

Pojačanje postojećih armiranobetonskih greda i ploča s polimerom armiranim ugljičnim vlaknima (CFRP)

Hek, Sara

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:059837>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Sara Hek

**POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I
PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA
(CFRP)**

Diplomski rad

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo
Konstrukcije
Betonske i zidane konstrukcije 2**

Sara Hek

JMBAG: 0114032393

**POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I
PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA
(CFRP)**

Diplomski rad

Rijeka, veljača 2024.

IZJAVA

Diplomski rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.



Sara Hek

U Rijeci, 27. veljače 2024.

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru Davoru Grandiću na strpljenju i pomoći prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Hvala mojoj obitelji i prijateljima na podršci i razumijevanju tijekom studiranja.

SAŽETAK

Jedna od današnjih najsuvremenijih tehnika povećanja nosivosti konstrukcije je korištenje polimernih (FRP) kompozita ojačanih vlaknima. FRP materijali imaju mnoge prednosti u odnosu na čeličnu armaturu i mogu se koristiti u situacijama kada bi bilo nemoguće ili nepraktično koristiti čelik. U ovom radu obrađena je uporaba polimera armiranih ugljičnim vlaknima za pojačanje postojećih armiranobetonskih greda i ploča uslijed povećanja opterećenja. U prvom dijelu rada dan je kratak opis osnovnih karakteristika FRP-a te teorijski pregled normi za proračun FRP-a na povećane momente savijanja i poprečne sile kroz protekla dva desetljeća. U drugom dijelu rada proveden je proračun pojačanja armiranobetonskih ploča i greda na savijanje te proračun pojačanja armiranobetonskih greda na poprečne sile prema pripadajućim normama uz odgovarajuće nacрте armature.

KLJUČNE RIJEČI: polimeri armirani ugljičnim vlaknima (CFRP), lamele, pojačanje, armirano betonske grede i ploče, povećano opterećenje

ABSTRACT

One of today's most modern techniques for increasing the structural load-bearing capacity is the use of fibre reinforced polymer (FRP) composites. FRP materials have many advantages over steel reinforcement and can be used in situations where it would be impossible or impractical to use steel. This paper deals with the use of carbon fibre reinforced polymers to strengthen existing reinforced concrete beams and slabs due to increased loads. In the first part of the paper, a brief description of the basic characteristics of FRP is given, as well as a theoretical overview of the norms over the past two decades for the calculation of FRP for increased bending moments and transverse forces. In the second part of the work, the calculation of the reinforcement of reinforced concrete slabs and beams for bending and the calculation of the reinforcement of reinforced concrete beams for transverse forces was carried out according to the relevant norms with appropriate reinforcement drawings.

KEY WORDS: carbon fibre reinforced polymers (CFRP), strips, strengthening, reinforced concrete beams and plates, increased loads

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. POLIMERI ARMIRANI UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP).....	3
2.1. Sastav i svojstva polimera armiranih ugljičnim vlaknima	3
3. PRORAČUN I POJAČANJE ARMIRANOBETONSKIH ELEMENATA	6
3.1. PREUZMANJE POVEĆANIH MOMENATA SAVIJANJA	6
3.1.1. FIB 14.....	6
3.1.1.1. Općenito.....	6
3.1.1.2. Početno stanje	8
3.1.1.3. Proračun graničnog stanja nosivosti (GSN)	9
3.1.1.4. Granično stanje uporabljivosti (GSU)	12
3.1.2. TR 55.....	16
3.1.2.1. Općenito.....	16
3.1.2.2. Moment nosivosti	17
□ Preliminarni proračun.....	17
□ Proračunski moment otpora FRP-om ojačane grede.....	18
□ Primjer metode projektiranja.....	20
3.1.2.3. Otkazivanje odvajanjem FRP-a.....	22
3.1.2.5. Debeli i višeslojni laminati	25
3.1.2.6. Uporabljivost	26
3.1.3. FIB 90.....	27
3.1.3.1. Pojačanje FRP-om spojenim s vanjske strane za elemente koji su primarno izloženi savijanju s ili bez osne sile.....	27
3.1.3.2. Granično stanje uporabljivosti.....	33
□ Naprezanja materijala u slučaju pojačanja na savijanje	33
3.1.4. FprEN 1992-1-1: 2023	37
3.1.4.1. Općenito.....	37
3.1.4.2. Granično stanje uporabljivosti (GSU)	38
3.1.4.4. Zahtjevi za EBR sidrenje	39
3.1.4.5. Detalji o elementima i posebna pravila	39
3.2. PREUZIMANJE POVEĆANIH POPREČNIH SILA	41
3.2.1. FIB 14.....	41
3.2.1.1. Općenito.....	41
3.2.1.2. Proračunski model u graničnom stanju nosivosti	43

3.2.1.3. Granično stanje uporabljivosti.....	47
3.2.2. TR 55.....	48
3.2.2.1. Općenito.....	48
3.2.2.2. Postupak projektiranja FRP pojačanja.....	49
3.2.2.3. Razmak FRP lamela	53
3.2.3. FIB 90.....	54
3.2.3.1. Općenito.....	54
3.2.3.2. Elementi koji ne zahtijevaju proračunsku poprečnu armaturu	55
3.2.3.3. Elementi koji zahtijevaju proračunsku poprečnu armaturu	55
3.2.3.4. Pojačanje s obzirom na nedovoljnu otpornost na poprečne sile	55
3.2.4. FprEN 1992-1-1: 2023	60
3.2.4.1. Elementi koji zahtijevaju proračunsku poprečnu armaturu	60
3.2.4.3. Osnovna otpornost sidrenja	63
4. DIMENZIONIRANJE KONTINUIRANE PLOČE I JEDNOSTAVNE GREDE	65
4.1. KONTINUIRANE PLOČE	67
4.2. JEDNOSTAVNA GREDA	76
5. PRORAČUN I POJAČANJE ARMIRANOBETONSKIH ELEMENATA – PRIMJERI	87
5.1. PREUZIMANJE POVEĆANIH MOMENATA SAVIJANJA	90
5.1.1. FIB 14 - GREDA.....	101
5.1.2. FIB 14 PLOČA 101, x-smjer.....	104
5.1.3. FIB 14 – PLOČA 101, y-smjer.....	107
5.1.4. FIB 14 – PLOČA 102, x-smjer.....	110
5.1.5. FIB 14 – PLOČA 102, y-smjer.....	113
5.1.6. TR 55 – GREDA	116
5.1.7. TR 55 – PLOČA 101, x-smjer.....	119
5.1.8. TR 55 – PLOČA 101, y-smjer.....	122
5.1.9. TR 55 – PLOČA 102, x-smjer.....	125
5.1.10. TR 55 – PLOČA 102, y-smjer.....	128
5.1.11. FIB 90 – GREDA	131
5.1.12. FIB 90 – PLOČA 101, x-smjer.....	134
5.1.13. FIB 90 – PLOČA 101, y-smjer.....	137
5.1.14. FIB 90 – PLOČA 102, x-smjer.....	140
5.1.15. FIB 90 – PLOČA 102, y-smjer.....	143
5.1.16. FprEN – GREDA	146

5.1.17. FprEN – PLOČA 101, x-smjer.....	149
5.1.18. FprEN – PLOČA 101, y-smjer.....	152
5.1.19. FprEN – PLOČA 102, x-smjer.....	155
5.1.20. FprEN – PLOČA 102, y-smjer.....	158
5.2. PREUZIMANJE POVEĆANIH POPREČNIH SILA	161
5.2.1. FIB 14 – GREDA.....	161
5.2.2. TR 55 – GREDA.....	166
5.2.3. FIB 90 – GREDA.....	171
5.2.4. FprEN – GREDA	176
6. ZAKLJUČAK.....	181
LITERATURA.....	183
PRILOZI.....	184

Popis slika

Slika 1: Jednoosni dijagrami naprezanja i deformacije za različite jednosmjerne FRP-ove i čelik. CFRP = ugljik FRP, AFRP = aramid FRP, GFRP = stakleni FRP [1].....	2
Slika 2: FRP trake i lamele za pojačanje [6].....	4
Slika 3: FRP tkanine za pojačanje [6].....	5
Slika 4: Ugljična vlakna u polimernim šipkama [5].....	5
Slika 5: Pojačanje armiranobetonskih greda na savijanje s CFRP trakama [1].....	6
Slika 6: Idealizirane krivulje naprezanje-deformacija konstitutivnih materijala na GSN [1].....	7
Slika 7: Početna situacija [1].....	8
Slika 8: Proračun poprečnog presjeka za granično stanje pri savijanju: (a) geometrija, (b) raspodjela deformacija i (c) raspodjela naprezanja [1].....	10
Slika 9: Odvajanje uzrokovano neravninama betonske površine [1].....	12
Slika 10: Linearno elastični proračun raspucalog presjeka [1].....	13
Slika 11: Pojačanje greda i ploča FRP-om [2].....	16
Slika 12: Dijagram pravac-parabola za beton pod pritiskom i bilinearni dijagram naprezanje-deformacija [7].....	19
Slika 13: Idealizirana krivulja naprezanje - deformacija čelika za armiranje u proračunu ojačanih greda na savijanje [2].....	19
Slika 14: Karakteristična sila loma veze u odnosu na duljinu sidrenja [2].....	24
Slika 15: Pojačanje na savijanje: (a) most, (b) armiranobetonske grede i (c) armiranobetonska ploča s FRP lamelama [3].....	27
Slika 16: Krivulje opterećenje-progib za različite stupnjeve pojačanja na savijanje [3].....	28
Slika 17: Načini otkazivanja pri odvajanju betonskog elementa s vanjskim spojem FRP-a: (a) odvajanje srednje pukotine; (b) odvajanje na krajevima; (c) odvajanje zaštitnog sloja betona [3].....	29
Slika 18: Linearno elastični proračun raspucalog presjeka s vanjski vezanom armaturom [3].....	33
Slika 19: Dijagrami naprezanje-deformacija za ugljični čelik za armiranje (za vlak i tlak); 1 = nominalni dijagram za referencu, 2 = proračunski dijagrami [4]	37

Slika 20: Dijagrami naprezanje-deformacija za čelik za prednapinjanje (samo vlak); 1 = nominalni dijagram za referencu, 2 = proračunski dijagrami [4].....	38
Slika 21: Ovisnost FRP modula elastičnosti, E_{fu} , o orijentaciji vlakana [1].....	41
Slika 22: Shematski prikaz armiranobetonskog elementa ojačanog na poprečne sile FRP-om: (a) FRP lamele ili tkanine zalijepljene na hrbat; (b) omotani ili FRP u obliku slova U (koncept prikazan u D primjenjiv je i na grede i na stupove) [1].....	42
Slika 23: Posmično pojačanje: (a) kraj grede; (b) kratki stup [1].....	43
Slika 24: Shematska ilustracija reakcije na posmik [1].....	43
Slika 25: Doprinos FRP-a kapacitetu na poprečne sile [1].....	44
Slika 26: Efektivna FRP deformacija s obzirom na $E_{fu}\rho_f/f_{cm}^{2/3}$ – posmični slom u kombinaciji s odvajanjem FRP-a [1].....	46
Slika 27: Normalizirana deformacija FRP-a s obzirom na $E_{fu}\rho_f/f_{cm}^{2/3}$ – posmični slom u kombinaciji sa ili nakon loma FRP-a [1].....	46
Slika 28: Konfiguracije posmičnog pojačanja [2].....	48
Slika 29: Opće oznake za pojačanje na poprečne sile [2].....	51
Slika 30: Tipična varijacija graničnog kapaciteta naprezanja s duljinom prionljivosti [2].....	52
Slika 31: Posmično pojačanje greda s (a) zatvorenim FRP-om ili (b) trostranim FRP-om. (c) Posmično pojačanje stupova ili zidova omatanjem [3].....	54
Slika 32: Lamele koje prelaze preko pukotine od poprečnih sila [3].....	58
Slika 33: Sidrenje trostranog FRP-a: (a) upotreba šiljastih sidara u kombinaciji s FRP lamelama; (b) sidrenje pojedinačnih traka unutar ploče [3].....	59
Slika 34: Definicija oznake koja se koristi za opisivanje primjene pojačanja od CFRP-a [4].....	60
Slika 35: Ilustracija ABR spona koje prelaze preko pukotine od poprečnih sila; 1 = pukotina od poprečnih sila, 2 = trake s nagibom α_f , m = trake s $l_{bf} < l_{bf,max,k}$, n = trake koje sijeku pukotinu od poprečnih sila [4].....	63

Popis tablica

Tablica 1: Tipična svojstva ugljičnih vlakana [1].....	4
Tablica 2: Koeficijenti sigurnosti FRP materijala γ_f . [1].....	45

1. UVOD

Pitanje dogradnje postojeće građevinske infrastrukture od velike je važnosti već više od desetljeća. Propadanje kolnika mostova, greda, nosača i stupova, zgrada, parkirnih konstrukcija i drugog može se pripisati starenju, degradaciji izazvanoj okolišem, lošem projektu i/ili izvođenju, nedostatku održavanja i slučajnim događajima poput potresa. Sve veće propadanje infrastrukture često se kombinira s potrebom za nadogradnjom kako bi konstrukcije mogle zadovoljiti strože projektne zahtjeve te je stoga aspekt obnove građevinske infrastrukture dobio značajnu pozornost u cijelom svijetu. U isto vrijeme, potresna obnova postala je barem jednako važna, posebno u područjima velikog potresnog rizika. [1]

Postoje brojne situacije u kojima je možda potrebno povećati nosivost konstrukcije u uporabi, kao što je promjena opterećenja ili uporabe, ili kada je konstrukcija oštećena. U prošlosti bi se nosivost konstrukcije povećavala izvedbom dodatnog armiranog betona, dodavanjem armature ili konstrukcijskim čelikom. Šezdesetih godina prošlog stoljeća razvijena je tehnika pojačanja betonskih konstrukcija lijepljenjem čeličnih lamela na površinu vlačne zone ljepilima i vijcima. Otprilike od kasnih 1980-ih upotreba polimera ojačanih vlaknima (općenito poznatih kao FRP) se brzo razvija. [2]

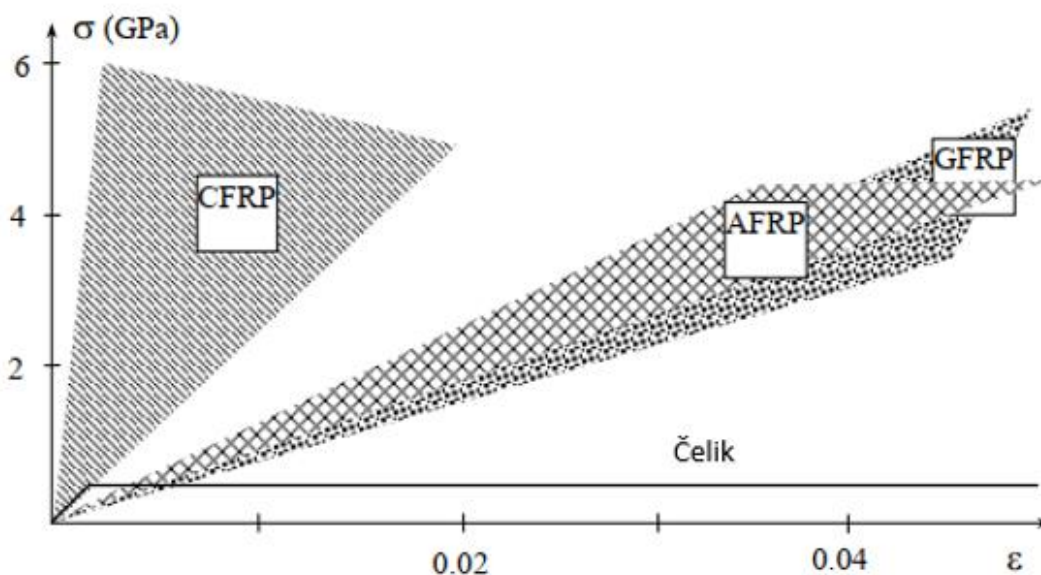
Jedna od današnjih najsuvremenijih tehnika upravo je korištenje polimernih (FRP) kompozita ojačanih vlaknima. Vlaknasti kompoziti već se godinama uspješno koriste u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji. Koriste se i u građevinarstvu – primjerice za konstrukcijske elemente, osobito u agresivnim sredinama kao što su kemijska postrojenja, te za oblaganje konstrukcijskih elemenata. [2]

FRP materijali imaju mnoge prednosti u odnosu na čeličnu armaturu i mogu se koristiti u situacijama kada bi bilo nemoguće ili nepraktično koristiti čelik: na primjer, mogu se oblikovati na mjestu u komplicirane oblike. FRP-i su lakši po težini od čeličnih ploča jednake čvrstoće ili krutosti. To čini ugradnju puno jednostavnijom i bržom i u većini slučajeva eliminira potrebu za privremenom potporom za lamele dok ljepilo ne očvrstne. FRP se također može jednostavno rezati na željenu duljinu na licu mjesta. [2]

Kompoziti također imaju određene nedostatke koje inženjeri ne smiju zanemariti: za razliku od čelika koji se ponaša na elastoplastičan način, kompoziti su općenito linearno elastični do

sloma bez ikakvog značajnog popuštanja ili plastičnosti deformacije, što dovodi do smanjene duktilnosti. Dodatno, cijena materijala na temelju težine je nekoliko puta veća od one za čelik. Štoviše, neki FRP materijali, npr. ugljik i aramid, imaju nekompatibilne toplinske koeficijente rastezanja s betonom. Konačno, njihova izloženost visokim temperaturama (npr. u slučaju požara) može uzrokovati preuranjenu degradaciju i kolaps. [2]

Za usporedbu s čelikom, tipični dijagrami naprezanje-deformacija za jednosmjerne kompozite pod kratkotrajnim monotonim opterećenjem dani su na Slici 1.



Slika 1: Jednoosni dijagrami naprežanja i deformacije za različite jednosmjerne FRP-ove i čelik. CFRP = ugljik FRP, AFRP = aramid FRP, GFRP = stakleni FRP [1]

FRP materijale stoga ne treba smatrati jedinstvenom zamjenom čelika (ili drugih materijala) za primjenu u konstrukcijama. Umjesto toga, prednosti koje nude trebalo bi procijeniti u odnosu na potencijalne nedostatke, a konačne odluke u vezi s njihovom upotrebom trebale bi se temeljiti na razmatranju nekoliko čimbenika, uključujući ne samo aspekte mehaničkih svojstava, već i izvedivost i trajnost. [2]

2. POLIMERI ARMIRANI UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)

Polimeri armirani vlaknima - FRP (*FRP - Fibre Reinforced Polymers*) kompozitni su materijali sastavljeni od matrice (smola), koja predstavlja polimernu osnovu, armirane organskim ili anorganskim vlaknima određenih omjera duljine i debljine. [5]

Odabir materijala za različite sustave pojačanja kritičan je proces. Svaki je sustav jedinstven u smislu da su vlakna i vezivne komponente dizajnirane da se deformiraju zajedno što implicira da vezivo za jedan sustav pojačanja neće nužno biti povoljan za neki drugi. Nadalje, vezivo za vlakna neće nužno osigurati dobru vezu s betonom. Stoga se samo sustavi koji su ispitani i provjereni u primjeni na armiranobetonskim konstrukcijama trebaju koristiti u EAR (Externally Applied Reinforcement) pojačanju. [3]

2.1. Sastav i svojstva polimera armiranih ugljičnim vlaknima

Kod FRP-a matrica zauzima oko 30-60% sveukupnog volumena polimernog kompozita, a može biti termoreaktivnog tipa ili termoplastičnog tipa, pri čemu je prvi najčešći. Funkcija matrice je zaštititi vlakna od abrazije ili korozije iz okoliša, povezati vlakna zajedno i raspodijeliti opterećenje. Matrica ima snažan utjecaj na mehanička svojstva kompozita. Fizikalne i kemijske karakteristike matrice kao što su temperatura taljenja ili stvrdnjavanja, viskoznost i reaktivnost s vlaknima utječu na izbor procesa izrade. Epoksidne smole, poliester i vinilester najčešći su polimerni matrični materijali. To su termoreaktivni polimeri dobre obradivosti i dobre kemijske otpornosti. Epoksidi općenito imaju bolja mehanička svojstva od poliester i vinilester i izvanrednu izdržljivost, dok su poliester i vinilesteri jeftiniji. [1]

Vlakna imaju za funkciju prihvaćanje opterećenja u smjeru vlakana kao i osiguranje dovoljne čvrstoće i krutosti. Najčešće se za pojačanje građevinskih konstrukcija primjenjuju tri vrste vlakana, a to su staklena, aramidna i ugljična vlakna pri čemu je važno voditi računa o tome da fizikalna i mehanička svojstva mogu jako varirati za različite vrste vlakana. [1]

Ugljična vlakna se obično temelje na smoli ili PAN-u (poliakrilonitril) kao sirovini. Vlakna smole proizvode se korištenjem rafinirane nafte ili smole ugljena koja se propušta kroz tanku mlaznicu i stabilizira zagrijavanjem. PAN vlakna izrađena su od poliakrilonitrila koji je

karboniziran izgaranjem. Promjer vlakana na bazi smole iznosi približno 9 - 18 μm , a na bazi PAN-a 5 - 8 μm . Ugljična vlakna na bazi smole nude materijale opće namjene i visoke čvrstoće/elastičnosti. Ugljična vlakna na bazi PAN-a daju materijale visoke čvrstoće i visoke elastičnosti. Tipična svojstva ugljičnih vlakana navedena su u *Tablici 1*.

Tablica 1: Tipična svojstva ugljičnih vlakana [1]

Materijal	Modul elastičnosti (GPa)	Vlačna čvrstoća (MPa)	Krajnja vlačna deformacija (%)
Ugljik velike čvrstoće	215 - 235	3500 - 4800	1,4 – 2,0
Ugljik vrlo velike čvrstoće	215 - 235	3500 – 6000	1,5 – 2,3
Ugljik velikog modula elastičnosti	350 - 500	2500 – 3100	0,5 – 0,9
Ugljik vrlo velikog modula elastičnosti	500 – 700	2100 - 2400	0,2 – 0,4

Kompozitni materijali za pojačanje građevinskih konstrukcija danas su uglavnom dostupni u obliku: 1) tankih jednosmjernih traka (debljine reda 1 mm) izrađenih pultruzijom (Slika 2)



Slika 2: FRP trake i lamele za pojačanje [6]

2) fleksibilnih listova ili tkanina, izrađenih od vlakana u jednom ili najmanje dva različita oblika. smjerovima (i ponekad prethodno impregnirani smolom) (Slika 3)



Slika 3: FRP tkanine za pojačanje [6]

3) šipke promjera veličine nekoliko mm izrađene poltruzijom (Slika 4) [1]



Slika 4: Ugljična vlakna u polimernim šipkama [5]

3. PRORAČUN I POJAČANJE ARMIRANOBETONSKIH ELEMENATA

3.1. PREUZMANJE POVEĆANIH MOMENATA SAVIJANJA

3.1.1. FIB 14

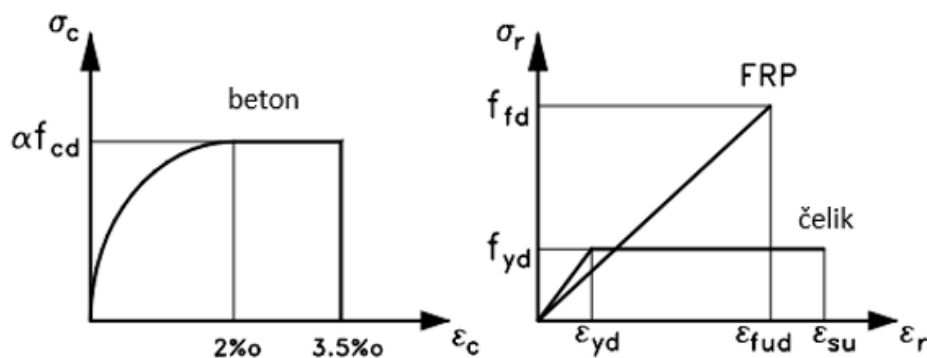
3.1.1.1. Općenito

Armiranobetonski elementi, kao što su grede, ploče i stupovi, mogu se ojačati na savijanje upotrebom FRP kompozita epoksidno vezanih za njihove vlačne zone, sa smjerom vlakana paralelnim sa osi elementa. Koncept je ilustriran na slici 5, koja također prikazuje praktičnu primjenu. Proračun graničnog stanja nosivosti pri savijanju za takve elemente može slijediti postupke za armiranobetonske konstrukcije, pod uvjetom da je doprinos vanjske FRP armature pravilno uzet u obzir. [1]



Slika 5: Pojačanje armiranobetonskih greda na savijanje s CFRP trakama [1]

Idealizirane krivulje naprezanje-deformacija za beton, FRP i čelik prikazane su na Slici 6. Ove krivulje čine osnovu za analizu graničnog stanja nosivosti betonskih elemenata ojačanih na savijanje. Osnova proračuna ovih elemenata je identifikacija svih mogućih načina otkazivanja. Njihov opis dan je u nastavku, nakon kratkog prikaza učinka početnog opterećenja koje djeluje u vrijeme pojačanja. [1]



Slika 6: Idealizirane krivulje naprežanje-deformacija konstitutivnih materijala na GSN [1]

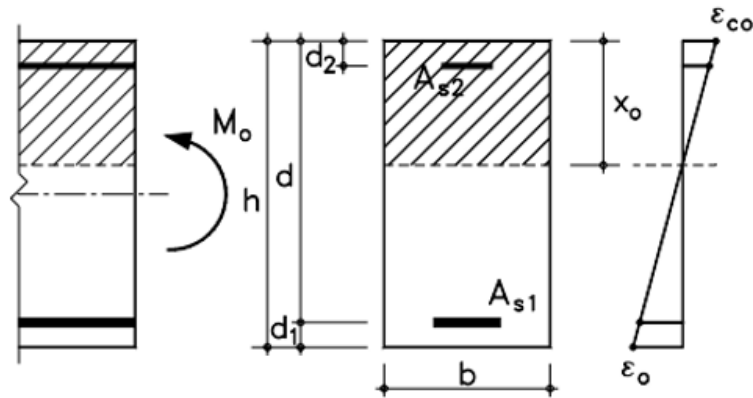
Za beton se može pretpostaviti parabolični pravokutni dijagram naprežanje – deformacija. Proračunska čvrstoća betona $\alpha f_{cd} = \alpha f_{ck} / \gamma_c$ temelji se na karakterističnoj vrijednosti tlačne čvrstoće f_{ck} , djelomičnom sigurnosnom faktoru $\gamma_c = 1,5$ i redukcijskom faktoru $\alpha = 0,85$ kako bi se uračunala smanjena tlačna čvrstoća pri dugotrajnom opterećenju. Za čeličnu armaturu razmatra se bilinearni odnos naprežanje-deformacija, s proračunskom granicom popuštanja $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$. Faktor sigurnosti materijala γ_s iznosi 1,15.

Odnos naprežanja i deformacija FRP-a za provjere GSU može se idealizirati kao linearan, definiran kao (Slika 6) $\sigma_f = E_{fu} \epsilon_f \leq f_{fd}$, gdje je $E_{fu} = f_{fk} / \epsilon_{fuk}$ granični modul elastičnosti, temeljen na karakterističnim vrijednostima vlačne čvrstoće i granične deformacije FRP-a. Karakteristična čvrstoća f_{fk} odgovara vrijednosti 5 % fraktilne vlačne čvrstoće, a ϵ_{fuk} je vrijednost od 5 % fraktilne deformacije sloma. Primijećeno je da je modul elastičnosti E_{fu} veći od modula sekante E_{fk} . Ipak, to iziskuje provjeru te se E_{fu} ne smije uzimati manje od $E_{fk0,05}$.

Kod proračuna GSU ili GSN koji odgovara drobljenju betona ili slomu veziva, FRP naprežanje je ograničeno. U ovoj situaciji, što će često biti slučaj, naprežanje FRP-a σ_f za GSN je znatno manje od vlačne čvrstoće, tako da proračunska vlačna čvrstoća općenito nije mjerodavna te se upućuje na projektiranu vlačnu čvrstoću f_{fd} . [1]

3.1.1.2. Početno stanje

Učinak početnog opterećenja prije pojačanja treba uzeti u obzir u proračunu ojačanog elementa. Na temelju teorije elastičnosti i s M_o momentom eksploatacije (bez faktora sigurnosti opterećenja) koji djeluje na kritični armiranobetonski presjek tijekom pojačanja, može se procijeniti raspodjela deformacije elementa. Kako je M_o obično veći od momenta pojave pukotina M_{cr} , izračun se temelji na raspucalom presjeku (Slika 7). Ako je M_o manji od M_{cr} , njegov utjecaj na proračun ojačanog elementa može se zanemariti.



Slika 7: Početna situacija [1]

Na temelju idealnog presjeka s pukotinama, visina tlačnog područja x_o može se riješiti iz:

$$\frac{1}{2}bx_0^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_0 - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_0) \quad (1)$$

gdje je $\alpha_s = E_s/E_c$. Deformacija betona ϵ_{co} na gornjem rubu može se izraziti kao:

$$\epsilon_{c0} = \frac{M_o x_0}{E_c I_{co}} \quad (2)$$

gdje je I_{o2} moment tromosti idealnog presjeka s pukotinama:

$$I_{o2} = \frac{bx_0^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_0 - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_0)^2 \quad (3)$$

Na temelju kompatibilnosti deformacija, deformacija betona ϵ_o na vlačnom rubu iznosi:

$$\epsilon_o = \epsilon_{c0} \frac{h - x_0}{x_0} \quad (4)$$

Ova deformacija jednaka je početnoj osnovj deformaciji na razini FRP EBR (Externally bonded FRP reinforcement), potrebnoj za ocjenu ojačanog elementa. [1]

3.1.1.3. Proračun graničnog stanja nosivosti (GSN)

1) Potpuno kompozitno djelovanje

- Popuštanje čelika praćeno drobljenjem betona

Prema načinu loma pri popuštanju čelika te drobljenju betona, koji je najpoželjniji, lom kritičnog presjeka događa se popuštanjem vlačne čelićne armature nakon čega slijedi drobljenje betona, dok je FRP netaknut. Proraćunski moment nosivosti ojaćanog poprećnog presjeka izraćunava se na temelju načela proraćuna armiranobetonskih elemenata (Slika 8). Najprije se izraćunava visina tlačnog područja x , iz kompatibilnosti deformacija i ravnoteže sila, a zatim se proraćunski moment nosivosti dobiva s pomoću ravnoteže momenata. Proraćunom treba uzeti u obzir da armiranobetonski element možda neće biti potpuno rasterećen kada se odvija ojaćavanje, te stoga treba uzeti u obzir početnu deformaciju ϵ_0 na vlačnom rubu (Slika 8). [1]

Proraćunski moment savijanja može se izraćunati na temelju sljedećeg:

Izraćun visine tlačnog područja presjeka x :

$$0,85\Psi f_{cd}bx + A_{s2}E_s\epsilon_{s2} = A_{s1}f_{yd} + A_fE_{fu}\epsilon_f \quad (5)$$

gdje je $\psi = 0,8$ i

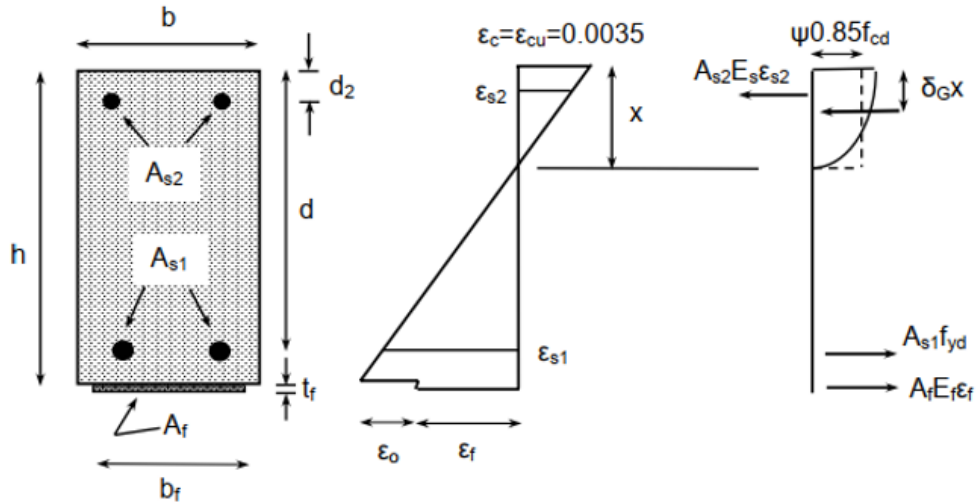
$$\epsilon_{s2} = \epsilon_{cu} \frac{x-d_2}{x} \quad (6)$$

$$\epsilon_f = \epsilon_{cu} \frac{h-x}{x} - \epsilon_0 \quad (7)$$

Proraćunski moment:

$$M_{Rd} = A_{s1}f_{yd}(d - \delta_Gx) + A_fE_f\epsilon_f(h - \delta_Gx) + A_{s2}E_s\epsilon_{s2}(\delta_Gx - d_2) \quad (8)$$

gdje je $\delta_G = 0,4$.



Slika 8: Proračun poprečnog presjeka za granično stanje pri savijanju: (a) geometrija, (b) raspodjela deformacija i (c) raspodjela naprezanja [1]

Da bi gore navedene jednačbe bile valjane, treba provjeriti sljedeće pretpostavke: (a) popuštanje vlačne čelične armature i (b) deformacija FRP-a ograničena je na krajnju deformaciju, ϵ_{fud} : [1]

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_{cu} \frac{d-x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (9)$$

$$\epsilon_f = \epsilon_{cu} \frac{h-x}{x} - \epsilon_0 \leq \epsilon_{fud} \quad (10)$$

- Popuštanje čelika praćeno lomom FRP-a

Način otkazivanja koji uključuje popuštanje čelika ili lom FRP-a je moguć. Međutim, vrlo je vjerovatno da će preuranjeno odvajanje FRP-a prethoditi lomu FRP-a i stoga se ovaj mehanizam neće aktivirati. Radi cjelovitosti, ovdje možemo reći da se proračun ovog mehanizma može izvršiti u skladu s prethodnim odjeljkom.

Jednačbe (5) – (8) i dalje vrijede, uz sljedeće izmjene: ϵ_{cu} se zamjenjuje s ϵ_c ; ϵ_f je zamijenjen sa ϵ_{fud} ; i ψ , δ_G dani su sljedećim izrazima: [1]

$$\Psi = \begin{cases} 1000\epsilon_c \left(0,5 - \frac{1000}{12}\epsilon_c\right) & \text{za } \epsilon_c \leq 0,002 \\ 1 - \frac{2}{3000\epsilon_c} & \text{za } 0,002 \leq \epsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad (11)$$

$$\delta_G = \begin{cases} \frac{8-1000\varepsilon_c}{4(6-1000\varepsilon_c)} \text{ za } \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c-4)+2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c-2)} \text{ za } 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad (12)$$

2) Gubitak kompozitnog djelovanja

- Odvajanje na krajevima sidrenja i na pukotinama od savijanja

Tretiranje odvajanja na krajnjem sidrenju i na pukotinama od savijanja može se obaviti različitim pristupima, koji su ukratko opisani u nastavku.

- Provjera na krajevima sidrenja, ograničenje naprezanja u FRP-u

Kod ovog pristupa treba primijeniti ograničenje naprezanja na FRP kako bi se osiguralo da će se spriječiti lom spoja daleko od sidrenja. Ovaj pristup predstavlja grubo pojednostavljeno stvarnog ponašanja, budući da FRP deformacija koja odgovara lomu spoja nije fiksna vrijednost, već ovisi o nizu parametara, uključujući odnos momenta od poprečnih sila, deformaciju čelične armature i raspodjelu pukotina.

- Provjera prema liniji ovojnice vlačnih naprezanja u FRP-u

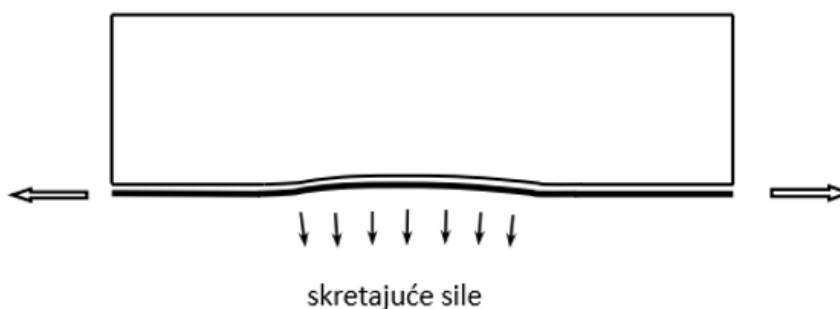
U ovom pristupu odvajanje se tretira na unificiran način i na krajevima sidrenja i na bilo kojoj točki duž spoja FRP-beton. Glavna prednost ovog pristupa je što se odvajanje na kraju i na pukotinama od savijanja tretira istim modelom, dok je glavni nedostatak njegova složenost, što otežava primjenu kao praktičnog inženjerskog modela.

- Provjera na krajevima sidrenja i prijenosa sile na spoju FRP-a i betona

Prema trećem pristupu (Matthys 2000.), treba slijediti dva neovisna koraka. U prvom slučaju, na krajevima sidrenje treba provjeriti na temelju konstitutivnog zakona posmično naprezanje – klizanje na spoju FRP-a i betona. U drugom treba potvrditi da se posmično naprezanje duž među površine, izračunato na temelju pojednostavljenih uvjeta ravnoteže, nalazi ispod kritične vrijednosti. [1]

- Odvajanje uzrokovano neravninama betonske površine

Odvajanje FRP-a zbog mogućih neravnina betonske površine (Slika 9) još je jedan mehanizam otkazivanja koji nije temeljito proučen. Eksperimentalni dokazi sugeriraju da se ovaj mehanizam može izbjeći usvajanjem određenih praktičnih pravila izvedbe i ograničenja hrapavosti površine betona. Većina ovih ograničenja odnosi se na maksimalnu hrapavost betona na određenoj duljini i ovisi o vrsti i dimenzijama FRP-a (npr. debljini). Specifične detalje treba potražiti u specifikacijama koje obično dostavljaju dobavljači FRP sustava za pojačanje. [1]

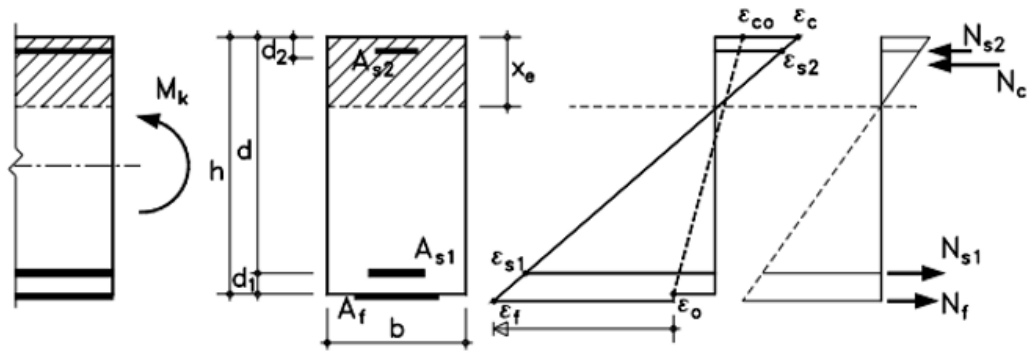


Slika 9: Odvajanje uzrokovano neravninama betonske površine [1]

3.1.1.4. Granično stanje uporabljivosti (GSU)

- Osnova proračuna

Proračuni za provjeru graničnog stanja uporabljivosti mogu se izvesti uz pretpostavku linearno elastičnog ponašanja. Upućivat će se i na neraspucale i na raspucale dijelove. Dok je visina tlačnog područja armiranobetonskog elementa, prema linearno elastičnom proračunu, neovisna o momentu djelovanja, to više nije slučaj za ojačani presjek kao rezultat početnih deformacija prije pojačanja. Uz pretpostavku linearno elastičnog ponašanja materijala i da beton preuzima vlačna naprezanja, proračun presjeka s pukotinama temelji se na slici 10.



Slika 10: Linearno elastični proračun raspucalog presjeka [1]

Iz ravnoteže sila i kompatibilnosti deformacija, visina tlačnog područja x_e dobiva se iz sljedećeg:

$$\frac{1}{2}bx_e^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_e) + \alpha_f A_f \left[h - \left(1 + \frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_c} \right) x_e \right] \quad (13)$$

gdje je $\alpha_f = E_f/E_c$. Za male vrijednosti početne deformacije ε_o , član $(1 + \varepsilon_o/\varepsilon_c)$ iznosi oko 1, tako da se jednačba (13) može izravno riješiti za x_e . Za velike vrijednosti ε_o u usporedbi s djelujućom deformacijom betona ε_c na tlačnom rubu, visina tlačnog područja x_e trebala bi se dobiti iz jednačbe (13) - (14):

$$E_c \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2}bx_e \left(h - \frac{x_e}{3} \right) + (\alpha_s - 1)A_{s2} \frac{(x_e - d_2)}{x_e} (h - d_2) - \alpha_s A_{s1} \frac{d - x_e}{x_e} (h - d)} \quad (14)$$

Zanemarujući čeličnu armaturu u tlaku ($A_{s2} = 0$) i pretpostavljajući $h/d \approx 1,1$ (srednja proračunska visina presjeka za čeličnu i FRP armaturu $\approx 1,05d$), jednačba (14) može se napisati kao:

$$E_c \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2}bx_e \left(1,05d - \frac{x_e}{3} \right)} \quad (15)$$

ili:

$$\frac{\varepsilon_o}{\varepsilon_c} \approx \frac{M_o x_e}{M_k x_o} \quad (16)$$

gdje je M_0 moment savijanja prije pojačanja, a x_0 , odgovarajuća visina tlačnog područja, izračunava se iz jednadžbe (1). Moment inercije presjeka s pukotinama dan je izrazom:

$$I_2 = \frac{bx_s^2}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_e)^2 + \alpha_f A_f(h - x_e)^2 \quad (17)$$

i ovisi, slično kao i za x_e , o momentu djelovanja M_k .

Proračun presjeka bez pukotina može se izvesti na sličan način kao i proračun presjeka s pukotinama. Međutim, kako je M_0 tipično veći od momenta pucanja M_{cr} i kako je utjecaj armature FRP-om ionako ograničen, vrijede geometrijske karakteristike presjeka bez pukotina prije pojačanja. Zanemarujući i doprinos čelične armature, moment tromosti (za pravokutne grede) može se aproksimirati kao:

$$I_1 \approx \frac{bh^3}{12} \quad (18)$$

i moment pri pojavi pukotine, za pravokutne grede, M_{cr} kao: [1]

$$M_{cr} \approx f_{ctm} \frac{bh^2}{6} \quad (19)$$

- Ograničenje naprezanja

U uvjetima opterećenja u eksploataciji potrebno je ograničiti naprezanja u betonu, čeliku i FRP-u kako bi se spriječilo oštećenje ili prekomjerno puzanje betona, popuštanje čelika i prekomjerno puzanje ili pucanje FRP-a uslijed puzanja. Ako se doda vanjska vlačna armatura i kako je tlačna sila jednaka ukupnoj vlačnoj sili, može se očekivati značajna promjena stanja naprezanja betona. Kako bi se spriječilo prekomjerno tlačenje, stvaranje uzdužnih pukotina i nepovratnih deformacija, vrijede sljedeća ograničenja za tlačno naprezanje betona (Eurokod 2):

$$\sigma_c \leq 0,60f_{ck} \quad \text{pod rijetkom kombinacijom opterećenja} \quad (20a)$$

$$\sigma_c \leq 0,45f_{ck} \quad \text{pod nazovi-stalnom kombinacijom opterećenja} \quad (20b)$$

gdje je $\sigma_c = E_c \varepsilon_c$ dobiveno iz jednadžbe (14).

Kako bi se spriječilo popuštanje čelika pri eksploatacijskom opterećenju, Eurokod 2 navodi:

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_c \frac{d-x_e}{x_e} \leq 0,80 f_{yk} \quad \text{pod rijetkom kombinacijom opterećenja} \quad (21)$$

Na sličan način, FRP naprezanje pod eksploatacijskim opterećenjem treba biti ograničeno kao:

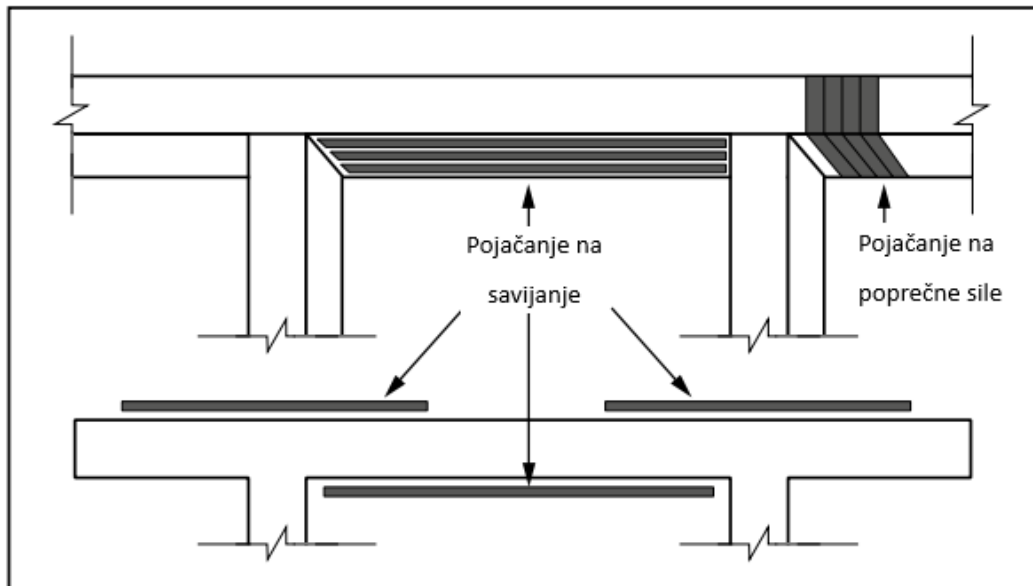
$$\sigma_f = E_f \left(\varepsilon_c \frac{h-x_e}{x_e} \varepsilon_o \right) \leq \eta f_{fk} \quad \text{pod nazovi-stalnom kombinacijom opterećenja} \quad (22)$$

gdje je f_{fk} karakteristična čvrstoća FRP-a, a $\eta < 1$ FRP koeficijent ograničenja naprezanja. Ovaj koeficijent ovisi o vrsti FRP-a i treba ga dobiti eksperimentalno. Na temelju ispitivanja otpornosti na puzanje, indikativne vrijednosti $\eta = 0,8, 0,5$ i $0,3$ mogu se predložiti za CFRP, AFRP i GFRP. Budući da je projektiranje često regulirano GSU-om, mogu se očekivati relativno niska naprezanja FRP-a pri eksploatacijskom opterećenju, tako da puknuće FRP-a puzanjem obično nije kritično. [1]

3.1.2. TR 55

3.1.2.1. Općenito

Nosivost na savijanje armiranobetonskih greda i ploča može se povećati lijepljenjem FRP-a na vlačne površine elemenata, kao što je prikazano na Slici 11.



Slika 11: Pojačanje greda i ploča FRP-om [2]

Za elemente ojačane na savijanje treba uzeti u obzir sljedeće:

- najveći moment savijanja
- rizik od otkazivanja pri ljuštenju na krajevima FRP-a
- rizik od odvajanja FRP-a i betonske podloge
- posmična nosivost presjeka
- duktilnost ojačanog elementa
- usklađenost s relevantnim graničnim stanjima uporabljivosti, npr. ograničenja naprezanja, pucanje, progib, zamor, puzanje-lom.

Osim navedenoga, ove smjernice za projektiranje ovise o sljedećim pretpostavkama:

- Nema klizanja između FRP pojačanja i podloge (tj. ravni presjeci ostaju ravni). Ova pretpostavka postavlja ograničenja debljine ljepila, modula posmika ljepila i FRP kompozitne krutosti na poprečne sile u ravnini.

- Interlaminarna posmična čvrstoća FRP pojačanja veća je od posmične čvrstoće adhezivne veze. To bi trebalo biti obuhvaćeno određivanjem vrste smola koje su prihvatljive, ograničenja volumnog udjela vlakana i modula elastičnosti FRP pojačanja.
- Kvaliteta podloge je takva da neće smanjiti učinkovitost FRP pojačanja. Stoga se stvarno stanje mora utvrditi i uzeti u obzir u projektiranju zajedno s vjerojatnim budućim propadanjem. Specifikacija bi također trebala jasno navesti dopuštene minimalne tlačne i vlačne čvrstoće betona kako bi se osigurala odgovarajuća veza i dugoročna trajnost.
- Priprema površine betonske podloge dovoljna je za postizanje potrebne razine prijanjanja koja je potrebna u projektu. [2]

3.1.2.2. Moment nosivosti

Presjek bi trebao biti projektiran tako da popuštanje čelične armature prethodi i tlačnom slomu betona i vlačnom slomu FRP-a.

U slučajevima kada će FRP doseći svoju projektiranu vlačnu deformaciju prije nego što se beton zgnječi, do sloma će obično dolaziti zbog odvajanja lamele, a ne zbog puknuća lamele. Ograničenja naprezanja i deformacije za sprječavanje odvajanja, često će biti važna kod projektiranja. U nekim slučajevima beton će se zdrobiti prije nego što FRP dosegne svoju projektiranu vlačnu deformaciju. Međutim, pod uvjetom da je deformacija čelika pri slomu dovoljno velika, to ne bi trebalo rezultirati krtim slomom ojačanog elementa. [2]

- Preliminarni proračun

Početna, ali potencijalno nekonzervativna procjena FRP zahtjeva za presjek može se dobiti pretpostavkom da položaj neutralne osi ostaje približno jednak položaju neojačanog presjeka. Približna potrebna površina FRP-a, A_f , stoga se može dobiti dijeljenjem potrebnog dodatnog proračunskog momenta grede, M_{add} , s umnoškom kraka čelične šipke, z , i proračunskog naprezanja u FRP-u (dano s $\varepsilon_{fe}E_{fd}$) kako slijedi:

$$A_f = \frac{M_{add}}{\varepsilon_{fe} E_{fd} z} \quad (23)$$

gdje je:

ε_{fe} = manji od $\varepsilon_{fk}/\gamma_{FRP,me}$ (konstrukcijska krajnja deformacija FRP-a) i deformacija od 0,008 (vrijednost koja obično rezultira odvajanjem, prema empirijskim dokazima)

$\gamma_{FRP,me}$ = proračunski parcijalni faktor sigurnosti za deformaciju FRP-a

E_{fd} = proračunski modul elastičnosti FRP-a, $E_{fk}/\gamma_{FRP,me}$

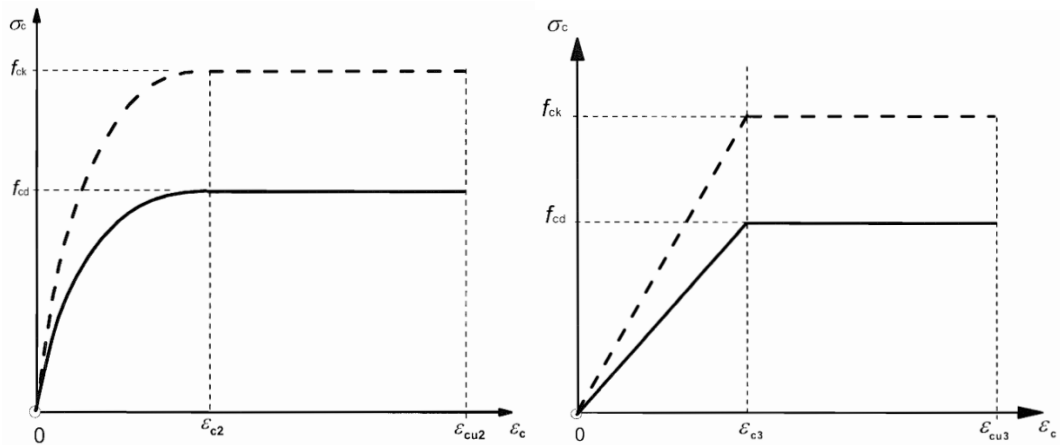
z = krak čelične šipke.

Ovaj izračun postaje manje pouzdan pokazatelj potrebne površine FRP-a ako je postojeći presjek već jako ojačan ili ako je presjek dvostruko ojačan. U svakom slučaju, uvijek je potrebno nastaviti s metodom detaljnog projektiranja, a ne oslanjati se na ovu početnu procjenu. [2]

- Proračunski moment otpora FRP-om ojačane grede

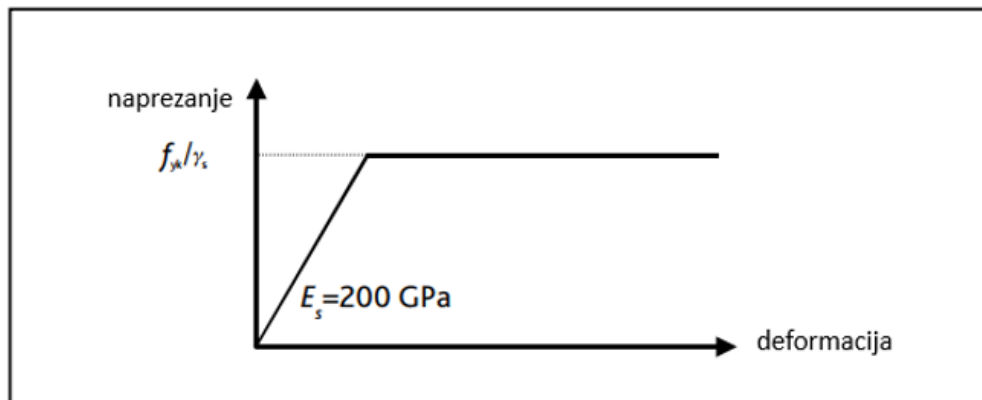
Prilikom proračuna poprečnog presjeka kako bi se odredio njegov moment nosivosti, treba uzeti u obzir sljedeće pretpostavke:

- Raspodjela naprezanja u betonu na tlak i naprezanja u armaturi, bilo na vlak ili na tlak, izvode se iz pretpostavke da ravni presjeci ostaju ravni i da nema uzdužnog klizanja između ili unutar komponenti presjeka.
- Naprezanja u betonu izvedena su iz krivulja naprezanje-deformacija iz norme EN 1992-1-1 (Slika 12) s maksimalnim naprežanjem kod sloma ograničenim na ε_{cu2} ili ε_{cu3} ovisno o korištenom dijagramu naprezanje-deformacija.



Slika 12: Dijagram pravac-parabola za beton pod pritiskom i bilinearni dijagram naprezanje-deformacija [7]

- Vlačna čvrstoća betona se zanemaruje.
- Naprezanja u čeličnoj armaturi izvedena su iz krivulja naprezanje-deformacija iz norme EN 1992-1-1 (Slika 13).



Slika 13: Idealizirana krivulja naprezanje - deformacija čelika za armiranje u proračunu ojačanih greda na savijanje [2]

- Deformacije u poprečnom presjeku trebale bi uzeti u obzir deformacije prisutne u postojećoj konstrukciji u vrijeme primjene FRP armature. Izračun ovog početnog naprezanja može se temeljiti na opterećenju pod nazovi-trajnom kombinacijom djelovanja, ili alternativno na temelju ograničenja opterećenja tijekom izvedbe pojačanja gdje se ona pouzdano kontroliraju.

- Naprezanja u FRP armaturi određena su iz pretpostavke da FRP ima linearno elastično ponašanje do puknuća.
- Do otkazivanja odvajanjem doći će kada uzdužno posmično naprezanje u FRP-u dosegne granično naprezanje.
- Puknuće FRP-a će se dogoditi kada FRP deformacija premaši deformaciju puknuća.

Nadalje, ako je moment nosivosti, izračunan u skladu s ovim pretpostavkama, manji od 1,15 puta zahtijevane vrijednosti, deformacija u težištu vlačne čelične armature treba biti veća od $0,002 + f_{yk} / (E_s \gamma_s)$.

Također treba uzeti u obzir zahtjeve za dodatnim vlačnim pojačanjem (za preuzimanje vlačnih sila koje proizlaze iz analogije rešetke za otpornost na poprečne sile). [2]

- Primjer metode projektiranja

U nastavku je dan primjer metode projektiranja:

- a) Izračunati početne deformacije u konstrukciji u trenutku pojačanja (koje se u ovom primjeru temelje na opterećenju pod nazovi stalnom kombinacijom djelovanja). Modul elastičnosti betona treba modificirati kako bi se uzeli u obzir trajanje opterećenja i učinci puzanja. U ovom primjeru razmatra se nazovi trajna kombinacija i stoga se pretpostavlja dugoročna vrijednost modula elastičnosti betona nakon što je došlo do puzanja, tj. $E_{cm} / (1 + \varphi_{ef})$, gdje je φ_{ef} efektivni koeficijent puzanja (EN 1992-1-1).
- b) Izračunati opterećenja koja će se primijeniti na konstrukciju za GSU za odgovarajuću proračunsku situaciju (koja je u ovom primjeru trajna proračunska situacija). Iz proračuna konstrukcije odrediti poprečne sile i momente savijanja na razmatranom presjeku.
- c) Procijeniti površinu uzdužnog FRP-a za projektiranje.
- d) U početku pretpostaviti vrijednost za najveću tlačnu deformaciju u betonu od ε_{cu2} ili ε_{cu3} ovisno o korištenom dijagramu naprezanje-deformacija.
- e) Pretpostaviti početni položaj neutralne osi.
- f) Izračunati sile u sastavnim dijelovima poprečnog presjeka. Deformacija koja se koristi za izračunavanje sile u FRP-u treba se procijeniti oduzimanjem početne deformacije u betonu na položaju FRP-a u vrijeme pojačanja (izračunato u koraku

- (a)) od deformacije na poziciji FRP-a od pretpostavljenog linearnog profila deformacije (ovisno o pretpostavljenom položaju neutralne osi i najvećoj deformaciji betona u koracima (d) i (e)).
- g) Iterativno prilagoditi pretpostavljeni položaj neutralne osi sve dok korak (f) ne rezultira nultom neto aksijalnom silom prisutnom u presjeku (tj. postignuta je „ravnoteža sila“).
- h) Provjeriti izračunata naprezanja i deformacije prema sljedećim kriterijima:
- Maksimalna tlačna deformacija betona ne smije premašiti ε_{cu2} ili ε_{cu3} ovisno o korištenom dijagramu naprezanje-deformacija.
 - Maksimalno uzdužno posmično naprezanje FRP-a ne bi trebalo premašiti proračunate granice.
 - Deformacija u FRP-u manja je od konačnog proračunskog kapaciteta deformacije FRP-a.

Ako vlačna deformacija ili posmično naprezanje FRP-a premašuju ove granice tada se maksimalna deformacija FRP-a treba smanjiti i postupak treba ponoviti od koraka (e) da se postigne aksijalna ravnoteža. Ako je to slučaj, beton neće dosegnuti svoju graničnu deformaciju (ε_{cu2} ili ε_{cu3}) budući da će maksimalna FRP deformacija upravljati proračunom. Maksimalna deformacija u betonu bit će određena deformacijom FRP-a i dubinom neutralne osi. Sila u betonu može se izračunati iz bilo kojeg dijagrama deformacije naprezanja, ali s prikladno skraćenom granicom deformacije uzimajući u obzir da je pravokutni blok naprezanja važeći samo ako beton dosegne svoju krajnju deformaciju.

- i) Otpor na savijanje presjeka može se izračunati na temelju momenta sila u presjeku. Ako otpor savijanja premašuje primijenjeni moment i deformacija čelične armature prelazi $0,002 + f_{yk}/(E_s \gamma_s)$, ili otpor savijanja premašuje 1,15 puta primijenjenog momenta, tada je presjek prikladan za savijanje. U protivnom će možda biti potrebno povećati količinu FRP-a i ponoviti gornji postupak od koraka (d).

Za presjeke s poprečnom armaturom ili pojačanjem na poprečne sile, potrebno je procijeniti postoji li dovoljno uzdužne armature (čelik ili FRP) da podnese dodatne vlačne sile povezane s posmikom. [2]

3.1.2.3. Otkazivanje odvajanjem FRP-a

Ponašanje dodirne plohe između FRP-a i betonske površine presudno je za izvedbu ojačane konstrukcije. Odvajanje FRP-a, zbog svoje važnosti, je tema koja potiče značajna istraživanja. Identificiran je niz inicijacijskih mehanizama i kontinuirano se napreduje u razumijevanju tih mehanizama. Odvajanje FRP-a od betona je najčešći način sloma FRP ojačanih greda.

Otkazivanja odvajanjem obično započinju na krajevima ploča, međutim, eksperimentalni dokazi sada pokazuju da odvajanje također može započeti iz pukotina od savijanja, pukotina od poprečnih sila ili konkavnih nepravilnosti u površinskom profilu, te da sve te slučajeve treba uzeti u obzir pri projektiranju.

Istraživanja su također pokazala da pojačanje FRP-om spojenim s vanjske strane može biti vrlo učinkovito bez potrebe za pričvršćivanjem vijcima ili upotrebom drugih mehaničkih spajala. Pokazalo se da povećanje površine FRP-a spojene na beton i smanjenje debljine FRP-a smanjuje vjerojatnost otkazivanja odvajanjem. [2]

- Postupak projektiranja

Postupak projektiranja koji uzima u obzir otkazivanje odvajanjem FRP-a prvo zahtijeva provjeru uvjeta ovisna o strukturi: (A) da otkazivanja neće biti izazvano nepravilnostima u profilu betonske površine. Pod uvjetom da je on zadovoljen, moraju se razmotriti daljnji kriteriji specifični za projekt koji se odnose na (B) pucanje FRP-a i (C) naprezanja koja se razvijaju u području sidrenja. Navedeni uvjeti opisani su u nastavku. [2]

(A) Odvajanje FRP-a uzrokovano nepravilnošću površine

Konkavne nepravilnosti u profilu površine na koju je FRP vezan dovest će do razvoja poprečnih vlačnih naprezanja u ljepilu i površinskom betonu dok se FRP pokušava ispraviti pod opterećenjem. Takva poprečna vlačna naprezanja mogu potaknuti početak sloma FRP-a odvajanjem.

Obično je površina na koju će se lijepiti FRP do neke mjere konkavno zakrivljena. Takve su neravnine ponekad relativno lokalne, možda zbog fleksibilnosti oplata

tijekom lijevanja, ili alternativno mogu biti i globalnije, na primjer kada je cijelo podnožje konstrukcije zakrivljeno.

Istraživanjima je utvrđeno da konkavna zakrivljenost može značajno utjecati na postignuti stupanj pojačanja.

Ako su nepravilnosti u betonu lokalne s glatko promjenjivim profilom, utjecaj zakrivljenosti može se zanemariti u proračunu ako svaka konkavnost u FRP profilu ne prelazi 3 mm u dubinu. Sustavi temeljeni na tkanini imaju tendenciju da usko prate profil betona na koji su zalijepljeni i stoga je bitno da specifikacija za takve sustave zahtijeva da betonska površina na koju će se FRP zalijepiti ima samo glatke varijacije u profilu s maksimalnim neravnina od 3 mm u 1 m dužnom. Za sustave koji se temelje na lamelama, FRP obično ne prati profil betona tako blisko i stoga veće neravnine u profilu betona, do 5 mm u 1 m dužnom, mogu biti prihvatljive pod uvjetom da FRP, nakon što je ugrađen, ima glatku varijaciju u profilu s maksimalnim neravninama od 3 mm u 1 m dužnom. U takvim slučajevima, razlika u profilu betona i FRP-a mora se nadoknaditi ljepilom. [2]

(B) Deformacije FRP-a

Puknuće je rijetko uzrok otkazivanja površinski ugrađene FRP armature, ali svejedno ga treba provjeriti. Najveća deformacija u FRP-u dogodit će se kao rezultat naprezanja na savijanje zajedno s lokalnim povećanjem deformacije na mjestima pukotina. Ukupna maksimalna deformacija u FRP-u u zoni tečenja, ε_{mt} , može se izračunati prema:

$$\varepsilon_{mt} = \varepsilon_{fmax} + 0,114 \frac{\tau_{sc}}{\sqrt{E_{fd}t_f}} \quad (24)$$

gdje je:

τ_{sc} = posmično naprezanje zbog koncentracija naprezanja (MPa)

t_f = debljina FRP-a, u mm

E_{fd} = proračunski modul elastičnosti za FRP, u MPa.

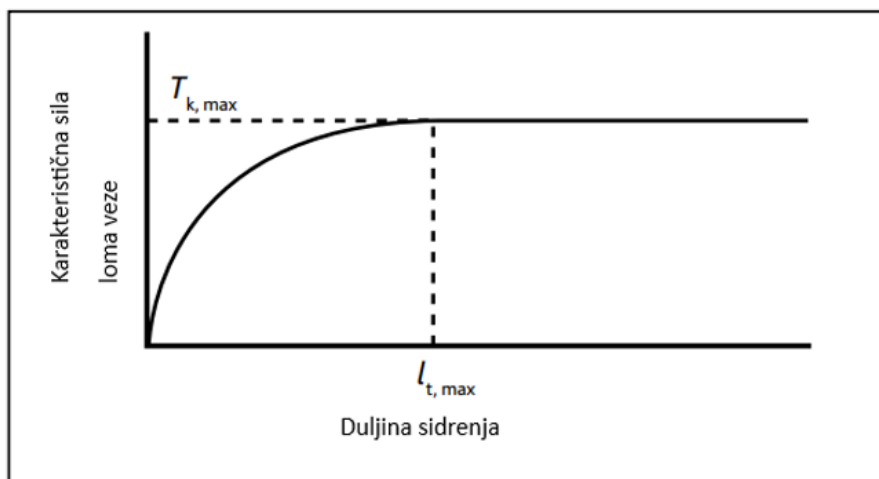
ε_{fmax} = deformacija FRP-a koja odgovara maksimalnom momentu izračunatom analizom presjeka.

Ovo povećanje deformacija zbog pukotina može dovesti do pucanja FRP-a. Stoga, najveća deformacija u FRP-u mora biti manja od proračunske deformacije loma FRP-a, tj. $\varepsilon_{mt} \leq \varepsilon_{fd}$. [2]

(C) Proračun sidrenja

Osim što je potrebno osigurati mala uzdužna posmična naprezanja, mora se osigurati odgovarajuće sidrenje na krajevima FRP-a. Zbog kombinacije povećanog uzdužnog posmika, kao rezultata završetka FRP-a i normalnih naprezanja koja rezultiraju odvajanjem, jednostavni proračuni posmičnog naprezanja nisu prikladni u zonama sidrenja.

Slika 14 ilustrira model. Može se vidjeti da karakteristična sila loma veze, T_k , raste s povećanjem duljine sidrenja, l_t , ali da postoji granična duljina sidrišta, $l_{t,max}$, iznad koje nije moguće povećanje sile loma veze.



Slika 14: Karakteristična sila loma veze u odnosu na duljinu sidrenja [2]

Maksimalna granična sila prijanjanja, $T_{k,max}$, i odgovarajuća maksimalna duljina sidrenja, $l_{t,max}$, potrebna za aktiviranje ove sile prijanjanja mogu se izračunati pomoću sljedećih izraza:

$$T_{k,max} = 0,5k_b b_f \sqrt{E_{fd} t_f f_{ctk}} \quad (N) \quad (25)$$

$$l_{t,max} = 0,7 \sqrt{\frac{E_{fd} t_f}{f_{ctk}}} \quad (mm) \quad (26)$$

gdje je:

$$k_b = 1,06 \sqrt{[(2 - b_f/b) / (1 + b_f/400)]} \geq 1,0$$

b_f = širina FRP laminata (mm)

b = širina grede (ili razmak ploča za punu ploču) (mm)

t_f = FRP debljina (mm)

E_{fd} = proračunski modul elastičnosti FRP-a (MPa)

f_{ctk} = karakteristična vlačna čvrstoća betona (MPa).

3.1.2.5. Debeli i višeslojni laminati

Neki proizvođači mogu isporučiti deblje lamele, bilo proizvedene odjednom ili spajanjem prethodno proizvedenih pultrudiranih lamela za proizvodnju debljeg laminata. Osim toga, moguće je lijepiti lamele na licu mjesta. Tkanine se laminiraju u jednu strukturu nanošenjem uzastopnih slojeva smole i tkanine dok se ne postigne potrebna debljina (a time i čvrstoća).

Međutim, postoje ograničenja debljine FRP-a koja se mogu korisno upotrijebiti. Često će sprječavanje odvajanja FRP-a od betona ograničiti debljinu, budući da će slaganje dva laminata gotovo udvostručiti uzdužna posmična naprezanja u vezi FRP-beton.

Dodatni slojevi povećavaju broj mogućih načina otkazivanja, budući da se otkazivanje može dogoditi u ljepilu između slojeva i pogoršava potencijalno otkazivanje unutar FRP-a. Ako naslagani slojevi nisu iste duljine (što je normalno, kako bi se smanjila koncentracija naprezanja u zoni suženja), postoje i dodatne zone sidrenja koje se moraju provjeriti radi odvajanja.

Treba napomenuti da FRP (bilo lamele ili tkanine) nose samo vlačna opterećenja. Međutim, kako postaju deblji, naprezanja na savijanje se induciraju u lameli jer se greda deformira pod opterećenjem. Takvo dodatno naprezanje vjerojatno neće biti značajno u smislu povećanja

ukupnih naprezanja u FRP-u, ali može imati posljedice na krajevima FRP-a, tj. u zoni sidrenja, što dovodi do značajno viših naprezanja. Nadalje, što je veći ekscentricitet FRP-a od prednje strane grede, to su veća naprezanja što može dovesti do preranog otkazivanja. [2]

3.1.2.6. Uporabljivost

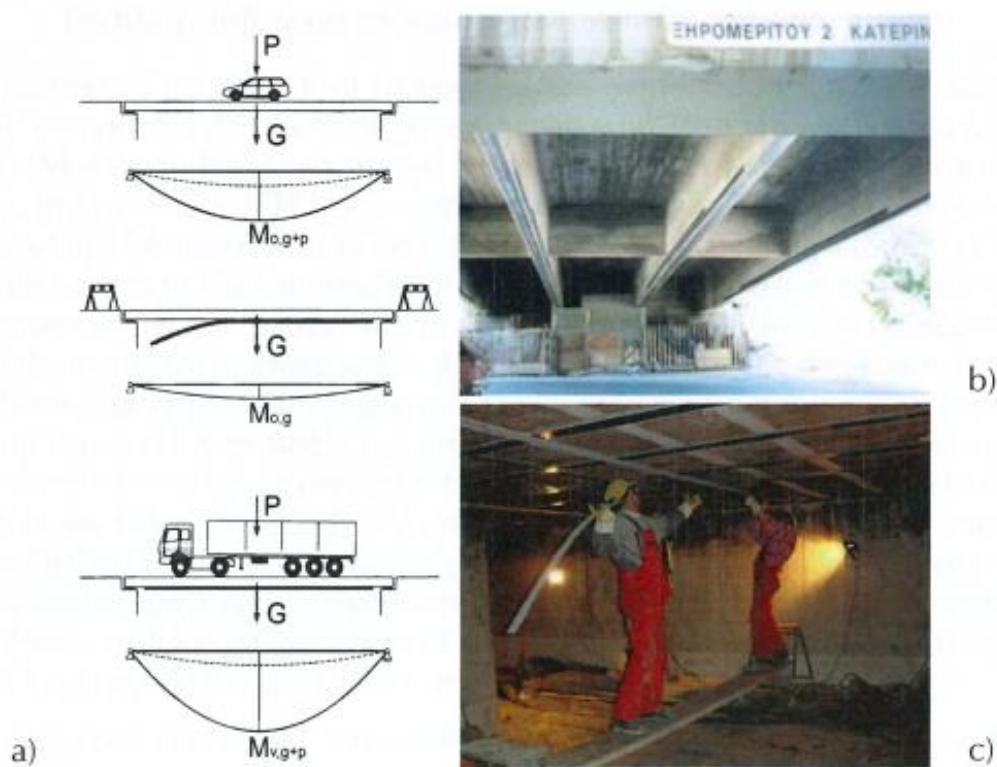
Uzroke svih postojećih pukotina u betonskoj podlozi treba utvrditi i, ako je moguće, riješiti prije ugradnje FRP sustava pojačanja. Sve takve pukotine treba popraviti prije ugradnje FRP sustava pojačanja, na primjer ubrizgavanjem smole. Svi korišteni materijali trebaju biti kompatibilni sa FRP sustavom pojačanja. [2]

3.1.3. FIB 90

3.1.3.1. Pojačanje FRP-om spojenim s vanjske strane za elemente koji su primarno izloženi savijanju s ili bez osne sile

- Osnovna načela i načini otkazivanja

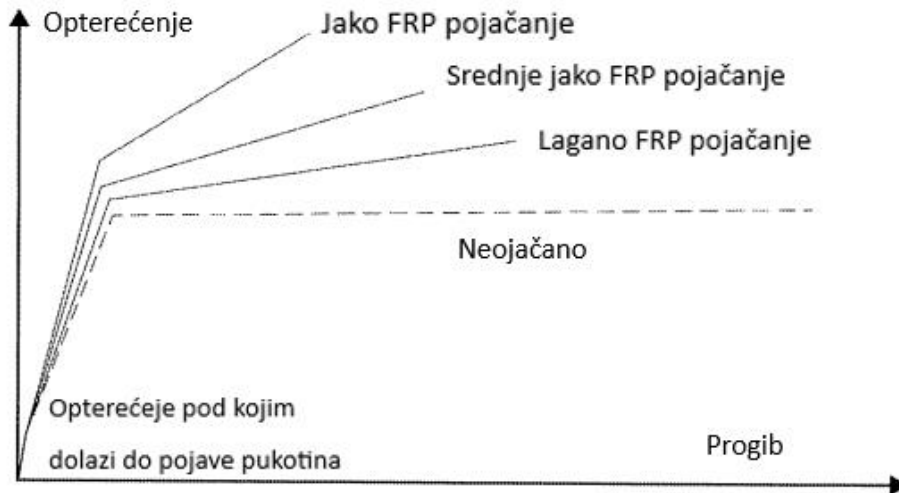
Armiranobetonski elementi, kao što su grede, ploče i stupovi, mogu se ojačati na savijanje upotrebom FRP-a epoksidno vezanog za njihove vlačne zone (Slika 17), sa smjerom vlakana paralelnim sa smjerom vlačnih naprezanja.



Slika 15: Pojačanje na savijanje: (a) most, (b) armiranobetonske grede i (c) armiranobetonska ploča s FRP lamelama [3]

Na slici 15 ilustrirana je tipična situacija opterećenja prije (Slika 15a, gore), tijekom (Slika 15a, sredina) i nakon (Slika 15a, donja slika) pojačanja na savijanje. Tipične krivulje progiba i opterećenja za neojačanu i tri ojačane armiranobetonske grede uspoređuju se na slici 16. Može se primijetiti povećanje krutosti grede, ovisno o količini FRP armature. Povećana krutost ograničava deformacije na razini eksploatacijskog opterećenja. Moment popuštanja

je malo povećan. Dodatnim FRP-om postiže se značajno povećanje nosivosti, na račun smanjenja krajnjeg progiba pri kojem se ojačana greda lomi. Način otkazivanja često ima tendenciju da bude krhke prirode i može odgovarati odvajanju između FRP-a i betona. [3]



Slika 16: Krivulje opterećenje-progib za različite stupnjeve pojačanja na savijanje [3]

Proračun za granično stanje nosivosti za takve elemente može slijediti dobro utvrđene postupke za armiranobetonske konstrukcije, pod uvjetom da: (a) je doprinos vanjske FRP armature pravilno uzet u obzir; i (b) posebna se pažnja posvećuje pitanju veze između betona i vanjske armature.

Napravljene su sljedeće pretpostavke:

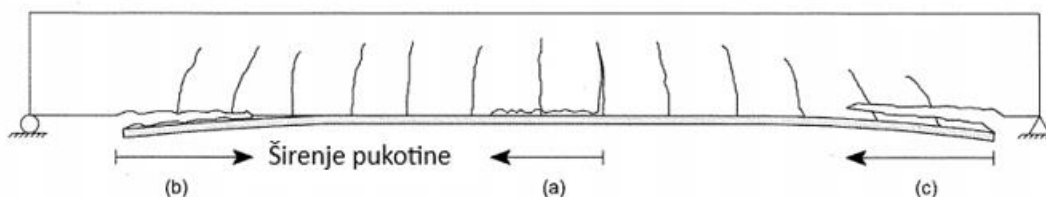
- Klizanje između FRP-a i podloge je zanemarivo. Ova pretpostavka je opravdana za većinu visokokvalitetnih konstrukcijskih ljepila koja se nanose u debljini reda veličine 1,0 mm, u kojem slučaju su osno i posmično puzanje kao i opuštanje, zanemarivi.
- Interlaminarna posmična čvrstoća FRP-a veća je od posmične čvrstoće adhezivne veze; to se može nadomjestiti odgovarajućim smolama.
- Priprema površine betonske podloge dovoljna je za postizanje razine čvrstoće prijanjanja koja je potrebna u projektu.
- Deformacijsko stanje postojeće armature u trenutku pojačanja (početno stanje) može se odrediti na temelju elastičnog proračuna raspucanog presjeka.

Betonska greda ojačana na savijanje vanjskim FRP-om može otkazati prema sljedećim načinima sloma:

- Popuštanje čelika praćeno drobljenjem betona
- Popuštanje čelika praćeno pucanjem FRP-a
- Drobljenje betona (ovaj kruti način sloma nije dopušten)
- Gubitak djelovanja kompozita zbog odvajanja, obično nakon (i rijetko prije) popuštanja čelika; ovo je najčešći način sloma

U slučajevima kada će FRP dosegnuti svoju proračunsku vlačnu deformaciju prije nego što se beton zgnječi, do otkazivanja obično dolazi zbog odvajanja, a ne zbog puknuća. Do odvajanja dolazi kroz beton, koji je "slaba karika" u smislu kapaciteta veze, prema jednom od sljedeća tri načina otkazivanja:

- Odvajanje srednje pukotine (Slika 17)
- Odvajanje na krajevima (površinski slom sidrenja) (Slika 17b)
- Odvajanje zaštitnog sloja betona (otkidanje na usidrenom kraju FRP-a) (Slika 17c)



Slika 17: Načini otkazivanja pri odvajanju betonskog elementa s vanjskim spojem FRP-a: (a) odvajanje srednje pukotine; (b) odvajanje na krajevima; (c) odvajanje zaštitnog sloja betona [3]

Odvajanje srednje pukotine i odvajanje na krajevima se razvijaju kada se prekorači čvrstoća veze i razlikuju se samo s obzirom na početnu točku procesa odvajanja. Ponašanje veze između FRP-a i betona, a time i odvajanje srednje pukotine i odvajanje na krajevima, može se karakterizirati na temelju odnosa posmičnog naprežanja i klizanja. Odvajanje zaštitnog sloja betona nastaje kada se pukotina od poprečnih sila u krajnjem području FRP-a širi na način da se odvajaju na razini ispod unutarnje čelične armature. [3]

- Proračun nosivosti na savijanje

Na svakom poprečnom presjeku ojačanog elementa mora se osigurati da proračunska otpornost elementa bude veća od proračunske vrijednosti koja proizlazi iz primijenjenog opterećenja. Ovime se sposobnost savijanja ojačanog elementa procjenjuje pomoću tradicionalnog proračuna poprečnog presjeka, na temelju kompatibilnosti naprezanja uz pretpostavku potpunog kompozitnog djelovanja između FRP-a i betonske podloge, horizontalne ravnoteže sila i ravnoteže momenta. Razina opterećenja tijekom pojačanja uzima se u obzir kroz djelujuće deformacije u presjeku u trenutku primjene EAR-a (Externally Applied Reinforcement).

- Odvajanje srednje pukotine

Uzimajući u obzir različite razine aproksimacije, dostupna je pojednostavljena FRP metoda ograničenja naprezanja i točnija metoda za analizu odvajanja srednje pukotine. Pojednostavljena FRP metoda ograničenja naprezanja temelji se na konačnoj FRP deformaciji koja je definirana na strani sigurnosti. Ova metoda može biti prilično konzervativna, budući da su te pojednostavljene granične deformacije općenito niže od onih predviđenih detaljnijim izračunima, s obzirom na različite razine aproksimacije. Točnija metoda temelji se na određivanju razmaka pukotina i na provjeri razlike FRP sile na elementu između dvije susjedne pukotine. [3]

➤ Pojednostavljena FRP metoda ograničenja naprezanja

Proračun pojačanja na savijanje za neprednapete elemente može se pojednostaviti kao proračun nosivosti opterećenja na savijanje korištenjem naprezanja FRP-a. [3]

Naprezanje u FRP-u u graničnom stanju nosivosti može se izračunati kao:

$$\sigma_{fd} = \min(f_{fbd,lc}, f_{fd}) \quad (40)$$

gdje je:

$f_{fbd,lc}$ = projektirana vrijednost čvrstoće spoja FRP koja odgovara odvajanju srednje pukotine

f_{fd} = proračunska vlačna čvrstoća FRP-a.

$$f_{\text{fbd,IC}} = \frac{k_{\text{cr,k}} \cdot k_k \cdot k_b \sqrt{\frac{2E_f f_{\text{cm}}^2}{t_f}}}{\gamma_{\text{fb}}} \quad (29)$$

gdje je:

$$k_{\text{cr,k}} = 1,8$$

$$k_k = 0,17$$

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{b}}} \geq 1$$

E_f = modul elastičnosti FRP-a (MPa)

f_{cm} = čvrstoća betona (MPa)

t_f = debljina FRP-a (mm).

➤ Točnija metoda ograničenja naprežanja

Točnija metoda uključuje provjeru prijenosa čvrstoće prionljivosti na elementima između pukotina. Za ovu provjeru mora se provjeriti je li promjena vlačne sile FRP-a, ΔF_{fEd} manja od otpora ΔF_{fRd} na svakom betonskom elementu između pukotina: [3]

$$\Delta F_{\text{fEd}} \leq \Delta F_{\text{fRd}} \quad (30)$$

Povećanje FRP vlačne sile na elementu između pukotina može se izračunati iz razlike FRP vlačnih sila na obje pukotine:

$$\Delta F_{\text{fEd}} = F_{\text{fEd}}(x + s_r) - F_{\text{fEd}}(x) \quad (31)$$

gdje je s_r razmak pukotina.

Zatim se može izvršiti ili detaljni proračun prijenosa čvrstoće prionljivosti na elementima između pukotina ili donekle pojednostavljeni proračun, kao što je navedeno u nastavku.

Obje vrste analize počinju s predviđanjem razmaka pukotina s_r za armiranobetonске elemente, koji se može odrediti kao:

$$s_r = 1,5l_{e,0} \quad (32)$$

gdje je $l_{e,0}$ duljina prijenosa čelika za armaturu, jednaka

$$l_{e,0} = \frac{M_{cr}}{z_s \cdot F_{bsm}} \quad (33)$$

gdje je

M_{cr} = moment pucanja

$z \approx 0,85 h$ (h je ukupna visina elementa)

F_{bsm} = sila veze po duljini.

U armiranobetonским elementima moment pucanja može se aproksimirati kao

$$M_{cr} = \kappa_{fl} \cdot f_{ctm} W_{c,0} \quad (34)$$

gdje je:

$$\kappa_{fl} = (1,6 - h/1000) \geq 1, \quad h \text{ (mm)}$$

$W_{c,0}$ = modul poprečnog presjeka betona bez pukotina. Pri određivanju M_{cr} za T-grede treba uzeti u obzir efektivnu širinu ruba.

Sila prionljivosti po duljini može se izračunati kao:

$$F_{bsm} = \sum_{i=1}^n n_{s,i} \cdot \pi \cdot \phi_{s,i} \cdot f_{bsm} \quad (35)$$

gdje je:

f_{bsm} = srednje naprezanje prijanjanja čelika za armaturu,

$n_{s,i}$ = broj čeličnih armaturnih šipki promjera $\phi_{s,i}$; jedna šipka s ekvivalentnim promjerom jednakim $\sqrt{2\phi_s}$ koristit će se za dvostruke šipke.

Jednadžba (35) temelji se na pretpostavci jednolikog naprezanja prijanjanja duž armaturne šipke, od napuknutog dijela do sredine između uzastopnih pukotina. Srednje naprezanje prijanjanja f_{bsm} može se dobiti na sljedeći način:

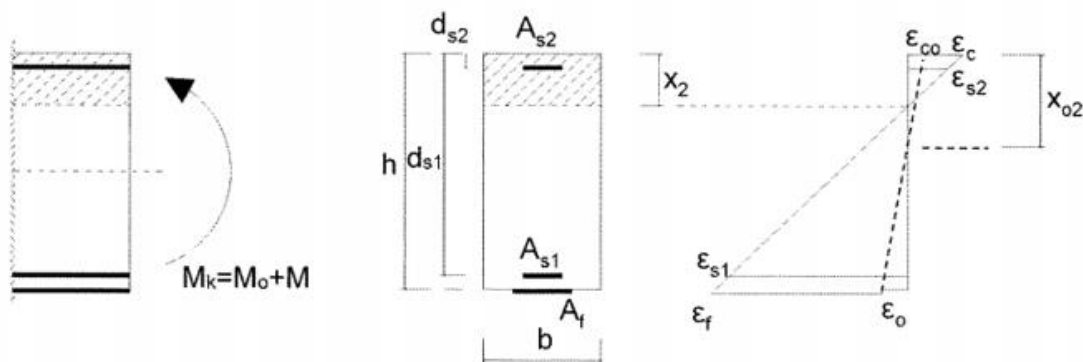
$$f_{bsm} = \begin{cases} 0,43\kappa_{vb1} \cdot f_{cm}^{\frac{2}{3}} & \text{za rebraste šipke} \\ 0,28\kappa_{vb2}\sqrt{f_{cm}} & \text{za glatke šipke} \end{cases} \quad (36)$$

Parametri κ_{vb1} i κ_{vb2} ovise o uvjetima veze i mogu se uzeti kao $\kappa_{vb1} = \kappa_{vb2} = 1,0$ za dobre uvjete prionjivosti i $\kappa_{vb1} = 0,7$ i $\kappa_{vb2} = 0,5$ za srednje uvjete prionjivosti.

3.1.3.2. Granično stanje uporabljivosti

- Naprezanja materijala u slučaju pojačanja na savijanje

Proračuni za provjeru graničnog stanja uporabljivosti u slučaju pojačanja na savijanje mogu se izvesti prema linearno elastičnom proračunu i neraspucalog (stanje 1) i raspucalog elementa (stanje 2). Djelujuća naprezanja mogu se odrediti uz zadovoljenje ograničenja naprezanja kako je navedeno u nastavku. [3]



Slika 18: Linearno elastični proračun raspucalog presjeka s vanjski vezanom armaturom [3]

Zanemarujući doprinos čelične armature i FRP-a, moment tromosti presjeka bez pukotina (stanje 1) u gredama koje imaju pravokutni presjek kao što je prikazano na slici 18, može se aproksimirati na sljedeći način:

$$I_1 \approx \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (37)$$

Ako je M_0 maksimalni moment u elementu pod uvjetima eksploatacijskog opterećenja prije pojačanja, (kao što je uobičajeno) veći od momenta pucanja, M_{cr} (34), proračun se može provesti u odnosu na raspucali presjek (stanje 2) prije i nakon primjene FRP armature.

Posebno za stanje 2, moment tromosti, I_{02} , raspucalog neojačanog presjeka prije nanošenja FRP-a i moment tromosti, I_2 , raspucanog ojačanog presjeka nakon nanošenja FRP-a, izračunavaju se kako slijedi:

$$I_{02} = \frac{b \cdot x_{02}^3}{3} + \alpha_s \cdot A_{s2} (x_{02} - d_{s2})^2 + \alpha_s \cdot A_{s1} (d_{s1} - x_{02})^2 \quad (38)$$

$$I_2 = \frac{b \cdot x_2^3}{3} + \alpha_s \cdot A_{s2} (x_2 - d_{s2})^2 + \alpha_s \cdot A_{s1} (d_{s1} - x_2)^2 + \alpha_f \cdot A_f (h - x_2)^2 \quad (39)$$

gdje su x_{02} i x_2 visine tlačnog područja prije i nakon primjene FRP-a, izračunate iz ravnoteže momenta kako slijedi:

$$\frac{b \cdot x_{02}^2}{2} + \alpha_s \cdot A_{s2} (x_{02} - d_{s2}) - \alpha_s \cdot A_{s1} (d_{s1} - x_{02}) = 0 \quad (40)$$

$$\frac{b \cdot x_2^2}{2} + \alpha_s \cdot A_{s2} (x_2 - d_{s2}) - \alpha_s \cdot A_{s1} (d_{s1} - x_2) - \alpha_f \cdot A_f (h - x_2) = 0 \quad (41)$$

Ako je M maksimalni moment u elementu pod uvjetima eksploatacijskog opterećenja primijenjenim nakon pojačanja, naprezanja izazvana ukupnim momentom $M_k = M_0 + M$ mogu se procijeniti zbrajanjem doprinosa dva momenta M_0 i M sljedećim izrazima:

Naprezanja u stlačenom betonu:

$$\sigma_c = \sigma_{c,M_0} + \sigma_{c,M} = \frac{M_0}{I_{02}} X_{02} + \frac{M}{I_2} X_2 \quad (42)$$

Naprezanja u vlačnoj čeličnoj armaturi:

$$\sigma_s = \sigma_{s,M_0} + \sigma_{s,M} = \alpha_s \frac{M_0}{I_{02}} (d_{s1} - x_{02}) + \alpha_s \frac{M}{I_2} (d_{s1} - x_2) \quad (43)$$

Naprezanja u FRP-u:

$$\sigma_f = \sigma_{f,M} = \alpha_f \frac{M}{I_2} (h - x_2) \quad (44)$$

Ako je moment M_o , primijenjen prije pojačanja, niži od momenta pucanja M_{cr} , a ukupni moment M_k veći od M_{cr} , mora se koristiti moment tromosti I_1 neraspucalog presjeka umjesto tromosti I_{o2} u jednadžbama (42) i (43).

Konačno, slučaj u kojem su i M_o i M_k niži od M_{cr} nije kritičan u smislu GSU-a, iako treba napomenuti da se ovaj slučaj obično neće dogoditi u tipičnim primjenama.

Omjeri modula elastičnosti čelika za armiranje i betona α_s i α_f trebali bi uzeti u obzir razvoj puzanja u betonu, razlikujući provjere pod kratkoročnim i dugotrajnim opterećenjima, za relevantne kombinacije eksploatacijskih opterećenja.

- Ograničenja naprezanja

U uvjetima eksploatacijskog opterećenja potrebno je ograničiti naprezanja u betonu, čeliku i FRP-u kako bi se spriječilo oštećenje ili prekomjerno puzanje betona i ljepila, popuštanje čelika i prekomjerno puzanje ili pucanje FRP-a zbog naprezanja. Kako bi se izbjegle prekomjerne tlačne deformacije, stvaranje uzdužnih pukotina i nepovratnih deformacija, ograničenja naprezanja za beton na tlak i čelik na vlak moraju se primijeniti u skladu s EN 1992-1-1, ovisno o uvjetima okoline. [3]

U područjima izloženim okruženjima razreda izloženosti XD, XF i XS, tlačna naprezanja u betonu trebaju biti ograničena kako slijedi:

$$\sigma_c \leq k_1 \cdot f_{ck} \quad (45)$$

pod karakterističnom kombinacijom opterećenja (preporučena vrijednost k_1 u EN 1992-1-1 je 0,60) i

$$\sigma_c \leq k_2 \cdot f_{ck} \quad (46)$$

pod najnepovoljnijom nazovi stalnom kombinacijom opterećenja (preporučena vrijednost k_2 u EN 1992 1-1 je 0,45).

Naprezanja u vlačnoj čeličnoj armaturi trebaju biti ograničena pod karakterističnom kombinacijom opterećenja:

$$\sigma_s \leq 0,8f_{yk} \quad (47)$$

i, gdje je naprezanje uzrokovano nametnutom deformacijom, vlačno naprezanje u čeliku treba biti ograničeno na:

$$\sigma_s \leq f_{yk} \quad (48)$$

Kao rezultat ograničenja unutarnjeg naprezanja čelika u jednadžbama. (47) i (48), a s obzirom na kompatibilnost naprezanja, naprezanje u FRP-u pod karakterističnom kombinacijom opterećenja također je ograničeno na:

$$\sigma_f \leq 0,8f_{yk} \frac{E_f}{E_s} \quad (49)$$

a, gdje je naprezanje uzrokovano prisilnom deformacijom, na:

$$\sigma_f \leq f_{yk} \frac{E_f}{E_s} \quad (50)$$

Dodatno, kako bi se izbjeglo pucanje zbog naprezanja, naprezanje u FRP-u pod nazovi stalnom kombinacijom opterećenja treba biti ograničeno na

$$\sigma_f \leq \eta \cdot f_{fk} \quad (51)$$

gdje je $\eta < 1$ koeficijent ograničenja naprezanja kod FRP-a. Ovaj koeficijent ovisi o vrsti FRP-a i treba ga dobiti eksperimentalno (indikativne vrijednosti $\eta = 0,8, 0,5$ i $0,3$ za CFRP, AFRP i GFRP). Mehanizam naprezanja i pucanja ovisi, osim o vrsti vlakana, i o uvjetima u okolišu. [3]

3.1.4. FprEN 1992-1-1: 2023

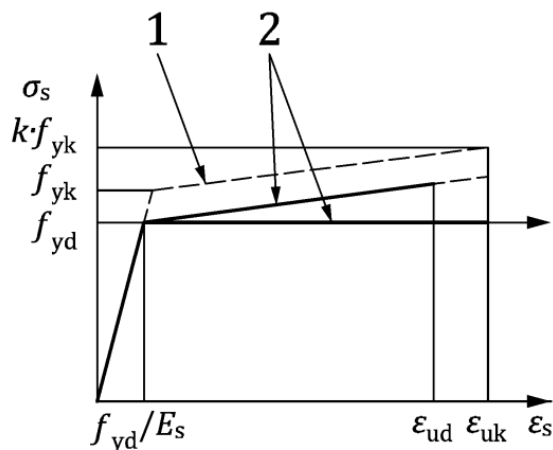
3.1.4.1. Općenito

Pri određivanju otpornosti na granični moment poprečnih presjeka od armiranog ili prednapetog betona ojačanih na savijanje s ABR-om (*ABR - Adhesively Bonded Reinforcement*), treba uzeti u obzir sljedeće pretpostavke: [4]

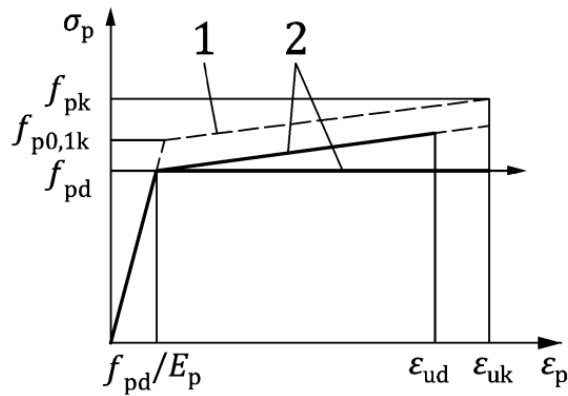
- presjeci ostaju ravni;
- promjena deformacija u armaturi ili nategama jednaka je promjeni deformacija u okolnom betonu;
- zanemaruje se vlačna čvrstoća betona;
- naprezanja u betonu pri tlaku izvedena su iz proračunske raspodjele naprezanja prema izrazu (52);

$$\sigma_{cd} = \begin{cases} f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c2}} \right)^2 \right] & \text{za } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{c2} \\ f_{cd} & \text{za } \epsilon_{c2} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (52)$$

- naprezanja u čeliku za armiranje ili prednapinjanje izvedena su iz proračunskih odnosa naprezanje-deformacija prema slici 19 i slici 20;



Slika 19: Dijagrami naprezanje-deformacija za ugljični čelik za armiranje (za vlak i tlak); 1 = nominalni dijagram za referencu, 2 = proračunski dijagrami [4]



Slika 20: Dijagrami naprezanje-deformacija za čelik za prednapinjanje (samo vlak); 1 = nominalni dijagram za referencu, 2 = proračunski dijagrami [4]

- razlika deformacije između čelika za prednapinjanje i okolnog betona uzima se u obzir pri procjeni naprezanja u šipkama, uzimajući u obzir gubitke ovisne o vremenu u razmatranom vremenu.
- zanemaruje se tlačna čvrstoća ABR-a;
- zanemaruje se klizanje između CFRP armature i betonske podloge.

Stanje deformacije postojeće armature i betonskih elemenata koji se ojačavaju na savijanje treba utvrditi prije pojačanja pod relevantnim učincima djelovanja.

Osim ako se ne poduzmu rigorozniji proračuni, odredbe iz ovog Eurokoda ne bi se trebale primjenjivati na beton s $f_{ck} \leq 12$ MPa ili $f_{ck} > 50$ MPa.

Potrebno je uzeti u obzir prednapinjanje armature u postojećoj konstrukciji, granicu tečenja armature i granice deformacije ABR-a. [4]

3.1.4.2. Granično stanje uporabljivosti (GSU)

Naprezanje u pojačanju od ugljičnih vlakana mora biti ograničeno na sljedeći način:

$$\sigma_f \leq 0,8 \cdot f_{yk} \cdot \frac{E_f}{E_s} \quad (53)$$

3.1.4.4. Zahtjevi za EBR sidrenje

- Općenito

Osigurat će se sidrenje sustava za pojačanje na betonsku površinu elementa u savijanju kako bi se izbjegli sljedeći mehanizmi sloma koji će biti opisani u nastavku: [4]

- krajnje sidrenje
- odvajanje srednje pukotine
- odvajanje na krajevima
- odvajanje izazvano poprečnim silama

- Krajnje sidrenje

EBR mora biti usidren duljinom sidrenja izvan dijela gdje je proračunska otpornost neojačanog postojećeg odjeljka barem jednako velika kao proračunski učinci koji proizlaze iz relevantnog graničnog stanja.

EBR će biti ograničen u skladu s jednim od sljedećih uvjeta:

- gdje se provodi jačanje elementa, ograničenje će uzeti u obzir α_1 ;
- tamo gdje se provodi lokalno pojačanje, EBR bi se trebao proširiti na udaljenost $l_{bf} + h$ izvan dijela gdje je to potrebno.

Otpor sidrenja f_{bFRd} treba izračunati pomoću formula (56) ili (59). [4]

3.1.4.5. Detalji o elementima i posebna pravila

- Pojačanje na savijanje s vanjskim CFRP-om

Za razmak od središta do središta EBR CFRP traka s_f treba primijeniti sljedeće:

$$s_{f,max} \leq 0,2 \text{ pomnoženo sa udaljenosti između točaka nul - momenata;}$$

$$s_{f,max} \leq 3 \text{ pomnoženo sa debljinom ploče;}$$

$$s_{f,max} \leq 0,4 \text{ pomnoženo sa duljinom konzole;}$$

$$s_{f,max} \leq 400 \text{ mm.}$$

Udaljenost uzdužnog ruba trake od ruba elementa mora biti najmanje jednaka nominalnom zaštitnom sloju betona c_{nom} unutarnje armature. [4]

- Dopušteni polumjer za savijanje CFRP-a

Ravne montažne šipke od CFRP-a ne bi trebale biti projektirane tako da budu raspoređene na polumjeru koji je manji od 1000 puta njihove debljine, osim ako se pri određivanju vlačne čvrstoće f_{tik} ne uzmu u obzir naprezanja koja proizlaze iz procesa savijanja. [4]

- Dopušteni slojevi CF lamela i CFRP traka

CF lamele trebaju biti zalijepljene u najviše pet slojeva za pojačanje na savijanje ili poprečne sile.

CFRP trake treba lijepiti u najviše dva sloja. Maksimalna debljina poprečnog presjeka CFRP trake bez ljepila ne bi smjela prelaziti 3 mm.

U jedan utor ne smije se zalijepiti više od jedne NSM trake ili šipke. [4]

- Preklapanje zatvorenih omotanih sustava pojačanja

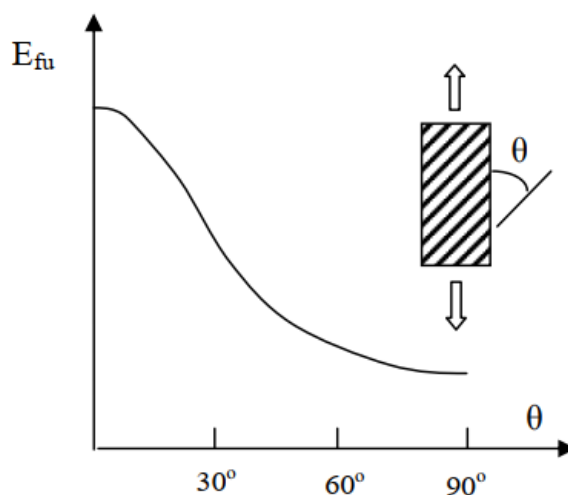
Za pojačanje sa zatvorenim omotanim lamelama i trakama treba uzeti u obzir potrebnu duljinu preklopa za sustav pojačanja. [4]

3.2. PREUZIMANJE POVEĆANIH POPREČNIH SILA

3.2.1. FIB 14

3.2.1.1. Općenito

Pojačanje armiranobetonskih elemenata s pomoću FRP-a može se osigurati polaganjem vanjske armature u smjeru glavnih vlakana tako da je učinkovitost FRP-a maksimalna (Slika 21). Za najčešći slučaj konstrukcijskih elemenata podvrgnutih bočnim opterećenjima, to jest opterećenjima okomitim na os elementa (npr. grede pod gravitacijskim opterećenjima ili stupovi izloženi seizmičkim silama), maksimalne glavne putanje naprezanja u zonama kritičnim za posmik čine kut s osi elementa koja se može uzeti približno jednakom 45° . Međutim, obično je praktičnije pričvrstiti vanjsku FRP armaturu u smjeru vlakana okomitim na os elementa (Slika 22, Slika 23). [1]

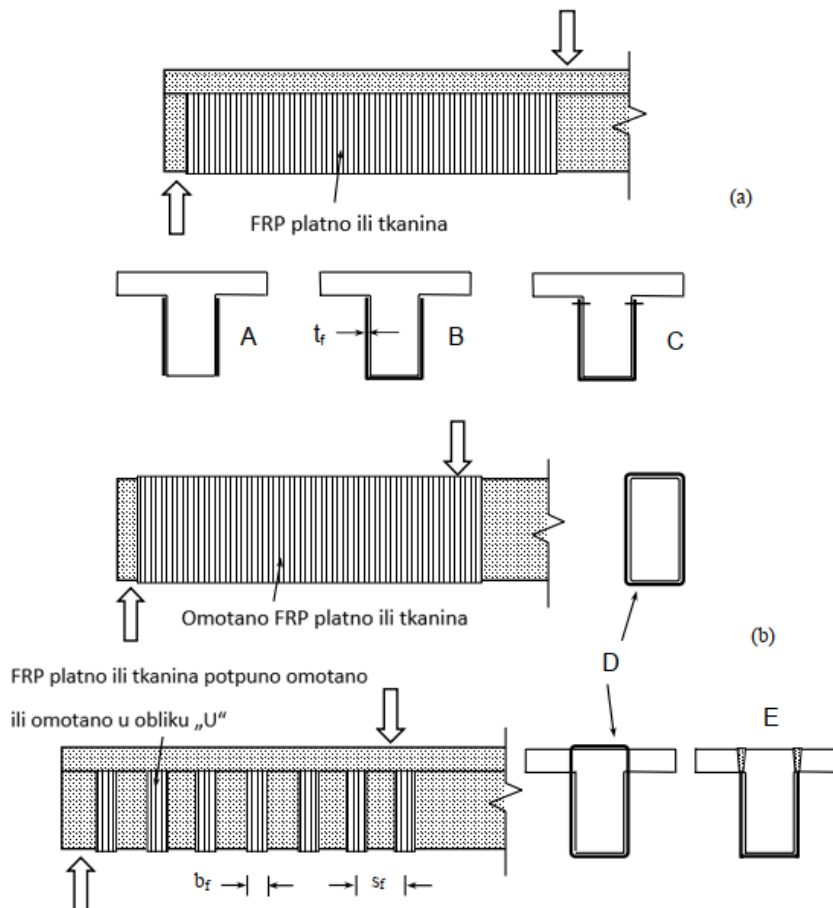


Slika 21: Ovisnost FRP modula elastičnosti, E_{fu} , o orijentaciji vlakana [1]

Detaljna istraživanja o pojačanju na poprečne sile armiranobetonskih elemenata bila su relativno ograničena i, do određenog stupnja, kontroverzna. Uz nekoliko iznimaka, većina istraživača je idealizirala FRP materijale pretpostavljajući da doprinos FRP kapaciteta na posmik proizlazi iz sposobnosti vlakana da podnose vlačna naprezanja pri više ili manje konstantnoj deformaciji.

Istraživanja su dokazala da kada betonski element dosegne svoj kapacitet na posmik (to je neposredno prije nego što otkáže na posmik), vanjski FRP se rasteže u smjeru glavnog vlakna do veličine deformacije, koja je općenito manja od vlačne deformacije loma ε_{fu} . Ova deformacija definirana je kao efektivna deformacija, $\varepsilon_{f,e}$, te ako se ista pomnoži s modulom elastičnosti FRP-a, E_f , i površinom poprečnog presjeka FRP-a, mogla bi dati ukupnu silu koju nosi FRP pri posmičnom slomu elementa.

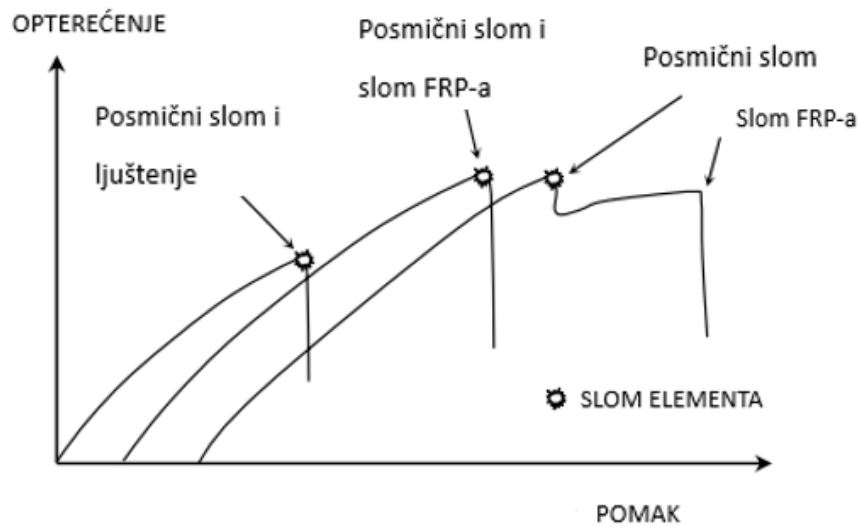
Naprezanje u FRP-u iznimno je teško, ako ne i nemoguće, izračunati na temelju rigoroznog proračuna. Ali može se procijeniti na temelju jednostavnog modeliranja i kroz detaljan proračun eksperimentalnih podataka. Otkazivanje se uvijek definira dijagonalnom napetosti betona. Kao što slika 24 na kvalitativan način prikazuje, to se može dogoditi ili prerano, kao rezultat odljepljivanja FRP-a, ili nakon što je FRP značajno istegnut. U potonjem slučaju FRP se može slomiti ili točno na vršnom opterećenju ili nešto kasnije, zbog prenaprezanja u blizini dijagonalnih pukotina. [1]



Slika 22: Shematski prikaz armiranobetonskog elementa ojačanog na poprečne sile FRP-om: (a) FRP lamele ili tkanine zalijepljene na hrbat; (b) omotani ili FRP u obliku slova U (koncept prikazan u D primjenjiv je i na grede i na stupove) [1]



Slika 23: Posmično pojačanje: (a) kraj grede; (b) kratki stup [1]



Slika 24: Shematska ilustracija reakcije na posmik [1]

3.2.1.2. Proračunski model u graničnom stanju nosivosti

1) Elementi pravokutnog, T i dvostrukog T presjeka

Prema modelu Triantafilloua (1998.) i Täljstena (1999.), vanjska FRP armatura može se tretirati analogno čeličnoj armaturi (prihvaćajući da FRP nosi samo normalna naprezanja u glavnom smjeru FRP materijala), uz pretpostavku da na granično stanje nosivosti u posmiku

FRP razvija efektivnu deformaciju u glavnom smjeru materijala, $\varepsilon_{f,e}$. Efektivna deformacija općenito je manja od deformacije vlačnog loma, ε_{fu} . Stoga se kapacitet na poprečne sile ojačanog elementa može izračunati prema formuli kako slijedi:

$$V_{Rd} = \min(V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}, V_{Rd2}) \quad (54)$$

gdje je V_{cd} doprinos nosivosti betona, V_{wd} , nosivost ugrađene poprečne armature, $V_{Rd,2}$ najveća proračunska poprečna sila koja se može preuzeti bez otkazivanja tlačnih štapova.

Doprinos FRP-a kapacitetu na poprečne sile, V_{fd} , može se napisati u sljedećem obliku (Slika 25):

$$V_{fd} = 0,9\varepsilon_{fd,e}E_{fu}\rho_f b_w d (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (55)$$

gdje je:

$\varepsilon_{fd,e}$ = proračunska vrijednost efektivne FRP deformacije

b_w = najmanja širina poprečnog presjeka

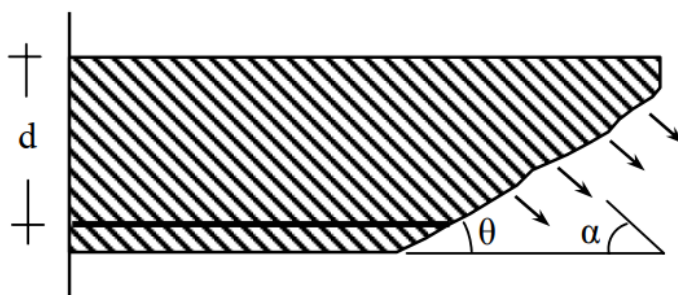
d = proračunska visina poprečnog presjeka

ρ_f = FRP omjer armature jednak $2t_f \sin \alpha / b_w$ za kontinuirano postavljeno pojačanje, pojačanje debljine t_f , ili $(2t_f / b_w)(b_f / s_f)$ za FRP pojačanje u obliku trake ili lamele širine b_f na razmaku s_f (Slika 22)

E_{fu} = modul elastičnosti FRP-a u smjeru glavnih vlakana

θ = kut dijagonalne pukotine u odnosu na os elementa, pretpostavlja se da je 45°

α = kut između orijentacije glavnog vlakna i uzdužne osi elementa



Slika 25: Doprinos FRP-a kapacitetu na poprečne sile [1]

Proračunska vrijednost efektivne FRP deformacije jednaka je karakterističnoj vrijednosti, $\varepsilon_{fk,e}$, podijeljenoj s parcijalnim koeficijentom sigurnosti γ_f . S obzirom na nedostatak podataka, $\varepsilon_{fk,e}$ može se približno izračunati množenjem srednje vrijednosti efektivne FRP deformacije, $\varepsilon_{f,e}$, faktorom smanjenja k .

$$\varepsilon_{fk,e} = k\varepsilon_{f,e} \quad k = 0,8 \quad (56)$$

Parcijalni koeficijent sigurnosti uzet je iz *Tablice 2* ako slom uključuje lom FRP-a (u kombinaciji s ili nakon dijagonalne napetosti), ili $\gamma_f = \gamma_{fb} = 1,3$ ako dominira slom spoja koji dovodi do odljepljivanja.

Tablica 2: Koeficijenti sigurnosti FRP materijala γ_f .

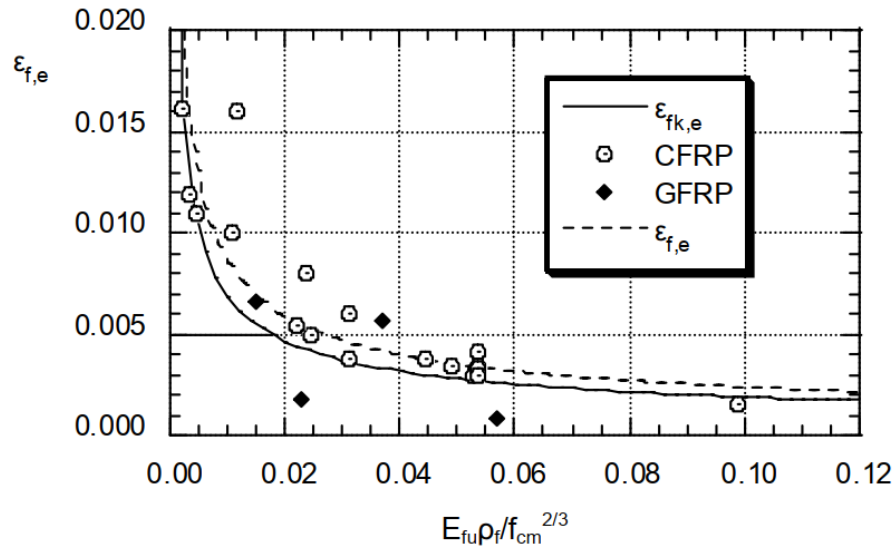
(1) Ugradnja montažnih FRP EBR sustava u normalnim uvjetima kontrole kvalitete. Primjena sustava mokrog postavljanja ako su poduzete sve potrebne mjere za postizanje visokog stupnja kontrole kvalitete i uvjeta primjene i procesa primjene.

(2) Primjena sustava mokrog postavljanja u normalnim uvjetima kontrole kvalitete. Primjena bilo kojeg sustava u teškim uvjetima rada na gradilištu. [1]

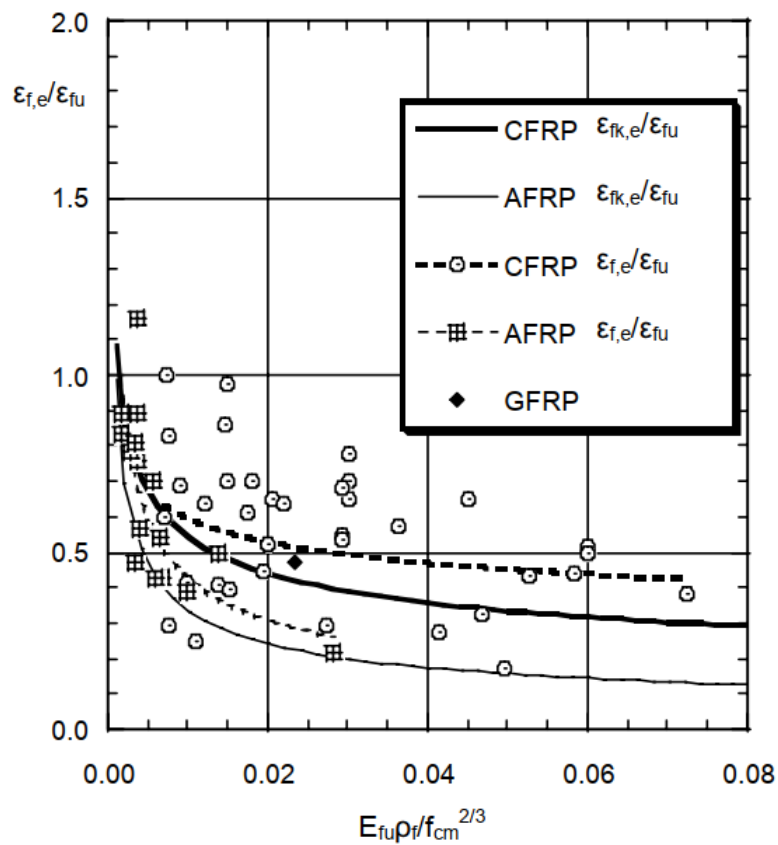
Vrsta FRP-a	Način ugradnje A ⁽¹⁾	Način ugradnje B ⁽¹⁾
CFRP	1,20	1,35
AFRP	1,25	1,45
GFRP	1,30	1,50

Na temelju nekoliko istraživanja predloženo je da se efektivna deformacija ograniči na maksimalnu vrijednost, reda veličine 0,006, kako bi se održao integritet betona i osigurala aktivacija mehanizma za uklještenje zrna agregata. Takvo ograničenje treba uzeti u obzir samo ako je aktivacija ovog mehanizma od presudne važnosti.

Sinteza i procjena svih objavljenih eksperimentalnih rezultata (Slika 26, Slika 27) o pojačanju na poprečne sile armiranobetonskih elemenata s FRP lamelama ili tkaninama objavljenim u literaturi do početka 1999. rezultirala je izrazima za srednju vrijednost efektivne FRP deformacije koji su prikazani u nastavku. [1]



Slika 26: Efektivna FRP deformacija s obzirom na $E_{fu}\rho_f/f_{cm}^{2/3}$ – posmični slom u kombinaciji s odvajanjem FRP-a [1]



Slika 27: Normalizirana deformacija FRP-a s obzirom na $E_{fu}\rho_f/f_{cm}^{2/3}$ – posmični slom u kombinaciji sa ili nakon loma FRP-a [1]

- Potpuno ovijen (ili pravilno usidren) CFRP (Slika 22b):

$$\varepsilon_{f,e} = 0,17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,30} \varepsilon_{fu} \quad (57)$$

- Bočni ili CFRP omotači u obliku slova U (Slika 22a):

$$\varepsilon_{f,e} = \min \left[0,65 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3}, 0,17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,30} \varepsilon_{fu} \right] \quad (58)$$

ljuštenje

prijelom

gdje su f_{cm} izraženi u MPa, a E_{fu} u GPa.

3.2.1.3. Granično stanje uporabljivosti

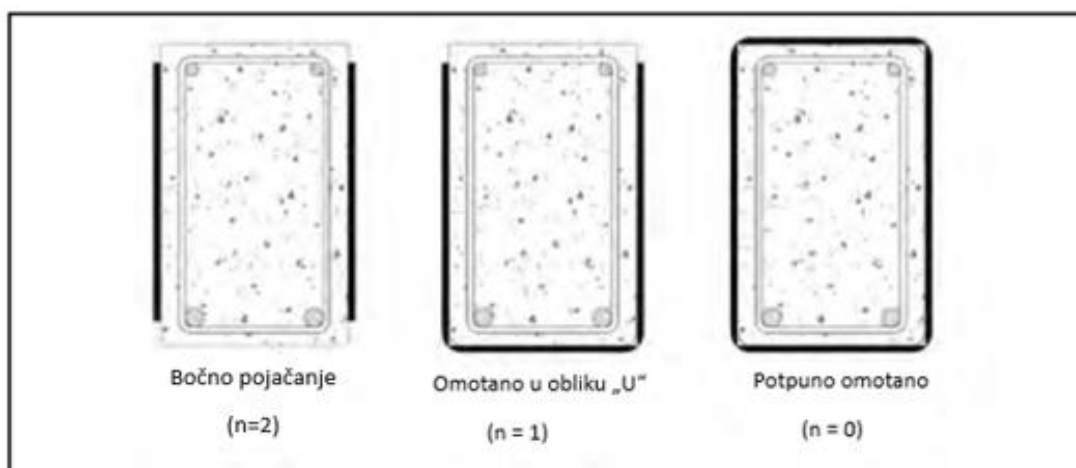
Vanjski zalijepljena armatura ne smije se odvojiti u graničnom stanju uporabljivosti. Ovo je važno kako bi se mogli izbjeći problemi povezani s prodorom vlage, širenjem pukotina, bukom od odvajanja itd. Da bi se to postiglo, naprezanje u FRP-u u graničnom stanju uporabljivosti, $\varepsilon_{fk,e}$, trebalo bi biti ograničeno na $0,8 f_{yk}/E_s$, osim ako nije drugačije određeno i potvrđeno od strane dobavljača FRP sustava. [1]

3.2.2. TR 55

3.2.2.1. Općenito

Vanjski spojeni FRP laminati i tkanine mogu se koristiti za povećanje čvrstoće na poprečne sile armiranobetonskih greda i stupova.

FRP se može zalijepiti za beton u različitim konfiguracijama. U idealnom slučaju FRP bi trebao biti omotan oko cijelog opsega elementa (potpuno omotan). Alternativno, može se nanijeti samo na strane elementa (samo bočno) ili na stranice i zateznu površinu elementa (umotano u U). Slika 28 prikazuje primjere mogućih FRP konfiguracija pojačanja na posmik koje se odnose na pravokutne grede i stupove.



Slika 28: Konfiguracije posmičnog pojačanja [2]

Orijentacija FRP vlakana može utjecati na svojstva sustava pojačanja. Teorijski, vlakna koja su približno okomita na kose pukotine od poprečnih sila mogu biti učinkovitija od vlakana postavljenih okomito na uzdužnu os elementa. Međutim, ako se smjer poprečne sile može obrnuti, ili ako je FRP djelomično ili potpuno omotan oko grede, sustavi s vlaknima poredanim okomito na uzdužnu os elementa su prikladniji i obično se koriste u praksi.

Bočni ili U-omotani elementi bit će skloniji otkazivanju odvajanjem nego potpuno omotani elementi. Potpuno zamatanje je stoga poželjno i treba ga koristiti uvijek kada je to izvedivo. Međutim, to općenito nije izvedivo za grede jer je vrh grede nedostupan. U većini slučajeva bit će moguće u potpunosti omotati stupove. Preporuča se da tamo gdje se FRP omotava oko

uglova, beton treba zaobliti na minimalni polumjer od 25 mm kako bi se spriječilo prerano pucanje FRP-a.

Ponašanje armiranog betona pri posmiku je složeno. Nadalje, znatno je manje istraživanja provedeno za pojačanja na poprečne sile pomoću FRP-a nego pojačanja na savijanje. Stoga je potrebno s oprezom pristupiti projektiranju za takvo pojačanje.

U većini eksperimentalnih ispitivanja armiranobetonskih elemenata ojačanih na posmik korištena su ugljična, a ne aramidna ili staklena vlakna. Iako bi temeljna načela trebala biti zajednička za sve materijale, postupak projektiranja prikazan u nastavku najbolje odgovara proračunu koji koristi ugljični FRP. [2]

3.2.2.2. Postupak projektiranja FRP pojačanja

Pristup za izračunavanje granične otpornosti na poprečne sile presjeka koji uključuje čeličnu poprečnu armaturu i pojačanje vanjskim FRP-om temelji se na proširenju metode u EN 1992-1-1.

Metoda proračunske otpornosti neojačanog armiranobetonskog dijela dopušta projektantu da kut rešetke bude ili na donjoj granici od $21,8^\circ$ ($\cot\theta = 2,5$) ili da se po želji poveća do najveće vrijednosti od 45° ($\cot\theta = 1$). Kada se uvede FRP pojačanje, to obično ima učinak povećanja efektivnog kuta rešetke u GSN. Ovaj se učinak može modelirati pomoću načela superpozicije, smatrajući da je ukupni učinak superpozicija dvaju sustava rešetki, jednog koji se odnosi na čeličnu armaturu, s kutom rešetke θ ograničenim na između $21,8^\circ$ i 45° (tj. $1 < \cot\theta < 2,5$), a drugi povezan s FRP-om, s kutom rešetke jednakim 45° . Otpor na poprečne sile se utvrđuje spajanjem ovih sustava i ograničavanjem naprezanja u čeliku, betonu i FRP-u kako bi se osiguralo da ne prelaze svoje proračunske vrijednosti. Ovo je ekvivalentno razmatranju jednog sustava rešetki s kutom rešetke koji je aritmetička sredina kutova rešetke za čelične i FRP sustave. [2]

Ovaj pristup rezultira sljedećim izrazom za nosivost na poprečne sile:

$$V_{Rd,sf} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{yw} \cot \theta + \frac{A_{fw}}{s_f} \left(d_f - \frac{n_s}{3} l_{t,max} \cos \beta \right) E_{fd} \varepsilon_{fse} (\sin \beta + \cos \beta) \quad (59)$$

gdje je:

A_{sw} = površina poprečnog presjeka čelične poprečne armature

s = uzdužni razmak čeličnih šipki poprečne armature

z = krak šipke između uzdužne čelične armature i težišta u presjeku

f_{ywd} = proračunska granica popuštanja čelične poprečne armature

θ = kut između betonskog tlačnog štapa i osi grede

A_{fw} = površina FRP-a (mm^2) za posmično pojačanje mjereno okomito na smjer vlakana., kada se FRP laminati nanose simetrično na obje strane grede, A_{fs} je zbroj površina oba laminata, tj. $A_{fs} = 2b_f t_f$

s_f = uzdužni razmak FRP laminata korištenih za posmično pojačanje (mm), za kontinuirane FRP lamele (npr. tkanine) uzima se kao 1,0

d_f = proračunska visina FRP pojačanja, mjereno od vrha FRP posmičnih pojačanja do čelične vlačne armature (mm)

$n_s = 0$ za potpuno omotanu gredu, jednak 1,0 kada je FRP kontinuirano vezan za bočne i donje strane grede (umotan u obliku „U“) i jednak 2,0 kada je vezan samo za bočne strane grede

$l_{t,max}$ = duljina sidrenja potrebna za razvoj punog kapaciteta sidrenja određena prema izrazu (26)

β = kut između glavnih vlakana FRP-a i linije okomite na uzdužnu os elementa, β je pozitivan kada su glavna vlakna FRP-a zakrenuta od smjera u kojem će nastati pukotina od poprečnih sila

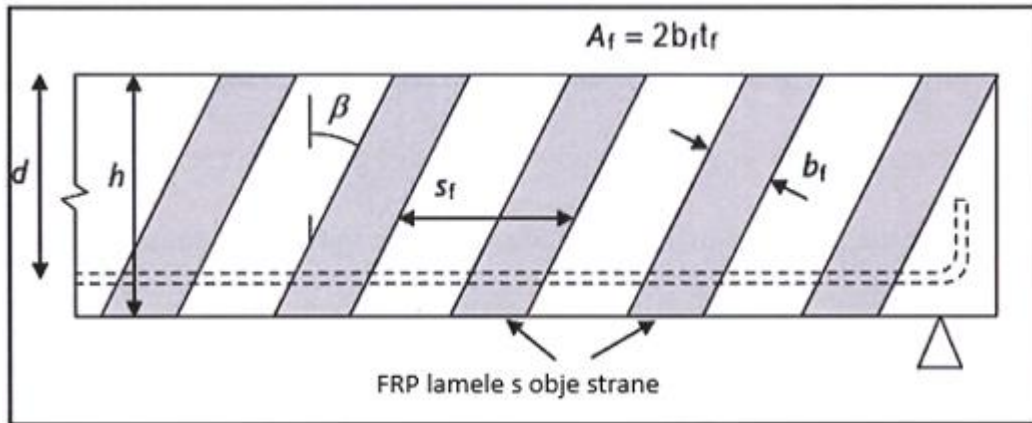
E_{fd} = projektirani modul elastičnosti FRP laminata (MPa)

ε_{fse} = efektivna deformacija u FRP-u za posmično pojačanje

b_f = širina FRP laminata (mm) mjerena okomito na smjer vlakana, za kontinuirani FRP lim, b_f se uzima kao $\cos\beta$

t_f = debljina FRP laminata (mm).

Odgovarajuća najveća nosivost na poprečne sile može se uzeti kao $V_{Rd,max}$ (ovaj izraz za maksimalnu nosivost na poprečne sile je konzervativan, jer se temelji na kutu rešetke za čeličnu komponentu, a ne na aritmetičkoj sredini kutova rešetke za čelične i FRP komponente, što bi dalo veću vrijednost). Oznake su ilustrirane na slici 29.



Slika 29: Opće oznake za pojačanje na poprečne sile [2]

Efektivna deformacija u FRP-u, ε_{fse} , uzima u obzir varijaciju deformacije u FRP-u duž pukotine od poprečnih sila kada se postigne granično stanje nosivosti. Treba uzeti kao manju vrijednost od: (i) $\frac{\varepsilon_{fd}}{2}$, (ii) $0,5 \sqrt{\frac{f_{ctk}}{E_{fat_f}}}$, (iii) 0,004

gdje je:

f_{ctk} = karakteristična vlačna čvrstoća betona (MPa)

ε_{fd} = proračunska granična sposobnost deformacije FRP-a.

Prva granica deformacije od polovice krajnjeg kapaciteta deformacije predstavlja prosječnu deformaciju FRP-a kada dođe do loma FRP-a.

Druga granica deformacije odgovara odvajanju FRP-a i temelji se na Neubauerovom i Rostasyjevom modelu sidrenja. Ovaj uvjet treba primijeniti na potpuno omotane grede kako bi se osiguralo održavanje cjelovitosti betona. Za male grede takav pristup može biti konzervativan, ali važno je da bi trebao biti siguran za slučajeve koji se najčešće susreću u praksi.

Konačna granica deformacije od 0,004 predložena je u ranim metodama projektiranja kako bi se osiguralo održavanje cjelovitosti betona. Čini se da ovo praktično pravilo ne sprječava nužno razvoj širokih pukotina, ali je svejedno zadržano. [2]

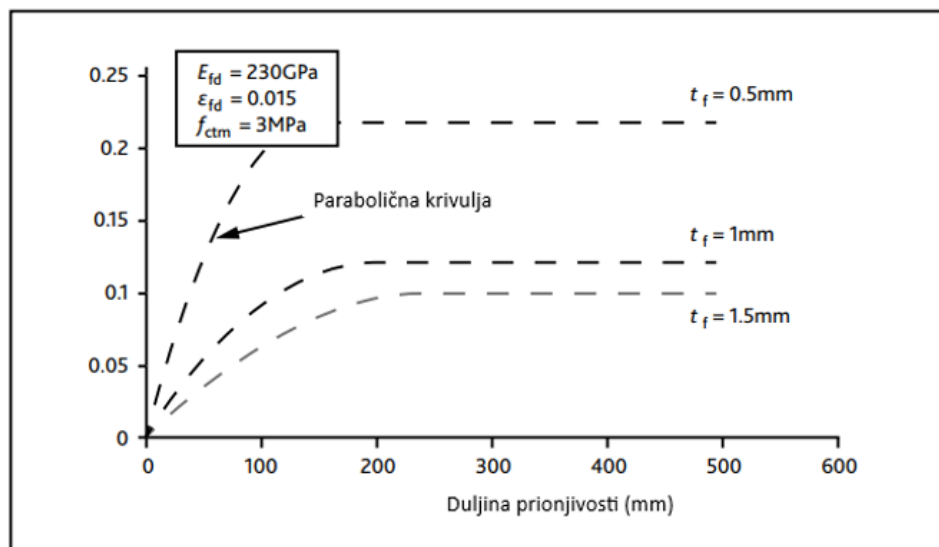
Jednadžba (59) vrijedi samo kada čelična armatura popusti prije sloma ili odvajanja FRP-a. Općenito se može pretpostaviti da će se to događati sve dok:

$$\frac{f_{ywk}}{E_s} < \varepsilon_{fse} \quad (60)$$

gdje je:

f_{ywk} = karakteristična granica popuštanja čelične poprečne armature

E_s = Youngov modul elastičnosti čelika



Slika 30: Tipična varijacija graničnog kapaciteta naprezanja s duljinom prionljivosti [2]

U jednadžbi (59), efektivna visina je smanjena za duljinu jednaku $(n_s/3)l_{t,max}\cos\beta$. Ova prilagodba objašnjava smanjenje sile koju može podnijeti FRP u područjima sidrenja. Neubauerov i Rostasyjev model sidrenja, pretpostavlja paraboličnu varijaciju naprezanja s duljinom prionljivosti (Slika 30). Sila koja odgovara površini ispod krivulje naprezanja u području sidrenja iznosi 2/3 najvećeg naprezanja pomnoženog s duljinom sidrenja. Ovo smanjenje FRP doprinosa može se modelirati oduzimanjem $(n_s/3)l_{t,max}$ od proračunske visine, kao u jednadžbi (59). Podešavanje se vrši na vrhu za U omotane grede ($n_s = 1,0$) i na vrhu i dnu za grede s FRP spojenim samo sa strane ($n_s = 2,0$). Nije potrebno podešavanje za potpuno

omotane grede ($n_s = 0$). Ako je FRP na vrhu U-omotane konfiguracije usidren i ispitivanjem se pokaže da sustav osigurava potpuno usidrenje (sprječavanje preranog ljuštenja kraja), tada se n može smanjiti s 1,0 na 0. [2]

3.2.2.3. Razmak FRP lamela

Kao u slučaju čelične poprečne armature, osni razmak lamela od FRP-a ne bi trebao biti toliko širok da omogući potpuno formiranje dijagonalne pukotine bez presretanja lamele. Osim toga, jednadžba (59) temelji se na aproksimaciji da je doprinos FRP-a nosivosti na poprečne sile raspoređen po cijeloj pukotini, a ne na diskretnim mjestima, što postaje nevažće pri velikim razmacima lamela. Iz ovih razloga, ako se koriste lamele, njihov osni razmak ne smije premašiti minimalnu vrijednost između: (i) $0,8d_f$, (ii) $d_f - \left(\frac{n_s}{3}\right) l_{t,max} \cos \beta$, (iii) $b_f + \frac{d_f}{4}$.

gdje su varijable definirane nakon jednadžbe (59).

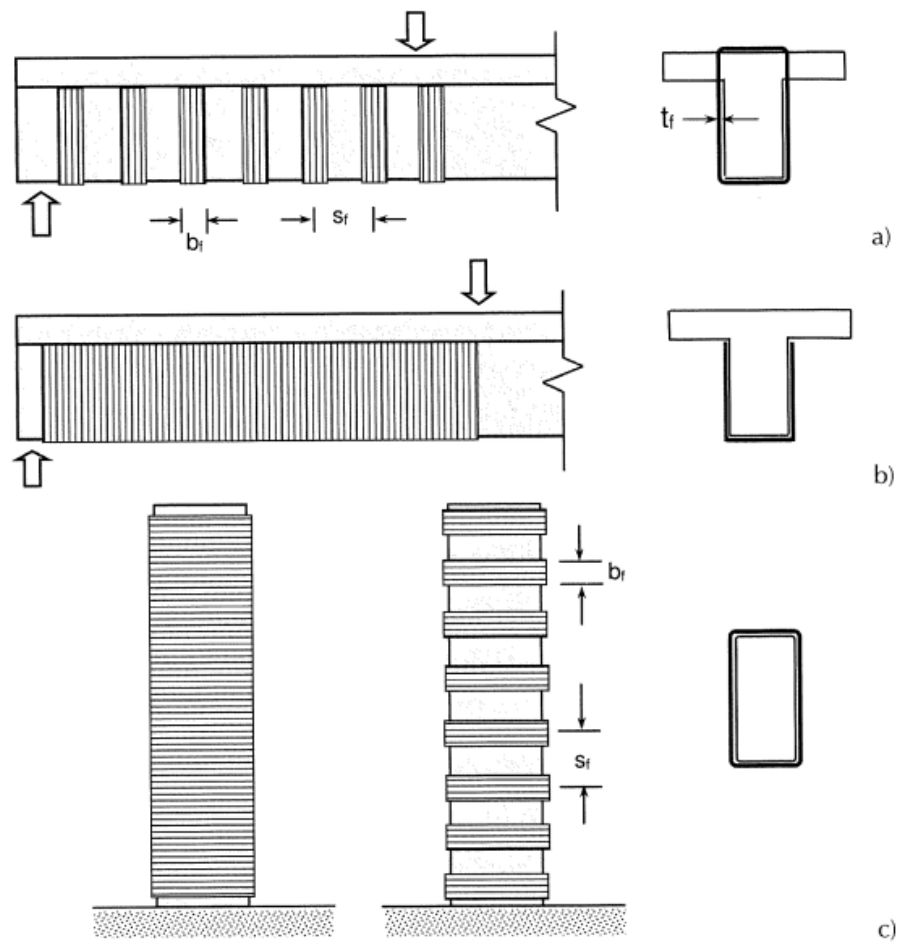
Alternativno, doprinos FRP lamela nosivosti na poprečne sile može se procijeniti rigoroznim proračunom, uzimajući u obzir kritično mjesto za pukotinu od poprečnih sila i učinak usidrenja FRP traka. Ako se koristi ovaj pristup, ne moraju se primjenjivati ograničenja razmaka traka u točkama (i)–(iii). [2]

3.2.3. FIB 90

3.2.3.1. Općenito

Nosivost na poprečne sile elementa može se povećati korištenjem FRP materijala s vlaknima koja (obično) idu okomito na smjer osi elementa (Slika 31). Dodatna FRP armatura premošćuje pukotine od poprečnih sila i povećava nosivost na poprečne sile. Takvo pojačanje je povećano ako FRP tvori zatvoreni sustav, npr. potpunim omotavanjem presjeka (Slika 31a, c). Otvoreni FRP sustavi (Slika 31b) također se mogu koristiti za pojačanje na poprečne sile, ali treba uzeti u obzir smanjenu učinkovitost FRP-a zbog odvajanja. [3]

U načelu, otpornost armiranobetonskih elemenata pojačanih na poprečne sile FRP-om mora se izračunati u skladu s EN 1992-1-1. Za elemente koji su također ojačani uzdužnom armaturom vezanom ljepilom, primjenjivat će se dodatni zahtjevi.



Slika 31: Posmično pojačanje greda s (a) zatvorenim FRP-om ili (b) trostranim FRP-om.

(c) Posmično pojačanje stupova ili zidova omatanjem [3]

3.2.3.2. Elementi koji ne zahtijevaju proračunsku poprečnu armaturu

Kada je V_{Ed} manji od $V_{Rd,c}$ u skladu s EN 1992-1-1 i pod djelovanjem opterećenja nakon pojačanja, proračunska poprečna armatura nije potrebna. Ovime, proračunska vrijednost nosivosti na poprečne sile, $V_{Rd,c}$, neće uzeti u obzir uzdužno zalijepljenu FRP armaturu, ako postoji, pri određivanju površine vlačne armature A_{sl} .

U slučajevima kada nije zadovoljen uvjet najmanje poprečne armature, razlika će se pokriti uporabom FRP armature. [3]

3.2.3.3. Elementi koji zahtijevaju proračunsku poprečnu armaturu

Kada je V_{Ed} veći od $V_{Rd,c}$, u skladu s EN 1992-1-1 i pod djelovanjem opterećenja nakon pojačanja, potrebna je proračunska poprečna armatura. U tom slučaju, V_{Rd} se određuje prema jednadžbi (61) pri tome se ocjenjuje jesu li postojeće čelične sponove dovoljne ili je potrebno dodatno pojačanje na poprečne sile.

U postojećim armiranobetonskim elementima, bez pojačanja na poprečne sile, treba voditi računa da prema EN 1992-1-1, barem dio jednak β_3 (preporučena vrijednost je 0,5) potrebne poprečne armature bude pokriven sponama. Ako ovaj zahtjev nije zadovoljen, razlika će biti pokrivena korištenjem izvana zalijepljenog FRP-a u skladu s poglavljem 3.2.3.4. [3]

3.2.3.4. Pojačanje s obzirom na nedovoljnu otpornost na poprečne sile

Pojačanje na poprečne sile može se osigurati zatvorenim ili otvorenim FRP sustavima, koji se nanose na vanjsku stranu elementa lijepljenjem. Ako su krajnje trake potrebne za sprječavanje odvajanja zaštitnog sloja betona, one se mogu uračunati u pojačanje na posmik.

Otpornost na poprečne sile elementa s posmičnim pojačanjem može se dobiti tretiranjem FRP-a analogno unutarnjoj čeličnoj armaturi kako slijedi:

$$V_{Rd} = V_{Rd,s} + V_{Rd,f} + V_{ccd} + V_{td} \quad (61)$$

gdje je $V_{Rd,s}$ proračunska vrijednost poprečne sile koju može podnijeti popuštajuća poprečna armatura i V_{Rdf} je proračunska vrijednost poprečne sile koju može podnijeti izvana postavljena armatura. U elementima s kosom armaturom definirane su sljedeće dodatne vrijednosti: V_{ccd} je proračunska vrijednost komponente poprečne sile u tlačnom području, u slučaju nagnutog tlačnog pojasa, i V_{td} je proračunska vrijednost komponente poprečne sile u vlačnoj armaturi, u slučaju kosog vlačnog pojasa elementa.

Proračun nosivosti tlačnih štapova provodi se prema izrazu:

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (62)$$

gdje je α_{cw} koeficijent koji uzima u obzir stanje naprezanja u tlačnoj armaturi, z je krak šipke, v_1 je faktor redukcije čvrstoće za beton koji je raspucan uslijed posmika, a θ je nagb tlačnih štapova.

Poprečna sila koju može podnijeti FRP je:

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fw}}{s_f} h_f \cdot f_{fwd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (63)$$

gdje je A_{fw} površina vanjske poprečne armature mjerena okomito na smjer vlakana ($= 2b_f t_f$ u slučaju simetrično postavljenih traka širine b_f i efektivne debljine t_f), s_f je razmak traka (mjereno u smjeru osi elementa), h_f je visina FRP-a preko kojeg prolazi pukotina od poprečnih sila (uzeto jednako $h - 0,1d_s$ u slučaju FRP-a pune dubine), α je kut između vlakana i osi elementa okomito na poprečnu silu i f_{fwd} je proračunska vrijednost prosječnog naprezanja u FRP-u (efektivna čvrstoća).

Za najčešći slučaj veze pune površine $s_f = b_f / \sin \alpha$, stoga vrijedi $A_{fw} / s_f = 2t_f \sin \alpha$. Efektivna debljina izračunava se iz broja FRP slojeva postavljenih u plašt, n , i debljine jednog sloja, t_0 , kao $t_f = n t_0$ za $n = 1, 2$ ili 3 , i kao $t_f = n^{0,85} t_0$ za $n \geq 4$. Stoga se uzima u obzir smanjena učinkovitost kod slučaja pojačanja s mnogo slojeva.

Vrijednost f_{fwd} ovisi o konfiguraciji vanjski primijenjenog pojačanja vlaknima (zatvoreno, trostrano, dvostrano) kako je navedeno u jednadžbama (64) - (72). Ovime se pretpostavlja da čelične sponje imaju dovoljnu sposobnost deformacije, tako da FRP može doseći svoju

proračunsku čvrstoću f_{fwd} . Ovo se može potvrditi usporedbom f_{fwd}/E_f s deformacijskom sposobnošću čelika (s danom klasom duktilnosti). [3]

- **Zatvoreni FRP**

$$f_{fwd} = f_{fwd,c} = k_R \cdot a_t \cdot f_{fd} \quad (64)$$

gdje je faktor dugotrajnog opterećenja a_t jednak 0.8 i k_R redukcijski faktor, kojim se uzima u obzir nejednolika raspodjela naprezanja u FRP-u koji prelazi preko pukotine od poprečnih sila kao i smanjenje čvrstoće FRP-a zbog savijanja vlakana u kutovima presjeka. Uz pretpostavku da je radijus u kutovima R (mm), k_R se dobiva na sljedeći način: [3]

$$k_R = \begin{cases} 0,5 \frac{R}{50} \left(2 - \frac{R}{50}\right) & R < 50 \text{ mm} \\ 0,5 & R \geq 50 \text{ mm} \end{cases} \quad (65)$$

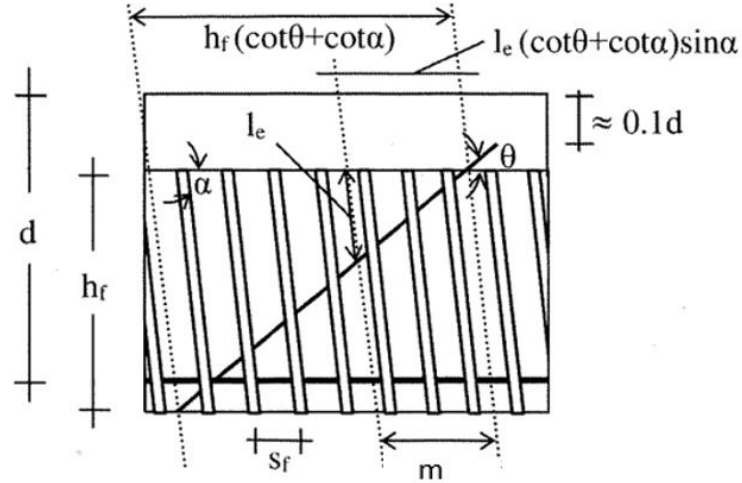
- **Trostrani FRP**

Nosivost je određena najmanjom od ove dvije vrijednosti čvrstoća vlaknastog pojačanja kao da je zatvoreno, $f_{fwd,c}$, i čvrstoća prionljivosti, f_{fbwd} (66). Potonja se dobiva kao funkcija geometrijskih odnosa na slici 32 i uz pretpostavku bilinearnog zakona prionljivosti pomoću jednadžbe (67) - (69). [3]

$$f_{fwd} = \min(f_{fbwd}, f_{fwd,c}) \quad (66)$$

(a) za $h_f/\sin\alpha \geq l_e$ i $l_e \leq s_f/(\cot\theta + \cot\alpha)\sin\alpha \leq h_f/\sin\alpha$, tj. ako sve lamele koje prelaze preko pukotine imaju duljinu prionljivosti $\geq l_e$:

$$f_{fbwd} = \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}} \quad (67)$$



Slika 32: Lamelle koje prelaze preko pukotine od poprečnih sila [3]

(b) za $h_f/\sin\alpha \geq l_e$ i $s_f/(\cot\theta + \cot\alpha)\sin\alpha \leq l_e$, tj. ako neke od lamela koje prelaze preko pukotine od poprečne sile imaju duljinu prionljivosti $\geq l_e$: i neke druge imaju duljinu prionljivosti $< l_e$:

$$f_{fbwd} = \left[1 - \left(1 - \frac{2}{3} \frac{ms_f}{l_e} \right) \frac{m}{n} \right] \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}} \quad (68)$$

(c) za $h_f/\sin\alpha \leq l_e$ i $s_f/(\cot\theta + \cot\alpha)\sin\alpha \leq h_f$, tj. ako sve trake koje presječe pukotina od poprečne sile imaju duljinu prionljivosti $< l_e$:

$$f_{fbwd} = \frac{2}{3} \frac{\frac{(ns_f)}{(\cot\theta + \cot\alpha)\sin\alpha}}{l_e} \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}} \quad (69)$$

gdje je n broj lamela koje prelaze pukotine od poprečnih sila, jednak je cijelom kvocijentu $h_f(\cot\theta + \cot\alpha)/s_f$, m je broj lamela za koje je duljina prionljivosti manja od l_e jednake cijelom kvocijentu $l_e(\cot\theta + \cot\alpha)\sin\alpha/s_f$, l_e je najveća duljina prionljivosti i f_{fbk} je karakteristična najveća čvrstoća prionljivosti.

Slučaj lijepljenja pune površine (kontinuirane FRP lamelle) može se tretirati kao poseban slučaj FRP lamela sa $s_f = b_f/\sin\alpha$.

Ako je $h_f/\sin\alpha \geq l_e$, jednađba (68) se primjenjuje s $m_{sf} = l_e$ i $m/n = 1/(h_f/\sin\alpha)$; i ako je $h_f/\sin\alpha \leq l_{b,max}$ jednađba (69) vrijedi s $n_{sf} = h_f(\cot\theta + \cot\alpha)$. Dakle:

$$\text{za } \frac{h_f}{\sin\alpha} \geq l_e \quad f_{fbwd} = \left[1 - \frac{1}{3} \frac{l_e}{(h_f/\sin\alpha)} \right] \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}} \quad (70)$$

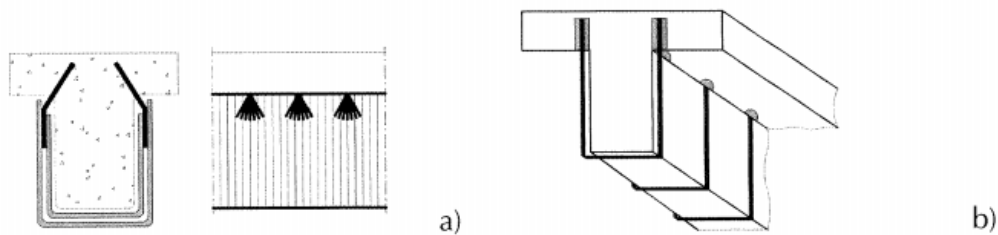
$$\text{za } \frac{h_f}{\sin\alpha} \leq l_e \quad f_{fbwd} = \frac{2}{3} \frac{h_f/\sin\alpha}{l_e} \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}} \quad (71)$$

- Trostrani FRP sa sidrenjem u tlačnoj zoni

Ako se pojačanje vrši pomoću trostranog FRP-a, čvrstoća veze f_{fbwd} obično je manja od čvrstoće zatvorenog FRP sustava, $f_{fwd,c}$, stoga je učinkovitost FRP-a mala. Teorijski, f_{fbwd} se može povećati do najveće vrijednosti jednake $f_{fwd,c}$ korištenjem sidara (Slika 33). Pod pretpostavkom da sustav sidrenja ima koeficijent učinkovitosti jednak k_a , koji se utvrđuje putem ispitivanja sustava, čvrstoća FRP-a u trostranom sustavu sa sidrima je: [3]

$$f_{fwd} = k_a \cdot f_{fwd,c} \quad (72)$$

s $k_a \leq 0,9$, a za slučaj kada se ne koriste sidra odgovara $k_a = f_{fbwd}/f_{fwd,c}$.



Slika 33: Sidrenje trostranog FRP-a: (a) upotreba šiljastih sidara u kombinaciji s FRP lamelama; (b) sidrenje pojedinačnih traka unutar ploče [3]

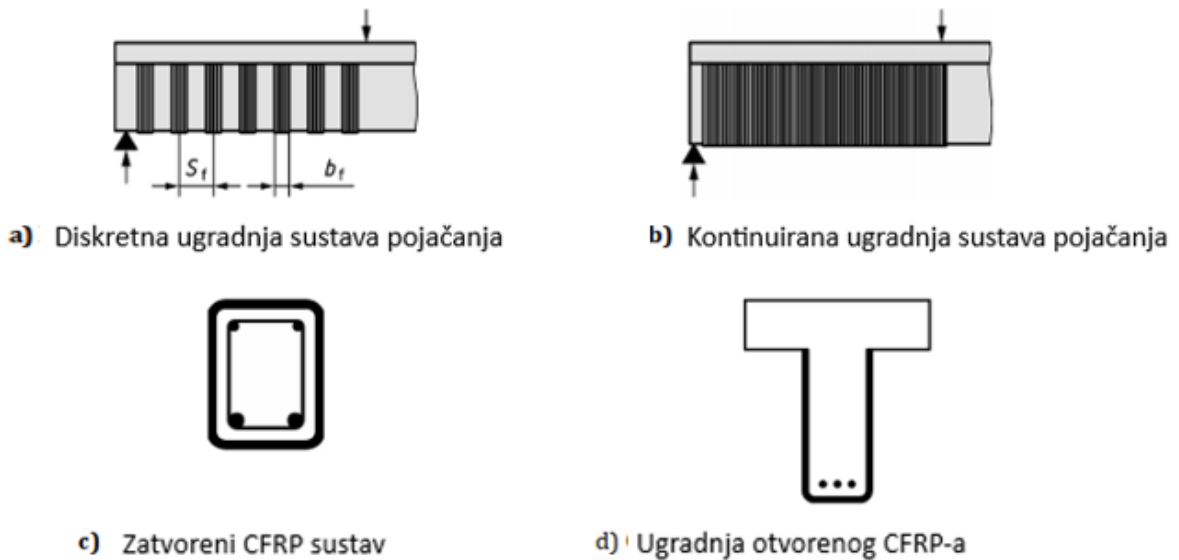
- Dvostrani FRP

Treba izbjegavati dvostrani FRP. [3]

3.2.4. FprEN 1992-1-1: 2023

3.2.4.1. Elementi koji zahtijevaju proračunsku poprečnu armaturu

Sljedeće odredbe primjenjuju se za pojačanje na poprečne sile pravokutnih i T-oblika poprečnih presjeka bez uređaja za sidrenje. Odredbe se primjenjuju na sustave pojačanja koji se primjenjuju diskretno ili kontinuirano što je prikazano na slici 34. [4]



Slika 34: Definicija oznake koja se koristi za opisivanje primjene pojačanja od CFRP-a [4]

Nosivost na poprečne sile presjeka ojačanog CFRP-om može se uzeti kao:

$$\tau_{Rd,CFRP} = \tau_{Rd} + \tau_{Rd,f} \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \quad (73)$$

gdje je:

$$\tau_{Rd,f} = \frac{A_f}{s_f} \cdot \frac{f_{fwd}}{b_w} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha_f) \cdot \sin \alpha_f \quad (74)$$

$$\frac{A_f}{s_f} = \begin{cases} \frac{2 \cdot t_f \cdot b_f}{s_f} \cdot \sin \alpha_f & \text{za diskretne CFRP trake ili CF lamele} \\ 2 \cdot t_f \cdot \sin \alpha_f & \text{za kontinuirane CF lamele} \end{cases} \quad (75)$$

α_f je kut između sustava pojačanja i osi uzdužnog elementa;

f_{fwd} je proračunska čvrstoća sustava za pojačanje izračunana u skladu s formulama (78), (80), (81) ili (87);

τ_{Rd} , v u skladu s izrazima (76) i (77)

$$\tau_{Rd} = \rho_w \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \leq \frac{v \cdot f_{cd}}{2} \quad (76)$$

$$v = \frac{1}{1,0 + 110 \cdot (\varepsilon_x + (\varepsilon_x + 0,001) \cdot \cot^2 \theta)} \leq 1,0 \quad (77)$$

gdje je ρ_w omjer ugrađene poprečne armature, a ε_x prosječna deformacija u x-smjeru ugrađene poprečne armature.

Osim ako se ne poduzmu rigorozniji proračuni, kut θ trebalo bi se uzeti kao 45 stupnjeva za izračun τ_{Rd} i $\tau_{Rd,f}$.

Sljedeći izraz (78) se može koristiti za određivanje projektirane čvrstoće na posmik zatvorenih omotanih CFRP sustava kako je definirano na slici 34c.

$$f_{fwd} = 0,8 \cdot k_r \cdot f_{fud} \quad (78)$$

gdje:

f_{fud} treba odrediti s pomoću formule (79), a k_r treba odrediti s pomoću formule (80):

$$f_{fud} = \frac{\eta_f \cdot f_{fuk}}{\gamma_f} \quad (79)$$

$$k_r = \begin{cases} 1,0 \cdot \frac{r_c}{50} \cdot \left(2 - \frac{r_c}{50}\right) & \text{za } r_c < 50 \text{ mm} \\ 1,0 & \text{za } r_c \geq 50 \text{ mm} \end{cases} \quad (80)$$

gdje je η_f redukcijski faktor primijenjen na vlačnu čvrstoću ABR-a za relevantne uvjete izloženosti, može se uzeti kao 0,7 osim ako nisu dostupni točniji podaci na temelju podataka ispitivanja za ABR.

Formule (81) i (82) mogu se koristiti za određivanje proračunske čvrstoće otvorenih diskretnih CFRP sustava kako je definirano na slici 35. U oba slučaja f_{fwd} je ograničen vrijednošću određenom formulom (78).

Tamo gdje je duljina sidrenja u tlačnoj zoni elementa svih CFRP lamela, l_{bf} , manja od $l_{bf,max,k}$, f_{fwd} treba odrediti s pomoću formule (81), gdje su θ i α_f definirani na slici 35. [4]

$$f_{fwd} = \frac{2}{3} \frac{n \cdot s_f}{l_{bf,max,k} \cdot [(\cot \theta + \cot \alpha_f) \cdot \sin \alpha_f]} f_{bfRd} \quad (81)$$

Gdje je duljina sidrenja u tlačnoj zoni elementa nekih CFRP traka, l_{bf} , manja od $l_{bf,max,k}$, f_{fwd} treba odrediti s pomoću formule (82):

$$f_{fwd} = \left[1 - \left(1 - \frac{2}{3} \frac{m \cdot s_f}{l_{bf,max,k} \cdot [(\cot \theta + \cot \alpha_f) \cdot \sin \alpha_f]} \right) \frac{m}{n} \right] f_{bfRd} \quad (82)$$

gdje su parametri α_f , m i n definirani u formulama (83), (84) i na slici 35, a $l_{bf,max,k}$ i f_{bfRd} određuju se s pomoću izraza (87) i (85):

$$n = \text{integer} \left(\frac{l_{bf}(\cot \theta + \cot \alpha_f)}{s_f} \right) \quad (83)$$

$$m = \text{integer} \left(\frac{l_{bf,max,k}(\cot \theta + \cot \alpha_f) \sin \alpha_f}{s_f} \right) \quad (84)$$

$$f_{bfRd} = \frac{0,2}{\gamma_{BA}} \beta_1 \sqrt{\frac{E_f}{t_f} (f_{cm} \cdot f_{ctm,surf})^{0,5}} \quad (85)$$

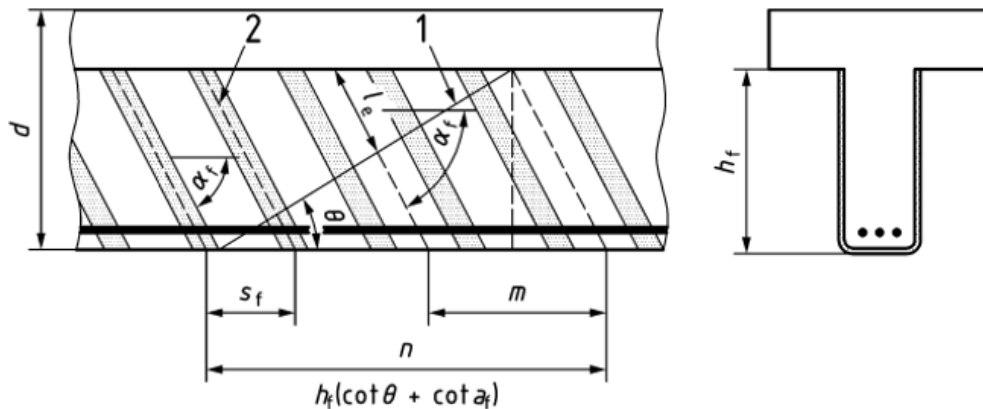
gdje je:

$$\beta_1 = \begin{cases} \frac{l_{bf}}{l_{bf,max,k}} \left(2 - \frac{l_{bf}}{l_{bf,max,k}} \right) < 1 & \text{za } l_{bf} < l_{bf,max,k} \\ 1 & \text{za } l_{bf} \geq l_{bf,max,k} \end{cases} \quad (86)$$

$$l_{bf,max,k} = 1,5 \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{(f_{cm} \cdot f_{ctm,surf})^{0,5}}} \quad (87)$$

Izraz (88) može se koristiti za određivanje proračunske čvrstoće otvorenih kontinuiranih CFRP sustava lamela. [4]

$$f_{fwd} = \begin{cases} \frac{2}{3} \cdot \frac{h_f}{l_{bf,max,k}} \cdot f_{bfRd} & \text{za } \frac{h_f}{\sin \alpha_f} < l_{bf,max,k} \\ \left[1 - \frac{1}{3} \frac{l_{bf,max,k}}{\frac{3h_f}{\sin \alpha_f}} \right] \cdot f_{bfRd} & \text{za } \frac{h_f}{\sin \alpha_f} \geq l_{bf,max,k} \end{cases} \quad (88)$$



Slika 35: Ilustracija ABR spona koje prelaze preko pukotine od poprečnih sila; 1 = pukotina od poprečnih sila, 2 = trake s nagibom α_f , m = trake s $l_{bf} < l_{bf,max,k}$, n = trake koje sijeku pukotinu od poprečnih sila [4]

3.2.4.3. Osnovna otpornost sidrenja

- Općenito

Površinska vlačna čvrstoća $f_{ctm,surf}$ pripremljene betonske površine na koju se lijepi od odlučujuće je važnosti za otpornost na lijepljenje. Ako se površinska vlačna čvrstoća ne može odrediti na elementu, može se procijeniti kao funkcija položaja tijekom betoniranja prema formuli (89). [4]

$$f_{ctm,surf} = k_{c,surf} \cdot f_{ctm} \quad (89)$$

gdje je:

$$k_{c,surf} = \begin{cases} 0,3 + 0,6 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{60} - 0,2\right) & \text{za poziciju betoniranja: gore} \\ 0,4 + 0,5 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{60} - 0,2\right) & \text{za poziciju betoniranja: sa strane} \\ 0,6 + 0,3 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{60} - 0,2\right) & \text{za poziciju betoniranja: dolje} \end{cases} \quad (90)$$

- Pojednostavljena metoda

Sljedeća, pojednostavljena metoda može se koristiti za određivanje otpora sidrenja za EBR.

[4]

$$f_{bfRd} = \frac{0,2}{\gamma_{BA}} \beta_1 \sqrt{\frac{E_f}{t_f}} (f_{cm} \cdot f_{ctm,surf})^{0,5} \quad (91)$$

gdje je:

$$\beta_1 = \begin{cases} \frac{l_{bf}}{l_{bf,max}} \left(2 - \frac{l_{bf}}{l_{bf,max,k}}\right) < 1 & \text{za } l_{bf} < l_{bf,max,k} \\ 1 & \text{za } l_{bf} \geq l_{bf,max} \end{cases} \quad (92)$$

$$l_{bf,max,k} = 1,5 \sqrt{\frac{E_f t_f}{(f_{cm} \cdot f_{ctm,surf})^{0,5}}} \quad (93)$$

4. DIMENZIONIRANJE KONTINUIRANE PLOČE I JEDNOSTAVNE GREDE

U ovom je poglavlju provedeno dimenzioniranje kontinuirane ploče i jednostavne grede na početno opterećenje $q_1 = 5 \text{ kN/m}^2$ u skladu s normom EN 1992-1-1 Eurocode 2 (2004.). Greda i ploča dio su konstrukcije trgovine koje je potrebno pojačati uslijed prenamjene u skladište.

Početno uporabno opterećenje:

$$q_1 = 5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Karakteristična tlačna čvrstoća betona C25/30:

$$f_{\text{ck}} = \alpha_{\text{cc}} \cdot \frac{f_{\text{ck}}}{\gamma_{\text{c}}} = 1,0 \cdot \frac{25}{1,5} = 16,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 1,67 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Proračunska granica popuštanja čelika B500B:

$$f_{\text{yd}} = \frac{f_{\text{yk}}}{\gamma_{\text{s}}} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 43,48 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

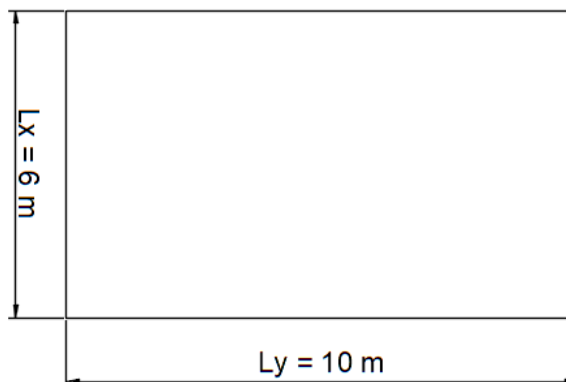
PLOČA

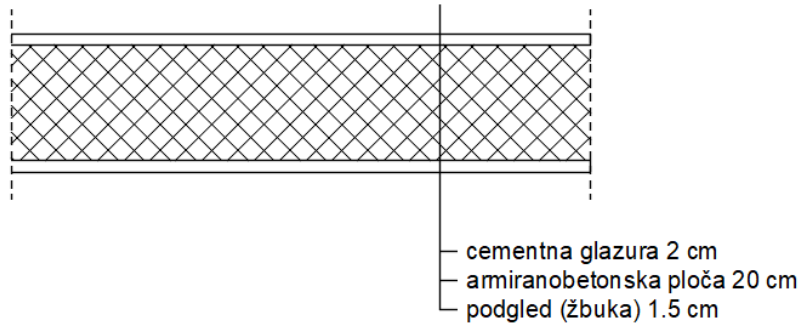
Geometrijske karakteristike ploče:

$$L_y = 6 \text{ m}$$

$$L_x = 10 \text{ m}$$

$$h_p = 20 \text{ cm}$$





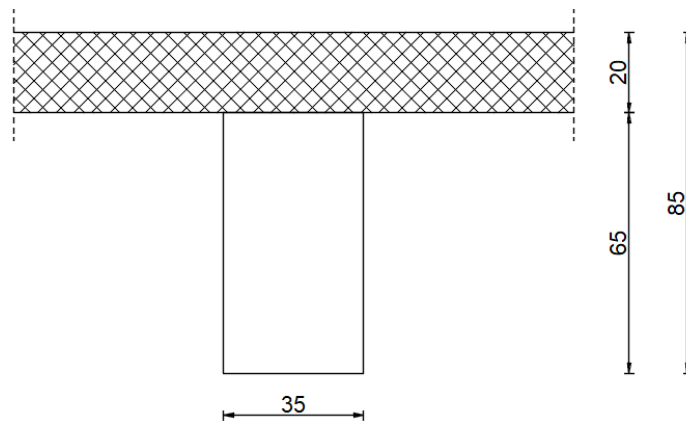
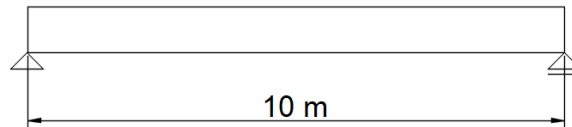
GREDA

Geometrijske karakteristike grede:

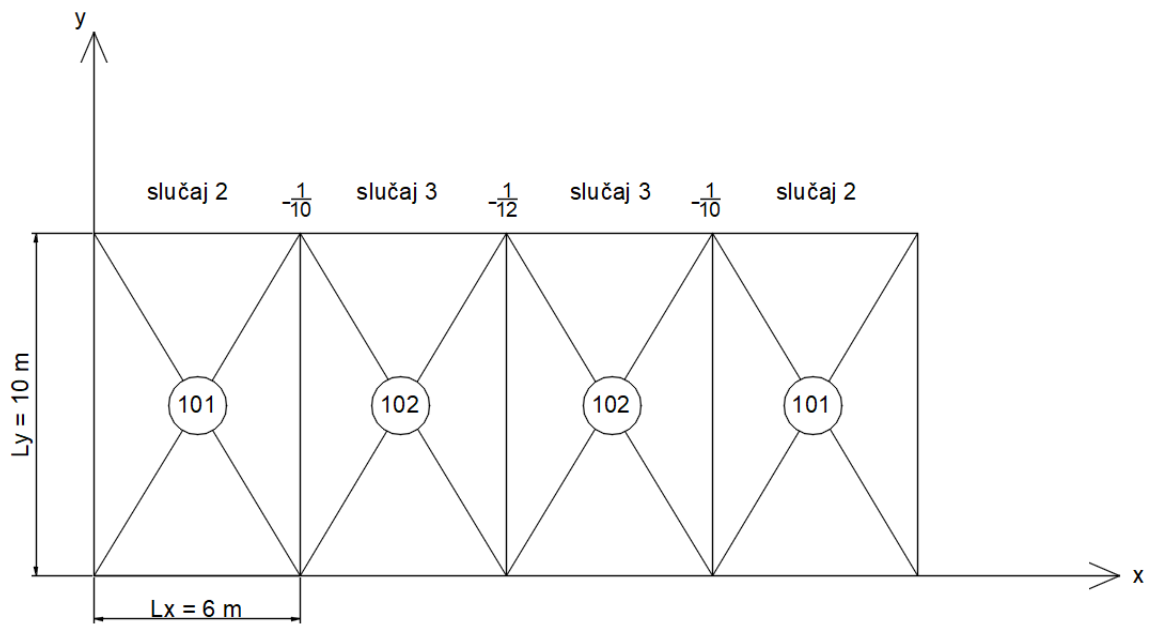
$$l_g = 10 \text{ m}$$

$$h_g = 65 \text{ cm}$$

$$b_g = 35 \text{ cm}$$



4.1. KONTINUIRANE PLOČE



Provjera nosivosti ploče:

$$1000/600 = 1,67 < 2 \quad \text{ploče nosive u 2 smjera}$$

Analiza opterećenja

Stalno opterećenje: - cementna glazura: $0,02 \cdot 24 = 0,48 \text{ kN/m}^2$
- armiranobetonska ploča $0,2 \cdot 25 = 5 \text{ kN/m}^2$
- podgled (žbuka) $0,015 \cdot 18 = 0,27 \text{ kN/m}^2$

$$g = 5,75 \text{ kN/m}^2$$

Uporabno opterećenje

$$q = 5 \text{ kN/m}^2$$

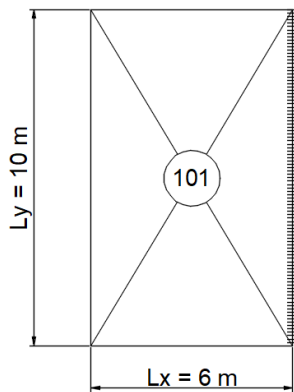
PLOČA POZ 101

Proračunska opterećenja:

$$q_{Ed}' = 1,35g + \frac{1,5q}{2} = 1,35 \cdot 5,75 + 1,5 \cdot \frac{5}{2} = 11,51 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{Ed}'' = \frac{1,5q}{2} = 1,5 \cdot \frac{5}{2} = 3,75 \text{ kN/m}^2$$

Maksimalni momenti dobivaju se iz Loserovih tablica



slučaj 2 $\lambda = \frac{L_y}{L_x} = 1,67 \approx 1,7$

$$M_{Ed,x} = \left(\frac{q_{Ed}'}{\varphi_{2x}} + \frac{q_{Ed}''}{\varphi_{1x}} \right) \cdot l_x^2 = \left(\frac{11,51}{17,63} + \frac{3,75}{12,06} \right) \cdot 6^2 = 34,7 \text{ kNm/m'}$$

$$M_{Ed,y} = \left(\frac{q_{Ed}'}{\varphi_{2y}} + \frac{q_{Ed}''}{\varphi_{1y}} \right) \cdot l_y^2 = \left(\frac{11,51}{196,69} + \frac{3,75}{100,77} \right) \cdot 10^2 = 9,57 \text{ kNm/m'}$$

Proračun statičke visine

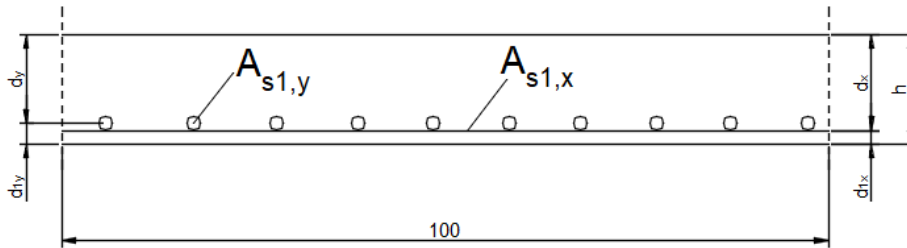
XC1

S4 → S4-0-0-1 = S3

$$c_{\min,dur} = \begin{cases} \varnothing \leq 10 \text{ mm} \\ c_{\min,dur} = 10 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \end{cases} = 10 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$$

$$c_{nom} = 1 + 1 = 2,0 \text{ cm}$$



$$d_{1x} = c_{\text{nom}} + \frac{\phi}{2} \cong 2 + \frac{1}{2} = 2,5 \text{ cm}$$

$$d_{1y} = d_{1x} + \phi \cong 2,5 + 1 = 3,5 \text{ cm}$$

$$d_x = h - d_{1x} = 20 - 2,5 = 17,5 \text{ cm}$$

$$d_y = h - d_{1y} = 20 - 3,5 = 16,5 \text{ cm}$$

$$\mu_{\text{Eds}}^x = \frac{M_{\text{Ed},x}}{b \cdot d_x^2 \cdot f_{\text{cd}}} = \frac{3470}{100 \cdot 17,5^2 \cdot 1,67} = 0,068$$

$$\xi = 0,091 ; \zeta = 0,962$$

$$\mu_{\text{Eds}}^y = \frac{M_{\text{Ed},y}}{b \cdot d_y^2 \cdot f_{\text{cd}}} = \frac{957}{100 \cdot 16,5^2 \cdot 1,67} = 0,021$$

$$\xi = 0,037 ; \zeta = 0,985$$

Proračun armature u x-smjeru

$$A_{s1x} = \frac{M_{\text{Eds},x}}{\zeta \cdot d_x \cdot f_{\text{yd}}} = \frac{3470}{0,962 \cdot 17,5 \cdot 43,48} = 4,74 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

$$A_{s,\text{min}} = 0,26 \cdot \frac{2,6}{500} \cdot 100 \cdot 17,5 \geq 0,0013 \cdot 100 \cdot 17,5$$

$$2,37\text{cm}^2 > 2,28\text{cm}^2$$

$$A_{s1x} > A_{s,\text{min}}$$

ODABIRE SE: $\phi 8/10,5 \text{ cm}$ ($4,79 \text{ cm}^2$)

Proračun armature u y-smjeru

$$A_{s1y} = \frac{M_{Eds,y}}{\zeta \cdot d_y \cdot f_{yd}} = \frac{957}{0,985 \cdot 16,5 \cdot 43,48} = 1,35 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \frac{2,6}{500} \cdot 100 \cdot 16,5 \geq 0,0013 \cdot 100 \cdot 16,5$$

$$2,23 \text{ cm}^2 > 2,15 \text{ cm}^2$$

$$A_{s1y} < A_{s,min}$$

ODABIRE SE: $\phi 6/12,5 \text{ cm}$ ($2,26 \text{ cm}^2$)

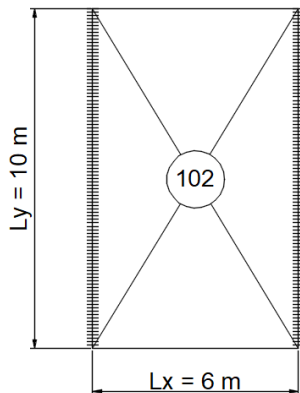
PLOČA POZ 102

Proračunska opterećenja:

$$q_{Ed}' = 1,35g + \frac{1,5q}{2} = 1,35 \cdot 5,75 + 1,5 \cdot \frac{5}{2} = 11,51 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{Ed}'' = \frac{1,5q}{2} = 1,5 \cdot \frac{5}{2} = 3,75 \text{ kN/m}^2$$

Maksimalni momenti dobivaju se iz Loserovih tablica



slučaj 3 $\lambda = \frac{L_y}{L_x} = 1,67 \approx 1,7$

$$M_{Ed,x} = \left(\frac{q_{Ed}'}{\varphi_{3x}} + \frac{q_{Ed}''}{\varphi_{1x}} \right) \cdot l_x^2 = \left(\frac{11,51}{27,12} + \frac{3,75}{12,06} \right) \cdot 6^2 = 26,47 \text{ kNm/m}'$$

$$M_{Ed,y} = \left(\frac{q_{Ed}'}{\varphi_{3y}} + \frac{q_{Ed}''}{\varphi_{1y}} \right) \cdot l_y^2 = \left(\frac{11,51}{362,5} + \frac{3,75}{100,77} \right) \cdot 10^2 = 6,9 \text{ kNm/m'}$$

$$\mu_{Eds}^x = \frac{M_{Ed,x}}{b \cdot d_x^2 \cdot f_{cd}} = \frac{2647}{100 \cdot 17,5^2 \cdot 1,67} = 0,052$$

$$\xi = 0,065 ; \zeta = 0,973$$

$$\mu_{Eds}^y = \frac{M_{Ed,y}}{b \cdot d_y^2 \cdot f_{cd}} = \frac{690}{100 \cdot 16,5^2 \cdot 1,67} = 0,015$$

$$\xi = 0,025 ; \zeta = 0,990$$

Proračun armature u x-smjeru

$$A_{s1x} = \frac{M_{Eds,x}}{\zeta \cdot d_x \cdot f_{yd}} = \frac{2647}{0,973 \cdot 17,5 \cdot 43,48} = 3,58 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

$$A_{s1x} > A_{s,min}$$

ODABIRE SE: $\phi 8/14 \text{ cm}$ ($3,59 \text{ cm}^2$)

Proračun armature u y-smjeru

$$A_{s1y} = \frac{M_{Eds,y}}{\zeta \cdot d_y \cdot f_{yd}} = \frac{690}{0,990 \cdot 16,5 \cdot 43,48} = 0,97 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

$$A_{s1y} < A_{s,min}$$

ODABIRE SE: $\phi 6/12,5 \text{ cm}$ ($2,26 \text{ cm}^2$)

OSLONAC POZ 101-102, x-smjer

$$\kappa_x^{(101)} = 0,7143$$

$$\kappa_x^{(102)} = 0,8333$$

$$\lambda = \frac{L_y}{L_x} = 1,67 > 1$$

$$q_{Ed,x}^{(101)} = \kappa_x^{(101)} \cdot (1,35g + 1,5q) = 0,7143 \cdot (1,35 \cdot 5,75 + 1,5 \cdot 5) = 10,9 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{Ed,x}^{(102)} = \kappa_x^{(102)} \cdot (1,35g + 1,5q) = 0,8333 \cdot (1,35 \cdot 5,75 + 1,5 \cdot 5) = 12,72 \text{ kN/m}^2$$

$$M_{Ed} = -\frac{1}{n} \cdot \frac{q_{Ed}^{(101)} + q_{Ed}^{(102)}}{2} \cdot l_x^2 = -\frac{1}{10} \cdot \frac{10,9 + 12,72}{2} \cdot 6^2 = -42,52 \text{ kNm/m}'$$

Proračun statičke visine

$$d_1 = c_{nom} + \frac{\emptyset}{2} \cong 2 + \frac{1}{2} = 2,5 \text{ cm}$$

$$d = h - d_1 = 20 - 2,5 = 17,5 \text{ cm}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{4252}{100 \cdot 17,5^2 \cdot 1,67} = 0,0831$$

$$\xi = 0,113 ; \zeta = 0,953$$

Proračun armature

$$A_{s1} = \frac{M_{Eds}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{4252}{0,953 \cdot 17,5 \cdot 43,48} = 5,86 \text{ cm}^2/\text{m}'$$

ODABIRE SE: $\phi 10/13 \text{ cm}$ ($6,04 \text{ cm}^2$)

OSLONAC POZ 102-102, x-smjer

$$\kappa_x^{(102)} = 0,8333$$

$$\lambda = \frac{L_y}{L_x} = 1,67 > 1$$

$$q_{Ed,x}^{(102)} = \kappa_x^{(102)} \cdot (1,35g + 1,5q) = 0,8333 \cdot (1,35 \cdot 5,75 + 1,5 \cdot 5) = 12,72 \text{ kN/m}^2$$

$$M_{Ed} = -\frac{1}{n} \cdot q_{Ed,x}^{(102)} \cdot l_x^2 = -\frac{1}{12} \cdot 12,72 \cdot 6^2 = -38,16 \text{ kNm/m'}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{3816}{100 \cdot 17,5^2 \cdot 1,67} = 0,0746$$

$$\xi = 0,097 ; \zeta = 0,960$$

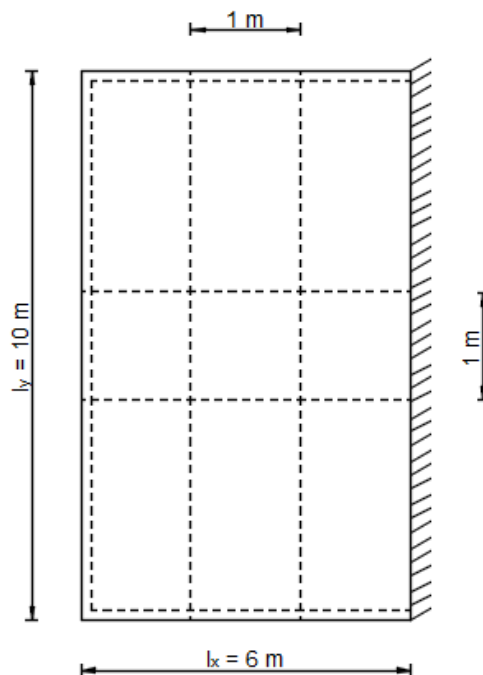
Proračun armature

$$A_{s1} = \frac{M_{Eds}}{\zeta \cdot d \cdot f_{yd}} = \frac{3816}{0,960 \cdot 17,5 \cdot 43,48} = 5,22 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

ODABIRE SE: $\phi 10/15 \text{ cm}$ ($5,24 \text{ cm}^2$)

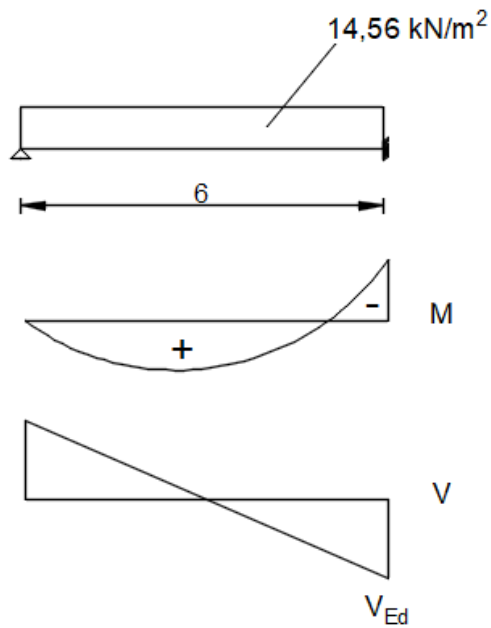
PROVJERA POSMIKA U PLOČI

Poprečna sila i naprezanje u sredini raspona ploče poz. 101:



$$\lambda = \frac{10}{6} = 1,67$$

$$\kappa_{2x} = 0,9543$$

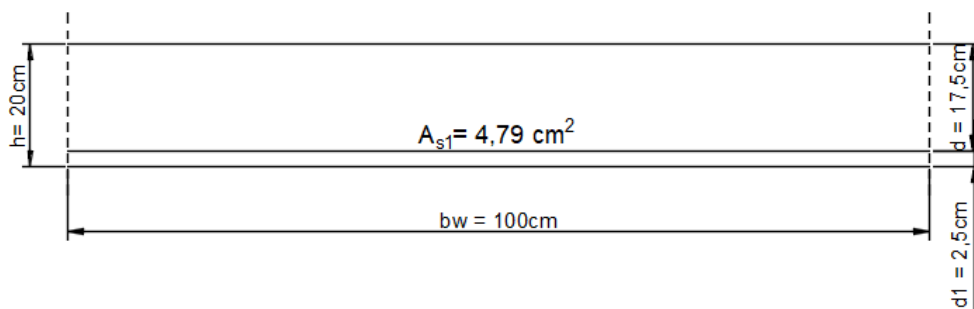


$$q_{Ed,x} = 0,9543 \cdot 15,26 = 14,56 \text{ kN/m}^2$$

$$V_{Ed} = 0,625 \cdot q_{Ed} \cdot l_x = 0,625 \cdot 14,56 \cdot 6 = 54,6 \text{ kN/m'}$$

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot d} = \frac{54,6 \cdot 10^3}{1 \cdot 0,175} = 312000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 0,31 \text{ Mpa}$$

Odabrana armatura u ploči poz. 101:



Koeficijent armiranja uzdužnom armaturom:

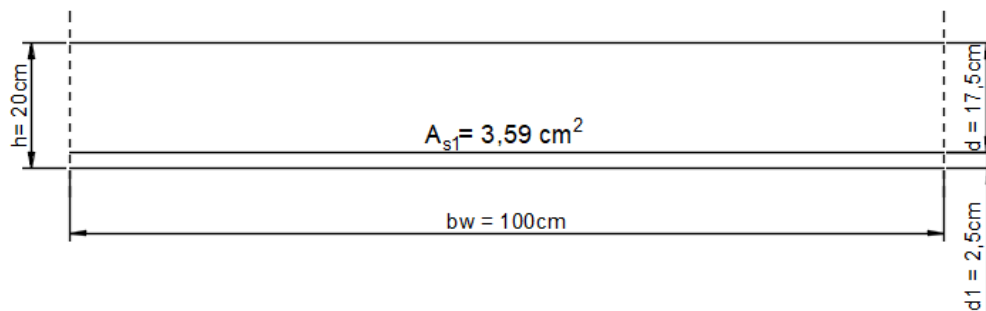
$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = \frac{4,79}{100 \cdot 17,5} = 2,74 \cdot 10^{-3} = 0,27\%$$

Provjera:

$$v_{Rdc} \cong 0,49 \text{ Mpa} - \text{vrijednost očitana iz tablice [10]}$$

$$V_{Ed} < v_{Rdc} \rightarrow 0,31 \text{ Mpa} < 0,49 \text{ Mpa} \rightarrow \text{nije potrebna poprečna armatura}$$

Odabrana armatura u ploči poz. 102:



Koeficijent armiranja uzdužnom armaturom:

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d} = \frac{3,59}{100 \cdot 17,5} = 2,05 \cdot 10^{-3} = 0,21\%$$

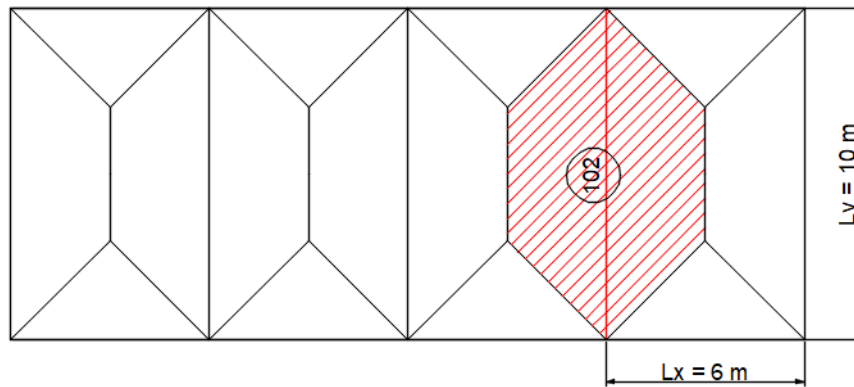
Provjera:

$$v_{Rdc} \cong 0,49 \text{ Mpa}$$

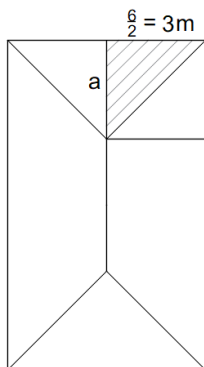
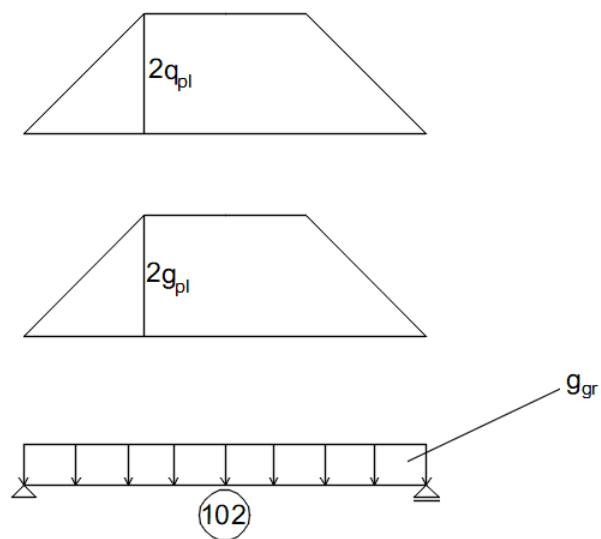
$$V_{Ed} < v_{Rdc} \rightarrow 0,31 \text{ Mpa} < 0,49 \text{ Mpa} \rightarrow \text{nije potrebna poprečna armatura}$$

4.2. JEDNOSTAVNA GREDA

Opterećenje na gredu poz 102:



Statička shema opterećenja na gredu poz 102:



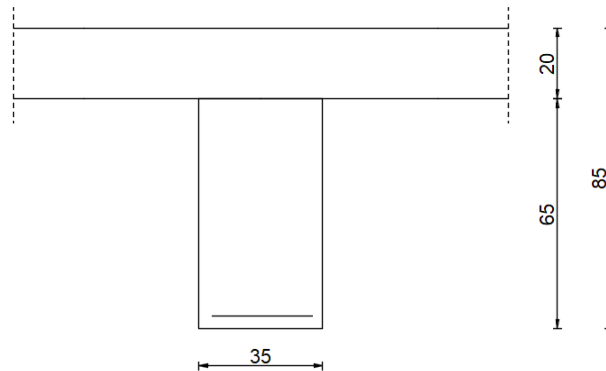
$$\text{tg}45^\circ = \frac{a}{3} \rightarrow a = 3 \text{ m}$$

ANALIZA OPTEREĆENJA

Stalno opterećenje od ploče: $g_{pl} = a \cdot g = 3 \cdot 5,75 = 17,25 \text{ kN/m}^2$

Uporabno opterećenje: $q_{pl} = a \cdot q = 3 \cdot 5 = 15 \text{ kN/m}^2$

Vlastita težina grede: $g_{gr} = (0,35 \cdot 0,65) \cdot 25 = 5,69 \text{ kN/m}^2$



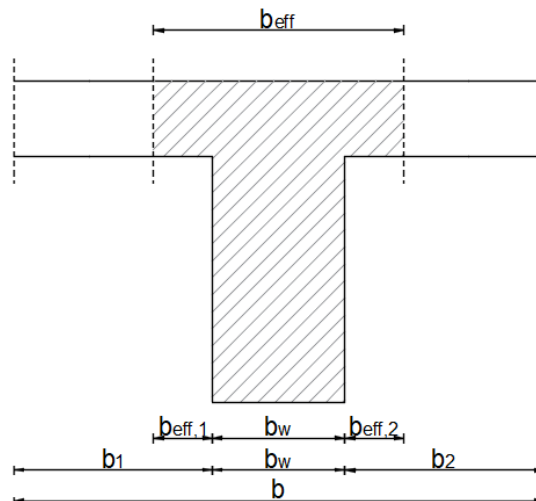
Proračun statičke visine:

$$c_{nom} = 2,5 \text{ cm}$$

$$d_1 = c_{nom} + \varnothing_w + \varnothing = 2,5 + 0,8 + \frac{2}{2} = 4,5 \text{ cm}$$

$$d = 85 - 4,5 = 80,5 \text{ cm}$$

Sudjelujuća širina T – presjeka:



$$b_{eff} = b_{eff,1} + b_w + b_{eff,2} \leq b$$

$$b = 600 \text{ cm}$$

$$b_1 = b_2 = \frac{b - b_w}{2} = \frac{600 - 35}{2} = 282,5 \text{ cm}$$

$$l_o = 0,85 \cdot l = 0,85 \cdot 1000 = 850 \text{ cm}$$

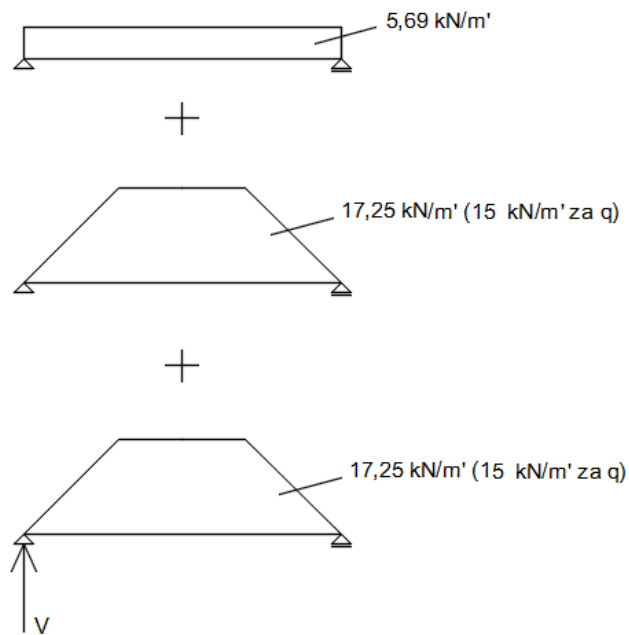
$$b_{\text{eff},1} = 0,2 \cdot b_1 + 0,1 \cdot l_o \leq \begin{cases} 0,2 \cdot l_o \\ b_1 \end{cases}$$

$$b_{\text{eff},1} = b_{\text{eff},2} = 0,2 \cdot 282,5 + 0,1 \cdot 800 = 141,5 \leq \begin{cases} 0,2 \cdot 850 = 170 \text{ cm} \\ 282,5 \text{ cm} \end{cases}$$

$$b_{\text{eff},1} = b_{\text{eff},2} = 141,5 \text{ cm}$$

$$b_{\text{eff}} = 141,5 + 35 + 141,5 = 318 \text{ cm} < 600 \text{ cm}$$

POLJE



$$M = q \cdot \frac{L^2}{24} \cdot \left[3 - 4 \cdot \left(\frac{a}{L} \right)^2 \right]$$

$$V = q \cdot \frac{(L - a)}{2}$$

Moment savijanja \$M_g\$:

$$M = q \cdot \frac{L^2}{24} \cdot \left[3 - 4 \cdot \left(\frac{a}{L} \right)^2 \right] = 17,25 \cdot \frac{10^2}{24} \cdot \left[3 - 4 \cdot \left(\frac{3}{10} \right)^2 \right] = 189,75 \text{ kNm}$$

$$M_g = 189,75 \cdot 2 + \frac{5,69 \cdot 10^2}{8} = 450,63 \text{ kNm}$$

Moment savijanja M_q :

$$M = q \cdot \frac{L^2}{24} \cdot \left[3 - 4 \cdot \left(\frac{a}{L} \right)^2 \right] = 15 \cdot \frac{10^2}{24} \cdot \left[3 - 4 \cdot \left(\frac{3}{10} \right)^2 \right] = 165 \text{ kNm}$$

$$M_q = 165 \cdot 2 = 330 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja:

$$M_{Ed} = 1,35 \cdot M_g + 1,5 \cdot M_q = 1,35 \cdot 450,63 + 1,5 \cdot 330 = 1103,35 \text{ kNm}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Ed}}{b_{eff} \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{110335}{318 \cdot 80,5^2 \cdot 1,67} = 0,032$$

$$\xi = 0,049 ; \zeta = 0,979$$

Proračun armature:

$$A_{s1} = \frac{M_{Ed}}{b_{eff} \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{110335}{0,979 \cdot 80,5 \cdot 43,48} = 32,2 \text{ cm}^2$$

$$A_{s1,min} = 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{500} \cdot b_w \cdot d \geq 0,0013 \cdot b_w \cdot d$$

$$A_{s1,min} = 0,26 \cdot \frac{2,6}{500} \cdot 35 \cdot 80,5 \geq 0,0013 \cdot 35 \cdot 80,5$$

$$A_{s1,min} = 3,81 \text{ cm}^2 > 3,66 \text{ cm}^2$$

ODABIRE SE: 4Ø20 + 4Ø25 (12,57 + 19,63 = 32,2 cm²)

DIMENZIONIRANJE GREDE NA POPREČNE SILE

Provjera nosivosti tlačnih štapova:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$$

Stalno opterećenje od ploče: $g_{pl} = 17,25 \text{ kN/m}^2 \cdot 2 = 34,5 \text{ kN/m}'$

Uporabno opterećenje: $q_{pl} = 15 \text{ kN/m}^2 \cdot 2 = 30 \text{ kN/m}'$

Vlastita težina grede: $g_{gr} = 5,69 \text{ kN/m}'$

Proračunska poprečna sila:

$$V_g = 5,69 \cdot \frac{10}{2} + \frac{34,5 \cdot (10 - 3)}{2} = 149,2 \text{ kN}$$

$$V_q = 30 \cdot \frac{10 - 3}{2} = 105 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 1,35 \cdot 149,2 + 1,5 \cdot 105 = 358,92 \text{ kN}$$

Najveća proračunska poprečna sila:

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{1}{\text{ctg}\theta + \text{tg}\theta} = 1 \cdot 35 \cdot 78,81 \cdot 0,54 \cdot 1,67 \cdot \frac{1}{1,2 + \frac{1}{1,2}}$$
$$= 1223,35 \text{ kN}$$

Faktor smanjenja tlačne čvrstoće betona raspucanog od poprečnih sila:

$$v_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,54$$

Provjera:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} \rightarrow 358,92 \text{ kN} < 1223,35 \text{ kN} \quad \text{zadovoljava}$$

Najmanja poprečna armatura:

$$\rho_{w,min} = 0,0009$$
$$s_{l,max} = \frac{A_{sw}^1 \cdot m}{b_w \cdot \rho_{w,min}} = \frac{0,5 \cdot 2}{35 \cdot 0,0009} = 31,75 \text{ cm}$$

$$s_{l,max} = \min \begin{cases} 0,75 \cdot d = 60,37 \text{ cm} \\ 30 \text{ cm} \end{cases} = 30 \text{ cm}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} = \frac{358,92}{1223,35} = 0,29 < 0,3$$

ODABIRE SE: $\emptyset 8/30 \text{ cm}$

$$V_{Rd,s}^{\min} = \frac{A_{sw}}{s_{l,max}} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \text{ctg}\theta = \frac{0,5 \cdot 2}{30} \cdot 78,81 \cdot 43,48 \cdot 1,2 = 137,07 \text{ kN}$$

Potrebna poprečna armatura:

$$V_{Ed} > V_{Rd,s}^{\min}$$

$$s = \frac{A_{sw}^1 \cdot m \cdot z \cdot f_{ywd}}{V_{Ed}} \cdot \text{ctg}\theta = \frac{0,5 \cdot 2 \cdot 78,81 \cdot 43,48}{358,92} \cdot 1,2 = 11,45 \text{ cm}$$

ODABIRE SE: $s = 11 \text{ cm}$ gdje je $V_{Ed} > V_{Rd,s}^{\min}$

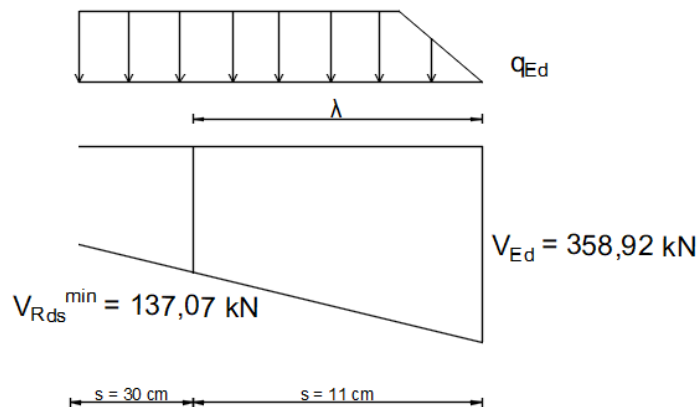
Najveća djelotvorna ploština presjeka poprečne armature za $\text{ctg}\theta = 1$:

$$\frac{A_{sw,max} \cdot f_{ywd}}{b_w \cdot s} \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\sin\alpha}$$

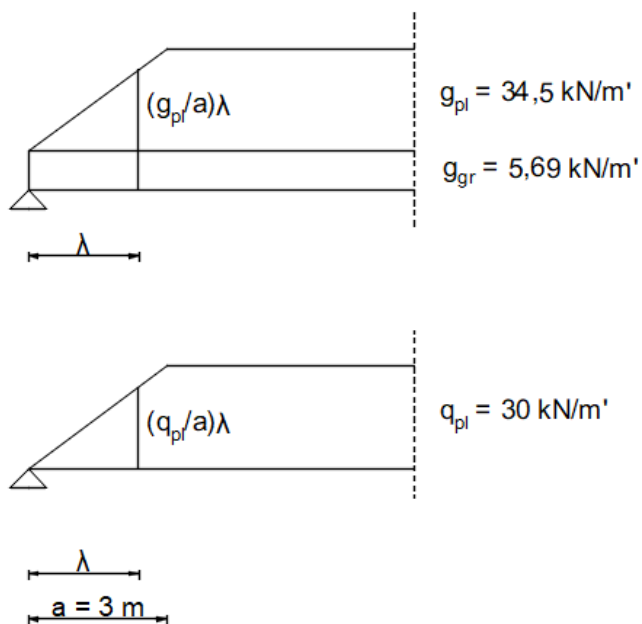
$$s \geq \frac{2 \cdot (A_{sw}^1 \cdot m) \cdot f_{ywd}}{b_w \cdot \alpha_{cw} \cdot v_1 \cdot f_{cd}}$$

$$s \geq \frac{2 \cdot (0,5 \cdot 2) \cdot 43,48}{35 \cdot 1 \cdot 0,54 \cdot 1,67}$$

$$s \geq 2,76 \text{ cm} \qquad 11 \text{ cm} > 2,76 \text{ cm}$$

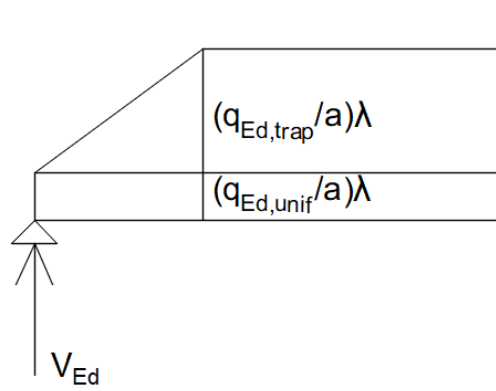


Proračun udaljenosti λ na kojoj je $V_{Ed} > V_{Rds}^{\min}$:



Jednoliko: $q_{Ed,unif} = 1,35 \cdot g_{gr} = 1,35 \cdot 5,69 = 7,68 \text{ kN/m'}$

Trapezno: $q_{Ed,trap} = 1,35 \cdot g_{pl} + 1,5 \cdot q_{pl} = 1,35 \cdot 34,5 + 1,5 \cdot 30 = 91,58 \text{ kN/m'}$



$$V_{Ed} - q_{Ed,unif} \cdot \lambda - \frac{q_{Ed,trap} \cdot \lambda^2}{2a} = V_{Rd,s}^{\min}$$

$$\frac{q_{Ed,trap}}{2a} \cdot \lambda^2 + q_{Ed,unif} \cdot \lambda - (V_{Ed} - V_{Rd,s}^{\min}) = 0$$

$$\lambda = \frac{-q_{Ed,unif} + \sqrt{q_{Ed,unif}^2 + \frac{2 \cdot q_{Ed,trap}}{a} \cdot (V_{Ed} - V_{Rd,s}^{\min})}}{\frac{q_{Ed,trap}}{a}}$$

$$\lambda = \frac{-7,68 + \sqrt{7,68^2 + \frac{2 \cdot 91,58}{a} \cdot (358,92 - 137,07)}}{\frac{91,58}{3}} = 3,57 \text{ m}$$

- IZRADA NACRTA ARMATURE

Crtanje dijagrama vlačnih sila (Fsd dijagram)

Proračun vrijednosti potrebnih za crtanje dijagrama vlačnih sila

Nosivost šipki:

$$F_{s1} = A_s \cdot f_{yd}$$

$$\text{za } \varnothing 20 \quad A_{s1} = 3,14 \text{ cm}^2 \rightarrow F_{s1}^{\varnothing 20} = 3,14 \cdot 43,48 = 136,53 \text{ kN}$$

$$\text{za } \varnothing 25 \quad A_{s1} = 4,91 \text{ cm}^2 \rightarrow F_{s1}^{\varnothing 25} = 4,91 \cdot 43,48 = 213,49 \text{ kN}$$

Duljine sidrenja uzdužnih šipki u gredama:

$$\text{Dobri uvjeti (razred izloženosti XC1)} = \begin{cases} \varnothing 20 \quad l_{bd}^{\varnothing 20} = 40,3 \cdot 2,0 = 80,6 \approx 85 \text{ cm} \\ \varnothing 25 \quad l_{bd}^{\varnothing 25} = 40,3 \cdot 2,5 = 100,75 \approx 105 \text{ cm} \end{cases}$$

Pomak dijagrama vlačnih sila:

$$a_i = \frac{\text{ctg}\theta - \text{ctg}\alpha}{2} \cdot z$$

$$\text{za } \theta = 40^\circ \rightarrow \text{ctg}\theta = 1,2$$

$$\text{za } \alpha = 90^\circ \rightarrow \text{ctg}\alpha = 0$$

$$a_i = \frac{1,2 - 0}{2} \cdot z = 0,6 \cdot z$$

GREDA

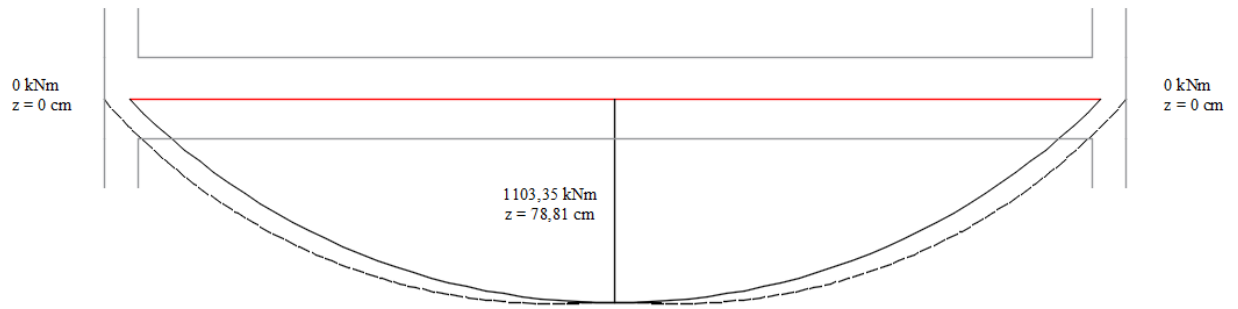
Proračunska visina:

$$d = 80,5 \text{ cm}$$

Krak unutarnjih sila:

$$z = \zeta \cdot d = 0,979 \cdot 80,5 = 78,81 \text{ cm}$$

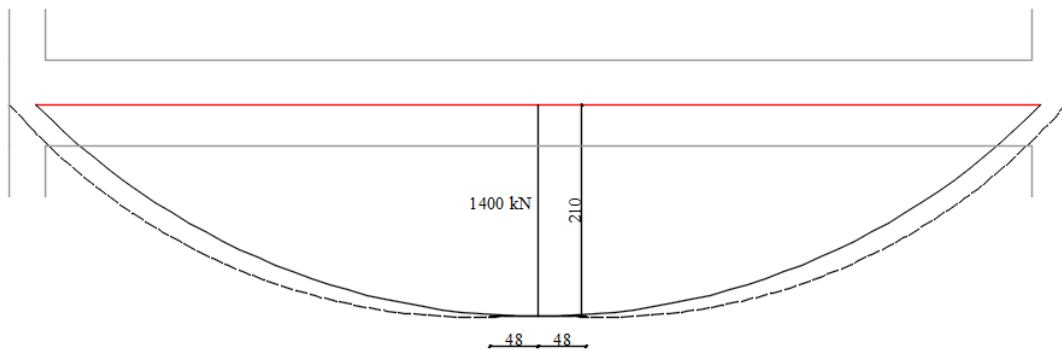
$$a_i = 0,6 \cdot z = 0,6 \cdot 78,81 = 47,29 \approx 48 \text{ cm}$$



Proračun F_{sd} sile:

$$F_{sd} = \frac{M_{Ed}}{z} = \frac{1103,35}{0,7881} = 1400,01 \text{ kN}$$

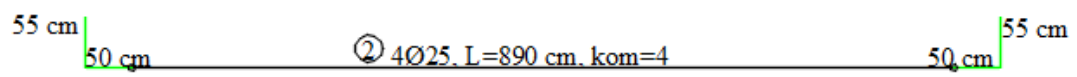
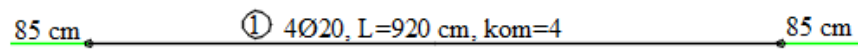
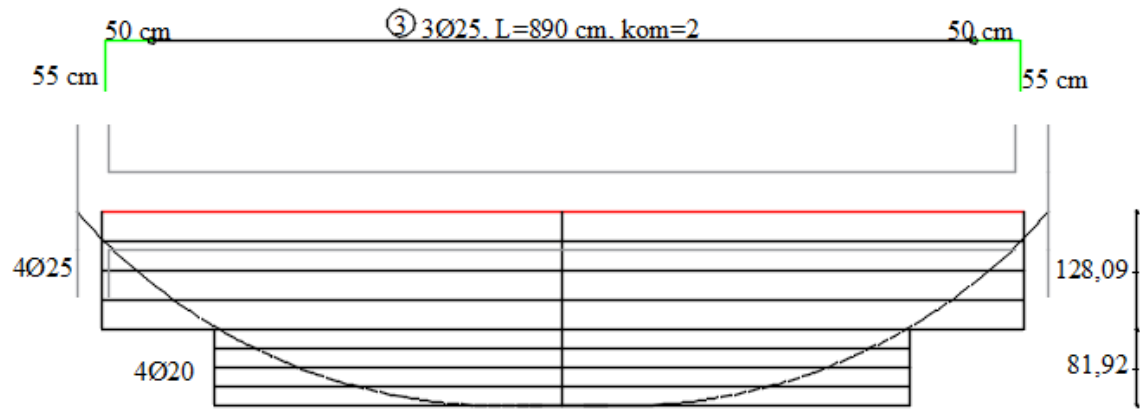
$$1 \text{ kN} = 0,15 \text{ cm}$$



Nosivost i duljine šipki:

$$\varnothing 20 \rightarrow 136,53 \cdot 0,15 \cdot 4 = 81,92 \text{ kN}$$

$$\varnothing 25 \rightarrow 213,49 \cdot 0,15 \cdot 4 = 128,09 \text{ kN}$$



5. PRORAČUN I POJAČANJE ARMIRANOBETONSKIH ELEMENATA – PRIMJERI

Kroz ovo poglavlje provedeno je dimenzioniranje pojačanja za grede i ploče izložene povećanom opterećenju $q = 10 \text{ kN/m}$, radi prenamjene prostora u skladište.

- PRORAČUNSKI MOMENT SAVIJANJA I PRORAČUNSKA POPREČNA SILA ZA POVEĆANO UPORABNO OPTEREĆENJE

Povećano uporabno opterećenje:

$$q = 10 \text{ kN/m}^2$$

PLOČA 101

Stalno opterećenje:

$$g = 5,75 \text{ kN/m}^2$$

Proračunska opterećenja:

$$q_{Ed}' = 1,35g + \frac{1,5q}{2} = 1,35 \cdot 5,75 + 1,5 \cdot \frac{10}{2} = 15,26 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{Ed}'' = \frac{1,5q}{2} = 1,5 \cdot \frac{10}{2} = 7,5 \text{ kN/m}^2$$

Maksimalni momenti savijanja:

$$M_{Ed,x} = \left(\frac{q_{Ed}'}{\varphi_{2x}} + \frac{q_{Ed}''}{\varphi_{1x}} \right) \cdot l_x^2 = \left(\frac{15,26}{17,63} + \frac{7,5}{12,06} \right) \cdot 6^2 = 53,55 \text{ kNm/m}'$$

$$M_{Ed,y} = \left(\frac{q_{Ed}'}{\varphi_{2y}} + \frac{q_{Ed}''}{\varphi_{1y}} \right) \cdot l_y^2 = \left(\frac{15,26}{196,69} + \frac{7,5}{100,77} \right) \cdot 10^2 = 15,2 \text{ kNm/m}'$$

PLOČA 102

Stalno opterećenje:

$$g = 5,75 \text{ kN/m}^2$$

Proračunska opterećenja:

$$q_{Ed}' = 1,35g + \frac{1,5q}{2} = 1,35 \cdot 5,75 + 1,5 \cdot \frac{10}{2} = 15,26 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{Ed}'' = \frac{1,5q}{2} = 1,5 \cdot \frac{10}{2} = 7,5 \text{ kN/m}^2$$

Maksimalni momenti savijanja:

$$M_{Ed,x} = \left(\frac{q_{Ed}'}{\varphi_{2x}} + \frac{q_{Ed}''}{\varphi_{1x}} \right) \cdot l_x^2 = \left(\frac{15,26}{27,12} + \frac{7,5}{12,06} \right) \cdot 6^2 = 42,64 \text{ kNm/m'}$$

$$M_{Ed,y} = \left(\frac{q_{Ed}'}{\varphi_{2y}} + \frac{q_{Ed}''}{\varphi_{1y}} \right) \cdot l_y^2 = \left(\frac{15,26}{362,5} + \frac{7,5}{100,77} \right) \cdot 10^2 = 11,65 \text{ kNm/m'}$$

GREDA

Uporabno opterećenje od ploče:

$$q_{pl} = a \cdot q = 3 \cdot 10 = 30 \text{ kN/m'}$$

Momenti savijanja od ploče i grede:

$$M_q = 2 \cdot q_{pl} \cdot \frac{L^2}{24} \left[3 - 4 \cdot \left(\frac{a}{L} \right)^2 \right] = 2 \cdot 30 \cdot \frac{10^2}{24} \left[3 - 4 \cdot \left(\frac{3}{10} \right)^2 \right] = 2 \cdot 330 = 660 \text{ kNm}$$

$$M_g = 450,63 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja za gredu:

$$M_{Ed} = 1,35 \cdot M_g + 1,5 \cdot M_q = 1,35 \cdot 450,63 + 1,5 \cdot 660 = 1598,35 \text{ kNm}$$

Proračunska poprečna sila:

$$V_q = 2 \cdot q \cdot \frac{(L - a)}{2} = 2 \cdot 30 \cdot \frac{10 - 3}{2} = 210 \text{ kN}$$

$$V_g = 149,2 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 1,35 \cdot V_g + 1,5 \cdot V_q = 1,35 \cdot 149,2 + 1,5 \cdot 210 = 516,42 \text{ kN}$$

- MOMENTI SAVIJANJA BEZ UPORABNOG OPTEREĆENJA

PLOČA 101

Proračunsko opterećenje:

$$q_{Ed}' = 1 \cdot g = 5,75 \text{ kN/m}^2$$

Maksimalni momenti savijanja:

$$M_{Ed,x} = \left(\frac{q_{Ed}'}{\varphi_{2x}} \right) \cdot l_x^2 = \left(\frac{5,75}{17,63} \right) \cdot 6^2 = 11,74 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,y} = \left(\frac{q_{Ed}'}{\varphi_{2y}} \right) \cdot l_y^2 = \left(\frac{5,75}{196,69} \right) \cdot 10^2 = 2,92 \text{ kNm}$$

PLOČA 102

Proračunsko opterećenje:

$$q_{Ed}' = 1 \cdot g = 5,75 \text{ kN/m}^2$$

Maksimalni momenti savijanja:

$$M_{Ed,x} = \left(\frac{q_{Ed}'}{\varphi_{3x}} \right) \cdot l_x^2 = \left(\frac{5,75}{27,12} \right) \cdot 6^2 = 7,63 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,y} = \left(\frac{q_{Ed}'}{\varphi_{3y}} \right) \cdot l_y^2 = \left(\frac{5,75}{362,5} \right) \cdot 10^2 = 1,59 \text{ kNm}$$

GREDA

Uporabna opterećenja od ploče i grede:

$$q_{pl} = 17,25 \text{ kN/m}'$$

$$q_{gr} = 5,69 \text{ kN/m}'$$

Momenti savijanja od ploče i grede:

$$M_{g,pl} = q \cdot \frac{L^2}{24} \left[3 - 4 \cdot \left(\frac{a}{L} \right)^2 \right] = 17,25 \cdot \frac{10^2}{24} \left[3 - 4 \cdot \left(\frac{3}{10} \right)^2 \right] = 189,75 \text{ kNm}$$

$$M_{g,gr} = \frac{5,69 \cdot 10^2}{8} = 71,13 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja za gredu:

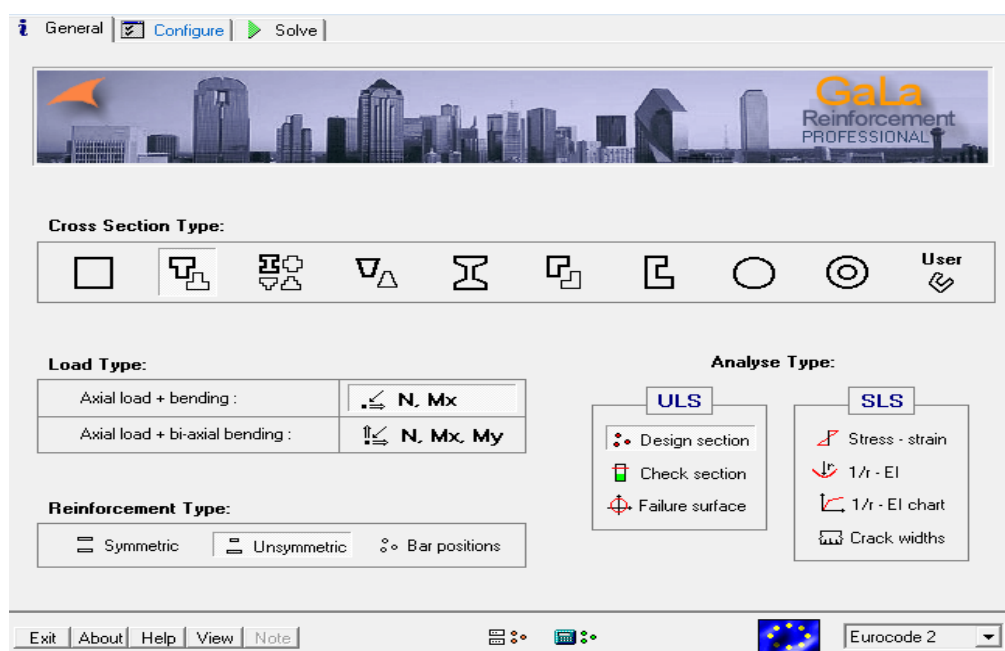
$$M_g = M_{Ed} = 2 \cdot 189,75 + 71,13 = 450,63 \text{ kNm}$$

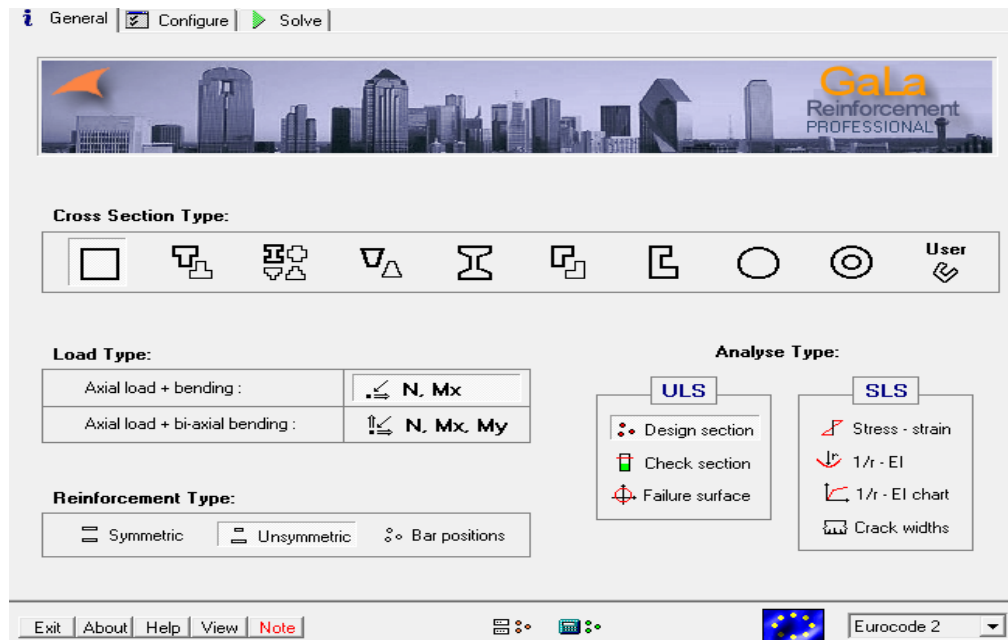
5.1. PREUZIMANJE POVEĆANIH MOMENATA SAVIJANJA

Dimenzioniranje FRP pojačanja za prihvaćanje povećanih momenata savijanja provedeno je u programu GaLa Reinforcement. Postupak dimenzioniranja u navedenom programu opisan je u nastavku.

1. Korak:

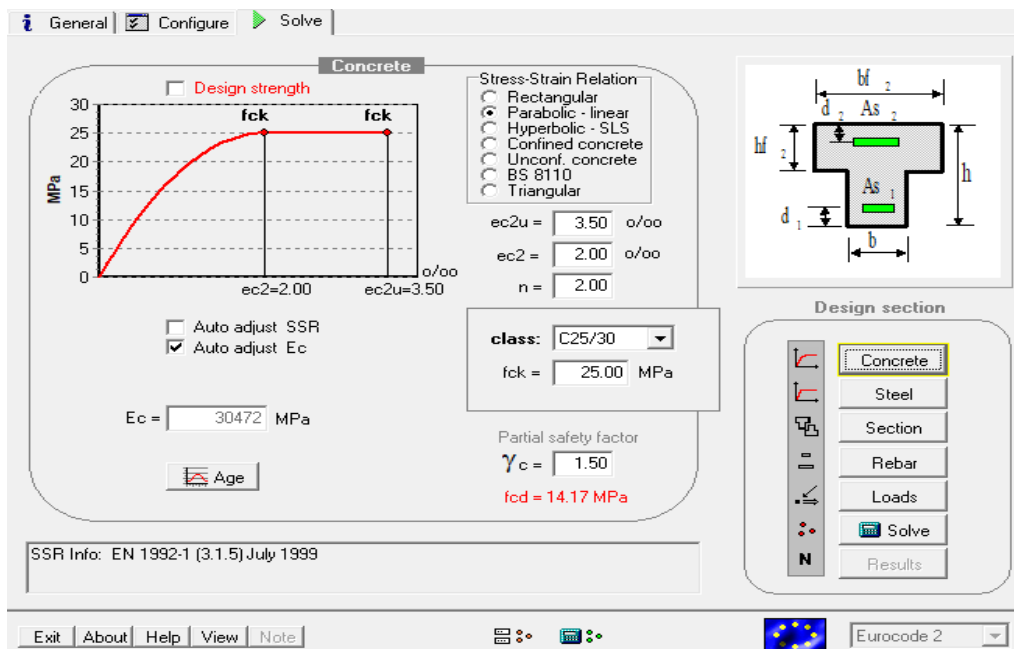
U kartici *General* odabran je poprečni presjek elementa. Za proračun pojačanja armiranobetonske grede odabran je T presjek, a za armiranobetonsku ploču pravokutni presjek. Proračun kreće s dimenzioiranjem poprečnog presjeka u kartici *ULS (Ultimate Limit State)*. U kartici *Load Type* odabrano je osno opterećenje sa savijanjem. U kartici *Reinforcement Type* odabrana je nesimetrična armatura. Nastavak proračuna provodi se u kartici *Solve*.





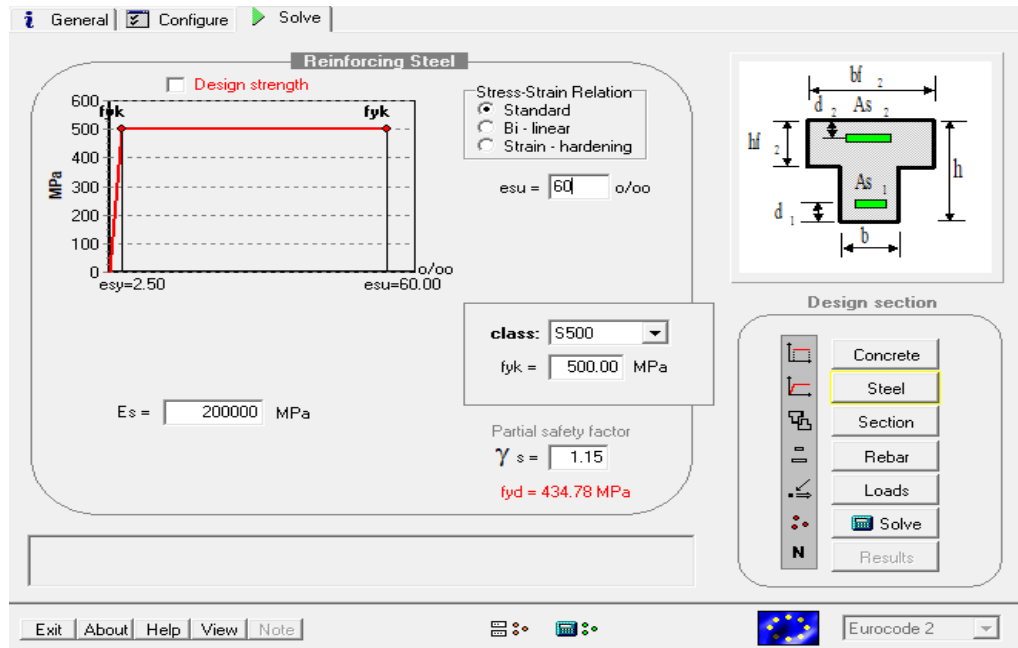
2. Korak

U kartici *Concrete* odabrane su karakteristike betona prikazane na isječku.



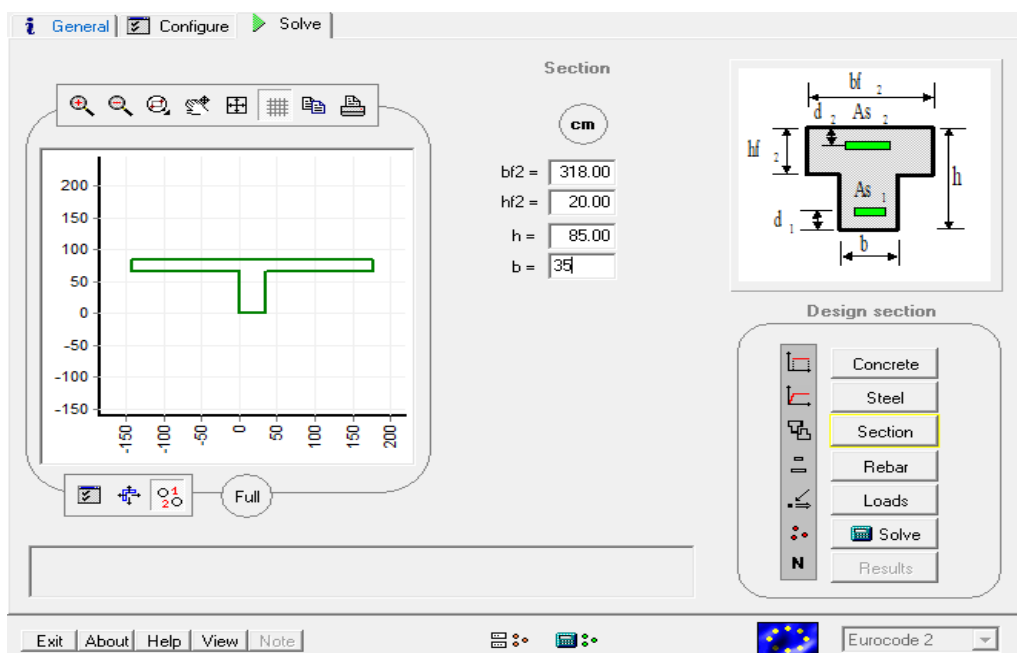
3. Korak

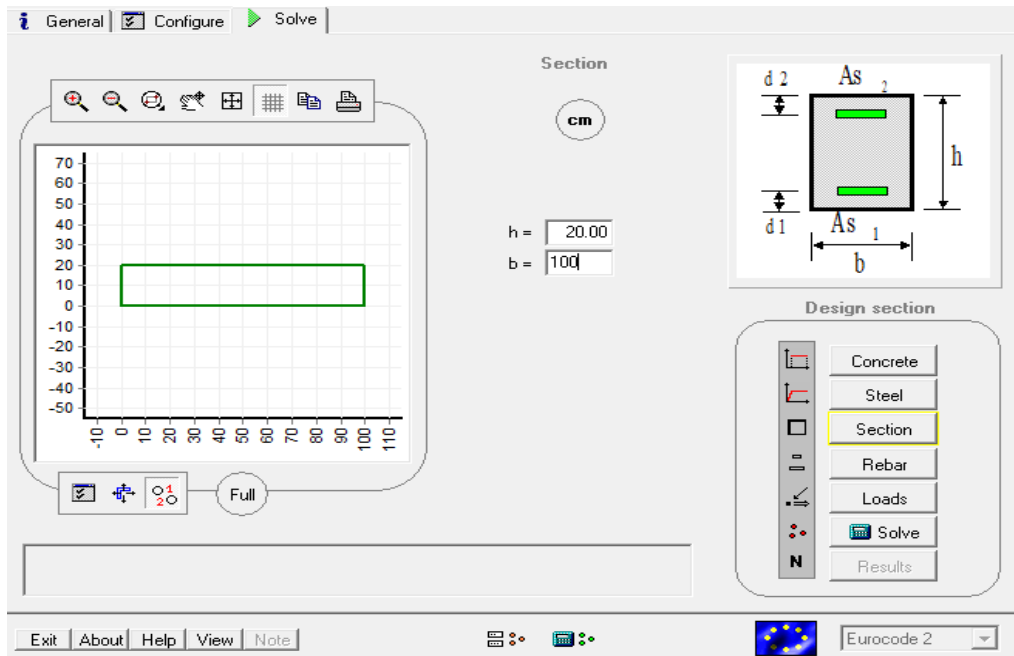
U kartici *Steel* odabrane su karakteristike čelika prikazane na isječku.



4. Korak

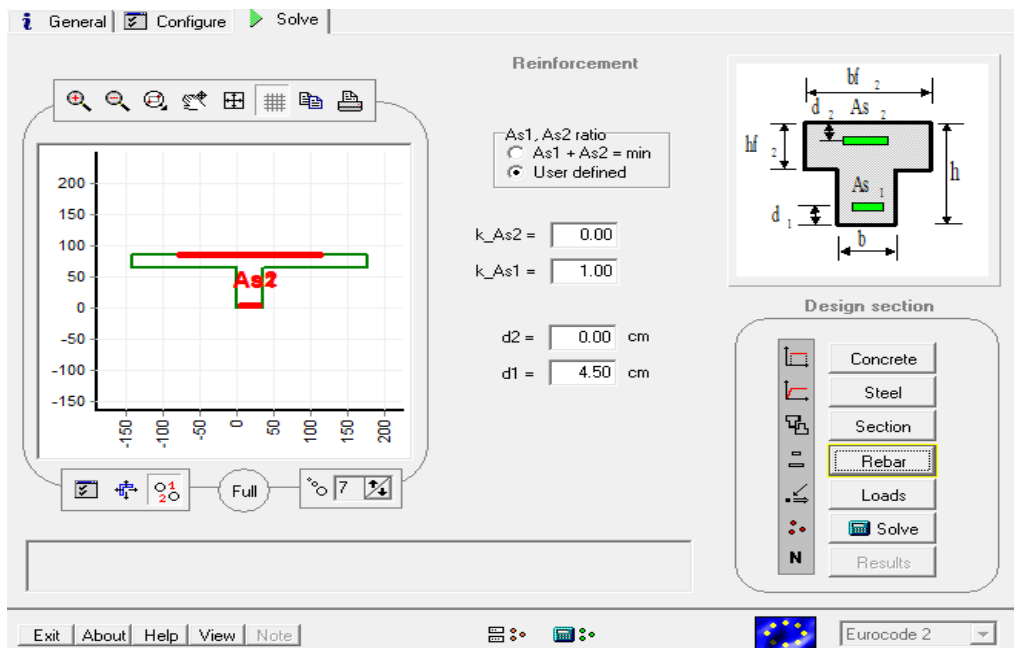
U kartici *Section* odabrane su karakteristike poprečnog presjeka grede i ploče.





5. Korak

U kartici *Rebar* zadana je udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona koja je prethodno izračunata.



6. Korak

U kartici *Loads* zadan je proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja.

The screenshot shows the 'Loads' configuration window. On the left, there is a 3D coordinate system with axes N , M_x , and u . In the center, a table lists load cases:

Load	N [kN]	M_x [kNm]
L1	0	-1103.35

Below the table, there is a checkbox for 'II order moments' set to 'No'. On the right, a cross-section diagram shows dimensions b_f , d_2 , As_2 , h , d_1 , and b . A 'Design section' menu on the right has 'Loads' selected. A warning message at the bottom reads: 'WARNING: N>0 is compression!'. The bottom status bar shows 'Eurocode 2'.

7. Korak

U kartici *Results* dobivena je ploština poprečnog presjeka vlačne armature te visina tlačnog područja prije ojačanja FRP-om.

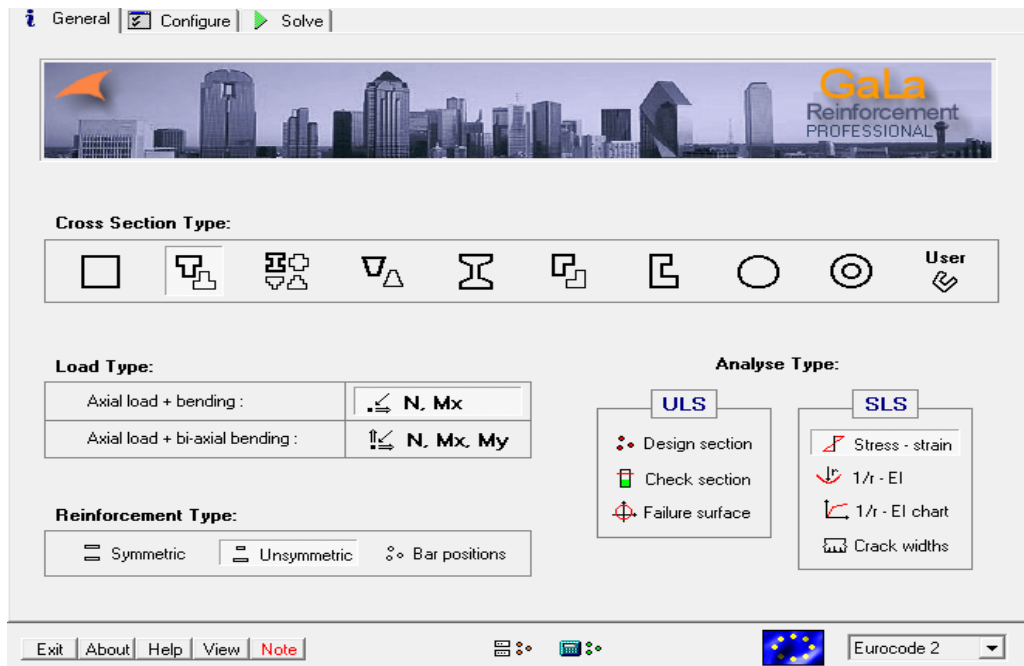
The screenshot shows the 'Results' window. On the left, a stress-strain diagram plots stress (MPa) on the y-axis (from -150 to 200) against strain (o/oo) on the x-axis (from -150 to 200). A red line shows the stress-strain curve, with a peak at 60.000 MPa and a strain of 3.100 o/oo. A table in the center lists reinforcement properties:

	Area	esi	Stress
As2	0.00	-3.100	-434.78
As1	32.17	60.000	434.78

On the right, 'Concrete' design parameters are shown: $\epsilon_{c,min} = -3.100$ o/oo, $x = 3.95$ cm, and 'Reinf. ratio: 0.37 %'. Below this, 'Required ratio' is given as min = 0.30 % and max = 8.00 %. The 'Design section' menu on the right has 'Results' selected. The bottom status bar shows 'Eurocode 2'.

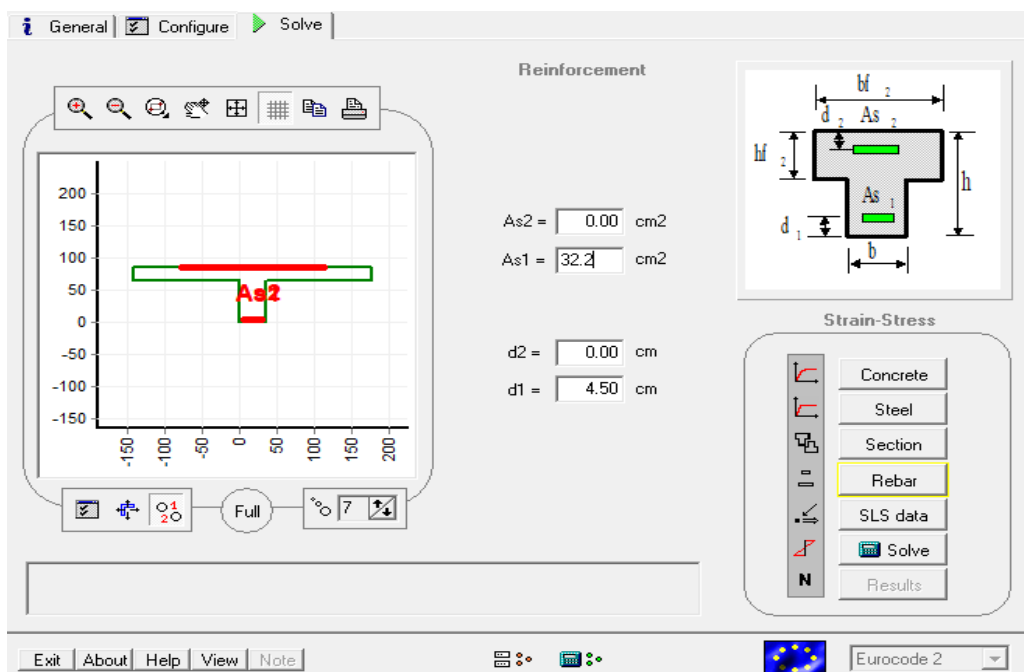
8. Korak

U sljedećem koraku potrebno je u kartici *General* odabrati opciju *Stress - strain* u kartici *SLS (Serviceability Limit State)*. Nastavak proračuna provodi se u kartici *Solve*.



9. Korak

U kartici *Rebar* potrebno je uvrstiti odabranu ploštinu čelilčne armature.



10. Korak

U kartici *SLS data* uvršten je proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja koji je prethodno izračunat.

The screenshot shows the 'SLS data' configuration window. On the left, a 3D coordinate system indicates the direction of forces: N (normal), Mx (bending moment), and My (bending moment). In the center, a table lists the load cases:

Load	N [kN]	Mx [kNm]
L1	0	-450.63

On the right, a cross-section diagram of a T-beam is shown with dimensions: b_f (flange width), d_f (flange thickness), h_f (flange height), d_1 (effective depth), b (web width), and h (total height). Reinforcement areas As_1 and As_2 are also indicated.

At the bottom left, a warning message reads: "WARNING: N>0 is compression!". The 'Strain-Stress' panel on the right contains buttons for 'Concrete', 'Steel', 'Section', 'Rebar', 'SLS data' (highlighted), 'Solve', and 'Results'. The bottom status bar shows 'Eurocode 2'.

11. Korak

U kartici *Results* proračunom su dobivene početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja te deformacija armaturnog čelika.

The screenshot shows the 'Results: Stress-Strain' window. On the left, a legend defines the symbols used in the results table:

- Sign: + is tension / - is compression
- ec - concrete strain
- sigma_c - concrete stress MPa
- es_s - steel strain <> for bar Nr.
- sigma_s - steel stress MPa

In the center, a table displays the results for load case L1:

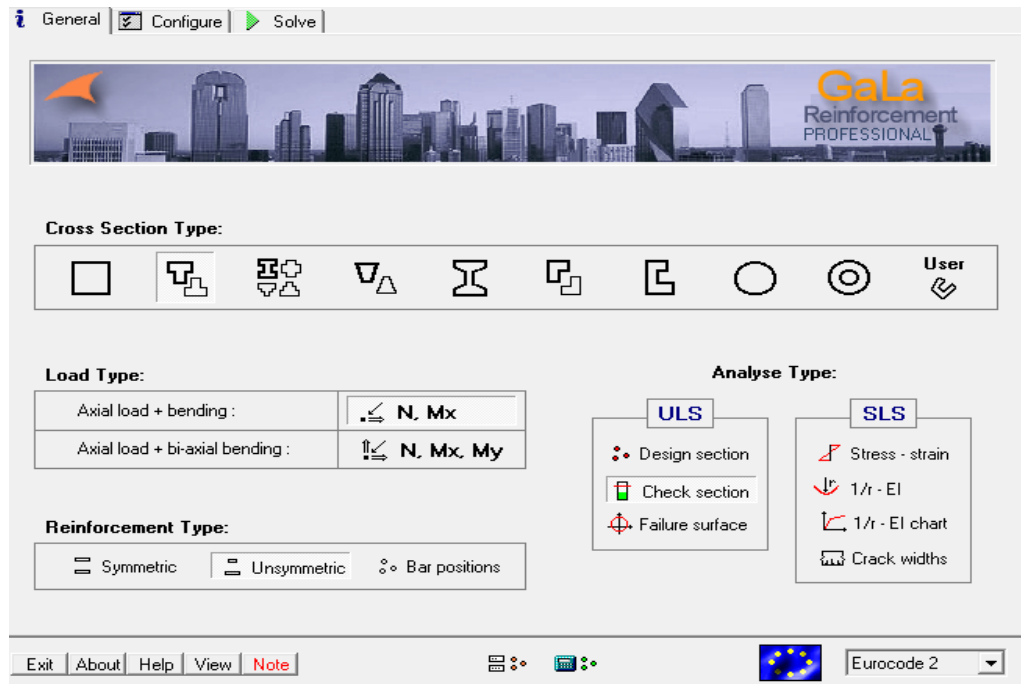
Load	ec [o/oo]	sigma_c-	es- [o/oo]	sigma_s-	es+ [o/oo]	sigma_s+
L1	-0.140	-3.39	-0.140<>2	-28.07	0.910<>1	182.01

On the right, a stress-strain diagram shows the concrete stress (sigma_c) and steel stress (sigma_s) versus strain. The concrete strain is labeled as -0.140 and the steel strain as 0.910. The diagram also shows the reinforcement layout with As_1 and As_2 .

The 'Strain-Stress' panel on the right contains buttons for 'Concrete', 'Steel', 'Section', 'Rebar', 'SLS data', 'Solve', and 'Results' (highlighted). The bottom status bar shows 'Eurocode 2'.

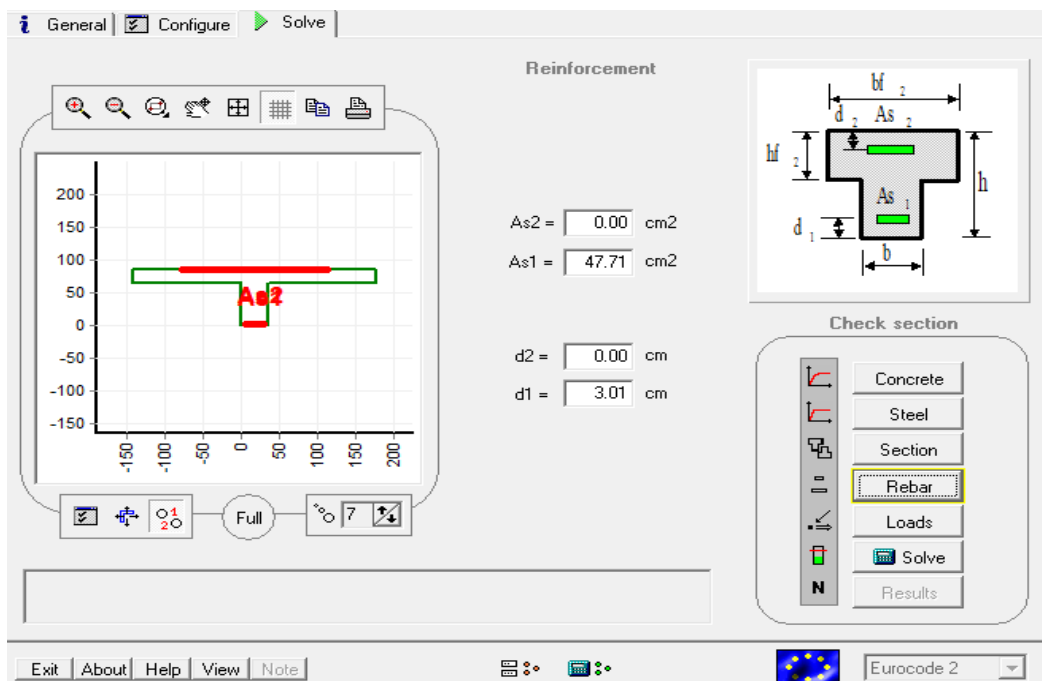
12. Korak

U sljedećem koraku kreće se u provjeru poprečnog presjeka u kartici *ULS* odabirom na *Check section*. Nastavak proračuna provodi se u kartici *Solve*.



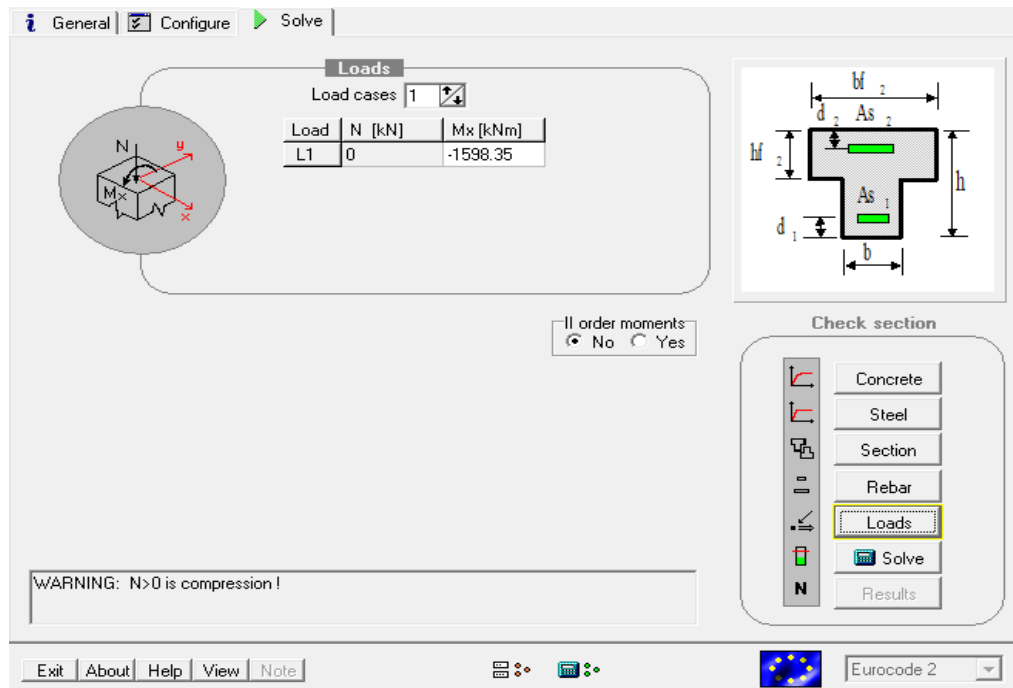
13. Korak

U kartici *Rebar* potrebno je uvrstiti ekvivalentnu pločtinu presjeka armature koja je prethodno izračunata.



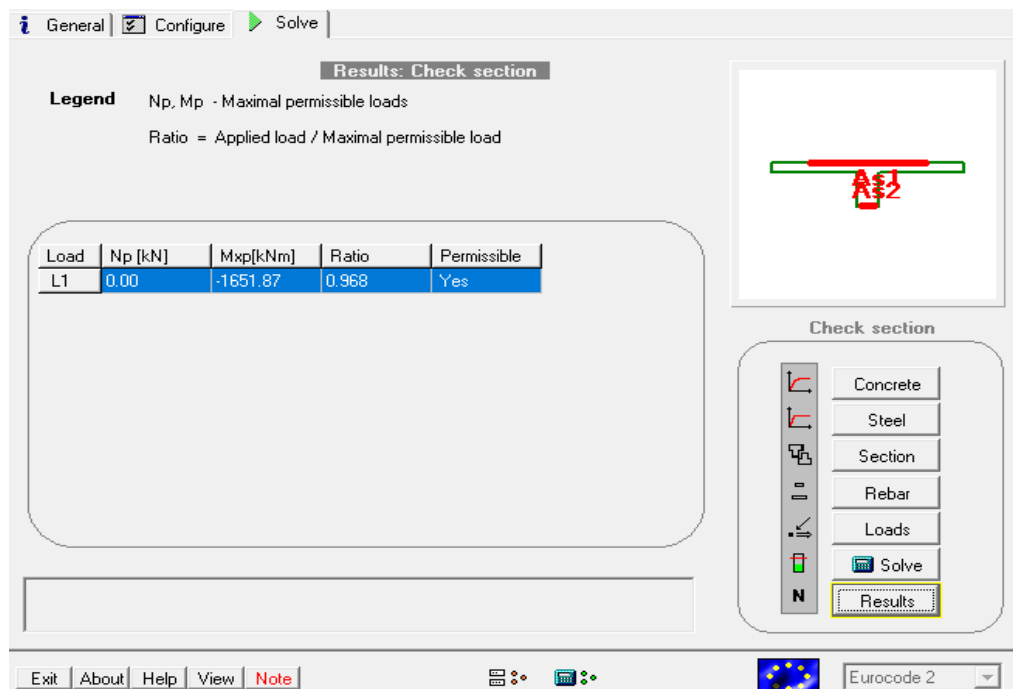
14. Korak

U kartici *Loads* uvrštava se proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja.



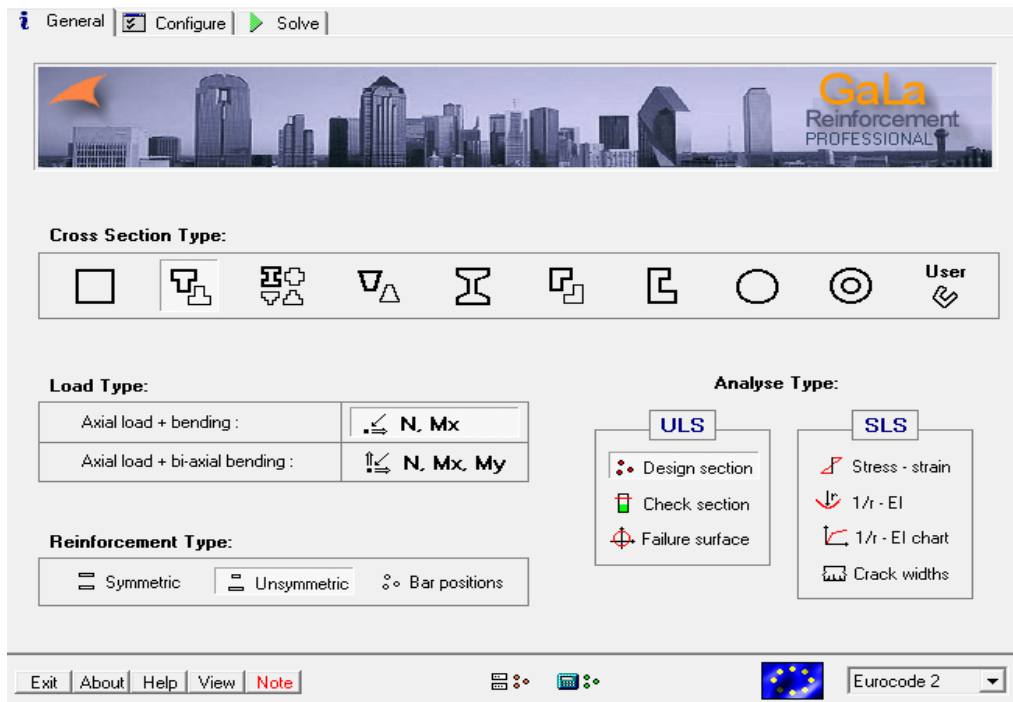
15. Korak

U kartici *Results* dobiven je proračunski moment nosivosti te omjer proračunskog momenta savijanja nakon pojačanja i proračunskog momenta nosivosti.



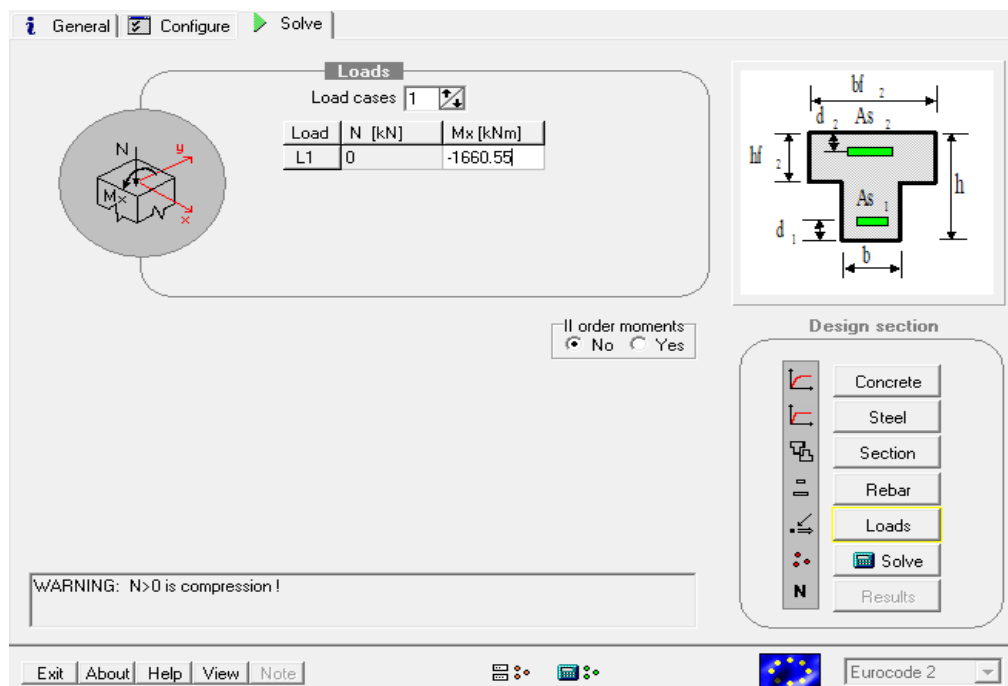
16. Korak

U sljedećem koraku potrebno je u kartici *ULS* odabrati opciju *Design section*.



17. Korak

U kartici *Loads* uvršten je proračunski moment nosivosti dobiven u 15. koraku. Nastavak proračuna provodi se u kartici *Solve*.



18. Korak

U sjedećem koraku u kartici Steel potrebno je uvrstiti odabranu graničnu deformaciju čelične armature.

Reinforcing Steel

Design strength

Stress-Strain Relation:
 Standard
 Bi-linear
 Strain-hardening

esu = 14.00 o/oo

class: S500
 fyk = 500.00 MPa

Partial safety factor $\gamma_s = 1.15$
 fyd = 434.78 MPa

Es = 200000 MPa

Design section

Concrete
 Steel
 Section
 Rebar
 Loads
 Solve
 Results

Exit About Help View Note

Eurocode 2

19. Korak

U posljednjem koraku u kartici Results dobiveni su podaci potrebni za provjeru deformacije FRP-a.

Results

cm2 o/oo MPa

	Area	esi	Stress
As2	0.00	-1.062	-212.46
As1	47.94	14.000	434.78

Concrete:
 ec,min = -1.062 o/oo
 x = 5.78 cm
 Reinf. ratio: **0.56 %**

Required ratio:
 min = 0.30 %
 max = 8.00 %

Design section

Concrete
 Steel
 Section
 Rebar
 Loads
 Solve
 Results

Exit About Help View Note

Eurocode 2

5.1.1. FIB 14 - GREDA

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 0,85$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,2$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 1103,35 \text{ kN}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 1598,35 \text{ kN}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 32,17 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 3,95 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 4,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 450,63 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 32,2 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,140 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,910 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{85}{80,5} (0,140 + 0,910) - 0,140 = 0,97\text{‰}$$

Ugljične lamele:

Vlačna čvrstoća FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{\frac{165000}{1,2}} = 0,0146 = 14,6 \text{ ‰}$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 1598,35 - 1103,35 = 495 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 80,5 - 0,410 \cdot 3,95 = 78,9 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{49500}{0,0146 \cdot 16500 \cdot 78,9} = 2,6 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

ODABIRE SE: 2x Sika Carbodur 1014 S → 2x 1,4 cm² = 2,8 cm²/m'

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 32,17 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $4\phi 20 + 4\phi 25$ ($32,2 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} = 32,2 \cdot 43,48 + 2,8 \cdot 0,0146 \cdot 16500 = 2074,58 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$
$$= \frac{-2,8 \cdot 16500 \cdot 0,0146 \cdot 0,07 + 32,2 \cdot 43,48 \cdot 4,5}{2074,58} = 3,01 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{2074,58}{43,48} = 47,71 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 1660,55 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 5,78 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 14 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 1,062 \cdot \frac{85 - 5,78}{5,78} - 0,97 = 13,6 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,6 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 14,6 \text{ ‰}$$

$$F_{t1} = 32,2 \cdot 43,48 + 2,8 \cdot 0,0136 \cdot 16500 = 2028,38 \text{ kN}$$

Proračunom je zaključeno da je razlika u ukupnoj vlačnoj sili samo 2,2% pa bi i razlika momenata bila približno tolika, a to se može zanemariti. Zbog ovog zaključka nije se provodila druga iteracija.

5.1.2. FIB 14 PLOČA 101, x-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 0,85$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,2$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 34,7 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 53,55 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 4,77 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 1,81 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 2,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 11,74 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 4,79 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,177 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,749 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{17,5} (0,177 + 0,749) - 0,177 = 0,88\%$$

Ugljične lamele:

Vlačna čvrstoća FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{\frac{165000}{1,2}} = 0,0146 = 14,6 \%$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 53,55 - 34,7 = 18,85 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 17,5 - 0,410 \cdot 1,81 = 16,76 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{1885}{0,0146 \cdot 16500 \cdot 16,76} = 0,47 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Razmak lamela je 1 m.

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 2.025 S → 1x 0,5 cm² = 0,5 cm²/m' na razmaku od 1 m

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 4,77 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 8/10,5$ ($4,79 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} = 4,79 \cdot 43,48 + 0,5 \cdot 0,0146 \cdot 16500 = 328,72 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba elementa.

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$
$$= \frac{-0,5 \cdot 16500 \cdot 0,0146 \cdot 0,125 + 4,79 \cdot 43,48 \cdot 2,5}{328,72} = 1,54 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{328,72}{43,48} = 7,56 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti.

$$M_{Rd} = 56,9 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 2,9 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 14 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 2,608 \cdot \frac{20 - 2,9}{2,9} - 0,88 = 14,5 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 14,5 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 14,6 \text{ ‰}$$

5.1.3. FIB 14 – PLOČA 101, y-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 0,85$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,2$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 9,57 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 15,2 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 1,35 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 0,59 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 3,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 2,92 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature

$$A_{s1,prov} = 1,41 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,081 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,652 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{16,5} (0,081 + 0,652) - 0,081 = 0,81\%$$

Ugljične lamele:

Vlačna čvrstoća FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{\frac{165000}{1,2}} = 0,0146 = 14,6 \%$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 15,2 - 9,57 = 5,63 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 16,5 - 0,410 \cdot 0,59 = 16,26 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{563}{0,0146 \cdot 16500 \cdot 16,26} = 0,14 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Razmak lamela je 1 m.

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 212 S → 1x 0,24 cm² = 0,24 cm²/m' na razmaku 1 m

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 1,35 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 6/20$ ($1,41 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} = 1,41 \cdot 43,48 + 0,24 \cdot 0,0146 \cdot 16500 = 119,12 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba elementa:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$
$$= \frac{-0,24 \cdot 16500 \cdot 0,0146 \cdot 0,06 + 1,41 \cdot 43,48 \cdot 3,5}{119,12} = 1,77 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{119,12}{43,48} = 2,74 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 21,21 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 1,05 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 13 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 0,795 \cdot \frac{20 - 1,05}{1,05} - 0,81 = 13,54 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,54 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 14,6 \text{ ‰}$$

$$F_{t1} = 1,41 \cdot 43,48 + 0,24 \cdot 0,01354 \cdot 16500 = 114,93 \text{ kN}$$

Proračunom je zaključeno da je razlika u ukupnoj vlačnoj sili samo 3,52% pa bi i razlika momenata bila približno tolika, a to se može zanemariti. Zbog ovog zaključka nije se provodila druga iteracija.

5.1.4. FIB 14 – PLOČA 102, x-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 0,85$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,2$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 26,47 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 42,64 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 3,6 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 1,36 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 2,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 7,63 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 3,72 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,127 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,622 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{17,5} (0,127 + 0,622) - 0,127 = 0,73\%$$

Ugljične lamele:

Vlačna čvrstoća FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{\frac{165000}{1,2}} = 0,0146 = 14,6 \%$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 42,64 - 26,47 = 16,17 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 17,5 - 0,410 \cdot 1,36 = 16,94 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{1617}{0,0146 \cdot 16500 \cdot 16,94} = 0,4 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Razmak lamela je 1 m.

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 2.025 S → 1x 0,5 cm² = 0,5 cm² /m' na razmaku 1 m

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 3,6 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 8/13,5$ ($3,72 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} = 3,72 \cdot 43,48 + 0,5 \cdot 0,0146 \cdot 16500 = 282,2 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$
$$= \frac{-0,5 \cdot 16500 \cdot 0,0146 \cdot 0,125 + 3,72 \cdot 43,48 \cdot 2,5}{282,2} = 1,38 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{282,2}{43,48} = 6,5 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 49,77 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 2,49 \text{ cm}$$

krajnja deformacije čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 14 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 2,160 \cdot \frac{20 - 2,49}{2,49} - 0,73 = 14,46 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 14,46 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 14,6 \text{ ‰}$$

5.1.5. FIB 14 – PLOČA 102, y-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 0,85$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,2$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 6,9 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 11,65 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 0,97 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 0,48 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 3,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 1,59 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 1,41 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,044 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,355 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{16,5} (0,044 + 0,355) - 0,044 = 0,44\%$$

Ugljične lamele:

Vlačna čvrstoća FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{\frac{165000}{1,2}} = 0,0146 = 14,6 \%$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 11,65 - 6,9 = 4,75 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 16,5 - 0,410 \cdot 0,48 = 16,3 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{475}{0,0146 \cdot 16500 \cdot 16,3} = 0,12 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Razmak lamela je 1 m.

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 212 S → 1x 0,24 cm² = 0,24 cm²/m' na razmaku 1 m

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 0,97 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 6/20$ ($1,41 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} = 1,41 \cdot 43,48 + 0,24 \cdot 0,0146 \cdot 16500 = 119,12 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$
$$= \frac{-0,24 \cdot 16500 \cdot 0,0146 \cdot 0,06 + 1,41 \cdot 43,48 \cdot 3,5}{119,12} = 1,77 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{119,12}{43,48} = 2,74 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 21,21 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 1,05 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 13 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 0,795 \cdot \frac{20 - 1,05}{1,05} - 0,44 = 13,91 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,91 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 14,6 \text{ ‰}$$

$$F_{t1} = 1,41 \cdot 43,48 + 0,24 \cdot 0,0139 \cdot 16500 = 116,35 \text{ kN}$$

Proračunom je zaključeno da je razlika u ukupnoj vlačnoj sili samo 2,3% pa bi i razlika momenata bila približno tolika, a to se može zanemariti. Zbog ovog zaključka nije se provodila druga iteracija.

5.1.6. TR 55 – GREDA

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 1,0$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,25$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 1103,35 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 1598,35 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 32,05 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 3,29 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 4,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 450,63 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 32,2 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija beton na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,128 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,908 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{85}{80,5} (0,128 + 0,908) - 0,128 = 0,97\text{‰}$$

Ugljične lamele:

Vlačna čvrstoća FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{1,25} = 0,014 = 14 \text{ ‰}$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 1598,35 - 1103,35 = 495 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 80,5 - 0,410 \cdot 3,29 = 79,2 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{49500}{0,014 \cdot 16500 \cdot 79,2} = 2,71 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

ODABIRE SE: 2x Sika Carbodur 1014 S → 2x 1,4 cm² = 2,8 cm²/m'

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 32,05 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $4\phi 20 + 4\phi 25$ ($32,2 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud} = 32,2 \cdot 43,48 + 2,8 \cdot 0,014 \cdot 16500 = 2046,86 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$
$$= \frac{-2,8 \cdot 16500 \cdot 0,014 \cdot 0,07 + 32,2 \cdot 43,48 \cdot 4,5}{2046,86} = 3,06 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{2046,86}{43,48} = 47,08 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 1637,82 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 4,83 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 14 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 0,877 \cdot \frac{85 - 4,83}{4,83} - 0,97 = 13,6 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,6 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 14 \text{ ‰}$$

$$F_{t1} = 32,2 \cdot 43,48 + 2,8 \cdot 0,0136 \cdot 16500 = 2028,38 \text{ kN}$$

Proračunom je zaključeno da je razlika u ukupnoj vlačnoj sili samo 0,9% pa bi i razlika momenata bila približno tolika, a to se može zanemariti. Zbog ovog zaključka nije se provodila druga iteracija.

5.1.7. TR 55 – PLOČA 101, x-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 1,0$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,25$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 34,7 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 53,55 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 4,73 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 1,52 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 2,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 11,74 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 4,79 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,161 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,745 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{17,5} (0,161 + 0,745) - 0,161 = 0,87\text{‰}$$

Ugljične lamele:

Vlačna čvrstoća FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{1,25} = 0,014 = 14 \text{ ‰}$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 53,55 - 34,7 = 18,85 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 17,5 - 0,410 \cdot 1,52 = 16,88 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{1885}{0,014 \cdot 16500 \cdot 16,88} = 0,48 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Razmak lamela je 1 m.

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 2.025 S → 1x 0,5 cm² = 0,5 cm² /m' na razmaku 1 m

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 4,73 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 8/10,5$ ($4,79 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} = 4,79 \cdot 43,48 + 0,5 \cdot 0,014 \cdot 16500 = 323,77 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$
$$= \frac{-0,5 \cdot 16500 \cdot 0,014 \cdot 0,125 + 4,79 \cdot 43,48 \cdot 2,5}{323,77} = 1,56 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{323,77}{43,48} = 7,45 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 56,45 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 2,43 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 13 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 1,973 \cdot \frac{20 - 2,43}{2,43} - 0,87 = 13,4 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,4 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 14 \text{ ‰}$$

$$F_{t1} = 4,79 \cdot 43,48 + 0,5 \cdot 0,0134 \cdot 16500 = 318,82 \text{ kN}$$

Proračunom je zaključeno da je razlika u ukupnoj vlačnoj sili samo 1,5% pa bi i razlika momenata bila približno tolika, a to se može zanemariti. Zbog ovog zaključka nije se provodila druga iteracija.

5.1.8. TR 55 – PLOČA 101, y-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 1,0$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,25$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 9,57 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 15,2 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 1,35 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 0,53 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 3,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 2,92 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 1,41 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,074 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,650 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{16,5} (0,074 + 0,650) - 0,074 = 0,8\text{‰}$$

Ugljične lamele:

Vlačna čvrstoća FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{1,25} = 0,014 = 14 \text{ ‰}$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 15,2 - 9,57 = 5,63 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 16,5 - 0,410 \cdot 0,53 = 16,3 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{563}{0,014 \cdot 16500 \cdot 16,3} = 0,15 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Razmak lamela je 1 m.

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 212 S → 1x 0,24 cm² = 0,24 cm² /m' na razmaku 1 m

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 1,35 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 6/20$ ($1,41 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} = 1,41 \cdot 43,48 + 0,24 \cdot 0,014 \cdot 16500 = 116,75 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$
$$= \frac{-0,24 \cdot 16500 \cdot 0,014 \cdot 0,06 + 1,41 \cdot 43,48 \cdot 3,5}{116,75} = 1,81 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{116,75}{43,48} = 2,69 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 20,86 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 0,88 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 13 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 0,658 \cdot \frac{20 - 0,88}{0,88} - 0,8 = 13,5 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,5 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 14 \text{ ‰}$$

$$F_{t1} = 1,41 \cdot 43,48 + 0,24 \cdot 0,0135 \cdot 16500 = 114,77 \text{ kN}$$

Proračunom je zaključeno da je razlika u ukupnoj vlačnoj sili samo 1,7% pa bi i razlika momenata bila približno tolika, a to se može zanemariti. Zbog ovog zaključka nije se provodila druga iteracija.

5.1.9. TR 55 – PLOČA 102, x-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 1,0$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,25$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 26,47 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 42,64 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 3,58 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 1,15 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 2,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 7,63 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 3,59 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,118 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,641 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{17,5} (0,118 + 0,641) - 0,118 = 0,75\%$$

Ugljične lamele:

Vlačna čvrstoća FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{1,25} = 0,014 = 14 \%$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 42,64 - 26,47 = 16,17 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 17,5 - 0,410 \cdot 1,15 = 17,03 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{1617}{0,014 \cdot 16500 \cdot 17,03} = 0,41 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Razmak lamela je 1 m.

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 2.025 S → 1x 0,5 cm² = 0,5 cm² /m' na razmaku 1 m

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 3,58 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 8/14$ ($3,59 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} = 3,59 \cdot 43,48 + 0,5 \cdot 0,014 \cdot 16500 = 271,6 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$
$$= \frac{-0,5 \cdot 16500 \cdot 0,014 \cdot 0,125 + 3,59 \cdot 43,48 \cdot 2,5}{271,6} = 1,38 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{271,6}{43,48} = 6,25 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 48,43 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 2,04 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 13 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 1,598 \cdot \frac{20 - 2,04}{2,04} - 0,75 = 13,32 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,32 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 14 \text{ ‰}$$

$$F_{t1} = 3,59 \cdot 43,48 + 0,5 \cdot 0,0133 \cdot 16500 = 265,82 \text{ kN}$$

Proračunom je zaključeno da je razlika u ukupnoj vlačnoj sili samo 2,1% pa bi i razlika momenata bila približno tolika, a to se može zanemariti. Zbog ovog zaključka nije se provodila druga iteracija.

5.1.10. TR 55 – PLOČA 102, y-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 1,0$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,25$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 6,9 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 11,65 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 0,97 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 0,43 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 3,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 1,59 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 1,41 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,04 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,354 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{16,5} (0,04 + 0,354) - 0,04 = 0,44\%$$

Ugljične lamele:

Vlačna deformacija FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{1,25} = 0,014 = 14 \text{ ‰}$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 11,65 - 6,9 = 4,75 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 16,5 - 0,410 \cdot 0,43 = 16,32 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{475}{0,014 \cdot 16500 \cdot 16,32} = 0,13 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Razmak lamela je 1 m.

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 212 S → 1x 0,24 cm² = 0,24 cm² /m' na razmaku 1 m

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 0,97 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 6/20$ ($1,41 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} = 1,41 \cdot 43,48 + 0,24 \cdot 0,014 \cdot 16500 = 116,75 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$\begin{aligned} d_{1,eff} &= \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}} \\ &= \frac{-0,24 \cdot 16500 \cdot 0,014 \cdot 0,06 + 1,41 \cdot 43,48 \cdot 3,5}{116,75} = 1,81 \text{ cm} \end{aligned}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{116,75}{43,48} = 2,69 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 20,86 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 0,88 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 13 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 0,658 \cdot \frac{20 - 0,88}{0,88} - 0,44 = 13,86 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,86 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 14 \text{ ‰}$$

5.1.11. FIB 90 – GREDA

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 1,0$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,25$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 1103,35 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 1598,35 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 32,05 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 3,29 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 4,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 450,63 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 32,2 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,128 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,908 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{85}{80,5} (0,128 + 0,908) - 0,128 = 0,97\%$$

Ugljične lamele:

Vlačna deformacija FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{1,25} = 0,014 = 14 \%$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 1598,35 - 1103,35 = 495 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 80,5 - 0,410 \cdot 3,29 = 79,15 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{49500}{0,014 \cdot 16500 \cdot 79,15} = 2,71 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

ODABIRE SE: 2x Sika Carbodur 1014 S → 2x 1,4 cm² = 2,8 cm²/m'

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 32,05 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $4\phi 20 + 4\phi 25$ ($32,2 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud} = 32,2 \cdot 43,48 + 2,8 \cdot 0,014 \cdot 16500 = 2046,86 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$
$$= \frac{-2,8 \cdot 16500 \cdot 0,014 \cdot 0,07 + 32,2 \cdot 43,48 \cdot 4,5}{2046,86} = 3,06 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{2046,86}{43,48} = 47,07 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 1637,81 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 4,83 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 14 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 0,877 \cdot \frac{85 - 4,83}{4,83} - 0,97 = 13,6 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,6 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 14 \text{ ‰}$$

$$F_{t1} = 32,2 \cdot 43,48 + 2,8 \cdot 0,0136 \cdot 16500 = 2028,38 \text{ kN}$$

Proračunom je zaključeno da je razlika u ukupnoj vlačnoj sili samo 0,9% pa bi i razlika momenata bila približno tolika, a to se može zanemariti. Zbog ovog zaključka nije se provodila druga iteracija.

5.1.12. FIB 90 – PLOČA 101, x-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 1,0$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,25$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 34,7 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 53,55 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 4,73 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 1,52 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 2,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 11,74 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 4,79 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,161 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,745 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{17,5} (0,161 + 0,745) - 0,161 = 0,86\%$$

Ugljične lamele:

Vlačna deformacija FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{1,25} = 0,014 = 14 \%$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 53,55 - 34,7 = 18,85 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 17,5 - 0,410 \cdot 1,52 = 16,88 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{1885}{0,014 \cdot 16500 \cdot 16,88} = 0,48 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Razmak lamela je $4 \cdot h = 4 \cdot 20 = 80 \text{ cm}$

$$A_f \cdot 0,8 = 0,48 \cdot 0,8 = 0,38 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 1.525 S \rightarrow 1x 0,375 cm² = 0,375 cm² /m', razmak 80 cm

$$A_{f,odabrano} = 0,375/0,8 = 0,47 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 4,73 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 8/10,5$ ($4,79 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud} = 4,79 \cdot 43,48 + 0,47 \cdot 0,014 \cdot 16500 = 316,84 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$

$$= \frac{-0,47 \cdot 16500 \cdot 0,014 \cdot 0,125 + 4,79 \cdot 43,48 \cdot 2,5}{316,84} = 1,6 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{316,84}{43,48} = 7,29 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 55,22 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 2,71 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 13 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h-x}{x} - \varepsilon_o = 2,248 \cdot \frac{20-2,71}{2,71} - 0,86 = 13,48 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,48 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 14 \text{ ‰}$$

$$F_{t1} = 4,79 \cdot 43,48 + 0,47 \cdot 0,01348 \cdot 16500 = 312,81 \text{ kN}$$

Proračunom je zaključeno da je razlika u ukupnoj vlačnoj sili samo 1,27% pa bi i razlika momenata bila približno tolika, a to se može zanemariti. Zbog ovog zaključka nije se provodila druga iteracija.

5.1.13. FIB 90 – PLOČA 101, y-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 1,0$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,25$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 9,57 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 15,2 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 1,35 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 0,53 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 3,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 2,92 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 1,41 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,074 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,650 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{16,5} (0,074 + 0,650) - 0,074 = 0,8\%$$

Ugljične lamele:

Vlačna deformacija FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{1,25} = 0,014 = 14 \%$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 15,2 - 9,57 = 5,63 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 16,5 - 0,410 \cdot 0,53 = 16,3 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{563}{0,014 \cdot 16500 \cdot 16,3} = 0,15 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Razmak lamela je $4 \cdot h = 4 \cdot 20 = 80 \text{ cm}$

$$A_f \cdot 0,8 = 0,15 \cdot 0,8 = 0,12 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 212 S → 1x 0,24 cm² = 0,24 cm² /m', razmak 80 cm

$$A_{f,odabrano} = 0,24/0,8 = 0,3 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 1,35 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 6/20$ ($1,41 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud} = 1,41 \cdot 43,48 + 0,3 \cdot 0,014 \cdot 16500 = 130,61 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$

$$= \frac{-0,3 \cdot 16500 \cdot 0,014 \cdot 0,06 + 1,41 \cdot 43,48 \cdot 3,5}{130,61} = 1,61 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{130,61}{43,48} = 3,0 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 23,45 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 0,88 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 13 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h-x}{x} - \varepsilon_o = 1,242 \cdot \frac{20-1,6}{1,6} - 0,8 = 13,5 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,5 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 14 \text{ ‰}$$

$$F_{t1} = 1,41 \cdot 43,48 + 0,3 \cdot 0,0135 \cdot 16500 = 128,13 \text{ kN}$$

Proračunom je zaključeno da je razlika u ukupnoj vlačnoj sili samo 1,9% pa bi i razlika momenata bila približno tolika, a to se može zanemariti. Zbog ovog zaključka nije se provodila druga iteracija.

5.1.14. FIB 90 – PLOČA 102, x-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 1,0$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,25$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 26,47 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 42,64 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 3,58 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 1,15 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 2,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 7,63 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 3,59 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,118 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,641 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{17,5} (0,118 + 0,641) - 0,118 = 0,75\%$$

Ugljične lamele:

Vlačna deformacija FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{1,25} = 0,014 = 14 \%$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 42,64 - 26,47 = 16,17 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 17,5 - 0,410 \cdot 1,15 = 17,03 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{1617}{0,014 \cdot 16500 \cdot 17,03} = 0,41 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Razmak lamela je $4 \cdot h = 4 \cdot 20 = 80 \text{ cm}$

$$A_f \cdot 0,8 = 0,41 \cdot 0,8 = 0,33 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 1.525 S \rightarrow 1x 0,375 cm² = 0,375 cm²/m', razmak 80 cm

$$A_{f,odabrano} = 0,375/0,8 = 0,47 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 3,58 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 8/14$ ($3,59 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud} = 3,59 \cdot 43,48 + 0,47 \cdot 0,014 \cdot 16500 = 264,66 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$

$$= \frac{-0,47 \cdot 16500 \cdot 0,014 \cdot 0,125 + 3,59 \cdot 43,48 \cdot 2,5}{264,66} = 1,42 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{264,66}{43,48} = 6,09 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 47,02 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 2,42 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 13 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h-x}{x} - \varepsilon_o = 1,951 \cdot \frac{20-2,42}{2,42} - 0,75 = 13,42 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,42 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 14 \text{ ‰}$$

$$F_{t1} = 3,59 \cdot 43,48 + 0,47 \cdot 0,01342 \cdot 16500 = 260,17 \text{ kN}$$

Proračunom je zaključeno da je razlika u ukupnoj vlačnoj sili samo 1,7% pa bi i razlika momenata bila približno tolika, a to se može zanemariti. Zbog ovog zaključka nije se provodila druga iteracija.

5.1.15. FIB 90 – PLOČA 102, y-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 1,0$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,25$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 6,9 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 11,65 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 0,97 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 0,43 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 3,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 1,59 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 1,41 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,04 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,354 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{16,5} (0,04 + 0,354) - 0,04 = 0,44\%$$

Ugljične lamele:

Vlačna deformacija FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{1,25} = 0,014 = 14 \text{ ‰}$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 11,65 - 6,9 = 4,75 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 16,5 - 0,410 \cdot 0,43 = 16,32 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{475}{0,014 \cdot 16500 \cdot 16,32} = 0,13 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Razmak lamela je $4 \cdot h = 4 \cdot 20 = 80 \text{ cm}$

$$A_f \cdot 0,8 = 0,13 \cdot 0,8 = 0,1 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 212 S \rightarrow 1x 0,24 cm² = 0,324 cm² /m' , razmak 80 cm

$$A_{f,odabrano} = 0,24/0,8 = 0,3 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 0,97 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 6/20$ ($1,41 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud} = 1,41 \cdot 43,48 + 0,3 \cdot 0,014 \cdot 16500 = 130,61 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$\begin{aligned} d_{1,eff} &= \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}} \\ &= \frac{-0,3 \cdot 16500 \cdot 0,014 \cdot 0,06 + 1,41 \cdot 43,48 \cdot 3,5}{130,61} = 1,61 \text{ cm} \end{aligned}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{130,61}{43,48} = 3,0 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 23,45 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 1,6 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 13 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 1,242 \cdot \frac{20 - 1,6}{1,6} - 0,44 = 13,84 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,84 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 14 \text{ ‰}$$

5.1.16. FprEN – GREDA

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 1,0$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,3$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 1103,35 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 1598,35 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 32,05 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 3,29 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 4,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 450,63 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 32,2 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,128 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,908 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{85}{80,5} (0,128 + 0,908) - 0,128 = 0,97\text{‰}$$

Ugljične lamele:

Vlačna deformacija FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{1,3} = 0,0135 = 13,5 \text{ ‰}$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 1598,35 - 1103,35 = 495 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 80,5 - 0,410 \cdot 3,29 = 79,15 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{49500}{0,0135 \cdot 16500 \cdot 79,15} = 2,81 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

ODABIRE SE: 3x Sika Carbodur 812 S → 3x 0,96 cm² = 2,88 cm²/m'

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 32,05 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $4\phi 20 + 4\phi 25$ (cm²)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud} = 32,2 \cdot 43,48 + 2,88 \cdot 0,0135 \cdot 16500 = 2041,58 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$
$$= \frac{-2,88 \cdot 16500 \cdot 0,0135 \cdot 0,06 + 32,2 \cdot 43,48 \cdot 4,5}{2041,58} = 3,07 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{2041,58}{43,48} = 46,95 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 1633,27 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 4,82 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 13 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 0,812 \cdot \frac{85 - 4,82}{4,82} - 0,97 = 12,54 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 12,54 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 13,5 \text{ ‰}$$

$$F_{t1} = 32,2 \cdot 43,48 + 2,88 \cdot 0,01254 \cdot 16500 = 1995,96 \text{ kN}$$

Proračunom je zaključeno da je razlika u ukupnoj vlačnoj sili samo 2,23% pa bi i razlika momenata bila približno tolika, a to se može zanemariti. Zbog ovog zaključka nije se provodila druga iteracija.

5.1.17. FprEN – PLOČA 101, x-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 1,0$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,3$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 34,7 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 53,55 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 4,73 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 1,52 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 2,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 11,74 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 4,79 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,161 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,745 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{17,5} (0,161 + 0,745) - 0,161 = 0,87\text{‰}$$

Ugljične lamele:

Vlačna deformacija FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{\frac{165000}{1,3}} = 0,0135 = 13,5 \text{ ‰}$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 53,55 - 34,7 = 18,85 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 17,5 - 0,410 \cdot 1,52 = 16,88 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{1885}{0,0135 \cdot 16500 \cdot 16,88} = 0,5 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Razmak lamela je 40 cm

$$A_f \cdot 0,4 = 0,5 \cdot 0,4 = 0,2 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 212 S → 1x 0,24 cm² = 0,24 cm² /m' na razmaku 40 cm

$$A_{f,odabrano} = 0,24/0,4 = 0,6 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 4,73 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 8/10,5$ ($4,79 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud} = 4,79 \cdot 43,48 + 0,6 \cdot 0,0135 \cdot 16500 = 341,92 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$
$$= \frac{-0,6 \cdot 16500 \cdot 0,0135 \cdot 0,06 + 4,79 \cdot 43,48 \cdot 2,5}{341,92} = 1,5 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{341,92}{43,48} = 7,86 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 59,68 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 2,86 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 13 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 2,378 \cdot \frac{20 - 2,86}{2,86} - 0,87 = 13,4 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,4 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 13,5 \text{ ‰}$$

5.1.18. FprEN – PLOČA 101, y-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 1,0$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,3$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 9,57 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 15,2 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 1,35 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 0,53 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 3,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 2,92 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 1,41 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,074 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,650 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{16,5} (0,074 + 0,650) - 0,074 = 0,8 \text{ ‰}$$

Ugljične lamele:

Vlačna deformacija FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{1,3} = 0,0135 = 13,5 \text{ ‰}$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 15,2 - 9,57 = 5,63 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 16,5 - 0,410 \cdot 0,53 = 16,28 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{563}{0,0135 \cdot 16500 \cdot 16,28} = 0,16 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Razmak lamela je 40 cm

$$A_f \cdot 0,4 = 0,16 \cdot 0,4 = 0,064 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 212 S → 1x 0,24 cm² = 0,24 cm² /m' na razmaku 40 cm

$$A_{f,odabrano} = 0,24/0,4 = 0,6 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 1,35 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 6/20$ ($1,41 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud} = 1,41 \cdot 43,48 + 0,6 \cdot 0,0135 \cdot 16500 = 194,96 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$

$$= \frac{-0,6 \cdot 16500 \cdot 0,0135 \cdot 0,06 + 1,41 \cdot 43,48 \cdot 3,5}{194,96} = 1,06 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{194,96}{43,48} = 4,48 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 35,75 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 2,04 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 13 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 1,566 \cdot \frac{20 - 2,04}{2,04} - 0,8 = 13 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 13,5 \text{ ‰}$$

$$F_{t1} = 1,41 \cdot 43,48 + 0,6 \cdot 0,013 \cdot 16500 = 190 \text{ kN}$$

Proračunom je zaključeno da je razlika u ukupnoj vlačnoj sili samo 2,54% pa bi i razlika momenata bila približno tolika, a to se može zanemariti. Zbog ovog zaključka nije se provodila druga iteracija.

5.1.19. FprEN – PLOČA 102, x-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 1,0$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,3$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 26,47 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 42,64 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 3,58 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 1,15 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 2,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 7,63 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 3,59 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,118 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,641 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{17,5} (0,118 + 0,641) - 0,118 = 0,75\%$$

Ugljične lamele:

Vlačna deformacija FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{1,3} = 0,0135 = 13,5 \%$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 42,64 - 26,47 = 16,17 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 17,5 - 0,410 \cdot 1,15 = 17,03 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{1617}{0,0135 \cdot 16500 \cdot 17,03} = 0,43 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Razmak lamela je 40 cm

$$A_f \cdot 0,4 = 0,43 \cdot 0,4 = 0,17 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 212 S → 1x 0,24 cm² = 0,24 cm² /m' na razmaku 40 cm

$$A_{f,odabrano} = 0,24/0,4 = 0,6 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 3,58 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 8/14$ ($3,59 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud} = 3,59 \cdot 43,48 + 0,6 \cdot 0,0135 \cdot 16500 = 289,74 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_{1,eff} = \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}}$$

$$= \frac{-0,6 \cdot 16500 \cdot 0,0135 \cdot 0,06 + 3,59 \cdot 43,48 \cdot 2,5}{289,74} = 1,32 \text{ cm}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{289,74}{43,48} = 6,66 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 51,52 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja:

$$x = 2,57 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 13 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 2,075 \cdot \frac{20 - 2,57}{2,57} - 0,75 = 13,32 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,32 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 13,5 \text{ ‰}$$

5.1.20. FprEN – PLOČA 102, y-smjer

Redukcijski faktor:

$$\alpha_{CC} = 1,0$$

Faktor sigurnosti FRP materijala:

$$\gamma_F = 1,3$$

Proračunski moment savijanja prije povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 6,9 \text{ kNm}$$

Proračunski moment savijanja nakon povećanja opterećenja:

$$M_{Ed} = 11,65 \text{ kNm}$$

Ploština presjeka vlačne armature :

$$A_{s1} = 0,97 \text{ cm}^2$$

Visina tlačnog područja prije pojačanja FRP-om:

$$x = 0,43 \text{ cm}$$

Udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$d_1 = 3,5 \text{ cm}$$

Proračunski moment savijanja bez uporabnog opterećenja:

$$M_{Ed} = 1,59 \text{ kNm}$$

Odabrana ploština presjeka vlačne armature:

$$A_{s1,prov} = 1,41 \text{ cm}^2$$

Početna deformacija betona na tlačnom rubu elementa prije pojačanja:

$$\varepsilon_{co} = -0,04 \text{ ‰}$$

Deformacija čelika za armiranje:

$$\varepsilon_s = 0,354 \text{ ‰}$$

Početna deformacija betona na vlačnom rubu:

$$\frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s}{d} = \frac{|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_o}{h}$$

$$\varepsilon_o = \frac{h}{d} (|\varepsilon_{co}| + \varepsilon_s) - |\varepsilon_{co}|$$

$$\varepsilon_o = \frac{20}{16,5} (0,04 + 0,354) - 0,04 = 0,44\%$$

Ugljične lamele:

Vlačna deformacija FRP-a:

$$f_{fk} = 2900 \text{ MPa}$$

Modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fu} = 165000 \text{ MPa} = 16500 \text{ kN/cm}^2$$

Proračunska vrijednost konačne FRP deformacije:

$$\varepsilon_{fud} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_F} = \frac{2900}{\frac{165000}{1,3}} = 0,0135 = 13,5 \%$$

Povećanje proračunskog momenta savijanja:

$$M_{Ed,add} = 11,65 - 6,9 = 4,75 \text{ kNm/m'}$$

Približno potrebna ploština presjeka lamela:

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z}$$

$$z = d - k_a \cdot x = 16,5 - 0,410 \cdot 0,43 = 16,32 \text{ cm}$$

$$A_f = \frac{M_{Ed,add}}{\varepsilon_{fud} \cdot E_{fu} \cdot z} = \frac{475}{0,0135 \cdot 16500 \cdot 16,32} = 0,13 \text{ cm}^2$$

Razmak lamela je 40 cm

$$A_f \cdot 0,4 = 0,13 \cdot 0,4 = 0,05 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

ODABIRE SE: 1x Sika Carbodur 212 S → 1x 0,24 cm² = 0,24 cm² /m' na razmaku 40 cm

$$A_{f,odabrano} = 0,24/0,4 = 0,6 \text{ cm}^2/\text{m'}$$

Ukupna vlačna sila:

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud}$$

Ploština presjeka armature za neojačani presjek: $A_{s1} = 0,97 \text{ cm}^2$

ODABRANO: $\phi 6/20$ ($1,41 \text{ cm}^2$)

$$F_{t1} = A_{s1} \cdot f_{yd} + A_f \cdot E_{fu} \cdot \varepsilon_{fud} = 1,41 \cdot 43,48 + 0,6 \cdot 0,0135 \cdot 16500 = 194,96 \text{ kN}$$

Efektivna udaljenost težišta vlačne armature do vlačnog ruba betona:

$$\begin{aligned} d_{1,eff} &= \frac{-A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fud} \cdot \frac{t_f}{2} + A_{s1} \cdot f_{yd} \cdot d_1}{F_{t1}} \\ &= \frac{-0,6 \cdot 16500 \cdot 0,0135 \cdot 0,06 + 1,41 \cdot 43,48 \cdot 3,5}{194,96} = 1,06 \text{ cm} \end{aligned}$$

Ekvivalentna ploština presjeka armature:

$$A_{s1,ekv} = \frac{F_{t1}}{f_{yd}} = \frac{194,96}{43,48} = 4,48 \text{ cm}^2$$

Proračunski moment nosivosti:

$$M_{Rd} = 35,75 \text{ kNm/m'}$$

Visina tlačnog područja nakon pojačanja.

$$x = 2,04 \text{ cm}$$

Krajnja deformacija čelične armature:

$$\varepsilon_{su} = 13 \text{ ‰}$$

Deformacija FRP-a:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - x}{x} - \varepsilon_o = 1,566 \cdot \frac{20 - 2,04}{2,04} - 0,44 = 13,35 \text{ ‰}$$

Provjera:

$$\varepsilon_f = 13,35 \text{ ‰} < \varepsilon_{fud} = 13,5 \text{ ‰}$$

5.2. PREUZIMANJE POVEĆANIH POPREČNIH SILA

5.2.1. FIB 14 – GREDA

Uvjet nosivosti na poprečne sile elementa pojačanog FRP-om glasi:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}$$

Ukupna nosivost elementa ojačanih FRP lamelama određuje se kao minimalna vrijednost između: zbroja doprinosa nosivosti betona V_{cd} , nosivosti ugrađene poprečne armature V_{wd} , doprinosa FRP pojačanja V_{fd} i najveće proračunske poprečne sile $V_{Rd,2}$ koja se može preuzeti bez otkazivanja tlačnih štapova:

$$V_{Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} V_{cd} + V_{wd} + V_{fd} \\ V_{Rd,2} \end{array} \right.$$

Djelujuća poprečna sila je prethodno izračunata i iznosi:

- poprečna sila prije pojačanja:

$$V_{Ed1} = 358,92 \text{ kN}$$

- poprečna sila nakon pojačanja:

$$V_{Ed2} = 516,42 \text{ kN}$$

Doprinos nosivosti betona:

$$V_{cd} = 2,5 \cdot \tau_{Rd} \cdot b_w \cdot d$$

$\tau_{Rd} = 0,3 \text{ MPa}$ - osnovna vrijednost proračunske čvrstoće za djelovanje glavnih kosih naprezanja za beton C25/30

$b_w = 350 \text{ mm}$ – najmanja širina poprečnog presjeka

$d = 805 \text{ mm}$ - efektivna visina poprečnog presjeka

$$V_{cd} = 2,5 \cdot 0,3 \cdot 350 \cdot 805 = 211,3 \text{ kN}$$

Doprinos nosivosti ugrađene poprečne čelične armature:

$$V_{wd} = A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot \frac{z}{s_w}$$

$A_{sw} = 2 \cdot 0,5 \text{ cm}^2$ - površina poprečne armature (spona) na razmaku s_w i reznosti $m = 2$

$f_{ywd} = 43,48 \text{ kN/cm}^2$ - proračunska granica popuštanja poprečne armature

z = krak unutrašnjih sila

$$z = \zeta \cdot d = 0,979 \cdot 805 = 788,1 \text{ mm}$$

$$V_{wd} = A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot \frac{z}{s_w} = 2 \cdot 0,5 \cdot 43,48 \cdot \frac{78,81}{11} = 311,51 \text{ kN}$$

Doprinos FRP pojačanja:

Odabrano pojačanje => Sika CarboDur S 1.030

CFRP omotač u obliku slova U

$$V_{fd} = 0,9 \cdot \varepsilon_{fd,e} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\text{ctg}\theta + \text{ctg}\alpha) \cdot \sin\alpha$$

θ = kut dijagonale pukotine u odnosu na os elementa (45°)

α = kut između orijentacije glavnih vlakana i uzdužne osi elemenata (90°)

$\varepsilon_{fd,e}$ - projektirana vrijednost efektivne FRP deformacije

$$\varepsilon_{fd,e} = \frac{\varepsilon_{fk,e}}{\gamma_f} = \frac{k \cdot \varepsilon_{f,e}}{\gamma_f} = \frac{0,8 \cdot \varepsilon_{f,e}}{1,2}$$

$\varepsilon_{fk,e}$ – karakteristična vrijednost efektivne FRP deformacije

γ_f – parcijalni faktor sigurnosti za FRP

k – faktor smanjenja

$\varepsilon_{f,e}$ – srednja vrijednost efektivne FRP deformacije

$$\begin{aligned}\varepsilon_{f,e} &= \min \left\{ \begin{array}{l} 0,65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \\ 0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,3} \cdot \varepsilon_{fu} \end{array} \right. = \\ &= \min \left\{ \begin{array}{l} 0,65 \cdot \left(\frac{33^{2/3}}{1,65 \cdot 10^5 \cdot 9,52 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \\ 0,17 \cdot \left(\frac{33^{2/3}}{1,65 \cdot 10^5 \cdot 9,52 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,3} \cdot 1,7\% \end{array} \right. \\ &= \min \left\{ \begin{array}{l} 1,41 \cdot 10^{-4} \\ 0,0013 \end{array} \right. = 1,41 \cdot 10^{-4}\end{aligned}$$

$f_{cm} = 33 \frac{N}{mm^2}$ - srednja tlačna čvrstoća betonskog valjka

$E_{fu} = 165 \frac{kN}{mm^2}$ - modul elastičnosti FRP-a

ρ_f - omjer FRP pojačanja (za FRP lamele)

$$\rho_f = \left(\frac{2 \cdot t_f}{b_w} \right) \cdot \frac{b_f}{s_f} = \left(\frac{2 \cdot 3}{350} \right) \cdot \frac{10}{180} = 9,52 \cdot 10^{-4}$$

$t_f = 3$ mm - debljina FRP lamele

$b_f = 10$ mm – širina FRP lamele

s_f – osni razmak FRP lamela, ograničen kako slijedi (za vertikalno postavljene lamele na grede T presjeka)

$$s_f \leq d - h_f - \frac{b_f}{2} = 805 - 620 - \frac{10}{2} = 180 \text{ mm} \Rightarrow \text{odabrano } 180 \text{ mm}$$

h_f – visina FRP lamela

$$\varepsilon_{fd,e} = \frac{\varepsilon_{fk,e}}{\gamma_f} = \frac{k \cdot \varepsilon_{f,e}}{\gamma_f} = \frac{0,8 \cdot \varepsilon_{f,e}}{1,2} = \frac{0,8 \cdot 1,41 \cdot 10^{-4}}{1,2} = 9,4 \cdot 10^{-5}$$

$$V_{fd} = 0,9 \cdot \varepsilon_{fd,e} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\text{ctg}\theta + \text{ctg}\alpha) \cdot \sin\alpha = 0,9 \cdot 9,4 \cdot 10^{-5} \cdot 1,65 \cdot 10^5 \cdot 9,52 \cdot 10^{-4} \cdot 350 \cdot 805 \cdot (1 + 0) \cdot 1 = 3744,2 \text{ N} = 3,74 \text{ kN}$$

Najveća proračunska poprečna sila $V_{Rd,2}$ koja se može preuzeti bez otkazivanja tlačnih štapova:

$$V_{Rd,2} = v \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot \frac{z}{\text{ctg}\theta + \text{tg}\theta} = 0,58 \cdot 16,67 \cdot 350 \cdot \frac{788,1}{1 + 1} = 1333,5 \text{ kN}$$

$f_{cd} = 16,67 \text{ N/mm}^2$ - proračunska tlačna čvrstoća betona

v - faktor koji reducira tlačnu čvrstoću betona u betonskim štapovima

$$v = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0,5$$
$$= 0,7 - \frac{25}{200} = 0,58 > 0,5$$

Najveća proračunska nosivosti betonskog elementa:

$$V_{Rd,2} = v \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot \frac{z}{\text{ctg}\theta + \text{tg}\theta} = 0,58 \cdot 16,67 \cdot 350 \cdot \frac{788,1}{1 + 1} = 1333,5 \text{ kN}$$

Ukupna nosivost:

$$V_{Rd} = \min \begin{cases} V_{cd} + V_{wd} + V_{fd} \\ V_{Rd,2} \end{cases} = \min \begin{cases} 211,3 \text{ kN} + 311,51 \text{ kN} + 3,74 \text{ kN} \\ 1333,5 \text{ kN} \end{cases}$$
$$= \min \begin{cases} 526,55 \text{ kN} \\ 1333,5 \text{ kN} \end{cases}$$

Provjera nosivosti:

$$V_{Ed2} = 516,42 \text{ kN} < V_{Rd} = 526,55 \text{ kN}$$

5.2.2. TR 55 – GREDA

Uvjet nosivosti na poprečne sile elementa pojačanog FRP-om glasi:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}$$

Nosivost grede armirane čeličnom poprečnom armaturom je manja vrijednost između doprinosa nosivosti ugrađene poprečne armature i najveće proračunske nosivosti betonskog elementa:

$$V_{Rd} = \min \begin{cases} V_{Rds,f} \\ V_{Rd,max} \end{cases}$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{1}{\text{ctg}\theta + \text{tg}\theta}$$

gdje je $V_{Rds,f}$ doprinos FRP pojačanja i $V_{Rd,max}$ najveća proračunska poprečna sila koja se može preuzeti bez otkazivanja tlačnih štapova.

Djelujuća poprečna sila je prethodno izračunata i iznosi:

- poprečna sila prije pojačanja:

$$V_{Ed1} = 358,92 \text{ kN}$$

- poprečna sila nakon pojačanja:

$$V_{Ed2} = 516,42 \text{ kN}$$

Najveća proračunska poprečna sila $V_{Rd,max}$ koja se može preuzeti bez otkazivanja tlačnih štapova:

$$\begin{aligned} V_{Rd,max} &= \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{1}{\text{ctg}\theta + \text{tg}\theta} \\ &= 1 \cdot 350 \cdot 788,1 \cdot 0,6 \cdot 16,67 \cdot \frac{1}{\text{ctg}45^\circ + \text{tg}45^\circ} = 1379,45 \text{ kN} \end{aligned}$$

$\alpha_{cw} = 1$ – koeficijent kojim se uzima u obzir stanje naprezanja u tlačnom pojasu nosača

$v_1 = 0,6$ – faktor smanjenja tlačne čvrstoće betona raspucanog od poprečnih sila

θ – kut dijagonale pukotine u odnosu na os elementa (45°)

Doprinos FRP pojačanja:

Odabrano pojačanje => Sika CarboDur S 1.030

CFRP omotač u obliku slova U

$$V_{Rds,f} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \text{ctg}\theta + \frac{A_{fw}}{s_f} \cdot \left(d_f - \frac{n_s}{3} \cdot l_{t,max} \cdot \cos\beta \right) \cdot E_{fd} \cdot \varepsilon_{fse} (\sin\beta + \cos\beta)$$

$A_{sw} = 2 \cdot 0,5 \text{ cm}^2$ - površina poprečne armature na razmaku $s = 11 \text{ cm}$ i reznosti $m = 2$

Krak unutarnjih sila:

$$z = \zeta \cdot d = 0,979 \cdot 805 = 788,1 \text{ mm}$$

Proračunska granica popuštanja poprečne armature

$$f_{ywd} = 0,8 \cdot f_{ywk} = 0,8 \cdot 500 = 400 \text{ Mpa}$$

Ploština presjeka FRP pojačanja:

$$A_{fw} = 2b_f \cdot t_f = 2 \cdot 10 \cdot 3 = 60 \text{ mm}^2$$

$b_f = 10 \text{ mm}$ - širina FRP trake

$t_f = 3 \text{ mm}$ - debljina FRP trake

$\beta = 0^\circ$

Oсни razmak FRP lamela:

$$s_f = \min \begin{cases} 0,8 \cdot d_f \\ d_f - \left(\frac{n_s}{3}\right) \cdot l_{t,max} \cdot \cos\beta \\ b_f + \frac{d_f}{4} \end{cases} = \min \begin{cases} 0,8 \cdot 548 = 438,4 \text{ mm} \\ 548 - \left(\frac{1}{3}\right) \cdot 85,73 \cdot \cos 0^\circ = 519,42 \text{ mm} \\ 10 + \frac{548}{4} = 147 \text{ mm} \end{cases}$$

$$= 147 \text{ mm}$$

$d_f = 54,8 \text{ cm}$ - efektivna visina FRP pojačanja

$n_s = 1$ - faktor za sidrenje pojačanja na poprečne sile

Duljina sidrenja potrebna za razvoj punog kapaciteta sidrenja:

$$l_{t,max} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{E_{fd} \cdot t_f}{f_{ctk}}} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{125000 \cdot 3}{25}} = 85,73 \text{ mm}$$

Proračunski modul elastičnosti FRP-a:

$$E_{fd} = \frac{E_{fk}}{\gamma_{FRP,mE}} = \frac{1,65 \cdot 10^5}{1,1 \cdot 1,2} = 125000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Proračunski parcijalni faktor sigurnosti za modul elastičnosti FRP-a:

$$\gamma_{FRP,mE} = \gamma_{FRP,E} \cdot \gamma_{FRP,m} = 1,1 \cdot 1,2 = 1,32$$

$\gamma_{FRP,E}$ – parcijalni faktor sigurnosti za modul elastičnosti FRP-a

$\gamma_{FRP,m}$ - parcijalni faktor sigurnosti za proizvodnju FRP-a

Efektivna deformacija u FRP-u za posmično pojačanje:

$$\varepsilon_{fse} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{\varepsilon_{fd}}{2} \\ 0,5 \cdot \sqrt{\frac{f_{ctk}}{E_{fd} \cdot t_f}} \\ 0,004 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,0113}{2} = 5,65 \cdot 10^{-3} \\ 0,5 \cdot \sqrt{\frac{25}{125000 \cdot 3}} = 4,08 \cdot 10^{-3} \\ 0,004 \end{array} \right\} = 0,004$$

ε_{fd} - proračunska granična sposobnost deformacije FRP-a:

$$\varepsilon_{fd} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_{FRP,m\varepsilon}} = \frac{1,7}{1,5} = 0,0113$$

Proračunski parcijalni faktor sigurnosti za deformaciju FRP-a:

$$\gamma_{FRP,m\varepsilon} = \gamma_{FRP,\varepsilon} \cdot \gamma_{FRP,m} = 1,25 \cdot 1,2 = 1,5$$

$\gamma_{FRP,\varepsilon}$ - parcijalni faktor sigurnosti za deformaciju FRP-a

$\gamma_{FRP,m}$ - parcijalni faktor sigurnosti za proizvodnju FRP-a

$$\begin{aligned} V_{Rds,f} &= \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot ctg\theta + \frac{A_{fw}}{s_f} \cdot \left(d_f - \frac{n_s}{3} \cdot l_{t,max} \cdot \cos\beta \right) \cdot E_{fd} \cdot \varepsilon_{fse} (\sin\beta + \cos\beta) \\ &= \frac{2 \cdot 50}{110} \cdot 788,1 \cdot 400 \cdot ctg45^\circ + \frac{60}{147} \cdot \left(548 - \frac{1}{3} \cdot 85,73 \cdot \cos0^\circ \right) \cdot 125000 \\ &\quad \cdot 0,004 \cdot (\sin0^\circ + \cos0^\circ) = 392586,58 \text{ N} = 392,59 \text{ kN} \end{aligned}$$

Ukupna nosivost elementa ojačanih FRP lamelama:

$$V_{Rd} = \min \begin{cases} V_{Rds,f} = 392,59 \text{ kN} \\ V_{Rd,max} = 1379,45 \text{ kN} \end{cases} = 392,59 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti:

$$V_{Ed2} = 516,42 \text{ kN} > V_{Rd} = 392,59 \text{ kN}$$

Nosivost ne zadovoljava, potrebno je postaviti gušču FRP poprečnu armaturu (lamelle):

$$s_f = 110 \text{ mm}$$

$$V_{Rds,f} = 392,59 \cdot \frac{147}{110} = 524,64 \text{ kN} = V_{Rd}$$

Provjera nosivosti:

$$V_{Ed2} = 516,42 \text{ kN} < V_{Rd} = 524,64 \text{ kN}$$

5.2.3. FIB 90 – GREDA

Uvjet nosivosti na poprečne sile elementa pojačanog FRP-om glasi:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}$$

Nosivost grede armirane čeličnom poprečnom armaturom je manja vrijednost između doprinosa nosivosti ugrađene poprečne armature i najveće proračunske nosivosti betonskog elementa:

$$V_{Rd} = \min \left\{ V_{Rd,s} + V_{Rd,f} \right. \\ \left. V_{Rd,max} \right.$$

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{1}{\text{ctg}\theta + \text{tg}\theta}$$

gdje je $V_{Rd,s}$ doprinos nosivosti ugrađene poprečne armature, $V_{Rd,f}$ doprinos FRP pojačanja i $V_{Rd,max}$ najveća proračunska poprečna sila koja se može preuzeti bez otkazivanja tlačnih štapova.

Djelujuća poprečna sila je prethodno izračunata i iznosi:

- poprečna sila prije pojačanja:

$$V_{Ed1} = 358,92 \text{ kN}$$

- poprečna sila nakon pojačanja:

$$V_{Ed2} = 516,42 \text{ kN}$$

Doprinos nosivosti ugrađene poprečne čelične armature

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \text{ctg}\theta$$

$A_{sw} = 2 \cdot 0,5 \text{ cm}^2$ - površina poprečne armature na razmaku $s = 11 \text{ cm}$ i reznosti $m = 2$

Krak unutarnjih sila:

$$z = \zeta \cdot d = 0,979 \cdot 805 = 788,1 \text{ mm}$$

Proračunska granica popuštanja poprečne armature

$$f_{ywd} = 0,8 \cdot f_{ywk} = 0,8 \cdot 500 = 400 \text{ Mpa}$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \text{ctg}\theta = \frac{2 \cdot 0,5}{11} \cdot 78,81 \cdot 40 \cdot \text{ctg}45^\circ = 286,58 \text{ kN}$$

Najveća proračunska poprečna sila $V_{Rd,max}$ koja se može preuzeti bez otkazivanja tlačnih štapova:

$$\begin{aligned} V_{Rd,max} &= \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd} \cdot \frac{1}{\text{ctg}\theta + \text{tg}\theta} \\ &= 1 \cdot 350 \cdot 788,1 \cdot 0,6 \cdot 16,67 \cdot \frac{1}{\text{ctg}45^\circ + \text{tg}45^\circ} = 1379,45 \text{ Kn} \end{aligned}$$

$\alpha_{cw} = 1$ - koeficijent kojim se uzima u obzir stanje naprezanja u tlačnom pojasu nosača

$v_1 = 0,6$ - faktor smanjenja tlačne čvrstoće betona raspucanog od poprečnih sila

θ - kut dijagonale pukotine u odnosu na os elementa (45°)

Doprinos FRP pojačanja:

Odabrano pojačanje => Sika CarboDur S 812

CFRP omotač u obliku slova U

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fw}}{s_f} \cdot h_f \cdot f_{fwd} \cdot (\text{ctg}\theta + \text{ctg}\alpha) \cdot \text{sin}\alpha$$

Ploština presjeka FRP pojačanja:

$$A_{fw} = 2b_f \cdot t_f = 2 \cdot 80 \cdot 1,2 = 192 \text{ mm}^2$$

$b_f = 80 \text{ mm}$ - širina FRP trake

$t_f = 1,2 \text{ mm}$ - debljina FRP trake

$\alpha = 90^\circ$

$s_f = 100 \text{ mm}$

Visina FRP-a preko kojeg prolazi pukotina od poprečnih sila:

$$h_f = h - 0,1 \cdot d_s = 65 - 0,1 \cdot 4,5 = 646 \text{ mm}$$

f_{fwd} - proračunska vrijednost prosječnog naprežanja u FRP-u presječenim pukotinom u graničnom stanju:

$$f_{fwd} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{fbwd} \\ f_{fwd,c} \end{array} \right. = 214,21 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

f_{fbwd} - čvrstoća prionjivosti FRP-a:

$$f_{fbwd} = \left[1 - \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{m \cdot s_f}{l_e} \right) \frac{m}{n} \right] \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}}$$

f_{fbk} - karakteristična čvrstoća prionjivosti:

$$f_{fbk} = \sqrt{\frac{E_f \cdot s_{0k} \cdot \tau_{b1k}}{t_f}} = \sqrt{\frac{1,65 \cdot 10^5 \cdot 0,21 \cdot 4,91}{1,2}} = 379,94 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{b1k} = 0,53 \cdot \sqrt{f_{cu} \cdot f_{ctm}} = 0,53 \cdot \sqrt{33 \cdot 2,6} = 4,91$$

$$s_0 = 0,21$$

Minimalna čvrstoća pojačanja (kao zatvoreni sustav):

$$f_{fwd,c} = k_R \cdot a_t \cdot f_{fd} = 0,26 \cdot 0,8 \cdot 2320 = 482,56 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} = \frac{2900}{1,25} = 2320 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Redukcijski faktor k_R :

$$k_R = \begin{cases} 0,5 \cdot \frac{R}{50} \cdot \left(2 - \frac{R}{50}\right) & R < 50 \text{ mm} \\ 0,5 & R > 50 \text{ mm} \end{cases}$$

$$R = 15 \text{ mm}$$

Najveća duljina prionjivosti l_e :

$$l_e = \frac{\pi \cdot s_0}{k_b \cdot k} \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{8 \cdot f_{cm}^{\frac{2}{3}}}} = \frac{\pi \cdot 0,25}{1,2 \cdot 0,25} \cdot \sqrt{\frac{1,65 \cdot 10^5 \cdot 1,2}{8 \cdot 2,6^{\frac{2}{3}}}} = 299,52 \text{ mm}$$

Faktor oblika k_b :

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{b}}} = 1,2$$

Broj traka koje prelazi pukotina od poprečnih sila n i m je broj traka za koje je duljina prionjivosti manja od l_e

$$m = l_e (\text{ctg}\theta + \text{ctg}\alpha) \cdot \frac{\sin\alpha}{s_f} = 299,52 \cdot (1 + 0) \cdot \frac{1}{100} = 3$$

$$n = \frac{h_f \cdot (\text{tg}\theta + \text{ctg}\alpha)}{s_f} = \frac{646 \cdot 1}{100} = 6,46$$

$$\begin{aligned} f_{fbwd} &= \left[1 - \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{m \cdot s_f}{l_e}\right) \frac{m}{n}\right] \frac{f_{fbk}}{\gamma_{fb}} = \left[1 - \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{3 \cdot 100}{299,52}\right) \cdot \frac{3}{6,46}\right] \cdot \frac{379,94}{1,5} \\ &= 214,21 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \end{aligned}$$

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fw}}{S_f} \cdot h_f \cdot f_{fwd} \cdot (\operatorname{ctg}\theta + \operatorname{ctg}\alpha) \cdot \sin\alpha = \frac{192}{100} \cdot 646 \cdot 214,21 \cdot (1 + 0) \cdot 1$$

$$= 265688,95 \text{ N} = 265,69 \text{ kN}$$

Ukupna nosivost elementa ojačanih FRP lamelama:

$$V_{Rd} = \min \begin{cases} V_{Rd,s} + V_{Rd,f} = 286,58 + 265,69 = 552,27 \text{ kN} \\ V_{Rd,max} = 1379,45 \text{ kN} \end{cases} = 552,27 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti:

$$V_{Ed2} = 516,42 \text{ kN} < V_{Rd} = 552,27 \text{ kN}$$

5.2.4. FprEN – GREDA

Uvjet nosivosti na poprečne sile elementa pojačanog FRP-om glasi:

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd,CFRP}$$

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot z}$$

Djelujuća poprečna sila je prethodno izračunata i iznosi:

- poprečna sila prije pojačanja:

$$V_{Ed1} = 358,92 \text{ kN}$$

- poprečna sila nakon pojačanja:

$$V_{Ed2} = 516,42 \text{ kN}$$

- povećanje djelujuće poprečne sile koju će preuzeti FRP armatura:

$$V_{Ed} = 516,42 - 358,92 = 157,5 \text{ kN}$$

Krak unutarnjih sila:

$$z = \zeta \cdot d = 0,979 \cdot 805 = 788,1 \text{ mm}$$

Nosivost na poprečne sile presjeka ojačanog CFRP-om $\tau_{Rd,CFRP}$ određen je kao zbroj doprinosa nosivosti ugrađene poprečne armature τ_{Rd} i doprinosa ugrađenog FRP-a :

$$\tau_{Rd,CFRP} = \tau_{Rd} + \tau_{Rd,f} \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd}$$

Doprinos nosivosti ugrađene poprečne armature τ_{Rd} :

$$\tau_{Rd} = \rho_w \cdot f_{ywd} \cdot \text{ctg}\theta$$

$$\text{ctg}\theta = \text{ctg}45^\circ = 1$$

$$A_{sw} = 50 \text{ mm}^2$$

$$b_w = 350 \text{ mm}$$

$$s = 300 \text{ mm}$$

Omjer ugrađene poprečne armature:

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{b_w \cdot s} = \frac{2 \cdot 50}{350 \cdot 300} = 9,52 \cdot 10^{-4}$$

Faktor smanjenja čvrstoće za beton napuknut uslijed djelovanja poprečnih sila ili drugih utjecaja:

$$v = \frac{1}{110(\varepsilon_x + (\varepsilon_x + 0,001) \cdot \text{ctg}^2\theta)} \leq 1 \quad \text{uzima se } v = 0,5$$

$$\tau_{Rd} = \rho_w \cdot f_{ywd} \cdot \text{ctg}\theta = 9,52 \cdot 10^{-4} \cdot 434,8 \cdot 1 = 0,41 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Doprinos FRP pojačanja:

Odabrano pojačanje => Sika CarboDur S 512

CFRP omotač u obliku slova U

$t_f = 1,2 \text{ mm}$ – debljina FRP trake

$b_f = 50 \text{ mm}$ – širina FRP trake

$s_f = 200 \text{ mm}$ – osni razmak FRP traka

$\alpha_f = 90^\circ$ - kut formiran između sustava pojačanja i osi uzdužnog elementa

$$\tau_{Rd,f} = \frac{A_f}{s_f} \cdot \frac{f_{fwd}}{b_w} \cdot (\text{ctg}\theta + \text{ctg}\alpha_f) \cdot \sin\alpha_f$$

Omjer ploštine presjeka FRP-a i osnog razmaka FRP traka:

$$\frac{A_f}{s_f} = \frac{2 \cdot t_f \cdot b_f}{s_f} \cdot \sin\alpha_f = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 50}{200} \cdot \sin 90^\circ = 0,6$$

Proračunska čvrstoća sustava za pojačanje:

$$f_{fwd} = \frac{2}{3} \cdot \frac{n \cdot s_f}{l_{bf,max,k}[(ctg\theta + ctg\alpha_f) \cdot \sin\alpha_f]} \cdot f_{bfRd}$$

– duljina sidrenja u tlačnoj zoni svih CFRP traka $l_{bf} < l_{bf,max,k}$

Broj traka koje prelazi pukotina od poprečnih sila n

$$n = \frac{h_f \cdot (ctg\theta + ctg\alpha_f)}{s_f} = \frac{646 \cdot (ctg45^\circ + ctg90^\circ)}{200} = 3,23$$

$h_f = 646$ mm – visina FRP trake

Karakteristična najveća vrijednost efektivne duljine sidrenja:

$$l_{bf,max,k} = 1,5 \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{(f_{cm} \cdot f_{ctm,surf})^{0,5}}} = 1,5 \cdot \sqrt{\frac{1,65 \cdot 10^5 \cdot 1,2}{(33 \cdot 1,33)^{0,5}}} = 259,32 \text{ mm}$$

$$E_f = 1,65 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$f_{cm} = 33 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Površinska vlačna čvrstoća betona:

$$f_{ctm,surf} = k_{c,surf} \cdot f_{ctm} = 0,51 \cdot 2,6 = 1,33 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Koeficijent koji uzima u obzir poziciju betoniranja za procjenu vlačne čvrstoće:

$$k_{c,surf} = 0,4 + 0,5 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{60} - 0,2\right) = 0,4 + 0,5 \cdot \left(\frac{25}{60} - 0,2\right) = 0,51$$

Granična proračunska čvrstoća sidrenja:

$$f_{bfRd} = \frac{0,2}{\gamma_{BA}} \cdot \beta_1 \cdot \sqrt{\frac{E_f}{t_f} \cdot (f_{cm} \cdot f_{ctm,surf})^{0,5}} = \frac{0,2}{1,5} \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{1,65 \cdot 10^5}{1,2} \cdot (33 \cdot 1,33)^{0,5}}$$

$$= 126,53 \frac{N}{mm^2}$$

$\gamma_{BA} = 1,5$ – parcijalni faktor za FRP pojačanje ugrađeno lijepljenjem

Faktor redukcije za kapacitet prljanja uzimajući u obzir duljinu sidrenja:

$$\beta_1 = \begin{cases} \frac{l_{bf}}{l_{bf,max,k}} \cdot \left(2 - \frac{l_{bf}}{l_{bf,max,k}}\right) < 1 & \text{za } l_{bf} < l_{bf,max,k} \\ 1 & \text{za } l_{bf} \geq l_{bf,max,k} \end{cases}$$

$$\beta_1 = 1; l_{bf} > l_{bf,max,k}$$

$$f_{fwd} = \frac{2}{3} \cdot \frac{n \cdot s_f}{l_{bf,max,k}[(ctg\theta + ctg\alpha_f) \cdot \sin\alpha_f]} \cdot f_{bfRd} = \frac{2}{3} \cdot \frac{3,23 \cdot 200}{259,32 \cdot [(1 + 0) \cdot 1]} \cdot 126,53$$

$$= 210,14 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Rd,f} = \frac{A_f}{s_f} \cdot \frac{f_{fwd}}{b_w} \cdot (ctg\theta + ctg\alpha_f) \cdot \sin\alpha_f = 0,6 \cdot \frac{210,14}{350} \cdot (ctg45^\circ + ctg90^\circ) \cdot \sin90^\circ$$

$$= 0,36 \frac{N}{mm^2}$$

Nosivost na poprečne sile presjeka ojačanog CFRP-om:

$$\tau_{Rd,CFRP} = \tau_{Rd} + \tau_{Rd,f} \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd}$$

$$0,41 + 0,36 \leq 0,5 \cdot 0,5 \cdot 16,67$$

$$0,77 \frac{N}{mm^2} < 4,17 \frac{N}{mm^2}$$

Provjera nosivosti:

$$\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd,CFRP}$$

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot z} = \frac{157,5 \cdot 10^3}{350 \cdot 788,1} = 0,57 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Ed} = 0,57 \frac{N}{mm^2} < \tau_{Rd,CFRP} = 0,77 \frac{N}{mm^2}$$

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu istražene su metode pojačanja FRP-om armiranobetonskih greda i ploča za preuzimanje povećanih momenata savijanja te pojačanje greda za preuzimanje povećanih poprečnih sila za slučaj povećanog opterećenja na postojećim konstrukcijama. Istraživanje je provedeno prateći razvoj metoda za proračun pojačanja armiranobetonskih elemenata naprezanih momentima savijanja i poprečnim silama u zadnja dva desetljeća. Razmatrane su metode za proračun pojačanja prema *fib Bulletin No. 14*, *Tehcnical Report No. 55*, *fib Bulletin No. 90* te *FprEN 1992-1-1 Eurocode 2*.

Nakon teorijskog prikaza proračunskih metoda proveden je proračun armature za kontinuirane armiranobetonske ploče i jendostavnu armiranobetonsku gredu. Povećanjem uporabnog opterećenja zaključeno je da je postojeće elemente potrebno pojačati.

Proračun pojačanja na povećane momente savijanja proveden je u programu *GalLa Reinforcement*. Razliku u rezultatima, odnosno potrebnom pojačanju svake pojedine metode, činili su redukcijski faktor, faktor sigurnosti FRP materijala i razmak FRP lamela. Kod *fib Bulletin No. 14* redukcijski faktor iznosi 0,85, faktor sigurnosti FRP materijala 1,2 te razmak FRP lamela 1 m. Prema tome je za gredu proračunato potrebno pojačanje od 2,8 cm²/m'. Za ploče je proračunato potrebno pojačanje od 0,5 cm²/m' u x smjeru te 0,24 cm²/m' u y smjeru. Kod *Tehcnical Report No. 55* redukcijski faktor iznosi 1,0, faktor sigurnosti FRP materijala 1,25 te razmak FRP lamela 1 m. Prema tome je za gredu proračunato potrebno pojačanje od 2,8 cm²/m'. Za ploče je proračunato potrebno pojačanje od 0,5 cm²/m' u x smjeru te 0,24 cm²/m' u y smjeru. Kod *fib Bulletin No. 90* redukcijski faktor iznosi 1,0, faktor sigurnosti FRP materijala 1,25 te razmak FRP lamela 80 cm. Prema tome je za gredu proračunato potrebno pojačanje od 2,8 cm²/m'. Za ploče je proračunato potrebno pojačanje od 0,47 cm²/m' u x smjeru te 0,3 cm²/m' u y smjeru. Kod *FprEN 1992-1-1 Eurocode 2* redukcijski faktor iznosi 1,0, faktor sigurnosti FRP materijala 1,3 te razmak FRP lamela 40 cm. Prema tome je za gredu proračunato potrebno pojačanje od 2,88 cm²/m'. Za ploče je proračunato potrebno pojačanje od 0,6 cm²/m' u x smjeru te 0,6 cm²/m' u y smjeru.

Proračunom pojačanja armiranobetonske grede na povećanu poprečnu silu kod *fib Bulletin No. 14* odabrano je pojačanje u obliku U traka površine presjeka 30 mm² postavljene na razmaku od 18 cm. Kod *Tehcnical Report No. 55* odabrano je pojačanje u obliku U traka površine presjeka 30 mm² postavljene na razmaku od 11 cm. Kod *fib Bulletin No. 90*

odabrano je pojačanje u obliku U traka površine presjeka 96 mm^2 postavljene na razmaku od 10 cm. Kod *FprEN 1992-1-1 Eurocode 2* odabrano je pojačanje u obliku U traka površine presjeka 60 mm^2 postavljene na razmaku od 20 cm.

Iz provedenog proračuna može se zaključiti kako se daljnjim istraživanjima i novim saznanjima zahtjevi u normama postrožuju međutim zbog brojnih prednosti i jednostavne izvedbe smatram kako će se u budućnosti značajno povećati upotreba FRP-a u pojačavanju i sanacijama postojećih konstrukcija.

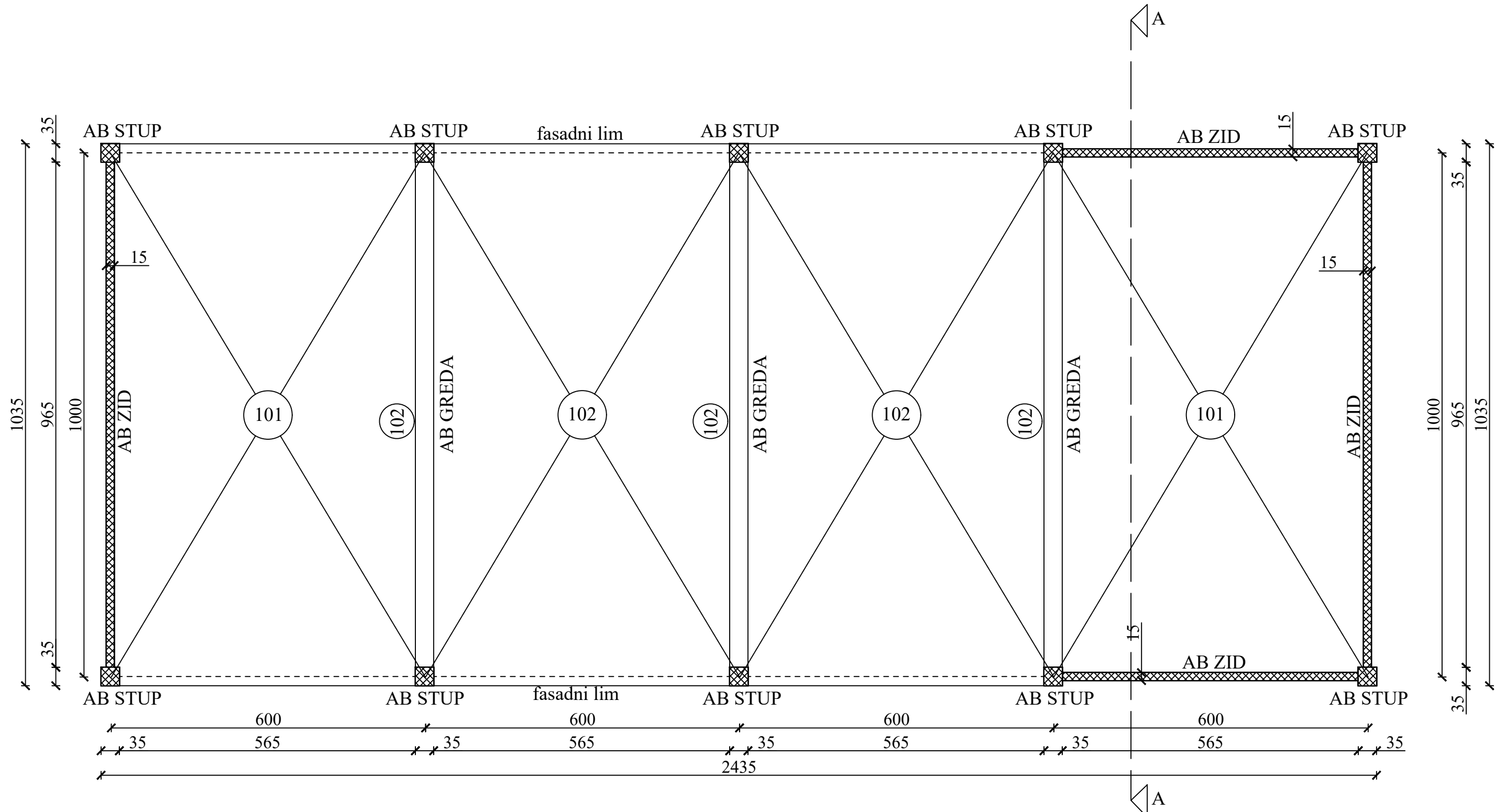
LITERATURA

- [1] fib Bulletin No. 14: *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures* (2001.)
- [2] Technical Report No. 55: *Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials* (2013.)
- [3] fib Bulletin No. 90: *Externally applied FRP reinforcement for concrete structures* (2019.)
- [4] FprEN 1992-1-1 Eurocode 2: *Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures* (2023.)
- [5] Bjegović D.; Kalman T.; Sigmund V.: *Trajnost polimera armiranih vlaknima u betonskim konstrukcijama*; (2009.)
- [6] fib Bulletin No. 40: *FRP reinforcement in RC structures* (2007.)
- [7] EN 1992-1-1 Eurocode 2: *Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings* (2004.):
- [8] Tomičić Ivan: *Betonske konstrukcije* (1996.)
- [9] <https://hrv.sika.com/> pristup 10.08.2023.
- [10] Šćulac Paolo: *Separat za poprečne sile (Osnove betonskih konstrukcija)*

PRILOZI

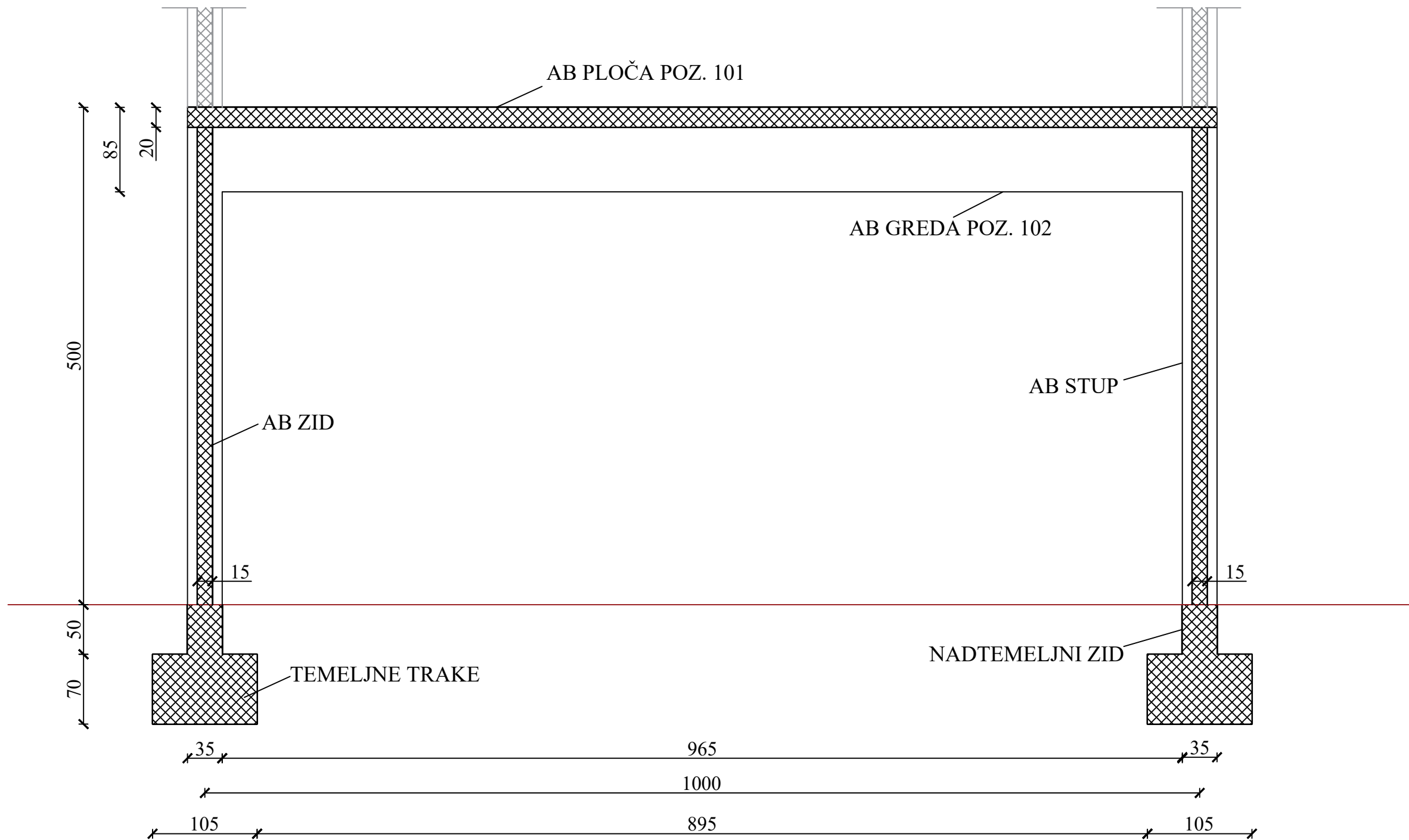
1. Dispozicija stropa iznad prizemlja, mjerilo 1:75
2. Presjek A-A, mjerilo 1:45
3. Armatura grede prije pojačanja, mjerilo 1:40
4. Armatura ploče prije pojačanja, mjerilo 1:10
5. Pojačanje ploče poz. 101 na momente savijanja – FIB 14, mjerilo 1:40
6. Pojačanje ploče poz. 101 na momente savijanja – TR 55, mjerilo 1:40
7. Pojačanje ploče poz. 101 na momente savijanja – FIB 90, mjerilo 1:40
8. Pojačanje ploče poz. 101 na momente savijanja – FprEN, mjerilo 1:40
9. Pojačanje ploče poz. 102 na momente savijanja – FIB 14, mjerilo 1:40
10. Pojačanje ploče poz. 102 na momente savijanja – TR 55, mjerilo 1:40
11. Pojačanje ploče poz. 102 na momente savijanja – FIB 90, mjerilo 1:40
12. Pojačanje ploče poz. 102 na momente savijanja – FprEN, mjerilo 1:40
13. Pojačanje grede na momente savijanja i poprečne sile – FIB 14, mjerilo 1:20
14. Pojačanje grede na momente savijanja i poprečne sile – TR 55, mjerilo 1:20
15. Pojačanje grede na momente savijanja i poprečne sile – FIB 90, mjerilo 1:20
16. Pojačanje grede na momente savijanja i poprečne sile – FprEN, mjerilo 1:20

DISPOZICIJA STROPA IZNAD PRIZEMLJA



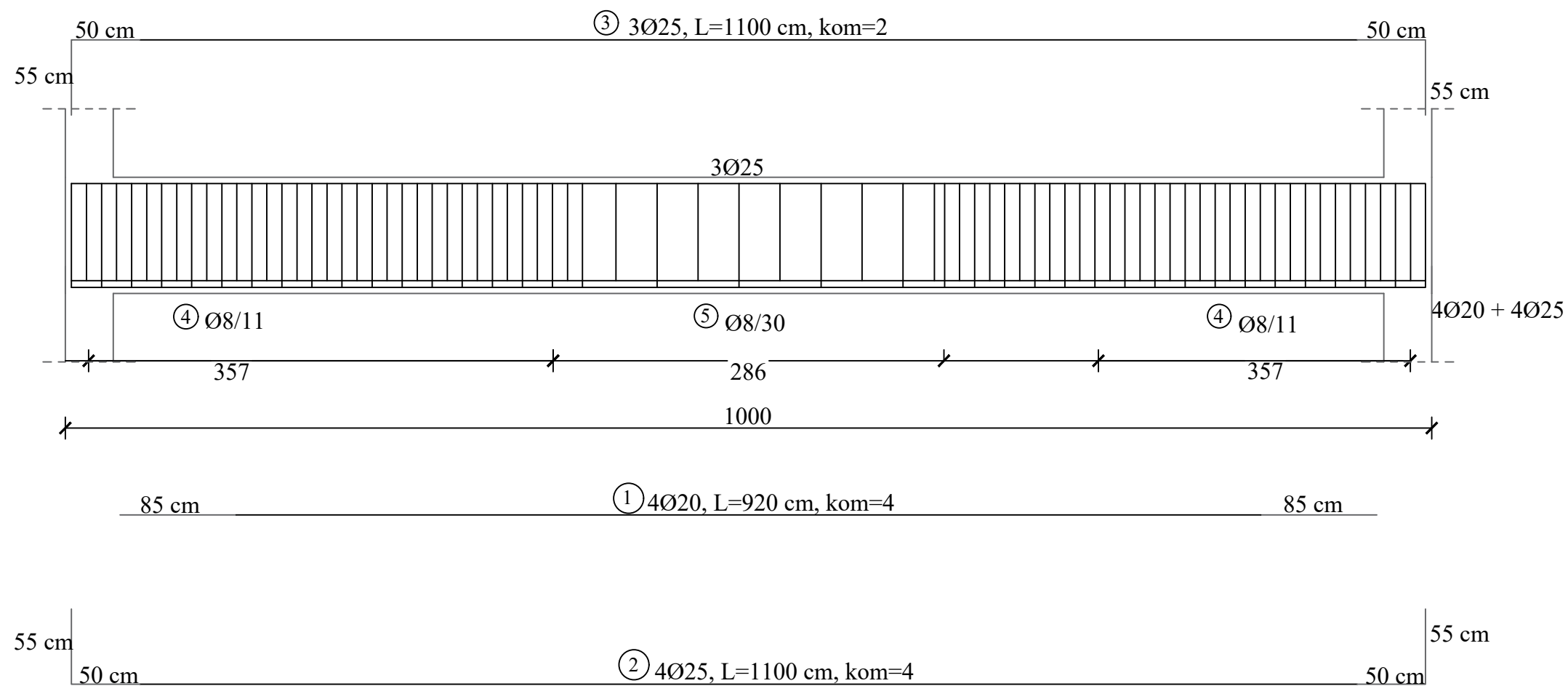
G F GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacрта: Dispozicija stropa iznad prizemlja	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:75	List: 1

PRESJEK A-A

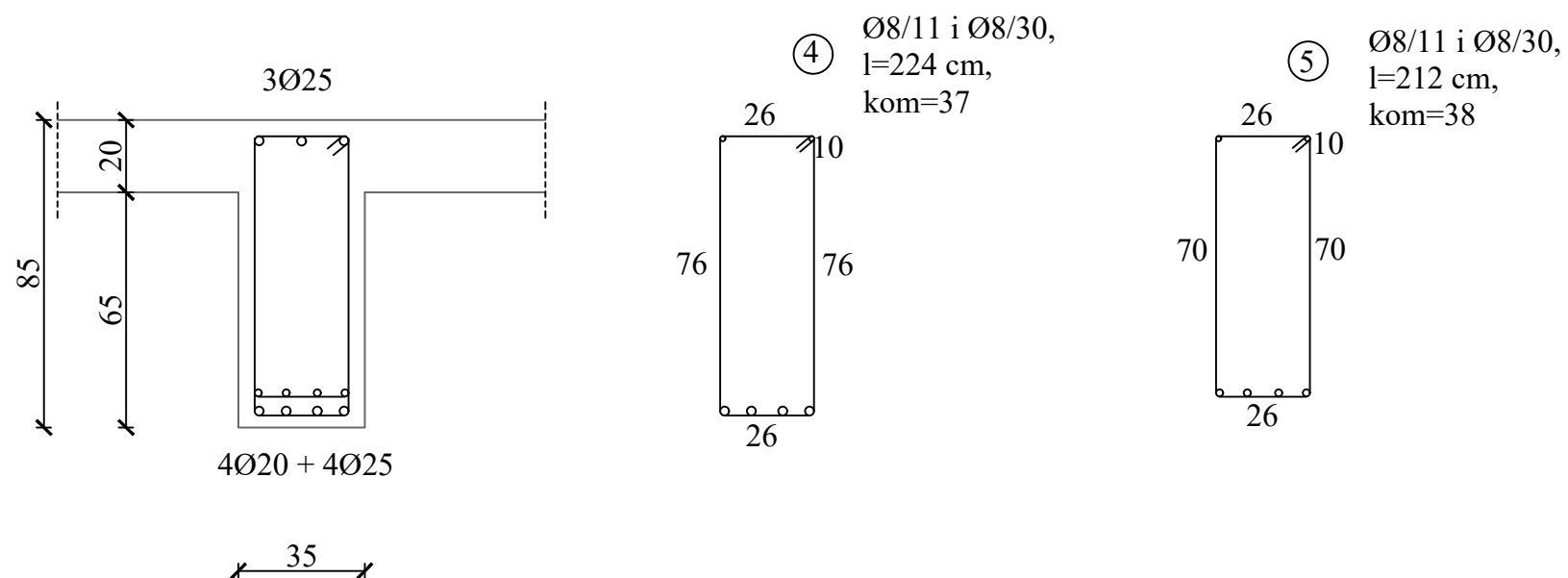


G F GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacrt: Presjek A-A	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:45	List: 2

ARMATURA GREDE PRIJE POJAČANJA

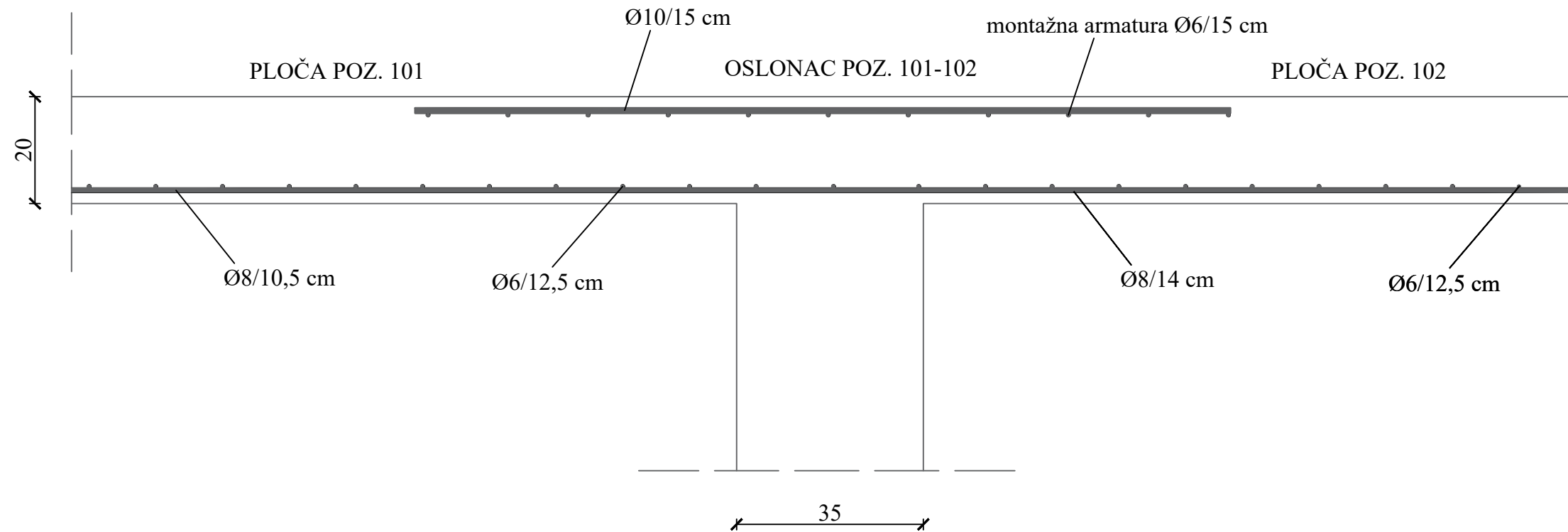


POPREČNI PRESJEK GREDE M 1:20



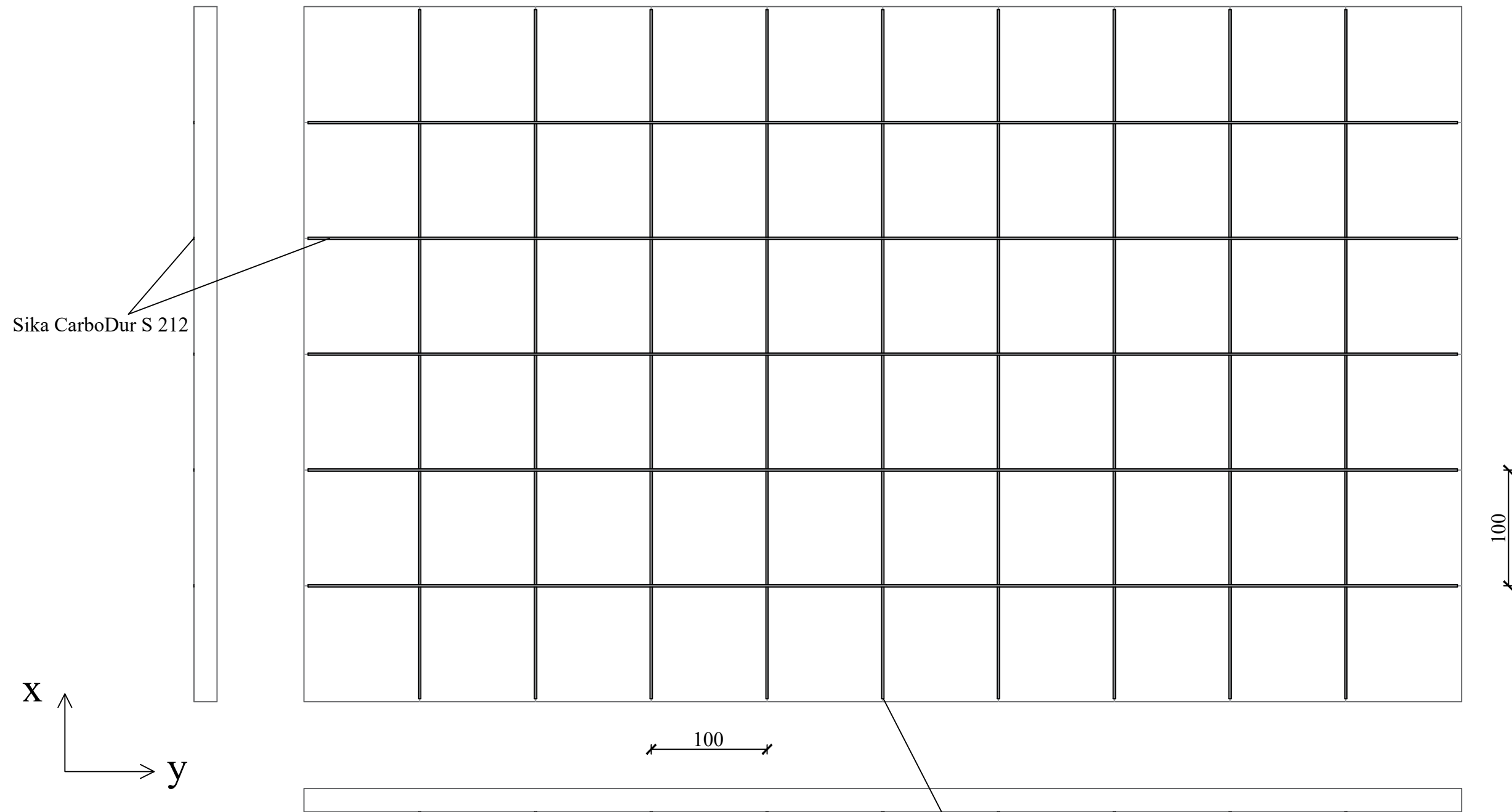
GF GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacрта: Armatura grede prije pojačanja	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:40	List: 3

ARMATURA PLOČE PRIJE POJAČANJA



GF GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacрта: Armatura ploče prije pojačanja	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:10	List: 4

POJAČANJE PLOČE POZ. 101 NA MOMENTE SAVIJANJA - FIB 14



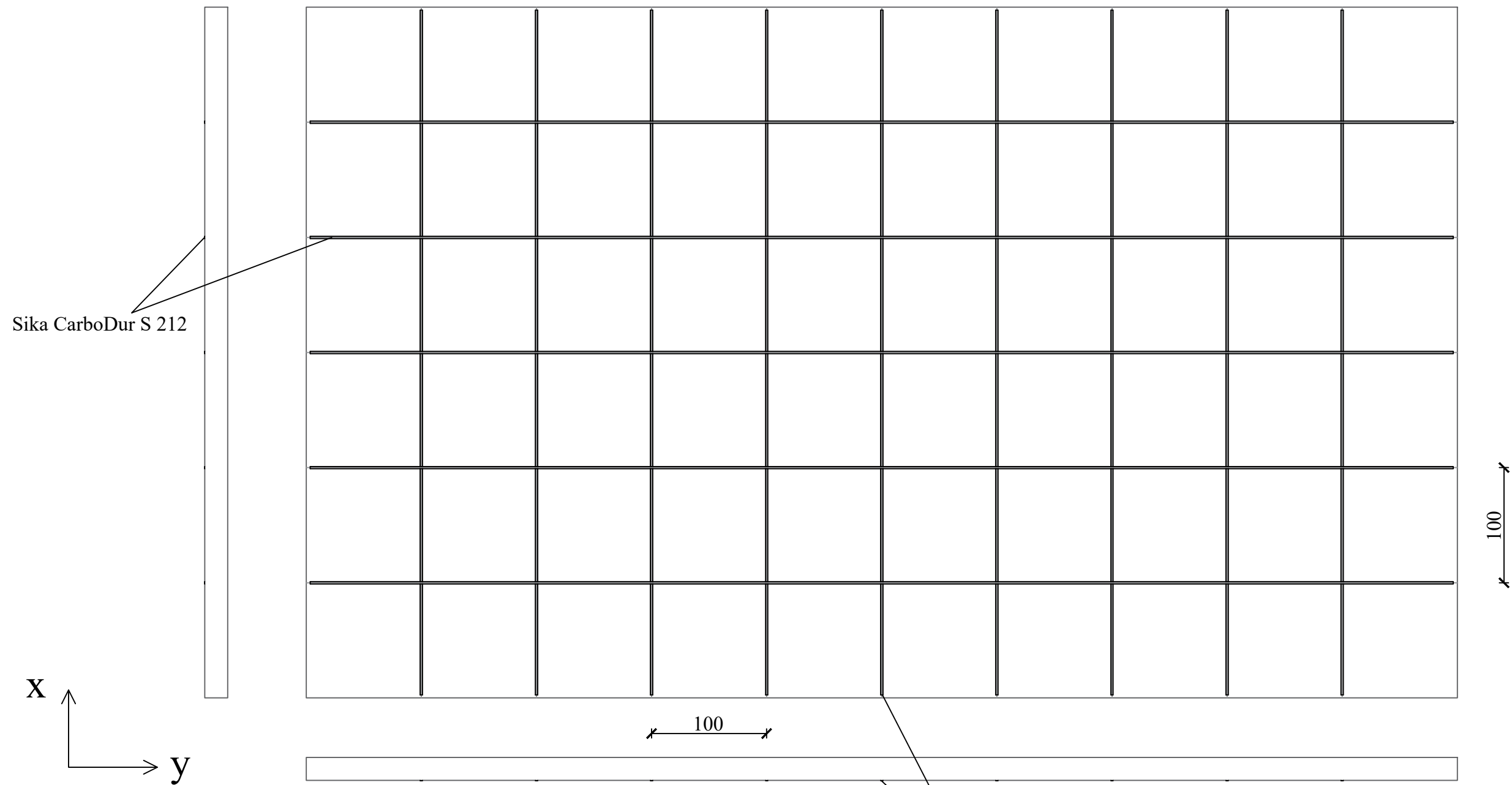
Odabrano pojačanje na momente savijanja u x smjeru: Sika CarboDur S 2.025
 - širina trake: $b_f = 2 \text{ cm}$
 - debljina trake: $t_f = 2.5 \text{ mm}$

Odabrano pojačanje na momente savijanja u y smjeru: Sika CarboDur S 212
 - širina trake: $b_f = 2 \text{ cm}$
 - debljina trake: $t_f = 1,2 \text{ mm}$

Sika CarboDur S 2.025

GF GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacрта: Pojačanje ploče poz. 101 na momente savijanja - FIB 14	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:40	List: 5

POJAČANJE PLOČE POZ. 101 NA MOMENTE SAVIJANJA - TR 55



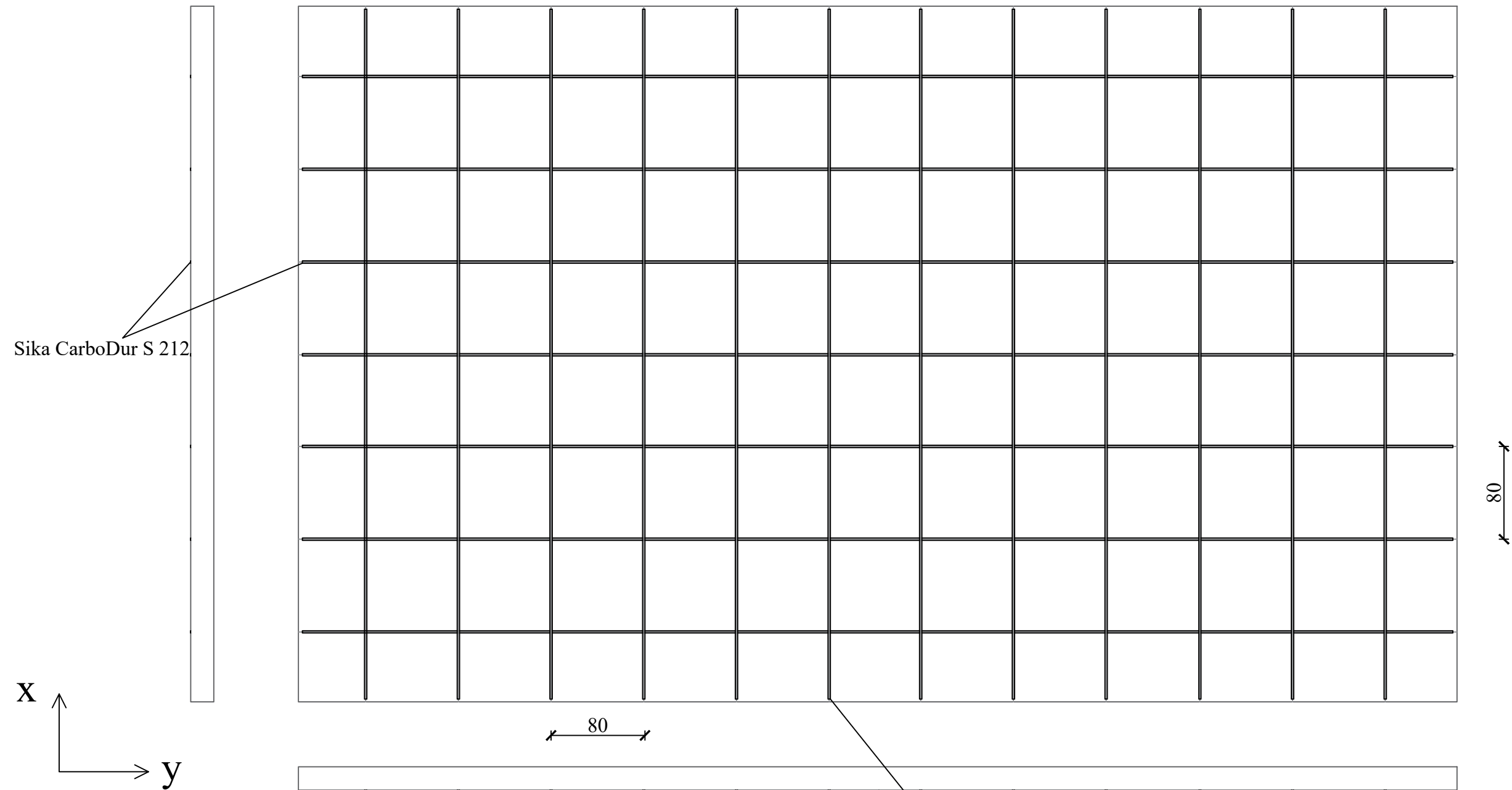
Odabrano pojačanje na momente savijanja u x smjeru: Sika CarboDur S 2.025
- širina trake: $b_f = 2$ cm
- debljina trake: $t_f = 2,5$ mm

Odabrano pojačanje na momente savijanja u y smjeru: Sika CarboDur S 212
- širina trake: $b_f = 2$ cm
- debljina trake: $t_f = 1,2$ mm

Sika CarboDur S 2.025

GF GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacрта: Pojačanje ploče poz. 101 na momente savijanja - TR 55	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:40	List: 6

POJAČANJE PLOČE POZ. 101 NA MOMENTE SAVIJANJA - FIB 90



Odabrano pojačanje na momente savijanja u x smjeru: Sika CarboDur S 1.525

- širina trake: $b_f = 1,5$ cm
- debljina trake: $t_f = 2,5$ mm

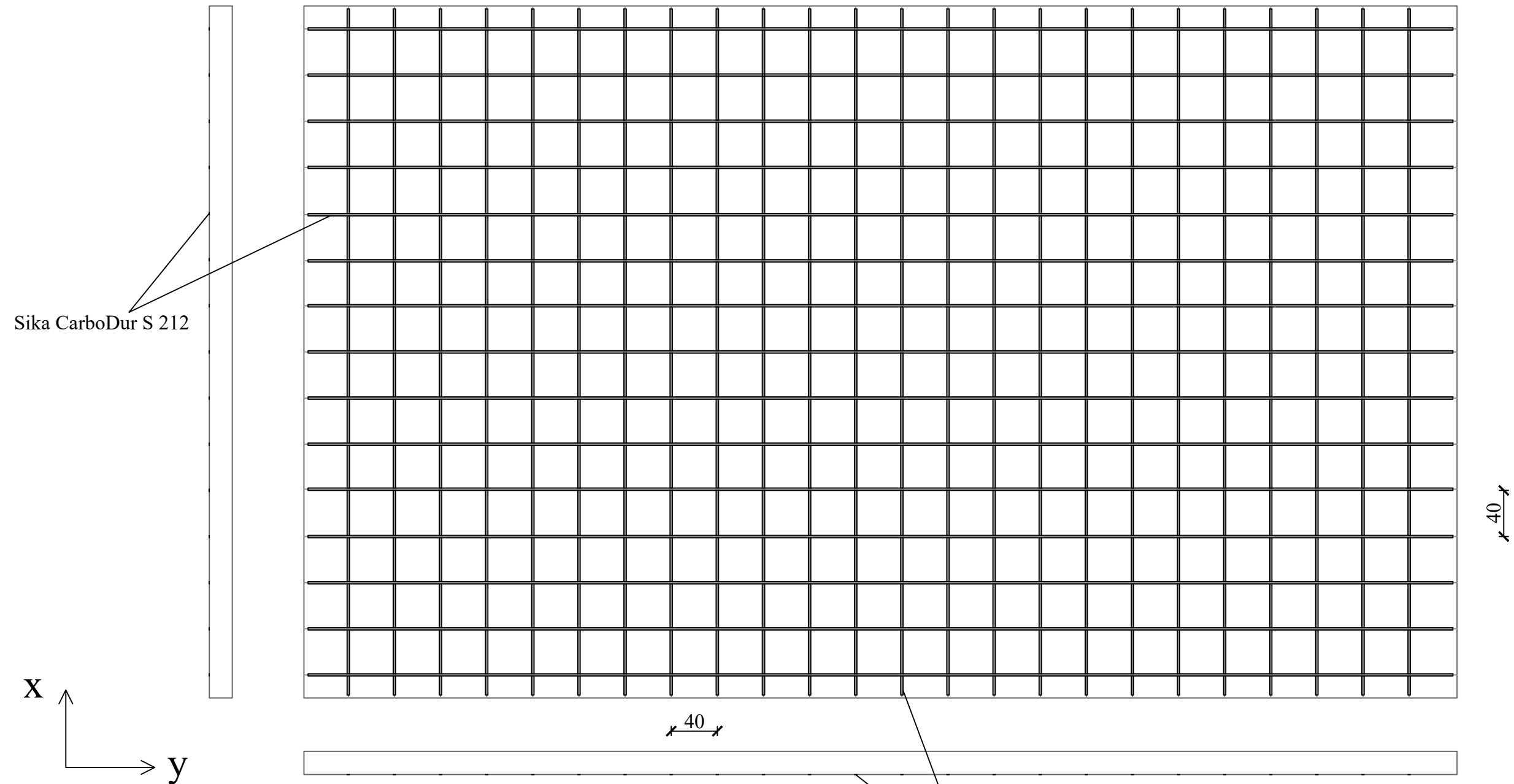
Odabrano pojačanje na momente savijanja u y smjeru: Sika CarboDur S 212

- širina trake: $b_f = 2$ cm
- debljina trake: $t_f = 1,2$ mm

Sika CarboDur S 1.525

GF GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacрта: Pojačanje ploče poz. 101 na momente savijanja - FIB 90	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:40	List: 7

POJAČANJE PLOČE POZ. 101 NA MOMENTE SAVIJANJA - FprEN



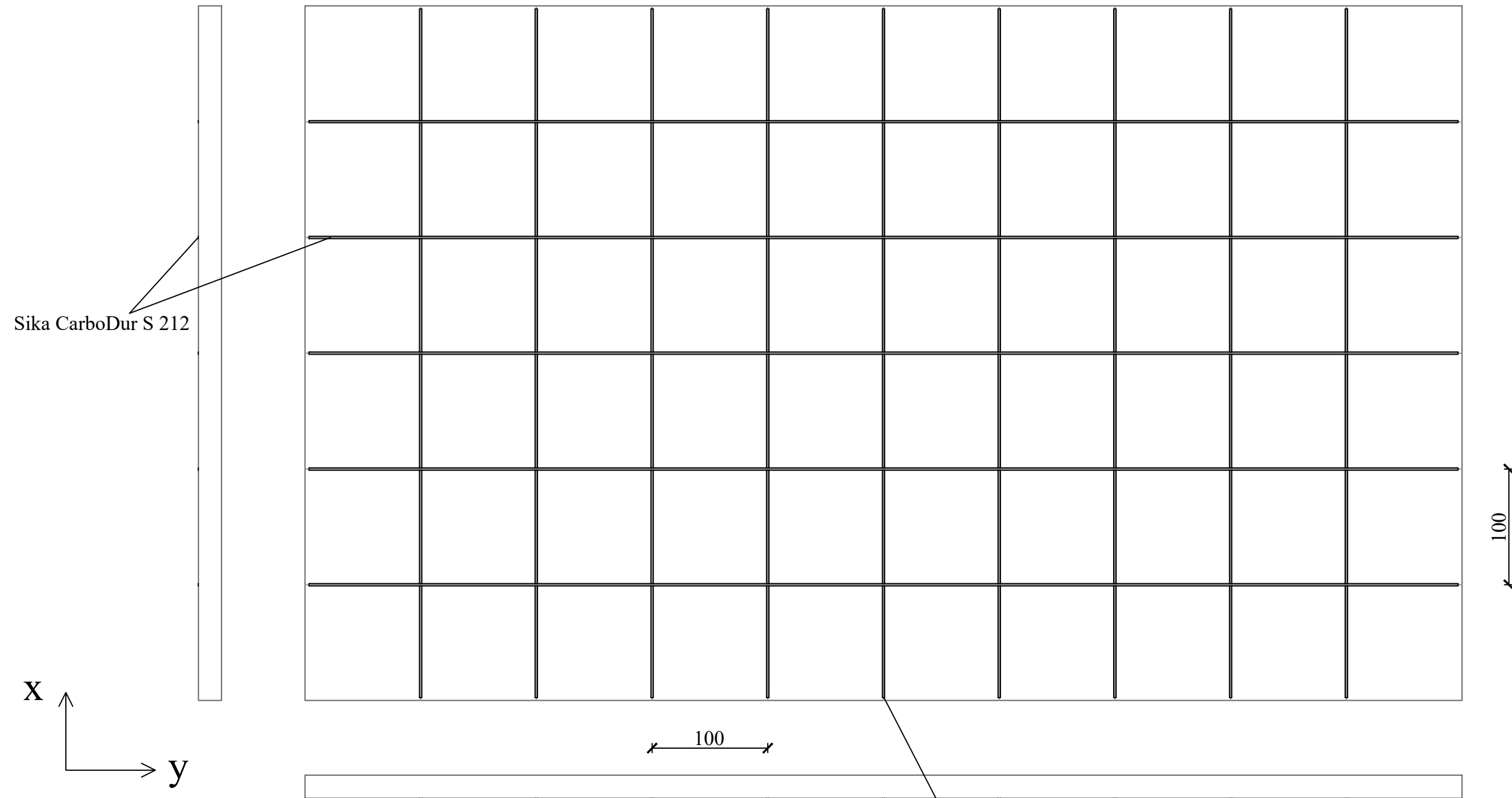
Odabrano pojačanje na momente savijanja u x smjeru: Sika CarboDur S 212
 - širina trake: $b_f = 2 \text{ cm}$
 - debljina trake: $t_f = 1,2 \text{ mm}$

Odabrano pojačanje na momente savijanja u y smjeru: Sika CarboDur S 212
 - širina trake: $b_f = 2 \text{ cm}$
 - debljina trake: $t_f = 1,2 \text{ mm}$

Sika CarboDur S 212

GF GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacрта: Pojačanje ploče poz. 101 na momente savijanja - FprEN	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:40	List: 8

POJAČANJE PLOČE POZ. 102 NA MOMENTE SAVIJANJA - FIB 14



Odabrano pojačanje na momente savijanja u x smjeru: Sika CarboDur S 2.025

- širina trake: $b_f = 2$ cm
- debljina trake: $t_f = 2,5$ mm

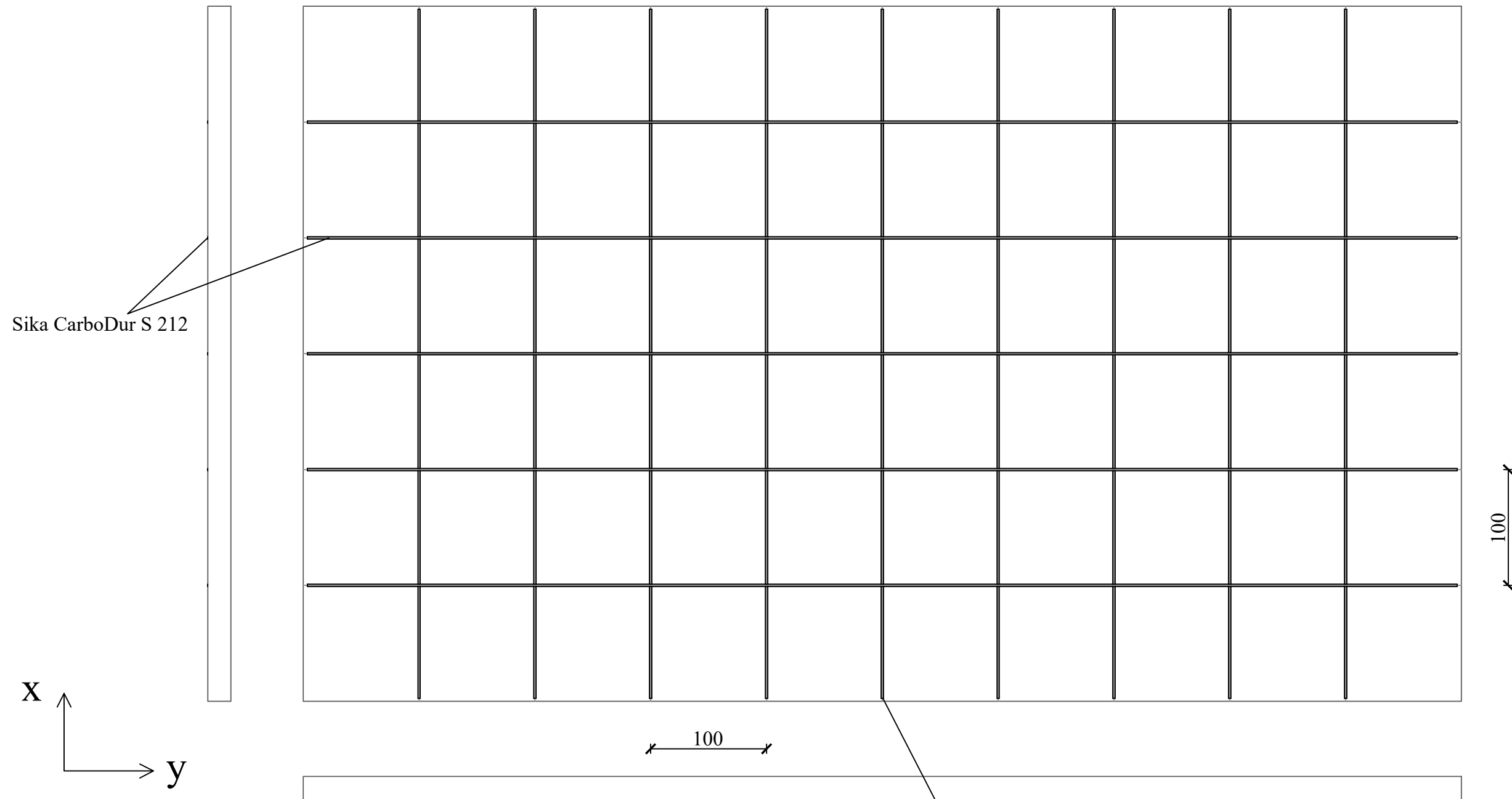
Odabrano pojačanje na momente savijanja u y smjeru: Sika CarboDur S 212

- širina trake: $b_f = 2$ cm
- debljina trake: $t_f = 1,2$ mm

Sika CarboDur S 2.025

GF GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacрта: Pojačanje ploče poz. 102 na momente savijanja - FIB 14	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:40	List: 9

POJAČANJE PLOČE POZ. 102 NA MOMENTE SAVIJANJA - TR 55



Odabrano pojačanje na momente savijanja u x smjeru: Sika CarboDur S 2.025

- širina trake: $b_f = 2$ cm
- debljina trake: $t_f = 2,5$ mm

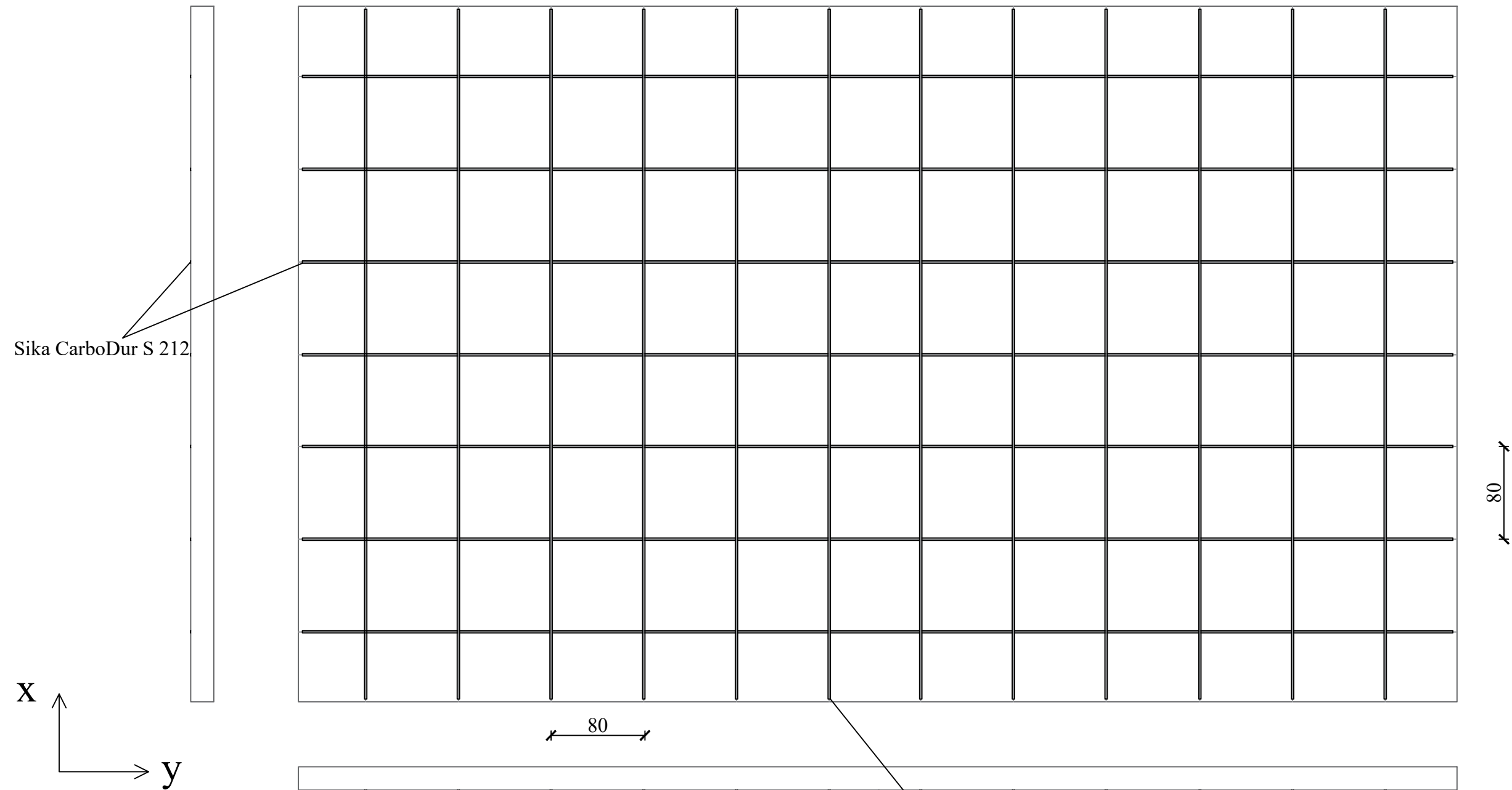
Odabrano pojačanje na momente savijanja u y smjeru: Sika CarboDur S 212

- širina trake: $b_f = 2$ cm
- debljina trake: $t_f = 1,2$ mm

Sika CarboDur S 2.025

GF GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacрта: Pojačanje ploče poz. 102 na momente savijanja - TR 55	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:40	List: 10

POJAČANJE PLOČE POZ. 102 NA MOMENTE SAVIJANJA - FIB 90



Odabrano pojačanje na momente savijanja u x smjeru: Sika CarboDur S 1.525

- širina trake: $b_f = 1,5 \text{ cm}$
- debljina trake: $t_f = 2,5 \text{ mm}$

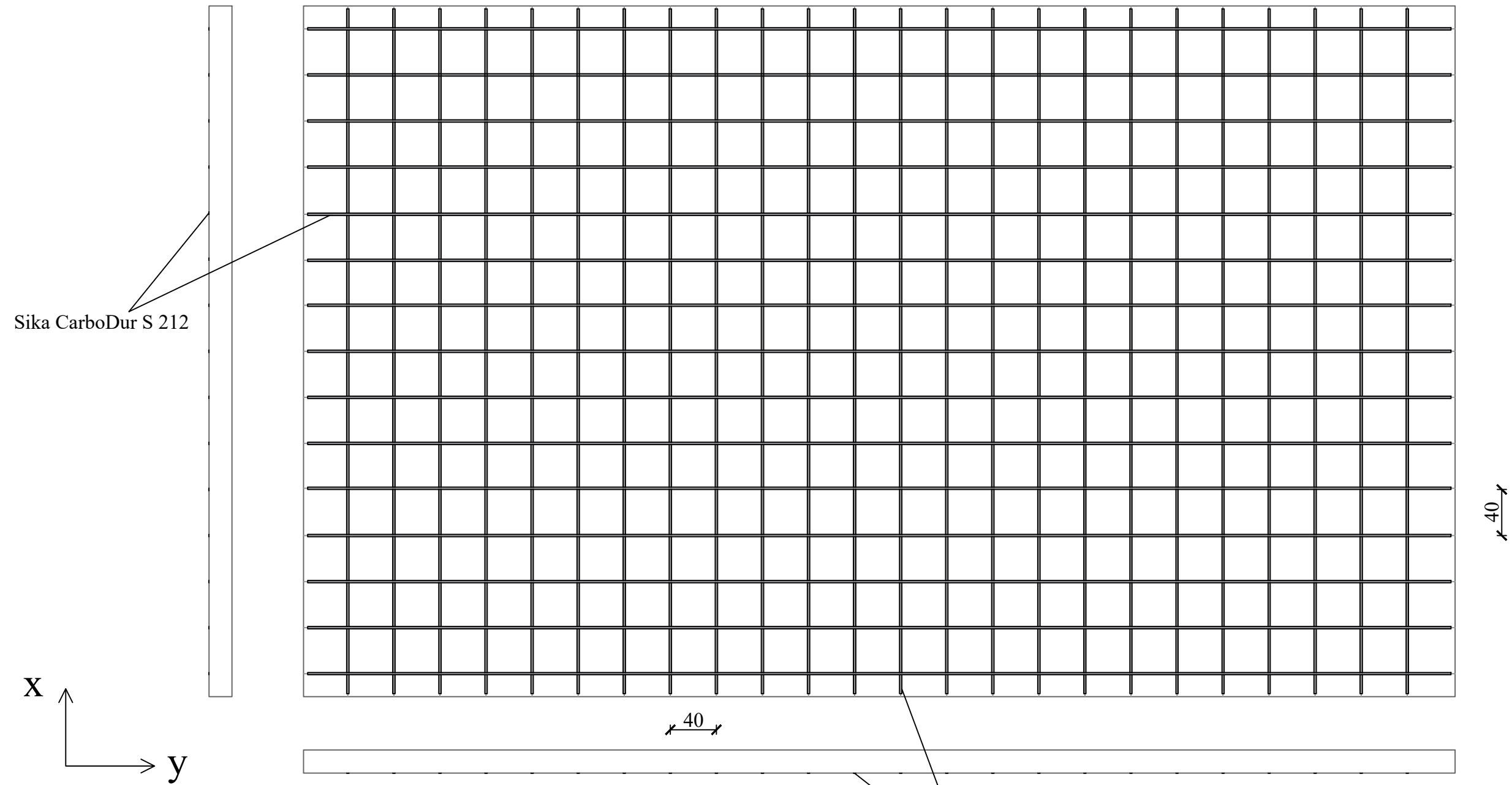
Odabrano pojačanje na momente savijanja u y smjeru: Sika CarboDur S 212

- širina trake: $b_f = 2 \text{ cm}$
- debljina trake: $t_f = 1,2 \text{ mm}$

Sika CarboDur S 1.525

GF GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacрта: Pojačanje ploče poz. 102 na momente savijanja - FIB 90	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:40	List: 11

POJAČANJE PLOČE POZ. 102 NA MOMENTE SAVIJANJA - FprEN



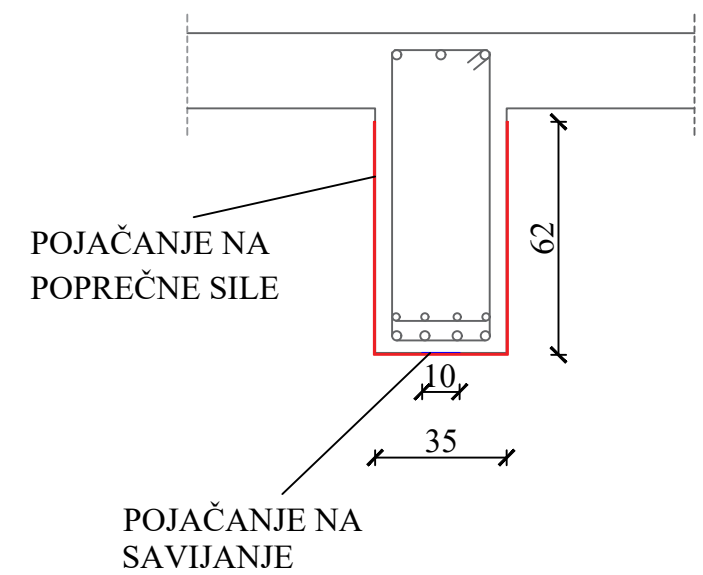
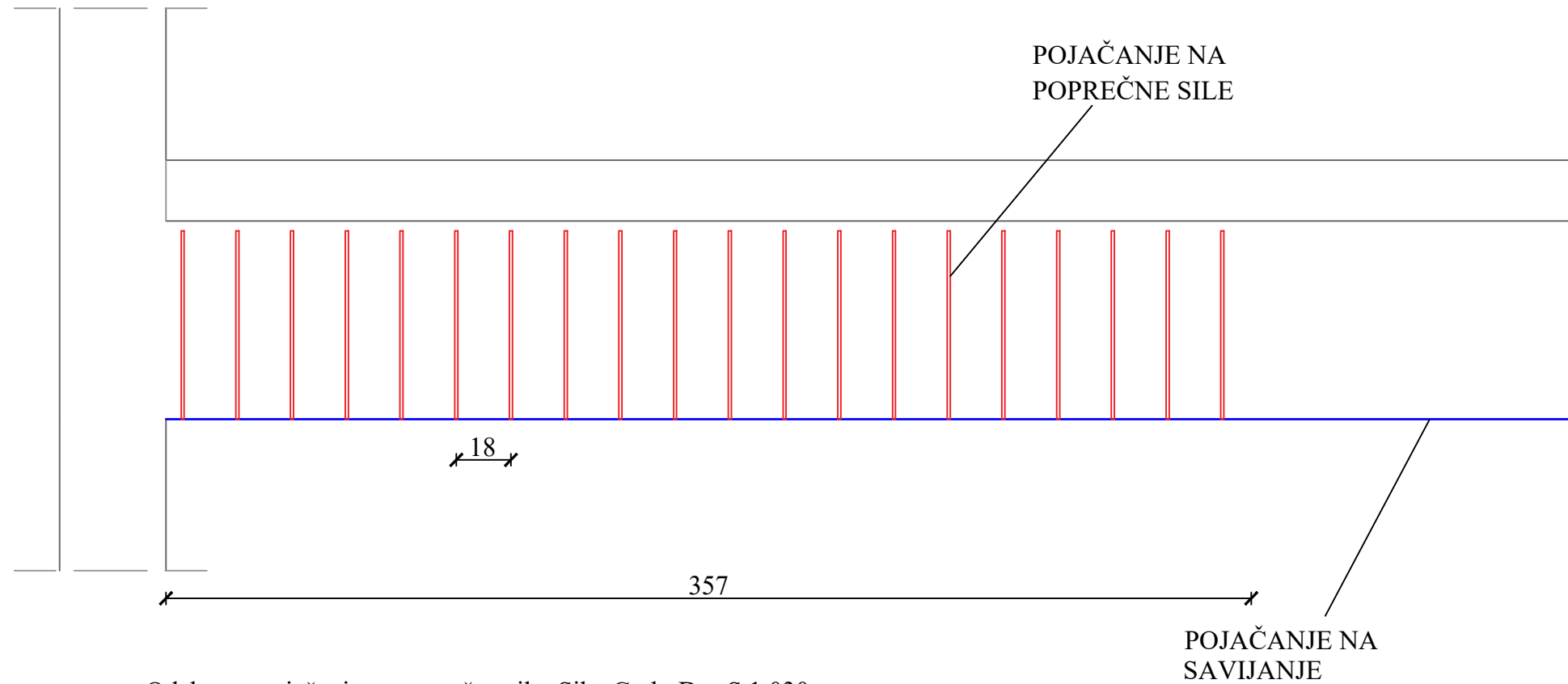
Odabrano pojačanje na momente savijanja u x smjeru: Sika CarboDur S 212
- širina trake: $b_f = 2 \text{ cm}$
- debljina trake: $t_f = 1,2 \text{ mm}$

Odabrano pojačanje na momente savijanja u y smjeru: Sika CarboDur S 212
- širina trake: $b_f = 2 \text{ cm}$
- debljina trake: $t_f = 1,2 \text{ mm}$

Sika CarboDur S 212

GF GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacрта: Pojačanje ploče poz. 102 na momente savijanja - FprEN	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:40	List: 12

POJAČANJE GREDE NA MOMENTE SAVIJANJA I POPREČNE SILE - FIB 14



Odabrano pojačanje na poprečne sile: Sika CarboDur S 1.030

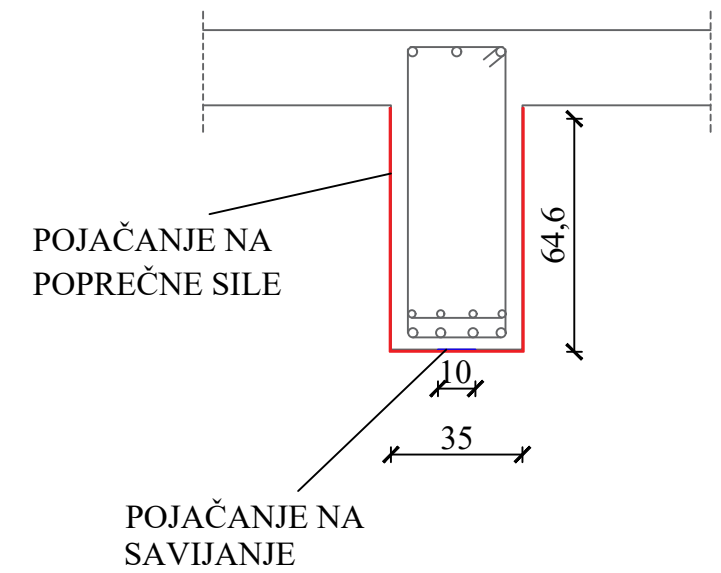
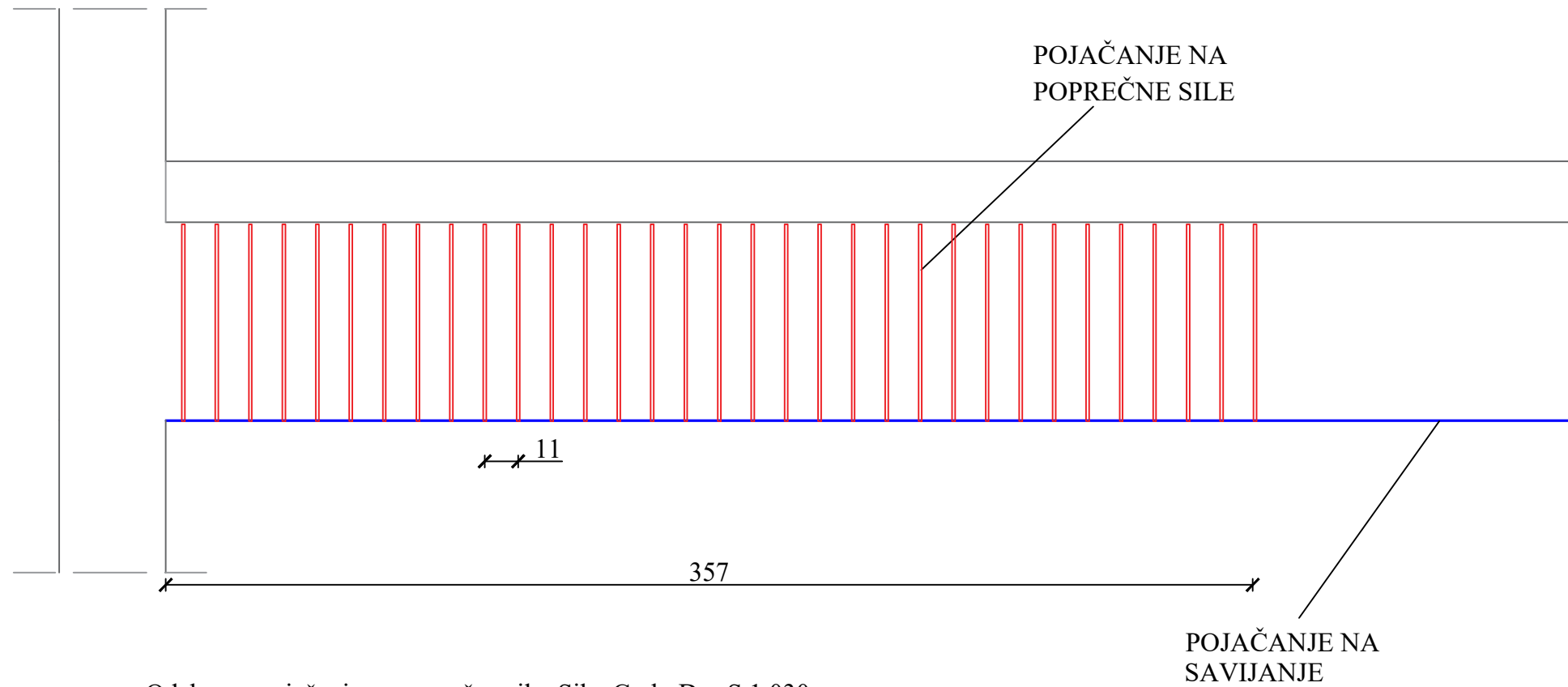
- širina trake: $b_f = 1$ cm
- debljina trake: $t_f = 3$ mm
- razmak pojačanja $s_f = 18$ cm

Odabrano pojačanje na momente savijanja: Sika CarboDur S 1014 u dva sloja

- širina trake: $b_f = 10$ cm
- debljina trake: $t_f = 1,4$ mm

GF GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacрта: Pojačanje grede na momente savijanja i poprečne sile - FIB 14	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:20	List: 13

POJAČANJE GREDE NA MOMENTE SAVIJANJA I POPREČNE SILE - TR 55



Odabrano pojačanje na poprečne sile: Sika CarboDur S 1.030

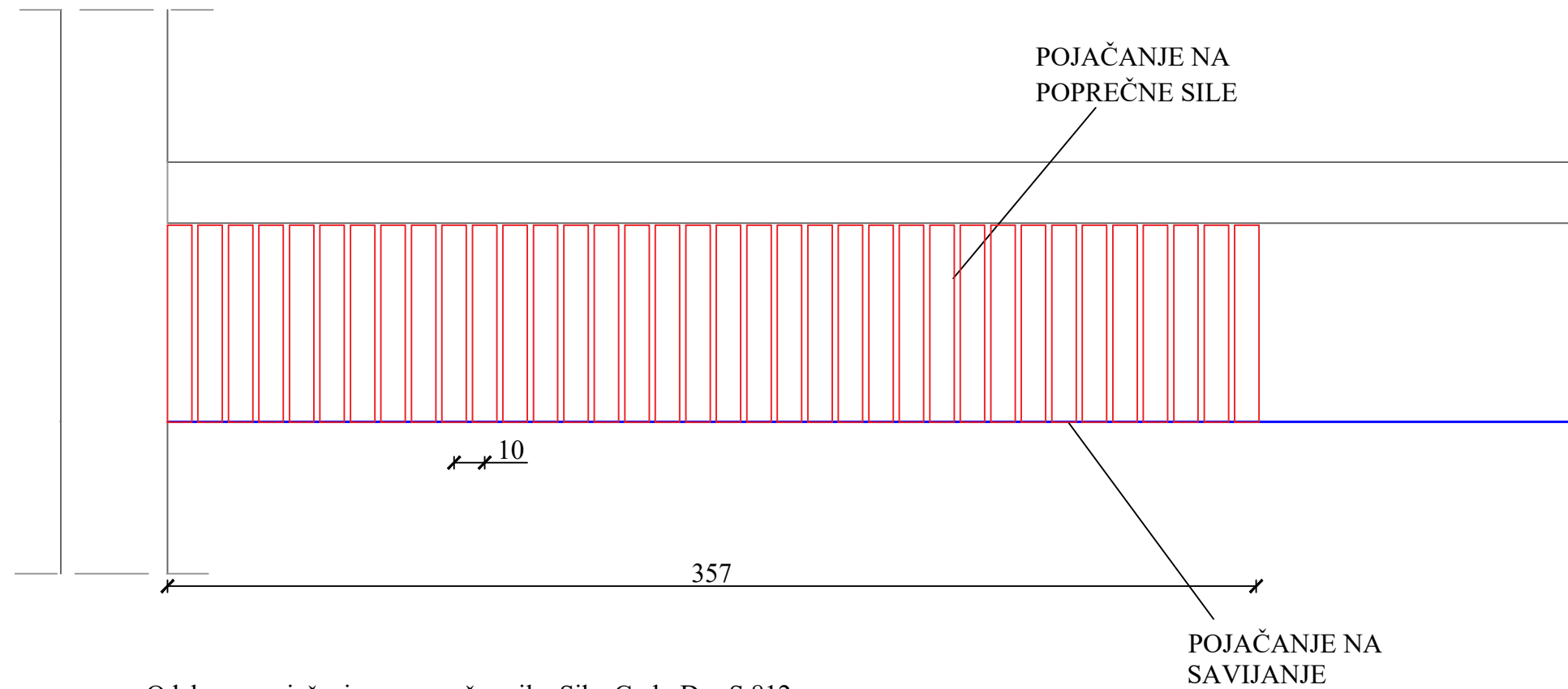
- širina trake: $b_f = 1$ cm
- debljina trake: $t_f = 3$ mm
- razmak pojačanja $s_f = 11$ cm

Odabrano pojačanje na momente savijanja: Sika CarboDur S 1014 u dva sloja

- širina trake: $b_f = 10$ cm
- debljina trake: $t_f = 1,4$ mm

GF GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacрта: Pojačanje grede na momente savijanja i poprečne sile - TR 55	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:20	List: 14

POJAČANJE GREDE NA MOMENTE SAVIJANJA I POPREČNE SILE - FIB 90

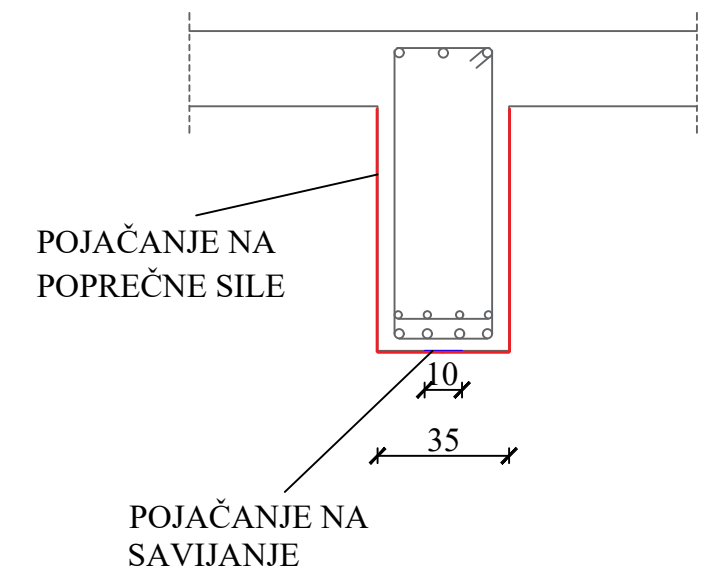


Odabrano pojačanje na poprečne sile: Sika CarboDur S 812

- širina trake: $b_f = 8$ cm
- debljina trake: $t_f = 1,2$ mm
- razmak pojačanja $s_f = 10$ cm

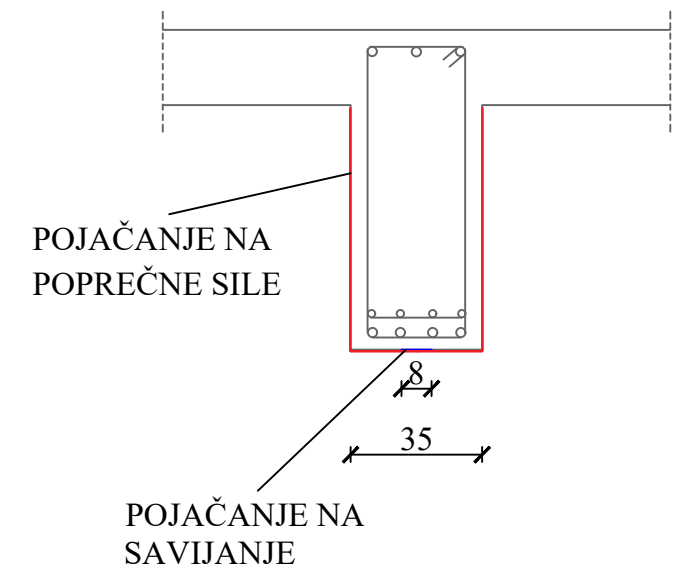
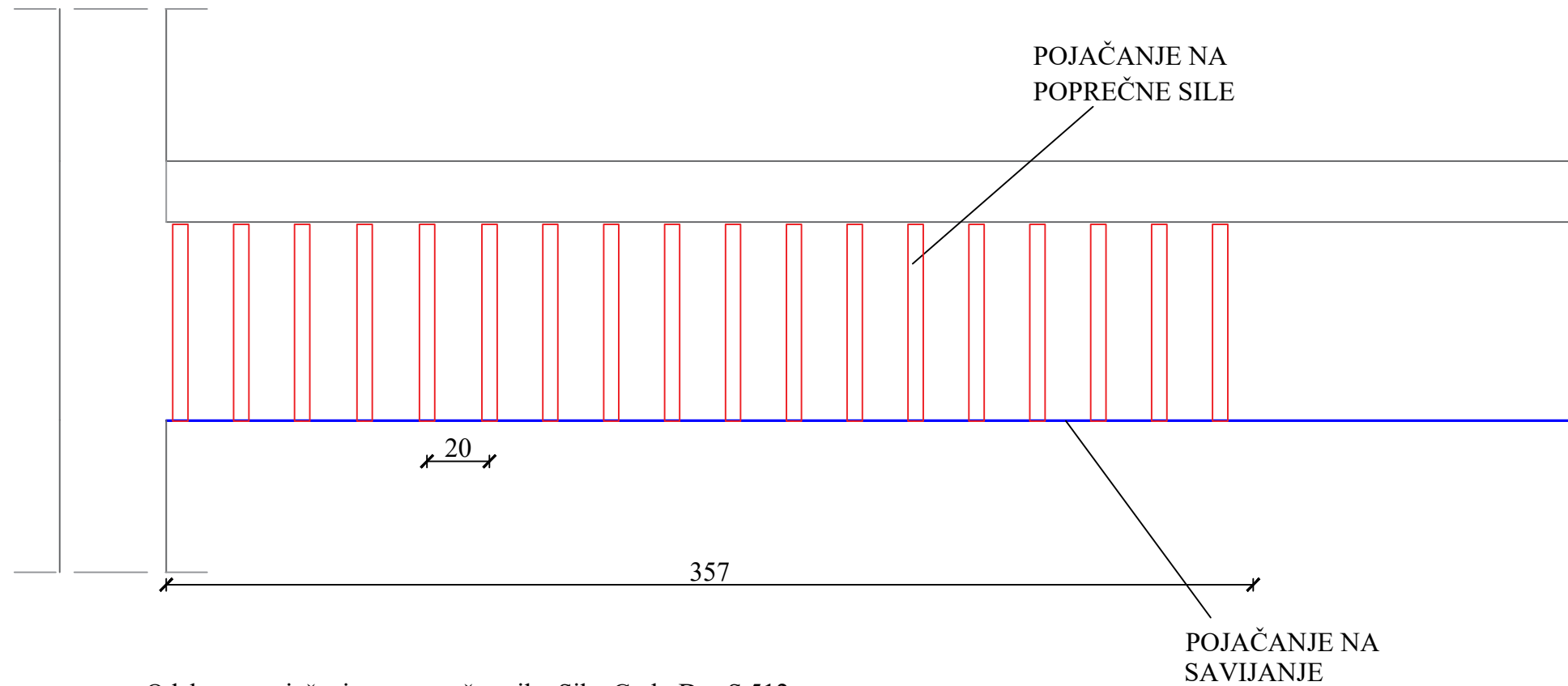
Odabrano pojačanje na momente savijanja: Sika CarboDur S 1014 u dva sloja

- širina trake: $b_f = 10$ cm
- debljina trake: $t_f = 1,4$ mm



GF GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacрта: Pjačanje grede na momente savijanja i poprečne sile - FIB 90	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:20	List: 15

POJAČANJE GREDE NA MOMENTE SAVIJANJA I POPREČNE SILE - FprEN



Odabrano pojačanje na poprečne sile: Sika CarboDur S 512

- širina trake: $b_f = 5$ cm
- debljina trake: $t_f = 1,2$ mm
- razmak pojačanja $s_f = 20$ cm

Odabrano pojačanje na momente savijanja: Sika CarboDur S 812 u tri sloja

- širina trake: $b_f = 8$ cm
- debljina trake: $t_f = 1,2$ mm

GF GRAĐEVISNKI FAKULTET, SVEUČILIŠTE U RIJECI			
Diplomski rad POJAČANJE POSTOJEĆIH ARMIRANOBETONSKIH GREDA I PLOČA S POLIMEROM ARMIRANIM UGLJIČNIM VLAKNIMA (CFRP)		Sadržaj nacрта: Pojačanje grede na momente savijanja i poprečne sile - FprEN	
Student: Sara Hek		Kolegij: Betonske i zidane konstrukcije 2	
Mentor: prof.dr.sc. Davor Grandić	Datum: veljača 2024.	Mjerilo: 1:20	List: 16