$$\phi_{LT} := 0.5\cdot\left[1 + \alpha_{LT}\cdot\left(\lambda_{LT} - \lambda_{LT.0}\right) + \beta\cdot\lambda_{LT}^{2}\right] \qquad \phi_{LT} = 0.815$$

β fattades i sista termen

Detta fel finns även i exempel 2 -- 13

$$\chi_{LT} := \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^{2} - \beta\cdot\lambda_{LT}^{2}}} \qquad \chi_{LT} := if\left(\lambda_{LT} < \lambda_{LT.0}, 1, \chi_{LT}\right) \qquad \chi_{LT} = 0.812$$

$$\chi_{LT} := if\left(\chi_{LT} > \frac{1}{\lambda_{LT}^{2}}, \frac{1}{\lambda_{LT}^{2}}, \chi_{LT}\right) \qquad \chi_{LT} = 0.812$$

Korrektionsfaktor k_c från [1] Tabell 6.6 $\quad k_c := 0.94 \qquad k_c = 0.940$

[1] 6.3.2.3(2) $\quad f := 1 - 0.5\cdot\left(1 - k_c\right)\cdot\left[1 - 2\cdot\left(\lambda_{LT} - 0.8\right)^{2}\right] \qquad f := if(f > 1, 1, f) \qquad f = 0.970$

$$\chi_{LT} := \frac{\chi_{LT}}{f} \qquad \chi_{LT} := if\left(\chi_{LT} > 1, 1, \chi_{LT}\right) \qquad \chi_{LT} = 0.837$$

Vridknäckning

Knäckningslängd $\qquad l_{cr.z} = 7200\cdot mm$

[2] Annex I.3 $\quad i_s := \sqrt{\frac{I_y + I_z}{A_{gr}}} \qquad k_w = 1.000 \qquad i_s = 150.4\cdot mm$

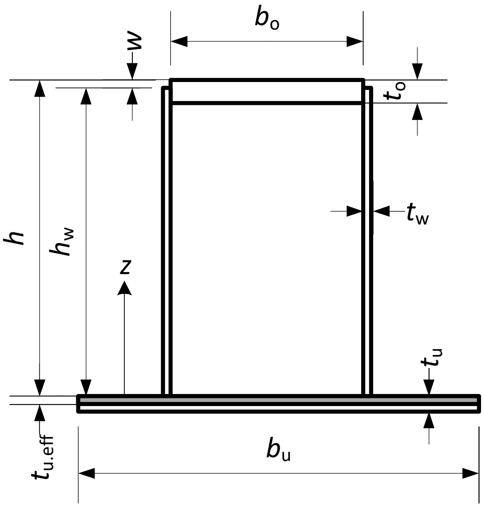
Torsionsknäckningslast $\quad N_{cr.T} := \frac{1}{i_s^{2}}\cdot\left[G\cdot I_t + \frac{\pi^{2}\cdot E\cdot I_w}{\left(k_w\cdot l_{cr.z}\right)^{2}}\right] \qquad N_{cr.T} = 9.791 \times 10^{3}\cdot kN$

Tvärkraftsbärförmåga

För valsade I-balkar kan tvärkraftsbärförmågan kontrolleras enligt EN1993-1-1 eller EN1993-1-5. Den första eurokoden ger den plastiska bärförmågan och en kontroll av den är tillämplig med en elastisk kontroll. I interaktionsformler behövs en bärförmåga även med hänsyn till buckling. Därför bör EN1993-1-5 användas (till vilken hänvisas till EN1993-1-1).

Tvärsnittsbärförmåga för hattvärsnitt

Dimension och material



Svetsutrymme $w := 6 \cdot mm$

Tvärsnittshöjd / livhöjd: $h := 400 \cdot mm$ $h_w := h - w = 394 \cdot mm$

Flänsbredder $b_o := 160 \cdot mm$ $b_u := 360 \cdot mm$

Livtjocklek: $t_w := 6 \cdot mm$

Flänstjocklekar: $t_o := 22 \cdot mm$ $t_u := 14 \cdot mm$

Stål $f_y := \left(\begin{array}{l} 355 \;\; if \; t_o \le 16 \cdot mm \\ 345 \;\; otherwise \end{array} \right) \cdot MPa = 345 \cdot MPa$ $f_u := 450 \cdot MPa$

Partialcoefficienter: $\gamma_{M0} \equiv 1.0$ $E := 210000 \cdot MPa$

Tvärsnittsarea $A := b_u \cdot t_u + 2 \cdot t_w \cdot h_w + b_o \cdot t_o = 13288 \cdot mm^2$

Överfläns $A_o := b_o \cdot t_o = 3520 \cdot mm^2$

Underfläns $A_u := b_u \cdot t_u = 5040 \cdot mm^2$

Ursprungsvärden:

$t_{u0} := t_u$ $t_{o0} := t_o$

$t_{w0} := t_w$ $h_{w0} := h_w$

Statiskt moment $S_y := A_o \cdot (h - 0.5 \cdot t_o) + t_w \cdot h_w^2 - 0.5 \cdot b_u \cdot t_u^2 = 2.265 \times 10^6 \cdot mm^3$

Tyngdpunkt $z_{gc} := \dfrac{S_y}{A} = 170.5 \cdot mm$

Tröghetsmoment $I_y := A_o \cdot (h - 0.5 \cdot t_o)^2 + \dfrac{b_o \cdot t_o^3}{12} + \dfrac{2 \cdot t_w \cdot h_w^3}{3} + \dfrac{b_u \cdot t_u^3}{3} - A \cdot z_{gc}^2 = 3.916 \times 10^8 \cdot mm^4$

Elastiskt böjmotstånd

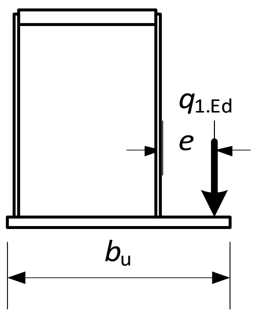
Till halva flänstjockleken

$W_{el.u} := \dfrac{I_y}{z_{gc} + 0.5 \cdot t_u} = 2.206 \times 10^6 \cdot mm^3$ $W_{el.o} := \dfrac{I_y}{h - z_{gc} - 0.5 \cdot t_o} = 1.792 \times 10^6 \cdot mm^3$

$W_{el} := min(W_{el.u}, W_{el.o}) = 1.792 \times 10^6 \cdot mm^3$

Plastiskt böjmotstånd

Lasten på underflänsen ger böjande moment i tvärled. Om lasten är stor (tvärböjande momentet > 0.19 x moment- bärförmågan av underflänsen) reduceras därför underflänsens bärförmåga för drag eller tryck genom att en effektiv tjocklek används. Detta fenomen behandlas senare, men i formlerna för plastiskt böjmotstånd används den effektiva tjockleken $t_{u.eff} := t_u$.



Exemplet kan även användas för osymmertisk hattbalk.

Plastiskt böjmotstånd om neutrala lagret hamnar i liven.

Tvärsnittsarea $A := b_u \cdot t_{u.eff} + 2 \cdot t_w \cdot h_w + b_o \cdot t_o = 1.329 \times 10^4 \cdot mm^2$

Överfläns $A_o := b_o \cdot t_o = 3.52 \times 10^3 \cdot mm^2$

Underfläns $t_{u.eff} = 14 \cdot mm$ $A_u := b_u \cdot t_{u.eff} = 5.04 \times 10^3 \cdot mm^2$

Plastiska neutrala lagret

$$PNL := \left| \begin{array}{l} \text{"i underflänsen"} \;\; if \; A_u > 0.5 \cdot A \\ \text{"i överflänsen"} \;\; if \; A_o > 0.5 \cdot A \\ \text{"i liven"} \;\; otherwise \end{array} \right. = \text{"i liven"}$$

$z := \dfrac{0.5 \cdot A - A_u}{2 \cdot t_w} = 133.7 \cdot mm$ $0.5 \cdot h_w = 197 \cdot mm$ $Koll := \dfrac{2 \cdot t_w \cdot z + A_u}{A} = 0.500$

Tryckta zonens bredd (för tvärsnittsklassificering nedan) $\alpha := \frac{h_w - z}{h_w} = 0.661$

$$W_{pl.w} := A_o \cdot (h - z - 0.5 \cdot t_o) + t_w \cdot (h_w - z)^2 + t_w \cdot z^2 + A_u \cdot (z + 0.5 \cdot t_{u.eff}) = 2.122 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Plastiskt böjmotstånd om neutrala lagret hamnar i underflänsen

$t_{u.eff} := 40 \cdot mm$

$A := b_u \cdot t_{u.eff} + 2 \cdot t_w \cdot h_w + b_o \cdot t_o = 2.265 \times 10^4 \cdot mm^2$ $\quad t_w = 6 \cdot mm$

$A_o := b_o \cdot t_o = 3.52 \times 10^3 \cdot mm^2$

$A_u := b_u \cdot t_{u.eff} = 1.44 \times 10^4 \cdot mm^2$

Plastiska neutrala lagret

$$PNL := \begin{vmatrix} \text{"i underflänsen"} \;\; \mathit{if} \;\; A_u > 0.5 \cdot A \\ \text{"i överflänsen"} \;\; \mathit{if} \;\; A_o > 0.5 \cdot A \\ \text{"i liven"} \;\; \mathit{otherwise} \end{vmatrix} = \text{"i underflänsen"}$$

$z := \frac{0.5 \cdot A}{b_u} - t_{u.eff} = -8.544 \cdot mm$ $\quad t_{u.eff} + z = 31.456 \cdot mm$

$$W_{pl.u} := A_o \cdot (h - z - 0.5 \cdot t_o) + t_w \cdot (h_w - z)^2 - t_w \cdot z^2 + 0.5 \cdot b_u \cdot z^2 + 0.5 \cdot b_u \cdot (t_{u.eff} + z)^2 = 2.562 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Plastiskt böjmotstånd om neutrala lagret hamnar i överflänsen

$t_{u.eff} := 10 \cdot mm$ $\quad t_o := 50 \cdot mm \quad t_w := 4 \cdot mm \quad h_w := 400 \cdot mm$

$A := b_u \cdot t_{u.eff} + 2 \cdot t_w \cdot h_w + b_o \cdot t_o = 1.480 \times 10^4 \cdot mm^2$

$A_o := b_o \cdot t_o = 8 \times 10^3 \cdot mm^2$

$A_u := b_u \cdot t_{u.eff} = 3.6 \times 10^3 \cdot mm^2$

Plastiska neutrala lagret

$$PNL := \begin{vmatrix} \text{"i underflänsen"} \;\; \mathit{if} \;\; A_u > 0.5 \cdot A \\ \text{"i överflänsen"} \;\; \mathit{if} \;\; A_o > 0.5 \cdot A \\ \text{"i liven"} \;\; \mathit{otherwise} \end{vmatrix} = \text{"i överflänsen"}$$

$h_w > z$

$z := h - \frac{0.5 \cdot A + 2 \cdot t_w \cdot (h - h_w)}{b_o + 2 \cdot t_w} = 356 \cdot mm$ $\quad h - z = 44.05 \cdot mm \quad h_w - z = 44.05 \cdot mm$

$$W_{pl.o} := t_w \cdot (h_w - z)^2 + t_w \cdot z^2 + A_u \cdot (z + 0.5 \cdot t_{u.eff}) + 0.5 \cdot b_o \cdot (h - z)^2 + 0.5 \cdot b_o \cdot [t_o - (h - z)]^2 = 1.972 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Återgå till ursprungsmått: $\quad t_u := t_{u0} = 14 \cdot mm \quad t_o := t_{o0} = 22 \cdot mm \quad t_w := t_{w0} = 6 \cdot mm \quad h_w := h_{w0} = 394 \cdot mm$

$b_o = 160 \cdot mm$

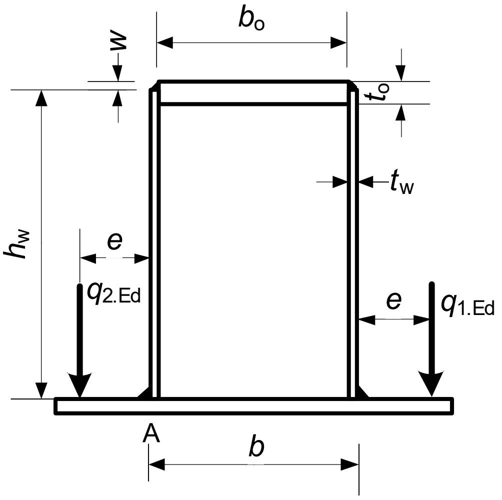
Vridstyvhet och vridmotstånd

$a := b_o + t_w = 166 \cdot mm$ $\quad b := h_w + 0.5 \cdot t_u = 401 \cdot mm$

Vridtyvhetens tvärsnitts-faktor för fyrkantdelen $\quad I_t := \frac{4 \cdot a^2 \cdot b^2}{2 \cdot \frac{b}{t_w} + \frac{a}{t_o} + \frac{a}{t_u}} = 1.158 \times 10^8 \cdot mm^4$

Eftersom överflänsen ofta är tjock tillkommer $\quad I_t := I_t + b_o \cdot t_o^3 \cdot \frac{1}{3} = 1.164 \times 10^8 \cdot mm^4$ $\quad$ (Försumbart i detta exempel)

Vridmotstånd $W_t := 2 \cdot a \cdot b \cdot t_w = 7.988 \times 10^5 \cdot mm^3$



Tvärkraft i ett liv av vridning

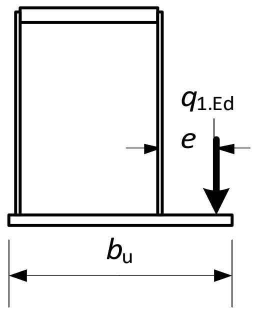
Lastangreppslinje $e := 85 \cdot mm$

Laster $q_{1.Ed} := 80 \cdot \frac{kN}{m}$

$q_{2.Ed} := 40 \cdot \frac{kN}{m}$

Spännvidd $L := 6 \cdot m$

Vridande moment $T_{Ed} := (q_{1.Ed} - q_{2.Ed}) \cdot \left(\frac{b_o}{2} + t_w + e \right) \cdot \frac{L}{2} = 20.52 \cdot kN \cdot m$



Skjuvspänning av vridning $\tau_T := \frac{T_{Ed}}{W_t} = 25.7 \cdot MPa$

Tvärkraft i liv av vridning $V_{T.Ed} := \tau_T \cdot h_w \cdot t_w = 60.7 \cdot kN$

Tvärkraft av transversallasten $V_{V.Ed} := (q_{1.Ed} + q_{2.Ed}) \cdot \frac{L}{2} = 360 \cdot kN$

Summa tvärkraft i ett liv $V_{Ed} := V_{T.Ed} + 0.5 \cdot V_{V.Ed} = 241 \cdot kN$

Rättelse $0.5 \cdot V_{V.Ed}$

Gäller även osymmetriskt tvärsnitt eftersom skjuvcentrum ligger mitt i fyrkantdelen

Tvärkraftsbärförmåga

Endast bidraget från livet tas med eftersom avståndet mellan tväravstyvningarna är stort.

Vid de tunna liven är $f_{yv} := 355 \cdot MPa$ $\quad k_\tau := 5.34$ $\quad \varepsilon := \sqrt{\frac{235 \cdot MPa}{f_{yv}}} = 0.814$

$h_w = 394 \cdot mm$

$t_w = 6 \cdot mm$

$$\lambda_w := \frac{0.0267 \cdot h_w}{t_w \cdot \sqrt{k_\tau} \cdot \varepsilon} = 0.933$$

$$\eta := \begin{cases} 1.2 & \text{if } f_{yv} \le 460 \cdot MPa \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} = 1.2$$

$$\chi_w := \begin{cases} \eta & \text{if } \lambda_w < \frac{0.83}{\eta} \\ \frac{0.83}{\lambda_w} & \text{if } \lambda_w \ge \frac{0.83}{\eta} \wedge \lambda_w < 1.08 \\ \frac{0.83}{\lambda_w} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.89$$

Tvärkraftsbärförmåga för ett liv $V_{b.Rd} := \chi_w \cdot f_{yv} \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{1}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = 431 \cdot kN$

Kommentar

För valsade I-balkar kan tvärkraftsbärförmågan kontrolleras enligt EN1993-1-1 eller EN1993-1-5. Den första eurokoden ger den plastiska bärförmågan och en kontroll av att den är tillämplig med en elastisk kontroll. I interaktionsformler behövs en bärförmåga även med hänsyn till buckling. Därför har EN1993-1-5 använts (till vilken hänvisas till i EN1993-1-1).

Interaktion tvärkraft och vridning

$$U := \frac{V_{T.Ed} + 0.5 \cdot V_{V.Ed}}{V_{b.Rd}} = 0.558$$

Interaktion tvärkraft (inklusive av vridning) och moment

Om tvärkraften är mindre än halva tvärkraftsbärförmågan beaktas ingen interaktion annars kontrolleras följande formel

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl.Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f.Rd}}{M_{pl.Rd}}\right) \cdot \left(2 \cdot \frac{V_{Ed}}{V_{b.Rd}} - 1\right)^2 \le 1$$

där med $A_f := min\left(b_o \cdot t_o , b_u \cdot t_u\right) = 3.52 \times 10^3 \cdot mm^2$ $\quad h_f := h - \frac{t_o}{2} + \frac{t_u}{2} = 396 \cdot mm$ $\quad M_{f.Rd} := f_y \cdot A_f \cdot h_f = 481 \cdot kN \cdot m$

$M_{pl.Rd}$ är den plastiska momentbärförmågan oberoende av vilken tvärsnittsklass tvärsnittet tillhör.

Tvärsnittsklass

Tvärsnittsklass används för att bestämma vilken metod som skall användas för beräkning av momentbärförmågan.

- Tvärsnittsklass 1 och 2 — Plastiskt böjmotstånd
- Tvärsnittsklass 3 — Plastiskt böjmotstånd baserat på effektivt tvärsnitt om tryckta flänsen tillhör klass 1 eller 2, see nedan
- Tvärsnittsklass 3 — Elastiskt böjmotstånd om tryckta flänsen tillhör klass 3
- Tvärsnittsklass 4 — Elastiskt böjmotstånd för effektivt tvärsnitt med effektiv bredd för klass 4 tvärsnittsdelar.

Den tvärsnittsdel som har störst tvärsnittsklass bestämmer hela tvärsnittets klass.

Tvärsnittsklass för tryckt överfläns

EN 1993-1-1, Tabell 5.2

$$c := b_o \qquad \varepsilon := \sqrt{\frac{235 \cdot MPa}{f_y}} = 0.825$$

$$\frac{c}{t_o} = 7.273 \qquad ct := \frac{c}{t_o}$$

$$Class_o := \begin{cases} 1 & if\ ct \le 33 \cdot \varepsilon \\ 2 & if\ ct \le 38 \cdot \varepsilon \wedge ct > 33 \cdot \varepsilon \\ 3 & if\ ct \le 42 \cdot \varepsilon \wedge ct > 38 \cdot \varepsilon \\ 4 & otherwise \end{cases} = 1$$

Tvärsnittsklass för tryckt underfläns

EN 1993-1-1, Tabell 5.2, delen mellan liven

$$c := b_o = 160 \cdot mm$$

$$\frac{c}{t_u} = 11.429 \qquad ct := \frac{c}{t_u}$$

$$Class_{um} := \begin{cases} 1 & if\ ct \le 33 \cdot \varepsilon \\ 2 & if\ ct \le 38 \cdot \varepsilon \wedge ct > 33 \cdot \varepsilon \\ 3 & if\ ct \le 42 \cdot \varepsilon \wedge ct > 38 \cdot \varepsilon \\ 4 & otherwise \end{cases} = 1$$

$$a_{svets} := 4 \cdot mm$$

EN 1993-1-1, Tabell 5.3, utstickande delar

$c := 0.5 \cdot b_u - 0.5 \cdot b_o - t_w - a_{svets} \cdot \sqrt{2} = 88.343 \cdot mm$

$\frac{c}{t_u} = 6.31 \qquad ct := \frac{c}{t_u}$

$$Class_{uu} := \begin{cases} 1 & if\ ct \le 9 \cdot \varepsilon \\ 2 & if\ ct \le 10 \cdot \varepsilon \wedge ct > 9 \cdot \varepsilon \\ 3 & if\ ct \le 14 \cdot \varepsilon \wedge ct > 10 \cdot \varepsilon \\ 4 & otherwise \end{cases} = 1$$

Tvärsnittsklass för liven vid tryckt överfläns

EN 1993-1-1, Tabell 5.2

$c := h_w \qquad \alpha = 0.661$ (se beräkning av plastiskt böjmotstånd)

$\frac{c}{t_w} = 65.67 \qquad ct := \frac{c}{t_w} \qquad \psi := \frac{-z_{gc}}{h_w - z_{gc}} = -0.763$

Gränser enligt Tabell 5.2 kolumn 4

$g_{11} := \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} \qquad g_{12} := \frac{36 \cdot \varepsilon}{\alpha} \qquad g_{21} := \frac{456 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} \qquad g_{22} := \frac{41.5 \cdot \varepsilon}{\alpha}$

$g_1 := if(\alpha > 0.5, g_{11}, g_{12}) = 43.1 \qquad g_2 := if(\alpha > 0.5, g_{21}, g_{22}) = 49.6$

$g_{31} := \frac{42 \cdot \varepsilon}{0.67 + 0.33 \cdot \psi} \qquad g_{32} := 62 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \psi) \cdot \sqrt{-\psi} \qquad g_3 := if(\psi > -1, g_{31}, g_{32}) = 82.9$

$$Class_w := \begin{cases} 1 & if\ ct \le g_1 \\ 2 & if\ ct \le g_2 \wedge ct > g_1 \\ 3 & if\ ct \le g_3 \wedge ct > g_2 \\ 4 & otherwise \end{cases} = 3$$

Tvärsnittsklass för *balken* vid tryckt överfläns

$Class := max(Class_o, Class_w) = 3$

Böjmotstånd vid tryckt överfläns vid klass 3 för liven och klass 1 eller 2 för flänsarna

Det kan vara ganska stor skillnad mellan plastiska och elastiska böjmotstånden. Därför kan det löna sig att räkna med effektivt tvärsnitt enligt 6.2.2.4 i EN 1993-1-3. I detta fall

$$W_{el} = 1.792 \times 10^6 \cdot mm^3 \qquad W_{pl.w} = 2.122 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Effektiv bredd $\quad b_{eff} := 20 \cdot \varepsilon \cdot t_w = 99 \cdot mm$

"Hål" i liven $\quad b_h := h_w - z_{gc} - 2 \cdot b_{eff} = 25.4 \cdot mm \qquad b_h := if(b_h < 0, 0 \cdot mm, b_h) = 25.4 \cdot mm$

Effektiv tvärsnittsarea $\quad A := b_u \cdot t_u + 2 \cdot t_w \cdot h_w + b_o \cdot t_o - 2 \cdot b_h \cdot t_w = 1.298 \times 10^4 \cdot mm^2$

$$A_o := b_o \cdot t_o = 3.52 \times 10^3 \cdot mm^2 \qquad A_u := b_u \cdot t_u = 5.04 \times 10^3 \cdot mm^2$$

Plastiska neutrala lagret

$$PNL := \begin{cases} \text{"i underflänsen"} & if\ A_u > 0.5 \cdot A \\ \text{"i överflänsen"} & if\ A_o > 0.5 \cdot A \\ \text{"i liven"} & otherwise \end{cases} = \text{"i liven"}$$

$$z := \begin{cases} h - \dfrac{0.5 \cdot A}{b_o} & if\ PNL = \text{"i överflänsen"} \\ \dfrac{0.5 \cdot A - A_u}{2 \cdot t_w} & if\ PNL = \text{"i liven"} \\ \dfrac{0.5 \cdot A - A_u}{b_u} & otherwise \end{cases} = 121 \cdot mm$$

$$Wpl := \begin{cases} \left[0.5 \cdot b_o \cdot \left[(h - z)^2 + (z - h + t_o)^2\right] + t_w \cdot (h_w - z)^2 + t_w \cdot z^2 + A_u \cdot (z + 0.5 \cdot t_u) - 2 \cdot t_w \cdot b_h \cdot (h_w - z - b_{eff} - 0.5 \cdot b_h)\right] \\ \left[A_o \cdot (h - z - 0.5 \cdot t_o) + t_w \cdot (h_w - z)^2 + t_w \cdot z^2 + A_u \cdot (z + 0.5 \cdot t_u) - 2 \cdot t_w \cdot b_h \cdot (h_w - z - b_{eff} - 0.5 \cdot b_h)\right] \quad if\ PNL = \text{"i} \\ \left[A_o \cdot (h - z - 0.5 \cdot t_o) + t_w \cdot (h_w - z)^2 - t_w \cdot z^2 + 0.5 \cdot b_u \cdot \left[z^2 + (t_u + z)^2\right] - 2 \cdot t_w \cdot b_h \cdot (h_w - z - b_{eff} - 0.5 \cdot b_h)\right] \quad othe \end{cases}$$

$$W_{pl.eff} := Wpl = 2.074 \times 10^6 \cdot mm^3$$

I uttrycken ovan avser raderna

$$PNL = \begin{cases} \text{"i överflänsen"} \\ \text{"i liven"} \\ \text{"i underflänsen"} \end{cases}$$

Jämför $\quad W_{el} = 1.792 \times 10^6 \cdot mm^3$ och

$$W_{pl} := \begin{cases} W_{pl.o} & if\ PNL = \text{"i överflänsen"} \\ W_{pl.w} & if\ PNL = \text{"i liven"} \\ W_{pl.u} & otherwise \end{cases} = 2.122 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Tvärsnittsklass för liven vid tryckt underfläns

EN 1993-1-1, Tabell 5.2

$c := h_w$ $\quad \alpha := 1 - \alpha = 0.339$ (se beräkning av plastiskt böjmotstånd)

$$\frac{c}{t_w} = 65.67 \qquad ct := \frac{c}{t_w} \qquad \psi := \frac{h_w - z_{gc}}{-z_{gc}} = -1.311$$

Gränser enligt Tabell 5.2
kolumn 4

$$g_{11} := \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} \qquad g_{12} := \frac{36 \cdot \varepsilon}{\alpha} \qquad g_{21} := \frac{456 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} \qquad g_{22} := \frac{41.5 \cdot \varepsilon}{\alpha}$$

$$g_1 := if\left(\alpha > 0.5, g_{11}, g_{12}\right) = 88 \qquad g_2 := if\left(\alpha > 0.5, g_{21}, g_{22}\right) = 101$$

$$g_{31} := \frac{42 \cdot \varepsilon}{0.67 + 0.33 \cdot \psi} \qquad g_{32} := 62 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \psi) \cdot \sqrt{-\psi} \qquad g_3 := if\left(\psi > -1, g_{31}, g_{32}\right) = 135$$

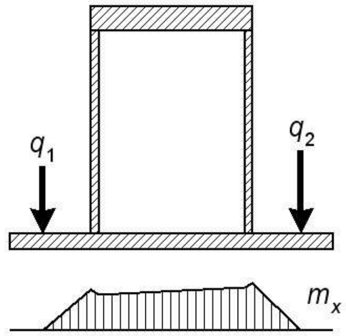
$$Class_w := \left| \begin{array}{l} 1 \ \ if \ \ ct \le g_1 \\ 2 \ \ if \ \ ct \le g_2 \wedge ct > g_1 \\ 3 \ \ if \ \ ct \le g_3 \wedge ct > g_2 \\ 4 \ \ otherwise \end{array} \right. = 1$$

Tvärsnittsklass för *balken* vid tryckt underfläns

$$Class := max\left(Class_{um}, Class_{uu}, Class_w\right) = 1$$

Observera att man inte skall använda effektiv tjocklek med hänsyn till last på underflänsen vid tvärsnitts-klassificeringen.

Normalkraft och böjning i tvärriktningen

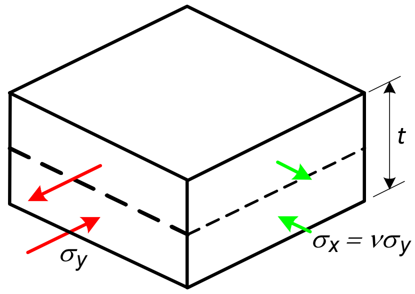


I bjälklag används ofta hattbalkar som ryms inom bjälklagstjockleken i princip enligt figuren. Om balken är fritt upplagd blir underflänsen dragen i längdriktningen och belastad av moment i tvärriktningen. Detta belastningsfall studeras under antagande att momentet i tvärriktningen är konstant.

Den elastiska bärförmågan ges av flytvillkoret

$$\sqrt{\sigma_x^{\,2} - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^{\,2} + 3 \cdot \tau^2} = f_y$$

Vid böjning av en bred plåt kommer tvärkontraktionen att förhindras och det uppstår spänningar i längdriktningen som varierar över tjockleken enligt figuren. För spänningarna σ_y och $\nu \cdot \sigma_y$ ger flytvillkoret



$$\sqrt{\sigma_y^{\,2} - \nu \cdot \sigma_y \cdot \sigma_y + \nu^2 \cdot \sigma_y^{\,2}} = f_y$$

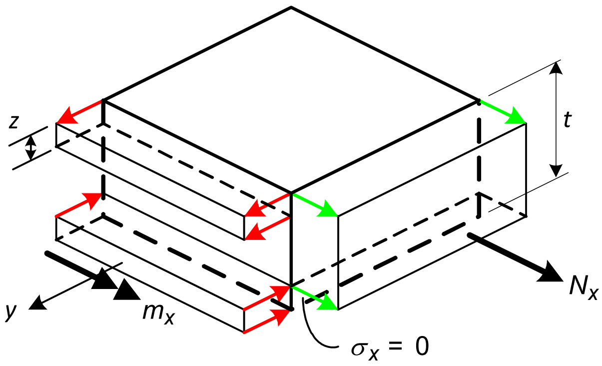
varur

$$\sigma_y = \frac{f_y}{\sqrt{1 - \nu + \nu^2}} = 1.12 \cdot \sigma_y \qquad \text{för} \qquad \nu = 0.3$$

Värsta punkten är på undersidan där det blir olika tecken på spänningarna längs och tvärs.

En belastning på underflänsen ger då alltid en reduktion av längsspänningen $\sigma_x = n_x/t$. Sambandet kan åskådliggöras i ett diagram enligt figuren, kurva med korta streck. För $n_x = 0$ startar kurvan för $m_x = 1.12\ f_y t^2/6$.

Vid böjning av en plåt kan plasticering över plåttjockleken förutsättas. På översidan av flänsen blir det dragning i båda riktningarna. Enligt flytvillkoret kan spänningen uppgå till sträckgränsen i båda riktningarna samtidigt. Spänningarna enligt figuren är alltså tillåtna enligt flytvillkoret. På undersidan har spänningarna olika tecken. Materialet utnyttjas då upp till sträckgränsen i tvärriktningen eftersom det måste vara tryckspänningar vid undersidan för att uppta ett moment i tvärled. Inom mittområdet antas att spänningarna i tvärriktningen är noll och lika med sträckgränsen i längdriktningen. Om momentbärförmågan i tvärriktningen är helt utnyttjad kan ändå halva flänstjockleken utnyttjas för dragspänningar i längdriktningen, d v s medelspänningen beräknad på hela plåttjockleken är lika med halva sträckgränsen. Genom att variera de plastiska zonernas tjocklek mellan $z = 0$ och $z = 0{,}5t$ kan samhörande värden för normalkraft och moment svarande mot streckad kurva beräknas. Med hänsyn till förhindrad tvärkontraktion kan kurvan högerförskjutas till den blå heldragna kurvan. Se Att konstruera i stål, Modul 5 Tvärsnittsbärförmåga av Bernt Johansson SBI.

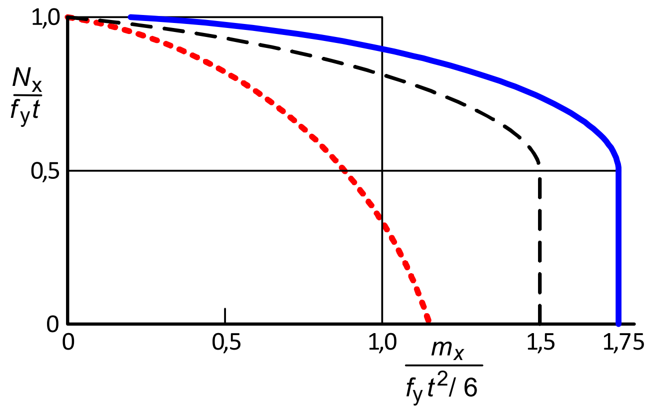


Kurvan kan uttryckas med

$$\frac{N_x}{f_y \cdot t} = 0.5 \cdot \left(1.1 + \sqrt{1 - \frac{m_x}{m_{pl}}}\right) \qquad \text{för} \qquad \frac{m_x}{m_{pl}} \geq 0.19$$

eller

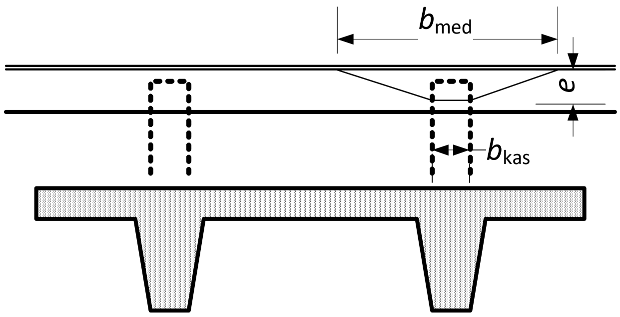
$$\frac{t_{u.eff}}{t_u} = 0.5 \cdot \left(1.1 + \sqrt{1 - \frac{m_x}{m_{pl}}}\right) \qquad \text{där} \qquad m_{pl} := 1.75 \cdot \frac{f_y \cdot t_u^{\,2}}{6}$$



TT-bjälklag

Vid lokal belastning av TT-kassetter kan man räkna med att lasten på underflänsen sprids 1:3 in mot hattbalkens liv. Medverkande bredd blir då

$$b_{med} = b_{kas} + 6 \cdot e$$



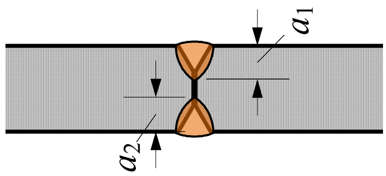
Dimensionering av svets mellan underfläns och liv

Svetsen påverkas av skjuvspänningar av tvärkraften och vertikala dragspänningar av lasten som ligger på underflänsen. Möjligen skulle det kunna bli skiktbristning i underflänsen om stålet inte har tillräcklig töjbarhet i tvärriktningen (plåtens z-riktning)

Utredningen Höglund, T. och Norlin, B, Dragkraft i tjockleksriktningen under en svetsbult Stålbyggnad, KTH 2001-11-27 visar dock att det är problem om underflänsen hänger i svetsbultar endast vid mycket stora slagginneslutningar. Kontinuerlig upphängning i livplåtar är ett gynnsammare fall varför behov av extra kontroll av underflänsen inte behövs.

Skarvning av flänsar

Enligt 4.7.2(1) och (2) i EN 1993-1-8:
- skall bärförmågan för en partiell stumsvets bestämmas med metoden för kälsvets med inträngning
- bör a-måttet för en partiell stumsvets inte väljas större än det inträngningsdjup som fortlöpande kan uppnås
- bör svetsens effektiva a-mått inte vara mindre än 3 mm



Grundläggande hållfasthetsvärden

Partialkoefficienter för bärförmåga, plåt $\gamma_{M1} := 1.0$ förband $\gamma_{M2} := 1.25$ nettotvärsnitt med hål $\gamma_{M2.net} := 1.1$

Mateial S355

Sträckgräns och brottgräns $f_y = 345 \cdot MPa$ $f_u = 450 \cdot MPa$

Koefficient för kälsvets, Tabell 4.1 i EN 1993-1-8 $\beta_w := 0.9$ $f_{wd} := \dfrac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = 400 \cdot MPa$ $\beta_w = 1.0$ för S420 och S 460

Antag a-mått och bredd $a_1 := 7 \cdot mm$ $a_2 := 5 \cdot mm$ $b = 401 \cdot mm$

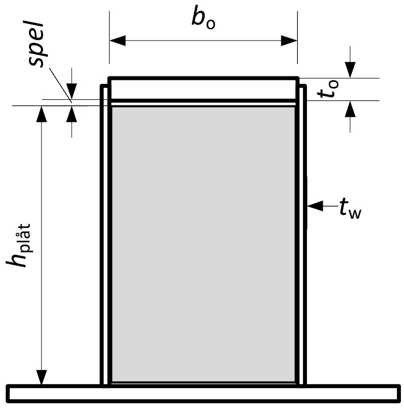
Bärförmåga för dragen fläns $N_{w.Ed} := b \cdot (a_1 + a_2) \cdot f_{wd} = 1925 \cdot kN$

Om plåttjockleken är $t := 15 \cdot mm$

blir effektiva tjockleken som kan användas för beräkning av böjmotståndet.

$$t_{eff} := min\left[t, \frac{N_{w.Ed}}{\left(\frac{b \cdot t \cdot f_y}{\gamma_{M1}}\right)} \cdot t\right] = 13.9 \cdot mm$$

Livavstyvning under koncentrerad last (pelare)



Avstyvningen svetsas mot liven och underflänsen. Mellan överflänsen och avstyvningen kan ett *spel* på uppemot 1 mm uppkomma. Det antas att detta spel trycks samman så att man får anliggning i brottgränstillståndet.

Avstyvningen räknas som en fyrsidigt upplagd platta med tryck i vertikalriktningen. Även om plåten är relativt kort räknas den ändå som lång med $k_\sigma := 4$ och medverkande bredd

Tjocklek $\quad t_p := 14 \cdot mm$

Tvärsnittsklass för avstyvningen

EN 1993-1-1, Tabell 5.2

$$c := b_o \qquad \varepsilon := \sqrt{\frac{235 \cdot MPa}{f_y}} = 0.825$$

$$\frac{c}{t_p} = 11.4 \qquad ct := \frac{c}{t_p}$$

$$Class_o := \begin{cases} 1 & \text{if } ct \le 33 \cdot \varepsilon \\ 2 & \text{if } ct \le 38 \cdot \varepsilon \wedge ct > 33 \cdot \varepsilon \\ 3 & \text{if } ct \le 42 \cdot \varepsilon \wedge ct > 38 \cdot \varepsilon \\ 4 & \text{otherwise} \end{cases} = 1$$

Enligt StBK-N1

$$\lambda_p := \frac{1.05}{\sqrt{k_\sigma}} \cdot ct \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} = 0.243$$

eller enligt 4.4 i EN 1993-1-5

$$\lambda_p := \frac{ct}{28.4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = 0.244 \qquad \psi := 1$$

$$\rho := if\left[\lambda_p < 0.673, 1, \frac{\lambda_p - 0.055 \cdot (3 + \psi)}{\lambda_p^{\,2}}\right] = 1$$

Effektiv bredd

$$b_{eff} := \rho \cdot b_o = 160 \cdot mm \qquad \frac{b_{eff}}{b_o} = 1$$

Bärförmågan för en avstyvning

$$N_{Rd} := b_{eff} \cdot t_p \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 773 \cdot kN$$

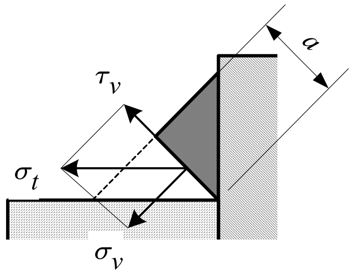
Om pelaren är ett fyrkantrör med bredd ungefär som överflänsens bredd sätts medverkande bredd för liven försiktigtvis lika med pelarens tvärsnittsmått i balkriktningen. Vid I-balk med flänsarna vinkelrätt mot balkriktningen sätts medverkande bredd för liven vid varje flänskant lika med pelarens flänstjocklek.

Om liven antas medverka på detta sätt och pelarna står på överflänsen (utan kontakt med liven) bör svetsen dimensioneras för den andel som liven avses uppta av vertikallasten dvs för skjuvning av kälsvetsen.

Bärförmåga för kälsvetsförband

Enligt SS-EN 1993-1-8 uttryck (4.1) gäller

$$\sqrt{\sigma_v^2 + 3\cdot\tau_v^2 + 3\cdot\tau_p^2} \le \frac{f_u}{\beta_w\cdot\gamma_{M2}}$$



där index v används för vinkelrätt och p för parallellt eftersom de index som används i eurokoden inte finns i MathCad.

Inför dessutom beteckningen för dimensioneringsvärdet för hållfastheten

$$f_{wd} = \frac{f_u}{\beta_w\cdot\gamma_{M2}}$$

Kraften $F_{t.Rd} = \sigma_t\cdot a\cdot l$ är vid 45 graders vinkel $F_{t.Rd} = \left(\frac{\tau_v\cdot a\cdot l}{\sqrt{2}} + \frac{\sigma_v\cdot a\cdot l}{\sqrt{2}}\right)$ vilket ger $\tau_v = \sigma_v = \frac{F_{t.Rd}}{a\cdot l\cdot\sqrt{2}}$

Insatt i dimensionerings-uttrycket (4.1)

$$\sqrt{\left(\frac{F_{t.Rd}}{a\cdot l\cdot\sqrt{2}}\right)^2 + 3\cdot\left(\frac{F_{t.Rd}}{a\cdot l\cdot\sqrt{2}}\right)^2} = f_w$$

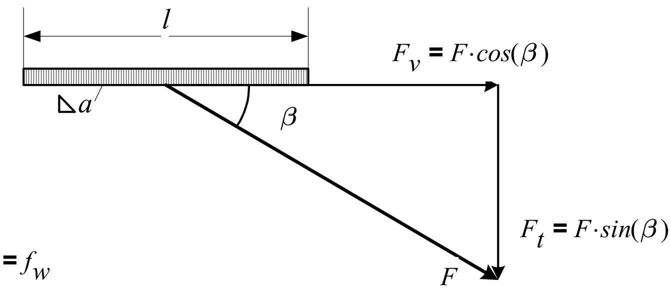
erhålls draghållfastheten vinkelrätt mot svetsen

$$F_{t.Rd} = \frac{1}{\sqrt{2}}\cdot f_w\cdot a\cdot l = 0.707\cdot f_w\cdot a\cdot l$$

Skjuvhållfastheten blir

$$F_{v.Rd} = \frac{1}{\sqrt{3}}\cdot f_w\cdot a\cdot l = 0.577\cdot f_w\cdot a\cdot l$$

Kraft snett mot kälsvets



Spänningar av F_t och F_v insatta i uttryck (4.1) ger i gränsen

$$\sqrt{\left(\frac{F\cdot sin(\beta)}{a\cdot l\cdot\sqrt{2}}\right)^2 + 3\cdot\left(\frac{F\cdot sin(\beta)}{a\cdot l\cdot\sqrt{2}}\right)^2 + 3\cdot\left(\frac{F\cdot cos(\beta)}{a\cdot l}\right)^2} = f_w$$

omskrivet

$$\frac{2\cdot F}{\sqrt{2}\cdot a\cdot l}\cdot\sqrt{sin(\beta)^2 + \frac{3}{2}\cdot cos(\beta)^2} = f_w$$

och i förhållande till kraft vinkelrätt mot svetsen

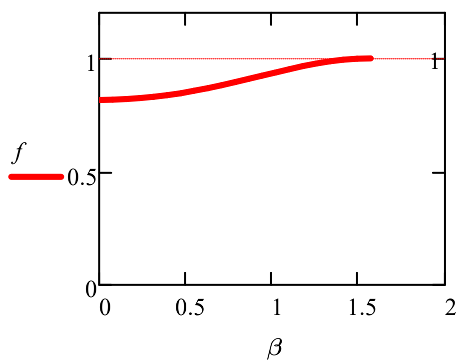
$$f(\beta) = \frac{F}{F_{t.Rd}} = \frac{1}{\sqrt{sin(\beta)^2 + 1.5\cdot cos(\beta)^2}}$$

Hur ser funktionen *f* ut?

$i := 1..20 \quad \beta_i := \frac{\pi}{2}\cdot\frac{i}{20}$

$$f := \frac{1}{\sqrt{sin(\beta)^2 + 1.5\cdot cos(\beta)^2}}$$

$f_0 = 0.816$

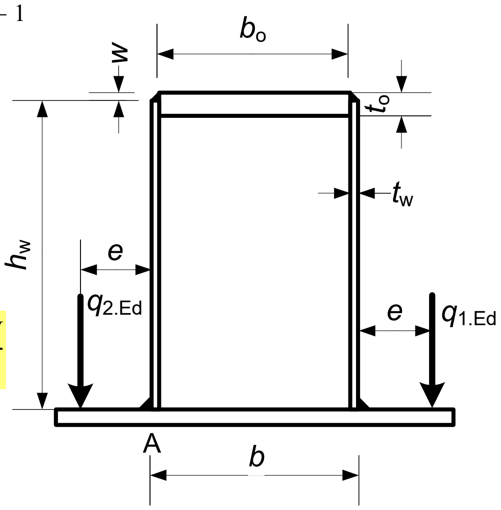


Anmärkning
Detta är en härledning med komposantmetoden enligt 4.5.3.2 i SS-EN 1993-1-8. Den förenklade metoden i 4.5.3.3 ger

$f = \sqrt{\frac{2}{3}} = 0.816$ oberoende av β

Svets mellan underfläns och liv

Lasten på underflänsen ger vertikala spänningar i kälsvetsen och tvärkraften ger skjuvspänningar. Dessutom uppkommer skjuvspänningar av vridning vid osymmetrisk last. Normalspänningen av det böjande momentet behöver inte tas med vid kontroll av svetsen.



Laster och a-mått $\quad q_{1.Ed} := 50 \cdot kN \cdot m^{-1} \quad q_{2.Ed} := 30 \cdot kN \cdot m^{-1}$

Spännvidd $\quad L := 7.2 \cdot m \quad a := 5 \cdot mm$

Moment kring A för $\quad q_1 > q_2 \quad q_1 \cdot \left(\frac{b}{2} + e\right) - q_2 \cdot e = q_t \cdot \frac{b}{2}$

där b är bredden på utsidan av liven där kraften i svetsen antas verka. $\quad b := b_o + 2 \cdot t_w$

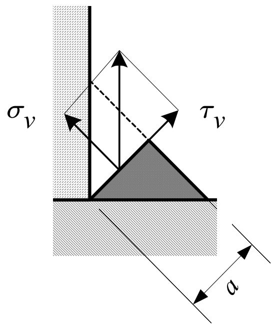
Jämviktsekvationen ger $\quad q_t := q_{1.Ed} \cdot \left(1 + \frac{1 \cdot e}{b}\right) - q_{2.Ed} \cdot \frac{1 \cdot e}{b} = 59.88 \cdot \frac{kN}{m}$

Rättelse $2 \cdot e$ ersatt med $1 \cdot e$

Spänningarna i svetsen blir $\quad \tau_v := \frac{q_t}{a \cdot \sqrt{2}} = 8.5 \cdot MPa$

$$\sigma_v := \frac{q_t}{a \cdot \sqrt{2}} = 8.5 \cdot MPa$$

Tvärkraft $\quad V_{Ed} := \left(q_{1.Ed} + q_{2.Ed}\right) \cdot \frac{L}{2} = 288 \cdot kN$



Om tvärkraften upptas av liven (se 6.2.6 i EN 1993-1-1) blir skjuvspänningen parallellt svetsen $\quad \tau_{p.v} := \frac{V_{Ed}}{2 \cdot h_w \cdot a} = 73.1 \cdot MPa$

Vridande momentet blir $\quad T_{Ed} := \left(q_{1.Ed} - q_{2.Ed}\right) \cdot \left(\frac{b}{2} + e\right) \cdot \frac{L}{2} = 12.31 \cdot kNm$

Skjuvspänningen i svetsen, se sid 3 $\quad \tau_{p.t} := \frac{T_{Ed}}{W_t \cdot \frac{a}{t_w}} = 18.5 \cdot MPa$

Vänsterledet i uttryck (4.1) i EN 1993-1-8 är $\quad \sigma_j := \sqrt{\sigma_v^2 + 3 \cdot \tau_v^2 + 3 \cdot \left(\tau_{p.v} + \tau_{p.t}\right)^2} = 159.5 \cdot MPa$

Dimensioneringsvärde för svetsens hållfasthet $\quad f_{w.d} := \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = 400 \cdot MPa \quad$ där $\quad f_u := 470 \cdot MPa \quad \beta_w = 0.9 \quad \gamma_{M2} = 1.25$

$$Verifiering := if\left(\sigma_j < f_{w.d}, \text{"OK"}, \text{"Inte OK"}\right) = \text{"OK"}$$

Svets mellan överfläns och liv

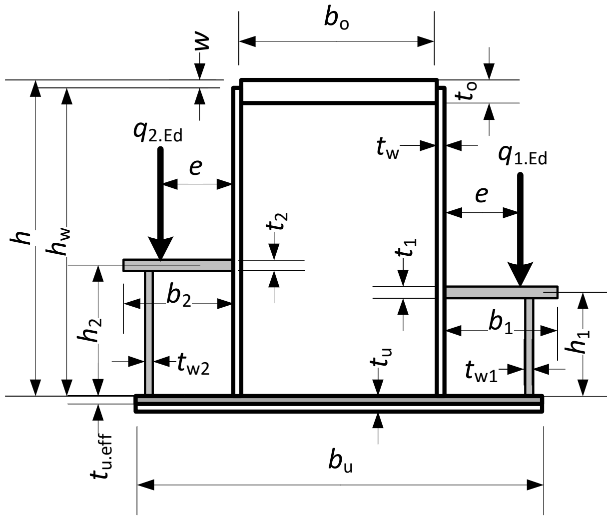
Svets mellan överfläns och liv kontrolleras på samma sätt utom att spänningarna av upphängning utgår. Om a-måttet är detsamma blir

$$\sigma_j := \sqrt{3 \cdot \left(\tau_{p.v} + \tau_{p.t}\right)^2} = 158.6 \cdot MPa$$

Upphängningen ger alltså mycket liten inverkan och kan ofta försummas.

Tvärsnittsbärförmåga för hattvärsnitt med förhöjningar

Dimension och material



Svetsutrymme $w := 11 \cdot mm$

Tvärsnittshöjd / livhöjd $h := 400 \cdot mm$ $\quad h_w := h - w$

Flänsbredder $b_o := 160 \cdot mm$ $\quad b_u := 360 \cdot mm$

Livtjocklek $t_w := 6 \cdot mm$

Flänstjocklekar $t_o := 22 \cdot mm$ $\quad t_u := 14 \cdot mm$

Förhöjningar $h_2 := 160 \cdot mm$ $\quad h_1 := 100 \cdot mm$

Tjocklekar $t_{w2} := 8 \cdot mm$ $\quad t_{w1} := 8 \cdot mm$

Hylla $b_2 := 120 \cdot mm$ $\quad b_1 := 120 \cdot mm$

Tjocklekar hylla $t_2 := 12 \cdot mm$ $\quad t_1 := 12 \cdot mm$

Stål $f_y := \left(\begin{array}{|ll} 355 & \text{if } t_o \le 16 \cdot mm \\ 345 & \text{otherwise} \end{array} \right) \cdot MPa = 345 \cdot MPa$ $\quad f_u := 490 \cdot MPa$

$h_2 \ge h_1$

Partialcoefficienter: $\gamma_{M0} \equiv 1.0$ $\quad E := 210000 \cdot MPa$

Tvärsnittsarea $A := b_u \cdot t_u + 2 \cdot t_w \cdot h_w + b_o \cdot t_o = 1.323 \times 10^4 \cdot mm^2$

av hyllor

$$A := A + b_2 \cdot t_2 + (h_2 - 0.5 \cdot t_2) \cdot t_{w2} + b_1 \cdot t_1 + (h_1 - 0.5 \cdot t_1) \cdot t_{w1} = 1.809 \times 10^4 \cdot mm^2$$

Ursprungsvärden:

$t_{u0} := t_u$ $\quad t_{o0} := t_o$

$t_{w0} := t_w$ $\quad h_{w0} := h_w$

Överfläns $A_o := b_o \cdot t_o = 3.52 \times 10^3 \cdot mm^2$

Underfläns $A_u := b_u \cdot t_u = 5.04 \times 10^3 \cdot mm^2$

Statiskt moment $S_y := A_o \cdot (h - 0.5 \cdot t_o) + t_w \cdot h_w^2 - 0.5 \cdot b_u \cdot t_u^2 = 2.242 \times 10^6 \cdot mm^3$

av hyllor

$$S_y := S_y + b_2 \cdot t_2 \cdot h_2 + 0.5 \cdot (h_2 - 0.5 \cdot t_2)^2 \cdot t_{w2} + b_1 \cdot t_1 \cdot h_1 + 0.5 \cdot (h_1 - 0.5 \cdot t_1)^2 \cdot t_{w1} = 2.747 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Tyngdpunkt $z_{gc} := \dfrac{S_y}{A} = 151.8 \cdot mm$

Tröghetsmoment $I_y := A_o \cdot (h - 0.5 \cdot t_o)^2 + \dfrac{b_o \cdot t_o^3}{12} + \dfrac{2 \cdot t_w \cdot h_w^3}{3} + \dfrac{b_u \cdot t_u^3}{3} = 7.686 \times 10^8 \cdot mm^4$

$$I_y := I_y + b_2 \cdot t_2 \cdot h_2^2 + \frac{(h_2 - 0.5 \cdot t_2)^3 \cdot t_{w2}}{3} + b_1 \cdot t_1 \cdot h_1^2 + \frac{(h_1 - 0.5 \cdot t_1)^3 \cdot t_{w1}}{3} + \frac{b_1 \cdot t_1^3}{12} + \frac{b_2 \cdot t_2^3}{12} - A \cdot z_{gc}^2 = 4.149 \times 10^8 \cdot$$

Elastiskt böjmotstånd $W_{el.u} := \dfrac{I_y}{z_{gc} + t_u} = 2.502 \times 10^6 \cdot mm^3$ $\quad W_{el.o} := \dfrac{I_y}{h - z_{gc}} = 1.672 \times 10^6 \cdot mm^3$

$$W_{el} := min(W_{el.u}, W_{el.o}) = 1.672 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Plastiskt böjmotstånd

Lasten på underflänsen ger böjande moment i tvärled. Om lasten är stor (tvärböjande momentet > 0.19 x moment-bärförmågan av underflänsen) reduceras därför underflänsens bärförmåga för drag eller tryck genom att en effektiv tjocklek används. Detta fenomen behandlas senare, men i formlerna för plastiskt böjmotstånd används den effektiva tjockleken $t_{u.eff} := t_u$.

Det antas att tvärböjande momentet upptas av underflänsen enbart.

Plastiskt böjmotstånd om neutrala lagret hamnar i liven

Tvärsnittsarea $A := b_u \cdot t_{u.eff} + 2 \cdot t_w \cdot h_w + b_o \cdot t_o = 1.323 \times 10^4 \cdot mm^2$ $t_w = 6 \cdot mm$

$A := A + b_2 \cdot t_2 + h_2 \cdot t_{w2} + b_1 \cdot t_1 + h_1 \cdot t_{w1} = 1.819 \times 10^4 \cdot mm^2$

Överfläns $A_o := b_o \cdot t_o = 3520 \cdot mm^2$ $\frac{A}{2} = 9094 \cdot mm^2$

Underfläns $A_u := b_u \cdot t_{u.eff} = 5040 \cdot mm^2$

Plastiska neutrala lagret

$$PNL := \begin{cases} \text{"i underflänsen"} & \text{if } A_u > 0.5 \cdot A \\ \text{"i överflänsen"} & \text{if } A_o > 0.5 \cdot A \\ \text{"i liven"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"i liven"}$$

Var i liven?

$Aw2 := A_o + 2 \cdot t_w \cdot (h - h_2) = 6400 \cdot mm^2$

$Aw4 := A_u + 2 \cdot t_w \cdot (h_1 - 0.5 \cdot t_1) + (t_{w1} + t_{w2}) \cdot (h_1 - 0.5 \cdot t_1) = 7672 \cdot mm^2$

$Aw3 := Aw4 + b_1 \cdot t_1 + (t_{w2} + 2 \cdot t_w) \cdot t_1 = 9352 \cdot mm^2$

$$PNL := \begin{cases} \text{"i underdelen"} & \text{if } Aw2 < 0.5 \cdot A \wedge Aw4 > 0.5 \cdot A \\ \text{"i undre hyllan"} & \text{if } Aw4 < 0.5 \cdot A \wedge Aw3 > 0.5 \cdot A \\ \text{"i överdelen"} & \text{if } Aw3 < 0.5 \cdot A \wedge Aw2 > 0.5 \cdot A \\ \text{"i mittdelen"} & \text{otherwise} \end{cases} = \text{"i undre hyllan"}$$

Neutrala lagret hamnar i underdelen av liven (fyra liv)

$$z := \frac{0.5 \cdot A - A_u}{2 \cdot t_w + t_{w1} + t_{w2}} = 144.8 \cdot mm \qquad h_1 = 100 \cdot mm$$

Tryckta zonens bredd (för tvärsnittsklassificering nedan) $\alpha := \frac{h_w - z}{h_w} = 0.628$

$$W_{pl.w} := A_o \cdot (h - z - 0.5 \cdot t_o) + t_w \cdot (h_w - z)^2 + t_w \cdot z^2 + A_u \cdot (z + 0.5 \cdot t_{u.eff}) = 2.108 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + 0.5 \cdot \left[t_{w2} \cdot (h_2 - z)^2 + t_{w2} \cdot z^2 \right] + 0.5 \cdot \left[t_{w1} \cdot (h_1 - z)^2 + t_{w1} \cdot z^2 \right]$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + b_2 \cdot t_2 \cdot (h_2 - z) + b_1 \cdot t_1 \cdot (h_1 - z) = 2.242 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Neutrala lagret hamnar i överdelen av liven (två liv)

$$z := h_w - \frac{0.5 \cdot A - A_o}{2 \cdot t_w} = -75.5 \cdot mm \qquad h_2 = 160 \cdot mm$$

Tryckta zonens bredd (för tvärsnittsklassificering nedan) $\alpha := \frac{h_w - z}{h_w} = 1.194$

$$W_{pl.w} := A_o \cdot (h - z - 0.5 \cdot t_o) + t_w \cdot (h_w - z)^2 + t_w \cdot z^2 + A_u \cdot (z + 0.5 \cdot t_{u.eff}) = 2.619 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + 0.5 \cdot \left[-t_{w2} \cdot (z - h_2)^2 + t_{w2} \cdot z^2 \right] + 0.5 \cdot \left[-t_{w1} \cdot (z - h_1)^2 + t_{w1} \cdot z^2 \right] = 2.319 \times 10^6 \cdot mm$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + b_2 \cdot t_2 \cdot (z - h_2) + b_1 \cdot t_1 \cdot (z - h_1) = 1.727 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Neutrala lagret hamnar i mittdelen av liven (tre liv)

$$z := \frac{0.5 \cdot A - A_u - b_1 \cdot t_1 - h_1 \cdot t_{w1}}{2 \cdot t_w + t_{w2}} = 90.7 \cdot mm \qquad h_2 = 160 \cdot mm \qquad h_1 = 100 \cdot mm$$

Tryckta zonens bredd (för tvärsnittsklassificering nedan) $\alpha := \frac{h_w - z}{h_w} = 0.767$

$$W_{pl.w} := A_o \cdot (h - z - 0.5 \cdot t_o) + t_w \cdot (h_w - z)^2 + t_w \cdot z^2 + A_u \cdot (z + 0.5 \cdot t_{u.eff}) = 2.126 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + 0.5 \cdot \left[t_{w2} \cdot (h_2 - z)^2 + t_{w2} \cdot z^2 \right] + 0.5 \cdot \left[-t_{w1} \cdot (z - h_1)^2 + t_{w1} \cdot z^2 \right]$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + b_2 \cdot t_2 \cdot (h_2 - z) + b_1 \cdot t_1 \cdot (z - h_1) = 2.297 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Neutrala lagret hamnar i undre hyllan

$$z := \frac{0.5 \cdot A - A_u - t_{w1} \cdot (h_1 - 0.5 \cdot t_1) + b_1 \cdot (h_1 - 0.5 \cdot t_1)}{2 \cdot t_w + t_{w2} + b_1} = 104.2 \cdot mm \qquad h_1 = 100 \cdot mm$$

$$h_2 = 160 \cdot mm$$

Tryckta zonens bredd (för tvärsnittsklassificering nedan) $\alpha := \frac{h_w - z}{h_w} = 0.732$

$$W_{pl.w} := A_o \cdot (h - z - 0.5 \cdot t_o) + t_w \cdot (h_w - z)^2 + t_w \cdot z^2 + A_u \cdot (z + 0.5 \cdot t_{u.eff}) = 2.115 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + 0.5 \cdot \left[t_{w2} \cdot (h_2 - z)^2 + t_{w2} \cdot z^2 \right] + 0.5 \cdot \left[-t_{w1} \cdot (z - h_1)^2 + t_{w1} \cdot z^2 \right] = 2.214 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + b_2 \cdot t_2 \cdot (h_2 - z) + 0.5 \cdot b_1 \cdot (z - h_1)^2 + 0.5 \cdot b_1 \cdot (t_1 - z + h_1)^2 = 2.299 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Plastiskt böjmotstånd om neutrala lagret hamnar i underflänsen

$$t_{u.eff} := 38 \cdot mm \qquad A := b_u \cdot t_{u.eff} + 2 \cdot t_w \cdot h_w + b_o \cdot t_o = 2.187 \times 10^4 \cdot mm^2 \qquad t_w = 6 \cdot mm$$

$$A := A + b_2 \cdot t_2 + h_2 \cdot t_{w2} + b_1 \cdot t_1 + h_1 \cdot t_{w1} = 2.683 \times 10^4 \cdot mm^2$$

$$A_o := b_o \cdot t_o = 3.52 \times 10^3 \cdot mm^2$$

$$A_u := b_u \cdot t_{u.eff} = 1.368 \times 10^4 \cdot mm^2$$

Plastiska neutrala lagret

$$PNL := \left| \begin{array}{ll} \text{"i underflänsen"} & \text{if } A_u > 0.5 \cdot A \\ \text{"i överflänsen"} & \text{if } A_o > 0.5 \cdot A \\ \text{"i liven"} & \text{otherwise} \end{array} \right. = \text{"i underflänsen"}$$

$$z := \frac{0.5 \cdot A}{b_u} - t_{u.eff} = -0.739 \cdot mm \qquad t_{u.eff} + z = 37.261 \cdot mm$$

$$W_{pl.u} := A_o \cdot (h - z - 0.5 \cdot t_o) + t_w \cdot (h_w - z)^2 - t_w \cdot z^2 + 0.5 \cdot b_u \cdot z^2 + 0.5 \cdot b_u \cdot (t_{u.eff} + z)^2 = 2.533 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.u} := W_{pl.u} + 0.5 \cdot \left[t_{w2} \cdot (h_2 - z)^2 - t_{w2} \cdot z^2 \right] + 0.5 \cdot \left[t_{w1} \cdot (h_1 - z)^2 - t_{w1} \cdot z^2 \right] = 2.677 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.u} := W_{pl.u} + b_2 \cdot t_2 \cdot (h_2 - z) + b_1 \cdot t_1 \cdot (h_1 - z) = 3.054 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Plastiskt böjmotstånd om neutrala lagret hamnar i överflänsen

$t_{u.eff} := 2 \cdot mm$ $\quad t_o := 80 \cdot mm$ $\quad t_w := 4 \cdot mm$ $\quad h_w := 360 \cdot mm$ $\quad h = 400 \cdot mm$

$$A := b_u \cdot t_{u.eff} + 2 \cdot t_w \cdot h_w + b_o \cdot t_o = 1.640 \times 10^4 \cdot mm^2$$

$$A := A + b_2 \cdot t_2 + h_2 \cdot t_{w2} + b_1 \cdot t_1 + h_1 \cdot t_{w1} = 2.136 \times 10^4 \cdot mm^2$$

$$A_o := b_o \cdot t_o = 1.28 \times 10^4 \cdot mm^2$$

$$A_u := b_u \cdot t_{u.eff} = 720 \cdot mm^2$$

Plastiska neutrala lagret

$$PNL := \begin{vmatrix} \text{"i underflänsen"} \quad if \ A_u > 0.5 \cdot A \\ \text{"i överflänsen"} \quad if \ A_o > 0.5 \cdot A \\ \text{"i liven"} \quad otherwise \end{vmatrix} = \text{"i överflänsen"}$$

$h_w > z$

$$z := h - \frac{0.5 \cdot A + 2 \cdot t_w \cdot (h - h_w)}{b_o + 2 \cdot t_w} = 334.5 \cdot mm \qquad h - z = 65.48 \cdot mm \qquad h_w - z = 25.48 \cdot mm$$

$$W_{pl.o} := t_w \cdot (h_w - z)^2 + t_w \cdot z^2 + A_u \cdot (z + 0.5 \cdot t_{u.eff}) + 0.5 \cdot b_o \cdot (h - z)^2 + 0.5 \cdot b_o \cdot [t_o - (h - z)]^2 = 1.052 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.o} := W_{pl.o} + 0.5 \cdot \left[-t_{w2} \cdot (h_2 - z)^2 + t_{w2} \cdot z^2\right] + 0.5 \cdot \left[-t_{w1} \cdot (h_1 - z)^2 + t_{w1} \cdot z^2\right] = 1.605 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.o} := W_{pl.o} + b_2 \cdot t_2 \cdot (z - h_2) + b_1 \cdot t_1 \cdot (z - h_1) = 2.194 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Återgå till ursprungsmått: $t_u := t_{u0} = 14 \cdot mm$ $\quad t_o := t_{o0} = 22 \cdot mm$ $\quad t_w := t_{w0} = 6 \cdot mm$ $\quad h_w := h_{w0} = 389 \cdot m$

$t_{u.eff} := t_u$ $\quad t_{o.eff} := t_o$ $\quad b_o = 160 \cdot mm$

Vridstyvhet och vridmotstånd

De två yttre delarna försummas

$$a := b_o + t_w = 166 \cdot mm \qquad b := h - 0.5 \cdot t_o + 0.5 \cdot t_u = 396 \cdot mm$$

Vridtyvhetens tvärsnitts-faktor för mittdelen

$$I_t := \frac{4 \cdot a^2 \cdot b^2}{2 \cdot \frac{b}{t_w} + \frac{a}{t_o} + \frac{a}{t_u}} = 1.142 \times 10^8 \cdot mm^4$$

Summa

$$I_t := I_t + b_o \cdot t_o^3 \cdot \frac{1}{3} = 1.147 \times 10^8 \cdot mm^4$$

Vridmotstånd

$$W_t := 2 \cdot a \cdot b \cdot t_w = 7.888 \times 10^5 \cdot mm^3$$

Tvärkraft i ett liv av vridning

Lastangreppslinje

$$e := 85 \cdot mm$$

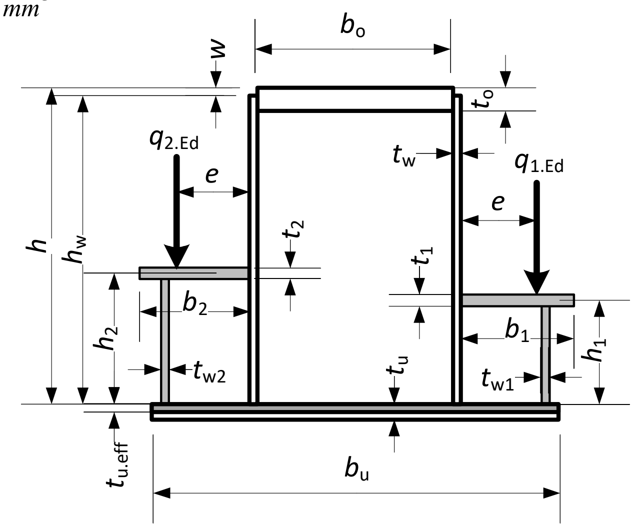
Laster

$$q_{1.Ed} := 80 \cdot \frac{kN}{m}$$

$$q_{2.Ed} := 40 \cdot \frac{kN}{m}$$

Spännvidd

$$L := 6 \cdot m$$



Vridande moment $T_{Ed} := (q_{1.Ed} - q_{2.Ed}) \cdot \left(\frac{b_o}{2} + t_w + e\right) \cdot \frac{L}{2} = 20.52 \cdot kN \cdot m$

Skjuvspänning av vridning $\tau_T := \frac{T_{Ed}}{W_t} = 26.0 \cdot MPa$

Tvärkraft i liv av vridning $V_{T.Ed} := \tau_T \cdot h_w \cdot t_w = 60.7 \cdot kN$

Tvärkraft av transversallasten $V_{V.Ed} := (q_{1.Ed} + q_{2.Ed}) \cdot \frac{L}{2} = 360 \cdot kN$

Summa tvärkraft i ett liv $V_{Ed} := V_{T.Ed} + \frac{V_{V.Ed}}{2} = 241 \cdot kN$

Tvärkraftsbärförmåga

Endast bidraget från livet tas med eftersom avståndet mellan tväravstyvningarna är stort

$k_\tau := 5.34$ $\quad f_y := 355 \cdot MPa$ $\quad \varepsilon := \sqrt{\frac{235 \cdot MPa}{f_y}} = 0.814$

Hyllorna ger effektiv avstyvning

$h_{w.max} := max(h_w - h_2, h_2, h_w - h_1, h_1) = 289 \cdot mm$ $\quad h_w = 389 \cdot mm$

$t_w = 6 \cdot mm$

Eventuell tvärkraft som tas av hyllornas liv försummas

$\lambda_w := \frac{0.0267 \cdot h_{w.max}}{t_w \cdot \sqrt{k_\tau} \cdot \varepsilon} = 0.684$ $\quad f_y = 355 \cdot MPa$

$$\eta := \begin{cases} 1.2 & \text{if } f_y \le 460 \cdot MPa \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} = 1.2$$

$$\chi_w := \begin{cases} \eta & \text{if } \lambda_w < \frac{0.83}{\eta} \\ \frac{0.83}{\lambda_w} & \text{if } \lambda_w \ge \frac{0.83}{\eta} \wedge \lambda_w < 1.08 \\ \frac{0.83}{\lambda_w} & \text{otherwise} \end{cases} = 1.2$$

Tvärkraftsbärförmåga för ett liv $V_{b.Rd} := \chi_w \cdot f_y \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{1}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = 574 \cdot kN$

Interaktion tvärkraft och vridning

$$U := \frac{V_{T.Ed} + 0.5 \cdot V_{V.Ed}}{V_{b.Rd}} = 0.419$$

Interaktion tvärkraft (inklusive av vridning) och moment

Om tvärkraften är mindre än halva tvärkraftsbärförmågan beaktas ingen interaktion annars kontrolleras följande formel

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl.Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f.Rd}}{M_{pl.Rd}}\right) \cdot \left(2 \cdot \frac{V_{Ed}}{V_{b.Rd}} - 1\right)^2 \le 1$$

där $A_f := min(b_o \cdot t_o, b_u \cdot t_u) = 3.52 \times 10^3 \cdot mm^2$ $\quad h_f := h - \frac{t_o}{2} + \frac{t_u}{2} = 396 \cdot mm$ $\quad M_{f.Rd} := f_y \cdot A_f \cdot h_f = 495 \cdot kN \cdot$

$M_{pl.Rd}$ är den plastiska momentbärförmågan oberoende av vilken tvärsnittsklass tvärsnittet tillhör.

Tvärsnittsklass

Tvärsnittsklass används för att bestämma vilken metod som skall användas för beräkning av momentbärförmågan.

- Tvärsnittsklass 1 och 2	Plastiskt böjmotstånd
- Tvärsnittsklass 3	Plastiskt böjmotstånd baserat på effektivt tvärsnitt om tryckta flänsen tillhör klass 1 eller 2, see nedan
- Tvärsnittsklass 3	Elastiskt böjmotstånd om tryckta flänsen tillhör klass 3
- Tvärsnittsklass 4	Elastiskt böjmotstånd för effektivt tvärsnitt med effektiv bredd för klass 4 tvärsnittsdelar.

Den tvärsnittsdel som har störst tvärsnittsklass bestämmer hela tvärsnittets klass.

Tvärsnittsklass för tryckt överfläns

EN 1993-1-1, Tabell 5.2

$$c := b_o = 160 \cdot mm \qquad \varepsilon := \sqrt{\frac{235 \cdot MPa}{f_y}} = 0.814$$

$$\frac{c}{t_o} = 7.273 \qquad ct := \frac{c}{t_o}$$

$$Class_o := \begin{vmatrix} 1 & if\ ct \le 33 \cdot \varepsilon \\ 2 & if\ ct \le 38 \cdot \varepsilon \wedge ct > 33 \cdot \varepsilon \\ 3 & if\ ct \le 42 \cdot \varepsilon \wedge ct > 38 \cdot \varepsilon \\ 4 & otherwise \end{vmatrix} = 1$$

Tvärsnittsklass för tryckt underfläns

EN 1993-1-1, Tabell 5.2, den slankaste av tre delar

$$c := max\left(\frac{b_u - b_o}{2}, b_o\right) = 160 \cdot mm$$

$$\frac{c}{t_u} = 11.429 \qquad ct := \frac{c}{t_u}$$

$$Class_{um} := \begin{vmatrix} 1 & if\ ct \le 33 \cdot \varepsilon \\ 2 & if\ ct \le 38 \cdot \varepsilon \wedge ct > 33 \cdot \varepsilon \\ 3 & if\ ct \le 42 \cdot \varepsilon \wedge ct > 38 \cdot \varepsilon \\ 4 & otherwise \end{vmatrix} = 1$$

Tvärsnittsklass för liven vid tryckt överfläns

EN 1993-1-1, Tabell 5.2

$$c := max\left(h_w - h_2, h_w - h_1\right) = 289 \cdot mm \qquad \alpha = 0.732$$

(se beräkning av plastiskt böjmotstånd)

$$\frac{c}{t_w} = 48.17 \qquad ct := \frac{c}{t_w} \qquad \psi := \frac{h_w - z_{gc} - c}{h_w - z_{gc}} = -0.218$$

Gränser enligt Tabell 5.2 kolumn 4

$$g_{11} := \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} \qquad g_{12} := \frac{36 \cdot \varepsilon}{\alpha} \qquad g_{21} := \frac{456 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} \qquad g_{22} := \frac{41.5 \cdot \varepsilon}{\alpha}$$

$$g_1 := if\left(\alpha > 0.5, g_{11}, g_{12}\right) = 37.8 \qquad g_2 := if\left(\alpha > 0.5, g_{21}, g_{22}\right) = 43.5$$

$$g_{31} := \frac{42 \cdot \varepsilon}{0.67 + 0.33 \cdot \psi} \qquad g_{32} := 62 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \psi) \cdot \sqrt{-\psi} \qquad g_3 := if\left(\psi > -1, g_{31}, g_{32}\right) = 57.2$$

$$Class_w := \begin{vmatrix} 1 & if\ ct \le g_1 \\ 2 & if\ ct \le g_2 \wedge ct > g_1 \\ 3 & if\ ct \le g_3 \wedge ct > g_2 \\ 4 & otherwise \end{vmatrix} = 3$$

Tvärsnittsklass för *balken* vid tryckt överfläns

$$Class := max\left(Class_o, Class_w\right) = 3$$

Böjmotstånd vid tryckt överfläns vid klass 3 för liven och klass 1 eller 2 för flänsarna

Det kan vara ganska stor skillnad mellan plastiska och elastiska böjmotstånden. Därför kan det löna sig att räkna med effektivt tvärsnitt enligt 6.2.2.4 i EN 1993-1-1. I detta fall

$$W_{el} = 1.672 \times 10^6 \cdot mm^3 \qquad W_{pl.w} = 2.299 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Effektiv bredd $b_{eff} := 20 \cdot \varepsilon \cdot t_w = 97.6 \cdot mm$

"Hål" i liven $b_h := h_w - z_{gc} - 2 \cdot b_{eff} = 41.9 \cdot mm$

Plastiskt böjmotstånd om neutrala lagret hamnar i liven

Tvärsnittsarea $A := b_u \cdot t_{u.eff} + 2 \cdot t_w \cdot h_w + b_o \cdot t_o - 2 \cdot b_h \cdot t_w = 1.272 \times 10^4 \cdot mm^2$ $\qquad t_w = 6 \cdot mm$

$A := A + b_2 \cdot t_2 + h_2 \cdot t_{w2} + b_1 \cdot t_1 + h_1 \cdot t_{w1} = 1.768 \times 10^4 \cdot mm^2$ $\qquad t_{u.eff} = 14 \cdot mm$

Överfläns $A_o := b_o \cdot t_o = 3520 \cdot mm^2$ $\qquad \frac{A}{2} = 8842 \cdot mm^2$

Underfläns $A_u := b_u \cdot t_{u.eff} = 5040 \cdot mm^2$

Plastiska neutrala lagret

$$PNL := \begin{array}{|l} \text{"i underflänsen"} \;\; \textit{if} \;\; A_u > 0.5 \cdot A \\ \text{"i överflänsen"} \;\; \textit{if} \;\; A_o > 0.5 \cdot A \\ \text{"i liven"} \;\; \textit{otherwise} \end{array} = \text{"i liven"}$$

Var i liven?

$$Aw2 := A_o + 2 \cdot t_w \cdot \left(h - h_2\right) = 6400 \cdot mm^2$$

$$Aw4 := A_u + 2 \cdot t_w \cdot \left(h_1 - 0.5 \cdot t_1\right) + \left(t_{w1} + t_{w2}\right) \cdot \left(h_1 - 0.5 \cdot t_1\right) = 7672 \cdot mm^2$$

$$Aw3 := Aw4 + b_1 \cdot t_1 + \left(t_{w2} + 2 \cdot t_w\right) \cdot t_1 = 9352 \cdot mm^2$$

$$PNL := \begin{array}{|l} \text{"i underdelen"} \;\; \textit{if} \;\; Aw2 < 0.5 \cdot A \wedge Aw4 > 0.5 \cdot A \\ \text{"i undre hyllan"} \;\; \textit{if} \;\; Aw4 < 0.5 \cdot A \wedge Aw3 > 0.5 \cdot A \\ \text{"i överdelen"} \;\; \textit{if} \;\; Aw3 < 0.5 \cdot A \wedge Aw2 > 0.5 \cdot A \\ \text{"i mittdelen"} \;\; \textit{otherwise} \end{array} = \text{"i undre hyllan"}$$

Neutrala lagret hamnar i underdelen av liven (fyra liv)

$PNL = \text{"i undre hyllan"}$

$$z := \frac{0.5 \cdot A - A_u}{2 \cdot t_w + t_{w1} + t_{w2}} = 135.8 \cdot mm \qquad h_1 = 100 \cdot mm$$

$$W_{pl.w} := A_o \cdot \left(h - z - 0.5 \cdot t_o\right) + t_w \cdot \left(h_w - z\right)^2 + t_w \cdot z^2 + A_u \cdot \left(z + 0.5 \cdot t_{u.eff}\right) = 2.106 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + 0.5 \cdot \left[t_{w2} \cdot \left(h_2 - z\right)^2 + t_{w2} \cdot z^2\right] + 0.5 \cdot \left[t_{w1} \cdot \left(h_1 - z\right)^2 + t_{w1} \cdot z^2\right]$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + b_2 \cdot t_2 \cdot \left(h_2 - z\right) + b_1 \cdot t_1 \cdot \left(h_1 - z\right) = 2.245 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} - 2 \cdot t_w \cdot b_h \cdot \left(h_w - z - b_{eff} - 0.5 \cdot b_h\right) = 2.177 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.eff} := if\left(PNL = \text{"i underdelen"}, W_{pl.w}, W_{el}\right) = 1.672 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Neutrala lagret hamnar i överdelen av liven (två liv)

$$z := h_w - \frac{0.5 \cdot A - A_o}{2 \cdot t_w} = -54.5 \cdot mm \qquad h_2 = 160 \cdot mm$$

$$W_{pl.w} := A_o \cdot \left(h - z - 0.5 \cdot t_o\right) + t_w \cdot \left(h_w - z\right)^2 + t_w \cdot z^2 + A_u \cdot \left(z + 0.5 \cdot t_{u.eff}\right) = 2.52 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + 0.5 \cdot \left[-t_{w2} \cdot \left(z - h_2\right)^2 + t_{w2} \cdot z^2\right] + 0.5 \cdot \left[-t_{w1} \cdot \left(z - h_1\right)^2 + t_{w1} \cdot z^2\right] = 2.264 \times 10^6 \cdot mm$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + b_2 \cdot t_2 \cdot \left(z - h_2\right) + b_1 \cdot t_1 \cdot \left(z - h_1\right) = 1.733 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} - 2 \cdot t_w \cdot b_h \cdot \left(h_w - z - b_{eff} - 0.5 \cdot b_h\right) = 1.569 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.eff} := if\left(PNL = \text{"i överdelen"}, W_{pl.w}, W_{pl.eff}\right) = 1.672 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Neutrala lagret hamnar i mittdelen av liven (tre liv)

$$PNL = \text{"i undre hyllan"}$$

$$z := \frac{0.5 \cdot A - A_u - b_1 \cdot t_1 - h_1 \cdot t_{w1}}{2 \cdot t_w + t_{w2}} = 78.1 \cdot mm \qquad h_2 = 160 \cdot mm \qquad h_1 = 100 \cdot mm$$

$$W_{pl.w} := A_o \cdot \left(h - z - 0.5 \cdot t_o\right) + t_w \cdot \left(h_w - z\right)^2 + t_w \cdot z^2 + A_u \cdot \left(z + 0.5 \cdot t_{u.eff}\right) = 2.14 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + 0.5 \cdot \left[t_{w2} \cdot \left(h_2 - z\right)^2 + t_{w2} \cdot z^2\right] + 0.5 \cdot \left[-t_{w1} \cdot \left(z - h_1\right)^2 + t_{w1} \cdot z^2\right]$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + b_2 \cdot t_2 \cdot \left(h_2 - z\right) + b_1 \cdot t_1 \cdot \left(z - h_1\right) = 2.3 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} - 2 \cdot t_w \cdot b_h \cdot \left(h_w - z - b_{eff} - 0.5 \cdot b_h\right) = 2.203 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.eff} := if\left(PNL = \text{"i mittdelen"}, W_{pl.w}, W_{pl.eff}\right) = 1.672 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Neutrala lagret hamnar i undre hyllan

$$PNL = \text{"i undre hyllan"}$$

$$z := \frac{0.5 \cdot A - A_u - t_{w1} \cdot \left(h_1 - 0.5 \cdot t_1\right) + b_1 \cdot \left(h_1 - 0.5 \cdot t_1\right)}{2 \cdot t_w + t_{w2} + b_1} = 102.4 \cdot mm \qquad h_1 + \frac{t_1}{2} = 106 \cdot mm$$

$$Koll := if\left(z > h_1 + \frac{t_1}{2}, \text{"PNL ligger ovanför hyllan"}, \text{"OK"}\right) = \text{"OK"}$$

$$W_{pl.w} := A_o \cdot \left(h - z - 0.5 \cdot t_o\right) + t_w \cdot \left(h_w - z\right)^2 + t_w \cdot z^2 + A_u \cdot \left(z + 0.5 \cdot t_{u.eff}\right) = 2.116 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + 0.5 \cdot \left[t_{w2} \cdot \left(h_2 - z\right)^2 + t_{w2} \cdot z^2\right] + 0.5 \cdot \left[-t_{w1} \cdot \left(z - h_1\right)^2 + t_{w1} \cdot z^2\right] = 2.213 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} + b_2 \cdot t_2 \cdot \left(h_2 - z\right) + 0.5 \cdot b_1 \cdot \left(z - h_1\right)^2 + 0.5 \cdot b_1 \cdot \left(t_1 - z + h_1\right)^2 = 2.302 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.w} := W_{pl.w} - 2 \cdot t_w \cdot b_h \cdot \left(h_w - z - b_{eff} - 0.5 \cdot b_h\right) = 2.217 \times 10^6 \cdot mm^3$$

$$W_{pl.eff} := if\left(PNL = \text{"i undre hyllan"}, W_{pl.w}, W_{pl.eff}\right) = 2.217 \times 10^6 \cdot mm^3$$

Jämför $W_{el} = 1.672 \times 10^6 \cdot mm^3$ och $W_{pl} = 2.299 \times 10^6 \cdot mm^3$

Neutrala lagret hamnar i övre hyllan

Det plastiska böjmotståndet kan bestämmas som för PNL i överdelen eller i mellandelen som skall ge ungefär samma resultet.

Tvärsnittsklass för liven vid tryckt underfläns

EN 1993-1-1, Tabell 5.2

$c := max(h_1, h_2) = 160 \cdot mm$ $\quad \alpha := 1 - \alpha = 0.268$ (se beräkning av plastiskt böjmotstånd)

$t_{min} := if(c = h_1, min(t_w, t_1), min(t_w, t_2)) = 6 \cdot mm$

$\frac{c}{t_{min}} = 26.67 \quad ct := \frac{c}{t_{min}} \quad \psi := \frac{z_{gc} - c}{z_{gc}} = -0.054$

Gränser enligt Tabell 5.2 kolumn 4

$g_{11} := \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} \quad g_{12} := \frac{36 \cdot \varepsilon}{\alpha} \quad g_{21} := \frac{456 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} \quad g_{22} := \frac{41.5 \cdot \varepsilon}{\alpha}$

$g_1 := if(\alpha > 0.5, g_{11}, g_{12}) = 109 \quad g_2 := if(\alpha > 0.5, g_{21}, g_{22}) = 126$

$g_{31} := \frac{42 \cdot \varepsilon}{0.67 + 0.33 \cdot \psi} \quad g_{32} := 62 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \psi) \cdot \sqrt{-\psi} \quad g_3 := if(\psi > -1, g_{31}, g_{32}) = 52$

$$Class_w := \begin{array}{|l} 1 \ \ if \ \ ct \le g_1 \\ 2 \ \ if \ \ ct \le g_2 \wedge ct > g_1 \\ 3 \ \ if \ \ ct \le g_3 \wedge ct > g_2 \\ 4 \ \ otherwise \end{array} = 1$$

Tvärsnittsklass för *balken* vid tryckt underfläns

$Class := max(Class_{um}, Class_w) = 1$

Observera att man inte skall använda effektiv tjocklek med hänsyn till last på underflänsen vid tvärsnitts-klassificeringen.

Böjning av underflänsen i tvärled

Det antas att det tvärböjande momentet upptas av underflänsen enbart. Se beräkning av "vanliga" hattbalker i Hatt-tvärsnitt.xmcd. Anledningen är att infästningen av förhöjningsplåtarna inte dimensioneras för att kunna uppta något moment i tvärled utan fungera som leder.

Beträffande övriga beräkningar se exempel 15