

Kaivantotoimikunnan koulutuspäivä 17.5.2021

TERÄSMATERIAALIEN ERITYISPIIRTEET

Juha Kujansuu, Geosolver Oy



Suomen Geoteknillinen Yhdistys
– Finnish Geotechnical Society

Sisältö

- Teräs materiaalina
- Teräsprofiilien ominaisuuksia
- Poikkileikkausluokitus
 - Palkit
- Nurjahdusmitoituksen periaatteet
 - Mitoituksen kulku
 - Esimerkkilaskelma (puristussauva)

Teräs materiaalina

- Teräs on homogeeninen materiaali, jonka suuri lujuus poikkeaa muista rakennusaineista kuten tiilestä, betonista tai puusta (kestävyyden varmuuskerroin teräksellä lähtökohtaisesti yleensä 1,0)
- Materiaalin ominaisuuksia on mahdollista säätää koostumuksen ja valmistusprosessin avulla.
- Teräslajeja on olemassa useita tuhansia (Teräsrakenneyhdistys – teräs materiaalina).

Teräs materiaalina – teräslaji

- Kuumavalsattujen **teräsponttien** (yleisimpiä profiileita) myötöraja f_y ja vetomurtolujuuden f_u nimellisarvot ovat seuraavat:

Teräksen nimike standardin SFS-EN 10027 mukaisesti	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)
S240GP	240	340
S270GP	270	410
S320GP	320	440
S355GP	355	480
S390GP	390	490
S430GP	430	510

Teräs materiaalina – teräslaji

- Kuumavalssatut **rakenneterästen** myötörajan f_y ja vetomurtolujuuden f_u nimellisarvot ovat seuraavat:

Standardi ja teräslaji	Nimellispaksuus t (mm)			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)
SFS-EN 10025				
S235	235	360	215	360
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	470
S450	440	550	410	550

Huom! Paksummilla teräsosilla myötöraja on alhaisempi!

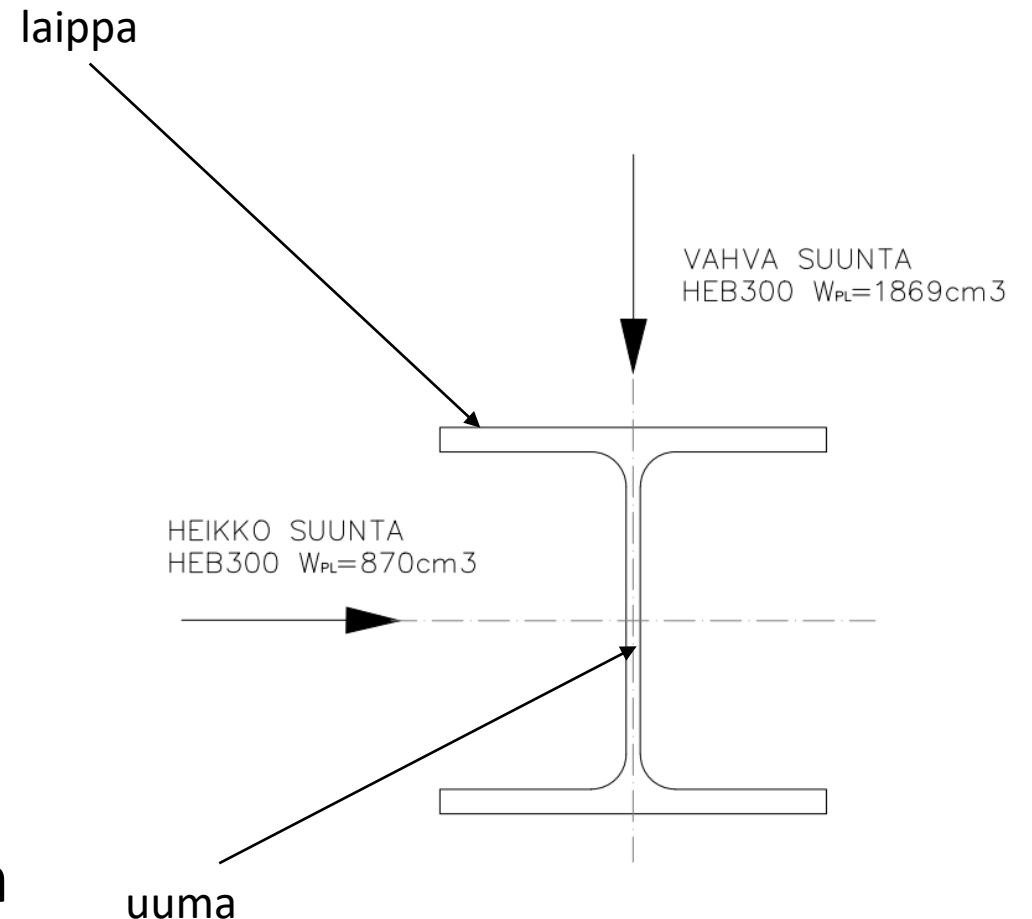


Teräs materiaalina – teräslaji

- Jos työmaalla käytetään käytettyjä pontteja tai teräsosia, niin laskelmissa myötörajana ponteilla tulee käyttää $f_y=240\text{N/mm}^2$ ja muille teräsosille $f_y=235\text{ N/mm}^2$, jollei tarkempia ainestodistuksia ole olemassa.
- Uudelleen käytettävien ja II-laatua olevien teräsosien ja ponttilevyjen on täytettävä vähintään suunnitelmissa esitetyt muoto-, mitta- ja materiaaliominaisuuksia koskevat vaatimukset, eikä niissä saa olla vaurioita tai vahingollisia aineita, jotka voivat vaikuttaa niiden säilyvyyteen tai lujuuteen.

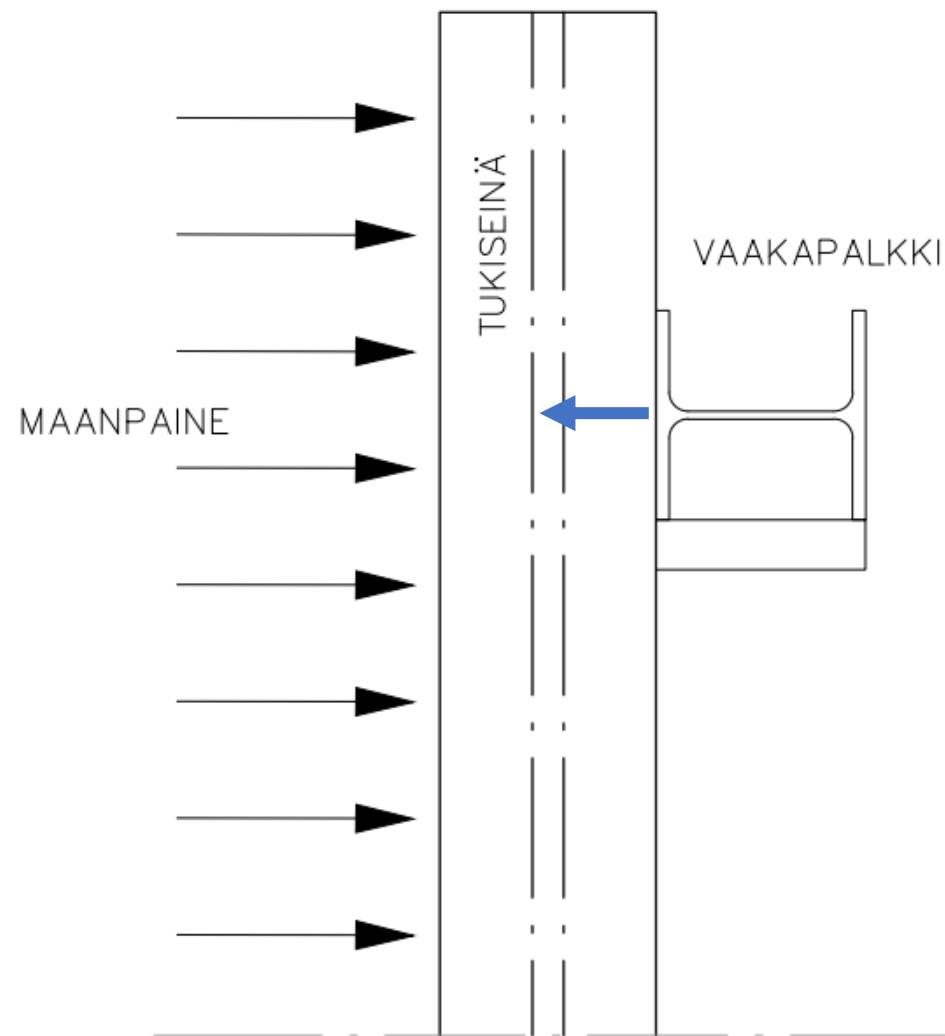
Teräsprofiilien akselit

- Riippuen kuormituksen suunnasta esim. H tai I-profiileilla ovat kuormituksen suunnasta riippuen taivutusvastukseltaan joko **vahvempia** tai **heikompia**.
- Tukiseinässä palkin asennus siten, että maanpaine on palkin vahvaa suuntaa kohti
- Neliö- tai putkiprofiileilla kuormituksen suunnalla ei ole merkitystä



Teräsprofiilien akselit

- Eli näin...



Teräsmateriaalien erityispiirteitä

- Mitoituksen alussa tarkastetaan ensiksi, että mikä on teräsprofiilin poikkileikkausluokka.
- Poikkileikkausluokka määritellään teräsosan mitta- ja paksuussuhteiden avulla. Käytännössä luokituksen tarkoitus on tunnistaa, että milloin paikallinen **lommahtaminen** rajoittaa poikkileikkauksen kiertymistä tai kestävyyttä.
- Teräsosan voi olla eri kohdilla erilainen poikkileikkausluokitus esim. palkin uuma tai laippa
- Yleensä mitoitus tehdään niin, että poikkileikkausluokka ei muutu käyttöiän aikana. Jos muutos tapahtuu, tulee ko. muutos huomioida laskelmissa.
- Poikkileikkausluokitus jaetaan neljään luokkaan seuraavasti

Teräsmateriaalien erityispiirteitä

Poikkileikkausluokka 1: Poikkileikkauksen voidaan otaksua **plastisoituvan** ja poikkileikkauksen kiertymiskyky ei ole rajoittunut. Laskenta edellyttää **plastisuusteorian** mukaista kokonaistarkastelua.

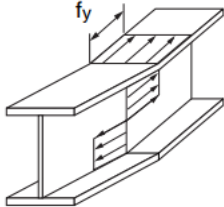
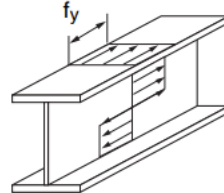
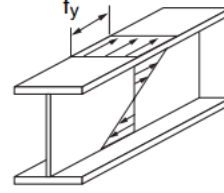
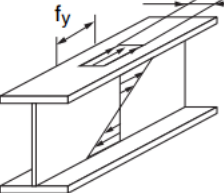
Poikkileikkausluokka 2: Poikkileikkauksessa voidaan olettaa syntyvän plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys, mutta poikkileikkauksen kiertymiskykyä rajoittaa **paikallinen lommahdus**. Poikkileikkausluokassa 2 käytetään **kimmoteorian** mukaista **kokonaistarkastelua**.

Poikkileikkausluokka 3: Poikkileikkaukset, joihin sovelletaan **kimmoteorian** mukaista kokonaistarkastelua ja poikkileikkauksen jännitykset lasketaan **kimmoteorian** mukaan ja poikkileikkauksen uloimpiin reunoihin muodostuu myötörajan suuruinen jännitys.

Poikkileikkausluokka 4: Poikkileikkaukset, joilla **paikallinen lommahdus** esiintyy ennen myötörajan saavuttamista yhdessä tai useassa kohdassa poikkileikkausta.

Paljon termejä, joten käydään ne läpi tässä yhteydessä.

Poikkileikkausluokat

Poikkileikkausluokka	Kestävyyden laskentatapa	Voimasuureiden laskentatapa	Jännitysjaakauma, kun kestävyys on saavutettu
1	plastisuusteoria	plastisuusteoria	
2	plastisuusteoria	kimmoteoria	
3	kimmoteoria	kimmoteoria	
4	tehollinen poikkileikkaus	kimmoteoria	

Laskenta suoritetaan plastisuusteorian mukaisilla kokonaismenettelyillä – syntyy plastisia niveliä (ei käsitellä tässä koulutuksessa)

Laskenta voidaan suorittaa kimmoteorian mukaisella kokonaismenettelyllä

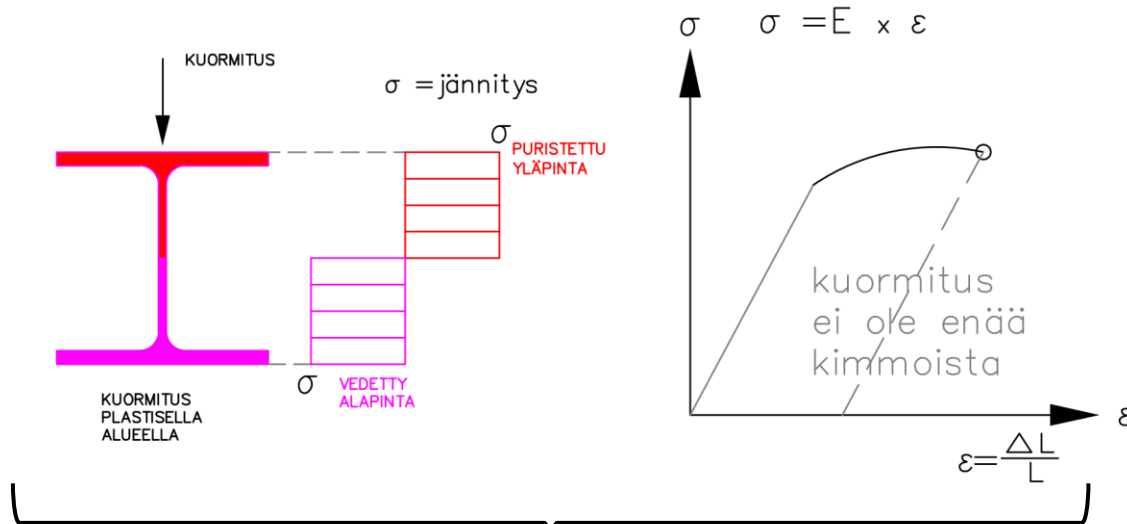
Paikallinen lommahtaminen rajoittaa profiilin ominaisuuksia, jolloin tulisi määriteltäväksi profiilin tehokas pinta-ala tai alue (ei käsitellä tässä koulutuksessa)

Kuva: Ruukki hitsatut profiilit, taulukko 2.6

Teräsmateriaalien erityispiirteitä

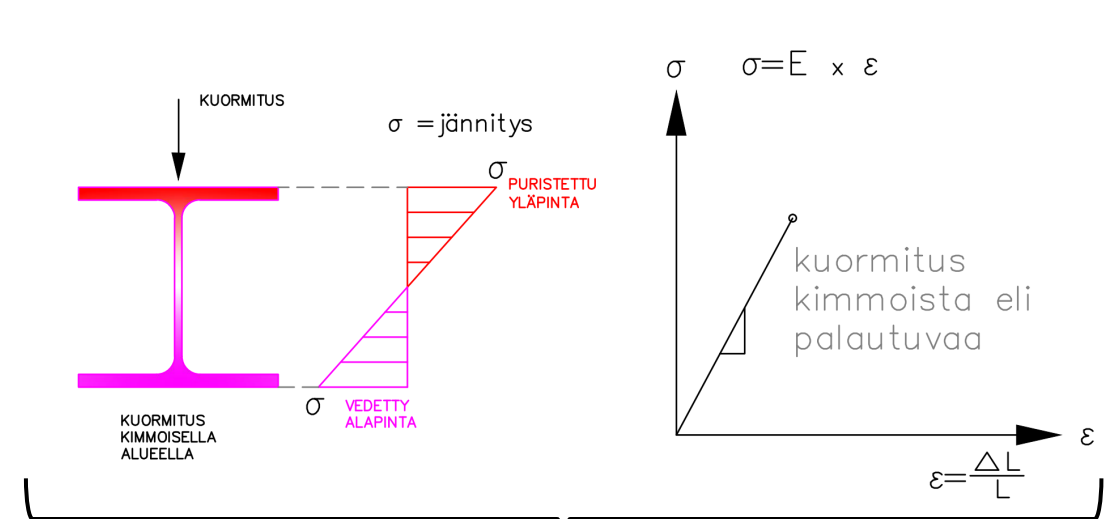
- Plastisuusteoria? Poikkileikkausluokassa 2 kokonaistarkastelun voi siis suorittaa kimmoteorian mukaisella menettelyllä ja teräsprofiilin **plastisoituminen** voidaan hyödyntää mm. taivutusvastuksen osalta. Huom!

PLASTINEN TAIVUTUS



Poikkileikkaus on saavuttanut myötörajan kauttaaltaan, eli koko poikkileikkaus on plastisoitunut ja kuormituksen poistuessa jää pysyviä muodonmuutoksia

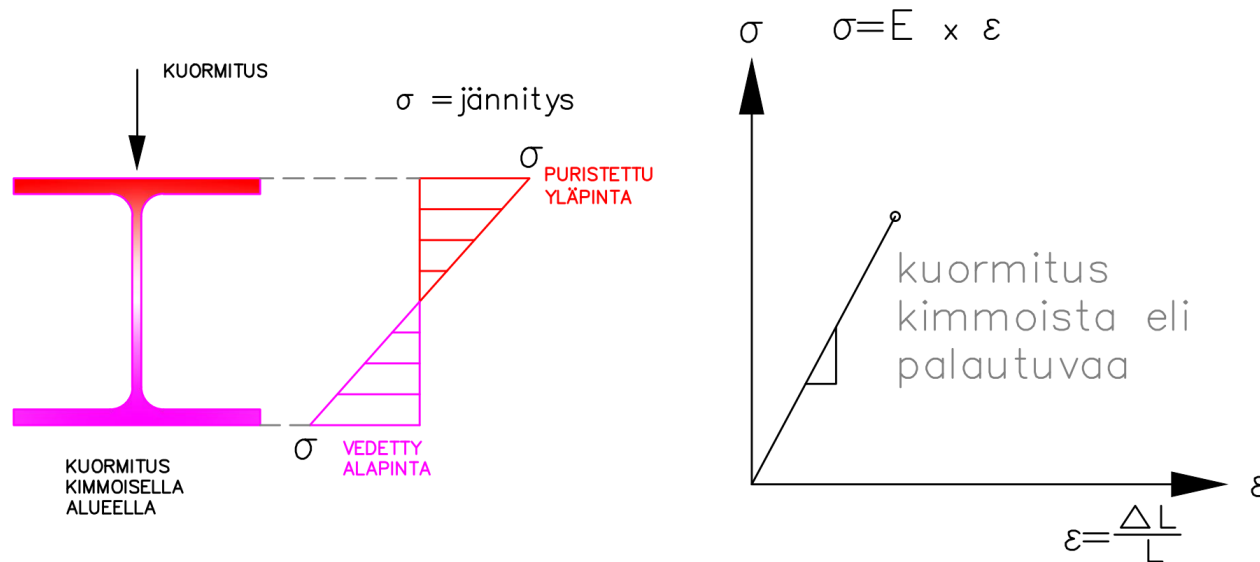
KIMMOINEN TAIVUTUS



Poikkileikkauksessa vain reuna-alue on myötörajassa eli vain paikallisesti on saavutettu myötöraja.

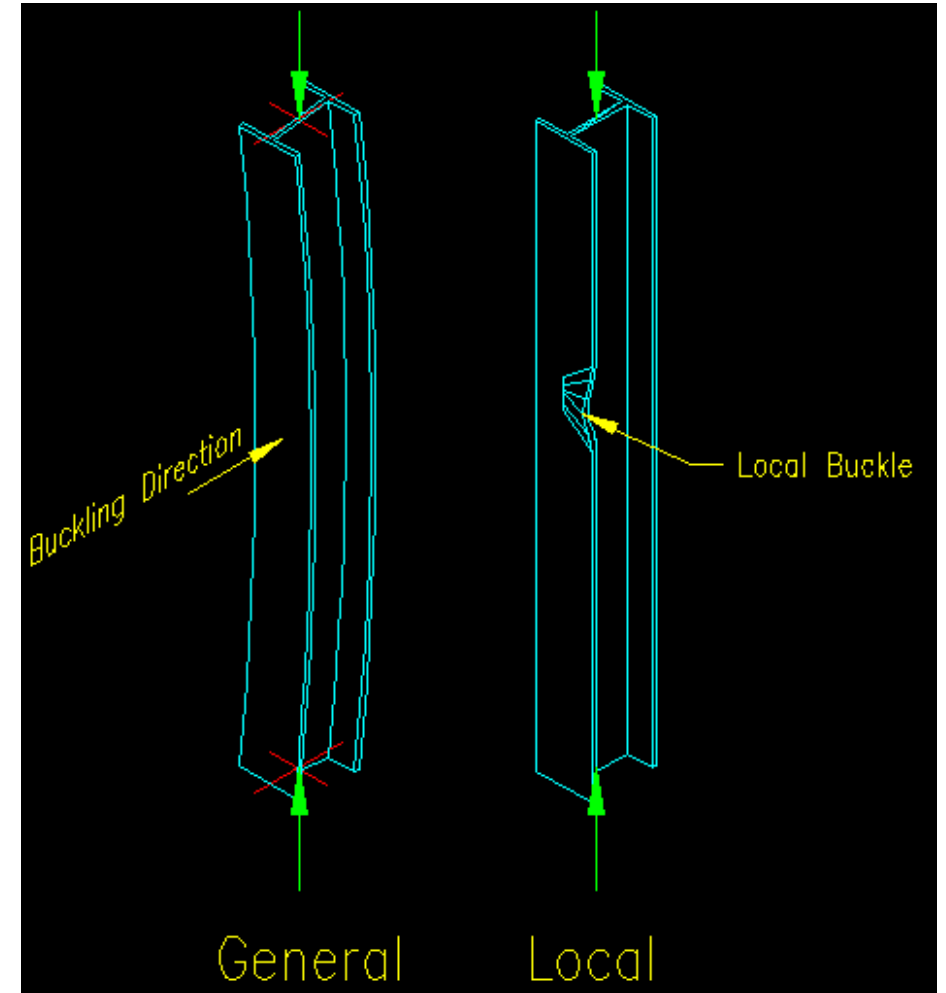
Teräsmateriaalien erityispiirteitä

- **Kimmoiteoria?** Tarkoittaa, että kuormitus on ns. kimmoisalla/elastisella alueella eli kuormituksen poistuessa teräsprofiiliin ei jää pysyviä muodonmuutoksia.



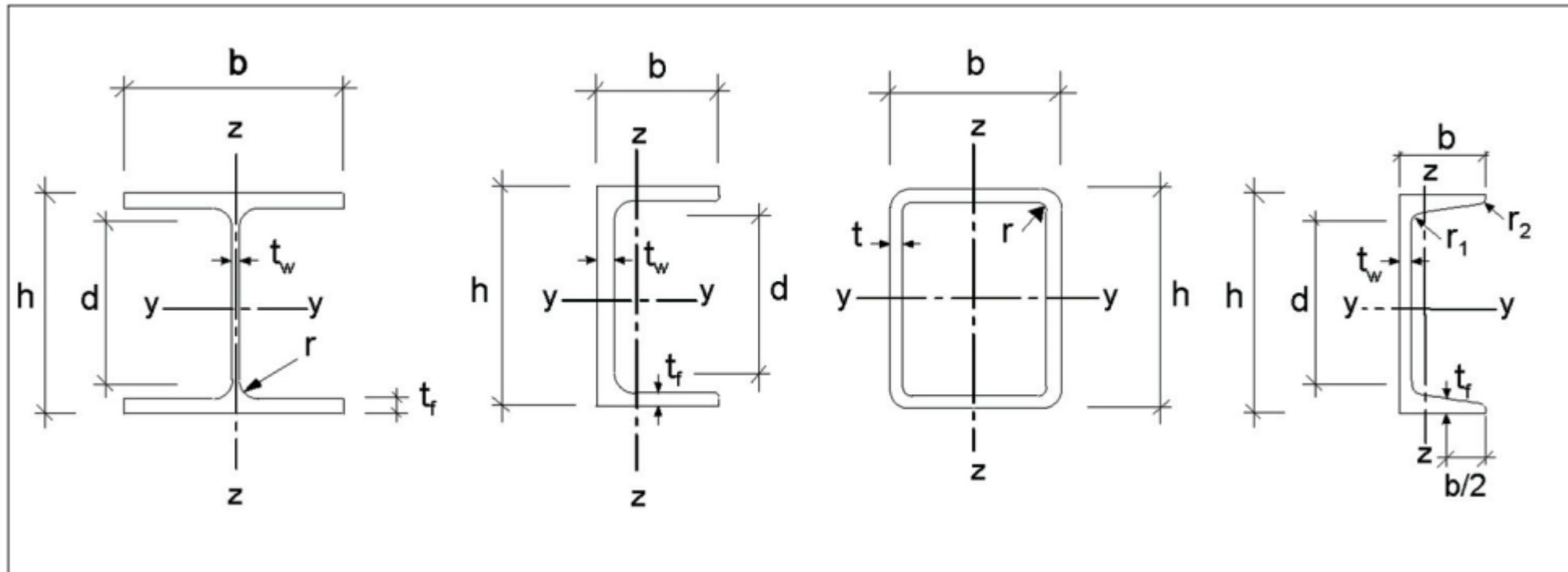
Teräsmateriaalien erityispiirteitä

- Paikallinen lommahdus?
- Se tarkoittaa sitä, että ennen kuin mikään teräsprofiilin poikkileikkauksen paikallinen kohta/alue saavuttaa myötörajan voi esiintyä paikallinen lommahtaminen joka alentaa mm. teräsprofiilin taivutuskestävyyttä ja kiertymiskykyä
- Poikkileikkausluokan 4 teräsprofiilit ovat yleensä alttiita paikalliselle lommahtamiselle (yleensä korkea profiili ja ohut uuma). Tässä koulutuksessa ei käsitellä niitä, koska näiden teräsprofiilien mitoitusmenettely menee hankalaksi.



<https://www.bgstructuralengineering.com/BGSCM13/BGSCM006/index.htm>

Miten teräspalkin poikkileikkausluokka määräytyy (yleisimmät akselit, mitat jne.)

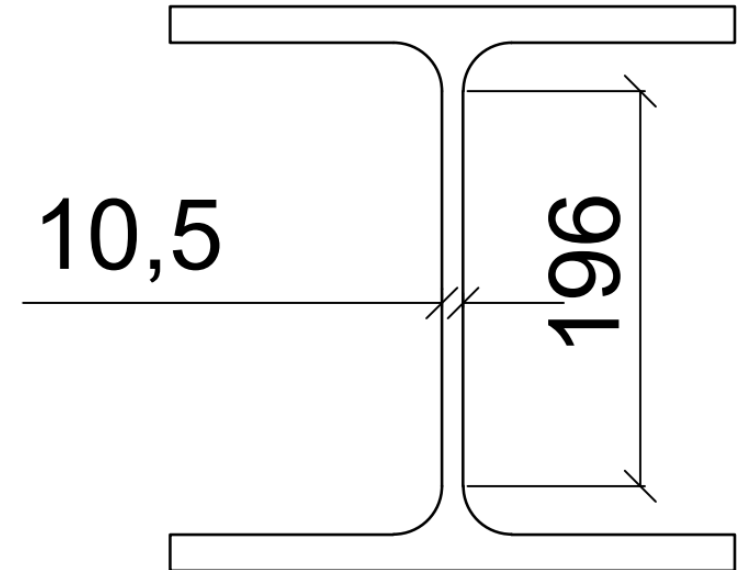


Tyypillisesti taivutus y - y akselin ympäri on ns. vahva-akseli ja z - z akselin ympäri heikko akseli

Miten teräspalkin poikkileikkausluokka määräytyy (esimerkki HEB280 S235)

- Mitta $c = 196\text{mm}$
- Uuman paksuus $t = 10,5\text{mm}$
- $\varepsilon (\text{S235}) = 1,00$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

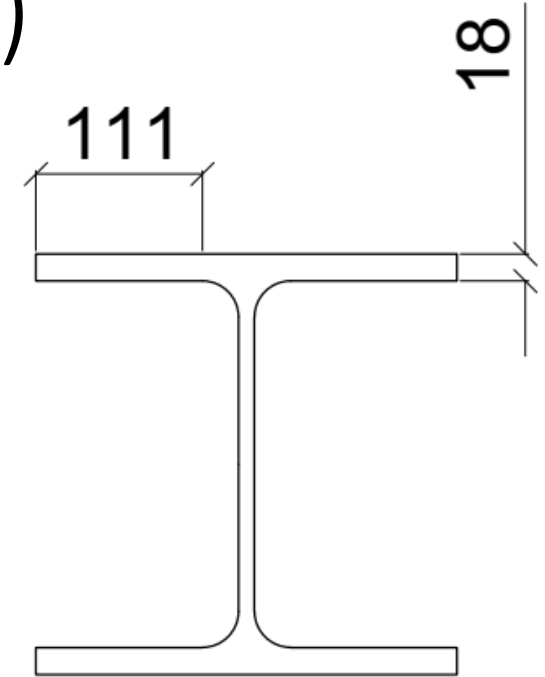


- Suhdeluku $c/t \rightarrow 196\text{mm}/10,5\text{mm} = 18,7$
- Koska 18,7 on pienempi kuin $72 \times \varepsilon$, niin uuman osalta poikkileikkaus kuuluu luokkaan PL1.

Miten teräspalkin poikkileikkausluokka määräytyy (esimerkki HEB280 S235)

- Mitta $c = 111$ mm
- Laipan paksuus $t = 18$ mm
- ε (S235) = 1,00

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$



- Suhdeluku $c/t \rightarrow 111\text{mm}/18\text{mm} = 6,2$
- Koska 6,2 on pienempi kuin $9 \times \varepsilon$, niin uuman osalta poikkileikkaus kuuluu luokkaan PL1.
- HEB280 kuuluu siis poikkileikkausluokkaan 1.

Nurjahdusmitoitus (käsitellään tarkemmin myöhemmässä vaiheessa)

- Nurjahduksessa teräsprofiili pääsee sivuttaissuunnassa nurjahtamaan, kun siihen kohdistuu voimakas puristusvoima (samaa aikaan voi esiintyä myöskin taivutusta). Yleensä nurjahdus tapahtuu heikon akselin(z-z) ympäri, jollei sitä ole rakenteellisesti estetty.
- Kriittiseen nurjahduskuormaan vaikuttavat seuraavat asiat:
 - Teräsrakenneposan dimensiot, paksuudet
 - Palkin pituus (pidempi nurjahtaa helpommin)
 - Palkin päiden tuenta (vaikuttaa laskennalliseen kriittiseen nurjahduspituuteen)
 - Nurjahdussuunta (yleensä tarkastellaan nurjahdus heikon akselin suuntaan)
- Aluksi tarkastellaan teräsprofiilin nurjahduskäyrä, jonka perusteella valitaan epätarkkuustekijä α .

Nurjahdusmitoitus (palkit)

- Epätarkkuustekijän avulla otetaan huomioon teräsprofiilin valmistuksesta aiheutuvien alkujännitysten ja geometrinen epätarkkuuksien nurjahduskestävyyttä heikentävä vaikutus eri nurjahdusmuodoilla.
- Aluksi tarkastellaan korkeuden ja leveyden suhteen oikea raja-arvo.
- Sitten tarkastellaan nurjahdusakselin suunta ja sitä vastaava nurjahduskäyrä

	POIKKILEIKKAUS	RAJAT	NURJAHDUS KO. AKSELIN SUHTEEN	NURJAHDUS KÄYRÄ-S235-S420	
Valssatut profiilit		$h/b > 1,2$	$t_r \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	a b
			$40 \text{ mm} < t_r \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b c
		$h/b \leq 1,2$	$t_r \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b c
			$t_r > 100 \text{ mm}$	y - y z - z	d d
Rakenneputket		Kuumamuovattu	Kaikki	a	
		Kylmämuovattu	Kaikki	c	
Rakenneputket			Kaikki	c	
L-feräkset			Kaikki	b	

Nurjahdusmitoitus (palkit)

- Esimerkiksi HEB280
- h/b suhdeluku on $280/280 = 1,0$ eli luku on $\leq 1,2$
- Laipan paksuus t_f oli 18mm.
- Nurjahdus tapahtuu heikon akselin $z - z$ ympäri, niin nurjahduskäyrä on tällöin **c**
- Taulukosta 16 ohjeesta katsotaan oikea arvo.

	POIKKILEIKKAUS	RAJAT	NURJAHDUS KO. AKSELIN SUHTEEN	NURJAHDUS KÄYRÄ-S235-S420	
Valssatut profiilit		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	a b
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b c
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b c
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y - y z - z	d d
Rakenneputket		Kuumamuovattu	Kaikki	a	
		Kylmämuovattu	Kaikki	c	
Rakenneputket			Kaikki	c	
L-teräkset			Kaikki	b	

Epätarkkuustekijä α

Taulukko 16. Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijät α ja niitä vastaavat sauvojen alkuepätarkkuudet e_0/L /6/.

Nurjahduskäyrä	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α	0,21	0,34	0,49	0,76
Kimmoiteorian mukainen analyysi e_0/L	1/300	1/250	1/200	1/250
Plastisuusteorian mukainen analyysi e_0/L	1/250	1/200	1/150	1/100

- Eli esimerkissä valittaisiin arvoksi $\alpha = 0,49$.

Puristussauvan mitoitus

- Mitoittaessa puristussauvaa esim. sisäpuolisesti tuettu tukiseinä, tulee puristussauvan osalta tehdä seuraavat tarkastelut:
 - Sauvan taivutuskestävyyden tarkistaminen $M_{c,Rd} \geq M_{Ed}$
 - Sauvan puristuskestävyyden tarkistaminen $N_{pl,Rd} \geq N_{Ed}$
 - Sauvan nurjahdusmitoituksen tarkistaminen puristukselle $N_{b,Rd} \geq N_{Ed}$
 - Sauvan nurjahdusmitoituksen tarkistaminen (huomioiden puristus- ja taivutus)
- Jos sauvaan vaikuttaisi taivutusta myös toisessa poikkileikkaussuunnassa, vaikeutuisi tarkastelu jonkin verran eikä sitä ole ohjeessa käsitelty.

Puristussauvan mitoitus

Puristussauvan mitoituksen kulku:

1. Aluksi määritetään palkkiin kohdistuvat kuormitukset (N_{Ed} , M_{Ed})
2. Valitaan palkki ja tarkistetaan tuentatapa sekä määritetään teräslaji f_y
3. Lasketaan kriittinen nurjahduskuorma N_{cr}
4. Tarkistetaan ehto N_{Ed} / N_{cr} (jos ehto on $\leq 0,04$ ei nurjahdusta tarvitse huomioida)
5. Määritetään aputermit $\bar{\lambda}$, Φ ja vähennyskerroin χ (jos hoikkuus $\bar{\lambda} \leq 0,2$ ei nurjahdusta tarvitse huomioida)
6. Tarkistetaan ehdot $N_{Rd} \geq N_{Ed}$ ja $M_{c,Rd} \geq M_{Ed}$
7. Jos palkkiin kohdistuu taivutusta, tulee määrittää myös kerroin k_{yy}

8. Tarkistetaan loppuehto:
$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot N_{c,Rd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{c,Rd}} \leq 1,0$$

χ_{LT} on yleensä 1,0 (jos poikkileikkaus ei ole altis vääntömuodonmuutoksille tai kun kuormitus on laipan suuntainen)

Puristussauvan mitoitus (esimerkki)

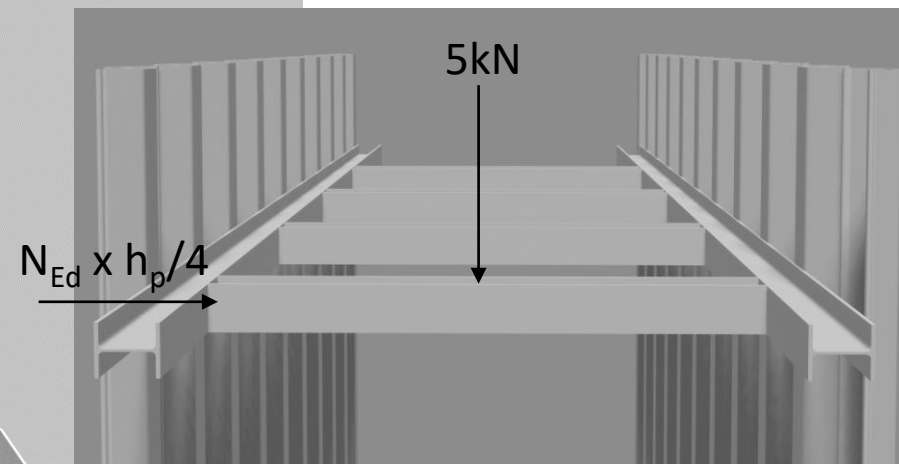
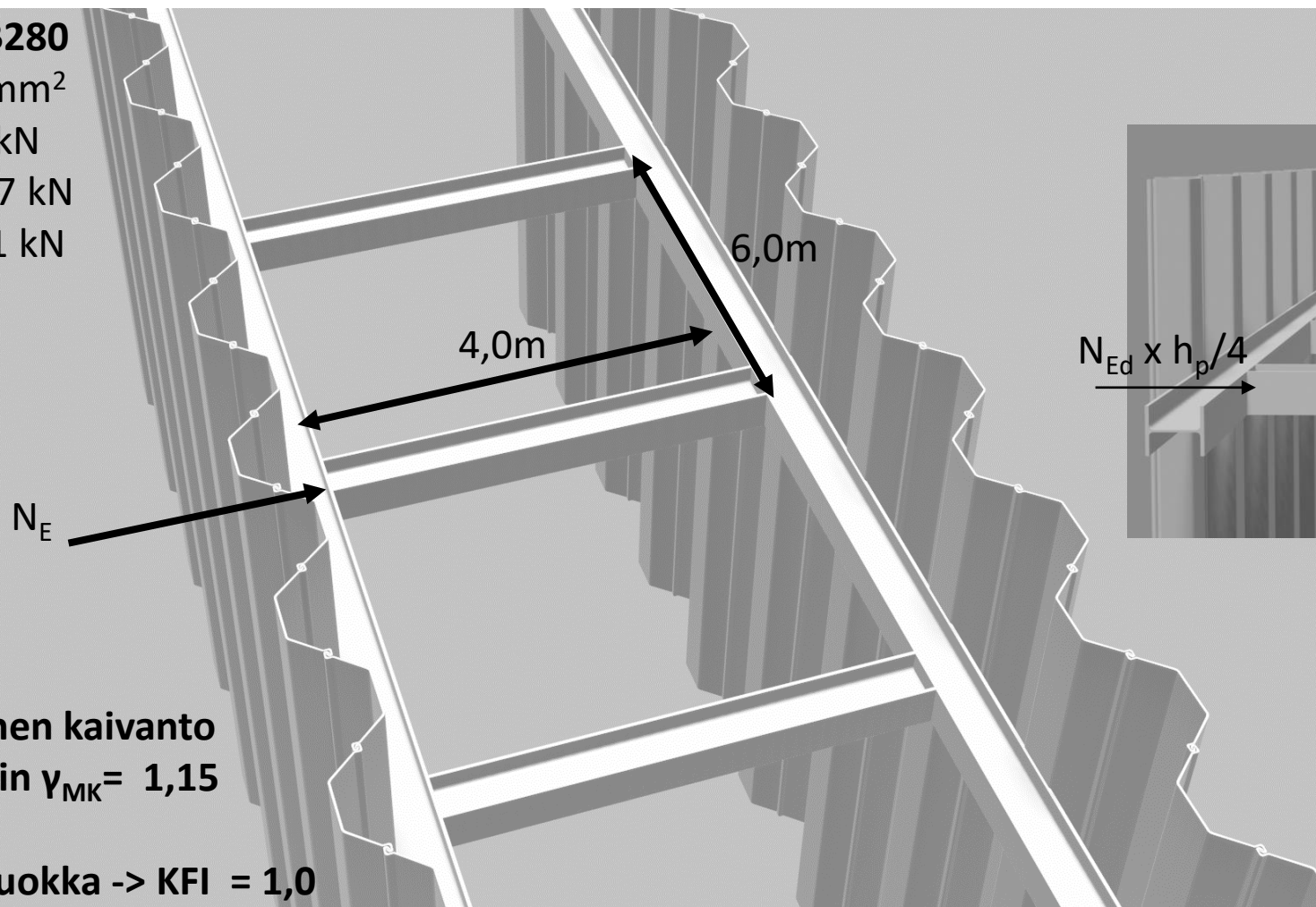
Palkki HEB280

$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

$N_{Ek,G} = 236 \text{ kN}$

$N_{Ek,G+Q} = 417 \text{ kN}$

$\Delta N_{Ek,Q} = 181 \text{ kN}$



**Työnaikainen kaivanto
mallikerroin $\gamma_{MK} = 1,15$**

CC2/RC2-luokka -> KFI = 1,0

Puristussauvan mitoitus

Määritetään palkkiin kohdistuvat kuormitukset (N_{Ed})

Yhtälöiden 6.10a ja 6.10b perusteella mitoitusvoimaksi saadaan:

$$6.10a = 1,35 \times 236 \text{ kN} \rightarrow 319 \text{ kN}$$

$$6.10b = 1,15 \times 236 \text{ kN} + 1,50 \times 181 \text{ kN} \rightarrow \mathbf{543 \text{ kN}}$$
 (määrävä tapaus!)

$$N_{Ed} = N_{Ek} \times \gamma_{MK} = 543 \text{ kN} \times 1,15 = \mathbf{624 \text{ kN}}$$

Puristussauvan mitoitus

Määritetään palkkiin kohdistuvat kuormitukset (M_{Ed})

Teräspalkin omapaino:

$$\Delta M_{Ek1} = p \times L^2 / 8 = (103 \times 9,81 / 1000) \text{ kN/m} \times (4,0\text{m})^2 / 8 \rightarrow 2,0 \text{ kNm}$$

Koska kyseessä omapaino, niin kerrotaan kertoimella 1,35 ja mallikertoimella 1,15 \rightarrow

$$\Delta M_{Ed1} = \Delta M_{Ek1} \times 1,35 \times \gamma_{MK} \rightarrow 2,0 \text{ kNm} \times 1,35 \times 1,15 \rightarrow 3,1 \text{ kNm}$$

Puristusvoiman epäkeskisyydestä syntyvä taivutusmomentti teräspalkkiin:

$$\Delta M_{Ed2} = N_{Ed} \times h_p / 4 \rightarrow 624 \text{ kN} \times 0,28\text{m} / 4 \rightarrow 43,7 \text{ kNm}$$

Oletettu pistekuorma 5kN keskeisesti teräspalkkiin:

$$\Delta M_{Ed3} = 5,0 \text{ kN} \times L / 4 \rightarrow 5,0 \text{ kN} \times 4\text{m} / 4 \rightarrow 5,0 \text{ kNm}$$

Puristussauvan mitoitus

Määritetään palkkiin kohdistuvat taivutuskuormitukset (M_{Ed})

$$\Sigma M_{Ed} = \Delta M_{Ed1} + \Delta M_{Ed2} + \Delta M_{Ed3} = 3,1 + 43,7 + 5,0 = 51,8 \text{ kNm}$$

Puristussauvan mitoitus

Palkkina HEB280. Palkin pituus 4,0m ja nurjahduspituus $L_{cr} = 4,0m$.
Kimmokerroin $E=210000 \text{ N/mm}^2$ ja jäyhyysmomentti $I=6595\text{cm}^4$

Lasketaan kriittinen nurjahduskuorma N_{cr} :

$$N_{cr} = E \cdot I \cdot \frac{\pi^2}{L_{cr}^2} = 210000 \text{ N/mm}^2 \times 6595 \times 10^4 \text{ mm}^4 \times \pi^2 / (4000 \text{ mm})^2$$

→ 8543 kN

Suhdeluku $N_{Ed} / N_{cr} = 624 \text{ kN} / 8543 \text{ kN} \rightarrow 0,073 \geq 0,04$ **Nurjahdus tarkistettava!!**

Puristussauvan mitoitus

Määritetään muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}$ ja aputermi Φ

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{ps} \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{13140 \text{ mm}^2 \cdot 235 \text{ N/mm}^2}{8543000 \text{ N}}} = 0,601$$

Lasketaan aputermi Φ

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (\alpha = 0,49 \text{ nurjahduskäyrä c})$$

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,601 - 0,2) + 0,601^2] = 0,779$$

Puristussauvan mitoitus

Lasketaan vähennyskerroin χ

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,779 + \sqrt{0,779^2 - 0,601^2}} = 0,785$$

Puristussauvan mitoitus

- Sauvan puristuskestävyys

$$N_{c,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A_{ps} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

Poikkileikkauksen pinta-ala
Teräslajin myötöraja
poikkileikkausluokat 1, 2 ja 3
Osavarmuusluku 1,0

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff,t} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

poikkileikkausluokka 4

- Esim. HEB280 $\rightarrow N_{pl,Rd} = 13140\text{mm}^2 \times 235 \text{ N/mm}^2 / 1,0 = 3088 \text{ kN}$

- Mitoitusehto $N_{Ed} \leq N_{c,Rd}$

Puristussauvan mitoitus

- Sauvan taivutuskestävyys

$$M_{c,Rd} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

Taivutusvastus (plastinen)

Teräslajin myötöraja

Osavarmuusluku 1,0

- Esim. HEB280 $\rightarrow M_{c,Rd} = 717600 \text{ mm}^3 \times 235 \text{ N/mm}^2 / 1,0 \rightarrow 169 \text{ kNm}$

- Mitoitusehto $M_{Ed} \leq M_{c,Rd}$

Puristussauvan mitoitus

Tarkistetaan mitoitusehdot $N_{Rd} \geq N_{Ed}$ ja $M_{c,Rd} \geq M_{Ed}$

$N_{pl,Rd} \geq N_{Ed} \rightarrow 3088 \text{ kN} \geq 624 \text{ kN} \rightarrow \text{OK!}$ ($N_{pl,Rd}$ laskettu sivulla 31)

$M_{c,Rd} \geq M_{Ed} \rightarrow 169 \text{ kNm} \geq 51,8 \text{ kNm} \rightarrow \text{OK!}$ ($M_{c,Rd}$ laskettu sivulla 32)

Puristussauvan mitoitus

Tarkistetaan nurjahduksen mitoitusehto $N_{b,Rd} \geq N_{Ed}$

$$N_{b,Rd} = N_{pl,Rd} \times \chi = 3088 \text{ kN} \times 0,785 = 2424 \text{ kN}$$

$$N_{b,Rd} \geq N_{Ed} \rightarrow 2424 \text{ kN} \geq 624 \text{ kN} \text{ (OK!!!!)}$$

Puristussauvan mitoitus

Tarkistetaan yhdistetyn taivutuksen ja puristusvoiman vaikutus:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot N_{c,Rd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{c,Rd}} \leq 1,0$$

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{rk}} \right)$$

$$= 1,0 \cdot \left(1 + (0,601 - 0,2) \cdot \frac{624}{0,785 \cdot 3088} \right) = 1,10$$

Puristussauvan mitoitus

Tarkistetaan yhdistetyn taivutuksen ja puristusvoiman vaikutus:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi \cdot N_{c,Rd}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{c,Rd}} \leq 1,0$$

Oletus 1,0 (sauva ei kiepahda)

$$\frac{624kN}{0,785 \cdot 3088 kN} + 1,1 \cdot \frac{51,8}{1,0 \cdot 169} \leq 1,0$$

$$0,257+0,337 \leq 1,0 \rightarrow 0,594 \leq 1,0 \quad \text{Mitoitus ok!}$$