

GRAĐEVINSKI FAKULTET
UNIVERZITETA U BEOGRADU
Odsek za konstrukcije
Katedra za materijale i konstrukcije (MIK)
Master studije (28+28)
I semester (2+2)
V.prof. dr Ivan Ignjatović

SANACIJE, REKONSTRUKCIJE I ODRŽAVANJE BETONSKIH KONSTRUKCIJA U VISOKOGRADNJI

Ojačanja AB konstrukcija primenom FRP vlakana

Ojačanje primenom veštačkih vlakana

FRP (Fibre Reinforced Polymer)

FRP materijal sadrži veliki broj finih vlakana, izraženih mehaničkih karakteristika, unutar matrice od epoksi smole. U zavisnosti od vrste vlakana, postoje: AFRP (aramidna), **CFRP** (karbonska) ili GFRP (staklena).

Osnovne **mehaničke karakteristike** određuju se u zavisnosti od karakteristika sastojaka - vlakana (vl) i matrice (m) i njihovih zapreminskih zastupljenosti (V):

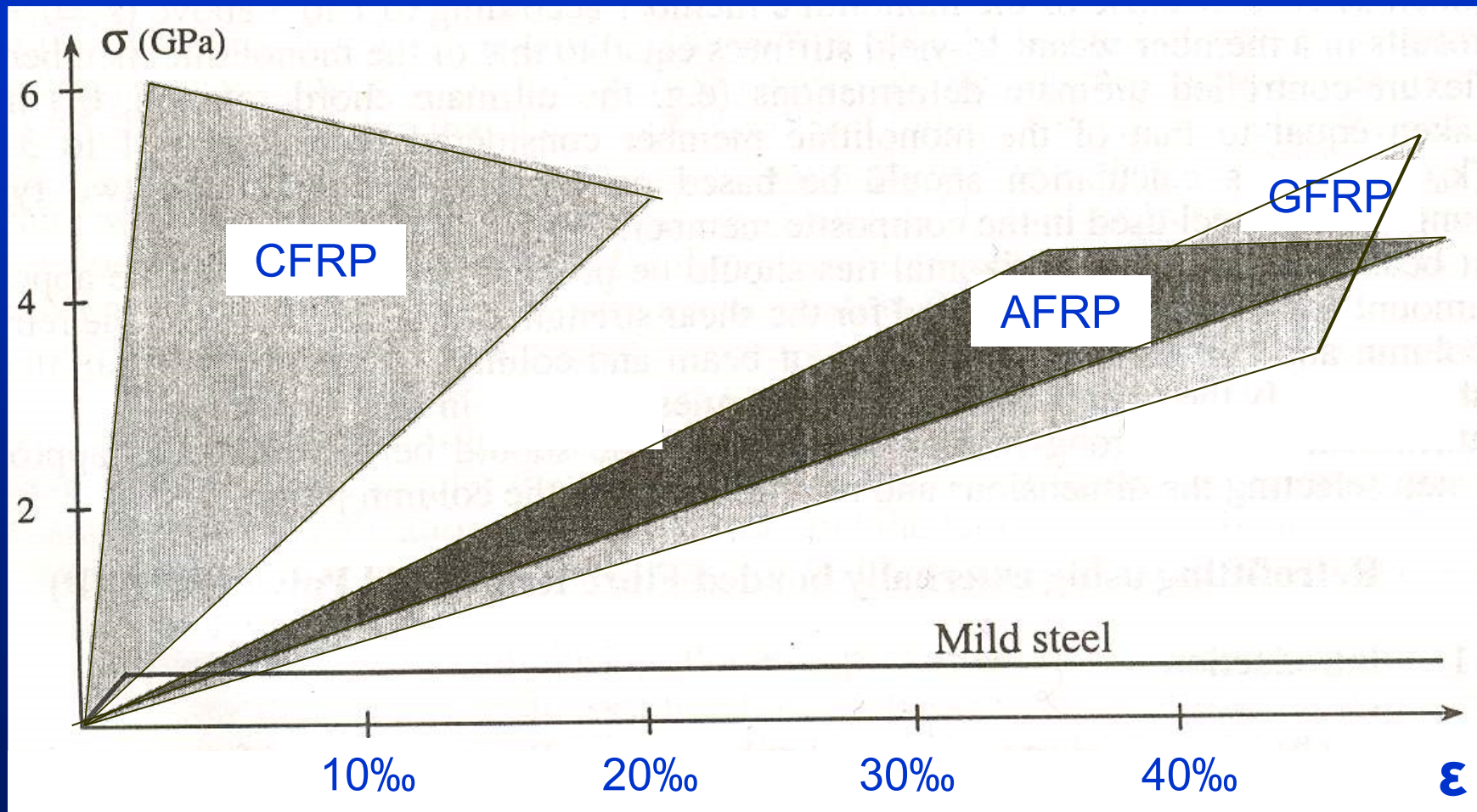
$$E_f = E_{vl} \cdot V_{vl} + E_m \cdot V_m$$

$$f_f = f_{vl} \cdot V_{vl} + f_m \cdot V_m \quad \text{gde je: } E - \text{moduo}$$

elastičnosti, f - čvrstoća na zatezanje.

Ojačanje primenom veštačkih vlakana - FRP

Dijagram napon-dilatacija pri zatezanju za razne vrste vlakana



Ojačanje primenom karbonskih vlakana

CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer)

KARBONSKE TRAKE se izrađuju od vlakana
prečnika 0.01 do 0.10 mm

Proizvode se kao:

TRAKE-LAMINATI u kojima su vlakna međusobno
slepljena odgovarajućim epoksidnim vezivom -
matricom

TRAKE-TKANINE dobijene tkanjem "konaca"
formiranih od karbonskih vlakana

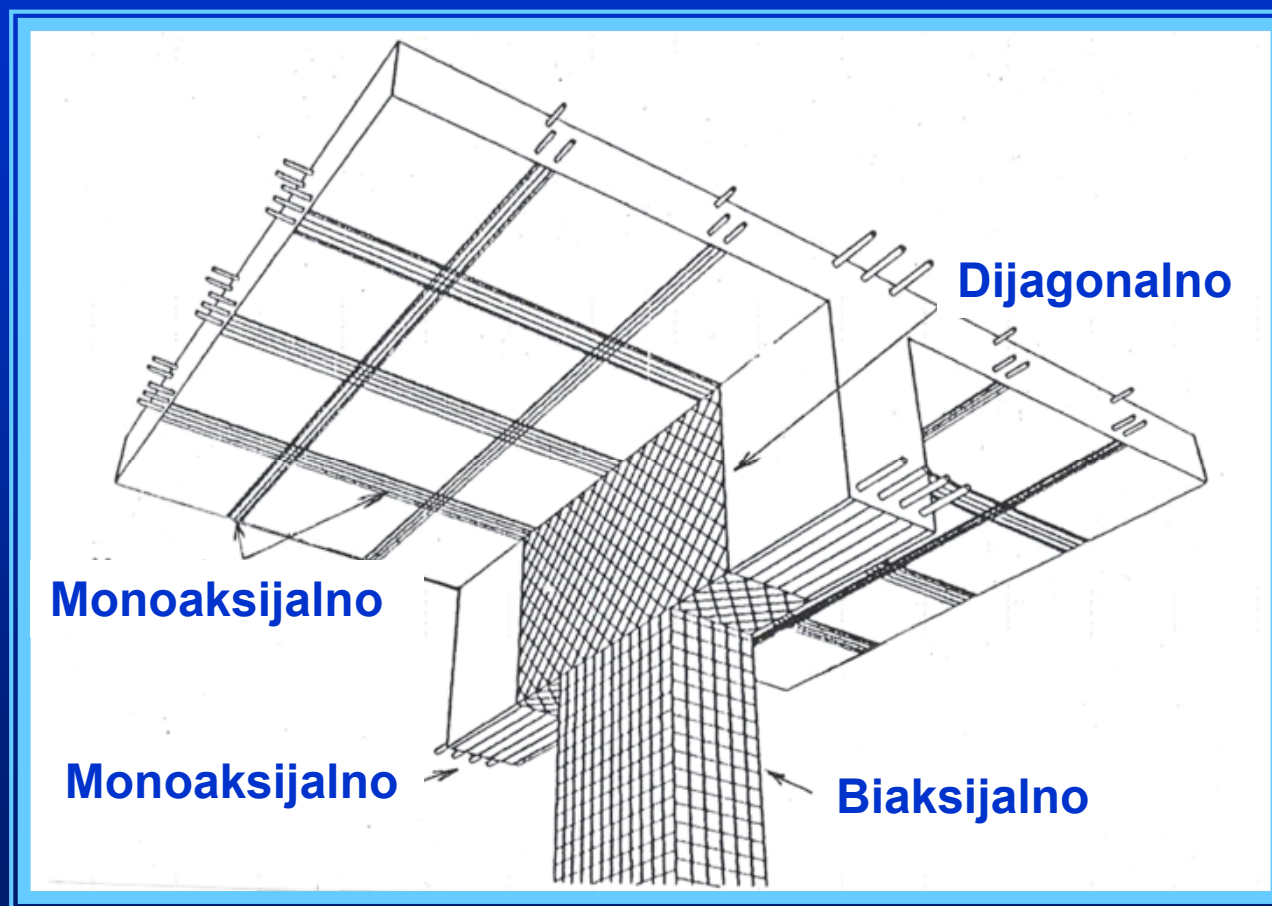
Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP

Trake-laminati mogu da prihvate samo opterećenja (sile) u podužnom pravcu - u pravcu svog pružanja

Trake-tkanine mogu da budu nosive u više pravaca u zavisnosti od načina tkanja "vlakana":

- **Monoaksijalne trake - tkanine** - trake koje imaju "vlakna" samo u jednom pravcu,
- **Biaksijalne trake** imaju "vlakna" (tkanje) u dva međusobno upravna pravca,
- Trake sa **dijagonalnim tkanjem**, gde "vlakna" sa osom trake zaklapaju uglove od 45°

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



Primer postupka ojačanja primenom monoaksijalnih, biaksijalnih i dijagonalnih karbonskih traka-tkanina

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP

<i>Kriterijum</i>	<i>Čelične lamele</i>	<i>Karbonske trake</i>
Sopstvena težina	<i>Visoka</i>	<i>Mala</i>
Čvrstoća pri zatezanju	<i>Visoka</i>	<i>Vrlo visoka</i>
Debljina	<i>Mala</i>	<i>Vrlo mala</i>
Mogućnost korozije	<i>Postoji</i>	<i>Ne postoji</i>
Dužina	<i>Ograničena</i>	<i>Neograničena</i>
Obrada, ponašanje	<i>Složena, kruto</i>	<i>Laka, fleksibilno</i>
Pravac nošenja	<i>U svim pravcima</i>	<i>Samo u određenim pravcima</i>
Mogućnost previjanja	<i>Komplikovano</i>	<i>Lako</i>
Otpornost prema zamoru	<i>Značajna</i>	<i>Dovoljna</i>
Cena	<i>Niska</i>	<i>Visoka</i>
Cena ugrađivanja	<i>Visoka</i>	<i>Niska</i>
Specifična oprema pri primeni	<i>Sredstva za pridržavanje</i>	<i>Nije potrebna</i>

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP

Karbonske trake se proizvode u praktično neograničenim dužinama

TRAKE - LAMINATI imaju debljine do oko 2 mm i širine do 200 mm

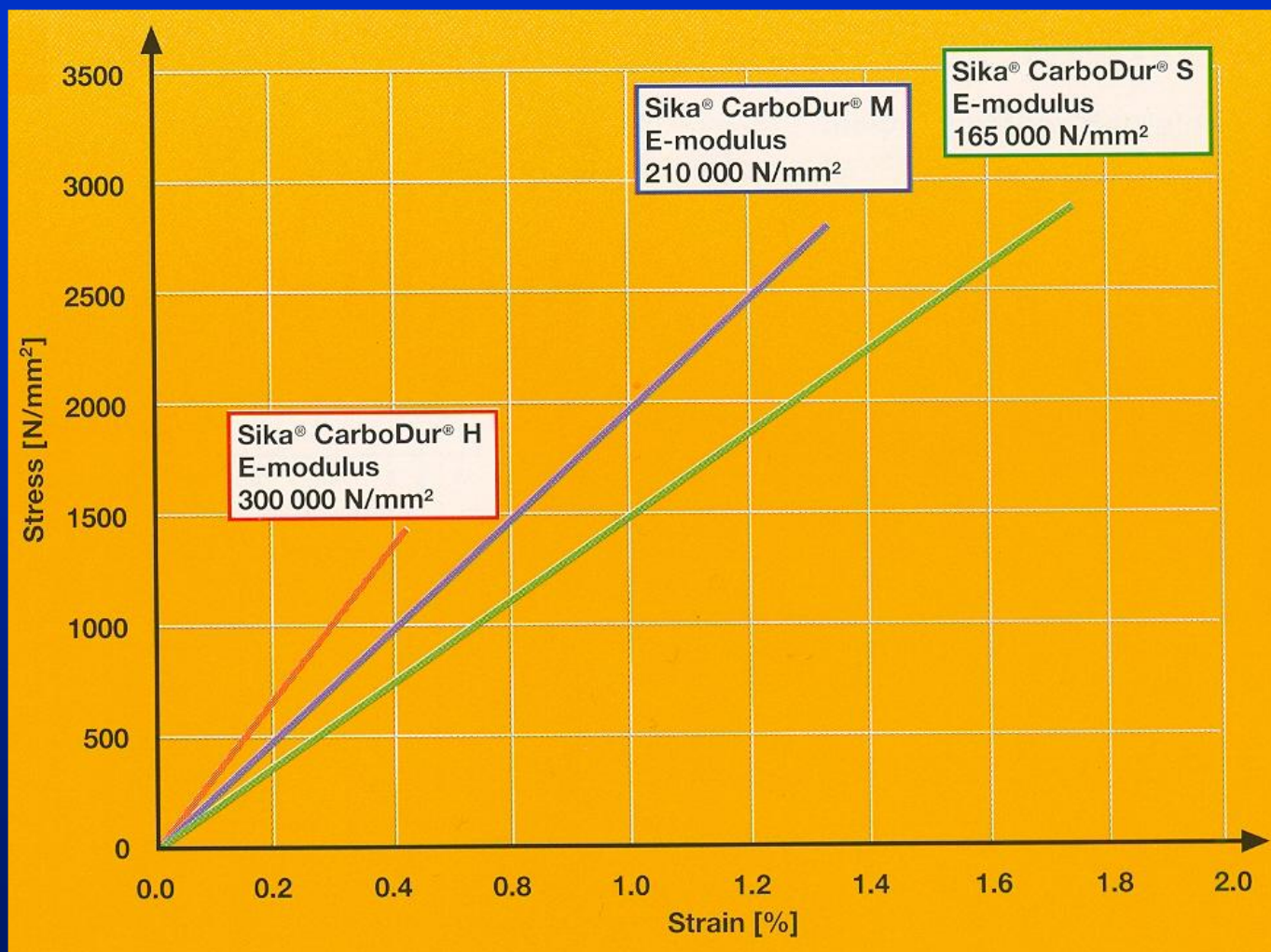
TRAKE - TKANINE imaju efektivne (neto) debljine do nekoliko desetih delova milimetra, dok su im širine najčešće 200 - 1000 mm

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP

Osnovne tehničke karakteristike *traka-laminata* (SIKA - Švajcarska)

Karakteristika	Oznaka trake		
	Sika CarboDur S	Sika CarboDur M	Sika CarboDur H
Debljina (mm)	1.2 i 1.4	1.4	1.4
Širina (mm)	50-150	50-120	50
Modul elastičnosti (MPa)	165000	210000	300000
Čvrstoća pri zatezanju (MPa)	2800	2400	1300
Granična deformacija pri lomu - kidanju (%)	> 1.7	> 1,2	> 0.45

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



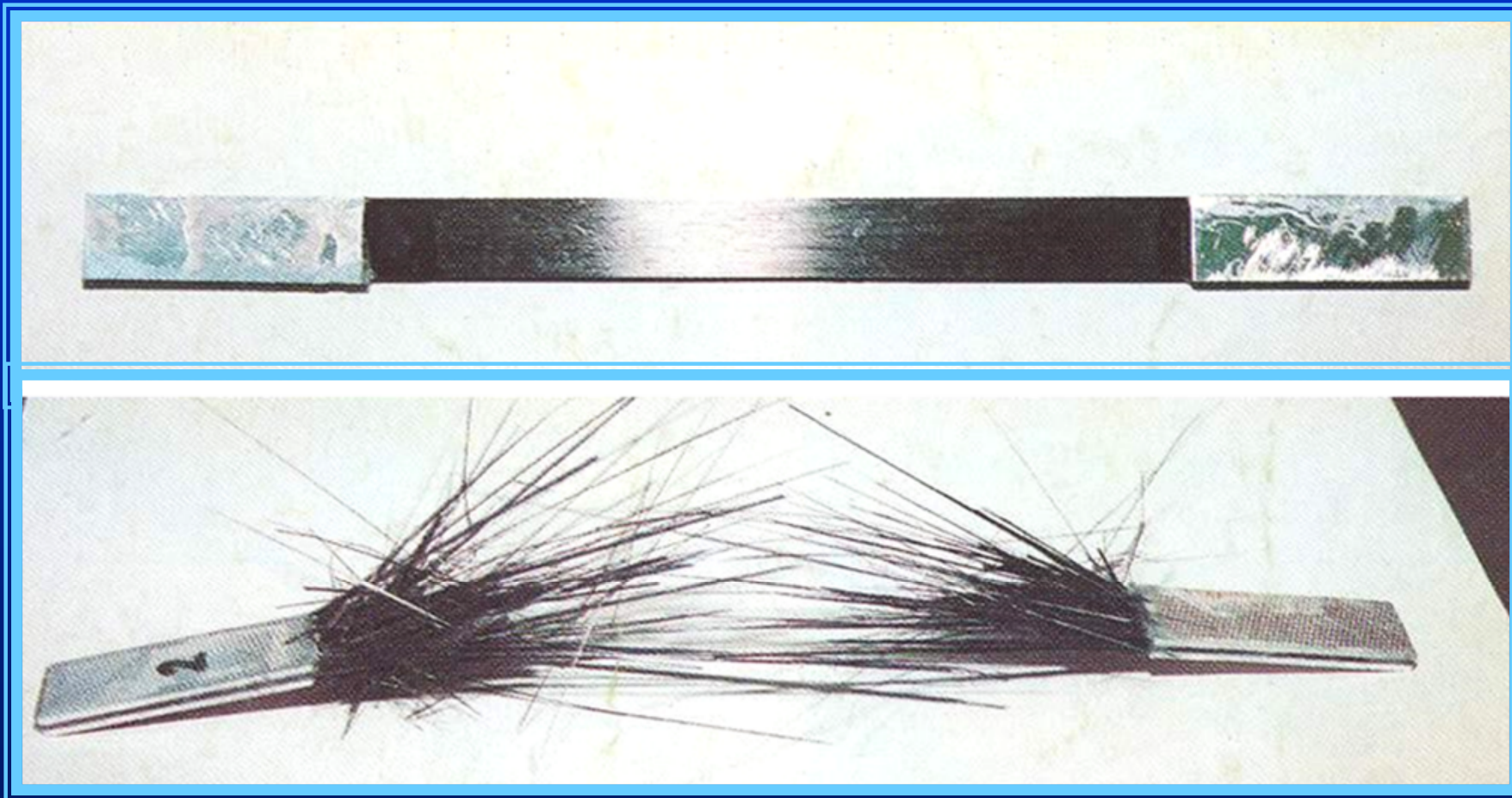
Dijagrami napon – dilatacija različitih laminata: H, M, S

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP

Osnovne tehničke karakteristike traka - tkanina (SINIT - Italija)

Karakteristika	Oznaka trake S&P Sheet 240	
Tip trake	Monoaksijalna	Monoaksijalna
Masa (g/m ²)	200	300
Modul elastičnosti (MPa)	240000	240000
Čvrstoća pri zatezanju (MPa)	3800	3800
Granična deformacija pri lomu - kidanju (%)	1.55	1.55
Specifična masa (gustina) vlakana (g/cm ³)	1.7	1.7
Efektivna (neto) debljina (mm)	0.117	0.176
Širina (mm)	300	300

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



Uzorak trake-laminata pre i nakon ispitivanja na zatezanje

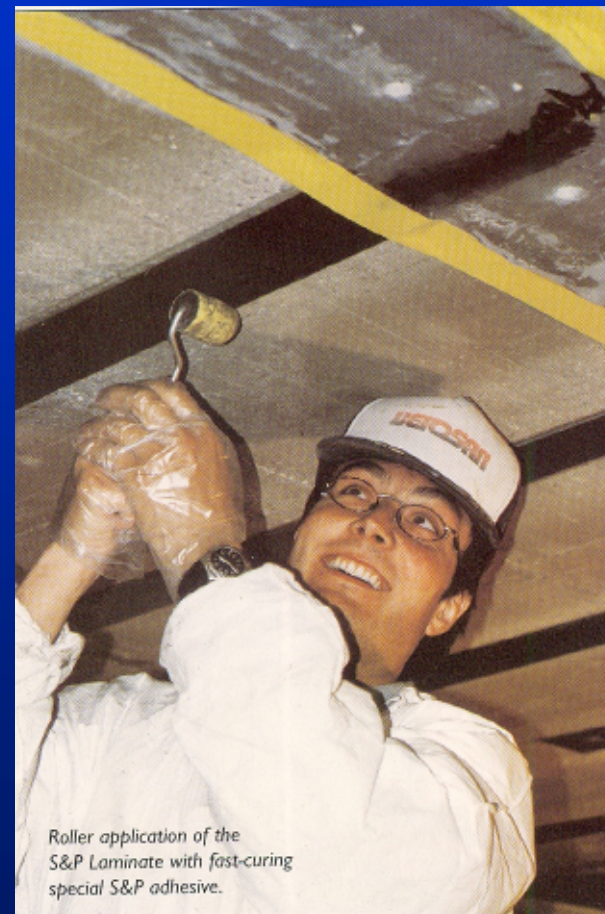
Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP

LEPLJENJE karbonskih traka za konstrukcijske elemente od betona izvodi se primenom odgovarajućih **EPOKSIDNIH LEPKOVA**

Ti lepkovi predstavljaju proizvode koje zajedno sa trakama isporučuje proizvođač određenih traka

To podrazumeva da se uvek mora koristiti **lepak kompatibilan sa određenom trakom**, a što se uvek definiše i uslovljava od strane proizvođača trake

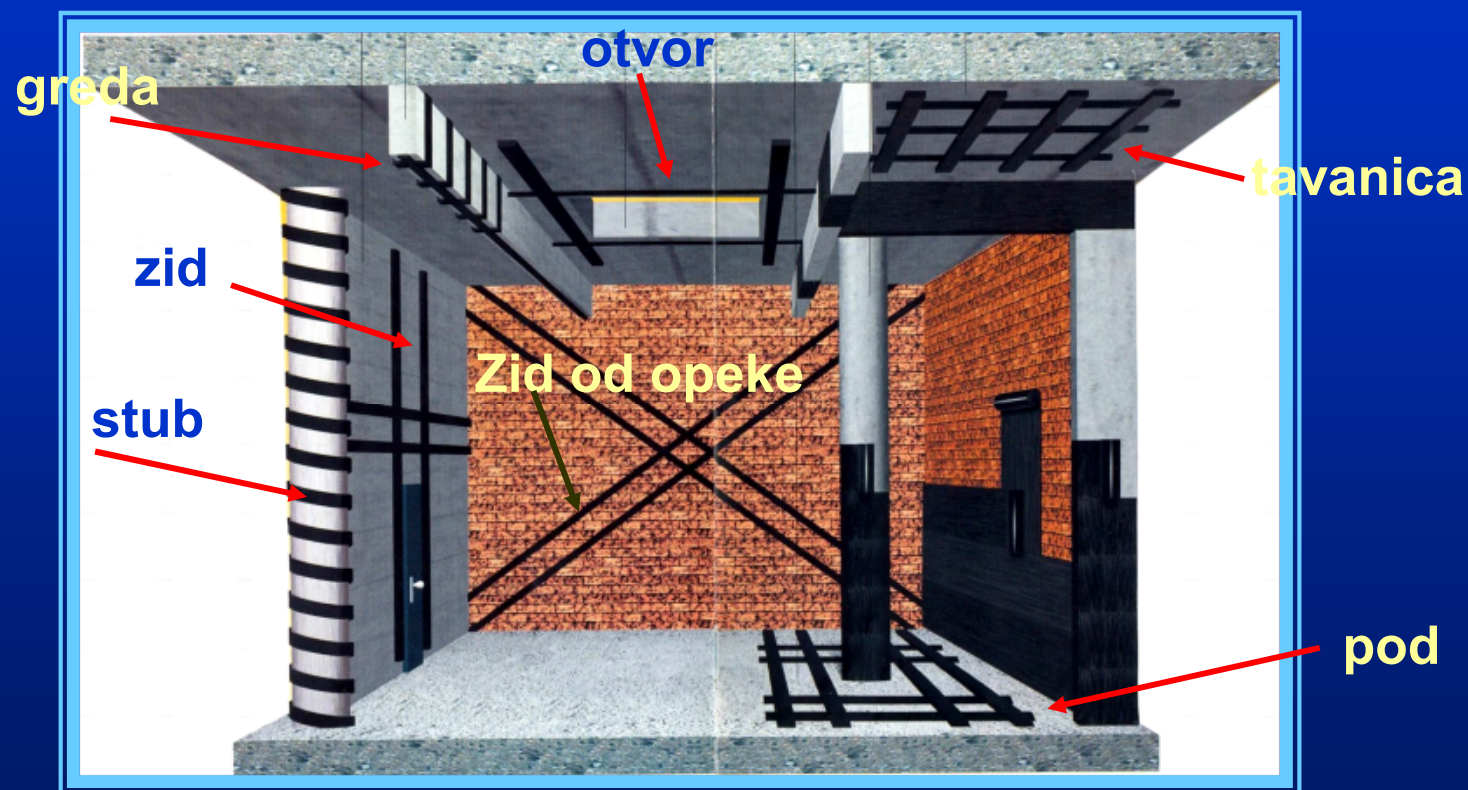
Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



Roller application of the S&P Laminate with fast-curing special S&P adhesive.

Ojačanje greda lamelama i izvođenje

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



Primer mogućnosti ojačanja različitih elemenata
armiranobetonske konstrukcije

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



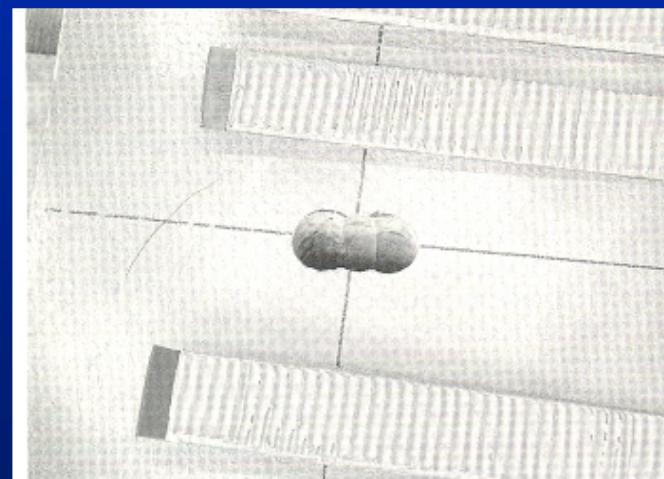
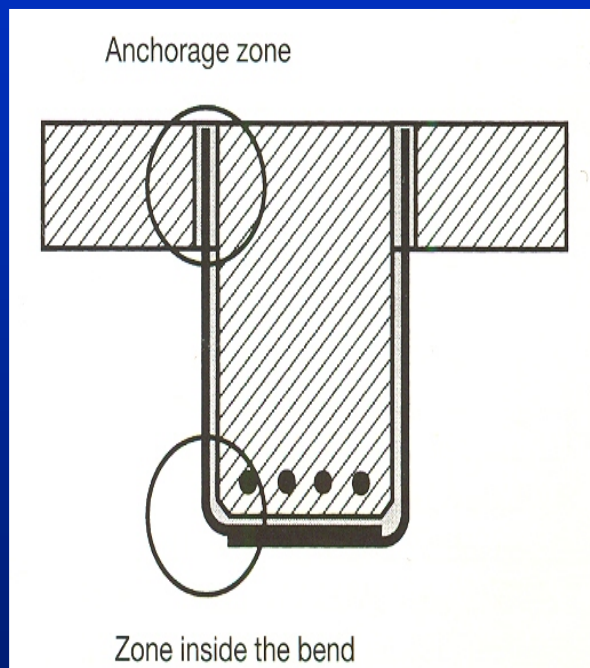
Ojačanje greda u polju i kod oslonaca

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



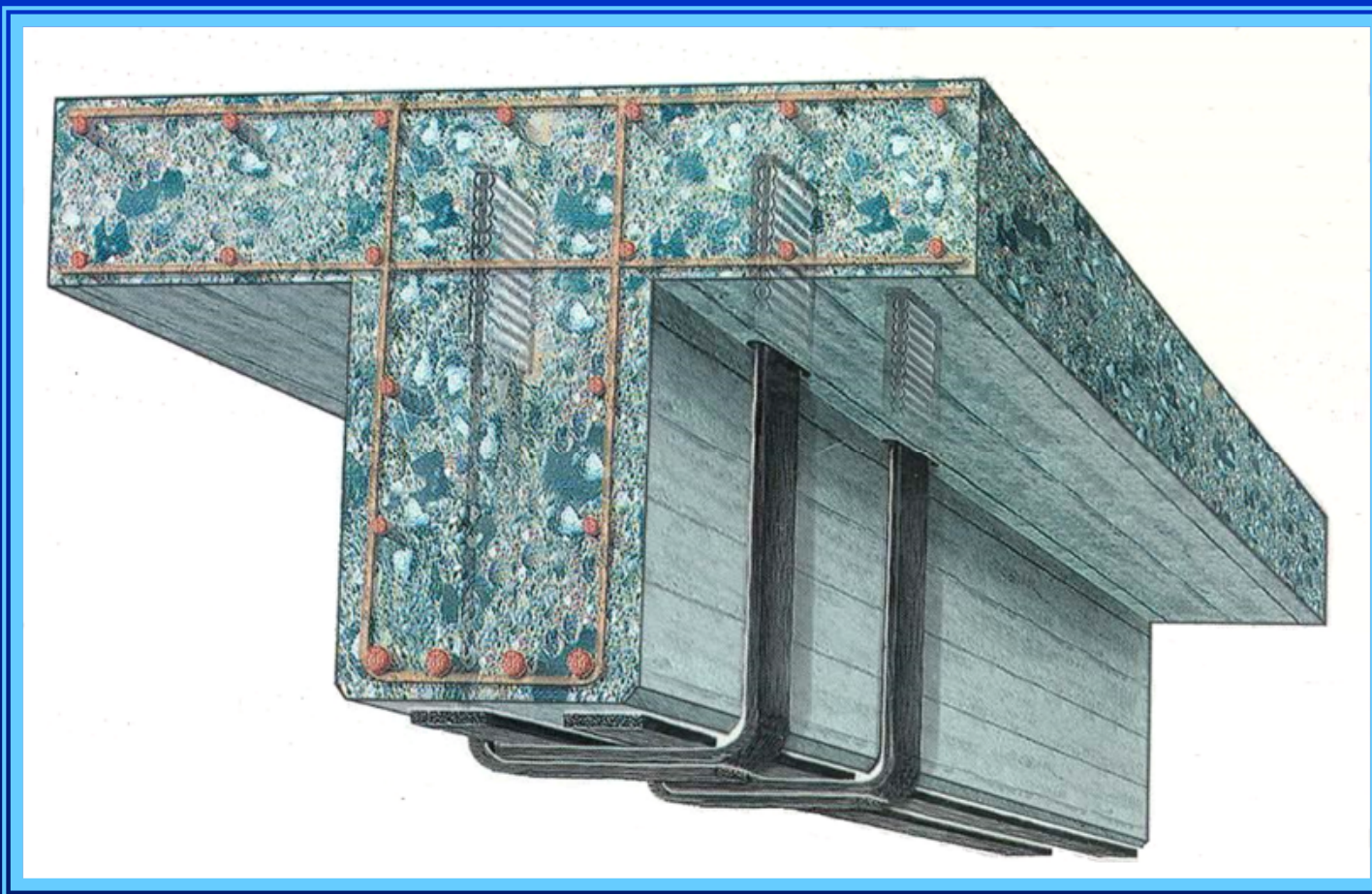
Lepljenje traka - tkanina za prijem kosih glavnih napona
zatezanja

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



Lamele **L** oblika za prijem kosih glavnih napona zatezanja:
zone ankerovanja i prevoja

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



Nosač T preseka sa podužnim i poprečnim ojačanjima u vidu zalepljenih traka - laminata L oblika

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



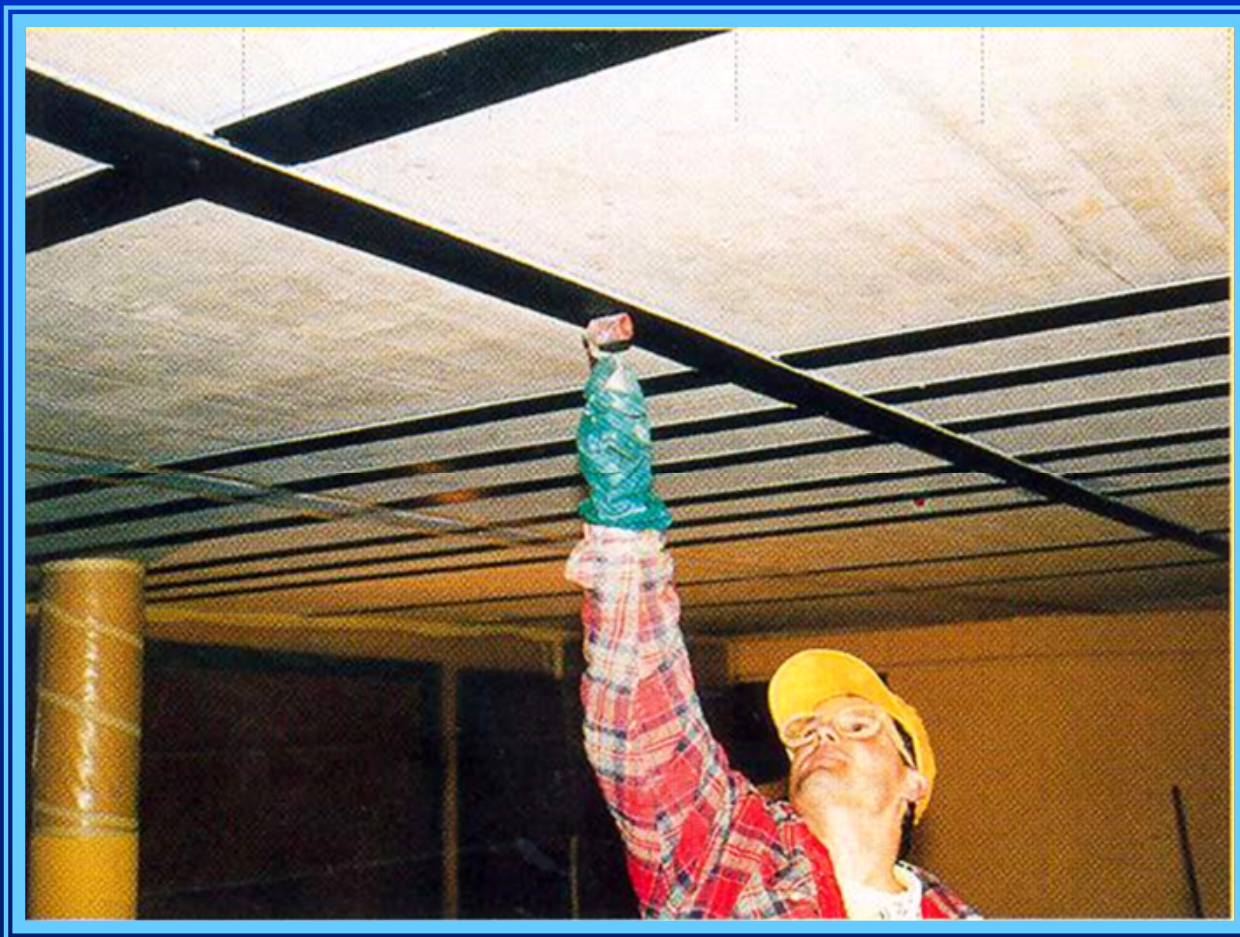
Lepljenje tkanina za prijem kosih glavnih napona zatezanja

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



Ojačanje ploče lepljenjem traka sa donje strane

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



Izvođenje ojačanja armiranobetonske ploče primenom traka - laminata

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



Ojačanje ploče lepljenjem traka iznad oslonca sa gornje strane ploče

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP

Lepljenje traka za površine betonskih elemenata podrazumeva prethodnu pripremu tih površina:

one moraju da budu ravne ili blago talasaste -
orapavljene peskarenjem ili brušenjem

Površinska vlažnost betona pri lepljenju karbonskih traka može da iznosi najviše

$$\leq 4\%$$

Radovi na lepljenju smeju se izvoditi samo na temperaturama

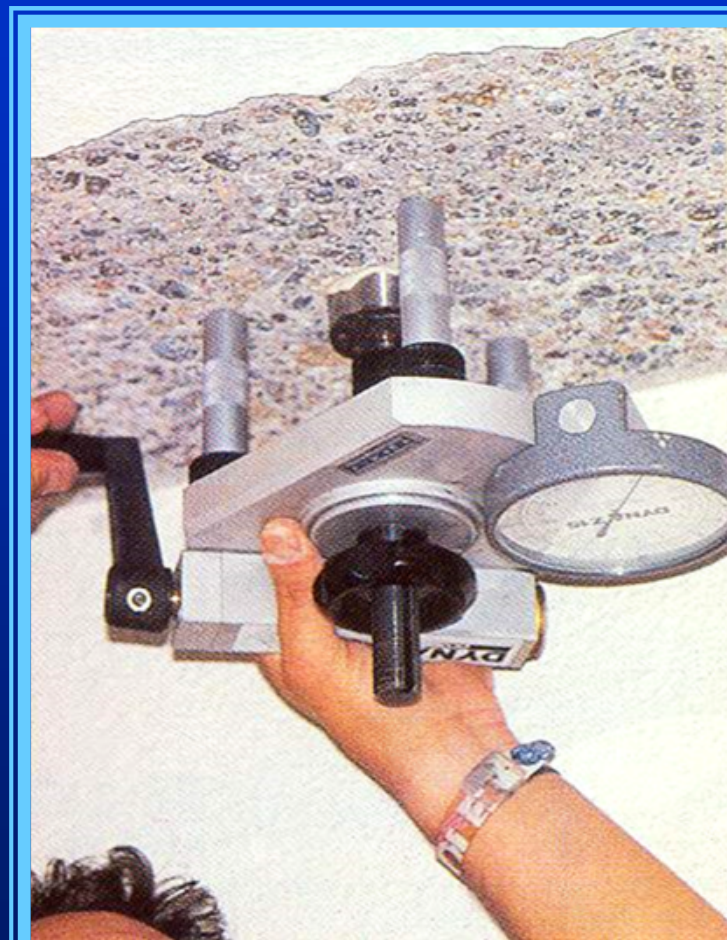
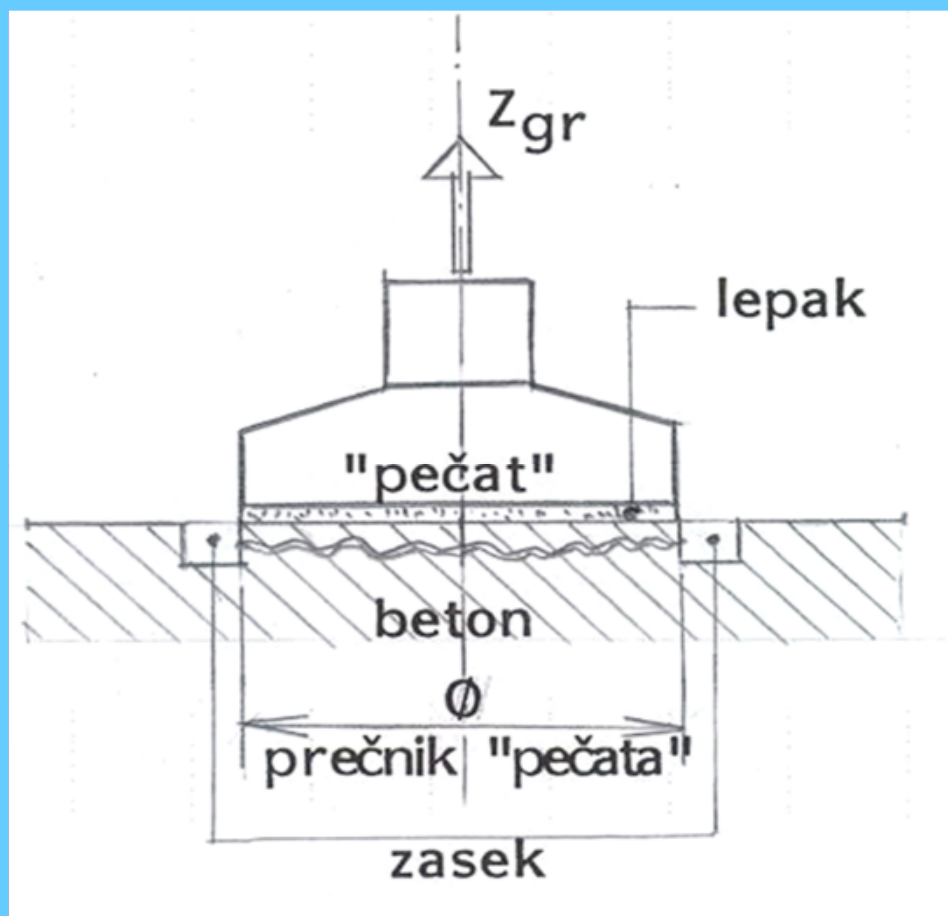
$$> 10^{\circ}\text{C}$$

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP

Pri primeni karbonskih traka postoji i uslov da se one mogu lepiti samo za betonske elemente **dovoljno visokih mehaničkih karakteristika**

To znači da se apliciranje traka može izvoditi samo na betonskim podlogama koje će obezbediti **zadovoljavajući stepen athezije** (prianjanja) između betona i lepka u toku eksploatacije posle ojačanja

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



Ispitivanje athezije beton-lepak metodom "otkidanja" zalepljenog "pečata"

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP

Uslovi u pogledu podobnosti betona za lepljenje karbonskih traka:

$f_{at} > 1.5 \text{ MPa}$

**kada se primenjuju trake -
laminati**

$f_{at} > 1.0 \text{ MPa}$

kada se primenjuju tkanine

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP

Osnove proračuna

Dimenzionisanje se zasniva na konceptu sigurnosti u odnosu na granična stanja

Dimenzionisanje prema graničnim stanjima (LS) podrazumeva sledeće kontrole:

1. graničnog stanja upotrebljivosti (SLS),
2. graničnog stanja nosivosti (ULS),
3. neočekivanih (slučajnih) situacija - udar, požar, vandalizam

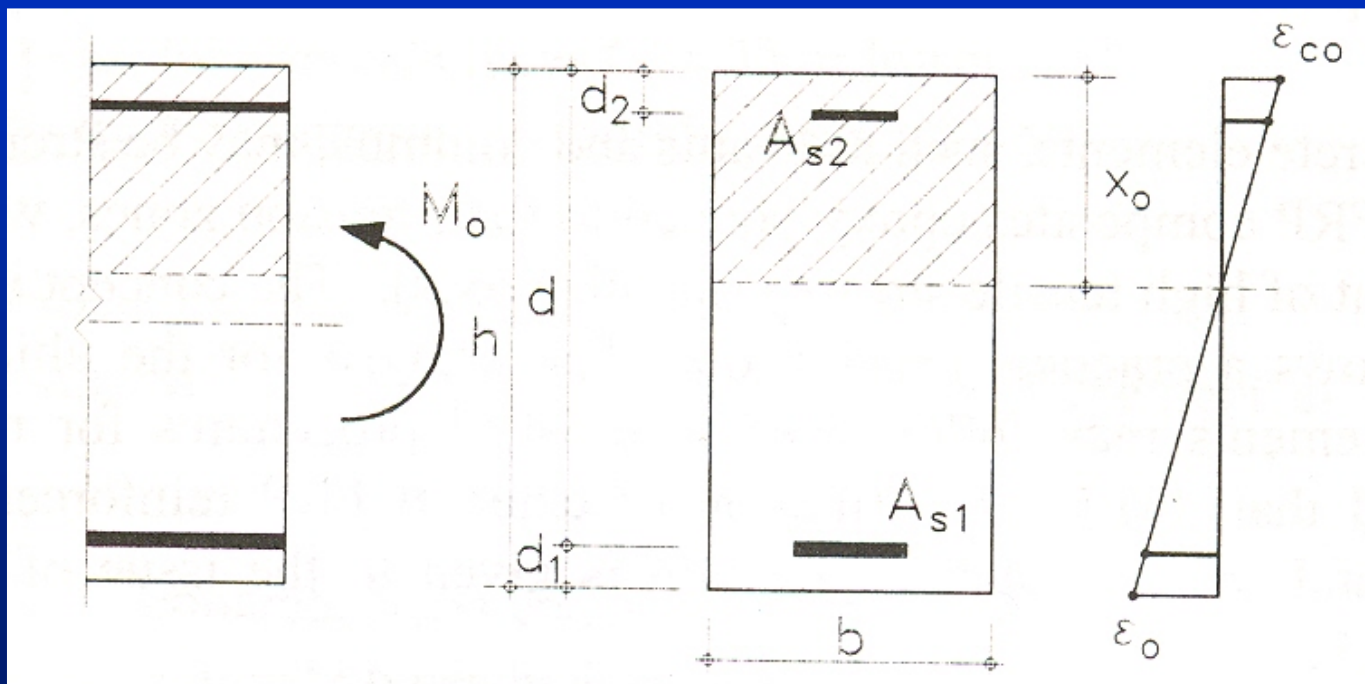
Granično stanje upotrebljivosti-SLS

Osnove proračuna

- proračun se sprovodi linearno - elastičnom analizom
- Za stanje eksploatacije (posle izvršene sanacije) zahteva se ograničenje napona u betonu, čeliku i karbonskim trakama:
 - $\sigma_c \leq 0.45 f_{ck}$ za kvazi stalno opterećenje
 - $\sigma_c \leq 0.6 f_{ck}$ za retke kombinacije opterećenja
 - $\sigma_s \leq 0.8 f_{yk}$ za retke kombinacije opterećenja
 - $\sigma_f \leq \eta f_{fk}$ za kvazi stalna opterećenje ($\eta=0.8$ za CFRP, $\eta=0.5$ za AFRP, $\eta=0.3$ za GFRP)

Granično stanje upotrebljivosti

- Početna situacija pre ojačanja (moment M_0)



Presek opterećen na savijanje neposredno pre ojačanja:
geometrija i raspodela dilatacija

Granično stanje upotrebljivosti

Položaj neutralne linije preseka sa prslinom ($M_0 \geq M_{cr}$):

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

Dilatacija pritisnute ivice betona je $\rightarrow$

$$\varepsilon_{c0} = \frac{M_0 x_0}{E_c I_{c0}}$$

za $M_0 \geq M_{cr} \rightarrow I_{c0} = I_{02}$, pa je momenat inercije preseka sa prslinom:

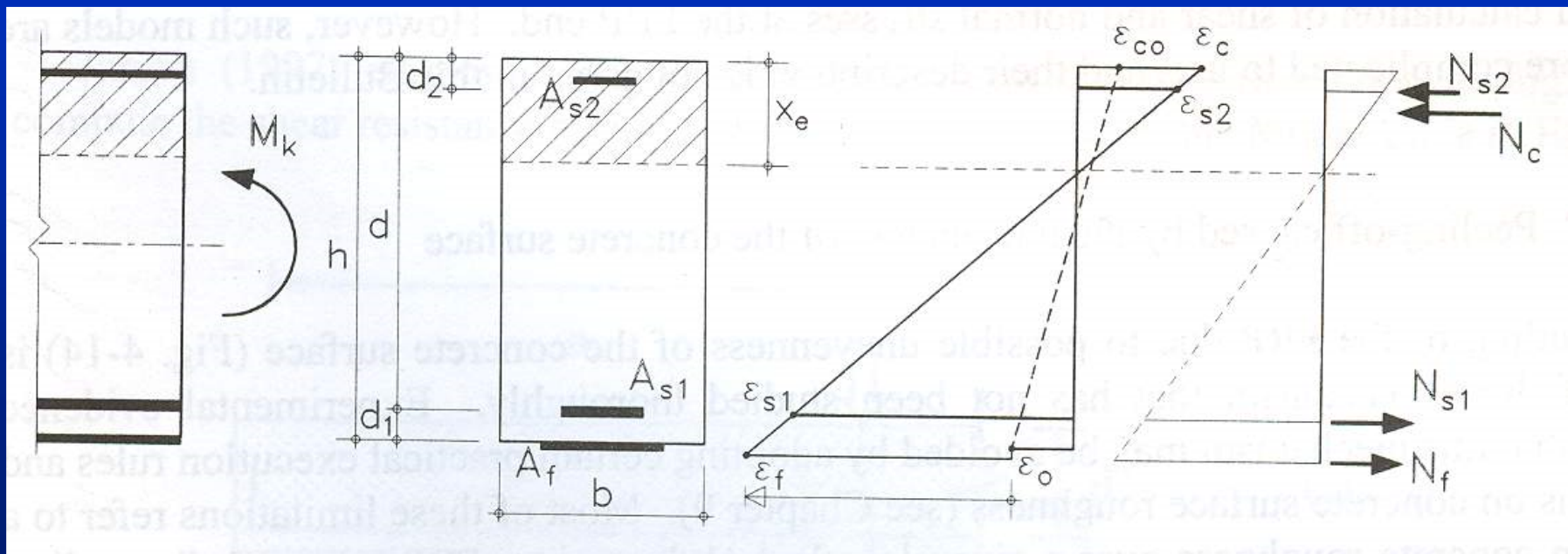
$$I_{02} = \frac{bx_0^3}{3} + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_0 - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1}(d - x_0)^2$$

početna dilatacija zategnute ivice je:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{c0} \frac{h - x_0}{x_0}$$

Granično stanje upotrebljivosti

- Stanje eksploatacije posle ojačanja



Presek sa prslinom opterećen na savijanje posle ojačanja:
geometrija, dilatacije i unutrašnje sile

Granično stanje upotrebljivosti

- Položaj neutralne linije (težišna linija aktivnog preseka)

$$\frac{1}{2}bx_e^2 + (\alpha_s - 1)A_{s2}(x_e - d_2) = \alpha_s A_{s1}(d - x_e) + \alpha_f A_f \left[h - \left(1 + \frac{\epsilon_0}{\epsilon_c} \right) x_e \right], \quad \text{gde je: } \alpha_f = E_f / E_c$$

Napon u betonu na pritisnutoj ivici preseka

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

Granično stanje upotrebljivosti

- Sa uprošćenjima ($A_{s2} \approx 0$ i $h/d \approx 1.1$) sledi:

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_c = \frac{M_k}{\frac{1}{2} b x_e \left(1.05 d - \frac{x_e}{3} \right)}$$

odnosno,

pa je napon u armaturi:

$$\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \approx \frac{M_0}{M_k} \frac{x_e}{x_0}$$

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_c \frac{d - x_e}{x_e} \leq 0.80 f_{yk}$$

i napon u FRP:

$$\sigma_f = E_f \left(\varepsilon_c \frac{h - x_e}{x_e} - \varepsilon_0 \right) \leq \eta f_{fk}$$

Granično stanje nosivosti - ULS

Ojačani AB element mora dostići granično stanje loma na **duktilan** način, dakle, bez loma po betonu, loma po CFRP i bez loma na vezi:

- ograničenje **visine pritisnute zone betona** na:
 - $x/d \leq 0.45$ za beton kvaliteta C35/45 i nižeg
 - $x/d \leq 0.35$ za beton višeg kvaliteta od C35/45
- ograničenje **dilatacije pri lomu vlakana FRP**:
 - $\varepsilon_{fu,c} \geq 5 \text{ ‰}$ za beton kvaliteta C35/45 i nižeg
 - $\varepsilon_{fu,c} \geq 7 \text{ ‰}$ za beton višeg kvaliteta od C35/45

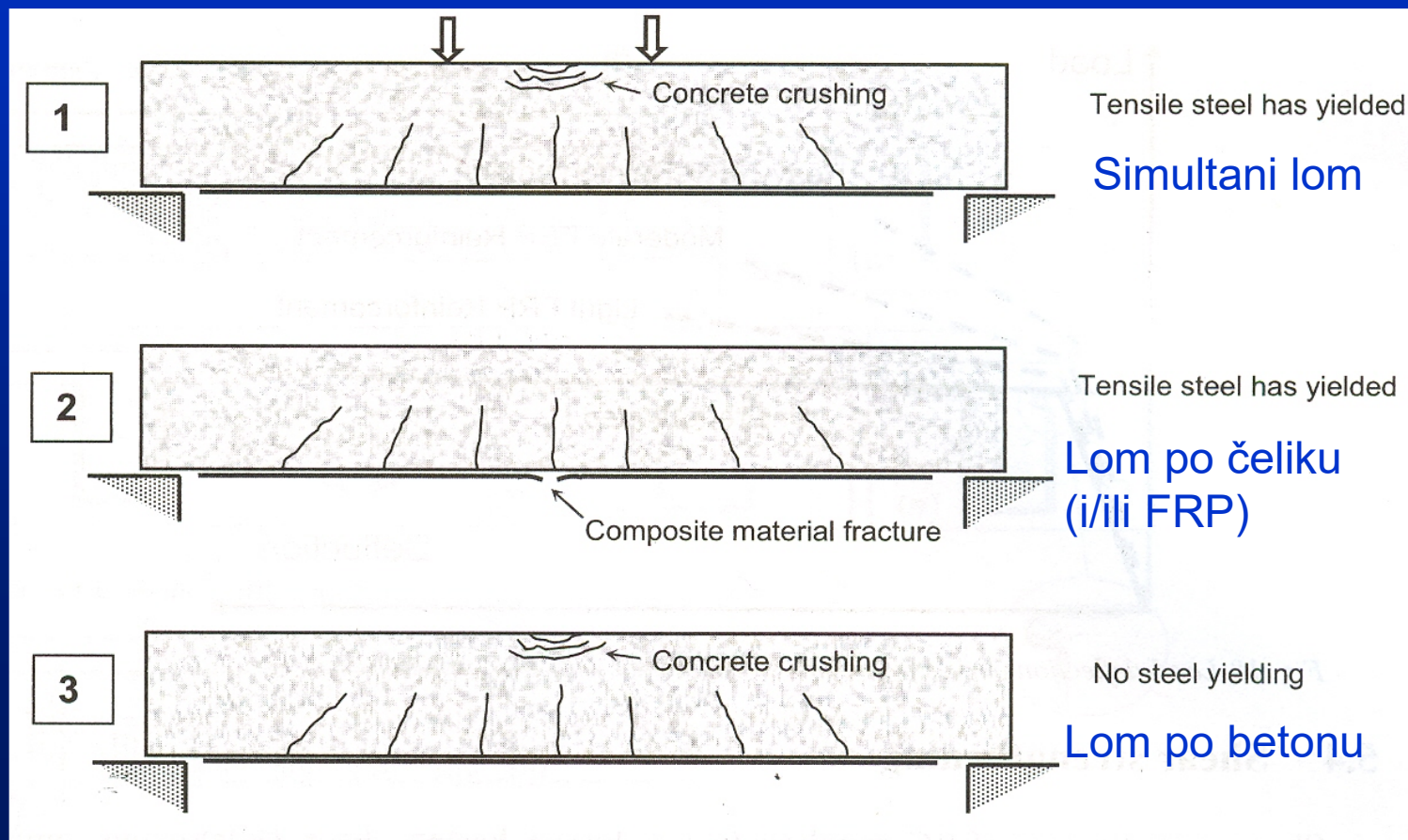
Granično stanje nosivosti

Načini loma:

1. Kada postoji puno sadejstvo betona i vlakana (FRP) – lom nastaje kao: **simultani**, ili kao lom **zatezanjem** (zajedno čelik i vlakna, ili pojedinačan lom), ili lom po **pritisnutom betonu**
2. Kada je gubitak sadejstva betona i vlakana – lom nastaje gubitkom veze na većoj dužini elementa (peeling-off) i to:
 - na **samoj vezi betona i FRP** (ali najčešće kroz beton),
 - kao posledica **pojave prslina** od savijanja ili od smicanja
 - kao posledica **neravne površine betona** (valovitost površine izaziva skretne sile na vezi betona i FRP)

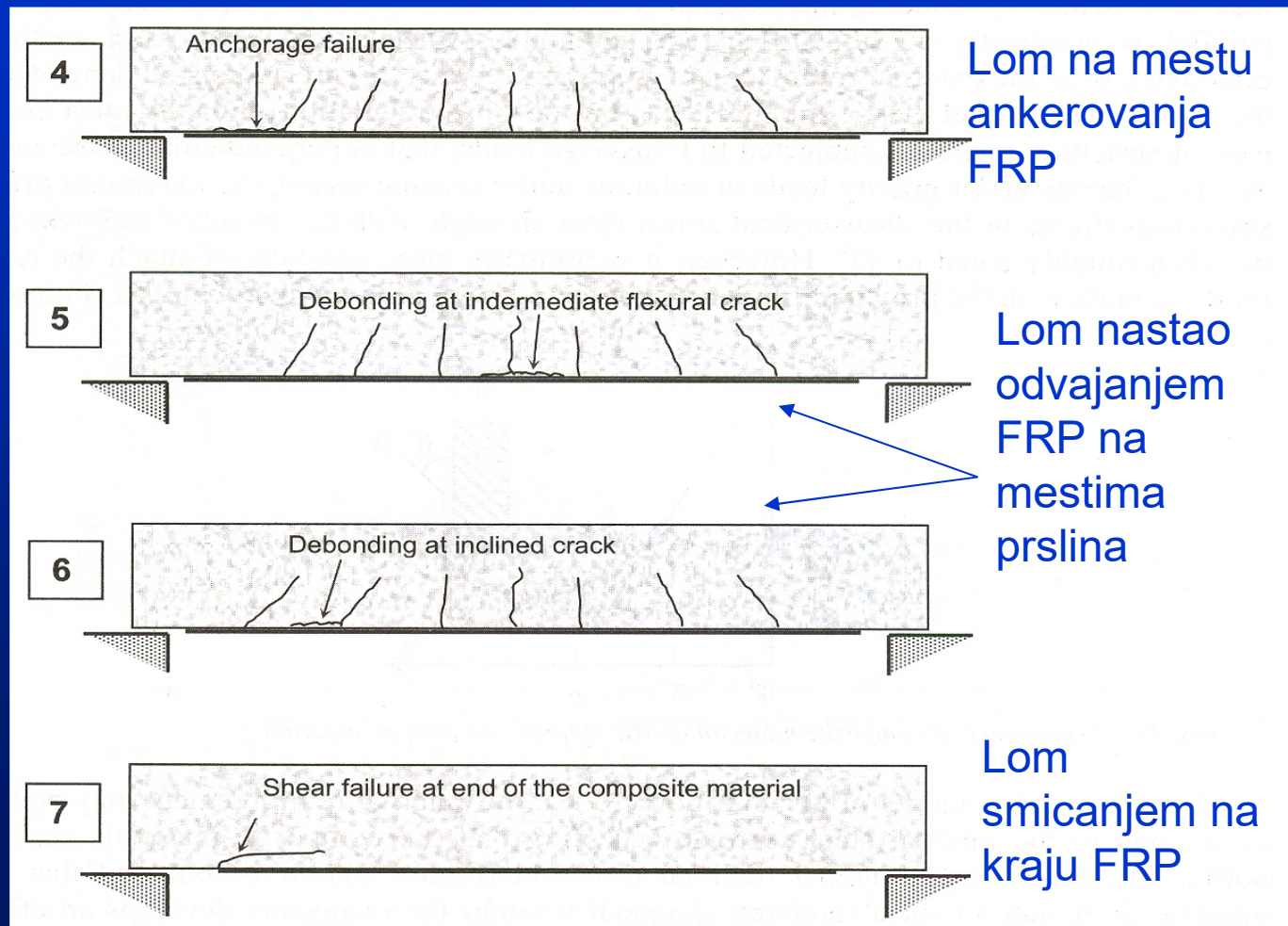
Granično stanje nosivosti

- Načini loma ojačanog AB elementa (kada postoji puno sadejstvo betona i vlakana):



Granično stanje nosivosti

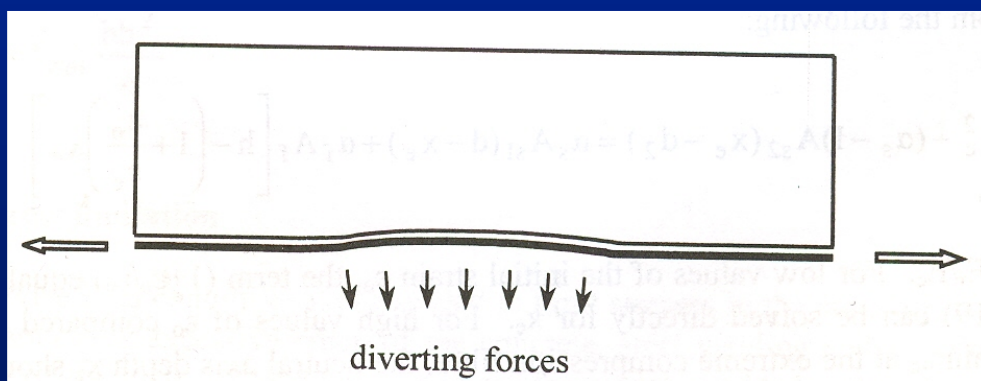
- Načini loma ojačanog AB elementa gubitkom veze:



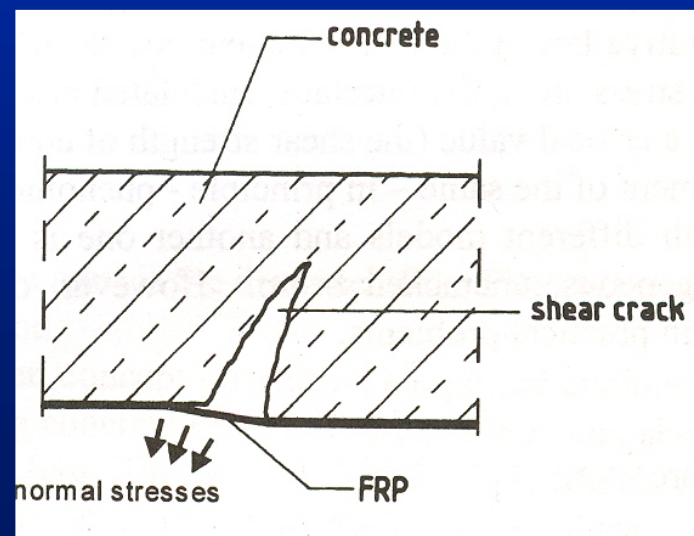
Granično stanje nosivosti

Mehanizam loma **gubitkom veze** (peeling-off) između betona i FRP, nastale usled:

Neravne površine betona



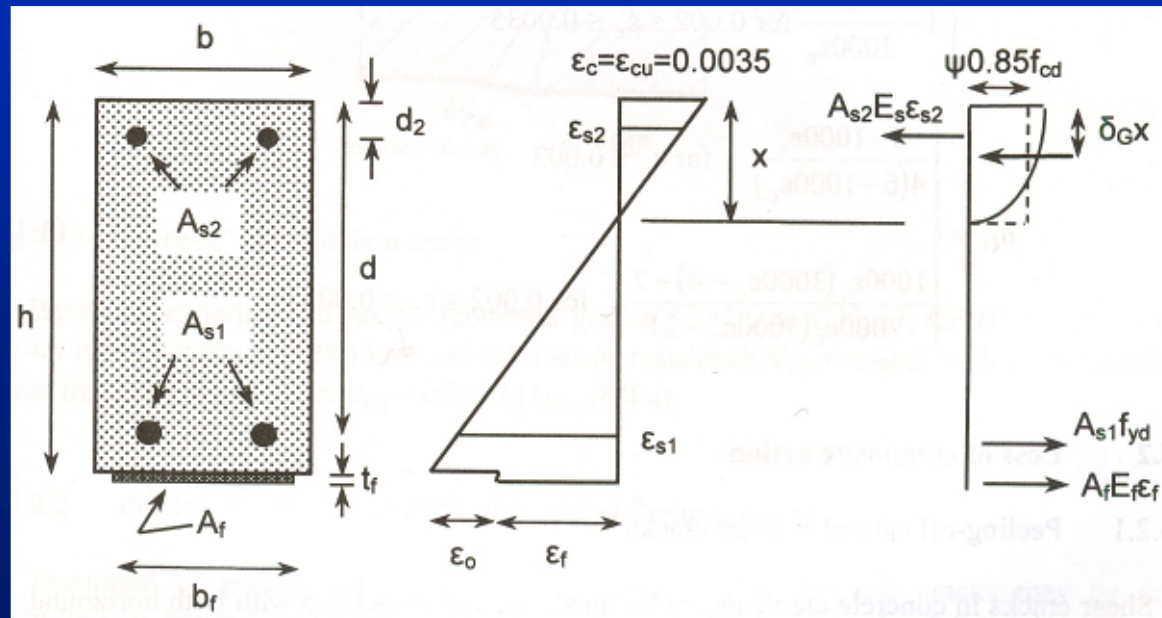
Pojave prsline



Granično stanje nosivosti

Simultani lom betona i zategnute armature

- Početna dilatacija u zategnutom betonu je ε_0
- Nema kidanja vlakana FRP



Oznake za
vlakna FRP:
 b_f - širina
 t_f - debljina
 E_f - moduo el.
 ε_f - dilatacija
 $\alpha_f = E_f / E_c$

Presek opterećen na savijanje: geometrija, raspodela
dilatacija i napona pri lomu

Granično stanje nosivosti

Proračun položaja neutralne ose

$$0.85 \psi f_{cd} b x + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} = A_{s1} f_{yd} + A_f E_{fu} \varepsilon_f$$

gde se usvaja da su: $\psi = 0.8$ i $\delta_G = 0.4$

dilatacija u zategnutoj armaturi je:

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \frac{x - d_2}{x}$$

dilatacija u vlaknima FRP:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0$$

Granično stanje nosivosti

Proračunski granični moment nosivosti
ojačanog preseka

$$M_{Rd} = A_{s1} f_{yd} (d - \delta_G x) + A_f E_f \varepsilon_f (h - \delta_G x) + \\ + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} (\delta_G x - d_2)$$

Pri tome se moraju kontrolisati dilatacije u
zategnutoj armaturi i u FRP vlaknima:

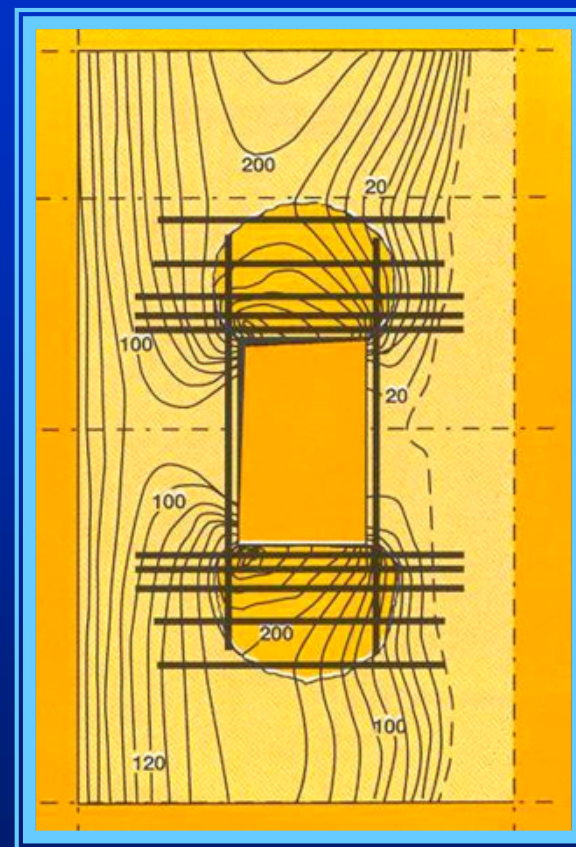
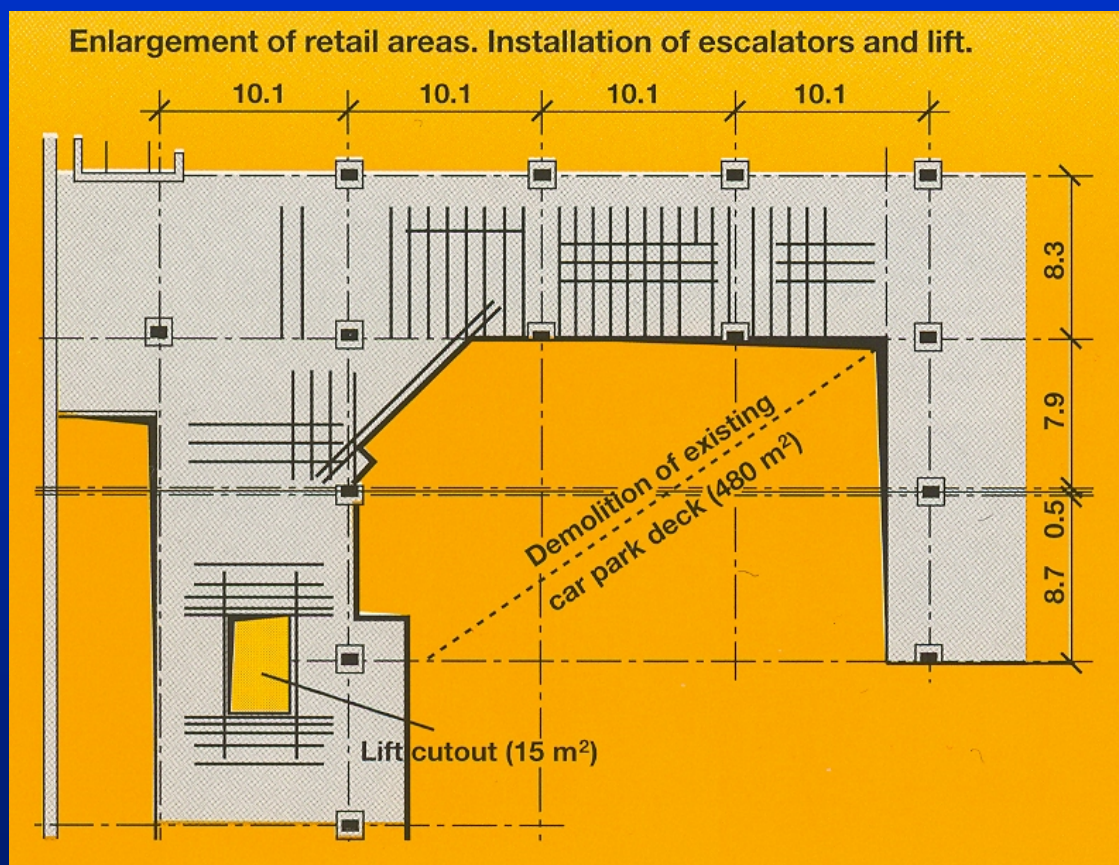
$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{cu} \frac{d - x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s}$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h - x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{fud}$$

Rekapitulacija proračuna ojačanja

- Pre ojačanja odrediti **računske momente** (za ULS i SLS)
- Za moment M_0 (pre ojačanja) odrediti **početnu dilataciju** ε_0 krajnjeg zategnutog betonskog vlakna,
- Odrediti potrebnu površinu FRP sa punim graničnim momentom M_u **posle ojačanja**,
- Proveriti **ugib za SLS**; ako je prekoračen → povećati površinu FRP,
- **Proveriti napone** u pritisnutom betonu, čeliku i FRP za SLS
- Proveriti **prsline** za SLS,
- Proveriti **atheziju** FRP i betona na kraju ankerovanja,
- Proveriti **smicanje**

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



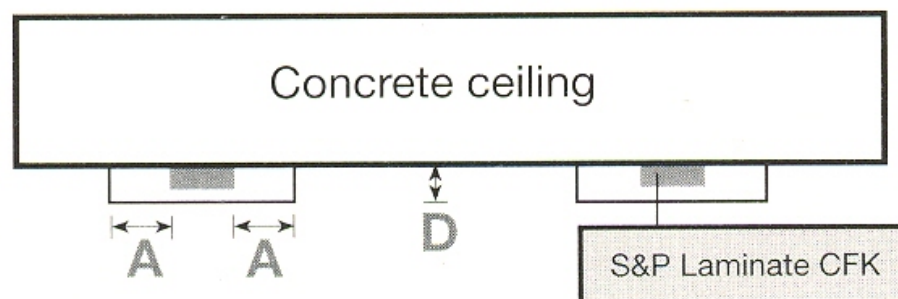
Dispozicija lamela kao ojačanje ploče u kojoj se izvode naknadni otvori za lift i postavljanje eskalatora

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



Izvođenje ojačanja ploče sa donje strane lepljenjem karbonskih lamela

Ojačanje primenom karbonskih vlakana CFRP



Fire resistance	A = 100 mm (D)	A = 200 mm (D)
F 30	2 x 20 mm	2 x 20 mm
F 60	2 x 40 mm	2 x 30 mm
F 90	> 110 mm	2 x 40 mm
F 120	> 110 mm	> 110 mm

Please contact the S&P Technical Service for detailed documentation.

Zaštita karbonskih traka i lamela od dejstva požara za različite protivpožarne otpornosti:
(F 30 – F 120 min)

Ojačanje stubova primenom karbonskih vlakana



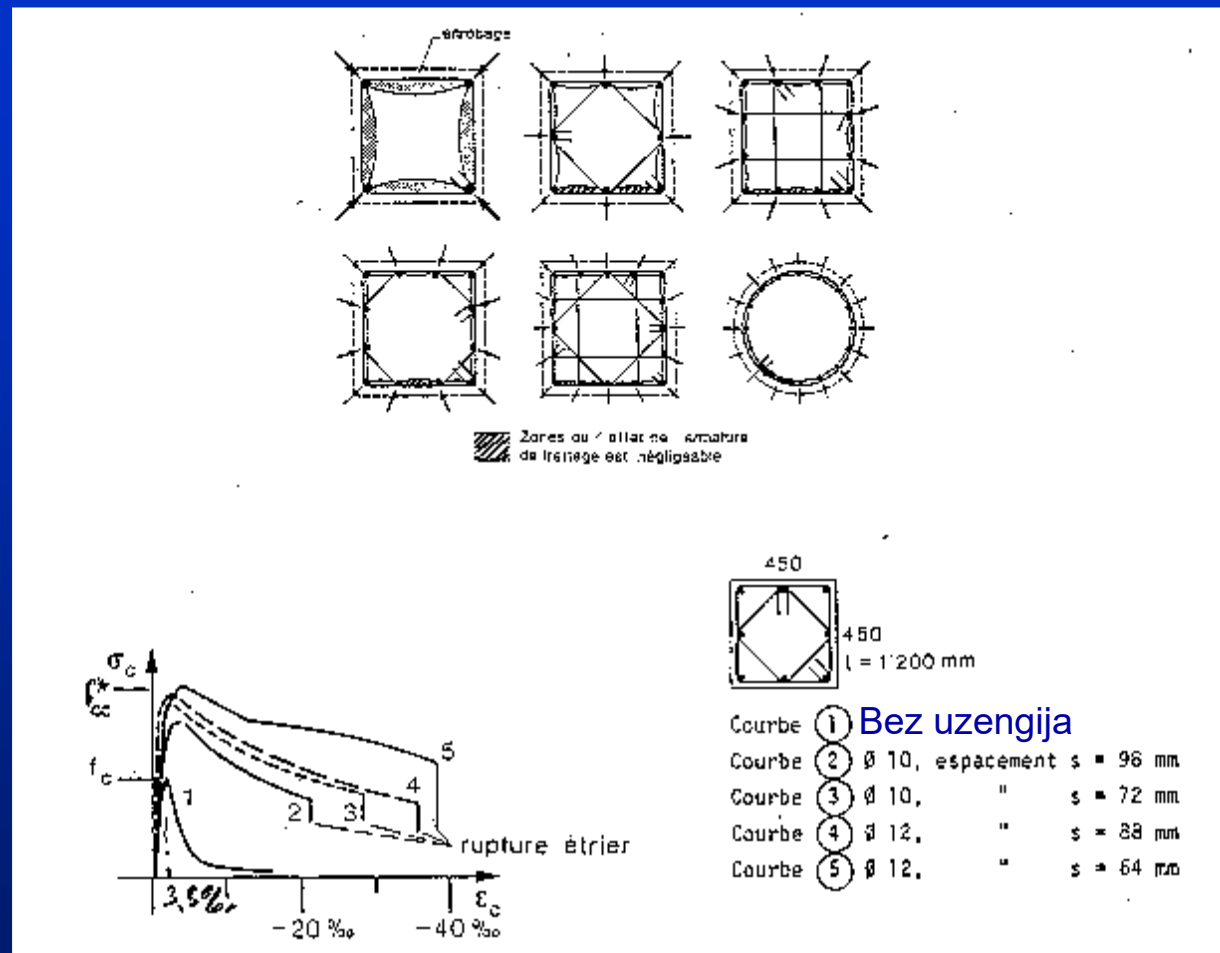
***Oblaganje – “utezanje” stubova tkaninom:
Stubovi kvadratnog i kružnog poprečnog preseka***

Ojačanje stubova primenom karbonskih vlakana

Efekat ojačanja stubova karbonskim trakama je sličan “utezanju” stubova poprečnom armturom – uzengijama kod armiranobetonskih stubova.

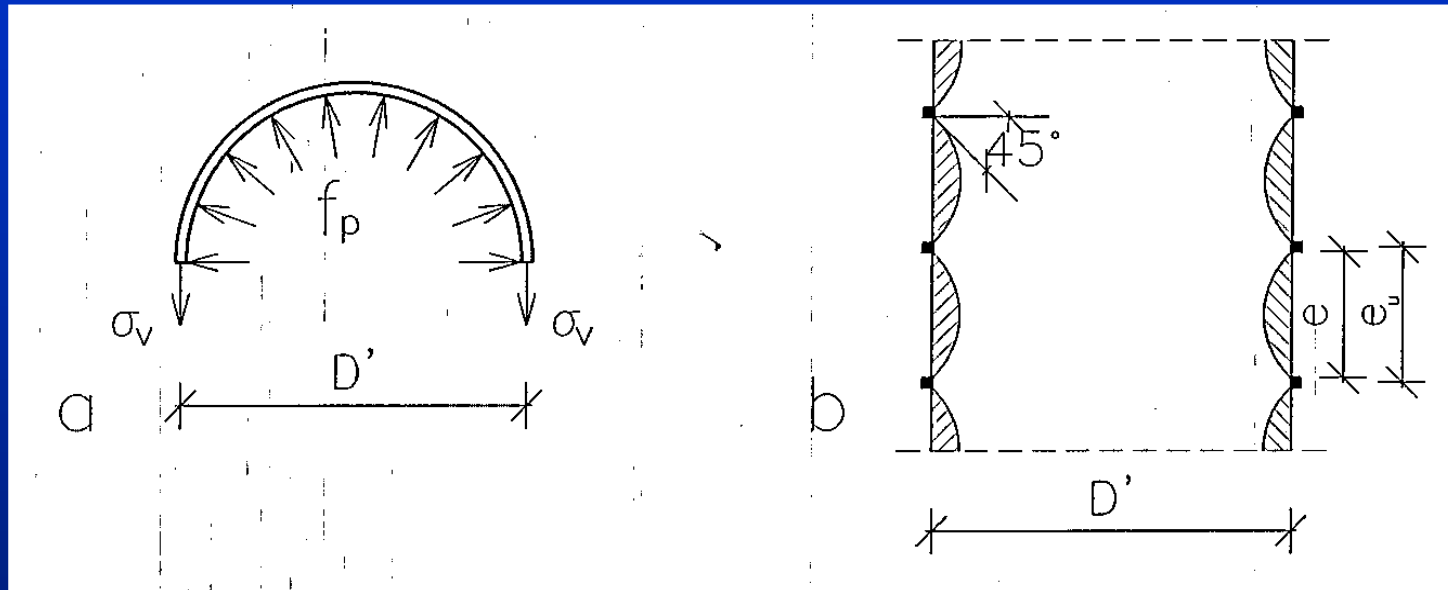
Iz tog razloga ćemo se u daljem razmatranju podsetiti kakav je uticaj poprečnog utezanja na nosivost i duktilnost armiranobetonskih stubova.

Ojačanje stubova primenom karbonskih vlakana



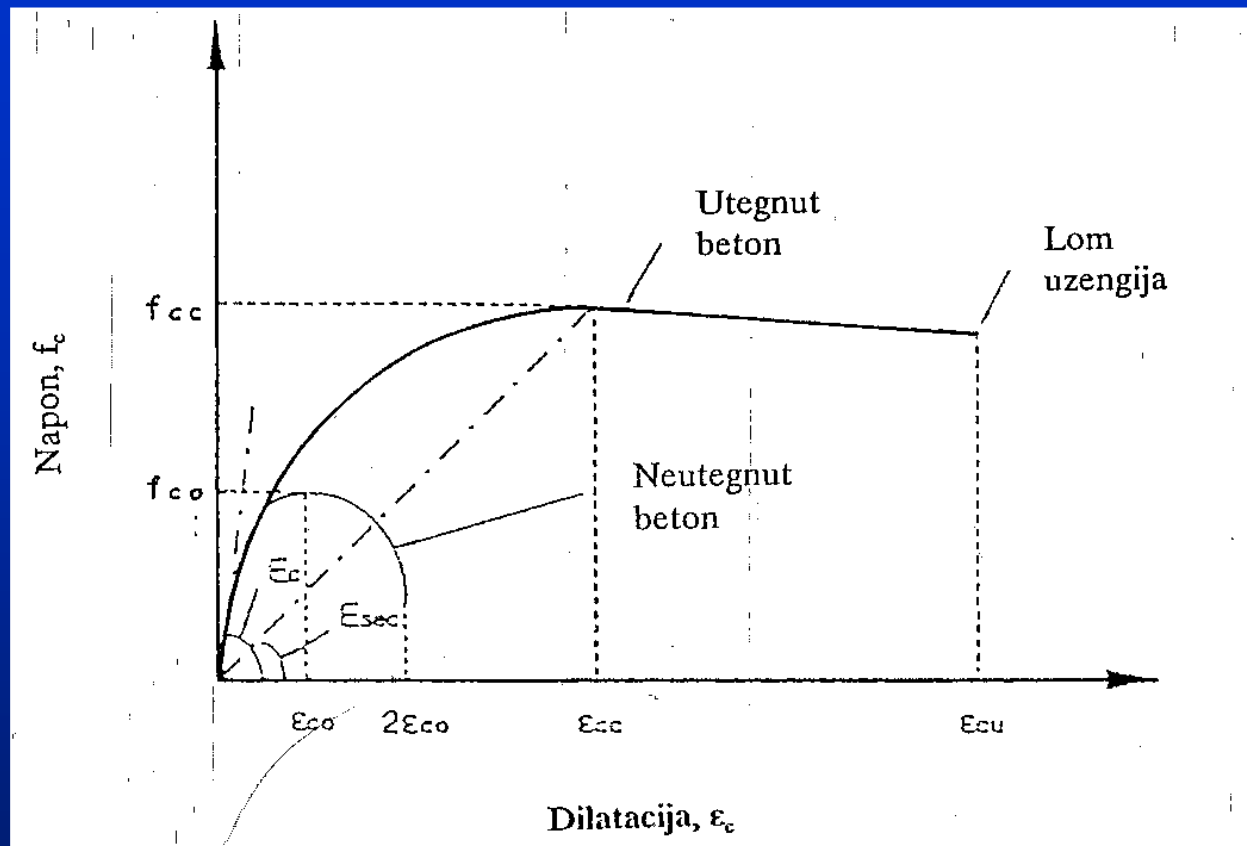
Dijagram napon – dilatacija za beton u funkciji količine poprečne armature

Ojačanje stubova primenom karbonskih vlakana



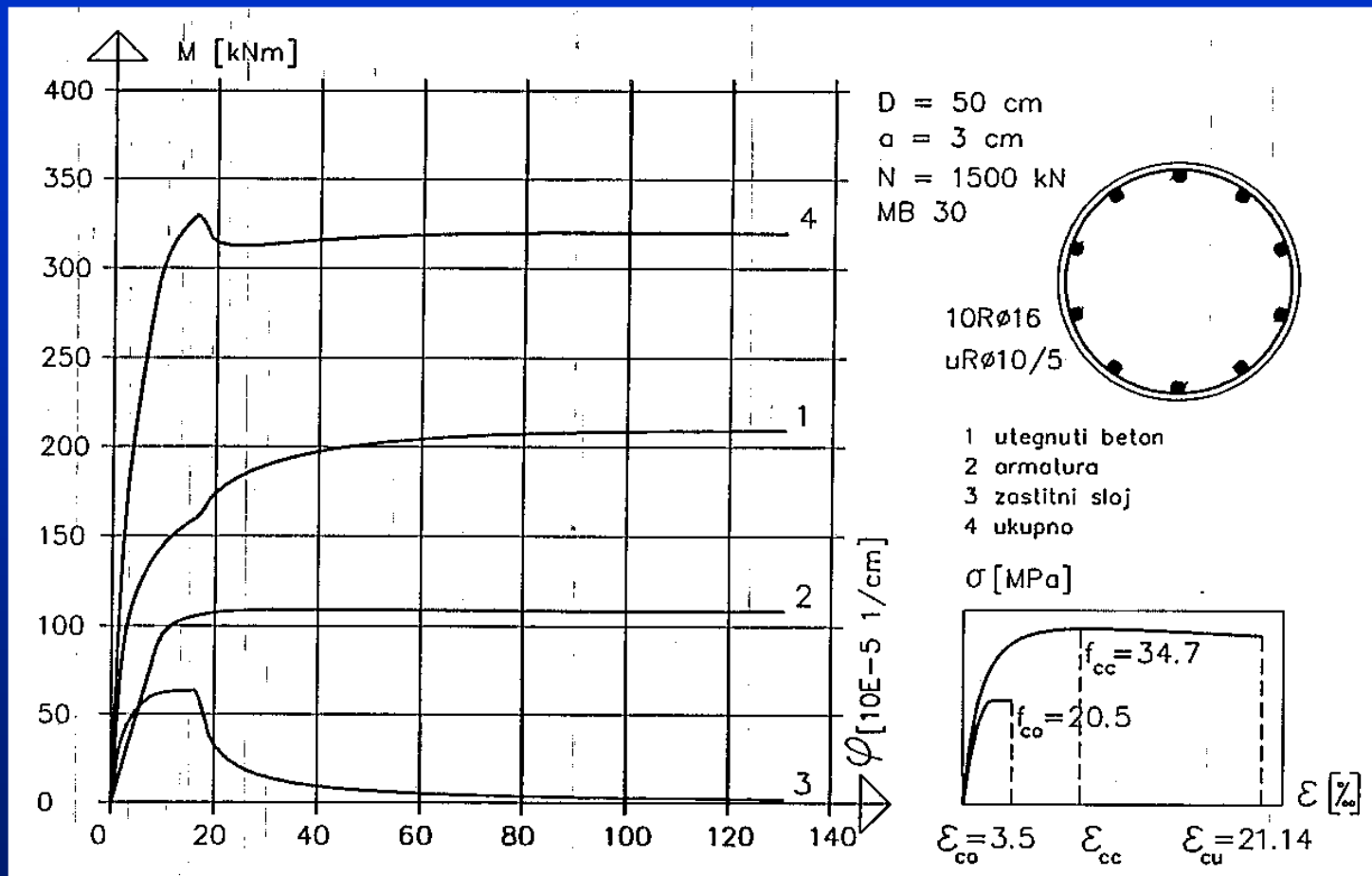
Efekat utezanja uzengijama kod stuba kružnog poprečnog preseka

Ojačanje stubova primenom karbonskih vlakana



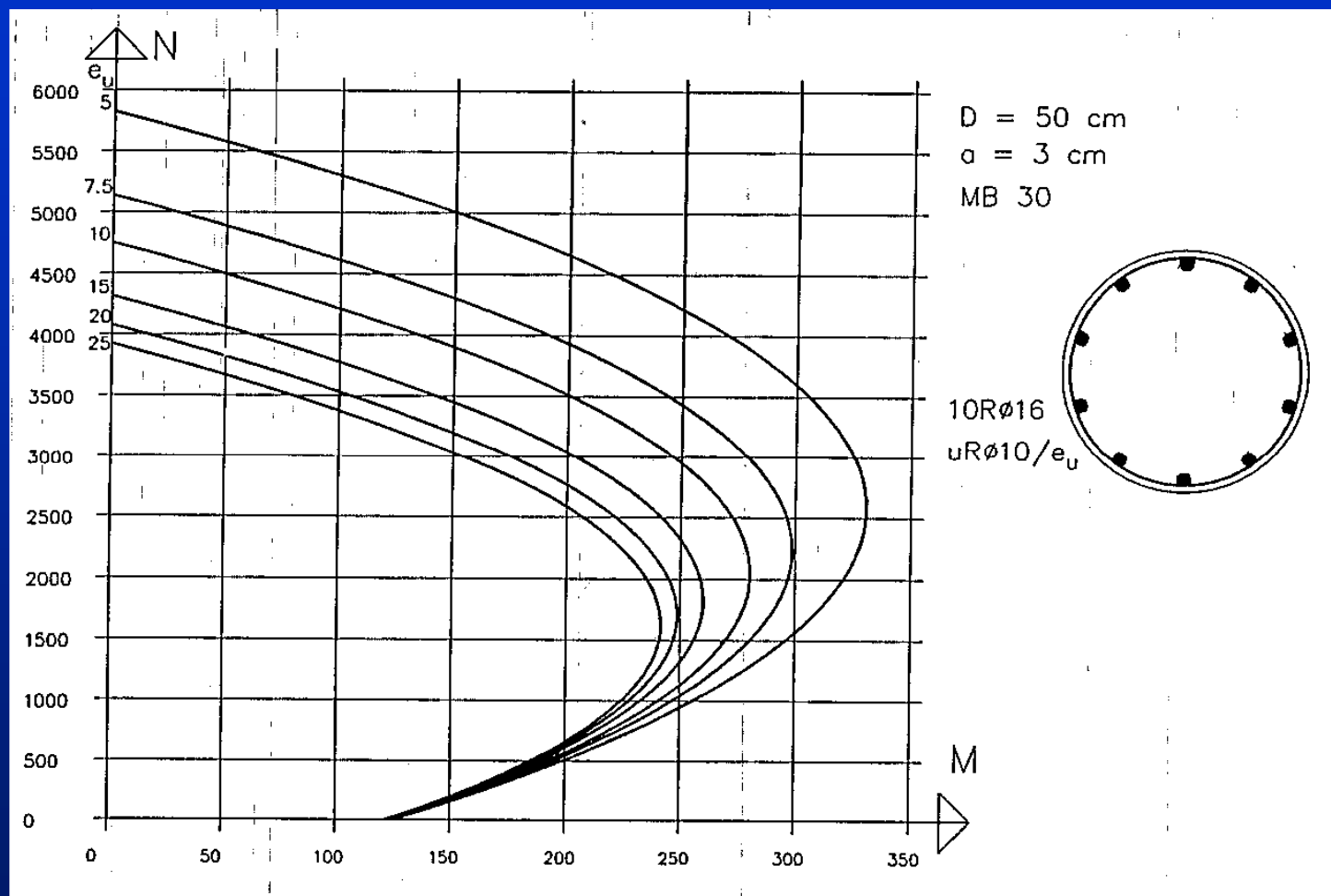
Oblik dijagrama napon – dilatacija za proračun utegnutog i neutegnutog betona prema Mander, Priestley i Park-u

Ojačanje stubova primenom karbonskih vlakana



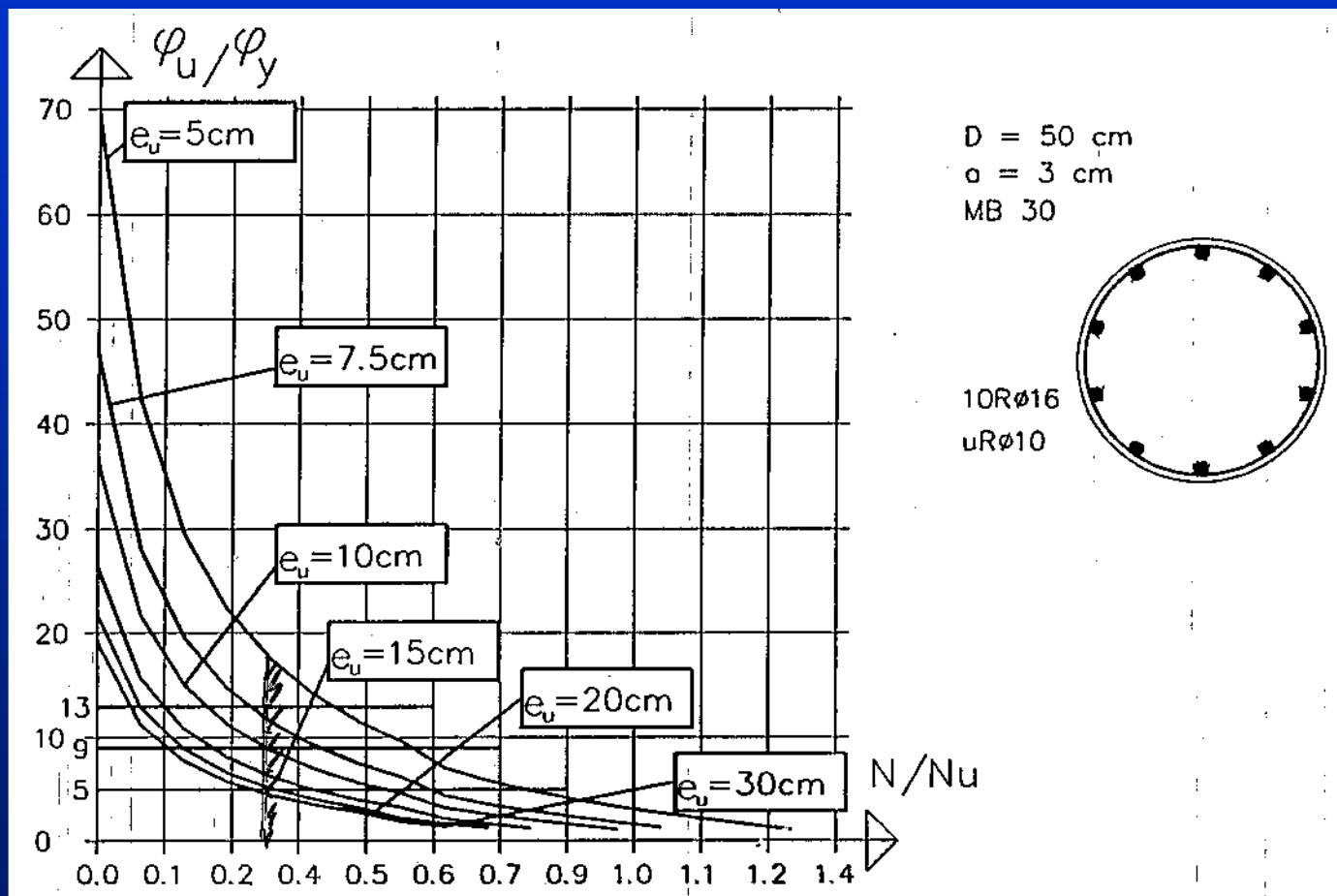
Dijagrami moment - krivina za pojedine elemente poprečnog preseka: 1-utegnuto jezgro betona, 2-podužna armatura, 3-zaštitni sloj, 4-ukupno

Ojačanje stubova primenom karbonskih vlakana



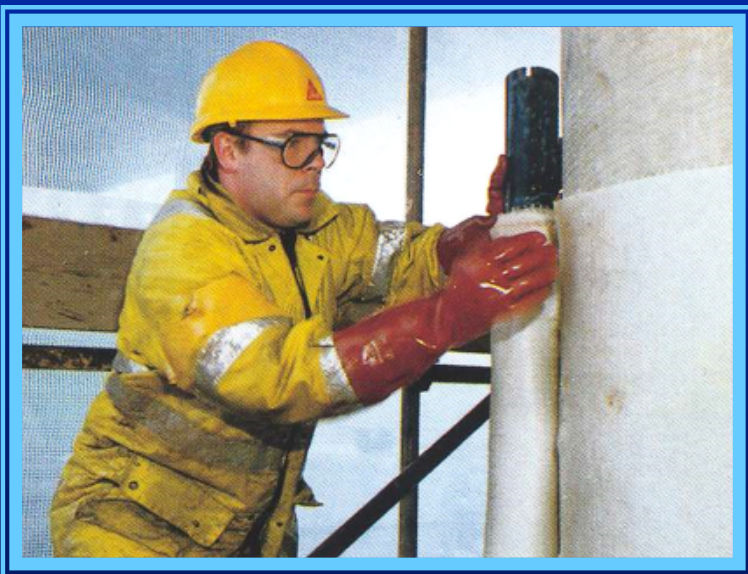
Dijagram interakcije M - N za kružni stub sa različitom gustinom uzengija e_u (e_u od 5 do 25 cm)

Ojačanje stubova primenom karbonskih vlakana



Duktilnost krivine φ_u/φ_y u funkciji razmaka uzengija e_u

Ojačanje stubova primenom karbonskih vlakana



Primer ojačavanja stubova kružnog preseka karbonskim trakama - tkaninama