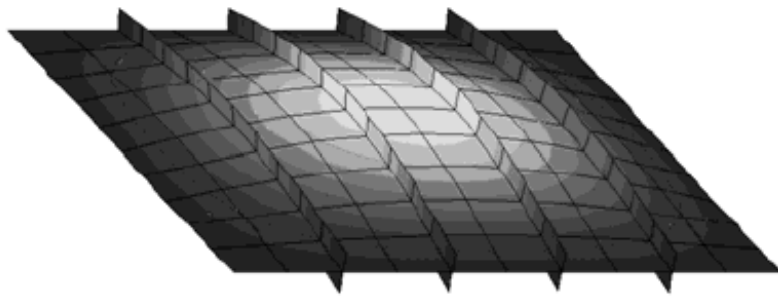
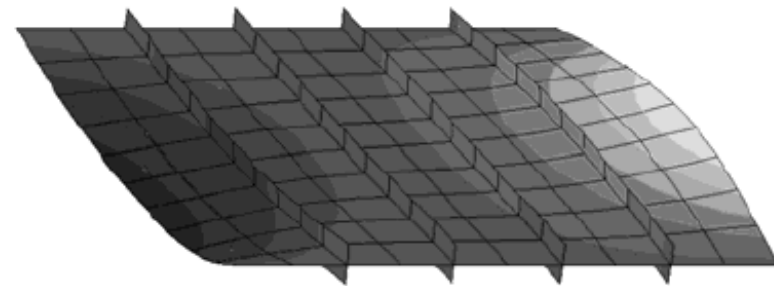


Stabiliteetti ja jäykistäminen



a) Plate-like behaviour



b) Column-like behaviour

Lommahdusjännitykset ja -kertoimet

Lommahdus normaalijännitysten vuoksi:

$$\sigma_{cr.p} = k_{\sigma} \sigma_E = k_{\sigma} \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \longleftrightarrow k_{\sigma}$$

Leikkauslommahdus:

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

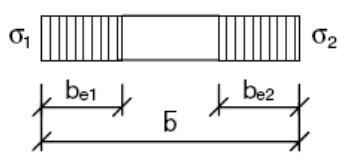
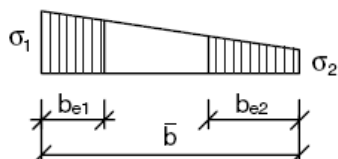
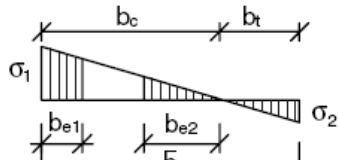


$$\sigma_E = 190000 \left(\frac{t}{b}\right)^2 \text{ [N / mm}^2\text{]}$$

”Eulerin jännitys”

Molemmat pitkät reunat nivelöity

Taulukko 4.1 Kahdelta reunalta tuetut taso-osat

Jännitysjakautuma (puristus on positiivinen)				Tehollinen ^p leveys b_{eff}		
				$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff} \quad b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi \leq 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\Psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Lommahduskerroin k_G	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Lomahduskerroin normaalijännitykselle, pitkä jäykistämätön levy:

3-1-5 / 4

Toinen pitkä reuna nivelöity, toinen vapaa

Taulukko 4.2 Yhdeltä reunalta tuetut taso-osat

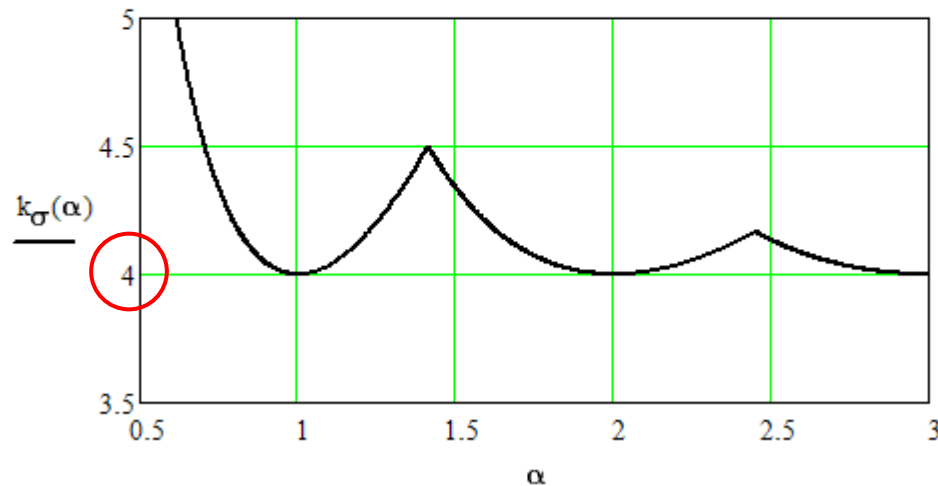
Jännitysjakautuma (puristus on positiivinen)		Tehollinen ^p leveys b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1-\psi)$			
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Lomahduskerroin k_G	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1-\psi)$			
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Lomahduskerroin k_G	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

Lommahduskerroin normaalijännitykselle tarkemmin

- Lommahdusaaltojen muodon ja lukumäärän tarkempi huomiointi
- Erikoistapaus, $\psi = 1$ (kaavaa ei ole esitetty normissa)

$$k_{\sigma}(\alpha, n) := \left(\frac{\alpha}{n} + \frac{n}{\alpha} \right)^2$$

$$k_{\sigma}(\alpha) := \min(k_{\sigma}(\alpha, 1), k_{\sigma}(\alpha, 2), k_{\sigma}(\alpha, 3), k_{\sigma}(\alpha, 4), k_{\sigma}(\alpha, 5)) \text{ jne...}$$



Taulukko 4.1

$\Psi = \sigma_2/\sigma_1$	1
Lommahduskerroin k_{σ}	4,0

Tässä tapauksessa taulukkoarvo = 4
= käyrien alaraja.

FEM-ohjelmat huomioivat tämän automaattisesti, 3-1-5 taulukkokaavat kuvaavat pitkää levyä eli lommahduskertoimen alarajaa. Määritettäessä lommahduskerrointa ts. kimmoteoreettista lommahdusjännitystä ominaisarvottehtävänä FEM-ohjelmalla, tämä seikka on hyvä olla tiedossa, etenkin kun vertaa tuloksia "käsikaavoihin".

Lommahdusjännitys normaalijännitysten suhteen

Ekvivalentti ortotrooppinen levy

3-1-5 / liite A.1

- Soveltuu täysin puristetulle pituusjäykistetyille levyille (puristuslaipalle)

Huom. 2. $\sigma_{cr,p}$ on kimmoteorian mukainen kriittinen lommahdusjännitys levykentän reunassa, missä esiintyy suurin puristujännitys, ks. kuva A.1.

Huom. 4. Jäykistetyille levyille, joissa on vähintään kolme toisistaan samalla etäisyydellä sijaitsevaa pituusjäykistettä, levyn lommahduskerroin $k_{\sigma,p}$ (jäykistetyin levykentän kokonaislommahdus) voidaan likimäärin laskea kaavasta:

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \sigma_E$$

$$k_{\sigma,p} = \frac{2\left((1 + \alpha^2)^2 + \gamma - 1\right)}{\alpha^2(\psi + 1)(1 + \delta)} \quad \text{jos } \alpha \leq \sqrt[4]{\gamma}$$

$$k_{\sigma,p} = \frac{4(1 + \sqrt{\gamma})}{(\psi + 1)(1 + \delta)} \quad \text{jos } \alpha > \sqrt[4]{\gamma}$$

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p} \longrightarrow I_p = \frac{bt^3}{12(1 - \nu^2)} = \frac{bt^3}{10,92}$$

$$\delta = \frac{\Sigma A_{sl}}{A_p}$$

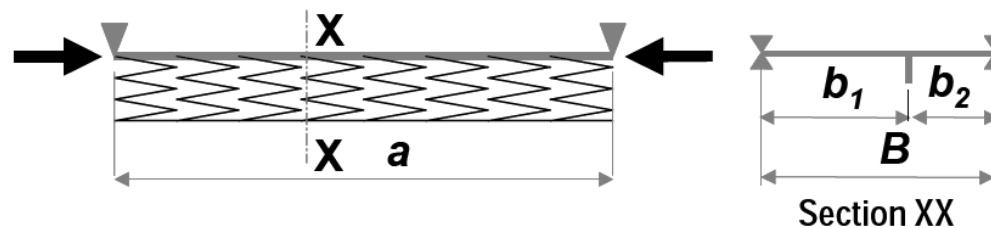
$$\alpha = \frac{a}{b} \geq 0,5$$

$$\text{missä: } \psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \geq 0,5$$

Lommahdusjännitys normaali­jännitysten suhteen

Yksinkertaistettu malli, joka perustuu levyn tukemaan pilariin 3-1-5 / liite A.2

- Soveltuu pituusjäykistetyin levyn lommahdusjännityksen laskentaan, kun puristetulla alueella on 1 tai 2 pituussuuntaista jäykistettä
- Malli perustuu ”kimmoisalla alustalla” olevan puristussauvan kimmoteoreettiseen nurjahdukseen
- Kimmoinen tuki tulee levyn toimimisesta laattana poikkisuunnassa
- Levyn reunoilla niveltuenta, jäykisteen vääntöjäykkyyttä ei huomioida lainkaan



$$\sigma_{cr,sl} = \frac{1,05 E}{A_{sl,1}} \frac{\sqrt{I_{sl,1} t^3 b}}{b_1 b_2}$$

jos $a \geq a_c$

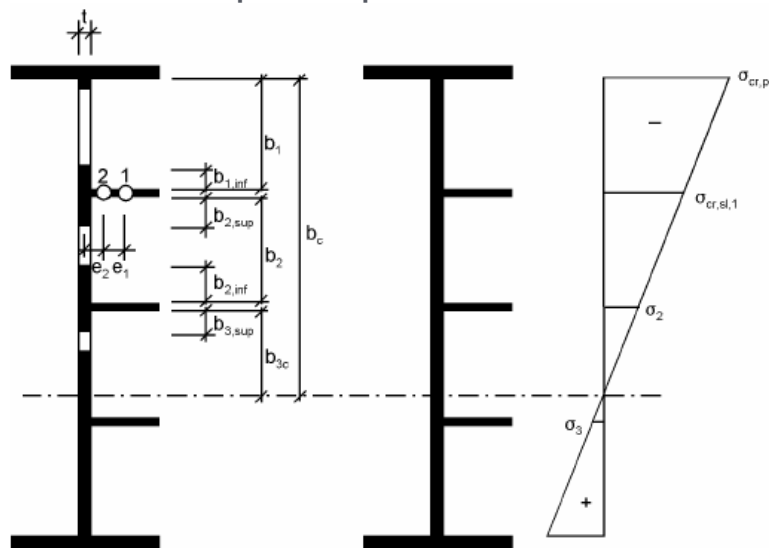
$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 E I_{sl,1}}{A_{sl,1} a^2} + \frac{E t^3 b a^2}{4 \pi^2 (1 - \nu^2) A_{sl,1} b_1^2 b_2^2}$$

jos $a \leq a_c$

$$a_c = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{sl,1} b_1^2 b_2^2}{t^3 b}}$$

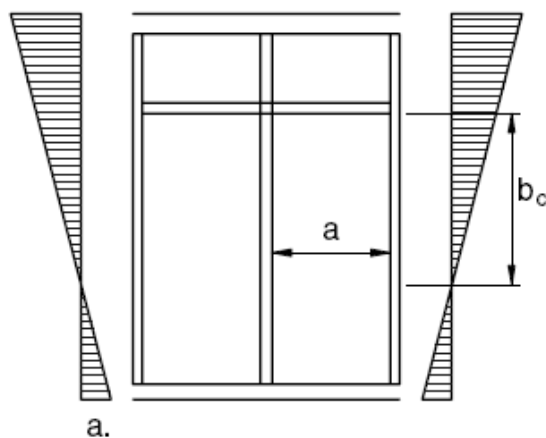
a_c olisi ”nurjahduspituus”, jos kentän pituus $a \rightarrow \infty$

Lommahdusjännitys normaalijännitysten suhteen Ekvivalentin pilarin poikkileikkauksen muodostaminen

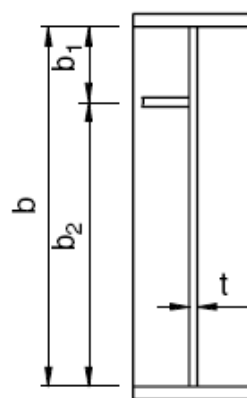


	Bruttopinta-alan leveys	Taulukon 4.1 mukainen tehollisen pinta-alan leveys	ψ_i :tä koskevat ehdot
$b_{1,inf}$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} b_1$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} b_{1,eff}$	$\psi_1 = \frac{\sigma_{cr,sl,1}}{\sigma_{cr,p}} > 0$
$b_{2,sup}$	$\frac{2}{5-\psi_2} b_2$	$\frac{2}{5-\psi_2} b_{2,eff}$	$\psi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,sl,1}} > 0$
$b_{2,inf}$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} b_2$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} b_{2,eff}$	$\psi_2 > 0$
$b_{3,sup}$	$0,4 b_{3c}$	$0,4 b_{3c,eff}$	$\psi_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} < 0$

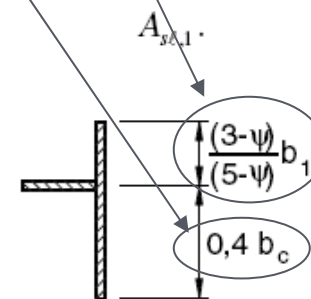
Kuva A.1 Pituusjäykistettyjen levyjen merkinnät



a.



b.



c.

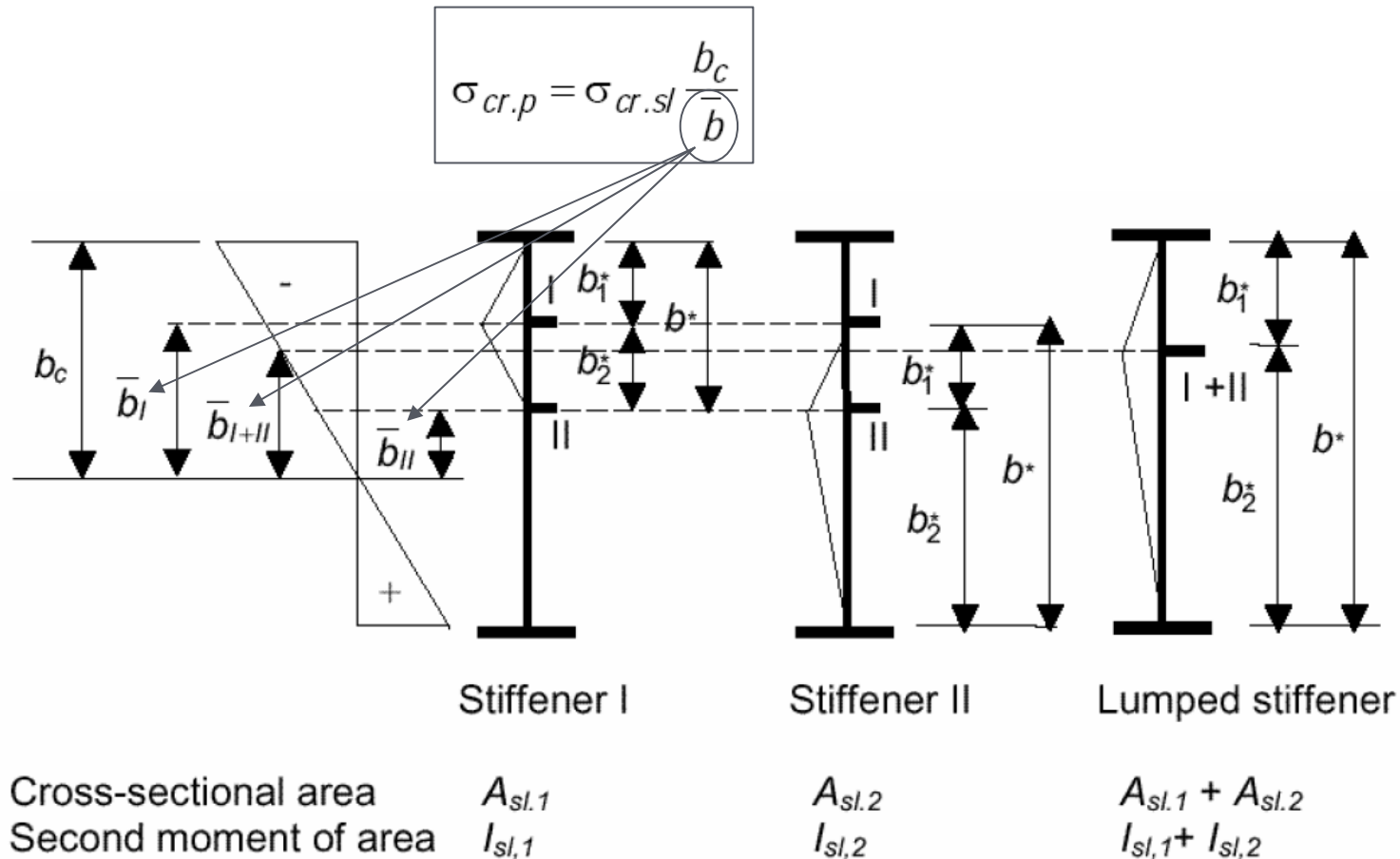
Kuva A.2 Levykenttä, jossa on yksi jäykiste puristetulla alueella – merkinnät

Lomahdusjännitys normaali­jännitysten suhteen
Yksinkertaistettu malli, joka perustuu levyn tukemaan pilariin...

Mitoituskaavoissa käytettävä lomahdusjännitys:

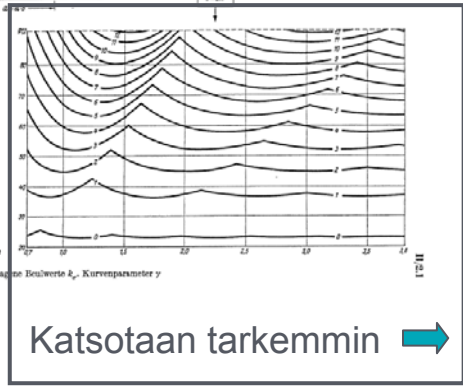
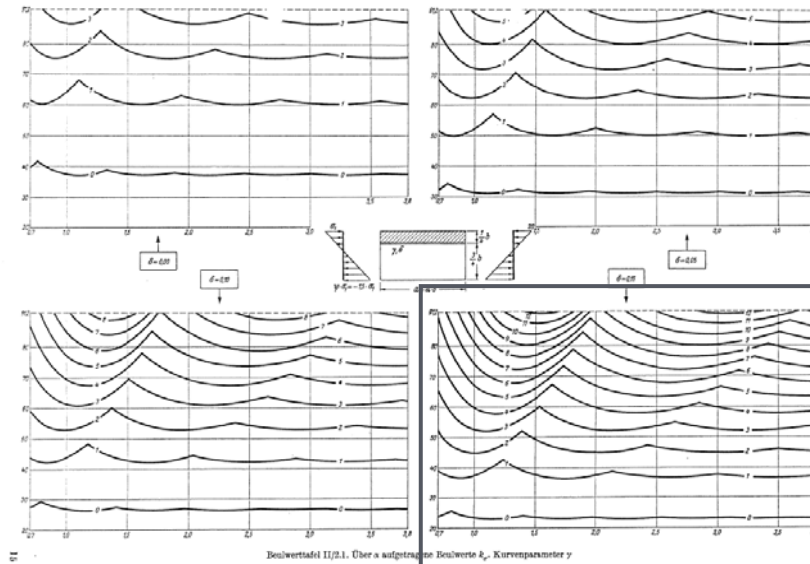
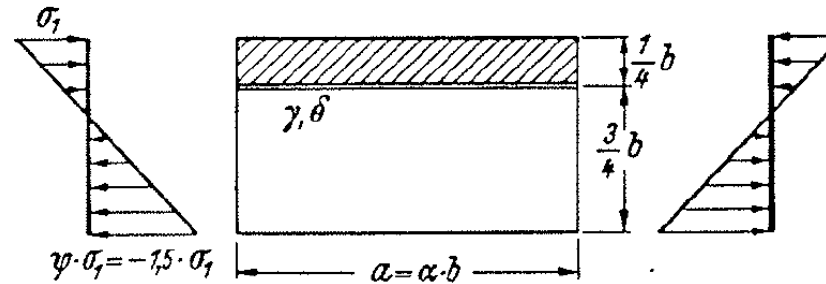
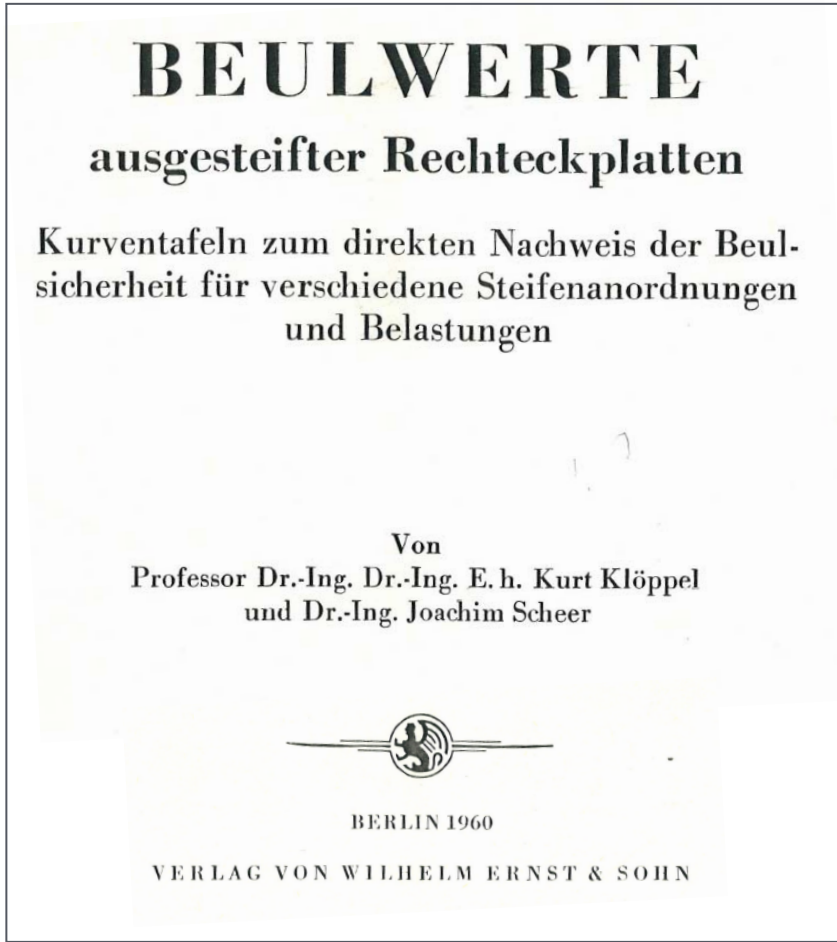
- Jännitys ekstrapoloidaan jäykistetyn levyn puristetummalle reunalle

3-1-5 / 4.5.3 (3) Huom.



Lommahdusjännitys normaalijännitysten suhteen

Klöppel&Scheer, 1960

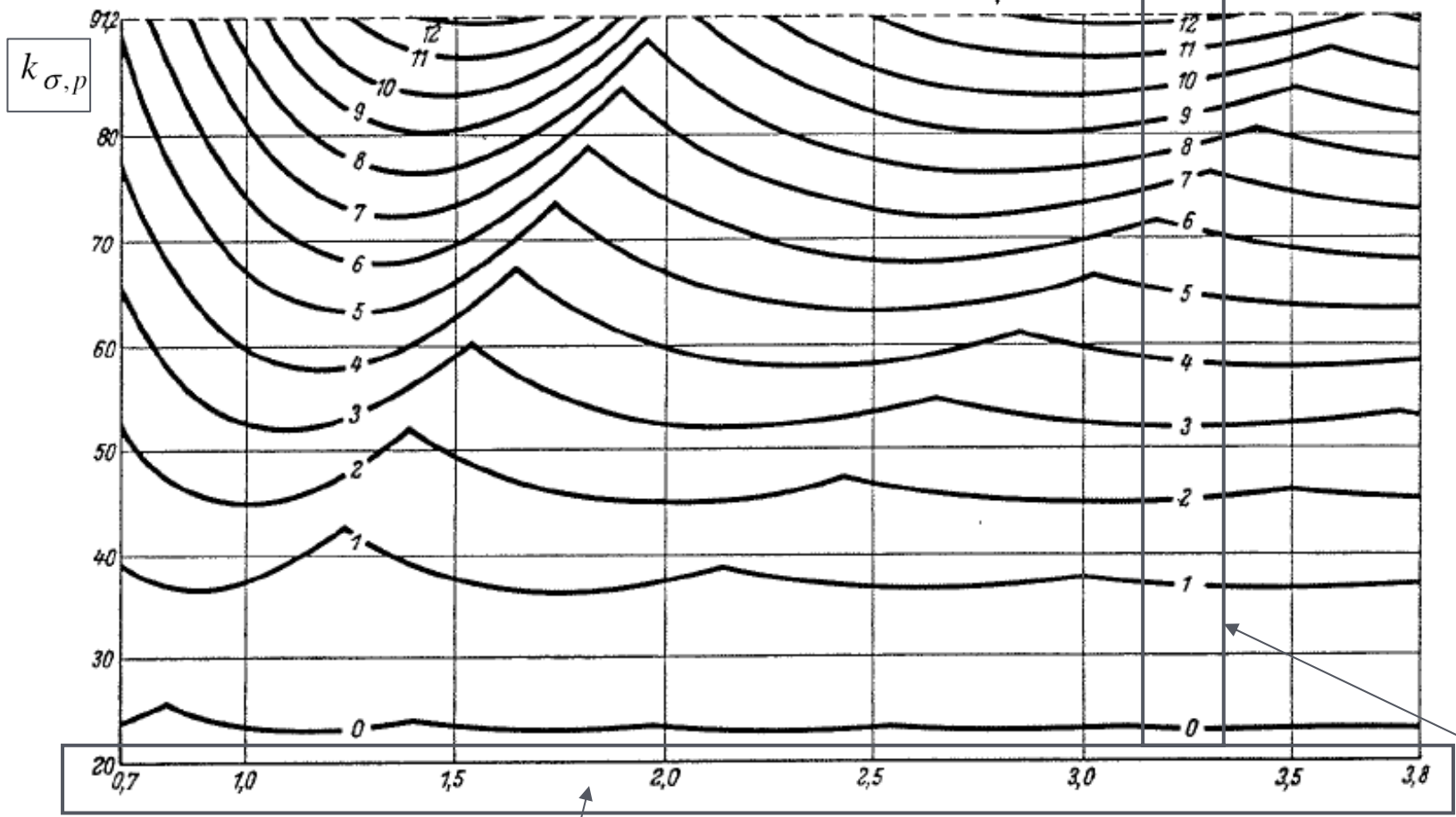


Lommahdusjännitys normaalijännitysten suhteen

Klöppel&Scheer, 1960

$$\delta = 0,15$$

$$\delta = \frac{\Sigma A_{sl}}{A_p}$$



Beulwerttafel II/2.1. Über α aufgetragene Beulwerte k_{σ} . Kurvenparameter γ

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p}$$

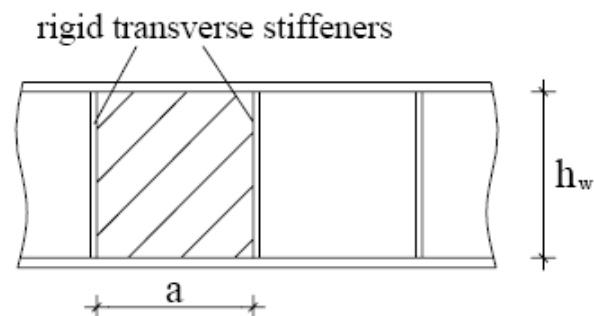
Leikkauslommahduskerroin

Uuma ilman pituusjäykisteitä ja ilman joustavia poikittaisjäykisteitä:

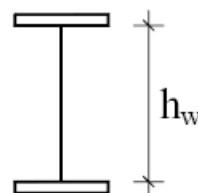
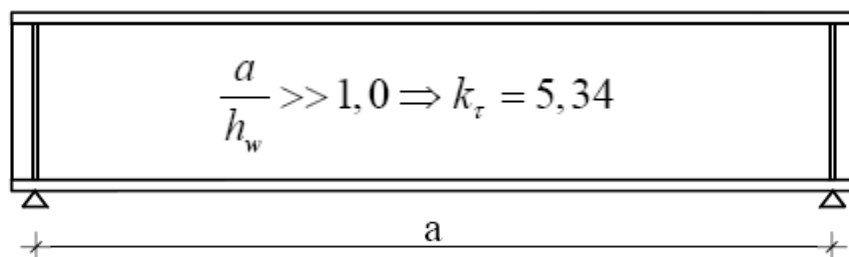
- Kaikki poikittaisjäykisteet oletetaan täysin jäykiksi
- Jäykiksi oletettujen poikittaisjäykisteiden jäykkyys- ja lujuusvaatimukset varmistetaan kohdan 3-1-5/9 mukaan

$$k_{\tau} = 5,34 + \frac{4,00}{\alpha^2} \quad \text{when} \quad \alpha \geq 1,0$$
$$k_{\tau} = 4,00 + \frac{5,34}{\alpha^2} \quad \text{when} \quad \alpha < 1,0$$

$$\alpha = a/h_w$$



Erikoistapauksena ”pitkä jäykisteetön lommahduskenttä”, poikittaisjäykisteet vain tuella



$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 t \varepsilon}$$

Leikkauslommahduskerroin

Uuma pituusjäykistettynä ja ilman joustavia poikittaisjäykisteitä:

- Kaikki poikittaisjäykisteet oletetaan täysin jäykiksi
- Jäykiksi oletettujen poikittaisjäykisteiden jäykkyys- ja lujuusvaatimukset varmistetaan kohdan 3-1-5/9 mukaan

Pituusjäykisteen hitausmomenttia pienennetään 1/3-osaan sen todellisesta arvosta, kun lasketaan kertoimen k_{τ} arvoa. Tämän pienennyksen huomioon ottamiseksi voidaan käyttää liitteen A kohdassa A.3 esitettyjä kertoimen k_{τ} kaavoja.

Poikittaisten jäykisteiden riittävä jäykkyys varmistetaan erikseen. Niiden siis oletetaan leikkauslommahduskestävyyden laskennassa pysyvän suorina = jäykkinä ja se varmistetaan erillisin laskelmin.

Kun uumaan lisätään pituusjäykisteitä, leikkauslommahduskuorma kasvaa ja sitä myötä myös leikkauslommahduskestävyys kasvaa. Tällöin lommahduksen jälkeinen ”jälkikriittinen lujuusreservi” eli ”post buckling strength” pienenee suhteessa pituussuunnassa jäykistämättömään uumaan nähden. Toisaalta pituusjäykisteet saattavat sijaita vielä uuman puristetulla osuudella, jolloin leikkauksen ja normaalijännitysten yhteisvaikutuksesta lopullinen hyöty jäykisteestä voi jäädä oletettua vähemmäksi redusoimatta jäykkyyttä. Tästä on syystä pituusjäykisteiden jäykkyydelle (jäyhyysmomentille tasosta ulospäin taivutettaessa) on valittu luku 3.

Tutkimusten mukaan reduktio voisi olla perusteltua jättää tekemättä suljetun ”trapetsijäykisteen” tapauksessa tekemättä sen vääntöjäykkyyden tuottaman lisäkestävyyden vuoksi. EC ei kuitenkaan vielä salli helpotusta.

Pituusjäykisteen jäykkyydsreduktio tulee tehdä vain laskettaessa leikkauslommahduskerrointa!

Leikkauslommahduskerroin

Uuma pituusjäykistettynä ja ilman joustavia poikittaisjäykisteitä, jatkoa...

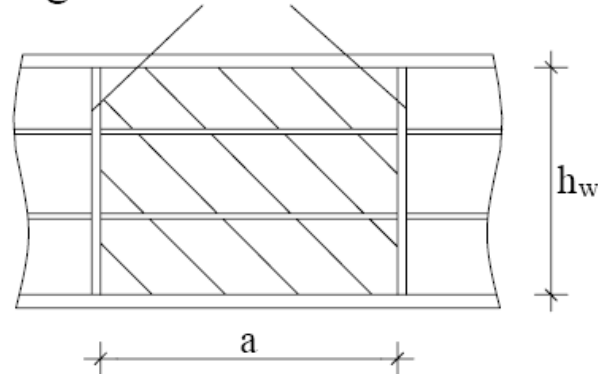
Leikkauslommahduskertoimen laskenta

- 3-1-5, liite A.3 yksinkertaistetuilla kaavoilla, joihin tarvittava 1/3 jäykkyysreduktio on jo sisällytetty
- Lommahdustarkastelu ominaisarvoteknävänä (FEM), itse jotenkin huomioitava jäykkyysreduktio
- Sopivilla taulukoilla, Klöppel&Muller, Klöppel&Scheer, RIL167-1 jne, jäykkyysreduktio tehtävä ennen käyrien käyttöä

Leikkauslommahduskerroin pienempi seuraavista:

- Jäykistetyn uumapaneelin kokonaisleikkauslommahdusta vastaava kerroin
- Hoikimman yksittäisen erillisuumapaneelin lommahduskerroin

rigid transverse stiffeners



$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 t \varepsilon \sqrt{k_\tau}}$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_{wi}}{37,4 t \varepsilon \sqrt{k_{\sigma_i}}}$$

Leikkauslommahduskerroin

Uuma pituusjäykistettynä ja ilman joustavia poikittaisjäykisteitä, jatkoa...

EN 1993-1-5, liite A.3

Levyille, joissa on jäykät poikittaiset jäykisteet eikä pituusjäykisteitä tai levyille, joissa on vähintään kolme pituusjäykistettä, leikkauslommahduskerroin k_τ lasketaan seuraavasti:

$$\begin{array}{l} k_\tau = 5,34 + 4,00 (h_w / a)^2 + k_{\tau sl} \quad \text{kun } a / h_w \geq 1 \\ k_\tau = 4,00 + 5,34 (h_w / a)^2 + k_{\tau sl} \quad \text{kun } a / h_w < 1 \end{array} \quad k_{\tau sl} = 9 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{sl}}{t^3 h_w} \right)^3} \quad \text{kuitenkin vähintään } \frac{2,1}{t} \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{h_w}}$$

sovelletaan myös levyille, joissa on yksi tai kaksi pituusjäykistettä edellyttäen, että

$$\alpha = \frac{a}{h_w} \text{ täyttää ehdon } \alpha \geq 3$$

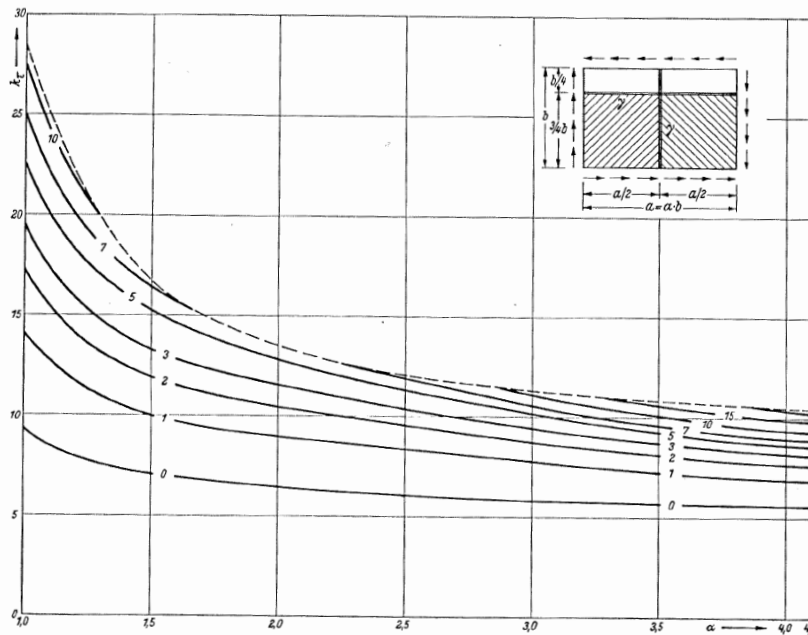
Levyille, joissa on yksi tai kaksi pituusjäykistettä ja sivusuhte $\alpha < 3$

$$k_\tau = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \frac{I_{sl}}{t^3 h_w}}{\alpha^2} + 2,2 \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{t^3 h_w}}$$

Leikkauslommahduskerroin

Uuma jäykistetty jäykällä ja joustavilla poikittais- eli välijäykisteillä, pituussuunnassa jäykistetty tai jäykistämätön:

- Vain pituussuuntaisten jäykisteiden jäykkyyttä tulee redusoida
- Joustavia välijäykisteitä hyödynnetään vain lommahduskertoimen kasvattamiseen
- Joustaville välijäykisteille ei ole esitetty jäykkyyks- tai lujuusvaatimuksia
- Lommahduskertoimen laskentaan ei ole esitetty normissa kaavoja, avuksi tulee kirjallisuus aiheesta, kuten ”Klöppelin käyrästöt”



Beulwerttafel III/1.4. Über α aufgetragene Beulwerte k_T . Kurvenparameter γ

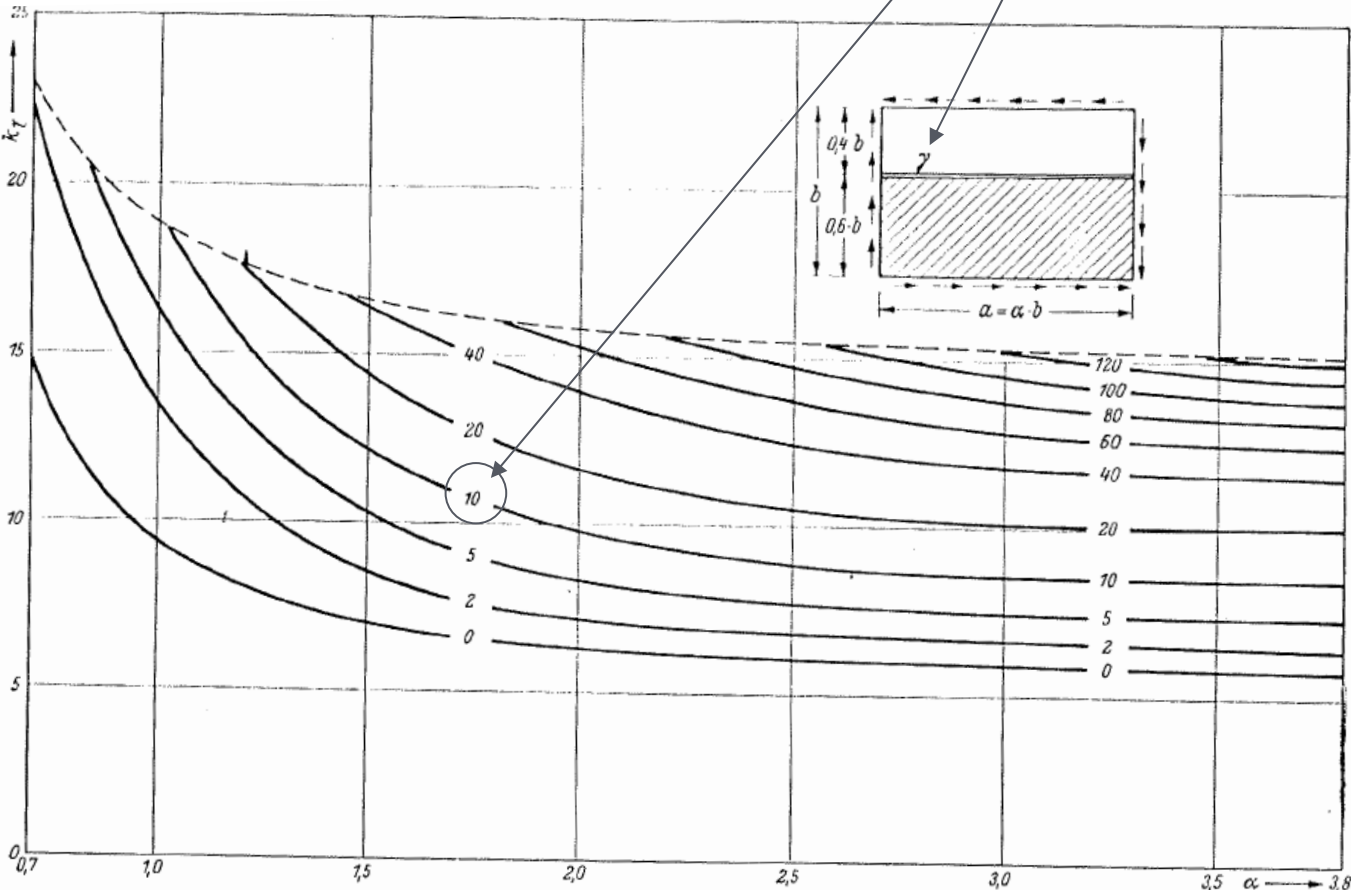
Esimerkki:
Klöppel&Scheer, 1960
Beulwerttafel III/1.4

Jäykkyyksreduktio tehtävä tässä myös välijäykisteeseen, koska oletuksena on sama jäykkyyks molemmissa...

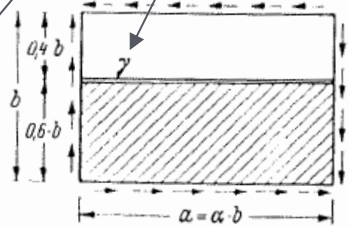
Leikkauslommahduskerroin

Klöppel&Scheer, 1960

$$k_{\tau}$$



$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p}$$



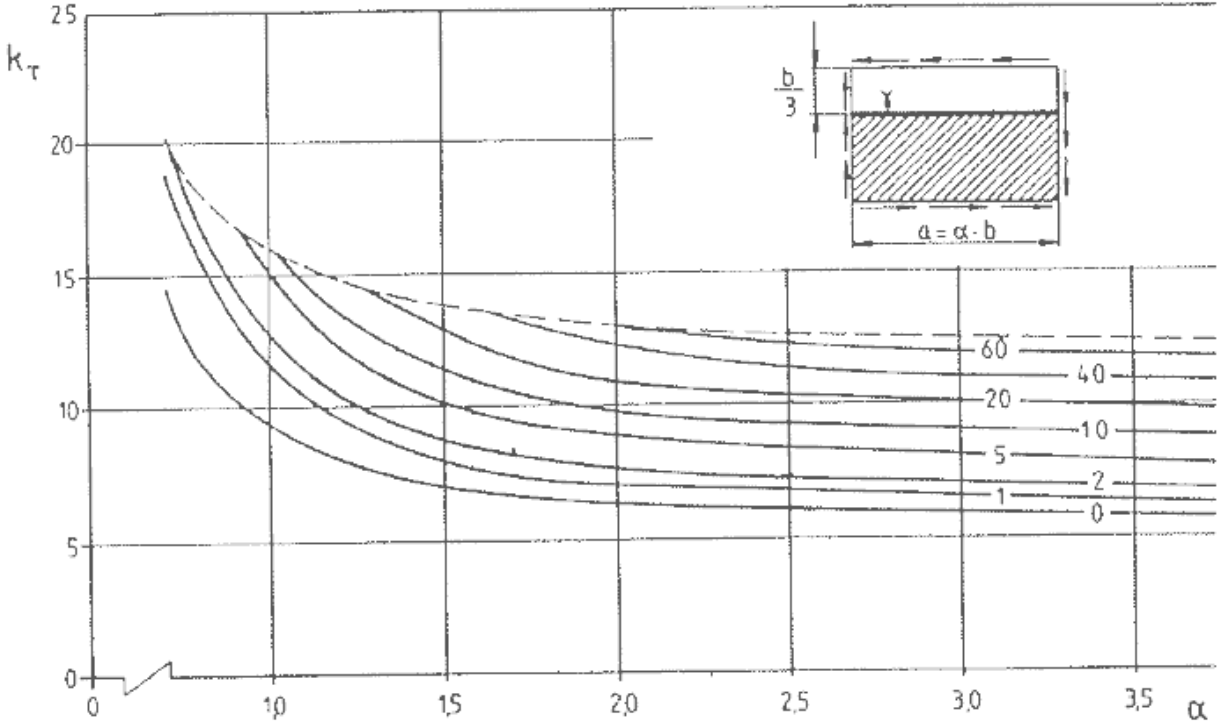
Beulwerttafel II/4.6. Über α aufgetragene Beulwerte k_{τ} . Kurvenparameter γ .

$$\alpha = a/h_w$$

Leikkauslommahduskerroin

RIL 167-1 ("vihreä kirja")

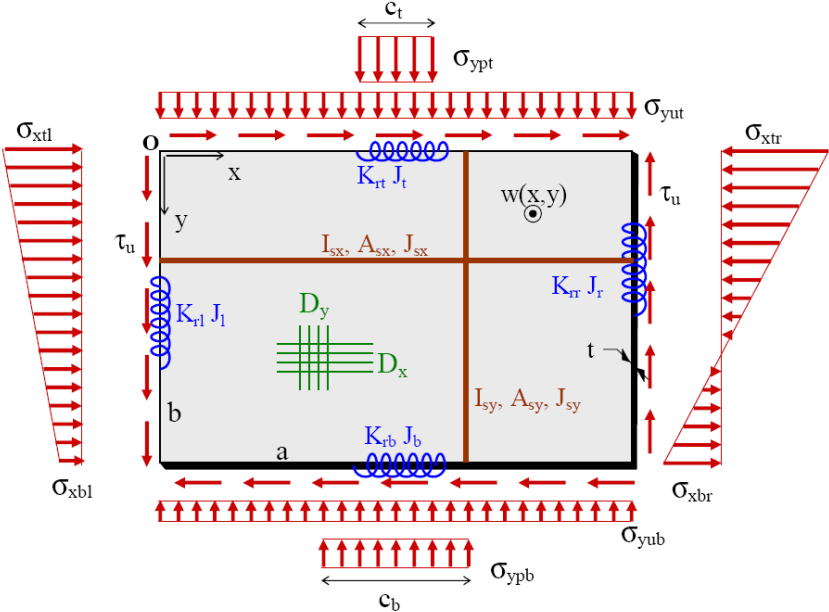
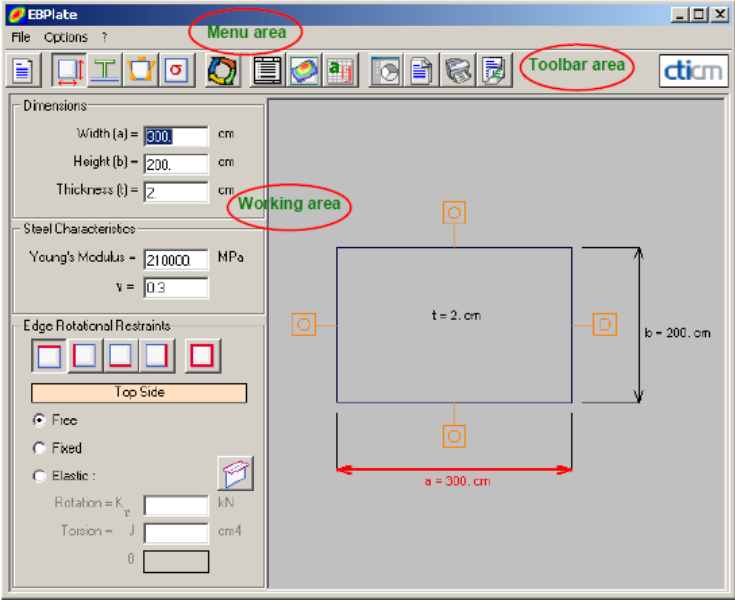
4.4.8 Lommahdus- ja nurjahdustaulukot.....270
4.4.8.1 Lommahdustaulukoita ja
-käyrästäjä jäykistettyjä levy-
kenttiä varten 270



Lomahduksen laskenta EBPlate-ohjelmalla

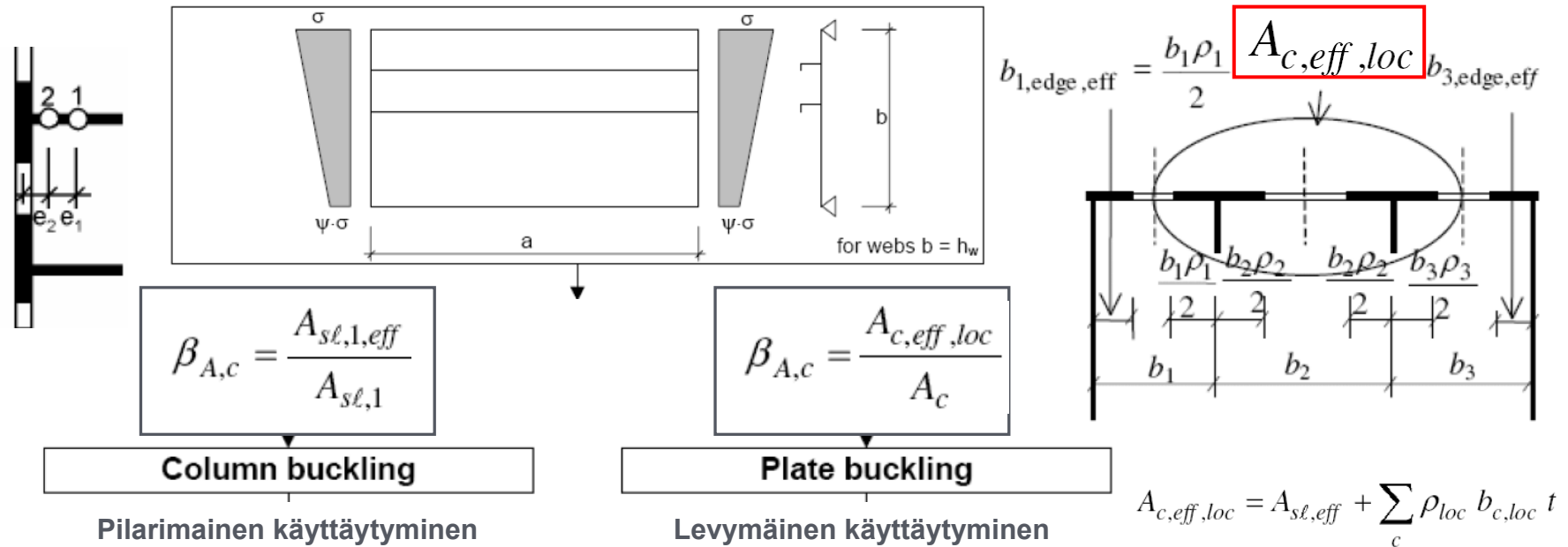
(normin säätäjät kehittelleet ohjelman, ilmainen)

<http://www.cticm.org/spip.php?article80>



Levyn tehollisen^P pinta-alan määrittäminen 3-1-5/4 mukaan

(pituusjäykistetty tai –jäykistämätön)

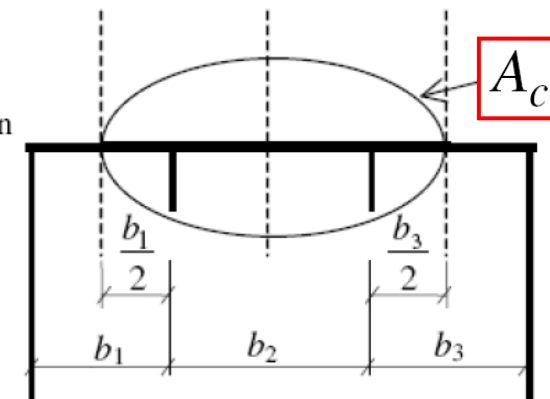


$A_{sl,1}$ on jäykisteen ja viereisten levyosien bruttopinta-ala kuvan A.1 mukaan

$A_{sl,1,eff}$ on jäykisteen ja sen viereisten levyosien tehollinen pinta-ala, kun levyn lommahdus otetaan huomioon, ks. kuva A.1.

A_c on jäykistetyn levyn puristetun alueen bruttopinta-ala lukuun ottamatta viereisten levyosien tukemien osakenttien osia, ks. kuva 4.4 (arvo kerrotaan shear lag-ilmiötä kuvaavalla tekijällä, jos shear lag-ilmiö tulee ottaa huomioon, ks. kohta 3.3)

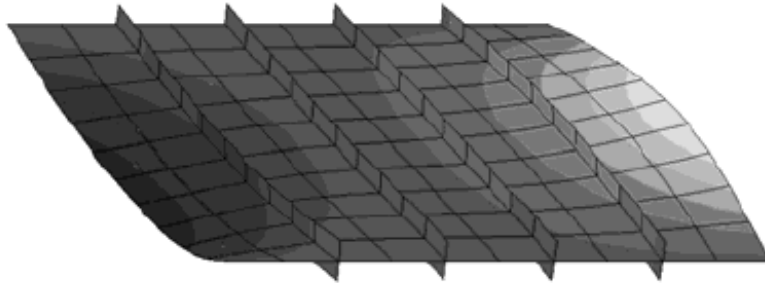
$A_{c,eff,loc}$ on saman levyosan tehollinen pinta-ala (mukaan lukien tarvittaessa shear-lag-ilmiön vaikutukset) ottaen huomioon osakenttien ja/tai jäykistettyjen taso-osien mahdollinen lommahdus.



Levyn tehollisen^p pinta-alan määrittäminen 3-1-5/4 mukaan

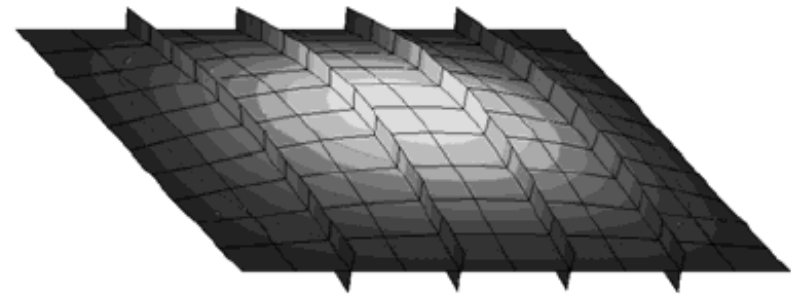
Pilarimainen käyttäytyminen

(tutkitaan olettaen pituussuuntaiset tuet poistetuiksi)

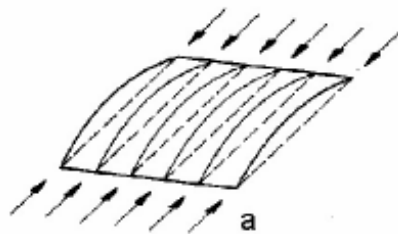


Levymäinen käyttäytyminen

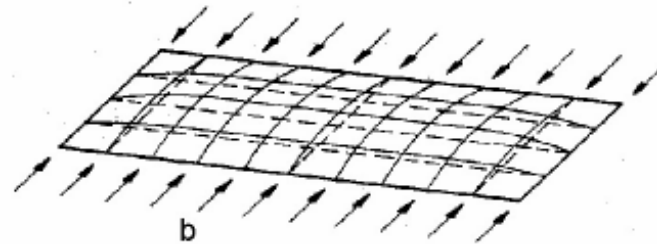
(tutkitaan hyödyntäen levyn tukeva vaikutus)



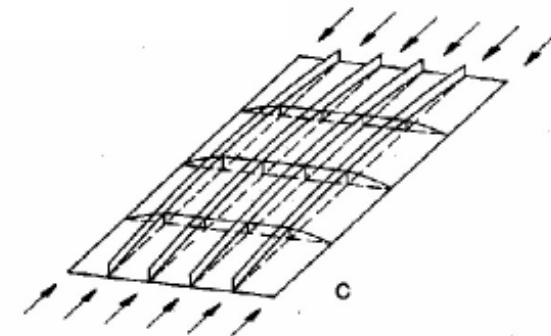
Kun sivusuhte $a/b < 1$, levyn pilarimainen käyttäytyminen voi olla määräävä, jolloin tarkistaminen tehdään kohdan 4.5.4 mukaan käyttäen pienennystekijää ρ_c .



a) Levyn pilarimainen käyttäytyminen, kun pituussuuntaisia tukia ei ole



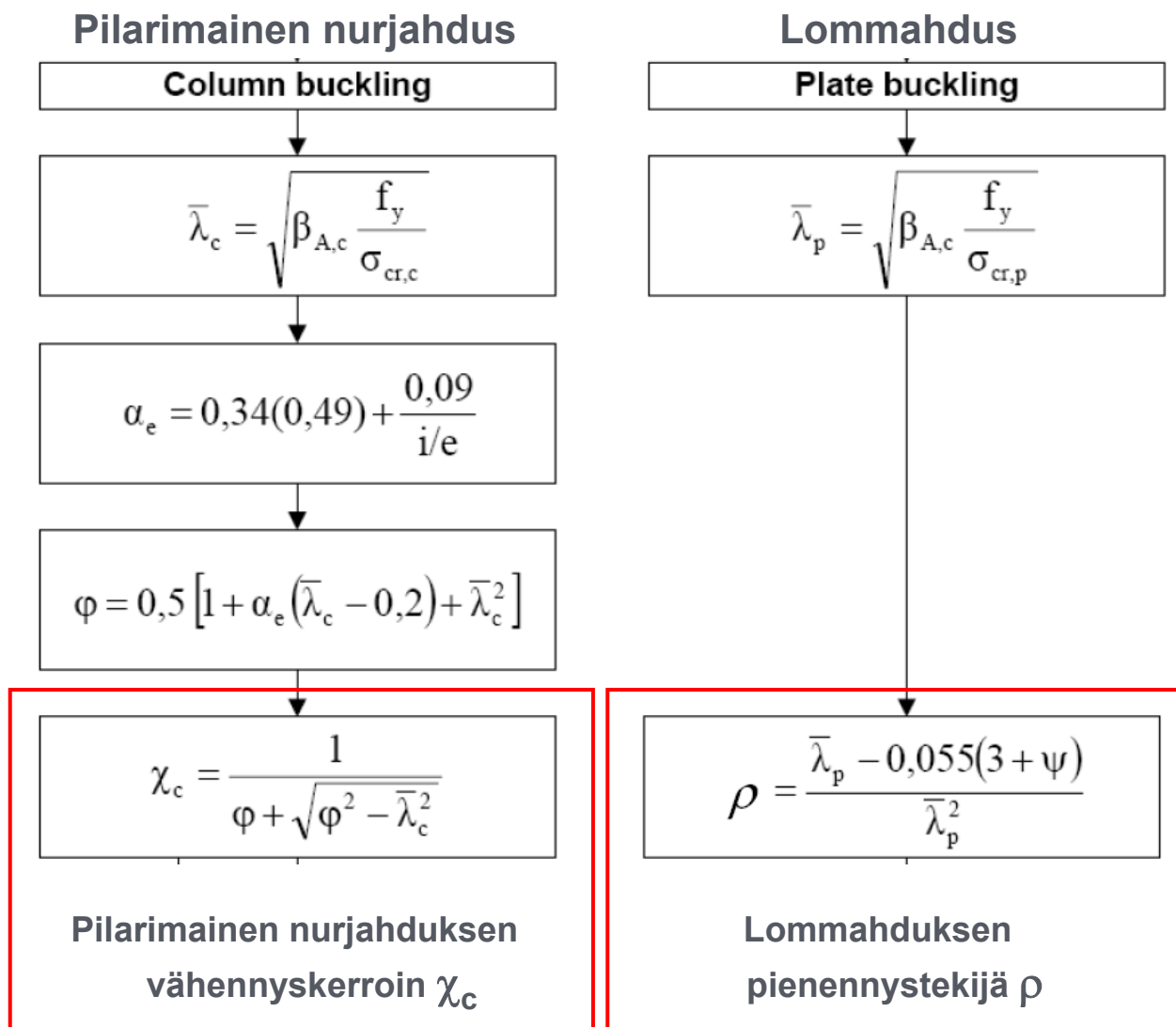
b) Jäykistämättömän levyn pilarimainen käyttäytyminen, kun sivusuhte α on pieni



c) Pituussuunnassa jäykistetyn levyn pilarimainen käyttäytyminen, kun sivusuhte α on suuri

Kuva 4.3 Pilarimainen käyttäytyminen

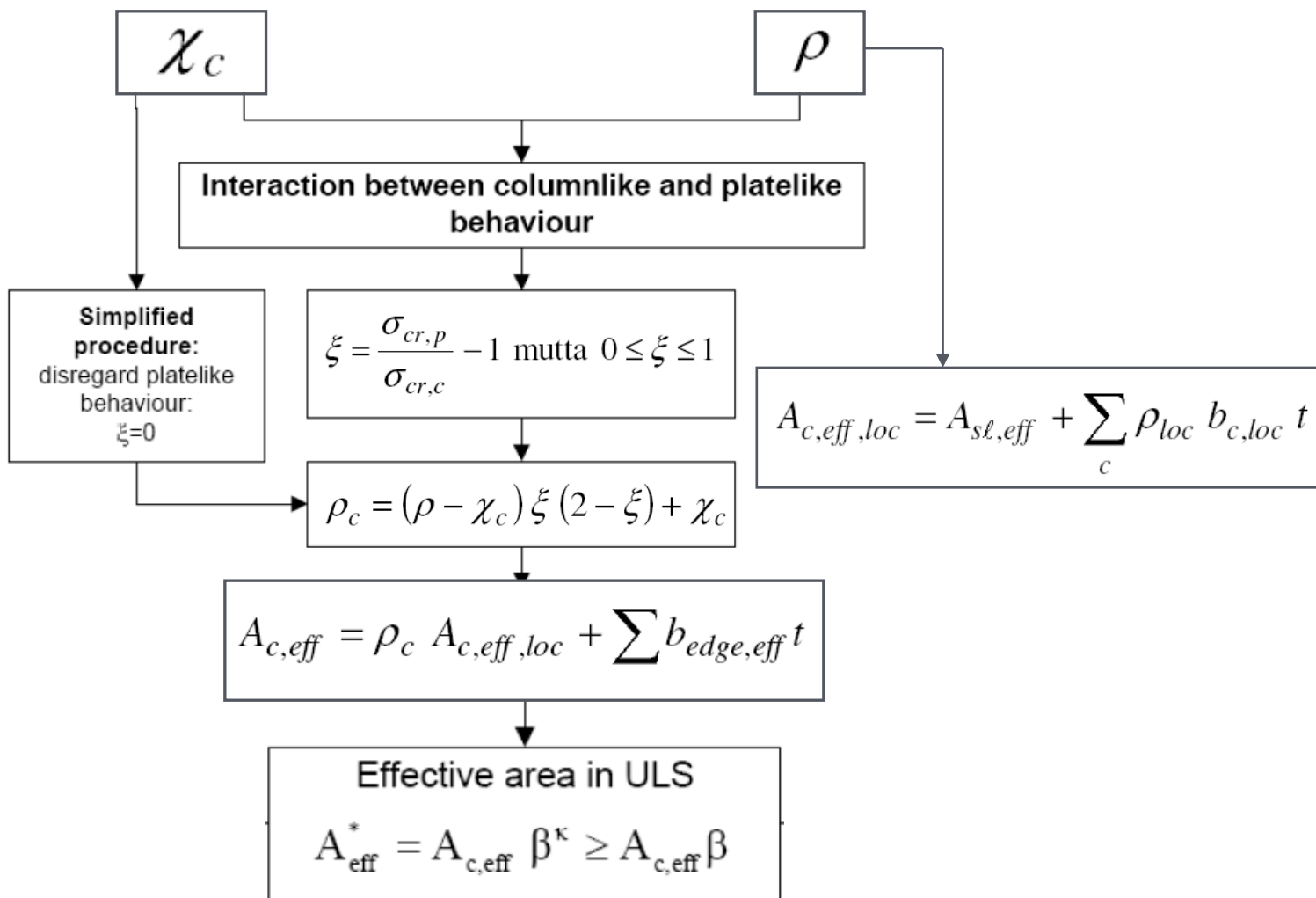
Levyn tehollisen^p pinta-alan määrittäminen 3-1-5/4 mukaan



Levyn tehollisen^p pinta-alan määrittäminen 3-1-5/4 mukaan

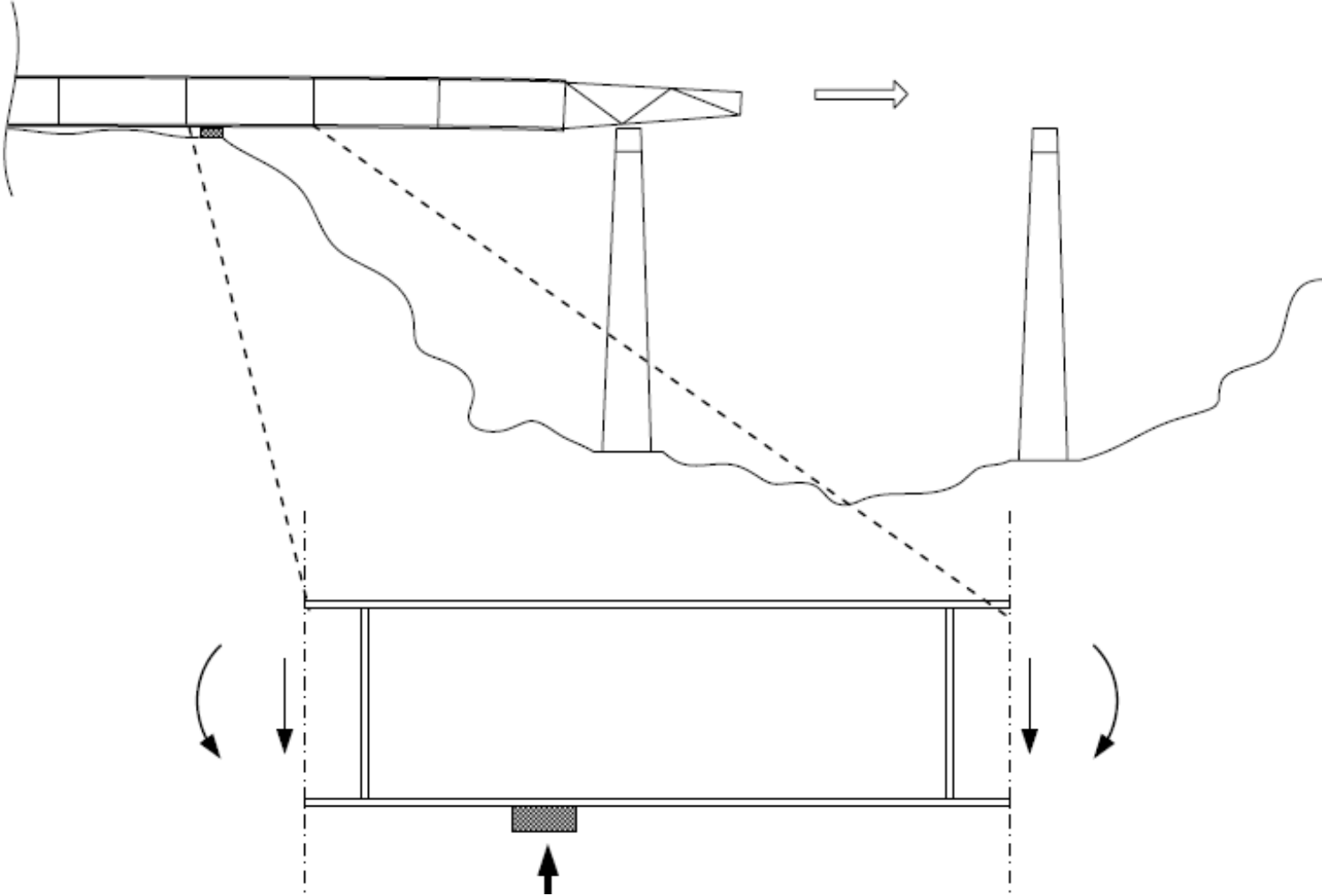
Pilarimainen nurjahdus

Lommahdus



Kestävyys poikittaisille kuormille

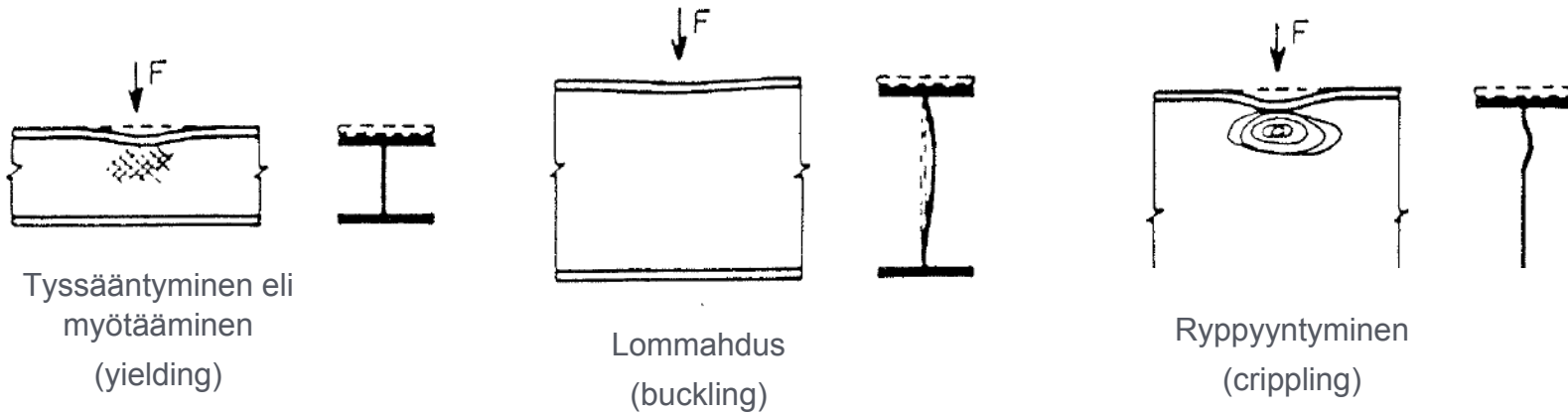
3-1-5 / kpl 6



Kestävyys poikittaisille kuormille

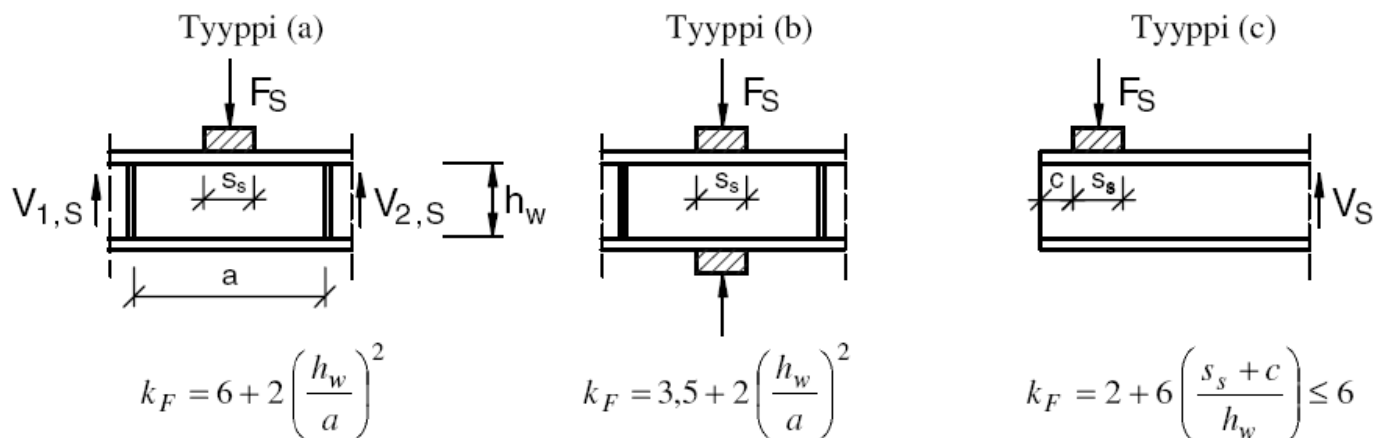
Perusteet:

- Soveltuu valssattujen ja hitsattujen palkkien uumille, edellyttäen että puristettu laippa on riittävästi tuettu sivusuunnassa
- Eri murtotavat sisällytetty normin mitoituskaavoihin

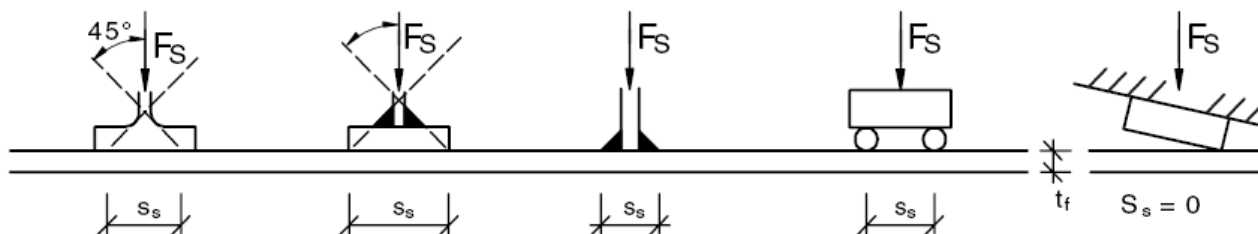


$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{array}{l} F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \\ \text{Tehollinen kuormituspituus, } \ell_y \end{array} \right\} \rightarrow \bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{\ell_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}} \rightarrow \chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1,0 \rightarrow L_{eff} = \chi_F \ell_y \\
 & \rightarrow F_{Rd} = \frac{f_{yw} L_{eff} t_w}{\gamma_{M1}}
 \end{aligned}$$

Kestävyys poikittaisille kuormille



Kuva 6.1 Lomahduskertoimet eri kuormituksille



Kuva 6.2 Jäykän tukipinnan pituus

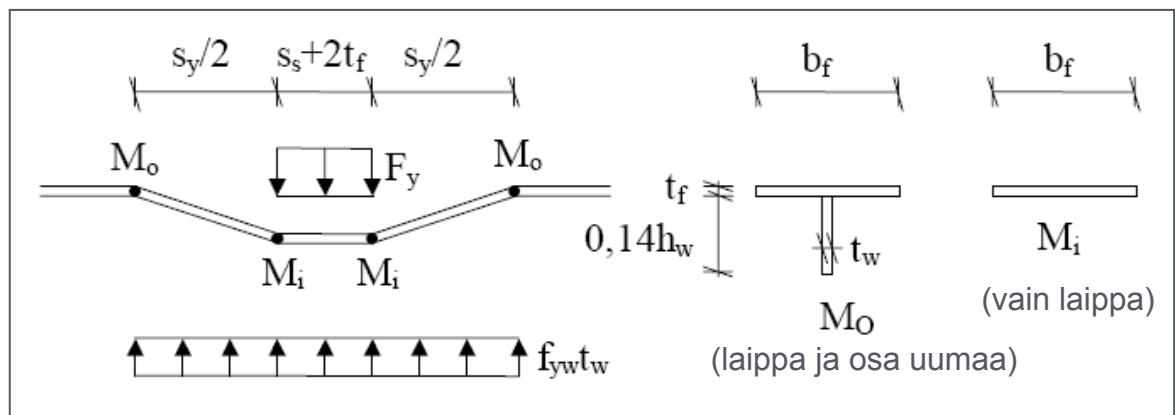
Jäykän tukipinnan pituus s_s laipassa on se mitta, jonka matkalla kuorma jakaantuu tehollisesti ja se voidaan määrittää olettamalla kuorman jakaantuvan kaltevuudessa 1:1, ks. kuva 6.1. Mitta s_s saa kuitenkin olla enintään h_w .

Kestävyys poikittaisille kuormille

Kuvan 6.1 tapauksissa a) ja b)
 ℓ_y on vähintään $s_s + 2 t_f$

Tehollinen kuormituspituus ℓ_y

- Teholliseen kuormituspituuteen vaikuttavat sekä laipan jämäkyys, että myös uuman hoikkuus
- Murtomallissa kuormitettu laippa ja osa uumaa muodostavat myötömekanismin



- Mitoituskaavoissa esiintyvä kerroin m_2 ottaa huomioon uuman osuuden mekaniismissa ulommissa plastisissa nivelissä, tosin vain hoikan uuman tapauksessa
- Sisempien nivelten kohdalla uuman oletetaan olevan poikittaisen kuorman vuoksi myödessä, jolloin sitä ei voi hyödyntää mekaniismissa lainkaan rikkomatta Von Mises – myötöehtoa

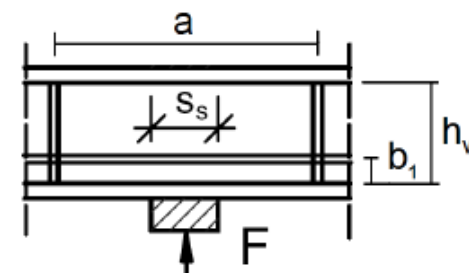
$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \quad \left| \quad \begin{array}{l} m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 \quad \text{jos } \bar{\lambda}_F > 0,5 \\ m_2 = 0 \quad \text{jos } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \end{array} \right. \quad \left| \quad \ell_y = s_s + 2 t_f \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2} \right) \right. \quad \left| \quad \begin{array}{l} L_{eff} = \chi_F \ell_y \\ F_{Rd} = \frac{f_{yw} L_{eff} t_w}{\gamma_{M1}} \end{array} \right.$$

Kuvan 6.1 tapauksissa a) ja b)

Kestävyys poikittaisille kuormille

Uumille, joissa on pituusjäykisteet, k_F voidaan laskea kaavasta:

$$k_F = 6 + 2 \left[\frac{h_w}{a} \right]^2 + \left[5,44 \frac{b_1}{a} - 0,21 \right] \sqrt{\gamma_s}$$



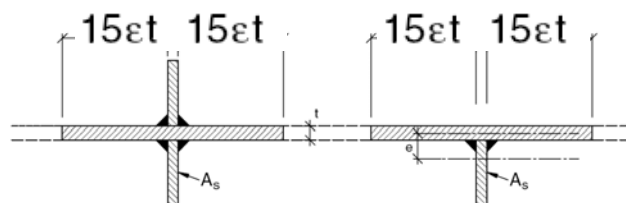
missä b_1 on kuormitetun osakentän korkeus, jonka arvoksi valitaan kuormitetun laipan ja jäykisteen välinen vapaa etäisyys

$$\gamma_s = 10,9 \frac{I_{sl,1}}{h_w t_w^3} \leq 13 \left[\frac{a}{h_w} \right]^3 + 210 \left[0,3 - \frac{b_1}{a} \right] \quad (6.7)$$

missä $I_{sl,1}$ on kuormitettua laippaa lähimpänä olevan jäykisteen hitausmomentti, jonka laskemisessa otetaan huomioon uuman toimivat osat kuvan 9.1 mukaan.

Yhtälö (6.6) on voimassa, kun $0,05 \leq \frac{b_1}{a} \leq 0,3$ ja $\frac{b_1}{h_w} \leq 0,3$ ja kuormitus on kuvan 6.1 tyyppin

(a) mukainen.

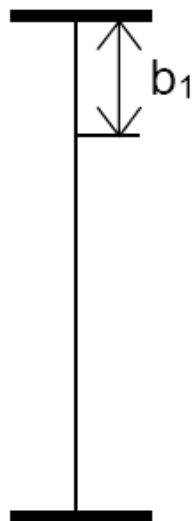


Kuva 9.1 Jäykisteen tehollinen pinta-ala

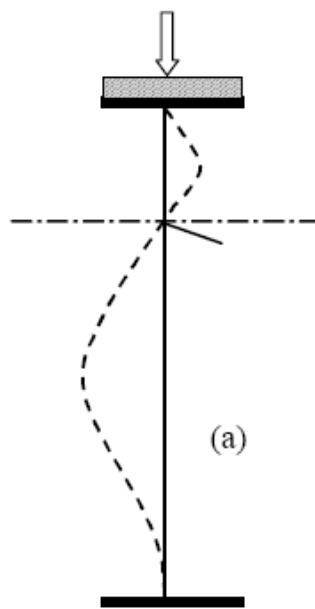
Kestävyys poikittaisille kuormille

Pituusjäykisteen jäykkyysraja:

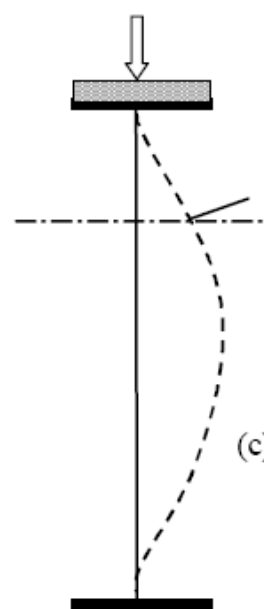
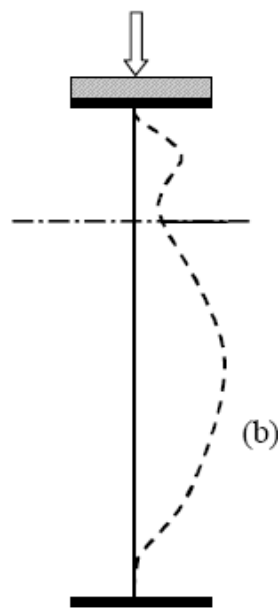
$$\gamma_s^* = 13 \left(\frac{a}{h_w} \right)^3 + 210 \left(0,3 - \frac{b_1}{a} \right) \text{ for } \frac{b_1}{a} \leq 0,3$$



$$\gamma_s \geq \gamma_s^*$$



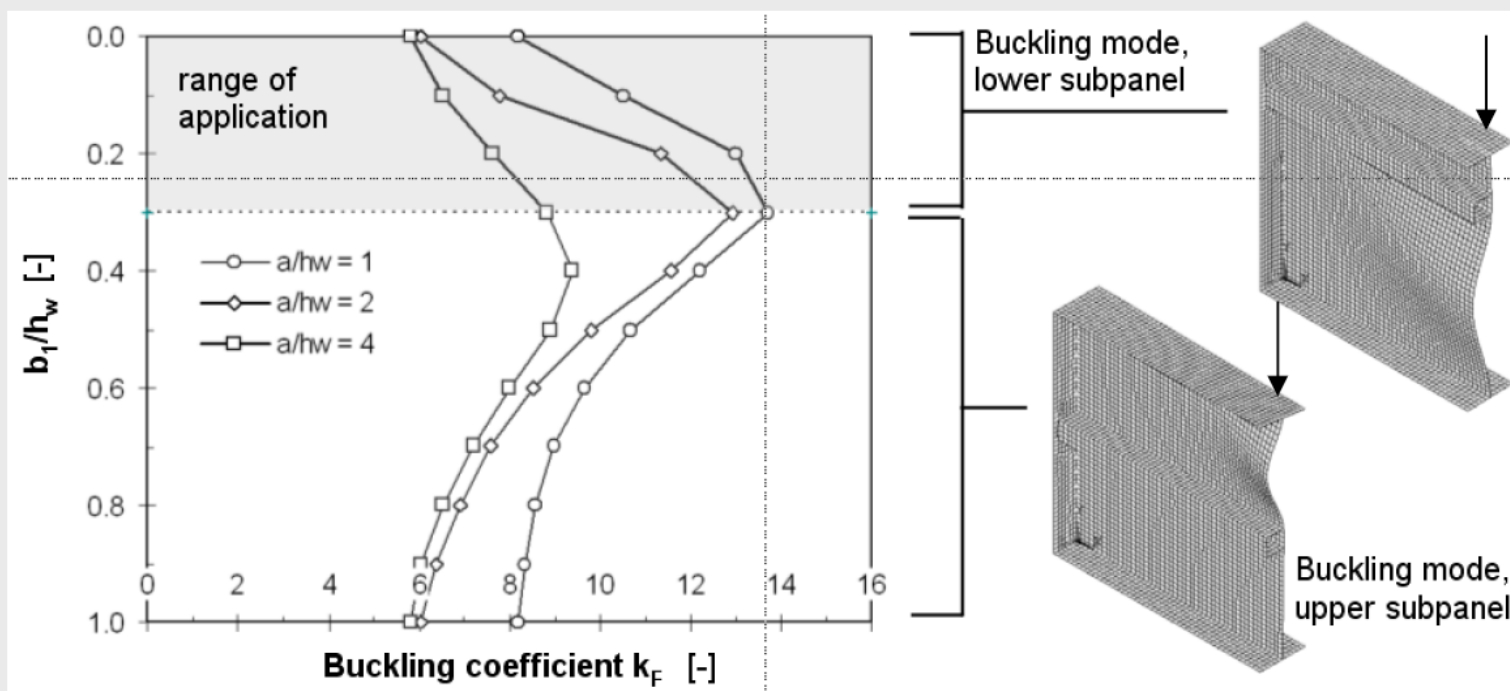
$$\gamma_s \leq \gamma_s^*$$



Kestävyyks poikittaisille kuormille

Determination of the critical load F_{cr}

In EN 1993-1-5 the determination of the critical load of a longitudinally stiffened web is based on the lowest buckling value k_F . In the diagram below buckling values for different panel aspect ratios and stiffener positions are given. Based on that, the formula in EN 1993-1-5 describes only the increasing branch and is therefore limited to a range of application $b_1/h_w \leq 0.3$.



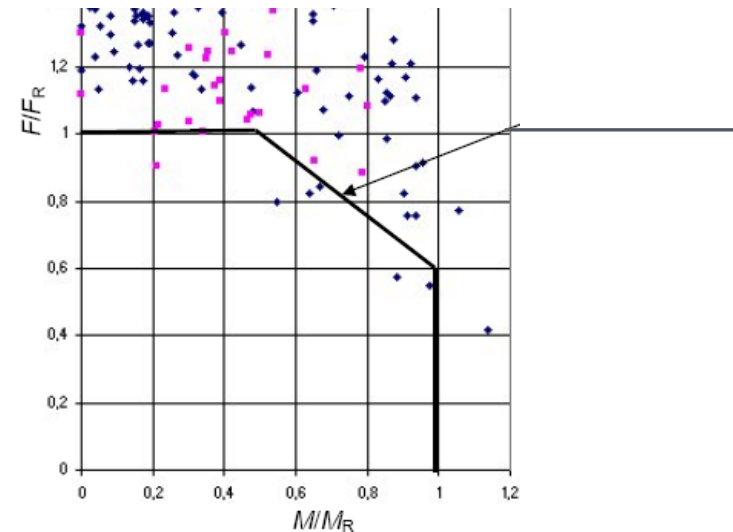
Thus, according to a EN 1993-1-5 calculation, the most advantageous stiffener position is at $b_1/h_w = 0.3$ although this might not be true in reality. In general, the patch loading resistance increases with decreasing distance between stiffener and loaded flange. In the COMBRI project, this paradox has been solved within the COMBRI project, see [7] as well as [5] and [9].

Pistekuorman ja muiden voimasuureiden yhteisvaikutus

Poikittainen voima, taivutusmomentti ja aksiaalinen voima

$$\eta_1 = \frac{\frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} e_N}{f_y W_{eff}}}{\gamma_{M0}} \leq 1,0$$

$$\eta_2 = \frac{\frac{F_{Ed}}{f_{yw} L_{eff} t_w}}{\gamma_{M1}} \leq 1,0$$



- (1) Jos rakenteeseen kohdistuu pistemäinen poikittainen voima, joka vaikuttaa puristetun laipan kautta ja jos rakenteeseen vaikuttaa samanaikaisesti taivutus ja aksiaalinen voima, kestävyys tarkistetaan kohtien 4.6 ja 6.6 mukaan sekä tarkistetaan seuraava yhteisvaikutusehto:

$$\eta_2 + 0,8 \eta_1 \leq 1,4$$

- (2) Jos pistemäinen kuorma vaikuttaa vedetyn laipan kautta, kestävyys tarkistetaan luvun 6 mukaan. Lisäksi tehdään standardin EN 1993-1-1 kohdan 6.2.1(5) mukainen tarkistus.

$$\text{EN 1993-1-1 6.2.1(5)} \Rightarrow \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1$$

Pistekuorman ja muiden voimasuureiden yhteisvaikutus

Poikittainen voima ja leikkausvoima:

- EC 3-1-5 ei vielä sisällä tätä yhteisvaikutustarkistusta, mutta suomen NA:ssa mainitaan seuraavaa:

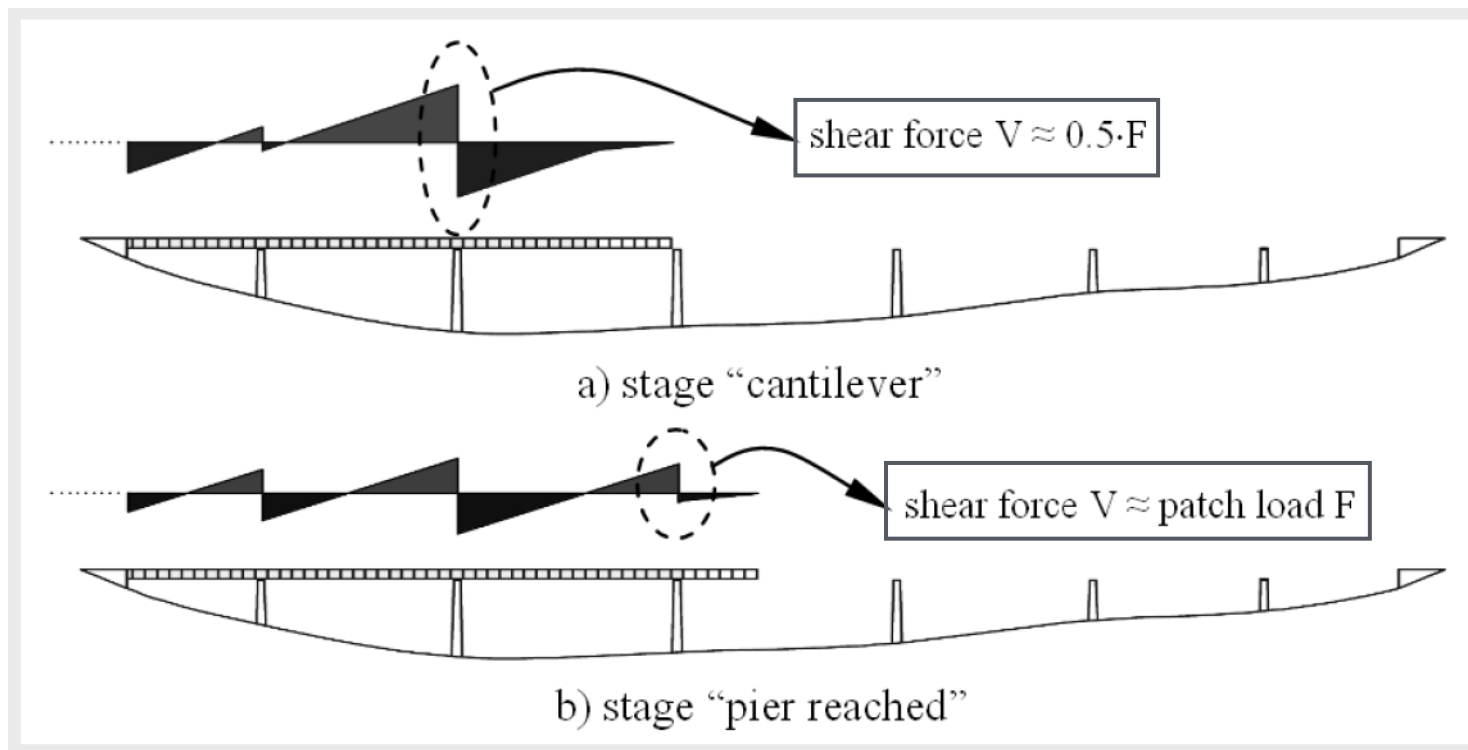
Standardi SFS-EN 1993-1-5 ei käsittele leikkausvoiman ja pistekuorman yhteisvaikutusta. Lisätietoa leikkausvoiman ja pistekuorman yhteisvaikutuksesta esitetään Teräsrakenneyhdistys ry:n normikortissa "Leikkausvoiman ja pistekuorman yhteisvaikutus, No. 20/2008".

$$\left(\frac{V_{Ed} - 0,5F_{Ed}}{V_{b,Rd}} \right)^a + \left(\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \right)^b \leq 1,0 \quad \begin{array}{l} a = 1,6; \\ b = 1,0. \end{array}$$

Menetelmä soveltuu alunperin kaksoissymmetrisille I-profiileille, joiden uuma on jäykistämätön tai uuma on pituussuunnassa jäykistetty ja kun koko profiilin teräslaji on enintään S355. Standardin SFS-EN 1993-1-5 mukaiselle suurelle η käytetään arvoa $\eta = 1$. Menetelmä soveltuu kaikille poikkileikkausluokille. Menetelmä ei sovellu hybridirakenteille.

Pistekuorman ja muiden voimasuureiden yhteisvaikutus

Poikittainen voima ja leikkausvoima...



$$\left(\frac{V_{Ed} - 0,5F_{Ed}}{V_{b,Rd}} \right)^a + \left(\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \right)^b \leq 1,0$$

$a = 1,6$
 $b = 1,0$

Terässauvojen nurjahdus- ja kiepahduskestävyys

Vakiopoikkileikkauksisen sauvan tasonurjahdus → nurjahduskäyrät 3-1-1 / 6.3.1

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}$$

PL 1,2,3

PL 4

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

Table 6.1: Imperfection factors for buckling curves

Buckling curve	a ₀	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{but } \chi \leq 1,0$$

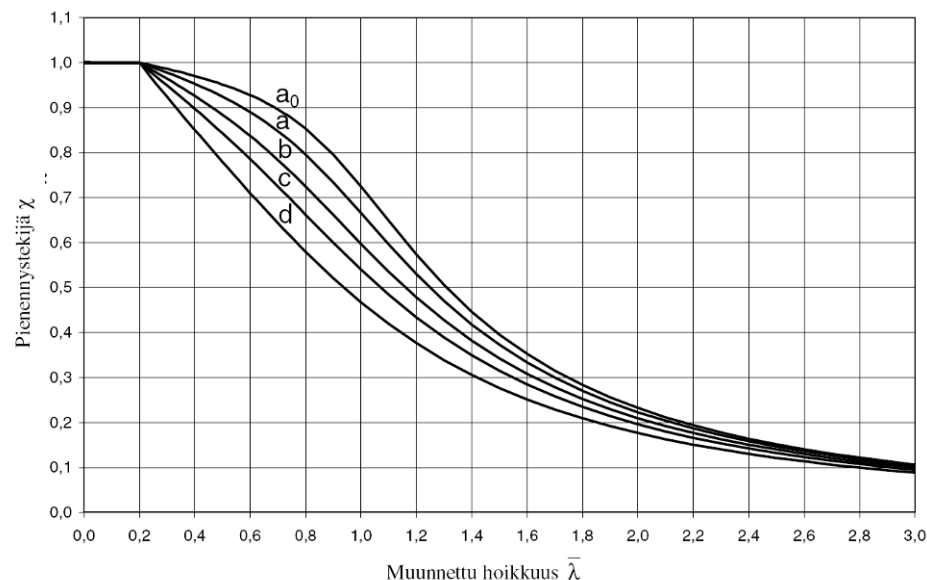
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}}$$

PL 1,2,3 PL 4



$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$$

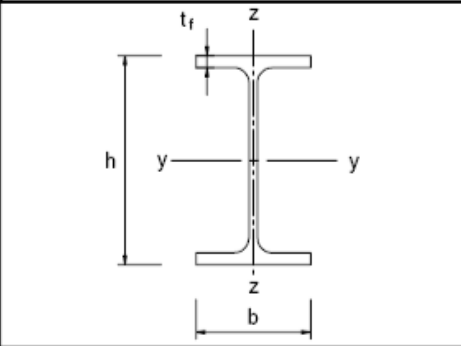
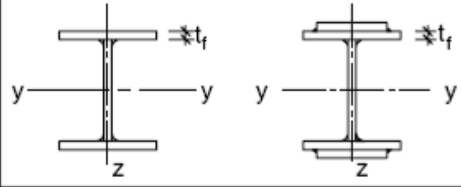

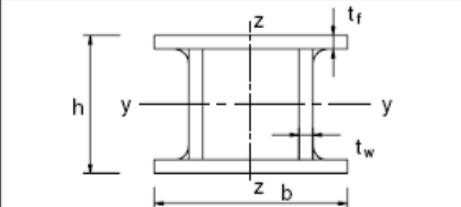
Nurjahduskäyrä riippuu profiilin muodosta ja levypaksuuksista (jännösjännitykset valssauksesta ja hitsauksesta!)

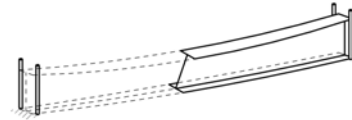


Kuva 6.4: Nurjahduskäyrät

Terässauvojen nurjahdus- ja kiepahduskestävyys

Nurjahduskäyrän valinta dimensioiden ja profiilimuodon perusteella:

Poikkileikkaus	Rajat	Nurjahdus ko. akselin suhteen	Nurjahduskäyrä		
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
 <p>Välssatut profiilit</p>	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$ $40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	a a ₀	
			b c	a a	
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$ $t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	a a
			b c	d c	
 <p>Hitsatut I-profiilit</p>	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	b c	
	$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	c d	c d	
 <p>Rakenneputket</p>	Kuumamuovattu	Kaikki	a	a ₀	
	Kylmämuovattu	Kaikki	c	c	
 <p>Hitsatut koteloprofiilit</p>	Yleensä (poikkeus, ks. alla)	Kaikki	b	b	
	Paksut hitsit: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	Kaikki	c	c	



Vakiopoikkileikkauksisen sauvan kiepahdus → nurjahduskäyrät **3-1-1 / 6.3.1**

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \rightarrow$$

Taulukko 6.3: Kiepahduskäyrien suositeltavat epätarkkuustekijät

Kiepahduskäyrä	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

NA: Noudatetaan taulukossa 6.3 esitettyjä arvoja.

Kiepahdusta ei tarvitse tutkia, jos molemmat ehdot täyttyvät:

$$\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0} \quad \left| \quad \frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}^2 \right.$$

Yleiset kaavat:
3-1-1 / 6.3.2.2

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

Poikkileikkaus	Rajat	Kiepahduskäyrä
Valssatut I-profiilit	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Hitsatut I-profiilit	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Muut profiilit	-	d

Valssatut ja dimensioiltaan vastaavat hitsatut profiilit:
3-1-1 / 6.3.2.3, katso NA:n tarkennukset

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

Taulukko 6.5 (FI) Kiepahduskäyrän valinta poikkileikkauksen mukaan käytettäessä yhtälöä (6.57)

Poikkileikkaus (poikkileikkaus on vakio sauvan pitoudella)	Rajat	Kiepahduskäyrä
Valssatut kaksiossymmetriset I- ja H-profiilit sekä kuumavalssatut rakenneputket	$h/b \leq 2$	b
	$2 < h/b < 3,1$	c
Hitsatut kaksiossymmetriset I- profiilit ja kylmämuovaut rakenneputket	$h/b \leq 2$	c
	$2 < h/b < 3,1$	d

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ but } \chi_{LT} \leq 1,0$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ but } \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1,0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases}$$

Terässauvojen nurjahdus- ja kiepahduskestävyys

Valssattujen ja dimensioiltaan vastaavien hitsattujen profiilien kiepahdus:

3-1-1 / NA:n tarkennukset

6.3.2.3 Valssattujen ja vastaavien hitsattujen profiilien kiepahduskäyrät

6.3.2.3(1)

a) Valssatuille kaksoissymmetrisille vakio poikkileikkauksisille I- ja H-profiileille ja kuumavalssatuille ja kylmämuokatuille rakenneputkille käytetään seuraavia arvoja:

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \quad (6.3.2.3(1)) \text{ (FI)}$$

$$\beta = 0,75. \quad (6.3.2.3(2)) \text{ (FI)}$$

b) Hitsatuille vakio poikkileikkauksisille kaksoissymmetrisille I- profiileille käytetään seuraavia arvoja:

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,2 \quad (6.3.2.3(3)) \text{ (FI)}$$

$$\beta = 1,0. \quad (6.3.2.3(4)) \text{ (FI)}$$

Molemmissa tapauksissa kiepahduskäyrä valitaan taulukosta 6.5 (FI)

Taulukko 6.5 (FI) Kiepahduskäyrän valinta poikkileikkauksen mukaan käytettäessä yhtälöä (6.57)

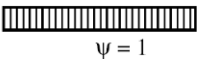







Poikkileikkaus (poikkileikkaus on vakio sauvan pituudella)	Rajat	Kiepahduskäyrä
Valssatut kaksoissymmetriset I- ja H-profiilit sekä kuumavalssatut rakenneputket	$h/b \leq 2$ $2 < h/b < 3,1$	b c
Hitsatut kaksoissymmetriset I- profiilit ja kylmämuovatut rakenneputket	$h/b \leq 2$ $2 < h/b < 3,1$	c d

Kaikissa muissa tapauksissa käytetään kohdan 6.3.2.2 mukaisia sääntöjä.

Kiepahdus, yksinkertainen menetelmä = puristetun laipan sivusuuntainen nurjahdus

- Sivuttaistukien väli = L_c
- Puristussauvan poikkileikkaus = laippa + kolmannes puristetusta uumasta

Taulukko 6.6: Korjaustekijä k_c

Momenttipinnan muoto	k_c
 $\psi = 1$	1,0
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
	0,94
	0,90
	0,91
	0,86
	0,77
	0,82

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1}$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\epsilon$$

$$i_{f,z} = \sqrt{\frac{I_{eff,f}}{A_{eff,f} + \frac{1}{3}A_{eff,w,c}}}$$

Jos seuraava hoikkuusraja ei ylitä, laipan nurjahdusta ei tarvitse tutkia:

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} \leq \bar{\lambda}_{c0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}}$$

$$M_{c,Rd} = W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

3-1-1 / NA:

6.3.2.4(1)B, Huomautus 2B

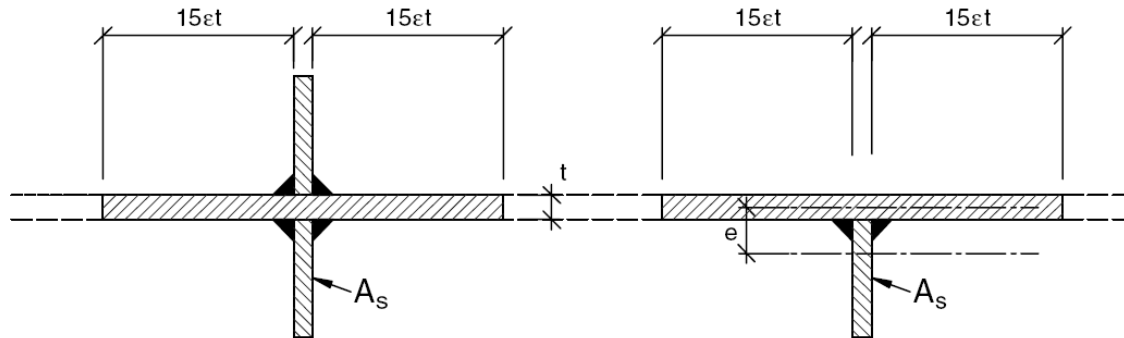
Käytetään raja-arvoa $\bar{\lambda}_{c0} = \bar{\lambda}_{LT,0} + 0,1$

$$M_{b,Rd} = k_{fl} \chi M_{c,Rd} \text{ but } M_{b,Rd} \leq M_{c,Rd}$$

3-1-1 / NA: 6.3.2.4(2)B, Huomautus B
Käytetään arvoa $k_{fl} = 1,10$.

Jäykisteiden lujuus- ja jäykkyyksivaatimukset

Jäykisteen poikkileikkaus:

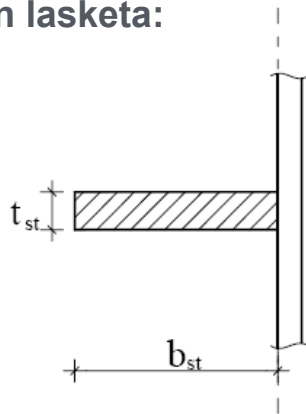


Kuva 9.1 Jäykisteen tehollinen pinta-ala

Vääntönurjahduksen estäminen:

Ellei tarkemmin lasketa:

$$\frac{I_T}{I_p} \geq 5,3 \frac{f_y}{E}$$



$$I_p = \frac{b_{st}^3 t_{st}}{3} + \frac{t_{st}^3 b_{st}}{12} \approx \frac{b_{st}^3 t_{st}}{3}$$

$$I_t = \frac{b_{st} t_{st}^3}{3}$$

$$\frac{I_t}{I_p} = \left(\frac{t_{st}}{b_{st}} \right)^2 \geq \frac{5,3 f_y}{E}$$

$$\frac{b_{st}}{t_{st}} \leq \sqrt{\frac{E}{5,3 f_y}} = \begin{cases} 13,0 \text{ (S235)} \\ 10,5 \text{ (S355)} \end{cases}$$

Tarkemmin laskien:

$$\sigma_{cr} \geq \theta f_y$$

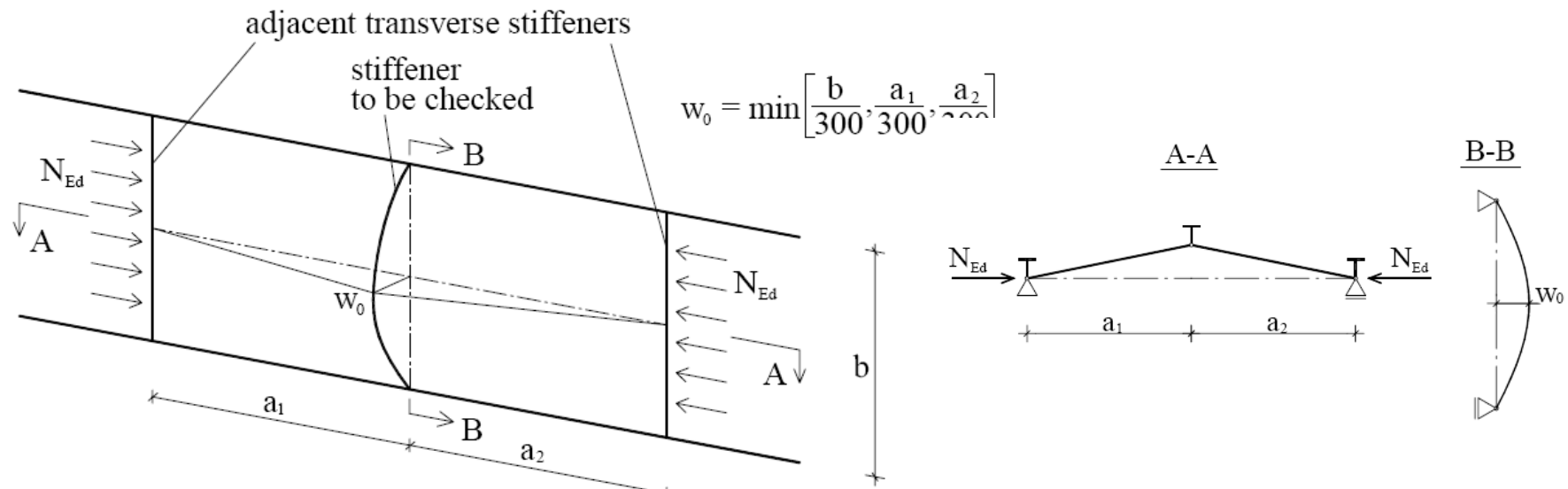
$$\theta = 6$$

Poikittaiset jäykiksi oletetut välijäykisteet:

$$\sigma_{\max} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}}, \quad w \leq \frac{b}{300}$$

$$\begin{aligned} \text{kun } a/h_w < \sqrt{2}: \quad I_{st} &\geq 1,5 h_w^3 t^3 / a^2 \\ \text{kun } a/h_w \geq \sqrt{2}: \quad I_{st} &\geq 0,75 h_w t^3 \end{aligned}$$

3-1-5 / 9.3.3 (3)



- (3) Poikittaisjäykisteeseen tulee kestää poikkeamista aiheutuvat voimat, jotka aiheutuvat viereisistä puristetuista levykentistä olettaen, että molemmat viereiset poikittaisjäykisteet ovat jäykkiä ja suoria sekä ulkoiset kuormat ja kohdan 9.3.3(3) mukaisen huomautuksen mukaiset aksiaaliset voimat. Puristettuja levykenttiä ja pituusjäykisteitä käsitellään vapaasti tuettuina poikittaisjäykisteiden kohdilla.

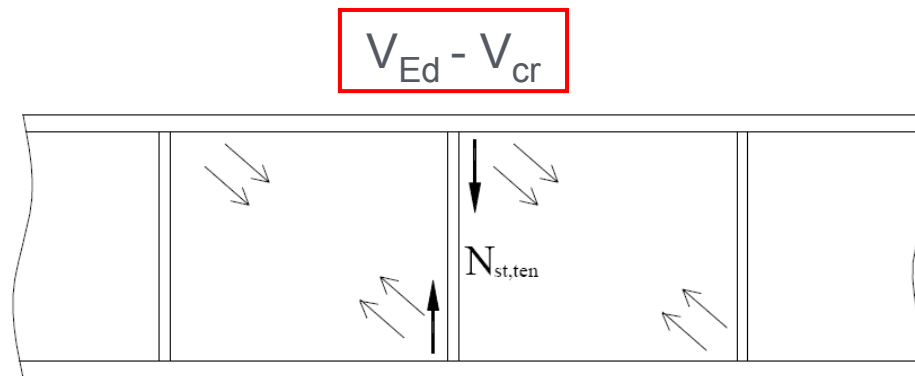
Poikittaiset jäykiksi oletetut välijäykisteet...

3-1-5 / 9.1 (3)

Poikittaisjäykisteeseen vaikuttavaksi aksiaaliseksi voimaksi valitaan leikkauksesta aiheutuvan resultoivan voiman [ks. 9.3.3(3)] ja ulkoisten kuormien summa.

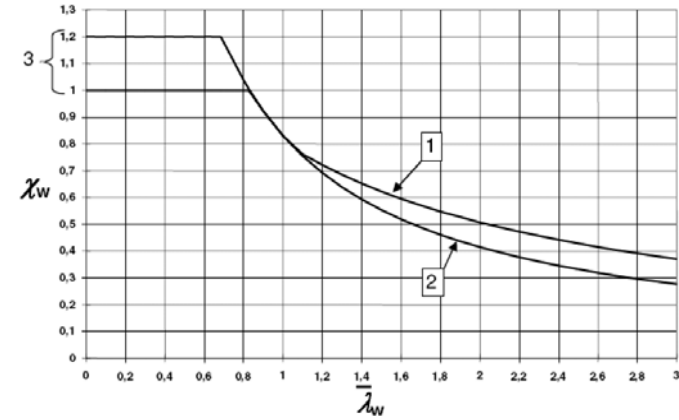
3-1-5 / 9.3.3 (3)

Huom. Jäykkien välijäykisteiden kestävyys voidaan mitoittaa aksiaaliselle mitoitusvoimalle, jonka suuruus on $\left(V_{Ed} - \frac{1}{\lambda_w^2} f_{yw} h_w t / (\sqrt{3} \gamma_{M1}) \right)$ kohdan 9.2.1(3) mukaan. Jos leikkausvoimat vaihtelevat, tarkastus tehdään leikkausvoimalle, joka vaikuttaa etäisyydellä $0,5h_w$ sen levykentän reunasta, jossa on suurin leikkausvoima.



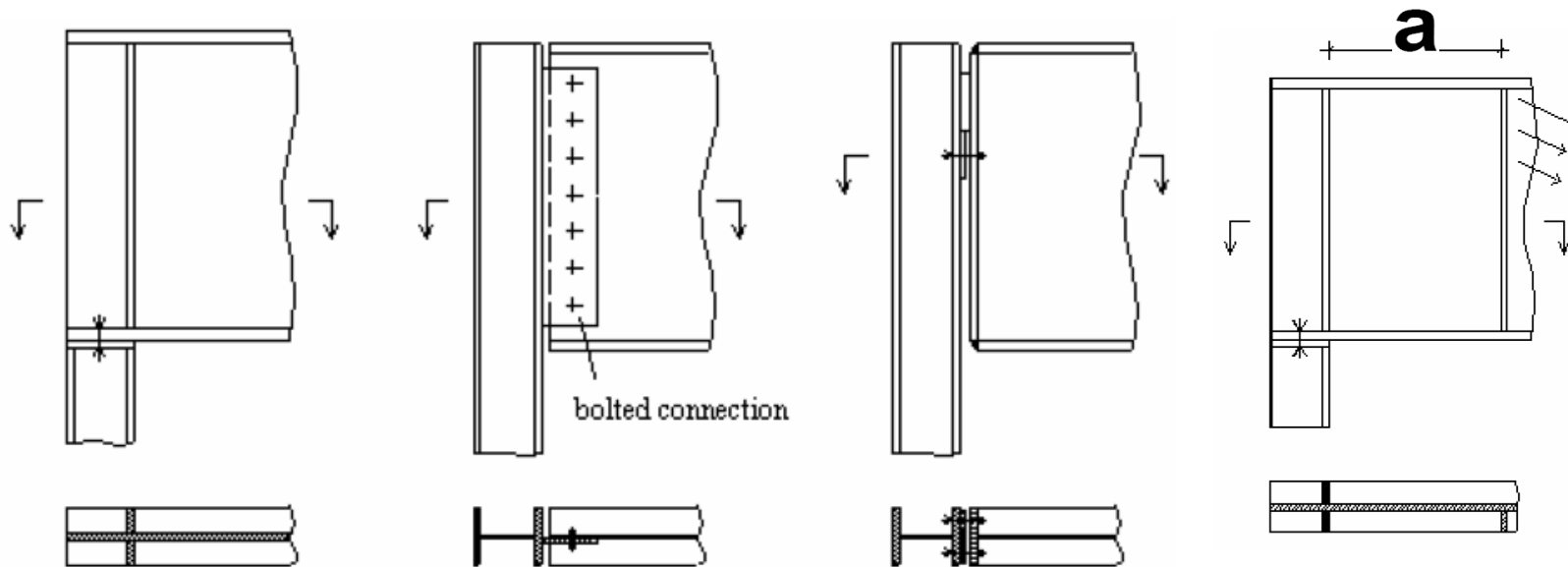
Jäykisteet päätytuilla:

Päätyjen pystyjäykisteet tulee mitoittaa sen mukaisesti, miten uuman leikkaus(lommahdus)kestävyys on laskettu!



9.3.2 Ei-jäykkänä päätytukina toimivat jäykisteet

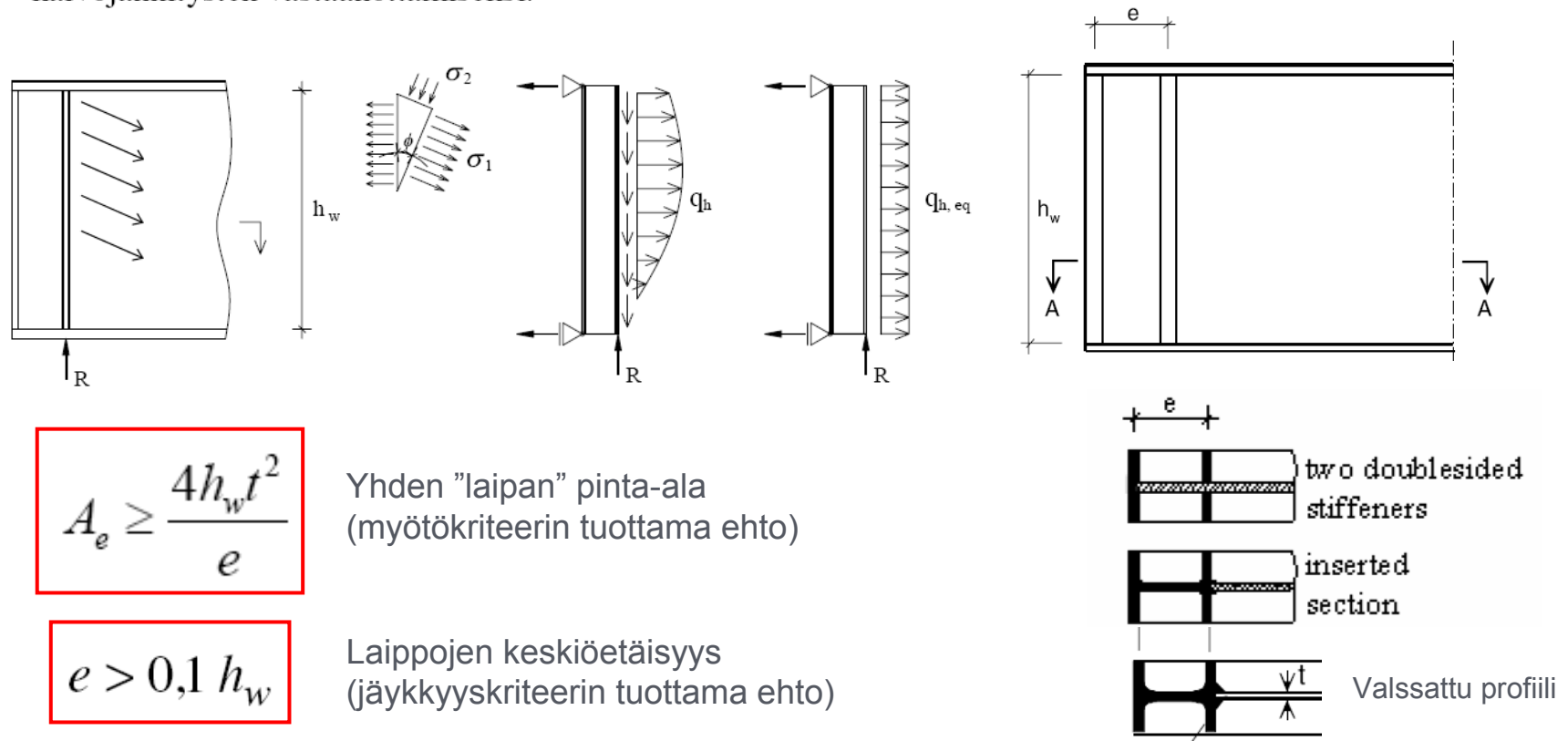
- (1) Ei-jäykkä päätytuki voi muodostua kuvan 5.1(c) mukaisesta yksittäisestä kaksipuolisesta jäykisteestä. Se voi toimia kantavana jäykisteenä vastustaen kannattimen tukireaktiota (ks. kohta 9.4).



Jäykisteet päätytuilla...


9.3.1 Jäykkä päätytuki

- (1) Jäykkä päätytuki (ks. kuva 5.1) toimii tukireaktiota vastaanottavana jäykisteenä tuella (ks. kohta 9.4) ja se mitoitetaan lyhyenä palkkina uuman tason suuntaisten pituussuunnassa vaikuttavien kalvojäännitysten vastaanottamiseksi.



Hyvää lueskeltavaa:


JRC Scientific and Technical Reports



COMMENTARY AND WORKED EXAMPLES TO EN 1993-1-5 "PLATED STRUCTURAL ELEMENTS"




B. Johansson, R. Maquoi, G. Sedlacek, C. Müller, D. Beg

Background documents in support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes



Joint Report
Prepared under the JRC – ECCS cooperation agreement for the evolution of Eurocode 3 (programme of CEN / TC 250)

First Edition, October 2007
EUR 22898 EN - 2007



COMBRI DESIGN MANUAL

Part I: Application of Eurocode rules



A project carried out with a financial grant from the Research Fund for Coal and Steel (RFCS) of the European Community.

Hyvää lueskeltavaa:



Sétra service d'Études techniques des routes et autoroutes


july 2007

Guidance book

Eurocodes 3 and 4

Application to steel-concrete composite road bridges




Liberté • Égalité • Fraternité
REPUBLIQUE FRANÇAISE
ministère de l'Écologie
du Développement
et de l'Aménagement
durables



EUROCODES

Background and Applications

"Dissemination of information for training" workshop

18-20 February 2008

Brussels

EN 1994

Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures

Organised by
European Commission: DG Enterprise and Industry, Joint Research Centre

with the support of
CEN/TC250, CEN Management Centre and Member States

