

Betonisiltojen murtorajatila

Siltaeurokoodien koulutus, 2.-3.12.2009

DI Markus Ryyänen
DI Mikko Peltomaa

Esityksen sisältö

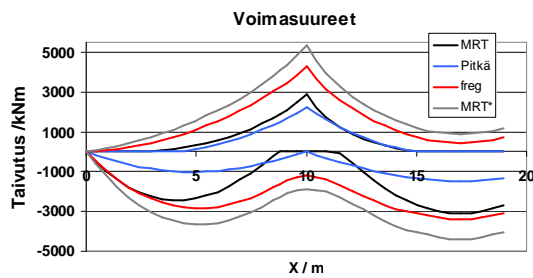
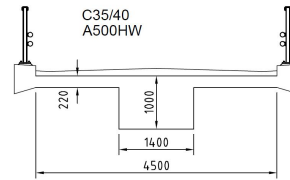
- Muutama sana rakenneanalyyseistä
- Taivutettu rakenne
 - laipan irtileikkaantuminen
- Taivutettu ja puristettu rakenne
- Leikkaus ja vääntö
- Lävistys
- Väsytytys



Muutama sana rakenneanalyysistä

- Esimerkkisilta

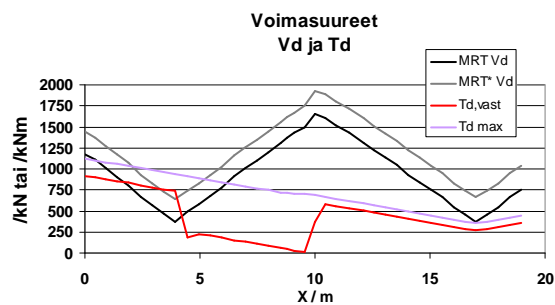
- Laattapalkkisilta
- Jännemitat 10+14+10
- Vapaasti tuettu, päätytuet ottavat väännön



MRT* = pakkovoimat mukana

Muutama sana rakenneanalyysistä

- Esimerkkisilta



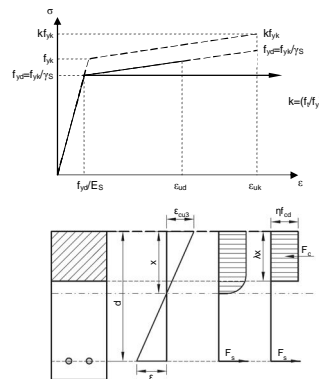
Taivutettu rakenne

- Vetoraudoituksen mitoitus; huomioitavaa

- Eurokoodi sallii betoniteräkselle myötölujittuvan jännitys-venymä -yhteyden, ei käytännön mitoituksessa vain pieni hyöty
- Teräsmäärän laskentaperiaate ei muutu: teräsmäärä johdetaan poikkileikkauksen tasapainosta, esim. taivutettu poikkileikkaus (N.A. laipassa):

$$-A_s^2 \frac{f_{yd}}{2b_{eff} f_{cd}} + A_s d - \frac{M_{Ed}}{f_{yd}} = 0$$

- Laippapalkin laskentakaavat riippuvat neutraaliakselin sijainnista: Jos $\frac{A_s f_{yd}}{b_{eff} f_{cd}} > h_f$, niin N.A. uumassa ja yllä oleva kaava ei päde
- Yliiraudoitusta tulee välttää, vaikkei EC2 otakaan siihen selvää kantaa
- Vähimmäisraudoitus: $A_{s,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} b_w d \geq 0,0013 b_w d$ (lisäehto liittyy betoneihin <C25, kun $f_{yk} = 500\text{MPa}$)



Taivutettu rakenne (jatkuu)

- Tukimomentin tasaus

- Tuen toimiessa nivelenä kiertymän suhteen voidaan teoreettista tukimomenttia pienentää määrällä

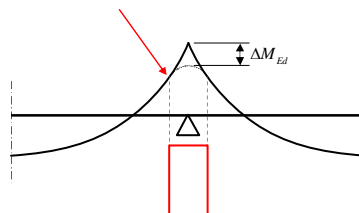
$$\Delta M_{Ed} = \frac{F_{Ed,sup} t}{8}$$

jossa

$F_{Ed,sup}$ Tukireaktion mitoitusarvo (epäedulliset vaikutukset)

t Tuen leveys jänteen suunnassa (laakerin pituus)

- Voidaan soveltaa käytetystä voimasuureiden laskentamenetelmästä riippumatta
- Monoliittisessa rakenteessa määräävä mitoitusmomentin arvo tuen reunalta



Taivutettu rakenne (jatkuu)

- Taivutusmomenttien uudelleen jakaminen
 - **Murtorajatilin** lineaarisella kimmoteorialla lasketut momentit voidaan jakaa TSP-ehdot täyttävällä tavalla uudestaan
 - Rasitetuimpien kohtien kiertymiskykyä ei tarvitse pääosin taivutetuissa rakenteissa, joiden peräkkäisten jännemittojen suhde on 0,5...2, erikseen tarkistaa jos

$$\begin{cases} \delta \geq 0,44 + 1,25 \frac{x_u}{d} \geq 0,85 & , \text{ kun } f_{ck} \leq 50\text{MPa} \\ \delta \geq 0,54 + k_4 \frac{x_u}{d} \geq 0,85 & , \text{ kun } f_{ck} > 50\text{MPa} \end{cases}$$

jossa

δ Uudelleen jakautuneen momentin suhde kimmoteorian mukaiseen momenttiin

x_u N.A:n etäisyys puristusreunasta MRT:ssä momenttien uudelleenjaon jälkeen

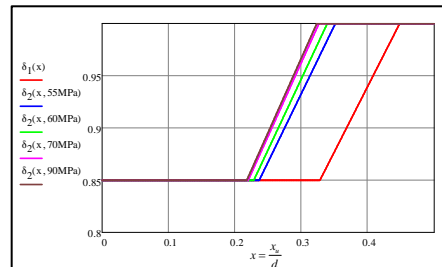
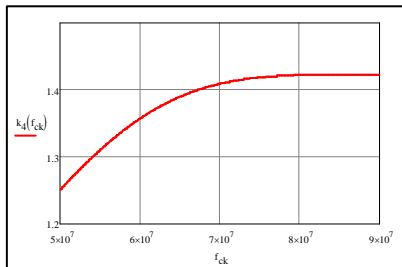
$$k_4 = 0,75 + \frac{1,75}{2,6 + 35 \left(\frac{90\text{MPa} - f_{ck}}{100} \right)^4}$$



www.a-insinoorit.fi

Momenttien uudelleen jakaminen (jatkuu)

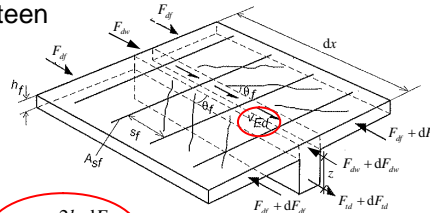
- Uudelleen jakamista ei sallita, kun kiertymiskykyä ei voida luotettavasti selvittää (kaarevat ja vinot sillat)
- Betoniteräksen tulee täyttää luokan B tai C vaatimukset (A500HW: B-luokka)



- Talonrakenteet: EN 1992-1-1 Suomen NA:ssa valittu erilaiset kertoimet

Laipan irtileikkaantuminen

- Silloissa laattapalkin uuma on leveä suhteessa laipan toimivaan leveyteen
 - uumaan jäävä puristusresultantti F_{dw} kannattaa huomioida



Leikkausjännitys:

$$v_{Ed} = \frac{dF_d}{h_f dx}$$

$$\begin{cases} dF_{dw} = \frac{b_w}{b_{eff}} dF_d \\ dF_d = 2dF_{df} + dF_{dw} \end{cases} \Leftrightarrow dF_{dw} = \frac{2b_w dF_{df}}{b_{eff} - b_w}$$

$$\frac{dM_{Ed}(b_{eff} - b_w)}{2b_{eff} h_f dx} \frac{1}{z} \quad dM_{Ed} = (2dF_{df} + dF_{dw})z \quad \Leftrightarrow \quad dF_{df} = \frac{dM_{Ed}(b_{eff} - b_w)}{2b_{eff} z}$$

$$\frac{dM_{Ed}}{dx} = V_{Ed} \quad \text{Leikkausvuo: } v_{L,Ed} = v_{Ed} h_f = \frac{V_{Ed}(b_{eff} - b_w)}{2b_{eff}} \frac{1}{z}$$

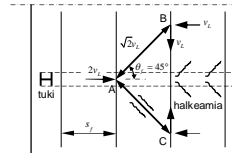
Lähde: by210, 2008

Laipan irtileikkaantuminen (jatkuu)

- Mitoituksessa ajatellaan puristus- (betoni) ja vetopaarteiden (poikittaisteräksset) muodostavan ristikkomekanismin
 - Sekä raudituksen vetokestävyys, että betonin puristuskestävyys on tarkistettava
 - Ratkaistaan mitoituksessa käytettävä optimaalinen puristusdiagonaalin ja palkin pituusakselin välinen kulma θ_f

$$\left. \begin{array}{l} 26,5^\circ \text{ puristuslaipoissa} \\ 38,6^\circ \text{ vetolaipoissa} \end{array} \right\} < \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{2v_{Ed}}{v_{f,cd}} \right) < \theta_f < 45^\circ$$

jossa $v = 0,6(1 - f_{cd}/250\text{MPa})$ Huom. Redusioitu h_f



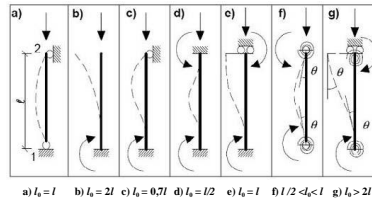
- Tarvittava rauditus (mm^2/m) lasketaan leikkausjännityksen avulla kaavalla:

$$\frac{A_{sf}}{s_f} > \frac{v_{Ed} h_f \tan(\theta_f)}{f_{yd}} \quad \text{tai leikkausvuon avulla: } \frac{A_{sf}}{s_f} > \frac{v_{L,Ed} \tan(\theta_f)}{f_{yd}}, \text{ väh.: } \frac{A_{sf}}{s_f} > 0,2 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} h_f$$

- EN 1992-2 6.2.4(105): Jos laattaa vaikuttaa myös poikittainen taivutus, kokonaispoikittaisraudoitus on edellä esitetty tai puolet siitä + poikittaisen taivutuksen edellyttämä määrä
- Suurin sallittu tarkastelupituus on puolet momentin maksimi- ja nollakohdan välisestä etäisyydestä tai pistekuormien välinen etäisyys

Taivutettu ja puristettu rakenne

- Käsitellään tässä pilareita erillisinä sauvoina
 - Sauvanpäämomentit lasketaan 1. kertaluvun teorialla ideaalisesta rakennekokonaisuudesta
- Rakenneseosan epätarkkuudet
 - Otetaan huomioon joko epäkeskisyyden e_i tai vaakavoiman H_i avulla
 - Erillispilareille voidaan käyttää yksinkertaistusta $e_i = l_0/400$
 - EC2:n nurjahduspituudet l_0 teoreettisia → myös vanhoja voidaan käyttää
- Toisen kertaluvun vaikutukset (geometrinen epälineaarisuus)
 - Asiat esitetty EC2:ssa sekavasti, by210 selventää jos löytää oikean kohdan
 - Ei tarvitse huomioida, jos $\lambda < \lambda_{lim} = 20 \cdot A \cdot B \cdot (C/\sqrt{n})$ (ks. EN 1992-1-1: 5.8.3.1)
 - EC2 esittelee yleisen menetelmän sekä nimelliseen jäykkyyteen ja nimelliseen kaarevuuteen perustuvat käsinlaskentamenetelmät
- Vähimmäisepäkeskisyydet: $e_0 = \max(h/30; 20\text{mm})$ **HUOM. EI SUMMATA!**



Nimelliseen jäykkyyteen perustuva menetelmä

- Kokonaismomentti M_{Ed} saadaan suurentamalla 1. kertaluvun analyysistä saatu taivutusmomentti M_{0Ed} , jolloin otetaan huomioon
 - halkeilun,
 - materiaalin epälineaarisuuden ja
 - virumisen vaikutukset kokonaistoimintaan

$$M_{Ed} = M_{0Ed} \left[1 + \frac{\beta}{N_B/N_{Ed} - 1} \right], \text{ jossa } N_B = \frac{\pi^2 (EI)_{ef}}{l_0^2} \quad \beta = \frac{\pi^2}{c_0}$$

jossa edelleen

$$(EI)_{ef} = K_c E_{cd} I_c + K_s E_s I_s \quad E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}} = \frac{E_{cm}}{1,2}$$

Kun $\rho = A_s/A_c \geq 0,002$:

$$K_s = 1$$

$$K_c = \frac{\sqrt{\frac{f_{ck}}{20\text{MPa}} \cdot \min\left(\frac{N_{Ed}}{A_c f_{cd}} \cdot \frac{\lambda}{170}; 0,20\right)}}{1 + \varphi_{ef}}$$

c_0 riippuu momentin jakaumasta, esim. $c_0 = 8$

Nimelliseen kaarevuuteen perustuva menetelmä

- Em. tekijät otetaan huomioon käyttämällä nimellistä lisämomenttia $M_2 = N_{Ed} e_2$, jolloin saadaan mitoitusmomentiksi $M_{Ed} = M_{0Ed} + M_2$
 - Menettely voidaan rinnastaa BN:n lisäepäkeskisyyden käyttöön
 - 1. kertaluvun momentissa M_{0Ed} otetaan huomioon epätarkkuuksien vaikutus
 - Jos pilarin päiden välillä ei vaikuta kuormia, voidaan käyttää ekvivalenttia vakiomomenttia $M_{0e} = 0,6M_{02} + 0,4M_{01} \geq 0,4M_{02}$, kun $|M_{02}| \geq |M_{01}|$
 - Mitoitusmomentin suurin arvo lasketaan komponenttien jakautumien mukaisesti. Lisämomentti voidaan olettaa nurjahduspituudella parabolisesti tai sinimuotoisesti jakautuneeksi

$$e_2 = K_r K_\varphi \frac{f_{sd}}{0,45d \cdot E_s} \frac{l_0^2}{c}$$

jossa

$$K_r = \frac{1 + \omega - N_{Ed} / A_c f_{cd}}{0,6 + \omega}$$

$$K_\varphi = 1 + \left(0,35 + \frac{f_{ck}}{200\text{MPa}} - \frac{\lambda}{150} \right) \varphi_{ef} \geq 1$$

Vakiopoikkileikkauksella tavallisesti $c = 10$, vakiomomentin tapauksessa $c = 8$, mutta aina $c \geq 8$



www.a-insinorit.fi

Vino taivutus

- Ympyräpoikkileikkauksen tarkastelu ei tuota ongelmia, koska sen kapasiteetti on sama kaikkien pääakseleiden suhteen
 - Taivutusmomentti voidaan laskea neliösummana: $M_{Ed} = \sqrt{M_{Ed,x}^2 + M_{Ed,y}^2}$

- Suorakaidepoikkileikkaus voidaan mitoittaa

- Suoraan vinosta taivutuksesta aiheutuvalle jännitystilalle
- Tarkastelemalla pääsuunnat toisistaan riippumatta (epätarkkuudet otetaan huomioon vain epäedullisemmassa suunnassa) jos

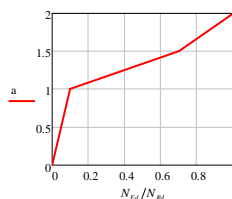
$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_y / \lambda_z \leq 2 \\ \lambda_z / \lambda_y \leq 2 \end{array} \right. \text{ JA } \left(\begin{array}{l} e_y / h_{eq} \leq 0,2 \\ e_z / b_{eq} \leq 0,2 \end{array} \right) \text{ TAI } \left(\begin{array}{l} e_z / h_{eq} \leq 0,2 \\ e_y / b_{eq} \leq 0,2 \end{array} \right) \left. \begin{array}{l} h_{eq} = i_z \sqrt{12} \\ b_{eq} = i_y \sqrt{12} \end{array} \right\} \text{ Muille kuin suorakaidepoikkileikkauksille}$$

joissa

epäkeskisyyksien $e_i = \frac{M_{Ed,i}}{N_{Ed}}$ laskennassa on huomioitu 2. kl:n aiheuttama taivutusmomentin lisä

- Tarkastamalla yhteisvaikutusehto

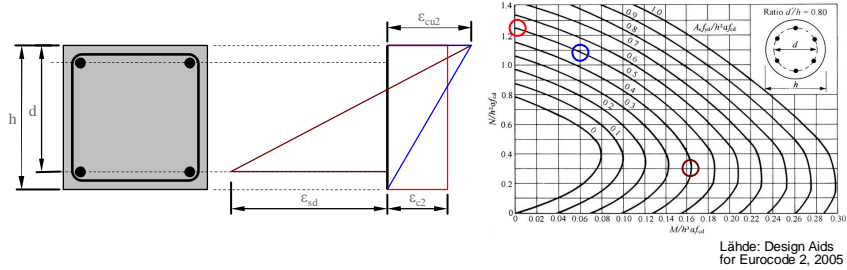
$$\left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{Rd,z}} \right)^a + \left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}} \right)^a \leq 1,0$$



www.a-insinorit.fi

Pilarin mitoitus

- Eurokoodissa on annettu vain perusteet. Mitoitusmenetelmäksi kelpaa edelleenkin esim. yhteisvaikutusdiagrammit
 - Perustuvat poikkileikkauksen venymätilan (ks. kuva) iterointiin, kun Bernoullin hypoteesi on voimassa



- Vanhat yhteisvaikutusdiagrammit ovat päteviä, jos ne ovat yhteensopivia EN 1992-1-1 materiaaliominaisuuksien kanssa
- Vähimmäisraudoitus: $A_{s,min} = 0,1 \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} \geq 0,002A_c$ Enimmäisraudoitus: $A_{s,max} = 0,06A_c$

Leikkaus ja vääntö

- Leikkaus- ja vääntömitoitus noin d:n päässä tuelta
 - Ylärajan tarkistus tuelle asti
- Jänteiden geometrian mukainen leikkausvoima/ohjausvoima on mukana jo voimasuureissa

$$\beta = a_v / 2d$$

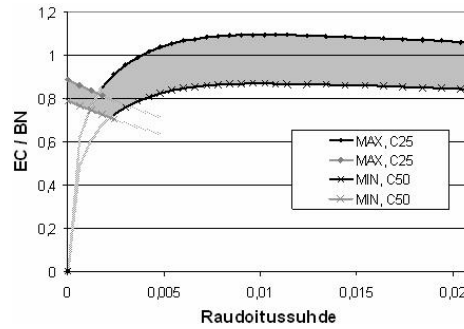
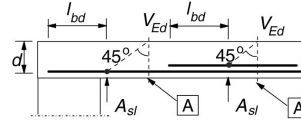


Leikkausraudoittamaton

$$V_{Rd,c} = \left(\frac{0,18}{\gamma_c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{2/3} + 0,15 \sigma_{cp} \right) b_w d$$

$$V_{Rd,c} = (0,035 k^{1,5} + 0,15 \sigma_{cp}) b_w d$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad \rho_1 = \frac{A_{st}}{b_w d} \leq 0,02$$



Leikkausraudoitettu

$$V_{Rd,s} = A_{sv} z f_{yd} \cot \theta \quad v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \quad 1 \leq \cot \theta \leq 2,5 \quad \text{eli} \quad 21,8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w z v f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad v_1 = 0,9 - \frac{f_{ck}}{200} \quad 0,5 \leq v_1 \leq 0,6 \rightarrow f_{yd} = 0,8 f_{yk} \quad z = 0,85d$$

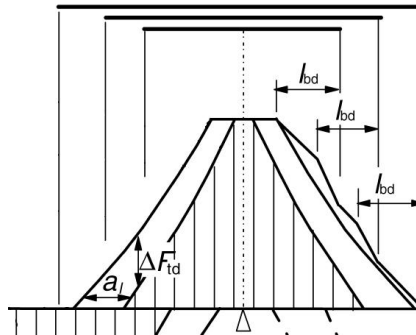
• Lisävetovoima

$$\Delta F_{td} = 0,5 V_d \cot \theta \quad a_i = 0,5 z (\cot \theta - \cot \alpha)$$

• Normaali voima ei vaikuta leikkauskestävyyteen (paitsi ylärajaan)

- leikkausraudoitemäärä kasvaa jännitetyllä rakenteilla
- Jännittämättömällä muutos riippuu puristusdiagonaalin kulman valinnasta

- Eurokoodissa ei ole betonin leikkauslujuus termiä leikkausraudoitetuissa rakenteissa, eikä vääntökestävyydessä!



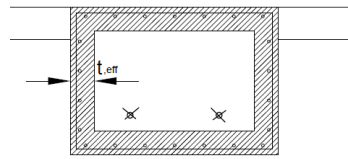
Vääntökestävyys

- Vääntömitoituksessa poikkileikkaus ajatellaan ohutseinämäiseksi kotelorakenteeksi
- Ainoastaan oletetussa ohutseinämässä sijaitseva pitkittäisraudoite vaikuttaa vääntökestävyyteen
 - Väännön edellyttävä pitkittäinen raudoite sijoitetaan tasaisesti poikkileikkauksen piirille
 - Eurokoodin mukaan puristuspaarteissa väännön edellyttämää pitkittäistä raudoitusta voidaan vähentää vallitsevaan puristusvoimaan verrannollisesti

$$A_{st} = \frac{T_d}{2A_k f_{yd} \cot \theta}$$

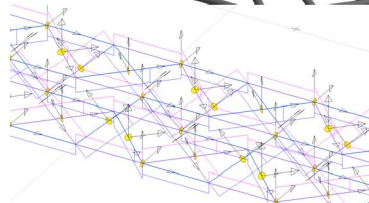
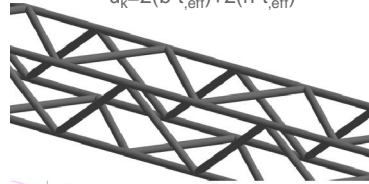
$$A_{st} = \frac{T_d u_k}{2A_k f_{yd}} \cot \theta$$

$$T_{Rd,max} = 2v \alpha_{cw} f_{cd} A_k t_{ef,i} \sin \theta \cos \theta$$



$$A_k = (b - t_{eff}) * (h - t_{eff})$$

$$u_k = 2(b - t_{eff}) + 2(h - t_{eff})$$



www.a-insinoorit.fi

Väännön ja leikkausvoiman yhteisvaikutus

- Pieni kulma
 - Paljon pitkittäistä raudoitetta
 - Vähän hakoja
 - Suuri puristus puristusdiagonaalissa
- Suuri kulma
 - Vähän pitkittäistä raudoitetta
 - Paljon hakoja
 - Pienempi puristus puristusdiagonaalissa
- Kokonaisvarmuuden kannalta
 - Ei lähellä kestävyiden ylärajaa, jotta vähennetään haurasmurtuman riskiä.
 - Ei kulmaa $\cot \theta = 2,5$ käyttäen, jotta varmuustaso hakojen kestävyydelle olisi parempi.

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1$$



$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd,max}} \leq 1????$$

Esimerkki leikkaus ja vääntömitoituksesta

Voimasuureet. T1 d:n päässä tuelta

	MRT* 1	MRT* 2	
Md	1200	857	kNm
Vd	1270	991	kN
Td	879	1100	kNm

- Valitaan 35,5° ja $t_{ef} = 150$ mm
 - neljä leikkeinen T12 k125 ($A_{sv}=3169$ mm²/m)
 - umpihaka + välihaka

	MRT 1*	MRT 1*	MRT1*	MRT 2*	MRT 2*	MRT2*
b [mm]	1400	1400	1400	1400	1400	1400
h [mm]	1000	1000	1000	1000	1000	1000
d [mm]	925	925	925	925	925	925
v	0.516	0.516	0.516	0.516	0.516	0.516
z	786.3	786.3	786.3	786.3	786.3	786.3
$\theta_{variable}$	21.8	21.8	35.5	21.8	21.8	35.5
t_{ef} [mm]	150	200	150	150	200	150
A_k [mm ²]	1062500	960000	1062500	1062500	960000	1062500
U_k [mm]	4200	4000	4200	4200	4000	4200
$A_{sv, shear}$ [mm ² /m]	1421	1421	2535	1013	1013	1806
$A_{sv, twisting}$ [mm ² /m]	364	403	649	466	495	798
$A_{sl, shear}$ [mm ²]	3493	3493	1959	2489	2489	1396
$A_{sl, twisting}$ [mm ²]	9556	10072	5358	11741	12376	6584
$V_{rd, max}$	4316	4316	5917	4316	4316	5917
$T_{Rd, max}$	1250	1506	1714	1250	1506	1714
$V_{Ed} / V_{Rd, max}$	0.294	0.294	0.215	0.210	0.210	0.153
$T_{Ed} / T_{Rd, max}$	0.703	0.584	0.513	0.864	0.717	0.630
Yhteisvaikutus	0.998	0.878	0.728	1.074	0.927	0.783

Lävistys

- Talopuolen kansallisessa liitteessä (NA) kielletään EN 1992-1-1 mukaisen lävistysmitoituksen käyttö eikä EN 1992 anna lisäohjeita
 - Myös siltojen mitoituksessa pitäydytään toistaiseksi Betonirakenneohjeet 2006 mukaisessa lävistysmitoituksessa

2.2.2.7 Laatan lävistys

Leikkausraudoittamattoman laatan betonin lävistyskapasiteetti V_c lasketaan ohjeen B4 kaavasta 2.38 käyttäen f_{ctd} :n laskennassa korkeintaan lujuusluokkaa K60. Kertoimelle k siinä käytetään arvoa, joka on määritelty tämän sovellusohjeen kohdassa 2.2.2.2. Raudituksen suhteellisen pinta-alan ρ laskennassa otetaan huomioon vain vedetyt puolen rauditus (lävistystä aiheuttavan kuorman vaikutuspintaan nähden vastakkaisen pinnan rauditus).

Jos käytetään leikkausraudoitusta, lasketaan lävistyskapasiteetti kaavasta

$$V_u = (0,25 V_c + V_s) \leq 2 V_c$$

$$\text{missä } V_s = A_{sv} f_{yd} \sin \alpha$$

V_c lasketaan kuten ohjeen B4 kaavassa 2.38 käyttäen kertoimelle k arvoa

$$k = 1,6 - d[m] \geq 1 \quad (\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3)$$

$$f_{yd} \leq 300 \text{ N/mm}^2$$

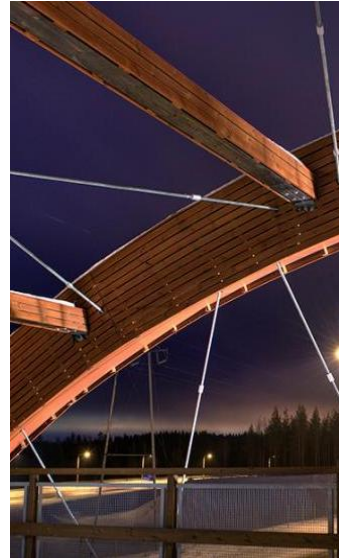
Leikkausraudoitukseen A_{sv} saa laskea raudituksen alueella tuen reunasta etäisyydelle 1,5 d tuen reunasta.



Väsytytys

Väsytytystarkastelu on tehtävä rakenteille joihin kohdistuu (merkittäviä) säännöllisiä kuormitusjaksoja. Silta rakenteista **väsytytystarkastelun ulkopuolelle** jäävät:

- kevyen liikenteen sillat, jotka eivät ole herkkiä tuuliherätteille
- riittävällä maataytöllä varustetut holvi- ja kehärakenteet
 - holvaantuminen! Ei pitkällä silloilla.
- perustukset
- alusrakenteet, jotka eivät ole jäykästi kiinnitetty päällysrakenteeseen
- penkereen tukimuurit
- betoni- ja jänneteräs alueilla, joissa tavallisen kuormitusyhdistelmän vaikuttaessa betonin ulkoreunalla esiintyy vain puristusjännityksiä.



www.a-insinorit.fi

Väsytytysmitoituksen tarkkuus?

- Murtorajatilan taivutusmitoitus
 - tunnetaan kuormat
 - yksinkertainen hyvin tunnettu teoria
- Leikkausmitoitus
 - tunnetaan kuormat
 - mitoitus teoria hieman kyseenalainen ja puutteellinen
 -
- Halkeilumitoitus
 - mikä on oikea kuorma?
 - mikä on kuorman aiheuttama halkeamaleveys?
 - mikä on halkeaman vaikutus pitkäaikaiskestävyyteen eri olosuhteissa?
- Väsytytysmitoitus
 - mitkä ovat oikeat kuormat ja monestiko ne toistuu?
 - kuormien samanaikaisuus
 - sillan ylittävän kuorman aiheuttama jännityshistoria
 - väsytytyskestävyys kokeessa
 - väsytytyskestävyys todellisissa kohteissa



www.a-insinorit.fi

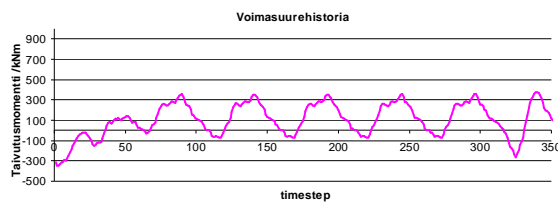
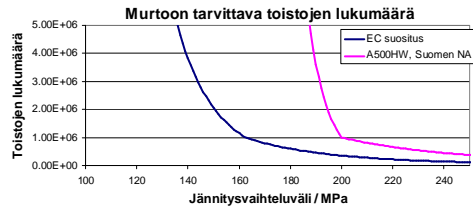
Kolme perusmenetelmää väsytsmitoitukseen

- Palmgren-Minerin sääntö $\sum_{i=1}^m \frac{n(\sigma_i)}{N(\sigma_i)} \leq 1$
 - rainflow

- Ekvivalentti jännitysvaihteluväli

$$\Delta\sigma_{ekv} = k \cdot \Delta\sigma_{kuormakaavio}$$

- Tai perustellaan ettei väsytsmitoitusta tarvitse tehdä

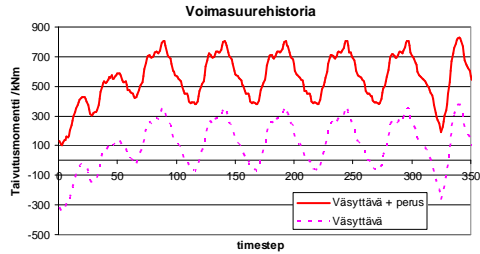


Väsytsmitoituksen analyysistä

- Jännityksiä laskettaessa betonin vetolujuutta ei huomioida
- Jännitysvaihteluväliä laskettaessa kuormat jaetaan jaksollisiin (väsyttäviin) ja jaksottomiin kuormiin (perusyhdistelmä). Väsyttäviä kuormia ovat tyypillisesti liikennekuormat ja suurissa silloissa myös tuulikuorma.
- Perusyhdistelmä:
 $G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i}$
- On sovittu, ettei tuulikuorma kuulu perusyhdistelmää.
 - Tällöin lähinnä lämpötilakuormat jäävät muuttuvista jäljelle.



Perusyhdistelmän vaikutus



• **ESIMERKKI, voimasuureet rakenneanalyysistä:**

- $M_{k,perus,max} = 200 \text{ kNm}$
- $M_{k,perus,min} = 150 \text{ kNm}$
- $M_{k,väsyttävä,max} = 40 \text{ kNm}$
- $M_{k,väsyttävä,min} = -30 \text{ kNm}$
- → Väsytyksmitoituksessa taivutus vaihtelee siis välillä 170...240 kNm

Raudituksen väsytyksmitoitus

- **300 MPa raja ominaisyhdistelyllä**
 - Tulee mahdollisesti sovellosuhteeseen
- **100 MPa jännitysvaihteluvälin raja väsyttävästä kuormasta**
 - Rajattoman väsytykskestävyyden tarkastus
 - $\psi_i LM1 \rightarrow FLM1$
 - (FLM2)
 - Rautateillä LM71 ja SW/0
- Väsytyksmitoitus ekvivalentilla jännitysvaihteluvälillä

$$\Delta\sigma_{s,eqv}(N^*) \leq \frac{\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)}{\gamma_{s,fat}\gamma_{F,fat}}$$

- FLM3 λ -kertoimilla
- Rautateillä LM71 ja SW/0 λ -kertoimilla
- (Todelliset junakuomakaaviot)
- Väsytyksmitoitus Palmgren-Miner

$$\sum_{i=1}^m \frac{n(\sigma_i)}{N(\sigma_i)} \leq 1$$

- FLM4
- FLM5
- Todelliset junakuomakaaviot



Raudituksen väsyysmitoitus FLM3 ekvivalentti jännitysvaihteluväli

$$\Delta\sigma_{s,eq}(N=10^6) = k \cdot \lambda_s \Delta\sigma_{s,FLM3}$$

$$\lambda_s = \varphi_{fat} \lambda_{s,1} \lambda_{s,2} \lambda_{s,3} \lambda_{s,4} \cdot \Delta\varphi_{fat}$$

$\lambda_{s,1}$ kts. EN 1992 - 2 Liite NN kuvat NN.1 ja NN.2

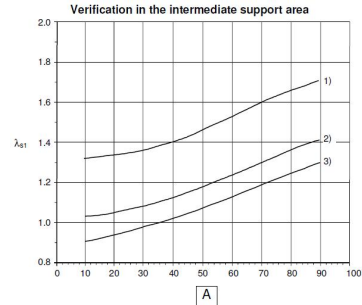
$$\lambda_{s,2} = Q^{k_2} \sqrt{\frac{N_{obs,1}}{2 \cdot 10^6}} \quad \lambda_{s,3} = k_3 \sqrt{\frac{N_{years}}{100}} \quad \lambda_{s,4} = k_4 \sqrt{\frac{\sum N_{obs,i}}{N_{obs,1}}}$$

Taulukon NN.1 Q-kerroin

k_2	Kaukoliikenne	Keskipitkä Paikallinen liikenne
5	1	0.9
7	1	0.92
9	1	0.94

$$\Delta\varphi_{fat} = 1,3 \left(1 - \frac{D}{26}\right) \geq 1$$

$$\varphi_{fat} = 1,2$$



- 1) splicing devices
 - 2) curved tendons in steel ducts
 - 3) reinforcing steel
- pre-tensioning (all)
post-tensioning:
strand in plastic ducts
straight tendons in steel ducts

A Critical length of influence line [m]

Taulukko 4.5(F1) – Odotettavissa oleva raskaiden ajoneuvojen lukumäärä vuotta ja hitaan liikenteen kaistaa kohti

	Liikenteen luokat (Oudaska on esittynyt hitaan liikenteen lisäksi raskaiden ajoneuvojen määrän laskuun siltan käyttöajan alustaksi)	N_{su} vuotta ja hitaan liikenteen kaistaa kohti (Laskennassa käytetty raskaiden ajoneuvojen määrän arvio)
1	Moottori-, moottoriliikenne- ja muut tietyt, joilla suuria kierre- tai ohjennettuja akselivälisiä kuorma-autosta muodostuvia liikennemääriä on suuri (> 1200 raskasta ajoneuvoa tarkkuudella)	$2,0 \times 10^7$
2	Moottori-, moottoriliikenne- ja muut tietyt, joilla kuorma-autosta muodostuvia liikennemääriä on keskimääräinen (200 - 1200 raskasta ajoneuvoa tarkkuudella)	$0,5 \times 10^7$
3	Päätet, joilla kuorma-autosten liikennemäärä on vähäinen (< 200 raskasta ajoneuvoa tarkkuudella)	$0,125 \times 10^7$
4	Päätet, joilla kuorma-autosten liikennemäärä on vähäinen (< 50 raskasta ajoneuvoa tarkkuudella)	$0,05 \times 10^7$

Raudituksen väsyysmitoitus Rautatiesiltojen ekvivalenttijännitysvaihteluväli

$$\Delta\sigma_{s,eq}(N=10^6) = \lambda_s \Phi \Delta\sigma_{s,LM71/SW0}$$

$$\lambda_s = \lambda_{s,1} \lambda_{s,2} \lambda_{s,3} \lambda_{s,4}$$

- Kuormakaaviolla LM71 ja SW/0 käytetään samaa dynaamista kerrointa Φ kuin muissa rajatiloissa
- $\lambda_{s,1}$ kertoimella sovitetaan kaavion LM71/SW0 jännitysvaihteluväli vastaamaan todellisten junien aiheuttamaa vauriota.

$$\lambda_{s,1}(L) = \lambda_{s,1}(2) + (\lambda_{s,1}(20) - \lambda_{s,1}(2))(\log(L) - 0.3)$$

Taulukosta NN.2 poimitut $\lambda_{s,1}$ arvot pehmeällä rauditoitteella

	Standard mix		Heavy mix	
	L(2)	L(20)	L(2)	L(20)
Yksiaukkoinen, vapaasti tuettu	0.9	0.65	0.95	0.7
Jatkuva, reunajärjesteet	0.9	0.65	1	0.65
Jatkuva, keskijärjesteet	0.95	0.5	1.05	0.55
Jatkuva, välitukien alue	0.85	0.7	0.85	0.75

- Tarkasteltava osa
- Jännemitta
- Rataosan todellisten junien keskinäiset osuudet

- $\lambda_{s,2}$ ja $\lambda_{s,3}$ kertoimilla otetaan huomioon sillan käyttöajan kuormituskertojen määrän suhde vertailuarvoon nähden, jolle $\Delta\sigma_{Rsk}$ on ilmoitettu

$$\lambda_{s,2} = k_2 \sqrt{\frac{Vol}{25 \cdot 10^6}} \quad \lambda_{s,3} = k_3 \sqrt{\frac{N_{years}}{100}}$$

- $\lambda_{s,4}$ kertoimella otetaan huomioon junien satunnainen samanaikaisuus sillalla

$$\lambda_{s,4} = k_4 \sqrt{n + (1-n) \left(\left(\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_{1+2}} \right)^{k_2} + \left(\frac{\Delta\sigma_2}{\Delta\sigma_{1+2}} \right)^{k_2} \right)}$$

- Kertoimet $\lambda_{s,1}$ ja $\lambda_{s,2}$ saattavat muuttua Suomen mitoituskäytännössä

Betonin väsytyksmitoitus

- Epäyhtälö tavallisella kuormitusyhdistelmällä

- leikkauksessa $f_{cd,fat}$ kerrotaan termillä v.
- FLM1
- (FLM2)
- LM71 ja SW/0

$$\frac{\sigma_{c,max}}{f_{cd,fat}} \leq 0,5 + 0,45 \frac{\sigma_{c,min}}{f_{cd,fat}}$$

- Väsytyksmitoitus ekvivalentilla jännitysvaihteluvälillä

- λ -kertoimet annettu ainoastaan rautatiesilloille!
- LM71 ja SW/0
- Todellisemmat junakuomakaaviot

$$\frac{7}{3} \left(1 - \frac{\gamma_{sd} \sigma_{cd,max}}{f_{cd,fat} \sqrt{1 - \frac{\sigma_{cd,min}}{\sigma_{cd,max}}}} \right) \leq 1$$

$$\sigma_{cd,max} = \sigma_{c,muut} + \lambda_c \sigma_{c,max,LM71/SW0}$$

$$\sigma_{cd,min} = \sigma_{c,muut} + \lambda_c \sigma_{c,min,LM71/SW0}$$

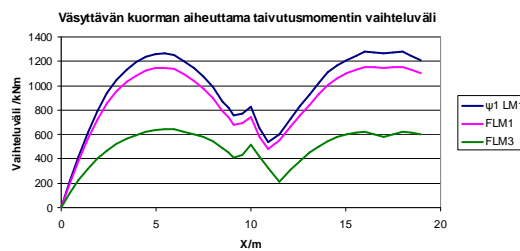
- Väsytyksmitoitus Palmgren-Miner

- FLM4
- FLM5
- Todellisemmat junakuomakaaviot

$$\sum_{i=1}^m \frac{n(\sigma_i)}{N(\sigma_i)} \leq 1$$

$$N_i = 10^{14 \left(1 - \frac{\sigma_{cd,max,i}}{f_{cd,fat} \sqrt{1 - \frac{\sigma_{cd,min,i}}{\sigma_{cd,max,i}}}} \right)}$$

Esimerkki väsytyksmitoituksesta

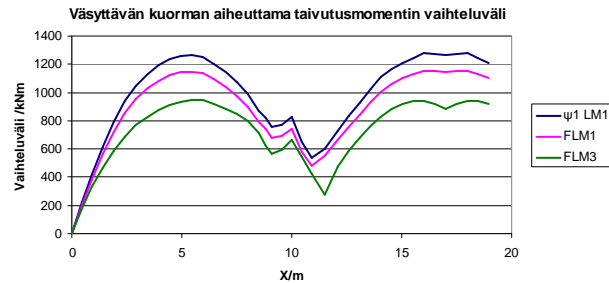


Esimerkin yksinkertaistamiseksi oletetaan, ettei vääntö aiheuta väsytystä.

- FLM3 ei ole vertailukelpoinen LM1 ja FLM1 kanssa

- FLM3 on vielä kerrottava λ -kertoimilla
 - keskipitkäliikenne, 50...200 raskasta ajoneuvoa/vrk $\rightarrow \lambda_2 = 0,94 \cdot 0,895 = 0,841$
 - Käyttöikä 100a $\rightarrow \lambda_3 = 1$
 - $\lambda_4 = 1$
 - Kentässä $k=1,4$. Välituella $k=1,75$
 - $\Phi = 1,2$
 - λ_1 10 m kentässä = 1,043, 15 m kentässä = 1,075
 - λ_1 välituella 10 m kentän puolelta 0,7755
 - λ_1 välituella 15 m kentän puolelta 0,7337

Esimerkki väsytyksmitoituksesta

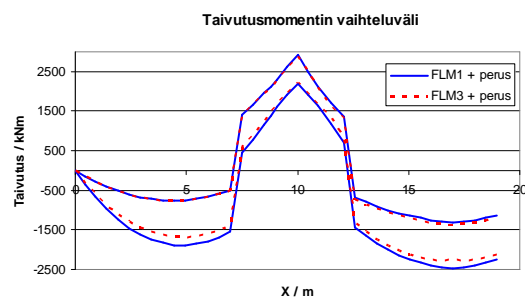


- Nyt vaihteluvälit ovat vertailukelpoisia
- ψ_1 LM1 ja FLM1 käytetään **100 MPa** jännitysvaihteluvälin rajan tarkistamiseen
- FLM3 käytetään viereisen kaavan mukaista rajaa vasten

$$\Delta\sigma_{s,eq}(N^*) \leq \frac{\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)}{\gamma_{s,fat}\gamma_{F,fat}}$$

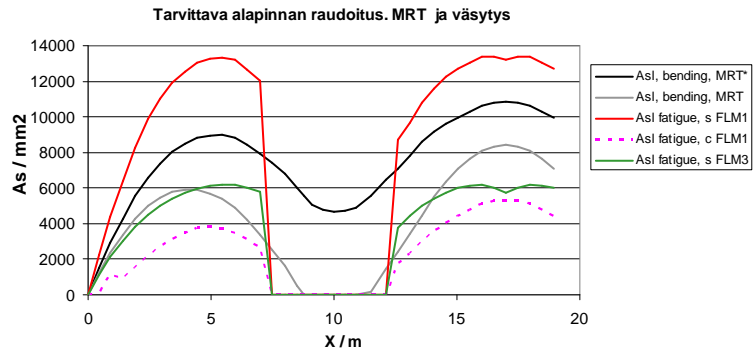
- eli raja on $200/1.15 = 173,9$ MPa

Esimerkki raudituksen väsytyksmitoituksesta

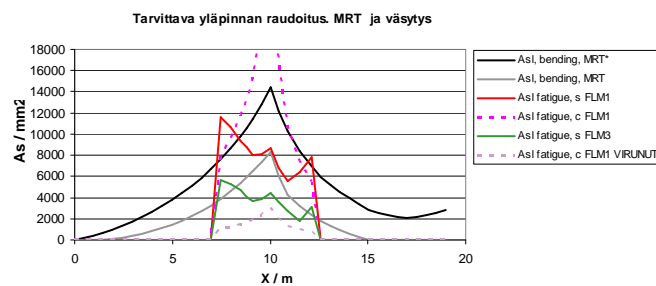


- Perusyhdistelmä + väsyttävä kuorma

Esimerkki raudoituksen väsytyksmitoituksesta



Esimerkki raudoituksen väsytyksmitoituksesta



- AsI fatigue, c FLM1 käyrän suuri raudoitemäärä tarkoittaa, ettei betonin väsytykskestävyys ole riittävä.
- Mitä betonin kimmokerrointa tulisi käyttää?
 - Väsytyksessä?
 - Ominaisyhdistelyn $0,6f_{ck}$ rajassa?

Kiitokset mielenkiinnosta!

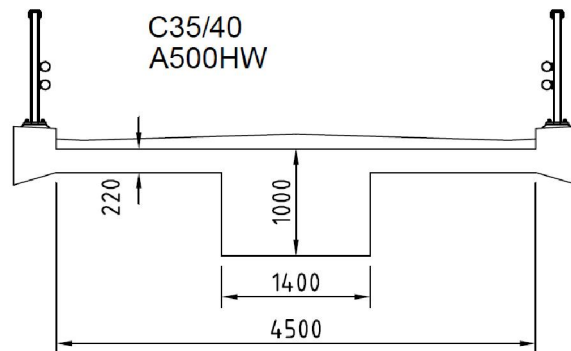


Kysymyksiä ja kommentteja?

Taivutusmitoitus

Perustiedot

Mitoitetaan oheisen siltapoikkileikkauksen vetorautoitus keskiaukossa.



Geometria

$$b_{\text{eff}} := 3980 \text{ mm}$$

$$h_f := 220 \text{ mm}$$

$$h := 1000 \text{ mm}$$

$$b_w := 1400 \text{ mm}$$

$$c := 40 \text{ mm}$$

$$\phi_{\text{työ}} := 12 \text{ mm}$$

$$\phi_{\text{haka}} := 12 \text{ mm}$$

$$\phi_{\text{pää}} := 32 \text{ mm}$$

$$d := h - c - \phi_{\text{työ}} - \phi_{\text{haka}} - \frac{\phi_{\text{pää}}}{2} = 920 \text{ mm}$$

Materiaalit

Betoni C35/45

$$f_{\text{ck}} := 35 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{\text{cc}} := 0.85$$

$$\gamma_C := 1.35$$

$$f_{\text{cd}} := \alpha_{\text{cc}} \cdot \frac{f_{\text{ck}}}{\gamma_C} = 22.037 \text{ MPa}$$

$$f_{\text{ctm}} := 0.3 \cdot \left(\frac{f_{\text{ck}}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \text{ MPa} = 3.21 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{\text{cu2}} := 0.35\%$$

$$\lambda := 0.8$$

Betoniteräs A500HW

$$f_y := 500 \text{ MPa}$$

$$\gamma_S := 1.1$$

$$f_{\text{yd}} := \frac{f_y}{\gamma_S} = 454.545 \text{ MPa}$$

$$E_s := 200 \text{ GPa}$$

$$\epsilon_{s1} := \frac{f_y}{E_s} = 0.25\%$$

Rasitukset

$$M_{\text{Ed}} := 4400 \text{ kNm}$$

Taivutusmomentti aukossa

$$V_{\text{Ed}} := 1930 \text{ kN}$$

Leikkausvoiman maksimiarvo välituella

Vetoteräksset

Oletetaan neutraaliakselin sijaitsevan laipassa

$$A_s := 1 \text{ mm}^2$$

Given

$$-(A_s)^2 \cdot \frac{f_{yd}}{2 \cdot b_{\text{eff}} \cdot f_{cd}} + A_s \cdot d - \frac{M_{Ed}}{f_{yd}} = 0$$

$$A_s := \text{Find}(A_s) = 1.085 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2$$

Tarkistetaan neutraaliakselin sijainti

$$y := \frac{A_s \cdot f_{yd}}{b_{\text{eff}} \cdot f_{cd}} = 56.249 \cdot \text{mm} < h_f = 220 \cdot \text{mm} \quad \text{--> Teräsmäärän laskentakaava oli oikea.}$$

Lasketaan teräsmäärä myös perinteisillä kaavoilla

$$\mu := \frac{M_{Ed}}{b_{\text{eff}} \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = 0.059 \quad \beta := 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu} = 0.061 \quad z := d \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) = 891.876 \cdot \text{mm}$$

$$A_s := \frac{M_{Ed}}{z \cdot f_{yd}} = 1.085 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2 \quad \text{Saatiin sama vastaus, OK!}$$

Tarkistetaan vähimmäisraudoitusvaatimus

$$b_t := b_w$$

$$A_{s,\text{min}} := \max\left(0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_y} \cdot b_t \cdot d, 0.0013 \cdot b_t \cdot d\right) = 2.15 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2 < A_s = 1.085 \times 10^4 \cdot \text{mm}^2 \quad \text{--> OK!}$$

Tarkistetaan vielä, ettei poikkileikkaus ole yliraudoitettu

$$\beta_b := \frac{\lambda \cdot \varepsilon_{cu2}}{\varepsilon_{cu2} + \varepsilon_{s1}} = 0.467$$

$$\text{testi} := \begin{cases} \text{"Normaaliraud"} & \text{if } \beta < \beta_b \\ \text{"YLIRAUD!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

testi = "Normaaliraud"

Lasketaan raudoitetankojen (T32) tarvittava määrä ja jako

$$A_{1s} := \frac{\pi \cdot \phi_{\text{pää}}^2}{4} = 804.248 \cdot \text{mm}^2$$

$$n_s := \begin{cases} \text{round}\left(\frac{A_s}{A_{1s}}\right) & \text{if } \text{round}\left(\frac{A_s}{A_{1s}}\right) > \frac{A_s}{A_{1s}} \\ \left(1 + \text{round}\left(\frac{A_s}{A_{1s}}\right)\right) & \text{otherwise} \end{cases} = 14$$

$$s := \frac{b_w - 2 \cdot (c + \phi_{\text{haka}}) - \phi_{\text{pää}}}{n_s - 1} = 97.231 \cdot \text{mm}$$

Laipan irtileikkaantuminen

Lasketaan ensin leikkausjännitys toisen puolen laipan ja uuman välisessä leikkauksessa

$$v_{Ed} := \frac{V_{Ed} \cdot (b_{eff} - b_w)}{2 \cdot b_{eff} \cdot h_f} \cdot \frac{1}{z} = 3.188 \cdot \text{MPa}$$

Redusoidaan termiä h_f poikittaisen taivutuksen mukaisella puristusalueen korkeudella (arvioidaan tämän puristusalueen korkeuden olevan 20mm).

$$v_{Ed,red} := \frac{V_{Ed} \cdot (b_{eff} - b_w)}{2 \cdot b_{eff} \cdot (h_f - 20\text{mm})} \cdot \frac{1}{z} = 3.507 \cdot \text{MPa}$$

Ratkaistaan optimaalinen puristusdiagonaalin kulma

$$\nu := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250\text{MPa}} \right) = 0.516$$

$$\theta_{f,apu} := \frac{1}{2} \cdot \text{asin} \left(\frac{2 \cdot v_{Ed,red}}{\nu \cdot f_{cd}} \right) = 19.042 \cdot \text{deg}$$

$$\theta_f := \begin{cases} \max(\theta_{f,apu}, 26.5\text{deg}) & \text{if } \theta_{f,apu} \leq 45\text{deg} \\ 26.5 \cdot \text{deg} \\ (45\text{deg}) & \text{otherwise} \end{cases} = 26.5 \cdot \text{deg}$$

Valitaan poikittaisraudoitteen halkaisija: $\phi_{sf} := 16\text{mm}$ $A_{sf} := \frac{\pi \cdot \phi_{sf}^2}{4} = 201.062 \cdot \text{mm}^2$

Tarvittava raudoitejako on tällöin

$$s_f := \frac{A_{sf} \cdot f_{yd}}{v_{Ed} \cdot \tan(\theta_f) \cdot h_f} = 261.343 \cdot \text{mm} \quad \text{--> Valitaan T16 k250}$$

Tarkistetaan NA:n luonnoksen mukainen vähimmäisraudoitus

$$A_{sf,min} := 0.2 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_y} \cdot h_f = 282.477 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

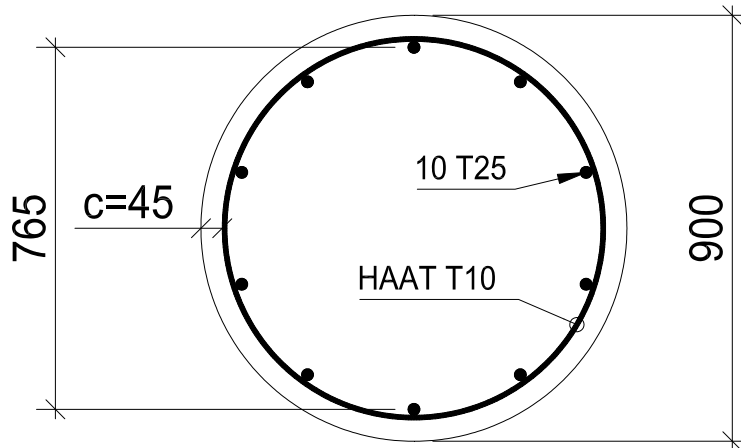
$$s_{f,min} := \frac{A_{sf}}{A_{sf,min}} = 711.782 \cdot \text{mm} > s_f = 261.343 \cdot \text{mm} \quad \text{--> OK!}$$

Pilarin mitoitus

kNm := kN·m ORIGIN := 1

Perustiedot

Mitoitetaan oheinen pilaripoikkileikkaus. Oletetaan aluksi teräkset T25, jotta voidaan laskea lisäepäkeskisyyss (jossa tarvitaan tietoa poikkileikkauksen raudoituksesta).



Geometria

$$D := 900\text{mm} \quad c := 45\text{mm} \quad l := 6.2\text{m} \quad l_0 := 2.2 \cdot l = 13.64\text{m}$$

$$\phi_{\text{haka}} := 10\text{mm} \quad \phi_{\text{pää}} := 25\text{mm}$$

$$i := \frac{D}{4} = 0.225\text{m} \quad \lambda := \frac{l_0}{i} = 60.622$$

$$h_{\text{eq}} := \sqrt{12} \cdot i = 779.423\text{mm}$$

$$d := h_{\text{eq}} - c - \frac{\phi_{\text{pää}}}{2} = 721.923\text{mm} \quad A_c := \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 6.362 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_s := 10 \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{\text{pää}}^2}{4} = 4.909 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Materiaalit

Betoni C35/45

$$f_{\text{ck}} := 35\text{MPa} \quad \alpha_{\text{cc}} := 0.85 \quad \gamma_C := 1.35 \quad f_{\text{cd}} := \alpha_{\text{cc}} \cdot \frac{f_{\text{ck}}}{\gamma_C} = 22.037\text{MPa}$$

$$\varphi_{\text{ef}} := 1.5 \quad \text{Virumaluku (arvioitu)}$$

Betoniteräs A500HW

$$f_y := 500\text{MPa} \quad \gamma_S := 1.1 \quad f_{\text{yd}} := \frac{f_y}{\gamma_S} = 454.545\text{MPa}$$

$$E_s := 200\text{GPa} \quad \varepsilon_{s1} := \frac{f_y}{E_s} = 0.25\%$$

Rasitukset

$$N_{\text{Ed}} := 4400\text{kN}$$

$$H_{\text{Ed}} := 0.06 \cdot 1704\text{kN} = 102.24\text{kN}$$

Epätarkkuudet

$$e_i := \frac{l_0}{400} = 34.1 \cdot \text{mm}$$

Huomioidaan vähimmäisepäkeskisyyttä

$$e_i := \max\left(\frac{l_0}{400}, \frac{D}{30}, 20\text{mm}\right) = 34.1 \cdot \text{mm}$$

Epäkeskisyydet (nimelliseen kaarevuuteen perustuva menetelmä)

$$\omega := \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}} = 0.159 \quad n := \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}} = 0.314 \quad \lambda_{lim} := 20 \cdot \frac{1}{1 + 0.2 \cdot \varphi_{ef}} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot \omega} \cdot 1.7 \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} = 53.602$$

testi := $\begin{cases} \text{"2. kertaluku"} & \text{if } \lambda > \lambda_{lim} \\ \text{"1. kertaluku"} & \text{otherwise} \end{cases}$ testi = "2. kertaluku"

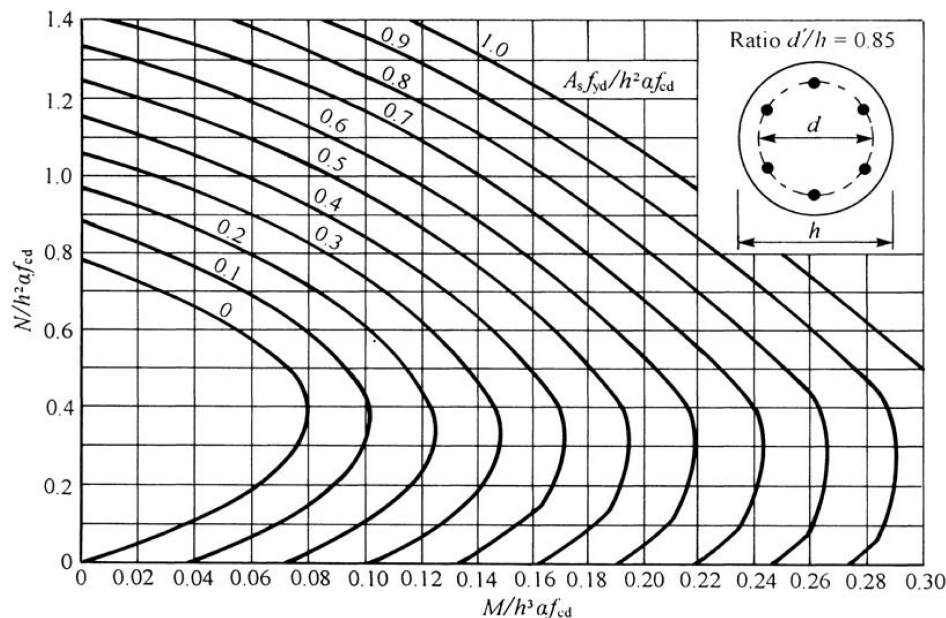
$$K_R := \frac{1 + \omega - \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}}}{0.6 + \omega} = 1.113 \quad K_{\varphi} := 1 + \left(0.35 + \frac{f_{ck}}{200\text{MPa}} - \frac{\lambda}{150}\right) \cdot \varphi_{ef} = 1.181$$

$e_2 := K_R \cdot K_{\varphi} \cdot \frac{f_{yd}}{E_s \cdot 4.5 \cdot d} \cdot l_0^2 = 171.201 \cdot \text{mm}$ --> $e_d := e_i + e_2 = 205.301 \cdot \text{mm}$

Mitoitusvoimasuureet

$N_{Ed} = 4.4 \times 10^3 \cdot \text{kN}$ $M_{Ed} := H_{Ed} \cdot l + N_{Ed} \cdot e_d = 1.537 \times 10^3 \cdot \text{kNm}$

$$v := \frac{N_{Ed}}{D^2 \cdot f_{cd}} = 0.246 \quad \mu := \frac{M_{Ed}}{D^3 \cdot f_{cd}} = 0.096 \quad \frac{D - 2 \cdot (c + \phi_{haka}) - \phi_{pää}}{D} = 0.85$$



Pääraudoitus

Luetaan yhteisvaikutusdiagrammista: $\omega := 0.10$

$$A_s := \omega \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \cdot D^2 = 3.927 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Lasketaan raudoitetankojen (T32) tarvittava määrä ja jako

$$A_{1s} := \frac{\pi \cdot \phi_{pää}^2}{4} = 490.874 \cdot \text{mm}^2$$

$$n_s := \begin{cases} \text{round}\left(\frac{A_s}{A_{1s}}\right) & \text{if } \text{round}\left(\frac{A_s}{A_{1s}}\right) > \frac{A_s}{A_{1s}} \\ \left(1 + \text{round}\left(\frac{A_s}{A_{1s}}\right)\right) & \text{otherwise} \end{cases} = 9$$

--> 10 T25 oli hyvä arvaus

Tarkistetaan vähimmäisraudoitusvaatimus

$$A_{s,\min} := \max\left(0.1 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}, 0.002 \cdot A_c\right) = 1.272 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2 < A_s = 3.927 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2 \text{ --> OK!}$$

Hakaraudoitus

$$\phi_{pää,\min} := 20\text{mm}$$

$$\phi_{haat} := \max\left(\frac{\phi_{pää}}{4}, 10\text{mm}\right) = 10\text{mm}$$

$$s_{cl,\max} := \min(15 \cdot \phi_{pää,\min}, D, 400\text{mm}) = 300\text{mm}$$

--> Valitaan haat T10 k300 (huom. tihennykset (0,6*s): ylä- ja alapäissä sekä limijatkosten kohdalla)