DIMENSJONERING AV SØYLE - BRUDDGRENSETILSTAND (ULS) (NS-EN 1992 Eurokode 2)

Søyle
Søylene betraktes som fritt opplagt i begge ender, og med fastholdte ender.

Diameter søyle	$d := 500\ mm$	
Radius søyle	$r := d \div 2 = 250\ mm$	
Lengde	$l_s := 15575\ mm$	
Betongtverrsnitt	$A_c := \pi \cdot r^2 = 196349.5\ mm^2$	
Lengdearmering	$\phi := 20\ mm$	SVV N400, 7.8.6
Bøylearmering	$\phi_b := 12\ mm$	SVV N400, 7.8.1

Bjelke

Høyde	$h := 900\ mm$
Bredde	$b := 900\ mm$
Lengde	$l_b := 18000\ mm$

Bjelkeverdier er basert på øvre del av kaiskjørtet omtalt som hovedbjelke.
Lengden på 18000mm tilsvarer to spenn á 9000mm.

Arealtreghetsmoment for søyle

$$I_s := \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \left(3.068 \cdot 10^9\right)\ mm^4$$

Arealtreghetsmoment for bjelke

$$I_b := \frac{b \cdot h^3}{12} = \left(5.468 \cdot 10^{10}\right)\ mm^4$$

OVERDEKNINGER

$c_{min.b} := 25\ mm$	EC 2, NA.4.2
$c_{min.dur} := 60\ mm$	EC 2, NA.4.4N
$\Delta c_{dur.\gamma} := 0\ mm$	EC 2, NA.4.4.1.2(6)
$\Delta c_{dur.st} := 0\ mm$	EC 2, NA.4.4.1.2(7)
$\Delta c_{dur.add} := 0\ mm$	EC 2, NA.4.4.1.2(8)
$\Delta c_{dev} := 10\ mm$	EC 2, NA.4.4.1.3(1)

EC 2, 4.4.1.2

$$c_{min} := \max\left(c_{min.b}, c_{min.dur} + \Delta c_{dur.\gamma} - \Delta c_{dur.st} - \Delta c_{dur.add}, 10\ mm\right) = 60\ mm$$

$c_{nom} := c_{min} + \Delta c_{dev} = 70\ mm$ EC 2, 4.4.1.3

MATERIALER

$\gamma_s := 1.00$ EC 2, Tabell NA.2.1N (Bruddgrensetilstand)

$f_{yk} := 500\ MPa$

$f_{yd} := \dfrac{f_{yk}}{\gamma_s} = 500\ MPa$

$E_s := 200000\ MPa$ EC 2, 3.2.7(4)

$\varepsilon_{yd} := \dfrac{f_{yd}}{E_s} = 0.003$

$\gamma_c := 1.2$ EC 2, Tabell NA.2.1N (Bruddgrensetilstand)

$\alpha_{cc} := 0.85$ EC 2, NA.3.1.6(1)

$f_{ck} := 45\ MPa$ EC 2, Tabell 3.1

$f_{cd} := \alpha_{cc} \cdot \dfrac{f_{ck}}{\gamma_c} = 32\ MPa$ EC 2, 3.1.6

$E_{cm} := 36000\ MPa$ EC 2, Tabell 3.1

FØRSTE ORDENS LASTER - SØYLE #3

I snittet er det søyle nummer 3 som blir dimensjonerende.
Etter analyse av lastkombinasjoner i Robot velges 3 tilfeller for manuell kontroll:

ULS - Bruddgrensetilstand

Første

$N_{Ed.1} := 1383\ kN$
$M_{Ed.1} := 45\ kN \cdot m$

Andre

$N_{Ed.2} := 1016\ kN$
$M_{Ed.2} := 66\ kN \cdot m$

Tredje

$N_{Ed.3} := 630\ kN$
$M_{Ed.3} := 89\ kN \cdot m$

$$M_{Ed.max} := \max\left(M_{Ed.1}, M_{Ed.2}, M_{Ed.3}\right) = 89\ kN \cdot m$$

$$N_{Ed.max} := \max\left(N_{Ed.1}, N_{Ed.2}, N_{Ed.3}\right) = 1383\ kN$$

De tre gitte lasttilfellene over er kontrollert enkeltvis, men utgjør ingen vesentlige endringer kapasitetsmessig. Derfor velges største aksialkraft og største moment som dimesjonerende laster for videre dimensjonering.

Ved å velge de største lastene fra ulike tilfeller får man et nok så konservativt lasttilfelle. Dette kan bety at tverrsnittet kan bli overdimensjonert, men det er ved gjennomgang fastslått at tverrsnittet likevel ikke kan bli slankere.

ANTALL ARMERINGSJERN

Avstand fra senter av tverrsnitt, til senter lengdearmering.

$$r' := \frac{d}{2} - c_{nom} - \phi_b - \frac{\phi}{2} = 158\ mm$$

Diameter fra armering til armering.

$$d' := 2 \cdot r' = 316\ mm$$

Avstand fra ytterkant av betong, til senter lengdearmering.

$$d1 := c_{nom} + \phi_b + \frac{\phi}{2} = 92\ mm$$

Overflate betong til senter armerig andre siden.

$$d_1 := d - d1 = 408\ mm$$

Bestemmer hvilket diagram for M-N som skal brukes.

$$\frac{d'}{d} = 0.6 \qquad \frac{d1}{d_1} = 0.225$$

Omkrets av tverrsnittet ved armeringens plassering.

$$o_{arm.} := \pi \cdot r' = 496\ mm$$

$$d_g := 16\ mm$$

$$k_1 := 2$$ EC 2, NA.8.2(2)

$$k_2 := 5\ mm$$

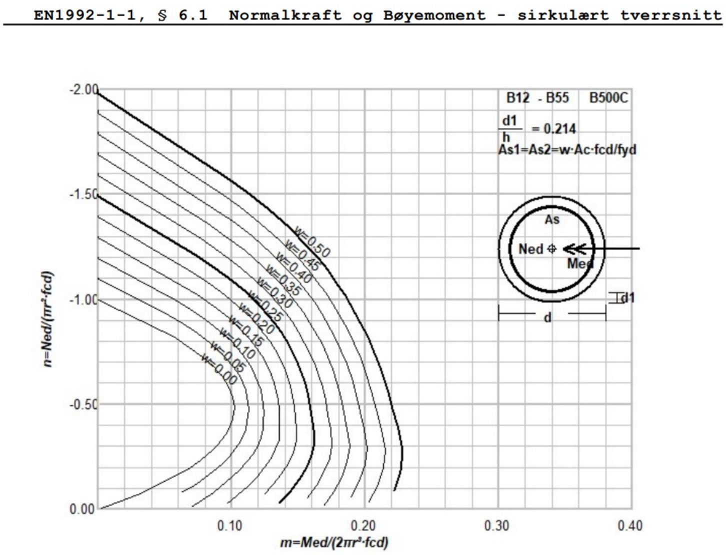
$$a := d_g + k_2 = 21\ mm$$

NØDVENDIG ARMERING

$$m_f := \frac{M_{Ed.max}}{f_{cd} \cdot A_c \cdot d} = 0.03$$

$$n_f := \frac{N_{Ed.max}}{f_{cd} \cdot A_c} = 0.22$$

Finner w fra dimensjoneringsdiagram for sirkulære tverrsnitt med symetrisk fordelt armering - d'/d



$$\omega := 0.00$$

Finner nødvendig armering:

$$A_{s.nød} := \left(\frac{2 \cdot \omega \cdot f_{cd} \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot f_{yd}} \right) = 0\ mm^2$$

Selv om nødvendig armering er $0\,mm^2$, må tverrsnittet likevel oppfylle kravene i EC2 til $A_{s.min}$ og $A_{s.max}$

Minste armering bestemmes av utrykket $0.2 \cdot A_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \leq 0.5 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$ EC 2, NA.9.5.3(2)

$$A_{s.min.1} := \begin{cases} \left| 0.2 \cdot A_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \right| & \text{if } \left| 0.2 \cdot A_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \right| \leq \left| 0.5 \cdot \frac{N_{Ed.max}}{f_{yd}} \right| \\ \left| 0.5 \cdot \frac{N_{Ed.max}}{f_{yd}} \right| & \text{else} \end{cases} = 1383\ mm^2$$

Men ikke mindre tverrsnitt enn $0.01 \cdot A_c$ EC 2, NA.9.5.3(3)

$$A_{s.min} := \begin{cases} 0.01 \cdot A_c & \text{if } \left| A_{s.min.1} \right| \leq \left| 0.01 \cdot A_c \right| \\ \left| A_{s.min.1} \right| & \text{else} \end{cases} = 1963\ mm^2$$

Største armering må ikke overskride $0.08 \cdot A_c\ eller\ 0.04 \cdot A_c$

$$A_{s.max} := \begin{cases} 0.08 \cdot A_c & \text{if } \left| 0.08 \cdot A_c \right| \geq \left| 0.04 \cdot A_c \right| \\ 0.04 \cdot A_c & \text{else} \end{cases} = 15708\ mm^2$$

EC 2, NA.9.5.3(3)

Manuell kontroll av nødvendig armering ved bruk av M-N diagram ga $0\ mm^2$ i resultat, og tilfredsstiller derfor ikke kontrollen. Det vil derfor bli foretatt en kontroll i ISY Design.

LENGDEARMERING

Areal for valgt armering ϕ: $A_{\phi} := \pi \cdot \frac{\phi^2}{4} = 314\ mm^2$

Antall stenger i søyletverrsnittet: $n_{\phi 1} := \frac{A_{s.min}}{A_{\phi}} = 6.25$

-> Velger x antall stenger $n_{\phi} := \text{ceil}\left(n_{\phi 1}\right) = 7$

Valgt armeringstverrsnitt $A_s := n_{\phi} \cdot A_{\phi} = 2199\ mm^2$

Kontroll

$$\begin{array}{l} \text{if } A_s > A_{s.min} \\ \quad \text{"OK!"} \\ \text{else} \\ \quad \text{"UNDERKJENT!"} \end{array} = \text{"OK!"}$$

Senteravstand mellom hver stang: $a_s := \frac{o_{arm.}}{n_{\phi}} = 70.9\ mm$

Fri avstand mellom hver stang: $a_{h1} := a_s - \phi = 50.9\ mm$

-> Runder opp $a_h := \text{ceil}\left(\frac{a_{h1}}{mm}\right) \cdot mm = 51\ mm$

$s := a_h$

Sjekker krav om minimum fri avstand fra EC 2, 8.2(2) $s_{h.min} := \max\left(\phi \cdot k_1, d_g + k_2, 20\ mm\right) = 40\ mm$

a_h blir større enn kravet i $s_{h.min}$, derfor velges fri avstand mellom hver stand lik a_h.

Velger da:

$n_{\phi} = 7$
$\phi = 20\ mm$
$s = 51\ mm$

BØYLEARMERING

Det er etter EC 2, 9.5.3(1) krav om at lengdearmeringen sikres med tverrarmerin av bøyler med diameter som ikke bør være mindre enn 6 mm. Her velges bøyler med ϕ_b.

Senteravstand mellom hver bøyle bestemmes av EC 2, 9.5.3(3):

$$s_{cl.tmax} := min\left(20 \cdot \phi, d, 400\ mm\right) = 400\ mm$$

AKSIALKRAFTKAPASITET

N_{Rd} blir beregnet som kapasiteten til en søyle med sentrisk aksiallast.

Dimensjoneringskriterium: $N_{Rd} \geq N_{Ed}$

$$N_{Rd} := f_{cd} \cdot (A_c - A_s) + f_{yd} \cdot A_s = 7288.102 \ kN$$

$$N_{Rd.1} := \text{if } N_{Rd} > N_{Ed.1} \;\Vert\; N_{Rd} \;\text{else}\; \Vert\; N_{Ed.max} = 7288 \ kN$$

$$KONTROLL_{NRd1} := \text{if } N_{Rd.1} > N_{Ed.max} \;\Vert\; \text{"OK"} \;\text{else}\; \Vert\; \text{"UNDERKJENT"} = \text{"OK"}$$

Utnyttelse: $\dfrac{N_{Ed.max}}{N_{Rd}} = 0.19$ God restkapasitet.

Knekklengde basert på rotasjonsinnspenningsgrad
Bruker regnemetode for uforskyvelige ender med tverrlast.

Basert på innspenningsgrad med c=4.8:

$$R_A := \left(\frac{\dfrac{2 \cdot 3 \cdot E_{cm} \cdot I_b}{l_b}}{\dfrac{2 \cdot 3\ E_{cm} \cdot I_b}{l_b} + \dfrac{4.8 \cdot E_{cm} \cdot I_s}{l_s}} \right) = 0.951$$ EC 2, 5.8.3.2(3, 4)

$$R_B := \left(\frac{\dfrac{2 \cdot 4 \cdot E_{cm} \cdot I_b}{l_b}}{\dfrac{2 \cdot 4\ E_{cm} \cdot I_b}{l_b} + \dfrac{4.8 \cdot E_{cm} \cdot I_s}{l_s}} \right) = 0.963$$

Utregning basert på innspenningsgrad tillater å medregne bidrag til rotasjon i knekkingen av søylen, som følge av stivheten i innspenningen mellom bjelke og søyle. Dimensjoneringen blir dermed mer konservativ. EC 2, 5.8.3.2(4)

KNEKKLENGDE

$\beta_0 := \dfrac{2}{2+1.1 \cdot R_A + 0.9 \cdot R_B} = 0.511$ EC 2, 5.8.3.2(3)

Knekklengde $l_0 := \beta_0 \cdot l_s = 7.963\ m$

Infleksjonspunkt

$L_A := (1-\beta_0) \cdot \dfrac{R_A}{R_A + R_B} \cdot l_s = 3.783\ m$ $L_B := (1-\beta_0) \cdot \dfrac{R_B}{R_A + R_B} \cdot l_s = 3.83\ m$

SLANKHET
Anser søylen som en uforskyvelig stav med tverrlast.

$i := \sqrt{\dfrac{I_s}{A_c}} = 125\ mm$ $Sørensen(6,5)$

$\lambda := \dfrac{l_0}{i} = 63.701$ EC 2, (5.14)

$r_m := 1$ EC 2, (NA 5.8.3.1)

Relativ luftfuktighet 80 % for søyler over vann SVV H400 - 7.2.3.

$\varphi_{\infty.to} := 1.21$ EC 2, 3.1.4

Det kan ses bort fra virkningen av kryp når følgende vilkår oppfylles. Da settes φ_{ef} lik 0: EC 2, 5.8.4(4)

$$\varphi_{ef} := \begin{array}{l} \text{if } \varphi_{\infty.to} \ge 2 \\ \quad \text{“Ta hensyn til kryp”} \\ \text{also if } \lambda \ge 75 \\ \quad \text{“Ta hensyn til kryp”} \\ \text{also if } \dfrac{M_{Ed.max}}{N_{Ed.max}} \ge d \\ \quad \text{“Ta hensyn til kryp”} \\ \text{else} \\ \quad 0 \end{array} = 0$$

$h'_s := d - 2 \cdot c_{nom} - 2 \cdot \phi_b = 336\ mm$

$n := \frac{N_{Ed.max}}{(A_c \cdot f_{cd})} = 0.221$ EC 2, NA (5.8.3.1(1))

$A_{\varphi 1} := \left(\frac{1.25}{(1 + 0.2 \cdot \varphi_{ef})} \right) = 1.25$ $A_{\varphi 2} := 1$ EC 2, NA (5.8.3.1)

$$A_{\varphi} := \text{if } \left| A_{\varphi 1} \le A_{\varphi 2} \right| \; \| A_{\varphi 1} \; \text{else} \; \| A_{\varphi 2} = 1$$

$k_a := \left(\frac{\frac{h'_s}{2}}{\frac{d}{\sqrt{12}}} \right) = 1.164$ Sørensen, (6.7)

$w := \frac{A_s \cdot f_{yd}}{f_{cd} \cdot A_c} = 0.176$ EC 2, NA (5.8.3.1(1))

$\lambda_n := \lambda \cdot \sqrt{\frac{n}{1 + 2 \cdot k_a \cdot w}} = 25.227$ EC 2, NA (5.8.3.1(1))

$\lambda_{n.lim} := 13 \cdot A_{\varphi} = 13$ EC 2, NA 5.13aN

$\lambda_n \le \lambda_{n.lim}$

EC 2, NA (5.8.3.1(1))
Hvis $\lambda_n \le \lambda_{n.lim}$ kan 2.ordens effekter ses bort i fra.

$$Kontroll := \text{if } \left| \lambda_n \le \lambda_{n.lim} \right| \; \| \text{“Ingen videre kontroll”} \; \text{else} \; \| \text{“2.ordens effekter må medregnes”} = \text{“2.ordens effekter må medregnes”}$$

EC 2 angir ingen øvre grense for slankhet, men grenser fra NS 3473 kan benyttes. Det bemerkes at NS 3473 er tilbaketrukket og erstattet av EC 2. — Sørensen

$\lambda_{n.max} < 45$ — Maks slankhet, Sørensen (6.14)

$\lambda_{max} < 80 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot k_a \cdot w}$ — Sørensen (6.15)

$\lambda_{n.max} := \lambda_n = 25$

$\lambda_{max} := 80 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot k_a \cdot w} = 94.96$ — $OK!$

$A_{s.beregna} := \max\left(A_s, A_{s.min}\right) = 2199.115\ mm^2$

BEREGNING AV 2.ORDENS UTBØYNING

$r_0 := 0.45 \cdot \frac{d}{\varepsilon_{yd}} = 90\ m$ — EC 2, 5.8.8.3(1)

$w := \frac{\left(A_s \cdot f_{yd}\right)}{\left(A_c \cdot f_{cd}\right)} = 0.176$ — EC 2, 5.8.8.3(3)

$n_u := 1 + w = 1.176$ — EC 2, 5.8.8.3(3)

$n_{bal} := 0.4$ — EC 2, 5.8.8.3(3)

$K_r := min\left(\frac{\left(n_u - n_f\right)}{n_u - n_{bal}}, 1\right) = 1$ — EC 2, (5.36)

$\beta := 0.35 + \frac{f_{ck}}{200 \cdot \frac{N}{mm^2}} - \frac{\lambda}{150} = 0.15$ — EC 2, 5.8.8.3(4)

$K_\varphi := 1 + \beta \cdot \varphi_{ef} = 1$ — EC 2, (5.36)

$r_1 := \frac{r_0}{K_r \cdot K_\varphi} = 90\ m$ — EC 2, (5.36)

$e_2 := \frac{{l_0}^2}{r_1 \cdot \pi^2} = 71.378\ mm$ — EC 2, 5.8.8.3(2)

$M_2 := N_{Ed.max} \cdot e_2 = 98.7\ kN \cdot m$ 2.ordens moment

EKVIVALVENT 1.ORDENS MOMENT

$M_{Ed.1} := M_{Ed.max} + M_2 = 188\ kN \cdot m$ EC 2, (5.31)

$e_0 := \max\left(\frac{d}{30}, 20\ mm\right) = 20\ mm$

$$M_{Ed} := \begin{cases} M_{Ed.1} & \text{if } \frac{M_{Ed.1}}{N_{Ed.max}} > e_0 \\ N_{Ed.max} \cdot e_0 & \text{else} \end{cases} = 188\ kN \cdot m$$

$m_{rev} := \frac{M_{Ed}}{f_{cd} \cdot \pi \cdot \frac{d^3}{4}} = 0.06$ $n_{rev} := \frac{N_{Ed.max}}{A_c \cdot f_{cd}} = 0.221$

$w_{diag.rev} := 0$ $A_{s.rev} := \frac{\left(w_{diag.rev} \cdot f_{cd} \cdot A_c\right)}{f_{yd}} = 0\ mm^2$

Gir ingen endring - bruker samme som før: $n_\phi = 7$ $\phi = 20\ mm$

$w_{rev} := \frac{\left(7 \cdot \pi \cdot \frac{\phi^2}{4} \cdot f_{yd}\right)}{f_{cd} \cdot A_c} = 0.176$ EC 2, 5.8.8.3(3)

$\lambda_{n.rev} := \lambda \cdot \sqrt{\frac{n}{1 + 2 \cdot k_a \cdot w}} = 25.227$ EC 2, 5.8.3.1(1)

$\lambda_{n.lim.rev} := 13 \cdot A_\varphi = 13$ EC 2, NA.5.13aN

$\frac{\lambda_{n.rev}}{\lambda_{n.lim.rev}} = 1.941$

$\lambda_n \le \lambda_{n.lim}$

$$Kontroll := \text{if } \left|\lambda_{n.rev} \le \lambda_{n.lim.rev}\right| \;\; \| \text{“Ingen videre kontroll”} \;\; \text{else} \;\; \| \text{“2.ordens effekter må medregnes”} = \text{“2.ordens effekter må medregnes”}$$

BEREGNING AV 2.ORDENS UTBØYNING REV.

$$r_0 := 0.45 \cdot \frac{d}{\varepsilon_{yd}} = 90\ m$$ EC 2, 5.8.8.3(1)

$$n_u := 1 + w_{rev} = 1.176$$ EC 2, 5.8.8.3(3)

$$n_{bal} := 0.4$$ EC 2, 5.8.8.3(3)

$$K_{r.rev} := min\left(\frac{(n_u - n_f)}{n_u - n_{bal}}, 1\right) = 1$$ EC 2, (5.36)

$$\beta := 0.35 + \frac{f_{ck}}{200 \cdot \frac{N}{mm^2}} - \frac{\lambda}{150} = 0.15$$ EC 2, 5.8.8.3(4)

$$K_\varphi := 1 + \beta \cdot \varphi_{ef} = 1$$ EC 2, (5.36)

$$r_{rev} := \frac{r_0}{K_r \cdot K_\varphi} = 90\ m$$ EC 2, (5.36)

$$e_{2.rev} := \frac{{l_0}^2}{r_{rev} \cdot \pi^2} = 71.378\ mm$$ EC 2, 5.8.8.2(3)

$$M_{2.rev} := N_{Ed.max} \cdot e_{2.rev} = 99\ kN \cdot m$$

Ekvivalent 1.ordens moment

$$M_{Ed.1} := M_{Ed.max} + M_{2.rev} = 188\ kN \cdot m$$ EC 2, (5.31)

$$M_{Ed.rev} := \text{if } \frac{M_{Ed.1}}{N_{Ed.max}} > e_0 \;\; \| M_{Ed.1} \;\; \text{else} \;\; \| N_{Ed.max} \cdot e_0 = 188\ kN \cdot m$$

$m_{rev} := \frac{M_{Ed.rev}}{f_{cd} \cdot \pi \cdot \frac{d^3}{4}} = 0.06$ $\qquad$ $n_{rev} := \frac{N_{Ed.max}}{A_c \cdot f_{cd}} = 0.221$

$w_{diag.rev} := 0$ $\qquad$ Fra N-M diagram

$$A_{s.rev.2} := \frac{\left(w_{diag.rev} \cdot f_{cd} \cdot A_c\right)}{f_{yd}} = 0 \ mm^2$$

Gir ingen endring - bruker samme som før: $n_{\phi} = 7$ $\qquad$ $\phi = 20 \ mm$

Konklusjon

$$\begin{bmatrix} \lambda \\ \lambda_n \\ \lambda_{n.rev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 63.7 \\ 25.2 \\ 25.2 \end{bmatrix}$$

Øvre slankhetsgrense fra NS3473

$$\begin{bmatrix} \lambda_{max} \\ \lambda_{n.max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 95 \\ 25 \end{bmatrix}$$

Sørensen, (6.15)

Sørensen, (6.14)

OK!

$A_s = 2199 \ mm^2$

$A_{s.max} = 15708 \ mm^2$

Konklusjon:

Fordi søylen blir lang og slank må vi regne ut 2.ordens moment for å kontrollere at søylen ikke får stabilitetsbrudd. Etter kontroll av dette gir ikke utregning av 2.ordens moment behov for ytterliggere armering.