

Kaivantotoimikunnan koulutuspäivä 17.5.2021

TUKIRAKENTEIDEN MITOITUS

Juha Kujansuu, Geosolver Oy



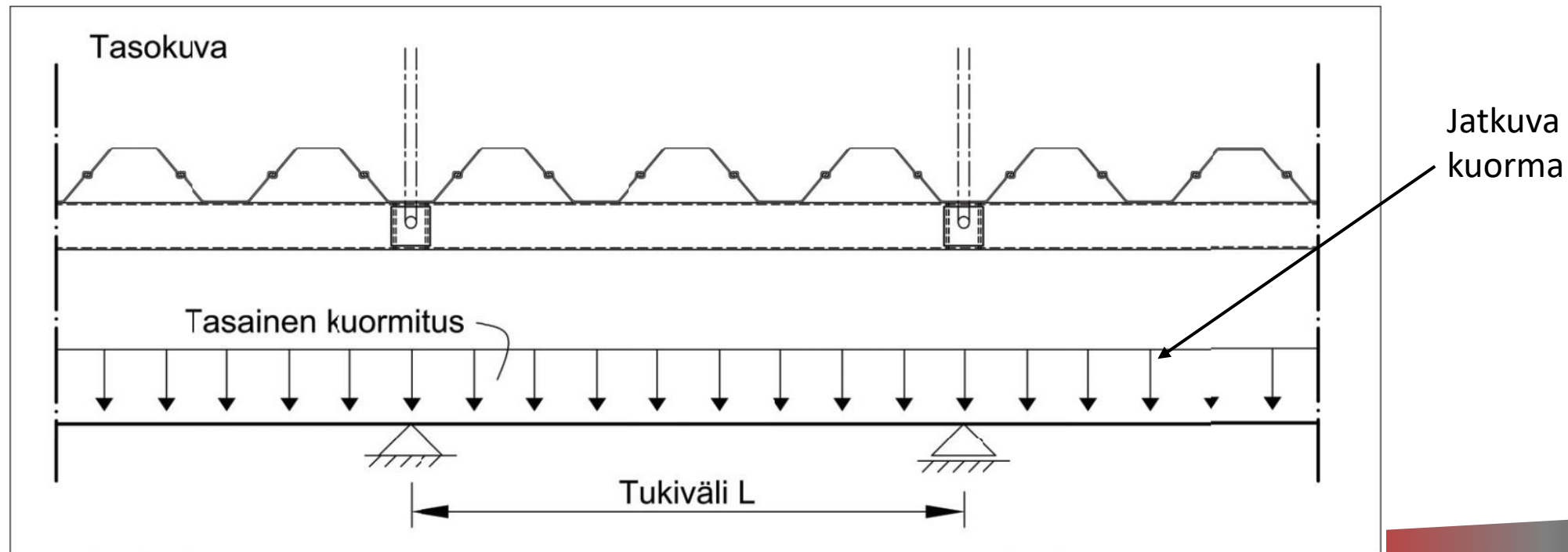
Suomen Geoteknillinen Yhdistys
– Finnish Geotechnical Society

Sisältö

- Vaakapalkin mitoitus
 - Perusmitoitus
 - Yhdistetyt rasitukset
 - Kiepahdus
- Ankkurin ja vetotankojen mitoitus
- Juuritappi
- Juuripalkki

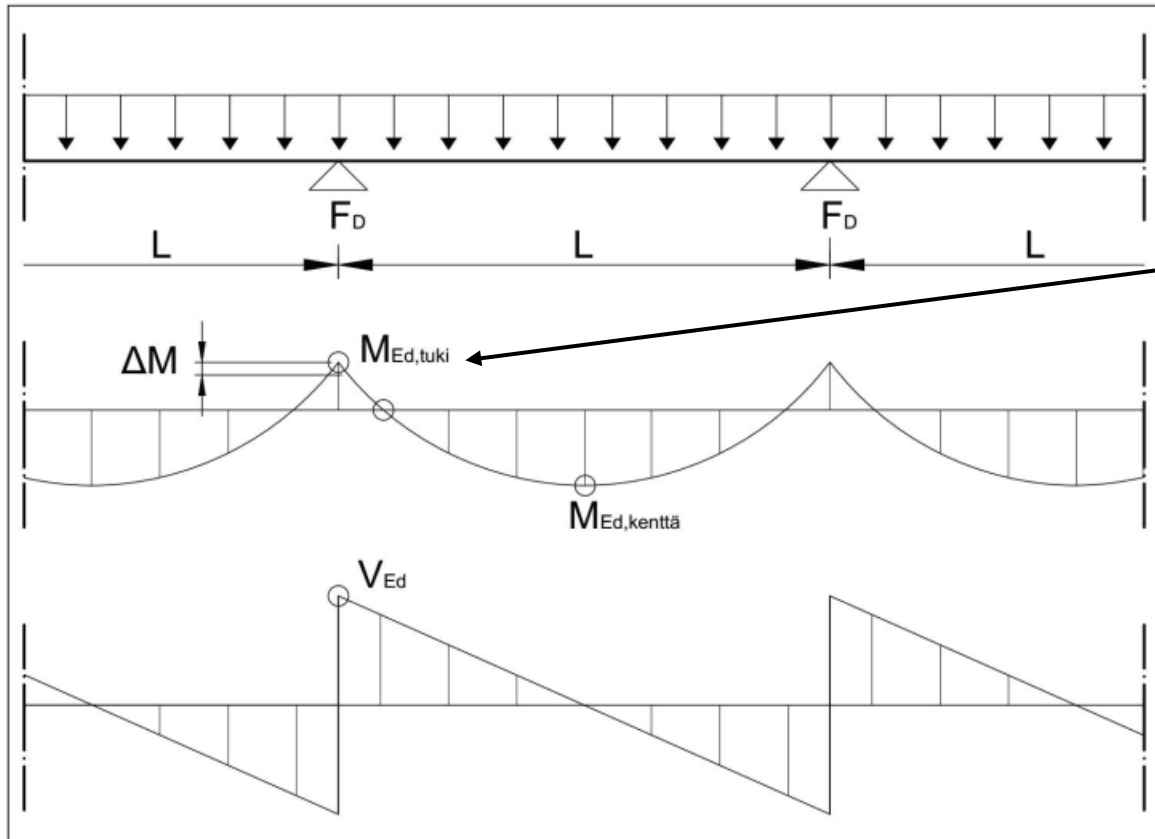
Vaakapalkki

- Normaalisti mitoitus etenee niin, että tukiseinälaskennasta saatu ankkuri-/tukirakenteen vaakakomponentti kohdistetaan vaakapalkille jatkuvana kuormana



Vaakapalkki

- Vaakapalkin tukimomentti voidaan redusoida



$$\Delta M = \frac{F_d \cdot t_l}{8}$$

F_d = tukivoima
 t_l = tukirasituksen
vaikutusleveys tukipalkin
taustalla

Vaakapalkki

- Vaakapalkin taivutuskestävyys määritetään kaavalla

$$M_{c,Rd} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

W_{pl} = plastinen (PL3 W_{El} elastinen) taivutusvastus

f_y = teräslaji

γ_{M0} = osavarmuusluku 1,0

Vaakapalkki (esimerkki)

Esimerkki: Työnaikaiseen vaakapalkkiin kohdistuva tukivoima on $F_{k,G}=175\text{kN}$ ja $F_{k,Q}=200\text{ kN}$. Vaakapalkin tukiväli 6,0m, teräsprofiili HEB200 ja teräslaji S355. $K_{FI} = 1,0$ ja $\gamma_{MK} = 1,15$.

Määritetään 6.10a ja 6.10b mukainen mitoitusvoima:

$$6.10a: 1,35 \times 175 \text{ kN} \rightarrow 236,3 \text{ kN}$$

$$6.10b: 1,15 \times 175 \text{ kN} + 1,50 \times 25 \text{ kN} \rightarrow \mathbf{238,8 \text{ kN}}$$

Jatkuva mitoittava tasainen kuorma $P_d = 238,8 \text{ kN} \times 1,15 / 6,0\text{m} \rightarrow 46 \text{ kN/m}$

Vaakapalkki (esimerkki)

Lasketaan taivutusmomentin mitoitusarvo M_{Ed} jatkuvalle palkille:

$$M_{Ed} = \frac{P_d \cdot L^2}{12} \rightarrow \frac{46 \text{ kN/m} \cdot (6,0 \text{ m})^2}{12} \rightarrow 138 \text{ kNm (tuen päissä)}$$

$$M_{Ed} = \frac{P_d \cdot L^2}{24} \rightarrow \frac{46 \text{ kN/m} \cdot (6,0 \text{ m})^2}{24} \rightarrow 69 \text{ kNm (kenttämomentti)}$$

Lasketaan palkin taivutusmomentti kestävyys $M_{c,Rd}$:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{642,5 \text{ cm}^3 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{\gamma_{M0} \cdot 1000} = 228 \text{ kNm}$$

Vaakapalkki (esimerkki)

Mitoitusehdon tarkastus $M_{Ed} \leq M_{c,Rd}$

→ 138 kNm ≤ 228 kNm **Mitoitus ok!**

Vaakapalkki

- Jos leikkausvoiman mitoitusarvo V_{Ed} on alle 50% plastisuusteorian mukaisesta leikkauskestävyyden mitoitusarvosta $V_{pl,Rd}$, ei taivutuskestävyyden mitoitusarvoa $M_{c,Rd}$ ole tarpeen pienentää.
- Vaakapalkin leikkauskestävyyden $V_{pl,Rd}$ määrittäminen (PL1 ja PL2)

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_w \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}}$$

A_w = vaakapalkin uuman pinta-ala

f_y = teräslaji

γ_{M0} = teräksen osavarmuusluku 1,0

Vaakapalkki

- Uuman pinta-ala A_w määritetään seuraavasti:

$$A_w = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \underbrace{\eta_t \cdot h_w \cdot t_w}_{\text{Kuitenkin } A_w\text{:n oltava vähintään tämän verran}}$$

A = poikkileikkauksen pinta-ala

t_f = vaakapalkin laipan paksuus

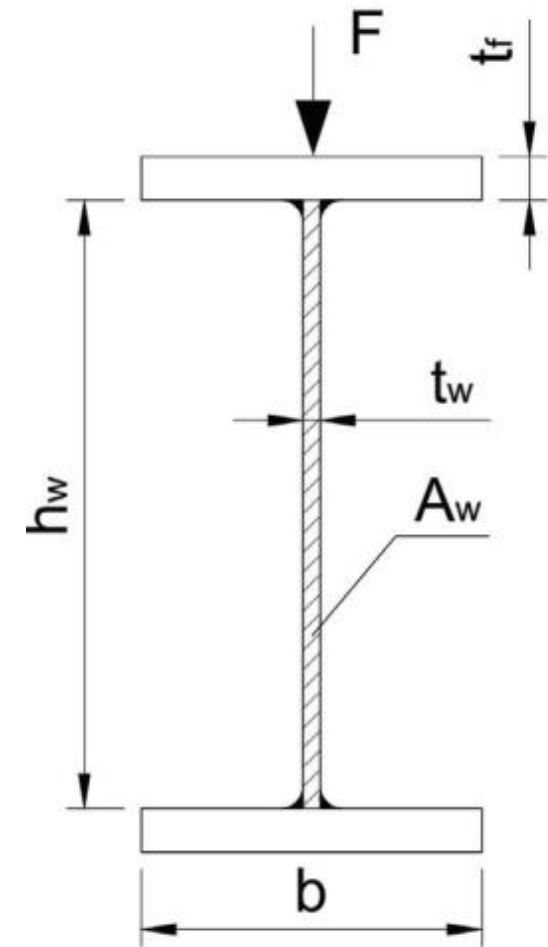
t_w = vaakapalkin uuman paksuus

h_w = vaakapalkin uuman korkeus

η_t teräslajista riippuva kerroin:

$\eta_t = 1,2$, kun $f_y \leq 460$ MPa ja $\eta_t = 1,0$, kun $f_y > 460$ MPa

r on pyöristyssäde uuman ja laipan rajapinnassa



kuormitus
uuman
suuntainen

Vaakapalkki – leikkauskestävyys HEB200

- Uuman pinta-ala A_w määritetään seuraavasti:

$$A_w = 7810\text{mm}^2 - 2 \cdot 200\text{mm} \cdot 15\text{mm} + (9\text{mm} + 2 \cdot 18\text{mm}) \cdot 15\text{mm} \\ \geq 1,2 \cdot 170\text{mm} \cdot 9\text{mm}$$

-> $2485\text{mm}^2 \geq 1836 \text{ mm}^2$ Ok! (käytetään 2485mm^2)

Leikkauskestävyys $V_{pl,Rd}$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_w \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{2485\text{mm}^2 \cdot 355\text{N/mm}^2}{1,0 \cdot \sqrt{3}} = 509\text{kN}$$

Vaakapalkki – Leikkaus

- Leikkausvoiman laskukaava esimerkin tilanteessa:

- $$V_{Ed} = \frac{P_d \cdot L}{2} = \frac{46 \text{ kN/m} \cdot 6,0 \text{ m}}{2} = 138 \text{ kN}$$

Puolet plastisesta leikkauskestävyydestä ($0,5 \times V_{pl,Rd}$)

→ $0,5 \times 509 \text{ kN} = 254,5 \text{ kN}$

Leikkausvoima V_{Ed} (138kN) on vähemmän kuin puolet plastisesta leikkausvoimakestävyydestä (254,5kN) eli leikkausvoimaa ei tarvitse huomioida!

Vaakapalkki – Taivutus, yksi tuki poistuu

- Tehdään tarkastelu siten, että yksi tuki poistuu. Työnaikaiseen vaakapalkkiin kohdistuva tukivoima on $F_{k,G}=25\text{kN/m}$. Vaakapalkin tukiväli on tällöin 12,0m, teräsprofiili HEB200 ja teräslaji S355.
- Tällöin mitoittava taivutusmomentti tukipalkille on:
- Lasketaan taivutusmomentti palkin päissä:

$$M_{Ek} = \frac{P_k \cdot L^2}{12} \rightarrow \frac{25\text{kN/m} \cdot (12,0\text{m})^2}{12} \rightarrow 300 \text{ kNm}(\text{tuen päissä})$$

Vaakapalkki – Leikkaus, yksi tuki poistuu

- Vastaavasti vallitseva leikkausvoima on:

- $$V_{Ek} = \frac{P_k \cdot L}{2} = \frac{25 \text{ kN/m} \cdot 12,0 \text{ m}}{2} = 150 \text{ kN}$$

- $150 \text{ kN} < 509 \text{ kN} \times 0,5$
- $150 \text{ kN} < 254,5 \text{ kN}$ Ei tarvitse huomioida vaikutusta

Vaakapalkki – Taivutus, yksi tuki poistuu

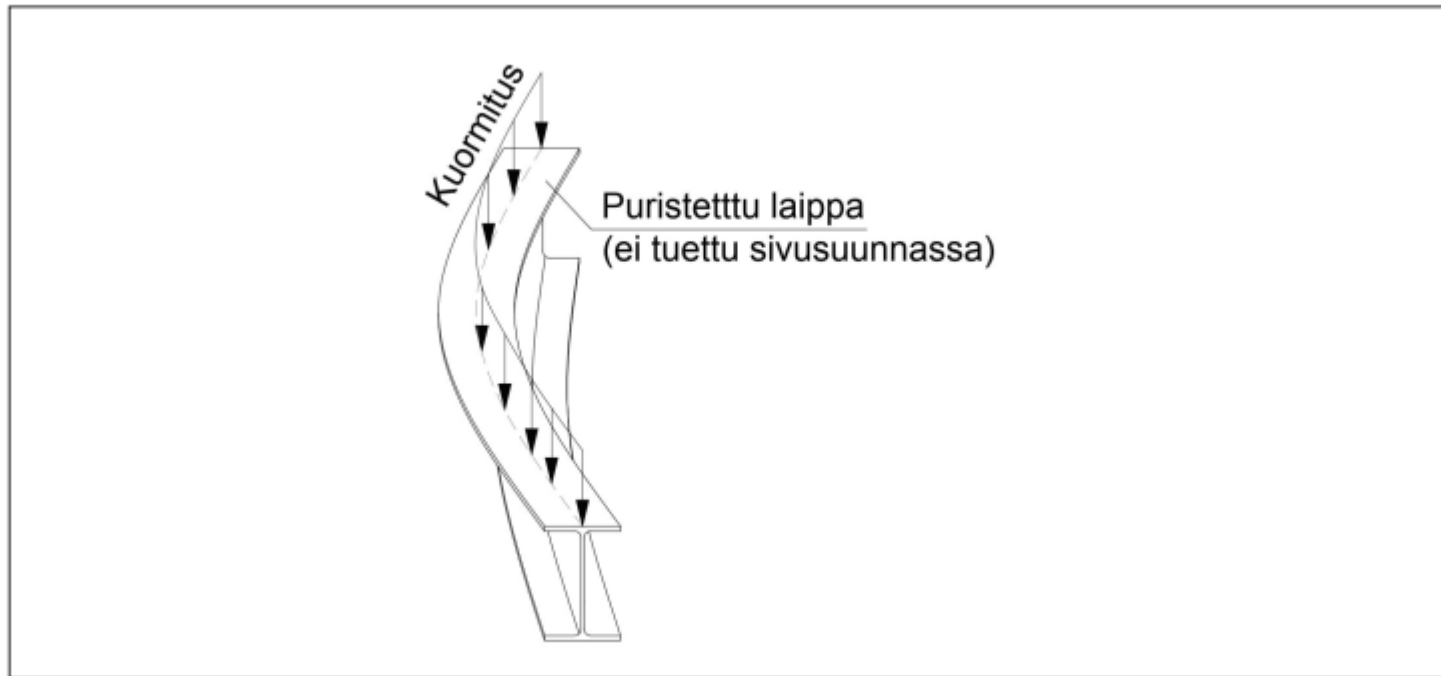
- $$M_{c,rk} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{569,6 \text{ cm}^3 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{\gamma_{M0} \cdot 1000} = 202 \text{ kNm}$$

- Eli mitoitusyhtälö $M_{c,Rk} \geq M_{Ek}$
- Eli mitoitusyhtälö $202 \text{ kNm} \geq 300 \text{ kNm}$ (ei ok!)

Kannattaa laskea palkit jatkuvina, jos se on rakenteellisesti mahdollista.

Vaakapalkin kiepahtaminen

- Kuormitetun H- tai I-palkin laippa saattaa kiepahtaa sivulle kuormituksen johdosta. Kiepahtamisherkkyttä lisää profiilin korkeus ja hoikkuus.



Huom! Mallikerroin γ_{MK}
kiepahdustarkastelussa on 1,0

Vaakapalkin kiepahtaminen

- Kiepahdus tarkistetaan siten, että palkin taivutusmomentti kestävyyttä alennetaan kaavan mukaisesti:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

missä

| | |
|---------------|--|
| W | poikkileikkauksesta riippuva taivutusvastus; |
| W_{pl} | poikkileikkausluokat 1 ja 2 |
| W_{el} | poikkileikkausluokka 3 |
| W_{eff} | poikkileikkausluokka 4 |
| χ_{LT} | kiepahduskestävyyden pienennystekijä |
| γ_{M1} | teräksen osavarmuusluku = 1,0 (taulukko 3) |

Vaakapalkin kiepahtaminen

- Kiepahtamista ei ole tarpeen tarkistaa jos toinen ehdoista täyttyy:

$$\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,16$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W \cdot f_y}{M_{cr}}} \quad \Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta_{LT} \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

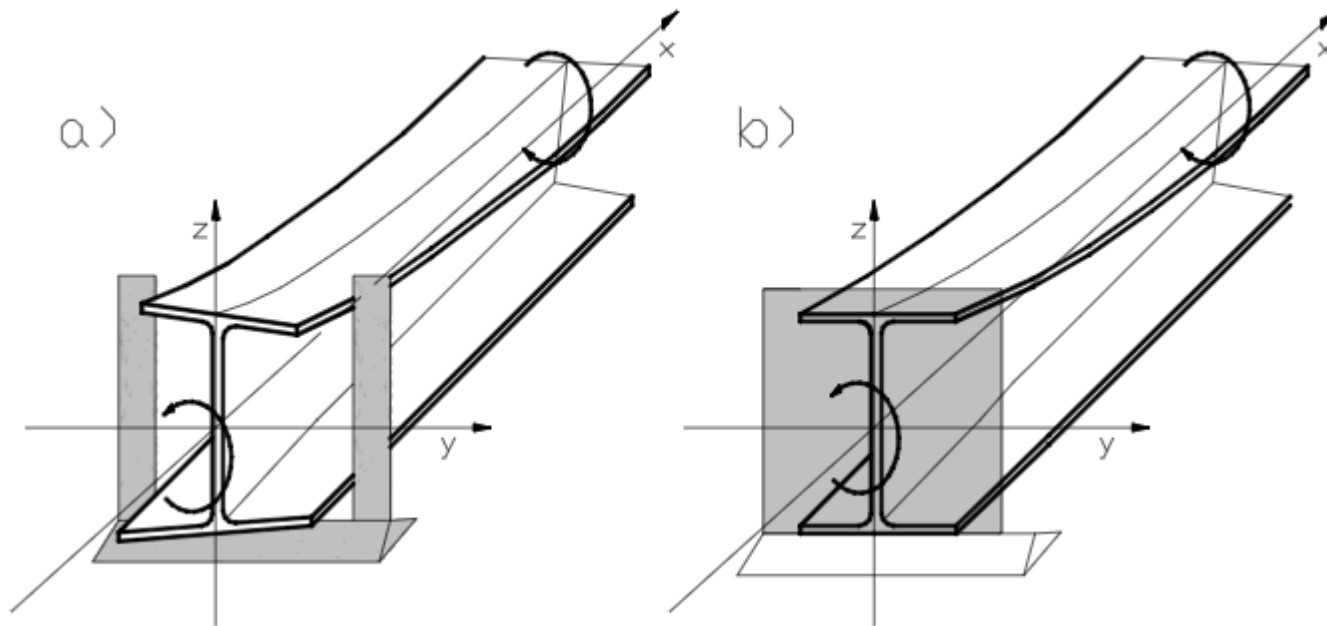
$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta_{LT} \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2}$$

$$\left(\sqrt{\left(\frac{k}{k_\omega} \right)^2 \cdot \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_s)^2} - (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_s) \right)$$

Huom! Kaava supistuu, kun valitaan kertoimet $C_3=0$ sekä $k=0,5$ ja $k_\omega=0,5$

Vaakapalkin kiepahtaminen



Huom! Kaavan supistettu muoto
(oletus $C_3=0$ sekä $k=0,5$ ja
 $k_w=0,5$)

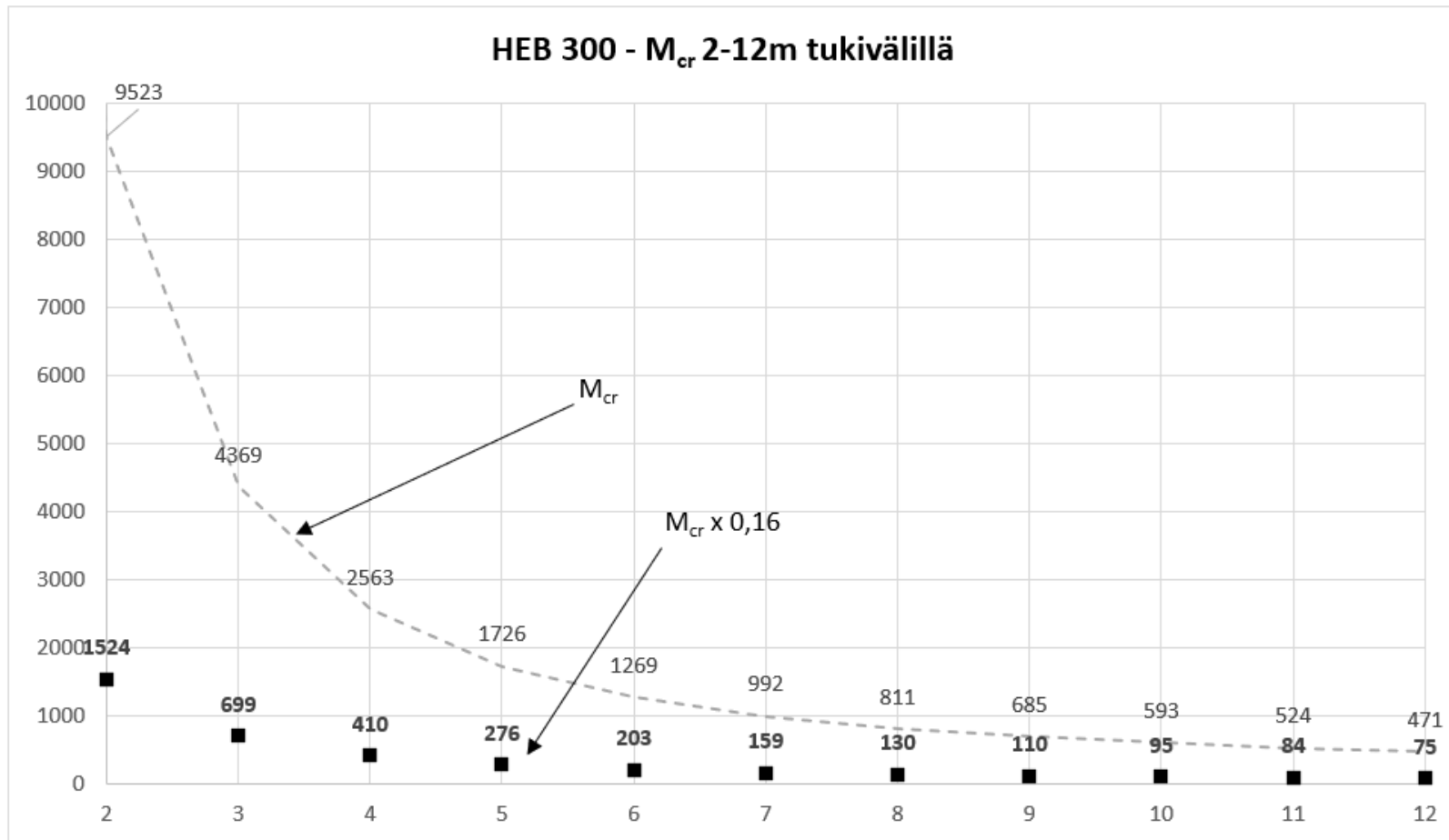
Eli vastaa kuvan tilannetta b

Ohjeen liitteessä 4 on esitetty
em. parametreille muitakin
arvoja.

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(0,5 \cdot L)^2} \cdot \left(\sqrt{\frac{I_{\omega}}{I} + \frac{(0,5 \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I} + (C_2 \cdot z_g)^2} - (C_2 \cdot z_g) \right)$$

Vaakapalkin kiepahtaminen

- Tarkastellaan HEB300 palkin M_{cr} arvoja



Yksiköt pystyakselilla [kNm] ja
vaaka-akselilla on [m]

Teräslaji S355

Eli jos vaakapalkin taivutusmomentti
on enemmän kuin $M_{cr} \times 0,16$, niin
kiepahdus tulisi huomioida
laskelmissa.

Teräspalkin leikkauslommahdus

- Teräspalkin uuma voi leikkauslommahtaa kuormien vaikutuksesta. Mitä hoikempi on uuma sitä todennäköisempää on uuman lommahtaminen.
- Teräspalkeilla, joilla ei ole uumajäykistystä, tehdään tarkistus seuraavalla kaavalla, jos ehto toteutuu, tulee leikkauslommahdus huomioida!

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{72\varepsilon}{\eta_t}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

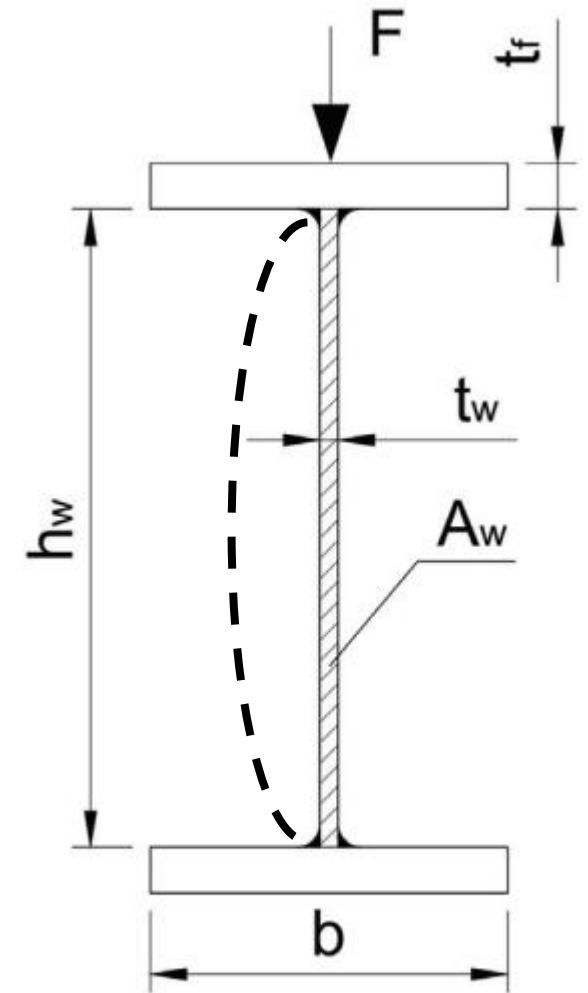
t_w

vaakapalkin uuman paksuus
vaakapalkin uuman korkeus

η_t

teräslajista riippuva kerroin:

$\eta_t = 1,2$, kun $f_y \leq 460$ MPa ja $\eta_t = 1,0$, kun $f_y > 460$ MPa



kuormitus
uuman
suuntainen

Teräspalkin leikkauslommahdus

- Tarkistetaan HEB340 S355 leikkauslommahdus:

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{72\varepsilon}{\eta_t} \rightarrow \frac{297}{12} > \frac{72 \cdot \sqrt{\frac{235}{355}}}{1,2} \rightarrow 24,8 > 48,8$$

Ehto ei toteudu, joten leikkauslommahdusta ei tarvitse huomioida!

Ankkurin tai vetotangon mitoitus

- Ankkureihin ei kohdisteta mallikerrointa, vaan käytetään ankkureiden osavarmuuskertoimia $\gamma_{a,t} = 1,25$ (työnaikainen) ja $\gamma_{a,p} = 1,50$ (pysyvä).
- Koevetovoima F_{koe} määräytyy siis mitoitusvoiman F_d perusteella seuraavasti:

$$F_{koe} = F_d \times \gamma_{a,t}$$

$$F_{koe} = F_d \times \gamma_{a,p}$$

F_d on siis ankkurin suuntainen mitoitusvoima, joka on määritetty 6.10a ja 6.10b yhtälöiden perusteella. Huomioitava myös K_{FI} -kerroin.

Ankkurin tai vetotangon mitoitus

- Punosankkurin maksimi hetkellinen voima määräytyy seuraavasti:
- $F_{koe,max} \leq 0,80 \times P_{tk}$ tai $F_{koe,max} \leq 0,95 \times P_{t0,1k}$

Esimerkiksi punosankkuri (9 punosta) st1570/1770 vastaavat $F_{koe,max}$ arvot ovat seuraavat (ohjeen taulukko 23):

$$F_{koe,max} \leq 0,80 \times P_{tk} \rightarrow 0,80 \times 1770 \text{ N/mm}^2 \times 9 \times 150\text{mm}^2 \rightarrow \mathbf{1912 \text{ kN}}$$

$$F_{koe,max} \leq 0,95 \times P_{t0,1k} \rightarrow 0,95 \times \mathbf{1500} \text{ N/mm}^2 \times 9 \times 150\text{mm}^2 \rightarrow 1924 \text{ kN}$$

Ohjeessa olevassa taulukossa 23 (referenssi-standardissa) todennäköisesti virhe, koska teräslajilla St1550/1770 raja-arvo on 1550 eikä 1500 (aikaisemmin ollut punoslaji 1570/1770 mutta siltikin 1500 tuntuisi olevan väärä arvo)

Ankkurin tai vetotangon mitoitus

- Vetotangon mitoituksessa tulee valita seuraavista pienempi arvo:

Ankkurin kierteen vetokestävyys $N_{tt,Rd}$ määritetään kaavalla 5.5.

$$N_{tt,Rd} = k_{vt} \cdot \frac{f_y \cdot A_{vtk}}{\gamma_{M2}}$$

missä

A_{vtk} vetotangon jännityspoikkipinta-ala kierteiden kohdalla
 f_y vetotangon teräksen myötölujuus
 γ_{M2} teräksen osavarmuusluku 1,25 (taulukko 3)

Suositusarvo kertoimelle $k_{vt} = 0,6$ SFS-EN 1993-5 mukaisesti. Standardissa mainitaan myös, että vain tapauksissa, joissa ankkuritangon ja seinän rakenneyksityiskohdan sijainti on sellainen, että taivutusmomenteja ei synny, voidaan käyttää kertoimelle arvoa $k_{vt} = 0,9$. Standardissa 5 on myös maininta, että varmallalla puolella olevana arvona voidaan kaavassa 5.5 pinta-alana A_{vtk} käyttää kierreosan nettopinta-alaa jännityspoikkipinta-alan sijaan.

Laatta-ankkureissa teräksen myötöraja saa olla enintään 800 N/mm^2 . Teräsrakenteiden kansallisessa liitteessä on myös maininta, että lisäksi kierteiden tekotavan vaikutus tulee huomioida standardin SFS-EN 1993-1-8 kohdan 3.6.1(3) mukaisesti.

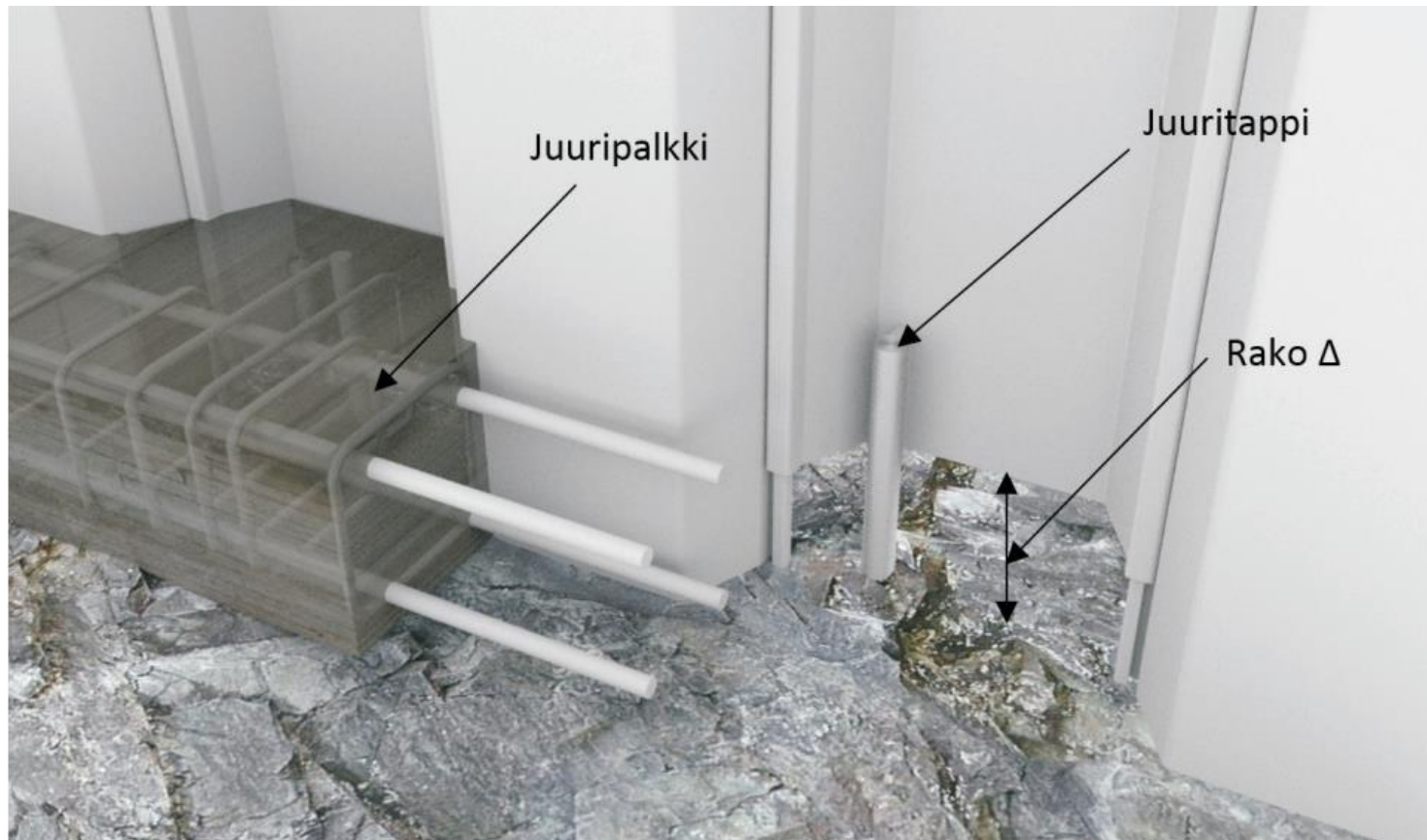
$$N_{vt,Rd} = A_{vt} \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

missä

A_{vt} vetotangon bruttopinta-ala
 f_y vetotangon teräksen myötölujuus
 γ_{M0} teräksen osavarmuusluku 1,0 (taulukko 3)

Juuritapin mitoitus

- Tukiseinän alapään juuritappi. Laskennallinen minimirako-oletus $\Delta=100\text{mm}$



Juuritapin mitoitus

- Juuritapin mitoituksessa huomioidaan juuritapin yhdistetty taivutus- ja leikkauskestävyys.
- Juuritappi voidaan mitoittaa kiinnityksen osalta kahdella tapaa:
 - 1. Juuritappi kiilataan tukiseinään, mutta ei kiinnitetä osaksi (voidaan myös rakenteellisesti sijoittaa teräspontissa olevaan varausputkeen)**
 2. Juuritappi hitsataan osaksi tukiseinärakennetta (pontteja ei saa tällöin vetämällä pois, jollei liitos myöhemmin poisteta)

Juuritapin mitoitus

- Ohjeessa esitetyt kaavat perustuvat siihen, että juuritapista otetaan kaikki kapasiteetti irti eli juuritappi voi plastisoitua.
- Kuitenkaan kaavoissa ei huomioida mahdollista aksiaalista (pontin suuntaista voimaa) - (kaava monimutkaistuu ja kapasiteetti vähenee, jos otetaan huomioon)
- Aluksi tarkistetaan mitoitus ns. puhtaalle leikkaukselle.

$$V_{el} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \cdot A_t$$

missä

A_t

juuritapin pinta-ala = $D^2 \cdot \pi/4$

Juuritapin mitoitus

- Jos leikkauskestävyys on ok. Niin lasketaan juuritapin kapasiteetti teoreettisen raon Δ (oletus 100mm) perusteella. Mitoitusta varten tulee olla tiedossa f_y teräslaji, W_{pl} juuritapin plastinen taivutusvastus sekä juuritapin pinta-ala A_t

$$V_{pl,t,fixed} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_t^2 \cdot f_y^2 \cdot W_{pl}^2}{A_t^2 \cdot \Delta_{fixed}^2 + 12 \cdot W_{pl}^2}} / \gamma_{M0}$$

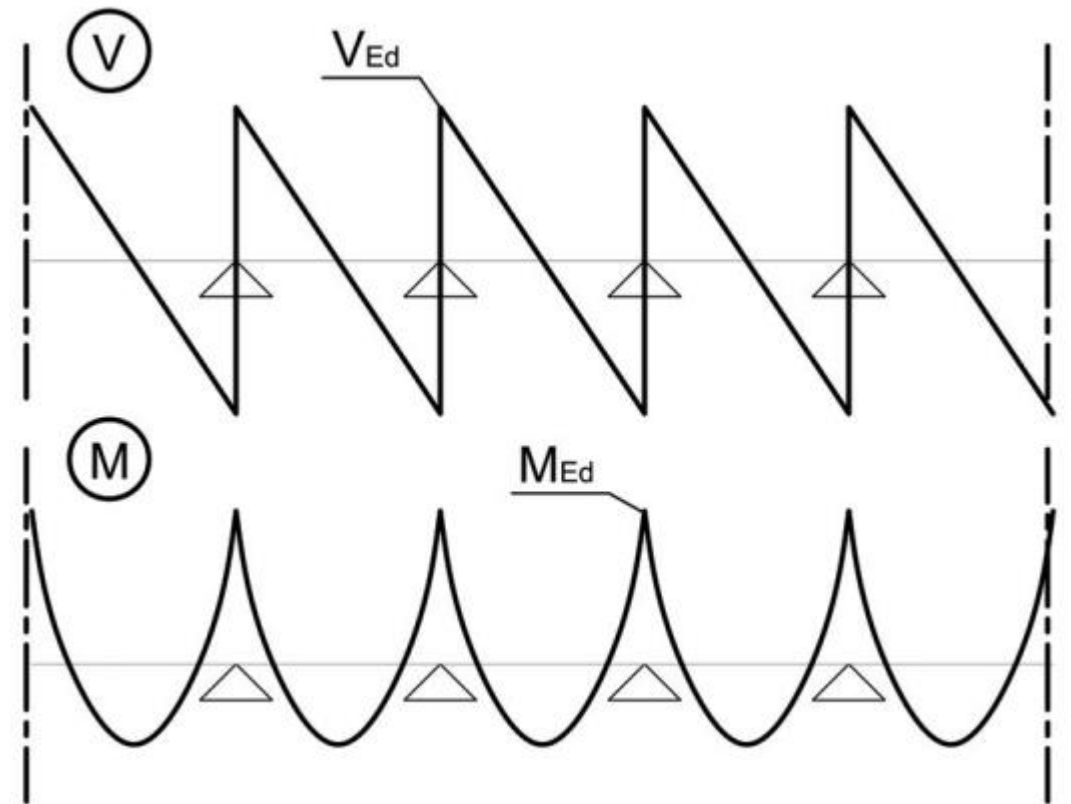
= kiinnitetty ponttiseinään sekä kallioon

$$V_{pl,t,free} = \sqrt{\frac{A_t^2 \cdot f_y^2 \cdot W_{pl}^2}{A_t^2 \cdot \Delta_{free}^2 + 3 \cdot W_{pl}^2}} / \gamma_{M0}$$

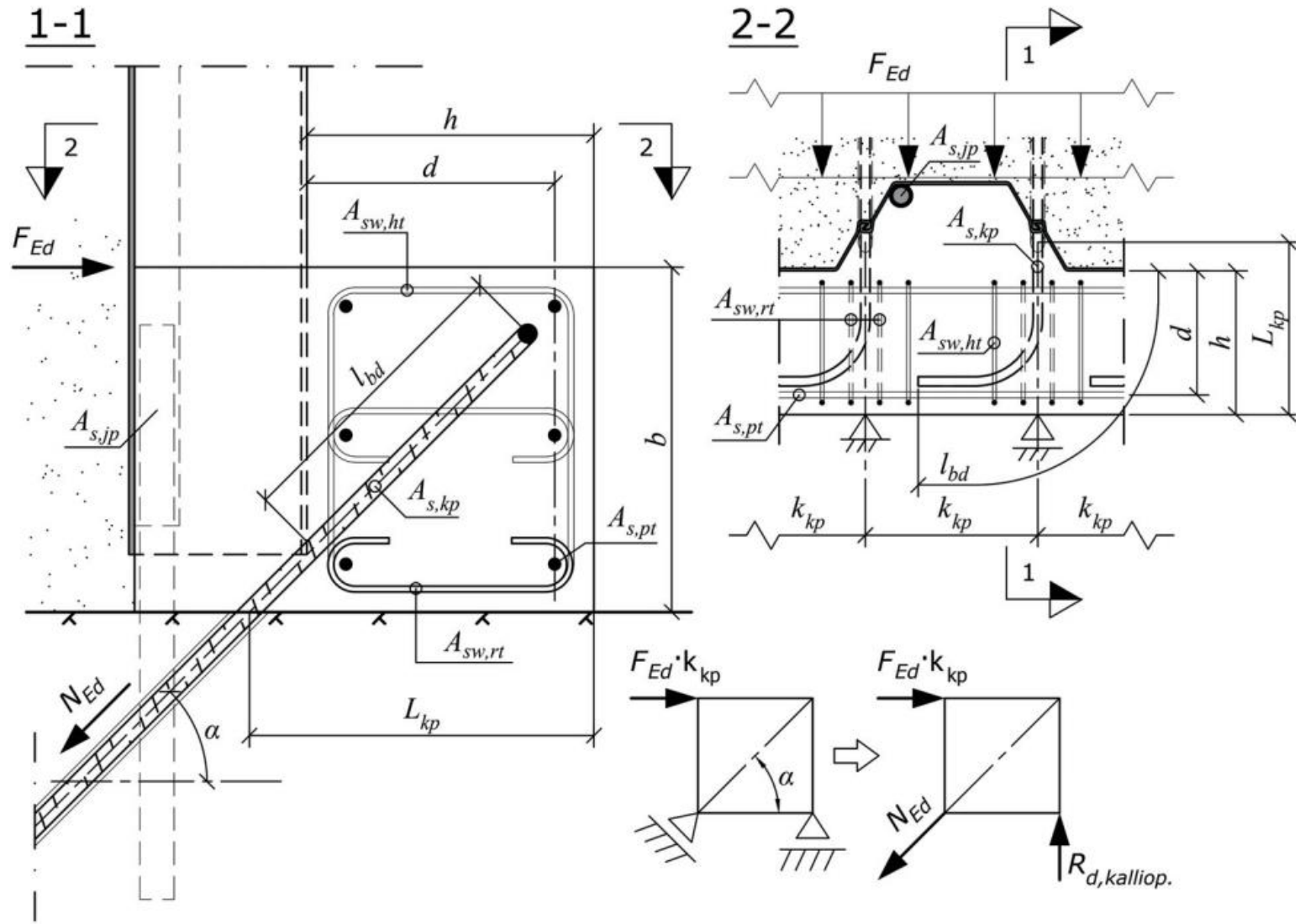
= kiilattu tukiseinään, mutta vain "kiinnitetty" kallioon

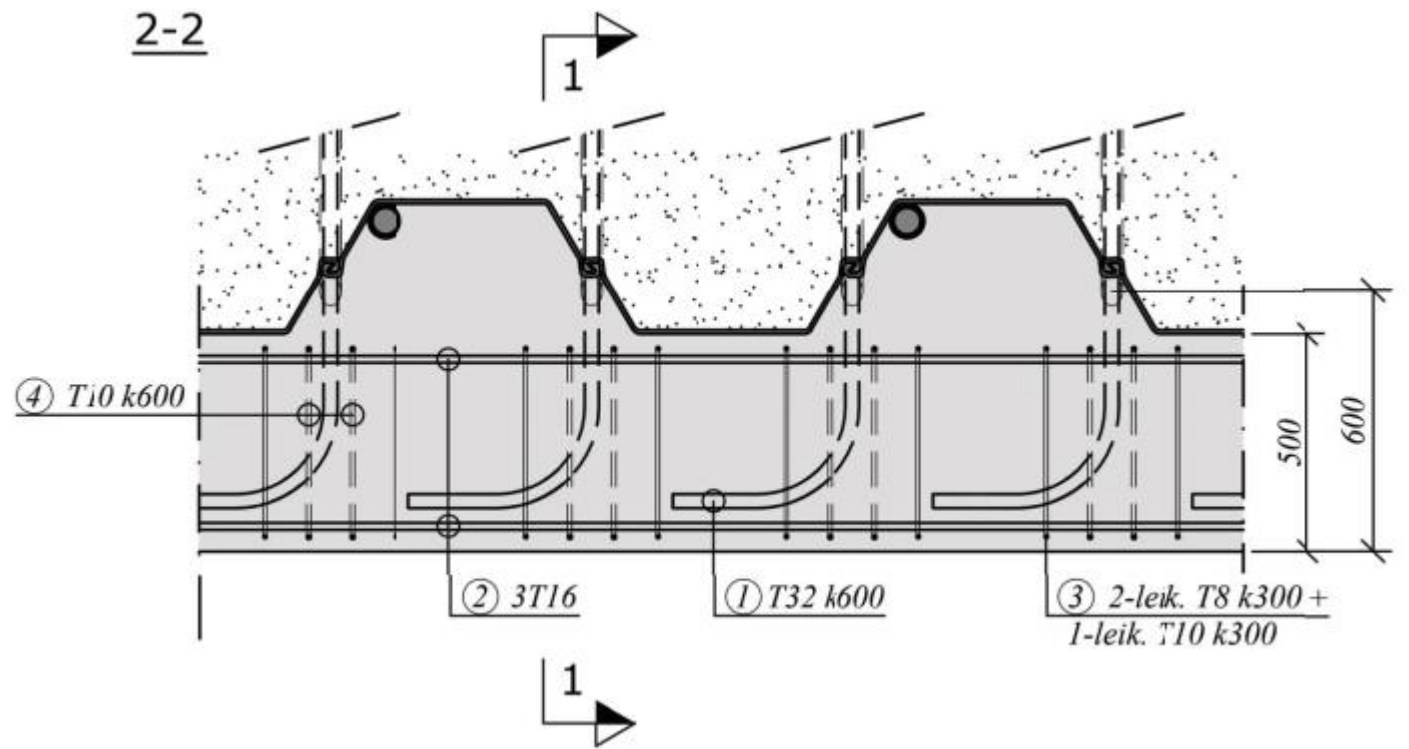
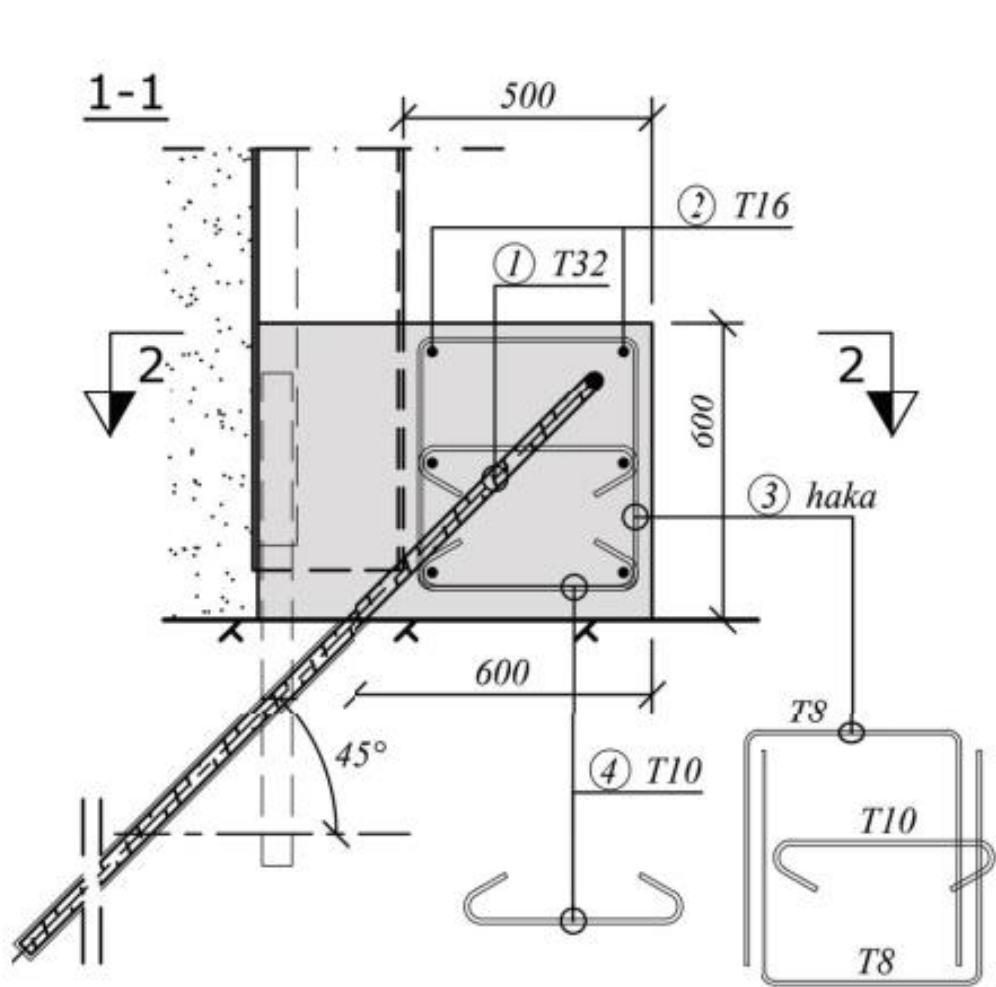
Juuripalkin mitoituksesta

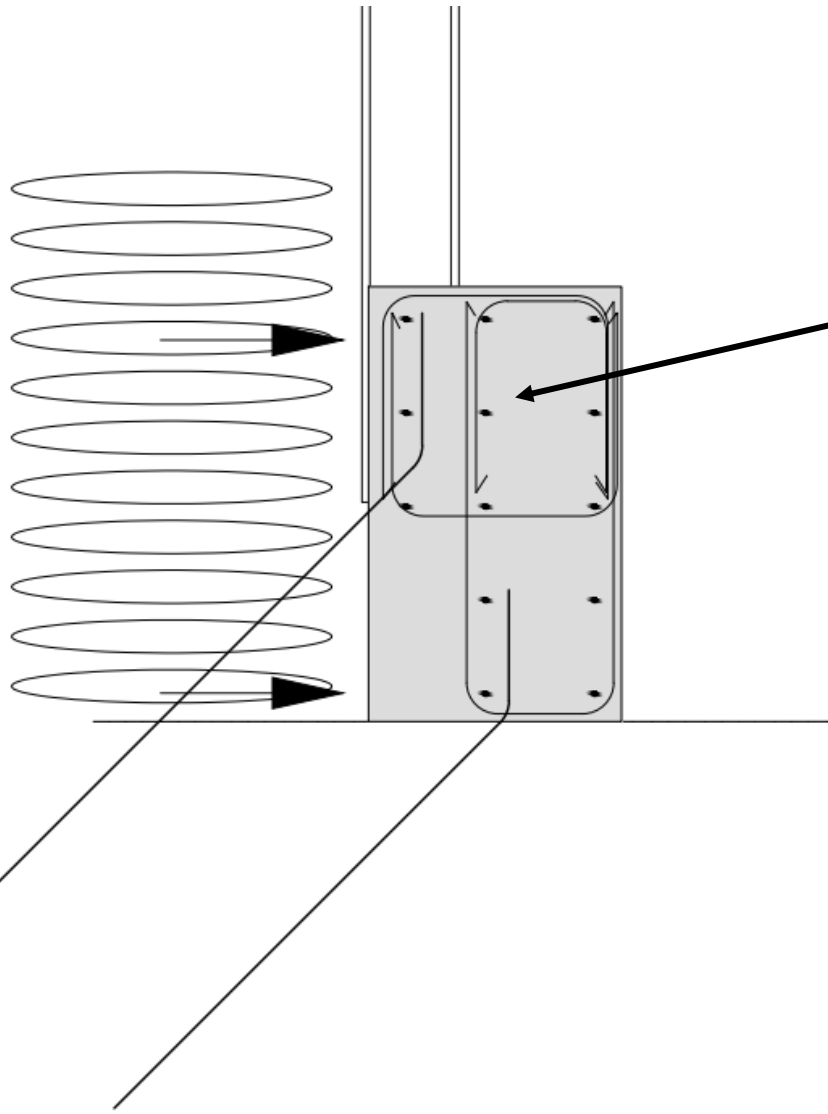
- Perustilanteessa juuripalkki toimii jatkuvana teräsbetonipalkkina, joka on yhteen suuntaan kuormitettu.



- Jos kohteessa esiintyy louhintaa, tulee juuripalkki tukea kalliopulteilla kallioon.
- Tällöin kallion ja palkin välistä kitkapintaa ei voi hyödyntää.
- Juuripalkin minimipääraudoitus tulee olla vähintään **4 x T16** ja leikkausraudoituksena **T8 k300**.
- Ohjeessa mitoitus tehtiin esimerkissä kuormitukselle 267 kN/m. Koska kalliopultit ovat yleensä tiheästä, niin juuripalkkiin ei kohdistu kovin suuria rasituksia.







Korkeassa juuripalkissa tulee huomioida kalliopultitus myös palkin yläosasta (muuten palkkiin kohdistuu korkeudesta suuri taivutusmomentti), jos palkkia ei ole tuettu myös yläosasta