

GRAĐEVINSKO - ARHITEKTONSKI FAKULTET

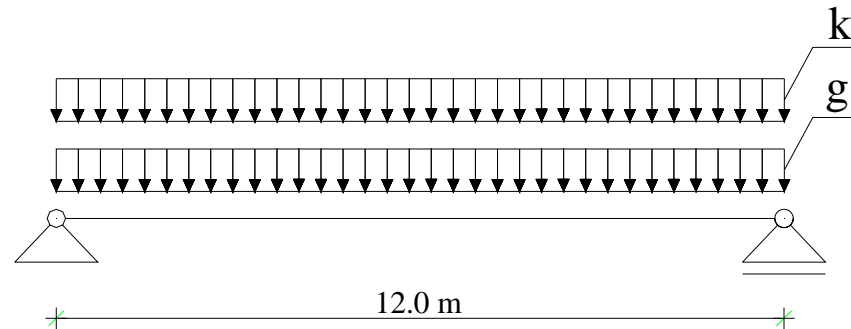
Katedra za metalne i drvene konstrukcije

Kolegij: SPREGNUTE KONSTRUKCIJE

Spregnute konstrukcije: čelik-čelik

ZADATAK

Potrebno je izvršiti dimenzioniranje čeličnog nosača na slici. Nosač je u prvoj fazi opterećen stalnim i korisnim opterećenjem ($g+k$) s danim vrijednostima. U drugoj fazi nosač se opterećuje dodatnim korisnim opterećenjem ($g+k+\Delta k$). Potrebno je dati dokaz nosivosti čeličnog nosača (krajnje granično stanje i granično stanje uporabljivosti) za obje faze opterećenja.



Opterećenja:

$$g=3.0 \text{ kN/m'}$$

$$k=5.0 \text{ kN/m'}$$

$$\Delta k=3.0 \text{ kN/m'}$$

Profil: **HE 300 A**

Materijal: **Fe-510 (S355)**

MATERIJAL

$f_y = 355 \text{ N/mm}^2$
 $f_u = 510 \text{ N/mm}^2$
 $\epsilon = 0.814$
 $E = 210000 \text{ N/mm}^2$
 $G = 80777 \text{ N/mm}^2$
 $\nu = 0.3$

REZNE SILE

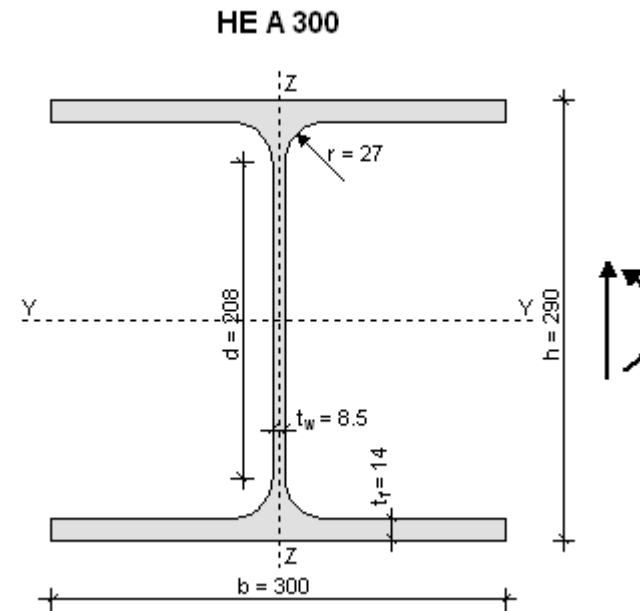
$V_{z,Sd} = 69.3 \text{ kN}$
 $M_{y,Sd} = 207.9 \text{ kNm}$

PARC. FAKTORI SIG.

$\gamma_{Mo} = 1.1$
 $\gamma_{M1} = 1.1$
 $\gamma_{M2} = 1.25$

PARAMETRI

$A = 112.528 \text{ cm}^2$
 $A_y = 87.017 \text{ cm}^2$
 $A_z = 25.636 \text{ cm}^2$
 $I_y = 18263.466 \text{ cm}^4$
 $W_y = 1259.549 \text{ cm}^3$
 $W_{ply} = 1383.271 \text{ cm}^3$
 $i_y = 12.740 \text{ cm}$
 $I_z = 6309.551 \text{ cm}^4$
 $W_z = 420.637 \text{ cm}^3$
 $W_{plz} = 641.166 \text{ cm}^3$
 $i_z = 7.488 \text{ cm}$
 $I_t = 85.173 \text{ cm}^4$
 $I_{\omega} = 1199772.000 \text{ cm}^6$

**Mjerodavna kombinacija opterećenja:**

$$q_1 = 1.35g + 1.5k = 1.35 \cdot 3.0 + 1.5 \cdot 5.0 = 11.55 \text{ kN/m'}$$

Rezne sile:

$$M_1 = \frac{q l^2}{8} = 207.9 \text{ kNm}$$

$$T_1 = \frac{q l}{2} = 69.3 \text{ kN}$$

Kontrola nosivosti čeličnog elementa (KGS):

KLASIFIKACIJA POPREČNOG PRESJEKA

HRBAT

$$\frac{d}{t_w} = 24.47 \leq 72 \cdot \varepsilon = 58.58 \Rightarrow \text{KLASA 1}$$

POJASNICA

$$\frac{c}{t_f} = 10.71 \leq 15 \cdot \varepsilon = 12.20 \Rightarrow \text{KLASA 3}$$

POPREČNI PRESJEK JE SVRSTAN U **KLASU 3**

OTPORNOST POPREČNOG PRESJEKA

MOMENT SAVIJANJA $M_{y,Sd}$

$$M_{y,Rd} = \frac{W_y \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \mathbf{406.49} \text{ kNm} \geq M_{y,Sd} = 207.9 \text{ kNm}$$

POPREČNA SILA $V_{z,Sd}$

$$\frac{d}{t_w} = 24.47 \leq 69 \cdot \varepsilon = 56.14$$

\Rightarrow provjera izbočavanja hrpta nije potrebna

$$V_{z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \mathbf{477.67} \text{ kN} \geq V_{z,Sd} = 69.3 \text{ kN}$$

Kontrola nosivosti čeličnog elementa (KGS):

INTERAKCIJA M - V

$$n = \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} = 0.000$$

$$\frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} = 0.511 \leq 1 - n = 1.000$$

OTPORNOST ELEMENTA

OTPORNOST NA BOČNO IZVIJANJE

$$g = 0 \text{ cm}, L = 1200 \text{ cm}$$

$$k = 1.0, k_w = 1.0, C_1 = 1.132, C_2 = 0.459$$

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \cdot \left(C_2 \cdot g + \sqrt{\frac{k^2}{k_w^2} \cdot \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot g)^2} \right)$$

$$M_{cr} = 316.47 \text{ kNm}$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{\beta_w \cdot W_{ply} \cdot f_y}{M_{cr}}} = 1.189 > 0.4$$

$$\text{MJERODANVA LINIJA IZVIJANJA } a \Rightarrow \chi_{LT} = 0.5372$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{\beta_w \cdot W_{ply} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 218.37 \text{ kNm} \geq M_{y,Sd} = 207.9 \text{ kNm}$$

Kontrola nosivosti čeličnog elementa (GSU):

$$f = \frac{5}{384} \frac{ql^4}{EI} = \frac{5}{384} \frac{0.08 \cdot 1200^4}{21000 \cdot 18263.5}$$

$$f = 5.6 \text{ cm} < f_{dop} = \frac{l}{200} = 6.0 \text{ cm}$$

Iskorištenost elementa:

$$\text{Stalno opterećenje (g)} \quad n_g = \frac{M_{sd_g}}{M_{b,Rd1}} = \frac{M_{sd(g)}}{\chi_{LT1} \cdot M_{y,rd1}} = \frac{72.9}{218.4} = 0.33$$

$$\text{Korisno opterećenje (k)} \quad n_k = \frac{M_{sd(k)}}{M_{b,Rd1}} = \frac{M_{sd(k)}}{\chi_{LT1} \cdot M_{y,rd1}} = \frac{135.0}{218.4} = 0.62$$

$$n_{uk} = n_g + n_k = 0.95 < 1.05$$

Povećanje korisnog opterećenja:

Dodatno korisno opterećenje (Δk) = 3.0 kN/m'

Mjerodavna kombinacija opterećenja:

$$q_2 = 1.35g + 1.5(k + \Delta k) = 1.35 \cdot 3.0 + 1.5 \cdot (5.0 + 3.0) = 16.05 \text{ kN/m'}$$

Rezne sile:

$$M_2 = \frac{ql^2}{8} = 288.9 \text{ kNm}$$

$$T_2 = \frac{ql}{2} = 96.3 \text{ kN}$$

Iskorištenost elementa:

Stalno opterećenje (g)

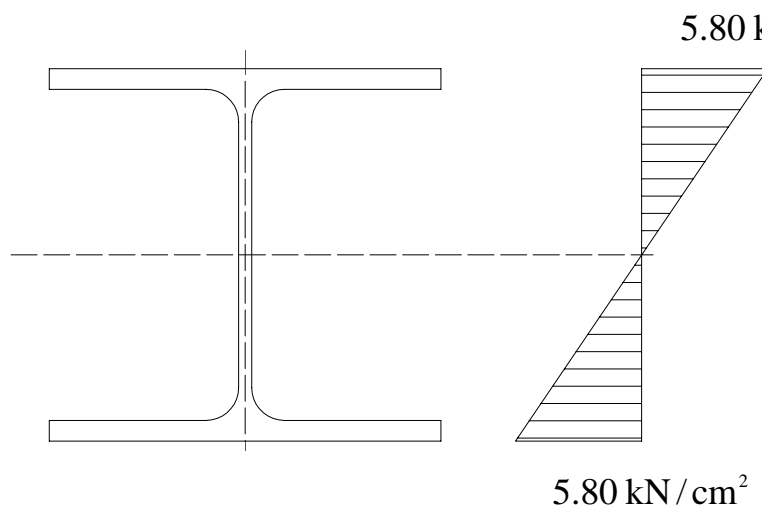
$$n_g = \frac{M_{sd(g)}}{M_{b,Rd1}} = \frac{M_{sd(g)}}{\chi_{LT1} \cdot M_{y,rd1}} = \frac{72.9}{218.4} = 0.33$$

$$n_{uk} = n_g + n_{k+\Delta k} = 1.32 \geq 1.05$$

Korisno opterećenje (k+Δk)

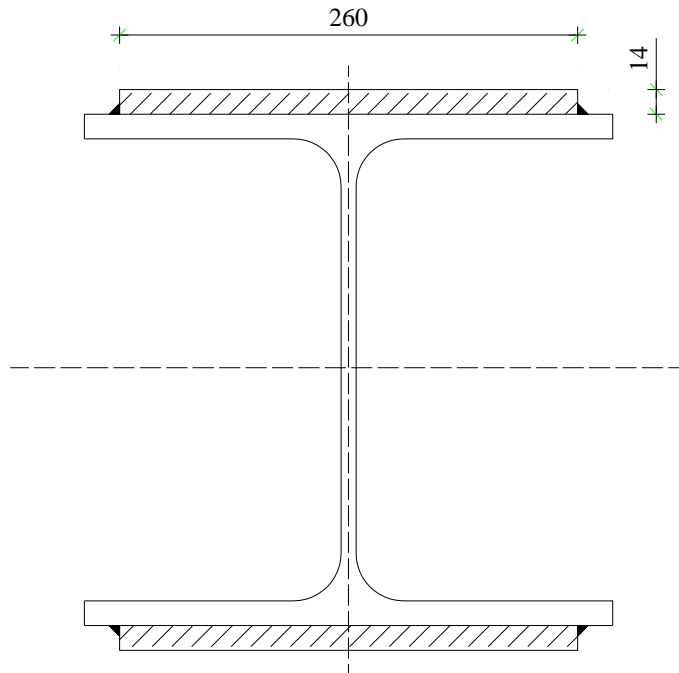
$$n_{k+\Delta k} = \frac{M_{sd(k+\Delta k)}}{M_{b,Rd1}} = \frac{M_{sd(k+\Delta k)}}{\chi_{LT1} \cdot M_{y,rd1}} = \frac{216.0}{218.4} = 0.99$$

- Potrebno je izvršiti ojačanje čeličnog nosača postavljanjem dodatnih čeličnih limova.
- Čelični nosač se rasterećuje od korisnog opterećenja prilikom montaže dodatnih limova uslijed čega u poprečnom presjeku imamo početna naprezanja od stalnog opterećenja:



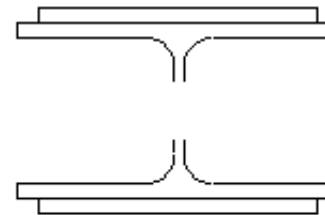
$$\sigma_{(g)} = \frac{M_{sd(g)}}{W_1} = \frac{72.9 \cdot 100}{1259.5} = 5.80 \text{ kN/cm}^2$$

- Ojačanje nosača se izvodi s dva čelična lima 260/14 koji se vare na gornji i donji pojas profila.



LAMELE

b = 260 mm h = 14 mm



b = 260 mm h = 14 mm

$$A = 185.328 \text{ cm}^2$$

$$A_y = 159.817 \text{ cm}^2$$

$$A_z = 28.111 \text{ cm}^2$$

$$I_y = 41588.176 \text{ cm}^4$$

$$W_y = 2236.525 \text{ cm}^3$$

$$W_{ply} = 2686.027 \text{ cm}^3$$

$$i_y = 14.980 \text{ cm}$$

$$I_z = 10410.617 \text{ cm}^4$$

$$W_z = 694.041 \text{ cm}^3$$

$$W_{plz} = 1114.366 \text{ cm}^3$$

$$i_z = 7.495 \text{ cm}$$

$$I_t = 85.173 \text{ cm}^4$$

$$I_{\omega} = 1199772.000 \text{ cm}^6$$

Kontrola nosivosti ojačanog čeličnog elementa (KGS):

(k+Δk)

KLASIFIKACIJA POPREČNOG PRESJEKA

HRBAT

$$\frac{d}{t_w} = 24.47 \leq 72 \cdot \varepsilon = 58.58 \Rightarrow \text{KLASA 1}$$

POJASNICA

$$\frac{c}{t_f} = 10.71 \leq 15 \cdot \varepsilon = 12.20 \Rightarrow \text{KLASA 3}$$

POPREČNI PRESJEK JE SVRSTAN U **KLASU 3**

OTPORNOST POPREČNOG PRESJEKA

MOMENT SAVIJANJA $M_{y,Sd}$

$$M_{y,Rd} = \frac{W_y \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \mathbf{721.79} \text{ kNm} \geq M_{y,Sd} = 216 \text{ kNm}$$

POPREČNA SILA $V_{z,Sd}$

$$\frac{d}{t_w} = 24.47 \leq 69 \cdot \varepsilon = 56.14$$

⇒ provjera izbočavanja hrpta nije potrebna

$$V_{z,Rd} = \frac{A_{v,z} \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \mathbf{523.79} \text{ kN} \geq V_{z,Sd} = 72 \text{ kN}$$

Kontrola nosivosti ojačanog čeličnog elementa (KGS):
(k+Δk)

INTERAKCIJA M - V

$$n = \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} = 0.000$$

$$\frac{M_{y,Sd}}{M_{y,Rd}} = 0.299 \leq 1 - n = 1.000$$

OTPORNOST ELEMENTA

OTPORNOST NA BOČNO IZVIJANJE

$$g = 0 \text{ cm} , L = 1200 \text{ cm}$$

$$k = 1.0 , k_w = 1.0 , C_1 = 1.132 , C_2 = 0.459$$

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \cdot \left(C_2 \cdot g + \sqrt{\frac{k^2}{k_w^2} \cdot \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot g)^2} \right)$$

$$M_{cr} = \mathbf{406.51 \text{ kNm}}$$

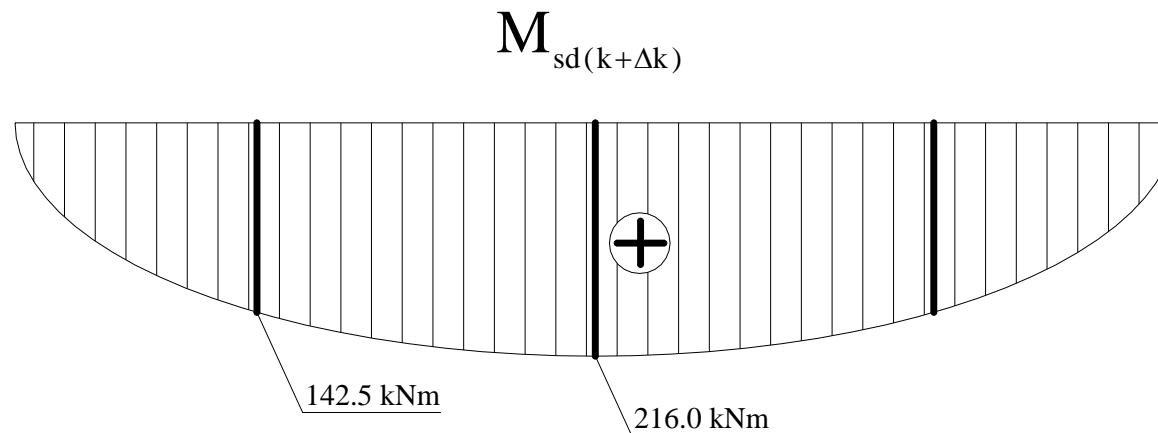
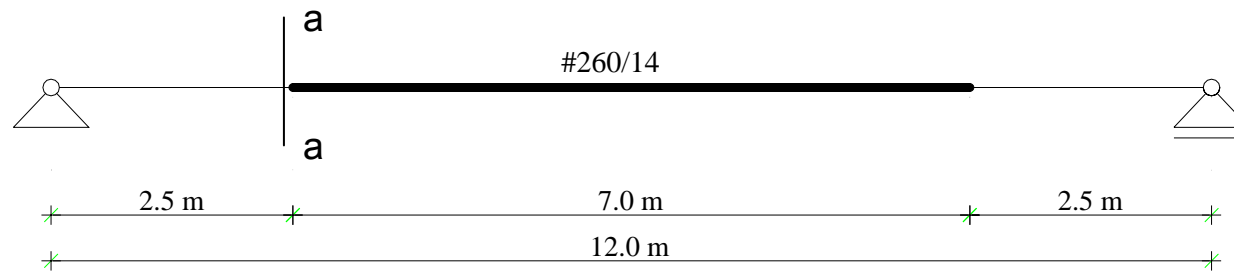
$$\chi_{LT} = \sqrt{\frac{\beta_w \cdot W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = 1.398 > 0.4$$

$$\text{MJERODANVA LINIJA IZVIJANJA a} \Rightarrow \chi_{LT} = 0.4191$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{\beta_w \cdot W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \mathbf{302.5 \text{ kNm}} \geq M_{y,Sd} = 216 \text{ kNm}$$

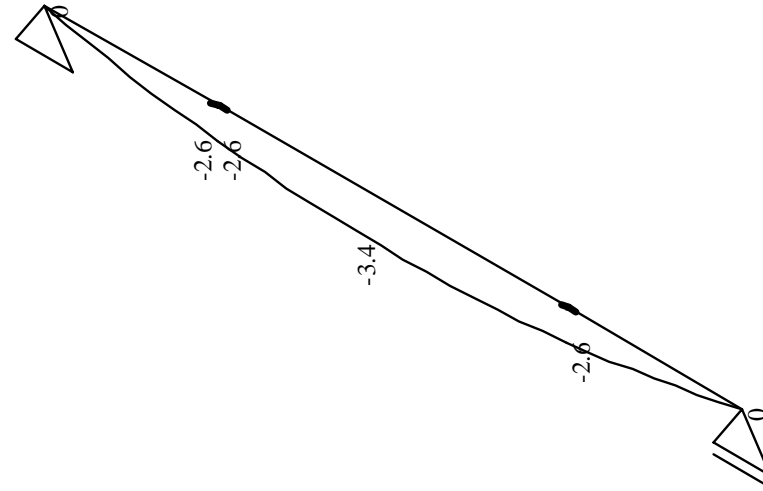
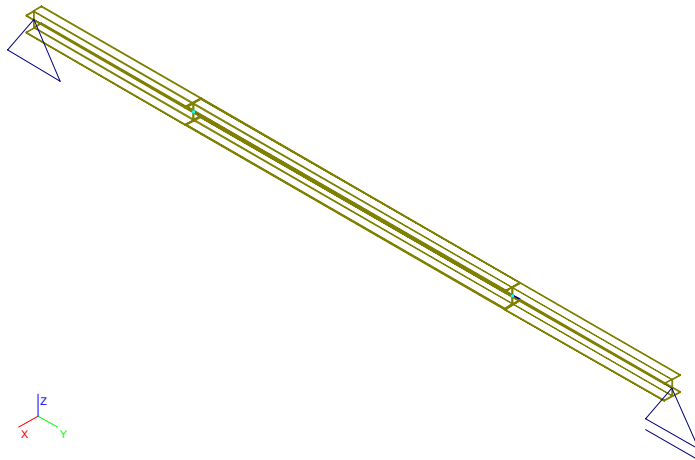
Kontrola nosivosti ojačanog čeličnog elementa (GSU):
(k+Δk)

- Nije potrebno izvršiti ojačanja po cijelom rasponu nosača.
- Ojačanja se izvode na ukupnoj duljini 7.0 m.
- Točan progib ojačanog nosača određuje se softverski metodom konačnih elemenata.



Kontrola nosivosti ojačanog čeličnog elementa (GSU):

(k+Δk)



$f_{(k+\Delta k)}$ (cm)

$$f_{(g)} = \frac{5}{384} \frac{gl^4}{EI} = \frac{5}{384} \frac{0.03 \cdot 1200^4}{21000 \cdot 18263.5} \quad \text{- Progib od stalnog opterećenja (neojačani element)}$$

$$f_{(g)} = 2.1 \text{ cm}$$

$$f_{uk} = f_{(g)} + f_{(k+\Delta k)} = 2.1 + 3.4 = 5.5 \text{ cm} < f_{dop} = \frac{1}{200} = 6.0 \text{ cm}$$

Iskorištenost elementa – kritični presjek:

Stalno opterećenje (g)
$$n_g = \frac{M_{sd(g)}}{M_{b,Rd1}} = \frac{M_{sd(g)}}{\chi_{LT1} \cdot M_{y,rd1}} = \frac{72.9}{218.4} = 0.33$$

$$n_{uk} = n_g + n_{k+\Delta k} = 1.04 < 1.05$$

Korisno opterećenje (k+Δk)
$$n_{k+\Delta k} = \frac{M_{sd(k+\Delta k)}}{M_{b,Rd2}} = \frac{M_{sd(k+\Delta k)}}{\chi_{LT2} \cdot M_{y,rd2}} = \frac{216.0}{302.5} = 0.71$$

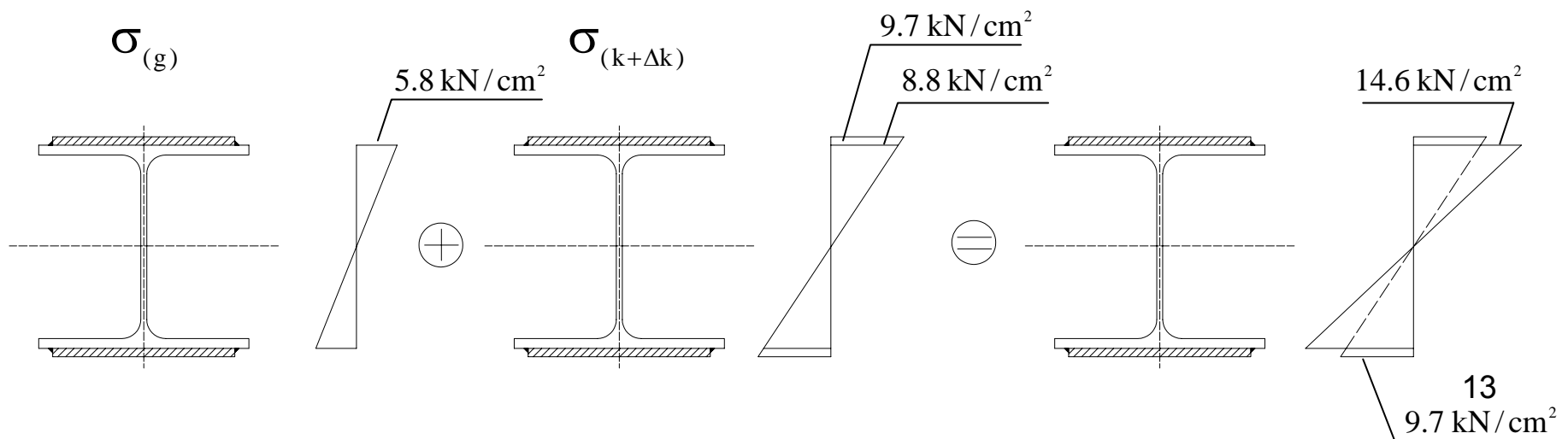
Iskorištenost elementa – presjek a-a:

Stalno opterećenje (g)
$$n_g = \frac{M_{sd(g)}}{M_{b,Rd1}} = \frac{M_{sd(g)}}{\chi_{LT1} \cdot M_{y,rd1}} = \frac{59.4}{218.4} = 0.27$$

$$n_{uk} = n_g + n_{k+\Delta k} = 0.92 < 1.05$$

Korisno opterećenje (k+Δk)
$$n_{k+\Delta k} = \frac{M_{sd(k+\Delta k)}}{M_{b,Rd1}} = \frac{M_{sd(k+\Delta k)}}{\chi_{LT1} \cdot M_{y,rd1}} = \frac{142.5}{218.4} = 0.65$$

Rezultirajući dijagram normalnih naprezanja u kritičnom presjeku nosača:



Proračun otpornosti zavora:

var 4.0 mm, Fe-510

Naprezanje u zavaru:

$$\tau_w = \frac{T_{(k+\Delta k)} \cdot S_x}{I_x \cdot 2 \cdot a} = \frac{72.0 \cdot 25.5}{41588.2 \cdot 2 \cdot 0.4} = 0.055 \text{ kN/cm}^2 \cdot 100$$

$$\tau_w = 5.5 \text{ kN/cm}^2$$

Otpornost zavora (100 mm):

$$F_{w,Rd} = \frac{F_{v,Rk}}{1.25} = \frac{130.9}{1.25} = 104.7 \text{ kN} \cdot 10$$

$$F_{w,Rd} = 10.5 \text{ kN/cm}^2$$

Dokaz nosivosti zavora:

$$5.5 < 10.5$$

