

PRORAČUN OJAČANOG LINIJSKOG NOSAČA

Trutanić, Branko

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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:228:938249>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-11**



Repository / Repozitorij:

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



UNIVERSITY OF SPLIT



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

BRANKO TRUTANIĆ

ZAVRŠNI RAD

PRORAČUN OJAČANOG LINIJSKOG NOSAČA

Split, rujan 2019.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

Predmet: Nauka o čvrstoći

Z A V R Š N I R A D

Kandidat: Branko Trutanić

Naslov rada: Proračun ojačanog linijskog nosača

Mentor: Dr. sc. Ado Matoković, prof. v. š. t. z.

Split, rujan 2019.

REPUBLIKA HRVATSKA
SVEUČILIŠTE U SPLITU
Sveučilišni odjel za stručne studije

Studij: Konstrukcijsko strojarstvo
Predmet: Nauka o čvrstoći
Nastavnik: Dr. sc. Ado Matoković, prof. v. š. t. z.

ZADATAK

Kandidat: Branko Trutanić

Zadatak: Proračun ojačanog linijskog nosača

- u uvodnom dijelu ukratko opisati proračun linijskih i rešetkastih nosača,
- zadano opterećenje ojačanog linijskog nosača prikazati kao zbroj simetričnog i asimetričnog opterećenja,
- za simetrično i asimetrično opterećenje izračunati sile u štapovima ojačanja te prikazati dijagrame unutarnjih sila linijskog nosača,
- za zadano opterećenje izračunati ukupne sile u štapovima ojačanja te konačne dijagrame unutarnjih sila linijskog nosača,
- dimenzionirati linijski nosač kao i štapove ojačanja koristeći različite profile,
- prikazati raspodjelu normalnih i posmičnih naprezanja po visini poprečnog presjeka za linijski nosač na udaljenosti $x = 2,1$ m od lijevog oslonca,
- izračunati glavna naprezanja u točki P presjeka,
- provjeriti stabilnost tlačno opterećenih štapova ojačanja te po potrebi izvršiti ponovno dimenzioniranje istih,
- oblikovati i dimenzionirati proizvoljno odabrani čvor ojačanja.

Sažetak

U ovom radu je izvršen proračun ojačanog linijskog nosača na način da je isti prikazan kao zbroj simetričnog i asimetričnog opterećenja. U uvodnom dijelu kratko je opisan proračun linijskih i rešetkastih nosača.

Nakon proračunskog analiziranja izvršeno je dimenzioniranje linijskog nosača i štapova ojačanja te provjera tlačno opterećenih štapova na izvijanje.

U posljednjem dijelu rada napravljen je proračun i dimenzioniranje čvornog lima na proizvoljno odabranom čvoru.

Ključne riječi: nosač, konstrukcija, dimenzioniranje, opterećenje.

Summary (Calculation of reinforced beam)

In this paper, the calculation of the reinforced beam is made in such a way that the load is presented as the sum of symmetric and antisymmetric loads. The introductory section briefly describes the calculation method of the beam and trusses.

After the budgetary analysis had been carried out, designing of the beam and reinforcement rods was performed. In addition, compression loads of the pressure-loaded rods were checked.

In the last part of the paper, the calculation and designing of the node sheet on an arbitrarily selected node were performed.

Keywords: beam, construction, designing, load.

SADRŽAJ

<i>Sažetak</i>	4
<i>1 Uvod</i>	10
1.1 Općenito o linijskim nosačima	10
1.2 Općenito o rešetkastim nosačima	13
<i>2 Proračun ojačanog linijskog nosača</i>	16
2.1 Simetrično opterećen linijski nosač	16
2.2 Asimetrično opterećen linijski nosač.....	28
2.3 Zadani linijski nosač	37
<i>3 Dimenzioniranje linijskog nosača i štapova ojačanja</i>	50
3.1 Dimenzioniranje linijskog nosača	50
3.2 Raspodjela normalnih i posmičnih naprezanja po visini poprečnog presjeka linijskog nosača	53
3.3 Dimenzioniranje štapova ojačanja	55
<i>4 Provjera stabilnosti tlačno opterećenih štapova ojačanja</i>	61
4.1 Provjera stabilnosti štapa 6 opterećenog tlačnom silom S_6	61
4.2 Provjera stabilnosti štapa 7 opterećenog tlačnom silom S_7	62
<i>5 Oblikovanje i dimenzioniranje čvora</i>	66
<i>6 Zaključak</i>	73
<i>Literatura</i>	74
<i>Prilozi</i>	75

Popis slika

Slika 1.1 - Ravninski linijski nosač s različitim vrstama opterećenja	10
Slika 1.2 - Dogovorno definiran koordinatni sustav kod ravninskih linijskih nosača	10
Slika 1.3 - Pozitivan poprečni presjek	11
Slika 1.4 - Negativan poprečni presjek	11
Slika 1.5 - Pozitivne unutarnje sile na pozitivnom presjeku	12
Slika 1.6 - Pozitivne unutarnje sile na negativnom presjeku	12
Slika 1.7 - Linijski nosač oslobođen od veza	12
Slika 1.8 - Rešetka	13
Slika 1.9 - Rešetka s dodanim reakcijama veza	14
Slika 1.10 - Čvor A	14
Slika 1.11 - Metoda presjeka s pripadajućim uvjetima ravnoteže	15
Slika 2.1 - Ojačani linijski nosač	16
Slika 2.2 - Simetrično opterećenje zadanog ojačanog nosača	17
Slika 2.3 - Simetrično opterećen ojačani linijski nosač oslobođen od veza	17
Slika 2.4 - Desni dio simetrično opterećenog nosača	18
Slika 2.5 - Čvor III simetrično opterećenog nosača	18
Slika 2.6 - Čvor IV simetrično opterećenog nosača	19
Slika 2.7 - Presjeci u neovisnim područjima za određivanje unutarnjih sila simetrično opterećenog nosača	20
Slika 2.8 - Presjek 1-1 simetrično opterećenog nosača	21
Slika 2.9 - Presjek 2-2 simetrično opterećenog nosača	21
Slika 2.10 - Presjek 3-3 simetrično opterećenog nosača	22
Slika 2.11 - Presjek 4-4 simetrično opterećenog nosača	23
Slika 2.12 - Presjek 5-5 simetrično opterećenog nosača	24
Slika 2.13 - Presjek 6-6 simetrično opterećenog nosača	24
Slika 2.14 - Presjek 7-7 simetrično opterećenog nosača	25
Slika 2.15 - Presjek 8-8 simetrično opterećenog nosača	26
Slika 2.16 - Dijagrami unutarnjih sila simetrično opterećenog nosača	27
Slika 2.17 - Asimetrično opterećenje zadanog ojačanog nosača	28
Slika 2.18 - Asimetrično opterećen ojačani linijski nosač oslobođen od veza	28
Slika 2.19 - Desni dio asimetrično opterećenog nosača	29

Slika 2.20 - Presjeci u neovisnim područjima za određivanje unutarnjih sila asimetrično opterećenog nosača	30
Slika 2.21 - Presjek 1-1 asimetrično opterećenog nosača	31
Slika 2.22 - Presjek 2-2 asimetrično opterećenog nosača	31
Slika 2.23 - Presjek 3-3 asimetrično opterećenog nosača	32
Slika 2.24 - Presjek 4-4 asimetrično opterećenog nosača	33
Slika 2.25 - Presjek 5-5 asimetrično opterećenog nosača	34
Slika 2.26 - Presjek 6-6 asimetrično opterećenog nosača	34
Slika 2.27 - Dijagrami unutarnjih sila asimetrično opterećenog nosača	36
Slika 2.28 - Zadano opterećenje	37
Slika 2.29 - Zadano opterećenje oslobođeno od veza	38
Slika 2.30 - Desni dio zadano opterećenog nosača	39
Slika 2.31 - Čvor III zadano opterećenog nosača.....	39
Slika 2.32 - Čvor IV zadano opterećenog nosača	40
Slika 2.33 - Presjeci u neovisnim područjima za određivanje unutarnjih sila zadanog opterećenja	41
Slika 2.34 - Presjek 1-1 zadano opterećenog nosača.....	42
Slika 2.35 - Presjek 2-2 zadano opterećenog nosača.....	42
Slika 2.36 - Presjek 3-3 zadano opterećenog nosača.....	43
Slika 2.37 - Presjek 4-4 zadano opterećenog nosača.....	44
Slika 2.38 - Presjek 5-5 zadano opterećenog nosača.....	45
Slika 2.39 - Presjek 6-6 zadano opterećenog nosača.....	46
Slika 2.40 - Presjek 7-7 zadano opterećenog nosača.....	46
Slika 2.41 - Presjek 8-8 zadano opterećenog nosača.....	47
Slika 2.42 - Dijagrami unutarnjih sila za zadano opterećenje.....	48
Slika 3.1 - HE profil	50
Slika 3.2 - IPE profil	50
Slika 3.3 - Idealizirani IPE profil	53
Slika 3.4 - Raspodjela normalnih i posmičnih naprezanja po visini poprečnog presjeka	55
Slika 3.5 - Čvor I zadanog opterećenja	55
Slika 3.6 - Čvor II zadanog opterećenja	58
Slika 5.1 - Čvorni spoj u čvoru II.....	66
Slika 5.2 - Spoj kvadratnog profila i čvornog lima	66
Slika 5.3 - Urezani kvadratni profil sa zavarenim čeličnim trakama	67

Slika 5.4 - Spoj čvornog lima(3), čelične trake(2) i kvadratnog profila(1).....	67
Slika 5.5 - Redizajnirani spoj čvornog lima(3), čelične trake(2) i kvadratnog profila(1).....	68
Slika 5.6 - Oblikovani i dimenzionirani čvorni lim	72

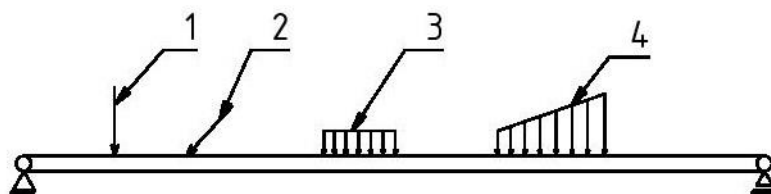
Popis tablica

Tablica 1 - Sile u štapovima simetrično opterećenog nosača.....	27
Tablica 2 - Sile u štapovima asimetrično opterećenog nosača.....	37
Tablica 3 - Sile u štapovima zadano opterećenog nosača	49

1 Uvod

1.1 Općenito o linijskim nosačima

Svako kruto tijelo punog, šupljeg ili nekog drugog oblika poprečnog presjeka vezano za podlogu naziva se nosač. U ovom radu vrši se proračun ravninskog nosača punog poprečnog presjeka. Kod ravninskog nosača os nosača i sva opterećenja bila koncentrirana ili kontinuirana djeluju u istoj ravnini. Koncentrirano opterećenje može djelovati okomito na os nosača ili pak pod određenim kutom, dok kontinuirano opterećenje može biti konstantnog ili promjenljivog intenziteta što je prikazano na slici 1.1.



Slika 1.1 - Ravninski linijski nosač s različitim vrstama opterećenja

1. Koncentrirano opterećenje koje djeluje okomito na os nosača
2. Koncentrirano opterećenje koje djeluje pod određenim kutom
3. Kontinuirano opterećenje konstantnog intenziteta
4. Kontinuirano opterećenje promjenljivog intenziteta

Koordinatni sistem kod rješavanja ravninskih nosača dogovorno je definiran tako da se os x poklapa s uzdužnom osi nosača, os y izlazi iz slike, a os z je usmjerena prema dolje (desni pravokutni koordinatni sustav), što je prikazano na slici 1.2.

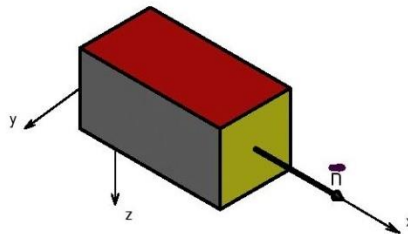


Slika 1.2 - Dogovorno definiran koordinatni sustav kod ravninskih linijskih nosača

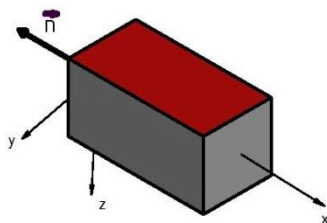
Sva vanjska opterećenja, bilo aktivna ili pasivna, koja djeluju na linijski nosač uzrokuju reakcijske sile u samom nosaču. Te sile se nazivaju unutarnje sile i potrebno ih je izračunavati radi dimenzioniranja samog nosača. Pod unutarnjim silama podrazumijevaju se:

- uzdužna sila koja se poklapa sa uzdužnom osi nosača i označava se s N ;
- poprečna sila koja je okomita na uzdužnu os nosača i označava se s Q_z ;
- moment savijanja koji djeluje oko osi y i označava se s M_y .

Prije samog izračunavanja unutarnjih sila u linijskom nosaču potrebno je definirati njihove predznake. Poprečni presjek je pozitivan ako se smjer vanjske normale na presjek poklapa s pozitivnim smjerom osi x (slika 1.3), a negativan ako je smjer vanjske normale suprotan od pozitivnog smjera osi x kao što je prikazano na slici 1.4 [1].

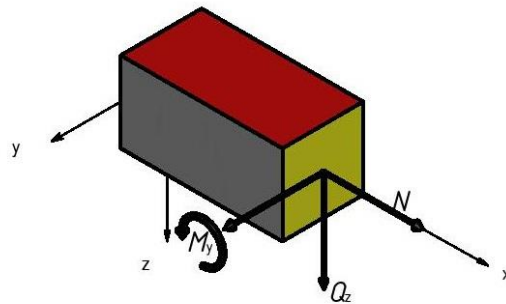


Slika 1.3 - Pozitivan poprečni presjek

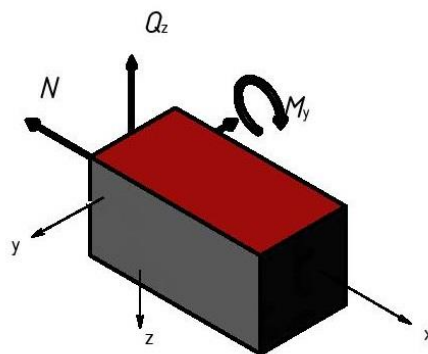


Slika 1.4 - Negativan poprečni presjek

Na osnovu prethodno utvrđenog pozitivnog odnosno negativnog poprečnog presjeka utvrđuju se predznaci unutarnjih sila. Pozitivne unutarnje sile na pozitivnom i negativnom presjeku prikazane su na slikama 1.5 i 1.6.

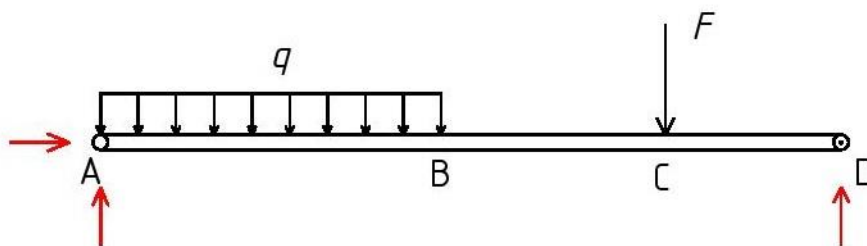


Slika 1.5 - Pozitivne unutarnje sile na pozitivnom presjeku



Slika 1.6 - Pozitivne unutarnje sile na negativnom presjeku

Rješavanje linijskog nosača započinje oslobađanjem od veza i dodavanjem reakcija u vezama, kao što je prikazano na slici 1.7.

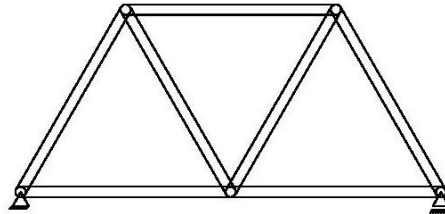


Slika 1.7 - Linijski nosač oslobođen od veza

Nakon toga uočava se broj neovisnih područja nosača (područja u kojima ne dolazi do nikakvih promjena). U primjeru sa slike 1.7 uočavaju se tri neovisna područja, a to su: područje A–B, područje B–C i područje C–D. Za svako od područja određuju se analitički izrazi za unutarnje sile, lociraju se područja opasnih presjeka te se crtaju i kotiraju dijagrami unutarnjih sila [1].

1.2 Općenito o rešetkastim nosačima

Rešetkom se naziva kruta konstrukcija sastavljena od štapova koji su međusobno spojeni cilindričnim zglobovima (slika 1.8). Mjesto spajanja štapova se naziva čvor.



Slika 1.8 - Rešetka

Pri razmatranju rešetkastog nosača uvode se slijedeće pretpostavke:

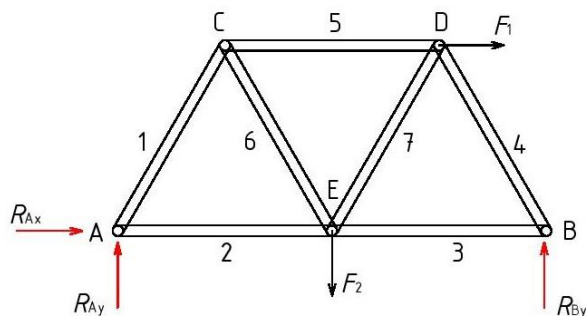
- vanjsko opterećenje djeluje isključivo u čvorovima rešetke;
- štapovi rešetke opterećeni su na sabijanje i istežanje;
- trenje u zglobovima se zanemaruje;
- težina štapova je u odnosu na vanjska opterećenja mala pa se zanemaruje.

Prva faza proračuna rešetkastog nosača identična je proračunu linijskog nosača tj. konstrukcija se oslobodi od veza i izračunaju se reakcije veza (vanjska ravnoteža). Nakon toga se vrši proračun sila u štapovima (unutarnja ravnoteža). Sile u štapovima određuju se:

- metodom čvorova,
- metodom presjeka.

Metoda čvorova

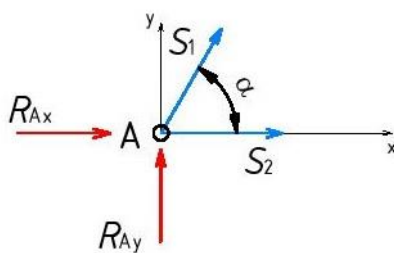
Nakon izračuna reakcija veza odabire se čvor s najmanje jednom poznatom i dvije nepoznate sile, što u primjeru sa slike 1.9 znači da odabir pada na čvor A ili na čvor B. Rešetka je opterećena vanjskim opterećenjima F_1 i F_2 .



Slika 1.9 - Rešetka s dodanim reakcijama veza

Za detaljno objašnjenje metode čvorova odabire se čvor A, na koji djeluju dvije poznate sile (komponente reakcije u nepomičnom osloncu A izračunate iz vanjskog uvjeta ravnoteže rešetke) i nepoznate sile u štapovima 1 i 2 (slika 1.10). U svim štapovima pretpostavit će se vlačne sile, a ukoliko rezultat bude negativan štapovi su opterećeni tlačno [1].

Sile u štapovima izračunate metodom čvorova označavati će se slovom S .



Slika 1.10 - Čvor A

Iz dva uvjeta ravnoteže za konkurentni sustav sila koji glase:

$$\sum F_x = 0: S_2 + S_1 \cdot \cos \alpha + R_{Ax} = 0,$$

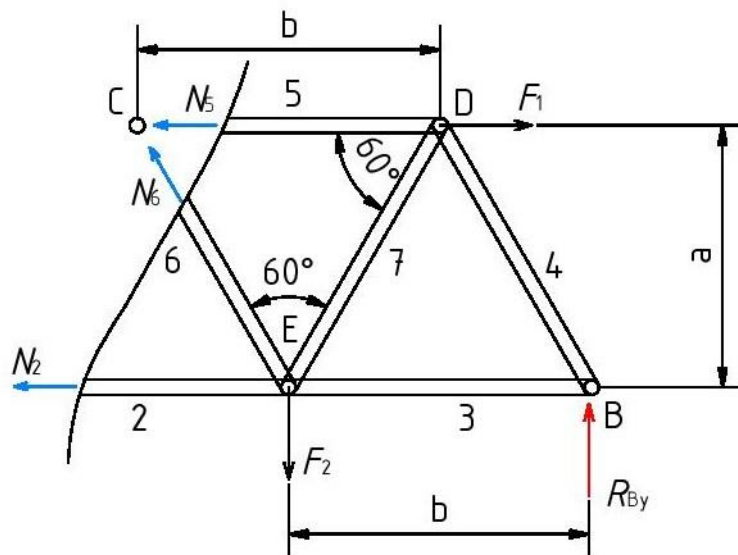
$$\sum F_y = 0: R_{Ay} + S_1 \cdot \sin \alpha = 0,$$

izračunavaju se nepoznate sile u štapovima 1 i 2. Postupak se ponavlja sve dok se ne izračunaju sve sile u štapovima.

Metoda presjeka

Ova metoda se koristi u slučaju kada se žele odrediti sile u pojedinačnim štapovima. Pretpostavka je da se u primjeru sa slike 1.9 žele odrediti samo sile u štapovima 2, 5 i 6, što je ujedno i maksimalni broj štapova preko kojih se može vršiti presjek. Sustav sila nije konkurentan, te se za takav sustav mogu postaviti tri jednadžbe ravnoteže [1].

Iz vanjske ravnoteže cijele konstrukcije izračunaju se reakcije veza, a zatim se napravi presjek preko traženih štapova (2, 5 i 6). Sile u štapovima se u slučaju metode presjeka označavaju s N i pretpostavka je da su štapovi opterećeni vlačno (u slučaju da se dobije negativna vrijednost opterećenje je tlačno). Nakon toga se postavljaju uvjeti ravnoteže koji najlakše dovode do rješenja. Opisani postupak prikazan je na slici 1.11.



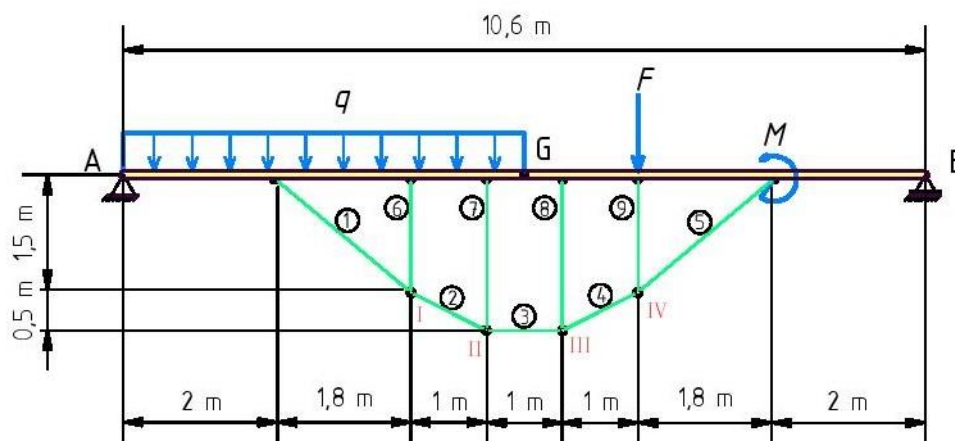
1. $\sum M_C = 0: R_{By} \cdot 1,5 \cdot b - F_2 \cdot 0,5 \cdot b - N_2 \cdot a = 0$,
2. $\sum M_D = 0: R_{By} \cdot 0,5 \cdot b + F_2 \cdot 0,5 \cdot b - N_2 \cdot a - N_6 \cdot \sin 60^\circ \cdot b = 0$,
3. $\sum M_E = 0: R_{By} \cdot b - F_1 \cdot a + N_5 \cdot a = 0$.

Slika 1.11 - Metoda presjeka s pripadajućim uvjetima ravnoteže

Iz prve jednadžbe izračuna se sila u štapu 2, iz druge sila u štapu 6 i iz treće sila u štapu 5.

2 Proračun ojačanog linijskog nosača

U ovom radu razmatra se linijski nosač sastavljen od dva dijela međusobno spojena zglobom u G. Nosač je za podlogu vezan nepomičnim osloncem u A i pomičnim osloncem u B. Radi velikog raspona nosača isti je ojačan štapovima kao što je prikazano na slici 2.1 [1], [5].



Slika 2.1 - Ojačani linijski nosač

Zadana konstrukcija ojačanog linijskog nosača opterećena je koncentriranom silom F , spregom sila M i jednoliko raspodijeljenim kontinuiranim opterećenjem iznosa q prema navedenom:

$$F = 30 \text{ kN}, \quad M = 25 \text{ kN}\cdot\text{m}, \quad q = 20 \text{ kN/m}.$$

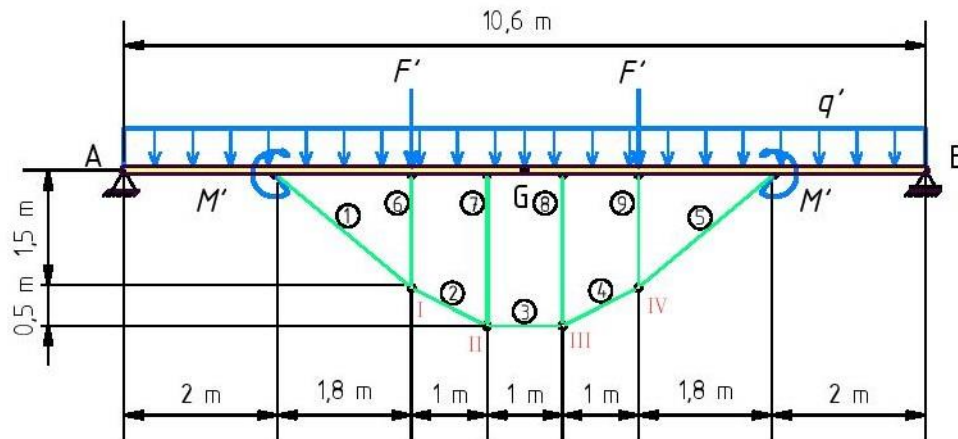
Budući da se radi o simetričnoj konstrukciji zadano opterećenje može se prikazati kao zbroj simetričnog i asimetričnog opterećenja.

2.1 Simetrično opterećen linijski nosač

Simetrično opterećenje prikazano je na slici 2.2, s vrijednostima:

$$F' = \frac{F}{2} = 15 \text{ kN}, \quad M' = \frac{M}{2} = 12,5 \text{ kN}\cdot\text{m}, \quad q' = \frac{q}{2} = 10 \text{ kN/m}.$$

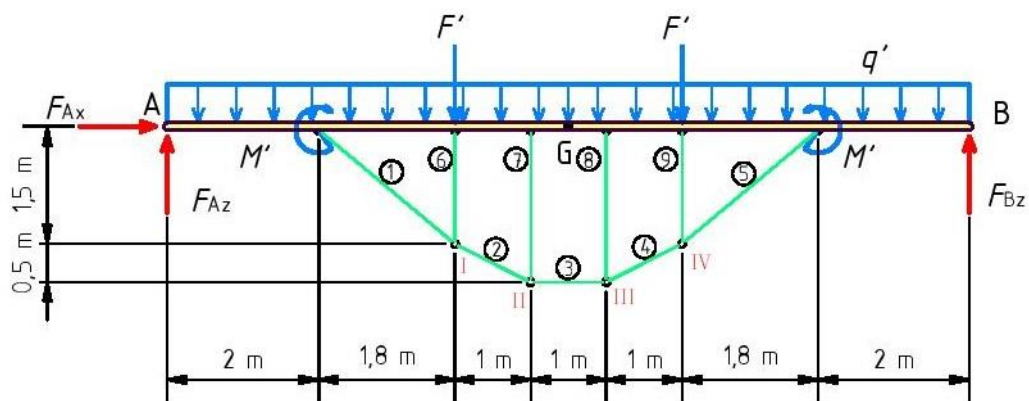
Redoslijed proračuna je slijedeći: prvo se određuju reakcije oslonaca A i B razmatranjem ravnoteže cijele konstrukcije, zatim se izračunavaju sile u štapovima ojačanja, te se na kraju dobivaju unutarnje sile po područjima nosača [2].



Slika 2.2 - Simetrično opterećenje zadanog ojačanog nosača

Izračunavanje reakcija u osloncima

Ojačani nosač nakon oslobađanja od veza i zamjenom veza pripadajućim reakcijama prikazan je na slici 2.3.



Slika 2.3 - Simetrično opterećen ojačani linijski nosač oslobođen od veza

Uvjeti ravnoteže glase:

$$\sum F_x = 0: \quad F_{Ax} = 0,$$

$$\sum F_z = 0: \quad q' \cdot 10,6 + F' + F' - F_{Az} - F_{Bz} = 0,$$

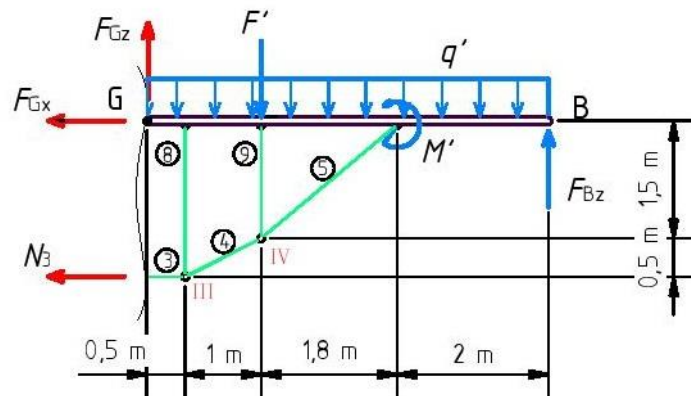
$$\sum M_A = 0: \quad F_{Bz} \cdot 10,6 + M' - M' - F' \cdot 3,8 - F' \cdot 6,8 - q' \cdot 10,6 \cdot 5,3 = 0.$$

Rješavanjem gornjih jednadžbi dobije se:

$$F_{Ax} = 0, \quad F_{Bz} = 68 \text{ kN}, \quad F_{Az} = 68 \text{ kN}.$$

Izračunavanje sile u štapovima ojačanja

Sila u štapu 3 i komponente sile u zglobu G dobit će se metodom presjeka promatrajući desni dio zadane konstrukcije prikazan na slici 2.4.



Slika 2.4 - Desni dio simetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže glase:

$$\sum F_x = 0: \quad -N_3 - F_{Gx} = 0,$$

$$\sum F_z = 0: \quad F_{Gz} - F_{Bz} + F' + q' \cdot 5,3 = 0,$$

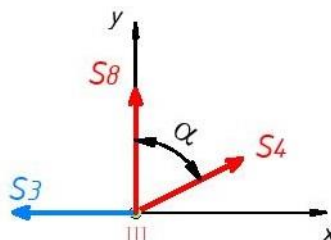
$$\sum M_G = 0: \quad F_{Bz} \cdot 5,3 - N_3 \cdot 2 - F' \cdot 1,5 - q' \cdot 5,3 \cdot 2,65 + M' = 0.$$

Rješavanjem gornjih jednadžbi dobije se:

$$F_{Gz} = 0, \quad N_3 = 104,97 \text{ kN}, \quad F_{Gx} = -104,97 \text{ kN}.$$

Smjer komponente sile F_{Gx} je krivo pretpostavljen.

Sile u štapovima 4 i 8 dobit će se metodom rješavanja čvora III prikazanog na slici 2.5.



Slika 2.5 - Čvor III simetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za čvor III glase:

$$\sum F_x = 0: \quad -S_3 + S_4 \cdot \sin \alpha = 0 ,$$

$$\sum F_y = 0: \quad S_8 + S_4 \cdot \cos \alpha = 0 ,$$

gdje je α kut kojeg zatvaraju štapovi S_4 i S_8 , a iznosi:

$$\tan \alpha = \frac{1}{0,5} = 2 , \quad \alpha = 63,43^\circ .$$

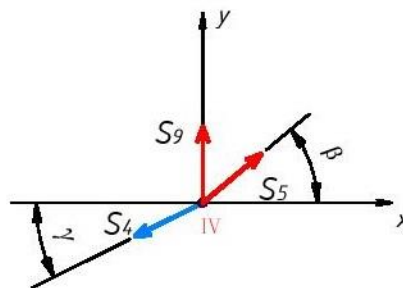
Iz prve jednadžbe je:

$$S_4 = \frac{S_3}{\sin \alpha} = 117,37 \text{ kN} .$$

Iz druge jednadžbe je:

$$S_8 = -S_4 \cdot \cos \alpha = -52,49 \text{ kN} .$$

Sile u štapovima 5 i 9 dobit će se metodom rješavanja čvora IV prikazanog na slici 2.6.



Slika 2.6 - Čvor IV simetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za čvor IV glase:

$$\sum F_x = 0: \quad S_5 \cdot \cos \beta - S_4 \cdot \cos \gamma = 0 ,$$

$$\sum F_y = 0: \quad S_9 + S_5 \cdot \sin \beta - S_4 \cdot \sin \gamma = 0 ,$$

gdje su kutovi β i γ dobiveni iz izraza:

$$\tan \beta = \frac{1,5}{1,8} = 0,83 , \quad \beta = 39,8^\circ ,$$

$$\tan \gamma = \frac{0,5}{1} = 0,5, \quad \gamma = 26,57^\circ.$$

Iz prve jednadžbe je $S_5 = 136,63 \text{ kN}$.

Iz druge jednadžbe je $S_9 = -34,95 \text{ kN}$.

Čvor II je identičan čvoru III, pa slijedi:

$$S_7 = S_8 = -52,49 \text{ kN}, \quad S_2 = S_4 = 117,37 \text{ kN}.$$

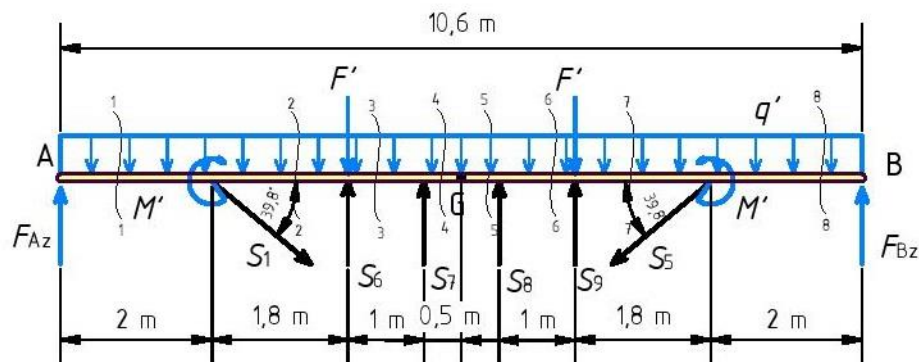
Čvor I je identičan čvoru IV, pa slijedi:

$$S_6 = S_9 = -34,95 \text{ kN}, \quad S_1 = S_5 = 136,63 \text{ kN}.$$

Izračunavanje unutarnjih sila

Unutarnje sile u nosaču dobit će se metodom presjeka po neovisnim područjima (slika 2.7).

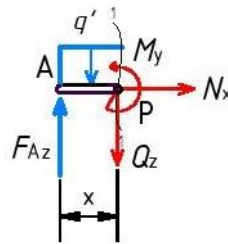
Smjerovi sila u štapovima 6, 7, 8 i 9 promijenjeni su i u daljnjem proračunu uvrštavati će se pozitivne vrijednosti istih.



Slika 2.7 - Presjeci u neovisnim područjima za određivanje unutarnjih sila simetrično opterećenog nosača

Presjek 1-1:

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



Slika 2.8 - Presjek 1-1 simetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 0 do 2 m (slika 2.8) glase:

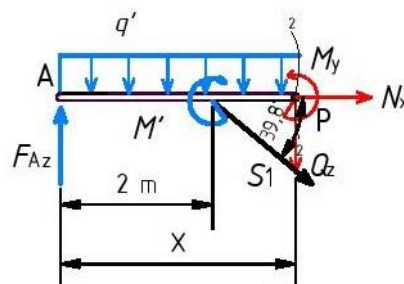
$$\begin{aligned}\sum F_x = 0: & \quad N = 0, \\ \sum F_z = 0: & \quad Q_z - F_{Az} + q' \cdot x = 0, \\ \sum M_P = 0: & \quad M_y - F_{Az} \cdot x + q' \cdot x^2 / 2 = 0,\end{aligned}$$

odakle se dobije:

$$\begin{aligned}N &= 0, \\ Q_z &= F_{Az} - q' \cdot x, & Q_z(0) &= 68 \text{ kN}, & Q_z(2) &= 48 \text{ kN}, \\ M_y &= F_{Az} \cdot x - q' \cdot x^2 / 2, & M_y(0) &= 0, & M_y(2) &= 116 \text{ kN} \cdot \text{m}.\end{aligned}$$

Presjek 2-2:

$$2 \text{ m} \leq x \leq 3,8 \text{ m}$$



Slika 2.9 - Presjek 2-2 simetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 2 m do 3,8 m (slika 2.9) glase:

$$\begin{aligned}\sum F_x = 0: & \quad N + S_1 \cdot \cos 39,8^\circ = 0, \\ \sum F_z = 0: & \quad Q_z + S_1 \cdot \sin 39,8^\circ - F_{Az} + q' \cdot x = 0, \\ \sum M_P = 0: & \quad M_y - F_{Az} \cdot x - M' + S_1 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x - 2) + q' \cdot x^2 / 2 = 0,\end{aligned}$$

odakle se dobije:

$$N = -S_1 \cdot \cos 39,8^\circ = -104,97 \text{ kN},$$

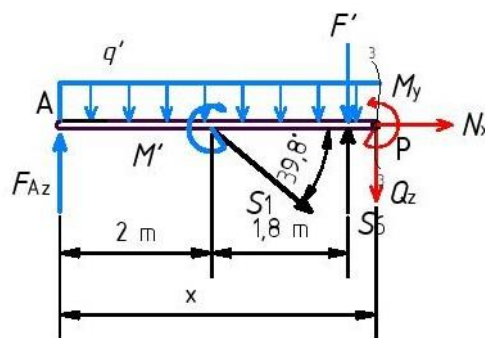
$$Q_z = F_{Az} - q' \cdot x - S_1 \cdot \sin 39,8^\circ, \quad Q_z(2) = -39,46 \text{ kN}, \quad Q_z(3,8) = -57,46 \text{ kN},$$

$$M_y = F_{Az} \cdot x + M' - S_1 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x-2) - q' \cdot x^2 / 2,$$

$$M_y(2) = 128,5 \text{ kN} \cdot \text{m}, \quad M_y(3,8) = 41,28 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

Presjek 3-3:

$$3,8 \text{ m} \leq x \leq 4,8 \text{ m}$$



Slika 2.10 - Presjek 3-3 simetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 3,8 m do 4,8 m (slika 2.10) glase:

$$\sum F_x = 0: \quad N + S_1 \cdot \cos 39,8^\circ = 0,$$

$$\sum F_z = 0: \quad Q_z + S_1 \cdot \sin 39,8^\circ - F_{Az} + q' \cdot x + F' - S_6 = 0,$$

$$\sum M_P = 0: \quad M_y - F_{Az} \cdot x - S_6 \cdot (x-3,8) + S_1 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x-2) + q' \cdot x^2 / 2 + \\ + F' \cdot (x-3,8) - M' = 0,$$

odakle se dobije:

$$N = -S_1 \cdot \cos 39,8^\circ = -104,97 \text{ kN},$$

$$Q_z = F_{Az} - q' \cdot x - S_1 \cdot \sin 39,8^\circ - F' + S_6,$$

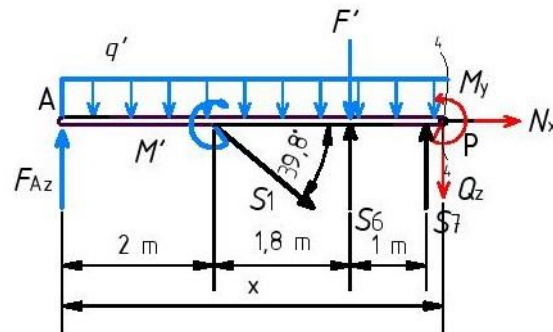
$$Q_z(3,8) = -37,51 \text{ kN}, \quad Q_z(4,8) = -47,51 \text{ kN},$$

$$M_y = F_{Az} \cdot x + M' + S_6 \cdot (x-3,8) - S_1 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x-2) - F' \cdot (x-3,8) - q' \cdot x^2 / 2,$$

$$M_y(3,8) = 41,28 \text{ kN} \cdot \text{m}, \quad M_y(4,8) = -1,24 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

Presjek 4-4:

$$4,8 \text{ m} \leq x \leq 5,3 \text{ m}$$



Slika 2.11 - Presjek 4-4 simetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 4,8 m do 5,3 m (slika 2.11) glase:

$$\sum F_x = 0: \quad N + S_1 \cdot \cos 39,8^\circ = 0,$$

$$\sum F_z = 0: \quad Q_z + S_1 \cdot \sin 39,8^\circ - F_{Az} + q' \cdot x + F' - S_6 - S_7 = 0,$$

$$\sum M_P = 0: \quad M_y - S_6 \cdot (x - 3,8) + S_1 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x - 2) + q' \cdot x^2 / 2 - S_7 \cdot (x - 4,8) + F' \cdot (x - 3,8) - M' - F_{Az} \cdot x = 0,$$

odakle se dobije:

$$N = -S_1 \cdot \cos 39,8^\circ = -104,97 \text{ kN},$$

$$Q_z = F_{Az} - q' \cdot x - S_1 \cdot \sin 39,8^\circ - F' + S_6 + S_7,$$

$$Q_z(4,8) = 4,98 \text{ kN}, \quad Q_z(5,3) = 0,$$

$$M_y = S_7 \cdot (x - 4,8) - S_1 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x - 2) - F' \cdot (x - 3,8) - q' \cdot x^2 / 2 +$$

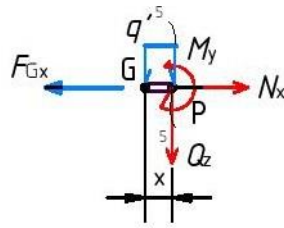
$$+ S_6 \cdot (x - 3,8) + M' + F_{Az} \cdot x,$$

$$M_y(4,8) = -1,24 \text{ kN} \cdot \text{m}, \quad M_y(5,3) = 0.$$

Presjek 5-5:

$$0 \text{ m} \leq x \leq 0,5 \text{ m}$$

Ojačani linijski nosač presjeći će se u točki G, dodati će se komponente sile u Gerberovom zglobu, što znači samo komponentu F_{Gx} , jer je komponenta F_{Gz} jednaka nuli i promatrati desni dio kao zasebnu cjelinu.



Slika 2.12 - Presjek 5-5 simetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 0 m do 0,5 m (slika 2.12) glase:

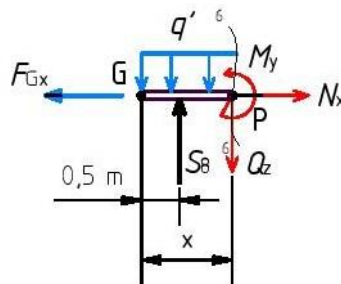
$$\begin{aligned}\sum F_x = 0: & \quad N - F_{Gx} = 0, \\ \sum F_z = 0: & \quad Q_z + q' \cdot x = 0, \\ \sum M_P = 0: & \quad M_y + q' \cdot x^2 / 2 = 0,\end{aligned}$$

odakle se dobije:

$$\begin{aligned}N = F_{Gx} &= -104,97 \text{ kN}, \\ Q_z &= -q' \cdot x, & Q_z(0) &= 0, & Q_z(0,5) &= -4,98 \text{ kN}, \\ M_y &= -q' \cdot x^2 / 2, & M_y(0) &= 0, & M_y(0,5) &= -1,24 \text{ kN} \cdot \text{m}.\end{aligned}$$

Presjek 6-6:

$$0,5 \text{ m} \leq x \leq 1,5 \text{ m}$$



Slika 2.13 - Presjek 6-6 simetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 0,5 m do 1,5 m (slika 2.13) glase:

$$\begin{aligned}\sum F_x = 0: & \quad N - F_{Gx} = 0, \\ \sum F_z = 0: & \quad Q_z + q' \cdot x - S_8 = 0, \\ \sum M_P = 0: & \quad M_y + q' \cdot x^2 / 2 - S_8 \cdot (x - 0,5) = 0,\end{aligned}$$

odakle se dobije:

$$N = F_{Gx} = -104,97 \text{ kN},$$

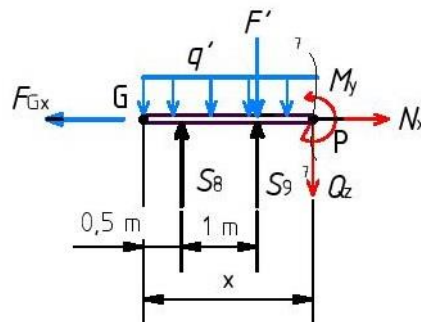
$$Q_z = -q' \cdot x + S_8, \quad Q_z(0,5) = 47,5 \text{ kN}, \quad Q_z(1,5) = 37,5 \text{ kN},$$

$$M_y = S_8 \cdot (x - 0,5) - q' \cdot x^2 / 2,$$

$$M_y(0,5) = -1,24 \text{ kN} \cdot \text{m}, \quad M_y(1,5) = 41,28 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

Presjek 7-7:

$$1,5 \text{ m} \leq x \leq 3,3 \text{ m}$$



Slika 2.14 - Presjek 7-7 simetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 1,5 m do 3,3 m (slika 2.14) glase:

$$\sum F_x = 0: \quad N - F_{Gx} = 0,$$

$$\sum F_z = 0: \quad Q_z + q' \cdot x - S_8 - S_9 + F' = 0,$$

$$\sum M_P = 0: \quad M_y + q' \cdot x^2 / 2 - S_8 \cdot (x - 0,5) - S_9 \cdot (x - 1,5) + F' \cdot (x - 1,5) = 0,$$

odakle se dobije:

$$N = F_{Gx} = -104,97 \text{ kN},$$

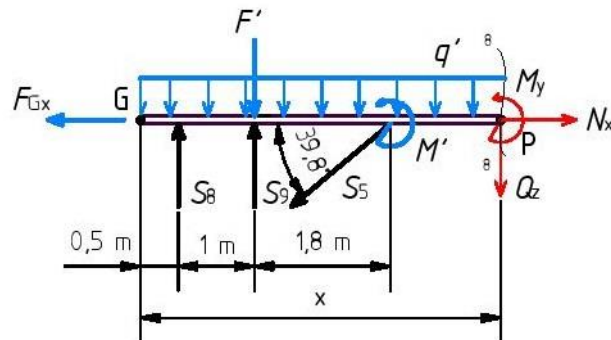
$$Q_z = -q' \cdot x + S_8 + S_9 - F', \quad Q_z(1,5) = 57,46 \text{ kN}, \quad Q_z(3,3) = 39,46 \text{ kN},$$

$$M_y = S_8 \cdot (x - 0,5) + S_9 \cdot (x - 1,5) - F' \cdot (x - 1,5) - q' \cdot x^2 / 2,$$

$$M_y(1,5) = 41,28 \text{ kN} \cdot \text{m}, \quad M_y(3,3) = 128,5 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

Presjek 8-8:

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



Slika 2.15 - Presjek 8-8 simetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 3,3 m do 5,3 m (slika 2.15) glase:

$$\sum F_x = 0: \quad N - F_{Gx} - S_5 \cdot \cos 39,8^\circ = 0,$$

$$\sum F_z = 0: \quad Q_z + q' \cdot x - S_8 - S_9 + F' + S_5 \cdot \sin 39,8^\circ = 0,$$

$$\sum M_P = 0: \quad M_y + q' \cdot x^2 / 2 - S_8 \cdot (x - 0,5) - S_9 \cdot (x - 1,5) + S_5 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x - 3,3) + F' \cdot (x - 1,5) + M' = 0,$$

odakle se dobije:

$$N = F_{Gx} + S_5 \cdot \cos 39,8^\circ = 0,$$

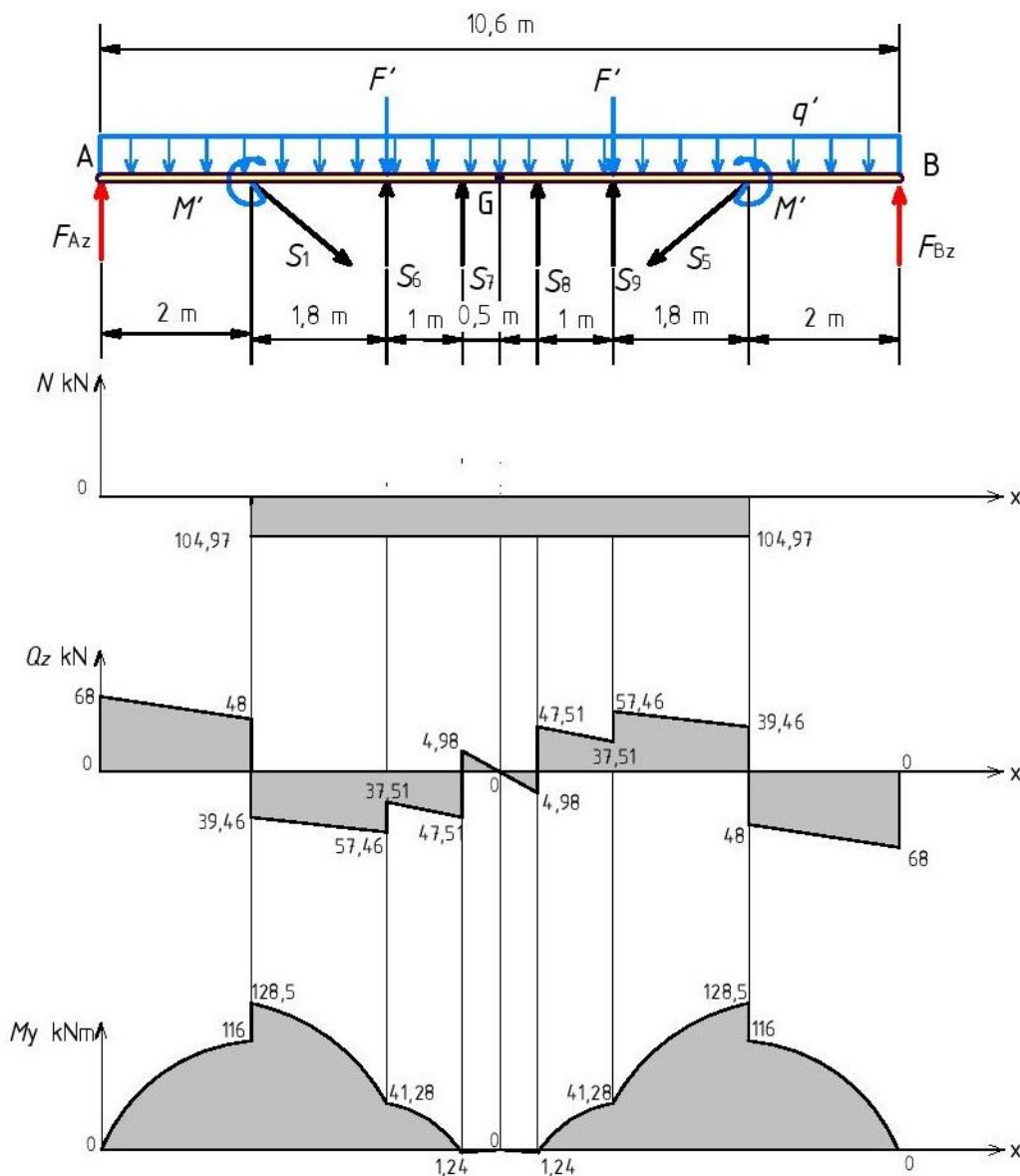
$$Q_z = -q' \cdot x + S_8 + S_9 - F' - S_5 \cdot \sin 39,8^\circ, \quad Q_z(3,3) = -48 \text{ kN}, \quad Q_z(5,3) = -68 \text{ kN},$$

$$M_y = S_8 \cdot (x - 0,5) + S_9 \cdot (x - 1,5) - q' \cdot x^2 / 2 - S_5 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x - 3,3) - F' \cdot (x - 1,5) - M' = 0,$$

$$M_y(3,3) = 116 \text{ kN} \cdot \text{m}, \quad M_y(5,3) = 0.$$

Dijagrami unutarnjih sila za simetrično opterećen ojačani linijski nosač

Unutarnje sile simetrično opterećenog linijskog nosača s karakterističnim vrijednostima prikazane su na slici 2.16.



Slika 2.16 - Dijagrami unutarnjih sila simetrično opterećenog nosača

U tablici 1 prikazane su brojčane vrijednosti sila u štapovima simetrično opterećenog nosača.

Tablica 1 - Sile u štapovima simetrično opterećenog nosača

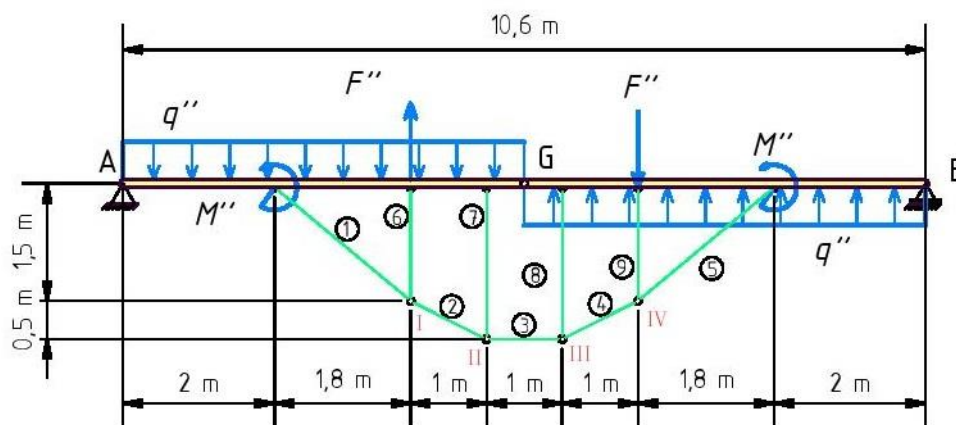
Štap	1	6	7	8	9	5
Sila u štapu N kN	136,63	-34,95	-52,49	-52,49	-34,95	136,63

2.2 Asimetrično opterećen linijski nosač

Asimetrično opterećenje prikazano je na slici 2.17, s vrijednostima:

$$F'' = \frac{F}{2} = 15 \text{ kN}, \quad M'' = \frac{M}{2} = 12,5 \text{ kN} \cdot \text{m}, \quad q'' = \frac{q}{2} = 10 \text{ kN/m}.$$

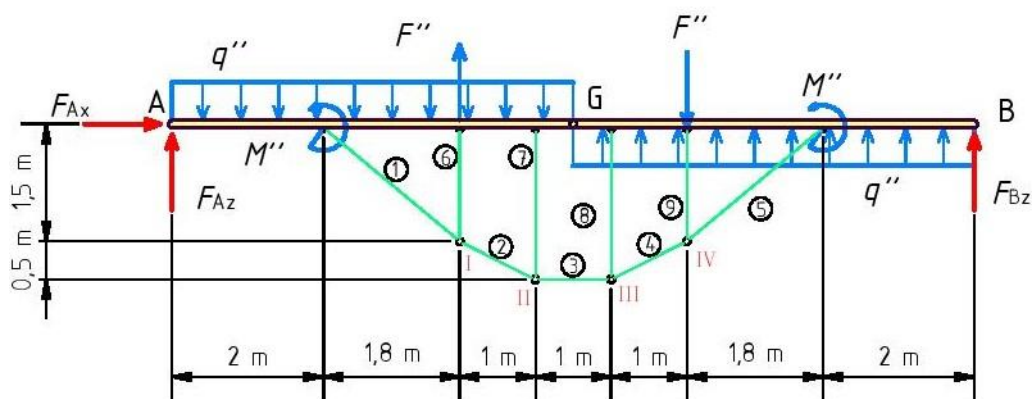
Redosljed proračuna identičan je prethodnom; prvo se određuju reakcije oslonaca A i B razmatranjem ravnoteže cijele konstrukcije, zatim se izračunavaju sile u štapovima ojačanja te se na kraju dobivaju unutarnje sile po područjima nosača [2].



Slika 2.17 - Asimetrično opterećenje zadanog ojačanog nosača

Izračunavanje reakcija u osloncima

Ojačani nosač nakon oslobađanja od veza i zamjenom veza pripadajućim reakcijama prikazan je na slici 2.18.



Slika 2.18 - Asimetrično opterećen ojačani linijski nosač oslobođen od veza

Uvjeti ravnoteže glase:

$$\sum F_x = 0 : F_{Ax} = 0 ,$$

$$\sum F_z = 0 : q'' \cdot 5,3 - q'' \cdot 5,3 + F'' - F'' - F_{Az} - F_{Bz} = 0 ,$$

$$\sum M_A = 0 : F_{Bz} \cdot 10,6 - F'' \cdot 6,8 - q'' \cdot 5,3 \cdot 2,65 + q'' \cdot 5,3 \cdot 7,95 + \\ + M'' + M'' + F'' \cdot 3,8 = 0 ,$$

odakle se dobije:

$$F_{Ax} = 0 ,$$

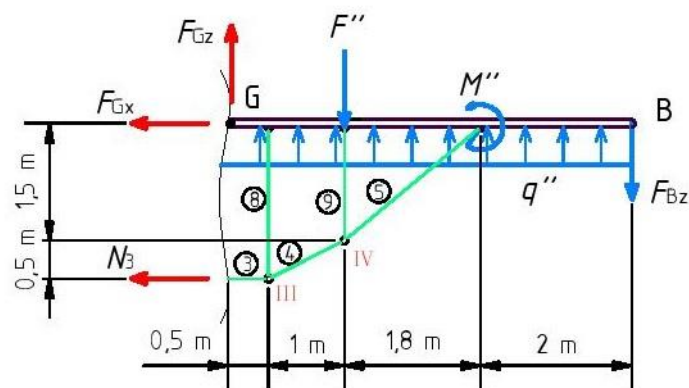
$$F_{Bz} = \frac{F'' \cdot 6,8 + q'' \cdot 5,3 \cdot 2,65 - q'' \cdot 5,3 \cdot 7,95 - 2 \cdot M'' - F'' \cdot 3,8}{10,6} = -24,61 \text{ kN} ,$$

$$F_{Az} = -F_{Bz} = 24,61 \text{ kN} .$$

Smjer reakcije u osloncu B je krivo pretpostavljen. U daljnji proračun ulazi se sa promijenjenim smjerom reakcije u osloncu B.

Izračunavanje sila u štapovima ojačanja

Sila u štapu 3 i komponente sile u zglobu G dobiti će se metodom presjeka promatrajući desni dio zadane konstrukcije prikazan na slici 2.19.



Slika 2.19 - Desni dio asimetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže glase:

$$\sum F_x = 0 : -N_3 - F_{Gx} = 0 ,$$

$$\sum F_z = 0 : -F_{Gz} + F_{Bz} + F'' + q'' \cdot 5,3 = 0 ,$$

$$\sum M_G = 0 : -F_{Bz} \cdot 5,3 - N_3 \cdot 2 - F'' \cdot 1,5 + q'' \cdot 5,3 \cdot 2,65 + M'' = 0 ,$$

odakle se dobije:

$$F_{Gz} = F_{Bz} + F'' - q'' \cdot 5,3 = -13,39 \text{ kN},$$

$$N_3 = \frac{-F_{Bz} \cdot 5,3 - F'' \cdot 1,5 + q'' \cdot 5,3 \cdot 2,65 + M''}{2} = 0,$$

$$F_{Gx} = -N_3 = 0.$$

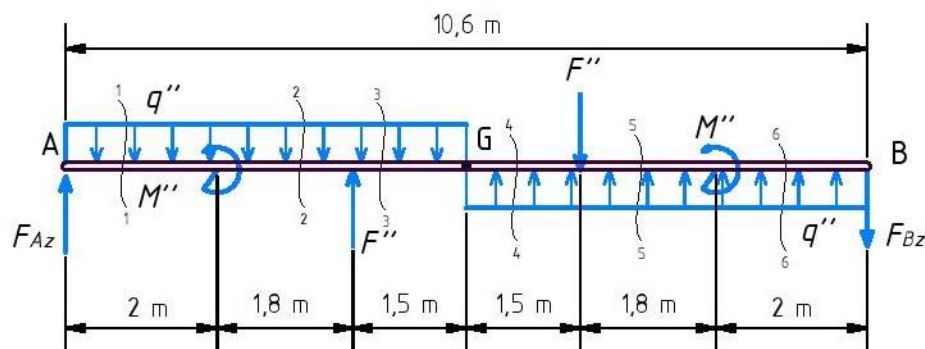
Smjer komponente F_{Gz} je krivo pretpostavljen i u daljnji proračun ulazi se s promijenjenim smjerom i uvrštavanjem pozitivne vrijednosti iste.

Pošto je unutarnja sila N_3 u štapu 3 jednaka nuli, može se zaključiti da su sile u svim štapovima također jednake nuli.

$$S_4 = 0 , \quad S_5 = 0 , \quad S_8 = 0 , \quad S_9 = 0.$$

Izračunavanje unutarnjih sila

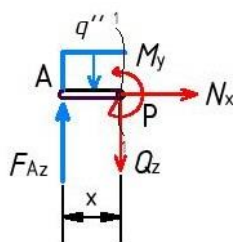
Unutarnje sile u nosaču dobit će se metodom presjeka po neovisnim područjima (slika 2.20).



Slika 2.20 - Presjeci u neovisnim područjima za određivanje unutarnjih sila asimetrično opterećenog nosača

Presjek 1-1:

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



Slika 2.21 - Presjek 1-1 asimetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 0 m do 2 m (slika 2.21) glase:

$$\sum F_x = 0: \quad N = 0,$$

$$\sum F_z = 0: \quad Q_z - F_{Az} + q'' \cdot x = 0,$$

$$\sum M_P = 0: \quad M_y - F_{Az} \cdot x + q'' \cdot x^2 / 2 = 0,$$

odakle se dobije:

$$N = 0,$$

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

$$Q_z(0) = 24,61 \text{ kN}, \quad Q_z(2) = 4,61 \text{ kN},$$

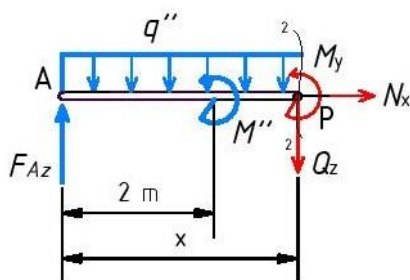
$$M_y = F_{Az} \cdot x - q'' \cdot x^2 / 2,$$

$$M_y(0) = 0,$$

$$M_y(2) = 29,22 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

Presjek 2-2:

$$2 \text{ m} \leq x \leq 3,8 \text{ m}$$



Slika 2.22 - Presjek 2-2 asimetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 2 m do 3,8 m (slika 2.22) glase:

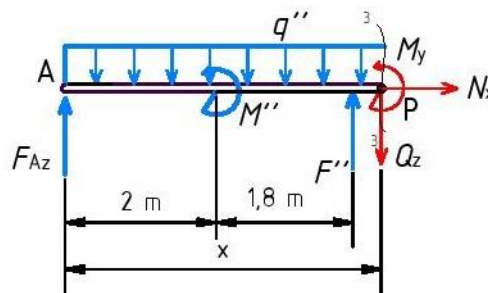
$$\begin{aligned}\sum F_x = 0: & \quad N = 0, \\ \sum F_z = 0: & \quad Q_z - F_{Az} + q'' \cdot x = 0, \\ \sum M_p = 0: & \quad M_y - F_{Az} \cdot x + M'' + q'' \cdot x^2 / 2 = 0,\end{aligned}$$

odakle se dobije:

$$\begin{aligned}N &= 0, \\ Q_z &= F_{Az} - q'' \cdot x, & Q_z(2) &= 4,61 \text{ kN}, & Q_z(3,8) &= -13,39 \text{ kN}, \\ M_y &= F_{Az} \cdot x - M'' - q'' \cdot x^2 / 2, \\ & & M_y(2) &= 16,72 \text{ kN} \cdot \text{m}, & M_y(3,8) &= 8,82 \text{ kN} \cdot \text{m}.\end{aligned}$$

Presjek 3-3:

$$3,8 \text{ m} \leq x \leq 5,3 \text{ m}$$



Slika 2.23 - Presjek 3-3 asimetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 3,8 m do 5,3 m (slika 2.23) glase:

$$\begin{aligned}\sum F_x = 0: & \quad N = 0, \\ \sum F_z = 0: & \quad Q_z - F_{Az} + q'' \cdot x - F'' = 0, \\ \sum M_p = 0: & \quad M_y - F_{Az} \cdot x + q'' \cdot x^2 / 2 + M'' - F'' \cdot (x - 3,8),\end{aligned}$$

odakle se dobije:

$$\begin{aligned}N &= 0, \\ Q_z &= F_{Az} - q'' \cdot x + F'', & Q_z(3,8) &= 1,61 \text{ kN}, & Q_z(5,3) &= -13,39 \text{ kN},\end{aligned}$$

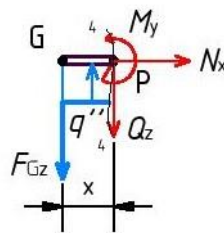
$$M_y = F_{Az} \cdot x - M'' + F'' \cdot (x - 3,8) - q'' \cdot x^2 / 2 ,$$

$$M_y(3,8) = 8,82 \text{ kN} \cdot \text{m} , \quad M_y(5,3) = 0.$$

Presjek 4-4:

$$0 \text{ m} \leq x \leq 1,5 \text{ m}$$

Ojačani linijski nosač presjeći će se u točki G, dodati će se komponente sile u Gerberovom zglobu, što znači samo komponentu F_{Gz} , jer je komponenta F_{Gx} jednaka nuli i promatrati desni dio kao zasebnu cjelinu.



Slika 2.24 - Presjek 4-4 asimetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 0 m do 1,5 m (slika 2.24) glase:

$$\sum F_x = 0 : \quad N = 0 ,$$

$$\sum F_z = 0 : \quad Q_z - q'' \cdot x + F_{Gz} = 0 ,$$

$$\sum M_p = 0 : \quad M_y - q'' \cdot x^2 / 2 + F_{Gz} \cdot x = 0 ,$$

odakle se dobije:

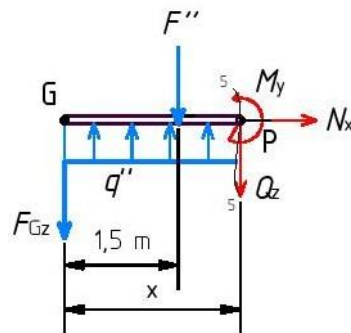
$$N = 0 ,$$

$$Q_z = q'' \cdot x - F_{Gz} , \quad Q_z(0) = -13,39 \text{ kN} , \quad Q_z(1,5) = 1,61 \text{ kN} ,$$

$$M_y = q'' \cdot x^2 / 2 - F_{Gz} \cdot x , \quad M_y(0) = 0 , \quad M_y(1,5) = -8,82 \text{ kN} \cdot \text{m} .$$

Presjek 5-5:

$$1,5 \text{ m} \leq x \leq 3,3 \text{ m}$$



Slika 2.25 - Presjek 5-5 asimetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 1,5 m do 3,3 m (slika 2.25) glase:

$$\sum F_x = 0: \quad N = 0,$$

$$\sum F_z = 0: \quad Q_z + F_{Gz} - q'' \cdot x + F'' = 0,$$

$$\sum M_P = 0: \quad M_y + F_{Gz} \cdot x - q'' \cdot x^2 / 2 + F'' \cdot (x - 1,5) = 0,$$

odakle se dobije:

$$N = 0,$$

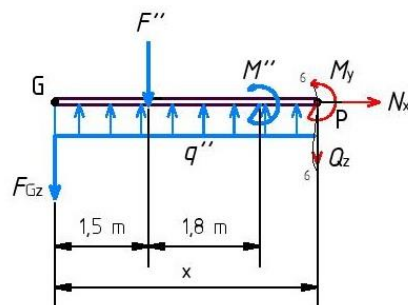
$$Q_z = -F_{Gz} + q'' \cdot x - F'', \quad Q_z(1,5) = -13,39 \text{ kN}, \quad Q_z(3,3) = 4,61 \text{ kN},$$

$$M_y = -F_{Gz} \cdot x + q'' \cdot x^2 / 2 - F'' \cdot (x - 1,5),$$

$$M_y(1,5) = -8,82 \text{ kN} \cdot \text{m}, \quad M_y(3,3) = -16,72 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

Presjek 6-6:

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



Slika 2.26 - Presjek 6-6 asimetrično opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 3,3 m do 5,3 m (slika 2.26) glase:

$$\sum F_x = 0: \quad N = 0 ,$$

$$\sum F_z = 0: \quad Q_z + F_{Gz} - q'' \cdot x + F'' = 0 ,$$

$$\sum M_p = 0: \quad M_y + F_{Gz} \cdot x - q'' \cdot x^2 / 2 + M'' + F'' \cdot (x - 1,5) ,$$

odakle se dobije:

$$N = 0 ,$$

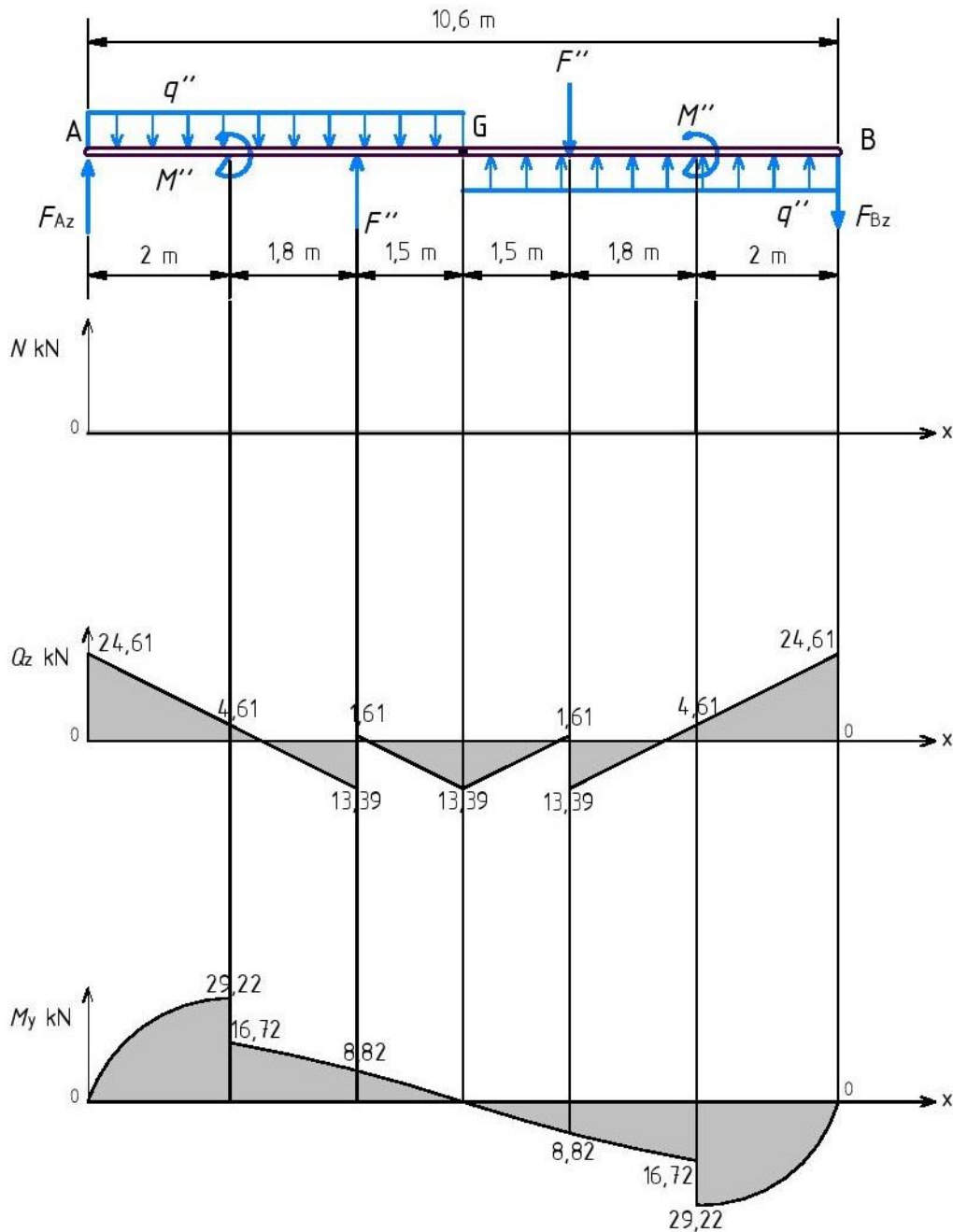
$$Q_z = -F_{Gz} + q'' \cdot x - F'' , \quad Q_z(3,3) = 4,61 \text{ kN} , \quad Q_z(5,3) = 24,61 \text{ kN} ,$$

$$M_y = -F_{Gz} \cdot x - M'' - F'' \cdot (x - 1,5) + q'' \cdot x^2 / 2 ,$$

$$M_y(3,3) = -29,22 \text{ kN} \cdot \text{m} , \quad M_y(5,3) = 0 .$$

Dijagrami unutarnjih sila za asimetrično opterećen ojačani linijski nosač

Unutarnje sile asimetrično opterećenog linijskog nosača s karakterističnim vrijednostima prikazane su na slici 2.27.



Slika 2.27 - Dijagrami unutarnjih sila asimetrično opterećenog nosača

U tablici 2 prikazane su brojčane vrijednosti sila u štapovima asimetrično opterećenog nosača.

Tablica 2 - Sile u štapovima asimetrično opterećenog nosača

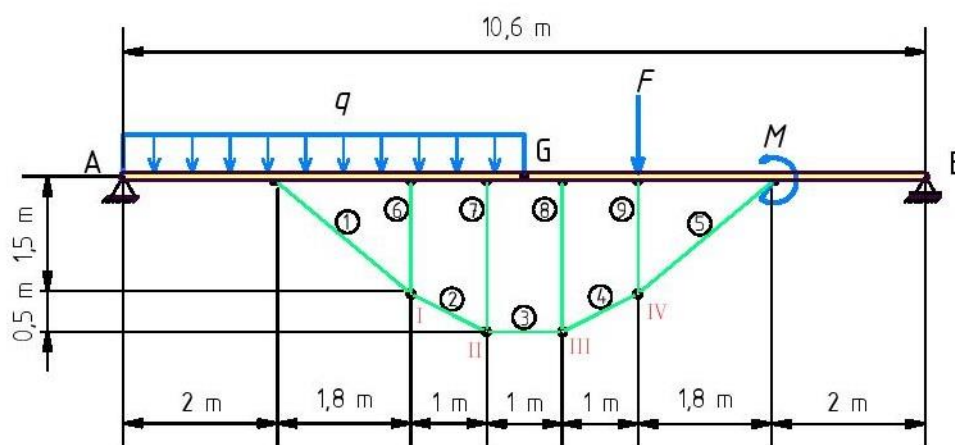
Štap	1	6	7	8	9	5
Sila u štapu N kN	0	0	0	0	0	0

2.3 Zadani linijski nosač

Zadano opterećenje prikazano je na slici 2.28 s vrijednostima:

$$F = 30 \text{ kN}, \quad M = 25 \text{ kN}\cdot\text{m}, \quad q = 20 \text{ kN/m}.$$

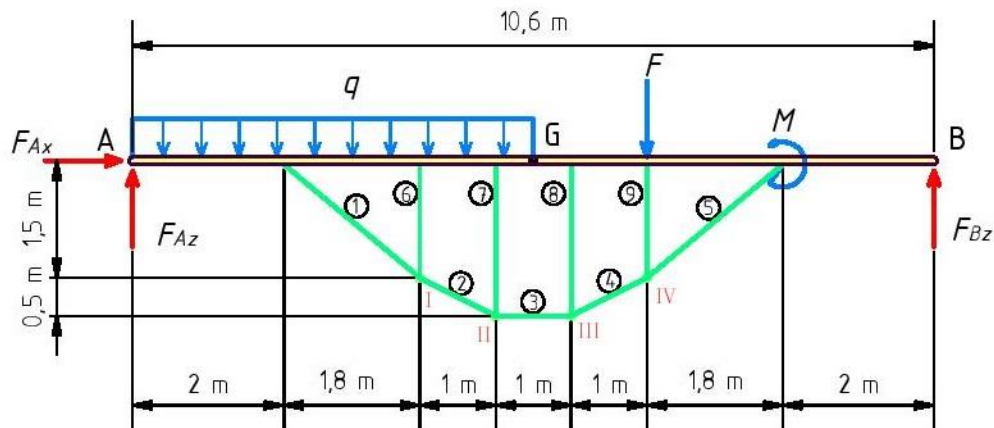
Redoslijed proračuna je također identičan prethodnom; prvo se određuju reakcije oslonaca A i B razmatranjem ravnoteže cijele konstrukcije, zatim se izračunavaju sile u štapovima ojačanja te se na kraju dobivaju unutarnje sile po područjima nosača [2].



Slika 2.28 - Zadano opterećenje

Izračunavanje reakcija u osloncima

Ojačani nosač nakon oslobađanja od veza i zamjenom veza pripadajućim reakcijama prikazan je na slici 2.29.



Slika 2.29 - Zadano opterećenje oslobođeno od veza

Uvjeti ravnoteže glase:

$$\sum F_x = 0 : F_{Ax} = 0,$$

$$\sum F_z = 0 : q \cdot 5,3 + F - F_{Az} - F_{Bz} = 0,$$

$$\sum M_A = 0 : F_{Bz} \cdot 10,6 + M - F \cdot 6,8 - q \cdot 5,3 \cdot 2,65 = 0.$$

Rješavanjem gornjih jednadžbi dobije se:

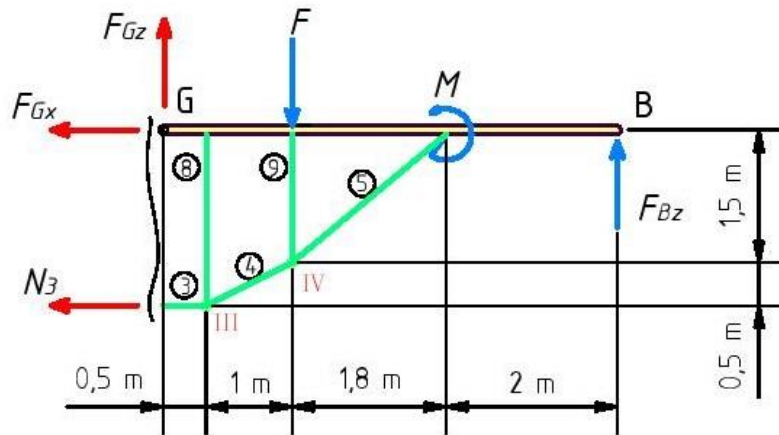
$$F_{Ax} = 0,$$

$$F_{Bz} = \frac{F \cdot 6,8 + q \cdot 5,3 \cdot 2,65 - M}{10,6} = 43,39 \text{ kN},$$

$$F_{Az} = q \cdot 5,3 + F - F_{Bz} = 92,61 \text{ kN}.$$

Izračunavanje sila u štapovima ojačanja

Sila u štapu 3 i komponente sile u zglobu G dobit će se metodom presjeka promatrajući desni dio zadane konstrukcije prikazan na slici 2.30.



Slika 2.30 - Desni dio zadano opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže glase:

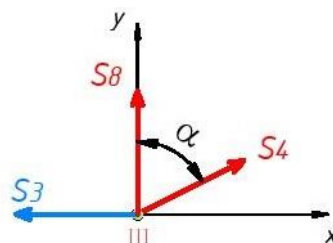
$$\begin{aligned}\sum F_x = 0: & \quad -N_3 - F_{Gx} = 0, \\ \sum F_z = 0: & \quad -F_{Gz} - F_{Bz} + F = 0, \\ \sum M_G = 0: & \quad F_{Bz} \cdot 5,3 - N_3 \cdot 2 - F \cdot 1,5 + M = 0.\end{aligned}$$

Rješavanjem gornjih jednadžbi dobije se:

$$\begin{aligned}F_{Gz} &= F - F_{Bz} = -13,39 \text{ kN}, \\ N_3 &= \frac{F_{Bz} \cdot 5,3 - F \cdot 1,5 - M}{2} = 104,97 \text{ kN}, \\ F_{Gx} &= -N_3 = -104,97 \text{ kN}.\end{aligned}$$

Smjerovi komponenti sila F_{Gx} i F_{Gz} su krivo pretpostavljeni, te se u daljnji proračun ulazi s promijenjenim smjerovima i uvrštavanjem pozitivnih vrijednosti istih.

Sile u štapovima 4 i 8 dobit će se metodom rješavanja čvora III prikazanog na slici 2.31.



Slika 2.31 - Čvor III zadano opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za čvor III glase:

$$\sum F_x = 0: \quad -S_3 + S_4 \cdot \sin \alpha = 0 ,$$

$$\sum F_y = 0: \quad S_8 + S_4 \cdot \cos \alpha = 0 ,$$

gdje je α kut kojeg zatvaraju štapovi S_4 i S_8 , a iznosi:

$$\tan \alpha = \frac{1}{0,5} = 2 , \quad \alpha = 63,43^\circ .$$

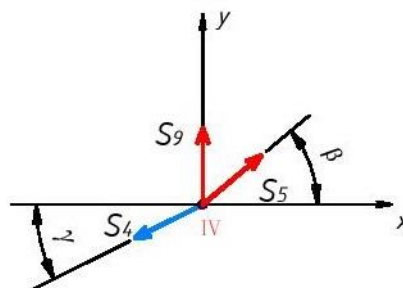
Iz prve jednadžbe je:

$$S_4 = \frac{S_3}{\sin \alpha} = 117,37 \text{ kN} .$$

Iz druge jednadžbe je:

$$S_8 = -S_4 \cdot \cos \alpha = -52,49 \text{ kN} .$$

Sile u štapovima 5 i 9 dobit će se metodom rješavanja čvora IV prikazanog na slici 2.32.



Slika 2.32 - Čvor IV zadano opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za čvor IV glase:

$$\sum F_x = 0: \quad S_5 \cdot \cos \beta - S_4 \cdot \cos \gamma = 0 ,$$

$$\sum F_y = 0: \quad S_9 + S_5 \cdot \sin \beta - S_4 \cdot \sin \gamma = 0 ,$$

gdje su kutovi β i γ dobiveni iz izraza:

$$\tan \beta = \frac{1,5}{1,8} = 0,83 , \quad \beta = 39,8^\circ ,$$

$$\tan \gamma = \frac{0,5}{1} = 0,5, \quad \gamma = 26,57^\circ.$$

Iz prve jednadžbe je

$$S_5 = \frac{S_4 \cdot \cos \gamma}{\cos \beta} = 136,63 \text{ kN.}$$

Iz druge jednadžbe je

$$S_9 = S_4 \cdot \sin \gamma - S_5 \cdot \sin \beta = -34,95 \text{ kN.}$$

Čvor II je identičan čvoru III, pa slijedi:

$$S_7 = S_8 = -52,49 \text{ kN,}$$

$$S_2 = S_4 = 117,37 \text{ kN.}$$

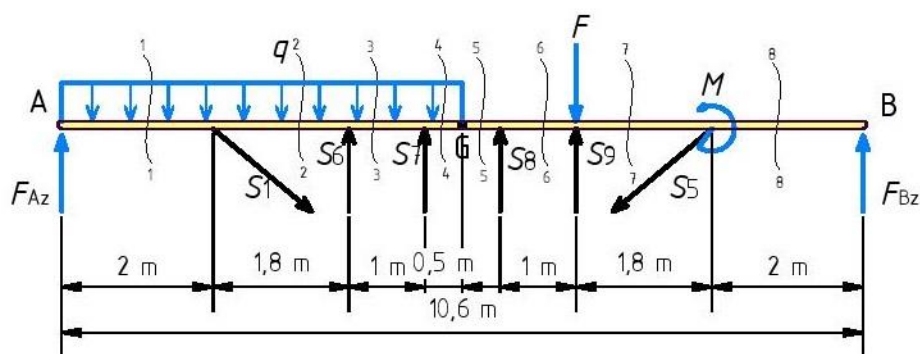
Čvor I je identičan čvoru IV, pa slijedi:

$$S_6 = S_9 = -34,95 \text{ kN,}$$

$$S_1 = S_5 = 136,63 \text{ kN.}$$

Izračunavanje unutarnjih sila

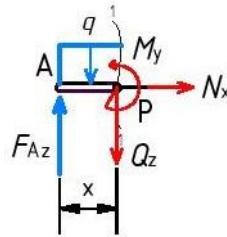
Unutarnje sile u nosaču dobit će se metodom presjeka po neovisnim područjima (slika 2.33). Smjerovi sila u štapovima 6, 7, 8 i 9 promijenjeni su i u daljnjem proračunu uvrštavati će se pozitivne vrijednosti istih.



Slika 2.33 - Presjeci u neovisnim područjima za određivanje unutarnjih sila zadanog opterećenja

Presjek 1-1:

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



Slika 2.34 - Presjek 1-1 zadano opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 0 do 2 m (slika 2.34) glase:

$$\sum F_x = 0: \quad N = 0,$$

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

$$\sum M_P = 0: \quad M_y - F_{Az} \cdot x + q \cdot x / 2 = 0,$$

odakle se dobije:

$$N = 0,$$

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

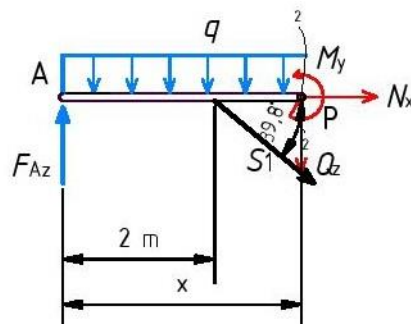
$$M_y = F_{Az} \cdot x - q \cdot x^2 / 2,$$

$$Q_z(0) = 92,61 \text{ kN}, \quad Q_z(2) = 52,61 \text{ kN},$$

$$M_y(0) = 0, \quad M_y(2) = 145,22 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

Presjek 2-2:

$$2 \text{ m} \leq x \leq 3,8 \text{ m}$$



Slika 2.35 - Presjek 2-2 zadano opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 2 m do 3,8 m (slika 2.35) glase:

$$\sum F_x = 0 : \quad N + S_1 \cdot \cos 39,8^\circ = 0 ,$$

$$\sum F_z = 0 : \quad Q_z + S_1 \cdot \sin 39,8^\circ - F_{Az} + q \cdot x = 0 ,$$

$$\sum M_p = 0 : \quad M_y - F_{Az} \cdot x + S_1 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x-2) + q \cdot x^2 / 2 = 0 ,$$

odakle se dobije:

$$N = -S_1 \cdot \cos 39,8^\circ = -104,97 \text{ kN},$$

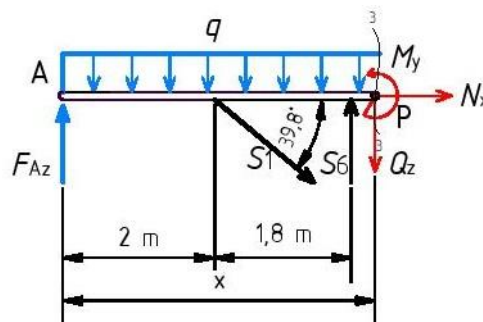
$$Q_z = F_{Az} - q \cdot x - S_1 \cdot \sin 39,8^\circ, \quad Q_z(2) = -34,85 \text{ kN}, \quad Q_z(3,8) = -70,85 \text{ kN},$$

$$M_y = F_{Az} \cdot x - S_1 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x-2) - q \cdot x^2 / 2,$$

$$M_y(2) = 145,22 \text{ kN} \cdot \text{m}, \quad M_y(3,8) = 50,09 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

Presjek 3-3:

$$3,8 \text{ m} \leq x \leq 4,8 \text{ m}$$



Slika 2.36 - Presjek 3-3 zadano opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 3,8 m do 4,8 m (slika 2.36) glase:

$$\sum F_x = 0 : \quad N + S_1 \cdot \cos 39,8^\circ = 0 ,$$

$$\sum F_z = 0 : \quad Q_z + S_1 \cdot \sin 39,8^\circ - F_{Az} + q \cdot x - S_6 = 0 ,$$

$$\sum M_p = 0 : \quad M_y - F_{Az} \cdot x - S_6 \cdot (x-3,8) + S_1 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x-2) + q \cdot x^2 / 2 = 0 ,$$

odakle se dobije:

$$N = -S_1 \cdot \cos 39,8^\circ = -104,97 \text{ kN},$$

$$Q_z = F_{Az} - q \cdot x - S_1 \cdot \sin 39,8^\circ + S_6,$$

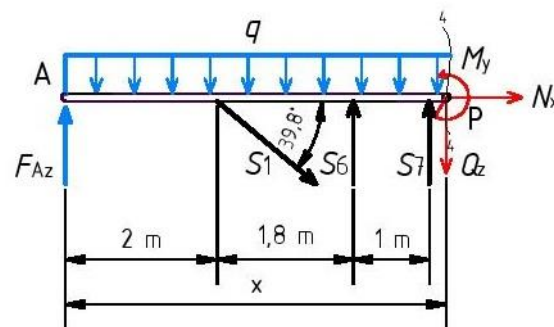
$$Q_z(3,8) = -35,88 \text{ kN}, \quad Q_z(4,8) = -55,88 \text{ kN},$$

$$M_y = F_{Az} \cdot x + S_6 \cdot (x - 3,8) - S_1 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x - 2) - q \cdot x^2 / 2,$$

$$M_y(3,8) = 50,09 \text{ kN} \cdot \text{m}, \quad M_y(4,8) = 4,22 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

Presjek 4-4:

$$4,8 \text{ m} \leq x \leq 5,3 \text{ m}$$



Slika 2.37 - Presjek 4-4 zadano opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 4,8 m do 5,3 m (slika 2.37) glase:

$$\sum F_x = 0: \quad N + S_1 \cdot \cos 39,8^\circ = 0,$$

$$\sum F_z = 0: \quad Q_z + S_1 \cdot \sin 39,8^\circ - F_{Az} + q \cdot x - S_6 - S_7 = 0,$$

$$\sum M_P = 0: \quad M_y - S_6 \cdot (x - 3,8) + S_1 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x - 2) + q \cdot x^2 / 2 - S_7 \cdot (x - 4,8) - F_{Az} \cdot x = 0,$$

odakle se dobije:

$$N = -S_1 \cdot \cos 39,8^\circ = -104,97 \text{ kN},$$

$$Q_z = F_{Az} - q \cdot x - S_1 \cdot \sin 39,8^\circ + S_6 + S_7,$$

$$Q_z(4,8) = -3,39 \text{ kN}, \quad Q_z(5,3) = -13,39 \text{ kN},$$

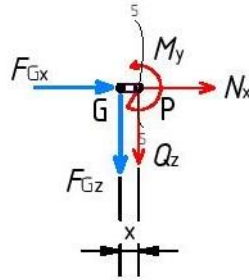
$$M_y = S_7 \cdot (x - 4,8) - S_1 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x - 2) - q \cdot x^2 / 2 + S_6 \cdot (x - 3,8) + F_{Az} \cdot x,$$

$$M_y(4,8) = 4,22 \text{ kN} \cdot \text{m}, \quad M_y(5,3) = 0.$$

Presjek 5-5:

$$0 \text{ m} \leq x \leq 0,5 \text{ m}$$

Ojačani linijski nosač presjeći će se u točki G, dodati će se komponente sila u Gerberovom zglobu F_{Gx} i F_{Gz} i promatrati desni dio kao zasebnu cjelinu.



Slika 2.38 - Presjek 5-5 zadano opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 0 m do 0,5 m (slika 2.38) glase:

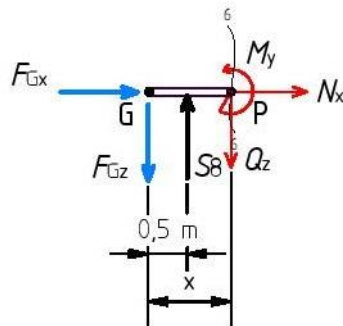
$$\begin{aligned} \sum F_x = 0 : \quad N + F_{Gx} &= 0 , \\ \sum F_z = 0 : \quad Q_z + F_{Gz} &= 0 , \\ \sum M_P = 0 : \quad M_y + F_{Gz} \cdot x &= 0 , \end{aligned}$$

odakle se dobije:

$$\begin{aligned} N &= -F_{Gx} = -104,97 \text{ kN} , \\ Q_z &= -F_{Gz} = -13,39 \text{ kN} , \\ M_y &= -F_{Gz} \cdot x, & M_y(0) &= 0 , & M_y(0,5) &= -6,7 \text{ kN} \cdot \text{m} . \end{aligned}$$

Presjek 6-6:

$$0,5 \text{ m} \leq x \leq 1,5 \text{ m}$$



Slika 2.39 - Presjek 6-6 zadano opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 0,5 m do 1,5 m (slika 2.39) glase:

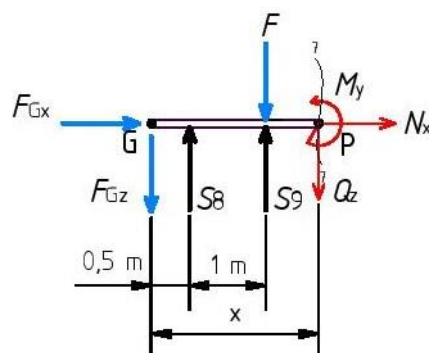
$$\begin{aligned}\sum F_x = 0: & \quad N + F_{Gx} = 0, \\ \sum F_z = 0: & \quad Q_z + F_{Gz} - S_8 = 0, \\ \sum M_P = 0: & \quad M_y + F_{Gz} \cdot x - S_8 \cdot (x - 0,5) = 0,\end{aligned}$$

odakle se dobije:

$$\begin{aligned}N &= -F_{Gx} = -104,97 \text{ kN}, \\ Q_z &= -F_{Gz} + S_8 = 39,1 \text{ kN}, \\ M_y &= S_8 \cdot (x - 0,5) - F_{Gz} \cdot x, \quad M_y(0,5) = -6,7 \text{ kN} \cdot \text{m}, \quad M_y(1,5) = 32,41 \text{ kN} \cdot \text{m}.\end{aligned}$$

Presjek 7-7:

$$1,5 \text{ m} \leq x \leq 3,3 \text{ m}$$



Slika 2.40 - Presjek 7-7 zadano opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 1,5 m do 3,3 m (slika 2.40) glase:

$$\sum F_x = 0: \quad N + F_{Gx} = 0,$$

$$\sum F_z = 0 : \quad Q_z + F_{Gz} - S_8 - S_9 + F = 0 ,$$

$$\sum M_P = 0 : \quad M_y + F_{Gz} \cdot x - S_8 \cdot (x - 0,5) - S_9 \cdot (x - 1,5) + F \cdot (x - 1,5) = 0 ,$$

odakle se dobije:

$$N = -F_{Gx} = -104,97 \text{ kN},$$

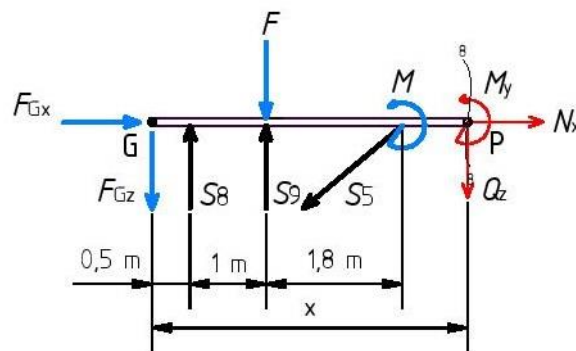
$$Q_z = S_8 + S_9 - F - F_{Gz} = 44,07 \text{ kN},$$

$$M_y = S_8 \cdot (x - 0,5) + S_9 \cdot (x - 1,5) - F \cdot (x - 1,5) - F_{Gz} \cdot x,$$

$$M_y(1,5) = 32,41 \text{ kN} \cdot \text{m} , \quad M_y(3,3) = 111,73 \text{ kN} \cdot \text{m}.$$

Presjek 8-8:

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



Slika 2.41 - Presjek 8-8 zadano opterećenog nosača

Uvjeti ravnoteže za dio nosača od 3,3 m do 5,3 m (slika 2.41) glase:

$$\sum F_x = 0 : \quad N + F_{Gx} - S_5 \cdot \cos 39,8^\circ = 0 ,$$

$$\sum F_z = 0 : \quad Q_z + F_{Gz} - S_8 - S_9 + F + S_5 \cdot \sin 39,8^\circ = 0 ,$$

$$\sum M_P = 0 : \quad M_y + F_{Gz} \cdot x - S_8 \cdot (x - 0,5) - S_9 \cdot (x - 1,5) + S_5 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x - 3,3) + F \cdot (x - 1,5) + M = 0 ,$$

odakle se dobije:

$$N = -F_{Gx} + S_5 \cdot \cos 39,8^\circ = 0,$$

$$Q_z = S_8 + S_9 - F - S_5 \cdot \sin 39,8^\circ - F_{Gz} = -43,39 \text{ kN},$$

$$M_y = S_8 \cdot (x - 0,5) + S_9 \cdot (x - 1,5) - S_5 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x - 3,3) -$$

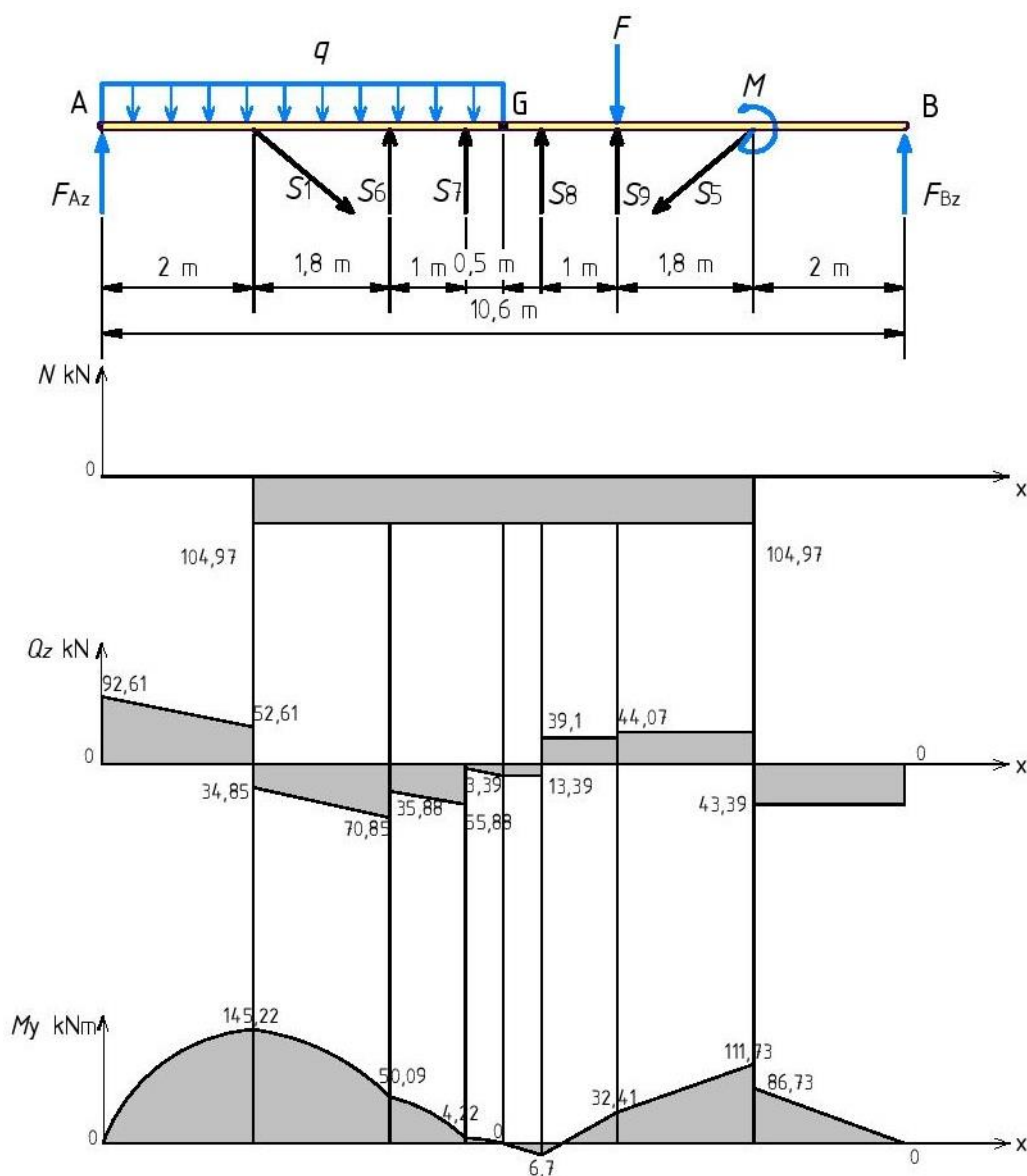
$$-F \cdot (x-1,5) - M - F_{Gz} \cdot x = 0,$$

$$M_y(3,3) = 86,73 \text{ kN} \cdot \text{m},$$

$$M_y(5,3) = 0.$$

Dijagrami unutarnjih sila za zadano opterećen ojačani linijski nosač

Unutarnje sile zadano opterećenog linijskog nosača s karakterističnim vrijednostima prikazane su na slici 2.42.



Slika 2.42 - Dijagrami unutarnjih sila za zadano opterećenje

U tablici 3 prikazane su brojčane vrijednosti sila u štapovima zadano opterećenog nosača.

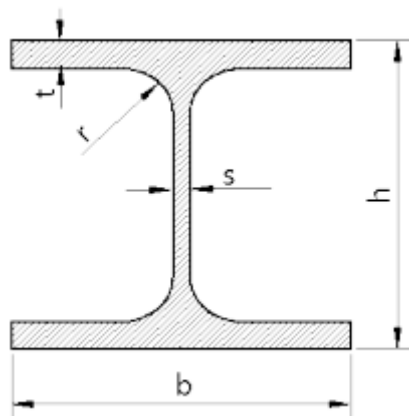
Tablica 3 - Sile u štapovima zadano opterećenog nosača

Štap	1	6	7	8	9	5
Sila u štapu N kN	136,63	-34,95	-52,49	-52,49	-34,95	136,63

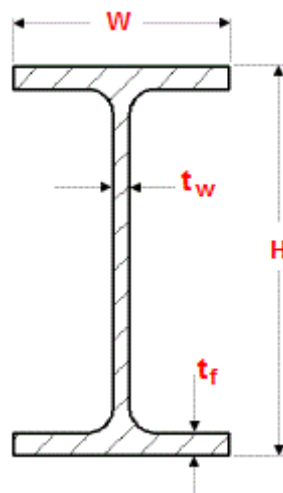
3 Dimenzioniranje linijskog nosača i štapova ojačanja

3.1 Dimenzioniranje linijskog nosača

Za dimenzioniranje linijskog nosača koristit će se profili HE (slika 3.1) i IPE (slika 3.2) iz toplo valjanog čelika klase S235JR ili S355JR. Kod HE profila širina profila (b) je približno jednaka visini (h), dok je kod IPE profila širina (W) znatno manja od visine (H) [3].



Slika 3.1 - HE profil



Slika 3.2 - IPE profil

Uvjet nosivosti je $\sigma_d \leq f_{y,d}$, to jest proračunsko opterećenje mora biti manje od proračunske vrijednosti granice tečenja materijala;

$$\sigma_d = \frac{M_{d,max}}{W_y} \leq f_{y,d} \Rightarrow W_y \geq \frac{M_{d,max}}{f_{y,d}}.$$

Karakteristike materijala klase S235JR: [4]

S – konstrukcijski čelik

235 – granica tečenja (235 MPa)

J – udarna žilavost (27 J)

R – temperatura na kojoj je testirana udarna žilavost (20°)

$f_{y,k} = 24 \text{ kN/cm}^2$ (karakteristična vrijednost granica tečenja),

$f_{y,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 21,8 \text{ kN/cm}^2$ (proračunska vrijednost granice tečenja), gdje je γ_M faktor sigurnosti materijala i iznosi 1,1.

Karakteristike materijala klase S355JR: [4]

S – konstrukcijski čelik

355 – granica tečenja (355MPa)

J – udarna žilavost (27 J)

R – temperatura na kojoj je testirana udarna žilavost (20°)

$f_{y,k} = 36 \text{ kN/cm}^2$ (karakteristična vrijednost granica tečenja),

$f_{y,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 32,7 \text{ kN/cm}^2$ (proračunska vrijednost granice tečenja), gdje je γ_M faktor sigurnosti materijala i iznosi 1,1.

$M_{d,max} = 14522 \text{ kN/cm}^2$ (maksimalni moment savijanja za linijski nosač), te slijedi:

$$W_y \geq \frac{M_{d,max}}{f_{y,d}} \geq \frac{14522}{21,8} \geq 666,15 \text{ cm}^3.$$

Iz tablica navedenih u prilogu 1, 2 i 3 odabiru se profili koji zadovoljavaju traženi W_y :

HE 240 A sa slijedećim karakteristikama;

$$G = 60,3 \text{ kg/m} ,$$

$$I_y = 7763 \text{ cm}^4 ,$$

$$i_y = 10,05 \text{ cm} ,$$

$$W_{el,y} = 675,1 \text{ cm}^3 ,$$

$$A = 76,8 \text{ cm}^2 ,$$

te IPE 330 sa slijedećim karakteristikama;

$$G = 49,1 \text{ kg/m} , \quad H = 330 \text{ mm} ,$$

$$I_y = 11770 \text{ cm}^4 , \quad W = 160 \text{ mm} ,$$

$$i_y = 13,71 \text{ cm} , \quad t_w = 7,5 \text{ mm} ,$$

$$W_{el,y} = 713,1 \text{ cm}^3 , \quad t_t = 7,5 \text{ mm} ,$$

$$A = 62,6 \text{ cm}^2 .$$

Provjera nosivosti za materijal s nižom proračunskom vrijednosti granice tečenja S235JR:

$$\sigma_d = \frac{M_{d,max}}{W_y} \leq f_{y,d} \Rightarrow \frac{14522}{675,1} \leq 21,8 \Rightarrow 21,51 \leq 21,8 , \text{ za HE 240A;} ,$$

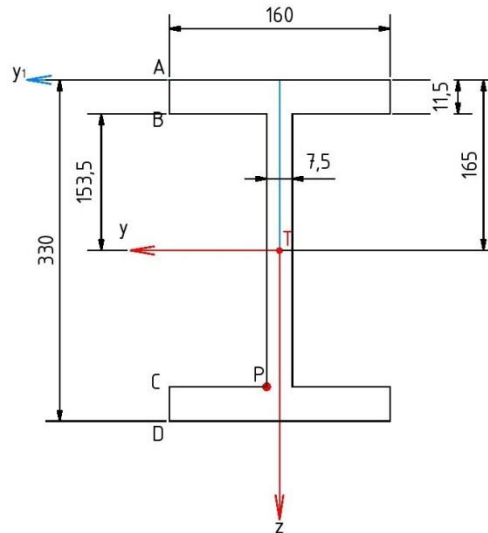
$$\sigma_d = \frac{M_{d,max}}{W_y} \leq f_{y,d} \Rightarrow \frac{14522}{713,1} \leq 21,8 \Rightarrow 20,36 \leq 21,8 , \text{ za IPE 330.}$$

Uvjet je zadovoljen za slabiji materijal, a samim tim i za materijal S355JR s višom proračunskom vrijednosti granice tečenja.

Za linijski nosač, a po principu lake metalne konstrukcije odabire se profil IPE 330 (S235JR).

3.2 Raspodjela normalnih i posmičnih napreznja po visini poprečnog presjeka linijskog nosača

Idealizirani IPE profil prikazan je na slici 3.3.



Slika 3.3 - Idealizirani IPE profil

Uzdužne i poprečne sile, kao i moment savijanja na udaljenosti 2,1 m od lijevog oslonca dobit će se iz izraza:

$$N + S_1 \cdot \cos 39,8^\circ = 0 ,$$

$$Q_z = F_{Az} - q \cdot x - S_1 \cdot \sin 39,8^\circ ,$$

$$M_y = F_{Az} \cdot x - S_1 \cdot \sin 39,8^\circ \cdot (x-2) - q \cdot x^2 / 2 .$$

Uvrštavanjem vrijednosti $x = 2,1$ m u gornje izraze slijedi:

$$N = -104,97 \text{ kN}, \quad Q_z = -36,85 \text{ kN}, \quad M_y = 141,64 \text{ kN} \cdot \text{m} .$$

Normalna napreznja u gornjem i donjem pojasu profila računaju se prema izrazu

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} \cdot z_T .$$

Normalna napreznja u gornjem pojasu:

$$\sigma_g = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} \cdot z_T = \frac{-104,97}{59,82} + \frac{14164}{11770} \cdot -16,5 = -21,61 \text{ kN/cm}^2 ,$$

dok normalna napreznja u donjem pojasu iznose:

$$\sigma_d = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} \cdot z_T = \frac{-104,97}{59,82} + \frac{14164}{11770} \cdot 16,5 = 18,1 \text{ kN/cm}^2.$$

Posmična naprezanja po visini presjeka računaju se prema izrazu $\tau = \frac{|Q_z| \cdot S_y^*}{b \cdot I_y}$, gdje je:

Q_z – poprečna sila u poprečnom presjeku,

S_y^* – statički moment dijela poprečnog presjeka ispod/iznad točke u kojoj računamo naprezanje u odnosu na težišnu os y ,

b – širina poprečnog presjeka u točki u kojoj računamo naprezanje.

$$\tau_A = \tau_D = 0,$$

$$\tau_B = \tau_C = \frac{|Q_z| \cdot S_y^*}{b \cdot I_y},$$

$$S_y^* = 16 \cdot 1,15 \cdot 15,93 = 293,11 \text{ cm}^3,$$

$$\tau_B = \tau_C = \frac{36,85 \cdot 293,11}{16 \cdot 11770} = 0,06 \text{ kN/cm}^2,$$

$$\tau_T = \frac{|Q_z| \cdot S_y^*}{b \cdot I_y},$$

$$S_y^* = 16 \cdot 1,15 \cdot 15,93 + 15,35 \cdot 0,75 \cdot 7,68 = 381,53 \text{ cm}^3,$$

$$\tau_T = \frac{36,85 \cdot 381,53}{0,75 \cdot 11770} = 1,59 \text{ kN/cm}^2,$$

$$\tau_P = \frac{|Q_z| \cdot S_y^*}{b \cdot I_y},$$

$$\tau_{P,g} = \frac{36,85 \cdot 293,11}{0,75 \cdot 11770} = 1,22 \text{ kN/cm}^2.$$

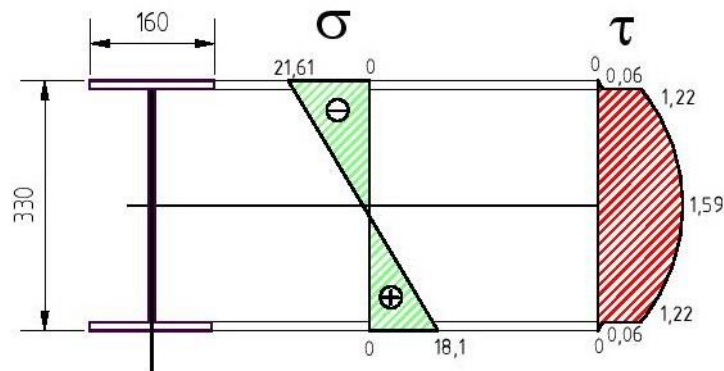
Normalno naprezanje za točku P iznosi:

$$\sigma_P = \frac{-104,97}{59,82} + \frac{14164}{11770} \cdot 15,93 = 17,42 \text{ kN/cm}^2.$$

Ekvivalentno naprezanje za točku P po teoriji najveće distorzijske energije (HMH) iznosi:

$$\sigma_{ekv} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sqrt{17,42^2 + 3 \cdot 1,22^2} = 17,55 \text{ kN/cm}^2.$$

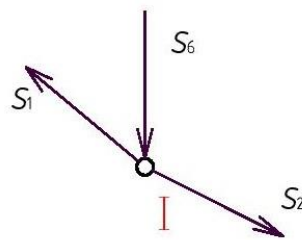
Raspodjela normalnih i posmičnih naprezanja prikazana je na slici 3.4.



Slika 3.4 - Raspodjela normalnih i posmičnih naprezanja po visini poprečnog presjeka

3.3 Dimenzioniranje štapova ojačanja

U razmatranje se uzima čvor I s pripadajućim silama (slika 3.3).



Slika 3.5 - Čvor I zadanog opterećenja

Dimenzioniranje štapa 1 opterećenog vlačnom silom $S_1 = 136,63 \text{ kN}$

Uvjet nosivosti je $\sigma_d \leq f_{y,d}$, to jest proračunsko opterećenje mora biti manje od proračunske vrijednosti granice tečenja materijala;

$$\sigma_d = \frac{N_d}{A} \leq f_{y,d} \Rightarrow A \geq \frac{N_d}{f_{y,d}}$$

$N_d = S_1 = 136,63 \text{ kN}$ (proračunsko opterećenje štapa 1), pa slijedi:

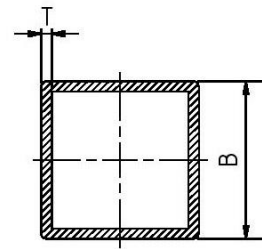
$$A \geq \frac{N_d}{f_{y,d}} \Rightarrow A \geq \frac{136,63}{21,8} \Rightarrow A \geq 6,27 \text{ cm}^2, \text{ za S235JR;}$$

$$A \geq \frac{N_d}{f_{y,d}} \Rightarrow A \geq \frac{136,63}{32,7} \Rightarrow A \geq 4,18 \text{ cm}^2, \text{ za S355JR.}$$

Iz tablica navedenih u prilogu 4 i 5 odabiru se kvadratni profili čija površina poprečnog presjeka A zadovoljava uvjet pa slijedi:

- za S235JR odabire se kvadratni profil sljedećih karakteristika;

$$\begin{aligned} B &= 60 \text{ mm}, & I &= I_y = I_z = 35,1 \text{ cm}^4, \\ T &= 3 \text{ mm}, & W &= W_y = W_z = 11,7 \text{ cm}^3, \\ A &= 6,61 \text{ cm}^2, & i &= i_y = i_z = 2,31 \text{ cm}, \\ m &= 5,19 \text{ kg/m}. \end{aligned}$$



- za S355JR odabire se kvadratni profil sljedećih karakteristika;

$$\begin{aligned} B &= 40 \text{ mm}, & I &= I_y = I_z = 9,32 \text{ cm}^4, \\ T &= 3 \text{ mm}, & W &= W_y = W_z = 4,66 \text{ cm}^3, \\ A &= 4,21 \text{ cm}^2, & i &= i_y = i_z = 1,43 \text{ cm}, \\ m &= 3,30 \text{ kg/m}. \end{aligned}$$

Po principu lake metalne konstrukcije odabire se kvadratni profil 40 x 40 x 3 (S355JR).

Dimenzioniranje štapa 2 opterećenog vlačnom silom $S_2 = 117,37 \text{ kN}$

Uvjet nosivosti je $\sigma_d \leq f_{y,d}$, to jest proračunsko opterećenje mora biti manje od proračunske vrijednosti granice tečenja materijala;

$$\sigma_d = \frac{N_d}{A} \leq f_{y,d} \Rightarrow A \geq \frac{N_d}{f_{y,d}}.$$

$N_d = S_2 = 117,37 \text{ kN}$ (proračunsko opterećenje štapa 2), pa slijedi:

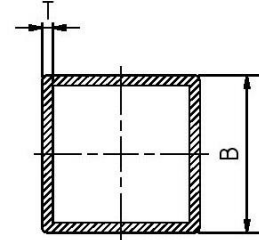
$$A \geq \frac{N_d}{f_{y,d}} \Rightarrow A \geq \frac{117,37}{21,8} \Rightarrow A \geq 5,38 \text{ cm}^2, \text{ za S235JR;}$$

$$A \geq \frac{N_d}{f_{y,d}} \Rightarrow A \geq \frac{117,37}{32,7} \Rightarrow A \geq 3,59 \text{ cm}^2, \text{ za S355JR.}$$

Iz tablica navedenih u prilogu 4 i 5 odabiru se kvadratni profili čija površina poprečnog presjeka A zadovoljava uvjet pa slijedi:

- za S235JR odabire se kvadratni profil sljedećih karakteristika;

$$\begin{aligned}
 B &= 50 \text{ mm}, & I &= I_y = I_z = 19,5 \text{ cm}^4, \\
 T &= 3 \text{ mm}, & W &= W_y = W_z = 7,79 \text{ cm}^3, \\
 A &= 5,41 \text{ cm}^2, & i &= i_y = i_z = 1,90 \text{ cm}, \\
 m &= 4,25 \text{ kg/m}.
 \end{aligned}$$



- za S355JR odabire se kvadratni profil sljedećih karakteristika;

$$\begin{aligned}
 B &= 50 \text{ mm}, & I &= I_y = I_z = 14,1 \text{ cm}^4, \\
 T &= 2 \text{ mm}, & W &= W_y = W_z = 5,56 \text{ cm}^3, \\
 A &= 3,74 \text{ cm}^2, & i &= i_y = i_z = 1,95 \text{ cm}, \\
 m &= 2,93 \text{ kg/m}.
 \end{aligned}$$

Po principu lake metalne konstrukcije odabire se kvadratni profil 50 x 50 x 2 (S355JR).

Dimenzioniranje štapa 6 opterećenog tlačnom silom $S_6 = 34,95 \text{ kN}$

Uvjet nosivosti je $\sigma_d \leq f_{y,d} \cdot \chi$, to jest proračunsko opterećenje mora biti manje od proračunske vrijednosti granice tečenja materijala pomnožene s koeficijentom smanjenja nosivosti χ koji se kreće u granicama 0,6 – 0,7. U svrhu proračuna preliminarno se usvaja $\chi = 0,6$.

$$\sigma_d = \frac{N_d}{A} \leq f_{y,d} \cdot \chi \Rightarrow A \geq \frac{N_d}{f_{y,d} \cdot \chi}$$

$N_d = S_6 = 34,95 \text{ kN}$ (proračunsko opterećenje štapa 6), pa slijedi:

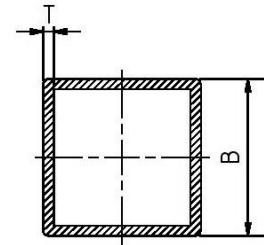
$$A \geq \frac{N_d}{f_{y,d} \cdot \chi} \Rightarrow A \geq \frac{34,95}{21,8 \cdot 0,6} \Rightarrow A \geq 2,67 \text{ cm}^2, \text{ za S235JR};$$

$$A \geq \frac{N_d}{f_{y,d} \cdot \chi} \Rightarrow A \geq \frac{34,95}{32,7 \cdot 0,6} \Rightarrow A \geq 1,78 \text{ cm}^2, \text{ za S355JR}.$$

Iz tablica navedenih u prilogu 4 i 5 odabiru se kvadratni profili čija površina poprečnog presjeka A zadovoljava uvjet pa slijedi:

- za S235JR odabire se kvadratni profil sljedećih karakteristika;

$$\begin{aligned} B &= 40 \text{ mm}, & I &= I_y = I_z = 6,94 \text{ cm}^4, \\ T &= 2 \text{ mm}, & W &= W_y = W_z = 3,47 \text{ cm}^3, \\ A &= 2,94 \text{ cm}^2, & i &= i_y = i_z = 1,54 \text{ cm}, \\ m &= 2.31 \text{ kg/m}. \end{aligned}$$

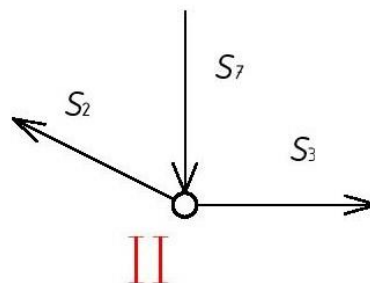


- za S355JR odabire se kvadratni profil sljedećih karakteristika;

$$\begin{aligned} B &= 30 \text{ mm}, & I &= I_y = I_z = 2,72 \text{ cm}^4, \\ T &= 2 \text{ mm}, & W &= W_y = W_z = 1,81 \text{ cm}^3, \\ A &= 2,14 \text{ cm}^2, & i &= i_y = i_z = 1,13 \text{ cm}, \\ m &= 1,68 \text{ kg/m}. \end{aligned}$$

Po principu lake metalne konstrukcije odabire se kvadratni profil 30 x 30 x 2 (S355JR).

U razmatranje se uzima čvor II s pripadajućim silama (slika 3.6).



Slika 3.6 - Čvor II zadanog opterećenja

Dimenzioniranje štapa 3 opterećenog vlačnom silom $S_3 = 104,97 \text{ kN}$

Uvjet nosivosti je $\sigma_d \leq f_{y,d}$, to jest proračunsko opterećenje mora biti manje od proračunske vrijednosti granice tečenja materijala;

$$\sigma_d = \frac{N_d}{A} \leq f_{y,d} \Rightarrow A \geq \frac{N_d}{f_{y,d}}.$$

$N_d = S_3 = 104,98 \text{ kN}$ (proračunsko opterećenje štapa 3), pa slijedi:

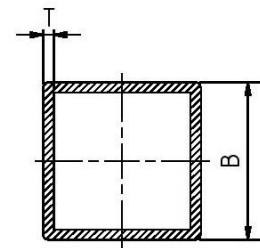
$$A \geq \frac{N_d}{f_{y,d}} \Rightarrow A \geq \frac{104,98}{21,8} \Rightarrow A \geq 4,82 \text{ cm}^2, \text{ za S235JR};$$

$$A \geq \frac{N_d}{f_{y,d}} \Rightarrow A \geq \frac{104,98}{32,7} \Rightarrow A \geq 3,21 \text{ cm}^2, \text{ za S355JR}.$$

Iz tablica navedenih u prilogu 4 i 5 odabiru se kvadratni profili čija površina poprečnog presjeka A zadovoljava uvjet pa slijedi:

- za S235JR odabire se kvadratni profil sljedećih karakteristika;

$$\begin{aligned} B &= 50 \text{ mm}, & I &= I_y = I_z = 19,5 \text{ cm}^4, \\ T &= 3 \text{ mm}, & W &= W_y = W_z = 7,79 \text{ cm}^3, \\ A &= 5,41 \text{ cm}^2, & i &= i_y = i_z = 1,90 \text{ cm}, \\ m &= 4,25 \text{ kg/m}. \end{aligned}$$



- za S355JR odabire se kvadratni profil sljedećih karakteristika;

$$\begin{aligned} B &= 50 \text{ mm}, & I &= I_y = I_z = 14,1 \text{ cm}^4, \\ T &= 2 \text{ mm}, & W &= W_y = W_z = 5,56 \text{ cm}^3, \\ A &= 3,74 \text{ cm}^2, & i &= i_y = i_z = 1,95 \text{ cm}, \\ m &= 2,93 \text{ kg/m}. \end{aligned}$$

Po principu lake metalne konstrukcije odabire se kvadratni profil 50 x 50 x 2 (S355JR).

Dimenzioniranje štapa 7 opterećenog tlačnom silom $S_7 = 52,49 \text{ kN}$

Uvjet nosivosti je $\sigma_d \leq f_{y,d} \cdot \chi$, to jest proračunsko opterećenje mora biti manje od proračunske vrijednosti granice tečenja materijala pomnožene s koeficijentom smanjenja nosivosti χ koji se kreće u granicama 0,6 – 0,7. U svrhu proračuna preliminarno se usvaja $\chi = 0,6$.

$$\sigma_d = \frac{N_d}{A} \leq f_{y,d} \cdot \chi \Rightarrow A \geq \frac{N_d}{f_{y,d} \cdot \chi}$$

$N_d = S_7 = 52,49 \text{ kN}$ (proračunsko opterećenje štapa 7), pa slijedi:

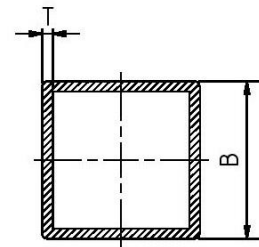
$$A \geq \frac{N_d}{f_{y,d} \cdot \chi} \Rightarrow A \geq \frac{52,49}{21,8 \cdot 0,6} \Rightarrow A \geq 4,01 \text{ cm}^2, \text{ za S235JR};$$

$$A \geq \frac{N_d}{f_{y,d} \cdot \chi} \Rightarrow A \geq \frac{52,49}{32,7 \cdot 0,6} \Rightarrow A \geq 2,68 \text{ cm}^2, \text{ za S355JR}.$$

Iz tablica navedenih u prilogu 4 i 5 odabiru se kvadratni profili čija površina poprečnog presjeka A zadovoljava uvjet pa slijedi:

- za S235JR odabire se kvadratni profil sljedećih karakteristika;

$$\begin{aligned} B &= 40 \text{ mm}, & I &= I_y = I_z = 9,32 \text{ cm}^4, \\ T &= 3 \text{ mm}, & W &= W_y = W_z = 4,66 \text{ cm}^3, \\ A &= 4,21 \text{ cm}^2, & i &= i_y = i_z = 1,49 \text{ cm}, \\ m &= 3,30 \text{ kg/m}. \end{aligned}$$



- za S355JR odabire se kvadratni profil sljedećih karakteristika;

$$\begin{aligned} B &= 40 \text{ mm}, & I &= I_y = I_z = 6,94 \text{ cm}^4, \\ T &= 2 \text{ mm}, & W &= W_y = W_z = 3,47 \text{ cm}^3, \\ A &= 2,94 \text{ cm}^2, & i &= i_y = i_z = 1,54 \text{ cm}, \\ m &= 2,31 \text{ kg/m}. \end{aligned}$$

Po principu lake metalne konstrukcije odabire se kvadratni profil 40 x 40 x 2 (S355JR).

4 Provjera stabilnosti tlačno opterećenih štapova ojačanja

U ovom poglavlju izvršit će se provjera stabilnosti tlačno opterećenih štapova 6, 7, 8 i 9. Štapovi 6 i 9 opterećeni su istom tlačnom silom koja iznosi 34,95 kN dok su štapovi 7 i 8 također opterećeni jednakim iznosom tlačne sile u iznosu od 52,49 kN.

4.1 Provjera stabilnosti štapa 6 opterećenog tlačnom silom S_6

Prvo se provjerava relativna vitkost ($\bar{\lambda}$) iz izraza $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a}$, gdje je λ vitkost po Euler-u, a λ_a

vitkost na granici tečenja. Izraz za vitkost po Euler-u je $\lambda = \frac{l_0}{i}$, dok izraz za vitkost na granici

tečenja glasi $\lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y,k}}}$. Oznaka l_0 je duljina izvijanja, koja je u ovom slučaju jednaka

duljini l štapa, jer je isti zglobno vezan na oba kraja. Nakon toga se iz tablice u prilogu 6 nalazi koeficijent smanjenja nosivosti (χ) i uvrštava u izraz za provjeru sigurnosti koji glasi

$$A \cdot f_{y,d} \cdot \chi \geq N_d.$$

Provjerava se odabrani kvadratni profil 30 x 30 x 2 iz materijala S355JR. Duljina štapa 6 iznosi 1,5 m.

Vrijednosti potrebne za proračun su:

$$\begin{aligned} B &= 30 \text{ mm}, & I &= I_y = I_z = 2,72 \text{ cm}^4, \\ T &= 2 \text{ mm}, & W &= W_y = W_z = 1,81 \text{ cm}^3, \\ A &= 2,14 \text{ cm}^2, & i &= i_y = i_z = 1,13 \text{ cm}, \\ m &= 1,68 \text{ kg/m}, & l &= 150 \text{ cm}. \end{aligned}$$

$$\lambda = \frac{l}{i} = \frac{150}{1,13} = 132,74,$$

$$\lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y,k}}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^3}{360}} = 75,88,$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a} = \frac{132,74}{75,88} = 1,75.$$

Iz tablice (prilog 6) slijedi $\chi = 0,25$.

Provjera sigurnosti

$$A \cdot f_{y,d} \cdot \chi \geq N_d \Rightarrow 2,14 \cdot 32,7 \cdot 0,25 \geq 34,95 \Rightarrow 17,49 < 34,95.$$

Uvjet sigurnosti nije zadovoljen pa se odabire drugi profil s većom površinom poprečnog presjeka, a to je 40 x 40 x 3 sa slijedećim vrijednostima:

$$\begin{aligned} B &= 40 \text{ mm}, & I &= I_y = I_z = 9,32 \text{ cm}^4, \\ T &= 3 \text{ mm}, & W &= W_y = W_z = 4,66 \text{ cm}^3, \\ A &= 4,21 \text{ cm}^2, & i &= i_y = i_z = 1,49 \text{ cm}, \\ m &= 3,30 \text{ kg/m}, & l &= 150 \text{ cm}, \end{aligned}$$

te se za istog provjerava sigurnost pa proizlazi:

$$\lambda = \frac{l}{i} = \frac{150}{1,49} = 100,67,$$

$$\lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y,k}}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^3}{360}} = 75,88,$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a} = \frac{100,67}{75,88} = 1,33.$$

Iz tablice (prilog 6) slijedi $\chi = 0,38$.

Provjera sigurnosti

$$A \cdot f_{y,d} \cdot \chi \geq N_d \Rightarrow 4,21 \cdot 32,7 \cdot 0,38 \geq 34,95 \Rightarrow 52,31 \geq 34,95.$$

Uvjet sigurnosti je zadovoljen.

Usvaja se profil 40 x 40 x 3 (S355JR).

4.2 Provjera stabilnosti štapa 7 opterećenog tlačnom silom S_7

Provjerava se odabrani kvadratni profil 40 x 40 x 2 iz materijala S355JR. Duljina štapa 7 iznosi 2 m.

Vrijednosti potrebne za proračun su:

$$\begin{aligned} B &= 40 \text{ mm}, & I &= I_y = I_z = 6,94 \text{ cm}^4, \\ T &= 2 \text{ mm}, & W &= W_y = W_z = 3,47 \text{ cm}^3, \\ A &= 2,94 \text{ cm}^2, & i &= i_y = i_z = 1,54 \text{ cm}, \\ m &= 2.31 \text{ kg/m}, & l &= 200 \text{ cm}. \end{aligned}$$

$$\lambda = \frac{l}{i} = \frac{200}{1,54} = 129,87,$$

$$\lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y,k}}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^3}{360}} = 75,88,$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a} = \frac{129,87}{75,88} = 1,71.$$

Iz tablice (prilog 6) slijedi $\chi = 0,25$.

Provjera sigurnosti

$$A \cdot f_{y,d} \cdot \chi \geq N_d \Rightarrow 2,94 \cdot 32,7 \cdot 0,25 \geq 34,95 \Rightarrow 24,03 < 34,95.$$

Uvjet sigurnosti nije zadovoljen pa se odabire drugi profil s većom površinom poprečnog presjeka, a to je 40 x 40 x 3 sa slijedećim vrijednostima:

$$\begin{aligned} B &= 40 \text{ mm}, & I &= I_y = I_z = 9,32 \text{ cm}^4, \\ T &= 3 \text{ mm}, & W &= W_y = W_z = 4,66 \text{ cm}^3, \\ A &= 4,21 \text{ cm}^2, & i &= i_y = i_z = 1,49 \text{ cm}, \\ m &= 3,30 \text{ kg/m}, & l &= 200 \text{ cm}, \end{aligned}$$

te se za istog provjerava sigurnost pa proizlazi:

$$\lambda = \frac{l}{i} = \frac{200}{1,49} = 134,23,$$

$$\lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y,k}}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^3}{360}} = 75,88,$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a} = \frac{134,23}{75,88} = 1,77.$$

Iz tablice (prilog 6) slijedi $\chi = 0,24$.

Provjera sigurnosti

$$A \cdot f_{y,d} \cdot \chi \geq N_d \Rightarrow 4,21 \cdot 32,7 \cdot 0,24 \geq 34,95 \Rightarrow 33,04 < 34,95.$$

Uvjet sigurnosti nije zadovoljen pa se postupak ponavlja to jest odabire se profil 50 x 50 x 3 sa slijedećim vrijednostima:

$$\begin{aligned} B &= 50 \text{ mm}, & I &= I_y = I_z = 19,5 \text{ cm}^4, \\ T &= 3 \text{ mm}, & W &= W_y = W_z = 7,79 \text{ cm}^3, \\ A &= 5,41 \text{ cm}^2, & i &= i_y = i_z = 1,90 \text{ cm}, \\ m &= 4,25 \text{ kg/m}, & l &= 200 \text{ cm}, \end{aligned}$$

te se i za ovaj profil provjerava sigurnost iz čega proizlazi:

$$\lambda = \frac{l}{i} = \frac{200}{1,90} = 105,26,$$

$$\lambda_a = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y,k}}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{210 \cdot 10^3}{360}} = 75,88,$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_a} = \frac{105,26}{75,88} = 1,39.$$

Iz tablice (prilog 6) slijedi $\chi = 0,35$.

Provjera sigurnosti

$$A \cdot f_{y,d} \cdot \chi \geq N_d \Rightarrow 5,41 \cdot 32,7 \cdot 0,35 \geq 34,95 \Rightarrow 61,91 \geq 34,95.$$

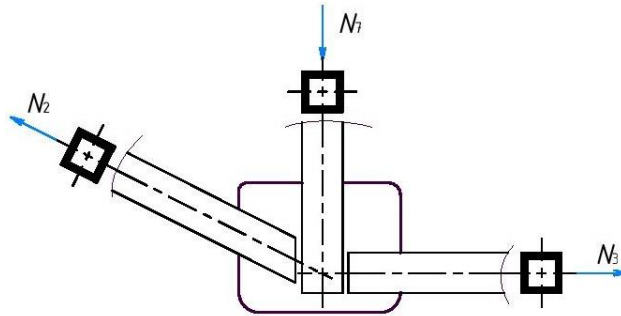
Uvjet sigurnosti je zadovoljen.

Usvaja se profil 50 x 50 x 3 (S355JR).

Iz proračuna slijedi da minimalne dimenzije profila moraju biti 50 x 50 x 3 iz materijala S355JR, te će se za sve štapove ojačanja uzeti isti. S ekonomskog aspekta cijena će neznatno porasti, ali s aspekta montaže i estetike je odabir istog profila znatno bolji.

5 Oblikovanje i dimenzioniranje čvora

Za oblikovanje i dimenzioniranje odabran je čvor II opterećen silama N_2 , N_3 i N_7 prikazan na slici 5.1.



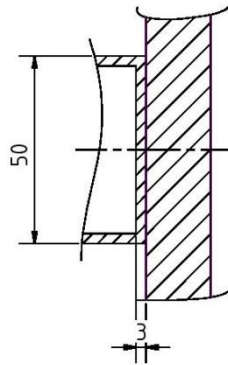
Slika 5.1 - Čvorni spoj u čvoru II

Vrijednosti sila su:

$$N_2 = 117,37 \text{ kN}, \quad N_3 = 104,98 \text{ kN}, \quad N_7 = 52,49 \text{ kN}.$$

Provjera nosivosti kvadratnog profila 50 x 50 x 3 (S355JR) opterećenog silom N_2 bez rupa

Provjerava se dio kvadratnog profila koji je u dodiru s čvornim limom, a što je prikazano na slici 5.2.

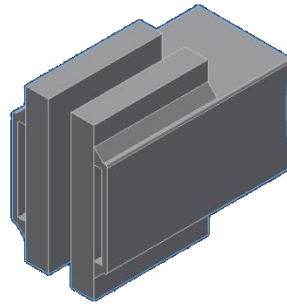


Slika 5.2 - Spoj kvadratnog profila i čvornog lima

Uvjet nosivosti glasi $\sigma_d = \frac{N_d}{A} \leq f_{y,d}$ iz čega proizlazi:

$$\sigma_d = \frac{N_d}{A} \leq f_{y,d} \Rightarrow \frac{117,37}{5 \cdot 0,3} \leq 32,7 \Rightarrow 78,25 > 32,7.$$

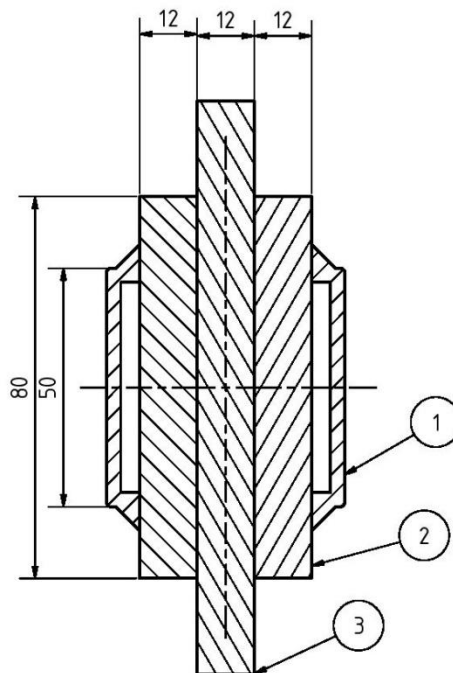
Nosivost profila ne zadovoljava pa se nastali problem rješava pomoću čelične trake iz materijala S355JR zavarene na urezani kvadratni profil (slika 5.3).



Slika 5.3 - Urezani kvadratni profil sa zavarenim čeličnim trakama

Provjera nosivosti čelične trake opterećene silom N_2 bez rupa

Provjerava se čelična traka koja je zavarena na urezani kvadratni profil dimenzija prikazanih na slici 5.4.



Slika 5.4 - Spoj čvornog lima(3), čelične trake(2) i kvadratnog profila(1)

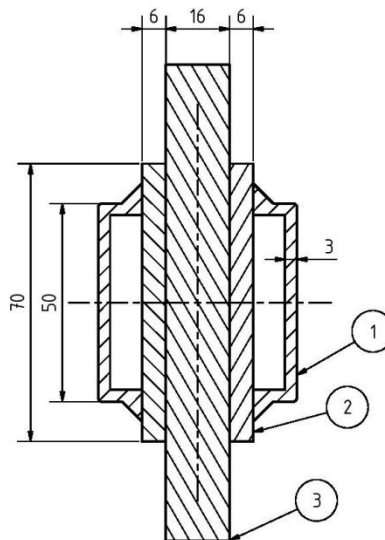
Uvjet nosivosti glasi $\sigma_d = \frac{N_d}{A} \leq f_{y,d}$ iz čega proizlazi:

$$\sigma_d = \frac{N_d}{A} \leq f_{y,d} \Rightarrow \frac{117,37}{8 \cdot 1,2 \cdot 2} \leq 32,7 \Rightarrow 6,11 \leq 32,7.$$

Čelična traka je predimenzionirana pa se odabire traka dimenzija 70 x 6 x l težine 3,3 kg/m, te uvrštavanjem površine poprečnog presjeka čelične trake u uvjet nosivosti slijedi:

$$\sigma_d = \frac{N_d}{A} \leq f_{y,d} \Rightarrow \frac{117,37}{7 \cdot 0,6 \cdot 2} \leq 32,7 \Rightarrow 13,97 \leq 32,7.$$

Uvjet nosivosti je zadovoljen i usvaja se čelična traka dimenzija 70 x 6 x l . Iz prethodno izračunatih geometrijskih karakteristika kvadratne cijevi i čelične trake usvaja se debljina čvornog lima 16 mm (slika 5.5).



Slika 5.5 - Redizajnirani spoj čvornog lima(3), čelične trake(2) i kvadratnog profila(1)

Izbor promjera vijka

Izračunava se preliminarni promjer vijka prema izrazu:

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

gdje je t_{\min} manja vrijednost između debljine čvornog lima i debljine čelične trake. Budući da debljina čvornog lima iznosi 16 mm u proračun se ulazi s vrijednošću $t_{\min} = 6 \text{ mm}$, pa slijedi:

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

Usvaja se prvi manji standardni promjer vijka, a to je M14 klase čvrstoće 5.6 (obični vijci).

Usvojeno:

Vijak **M14**; k.č. 5.6,

Matica **M14**; k.č. 5,

Podloška 14.

Nosivost vijka

Računa se iz izraza $V_{R,v} = i \cdot n \cdot \alpha_a \cdot A_v \cdot \frac{f_{v,uk}}{\gamma_M}$ kN, gdje je:

n – broj vijaka,

i – broj smičnih ravnina,

α_a – koeficijent koji ovisi o klasi čvrstoće vijka, a za obične vijke isti iznosi 0,6,

A_v – površina poprečnog presjeka vijka,

$f_{v,uk}$ – čvrstoća vijka,

γ_M – koeficijent sigurnosti.

Nosivost jednog vijka prema tome iznosi:

$$V_{R,v} = 2 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 1,54 \cdot \frac{50}{1,1} = 84 \text{ kN} .$$

Broj potrebnih vijaka za štap 2 dobije se iz izraza $n \geq \frac{N_d}{V_{R,v}} = \frac{117,37}{84} \geq 1,39$.

Usvaja se: $n = 2$.

Broj potrebnih vijaka za štap 3 dobije se iz izraza $n \geq \frac{N_d}{V_{R,v}} = \frac{104,98}{84} \geq 1,25$.

Usvaja se: $n = 2$.

Broj potrebnih vijaka za štap 7 dobije se iz izraza $n \geq \frac{N_d}{V_{R,v}} = \frac{52,49}{84} \geq 0,62$.

Usvaja se: $n = 1$.

Udaljenost vijka od ruba čelične trake: $e_1 = 2 \cdot d_r = 2 \cdot 16 = 32 \text{ mm}$. Usvaja se $e_1 = 35 \text{ mm}$.

Udaljenost između vijaka: $e = 2,5 \cdot d_r = 2,5 \cdot 16 = 40 \text{ mm}$. Usvaja se $e = 45 \text{ mm}$.

Nosivost čelične trake za $n = 2$ vijka

$$V_{R,v} = 2 \cdot 2 \cdot 0,6 \cdot 1,54 \cdot \frac{50}{1,1} = 168 \text{ kN} \geq 117,37 \text{ kN} \quad \text{Uvjet zadovoljen.}$$

Nosivost omotača rupe za $n = 2$ vijka

Nosivost omotača rupe računa se iz izraza $V_{R,r} = A_{\min} \cdot \alpha_r \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M}$ kN, gdje je:

α_r – geometrijska karakteristika koja ovisi o raspodjeli opterećenja u okolini rupe i kreće se u granicama 1–3,

A_{\min} – minimalna dodirna površina,

$f_{y,k}$ – karakteristična granica tečenja materijala čelične trake,

γ_M – koeficijent sigurnosti.

$$\alpha_r = f(e, e_1)$$

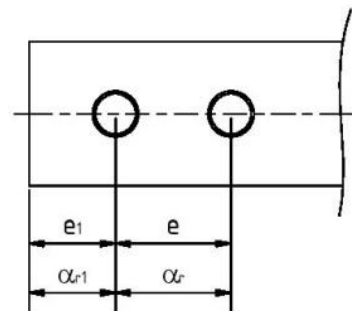
$$\alpha_{r,1} = 1,1 \cdot \frac{e_1}{d_r} - 0,3 = 1,1 \cdot \frac{35}{16} - 0,3 = 2,11,$$

$$\alpha_r = 1,08 \cdot \frac{e}{d_r} - 0,77 = 1,08 \cdot \frac{45}{16} - 0,77 = 2,27,$$

$$A_{\min} = t_{\min} \cdot d_v,$$

$$t_{\min} = \min(2 \cdot t_1, t_2) = \min(12, 16) = 12 \text{ mm},$$

$$V_{R,r} = A_{\min} \cdot \alpha_r \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 1,2 \cdot 1,4 \cdot (2,11 + 2,27) \cdot \frac{36}{1,1} = 240,62 \text{ kN},$$



$$V_{R,r} = 240,62 \text{ kN} \geq N_d = 117,38 \text{ kN}. \quad \text{Nosivost zadovoljava.}$$

Nosivost omotača rupe za $n = 1$ vijak

$$V_{R,r} = A_{\min} \cdot \alpha_r \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = 1,2 \cdot 1,4 \cdot 2,11 \cdot \frac{36}{1,1} = 116,01 \text{ kN},$$

$$V_{R,r} = 116,01 \text{ kN} \geq N_d = 52,49 \text{ kN}. \quad \text{Nosivost zadovoljava.}$$

Provjera nosivosti čelične trake na mjestu rupa za vijke

$$A_{\text{brutto}} = 2 \cdot 7 \cdot 0,6 \text{ cm}^2 = 8,4 \text{ cm}^2,$$

$$A_{\text{netto}} = A_{\text{brutto}} - 2 \cdot d_r \cdot t_1 = 8,4 - 2 \cdot 1,6 \cdot 0,6 = 6,48 \text{ cm}^2,$$

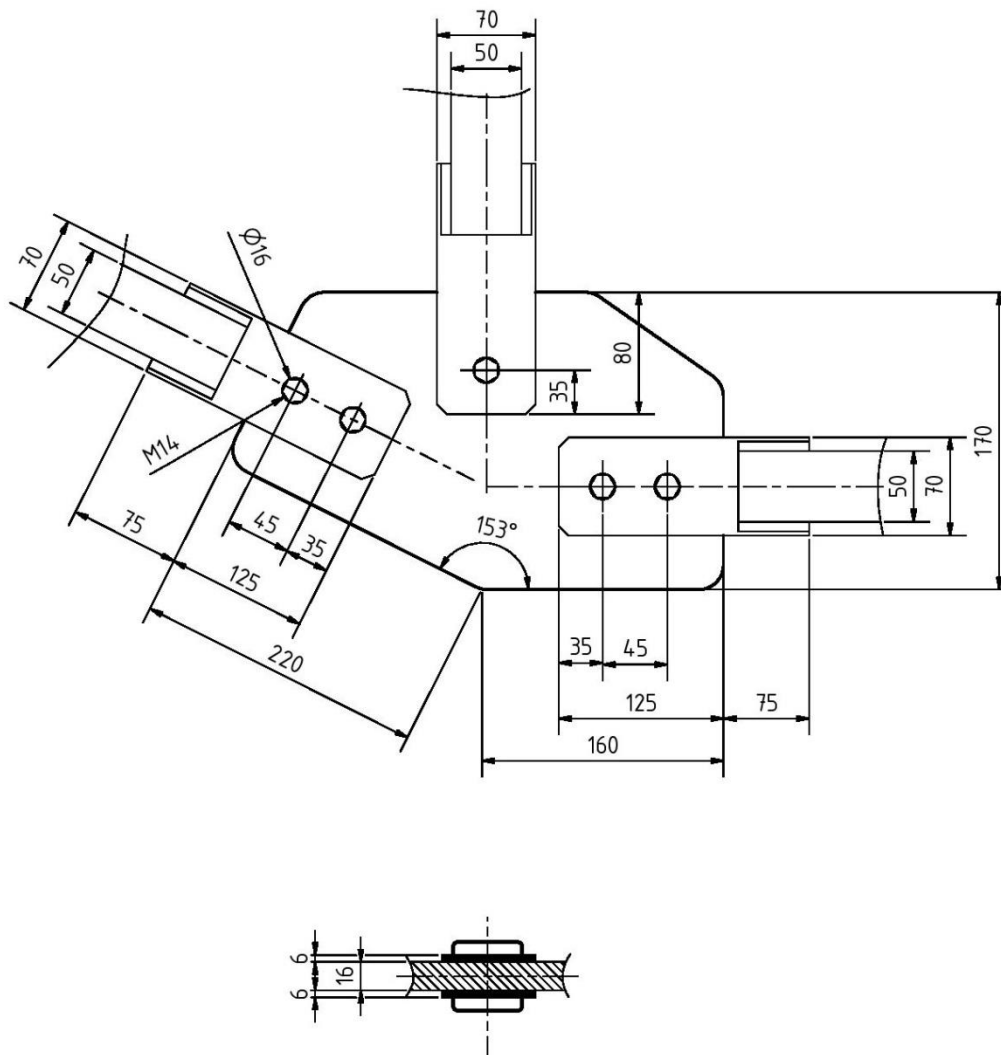
$$\frac{A_{\text{brutto}}}{A_{\text{netto}}} = \frac{8,4}{6,48} = 1,3 > 1,2 \Rightarrow \text{presjek je oslabljen, pa se u proračun ulazi sa slijedećim}$$

izrazom;

$$N_{R,t} = A_{\text{netto}} \cdot \frac{f_{y,k}}{1,25 \cdot \gamma_M} = 6,48 \cdot \frac{36}{1,25 \cdot 1,1} = 169,66 \text{ kN}.$$

$$N_{R,t} = 169,66 \text{ kN} > N_{d,\max} = 117,37 \text{ kN}. \quad \text{Nosivost zadovoljava.}$$

Oblikovani i dimenzionirani čvorni lim prikazan je na slici 5.6.



Slika 5.6 - Oblikovani i dimenzionirani čvorni lim

6 Zaključak

Cilj ovog završnog rada bio je napraviti proračun linijskog nosača i štapova ojačanja opterećenih koncentriranom silom F , kontinuiranim opterećenjem q i spregom sila M , te izvršiti njihovo dimenzioniranje.

Budući da je zadana konstrukcija simetrična, zadano opterećenje je prikazano kao zbroj simetričnog i asimetričnog opterećenja. Kod simetričnog opterećenja uočava se da je dijagram uzdužnih sila i momenata savijanja simetričan, a poprečnih sila asimetričan.

Kod asimetričnog opterećenja situacija je slijedeća; uzdužna sila jednaka je nuli, dijagram poprečnih sila je simetričan, momenata savijanja asimetričan i unutarnje sile u svim štapovima ojačanja jednake su nuli.

Proračunom je pokazano da se vrijednosti unutarnjih sila pri zadanom opterećenju mogu dobiti zbrajanjem vrijednosti simetričnog i asimetričnog opterećenja.

Linijski nosač i štapovi ojačanja dimenzionirani su tako da zadovoljavaju uvjete čvrstoće i stabilnosti.

U prilogu 7 dani su dijagrami zadanog opterećenja provjerenog u programskom paketu 2D Frame Analysis, koji se u potpunosti podudaraju s proračunom. Os z u dijagramima programskog paketa ima suprotan smjer od smjera korištenog u proračunu.

Literatura

- [1] Plazibat B., Matoković A., Vetma V.: *Tehnička mehanika I*, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split 2018.
- [2] Plazibat B., Matoković A., Vetma V.: *Nauka o čvrstoći*, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split 2019.
- [3] Androić B., Dujmović D., Džeba I.: *Metalne konstrukcije 3*, Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 1998.
- [4] Androić B., Dujmović D., Džeba I.: *Čelične konstrukcije 2 – numerički primjeri prema EC3*, Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2007.
- [5] Mihanović A., Trogrlić B.: *Građevna statika I*, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split 2011.

Prilozi

1, 2, 3. Tablice HE i IPE profila

4, 5. Tablice za odabir kvadratnih profila ojačanja

6. Tablica za odabir koeficijenta smanjenja nosivosti

7, 8, 9. Dijagrami napravljeni u programskom paketu 2D Frame Analysis

HE

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 _{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	s _s mm	I _t mm ⁴	I _w mm ⁶	S 235	S 355	S 460	EN 10025:1993	EN 10113-3:1993	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	1033	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	5098	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.

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		EN 10225:1993	EN 10113:1993	EN 10225:2001				
	G kg/m	I_y mm ⁴	$W_{el,y}$ mm ³	$W_{pl,y}^{\dagger}$ mm ³	i_y mm	A_{vz} mm ²	I_z mm ⁴	$W_{el,z}$ mm ³	$W_{pl,z}^{\dagger}$ mm ³	i_z mm	s_s mm	I_t mm ⁴	I_w mm ⁶	S 235				S 355	S 460	S 235	S 355
	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 ³									
HE 240 AA	47,4	5835	521,0	570,6	9,83	21,54	2077	173,1	264,4	5,87	49,10	22,98	239,6	3	4	-	3	4	-	✓	✓
HE 240 A	60,3	7763	675,1	744,6	10,05	25,18	2769	230,7	351,7	6,00	56,10	41,55	328,5	1	3	-	1	3	-	✓	✓
HE 240 B	83,2	11260	938,3	1053	10,31	33,23	3923	326,9	498,4	6,08	68,60	102,7	486,9	1	1	-	1	1	-	✓	✓
HE 240 M	157	24290	1799	2117	11,03	60,07	8153	657,5	1006	6,39	106,6	627,9	1152	1	1	-	1	1	-	✓	✓
HE 260 AA	54,1	7981	654,1	714,5	10,76	24,75	2788	214,5	327,7	6,36	53,62	30,31	382,6	3	4	-	3	4	-	✓	✓
HE 260 A	68,2	10450	836,4	919,8	10,97	28,76	3668	282,1	430,2	6,50	60,62	52,37	516,4	2	3	3	2	3	3	✓	HI
HE 260 B	93	14920	1148	1283	11,22	37,59	5135	395,0	602,2	6,58	73,12	123,8	753,7	1	1	2	1	1	2	✓	HI
HE 260 M	172	31310	2159	2524	11,94	66,89	10450	779,7	1192	6,90	111,1	719,0	1728	1	1	1	1	1	1	✓	HI
HE 280 AA	61,2	10560	799,8	873,1	11,63	27,52	3664	261,7	399,4	6,85	55,12	36,22	590,1	3	4	-	3	4	-	✓	✓
HE 280 A	76,4	13670	1013	1112	11,86	31,74	4763	340,2	518,1	7,00	62,12	62,10	785,4	2	3	4	2	3	4	✓	HI
HE 280 B	103	19270	1376	1534	12,11	41,09	6595	471,0	717,6	7,09	74,62	143,7	1130	1	1	2	1	1	2	✓	HI
HE 280 M	189	39550	2551	2966	12,83	72,03	13160	914,1	1397	7,40	112,6	807,3	2520	1	1	1	1	1	1	✓	HI
HE 300 AA	69,8	13800	975,6	1065	12,46	32,37	4734	315,6	482,3	7,30	60,13	49,35	877,2	3	4	-	3	4	-	✓	✓
HE 300 A	88,3	18260	1260	1383	12,74	37,28	6310	420,6	641,2	7,49	68,13	85,17	1200	2	3	3	2	3	3	✓	HI
HE 300 B	117	25170	1678	1869	12,99	47,43	8563	570,9	870,1	7,58	80,63	185,0	1688	1	1	3	1	1	3	✓	HI
HE 300 M	238	59200	3482	4078	13,98	90,53	19400	1252	1913	8,00	130,6	1408	4386	1	1	1	1	1	1	✓	HI
HE 320 AA	74,2	16450	1093	1196	13,19	35,40	4959	330,6	505,7	7,24	61,63	55,87	1041	3	4	-	3	4	-	✓	✓
HE 320 A	97,6	22930	1479	1628	13,58	41,13	6985	465,7	709,7	7,49	71,63	108,0	1512	1	3	3	1	3	3	✓	HI
HE 320 B	127	30820	1926	2149	13,82	51,77	9239	615,9	939,1	7,57	84,13	225,1	2069	1	1	2	1	1	2	✓	HI
HE 320 M	245	68130	3796	4435	14,78	94,85	19710	1276	1951	7,95	132,6	1501	5004	1	1	1	1	1	1	✓	HI
HE 340 AA	78,9	19550	1222	1341	13,95	38,69	5185	345,6	529,3	7,18	63,13	63,07	1231	3	4	-	3	4	-	✓	✓
HE 340 A	105	27690	1678	1850	14,40	44,95	7436	495,7	755,9	7,46	74,13	127,2	1824	1	3	3	1	3	3	✓	HI
HE 340 B	134	36660	2156	2408	14,65	56,09	9690	646,0	985,7	7,53	86,63	257,2	2454	1	1	1	1	1	1	✓	HI
HE 340 M	248	76370	4052	4718	15,55	98,63	19710	1276	1953	7,90	132,6	1506	5584	1	1	1	1	1	1	✓	HI
HE 360 AA	83,7	23040	1359	1495	14,70	42,17	5410	360,7	553,0	7,12	64,63	70,99	1444	3	4	-	3	4	-	✓	✓
HE 360 A	112	33090	1891	2088	15,22	48,96	7887	525,8	802,3	7,43	76,63	148,8	2177	1	2	3	1	2	3	✓	HI
HE 360 B	142	43190	2400	2683	15,46	60,60	10140	676,1	1032	7,49	89,13	292,5	2883	1	1	1	1	1	1	✓	HI
HE 360 M	250	84870	4297	4989	16,32	102,4	19520	1268	1942	7,83	132,6	1507	6137	1	1	1	1	1	1	✓	HI

HI = HISTAR®

† 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.

IPE

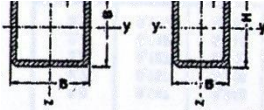
Notations pages 211-215 / Bezeichnungen Seiten 211-215

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		EN 10025:1993	EN 10113-3:1993	EN 10225:2001					
	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	s _s mm	I _t mm ⁴	I _w mm ⁶	S 235				S 355	S 460	S 235	S 355	S 460
		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 ⁹									
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	-	✓	✓	✓

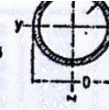
† W_{pl}: pour un dimensionnement plastique, la section doit appartenir à la classe 1 ou 2 suivant la capacité de rotation requise. Voir page 215.

† 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.



Mantelfläche U siehe Seite 27
 Rechenwerte W_{ply} M_{ply} W_{plz} I_r C_I siehe Seite 40 und 41



B	T	A	M	I	W	i	B	T	A	M	I	W	i	B	T	A	M	I	W	i
mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm
Quadrat-Hohlprofile (warmgefertigt, nahtlos oder geschweißt), nach DIN EN 10210-2, Weißdruck 1996																				
40	3	4,34	3,41	9,78	4,89	1,50	120	10	42,9	33,7	852	142	4,46	220	8	57,2	52,7	5 002	455	8,6
4	4	5,59	4,39	11,8	5,91	1,45	140	5	25,7	21,0	807	115	5,50	10	82,9	65,1	6 050	550	8,5	
50	3	5,54	4,35	20,2	8,08	1,91		6,3	33,3	26,1	984	141	5,44	12,5	102	80,1	7 254	659	8,4	
4	4	7,19	5,64	25,0	9,99	1,86		8	41,6	32,6	1 195	171	5,36	8,3	61,0	47,9	6 014	481	9,3	
60	3	6,74	5,29	36,2	12,1	2,32		10	50,9	40,0	1 416	202	5,27	8	76,8	60,3	7 455	596	9,8	
4	4	8,79	6,90	45,4	15,1	2,27	150	5	28,7	22,6	1 002	134	5,90	10	94,9	74,5	9 055	724	9,7	
5	5	10,7	8,42	53,3	17,8	2,23		6,3	35,8	28,1	1 223	163	5,85	16	147	115	13 267	1 061	9,5	
70	3	7,94	6,24	59,0	16,9	2,73		8	44,8	35,1	1 491	199	5,77	260	8	80,0	62,8	8 423	648	10,3
4	4	10,4	8,15	74,7	21,3	2,68		10	54,9	43,1	1 773	236	5,68	8	89,9	77,7	10 242	788	10,2	
5	5	12,7	9,99	88,5	25,3	2,64	160	6,3	38,3	30,1	1 499	187	6,26	12,5	122	95,8	12 365	951	10,1	
80	4	12,0	9,41	114	28,6	3,09		8	48,0	37,6	1 831	229	6,18	16	153	120	15 061	1 159	9,9	
5	5	14,7	11,6	137	34,2	3,05		10	58,9	45,3	2 186	273	6,09	300	8	92,8	72,8	13 128	875	11,9
6,3	6,3	18,1	14,2	156	40,5	2,99		12,5	72,1	56,6	2 576	322	5,98	10	115	90,2	16 026	1 068	11,8	
90	4	13,6	10,7	166	37,0	3,50	180	6,3	43,3	34,0	2 168	241	7,07	12,5	142	112	19 442	1 296	11,7	
5	5	16,7	13,1	200	44,4	3,45		8	54,4	42,7	2 661	296	7,00	16	179	141	23 855	1 590	11,5	
6,3	6,3	20,7	16,2	238	53,0	3,40		10	66,9	52,5	3 193	355	6,91	350	8	109	85,4	21 129	1 207	13,9
100	4	15,2	11,9	232	46,4	3,91		12,5	82,1	64,4	3 790	421	6,80	10	135	106	25 884	1 479	13,9	
5	5	18,7	14,7	279	55,9	3,86	200	6,3	48,4	38,0	3 011	301	7,89	12,5	167	131	31 541	1 802	13,7	
6,3	6,3	23,2	18,2	336	67,1	3,80		8	60,8	47,7	3 709	371	7,81	16	211	166	38 942	2 225	13,6	
120	5	22,7	17,8	498	83,0	4,68		10	74,9	58,8	4 471	447	7,72	400	10	155	122	39 128	1 956	15,9
6,3	6,3	28,2	22,2	603	100,0	4,62		12,5	92,1	72,3	5 336	534	7,61	16	192	151	47 839	2 392	15,8	
8	8	35,2	27,6	726	121	4,55	220	6,3	53,4	41,9	4 049	368	8,71	16	243	191	59 344	2 967	15,6	

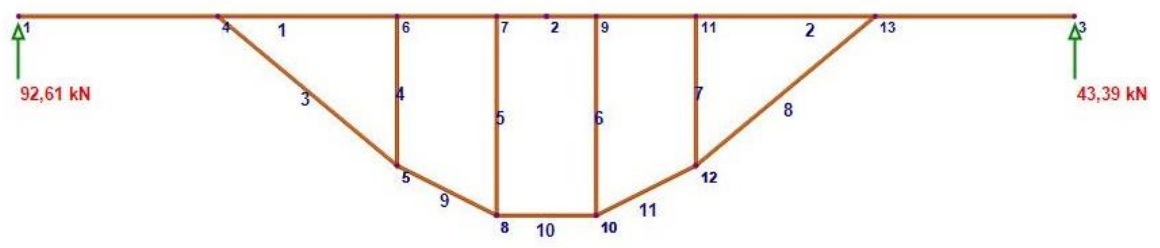
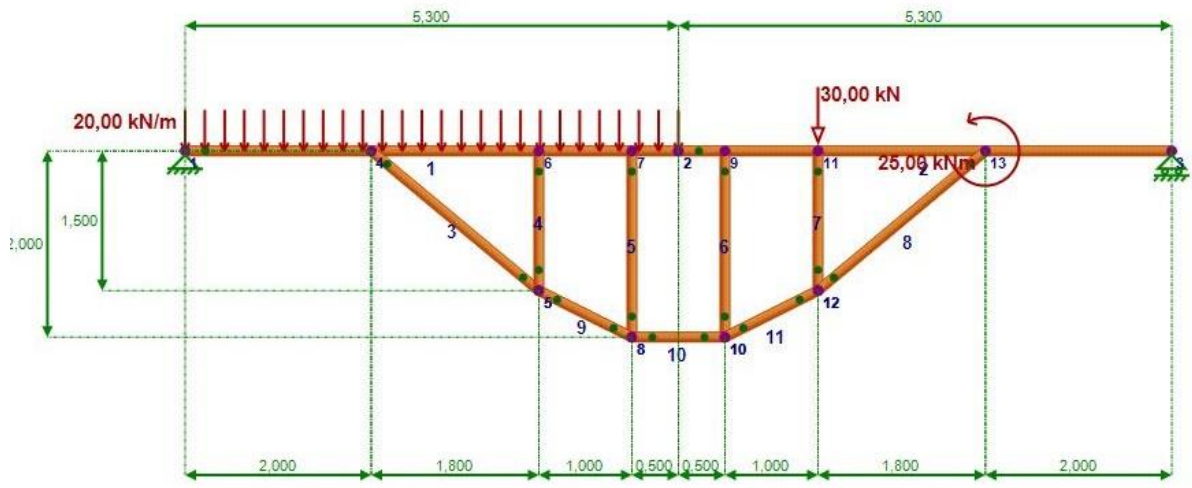
HxB	T	A	M	I _y	W _y	I _x	W _x	I _z	HxB	T	A	M	I _y	W _y	I _x	W _x	I _z		
mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm ⁴		
Rechteck-Hohlprofile (warmgefertigt, nahtlos oder geschweißt), nach DIN EN 10210-2, Weißdruck 1996																			
50x30	3	4,34	3,41	13,6	5,43	1,77	5,94	3,96	1,17	200x100	6,3	35,8	28,1	1 829	183	7,15	613	123	4,1
4	4	5,59	4,39	16,5	6,60	1,72	7,08	4,72	1,13	8	44,8	35,1	2 234	223	7,06	739	148	4,0	
60x40	3	5,54	4,35	26,5	8,82	2,18	13,9	6,95	1,58	10	54,9	43,1	2 664	266	6,96	869	174	3,8	
4	4	7,19	5,64	32,8	10,9	2,14	17,0	8,52	1,54	12,5	67,1	52,7	3 136	314	6,84	1 004	201	3,8	
80x40	3	6,74	5,29	54,2	13,6	2,84	18,0	9,00	1,63	200x120	6,3	38,3	30,1	2 065	207	7,34	929	155	4,3
4	4	8,79	6,90	68,2	17,1	2,79	22,2	11,1	1,59	8	48,0	37,6	2 529	253	7,26	1 128	188	4,8	
5	5	10,7	8,42	80,3	20,1	2,74	25,7	12,9	1,55	10	58,9	46,3	3 026	303	7,17	1 337	223	4,7	
90x50	3	7,94	6,24	84,4	18,8	3,26	33,5	13,4	2,05	250x150	12,5	72,1	56,6	3 576	358	7,04	1 562	260	4,6
4	4	10,4	8,15	107	23,8	3,21	41,9	16,8	2,01	6,3	48,4	38,0	4 143	331	9,25	1 874	250	6,2	
5	5	12,7	9,99	127	28,3	3,16	49,2	19,7	1,97	8	60,8	47,7	5 111	409	9,17	2 298	306	6,1	
100x50	4	11,2	8,78	140	27,9	3,53	46,2	18,5	2,03	10	74,9	58,8	6 174	494	9,08	2 755	367	6,0	
5	5	13,7	10,8	167	33,3	3,48	54,3	21,7	1,99	12,5	92,1	72,3	7 378	591	8,96	3 265	435	5,9	
6,3	6,3	16,9	13,3	197	39,4	3,42	63,0	25,2	1,93	260x180	6,3	53,4	41,9	5 186	397	9,83	2 929	325	7,4
100x60	4	12,0	9,41	158	31,6	3,63	70,5	23,5	2,43	8	67,2	52,7	6 390	492	9,75	3 608	401	7,3	
5	5	14,7	11,6	189	37,8	3,58	83,6	27,9	2,38	10	82,9	65,1	7 741	595	9,66	4 351	483	7,2	
6,3	6,3	18,1	14,2	225	45,0	3,52	98,1	32,7	2,33	12,5	102	80,1	9 299	715	9,54	5 196	577	7,1	
120x60	4	13,6	10,7	249	41,5	4,28	83,1	27,7	2,47	6,3	61,0	47,9	7 829	522	11,3	4 193	419	8,2	
5	5	16,7	13,1	299	49,9	4,23	98,8	32,9	2,43	8	76,8	60,3	9 717	648	11,3	5 184	518	8,2	
6,3	6,3	20,7	16,2	358	59,7	4,16	116	38,8	2,37	10	94,9	74,5	11 619	788	11,2	6 278	628	8,1	
120x80	4	15,2	11,9	303	50,4	4,46	161	40,2	3,25	12,5	117	91,9	14 273	952	11,0	7 537	754	8,0	
5	5	18,7	14,7	365	60,9	4,42	193	48,2	3,21	8	92,8	72,8	16 449	940	13,3	9 798	784	10,0	
6,3	6,3	23,2	18,2	440	73,3	4,36	230	57,6	3,15	10	115	90,2	20 102	1 149	13,2	11 937	955	10,0	
140x80	4	16,8	13,2	441	62,9	5,12	184	46,0	3,31	12,5	142	112	24 419	1 395	13,1	14 444	1 156	10,0	
5	5	20,7	16,3	534	76,3	5,08	222	55,3	3,27	16	179	141	30 011	1 715	12,9	17 654	1 412	9,9	
6,3	6,3	25,7	20,2	646	92,3	5,01	265	66,2	3,21	8	92,8	72,8	19 562	978	14,5	6 660	666	8,4	
150x100	5	29,5	23,1	898	120	5,52	474	94,8	4,01	10	115	90,2	23 914	1 196	14,4	8 084	808	8,3	
8	8	36,8	28,9	1 087	145	5,44	569	114	3,94	12,5	142	112	29 063	1 453	14,3	9 736	974	8,2	
160x80	10	44,9	35,3	1 282	171	5,34	665	133	3,85	16	179	141	35 738	1 787	14,1	11 824	1 182	8,1	
5	5	22,7	17,8	744	93,0	5,72	249	62,3	3,31	8	109	85,4	30 082	1 337	16,6	12 142	971	10,1	
6,3	6,3	28,2	22,2	903	113	5,66	299	74,8	3,26	10	135	106	36 895	1 640	16,5	14 819	1 185	10,1	
8	8	35,2	27,6	1 091	136	5,57	356	89,0	3,18	12,5	167	131	45 026	2 001	16,4	17 973	1 438	10,0	
180x100	10	42,9	33,7	1 284	161	5,47	411	103	3,10	16	211	166	55 705	2 476	16,2	22 041	1 763	10,0	
5	5	26,7	21,0	1 153	128	6,57	460	92,0	4,15	10	155	122	53 782	2 150	18,6	24 439	1 629	12,1	
6,3	6,3	33,3	26,1	1 407	156	6,50	557	111	4,09	12,5	192	151	65 813	2 633	18,5	29 780	1 985	12,1	
8	8	41,6	32,6	1 713	190	6,42	671	134	4,02	16	243	191	81 783	3 271	18,3	36 768	2 451	12,2	
10	10	50,9	40,0	2 036	226	6,32	787	157	3,93	20	300	235	98 777	3 951	18,2	44 078	2 838	12,2	

In dieser Norm sind die Abkürzungen mit w_{xx} und w_{yy} bezeichnet

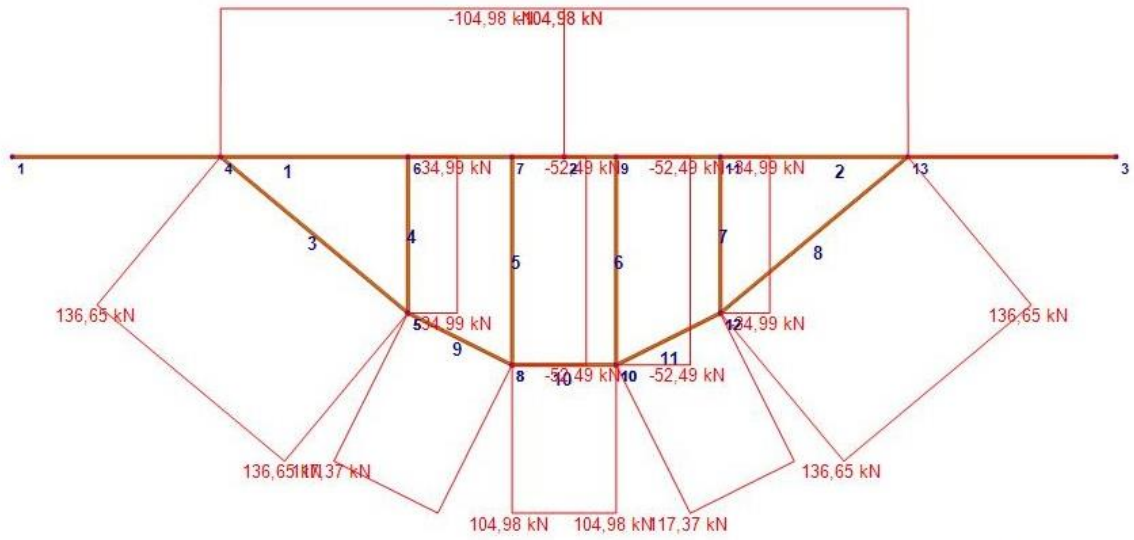
B	T	A	M	I	W	I	B	T	A	M	I	W	I	B	T	A	M	I	W	I
mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm
Quadrat-Hohlprofile (kaltgefertigt, geschweißt), Auswahl aus DIN EN 10219-2 (Weißdruck 1996)																				
20	2	1,34	1,05	0,69	0,69	0,72	100	4	14,9	11,7	226	45,3	3,89	180	12,5	77,0	60,5	3 466	378	6,6
30	2	2,14	1,68	2,72	1,81	1,13		5	18,4	14,4	271	54,2	3,84	200	6,3	47,4	37,2	2 922	292	7,8
40	2	2,94	2,31	6,94	3,47	1,64		6,3	22,2	17,5	314	62,8	3,78	8	59,2	46,5	3 566	357	7,7	
	3	4,21	3,30	9,32	4,66	1,49	120	4	18,1	14,2	402	67,0	4,71	10	72,6	57,0	4 251	425	7,6	
	4	5,35	4,20	11,1	5,54	1,44		5	22,4	17,5	485	80,9	4,66	12,5	87,0	68,3	4 859	486	7,4	
50	2	3,74	2,93	14,1	5,66	1,95		6,3	27,3	21,4	572	95,3	4,58	220	8	65,6	51,5	4 828	439	8,5
	3	5,41	4,25	19,5	7,79	1,90		8	33,6	26,4	677	113	4,49	10	80,8	63,2	5 782	526	8,4	
	4	6,95	5,45	23,7	9,49	1,85	140	4	21,3	16,8	652	93,1	5,52	12,5	97,0	76,2	6 674	607	8,2	
	5	8,36	6,56	27,0	10,8	1,80		5	26,4	20,7	791	113	5,48	250	6,3	60,0	47,1	5 873	470	9,8
60	2	4,54	3,56	25,1	8,38	2,35		6,3	32,3	25,4	941	134	5,39	8	75,2	59,1	7 229	578	9,8	
	3	6,61	5,19	35,1	11,7	2,31		8	40,0	31,4	1 127	161	5,30	10	92,6	72,7	8 707	697	9,7	
	4	8,55	6,71	43,6	14,5	2,26		10	48,8	38,1	1 312	187	5,20	12,5	112	88,0	10 161	813	9,5	
	5	10,4	8,13	50,5	16,8	2,21	150	5	28,4	22,3	882	131	5,89	260	8	78,4	61,6	8 178	629	10,2
70	3	7,81	6,13	57,5	16,4	2,71		6,3	34,8	27,4	1 174	156	5,80	10	96,6	75,8	9 665	759	10,1	
	4	10,1	7,97	72,1	20,6	2,67		8	43,2	33,9	1 412	188	5,71	12,5	117	91,9	11 548	888	9,9	
	5	12,4	9,70	84,6	24,4	2,62		10	52,6	41,3	1 653	220	5,61	300	6,3	73,6	57,8	10 342	689	11,9
80	3	9,01	7,07	87,8	22,0	3,12	160	4	24,5	19,3	987	123	6,34	8	91,2	71,6	12 801	853	11,8	
	4	11,7	9,22	111	27,8	3,07		5	30,4	23,8	1 202	150	6,29	10	113	88,4	15 519	1035	11,7	
	5	14,4	11,3	131	32,9	3,03		6,3	37,4	29,3	1 442	180	6,21	12,5	137	108	18 348	1223	11,6	
	6,3	17,2	13,5	149	37,1	2,94		8	46,4	36,5	1 741	218	6,12	350	8	107	84,2	20 681	1182	13,9
90	3	10,2	8,01	127	28,3	3,53		10	56,6	44,4	2 048	256	6,02	10	133	104	25 189	1439	13,8	
	4	13,3	10,5	162	36,0	3,48	180	6,3	42,4	33,3	2 096	233	7,03	12,5	162	127	30 045	1717	13,6	
	5	16,4	12,8	193	42,9	3,43		8	52,8	41,5	2 546	283	6,94	400	10	153	120	38 216	1911	15,8
	6,3	19,7	15,5	221	49,1	3,35		10	64,6	50,7	3 017	335	6,84	12,5	187	147	45 877	2294	15,7	

H x B	T	A	M	I _y	W _y	I _x	I _y	I _z	W _z	I _x	H x B	T	A	M	I _y	W _y	I _x	I _y	I _z	W _z	I _x
mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm ⁴	cm ³	cm	mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm ⁴	cm ³	cm
Rechteck-Hohlprofile (kaltgefertigt, geschweißt), Auswahl aus DIN EN 10219-2 (Weißdruck 1996)																					

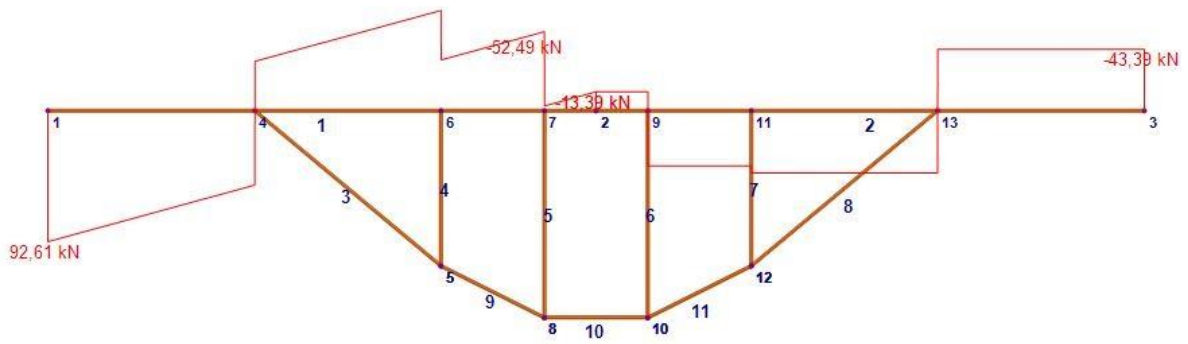
40 x 20	2	2,14	1,68	4,05	2,02	1,38	1,34	1,34	0,79	160 x 80	4	18,1	14,2	598	74,7	5,74	204	50,9	3,35
	2,5	2,59	2,03	4,69	2,35	1,35	1,54	1,54	0,77		5	22,4	17,5	722	90,2	5,68	244	61,0	3,30
50 x 30	2	2,94	2,31	9,54	3,81	1,80	4,29	2,86	1,21		6,3	27,3	21,4	846	106	5,57	286	71,4	3,24
	3	4,21	3,30	12,8	5,13	1,75	5,70	3,80	1,16	180 x 100	8	33,6	26,4	1001	125	5,46	335	83,7	3,16
	4	5,35	4,20	15,3	6,10	1,69	6,69	4,46	1,12		5	26,4	20,7	1 124	125	6,53	452	90,4	4,14
60 x 40	2	3,74	2,93	18,4	6,14	2,22	9,83	4,92	1,62		6,3	32,3	25,4	1 335	148	6,43	536	107	4,07
	3	5,41	4,25	25,4	8,46	2,17	13,4	6,72	1,58	200 x 100	8	40,0	31,4	1 598	178	6,32	637	127	3,96
	4	6,95	5,45	31,0	10,3	2,11	16,3	8,14	1,53		10	48,8	38,1	1 859	207	6,19	736	147	3,85
	5	8,36	6,56	35,3	11,8	2,06	18,4	9,21	1,48		6,3	34,8	27,4	1 739	174	7,06	591	118	4,12
80 x 40	2	4,54	3,56	37,4	9,34	2,87	12,7	6,36	1,67		8	43,2	33,9	2 091	209	6,95	705	141	4,04
	3	6,61	5,19	52,3	13,1	2,81	17,6	8,78	1,63		10	52,6	41,3	2 444	244	6,82	818	164	3,94
	4	8,55	6,71	64,8	16,2	2,75	21,5	10,7	1,59	200 x 120	5	30,4	23,8	1 649	165	7,37	750	125	4,97
	5	10,4	8,13	75,1	18,8	2,69	24,6	12,3	1,54		6,3	37,4	29,3	1 976	198	7,27	896	150	4,90
90 x 50	3	7,81	6,13	81,9	18,2	3,24	32,7	13,1	2,05		8	46,4	36,5	2 386	239	7,17	1 079	180	4,82
	4	10,1	7,97	103	22,8	3,18	40,7	16,3	2,00		10	56,6	44,4	2 806	281	7,04	1 262	210	4,72
	5	12,4	9,70	121	26,8	3,12	47,4	18,9	1,96	250 x 150	6,3	47,4	37,2	4 001	320	9,18	1 825	243	6,20
	6,3	15,1	11,8	149	32,1	3,06	56,6	22,9	1,91		8	59,2	46,5	4 886	391	9,08	2 219	286	6,12
100 x 50	3	8,41	6,60	106	21,3	3,56	36,1	14,4	2,07		10	72,6	57,0	5 825	466	8,96	2 634	351	6,02
	4	11,7	9,22	133	26,5	3,44	45,5	18,2	1,98		12,5	87,0	68,3	6 833	531	8,73	3 002	400	5,87
100 x 60	3	9,01	7,07	121	24,1	3,66	34,6	18,2	2,46		6,3	47,4	37,2	4 907	327	10,2	868	174	4,28
	4	11,7	9,22	153	30,5	3,60	46,7	22,9	2,42		8	59,2	46,5	5 825	466	9,08	2 219	286	6,12
	5	14,4	11,3	181	36,2	3,55	56,8	26,9	2,37	300 x 100	10	72,6	57,0	7 106	474	9,90	2 634	351	6,02
	6,3	17,2	13,5	203	40,7	3,44	64,4	30,3	2,30		12	84,1	65,0	8 080	521	9,64	3 002	400	5,87
120 x 60	3	10,2	8,01	189	31,5	4,20	64,4	21,5	2,51		6,3	60,0	47,1	7 624	508	11,3	4 104	410	8,27
	4	13,3	10,5	241	40,1	4,25	81,2	27,1	2,47		8	75,2	59,1	9 399	626	11,2	5 042	504	8,19
	5	16,4	12,8	287	47,8	4,19	96,0	32,0	2,42		10	92,6	72,7	11 313	754	11,1	6 058	606	8,09
	6,3	19,7	15,5	327	54,5	4,07	109	36,4	2,35		12,5	112	88,0	13 179	879	10,8	7 066	706	7,94
120 x 80	4	14,9	11,7	285	49,1	4,44	157	39,3	3,24		6,3	72,6	57,0	12 923	738	13,3	7 744	620	10,3
	5	18,4	14,4	353	58,9	4,39	188	46,8	3,20		8	91,2	71,6	16 001	914	13,2	9 573	766	10,2
	6,3	22,2	17,5	408	68,1	4,28	217	54,3	3,12	140 x 80	10	113	88,4	19 407	1 109	13,1	11 588	927	10,1
	4	16,5	13,0	430	61,4	5,10	180	45,1	3,30		12	132	104	22 197	1 288	13,0	13 251	1 061	10,0
	5	20,4	16,0	517	73,9	5,04	216	54,0	3,26		8	91,2	71,6	18 974	949	14,4	6 517	652	8,45
150 x 100	6,3	24,8	19,4	603	86,1	4,93	251	62,9	3,19		10	113	88,4	23 003	1 150	14,3	7 864	786	8,



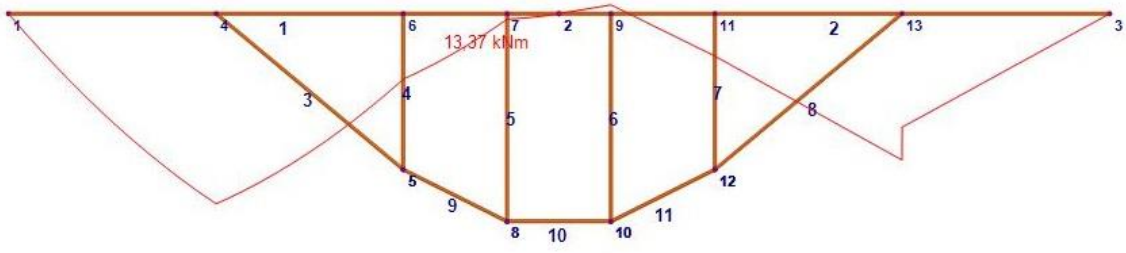
Support Reactions
 Load case: Load case 1
 [kN units]



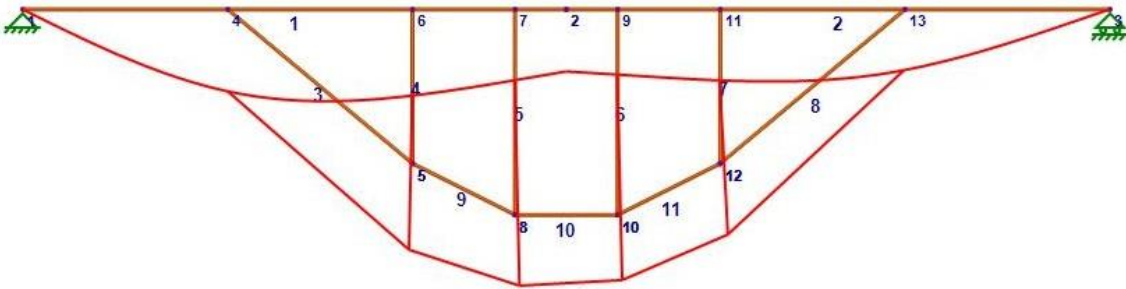
Axial Force Diagram
Load case: Load case 1
[kN units]



Shear Force Diagram
Load case: Load case 1
[kN units]



Bending Moment Diagram
 Load case: Load case 1
 [kNm units]



Deformed Shape
 Load case: Load case 1
 [mm,rad units]