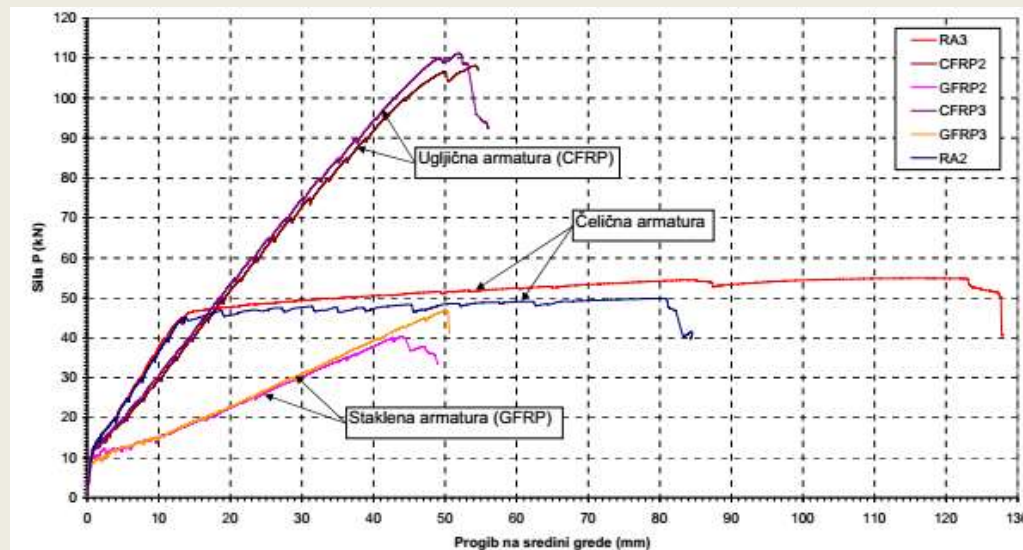


# UVOD

Mogućnosti primjene FRP armature u izgradnji novih AB konstrukcija

Istraživanja u Hrvatskoj

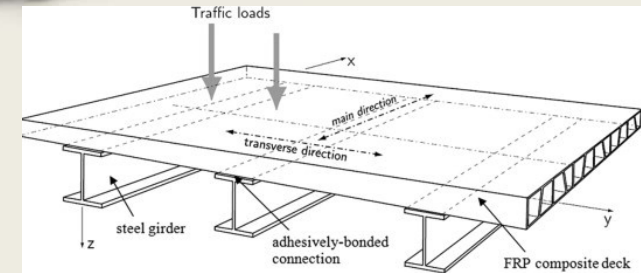
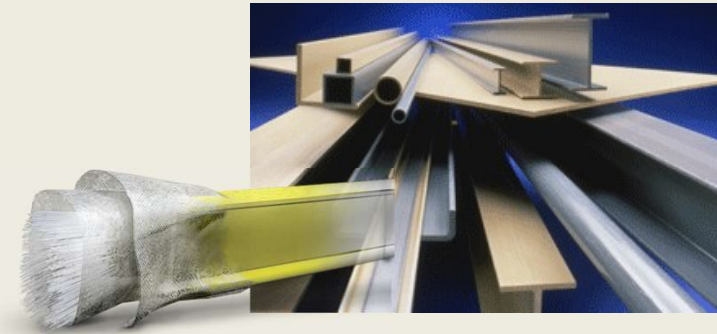
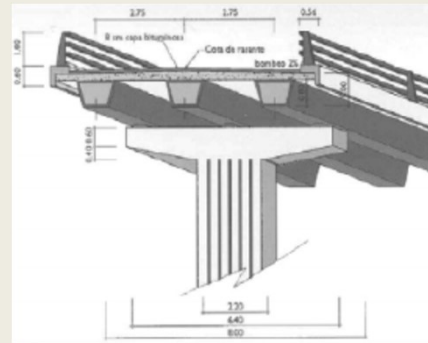
- T. Kišiček, 'Progibi betonskih greda s FRP armaturom' - disertacija, 2006. g.



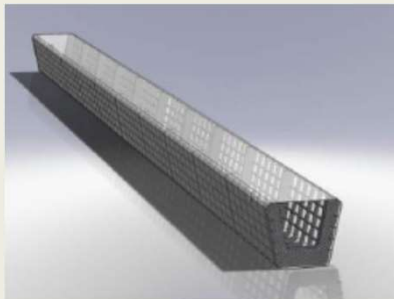


# UVOD

Izgradnja novih konstrukcija od FRP profila  
(engl.: Hybrid and all composite structures)



Autovia del Contabrico bridge, Španjolska:  
FRP nosači spregnuti sa betonskom pločom



Beam type	Open-shaped beam	Closed-shaped beam	U-shaped beam
Ideal span	10-15m	20-35m	35-40m
Depth	1.2m	1.5m	2.2m
Width	2.5m	1.8m	3.2m
Weight	1.7kN/m - 9.8kN/m	2.1kN/m - 7.9kN/m	3.7kN/m - 7.4kN/m
Materials	Glass and carbon fibre, light core	Glass and carbon fibre, light core	Glass and carbon fibre, light core
Optimal load	5-9kN/m <sup>2</sup>	5-9kN/m <sup>2</sup>	5-9kN/m <sup>2</sup>
Use	Vehicular and pedestrian bridges	Vehicular and pedestrian bridges	Vehicular and pedestrian bridges
Beam to deck connection	Bolted connection	Embedded connection	Bolted connection

West Mill bridge, UK: Prvi cestovni most u Europi izgrađen u cjelosti od FRP profila

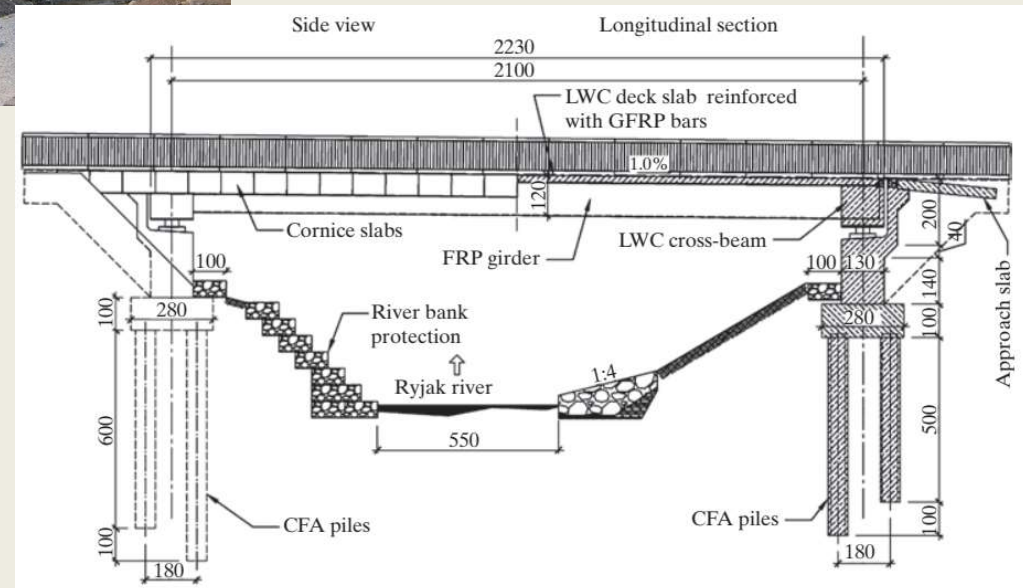
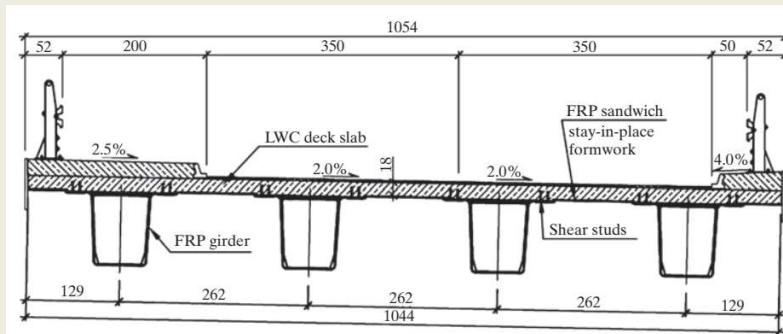


# UVOD

Izgradnja novih konstrukcija od FRP profila  
(engl.: Hybrid and all composite structures)



Road bridge over the Ryjak River,  
Near Rzeszow in south-east part of Poland





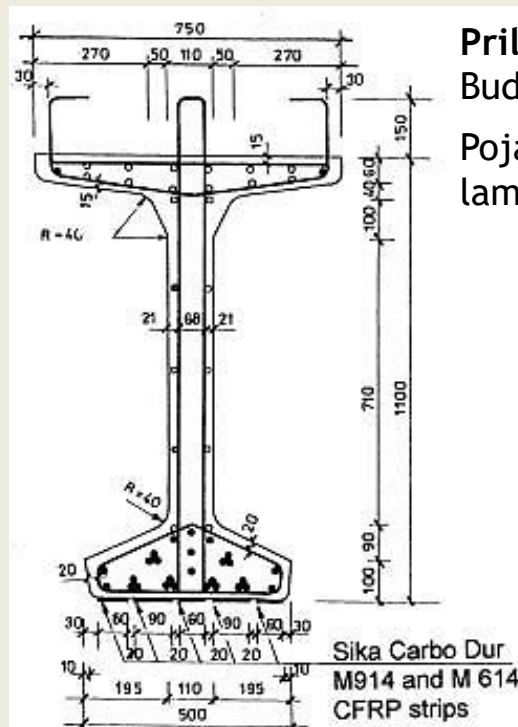
# UVOD

Mogućnosti primjene FRP-a (lamela i traka) u pojačanju postojećih betonskih konstrukcija

Pojačanje AB grede na savijanje i posmik



Povećanje nosivosti AB stupa ovijanjem



Prilazni vijadukt mostu Petofi, Budimpešta, Mađarska:

Pojačanje prednapetog nosača FRP lamelama



# MOGUĆNOSTI PRIMJENE FRP-a U SANACIJAMA MOSTOVA

## Sanacija i pojačanje mostova

- Omjer radova u građevinarstvu u Europi:

radovi na sanaciji i zaštiti: 55 %

radovi na novogradnji: 45 %

SAD	- 600.000 mostova	→ na 100.000 nužna sanacija
UK	- 100.000 mostova	→ na 10.000 nužna sanacija
HR	- 3.500 mostova	→ sanacija = ?

- Problem trajnosti konstrukcija najviše naglašen u infrastrukturnim građevinama → prvenstveno mostovima

### SANACIJE MOSTOVA:

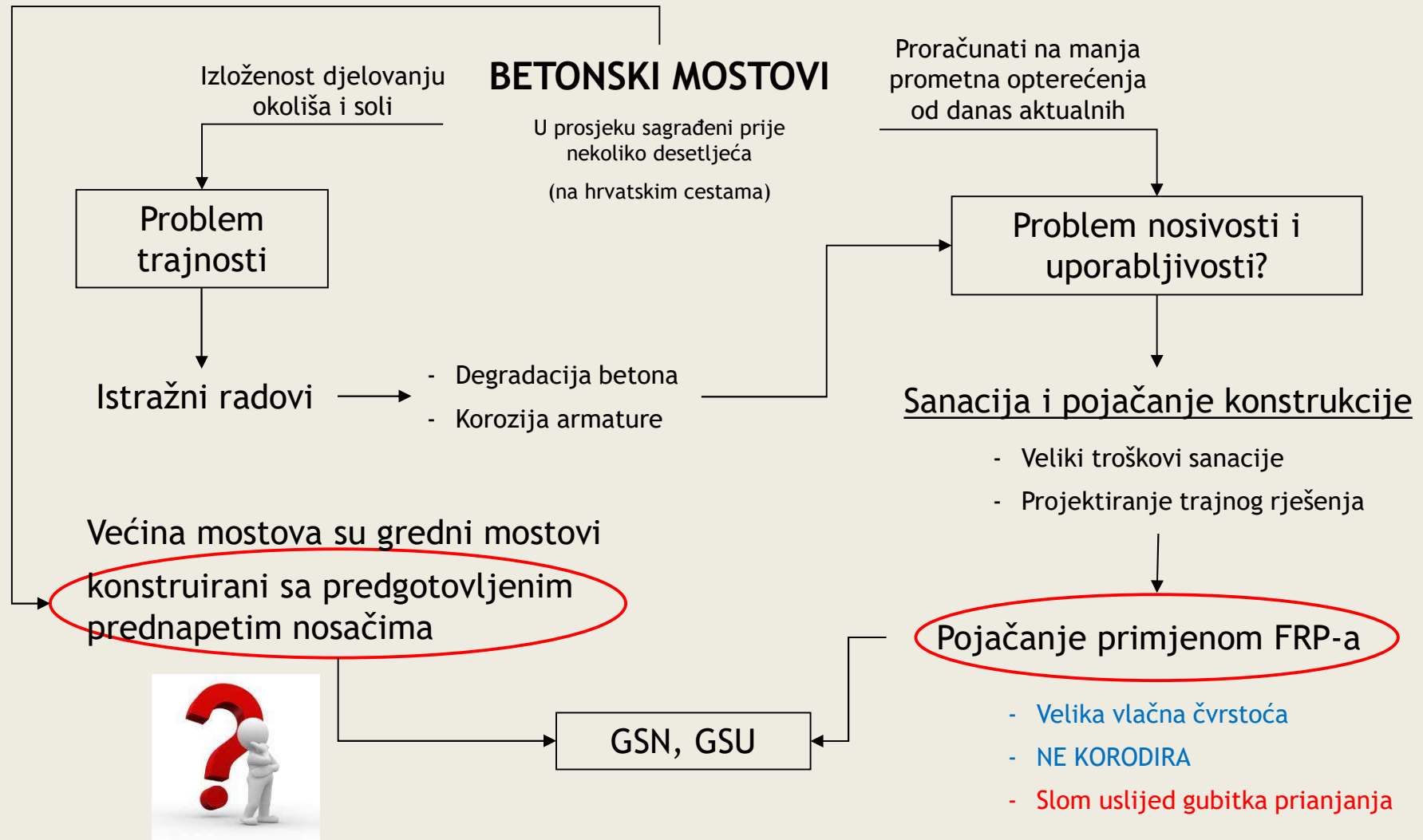
- Adaptacija (zamjena i popravak opreme mosta, ...)
- Sanacija (saniranje lokalnih oštećenja prouzročenih degradacijom betona i sl.)
- Rekonstrukcija (opsežniji radovi na popravcima i zamjeni dijelova konstrukcije, ...)
- Pojačanje konstrukcije ili konstruktivnih elemenata

- Smanjenje statičkih utjecaja (promjena statičkog sustava, smanjenje raspona, povećanje poprečne preraspodjele)
- Promjena stanja naprezanja (vanjsko prednapinjanje)
- Povećanje otpornosti presjeka (sprezanje, ugradnja dodatne čelične armature ili FRP-a)



# MOGUĆNOSTI PRIMJENE FRP-a U SANACIJAMA MOSTOVA

## Primjena FRP-a u pojačanju betonskih mostova



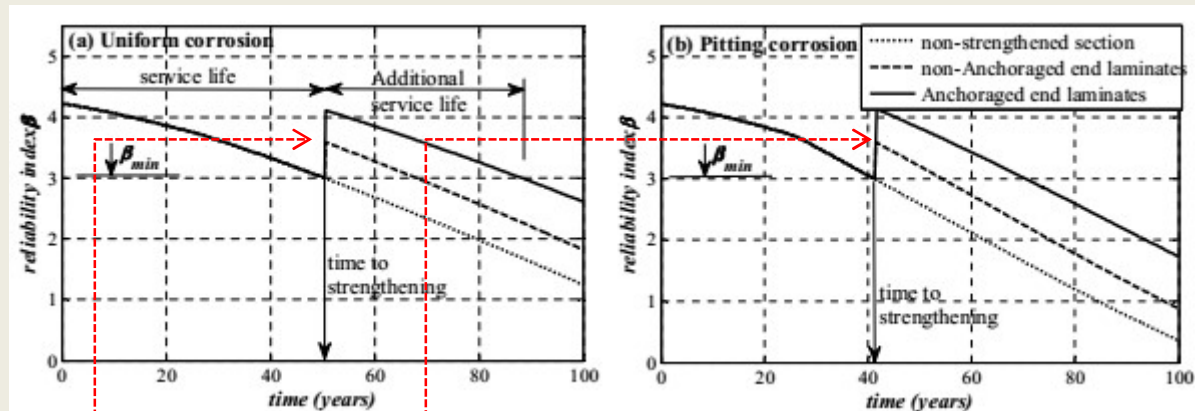


# MOGUĆNOSTI PRIMJENE FRP-a U SANACIJAMA MOSTOVA

## Problem pouzdanosti mostova i utjecaj FRP pojačanja



Granično stanje	Minimalne vrijednosti indeksa pouzdanosti $\beta$	
	za 1 godinu	za 50 godina
GSN	4,7	$3,8 (P_f = 7,2 \cdot 10^{-5})$
GSU	2,9	$1,5 (P_f = 7,2 \cdot 10^{-2})$



**Primjena FRP pojačanja**

Prikaz vremenski ovisnog indeksa pouzdanosti  $\beta(t)$  betonskih nosača za slučajeve distribuirane i točkaste korozije



# PROPISI, NORME I SMJERNICE ZA PRORAČUN AB KONSTRUKCIJA POJAČANIH FRP-om

- U protekla 2 desetljeća provedena su brojna eksperimentalna i teorijska istraživanja nosivosti na savijanje AB greda pojačanih FRP-om



- Nacionalne norme za proračun i dimenzioniranje AB konstrukcija ojačanih FRP-om

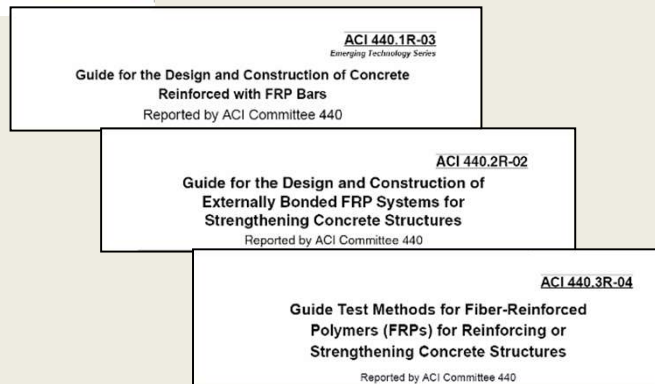
SAD - ACI 440.2R-17

Švicarska - SIA 166

Japan - JSCE

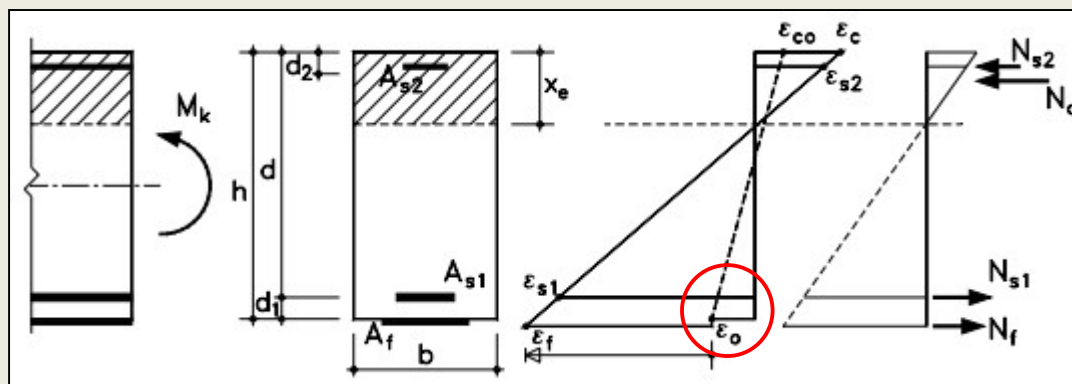
Italija - CNR-DT 200

EU - smjernice za proračun izdane od strane Fib-a (Fib bulletins 14 & 90)



# PROPISI, NORME I SMJERNICE ZA PRORAČUN AB KONSTRUKCIJA POJAČANIH FRP-om

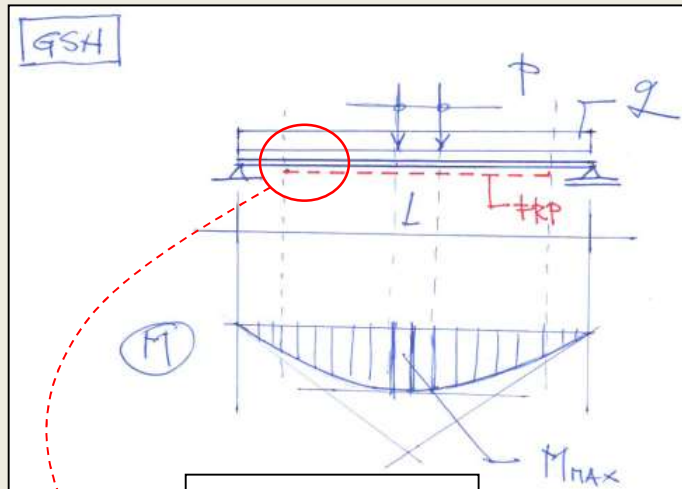
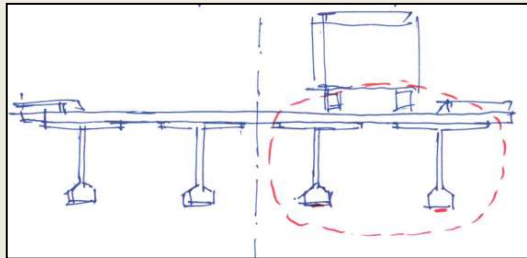
- U europski ne postoji jedinstvena norma (na nivou Eurokoda), za proračun i dimenzioniranje AB konstrukcija armiranih ili pojačanih FRP-om
- U fib-ovim biltenima (fib bulletins 14 & 90), prednapete AB konstrukcije nisu specifično obrađene, već se upute za proračun daju samo za AB konstrukcije armirane mekom armaturom
- Proračun se generalizira na način da je u slučaju prednapetih nosača pojačanih na savijanje FRP-om u početnom koraku nužno uzeti u obzir početno, tj. aktualno stanje naprezanja u promatranom kritičnom presjeku prije nanošenja pojačanja.



Nedostatak istraživanja prednapetih greda ojačanih na savijanje primjenom FRP-a!



# PONAŠANJE PREDNAPETIH NOSAČA POJAČANIH FRP-om



$M_{rd} > M_{ed}$   
 $\downarrow$   
 $M_{rd, debonding} = ?$

Utjecaj FRP ojačanja?

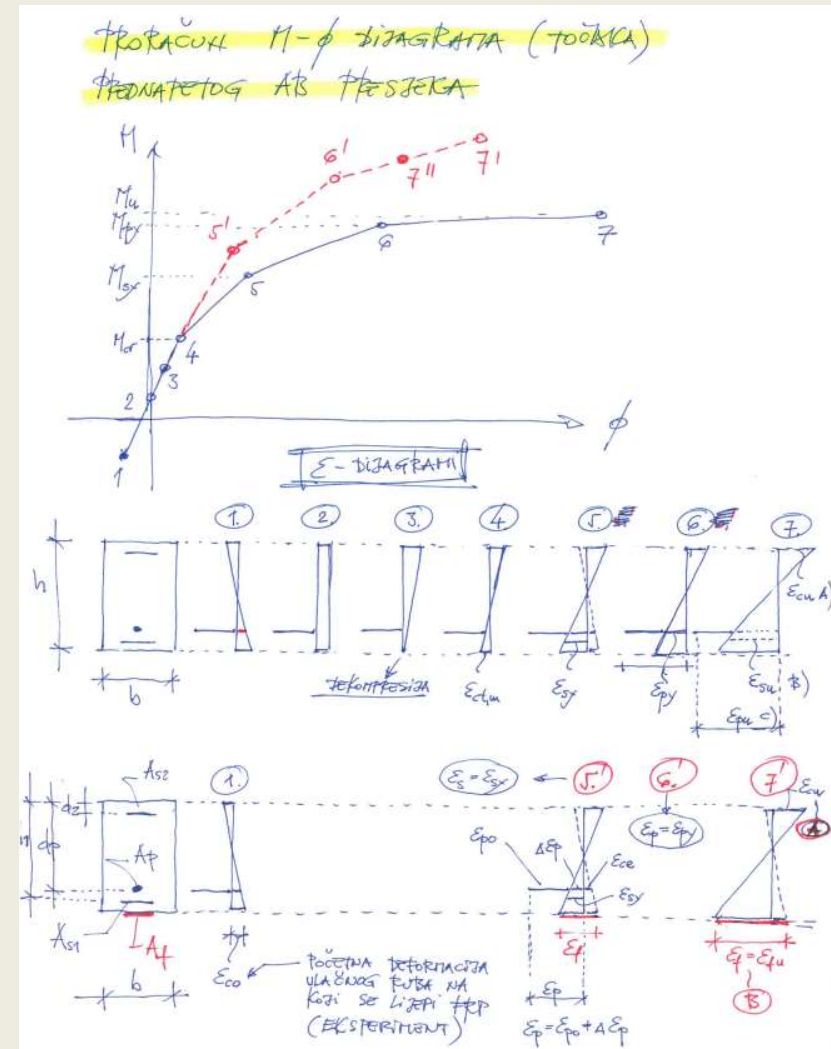
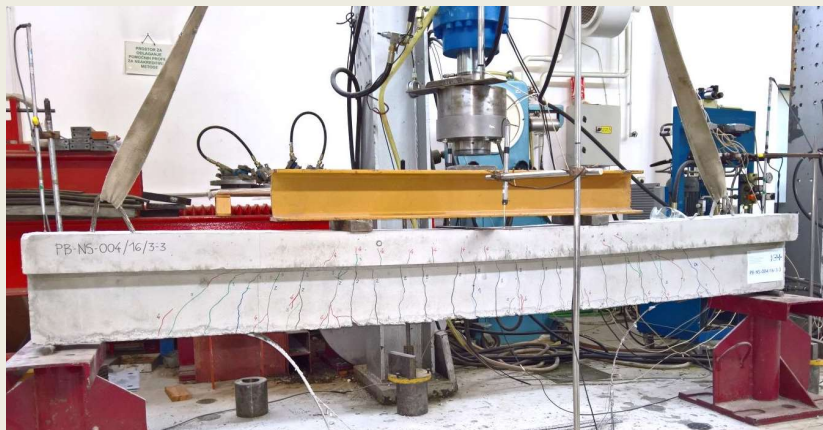
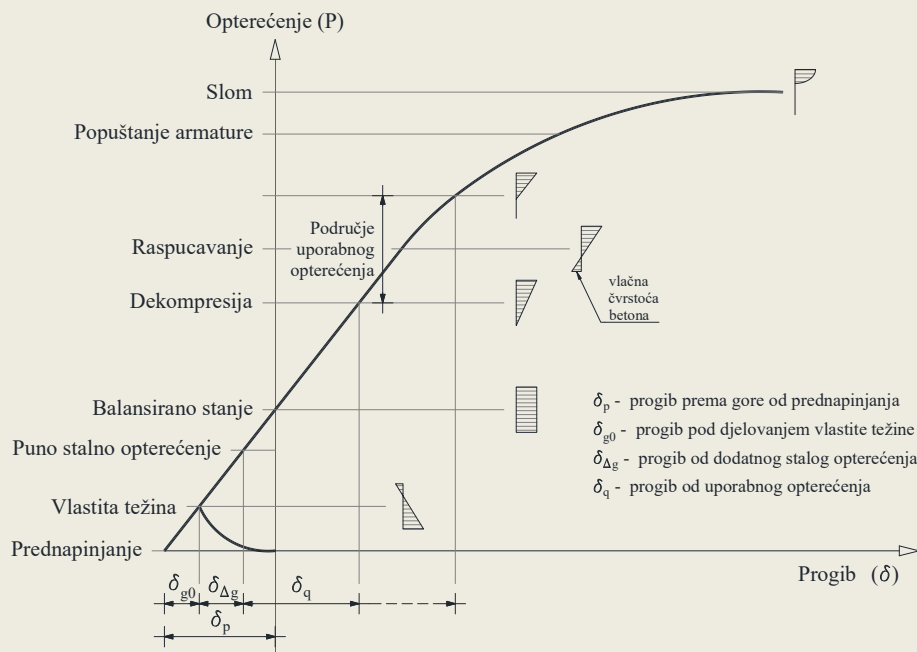


GSH

1. STANJE NAPREZANJA (PLOTKA KOTB.)
2. STANJE BEKOMPRESIJE (NAZOVISTALNA KOTB.)
3. PUKOTINE ( $t \rightarrow \infty$ ) (UČESTALA KOTB.)
4. NAPREZANJA U BETONU (KRIJETKA KOTB.)
5. NAPREZANJA U ARMATURI (KRIJETKA KOTB.)
6. NAPREZANJA U KATEGORIJA (NAZOVISTALNA KOTB.)

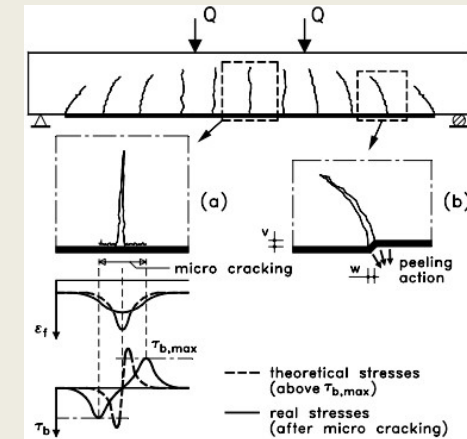
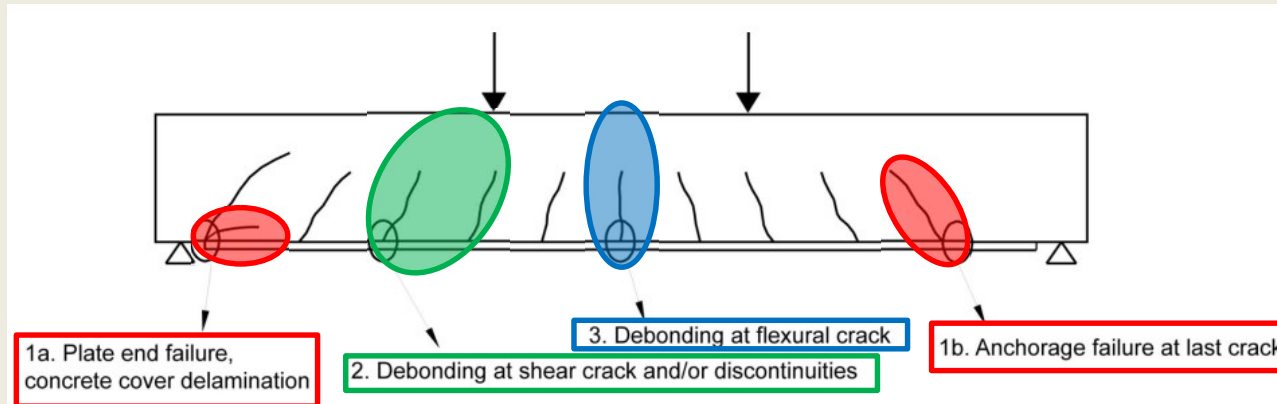


# PONAŠANJE PREDNAPETIH NOSAČA POJAČANIH FRP-om



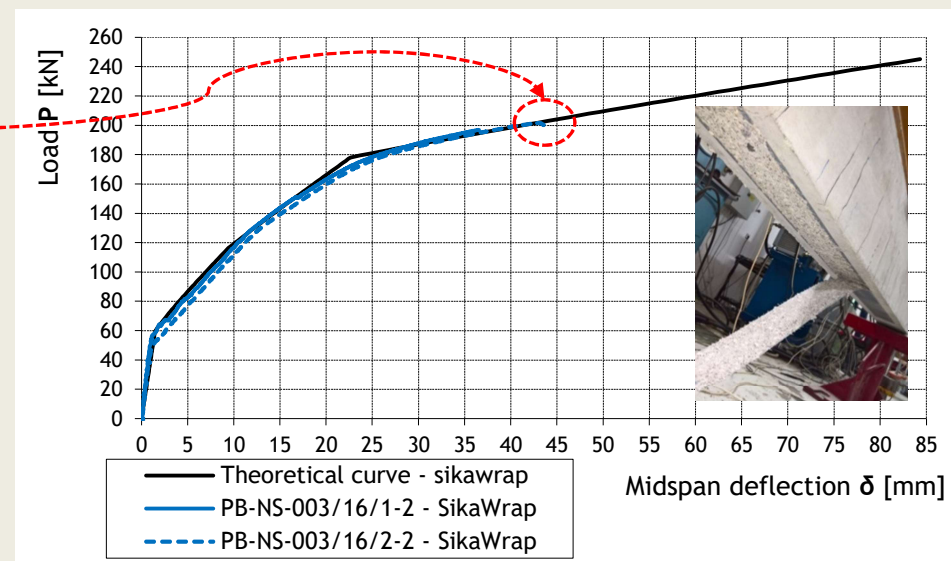
# PONAŠANJE PREDNAPETIH NOSAČA POJAČANIH FRP-om

Ekperimentalna i teorijska istraživanja GSN uslijed gubitka kompozitne veze (delaminacije FRP trake od betona)



Oblici sloma:

1. Odvajanje lamele u zoni sidrenja
2. Odvajanje lamele u zoni posmičnih pukotina
3. Odvajanje lamele u zoni maksimalnih vlačnih naprezanja

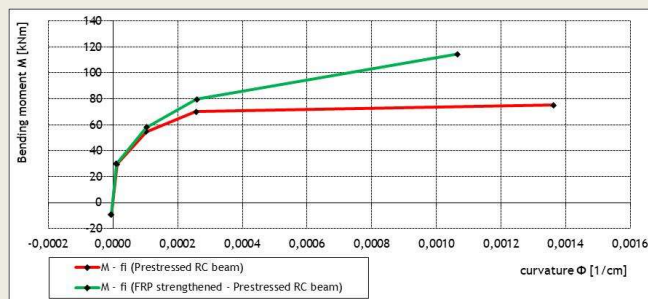




# PONAŠANJE PREDNAPETIH NOSAČA POJAČANIH FRP-om

## POSTUPAK PRORAČUNA PREDNAPETOG NOSAČA POJAČANOG FRP-om

1. Proračun stanja naprezanja i relativnih deformacija u poprečnim presjecima duž nosača za opterećenje od vlastite težine i dodatnog stalnog opterećenja (početno stanje prije nanošenja FRP-a -  $M_{G+\Delta G}$ )
2. Proračun granične otpornosti poprečnog presjeka ( $M_{Rd}$ ), za slučaj da je osigurano puno kompozitno djelovanje
3. Proračun naprezanja, relativnih deformacija i sila u betonu, armaturi, nategama i FRP-u u diskretnim presjecima uzduž nosača za proračunsko opterećenje ( $M_{Ed}$ )
4. Provjera graničnog stanja nosivosti za slučaj delaminacije FRP-a ( $M_{Rd,debonding} > M_{Ed}$ )
  - U zoni sidrenja (provjera potrebne duljine sidrenja -  $l_{b0}$ ;  $F_{b,0}$ )
  - U zoni promjene vlačne sile u FRP-u (ograničenje posmičnih naprezanja -  $\tau_{lim}$ )
  - U zoni maksimalnih vlačnih naprezanja (ograničenje relativne deformacije -  $\epsilon_{f,lim}$ )

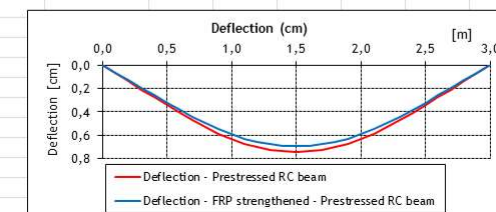
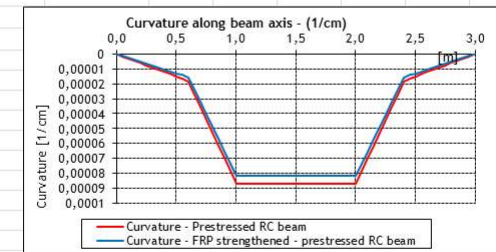
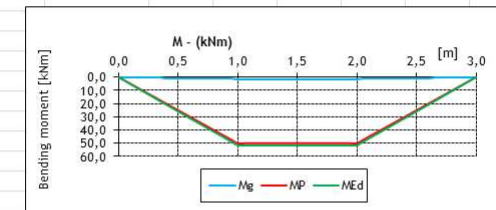
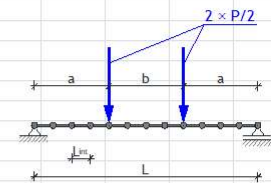
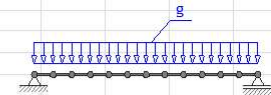


Point 5	
$M_{S\_FRP}$	58,09 kNm
$\Phi_{S\_FRP}$	0,0001 1/cm
$\epsilon_{c1}$	0,003041 -
$\epsilon_{c2}$	0,000561 -
$\epsilon_{c12}$	0,000065 -
$\epsilon_{s1}$	0,002701 -
$\epsilon_{s2}$	0,000231 -
$\epsilon_{p0}$	0,003860 -
$\epsilon_{ce}$	0,002320 -
$\epsilon_p$	0,006180 -
$\epsilon_{f0}$	0,000000 -
$\epsilon_f$	0,003041 -
$k_a$	0,34192 -
$\alpha_v$	0,25409 -
$x$	5,4 cm
$z$	28,0 cm
$y_{c1}$	1,9 cm
$y_{c2}$	1,9 cm
$y_{rd}$	5,1 cm
$y_{rg}$	1,9 cm
$F_p$	112,08 kN
$F_{s1}$	84,47 kN
$F_{s2}$	9,26 kN
$F_{c1}$	198,50 kN
$F_{c2}$	198,50 kN
$F_t$	11,17 kN
$\sigma_p$	1205,1 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{s1}$	538,0 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{s2}$	46,1 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{c1}$	14,8 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{c2}$	14,8 N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_f$	668,9 N/mm <sup>2</sup>
no. of iteration - $\epsilon_{c2}$ :	8
$M$	58,07 kNm
$F_H$	-0,05 kN

PT RC beam deflection analysis

### Load analysis

(self weight)	1,50 kN/m
P =	100,00 kN
L =	300,0 cm
L <sub>int</sub> =	10,0 cm
a =	100,0 cm
b =	100,0 cm

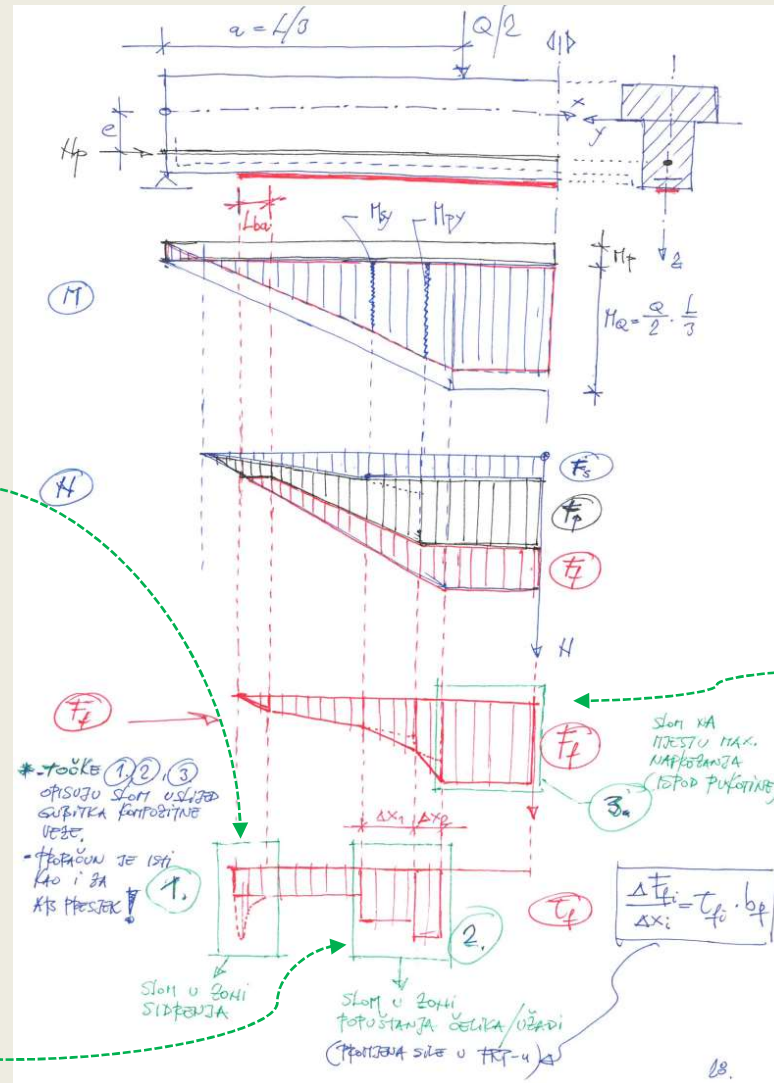


# PONAŠANJE PREDNAPETIH NOSAČA POJAČANIH FRP-om

## POSTUPAK PRORAČUNA PREDNAPETOG NOSAČA POJAČANOG FRP-om

U zoni sidrenja (provjera potrebne duljine sidrenja -  $l_{b0}$ ;  $F_{b,0}$ ) (1)

U zoni promjene vlačne sile u FRP-u (ograničenje posmičnih naprezanja -  $\tau_{lim}$ ) (2)



U zoni maksimalnih vlačnih naprezanja (ograničenje relativne deformacije -  $\epsilon_{f,lim}$ ) (3)



# PRIMJERI POJAČANJA PREDNAPETIH NOSAČA MOSTOVA PRIMJENOM CFRP LAMELA

## 1. PRIMJER - MOST PREKO RIJEKE GOLINJE NA DC 31 KOD POKUPSKOG



Investitor: HRVATSKE CESTE d.o.o.  
Projektant: Institut IGH d.d.  
Izvođač: MAR d.o.o.  
Nadzor: Ivago-Plan d.o.o.

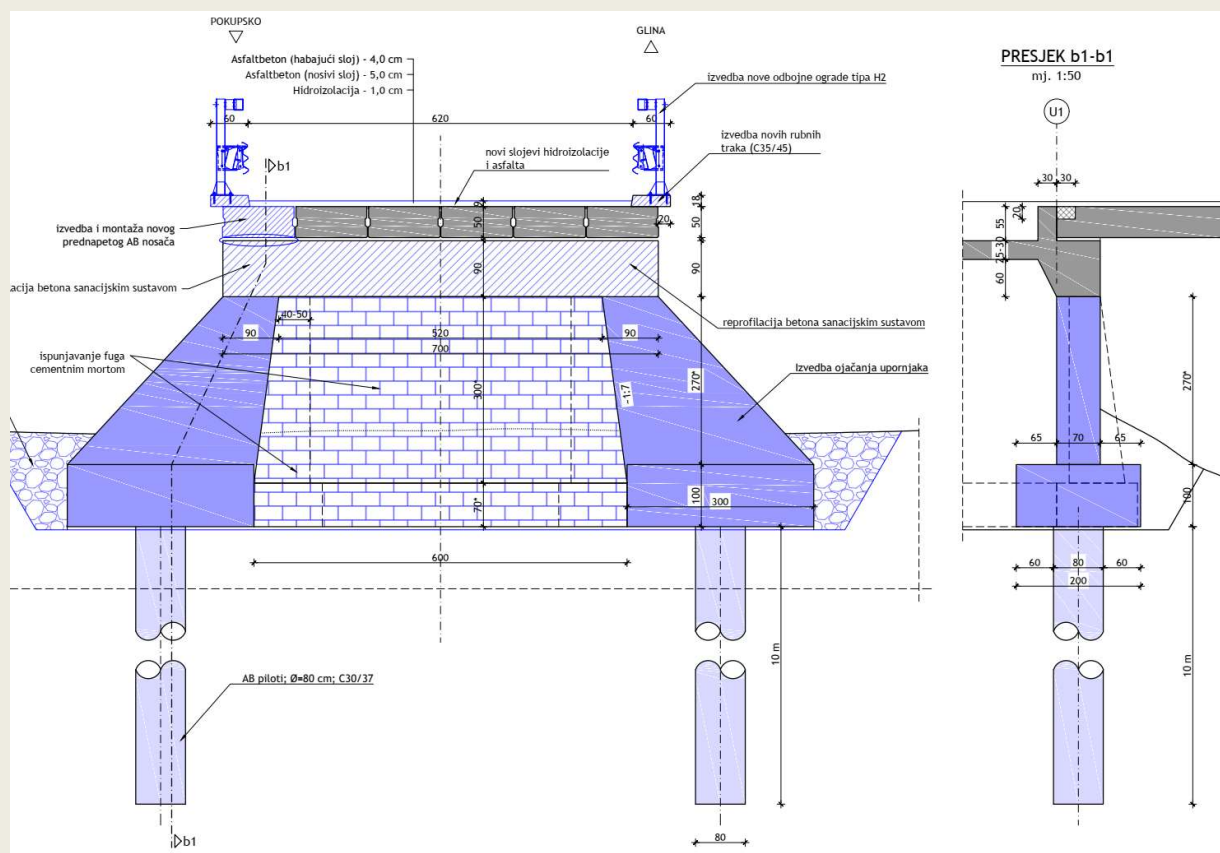






# PRIMJERI POJAČANJA PREDNAPETIH NOSAČA MOSTOVA PRIMJENOM CFRP LAMELA

## 1. PRIMJER - MOST PREKO RIJEKE GOLINJE NA DC 31 KOD POKUPSKOG

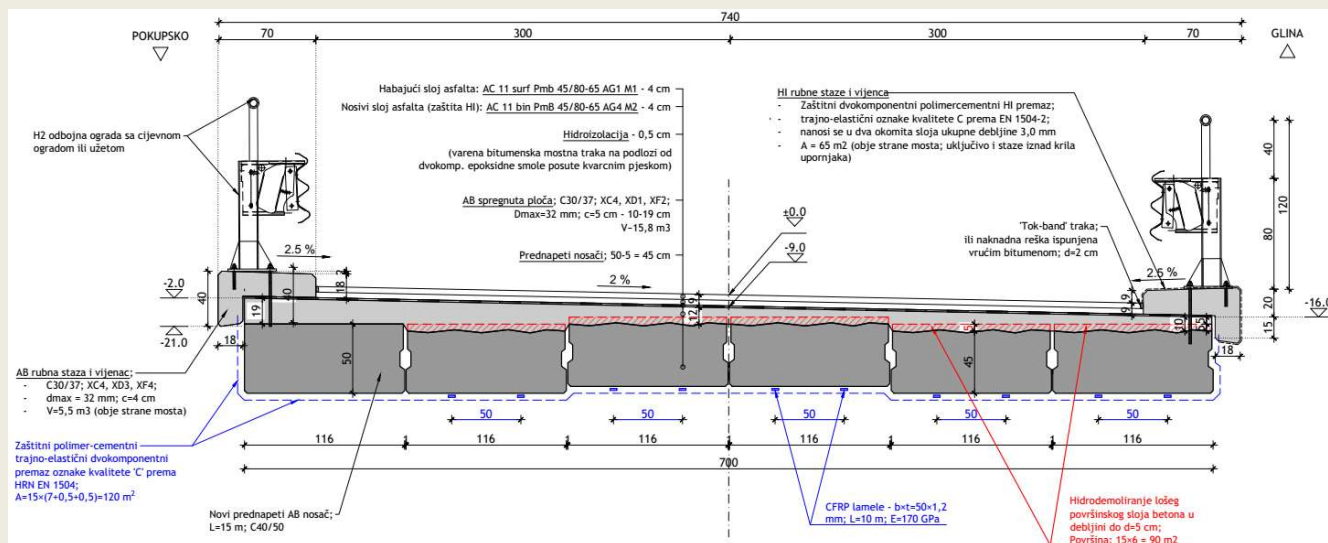


Shema rekonstrukcije upornjaka

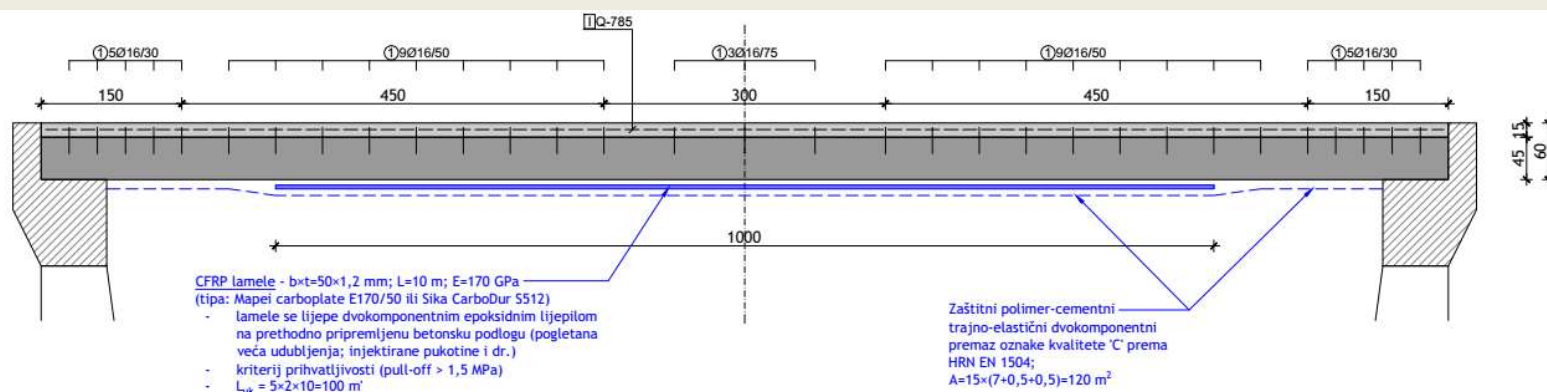


# PRIMJERI POJAČANJA PREDNAPETIH NOSAČA MOSTOVA PRIMJENOM CFRP LAMELA

## 1. PRIMJER - MOST PREKO RIJEKE GOLINJE NA DC 31 KOD POKUPSKOG



Schema ojačanja rasponske konstrukcije

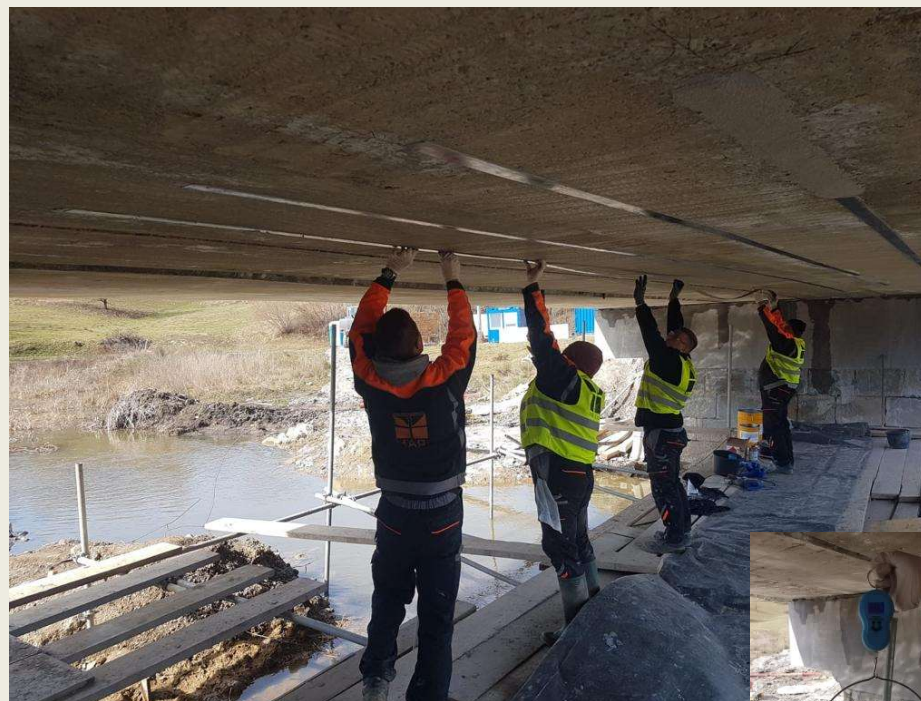


# PRIMJERI POJAČANJA PREDNAPETIH NOSAČA MOSTOVA PRIMJENOM CFRP LAMELA

## 1. PRIMJER - MOST PREKO RIJEKE GOLINJE NA DC 31 KOD POKUPSKOG

### Redoslijed izvođenja radova:

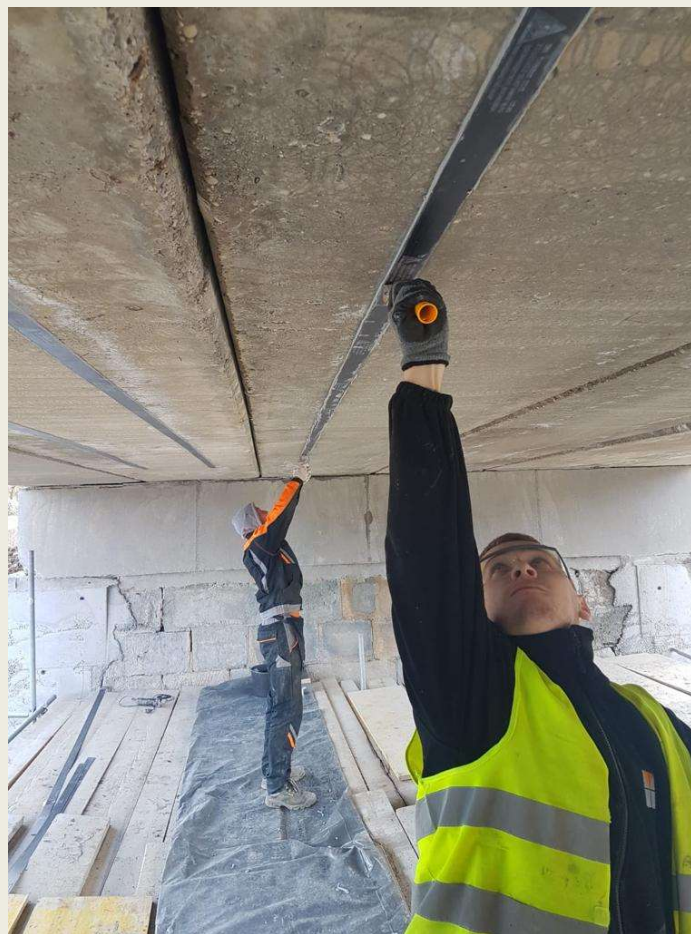
1. Čišćenje vodom pod pritiskom donje plohe nosača sa ciljem uklanjanja nečistoća i oštećenih - slabo vezanih dijelova betona
2. Sanacija oštećenja i reprofilacija neravnina reparaturnim mortom
3. Testiranje prijanjanja betona pull-off metodom (kriterij prihvatljivosti > 1,5 Mpa)
4. Primjena sustava ojačanja (lijepjenje CFRP lamela epoksidnim dvokomponentnim ljepilom)
5. Izvedba zaštitnog polimer-cementnog trajno-elastičnog dvokomponentnog premaza kvalitete "C" prema HRN EN 1504





# PRIMJERI POJAČANJA PREDNAPETIH NOSAČA MOSTOVA PRIMJENOM CFRP LAMELA

## 1. PRIMJER - MOST PREKO RIJEKE GOLINJE NA DC 31 KOD POKUPSKOG



Radovi nanošenja  
CFRP lamela na  
nosače



# PRIMJERI POJAČANJA PREDNAPETIH NOSAČA MOSTOVA PRIMJENOM CFRP LAMELA

## 2. PRIMJER - SJEVERNI MOST 'ROTORA' U ZAGREBU

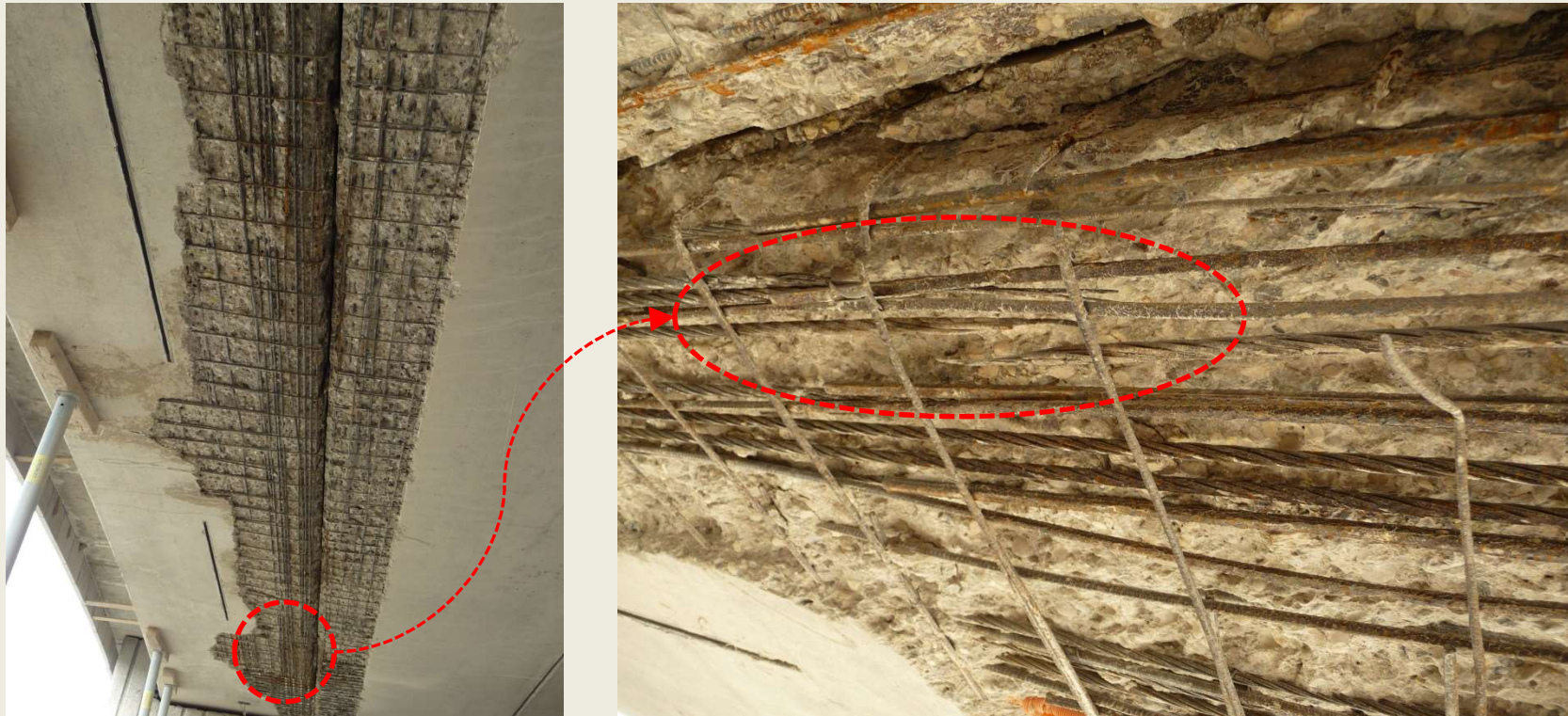


Investitor: GRAD ZAGREB  
Projektiranje i nadzor: Institut IGH d.d.  
Izvođač sanacije: MAR d.o.o.



# PRIMJERI POJAČANJA PREDNAPETIH NOSAČA MOSTOVA PRIMJENOM CFRP LAMELA

## 2. PRIMJER - SJEVERNI MOST 'ROTORA' U ZAGREBU

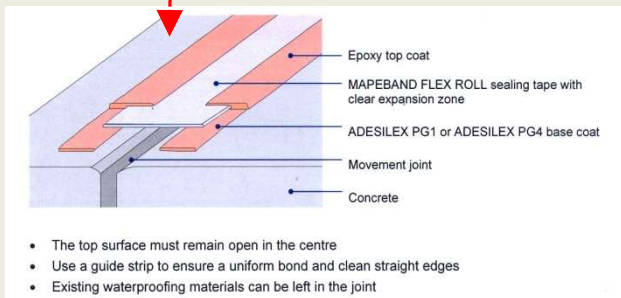
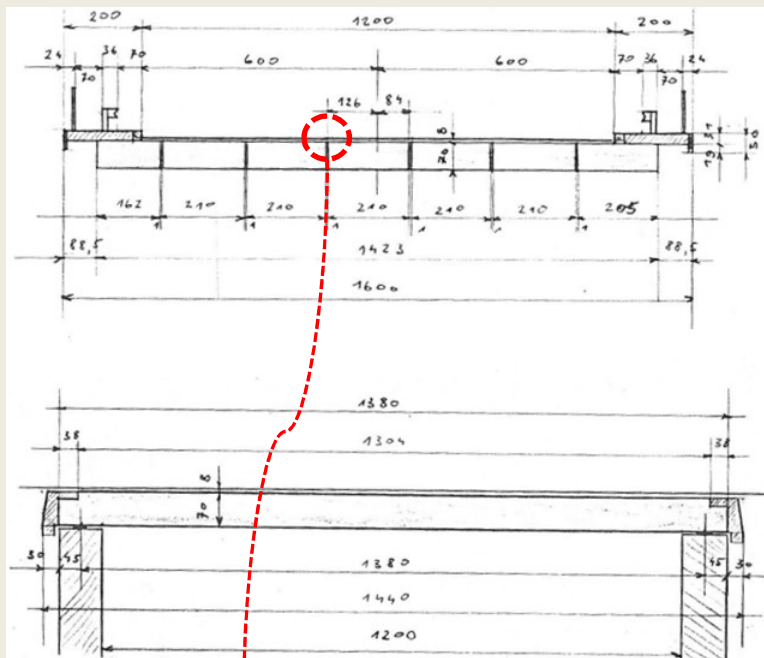


- Hidrodemoliranje reški rubnih nosača sa donje i gornje strane;
- Pregled oštećenja → utvrđeno pucanje 4 užeta i korozija na preostaloj užadi i armaturi u zonama većih oštećenja (vlaženja betona)



# PRIMJERI POJAČANJA PREDNAPETIH NOSAČA MOSTOVA PRIMJENOM CFRP LAMELA

## 2. PRIMJER - SJEVERNI MOST 'ROTORA' U ZAGREBU



### RADOVI NA SANACIJI RASPONSKE KONSTRUKCIJE MOSTA

- Radovi uklanjanja (pj. ograda, vijenci, asfaltni zastor, rubnjaci, odbojna ograda, ...)
- Reprofilacija betonom konzola pješačkih staza i izvedba novih vijenaca
- Hidrodemoliranje oštećenih dijelova rubnih nosača i lokalna reprofilacija sa reparaturnim mortom
- Čišćenje kompletnog podgleda sa vodom pod pritiskom sa ciljem uklanjanja nečistoća i nevezanih dijelova betona
- Primjena sustava pojačanja (lijepljenje CFRP lamela na oštećeni nosač);
- Reprofilacija gornjih ploha nosača betonom i mortom do nivoa nove nivelete ( $d=5-10$  cm);
- Lijepljenje brtvenih gumenih traka širine 30 cm na reškama između nosača
- Izvedba slojeva kolnika (epoksidna smola, jednoslojna HI traka, nosivi I habajući sloj asfaltbetona, holker, drenažni kanal)
- Izvedba površinske zaštite svih vanjskih ploha (gletanje - mort R2 + završni zaštitni polimer-cementni premaz)

# PRIMJERI POJAČANJA PREDNAPETIH NOSAČA MOSTOVA PRIMJENOM CFRP LAMELA

## 2. PRIMJER - SJEVERNI MOST 'ROTORA' U ZAGREBU



**RADOVI NA SANACIJI BETONSKE KONSTRUKCIJE, KOLNIKA, HODNIKA I OPREME**





# PRIMJERI POJAČANJA PREDNAPETIH NOSAČA MOSTOVA PRIMJENOM CFRP LAMELA

## 2. PRIMJER - SJEVERNI MOST 'ROTORA' U ZAGREBU

RADOVI NA POJAČANJU OŠTEĆENOG RUBNOG NOSAČA PRIMJENOM CFRP LAMELA



# PRIMJERI POJAČANJA PREDNAPETIH NOSAČA MOSTOVA PRIMJENOM CFRP LAMELA

## 2. PRIMJER - SJEVERNI MOST 'ROTORA' U ZAGREBU

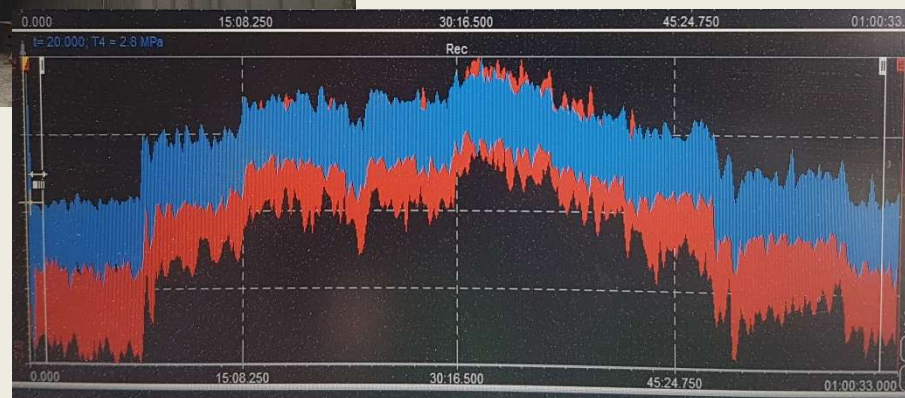
### ISPITIVANJE KONSTRUKCIJE POKUSNIM OPTEREĆENJEM



- Kontinuirano mjerenje napreznja na CFRP lamelama tijekom provođenja ispitivanja
- Maksimalno registrirano napreznje iznosilo je ~ 22 MPa

#### Podaci o ispitivanju:

- Ispitivanje je proveo **Laboratorij za konstrukcije Instituta IGH** akreditiranim postupkom sukladno normi HRN EN U.M1.046
- Provedeno je statičko i dinamičko ispitivanje rasponske konstrukcije



# ZAKLJUČAK

1. Temeljna ideja i cilj primjene FRP-a u pojačanju betonskih nosača jest da se lijepljenjem FRP lamela ili traka za vlačni pojas nadoknadi manjak armature i time poveća nosivost na savijanje.
2. Problem starih betonskih mostova jest njihova trajnost koja se primarno očituje u vidu oštećenja kolnika i opreme mosta. Međutim, česti su slučajevi pojave oštećenja i nosive konstrukcije, a koja se manifestiraju u obliku degradacije betona i koroziji armature. Može se utvrditi da su primarni razlog oštećenja betonske konstrukcije mostova premali zaštitni sloj betona, neučinkovita hidroizolacija i sustav odvodnje te loše riješeni konstruktivni detalji koji su nerijetko posljedica loše koncepcije i manjkavog statičkog sustava. Primjer toga na HR prometnicama su rasponske konstrukcije mostova konstruirane od predgotovljenih prednapetih nosača bez izvedene kolničke ploče.
3. Problem starih mostova jest i činjenica da su proračunati i konstruirani na manja nominalna prometna opterećenja od danas važećih, te pogotovo na značajno manja seizmička opterećenja!
4. → U SKLOPU SANACIJA MOSTOVA NUŽNO JE PROVODITI KONTROLNI PRORAČUN MEHANIČKE OTPORNOSTI I STABILNOSTI!!!
5. To se mora odnositi i na provjere rasponskog sklopa na prometno opterećenje i na seizmičku otpornost mostova!!!
6. → ISTRAŽNI RADOVI MORAJU PRIMARNO BITI U FUNKCIJI PRORAČUNSKE PROVJERE NOSIVOSTI I UPORABLJIVOSTI MOSTA!
7. Iz tog razloga potrebno je staviti naglasak na one istražne radove koji se tiču kontrole količine i stanja ugrađene armature i natega, a ne samo i isključivo kvalitetu betona.
8. FRP je visoko-kvalitetan materijal sa superiornim mehaničkim i fizikalnim karakteristikama, ali je i relativno skup. Iz tog razloga potrebno ga je upotrebljavati uistinu tamo gdje se može iskoristiti njegov potencijal, odnosno njegova velika vlačna čvrstoća, a to su pojačanja rasponskih konstrukcija, tj. nosača na savijanje i posmik, te pojačanja stupova tehnikom ovijanja.



**HVALA NA POZORNOSTI!**

