

Innholdsfortegnelse vedlegg

Vedleggsbeskrivelse	III
Vedlegg A.....	IV
Overdekning overside.....	IV
Overdekning underside spennrør.....	IV
Vedlegg B	V
Egenlast.....	V
Landkar	V
Endeskjørt.....	V
Belegning.....	V
Rekkverk.....	V
Kantdrager	VI
Variable laster	VII
Trafikklast.....	VII
Termisk last	VII
Vedlegg C	IX
Opptredende laster	IX
Håndberegninger.....	IX
Vedlegg D	XI
Bruddgrensetilstand	XI
Momentkapasitet.....	XI
Skjærkapasitet.....	XII
Vedlegg E	XIV
Spennkraft.....	XIV
Armeringsmengde.....	XIV
Balansert armering.....	XV
Eksentrisiteter	XVI
Spennkrafttap	XVII
Låsetap.....	XVII
Friksjonstap.....	XVIII
Vedlegg F.....	XX
Brukgrensetilstand.....	XX
Spenningsbegrensing	XX
Langtidseffekter	XXII
Krypfaktor.....	XXII
Svinnfaktor	XXIII

Relaksasjonstap.....	XXV
Vedlegg G.....	XXVII
Bøyning.....	XXVII
Bøyestivhet i stadium I	XXVII
Negativ langtidsbøyning fra permanente laster	XXVII
Negativ bøyning fra svinn	XXVIII
Positiv bøyning fra spennarmering.....	XXVIII
Total bøyning.....	XXIX
Vedlegg H.....	XXX
Armering i tverrsnittet	XXX
Lengdearmering underkant.....	XXX
Tverrarmering underkant.....	XXXI
Lengdearmering overkant.....	XXXII
Tverrarmering overkant.....	XXXIII
Skjærarmering.....	XXXIII
Spennarmering.....	XXXIV
Referanseliste vedlegg.....	XXXV

Vedleggsbeskrivelse

Vedleggslisten er strukturert i form av Vedlegg A til H, hvor hvert vedlegg er knyttet til et spesifikt delkapittel i rapporten som beskriver beregningene. Det brukt referanser for verdier, formler, krav og variabelantagelser, og disse er oppgitt etter beregningene i hvert delkapittel.

Vedlegg A

Overdekning overside

$$C_{min} = maks \{ C_{min,b} * C_{min,dur} + \Delta C_{dur,y} - \Delta C_{dur,add} - \Delta C_{dur,st} \}$$

Der:

$$C_{min,b} = \emptyset = 32 \text{ mm}$$

$$C_{min,dur} = 50 \text{ mm}$$

$$\Delta C_{dur,y} = \Delta C_{dur,add} = \Delta C_{dur,st} = 0 \text{ mm}$$

$$C_{min} = 50 \text{ mm}$$

$$\Delta C_{dev} = 10 \text{ mm}$$

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev} = 50 \text{ mm} + 10 \text{ mm} = 60 \text{ mm}$$

Hentet fra:

- EC2, del 1-1, Tabell NA.4.4N [3]

Overdekning underside spennrør

$$C_{min} = maks \{ C_{min,b} * C_{min,dur} + \Delta C_{dur,y} - \Delta C_{dur,add} - \Delta C_{dur,st} \}$$

Der:

$$C_{min,b} = \emptyset = 110 \text{ mm} \leq 80 \text{ mm} \Rightarrow C_{min,b} = 80 \text{ mm}$$

$$C_{min,dur} = 60 \text{ mm}$$

$$\Delta C_{dur,y} = \Delta C_{dur,add} = \Delta C_{dur,st} = 0 \text{ mm}$$

$$C_{min} = 80 \text{ mm}$$

$$\Delta C_{dev} = 10 \text{ mm}$$

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev} = 80 \text{ mm} + 10 \text{ mm} = 90 \text{ mm}$$

Hentet fra:

- EC2, del 1-1, Tabell NA.4.5N [3]

Vedlegg B

Egenlast

$$g_1 = \rho_c * A_c = \frac{25 \text{ kN}}{\text{m}^3} * 3,2 \text{ m}^2 = 79,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Landkar

$$\text{Areal rektangel: } A_r = b_r * l_r = 0,5 \text{ m} * 6 \text{ m} = 3 \text{ m}^2$$

$$\text{Massesenter Rektangel: } Z_{c,r} = 12 * l_r = 0,5 * 6 \text{ m} = 3 \text{ m}$$

$$\text{Areal trekant: } A_t = \frac{1}{2} * b_t * l_r = 0,5 * 3,3 \text{ m} * 6 \text{ m} = 9,9 \text{ m}^2$$

$$\text{Massesenter trekant: } Z_{c,t} = \frac{1}{3} * l_r = \frac{1}{3} * 6 \text{ m} = 2 \text{ m}$$

$$\text{Volum landkarvinge: } V_{lv} = (A_r + A_t) * h_{lv} = (9,9 \text{ m}^2 + 2 \text{ m}^2) * 0,3 \text{ m} = 3,9 \text{ m}^3$$

$$\text{Massesenter landkarvinge: } Z_{c,lv} = \frac{(Z_{c,t} * A_t) + (Z_{c,r} * A_r)}{A_t + A_r} = \frac{(2 * 9,9) + (3 * 3)}{9,9 + 3} = 2,2 \text{ m}$$

$$\text{Last per vinge: } P_v = m * V_v = 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 3,87 \text{ m}^3 = 96,8 \text{ kN}$$

Endeskjørt

Areal endeskjørt:

$$A_e = b * h = 3,8 \text{ m} * 0,5 \text{ m} = 1,9 \text{ m}^2$$

$$\text{Punktlast endeskjørt: } P_e = l * A_e * m_e = 5 \text{ m} * 1,9 \text{ m}^2 * 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 237,5 \text{ kN}$$

Belegning

$$q_1 = m_b * b_{vei} = 2,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 5 \text{ m} = 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Rekkverk

$$q_2 = n * q_{rekkverk} = 2 * 0,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Kantdrager

$$q_1 = p_c * A_k = 2 * 25 \frac{kN}{m^3} * 0,2m^2 = 10 \frac{kN}{m}$$

Utkrager

$$g_1 = (b_u * h_u) * \rho_c = (1,5 m * 0,8) * 25 \frac{kN}{m^3} = 30 \frac{kN}{m}$$

Laster	Karakteristisk last	Dominerende egenlast		Dominerende trafikklast	
		Lastfaktor	Dim. last	Lastfaktor	Dim. last
Egenvekt	30 kN/m	1,35	40,5 kN/m	1,20	36 kN/m
Belegning	10 kN/m	1,35	13,5 kN/m	1,20	12 kN/m
Rekkverk	1,0 kN/m	1,35	1,35 kN/m	1,20	1,2 kN/m
Kantdrager	10 kN	1,35	13,5 kN/m	1,20	12 kN/m
Jevnt fordelt last	5,0 kN/m	0,95	4,75 kN/m	1,35	6,75 kN/m
Service kjøretøy	80 kN/m	0,95	76 kN/m	1,35	108 kN/m

Trafikklast:

$$g_{Ed,sub} = (36 + 12) \frac{kN}{m} = 48 \frac{kN}{m}$$

$$q_{Ed,dom} = 5,0 \frac{kN}{m} * 1,35 \frac{kN}{m} = 6,8 \frac{kN}{m}$$

$$P_{Ed,dom} = 80 \frac{kN}{m} * 1,35 = 108 \frac{kN}{m}$$

$$P_{Ed,sub} = 10 \frac{kN}{m} * 1,2 = 12 \frac{kN}{m}$$

$$M_{Ed.TR.dom} = 108 \frac{kN}{m} * 1,5m + 12 \frac{kN}{m} * 1,5m + 108 \frac{kN}{m} * 0,8m + 6,75 \frac{kN}{m} * 1,5m * 0,75m \\ + 48 \frac{kN}{m} * 1,5m * 0,75m = 327,99 \text{ kNm}$$

Hentet fra:

- EC0, Tabell NA.A2.4(B) [4]

Variable laster

Trafikklaster

$$q_{fk} = 5 \frac{kN}{m^2}$$

$$Q_{f_{wk}} = 10 \text{ kN}$$

$$Q_{sv1} = 80 \text{ kN}$$

$$Q_{sv2} = 40 \text{ kN}$$

Hentet fra:

- EC1, del 2, 5.3.2.1 [2]
- EC1, del 2, 5.3.2.2, Figur 5.2 [2]

Termisk last

$T_{max} = 35^{\circ}C$ i skyggen ved havnivå ved en returperiode på 50 år

$T_{min} = -30^{\circ}C$ i skyggen ved havnivå ved en returperiode på 50 år

$T_0 = 10^{\circ}C$ initialtemperatur

$$T_{e,max} = T_{max} - 3 = 35 - 3 = 32^{\circ}C$$

$$T_{e,min} = T_{min} + 8 = -30 + 8 = -22^{\circ}C$$

$$\Delta T_{N.con} = 10 - (-22) = 32^{\circ}C$$

$$\Delta T_{N.exp} = 32 - 10 = 22^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{M.heat} = 15$$

$$\Delta T_{M.cool} = 8$$

$$\Delta T_{M.heat.f} = \Delta T_{M.heat} * k_{sur1} = 15 * 0,8 = 12$$

$$\Delta T_{M.cool.f} = \Delta T_{M.cool} * k_{sur2} = 8 * 1,0 = 8$$

Overside varmere enn underside:

$$\Delta T_{M.heat.f} + \omega_N * \Delta T_{N.exp} = 12 + 0,35 * 22 = 19,7^{\circ}\text{C}$$

$$\omega_M * \Delta T_{M.heat.f} + \Delta T_{N.exp} = 0,75 * 12 + 22 = 31^{\circ}\text{C}$$

Underside varmere enn overside:

$$\Delta T_{M.cool.f} + \omega_N * \Delta T_{N.con} = 8 + 0,35 * 32 = 19,2^{\circ}\text{C}$$

$$\omega_M * \Delta T_{M.cool.f} + \omega_N * \Delta T_{N.con} = 0,75 * 8 + 0,35 * 32 = 17,2^{\circ}\text{C}$$

Hentet fra:

- EC1, del 1-5, NA.A1 [1]
- EC1, del 1-5, NA.A2 [1]

Vedlegg C

Opptredende laster

Håndberegninger

Permanente laster:

$$g_2 = q_1 + n * q_2 + q_3 = (10 + n * 0,5 + 10) \frac{kN}{m} = 21 \frac{kN}{m}$$

Total dimensjonert fordelt last:

$$\begin{aligned} q_{tot} &= q_{LM3} * \gamma_{TR} + g_1 * \gamma_G + g_2 * \gamma_g \\ &= (25 * 1,35 + 79,375 * 1,2 + 21 * 1,2) \frac{kN}{m} \\ &= 154,2 \frac{kN}{m} \end{aligned}$$

Beregning av moment:

Moment i midfelt:

$$M_{q.maks} = \frac{ql^2}{8} = \frac{154,2 * 28^2}{8} = 15111,6 \text{ kNm}$$

Dim. Punktlast fra landkar:

$$P_{Ed} = (P_v * n + P_e * n) * 1,35 = (96,75 * 2 + 237,5 * 2) * 1,35 = 802,2 \text{ kN}$$

Moment midt i felt:

$$M_{q.maks} = \frac{P * \frac{L^2}{2}}{L} = \frac{802,2 \text{ kN} * 14^2}{28} = 5615,4 \frac{kN}{m}$$

Superposisjonsprinsippet:

$$M_{tot} = M_{p.maks} + M_{q.maks} = 5615,4 + 15111,6 \frac{kN}{m} = 20727 \frac{kN}{m}$$

Skjærberegning:

$$V_{zq} = \frac{q_{tot} * l}{2} = \frac{154,2 * 28}{2} = 2158,8 \text{ kN}$$

$$V_{zp} = 802,2 \text{ kN}$$

Superposisjonsprinsippet:

$$V_{tot} = V_{zq} + V_{zp} = 802,2 \text{ kN} + 2158,8 \text{ kN} = 2960 \text{ kN}$$

Hentet fra:

- EC0 [4]

Vedlegg D

Bruddgrensetilstand

Momentkapasitet

$$M_{ED} = 16847,5 * 10^6$$

$$b = 5000mm$$

$$d = 658,75mm$$

$$\alpha = \frac{\text{høyde med konstant bredde}}{h * 0,8}$$

$$\alpha = \frac{250mm}{800mm * 0,8} = 0,3906$$

$$\text{Effektiv trykksone} = \alpha * d * 0,8 = 0,3906 * 658,75 * 0,8 = 205,85mm$$

$$A_p \geq \frac{M_{ED}}{f_{pd} * (1 - 0,4\alpha) * d} = \frac{16847,5 * 10^6}{1426,09 * (1 - 0,4 * 0,3906) * 658,75} = 21253,78mm^2$$

$$M_{Rd} = 0,8 * \alpha(1 - 0,4 * \alpha) * f_{cd} * b * d^2$$

$$= 0,8 * 0,3906(1 - 0,4 * 0,3906) * 25,5 * 5000 * 658,75^2$$

$$= 14587,89 kNm$$

Ser at momentkapasiteten er mindre enn opptredende kapasitet. Må derfor beregne for trykkarmering slik at kravet blir tilfredsstilt.

$$C = 60mm$$

$$\emptyset_w = 25 * 1,25 = 31,25$$

$$R_{r\emptyset r} = \frac{100}{2} = 50mm$$

$$\frac{\emptyset_L}{2} = \frac{25}{2} = 12,5 \text{ mm}$$

Distanse mellom rør og spennarmering: 50 mm

$$M_{ED} - M_{Rd} = A_{r_{ok-Ap}} * f_{yd} * A_{s.ok}$$

$$16847,5 \text{ kNm} - 14587,89 \text{ kNm}$$

$$= 800 \text{ mm} - (60 \text{ mm} + 31,25 + 12,5) - \left(60 + 31,25 + 25 + 50 + \frac{100}{2} \right) \\ * 434,78 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 10827,36 \text{ mm}^2$$

$$A_{s.ok} = \frac{2259,61 * 10^6}{480 * 434,78} = 10827,36 \text{ mm}^2$$

$$M_{Rd.total} = M_{Rd} + A_{s.ok} = 14587,89 \text{ kNm} + 10827,25415,25 > 16847,49$$

Hentet fra:

- Betongkonstruksjoner 7.1.2 [5]
- EC2, del 1-1, NA.3.1.6 [3]

Skjærkapasitet

$$V_{Rd,c} = \frac{I * b_w}{S} * \sqrt{f_{ctd^2}} + \alpha_1 * \sigma_{cp} * f_{ctd}$$

Der:

$$I_y = \frac{b * h^3}{12} = 85333333333 \text{ mm}^4$$

$$S_y = A * x_0 = 160000000 \text{ mm}^3$$

$$A_c = 2000 * 800 = 1600000 \text{ mm}^2$$

$$N_{Ed} = P_{max} - \Delta P_{tap} = P_{max} - (\Delta P_{lås} + \Delta P_{\mu}(x = 27)) = 30293,5 - (797,2 + 1192,8) \\ = 28305,5 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} = \frac{28305,5 * 10^3}{1600000} = 0,177$$

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} * \frac{f_{ctk0,05}}{\gamma_c} = 0,85 * \frac{2,7}{1,5} = 1,53 \frac{N}{mm^2}$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$V_{Rd,c} = \frac{85333333333 \text{ mm}^4 * 2000}{160000000 \text{ mm}^3} * \sqrt{(1,53^2 + 1 * 0,177 * 1,53)} = 1723,8 \text{ kN}$$

Vertikal jekkraftkomponent:

$$P = 27777,2 \text{ kN}$$

$$\theta = 5,2^\circ$$

$$P_v = P * \sin \theta = 27777,2 * \sin 5,2^\circ = 2517,5 \text{ kN}$$

Skjærkapasitet inkludert jekkraft:

$$V_{kap.tot} = V_{Rd,c} + P_v = 1723,8 + 2517,5 = 4241 \text{ kN} < V_{Ed} = 4986,6 \text{ kN}$$

⇒ Behov for skjærarmering

Hentet fra:

- EC2, 6.2.2 [3]

Vedlegg E

Spennkraft

Armeringsmengde

$$f_{pd} = \frac{f_{pk0.1k}}{\gamma_s} = \frac{1640 \frac{N}{mm^2}}{1,15} = 1426,09 \frac{N}{mm^2}$$

$$d = h - C_{nom} - b\emptyset_{yle} - r_{\emptyset r}$$

(valgt kamdiameter = 25mm)

(valgt rørdiameter = 100mm)

$$d = 800mm - 60mm - (25mm * 1,25) - \frac{100mm}{2} = 658,75 \text{ mm}$$

$$Z = 0,9 * d = 0,9 * 658,75 \text{ mm} = 592,875 \text{ mm}$$

$$A_p = \frac{M_{ED}}{f_{pd} * Z} = \frac{16847,5 * 10^6}{1426,09 * 592,875} = 19926,24 mm^2$$

Dette er en tilnærming som vi har valgt å forholde oss til. Verdi for A_p er også senere regnet ut under momentkapasitet med verdi lik $21253,78 mm^2$.

$$n_{kabler.totalt} = \frac{A_p}{A_{p.kabel}} = \frac{19926,24}{2100} = 9,5 \approx 10$$

Hentet fra:

- Betongkonstruksjoner 7.1.3 [5]
- EC2, del 1-1 [3]

Balansert armering

$$\varepsilon'_{p0} = 6,3 * 10^{-3}$$

$$\alpha_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \left(\frac{f_{pd}}{E_p} - \varepsilon'_{p0}\right)} = \frac{0,0035}{0,0035 + \left(\frac{1426,09}{195 * 10^3} - 6,3 * 10^{-3}\right)} = 0,775$$

$$\begin{aligned} A_{p,bal} &= 0,8 * \alpha_{bal} * b * d * \frac{f_{cd}}{f_{pd}} \\ &= 0,8 * 0,775 * 5000 \text{ mm} * 658,75 \text{ mm} * \frac{25,5 \frac{N}{mm^2}}{1426,09 \frac{N}{mm^2}} = 36515,36 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$A_{p,bal} = 36515,36 \text{ mm}^2 > A_p = 19926,24 \text{ mm}^2 \Rightarrow \text{Underarmert}$$

Hentet fra:

- Betongkonstruksjoner 6.4.2 [5]
- Betongkonstruksjoner 7.1.2 [5]

Eksentrisiteter

Fra underkant:

$$C_{z.under} = 455,84 \text{ mm}$$

Fra overkant:

$$C_{z.over} = 346,26 \text{ mm}$$

$$N_p = P = \sigma_{pmo} * A_{p.tot} = 1394 \frac{N}{mm^2} * 19926,24 \text{ mm}^2 = 27777,2 \text{ kN}$$

$$M_p = M_{Ed}$$

$$\Rightarrow N_p * e = M_{Ed}$$

$$\Rightarrow e = \frac{M_{Ed}}{N_p} = \frac{16847,5}{27777,2} = 0,6065 \text{ m} \approx 607 \text{ mm}$$

$$e_2 = C_z - C_{nom} - \emptyset_{b\emptyset yle} = 455,84 \text{ mm} - 60 \text{ mm} - 25 \text{ mm} = 370,84 \approx 371 \text{ mm}$$

$$e_m = e = \frac{e_1}{2} + e_2 + \frac{e_3}{2} = e_1 + e_2$$

$$e_1 = e_m - e_2 = 607 \text{ mm} - 371 \text{ mm} = 236 \text{ mm}$$

Hentet fra:

- Betongkonstruksjoner 4.4 [5]

Spennkrafttap

Spennkraft:

$$\sigma_{pmo} = \min\{k_1 * f_{pk}; k_2 * f_{p0,1k}\}$$

$$= \min\{0,75 * 1860; 0,85 * 1640\} = 1394 \frac{N}{mm^2}$$

$$N_p = -P_{m0} = -\sigma_{pmo} * A_{p.tot} = -1394 \frac{N}{mm^2} * 19926,24 mm^2 = -27777,2 kN$$

Hentet fra:

- EC2, del 1-1 [3]

Låsetap

$$\Delta \varepsilon_{lås} = \frac{\Delta L_{lås}}{L} = \frac{6mm}{28000mm} = 2 * 10^{-4}$$

Oppspenningstøyning:

$$\varepsilon_{p,jekk} = \frac{P_{jekk}}{E_s * A_p}$$

Der:

$$\varepsilon_{p0} = \frac{\frac{P_{p0}}{A_p}}{E_p} = \frac{1476}{195 * 10^3} = 7,57 * 10^{-3}$$

$$\frac{\Delta P}{P_{p0}} = \frac{2,31 * 10^{-4}}{7,57 * 10^{-3}} = 0,03$$

$$\frac{P_{jekk}}{P_{p0}} = 1 + \frac{\Delta P}{P_{p0}} = 1,03$$

$$P_{jekk} = 1,03 * P_{p0} = 1,03 * \left(1476 \frac{N}{mm^2} * 26107,9 mm^2\right) = 30293,5 kN$$

$$\varepsilon_{p,jekk} = \frac{30293,5 * 10^3 N}{200 * 10^3 * 19926,24 \text{ mm}^2} = 7,6 * 10^{-3}$$

Spennkrafttap fra låsing:

$$\Delta P_{lås} = \frac{\Delta \varepsilon_{lås}}{\varepsilon_{p,jekk}} * P_{jekk} = \frac{2 * 10^{-4}}{7,6 * 10^{-3}} * 30293,5 \text{ kN} = 797,2 \text{ kN}$$

Hentet fra:

- Betongkonstruksjoner 5.2.1 [5]
- Betongkonstruksjoner 5.2.2 [5]

Friksjonstap

Helning på siden:

$$\theta_A = \theta_B = \frac{2 * \theta_2}{\frac{L}{2}} = \frac{2 * 0,52}{\frac{27m}{2}} = 0,074 \text{ rad}$$

Midtsnitt:

$$\theta_m = 0$$

Spennkablenes vinkelendring:

Ved passiv forankring:

$$x = 27 \text{ m} : \theta = \theta_A + \theta_B = 0,074 + 0,074 = 0,158 \text{ rad}$$

I midtsnitt:

$$x = 13,5 \text{ m} : \theta = \theta_A - \theta_m = 0,074 - 0,074 = 0,074 \text{ rad}$$

$$\sigma_{max} = \min\{0,8 * f_{pk}, 0,9 * f_{p0,1k}\} = \min\{0,8 * 1860, 0,9 * 1640\} = 1476 \frac{N}{mm^2}$$

$$P_{max} = \sigma_{max} * A_{p.tot} = 1476 \frac{N}{mm^2} * 19926,24 \text{ mm}^2 = 29411,13 \text{ kN}$$

Spennkrafttap ved passiv forankring:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\mu}(x = 27) &= P_{max} * (1 - e^{-\mu(\theta + kx)}) \\ &= 29411,13 \text{ kN} * \left(1 - e^{-0,18rad(0,158rad + 0,005 \frac{rad}{m} * 27 \text{ m})}\right) = 1192,8 \text{ kN} \end{aligned}$$

Spennkrafttap i midtsnittet:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\mu}(x = 13,5) &= P_{max} * (1 - e^{-\mu(\theta + kx)}) \\ &= 29411,13 \text{ kN} * \left(1 - e^{-0,18rad(0,074rad + 0,005 \frac{rad}{m} * 13,5 \text{ m})}\right) = 739,6 \text{ kN} \end{aligned}$$

Hentet fra:

- Betongkonstruksjoner 5.10.2.1 [5]
- Betongkonstruksjoner 5.10.5.2 [5]

Vedlegg F

Bruksgrensetilstand

Spenningsbegrensing

$$\eta = \frac{E_p}{E_{cm}} = \frac{1,95 * 10^5 \frac{N}{mm^2}}{36000 \frac{N}{mm^2}} = 5,42$$

Transformert tverrsnitt:

$$\begin{aligned} A_t &= A_c + (\eta - 1) * A_{p.total} \\ &= 3,175 * 10^6 \text{ mm}^2 + (5,42 - 1) * 19926,24 \text{ mm}^2 \\ &= 3,26 * 10^6 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$e = e_2 = 371 \text{ mm}$$

$$y_t = \frac{(\eta - 1) * A_{p.tot} * e}{A_t} = \frac{(5,42 - 1) * 19926,24 \text{ mm}^2 * 371 \text{ mm}}{3,26 * 10^{11} \text{ mm}^2} = 10,02 \text{ mm}$$

Tregghetsmoment for betong:

$$I_c = 150676099081 \text{ mm}^4$$

$$\begin{aligned} I_t &= I_c + A_c * y_t^2 + (\eta - 1) * A_{p.total} * (e - y_t)^2 \\ &= 150676099081 + 3,175 * 10^6 * 10,02^2 + (5,42 - 1) * 19926,24 * (371 - 10,02)^2 \\ &= 1,51 * 10^{11} \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Aksialkraft og moment ved oppspenning:

$$N_p = -P_{m0} = -\sigma_{pm0} * A_{p.tot} = -1394 \frac{N}{mm^2} * 19926,24 \text{ mm}^2 = -27777,2 \text{ kN}$$

$$M_p = N_p * (e - y_t) = -27777,2 \text{ kN} * (0,371 \text{ m} - 0,01002 \text{ m}) = -10022,01 \text{ kNm}$$

Moment fra egenvekt i midtsnitt:

$$M_g = \frac{ql^2}{8} = \frac{154,2 \cdot 28^2}{8} = 15111,6 \text{ kNm}$$

$$M_t = M_g + M_p = 15111,6 \text{ kNm} - 10022,01 = 5089,6 \text{ kNm}$$

Spenning øverst i tverrsnittet:

$$\sigma_c\left(\frac{h}{2}\right) = \frac{N_p}{A_t} + \frac{M_t}{\frac{I_t}{y - y_t}} = \frac{-27777,2 \cdot 10^3 \text{ N}}{3,26 \cdot 10^6 \text{ mm}^2} + \frac{5089,6 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1,51 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4}{-\frac{800 \text{ mm}}{2} - 10,02 \text{ mm}}} = -22,34 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Spenning nederst i tverrsnittet:

$$\sigma_c\left(-\frac{h}{2}\right) = \frac{N_p}{A_t} + \frac{M_t}{\frac{I_t}{y - y_t}} = \frac{-27777,2 \cdot 10^3 \text{ N}}{3,26 \cdot 10^6 \text{ mm}^2} + \frac{5089,6 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1,51 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4}{-\frac{800 \text{ mm}}{2} - 10,02 \text{ mm}}} = 4,62 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Spenning ved spennkablene:

$$\sigma_c(e) = \frac{N_p}{A_t} + \frac{M_t}{\frac{I_t}{e - y_t}} = \frac{-27777,2 \cdot 10^3 \text{ N}}{3,26 \cdot 10^6 \text{ mm}^2} + \frac{5089,6 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{\frac{1,51 \cdot 10^{11} \text{ mm}^4}{371 \text{ mm} - 10,2 \text{ mm}}} = 3,65 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Maksimal trykkspenning tillatt: } \sigma_c \leq 0,6 f_{ck} = 0,6 \cdot 45 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 27 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Maksimal strekkspenning tillatt: } \sigma_c \leq f_{ctm} = 3,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Hentet fra:

- Betongkonstruksjoner 6.2 [5]
- N400, 13.1.7 [6]
- EC2 5.10.2.2(5) [3]

Langtidseffekter

Krypfaktor

Tykkelsen effektivt tverrsnitt:

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{u} = \frac{2 \cdot 1,35 \cdot 10^6 \text{ mm}}{10000 \text{ mm}} = 270 \text{ mm}$$

Koeffisienter:

$$f_{cm} = 53$$

$$\alpha = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,7} = 0,748 \quad \alpha = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,2} = 0,920 \quad \alpha = \left[\frac{35}{f_{cm}} \right]^{0,5} = 0,813$$

Betongfasthet:

$$\phi_{RH} = \left(1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} * \alpha_1 \right) * \alpha_2 = \left(1 + \frac{1 - \frac{0,7}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{270 \text{ mm}}} * 0,748 \right) * 0,920 = 1,977$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{16,8}{\sqrt{53}} = 2,31$$

Brukstid 100 år:

$$t = 36500$$

$$t_0 = 28$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,20}} = \frac{1}{0,1 + 28^{0,20}} = 0,49$$

$$\phi_0 = \phi_{RH} * \beta(f_{cm}) * \beta(t_0) = 1,977 * 2,31 * 0,49 = 2,24$$

Koeffisienten $\beta_c(t, t_0)$ beregnes for å beregne kryptallet:

$$\begin{aligned} \beta_H &= 1,5 * [1 + 0,012 * RH]^{18} * h_0 + 250 * \alpha_3 \\ &= 1,5 * [1 + 0,012 * 0,7]^{18} * 270 \text{ mm} + 250 * 0,813 = 306,375 \end{aligned}$$

$$\beta_c(t, t_0) = \left(\frac{t - t_0}{\beta_H + t - t_0} \right)^{0,3} = \left(\frac{36500 - 3}{306,375 + 36500 - 3} \right)^{0,3} = 0,9975$$

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 * \beta_c(t, t_0) = 2,24 * 0,9975 = 2,23$$

Effektiv E-modul (langtid):

$$E_{cl}(t_0) = \frac{E_{cm}}{1 + \phi_0} = \frac{36000 \frac{N}{mm^2}}{1 + 2,24} = 11111,11 \frac{N}{mm^2}$$

Hentet fra:

- EC2 Annex B (B1) [3]

Svinnfaktor

Bruker disse verdiene til svinnfaktor:

$$f_{ck} = 45 \text{ MPa}$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa} = 53 \text{ MPa}$$

$$f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{ds1} = 4 \quad (\text{koeffisient for sement type N})$$

$$\alpha_{ds2} = 0,12 \quad \text{For klasse N av sement}$$

$$\beta_{RH} = 1,55 * \left(1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right) = 1,018$$

$$RH = 70\%$$

$$RH_0 = 100\%$$

$$t_s = 28 \text{ d\o g}$$

$$t = 36500$$

Tørr svinntøyning:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{cd,0} &= 0,85 * \left((220 + 110 * \alpha_{ds1}) * \exp\left(-\alpha_{ds2} * \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right) \right) * 10^{-6} * \beta_{RH} \\
 &= 0,85 * \left((220 + 110 * 4) * \exp\left(-0,12 * \frac{53}{10}\right) \right) * 10^{-6} * 1,018 \\
 &= 3,023 * 10^{-4}
 \end{aligned}$$

Total svinntøyning:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca}$$

$$t_s = 5$$

$$k_h = 0,7$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{t - t_s + 0,004 * \sqrt{h_0^3}} = \frac{36500 - 28}{36500 - 28 + 0,004 * \sqrt{270^3}} \approx 1$$

$$\epsilon_{cd} = \beta_{ds}(t, t_s) * k_h * \epsilon_{cd,0} = 1 * 0,7 * 3,023 * 10^{-4} = 2,116 * 10^{-4}$$

Frembrakt svinntøyning:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{ca}(\infty) &= 2,5 * (f_{ck} - 10) * 10^{-6} \\
 &= 2,5 * (45 - 10) * 10^{-6} \\
 &= 8,75 * 10^{-5}
 \end{aligned}$$

$$\beta_{as} = 1 - \exp(-0,2 * t^{0,5}) = 1 - \exp(-0,2 * 36500^{0,5}) = 1$$

$$\epsilon_{ca} = \epsilon_{ca}(\infty) * \beta_{as} = 8,75 * 10^{-5} * 1 = 8,75 * 10^{-5}$$

Total svinntøyning:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} = 2,116 * 10^{-4} + 8,75 * 10^{-5} = 2,991 * 10^{-4}$$

Hentet fra:

- EC2 Annex B.2 [3]

Relaksasjonstap

$$\rho_{1000} = 2,5\%$$

$$\sigma_{pi} = \min\{k_1 * f_{pk}; k_2 * f_{p0,1k}\} = \min\left\{0,75 * 1860 \frac{N}{mm^2}; 0,85 * 1640 \frac{N}{mm^2}\right\} = 1394 \frac{N}{mm^2}$$

Koeffisient:

$$\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}} = \frac{1394 \frac{N}{mm^2}}{1860 \frac{N}{mm^2}} = 0,75$$

$$t = 500\,000 \text{ timer i henhold til 3.3.2 (8)}$$

Relaksasjonstap i forspenning:

$$e = 371 \text{ mm}$$

$$y_t = \frac{(\eta - 1) * A_{p.tot} * e}{A_t} = \frac{(7,8 - 1) * 19926,24 \text{ mm}^2 * 371 \text{ mm}}{3,31 * 10^{11} \text{ mm}^2} = 15,19 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{pr} &= 0,66 * \rho_{1000} * e^{9,1*\mu} * \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75*(1-\mu)} * \sigma_{pi} * 10^{-5} \\ &= 0,66 * 2,5 * e^{9,1*0,75} * \left(\frac{500000}{1000}\right)^{0,75*(1-0,75)} * 1394 * 10^{-5} \\ &= 67,90 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}$$

Laster:

$$N_r = \Delta\sigma_{pr} * A_p = 67,90 \frac{N}{mm^2} * 19926,24 \text{ mm}^2 = 1352,99 \text{ kN}$$

$$M_r = N_r * (e - y_t) = 1352,99 \text{ kN} * (0,37 \text{ m} - 0,01519 \text{ m}) = 480,05 \text{ kNm}$$

Spenningsendring på høyden til spennarmeringen:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{c,r}(e) &= \frac{N_r}{A_t} + \frac{M_r}{I_t} * (e - y_t) \\ &= \frac{1352,99kN}{3,31 * 10^6 mm^2} + \frac{480,05kNm}{1,68 * 10^{11} mm^4} * (371mm - 15,19mm) \\ &= 1,425 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}$$

Spenning ved underkant av tverrsnittet (svinn):

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{c,r}\left(\frac{h}{2}\right) &= \frac{N_r}{A_t} + \frac{M_r}{I_t} * \left(\frac{h}{2} - y_t\right) \\ \Delta\sigma_{c,r}\left(\frac{h}{2}\right) &= \frac{1352,99kN}{3,31 * 10^6 mm^2} + \frac{480,05kNm}{1,68 * 10^{11} mm^4} * \left(\frac{800}{2} - 15,19mm\right) = 1,508 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}$$

Endring i spenning i spennarmeringen:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_{p,r} &= \frac{\Delta\sigma_{c,r}(e)}{E_{middel}} * E_p \\ \Delta\sigma_{p,r} &= \frac{1,425 \frac{N}{mm^2}}{2,5 * 10^5 \frac{N}{mm^2}} * 1,95 * 10^5 \frac{N}{mm^2} = 1,11 \frac{N}{mm^2}\end{aligned}$$

Hentet fra:

- Betongkonstruksjoner 6.2 [5]
- EC2, del 1-1, 3.3.2 [3]

Vedlegg G

Bøyning

Bøyestivhet i stadium I

Arealtrehetsmoment betongtverrsnitt:

$$I_c = 150676099081 \text{ mm}^4$$

Bøyestivhet for stadium I:

$$EI = 36 * 10^3 \frac{N}{mm^2} * 150676099081 \text{ mm}^4 = 5,42 * 10^{15}$$

Hentet fra:

- Betongkonstruksjoner 5.2.3 (5.10) [5]

Negativ langtidsbøyning fra permanente laster

Bøyestivhet:

$$EI = 5,42 * 10^{15} \text{ Nmm}^2$$

$$g + p = 154,2 \frac{kN}{m}$$

$$\delta_{langtid} = \frac{5(q + p)L^4}{384EI} = \frac{5 * 154,2 * 27^4 * 10^{12}}{384 * 5,42 * 10^{15}} = 196,9 \text{ mm}$$

Hentet fra:

- Betongkonstruksjoner 5.2.5 [5]

Negativ bøyning fra svinn

$$K_s = \frac{\varepsilon_{cs}}{d} = \frac{2,991 * 10^{-4}}{658,75 \text{ mm}} = 4,54 * 10^{-7} \text{ mm}^{-1}$$

$$\begin{aligned}\delta_{svinn} &= \int_L^{\square} K_s * M_{virtuell} dx \\ &= \frac{1}{2} k_s * \frac{L}{4} * L = \frac{k_s * L^2}{8} = \frac{4,54 * 10^{-7} \text{ mm}^{-1} * 27^2 \text{ m}}{8} = 41,37 \text{ mm}\end{aligned}$$

Hentet fra:

- Betongkonstruksjoner 5.2.6 [5]

Positiv bøyning fra spennarmering

Nedbøyning fra endeeksentrisiteter:

$$\delta_{b1} = \frac{P * L^2}{EI * 4,8} = \frac{27777,2 * 10^3 * 371 * 27000^2}{5,42 * 10^{15} * 4,8} = 288,8 \text{ mm}$$

Oppbøyning fra endeeksentrisiteter:

$$\delta_{b2} = -\frac{P * L^2}{EI * 4,8} = \frac{-27777,2 * 10^3 * 607 * 27000^2}{5,42 * 10^{15} * 4,8} = -472,46 \text{ mm}$$

$$\delta_b = \delta_{b1} + \delta_{b2} = 288,8 - 472,5 = -183,7 \text{ mm}$$

Hentet fra:

- Betongkonstruksjoner 4.5 [5]

Total bøyning

$$\delta_{total} = \delta_{langtid} + \delta_{svinn} + \delta_b = 196,9 + 41,37 - 183,7 = 54,57 \text{ mm}$$

Vedlegg H

Armering i tverrsnittet

Lengdearmering underkant

Minimum armering for tverrsnittet per m:

$$A_{s,min.1} = 0,26 * b_t * d * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} = 0,26 * 1000mm * 658,75mm * \frac{3,8 \frac{N}{mm^2}}{500 \frac{N}{mm^2}} = 1301,69mm^2$$

Kan ikke være mindre enn:

$$A_{s,min.2} = 0,0013 * b_t * d = 0,0013 * 1000mm * 658,75mm = 856,38mm^2$$

$$A_{s,min} = 1301,69mm^2$$

Armeringsmengde per m:

$$Antall. arm = \frac{A_{s,min.1}}{\pi * r^2} = \frac{1301,69mm^2}{\pi * \left(\frac{20}{2}\right)^2} = 4,14 \approx 5$$

$$A_{s,u} = n * \pi * \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 = 5 * \pi * \left(\frac{20}{2}\right)^2 = 1570,8mm^2$$

$$A_{s,u,total} = A_{s,u} * b = 1570,8mm^2 * 5m = 7854mm^2$$

Maksimal senteravstand:

$$s_{max,slabs.h} = 250mm$$

Minsteavstanden horisontalt mellom armeringsjernet:

$$2\phi = 2 * 20mm = 40mm$$

Lengde mellom armeringsjern:

$$a_{lengde1} = \frac{b}{n.lengder} = \frac{5000mm}{26} = 193 mm$$

Hentet fra:

- EC2, del 1-1, 9.2.1.1(1) [3]
- EC2, del 1-1, 9.3.1.1(3) [3]
- EC2, del 1-1, 8.2(2) [3]

Tverrarmering underkant

$$\text{Armeringsmengde per meter} = 2827,43 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Finner 25% for å tilfredsstille krav 9.3.1.2 (2) i Eurokode 2:

$$\frac{2827,43 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}}{4} = 706,86 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Regner ut for $\phi 25$:

$$n = \frac{706,86 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}}{\pi * \left(\frac{25}{2}\right)^2} = 1,44$$

1,44 armeringsjern per m tverrarmering i underkant er ikke tilstrekkelig. Velger derfor å bruke 5 armeringsstenger per meter for å tilfredsstille kravet.

Lengde mellom armeringsjern:

$$a_{lengde2} = \frac{1000\text{mm}}{n} = \frac{1000\text{mm}}{5} = 200\text{mm}$$

Maksimal senteravstand:

$$s_{max,slabs.f} = 400\text{mm}$$

Minimumsavstanden horisontalt mellom armeringsjernet:

$$2\phi = 2 * 25\text{mm} = 50\text{mm}$$

Hentet fra:

- EC2, del 1-1, 9.3.1.1(2) [3]
- EC2, del 1-1, 9.3.1.1(3) [3]
- EC2, del 1-1, 8.2(2) [3]

Lengdearmering overkant

$$5m * \pi * \left(\frac{25}{2}\right)^2 = 2454,37mm^2$$

Finner 25% for å tilfredsstille krav 9.3.1.2 (2) i Eurokode 2:

$$\frac{2454,37mm^2}{4} = 613,59 mm^2$$

$$A_{s,o} = 613,59 mm^2 * 5m = 3067,95 mm^2$$

$$A_{s,o,tot} = 3067,95 mm^2 + 10827,36mm^2 = 13895,31mm^2$$

Regner ut for $\phi 20$:

$$n = \frac{A_{s,o,tot}}{\pi * \left(\frac{\phi}{2}\right)^2} = \frac{13895,31 mm^2}{\pi * \left(\frac{20}{2}\right)^2} = 44,23 \approx 45$$

Maksimal senteravstand mellom stengene ($s_{max,slabs.f}$):

$$s_{max,slabs.f} = 400mm$$

Minimumsavstanden horisontalt mellom armeringsjernet:

$$2\phi = 2 * 20mm = 40mm$$

Lengde mellom armeringsjern:

$$a_{lengde3} = \frac{b}{n.lengder} = \frac{5000mm}{46} = 108,7mm$$

$$40mm < 108,7mm < 400mm$$

Hentet fra:

- EC2, del 1-1, 9.3.1.1(2) [3]
- EC2, del 1-1, 9.3.1.1(3) [3]
- EC2, del 1-1, 8.2(2) [3]

Tverrarmering overkant

$$d = h - C_{nom} + \frac{\phi}{2} = 250mm - 60mm + \frac{25}{2}mm = 202,5mm$$

$$z = 0,9 * d = 0,9 * 202,5 = 182,25mm$$

$$A_s = \frac{M_{Ed.TR.dom}}{f_{cd} * z} = \frac{327,99 * 10^6 Nmm}{434,78 \frac{N}{mm^2} * 182,25mm} = 4139,27mm$$

$$n = \frac{A_s}{\pi * \left(\frac{\phi}{2}\right)^2} = \frac{4139,27mm}{\pi * \left(\frac{20}{2}\right)^2} = 13,18 \approx 14 \text{ jern per m}$$

Maksimal senteravstand mellom stengene $s_{max,slabs.h}$:

$$s_{max,slabs.h} = 250mm$$

Minste avstand horisontalt mellom armeringsjernet:

$$2\phi = 2 * 20mm = 40mm$$

Lengde mellom armeringsjern:

$$a_{lengde4} = \frac{L}{n.lengder} = \frac{1000mm}{15} = 66,67mm$$

$$50mm < 66,67mm < 250mm$$

Hentet fra:

- EC2, del 1-1, 9.3.3.1(3) [3]
- EC2, del 1-1, 8.2(2) [3]

Skjærarmering

Min. skjærarmering:

$$\rho_{w.min} = 0,1 * \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} = 0,1 * \frac{\sqrt{45 \frac{N}{mm^2}}}{500 \frac{N}{mm^2}} = 1,34 * 10^{-3}$$

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s * b_w * \sin \alpha}$$

Snur om på formel:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \rho_{w.min} * b_w = 1,34 * 10^{-3} * 2000mm = \frac{2,68mm^2}{mm}$$

$$A_{sw} = 2 * \pi * \left(\frac{\phi}{2}\right)^2 = 2 * \pi * \left(\frac{25}{2}\right)^2 = 981,75 mm^2$$

Senteravstand:

$$s \leq \frac{A_{sw}}{\left(\frac{A_{sw}}{s}\right)} = \frac{981,75 mm^2}{\frac{2,68mm^2}{mm}} = 366,32 mm$$

Maks senteravstand mellom skjærarmeringen:

$$s_{l,max} = 0,6 * h' = 0,6 * 0,9 * 800mm = 432mm$$

$$s_{l,min} = \max\{k_1 * \phi\} = 1 * 25mm = 25mm$$

Hentet fra:

- EC2, del 1-1, NA.9.2.2(5) [3]
- EC2, del 1-1, NA.9.2.2(6) [3]
- EC2, del 1-1, 8.2(2) [3]

Spennarmering

Minste avstand fra kabelrør til kabelrør (horisontalt):

$$a_h = \max\{\phi\} = 110mm$$

Hentet fra:

- EC2, del 1-1, 8.10.1.3(3) [3]

Referanseliste vedlegg

- [1] Standard Norge, 1991. Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, del 1-5: Allmenne laster, Termiske påvirkninger, s.l.:s.n.
- [2] Standard Norge, 1991. Eurokode 1: Laster på konstruksjoner, del 2: Trafikklast på bruer, s.l.: Standard Norge.
- [3] Standard Norge, 1992. Eurokode 2: Prosjektering av betongkonstruksjoner, del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger, s.l.:s.n.
- [4] Standard Norge, 1990. Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner, s.l.:s.n.
- [5] Sørensen, S. I., 2010. Betongkonstruksjoner. 2 red. Bergen: Fagbokforlaget
- [6] Vegdirektoratet, 2015. *Bruprosjektering*. [Internett] Available at:
<https://www.vegvesen.no/globalassets/fag/handboker/hb-n400bruprosjektering.pdf> [Funnet 10 Januar 2024]