

PRORAČUN I DIMENZIONIRANJE OJAČANE GREDE

Kokić, Anamaria

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Split / Sveučilište u Splitu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:950190>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-03**



Repository / Repozitorij:

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Prijediplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

ANAMARIA KOKIĆ

ZAVRŠNI RAD

**PRORAČUN I DIMENZIONIRANJE OJAČANE
GREDE**

Split, srpanj 2023.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Prijediplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

Predmet: Nauka o čvrstoći

Z A V R Š N I R A D

Kandidat: Anamaria Kokić

Naslov rada: Proračun i dimenzioniranje ojačane grede

Mentor: dr. sc. Ado Matoković, prof. struč. stud. u t.i.

Split, srpanj 2023.

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE U SPLITU
Sveučilišni odjel za stručne studije

Studij: Konstrukcijsko strojarstvo
Predmet: Nauka o čvrstoći
Nastavnik: dr. sc. Ado Matoković, prof. struč. stud. u t.i.

ZADATAK

Kandidat: Anamaria Kokić

Zadatak: Proračun i dimenzioniranje ojačane grede

U radu je potrebno:

- u uvodnom dijelu dati kratki prikaz proračuna linijskih i rešetkastih nosača;
- za ojačanje odrediti sile u štapovima, a za gredu reakcije oslonaca i unutarnje sile po područjima;
- na temelju proračuna nacrtati za gredu dijagrame unutarnjih sila;
- rezultate provjeriti uz pomoć programskog paketa MDSolids;
- dimenzionirati gredu i štapove ojačane grede za dva različita materijala;
- provjeriti stabilnost tlačno opterećenih štapova ojačane grede;
- oblikovati i dimenzionirati jedan čvor ojačanja.

Sažetak

U ovom radu je izvršen proračun grede ojačane rešetkastom konstrukcijom koja se sastoji od štapova i linijskog nosača. U uvodnom dijelu su opisani linijski i rešetkasti nosači te su navedene i opisane dvije metode određivanja sila u štapovima rešetke.

Nakon određivanja reakcija u osloncima grede i unutarnjih sila u nezavisnim područjima grede, rezultati dobiveni analitičkim izračunom vrijednosti unutarnjih sila u poprečnom presjeku nosača uspoređeni su s rezultatom dobivenih vrijednosti iz programskog paketa MDSolids. U nastavku je izvršeno dimenzioniranje štapova ojačanja za konstrukcijski čelik S235 i aluminijsku slitinu EN AW-6082 te dimenzioniranje linijskog nosača.

U posljednjem dijelu rada izvršeno je oblikovanje i dimenzioniranje proizvoljno odabranog čvora rešetkaste konstrukcije.

Ključne riječi: rešetkasta konstrukcija, dimenzioniranje, linijski nosač, štapovi

Summary (Calculation and dimensioning of the reinforced beam)

In this paper, the calculation of a beam reinforced with a lattice structure consisting of rods and a linear support was performed. In the introductory part, linear and truss supports are described, and two methods of determining forces in truss rods are listed and described.

After determining the reactions in the beam supports and the internal forces in the independent areas of the beam, the results obtained by analytically calculating the values of the internal forces in the cross section of the beam were compared with the results obtained from the MDSolids software package. In the following, the dimensioning of the reinforcement rods for structural steel S235 and aluminum alloy EN AW-6082 and the dimensioning of the linear support were carried out.

In the last part of this paper, the shaping and dimensioning of an arbitrarily selected node of the lattice structure was performed.

Keywords: grid construction, dimensioning, linear girder, rods

SADRŽAJ

Sažetak	2
Summary (Calculation and dimensioning of the reinforced beam)	2
1. Uvod	6
1.1. Linijski nosači.....	6
1.2. Rešetkasti nosači.....	9
2. Proračun i dimenzioniranje ojačane grede	14
3. Dimenzioniranje štapova ojačane grede.....	34
3.1. Dimenzioniranje štapova ojačanja za konstrukcijski čelik S235.....	36
3.2. Dimenzioniranje štapova ojačanja za aluminijsku leguru EN AW-6082.....	46
4. Dimenzioniranje linijskog nosača	53
5. Oblikovanje i dimenzioniranje čvora	57
6. Zaključak.....	65
Literatura	66
Prilozi	67

Popis slika

Slika 1.1 Jednostavni nosač.....	6
Slika 1.2 Nosač s jednim prepustom	6
Slika 1.3 Konzolni nosač s uklještenjem na lijevom kraju.....	7
Slika 1.4 Gerberov nosač sastavljen od dvije grede	7
Slika 1.5 Definirani koordinatni sustav linijskih nosača.....	8
Slika 1.6 Štap opterećen na sabijanje (tlak)	9
Slika 1.7 Štap opterećen na rastezanje (vlak).....	9
Slika 1.8 Rešetkasti nosač	9
Slika 1.9 Rešetkasti nosač (primjer).....	10
Slika 1.10 Čvor A.....	10
Slika 1.11 Rešetkasti nosač (primjer).....	12
Slika 1.12 Desni dio presjeka	12
Slika 2.1 Ojačana greda.....	14
Slika 2.2 Ojačana greda oslobođena od veza	15
Slika 2.3 Desni dio ojačane grede	16
Slika 2.4 Čvor D.....	17
Slika 2.5 Čvor C	18
Slika 2.6 Nezavisna područja grede	20
Slika 2.7 Presjek 1-1.....	20
Slika 2.8 Presjek 2-2.....	22
Slika 2.9 Kut α_1	22
Slika 2.10 Presjek 3-3.....	24
Slika 2.11 Presjek 4-4.....	26
Slika 2.12 Presjek 5-5.....	28
Slika 2.13 Kut β	28
Slika 2.14 Presjek 6-6.....	30
Slika 2.15 Dijagram unutarnjih sila ojačane grede	31
Slika 2.16 Dijagram unutarnjih sila ojačane grede iz programskog paketa MDSolids.....	32
Slika 3.1 Čvor D.....	36
Slika 3.2 Čvor C	42
Slika 5.1 Čvor D.....	57

Popis tablica

Tablica 2.1 Izračunate sile u štapovima rešetkaste konstrukcije ojačane grede.....	33
Tablica 3.1 - Tablica koeficijenta gubitka stabilnosti u ovisnosti o klasi izvijanja za $\lambda=1,08$.	38
Tablica 3.2 - Tablica koeficijenta gubitka stabilnosti u ovisnosti o klasi izvijanja za $\lambda=1,99$.	41
Tablica 3.3 - Tablica koeficijenta gubitka stabilnosti u ovisnosti o klasi izvijanja za $\lambda=1,53$.	44
Tablica 3.4 - Tablica ovisnosti relativne vitkosti o faktoru gubitka stabilnosti za $\lambda=1,53$	47
Tablica 3.5 - Tablica ovisnosti relativne vitkosti o faktoru gubitka stabilnosti za $\lambda=2,45$	49
Tablica 3.6 Tablica koeficijenta gubitka stabilnosti u ovisnosti o klasi izvijanja za $\lambda=2,17$...	52

1. Uvod

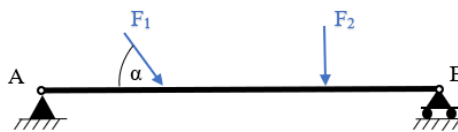
1.1. Linijski nosači

Svako kruto tijelo vezano za podlogu i opterećeno jednom ili više sila naziva se nosač. Nosači mogu biti ravninski i prostorni. Ravninskim nosačem se smatra nosač kojem su os nosača i sve sile u istoj ravnini. Prostornim nosačem smatra se nosač kojem osi ne leže u istoj ravnini, tj. odnosi se na konstrukcije čije su osi u jednoj ravnini, ali pravci djelovanja vanjskih sila su izvan te ravnine.

Sile koje djeluju na nosač mogu biti koncentrirane (pod kutom ili okomito na os nosača) ili kontinuirane (konstantnog ($q_z = konst.$) ili promjenljivog intenziteta ($q_z = q_z(x)$)).

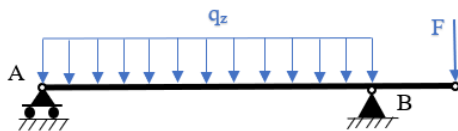
Prilikom podjele prema složenosti i načinu oslanjanja, linijski nosači mogu biti:

- jednostavni nosači kojima je udaljenost između oslonaca ujedno i ukupna duljina nosača (slika 1.1);



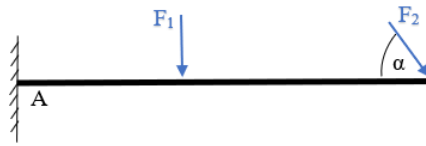
Slika 1.1 Jednostavni nosač

- nosači s jednim ili dva prepusta (slika 1.2);



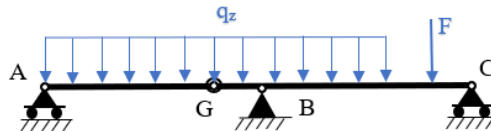
Slika 1.2 Nosač s jednim prepustom

- konzolni nosači tj. nosači s uklještenjem na jednom kraju (slika 1.3);



Slika 1.3 Konzolni nosač s uklještenjem na lijevom kraju

- nosači sa zglobom (Gerberovi nosači) tj. složeni nosači koji su sastavljeni od jedne ili više greda i međusobno su povezani zglobovima (slika 1.4) [1].



Slika 1.4 Gerberov nosač sastavljen od dvije grede

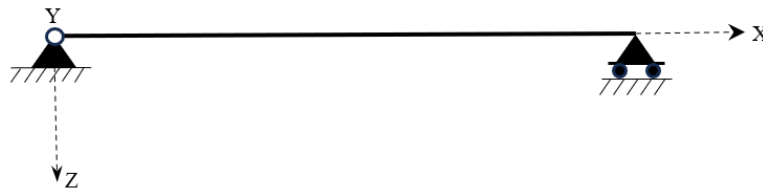
Djelovanjem vanjskih sila u proizvoljnom presjeku nosača pojavit će se *unutarnje sile* kako bi se kod proračuna i dimenzioniranja odabrale odgovarajuće dimenzije same konstrukcije.

Unutarnje sile možemo odrediti definiranjem zamišljenog presjeka nosača na proizvoljnoj udaljenosti te razmatranjem ravnoteže dijela nosača, lijevo ili desno od zamišljenog presjeka. Uvjet glasi da oba dijela moraju biti u ravnoteži zbog međusobnog djelovanja jednog dijela na drugi.

Unutarnje sile u presjeku nosača čine:

- uzdužna sila u pravcu osi nosača s oznakom N ;
- poprečna sila okomita na os nosača s oznakom Q_z ;
- moment savijanja s oznakom M_y .

Koordinatni sustav sila linijskih nosača definiran je na način da se os O_x poklapa s uzdužnom osi nosača, os O_y izlazi iz slike, a os O_z je usmjerena prema dolje jer se upotrebljava desni pravokutni koordinatni sustav prikazan na slici 1.5 [1].



Slika 1.5 Definirani koordinatni sustav linijskih nosača

Poprečni presjek je pozitivan ako se smjer vanjske normale na presjek poklapa s pozitivnim smjerom osi x , negativan ako smjer vanjske normale na presjek ima suprotan smjer od pozitivnog dijela osi x [1].

Na pozitivnom poprečnom presjeku unutarnje sile su pozitivne ako im se smjerovi poklapaju s pozitivnim dijelovima koordinatnih osi, a na negativnom poprečnom presjeku bit će pozitivne ako imaju smjerove suprotne smjerovima pozitivnih dijelova koordinatnih osi [1].

Nakon analitičkog određivanja iznosa unutarnjih sila, potrebno je odrediti tzv. *nezavisna područja nosača*. Temeljem dobivenih vrijednosti crta se i kotira *dijagram unutarnjih sila*.

1.2. Rešetkasti nosači

Rešetkasti nosači su nosači sastavljeni od ravnih štapova koji su međusobno povezani zglobovima. Mjesto spajanja štapova naziva se čvor rešetke.

Štapovi rešetke mogu biti opterećeni na sabijanje (tlak) kao što je prikazano na slici 1.6 i na rastezanje (vlak) kao što je prikazano na slici 1.7 [1].



Slika 1.6 Štap opterećen na sabijanje (tlak)



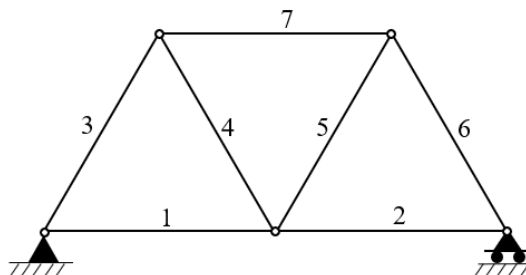
Slika 1.7 Štap opterećen na rastezanje (vlak)

Razmatranjem rešetkastih nosača (slika 1.8) definiraju se sljedeće pretpostavke:

- vanjsko opterećenje djeluje samo u čvorovima rešetke;
- štapovi rešetke opterećeni su na rastezanje (vlak) ili sabijanje (tlak);
- vlastita težina štapova može se zanemariti;
- trenje u zglobovima može se zanemariti.

Sile u štapovima možemo odrediti pomoću dvije metode:

- metodom čvorova,
- metodom presjeka.



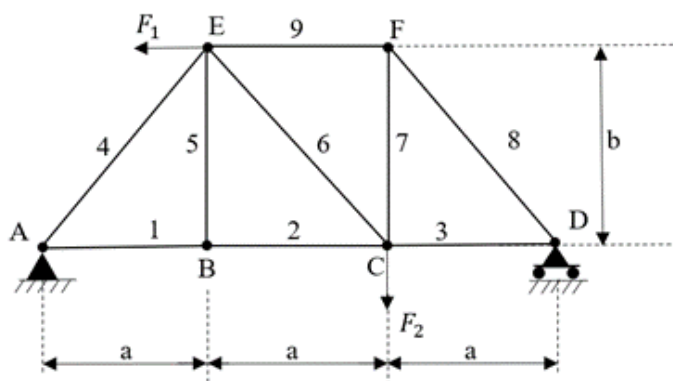
Slika 1.8 Rešetkasti nosač

Metoda čvorova

Određivanjem sila u štapovima metodom čvorova potrebno je prvo odrediti reakcije u osloncima pomoću uvjeta ravnoteže za cijelu rešetku. Odabire se čvor rešetke s najmanje jednom poznatom silom i najviše dvije nepoznate sile te se postavljaju uvjeti ravnoteže za taj čvor.

Pretpostavlja se vlačno opterećenje u svim štapovima rešetke, odnosno pozitivan predznak označava vlačne sile, a negativan predznak tlačne sile.

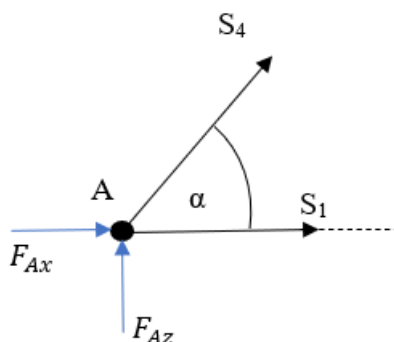
Način određivanja sila u štapovima metodom čvorova prikazan je na primjeru (slika 1.9).



Slika 1.9 Rešetkasti nosač (primjer)

Rešetka je vezana za podlogu sa nepomičnim osloncem u A, pomičnim osloncem u D te sa dvije koncentrirane sile u čvorovima E i C. Postavljanjem uvjeta ravnoteže za cijeli nosač, dobiju se reakcije u osloncima te se odabire čvor A za određivanje sila u štapovima 1 i 4.

Čvor A je prikazan na slici 1.10.



Slika 1.10 Čvor A

Uvjeti ravnoteže za čvor A glase:

$$\sum F_x = 0; F_{Ax} + S_1 + S_4 \cdot \sin \alpha = 0,$$

$$\sum F_z = 0; F_{Az} + S_4 \cdot \cos \alpha = 0,$$

gdje je kut α dobiven na sljedeći način :

$$\tan \alpha = \frac{b}{a}$$

Rješavanjem navedenih jednadžbi dobiju se tražene sile u štapovima 1 i 4.

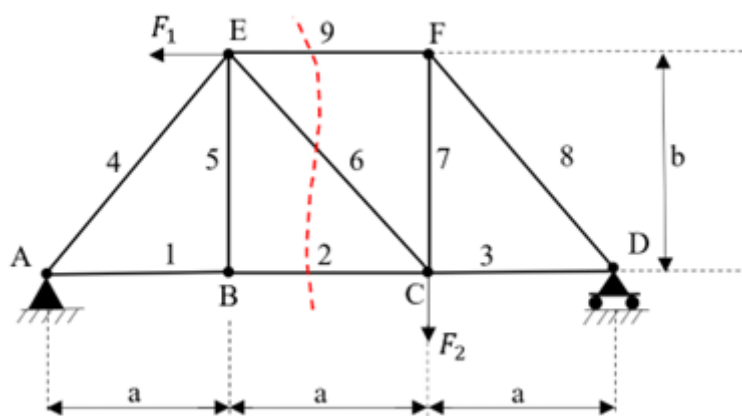
Navedeni postupak se ponavlja dok se ne odrede sve sile u traženim štapovima.

Metoda presjeka

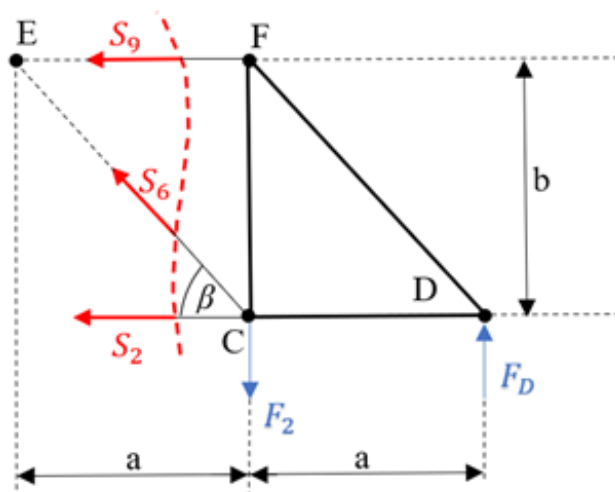
Metoda presjeka koristi se kada želimo odrediti sile samo u nekim štapovima rešetkastog nosača. Potrebno je postaviti zamišljeni presjek preko tih štapova, čime je rešetka podijeljena na dva dijela. Uvjet glasi da oba dijela moraju biti u ravnoteži zbog međusobnog djelovanja jednog dijela rešetke na drugi.

Način određivanja sila u štapovima metodom presjeka prikazan je na već spomenutom primjeru (slika 1.11).

Sile u štapovima 2, 6 i 9 dobit ćemo promatranjem desnog dijela rešetke (slika 1.12).



Slika 1.11 Rešetkasti nosač (primjer)



Slika 1.12 Desni dio presjeka

Uvjeti ravnoteže za desni dio rešetke glase:

$$\sum M_E = 0; F_D \cdot 2 \cdot a - F_2 \cdot a - S_2 \cdot b = 0,$$

$$\sum M_C = 0; F_D \cdot a + S_9 \cdot b = 0,$$

$$\sum F_y = 0: S_6 \cdot \sin \alpha - F_2 + F_D = 0,$$

gdje je kut β dobiven na sljedeći način:

$$\tan \beta = \frac{b}{a}$$

Rješavanjem navedenih jednadžbi dobiju se tražene sile u štapovima 2, 6 i 9.

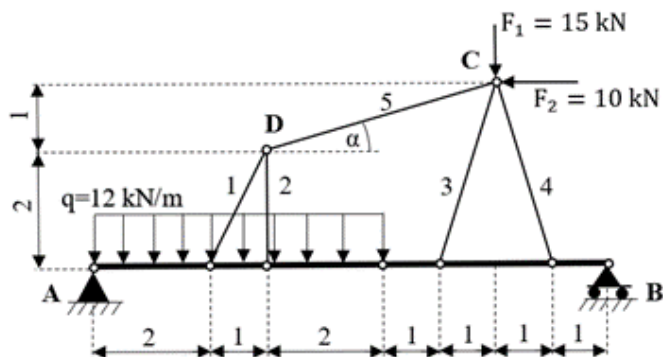
2. Proračun i dimenzioniranje ojačane grede

U ovom radu predmet razmatranja je ojačana greda koja se sastoji od linijskog nosača s jednoliko raspodijeljenim kontinuiranim opterećenjem iznosa q , ojačanja kojeg čine štapovi 1, 2, 3, 4 i 5 od dva različita materijala, vanjskih sila iznosa F_1 i F_2 koje djeluju na čvor ojačanja te zglobova A i B linijskog nosača čija je udaljenost jednaka ukupnoj duljini nosača.

Ojačanu gredu prikazanoj na slici 2.1 potrebno je analitičkim postupkom uravnotežiti, odrediti dijagrame unutarnjih sila, dimenzionirati linijski nosač te dimenzionirati i oblikovati proizvoljno odabrani čvor.

Prilikom izrade dijagrama unutarnjih sila i provjere rezultata koristit će se programski paket MDSolids. To je softver koji sadrži brojne alate za teme u područjima statike, čvrstoće materijala i mehanike deformabilnih krutih tijela poput proračuna greda, torzijskih sklopova, rešetki, stupova i mnogih drugih.

Nosač je vezan za podlogu nepomičnim osloncem u A i pomičnim osloncem u B .



Slika 2.1 Ojačana greda

Zadano je :

$$F_1 = 15 \text{ kN}$$

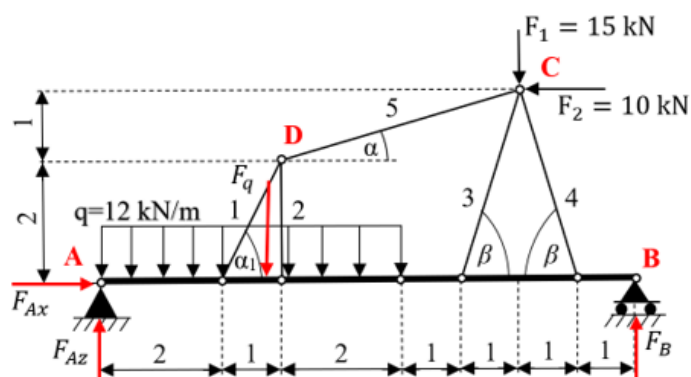
$$F_2 = 10 \text{ kN}$$

$$q = 12 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F_q = q \cdot l = 12 \cdot 5 = 60 \text{ kN} ; q = \text{konst.}$$

Izračunavanje reakcija u osloncima A i B

Rešetkasti nosač oslobađa se od veza kao što je prikazano na slici 2.2 te se djelovanje nepomičnog oslonca u A zamjenjuje reakcijom dvjema komponentama reakcije F_{Ax} i F_{Az} , a pomičnog oslonca u B reakcijom F_B . Kontinuirano opterećenje grede možemo zamijeniti jednom koncentriranom silom $F_q = q \cdot l$ s hvatištem u težištu.



Slika 2.2 Ojačana greda oslobođena od veza

Reakcije oslonaca dobit ćemo iz uvjeta ravnoteže :

$$\sum F_x = 0; F_{Ax} - F_2 = 0$$

$$\sum F_z = 0; F_{Az} - F_q - F_1 + F_B = 0$$

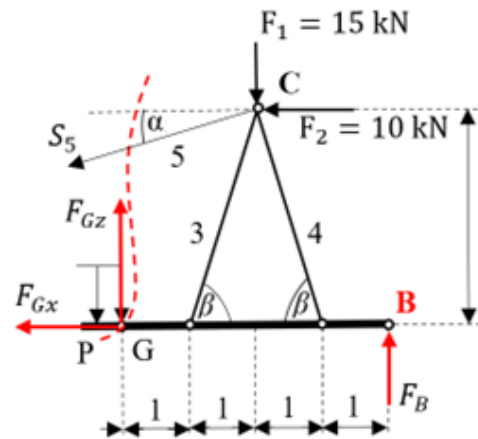
$$\sum M_A = 0; -F_q \cdot 2,5 + F_B \cdot 9 - F_1 \cdot 7 + F_2 \cdot 3 = 0$$

Rješavanjem gornjih jednadžbi dobije se :

$$F_B = 25 \text{ kN}; \quad F_{Az} = 50 \text{ kN}; \quad F_{Ax} = 10 \text{ kN}$$

Izračunavanje sila u štapovima ojačanja

Kako bismo metodom presjeka odredili silu u štapu 5 i komponente sile u zglobu G, potrebno je učiniti zamišljeni presjek rešetke preko tog štapa. Time je rešetka rastavljena na dva dijela, a tražene sile odredit će se razmatranjem ravnoteže desnog dijela rešetkastog nosača prema slici 2.3.



Slika 2.3 Desni dio ojačane grede

Uvjeti ravnoteže glase :

$$\sum F_x = 0; -S_5 \cdot \cos \alpha - F_2 - F_{Gx} = 0$$

$$\sum F_z = 0; -F_1 + F_B + F_{Gz} - S_5 \cdot \sin \alpha = 0$$

$$\sum M_P = 0; -F_1 \cdot 2 + F_2 \cdot 3 + S_5 \cdot \cos \alpha \cdot 3 - S_5 \cdot \sin \alpha \cdot 2 + F_B \cdot 4 = 0$$

gdje je kut α kojeg zatvara štap S_5 i horizontalna linija koja izlazi iz čvora D, a iznosi :

$$\tan \alpha = \frac{1}{4}$$

$$\alpha = 14,04^\circ$$

Rješavanjem gornjih jednažbi dobije se :

$$S_5 = \frac{-100}{\cos(14,04^\circ) \cdot 3 - \sin(14,04^\circ) \cdot 2} = -41,23 \text{ kN}$$

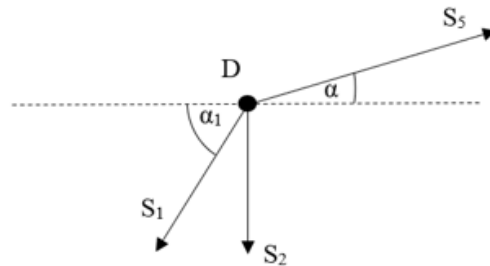
Štap S_5 je opterećen tlačno.

$$F_{Gz} = -F_B + F_1 + S_5 \cdot \sin \alpha = -25 + 15 + (-41,23) \cdot \sin(14,04^\circ) = -20 \text{ kN}$$

$$F_{Gx} = -F_2 - S_5 \cdot \cos(14,04^\circ) = 30 \text{ kN}$$

Sile u ostalim štapovima ojačanja (S_1 , S_2 , S_3 i S_4) određujemo metodom čvorova odnosno postavljanjem uvjeta ravnoteže za svaki čvor rešetke. Pretpostavlja se vlačno opterećenje svih štapova.

Odabire se čvor D prikazan na slici 2.4:



Slika 2.4 Čvor D

Uvjeti ravnoteže glase:

$$\sum F_x = 0; S_5 \cdot \cos \alpha - S_1 \cdot \cos \alpha_1 = 0$$

$$\sum F_z = 0; -S_2 - S_1 \cdot \sin \alpha_1 + S_5 \cdot \sin \alpha = 0$$

gdje je kut α_1 kojeg zatvaraju štap S_1 i horizontalna linija koja izlazi iz čvora D, a iznosi :

$$\tan \alpha_1 = \frac{2}{1}$$

$$\alpha_1 = 63,43^\circ$$

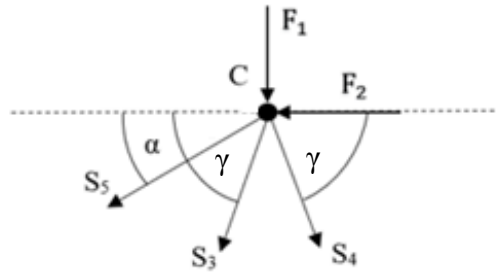
Rješavanjem gornjih jednadžbi dobije se :

$$S_1 = \frac{S_5 \cdot \cos \alpha}{\cos \alpha_1} = \frac{-41,23 \cdot \cos(14,04^\circ)}{\cos(63,43^\circ)} = -89,42 \text{ kN}$$

$$S_2 = S_5 \cdot \sin \alpha - S_1 \cdot \sin \alpha_1 = -41,23 \cdot \sin(14,04^\circ) - (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ) = 69,97 \text{ kN}$$

Štap S_1 je opterećen tlačno, a štap S_2 je opterećen vlačno.

Odabire se čvor C prikazan na slici 2.5:



Slika 2.5 Čvor C

Uvjeti ravnoteže glase :

$$\sum F_x = 0; \quad -S_5 \cdot \cos \alpha - F_2 - S_3 \cdot \cos \gamma + S_4 \cdot \cos \gamma = 0$$

$$\sum F_z = 0; \quad -F_1 - S_5 \cdot \sin \gamma - S_3 \cdot \sin \gamma - S_4 \cdot \sin \gamma = 0$$

gdje je γ kut između štapova S4 i S3 i horizontalne linije koja izlazi iz čvora C, a iznosi :

$$\tan \gamma = \frac{3}{1}$$

$$\gamma = 71,57^\circ$$

a kut δ između štapa S3 i horizontalne linije koja izlazi iz čvora C, a iznosi :

$$\tan \alpha = \frac{1}{4}$$

$$\alpha = 14,04^\circ$$

$$S_4 = \frac{S_3 \cdot \cos \gamma + F_2 + S_5 \cdot \cos \alpha}{\cos \gamma} = \frac{S_3 \cdot \cos(71,57^\circ) + 10 + (-41,23) \cdot \cos(14,04^\circ)}{\cos(71,57^\circ)} =$$

$$= S_3 - 94,89 = 44,81 - 94,89 = -50,08 \text{ kN}$$

Štap S4 je opterećen tlačno.

$$-S_3 \cdot \sin \gamma - S_4 \cdot \sin \gamma = F_1 + S_5 \cdot \sin \alpha \quad / \cdot (-1)$$

$$S_3 \cdot \sin \gamma + S_4 \cdot \sin \gamma = -F_1 - S_5 \cdot \sin \alpha$$

$$S_3 \cdot \sin \gamma + (S_3 - 94,89) \cdot \sin \gamma = -F_1 - S_5 \cdot \sin \alpha$$

$$S_3 \cdot \sin \gamma + S_3 \cdot \sin \gamma - 94,89 \cdot \sin \gamma = -F_1 - S_5 \cdot \sin \alpha$$

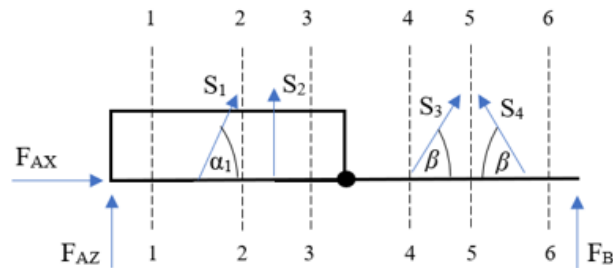
$$2 \cdot S_3 \cdot \sin \gamma = -F_1 - S_5 \cdot \sin \alpha + 94,89 \cdot \sin \gamma$$

$$S_3 = \frac{-15 - (-41,23) \cdot \sin(14,04^\circ) + 94,89 \cdot \sin(71,57^\circ)}{2 \cdot \sin(71,57^\circ)} = 44,81 \text{ kN}$$

Štap S_3 je opterećen vlačno.

Unutarnje sile

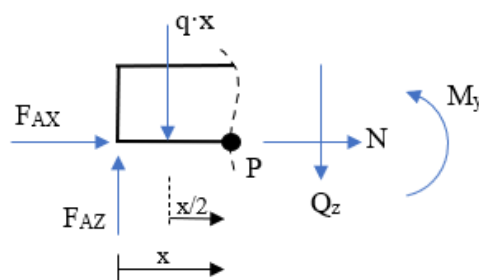
Unutarnje sile u označenom presjeku odredit će se s pomoću zamišljenog presjeka po nezavisnim područjima na proizvoljnoj udaljenosti x od lijevog oslonca (slika 2.6), pa za svako od tih područja određujemo analitičke izraze za unutarnje sile.



Slika 2.6 Nezavisna područja grede

Presjek 1-1

$$0 \leq x \leq 2 \text{ m}$$



Slika 2.7 Presjek 1-1

Zadano : $q = 12 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Uvjeti ravnoteže za dio nosača lijevo od presjeka (slika 2.7) glase:

$$\sum F_x = 0; F_{Ax} + N = 0$$

$$\sum F_z = 0; -F_{Az} + q \cdot x + Q_z = 0$$

$$\sum M_P = 0; -F_{Az} \cdot x + q \cdot x \cdot \frac{x}{2} + M_y = 0$$

Rješavanjem gornjih jednažbi dobije se :

- $N = -F_{Ax} = -10 \text{ kN}$

- $Q_z = F_{Az} - q \cdot x$

za $x=0 \rightarrow Q_z = 50 - 12 \cdot 0 = 50 \text{ kN}$

za $x=2 \rightarrow Q_z = 50 - 12 \cdot 2 = 26 \text{ kN}$

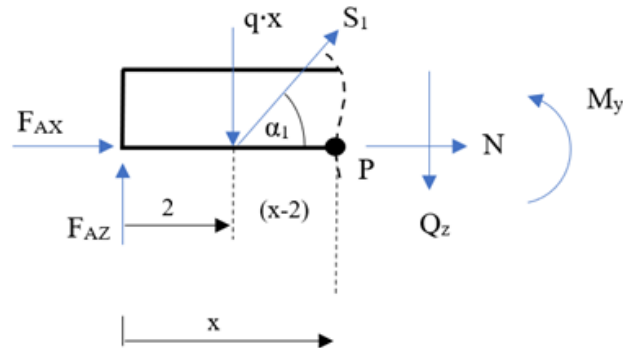
- $M_y = F_{Az} \cdot x - q \cdot x \cdot \frac{x^2}{2}$

za $x=0 \rightarrow M_y = 0 \text{ kN}$

za $x=2 \rightarrow M_y = 50 \cdot 2 - 12 \cdot \frac{2^2}{2} = 76 \text{ kNm}$

Presjek 2-2

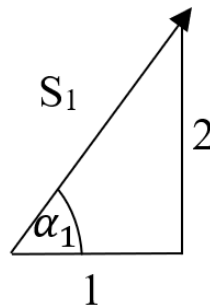
$$2 \leq x \leq 3 \text{ m}$$



Slika 2.8 Presjek 2-2

$$\text{Zadano : } q = 12 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Kut α_1 dobiven je na način (slika 2.9):

Slika 2.9 Kut α_1

$$\tan \alpha_1 = \frac{2}{1}$$

$$\alpha_1 = 63,43^\circ$$

Uvjeti ravnoteže za dio nosača lijevo od presjeka (slika 2.8) glase:

$$\sum F_x = 0; F_{Ax} + S_1 \cdot \cos \alpha_1 + N = 0$$

$$\sum F_z = 0; Q_z - F_{Az} + q \cdot x - S_1 \cdot \sin \alpha_1 = 0$$

$$\sum M_P = 0; -F_{Az} \cdot x + q \cdot x \cdot \frac{x}{2} - S_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot (x - 2) + M_y = 0$$

Rješavanjem gornjih jednažbi dobije se :

- $$N = -F_{Ax} - S_1 \cdot \cos \alpha_1 =$$
$$= -10 - (-89,42) \cdot \cos(63,43^\circ) =$$
$$= 30 \text{ kN}$$

- $$Q_z = F_{Az} - q \cdot x + S_1 \cdot \sin \alpha =$$
$$= 50 - 12 \cdot x + (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ)$$

$$\text{za } x=2 \rightarrow Q_z = 50 - 12 \cdot 2 + (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ) = -53,98 \text{ kN}$$

$$\text{za } x=3 \rightarrow Q_z = 50 - 12 \cdot 3 + (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ) = -65,98 \text{ kN}$$

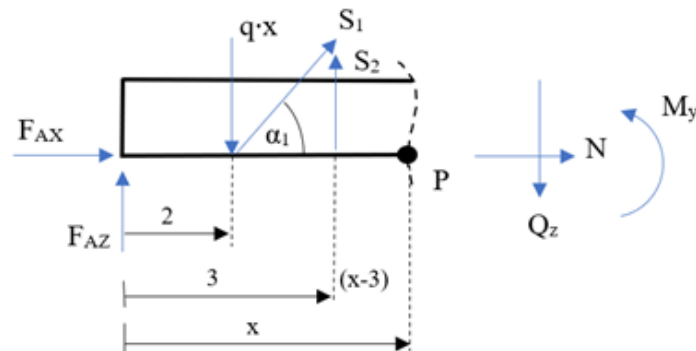
- $$M_y = F_{Az} \cdot x - q \cdot \frac{x^2}{2} + S_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot (x - 2)$$

$$\text{za } x=2 \rightarrow M_y = 50 \cdot 2 - 12 \cdot \frac{2^2}{2} + (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ) \cdot (2 - 2) = 76 \text{ kNm}$$

$$\text{za } x=3 \rightarrow M_y = 50 \cdot 3 - 12 \cdot \frac{3^2}{2} + (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ) \cdot (3 - 2) = 16,02 \text{ kNm}$$

Presjek 3-3

$$3 \leq x \leq 5 \text{ m}$$



Slika 2.10 Presjek 3-3

$$\text{Zadano : } q = 12 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\alpha_1 = 63,43^\circ$$

Uvjeti ravnoteže za dio nosača lijevo od presjeka (slika 2.10) glase:

$$\sum F_x = 0; F_{Ax} + S_1 \cdot \cos \alpha_1 + N = 0$$

$$\sum F_z = 0; Q_z - F_{Az} + q \cdot x - S_1 \cdot \sin \alpha_1 - S_2 = 0$$

$$\sum M_P = 0; -F_{Az} \cdot x + q \cdot x \cdot \frac{x}{2} - S_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot (x - 2) - S_2 \cdot (x - 3) + M_y = 0$$

Rješavanjem gornjih jednadžbi dobije se :

- $N = -F_{Ax} - S_1 \cdot \cos \alpha_1 =$
 $= -10 - (-89,42) \cdot \cos(63,43^\circ) =$
 $= 30 \text{ kN}$

- $Q_z = F_{Az} - q \cdot x + S_1 \cdot \sin \alpha_1 + S_2 =$
 $= 50 - 12 \cdot x + (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ) + 69,97$

$$\text{za } x=3 \rightarrow Q_z = 50 - 12 \cdot 3 + (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ) + 69,97 = 4 \text{ kN}$$

$$\text{za } x=5 \rightarrow Q_z = 50 - 12 \cdot 5 + (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ) + 69,97 = -20 \text{ kN}$$

$$\bullet \quad M_Y = F_{Az} \cdot x - q \cdot \frac{x^2}{2} + S_1 \cdot \sin \alpha \cdot (x - 2) + S_2 \cdot (x - 3)$$

$$\begin{aligned} \text{za } x=3 \rightarrow M_Y &= 50 \cdot 3 - 12 \cdot \frac{3^2}{2} + (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ) \cdot (3 - 2) + 69,97 \cdot 0 = \\ &= 16,02 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{za } x=5 \rightarrow M_Y &= 50 \cdot 5 - 12 \cdot \frac{5^2}{2} + (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ) \cdot (5 - 2) + 69,97 \cdot (5 - 3) \\ &= 0 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Na mjestu gdje je poprečna sila jednaka nuli potrebno je izračunati lokalni maksimum momenta savijanja za treće područje.

Udaljenost lokalnog momenta savijanja računa se prema izrazu:

$$\bullet \quad Q_Z = 0$$

$$Q_Z = F_{Az} - q \cdot x + S_1 \cdot \sin \alpha_1 + S_2$$

$$F_{Az} - q \cdot x + S_1 \cdot \sin \alpha_1 + S_2 = 0$$

$$-q \cdot x = -F_{Az} - S_1 \cdot \sin \alpha_1 - S_2 \quad / \cdot (-1)$$

$$q \cdot x = F_{Az} + S_1 \cdot \sin \alpha_1 + S_2$$

$$x = \frac{F_{Az} + S_1 \cdot \sin \alpha_1 + S_2}{q} = \frac{50 + (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ) + 69,97}{12} = 3,33 \text{ m}$$

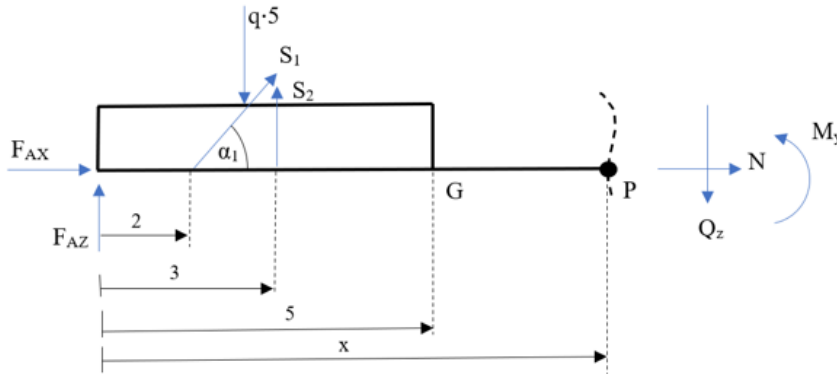
Lokalni maksimum momenta savijanja na udaljenosti $x = 3,33 \text{ m}$ računa se prema izrazu:

$$\bullet \quad M_Y = F_{Az} \cdot x - q \cdot \frac{x^2}{2} + S_1 \cdot \sin \alpha \cdot (x - 2) + S_2 \cdot (x - 3)$$

$$\begin{aligned} \text{za } x=3,33 \rightarrow M_Y &= 50 \cdot 3,33 - 12 \cdot \frac{3,33^2}{2} + (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ) \cdot (3,33 - 2) + 69,97 \cdot \\ &\quad (3,33 - 3) = \\ &= 16,67 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Presjek 4-4

$$5 \leq x \leq 6 \text{ m}$$



Slika 2.11 Presjek 4-4

$$\text{Zadano : } q = 12 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\alpha_1 = 63,43^\circ$$

Uvjeti ravnoteže za dio nosača lijevo od presjeka glase (slika 2.11):

$$\sum F_x = 0; F_{Ax} + S_1 \cdot \cos \alpha_1 + N = 0$$

$$\sum F_z = 0; Q_z - F_{Az} + q \cdot 5 - S_1 \cdot \sin \alpha_1 - S_2 = 0$$

$$\sum M_P = 0; -F_{Az} \cdot x + q \cdot 5 \cdot (x - 2,5) - S_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot (x - 2) - S_2 \cdot (x - 3) + M_y = 0$$

Rješavanjem gornjih jednadžbi dobije se :

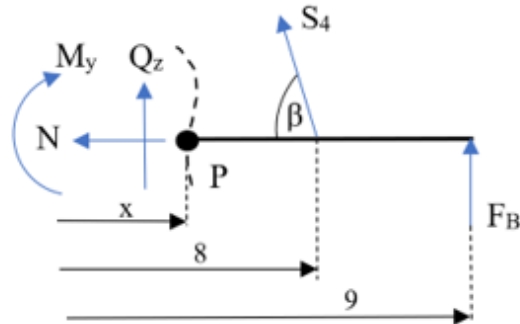
- $N = -F_{Ax} - S_1 \cdot \cos \alpha_1 =$
 $= -10 - (-89,42) \cdot \cos(63,43^\circ) =$
 $= 30 \text{ kN}$
- $Q_z = F_{Az} - q \cdot 5 + S_1 \cdot \sin \alpha_1 + S_2 =$
 $= 50 - 12 \cdot 5 + (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ) + 69,97 = -20 \text{ kN}$
- $M_y = F_{Az} \cdot x - q \cdot 5 \cdot (x - 2,5) + S_1 \cdot \sin \alpha_1 \cdot (x - 2) + S_2 \cdot (x - 3)$

$$\begin{aligned} \text{za } x=5 \rightarrow M_y &= 50 \cdot 5 - 12 \cdot 5 \cdot 2,5 + (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ) \cdot (5 - 2) + \\ &69,97 \cdot (5 - 3) = \\ &= 0 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{za } x=6 \rightarrow M_y &= 50 \cdot 6 - 12 \cdot 5 \cdot 3,5 + (-89,42) \cdot \sin(63,43^\circ) \cdot (6 - 2) + \\ &69,97 \cdot (6 - 3) = \\ &= -20 \text{ kNm} \end{aligned}$$

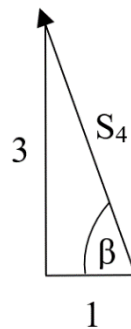
Presjek 5-5

$$6 \leq x \leq 8 \text{ m}$$



Slika 2.12 Presjek 5-5

Kut β dobiven je na način (slika 2.13):

Slika 2.13 Kut β

$$\tan \beta = \frac{3}{1}$$

$$\beta = 71,57^\circ$$

Uvjeti ravnoteže za dio nosača lijevo od presjeka glase (slika 2.12):

$$\sum F_x = 0; -N - S_4 \cdot \cos \beta = 0$$

$$\sum F_z = 0; -Q_z - F_B - S_4 \cdot \sin \beta = 0$$

$$\sum M_P = 0; -M_y + F_B \cdot (9 - x) + S_4 \cdot \sin \beta \cdot (8 - x) = 0$$

Rješavanjem gornjih jednažbi dobije se :

- $N = -S_4 \cdot \cos \beta =$

$$= -(-50,08) \cdot \cos(71,57^\circ) =$$

$$= 15,83 \text{ kN}$$

- $Q_z = -F_B - S_4 \cdot \sin \beta =$

$$= -25 - (-50,08) \cdot \sin(71,57^\circ) = 22,51 \text{ kN}$$

- $M_Y = F_B \cdot (9 - x) + S_4 \cdot \sin \beta \cdot (8 - x)$

$$\text{za } x=6 \rightarrow M_Y = 25 \cdot (9 - 6) + (-50,08) \cdot \sin(71,57^\circ) \cdot (8 - 6) =$$

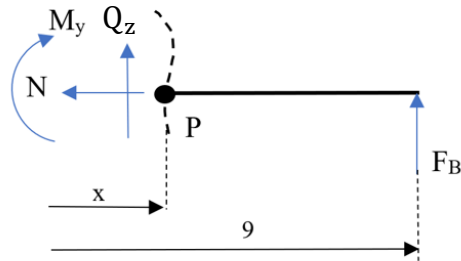
$$= -20 \text{ kNm}$$

$$\text{za } x=8 \rightarrow M_Y = 25 \cdot (9 - 8) + (-50,08) \cdot \sin(71,57^\circ) \cdot (8 - 8) =$$

$$= 25 \text{ kNm}$$

Presjek 6-6

$$8 \leq x \leq 9 \text{ m}$$



Slika 2.14 Presjek 6-6

Uvjeti ravnoteže za dio nosača lijevo od presjeka glase (slika 2.14):

$$\sum F_x = 0; -N = 0$$

$$\sum F_z = 0; -Q_z - F_B = 0$$

$$\sum M_P = 0; -M_y + F_B \cdot (9 - x) = 0$$

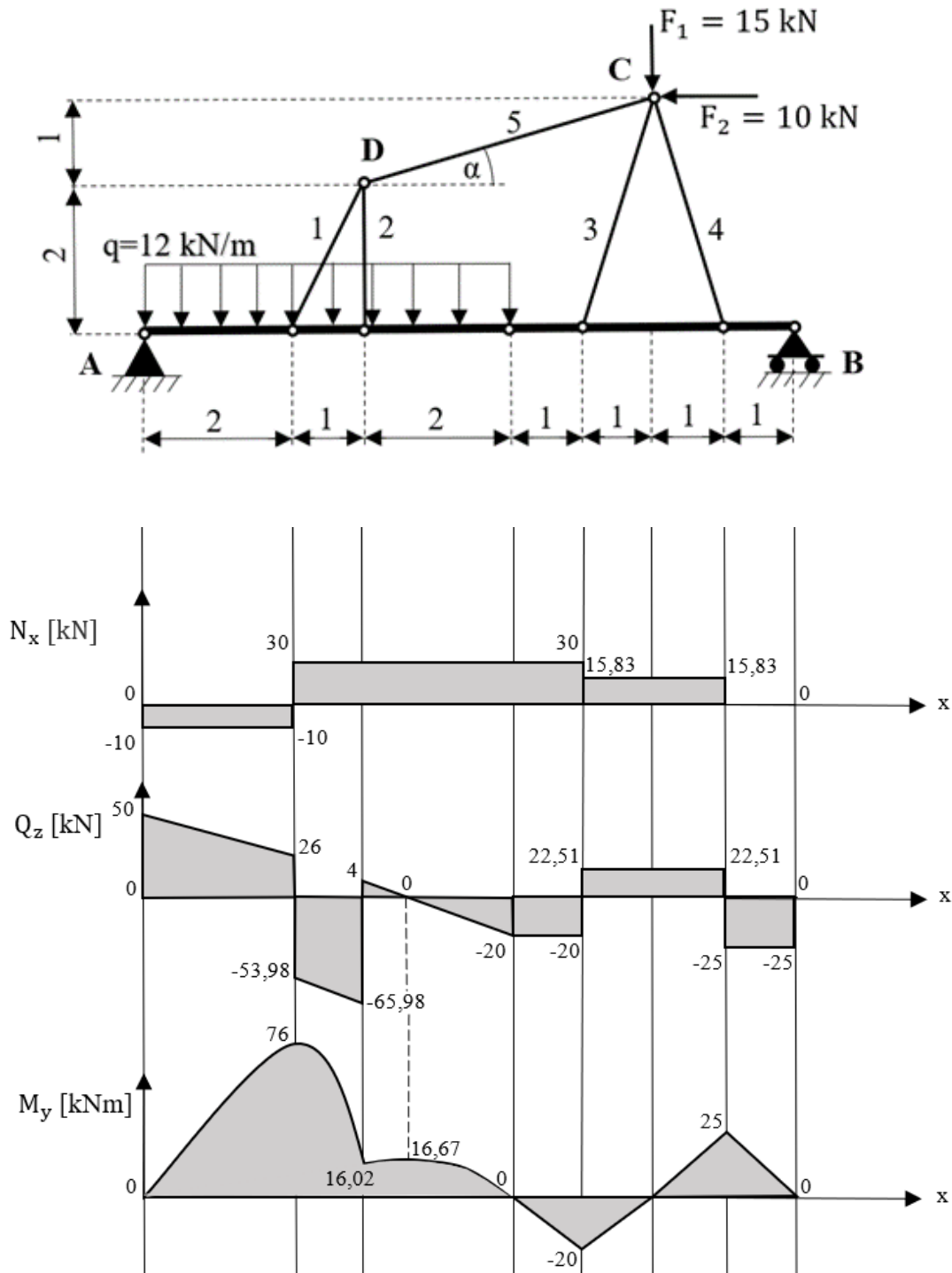
Rješavanjem gornjih jednadžbi dobije se :

- $N = 0 \text{ kN}$
- $Q_z = -F_B = -25 \text{ kN}$
- $M_y = F_B \cdot (9 - x)$

$$\text{za } x=8 \rightarrow M_y = 25 \cdot (9 - 8) = 25 \text{ kNm}$$

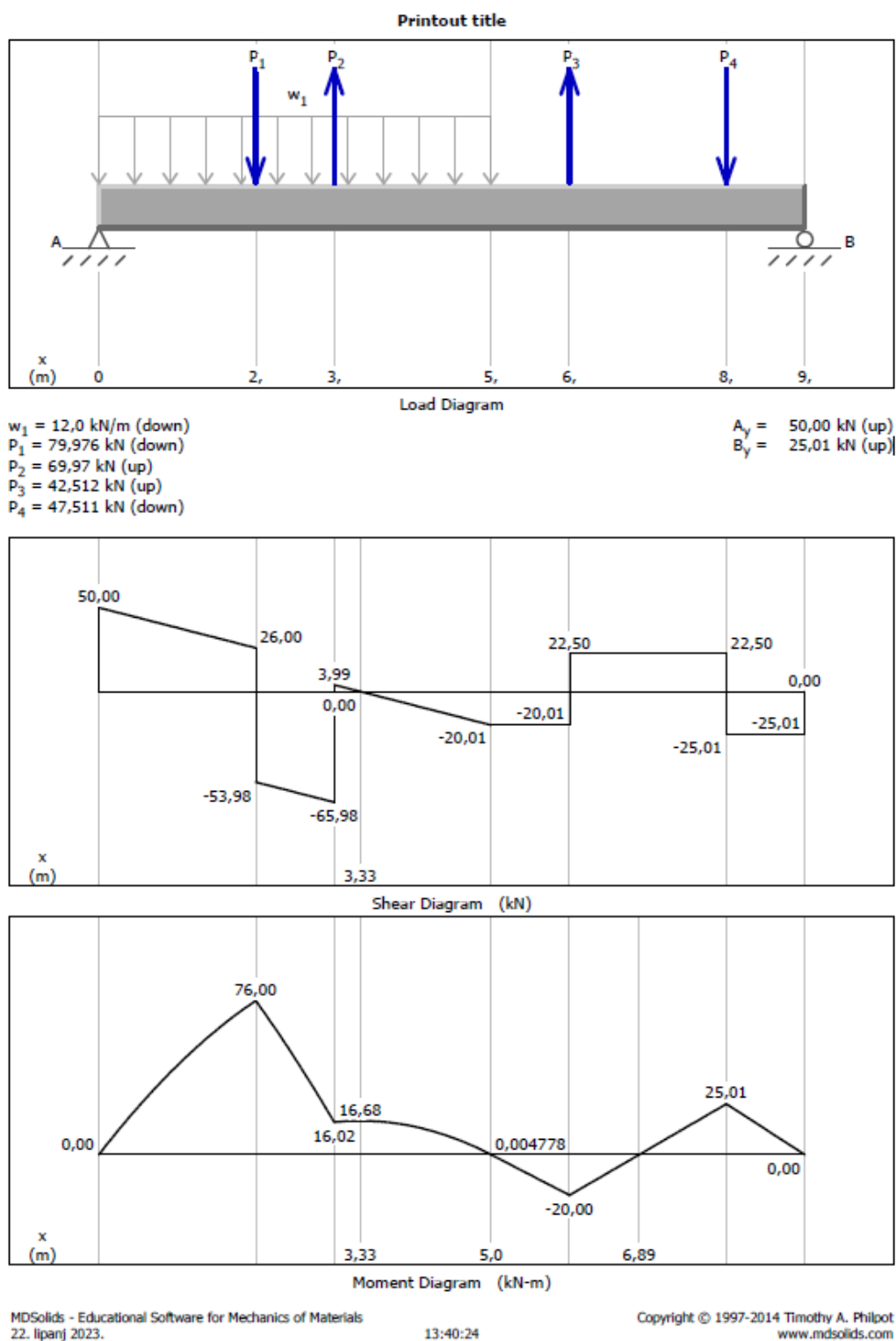
$$\text{za } x=9 \rightarrow M_y = 25 \cdot (9 - 9) = 0 \text{ kNm}$$

Dijagram unutarnjih sila po nezavisnim područjima linijskog nosača prikazan je na slici 2.15.



Slika 2.15 Dijagram unutarnjih sila ojačane grede

Dijagram unutarnjih sila dobiven iz programskog paketa MDSolids prikazan je na slici 2.16.



Slika 2.16 Dijagram unutarnjih sila ojačane grede iz programskog paketa MDSolids

Usporedbom dobivenih vrijednosti unutarnjih sila po nezavisnim područjima linijskog nosača analitičkim izračunom i dobivenih vrijednosti iz programskog paketa MDSolids utvrđuje se podudaranje vrijednosti.

U tablici 2.1 prikazane su izračunate sile u štapovima rešetkaste konstrukcije ojačane grede.

Tablica 2.1 Izračunate sile u štapovima rešetkaste konstrukcije ojačane grede

Štap	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
Sila u štapu [kN]	-89,42	69,97	44,81	-50,08	-41,23

3. Dimenzioniranje štapova ojačane grede

U ovom dijelu rada vrši se dimenzioniranje štapova ojačanja grede za dva izabrana materijala, za konstrukcijski čelik S235 i aluminijsku slitinu EN AW-6082.

Čelik s oznakom S235 je konstrukcijski čelik koji se primjenjuje kod izrade karakterističnih konstrukcijskih dijelova strojeva i uređaja. Najčešće služe za izradu vratila, osovina, zupčanika, nosača opruga, vijaka, poklopaca, ventila, kućišta itd. Obzirom na mehanička svojstva, konstrukcijski čelici moraju imati visoku granicu razvlačenja, dovoljnu plastičnu deformabilnost (radi izbjegavanja pojave krhkog loma), moraju biti otporni na trošenje i koroziju, te obradivi odvajanjem čestica (rezanje), zavarljivi itd. [2].

Kod oznake S235 slovom S označavamo konstrukcijski čelik, a vrijednost 235 označava granicu tečenja materijala (f_{yk}).

Karakteristike konstrukcijskog čelika S235 su:

$$f_{yk} = 240 \text{ MPa (granica tečenja)}$$

$$f_{yd} = 218 \text{ MPa (vlačna čvrstoća)}$$

$$E = 210 \text{ GPa} = 210 \cdot 10^3 \text{ MPa (modul elastičnosti)}$$

Aluminijska slitina EN AW-6082 odlikuje se dobrom toplinskom obradivošću, otpornošću na koroziju i najvećom vlačnom čvrstoćom iz grupe legura 6000 [3].

Koristi se za izradu limova, strukturnih profila, šipki i ploča. Naširoko se koristi u zrakoplovstvu, kamionima, tornjevima, brodovima i drugim primjenama koje zahtijevaju visoku čvrstoću, zavarljivost i otpornost na koroziju [4].

Kod oznake AW-6082 slovom A označavamo da se radi o aluminiju, iza slijedi četveroznamenasti broj za identifikaciju legure u kojoj prva znamenka označava glavni legirni element, druga znamenka varijacije početne legure, a treća i četvrtka znamenka varijacije pojedinačnih legura. U ovom slučaju 6xxx označava aluminij-magnezij-silicij leguru [5].

Karakteristike aluminijske slitine EN AW-6082 [6] su:

$$f_{yk} = 230 \text{ MPa (granica tečenja)}$$

$$f_{yd} = 270 \text{ MPa (vlačna čvrstoća)}$$

$$E = 71 \text{ GPa} = 71 \cdot 10^3 \text{ MPa (modul elastičnosti)}$$

$$\rho = 2710 \text{ kg / m}^3 \text{ (gustoća)}$$

Vlačno opterećene elemente dimenzioniramo po kriteriju nosivosti koji glasi

$$\sigma_d \leq f_{yd} .$$

Tlačno opterećene elemente dimenzioniramo po kriteriju stabilnosti tj. opasnosti od izvijanja

koji glasi $\frac{N_d}{A \cdot \chi} \leq f_{yd} .$

3.1. Dimenzioniranje štapova ojačanja za konstrukcijski čelik S235

Čvor D prikazan je na slici 3.1.

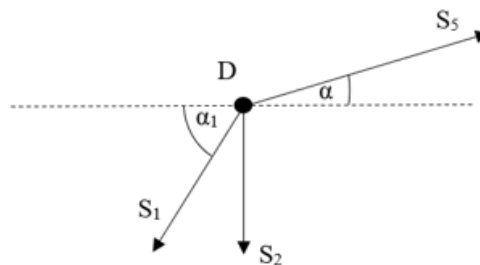
$$S_1 = -89,42 \text{ kN}$$

$$S_2 = 69,97 \text{ kN}$$

$$S_5 = -41,23 \text{ kN}$$

$$\alpha_1 = 63,43^\circ$$

$$\alpha = 14,04^\circ$$



Slika 3.1 Čvor D

- Dimenzioniranje štapa S_1

Provjerava se izvijanje tlačno opterećenog štapa iznosa $S_1 = -89,42 \text{ kN}$.

Uvjet izvijanja tlačno opterećenih elemenata glasi: $N_d \leq N_{iRd}$,

iz čega slijedi da je: $N_d = S_1$; $N_{iRd} = \kappa \cdot A \cdot f_{yd}$.

Oznaka κ označava koeficijent gubitka stabilnosti štapa, A označava površinu poprečnog presjeka opterećenog štapa, a f_{yd} označava vlačnu čvrstoću materijala štapa.

Za potrebe ovog proračuna dogovorno se uzima početna vrijednost koeficijenta gubitka stabilnosti $\kappa \rightarrow 0,6 \div 0,7$ odnosno usvaja se $\kappa = 0,6$.

Uvjet izvijanja sada glasi: $S_1 \leq \kappa \cdot A \cdot f_{yd}$,

$$\text{odnosno : } A \geq \frac{S_1}{\kappa \cdot f_{yd}} = \frac{89420 \text{ N}}{0,6 \cdot 218 \text{ MPa}} = 684 \text{ mm}^2$$

Vlačna čvrstoća materijala računa se prema izrazu: $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_M} = \frac{240}{1,1} = 218 \text{ MPa}$

Na temelju izračunate površine $A = 684 \text{ mm}^2$ usvaja se kvadratni profil dimenzija 60x60x5 mm s prvom većom površinom A od izračunate, a pripadajući podaci glase:

$$A = 1070 \text{ mm}^2$$

$$m = 8,42 \text{ kg/m}$$

$$I_y = I_z = 533000 \text{ mm}^4$$

$$W_y = W_z = 1,78 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

$$i = 22,3 \text{ mm}$$

Vitkost tlačno opterećenog štapa S_1 računa se prema izrazu: $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a}$, gdje oznaka λ označava vitkost prema Eulerovom izrazu, a oznaka λ_a označava vitkost na granici tečenja.

Vitkost po Euleru se računa prema izrazu: $\lambda = \frac{l_i}{i}$, gdje oznaka l_i označava duljinu izvijanja štapa, a oznaka i označava polumjer tromosti.

$$l_i = l_1 \rightarrow \text{duljina štapa } S_1 = 2,24 \text{ m} = 2240 \text{ mm}$$

$$i = 22,3 \text{ mm}$$

$$\text{Dobivena vitkost po Euleru iznosi: } \lambda = \frac{l_i}{i} = \frac{2240}{22,3} = 100,45$$

Vitkost na granici tečenja računa se prema izrazu: $\lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}}$, gdje oznaka E označava modul elastičnosti materijala, a oznaka f_{yk} označava granicu tečenja materijala.

$$E = 210 \text{ GPa} = 210\,000 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = 240 \text{ MPa}$$

$$\text{Dobivena vitkost na granici tečenja iznosi: } \lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^3}{240 \text{ MPa}}} = 92,9$$

$$\text{Vitkost štapa } S_1 \text{ iznosi: } \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a} = \frac{100,45}{92,9} = 1,08$$

Dobivena vrijednost se raspodjeljuje na brojeve 1,00 i 0,08, te se pomoću tablice 3.1 određuje vrijednost $\kappa = 0,49$.

Tablica 3.1 - Tablica koeficijenta gubitka stabilnosti u ovisnosti o klasi izvijanja za $\bar{\lambda}=1,08$

$\bar{\lambda}_k$	für Knickspannungslinie c									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,2	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95
0,3	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90
0,4	0,90	0,89	0,89	0,88	0,88	0,87	0,86	0,86	0,85	0,85
0,5	0,84	0,84	0,83	0,83	0,82	0,81	0,81	0,80	0,80	0,79
0,6	0,78	0,78	0,77	0,77	0,76	0,75	0,75	0,74	0,74	0,73
0,7	0,72	0,72	0,71	0,71	0,70	0,69	0,69	0,68	0,67	0,67
0,8	0,66	0,66	0,65	0,64	0,64	0,63	0,62	0,62	0,61	0,61
0,9	0,60	0,59	0,58	0,58	0,57	0,57	0,56	0,56	0,55	0,55
1,0	0,54	0,53	0,53	0,52	0,52	0,51	0,51	0,50	0,49	0,49
1,1	0,48	0,48	0,47	0,47	0,46	0,46	0,45	0,45	0,44	0,44
1,2	0,43	0,43	0,42	0,42	0,41	0,41	0,41	0,40	0,40	0,39
1,3	0,39	0,38	0,38	0,38	0,37	0,37	0,36	0,36	0,36	0,35
1,4	0,35	0,35	0,34	0,34	0,33	0,33	0,33	0,32	0,32	0,32
1,5	0,31	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,29	0,29	0,29
1,6	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26
1,7	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24
1,8	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
1,9	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
2,0	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18
2,1	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
2,2	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15
2,3	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14
2,4	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13
2,5	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12
2,6	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
2,7	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
2,8	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
2,9	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
3,0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

Zatim se vrši provjera zadovoljavanja uvjeta izvijanja tlačno opterećenog štapa:

$$N_{iRd} = \kappa \cdot A \cdot f_{yd} = 0,49 \cdot 1070 \cdot 218 = 114297,4 \text{ N} = 114,3 \text{ kN}$$

$$N_{iRd} = 114,3 \text{ kN} > S_1 = 89,42 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen!

- Dimenzioniranje štapa S_2

Provjerava se nosivost vlačno opterećenog štapa iznosa $S_2 = 69,97 \text{ kN}$.

Uvjet nosivosti vlačno opterećenih elemenata glasi: $\sigma_d = \frac{N_d}{A} \leq f_{yd}$, odnosno $N_d \leq N_{Rd}$

iz čega slijedi da je: $N_d = S_2$.

$$A \geq \frac{S_2}{f_{yd}} = \frac{69970 \text{ N}}{218 \text{ MPa}} = 321 \text{ mm}^2$$

Na temelju izračunate površine $A = 321 \text{ mm}^2$ usvaja se kvadratni profil dimenzija 50x50x3 mm s prvom većom površinom A od izračunate, a pripadajući podaci glase:

$$A = 554 \text{ mm}^2$$

$$m = 4,35 \text{ kg/m}$$

$$I_y = I_z = 202000 \text{ mm}^4$$

$$W_y = W_z = 8080 \text{ mm}^3$$

$$i = 19,1 \text{ mm}$$

Zatim se vrši provjera zadovoljavanja uvjeta nosivosti vlačno opterećenog štaba:

$$\sigma_s = \frac{S_2}{A} = \frac{69970 \text{ N}}{554 \text{ mm}^2} = 126,3 \text{ MPa} < f_{yd} = 218 \text{ MPa}$$

Uvjet je zadovoljen!

- Dimenzioniranje štaba S_5

Provjerava se izvijanje tlačno opterećenog štaba iznosa $S_5 = -41,23 \text{ kN}$.

Uvjet izvijanja tlačno opterećenih elemenata glasi: $N_d \leq N_{iRd}$,

iz čega slijedi da je: $N_d = S_5$; $N_{iRd} = \kappa \cdot A \cdot f_{yd}$.

Za potrebe ovog proračuna dogovorno se uzima početna vrijednost koeficijenta gubitka stabilnosti $\kappa \rightarrow 0,6 \div 0,7$ odnosno usvaja se $\kappa = 0,6$.

Uvjet izvijanja sada glasi: $S_5 \leq \kappa \cdot A \cdot f_{yd}$,

$$\text{odnosno : } A \geq \frac{S_5}{\kappa \cdot f_{yd}} = \frac{41230}{0,6 \cdot 218 \text{ MPa}} = 315,21 \text{ mm}^2$$

Vlačna čvrstoća materijala iznosi: $f_{yk} = \frac{f_{yk}}{\gamma_M} = \frac{240}{1,1} = 218 \text{ MPa}$

Na temelju izračunate površine $A = 315 \text{ mm}^2$ usvaja se kvadratni profil dimenzija 60x60x5 mm s prvom većom površinom A od izračunate, a pripadajući podaci glase:

$$A = 1070 \text{ mm}^2$$

$$m = 8,42 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$I_y = I_z = 533000 \text{ mm}^4$$

$$W_y = W_z = 1,78 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

$$i = 22,3 \text{ mm}$$

Vitkost tlačno opterećenog štapa S_5 računa se prema izrazu: $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a}$.

Vitkost po Euleru se računa prema izrazu: $\lambda = \frac{l_i}{i} = \frac{4120}{22,3} = 184,75$

$$l_i = l_1 \rightarrow \text{duljina štapa } S_5 = \sqrt{4^2 + 1^2} = 4,12 \text{ m} = 4120 \text{ mm}$$

$$i = 22,3 \text{ mm}$$

Vitkost na granici tečenja računa se prema izrazu: $\lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^3}{240 \text{ MPa}}} = 92,9$

$$E = 210 \text{ GPa} = 210\,000 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = 240 \text{ MPa}$$

Vitkost štapa S_1 iznosi: $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a} = \frac{184,75}{92,9} = 1,99$

Dobivena vrijednost se raspodjeljuje na brojeve 1,9 i 0,09 te se pomoću tablice 3.2 određuje vrijednost $\kappa = 0,20$.

Tablica 3.2 - Tablica koeficijenta gubitka stabilnosti u ovisnosti o klasi izvijanja za $\bar{\lambda}=1,99$

$\bar{\lambda}_k$	für Knickspannungslinie c									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,2	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95
0,3	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90
0,4	0,90	0,89	0,89	0,88	0,88	0,87	0,86	0,86	0,85	0,85
0,5	0,84	0,84	0,83	0,83	0,82	0,81	0,81	0,80	0,80	0,79
0,6	0,78	0,78	0,77	0,77	0,76	0,75	0,75	0,74	0,74	0,73
0,7	0,72	0,72	0,71	0,71	0,70	0,69	0,69	0,68	0,67	0,67
0,8	0,66	0,66	0,65	0,64	0,64	0,63	0,62	0,62	0,61	0,61
0,9	0,60	0,59	0,58	0,58	0,57	0,57	0,56	0,56	0,55	0,55
1,0	0,54	0,53	0,53	0,52	0,52	0,51	0,51	0,50	0,49	0,49
1,1	0,48	0,48	0,47	0,47	0,46	0,46	0,45	0,45	0,44	0,44
1,2	0,43	0,43	0,42	0,42	0,41	0,41	0,41	0,40	0,40	0,39
1,3	0,39	0,38	0,38	0,38	0,37	0,37	0,36	0,36	0,36	0,35
1,4	0,35	0,35	0,34	0,34	0,33	0,33	0,33	0,32	0,32	0,32
1,5	0,31	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,29	0,29	0,29
1,6	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26
1,7	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24
1,8	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
1,9	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
2,0	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18
2,1	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
2,2	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15
2,3	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14
2,4	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13
2,5	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12
2,6	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
2,7	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
2,8	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
2,9	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
3,0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

Zatim se vrši provjera zadovoljavanja uvjeta izvijanja tlačno opterećenog štapa:

$$N_{iRd} = \kappa \cdot A \cdot f_{yd} = 0,20 \cdot 1070 \cdot 218 = 46652 \text{ N} = 46,65 \text{ kN}$$

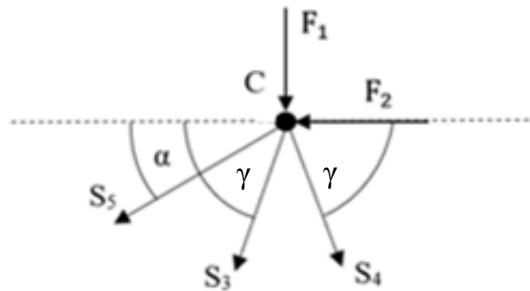
$$N_{iRd} = 46,65 \text{ kN} > S_5 = 41,23 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen!

Čvor C prikazan je na slici 3.2.

$$S_3 = 44,81 \text{ kN}$$

$$S_4 = -50,08 \text{ kN}$$



Slika 3.2 Čvor C

- Dimenzioniranje štapa S_3

Provjerava se nosivost vlačno opterećenog štapa iznosa $S_3 = 44,81 \text{ kN}$.

Uvjet nosivosti vlačno opterećenih elemenata glasi: $\sigma_d = \frac{N_d}{A} \leq f_{yd}$, odnosno $N_d \leq N_{Rd}$

iz čega slijedi da je: $N_d = S_3$.

$$A \geq \frac{S_3}{f_{yd}} = \frac{44810}{218 \text{ MPa}} = 205,55 \text{ mm}^2$$

Na temelju izračunate površine $A = 205,55 \text{ mm}^2$ usvaja se kvadratni profil dimenzija 40x40x3 mm s prvom većom površinom A od izračunate, a pripadajući podaci glase:

$$A = 434 \text{ mm}^2$$

$$m = 3,41 \text{ kg/m}$$

$$I_y = I_z = 97800 \text{ mm}^4$$

$$W_y = W_z = 4890 \text{ mm}^3$$

$$i = 15 \text{ mm}$$

Zatim se vrši provjera zadovoljavanja uvjeta nosivosti vlačno opterećenog štapa:

$$\sigma_s = \frac{S_3}{A} = \frac{44810 \text{ N}}{434 \text{ mm}^2} = 103,2 \text{ MPa} < f_{yd} = 218 \text{ MPa}$$

Uvjet je zadovoljen!

- Dimenzioniranje štapa S_4

Provjerava se izvijanje tlačno opterećenog štapa iznosa $S_4 = -50,08 \text{ kN}$.

Uvjet izvijanja tlačno opterećenih elemenata glasi: $N_d \leq N_{iRd}$,

iz čega slijedi da je: $N_d = S_4$; $N_{iRd} = \kappa \cdot A \cdot f_{yd}$.

Za potrebe ovog proračuna dogovorno se uzima početna vrijednost koeficijenta gubitka stabilnosti $\kappa \rightarrow 0,6 \div 0,7$ odnosno usvaja se $\kappa = 0,6$.

Uvjet izvijanja sada glasi: $S_4 \leq \kappa \cdot A \cdot f_{yd}$,

$$\text{odnosno : } A \geq \frac{S_4}{\kappa \cdot f_{yd}} = \frac{50080}{0,6 \cdot 218 \text{ MPa}} = 382,9 \text{ mm}^2$$

Vlačna čvrstoća materijala iznosi: $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_M} = \frac{240}{1,1} = 218 \text{ MPa}$

Na temelju izračunate površine $A = 382,9 \text{ mm}^2$ usvaja se kvadratni profil dimenzija 60x60x5 mm s prvom većom površinom A od izračunate, a pripadajući podaci glase:

$$A = 1070 \text{ cm}^2$$

$$m = 8,42 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$I_y = I_z = 533000 \text{ mm}^4$$

$$W_y = W_z = 1,78 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

$$i = 22,3 \text{ mm}$$

Vitkost tlačno opterećenog štapa S_4 računa se prema izrazu: $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a}$.

Vitkost po Euleru se računa prema izrazu: $\lambda = \frac{l_i}{i} = \frac{316}{22,3} = 141,70$

$$l_i = l_4 \rightarrow \text{duljina štapa } S_4 = \sqrt{3^2 + 1^2} = 3,16 \text{ m} = 3160 \text{ mm}$$

$$i = 22,3 \text{ mm}$$

$$\text{Vitkost na granici tečenja računa se prema izrazu: } \lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^3}{240 \text{ MPa}}} = 92,9$$

$$E = 210 \text{ GPa} = 210\,000 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = 240 \text{ MPa}$$

$$\text{Vitkost štapa } S_1 \text{ iznosi: } \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a} = \frac{141,70}{92,9} = 1,53$$

Dobivena vrijednost se raspodjeljuje na brojeve 1,5 i 0,03 te se pomoću tablice 3.3 određuje vrijednost $\kappa = 0,30$.

Tablica 3.3 - Tablica koeficijenta gubitka stabilnosti u ovisnosti o klasi izvijanja za $\bar{\lambda}=1,53$

$\bar{\lambda}_k$	für Knickspannungslinie c									
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,2	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95
0,3	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90
0,4	0,90	0,89	0,89	0,88	0,88	0,87	0,86	0,86	0,85	0,85
0,5	0,84	0,84	0,83	0,83	0,82	0,81	0,81	0,80	0,80	0,79
0,6	0,78	0,78	0,77	0,77	0,76	0,75	0,75	0,74	0,74	0,73
0,7	0,72	0,72	0,71	0,71	0,70	0,69	0,69	0,68	0,67	0,67
0,8	0,66	0,66	0,65	0,64	0,64	0,63	0,62	0,62	0,61	0,61
0,9	0,60	0,59	0,58	0,58	0,57	0,57	0,56	0,56	0,55	0,55
1,0	0,54	0,53	0,53	0,52	0,52	0,51	0,51	0,50	0,49	0,49
1,1	0,48	0,48	0,47	0,47	0,46	0,46	0,45	0,45	0,44	0,44
1,2	0,43	0,43	0,42	0,42	0,41	0,41	0,41	0,40	0,40	0,39
1,3	0,39	0,38	0,38	0,38	0,37	0,37	0,36	0,36	0,36	0,35
1,4	0,35	0,35	0,34	0,34	0,33	0,33	0,33	0,32	0,32	0,32
1,5	0,31	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,29	0,29	0,29
1,6	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26
1,7	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24
1,8	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
1,9	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
2,0	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18
2,1	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
2,2	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15
2,3	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14
2,4	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13
2,5	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12
2,6	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
2,7	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
2,8	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
2,9	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
3,0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

Zatim se vrši provjera zadovoljavanja uvjeta izvijanja tlačno opterećenog štapa:

$$N_{iRd} = \kappa \cdot A \cdot f_{yd} = 0,30 \cdot 1070 \cdot 218 = 69978 \text{ N} = 69,98 \text{ kN}$$

$$N_{iRd} = 69,98 \text{ kN} > S_4 = 50,08 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen!

3.2. Dimenzioniranje štapova ojačanja za aluminijsku leguru EN AW-6082

- Dimenzioniranje štapa S_1

Provjerava se izvijanje tlačno opterećenog štapa iznosa $S_1 = -89,42$ kN.

Uvjet izvijanja tlačno opterećenih elemenata glasi: $N_d \leq N_{iRd}$,

iz čega slijedi da je: $N_d = S_1$; $N_{iRd} = \kappa \cdot A \cdot f_{yd}$.

Za potrebe ovog proračuna dogovorno se uzima početna vrijednost koeficijenta gubitka stabilnosti $\kappa \rightarrow 0,6 \div 0,7$ odnosno usvaja se $\kappa = 0,6$.

Uvjet izvijanja sada glasi: $S_1 \leq \kappa \cdot A \cdot f_{yd}$,

$$\text{odnosno : } A \geq \frac{S_1}{\kappa \cdot f_{yd}} = \frac{89420}{0,6 \cdot 27 \text{ MPa}} = 551,2 \text{ mm}^2$$

Vlačna čvrstoća materijala iznosi: $f_{yd} = 270$ MPa

Na temelju izračunate površine $A = 551,2 \text{ mm}^2$ usvaja se kvadratni profil dimenzija 70x70x5 mm s prvom većom površinom A od izračunate, a pripadajući podaci glase:

$$A = 1270 \text{ mm}^2$$

$$m = 9,99 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$I_y = I_z = 885000 \text{ mm}^4$$

$$W_y = W_z = 2,53 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

$$i = 26,4 \text{ mm}$$

Vitkost tlačno opterećenog štapa S_1 računa se prema izrazu: $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a}$.

Vitkost po Euleru se računa prema izrazu: $\lambda = \frac{l_i}{i} = \frac{2240}{26,4} = 84,85$ mm

$l_i = l_1 \rightarrow$ duljina štapa $S_1 = 2,24 \text{ m} = 2240 \text{ mm}$

$$i = 26,4 \text{ mm}$$

$$\text{Vitkost na granici tečenja računa se prema izrazu: } \lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{71 \cdot 10^3}{230 \text{ MPa}}} = 55,20$$

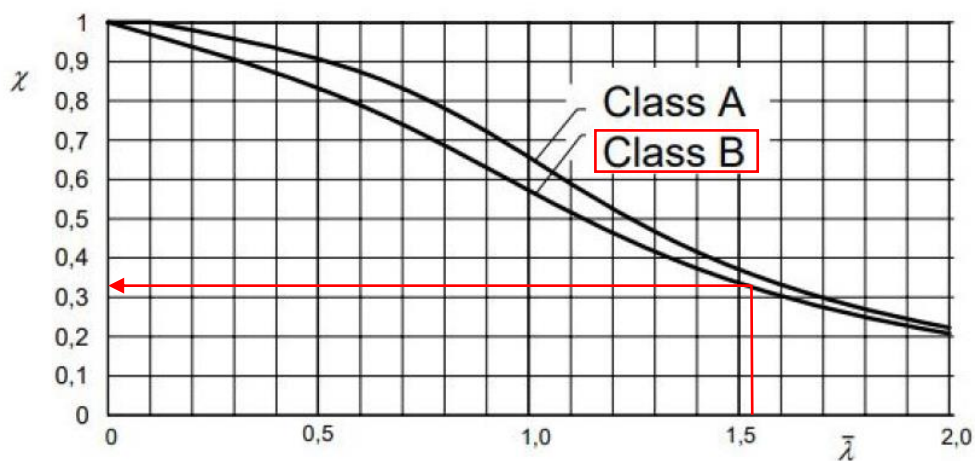
$$E = 71 \text{ GPa} = 71\,000 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = 230 \text{ MPa}$$

$$\text{Vitkost štapa } S_1 \text{ iznosi: } \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a} = \frac{84,85}{55,20} = 1,53$$

Pomoću tablice 3.4 se određuje vrijednost $\kappa = 0,32$.

Tablica 3.4 - Tablica ovisnosti relativne vitkosti o faktoru gubitka stabilnosti za $\bar{\lambda}=1,53$



Zatim se vrši provjera zadovoljavanja uvjeta izvijanja tlačno opterećenog štapa:

$$N_{iRd} = \kappa \cdot A \cdot f_{yd} = 0,32 \cdot 1270 \cdot 270 = 109728 \text{ N} = 109,73 \text{ kN}$$

$$N_{iRd} = 109,73 \text{ kN} > S_1 = 89,42 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen!

- Dimenzioniranje štapa S_2

Provjerava se nosivost vlačno opterećenog štapa iznosa $S_2 = 69,97 \text{ kN}$.

$$\text{Uvjet nosivosti vlačno opterećenih elemenata glasi: } \sigma_d = \frac{N_d}{A} \leq f_{yd}, \text{ odnosno } N_d \leq N_{Rd}$$

iz čega slijedi da je: $N_d = S_2$.

$$A \geq \frac{S_2}{f_{yd}} = \frac{69970 \text{ N}}{270 \text{ MPa}} = 259,15 \text{ mm}^2$$

Na temelju izračunate površine $A = 259,15 \text{ mm}^2$ usvaja se kvadratni profil dimenzija 40x40x3 mm s prvom većom površinom A od izračunate, a pripadajući podaci glase:

$$A = 434 \text{ mm}^2$$

$$m = 3,41 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$I_y = I_z = 97800 \text{ mm}^4$$

$$W_y = W_z = 4890 \text{ mm}^3$$

$$i = 15 \text{ mm}$$

Zatim se vrši provjera zadovoljavanja uvjeta nosivosti vlačno opterećenog štaba:

$$\sigma_s = \frac{S_2}{A} = \frac{69970}{434 \text{ mm}^2} = 161,2 \text{ MPa} < f_{yd} = 270 \text{ MPa}$$

Uvjet je zadovoljen!

- Dimenzioniranje štaba S_5

Provjerava se izvijanje tlačno opterećenog štaba iznosa $S_5 = -41,23 \text{ kN}$.

Uvjet izvijanja tlačno opterećenih elemenata glasi: $N_d \leq N_{iRd}$,

iz čega slijedi da je: $N_d = S_5$; $N_{iRd} = \kappa \cdot A \cdot f_{yd}$.

Za potrebe ovog proračuna dogovorno se uzima početna vrijednost koeficijenta gubitka stabilnosti $\kappa \rightarrow 0,6 \div 0,7$ odnosno usvaja se $\kappa = 0,6$.

Uvjet izvijanja sada glasi: $S_5 \leq \kappa \cdot A \cdot f_{yd}$,

$$\text{odnosno : } A \geq \frac{S_5}{\kappa \cdot f_{yd}} = \frac{41230}{0,6 \cdot 270 \text{ MPa}} = 254,5 \text{ mm}^2$$

Vlačna čvrstoća materijala iznosi: $f_{yd} = 270 \text{ MPa}$

Na temelju izračunate površine $A = 254,5 \text{ mm}^2$ usvaja se kvadratni profil dimenzija 80x80x5 mm s prvom većom površinom A od izračunate, a pripadajući podaci glase:

$$A = 1470 \text{ mm}^2$$

$$m = 11,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$I_y = I_z = 1370000 \text{ mm}^4$$

$$W_y = W_z = 34,2 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

$$i = 30,5 \text{ mm}$$

Vitkost tlačno opterećenog štapa S_5 računa se prema izrazu: $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a}$.

Vitkost po Euleru se računa prema izrazu: $\lambda = \frac{l_i}{i} = \frac{4120}{30,5} = 135,08 \text{ cm}$

$$l_i = l_5 \rightarrow \text{duljina štapa } S_5 = \sqrt{4^2 + 1^2} = 4,12 \text{ m} = 4120 \text{ mm}$$

$$i = 30,5 \text{ mm}$$

Vitkost na granici tečenja računa se prema izrazu: $\lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{71 \cdot 10^3}{230 \text{ MPa}}} = 55,20$

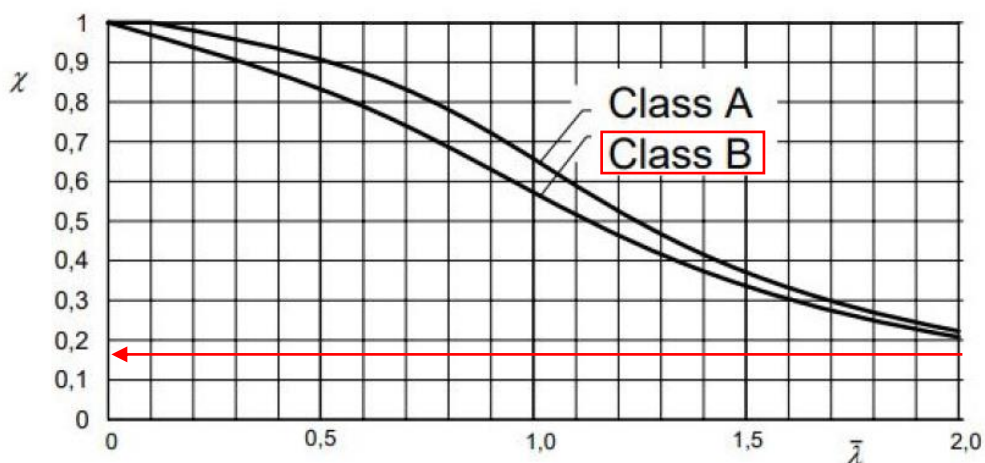
$$E = 71 \text{ GPa} = 71 \text{ 000 MPa}$$

$$f_{yk} = 230 \text{ MPa}$$

$$\text{Vitkost štapa } S_1 \text{ iznosi: } \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a} = \frac{135,08}{55,20} = 2,45$$

Pomoću tablice 3.5 se određuje vrijednost $\kappa = 0,14$.

Tablica 3.5 - Tablica ovisnosti relativne vitkosti o faktoru gubitka stabilnosti za $\bar{\lambda}=2,45$



Zatim se vrši provjera zadovoljavanja uvjeta izvijanja tlačno opterećenog štapa:

$$N_{iRd} = \kappa \cdot A \cdot f_{yd} = 0,14 \cdot 1470 \cdot 270 = 55566 \text{ N} = 55,57 \text{ kN}$$

$$N_{iRd} = 55,57 \text{ kN} > S_5 = 41,23 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen!

- Dimenzioniranje štapa S_3

Provjerava se nosivost vlačno opterećenog štapa iznosa $S_3 = 44,81 \text{ kN}$.

Uvjet nosivosti vlačno opterećenih elemenata glasi: $\sigma_d = \frac{N_d}{A} \leq f_{yd}$, odnosno $N_d \leq N_{Rd}$

iz čega slijedi da je: $N_d = S_3$.

$$A \geq \frac{S_3}{f_{yd}} = \frac{44810 \text{ N}}{270 \text{ MPa}} = 165,9 \text{ mm}^2$$

Na temelju izračunate površine $A = 165,9 \text{ mm}^2$ usvaja se kvadratni profil dimenzija 40x40x3 mm s prvom većom površinom A od izračunate, a pripadajući podaci glase:

$$A = 434 \text{ mm}^2$$

$$m = 3,41 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$I_y = I_z = 97800 \text{ mm}^4$$

$$W_y = W_z = 4890 \text{ mm}^3$$

$$i = 15 \text{ mm}$$

Zatim se vrši provjera zadovoljavanja uvjeta nosivosti vlačno opterećenog štapa:

$$\sigma_s = \frac{S_3}{A} = \frac{44810 \text{ N}}{434 \text{ mm}^2} = 103,2 \text{ MPa} < f_{yd} = 270 \text{ MPa}$$

Uvjet je zadovoljen!

- Dimenzioniranje štapa S_4

Provjerava se izvijanje tlačno opterećenog štapa iznosa $S_4 = -50,08 \text{ kN}$.

Uvjet izvijanja tlačno opterećenih elemenata glasi: $N_d \leq N_{iRd}$,

iz čega slijedi da je: $N_d = S_4$; $N_{iRd} = \kappa \cdot A \cdot f_{yd}$.

Za potrebe ovog proračuna dogovorno se uzima početna vrijednost koeficijenta gubitka stabilnosti $\kappa \rightarrow 0,6 \div 0,7$ odnosno usvaja se $\kappa = 0,6$.

Uvjet izvijanja sada glasi: $S_4 \leq \kappa \cdot A \cdot f_{yd}$,

$$\text{odnosno : } A \geq \frac{S_4}{\kappa \cdot f_{yd}} = \frac{50080}{0,6 \cdot 270 \text{ MPa}} = 309,13 \text{ mm}^2$$

Vlačna čvrstoća materijala iznosi: $f_{yd} = 270 \text{ MPa}$

Na temelju izračunate površine $A = 309,13 \text{ mm}^2$ usvaja se kvadratni profil dimenzija 70x70x5 mm s prvom većom površinom A od izračunate, a pripadajući podaci glase:

$$A = 1270 \text{ mm}^2$$

$$m = 9,99 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$I_y = I_z = 885000 \text{ mm}^4$$

$$W_y = W_z = 25,3 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

$$i = 26,4 \text{ mm}$$

Vitkost tlačno opterećenog štapa S_4 računa se prema izrazu: $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a}$.

Vitkost po Euleru se računa prema izrazu: $\lambda = \frac{l_i}{i} = \frac{3160}{26,4} = 119,7$

$$l_i = l_4 \rightarrow \text{duljina štapa } S_4 = \sqrt{3^2 + 1^2} = 3,16 \text{ m} = 3160 \text{ mm}$$

$$i = 26,4 \text{ mm}$$

Vitkost na granici tečenja računa se prema izrazu: $\lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{71 \cdot 10^3}{230 \text{ MPa}}} = 55,20$

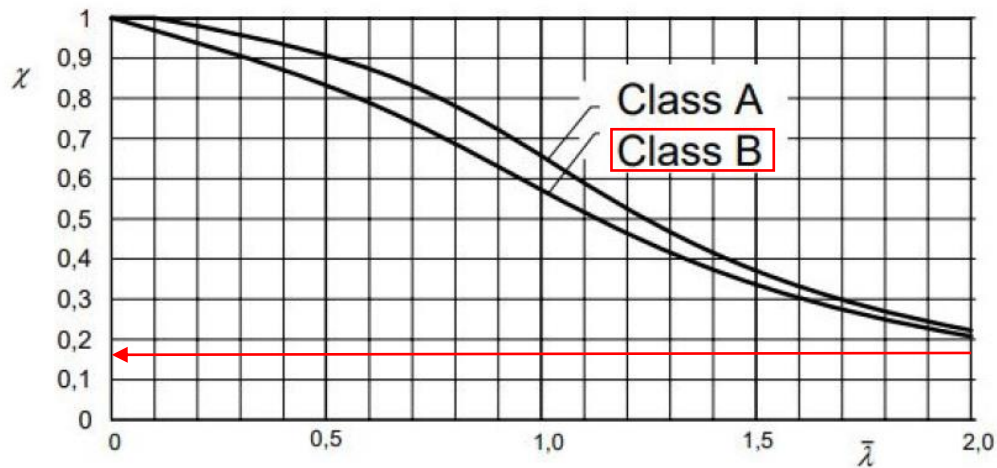
$$E = 71 \text{ GPa} = 71 \text{ 000 MPa}$$

$$f_{yk} = 230 \text{ MPa}$$

Vitkost štapa S_1 iznosi : $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a} = \frac{119,7}{55,20} = 2,17$

Pomoću tablice 3.6 se određuje vrijednost $\kappa = 0,17$.

Tablica 3.6 Tablica koeficijenta gubitka stabilnosti u ovisnosti o klasi izvijanja za $\bar{\lambda}=2,17$



Zatim se vrši provjera zadovoljavanja uvjeta izvijanja tlačno opterećenog štapa:

$$N_{iRd} = \kappa \cdot A \cdot f_{yd} = 0,17 \cdot 1270 \cdot 270 = 58293 \text{ N} = 59,29 \text{ kN}$$

$$N_{iRd} = 59,29 \text{ kN} > S_4 = 50,08 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen!

4. Dimenzioniranje linijskog nosača

Za dimenzioniranje linijskog nosača koriste se profili IPE, HEB i HEM iz priloga. Čelični profili imaju izvrsna fizička svojstva, zbog čega su poželjni i često se upotrebljavaju, prije svega u gradnji većih objekata. Čelični profili mogu premostiti velike udaljenosti, stoga se često upotrebljavaju u gradnji objekata gdje su potrebni veliki konstrukcijski rasponi. Glavne prednosti čeličnih profila su brza i ekonomična montaža, dug vijek, fleksibilnost u gradnji te jednostavno održavanje [7].

Uvjet nosivosti : $\sigma_d \leq f_{yd}$

$$\frac{M_{yd,max}}{W_y} \leq f_{yd}$$

$$W_y \geq \frac{M_{yd,max}}{f_{yd}}$$

$$W_y \geq \frac{76 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{218 \text{ MPa}}$$

$$W_y \geq 348623,9 \text{ mm}^3$$

Dopušteni progib W_{dop} računa se prema izrazu:

$$W_{dop} = \frac{l}{200} = \frac{9000}{200} = 45 \text{ mm}$$

$$W_{max} \leq 45 \text{ mm}$$

Karakteristike profila IPE 270 :

$$I_y = 57900000 \text{ mm}^4$$

$$W_y = 428900 \text{ mm}^3$$

$$G = 36,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$A_{vz} = 2568 \text{ mm}^2$$

Provjera nosivosti profila:

$$\sigma_d = \frac{M_{d,max}}{W_y} = \frac{76 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{428900} = 177,19 \text{ MPa} \leq f_{yd} = 218 \text{ MPa}$$

Uvjet je zadovoljen!

Tangencijalno naprezanje:

uvjet : $\tau_d \leq \tau_{R,d}$

$$\tau_{R,d} = \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} = \frac{218}{\sqrt{3}} = 126 \text{ MPa} \rightarrow \text{HMH teorija}$$

$$\frac{Q_{z,max}}{A_{vz}} \leq \tau_{R,d}$$

$$\frac{65980 \text{ N}}{2568 \text{ mm}^2} = 25,69 \text{ MPa} \leq \tau_{R,d} = 126 \text{ MPa}$$

Uvjet je zadovoljen!

Karakteristike profila HE 180B:

$$I_y = 3831000 \text{ mm}^4$$

$$W_y = 425700 \text{ mm}^3$$

$$G = 51,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$A_{vz} = 2024 \text{ mm}^2$$

Provjera nosivosti:

$$\sigma_d = \frac{M_{d,max}}{W_y} = \frac{76 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{425700} = 178,5 \text{ MPa} \leq f_{yd} = 218 \text{ MPa}$$

Uvjet je zadovoljen!

Tangencijalno naprezanje:

uvjet : $\tau_d \leq \tau_{R,d}$

$$\tau_{R,d} = \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} = \frac{218}{\sqrt{3}} = 126 \text{ MPa}$$

$$\frac{Q_{z,max}}{A_{vz}} \leq \tau_{R,d}$$

$$\frac{65980 \text{ N}}{2024 \text{ mm}^2} = 32,6 \text{ MPa} \leq \tau_{R,d} = 126 \text{ MPa}$$

Uvjet je zadovoljen!

Karakteristike profila HE 140M :

$$I_y = 32910000 \text{ mm}^4$$

$$W_y = 411400 \text{ mm}^3$$

$$G = 63,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$A_{vz} = 2446 \text{ mm}^2$$

$$\text{Provjera nosivosti : } \sigma_d = \frac{M_{d,max}}{W_y} = \frac{76 \cdot 10^6 \text{ kN cm}}{411400} = 184,7 \text{ MPa} \leq f_{yd} = 218 \text{ MPa}$$

Tangencijalno naprezanje :

$$\text{uvjet : } \tau_d \leq \tau_{R,d}$$

$$\tau_{R,d} = \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} = \frac{218}{\sqrt{3}} = 126 \text{ MPa}$$

$$\frac{Q_{z,max}}{A_{vz}} \leq \tau_{R,d}$$

$$\frac{65980 \text{ N}}{2446 \text{ mm}^2} = 26,97 \text{ MPa} \leq \tau_{R,d} = 126 \text{ MPa}$$

Optimalni profil, koji se ujedno i usvaja, je IPE 270 s pripadajućim podacima:

$$I_y = 57900000 \text{ mm}^4$$

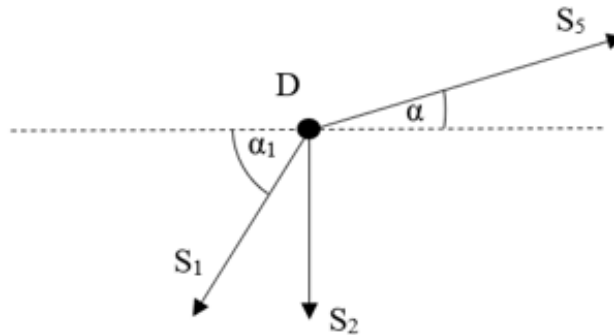
$$W_y = 428900 \text{ mm}^3$$

$$G = 36,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$A_{vz} = 2568 \text{ mm}^2$$

5. Oblikovanje i dimenzioniranje čvora

Za oblikovanje i dimenzioniranje čvora proizvoljno je odabran čvor D prikazan na slici 5.1., a sastoji se od štapova S_1 , S_2 i S_5 .



Slika 5.1 Čvor D

Vrijednosti sila u štapovima u čvoru D iznose:

$$S_1 = -89,42 \text{ kN} \quad S_2 = 69,97 \text{ kN} \quad S_5 = -41,23 \text{ kN}$$

Kutovi između štapova iznose:

$$\alpha = 14,04^\circ \quad \alpha_1 = 63,43^\circ$$

Provjera nosivosti traka štapa S_1 kvadratnog profila dimenzija 60x60x5:

$$A = 2 \cdot 0,6 \cdot 10 = 12 \text{ cm}^2 = 1200 \text{ mm}^2$$

↓

debljina uški

Uvjet nosivosti glasi: $N_{Rd} > N_d \rightarrow \text{nosivost} > \text{opterećenje}$

$$N_d = S_1 = 89,42 \text{ kN}$$

$$\sigma_d \leq f_{yd} = 218 \text{ MPa}$$

$$\frac{N_d}{A} \leq f_{yd}$$

$$\frac{S_1}{120} \leq f_{yd}$$

$$\frac{89420}{1200} \leq 218$$

74,5 MPa \leq 218 MPa \rightarrow Nosivost traka (uški) štapa zadovoljava uvjet!

Izbor promjera vijka:

Definira se promjer vijka prema izrazu:

$$d_{max} = \sqrt{50 \cdot t_{min}} - 2 ; t_{min} = 6 \text{ mm}$$

$$d_{max} = \sqrt{50 \cdot 6} - 2 = 15,32 \text{ mm}$$

Usvaja se : *promjer rupe* $\rightarrow d_r = 15 \text{ mm}$

promjer vijka $\rightarrow d_v = 14 \text{ mm}$

Prvi manji standardni promjer vijka : M14

k.č. 8.8. \rightarrow *čvrstoća* : $f_{uvk} = 800 \text{ MPa}$

\rightarrow *granica tečenja* : $f_{yk} = 640 \text{ MPa}$

Nosivost jednog vijka računa se prema izrazu:

$$V_{VR} = n \cdot i \cdot \alpha_a \cdot A_v \cdot \frac{f_{uvk}}{\gamma_m}$$

n \rightarrow *broj vijaka* $\rightarrow n = 1$

i \rightarrow *broj reznih ploha* $\rightarrow i = 2$

α_a \rightarrow *koeficijent ovisan o čvrstoći vijka*

 za *k.č. 8.8.* $\rightarrow \alpha_a = 0,56$

A_v \rightarrow *površina vijka*

$$A_v = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{14^2 \cdot \pi}{4} = 153,94 \text{ mm}^2$$

f_{uvk} \rightarrow *karakteristična čvrstoća vijka* $\rightarrow f_{uvk} = 800 \text{ MPa}$

$\gamma_m \rightarrow$ koeficijent materijala $\rightarrow \gamma_m = 1,1$

$$V_{VR} = 1 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 153,94 \cdot \frac{800}{1,1} = 1343476 \text{ N} = 133,52 \text{ kN}$$

Potreban broj vijaka određuje se na način:

Štap $S_1 \rightarrow V_{VR} \geq N_d$; $N_d = S_1 = 89,42 \text{ kN}$

$$V_{VR} = 133,52 \text{ kN} > S_1 = 89,42 \text{ kN}$$

usvaja se: $n = 1$ vijak

Nosivost omotača rupe za $n = 1$ vijak iznosi:

$$V_{rR} = t \cdot d_v \cdot \alpha_{r1} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_m}$$

$$t = \{2 \cdot t_1, t_2\} \rightarrow \{2 \cdot 6, 20\} \rightarrow t = 12 \text{ mm}$$

Udaljenost vijka od ruba čelične trake računa se prema izrazu: $e_1 = 2 \cdot d_r = 2 \cdot 15 = 30 \text{ mm}$

Zbog sigurnosti usvaja se : $e_1 = 40 \text{ mm}$

Koeficijent nosivosti omotača rubnog dijela računa se prema izrazu:

$$\alpha_{r1} = 1,1 \cdot \frac{e_1}{d_r} - 0,3 = 1,1 \cdot \frac{40}{15} - 0,3 = 2,63$$

$$V_{rR} = 12 \cdot 14 \cdot 2,63 \cdot \frac{240}{1,1} = 96401,5 \text{ N} = 96,40 \text{ kN}$$

$$V_{rR} \geq N_{Rd} \rightarrow 96,40 \text{ kN} \geq 89,42 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti trake na poziciji rupe vijka iznosi:

$$A_{bruto} = 2 \cdot 100 \cdot 6 = 1200 \text{ mm}^2$$

$$A_{neto} = A_{bruto} - 2 \cdot d_r \cdot t_1 = 1200 - 2 \cdot 15 \cdot 6 = 1020 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_{bruto}}{A_{neto}} = \frac{1200}{1020} = 1,176 < 1,2 \rightarrow \text{Presjek na mjestu rupe nije oslabljen!}$$

Provjera nosivosti traka štapa S_2 kvadratnog profila dimenzija 50x50x3:

$$A = 2 \cdot 6 \cdot 9 = 108 \text{ mm}^2$$

Uvjet nosivosti glasi: $N_{Rd} > N_d \rightarrow \text{nosivost} > \text{opterećenje}$

$$N_d = S_2 = 69,97 \text{ kN}$$

$$\sigma_d \leq f_{yd} = 218 \text{ MPa}$$

$$\frac{N_d}{A} \leq f_{yd}$$

$$\frac{S_2}{108} \leq f_{yd}$$

$$\frac{69970 \text{ N}}{108 \text{ mm}^2} \leq 218$$

$64,79 \text{ MPa} \leq 218 \text{ MPa} \rightarrow \text{Nosivost traka (uški) štapa zadovoljava uvjet!}$

Izbor promjera vijka:

Definira se promjer vijka prema izrazu:

$$d_{max} = \sqrt{50 \cdot t_{min}} - 2 ; t_{min} = 6 \text{ mm}$$

$$d_{max} = \sqrt{50 \cdot 6} - 2 = 15,32 \text{ mm}$$

Usvaja se : *promjer rupe* $\rightarrow d_r = 15 \text{ mm}$

promjer vijka $\rightarrow d_v = 14 \text{ mm}$

Prvi manji standardni promjer vijka: M14

k. č. 8.8. \rightarrow čvrstoća : $f_{uvk} = 800 \text{ MPa}$

\rightarrow *granica tečenja :* $f_{yk} = 640 \text{ MPa}$

Nosivost jednog vijka računa se prema izrazu:

$$V_{VR} = n \cdot i \cdot \alpha_a \cdot A_v \cdot \frac{f_{uvk}}{\gamma_m}$$

$n \rightarrow$ *broj vijaka* $\rightarrow n = 1$

$i \rightarrow$ *broj reznih ploha* $\rightarrow i = 2$

$\alpha_a \rightarrow$ koeficijent ovisan o čvrstoći vijka

$$\text{za k. č. 8.8.} \rightarrow \alpha_a = 0,56$$

$A_v \rightarrow$ površina vijka

$$A_v = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{14^2 \cdot \pi}{4} = 153,94 \text{ mm}^2$$

$f_{uvk} \rightarrow$ karakteristična čvrstoća vijka $\rightarrow f_{uvk} = 800 \text{ MPa}$

$\gamma_m \rightarrow$ koeficijent materijala $\rightarrow \gamma_m = 1,1$

$$V_{VR} = 1 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 153,94 \cdot \frac{800}{1,1} = 1343476 \text{ N} = 133,52 \text{ kN}$$

Potreban broj vijaka određuje se na način:

Štap $S_2 \rightarrow V_{VR} \geq N_d ; N_d = S_2 = 69,97 \text{ kN}$

$$V_{VR} = 133,52 \text{ kN} > S_2 = 69,97 \text{ kN}$$

usvaja se: $n = 1$ vijak

Nosivost omotača rupe za $n = 1$ vijak iznosi:

$$V_{rR} = t \cdot d_v \cdot \alpha_r \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_m}$$

$$t = \{2 \cdot t_1, t_2\} \rightarrow \{2 \cdot 6, 20\} \rightarrow t = 12 \text{ mm}$$

Udaljenost vijka od ruba čelične trake računa se prema izrazu: $e_1 = 2 \cdot d_r = 2 \cdot 15 = 30 \text{ mm}$

Zbog sigurnosti usvaja se : $e_1 = 40 \text{ mm}$.

$$\alpha_{r1} = 1,1 \cdot \frac{e_1}{d_r} - 0,3 = 1,1 \cdot \frac{40}{15} - 0,3 = 2,63$$

$$V_{rR} = 12 \cdot 14 \cdot 2,63 \cdot \frac{240}{1,1} = 96401,5 \text{ N} = 96,40 \text{ kN}$$

$$V_{rR} \geq N_{Rd} \rightarrow 96,40 \text{ kN} \geq 89,42 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti trake na poziciji rupe vijka iznosi:

$$A_{bruto} = 2 \cdot 9 \cdot 6 = 1080 \text{ mm}^2$$

$$A_{neto} = A_{bruto} - 2 \cdot d_r \cdot t_1 = 1080 - 2 \cdot 15 \cdot 6 = 900 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_{bruto}}{A_{neto}} = \frac{1080}{900} = 1,2 < 1,2 \rightarrow \text{Presjek na mjestu rupe nije oslabljen!}$$

Provjera nosivosti traka štapa S₅ kvadratnog profila dimenzija 60x60x5:

$$A = 2 \cdot 6 \cdot 10 = 120 \text{ mm}^2$$

↓

debljina uški

Uvjet nosivosti glasi: $N_{Rd} > N_d \rightarrow \text{nosivost} > \text{opterećenje}$

$$N_d = S_5 = -41,23 \text{ kN}$$

$$\sigma_d \leq f_{yd} = 218 \text{ MPa}$$

$$\frac{N_d}{A} \leq f_{yd}$$

$$\frac{S_1}{120} \leq f_{yd}$$

$$\frac{41230 \text{ N}}{120 \text{ mm}^2} \leq 218$$

$34,36 \text{ MPa} \leq 218 \text{ MPa} \rightarrow \text{Nosivost traka (uški) štapa zadovoljava uvjet!}$

Izbor promjera vijka:

Definira se promjer vijka prema izrazu:

$$d_{max} = \sqrt{50 \cdot t_{min}} - 2 ; t_{min} = 6 \text{ mm}$$

$$d_{max} = \sqrt{50 \cdot 6} - 2 = 15,32 \text{ mm}$$

Usvaja se : *promjer rupe* $\rightarrow d_r = 15 \text{ mm}$

promjer vijka $\rightarrow d_v = 14 \text{ mm}$

Prvi manji standardni promjer vijka: M14

k. č. 8.8. → čvrstoća : $f_{uvk} = 800$ MPa

→ granica tečenja : $f_{yk} = 640$ MPa

Nosivost jednog vijka računa se prema izrazu:

$$V_{VR} = n \cdot i \cdot \alpha_a \cdot A_v \cdot \frac{f_{uvk}}{\gamma_m}$$

n → broj vijaka → $n = 1$

i → broj reznih ploha → $i = 2$

α_a → koeficijent ovisan o čvrstoći vijka

za k. č. 8.8. → $\alpha_a = 0,56$

A_v → površina vijka

$$A_v = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{14^2 \cdot \pi}{4} = 153,94 \text{ mm}^2$$

f_{uvk} → karakteristična čvrstoća vijka → $f_{uvk} = 800$ MPa

γ_m → koeficijent materijala → $\gamma_m = 1,1$

$$V_{VR} = 1 \cdot 2 \cdot 0,56 \cdot 153,94 \cdot \frac{800}{1,1} = 1343476 \text{ N} = 133,52 \text{ kN}$$

Potreban broj vijaka određuje se na način:

Štap S_5 → $V_{VR} \geq N_d$; $N_d = S_5 = 41,23$ kN

$V_{VR} = 133,52$ kN > $S_5 = 41,23$ kN

usvaja se: $n = 1$ vijak

Nosivost omotača rupe za $n = 1$ vijak iznosi:

$$V_{rR} = t \cdot d_v \cdot \alpha_{r1} \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_m}$$

$t = \{2 \cdot t_1, t_2\} \rightarrow \{2 \cdot 6, 20\} \rightarrow t = 12$ mm

Udaljenost vijka od ruba čelične trake računa se prema izrazu: $e_1 = 2 \cdot d_r = 2 \cdot 15 = 30$ mm

Zbog sigurnosti usvaja se : $e_1 = 40$ mm

Koeficijent nosivosti omotača rubnog dijela računa se prema izrazu:

$$\alpha_{r1} = 1,1 \cdot \frac{e_1}{d_r} - 0,3 = 1,1 \cdot \frac{40}{15} - 0,3 = 2,63$$

$$V_{rR} = 12 \cdot 14 \cdot 2,63 \cdot \frac{240}{1,1} = 96401,5 \text{ N} = 96,40 \text{ kN}$$

$$V_{rR} \geq N_{Rd} \rightarrow 96,40 \text{ kN} \geq 41,23 \text{ kN}$$

Provjera nosivosti trake na poziciji rupe vijka iznosi:

$$A_{bruto} = 2 \cdot 100 \cdot 6 = 1200 \text{ mm}^2$$

$$A_{neto} = A_{bruto} - 2 \cdot d_r \cdot t_1 = 1200 - 2 \cdot 15 \cdot 6 = 1020 \text{ mm}^2$$

$$\frac{A_{bruto}}{A_{neto}} = \frac{1200}{1020} = 1,176 < 1,2 \rightarrow \text{Presjek na mjestu rupe nije oslabljen!}$$

6. Zaključak

Cilj završnog rada bio je izvršiti proračun i dimenzioniranje grede ojačane rešetkastom konstrukcijom.

Usporedbom prethodno dimenzioniranih štapova nosača od dva različita materijala, konstrukcijskog čelika S235 i aluminijske legure EN AW-6082, uočene su razlike u odabiru dimenzija profila samih štapova. Štapovi izrađeni od aluminijske legure zahtijevaju veće dimenzije profila u usporedbi sa štapovima konstrukcijskog čelika. Iako su dimenzije dobivenih aluminijskih štapova veće od dimenzija čeličnih, zbog male težine aluminija, težina same konstrukcije je znatno manja od čelične. Unatoč činjenici da su aluminijske legure skuplje od konstrukcijskih čelika, treba uzeti u obzir da je aluminij otporan na koroziju, te za razliku od čelika, nije mu potrebna dodatna antikorozivna zaštita, dok je čelik potrebno dodatno zaštititi od korozije čime se mijenja odnos cijena izvedbe same konstrukcije. Tablicom, priložena kao Prilog 1, je prikazan odnos cijena i težina konstrukcije u oba slučaja, te na temelju svih činjenica i analiza provedenih u ovom završnom radu možemo zaključiti da aluminijske legure mogu konkurirati konstrukcijskom čeliku u slučajevima koji zahtijevaju manje težine, jednostavniju montažu, manje statičko opterećenje i agresivnije uvjete okoline (npr. morska atmosfera).

Provjera rezultata unutarnjih sila poprečnog presjeka grede po nezavisnim područjima nosača izvršena je pomoću programskog paketa MDSolids te je utvrđeno da se vrijednosti unutarnjih sila po nezavisnim područjima linijskog nosača dobivene analitičkim izračunom i vrijednosti dobivene iz programskog paketa MDSolids podudaraju.

U prilogima su dane sve tablice karakteristika kvadratnih i pravokutnih profila za dimenzioniranje štapova ojačanja i IPE, HEB i HEM profila za dimenzioniranje linijskog nosača.

Literatura

- [1] Plazibat B., Matoković A., Vetma V.: *Tehnička mehanika I*, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split 2020.
- [2] Omnimerkur – konstrukcijski čelici. Dostupno na : <https://omnimerkur.hr/prodajni-program/crna-metalurgija/konstrukcijski-celici/>
- [3] Feal – aluminijske legure. Dostupno na : <https://feal.ba/legure/>
- [4] EOAluminium – primjena aluminijskih legura. Dostupno na : <http://ba.eo-aluminum.com/aluminum-material/aluminum-sheet/6082-aluminumsheet.html>
- [5] Top Aluminium - specifikacije aluminijske legure. Dostupno na : <https://hr.top-aluminumprofile.com/info/the-specifications-of-aluminum-alloy-35986628.html>
- [6] ZhognlianAluminium - 6082 aluminijske legure. Dostupno na: <https://ba.chinealuminium.com/info/6082-aluminium-alloy-22396556.html>
- [7] Magazin Emajstor - Čelična konstrukcija i čelični profili (željezni profili). Dostupno na: https://www.emajstor.hr/clanak/466/celicna_konstrukcija_i_celicni_profili_zeljezni_profili
- [8] Karakteristike profila konstrukcijskog čelika i aluminijske legure. Dostupno na: <https://www.thesteel.com/hr/ponuda/cijevi-profili/cijevni-profili/suplji-profili-kvadratni>

Prilozi

1. Prilog 1 – Tablični prikaz odnos cijena i težina konstrukcije za konstrukcijski čelik S235 i aluminijsku leguru EN AW-6082
2. Prilog 2.a – Tablice karakteristika kvadratnih i pravokutnih profila (1.dio)
3. Prilog 2.b – Tablice karakteristika kvadratnih i pravokutnih profila (2.dio)
4. Prilog 3 – Tablice odabranih IPE, HEM I HEB profila
5. Prilog 4 – Tablica koeficijenta gubitka stabilnosti u ovisnosti o klasi izvijanja

Prilog 1

SILE U ŠTAPOVIMA OJAČANJA	KONSTRUKCIJSKI ČELIK S235						ALUMINIJSKA LEGURA EN AW-608						
	DIMENZIJE PROFILA (mm)	DUŽINA PROFILA L (m)	MASA (kg/m)	CIJENA / m (€/m)	UKUPNA MASA (kg)	UKUPNA CIJENA (€)	DIMENZIJE PROFILA (mm)	DUŽINA PROFILA L (m)	MASA (kg/m)	CIJENA / m (€/m)	UKUPNA MASA (kg)	UKUPNA CIJENA (€)	
S1=89,42 kN	60x60x5	2.24	8.42	8.96	18.86	20.07	70x70x5	2.24	2.85	17.10	6.38	38.30	
S2=69,97kN	50x50x3	2	4.35	5.13	8.70	10.26	40x40x3	2	1.2	10.20	2.40	20.40	
S3=44,81kN	40x40x3	3.16	3.41	4.27	10.78	13.49	40x40x3	3.16	1.2	10.20	3.79	32.23	
S4=50,08kN	60x60x5	3.16	8.42	8.96	26.61	28.31	70x70x5	3.16	2.85	17.10	9.01	54.04	
S5=41,23kN	60x60x5	4.12	8.42	8.96	34.69	36.92	80x80x5	4.12	4.1	22.10	16.89	91.05	
UKUPNO :					99.63	109.05	UKUPNO:					38.47	236.02
UKUPNO €:					10865.33		UKUPNO €:					9080.79	

Prilog 3



IPE

Notations pages 211-215 / Bezeichnungen Seiten 211-215

Désignation Designation Bezeichnung	Valeurs statiques / Section properties / Statische Kennwerte											Classification ENV 1993-1-1										
	axe fort y-y strong axis y-y starke Achse y-y					axe faible z-z weak axis z-z schwache Achse z-z					pure bending yy		pure compression									
	G kg/m	I_y mm ⁴	$W_{pl,y}$ mm ³	$W_{pl,y}^*$ mm ³	i_y mm	A_{vz} mm ²	I_z mm ⁴	$W_{pl,z}$ mm ³	$W_{pl,z}^*$ mm ³	i_z mm	t_s mm	I_t mm ⁴	I_w mm ⁶	S 235	S 355	S 460	S 235	S 355	S 460	EN 10025:1993	EN 10113:1993	EN 10225:2001
	x 10 ⁴	x 10 ³	x 10 ³	x 10	x 10 ²	x 10 ⁴	x 10 ³	x 10 ³	x 10		x 10 ⁴	x 10 ⁶										
IPE A 240	26,2	3290	277,7	311,6	9,94	16,31	240,1	40,02	62,40	2,68	39,37	8,35	31,26	1	1	-	2	4	-	✓	✓	✓
IPE 240	30,7	3892	324,3	366,6	9,97	19,14	283,6	47,27	73,92	2,69	43,37	12,88	37,39	1	1	-	1	2	-	✓	✓	✓
IPE O 240	34,3	4369	361,1	410,3	10,00	21,36	328,5	53,86	84,40	2,74	46,17	17,18	43,68	1	1	-	1	2	-	✓	✓	✓
IPE A 270	30,7	4917	368,3	412,5	11,21	18,75	358,0	53,03	82,34	3,02	40,47	10,30	59,51	1	1	-	3	4	-	✓	✓	✓
IPE 270	36,1	5790	428,9	484,0	11,23	22,14	419,9	62,20	96,95	3,02	44,57	15,94	70,58	1	1	-	2	3	-	✓	✓	✓
IPE O 270	42,3	6947	507,1	574,6	11,36	25,23	513,5	75,51	117,7	3,09	49,47	24,90	87,64	1	1	-	1	2	-	✓	✓	✓
IPE A 300	36,5	7173	483,1	541,8	12,42	22,25	519,0	69,20	107,3	3,34	42,07	13,43	107,2	1	2	-	3	4	-	✓	✓	✓
IPE 300	42,2	8356	557,1	628,4	12,46	25,68	603,8	80,50	125,2	3,35	46,07	20,12	125,9	1	1	-	2	4	-	✓	✓	✓
IPE O 300	49,3	9994	657,5	743,8	12,61	29,05	745,7	98,12	152,6	3,45	50,97	31,06	157,7	1	1	-	1	3	-	✓	✓	✓
IPE A 330	43,0	10230	625,7	701,9	13,67	26,99	685,2	85,64	133,3	3,54	47,59	19,57	171,5	1	1	-	3	4	-	✓	✓	✓
IPE 330	49,1	11770	713,1	804,3	13,71	30,81	788,1	98,52	153,7	3,55	51,59	28,15	199,1	1	1	-	2	4	-	✓	✓	✓
IPE O 330	57,0	13910	833,0	942,8	13,84	34,88	960,4	118,6	185,0	3,64	56,59	42,15	245,7	1	1	-	1	3	-	✓	✓	✓
IPE A 360	50,2	14520	811,8	906,8	15,06	29,76	944,3	111,1	171,9	3,84	50,69	26,51	282,0	1	1	-	4	4	-	✓	✓	✓
IPE 360	57,1	16270	903,6	1019	14,95	35,14	1043	122,8	191,1	3,79	54,49	37,32	313,6	1	1	-	2	4	-	✓	✓	✓
IPE O 360	66,0	19050	1047	1186	15,05	40,21	1251	145,5	226,9	3,86	59,69	55,76	380,3	1	1	-	1	3	-	✓	✓	✓
IPE A 400	57,4	20290	1022	1144	16,66	35,78	1171	130,1	202,1	4,00	55,60	34,79	432,2	1	1	-	4	4	-	✓	✓	✓
IPE 400	66,3	23130	1156	1307	16,55	42,69	1318	146,4	229,0	3,95	60,20	51,08	490,0	1	1	-	3	4	-	✓	✓	✓
IPE O 400	75,7	26750	1324	1502	16,66	47,98	1564	171,9	269,1	4,03	65,30	73,10	587,6	1	1	-	2	3	-	✓	✓	✓
IPE A 450	67,2	29760	1331	1494	18,65	42,26	1502	158,1	245,7	4,19	58,40	45,67	704,9	1	1	-	4	4	-	✓	✓	✓
IPE 450	77,6	33740	1500	1702	18,48	50,85	1676	176,4	276,4	4,12	63,20	66,87	791,0	1	1	-	3	4	-	✓	✓	✓
IPE O 450	92,4	40920	1795	2046	18,65	59,40	2085	217,2	341,0	4,21	70,80	109	997,6	1	1	-	2	4	-	✓	✓	✓

* W_{pl} : pour un dimensionnement plastique, la section doit appartenir à la classe 1 ou 2 suivant la capacité de rotation requise. Voir page 215.

* W_{pl} : for plastic design, the shape must belong to class 1 or 2 according to the required rotation capacity. See page 215.

* W_{pl} : bei einer plastischen Bemessung muss das Profil der Klasse 1 oder 2, entsprechend der erforderlichen Rotationskapazität, angehören. Siehe Seite 215.





HE

Notations pages 211-215 / Bezeichnungen Seiten 211-215

Désignation Designation Bezeichnung	Valeurs statiques / Section propriétés / Statische Kennwerte												Classification ENV 1993-1-1										
	axe fort y-y strong axis y-y starke Achse y-y						axe faible z-z weak axis z-z schwache Achse z-z						pure bending yy		pure compression								
	G kg/m	I _y mm ⁴	W _{el,y} mm ³	W _{pl,y} † mm ³	i _y mm	A _{vz} mm ²	I _z mm ⁴	W _{el,z} mm ³	W _{pl,z} † mm ³	i _z mm	e _s mm	I _t mm ⁴	I _w mm ⁶	S 235	S 355	S 460	S 235	S 355	S 460	EN 10025:1993	EN 10113:1993	EN 10225:2001	
	x 10 ⁴	x 10 ³	x 10 ³	x 10	x 10 ²	x 10 ⁴	x 10 ³	x 10 ³	x 10		x 10 ⁴	x 10 ⁶											
HE 100 AA	12,2	236,5	51,98	58,36	3,89	6,15	92,06	18,41	28,44	2,43	29,26	2,51	1,68	1	3	-	1	3	-	✓	✓	✓	✓
HE 100 A	16,7	349,2	72,76	83,01	4,06	7,56	133,8	26,76	41,14	2,51	35,06	5,24	2,58	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓
HE 100 B	20,4	449,5	89,91	104,2	4,16	9,04	167,3	33,45	51,42	2,53	40,06	9,25	3,38	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓
HE 100 M	41,8	1143	190,4	235,8	4,63	18,04	399,2	75,31	116,3	2,74	66,06	68,21	9,93	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓
HE 120 AA	14,6	413,4	75,85	84,12	4,72	6,90	158,8	26,47	40,62	2,93	29,26	2,78	4,24	2	3	-	2	3	-	✓	✓	✓	✓
HE 120 A	19,9	606,2	106,3	119,5	4,89	8,46	230,9	38,48	58,85	3,02	35,06	5,99	6,47	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓
HE 120 B	26,7	864,4	144,1	165,2	5,04	10,96	317,5	52,92	80,97	3,06	42,56	13,84	9,41	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓
HE 120 M	52,1	2018	288,2	350,6	5,51	21,15	702,8	111,6	171,6	3,25	68,56	91,66	24,79	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓
HE 140 AA	18,1	719,5	112,4	123,8	5,59	7,92	274,8	39,26	59,93	3,45	30,36	3,54	10,21	3	3	-	3	3	-	✓	✓	✓	✓
HE 140 A	24,7	1083	155,4	173,5	5,73	10,12	389,3	55,62	84,85	3,52	36,56	8,13	15,06	1	2	-	1	2	-	✓	✓	✓	✓
HE 140 B	33,7	1509	215,6	245,4	5,93	13,08	549,7	78,52	119,8	3,58	45,06	20,06	22,48	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓
HE 140 M	63,2	3291	411,4	493,8	6,39	24,46	1144	156,8	240,5	3,77	71,06	120,0	54,33	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓
HE 160 AA	23,8	1283	173,4	190,4	6,50	10,38	478,7	59,84	91,36	3,97	36,07	6,33	23,75	3	3	-	3	3	-	✓	✓	✓	✓
HE 160 A	30,4	1673	220,1	245,1	6,57	13,21	615,6	76,95	117,6	3,98	41,57	12,19	31,41	1	2	-	1	2	-	✓	✓	✓	✓
HE 160 B	42,6	2492	311,5	354,0	6,78	17,59	889,2	111,2	170,0	4,05	51,57	31,24	47,94	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓
HE 160 M	76,2	5088	566,5	674,6	7,25	30,81	1759	211,9	325,5	4,26	77,57	162,4	108,1	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓
HE 180 AA	28,7	1967	235,6	258,2	7,34	12,16	730,0	81,11	123,6	4,47	37,57	8,33	46,36	3	3	-	3	3	-	✓	✓	✓	✓
HE 180 A	35,5	2510	293,6	324,9	7,45	14,47	924,6	102,7	156,5	4,52	42,57	14,80	60,21	1	3	-	1	3	-	✓	✓	✓	✓
HE 180 B	51,2	3831	425,7	481,4	7,66	20,24	1363	151,4	231,0	4,57	54,07	42,16	93,75	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓
HE 180 M	88,9	7483	748,3	883,4	8,13	34,65	2580	277,4	425,2	4,77	80,07	203,3	199,3	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓
HE 200 AA	34,6	2944	316,6	347,1	8,17	15,45	1068	106,8	163,2	4,92	42,59	12,69	84,49	3	4	-	3	4	-	✓	✓	✓	✓
HE 200 A	42,3	3692	388,6	429,5	8,28	18,08	1336	133,6	203,8	4,98	47,59	20,98	108,0	1	3	-	1	3	-	✓	✓	✓	✓
HE 200 B	61,3	5696	569,6	642,5	8,54	24,83	2003	200,3	305,8	5,07	60,09	59,28	171,1	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓
HE 200 M	103	10640	967,4	1135	9,00	41,03	3651	354,5	543,2	5,27	86,09	259,4	346,3	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓
HE 220 AA	40,4	4170	406,9	445,5	9,00	17,63	1510	137,3	209,3	5,42	44,09	15,93	145,6	3	4	-	3	4	-	✓	✓	✓	✓
HE 220 A	50,5	5410	515,2	568,5	9,17	20,67	1955	177,7	270,6	5,51	50,09	28,46	193,3	1	3	-	1	3	-	✓	✓	✓	✓
HE 220 B	71,5	8091	735,5	827,0	9,43	27,92	2843	258,5	393,9	5,59	62,59	76,57	295,4	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓
HE 220 M	117	14600	1217	1419	9,89	45,31	5012	443,5	678,6	5,79	88,59	315,3	572,7	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓	✓

† W_{pl}: pour un dimensionnement plastique, la section doit appartenir à la classe 1 ou 2 suivant la capacité de rotation requise. Voir page 215.
 † W_{pl}: for plastic design, the shape must belong to class 1 or 2 according to the required rotation capacity. See page 215.
 † W_{pl}: bei einer plastischen Bemessung muss das Profil der Klasse 1 oder 2, entsprechend der erforderlichen Rotationskapazität, angehören. Siehe Seite 215.



