

Teräspalkkisilta

Siltaeurokoodikoulutus
Erik Eriksson

29/03/2010

UNITED
BY OUR
DIFFERENCE



Teräspalkkisillan rakenneanalyysi

Voimasuureet lasketaan teräspalkkisillalle

- Kimmoteorialla 3-2 / 5.4.1 (1)
- Onnettomuustilanteen tarkastelussa kimmoteorialla tai plastisuusteorialla 3-1-1 / 5.4.3 (1)

Shear-lag-ilmiön vaikutus jäykkyyteen kokonaistarkastelussa: 3-1-5 / 2.2

- Vähennykset jännevälikohtaisesti vakioarvoja
- Vähennys pienempi seuraavista uuman yhtä sivua kohti:
täysi laipan leveys tai $L/8$, missä L = jänneväli tai kaksi kertaa ulokkeen pituus
- Käytännössä vähennystä ei tarvitse tehdä lähes koskaan voimasuurelaskentaa varten tavanomaisten levypalkkien tapauksessa
- Leveiden kotelopalkkien tapauksessa shear-lag-vähennys voi tulla kyseeseen jo voimasuurelaskennassa

Teräspalkkisillan rakenneanalyysi

Lommahduksen vaikutus jäykkyyteen:

3-1-5 / 2.2 (5)

- Tulee huomioida vain, mikäli tehollista poikkileikkausta laskettaessa jollain poikkileikkauksen levyosakokonaisuudella (puristuslaippa tai uuma) lommahdusvähennys on yli puolet vastaavasta bruttopinta-alasta.
- Koskee luonnollisesti vain poikkileikkausluokkaa 4

Poikkileikkausluokkaa 1 koskeva helpotus:

3-2 / 5.4.2 (4)

- Jos sillan poikkileikkaukset kuuluvat poikkileikkausluokkaan 1, seuraavat vaikutukset voidaan jättää huomioonottamatta voimasuurelaskennassa
 - Epätasainen lämpötila (lämpötilagradientti)
 - Kutistuma (tarkoittanee, kun kiinni betonissa eli osana liittorakennetta)
 - Tukipainumat
- Kommentti edelliseen: EN 1994-2 sallii edelliset helpotukset myös PL2:lle, ristiriita?

Teräspalkkisillan murtorajatila

Materiaaliosavarmuusluvut terässilloissa

3-2 / 6.1

Table 6.1: Partial factors

| | |
|---|-------------------|
| a) resistance of members and cross section: | |
| - resistance of cross sections to excessive yielding including local buckling | γ_{M0} |
| - resistance of members to instability assessed by member checks | γ_{M1} |
| - resistance of cross sections in tension to fracture | γ_{M2} |
| b) resistance of joints | |
| - resistance of bolts | γ_{M2} |
| - resistance of rivets | |
| - resistance of pins | |
| - resistance of welds | |
| - resistance of plates in bearing | |
| - slip resistance | γ_{M3} |
| - at ultimate limit state (Category C) | |
| - at serviceability limit state | $\gamma_{M3,ser}$ |
| - bearing resistance of an injection bolt | γ_{M4} |
| - resistance of joints in hollow section lattice girders | γ_{M5} |
| - resistance of pins at serviceability limit state | $\gamma_{M6,ser}$ |
| - preload of high strength bolts | γ_{M7} |

$$\gamma_{M0} = 1,00$$

$$\gamma_{M1} = 1,10$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

$$\gamma_{M3} = 1,25$$

$$\gamma_{M3,ser} = 1,10$$

$$\gamma_{M4} = 1,10$$

$$\gamma_{M5} = 1,10$$

$$\gamma_{M6,ser} = 1,00$$

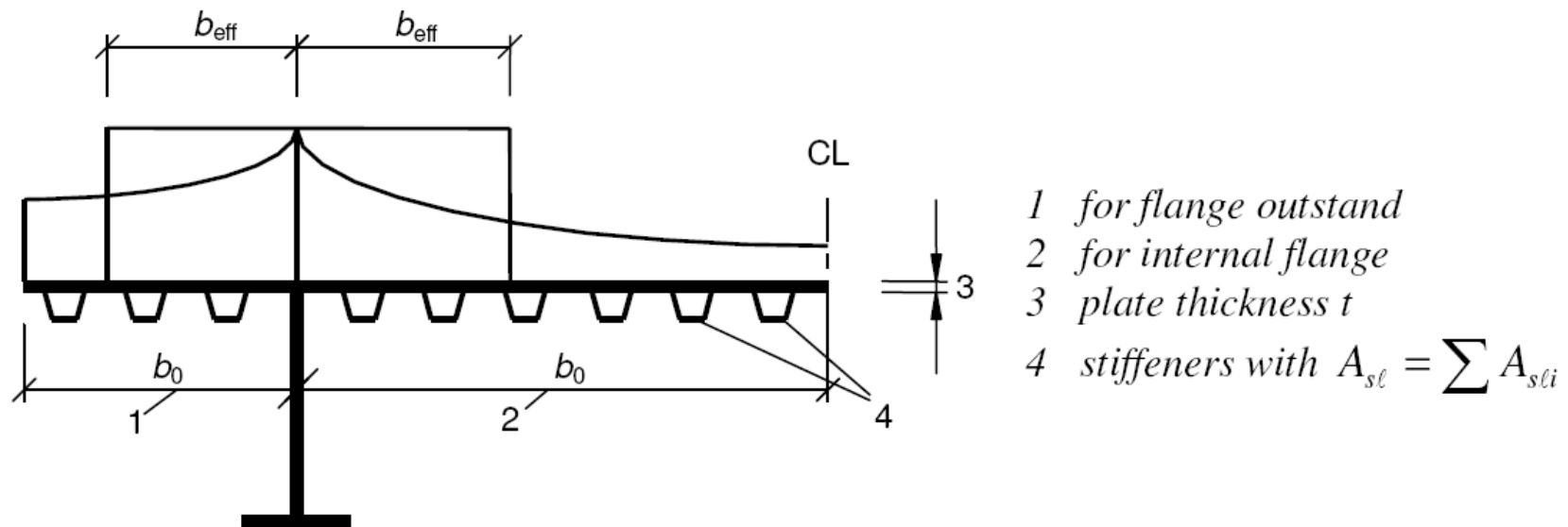
$$\gamma_{M7} = 1,10$$

Huom!

| γ_{M1} | |
|---------------|-----|
| 1,0 | 1,1 |
| 3-1-1 | 3-2 |

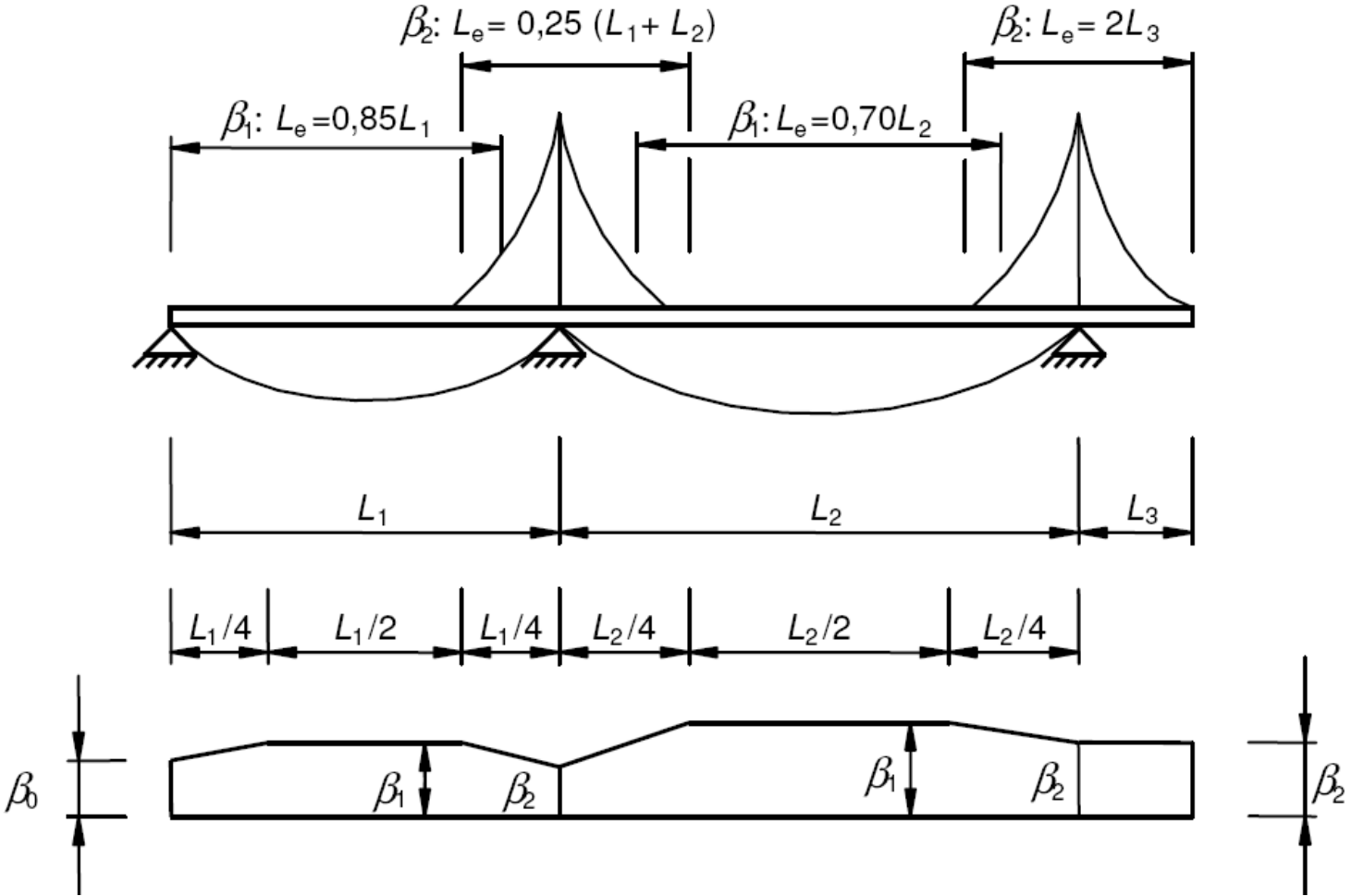
Shear-lag –ilmiön huomiointi 3-1-5 / 3 mukaan poikkileikkausmitoituksessa:

- Shear-lag eli ”leikkausviive” ilmenee leveiden laippojen tapauksessa ja
- on ilmiönä laipan joustamista sen levittäessä (leikkauksella) normaalijännityksiä laippaan laipan normaalivoiman muuttuessa leikkausvoiman vuoksi.
- Käytännössä oletus poikkileikkaustason pysymisestä tasona ei pidä leveillä laipoilla ”jouston” vuoksi paikkaansa ja siitä syystä laipan normaalijännitykset ovat suurimmillaan uuman kohdalla ja ”jouston” vuoksi pienenevät uumasta etäännyttäessä.
- Poikkileikkauskohtainen vähennys riippuu laipan leveydestä, laipan jäykistyksestä ja poikkileikkauksen sijainnista palkin pituussuunnassa



Poikkileikkauksen sijainnin vaikutus shear-lag-vähennykseen

3-1-5 / 3.2.1

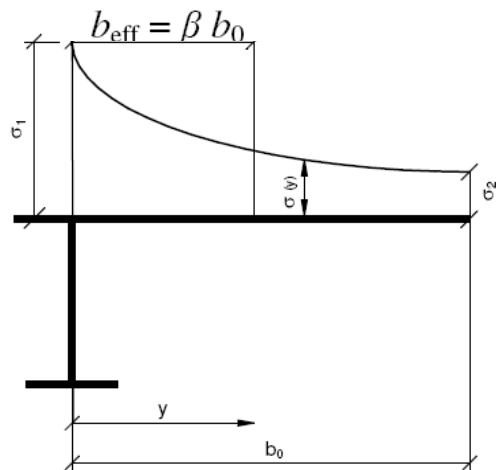


Shear-lag

Kimmoisen tilan shear-lag –vähennys (krt + väsytyk)

3-1-5 / 3.2

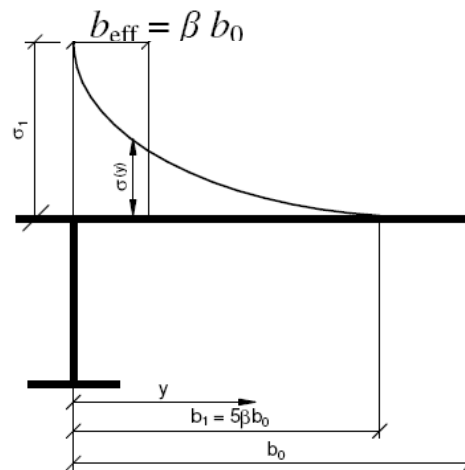
Laipan pinta-alaa pienennetään alkuperäisestä laskennallisesti, jotta tasan jakautuneeksi oletettu laipan jännitys ei ylittäisi uuman kohdalla esiintyvää jännityksen maksimiarvoa myötämisen välttämiseksi. Normi antaa myös kaavat kimmoisen toiminnan mukaiselle ”todelliselle” jännitysjakaumalle poikkisuunnassa. Tätä voidaan käyttää hyödyksi paikallisten ja kokonaistarkastelusta saatujen jännitysten yhdistelyyn, esim väsymismitoituksessa ortotrooppikannen tapauksessa.



$$\beta > 0,20:$$

$$\sigma_2 = 1,25 (\beta - 0,20) \sigma_1$$

$$\sigma(y) = \sigma_2 + (\sigma_1 - \sigma_2) (1 - y/b_0)^4$$



$$\beta \leq 0,20:$$

$$\sigma_2 = 0$$

$$\sigma(y) = \sigma_1 (1 - y/b_1)^4$$

Kimmoinen tila

- käyttörajatila
- väsytyk

$$b_{\text{eff}} = \beta b_0$$

Taulukko 3.1 Tehollisen leveyden^s tekijä β

| κ | Tarkasteltava kohta | β - arvo |
|---|-----------------------|--|
| $\kappa \leq 0,02$ | | $\beta = 1,0$ |
| $0,02 < \kappa \leq 0,70$ | Positiivinen momentti | $\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4 \kappa^2}$ |
| | Negatiivinen momentti | $\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \left(\kappa - \frac{1}{2500 \kappa} \right) + 1,6 \kappa^2}$ |
| $> 0,70$ | Positiivinen momentti | $\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9 \kappa}$ |
| | Negatiivinen momentti | $\beta = \beta_2 = \frac{1}{8,6 \kappa}$ |
| Kaikilla κ :n arvoilla | Päätytuki | $\beta_0 = (0,55 + 0,025 / \kappa) \beta_1$, mutta $\beta_0 < \beta_1$ |
| Kaikilla κ :n arvoilla | Uloke | $\beta = \beta_2$ väli- ja päätytuilla |
| $\kappa = \alpha_0 b_0 / L_e \text{ missä } \alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{s\ell}}{b_0 t}}$ <p>missä $A_{s\ell}$ on kaikkien pituusjäykisteiden pinta-ala, jotka sijaitsevat pituuden b_0 matkalla. Muut merkinnät esitetään kuvissa 3.1 ja 3.2.</p> | | |

Shear-lag – positiivinen vai negatiivinen momentti taulukossa 3.1?

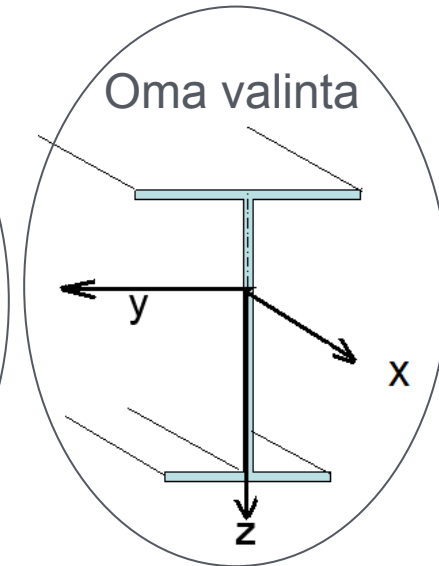
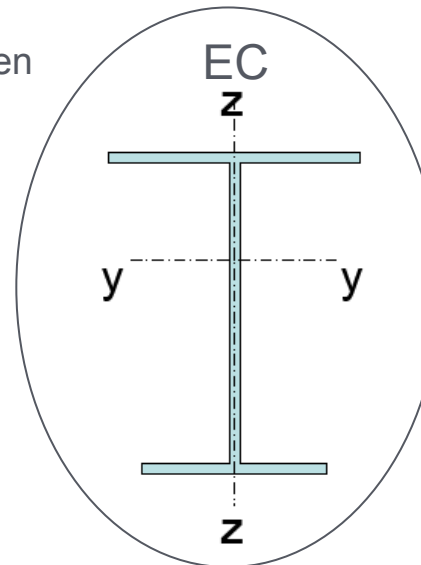
Eurokoodi määrittelee poikkileikkausakselit, mutta ei akselien positiivista suuntaa eikä varsinkaan akselien ”kätisyyttä”. Mikä tarkoittaakaan taulukossa esitetty negatiivinen/positiivinen momentti?

Siltapalkeilla vertikaalikuormat aiheuttamat taivutusmomenttijakauman M_y .
Taivutusmomentin positiivisuus/negatiivisuus riippuukin sitten täysin poikkileikkauksen koordinaatiston kätisyydestä ja normaalijännitysten etumerkkisäännöstä. Esim. seuraavasti:

$$M_y = \iint y \cdot \sigma_x dA$$

”Oikeakätisen koordinaatiston tapauksessa positiivinen momentti M_y venyttää z-akselin positiivisella puolella olevia säikeitä”

| Tarkasteltava kohta | Verification |
|-------------------------|-----------------|
| Positiivinen momentti → | sagging bending |
| Negatiivinen momentti → | hogging bending |



”Oikeakätisetkin” laskentaohjelmat asettavat yleensä defaulttina elementit siten päin, että z-akseli kasvaa ylöspäin. Jos haluaa taulukon mukaisia tuloksia, tulee elementti kiertää 180 astetta pituusakselinsa ympäri...

Ehdotus toiseksi suomennokseksi:
(ohjelmasta/mallintajasta riippumaton)

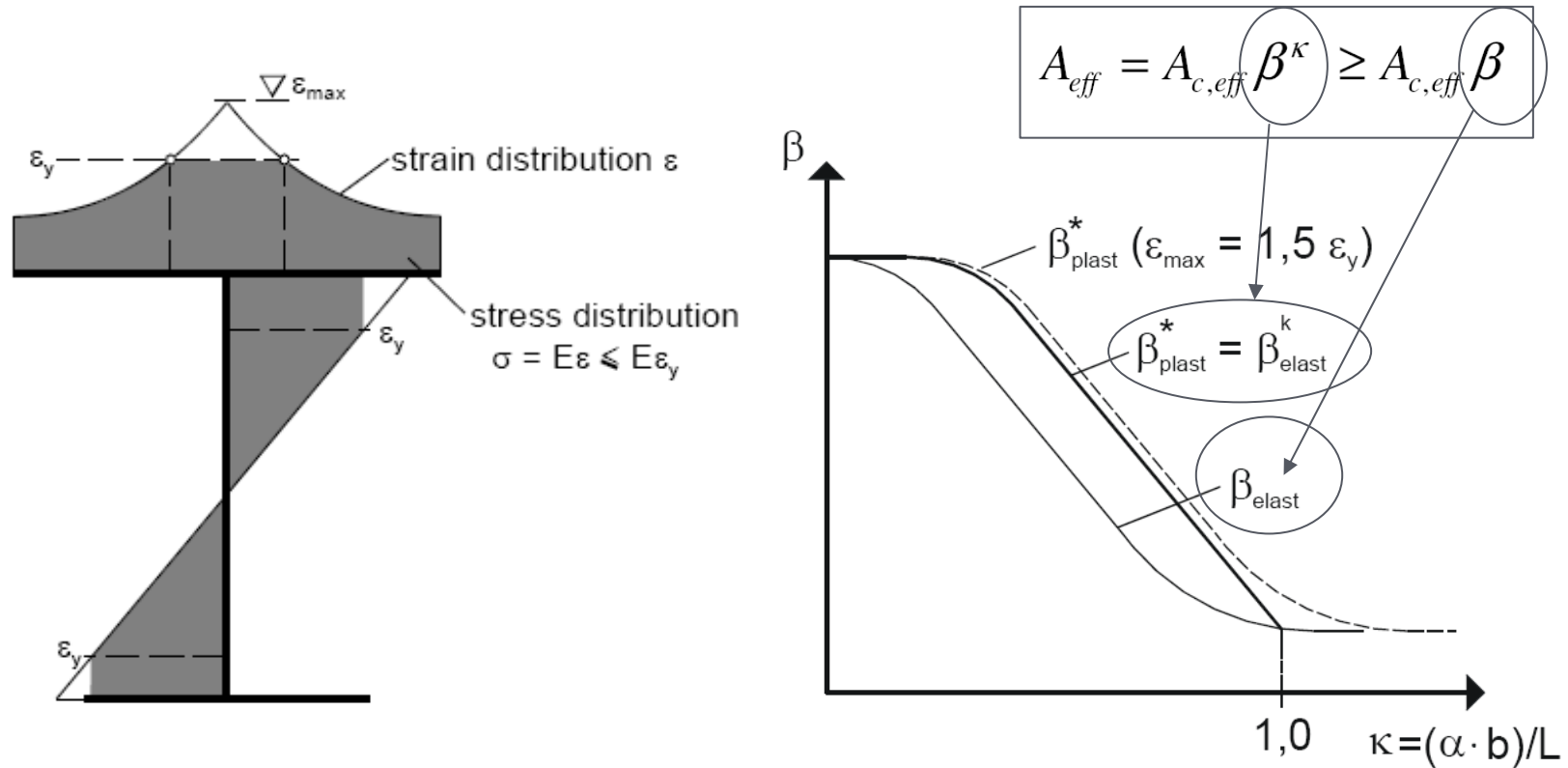
sagging bending = aukkomomentti
hogging bending = tukimomentti

Shear-lag

Shear-lag –vähennys murtotilassa

3-1-5 / 3.3

Murtorajatilassa sallitaan osittaista plastista muodonmuutosta tapahtuvan, jolloin shear-lag –vähennys tulee kyseeseen murtotilassa vain erityisen leveillä laipoilla. Suomessa on tehty kansallinen valinta (kts. NA-EN 1993-2 (LVM)), että käytetään murtorajatilassa normikohdan 3-1-5 / 3.3, huom. 3 mukaista menettelyä (vaihtoehtoisen huom. 2 sijasta).



Teräspalkkisillan murtorajatila

Taivutusmitoitus murtorajatilassa

3-2 / 6.2.5

Taivutuskestävyyteen vaikuttavat päätekijät:

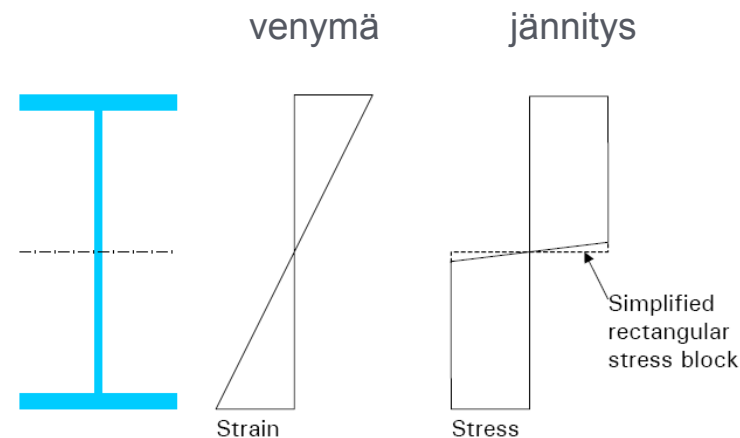
- Materiaalilujuudet (riippuvat levypaksuuksista) 3-1-1 / 3.2.1
 - tuotestandardeista (EN 10025)
 - tai 3-1-1 taulukosta 3.1 (yksinkertaistane laskentaa hieman)
- Poikkileikkausluokat (1,2,3 tai 4) 3-1-1 / 5.5.2
- Shear-lag-ilmiö, 3-1-5 / 3.3, Huom. 3 mukainen menettely NA-EN 1993-2 (LVM)

Teräspalkkisillan murtorajatila

Taivutuskestävyys poikkileikkausluokassa 1 ja 2:

- Poikkileikkausluokassa 1 ja 2 taivutuskestävyys voidaan laskea olettaen koko poikkileikkaus täysin plastisoituneeksi
- Huomioidaan shear-lag-vähennys poikkileikkaukseen 3-1-5 / 3.3 huom.3 mukaan
- Taivutuskestävyys voidaan aina laskea myös hyödyntämättä plastisoitumista (varman päälle menettely)

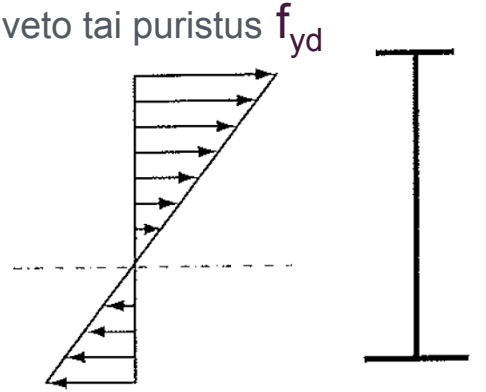
$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}$$

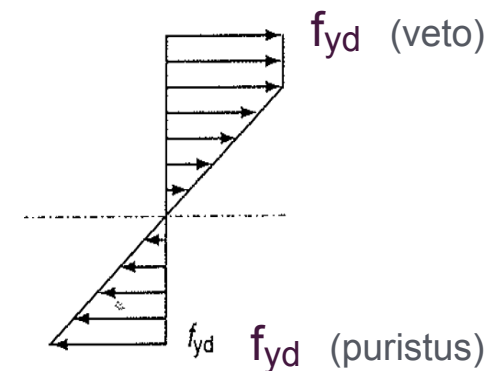


Teräspalkkisillan murtorajatila

Taivutuskestävyys poikkileikkausluokassa 3:

- Taivutuskestävyys saavutetaan, puristetumpi reuna myötää 3-1-5 / 6.2.1 (9)
- Reunajännitys lasketaan laipan keskilinjan suhteen 3-1-1 / 6.2.1 (9) huom.
- Huomioidaan shear-lag-vähennys poikkileikkaukseen 3-1-5 / 3.3 huom.3
- Osittainen myötääminen sallitaan vetopuolella 3-1-1 / 6.2.1 (10)
 - Tulee kyseeseen puhtaassa taivutuksessa vain epäsymmetrisillä palkeilla, joissa taivutusmomentti on niin päin, että vetopuoli myötää ennen ja puristuslaippa on suurempi
 - Teoriassa mahdollista myös symmetrisellä palkilla, johon kohdistuu taivutuksen lisäksi vetoa
 - Neutraaliakseli siirtyy plastisoitumisen alkaessa pintakeskiöstä kohti vetopuolta ja löytyy tasapainoehtojen perusteella (puristuspuolen korkeus kasvaa kimmoisesta tilanteesta ja tulee tarkistaa pysyykö uuma poikkileikkausluokassa 3 lopullisen puristuspuolen korkeuden mukaan)

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}}$$




Teräspalkkisillan murtorajatila

Tehollisen poikkileikkausluokan 2 taivutuskestävyys:

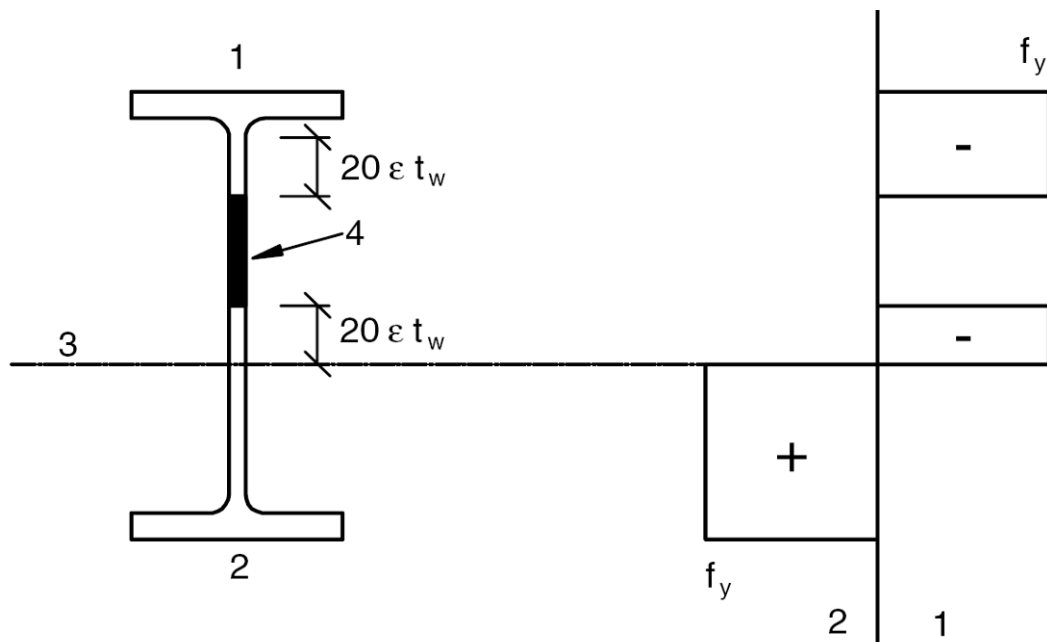
3-1-1 / 6.2.4

- Kun laipat = PL1 tai PL2 ja uuma = PL3, poikkileikkaus voidaan käsitellä tehollisena 2 luokan poikkileikkauksena
- Taivutuskestävyys voidaan laskea PL3:lle vaadittavan kimmoisen jännitys jakauman sijasta käyttäen plastista jännitys jakaumaa, mutta osa uumasta ”poistetaan” laskennallisesti lommahduksen huomioimiseksi
- Puristettua uumaa huomioidaan puristetun laipan sekä tehollisen poikkileikkauksen plastisen neutraaliakselin vieressä vain $20\varepsilon_w$ ja loput jätetään huomioimatta
- Tällä menetelmällä ”siloitetaan” muutoin ilmaantuva epäjatkuvuus taivutuskestävyydessä poikkileikkausluokkien 2 ja 3 rajalla

| | | | | | | |
|--------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|
| $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ | f_y | 235 | 275 | 355 | 420 | 460 |
| | ε | 1.00 | 0.92 | 0.81 | 0.75 | 0.71 |

Teräspalkkisillan murtorajatila

Tehollisen poikkileikkausluokan 2 taivutuskestävyys:



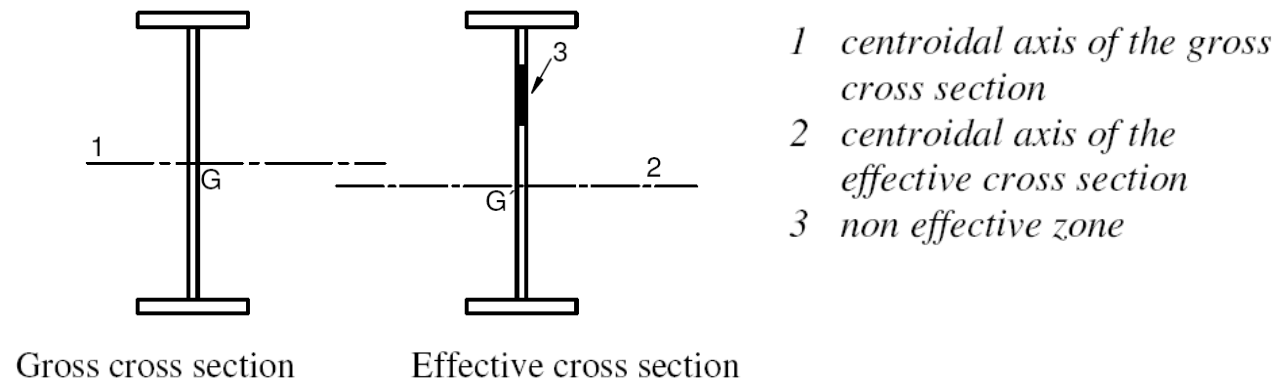
- 1 Puristus
- 2 Veto
- 3 Plastisuusteorian mukainen neutraaliakseli
- 4 Jätetään huomioon ottamatta

| | | | | | | |
|--------------------------------|---------------|------|------|------|------|------|
| $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ | f_y | 235 | 275 | 355 | 420 | 460 |
| | ε | 1.00 | 0.92 | 0.81 | 0.75 | 0.71 |

Teräspalkkisillan murtorajatila

Taivutuskestävyys poikkileikkausluokassa 4:

- Sallitaan lommahtelu ja jännitysten uudelleen jakautuminen eli hyödynnetään ”ylikriittistä tilaa” kestävyuden laskennassa
- Osittainen myötääminen sallitaan murtorajatilassa vain epäsuorasti shear-lag-vähennyskerroimen kautta (vähennyskerroin murtorajatilatarkastelua varten sallii rajoitettua plastista muodonmuutosta)
- Jännitykset lasketaan tehollisella poikkileikkauksella, johon on tehty lommahduksen ja shear-lagin edellyttämät vähennykset
- Taivutuskestävyys saavutetaan, kun eniten rasitettu reuna myötää
- Reunajännitys lasketaan laipan keskilinjan suhteen



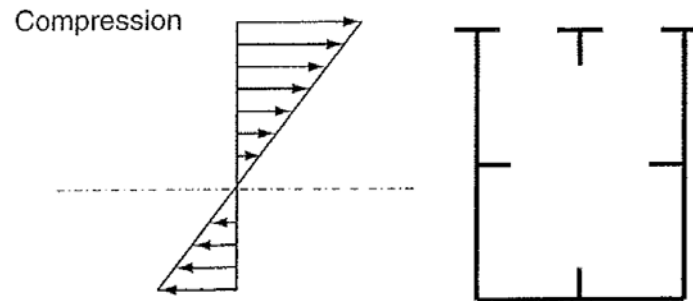
Teräspalkkisillan murtorajatila

Taivutuskestävyys tehollisella^{p+s} poikkileikkauksella (PL4)

3-1-5 / 4

1. Lasketaan puristuslaipalle tehollinen^p – poikkileikkaus
2. Tehdään shear-lag vähennys vetolaippaan ja teholliseen^p – puristuslaippaan 3-1-5 / 3.3 huom.3
3. Lasketaan poikkileikkausarvot tehollisilla^{p+s} laipoilla ja täysin tehollisella uumalla
4. Lasketaan taivutusjännitysjauma edellisillä poikkileikkausarvoilla
5. Lasketaan uuman puristetun osan tehollinen^p – poikkileikkaus edellä lasketun taivutusjännitysjauman mukaan
6. Lasketaan poikkileikkausarvot lopullisilla tehollisilla (laipat, uuma) dimensioilla
7. Lasketaan taivutusjännitykset lopullisilla tehollisilla poikkileikkausarvoilla ja rajataan reunajännitys myötöön (veto/puristus)

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} f_y}{\gamma_{M0}}$$



Leikkausmitoitus murtorajatilassa

3-2 / 6.2.6

6.2.6 Shear

(1) See 6.2.6(1), (2), (3), (4), (5), (6), (7) and (8) of EN 1993-1-1 and section 5 of EN 1993-1-5.

Leikkauskestävyys riippuu mm. seuraavista tekijöistä:

- uuman myötölujuudesta
- uuman korkeus/paksuus -suhteesta = uuman ”hoikkuudesta”
- lommahtavan uumapaneelin pituus/leveys -suhteesta
- uuman jäykistysjärjestelyistä (pituus-, poikki- ja päätyjäykistys)
- laippojen antamasta tuesta vetokentän muodostuessa lommahduksen jälkeen

Leikkauskestävyyden kaavoissa esiintyy kerroin η , jolle Suomessa käytetään

- suositusarvoa 1,2 teräslajeille, joiden myötölujuus on enintään 460 MPa
- lujemmille teräksille arvoa 1,0
- kertoimella otetaan hyöty myötölujittumisesta pienillä hoikkuuksilla (plastinen leikkausmyötölujuus voidaan ylittää 1,2 –kertaisesti)

Teräspalkkisillan murtorajatila

Leikkauskestävyys, rajahoikkeudet:

Kun uuman hoikkuus h_w / t_w ei ylitä arvoa

3-1-5 / 5.1 (2)

jäykisteettömällä uumalla

jäykistetyllä uumalla

$$\frac{72}{\eta} \varepsilon$$

$$\frac{31}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau}$$

tällöin leikkauslommahdusta ei tarvitse huomioida. Muutoin se tulee huomioida levynormin 3-1-5 kohdan 5 mukaan.

”Jäykisteetön uuma”, terminologiaa:

- 3-1-1 / 6.2.6 (6) → jäykisteettömästä käytetään nimitystä ”välijäykisteetön”
- 3-1-5 / 5.1 (1) → jäykisteettömästä käytetään nimitystä ”uumasta jäykistämätön”
→ jäykisteettömässä ei siis huomioida mitään jäykisteitä, oli tai ei

”Jäykistetty uuma”, terminologiaa:

- voisi olettaa, että 3-1-1 / 6.2.6 (6) termin ”välijäykisteetön” vastakohta olisi ”välijäykisteellinen”, mutta levynormi 3-1-5 laajentaa termin ”uumasta jäykistetyksi”, riippumatta jäykisteiden suunnasta
- jäykisteiden jäykkyyden huomiointi esitetään myöhemmin (jäykkyydsreduktio)

Teräspalkkisillan murtorajatila

Leikkauskestävyys, kun leikkauslommahdus ei rajoita kestävyyttä:

Leikkauskestävyys voidaan laskea

- plastisuusteoriolla 3-1-1 / 6.2.6 (2) mukaan tai
- ”varman päälle” kimmoteoriolla rajaten maksimileikkausjännitys rasitetuimmassa kohdassa leikkausmyötörajalle

$$\text{plastisuusteoriolla}$$
$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$$

kimmoteoriolla

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y / (\sqrt{3} \gamma_{M0})} \leq 1,0$$

Leikkauspinta-ala A_v lasketaan 3-1-1 / 6.2.6 (3) mukaan:

- Profiilin valmistustapa (valssattu/hitsattu), poikkileikkausmuoto ja leikkausvoiman suunta vaikuttaa laskennassa käytettävään leikkauspinta-alaan
- I ja H ja koteloprofiileilla, kun leikkausvoima on uuman tasossa, $A_v = \eta \sum (h_w t_w)$

Mahdollinen samanaikainen vääntö huomioidaan pienentämällä plastisuusteoreettisen leikkauskestävyyden laskennassa leikkausmyötörajaa normin 3-1-1 / 6.2.7 (9) mukaan.

Teräspalkkisillan murtorajatila

Kimboteoreettisen leikkausjännityksen laskentatapa:

- Kimboteoreettisen leikkauskestävyyden toteamiseksi, jos leikkauslommahdusta ei tarvitse tutkia (varman päälle tapa)
- Von Mises –vertailujännityksen laskentaa varten (jos tarvetta tarkistaa jossain)
- Väsytyksimitoitusta varten

3-1-1/6.2.6(4)

yleinen kaava:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} S}{I t}$$

3-1-1/6.2.6(5)

I ja H –profiileilla, kun leikkausvoima uuman suuntainen:

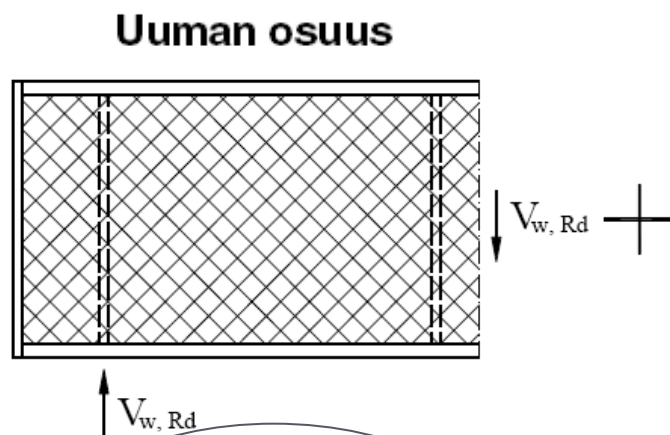
$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_w} \text{ if } A_f / A_w \geq 0,6$$

(Von Mises –vertailujännityksen laskenta ei ole tarpeen tavanomaisilla levypalkeilla, kun voimasuureiden yhteisvaikutusehdot tarkistetaan 3-1-1/6.2.8...6.2.10 mukaan.)

Teräspalkkisillan murtorajatila

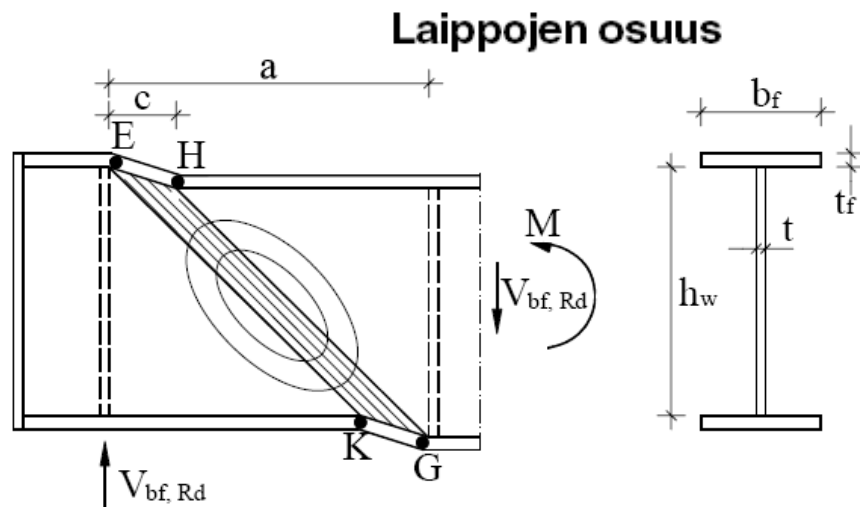
Leikkauslommahduskestävyys:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$



$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

Laippojen osuutta ei kannata yleensä hyödyntää, kaulahitsistä tulee muuten epätaloudellinen, katso 3-1-5 / 9.3.5



$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right)$$

$$c = a \left(0,25 + \frac{1,6 b_f t_f^2 f_{yf}}{t h_w^2 f_{yw}} \right) \quad M_{f,Rd} = \frac{A_f f_y d_f}{\gamma_{M0}}$$

d_f is the distance between the centroids of the flanges

Teräspalkkisillan murtorajatila

Leikkauslommahduskestävyyden mekaaninen malli, uuman osuus:

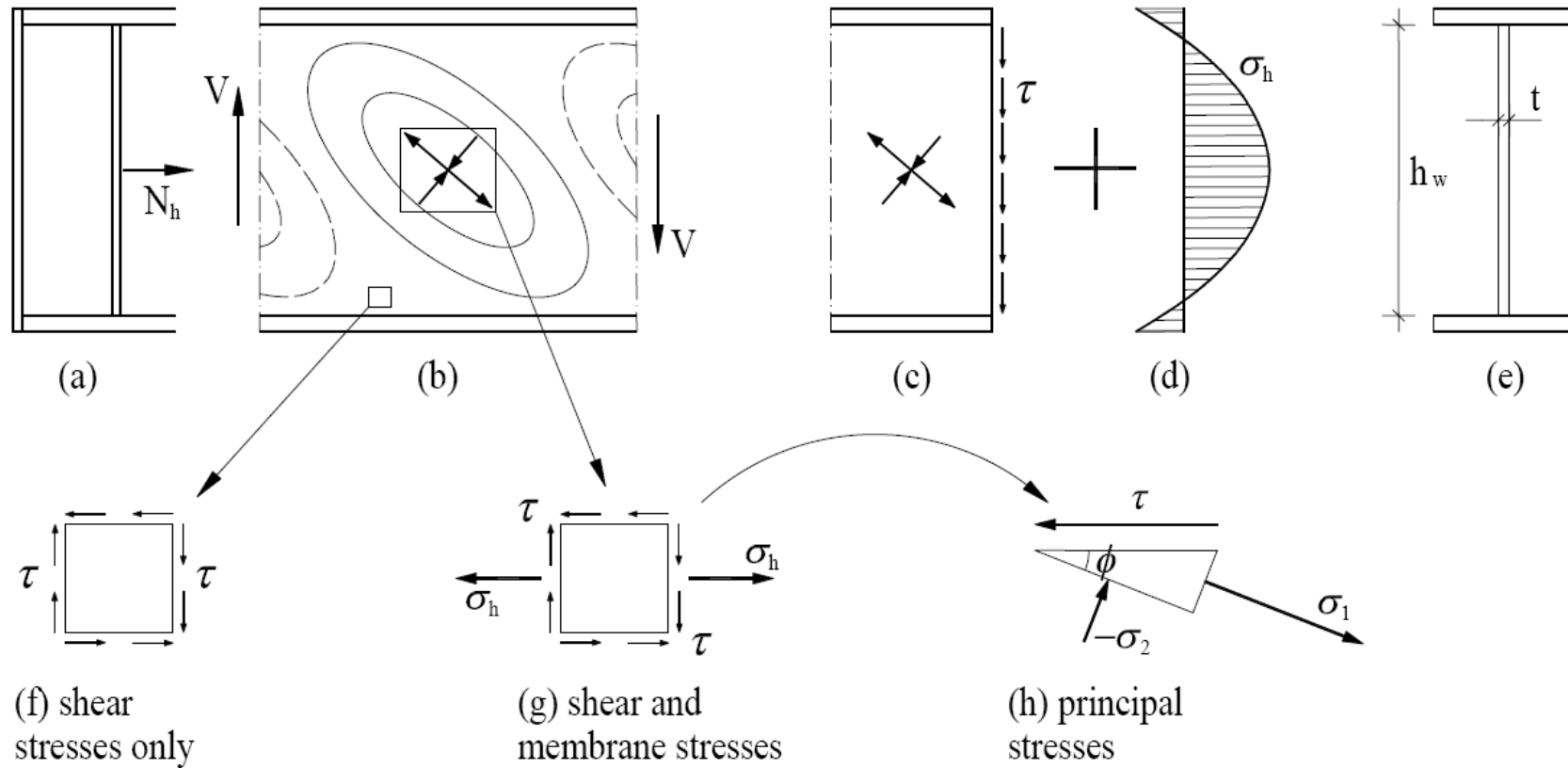
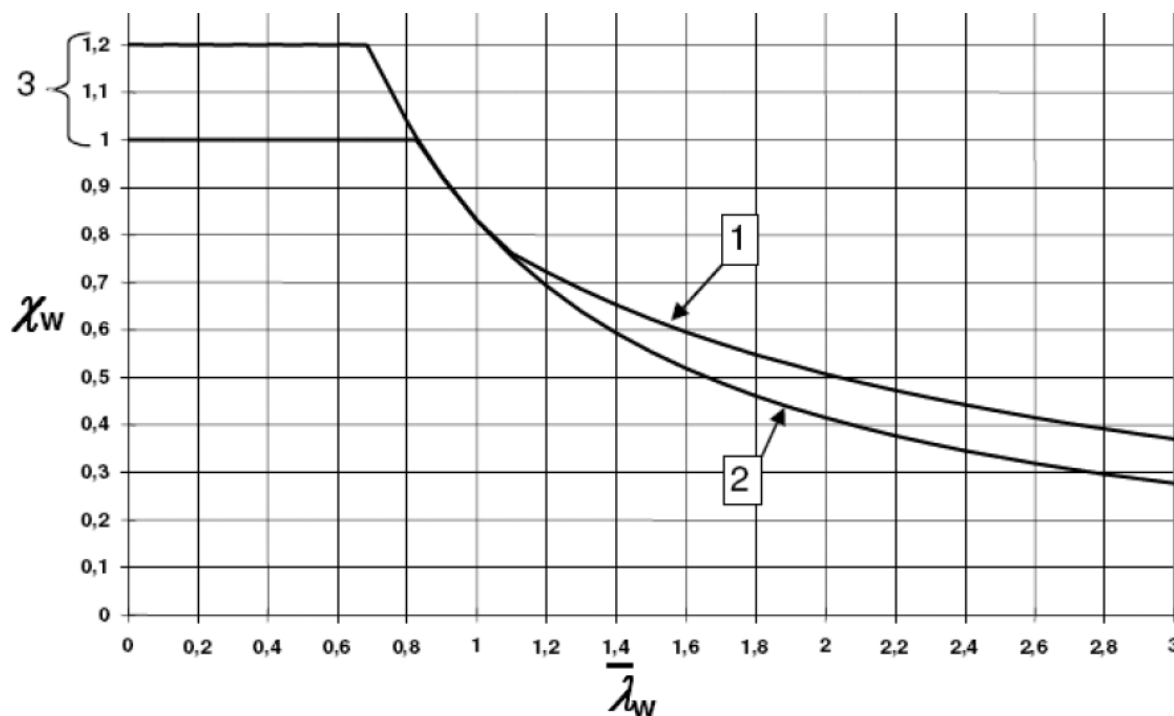


Figure 5.2: Mechanical model of the rotated stress field

Teräspalkkisillan murtorajatila

Taulukko 5.1 Uuman osuus χ_w leikkauskestävyydestä

| | Jäykkä päätyjäykiste | Ei-jäykkä päätyjäykiste |
|---|--------------------------------|-------------------------|
| $\bar{\lambda}_w < 0,83/\eta$ | η | η |
| $0,83/\eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$ | $0,83/\bar{\lambda}_w$ | $0,83/\bar{\lambda}_w$ |
| $\bar{\lambda}_w \geq 1,08$ | $1,37/(0,7 + \bar{\lambda}_w)$ | $0,83/\bar{\lambda}_w$ |



- 1 Jäykkä päätyjäykiste
- 2 Ei-jäykkä päätyjäykiste
- 3 Alue, jolla η vaikuttaa

Kuva 5.2 Uuman osuus χ_w leikkauskestävyydestä

$$\tau_{cr} = k_{\tau} \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t^2}{h_w^2}$$



$$\bar{\lambda}_w = \sqrt{\frac{f_{yw}}{\sqrt{3}\tau_{cr}}} = 0,76 \sqrt{\frac{f_{yw}}{\tau_{cr}}}$$

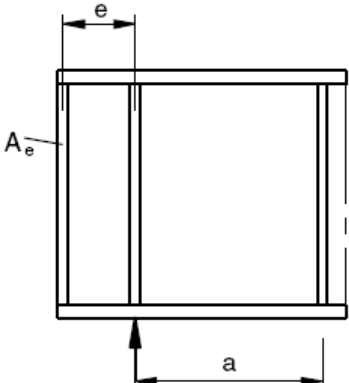


χ_w

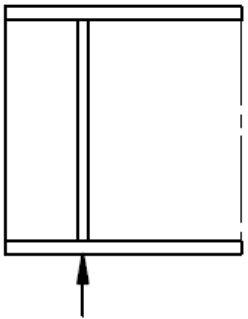


$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3}\gamma_{M1}}$$

Teräspalkkisillan murtorajatila



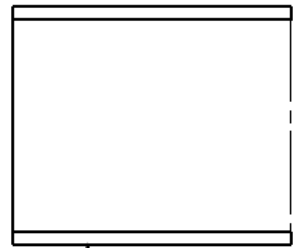
b) Jäykkä pääty-jäykiste



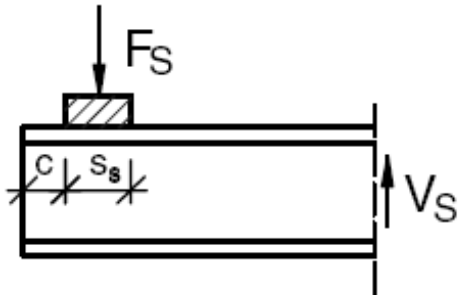
c) Ei-jäykkä pääty-jäykiste

Leikkauslommahduskestävyys

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$



a) Ei pääty-jäykistettä



Kestävyys poikittaisille kuormille

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} L_{eff} t_w}{\gamma_{M1}}$$

EN 1993-1-5, kpl 6

Teräspalkkisillan murtorajatila

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus

3-1-1 / 6.2.1 (5)

(5) Kimmoteorian mukaisessa mitoituksessa voidaan käyttää seuraavaa myötöehtoa poikkileikkauksen kriittisessä pisteessä, ellei muu yhteisvaikutuskaava ole soveltuva, ks. 6.2.8 - 6.2.10:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 \leq 1 \quad (6.1)$$

missä $\sigma_{x,Ed}$ on pituussuuntaisen paikallisen jännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa;

$\sigma_{z,Ed}$ on poikittaisen paikallisen jännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa;

Von Mises – tarkistus, ”ellei muu yhteisvaikutuskaava ole soveltuva, ks. 6.2.8 – 6.2.10”

Teräspalkkisillan murtorajatila

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus

Tulee tarkistaa vain, kun taivutusmomentti on suurempi kuin laippojen tuottama plastinen taivutuskestävyys

$$M_{Ed} > M_{f,Rd}$$

ja leikkausvoima on samanaikaisesti suurempi kuin

- puolet uuman leikkauslommahduskestävyydestä hoikan uuman tapauksessa

$$V_{Ed} > 0,5 V_{bw,Rd}$$

- tai puolet plastisesta leikkauskestävyydestä, jos leikkauslommahdusta ei tarvitse tutkia

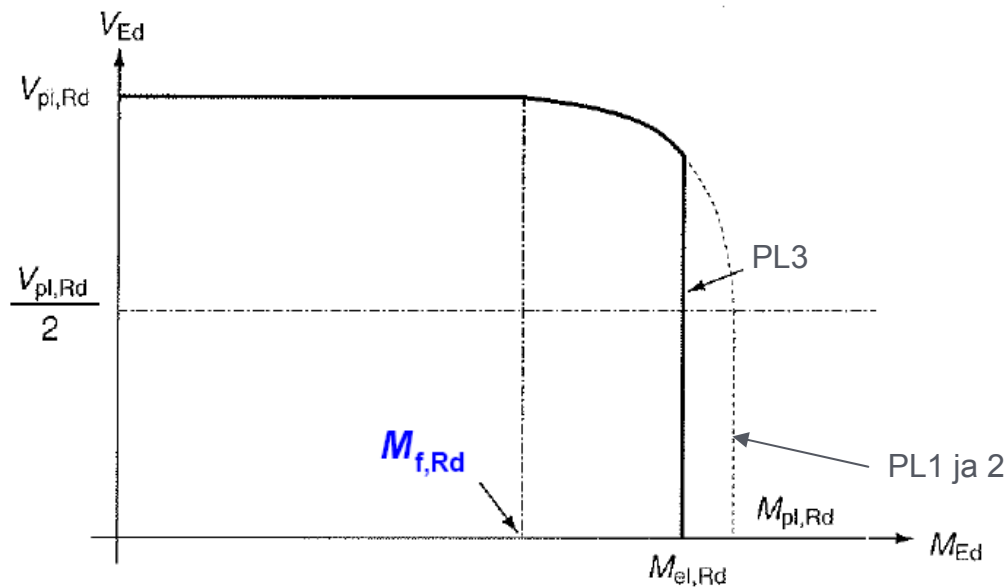
$$V_{Ed} > 0,5 V_{pl,Rd}$$

- muutoin ei (M+V) yhteisvaikutusta tarvitse tutkia murtorajatilassa

Teräspalkkisillan murtorajatila

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus, kun leikkauslommahdus ei määrää

- Leikkauspinta-alan myötölujuutena käytetään redusoitua lujuutta plastisen taivutuskestävyyden laskennassa
- Myötölujuutta pienennetään kertoimella $(1 - \rho) f_y$ jossa $\rho = \left(\frac{2 V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$



Poikkileikkausluokan 3 tapauksessa myötömomentti "katkaisee diagrammin" ja alue, jossa yhteisvaikutus tulee kyseeseen on pieni.

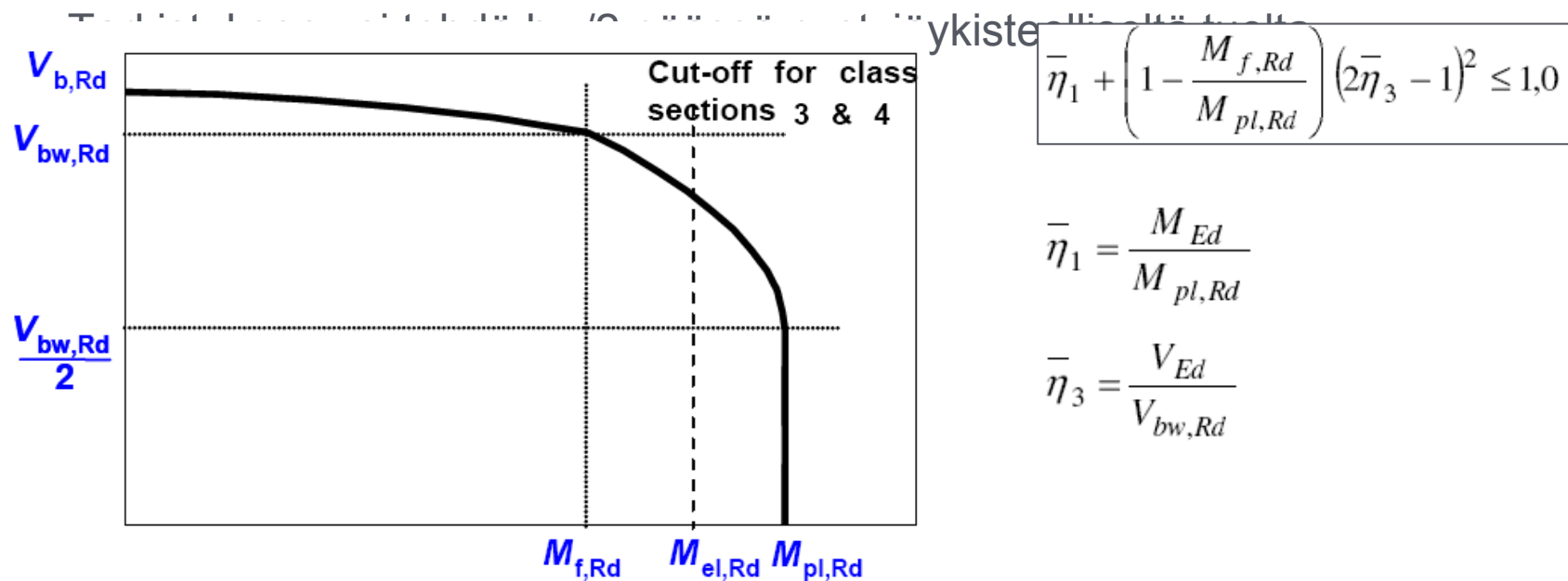
Erikoistapauksena symmetrinen I-palkki:

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left[W_{pl,y} - \frac{\rho A_w^2}{4 t_w} \right] f_y}{\gamma_{M0}}$$

Teräspalkkisillan murtorajatila

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus, kun leikkauslommahdus määrää

- Yhteisvaikutuskaava 3-1-5 / 7 mukaan



Teräspalkkisillan murtorajatila

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutus

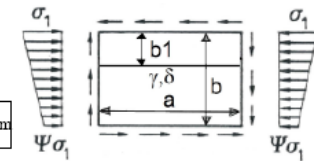
Jäykistetyin levyn lommahdustarkastelu hyödyntämättä ylikriittistä tilaa:

- yksi pituussuuntainen jäykiste noin b/3 etäisyydellä puristetummasta laidasta

Lähtötiedot:

Käytetään I-palkin lommahduslujuuksia

$\sigma_1 := 175 \text{ MPa}$ mitoitusnormaalijännitys, puristetumpi reuna (kuvasa ylempi), puristus (+)
 $\psi\sigma_1 := -125 \text{ MPa}$ mitoitusnormaalijännitys, vedetympi reuna (kuvasa alempi), puristus (+), veto (-)
 $V_d := 1200 \text{ kN}$ mitoitusleikkauvoima
 $a := 4000 \text{ mm}$ kentän pituus
 $b := 2000 \text{ mm}$ kentän korkeus
 $b_1 := 650 \text{ mm}$ ylemmän paneelin korkeus, noin b/3
 $t := 12 \text{ mm}$ levyn paksuus
 $b_g := 150 \text{ mm}$ jäykisteen leveys
 $t_s := 15 \text{ mm}$ jäykisteen paksuus
 $f_y := 355 \text{ MPa}$ ominaismyötölujuus
 $\gamma_m := 1.1$ materiaaliosavarmuusluku
 $m := 4$ jäykisteen jäykkyyden varmuuskertoimen (Tiehallinnon ohje: avoprofiililla 4)



$$\tau := \frac{V_d}{b \cdot t} = 50 \text{ MPa} \quad \psi := \frac{\psi\sigma_1}{\sigma_1} = -0.714$$

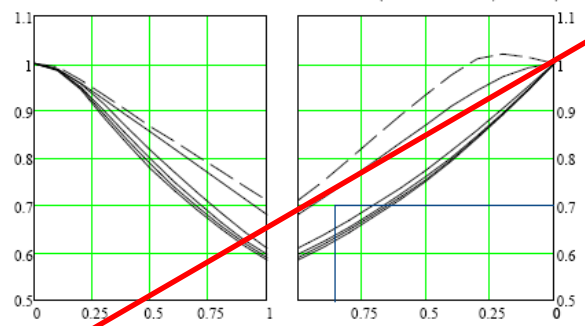
$$\delta := \frac{b_s \cdot t_s}{b \cdot t} = 0.094$$

...laskentaa...

Jäykistetyin kokonaiskentän lommahduslujuuudet:

Lommahdusleikkauslujuus: $k_\tau = 10.1$ $\tau_{el} = 69 \text{ MPa}$ $\lambda_{p\tau} = 2.264$ $f_{fvk} = 76 \text{ MPa}$
 Lommahduspuristuslujuus: $k_\sigma = 41.3$ $\sigma_{el} = 282 \text{ MPa}$ $\lambda_{p\sigma} = 1.122$ $f_{fck} = 251 \text{ MPa}$
 Vertailulujuus lommahduksen suhteen: $S = 0.701$ $\sigma_{elj} = 190 \text{ MPa}$ $\lambda_j = 1.368$ $f_{jk} = 215 \text{ MPa}$

Yhteisvaikutuskertoimen S (katso RIL 167-1, kuva 99)



Mitoitusehdot:
 B7 kaava (4.37): $\frac{\gamma_m \sigma_1}{f_{fck}} = 0.77$
 B7 kaava (4.38): $\frac{\gamma_m \tau}{f_{fvk}} = 0.72$
 B7 kaava (4.39): $\frac{\gamma_m \sqrt{\sigma_1^2 + 3 \cdot \tau^2}}{f_{jk}} = 1.00$

Jäykisteen redusoitu jäykkyys ja rajajäykkyys:
 Rajajäykkyyttä suuremmalla jäykkyydellä erilliskenttä lommahtaa ennen kokonaiskenttää.

$\frac{\tau}{\sigma_1} \cdot \frac{k_\sigma}{k_\tau} = 1.16$
 $\frac{\sigma_1}{\tau} \cdot \frac{k_\tau}{k_\sigma} = 0.86$
 $\gamma_{red} = 13.3$
 $\gamma_{raja} = 21.0$

Uusi aika, uudet kujeet...

Erillispaneelin lommahdustarkistus:

yp = ylempi (puristetumpi)
 ap = alempi (vedetympi) paneeli, yllä olevan kuvan mukaisesti
 ...laskentaa...

Ylempi kenttä:

$k_{\sigma,yp} = 5.49$ $k_{\tau,yp} = 5.45$ $\sigma_{elj,yp} = 372 \text{ MPa}$ $b_1 = 650 \text{ mm}$
 $\sigma_{el,yp} = 296 \text{ MPa}$ $\tau_{el,yp} = 353 \text{ MPa}$ $\lambda_{j,yp} = 0.977$ $\psi_{yp} = 0.44$
 $\lambda_{p\sigma,yp} = 0.999$ $\lambda_{p\tau,yp} = 1.003$ $s_{yp} = 0.937$ $\sigma_1 = 175 \text{ MPa}$
 $f_{fck,yp} = 282 \text{ MPa}$ $f_{fvk,yp} = 202 \text{ MPa}$ $f_{jk,yp} = 311 \text{ MPa}$ $\tau = 50 \text{ MPa}$

$$\frac{\gamma_m \sigma_1}{f_{fck,yp}} = 0.68$$

$$\frac{\gamma_m \tau}{f_{fvk,yp}} = 0.27$$

$$\frac{\gamma_m \sqrt{\sigma_1^2 + 3 \cdot \tau^2}}{f_{jk,yp}} = 0.69$$

Alempi kenttä:

$k_{\sigma,ap} = 40.83$ $k_{\tau,ap} = 5.80$ $\sigma_{elj,ap} = 218 \text{ MPa}$ $b_{ap} = 1350 \text{ mm}$
 $\sigma_{el,ap} = 613 \text{ MPa}$ $\tau_{el,ap} = 87 \text{ MPa}$ $\lambda_{j,ap} = 1.277$ $\psi_{ap} = -1.61$
 $\lambda_{p\sigma,ap} = 0.761$ $\lambda_{p\tau,ap} = 2.020$ $s_{ap} = 1.077$ $\sigma_{1,ap} = 78 \text{ MPa}$
 $f_{fck,ap} = 341 \text{ MPa}$ $f_{fvk,ap} = 96 \text{ MPa}$ $f_{jk,ap} = 237 \text{ MPa}$ $\tau = 50 \text{ MPa}$

$$\frac{\gamma_m \sigma_{1,ap}}{f_{fck,ap}} = 0.25$$

$$\frac{\gamma_m \tau}{f_{fvk,ap}} = 0.57$$

$$\frac{\gamma_m \sqrt{\sigma_{1,ap}^2 + 3 \cdot \tau^2}}{f_{jk,ap}} = 0.54$$

Teräspalkkisillan käyttöraja-tilavaatimukset

Ei saa myötää:

- Karakteristisen kuormayhdistelmän tuottamat jännitykset eivät saa ylittää myötölujuutta

$$\sigma_{Ed,ser} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M,ser}} \quad \tau_{Ed,ser} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M,ser}} \quad \sqrt{\sigma_{Ed,ser}^2 + 3\tau_{Ed,ser}^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M,ser}}$$

- Tavallisen (frequent) kuormayhdistelmän tuottamat jännitysvaihtelut eivät saa ylittää 1,5-kertaista myötölujuutta.

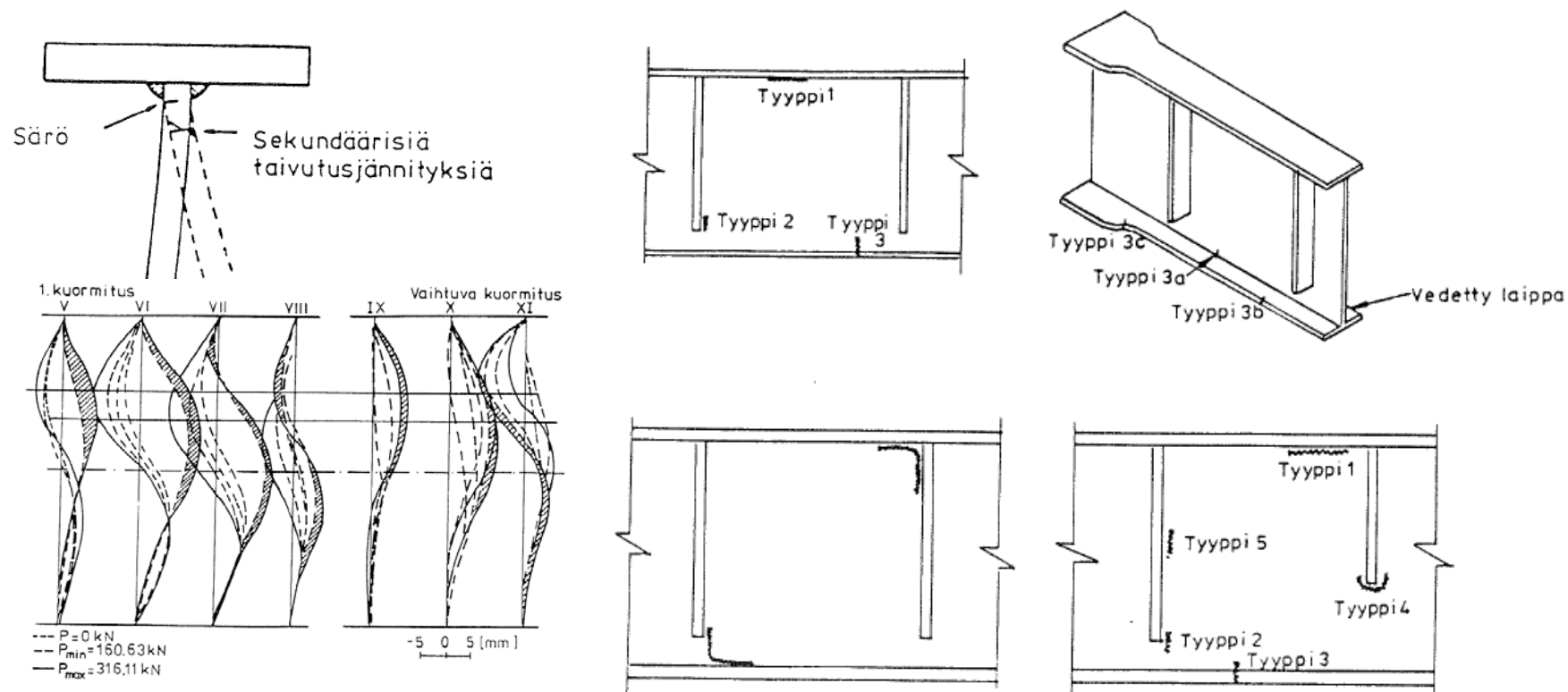
$$\Delta\sigma_{fre} \leq 1,5 f_y / \gamma_{M,ser}$$

- Jännitysten laskennassa
 - Shear lag tulee ottaa huomioon (kimmoisen tilan shear lag, 3-1-5 / 3.2)
 - Lommahtelua ei tarvitse huomioida poikkileikkausarvoissa

Teräspalkkisillan käyttörajatilavaatimukset

Uuman ”hengittämistä on rajoitettava”:

- uuman hoikkuutta rajoitettava ilmiön hillitsemiseksi



Tyypillisiä hengityksestä johtuvia väsymishalkeamia /4/.

Teräspalkkisillan käyttörajatilavaatimukset

Uuman hengittämisen voi jättää huomioimatta, jos ehdot täyttyvät

| | |
|--------------------------------|---------------------|
| $b/t \leq 30 + 4,0 L \leq 300$ | for road bridges |
| $b/t \leq 55 + 3,3 L \leq 250$ | for railway bridges |

- b on yksittäisen jäykisteiden ja laippojen rajaaman uumapaneelin pienin sivumitta
- t on uuman paksuus
- L on jänneväli, vähintään kuitenkin 20m

Jos edelliset hoikkuusehdot eivät täyty, seuraavan ehdon tulee täytyä:

- jännitykset lasketaan ”tavallisesta kuormayhdistelystä”
- lommahduskertoimet tulee laskea olettaen levyreunat nivelöidyiksi

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed,ser}}{k_{\sigma} \sigma_E}\right)^2 + \left(\frac{1,1 \tau_{x,Ed,ser}}{k_{\tau} \sigma_E}\right)^2} \leq 1,1$$

”Eulerin jännitys”

$$\sigma_E = 190000 \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad [N / mm^2]$$

