Kapasitetskontroll i ULS

<u>Nødvendige parametere:</u>
Dimensjoner på tverrsnitt: $bxh = 400\ x\ 1500mm$
Lamelltykkelsen: $t = 50\ mm$
Pilhøyde: $f = 13,5\ m$
Buelengde: $L = 45\ m$
Avstand mellom buer: $a = 7,2\ m$
Velger T21

<u>Dimensjonerende krefter i bruddgrensetilstand</u>
$M = 2253\ kNm$ (¼ - dels punkt)
$N = 1314\ kN$ (opplager)
$V = 213\ kN$ (buetopp)

Klimaklasse 1
$\gamma_M = 1,25$ for konstruksjonstre
$k_{mod} = 0,90$ for korttidslast (tabell 3.1, EK5)

<u>Karakteristiske verdier for fasthet, T21 (NS-EN 338:2016):</u>
$f_{m,k} = 29\ MPa$
$f_{c,0,k} = 25\ MPa$
$f_{t,90,k} = 0,4\ MPa$
$f_{v,k} = 4\ MPa$

I henhold til gjeldende regler i EK5, skal bøye- og strekkfasthet korrigeres for størrelseseffekt.
Høydefaktor, EK5-3.2 for konstruksjonstre:
$k_h = 1,0$ fordi $h > 150\ mm$

Formel for dimensjonerende fasthet: $f_d = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M}$

<u>Dimensjonerende fastheter:</u>
$f_{m,d} = 0,90 \cdot \frac{29}{1,25} = 20,88\ MPa$
$f_{c,0,d} = 0,90 \cdot \frac{25}{1,25} = 18\ MPa$
$f_{t,90,d} = 0,90 \cdot \frac{0,4}{1,25} = 0,288\ MPa$
$f_{v,d} = 0,90 \cdot \frac{4}{1,25} = 2,88\ MPa$

Indre radius, r_{in}:

Formelen for en elliptisk bue vil gi radiusen til bueelementet vårt, benytter oss av “Pythagoras theorem”

$r = \frac{a^2+b^2}{2\,a} = 25,5\,m \rightarrow r_{in} = r - h/2 = 25,5 - 0,75 = 24,75\,m$

der $a = 13,5\,m$, pilhøyden til buen

$b = 22,5\,m$, halve lengden av buen

For krumme bjelker, i henhold til EK5-1 lign. (6.49), får vi en verdi for k_r:

Vi har $\frac{r_{in}}{t} = 495 > 240 \rightarrow k_r = 1,0$

EK5-1 lign. (6.43):

$$k_l = k_1 + k_2\left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + k_3\left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2 + k_4\left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^3$$

$\alpha_{ap} = 0$ (EK5 → fig. 6.9)

h_{ap} er høyden til tverrsnittet i toppunktet → $h_{ap} = 1800\,mm$

$r = 25500\,mm$

$k_1 = 1 + 1.4\,\tan(\alpha_{ap}) + 5,4\tan^2(\alpha_{ap}) = 1$

$k_2 = 0,35 - 8\,\tan(\alpha_{ap}) = 0,35$

$k_3 = 0,6 + 8,3\,\tan(\alpha_{ap}) - 7,8\tan^2(\alpha_{ap}) = 0,6$

$k_4 = 6\tan^2(\alpha_{ap}) = 0$

Det gir oss:

$$k_l = 1 + 0,35\left(\frac{1500}{25500}\right) + 0,6\left(\frac{1500}{25500}\right)^2 + 0 = 1,023$$

Kombinert bøyning og aksialkraft (EK5-1, pkt. 6.3.2):

$M_{y,d} = 2253\,kNm \quad \rightarrow \quad \sigma_{M,y,d} = \frac{k_l \cdot M_{y,d}}{W} = \frac{1,023 \cdot 2253 \cdot 10^6}{1/6 \cdot 400 \cdot 1500^2} = 15,36\,MPa$

$\sigma_{M,z,d} = 0$

$N_d = 1314\,kN \quad \rightarrow \quad \sigma_{c,0,d} = \frac{N}{A} = \frac{1314 \cdot 10^3}{400 \cdot 1500} = 2,19\,MPa$

Lineær statisk analyse:

$L_{k,y} \approx 1,25 \cdot s$, der s er halve buelengden. $s = 26,6\,m$

Knekklengde om sterk akse:

$L_{k,y} = 1,25 \cdot 26,6\,m = 33,25\,m$

Knekning i buens plan om sterk akse (y-akse):

Slankhet: $\lambda_y = \frac{L_{ky}}{i_y} = \frac{33,25\ m}{0,289 \cdot 1,5\ m} = 76,701$

der $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{1/12 \cdot b\, h^3}{b\, h}} = \frac{h}{\sqrt{12}} = 0,289\, h$

$E_{0,05} = 8700\ MPa$

$f_{c,0,k} = 25\ MPa$

EK5-1, lign. (6.21) → $\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi}\sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{76,701}{\pi}\sqrt{\frac{28}{8700}} = 1,31$

$\beta_c = 0,2$ for konstruksjonstre

EK5-1, lign. (6.27) → $k_y = 0,5\left[1 + 0,2\,(1,31 - 0,3) + 1,31^2\right] = 1,46$

$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} = \frac{1}{1,46 + \sqrt{1,46^2 - 1,31}} = 0,48$

$k_m = 0,7$ for konstruksjonstre med rektangulært tverrsnitt, iht. EK5-1 pkt. 6.1.6.

$k_r = 1,0$

Kontroll for knekning (EK5-1 lign. (6.23)):

$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y}\, f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_r\, f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0$

$\frac{2,19}{0,48 \cdot 18} + \frac{15,36}{1,0 \cdot 20,88} + 0 = 0,99 \leq 1,0$ OK!

Vipping med aksialkraft (EK5-1, pkt. 6.3.3):
Lastbredde: $a = 7,2\ m$
Forutsetning: fastholdt sideveis i fotpunktene.
Forutsetning: buens tverrsnitt er fastholdt mot rotasjon om buens akse i de 4 åsene inne på buen med en avstand på 9 meter.

$$\rightarrow L_{ef} = 9000\ mm$$

For bartre med fast rektangulært tverrsnitt (EK5-1, lign. (6.32)):

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78\ b^2}{h\ L_{ef}}\ E_{0,05}$$

Dette gir:

$$\sigma_{crit} = \frac{0,78 \cdot 400^2}{1500 \cdot 9000} \cdot 8700 = 80,427\ MPa$$

og

$$\lambda_{rel,\ m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{29}{80,427}} = 0,60$$

For $\lambda_{rel,m} \leq 0,75$ (EK5, lign. (6.34))

$$\Rightarrow \qquad k_{crit} = 1,0$$

Fra tidligere:

$\sigma_{m,y,d} = 15,36\ MPa$

$\sigma_{c,0,d} = 2,19\ MPa$

$f_{m,d} = 20,88\ MPa$

$f_{c,0,d} = 18,00\ MPa$

Kontroll: $\left(\frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot k_r \cdot f_{m,y,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$ **EK5-1**: Lign. (6.35)

$\left(\frac{15,36}{1,0 \cdot 1,0 \cdot 20,88}\right)^2 + \frac{2,19}{0,46 \cdot 18,00} = 0,80 \leq 1$ OK!

Kontroll av tverrstrekk:

EK5-1, lign. (6.54):

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \cdot \frac{6\,M}{b \cdot h^2} - 0,6\,\frac{p_d}{b}$$

der p_d er det fordelte trykket på toppen av bjelken i møneområdet.

$$p_d = 1,2 \cdot g_{k,tak} \cdot 1,5 \cdot q_{s,k} = 1,2 \cdot 7,2 + 1,5 \cdot 50,4 = 84,24\,kN/m$$

$$k_p = 0,25 \cdot \frac{h}{r} = 0,25 \cdot \frac{1,5}{25,5} = 0,0147$$

Det gir oss:

$$\sigma_{t,90,d} = 0,0147 \cdot \frac{6 \cdot 2253 \cdot 10^6}{400 \cdot 1500^2} - 0,6 \cdot \frac{84,24}{400} = 0,0945$$

Kontroll for tverrstrekk: EK5-1, ligning (6.53)

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1,0$$

$k_{dis} = 1,4$ for en krum komponent

$k_{vol} = 1,0$ for konstruksjonstre

Maksimum moment opptrer i buens fjerdedels-punkt. I det punktet er skjærkraften null, og vi kan se bort fra skjærspenningen.

$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} = \frac{0,0945}{1,4 \cdot 1,0 \cdot 0,288} = 0,23 < 1,0$$ OK!

Skjærkontroll (EK5-1, pkt. 6.1.7**)**
Fra tidligere har vi at:
$V = 213\ kN$
$f_{v,d} = 2,88\ MPa$

Maksimum skjær opptrer i buetoppen.
I det punktet er momentet null, og vi kan se bort fra bøyespenningen.

Det gir dimensjonerende skjærspenning:
$$\tau_d = \frac{3 \cdot V_d}{2 \cdot k_{cr} \cdot b \cdot h} = \frac{3 \cdot 213 \cdot 10^3}{2 \cdot 0{,}67 \cdot 400 \cdot 1500} = 0,795\ MPa$$

der $k_{cr} = 0,67$ for konstruksjonstre.

$\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} = \frac{0{,}795}{2{,}88} = 0,28 \leq 1,0$ OK!

Kontroll av lasttilfellet 4: Egenlast + vindsug
Hvis egenlasten til taket nøytraliserer vindsuget, er det tilstrekkelig kapasitet.

Altså, $1,2 \cdot (g_{k,bue} + g_{k,tak}) - 1,5 \cdot q_{k,vind} \geq 0$

$g_{k,bue} = 4,2\ kN/m$
$g_{k,tak} = 7,2\ kN/m$
$q_{k,vind} = -\ 7,27\ kN/m$

Det gir oss:
$1,2 \cdot (4,2 + 7,2) - 1,5 \cdot 7,27 = 2,775\ kN/m \geq 0$ OK!