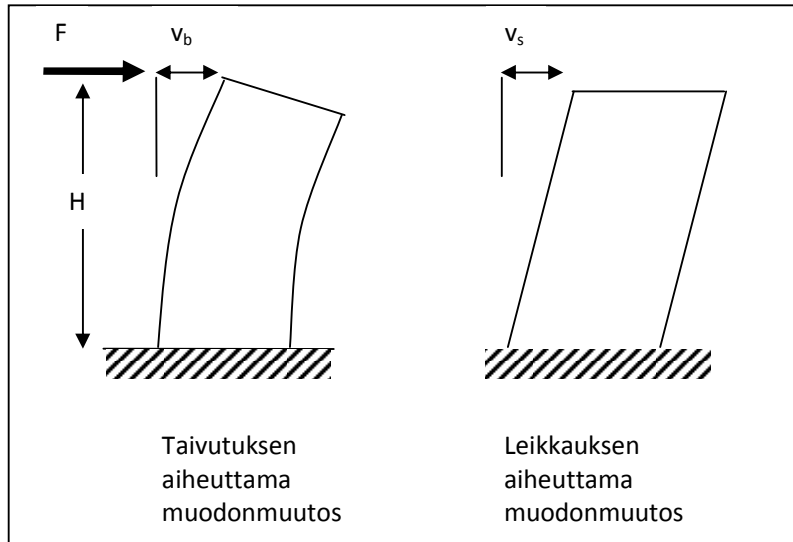


### 3 Laskentaperiaatteet

#### Seuraavassa käsitellään kuormien jakoa eri tilanteissa

Rakennuksen vaakakuormat, tuulesta aiheutuvat ja pystykuormien vinouden tai epäkeskisyyden (esimerkiksi lippurakenteet) aiheuttamien vaakakomponenttien jakaminen jäykistäville pystyrakenteille tapahtuu periaatteella, että vaakasuorat tasot toimivat jäykkinä levyinä ja jakavat voimat seinien kesken jäykkyyksien suhteessa.

#### Maston jäykkyys



Kuva 3.1 Mastoseinän taipuma

Siirtymien arvoiksi saadaan yleisimmässä tapauksessa pistekuorman kuormittamalle mastolle

$$v_b = F \frac{H^3}{3EI} \quad (3.1)$$

$$v_s = F \kappa \frac{H}{GA} \quad (3.2)$$

missä

E on maston kimmomoduli

I on mastoseinän jäyhyys

A mastoseinän poikkipinta-ala

Kokonaissiirtymä

$$v_b = v_b + v_s \quad (3.3)$$

Jäykkyydeksi saadaan siis

$$1/k = \frac{H^3}{3EI} + \kappa \frac{H}{GA} \quad (3.4)$$

x- ja y-suunnissa jäykkyydet ovat

$$1/k_x = \frac{H^3}{3EI_y} + \kappa_x \frac{H}{GA} \quad (3.5)$$

$$1/k_y = \frac{H^3}{3EI_x} + \kappa_y \frac{H}{GA} \quad (3.6)$$

Leikkausmuodonmuutoksen kertoimet voidaan laskea kaavoista

$$\kappa_x = \frac{A}{I_y^2} \int \frac{S(x)^2}{t(x)} dx \quad (3.7)$$

$$\kappa_y = \frac{A}{I_x^2} \int \frac{S(y)^2}{t(y)} dy \quad (3.8)$$

missä

$S(x)$  on staattinen momentti mastoikkileikkauksen painopisteen suhteen

$t(x)$  on poikkileikkauksen paksuus

### Kuormitus ei aiheuta kiertymää

Näin tapahtuu, kun seinät ovat vaikuttavan voiman suunnassa sijoitettu symmetrisesti niin, että voima ei aiheuta vaakatasoihin kiertymää. Seinälle tulevat osuus kokonaiskuormasta voidaan laskea kaavasta

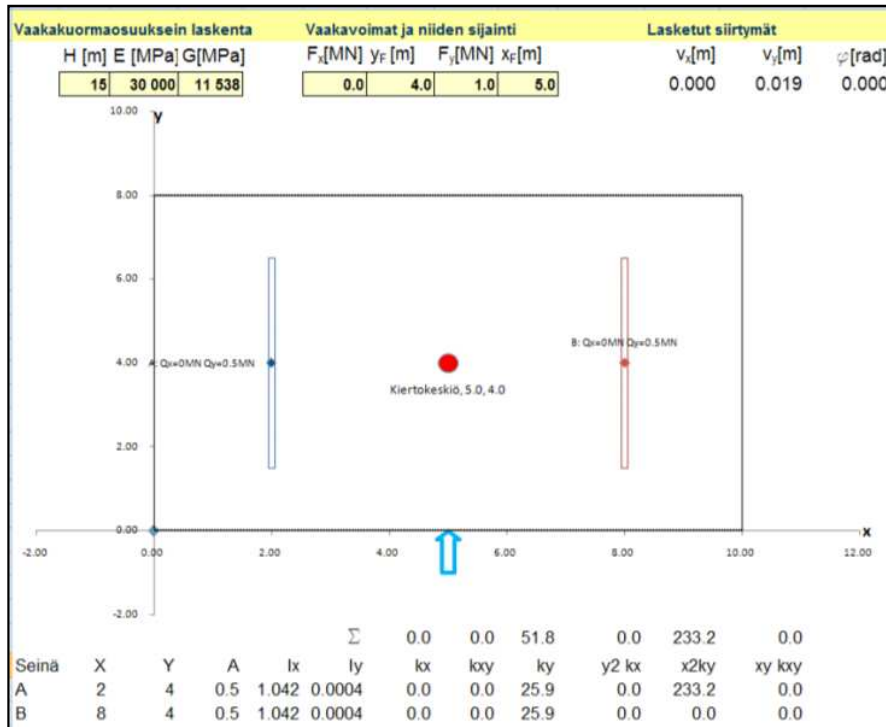
$$Q_y = \frac{k_y}{\sum k_y} F_y \quad (3.9)$$

missä

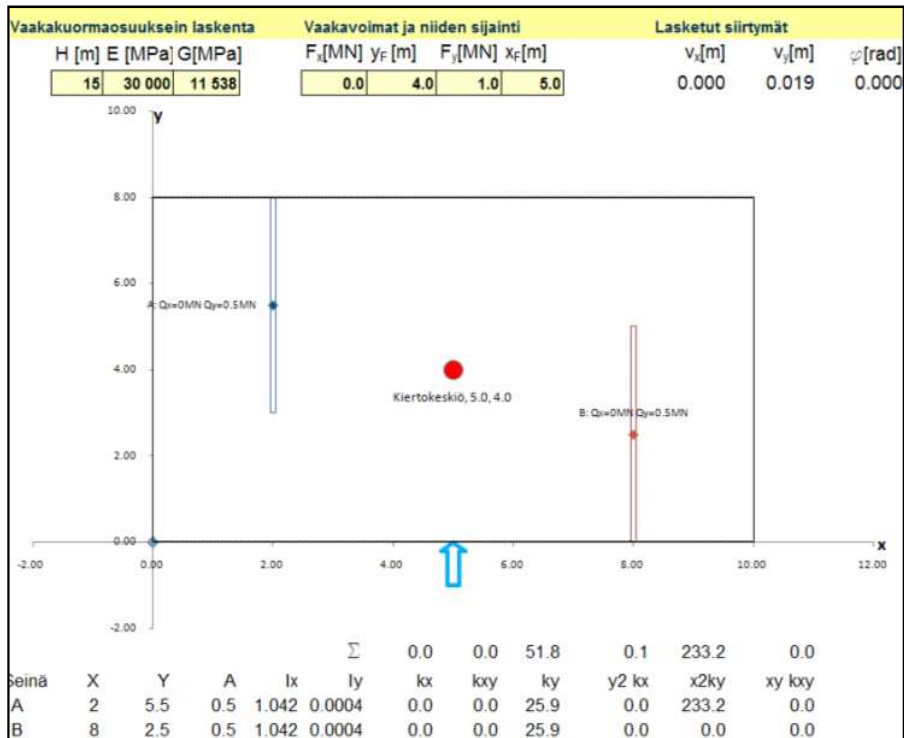
$Q_y$  on kyseisen seinän  $y$ -akselin suunnassa ottama osuus kokonaisvaakavoimasta  $F_y$

$k_y$  on seinän jäykkyyttä kuvaava termi, voima, jolla seinä saa yksikön suuruisen siirtymän

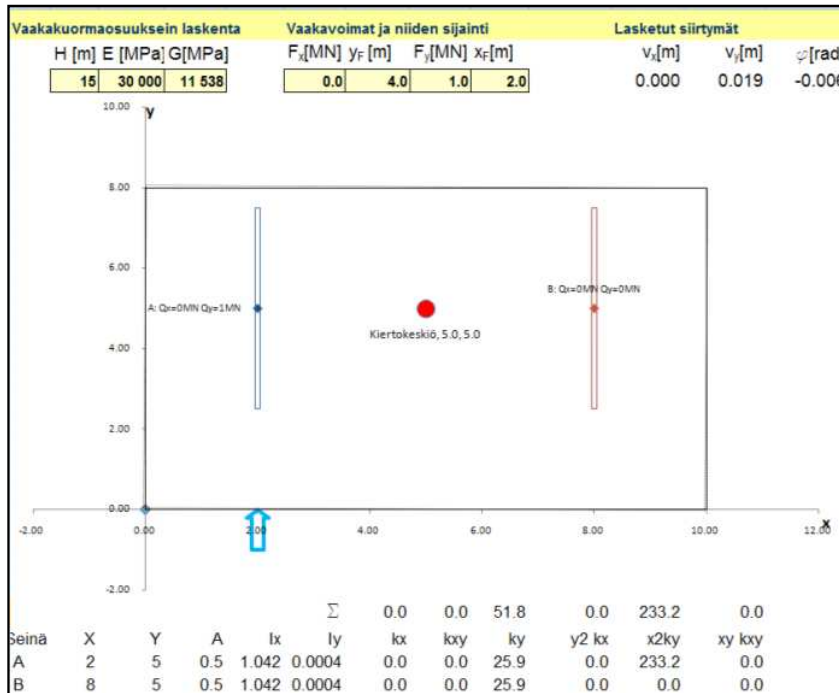
$\sum k_y$  on jäykistävien seinien jäykkyyksien summa



Kuva 3.1 Voimien jakautuminen staattisesti määrättyssä systeemissä

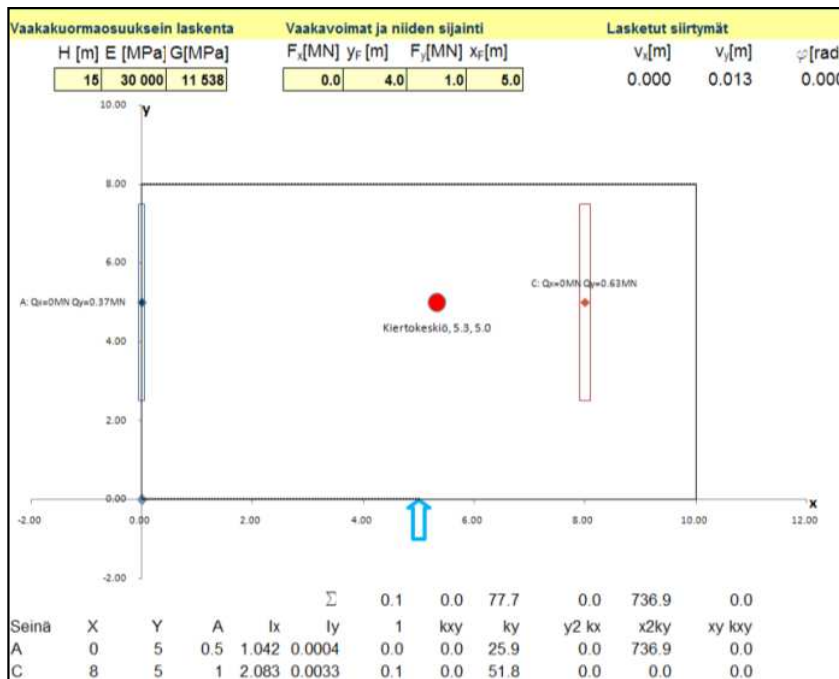


Kuva 3.2 Seinien sijainti voi siirtyä voiman suuntaisella linjalla, ilman että seinien ottamat osuudet vaakavoimasta muuttuvat.



Kuva 3.3 Voimat jakautuvat samalla tavalla kuin kaksitukisessa palkissa.

Kiertokeskiön paikka on riippuvainen seinien jäykkyyksistä. Se siirtyy jäykkyydeltään suuremman seinän suuntaan. Staattisesti määrättyssä systeemissä voimien jakauma ei kuitenkaan muutu.



Kuva 3.4 Staattisesti määrättyssä systeemissä voimien jakauma on edelleen kuin kaksitukisessa palkissa seinien jäykkyyseroista huolimatta.

## Kuormitus aiheuttaa kiertymän

Silloin, kun jäykistävien pystyrakenteiden sijainti ei ole täysin symmetrinen kuormaresultantin suhteen, rakennus saa myös kiertymän vaakavoiman epäkeskisyydestä kiertokeskiön suhteen.

Rakennuksen jäykistysysteemiin vaikuttaa nyt momentti

$$M = F_y \cdot x_1 - F_x \cdot y_1 \quad (3.10)$$

missä

$F_y$  on vaakavoimien resultantti x-akselin suuntaan

$F_x$  on vaakavoimien resultantti y-akselin suuntaan

$x_1$  on voimaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä x-suunnassa

$y_1$  on voimaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä y-suunnassa

Kun yksittäisten jäykistysseinien kiertokeskiöt sijaitsevat seinien painopisteissä, rakennuksen kiertokeskiön paikka voidaan laskea seuraavasta kaavasta.  $x'$  ja  $y'$  alkuperäisessä koordinaatistossa.

$$\bar{X} = \frac{\sum k_y x'}{\sum k_y}, \quad \bar{Y} = \frac{\sum k_x y'}{\sum k_x} \quad (3.11)$$

Kiertokeskiön koordinaatistossa ulkoisten kuormien ja sisäisten voimien tasapainoehdot ovat

$$\begin{aligned} F_x &= v_x \sum k_x \\ F_y &= v_y \sum k_y \\ M &= \varphi \left[ \sum T_{xy} + \sum k_x y^2 + \sum k_y x^2 \right] \end{aligned} \quad (3.12)$$

missä

$v_x$  on siirtymä x-suunnassa

$v_y$  on siirtymä y-suunnassa

$\varphi$  on kiertymä

$T_{xy}$  on vääntöjäykkyys, osamastolle kiertymästä  $\varphi = 1$  aiheutuva vääntömomentti

Yllä olevista tasapainoehdoista voidaan ratkaista siirtymätila

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{F_x}{\sum k_x} \\ v_y &= \frac{F_y}{\sum k_y} \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\varphi = \frac{M}{\sum T_{xy} + \sum k_x y^2 + \sum k_y x^2}$$

Suorien mastoseinien tapauksessa kiertymän kaavan osuus  $T_{xy}$  jää pieneksi ja voidaan unohtaa laskemasta.

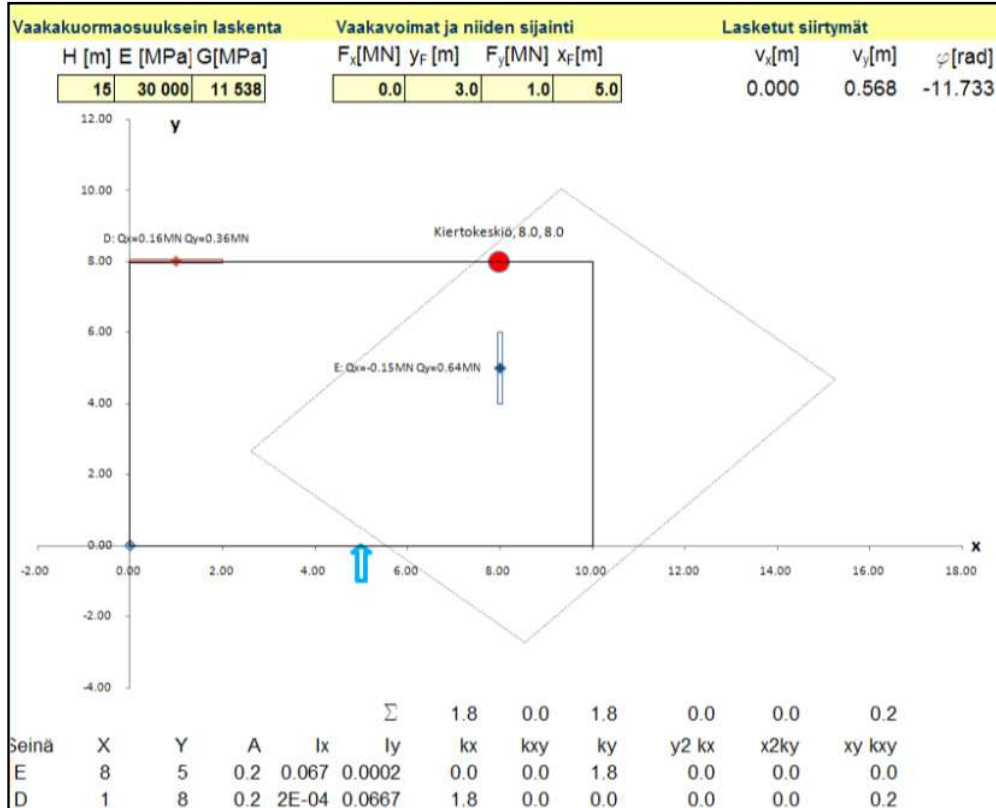
Osamastojen kuormitukset saadaan siirtymätilan perusteella

$$\begin{aligned} Q_x &= k_x v_x - k_x y \varphi \\ Q_y &= k_y v_y + k_y x \varphi \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$M = \varphi T_{xy}$$

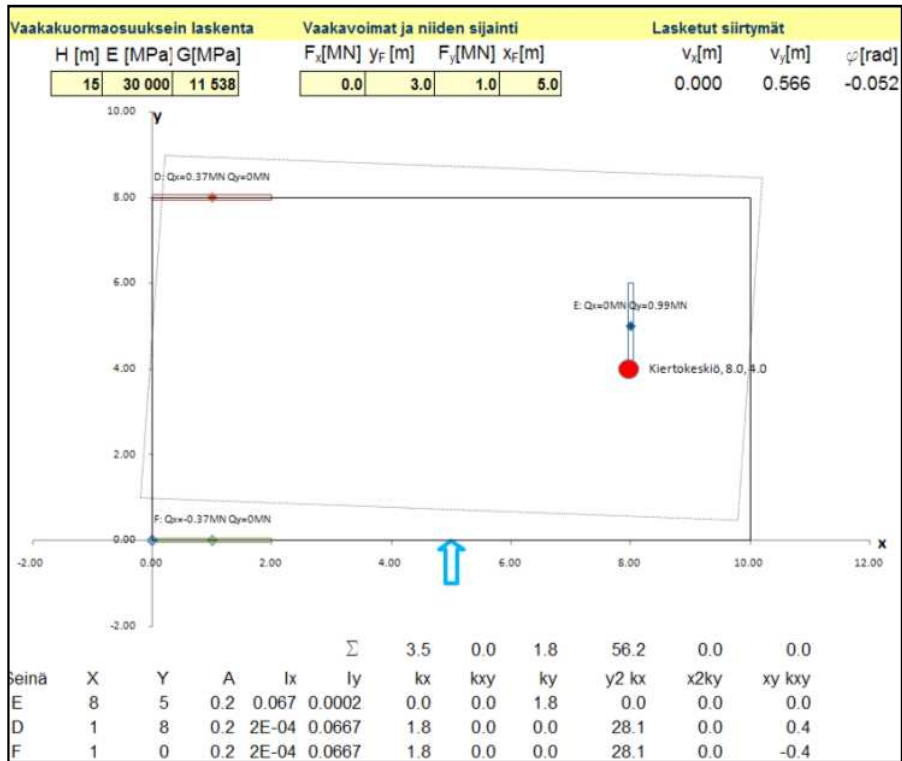
Suorien mastoseiniin tapauksessa kiertymän kaavan osuus  $T_{xy}$  jää pieneksi ja voidaan unohtaa laskemasta.

### Laskentaesimerkkejä kiertyvästä jäykistysysteemistä



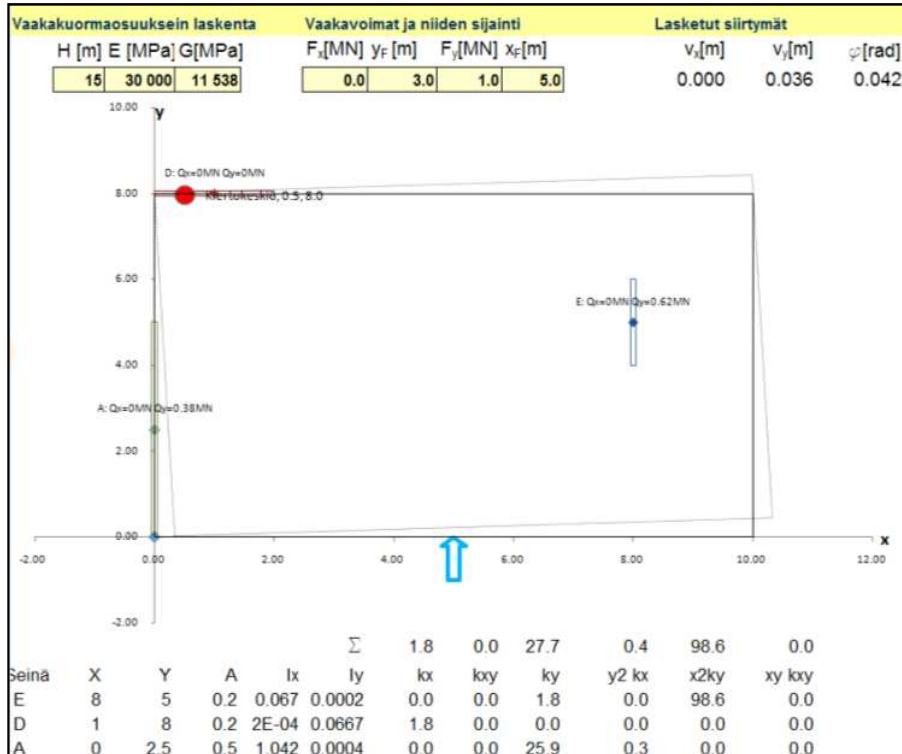
Kuva 3.5 Seinien kiertoakeskiö asettuu seinälinjojen jatkeiden leikkauspisteeseen.

Kahdella seinällä ei voida jäykistää rakennetta riittävästi vaan systeemin vääntöjäykkyys jää lähes olemattomaksi. Syntyvä vähäinen jäykkyys seuraa seinien heikomman akselin jäykkyyksistä.



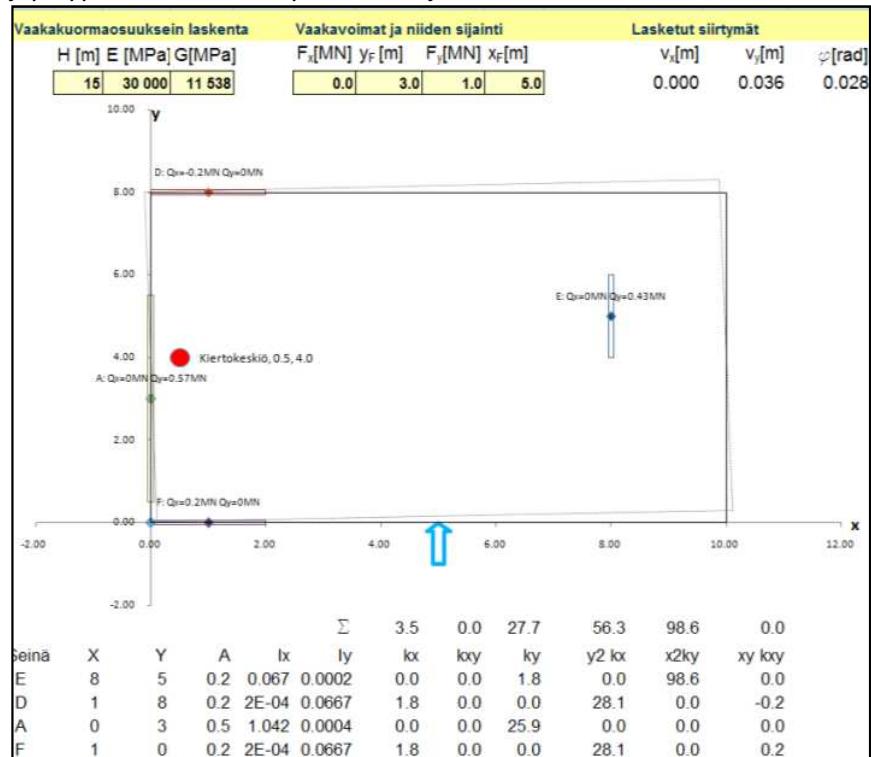
Kuva 3.6 Kolmas seinä jäykistää systeemin, y-suuntainen seinä ottaa kokonaisuudessaan F<sub>y</sub>-voiman, x-suuntaiset seinät ottavat kiertymän vaikutuksen.

Yllä olevan seinäsystemin voimajakauma ja kiertymäjäykkyys eivät enää ole epämääräiset, mutta voiman suuntaan syntyvä siirtymä on niin suuri, että systeemiä voi parantaa.

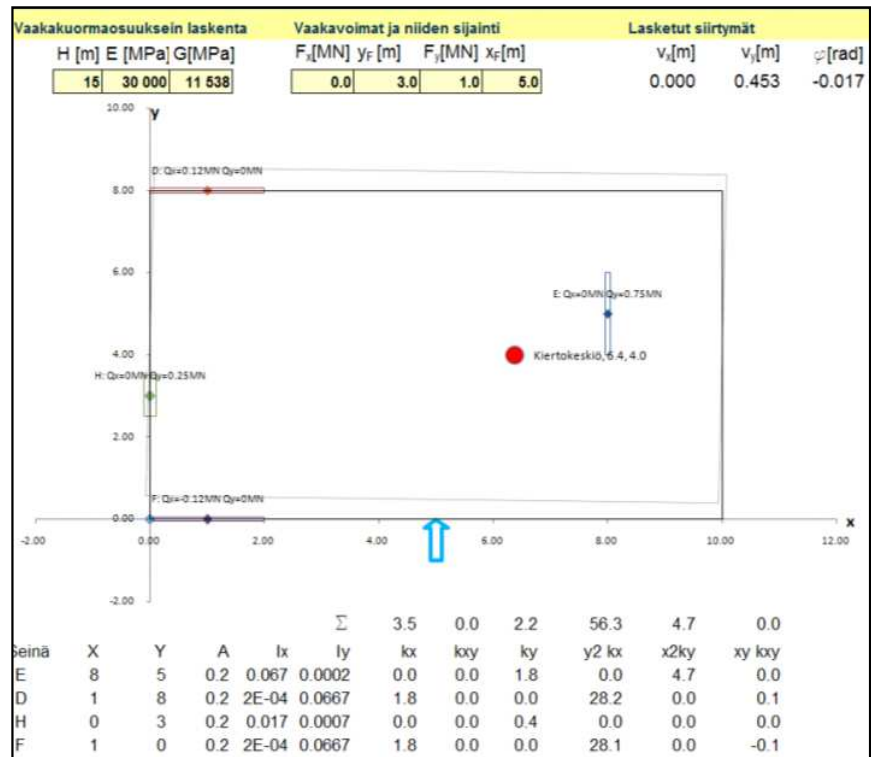


Kuva 3.7 Kolmannen seinän sijoittaminen voiman suuntaan parantaa tilannetta. Vaakavoima jakautuu y-seinien kesken kuten kaksitukisessa palkissa.

Kun seinä on neljä tai enemmän, systeemi ei ole enää staattisesti määrätty. Seinien jäykkyydet vaikuttavat myös voimien jakaumaan.



Kuva 3.8 Kiertokeskiön paikka ja voimien jakauma riippuvat seinien keskinäisistä jäykkyyksistä.



Kuva 3.9 Y-suuntaiset seinät ottavat edelleen F<sub>y</sub>-voiman, mutta jakauma muuttuu seinien jäykkyyksien suhteessa.



## Epäsymmetriset osamastot

Edellä esitetty koski seinämastoja, joilla poikkileikkauksen pääjäyhyysakselisto yhtyy rakennuksen pääsuuntien kanssa.

Kun osamaston poikkileikkauksen pääakselisuunnat (pääjäyhyysuunnat) eivät yhdy koko rakennuksen poikkileikkauksen pääsuuntiin  $x$  ja  $y$  eivätkä siis kuormien  $F_x$  ja  $F_y$  vaikutussuuntiin, on edellä esitettyjen jäykkyyksien  $k_x$  ja  $k_y$  ja lisäksi otettava mukaan kolmas jäykkyystekijä  $k_{xy}$ .

Kun tällaista, esim. L- tai toispuolista T- poikkileikkausta, jonka seinät siis ovat  $x$ - tai  $y$ - akselien suuntaiset, mutta jolla ei ole  $x$ - tai  $y$ - akselin suuntaista symmetria-akselia, kuormitetaan  $x$ -suuntaisella kuormituksella, se saa suuntaisen siirtymän lisäksi myös siirtymän  $y$ -suunnassa.  $y$ -suuntaisen siirtymän estämiseksi täytyy poikkileikkaukseen vaikuttaa myös  $y$ -suunnassa voima.

Jäykkyys määritetään nyt siten, että se on suuruudeltaan sellainen poikkileikkaukseen vaikuttava  $y$ -suuntainen voima, että poikkileikkaus saa  $x$ -suuntaisen voiman johdosta vain  $x$ -suuntaisen siirtymän = 1. Voimille  $k_{xy}$ , ja pätee:  $k_{xy} = k_{yx}$ . Jos poikkileikkauksen pääjäyhyysuunnat yhtyvät pääsuuntiin  $x$  ja  $y$ , niin  $k_{yx} = k_{xy} = 0$ . Jos rakennuksen osamastojen joukossa on edellä mainitunlaisia pääsuunnissa  $x$  ja  $y$  epäsymmetrisiä poikkileikkauksia, täytyy näille laskea jäykkyyksien  $k_x$  ja  $k_y$  lisäksi jäykkyys  $k_{xy}$ . Tässä tapauksessa jäykkyyksien laskeminen on hieman mutkikkaampaa kuin edellä symmetrisillä poikkileikkauksilla. Periaatteessa laskeminen tapahtuu kahdella koordinaatiston kierrolla siten, että ensin haetaan epäsymmetrisen poikkileikkauksen pääjäyhyysuunnat  $X$  ja  $Y$ , jotka poikkeavat kulman  $\alpha$  verran rakennuksen pääsuunnista  $x$  ja  $y$ . Sitten haetaan pääsuunnissa  $X$  ja  $Y$  vaikuttavia voimia  $F_x$  ja  $F_y$  ja vastaava voimapari  $F_x$  ja  $F_y$  ja kierretyissä koordinaatistossa ja edellä esitettyllä tavalla voimia vastaavat siirtymät  $v_x$  ja  $v_y$  tässä koordinaatistossa. Sen jälkeen palataan takaisin  $x$ ,  $y$  koordinaatistoon ja määrätään siirtymien  $v_x$  ja  $v_y$  vastaavat siirtymät ja  $x$ ,  $y$  koordinaatistossa. Asettamalla nyt vuorotellen siirtymille ja arvojarit ja saadaan siirtymien lausekkeissa esiintyvien voimien ja ratkaisuna jäykkyydet  $k_x$ ,  $k_{xy}$  ja  $k_y$ .

Tässä tapauksessa koko systeemin kiertokeskiö  $(\bar{X}, \bar{Y})$  voidaan ratkaista yhtälöistä

$$\sum k_x y' - \bar{Y} \sum k_x - \sum k_{xy} x' + \bar{X} \sum k_{xy} = 0 \quad (3.15)$$

$$\sum k_{xy} y' - \bar{Y} \sum k_{xy} - \sum k_y x' + \bar{X} \sum k_y = 0$$

Siirtymätilan ratkaisu saadaan taas tasapainoyhtälöistä

$$\begin{aligned} F_x &= v_x \sum k_x + v_y \sum k_{xy} \\ F_y &= v_x \sum k_{xy} + v_y \sum k_y \\ M &= \varphi \left[ \sum T_{xy} + \sum k_x y^2 - 2 \sum k_{xy} xy + \sum k_y x^2 \right] \end{aligned} \quad (3.16)$$

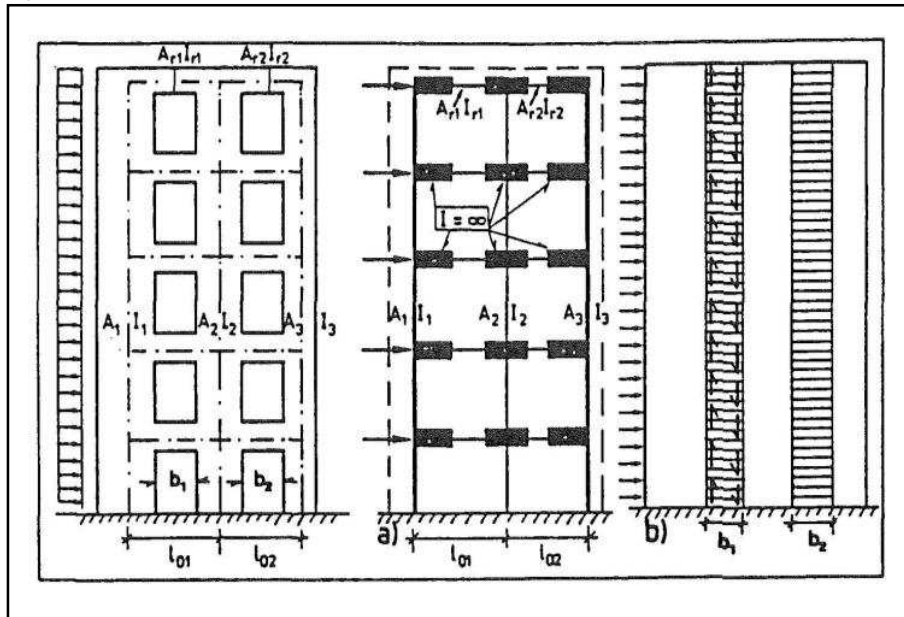
Osamastojen kuormitukset saadaan siirtymätilan perusteella

$$\begin{aligned} Q_x &= k_x v_x + k_{xy} v_y - k_x y \varphi + k_{xy} x \varphi \\ Q_y &= k_{xy} v_x + k_y v_y - k_{xy} y \varphi + k_y x \varphi \\ M &= \varphi T_{xy} \end{aligned} \quad (3.17)$$

## Seinien heikennysten tarkastelu

Aukolliset mastoseinät ovat tavallisimmin yhden tai useamman pystysuoran aukkorivin sisältäviä seiniä (kuva 3.10). Tällaisen seinän staattista toimintaa ulkoisten vaaka- ja pystykuormien alaisena voidaan arvioida yksinkertaisimmin pitämällä alapäästään jäykästi perustuksiin kiinnitettynä ulokepalkkeina. Tällöin vaikeutena on kuitenkin ulokkeen aukkojen huomioonottaminen jännitysjakautumien ja sitä kautta myös seinään syntyvien epätasaisten jännitysjakautumien määrittämiseksi. Tarkempiin analysointituloksiin päästään käyttämällä kuvassa 3.10 esitettyjä idealisoituja rakennemalleja leveäripaista kehämallia tai nk. jatkuvan välimassan mallia.

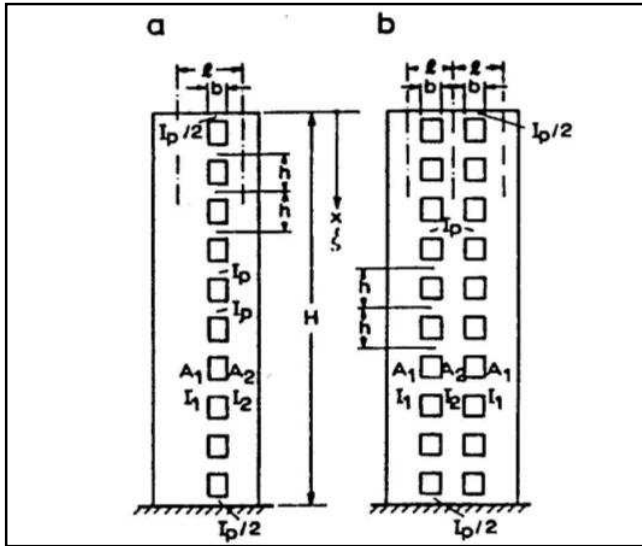
FEM -menetelmää käyttämällä on suhteellisen yksinkertaista mallintaa seinälevyn aukot. Malli voidaan muodostaa joko kuorielementtiä, siis tasojännitystilän elementin ja laattaelementin yhdistelmää käyttämällä tai käyttämällä kehämallia. Aukkorivillisen jäykistysseinän kehämalli (kuva 3.10 a) muodostetaan niin, että pystyaukkojen väliset ja aukkojen reunojen viereiset pystyosat korvataan niiden painopisteakseleilla sijaitsevilla vastaavilla pilareilla. Vaakapalkit muodostetaan niin, että aukkojen välisillä osilla kehäpilariin otaksutaan liittyvän äärettömän jäykkään vaakapalkin osa aukkorivin vierestä seinäosan leveyttä vastaavasti. Aukkojen väliset vaakasuorat osat korvataan niiden poikkileikkausta vastaavilla palkeilla, jotka yhdistävät äärettömän jäykkiä kehän vaakasuoria nurkkaosia. Tällaisen idealisoidun kehän tarkastelu voidaan tehdä normaalisti esimerkiksi siirtymämenetelmää (kulmanmuutosmenetelmää) soveltamalla.



**Kuva 3.10** Aukkorivillisen jäykistysseinän rakennemalli

Rosman'n menetelmässä korvataan aukkojen väliset poikki-pienat jatkuvalla aukkorivien kohdalle asetetulla välimassalla. Välimassa on ehjään seinään nähden siten heikennetty, että se vastaa taivutus- ja leikkauskapasiteetiltaan korvattuja poikkipalkkeja. Menetelmä ottaa siis huomioon poikkipalkkien taivutus- ja leikkausmuodonmuutokset sekä ehjien seinäosien taivutuksesta ja normaalivoimasta aiheutuvan muodonmuutoksen. Poikkipalkit oletetaan normaalivoiman suhteen äärettömän jäykiksi.

Rosman'n menetelmän mukaan saadaan kuvissa 3.11 a ja b esitetyille yksi- ja kaksiaukkoriviselle seinälle korvikehitausmomentit.



Kuva 3.11 Merkinnät

$$I_E = \frac{\sum I}{1 - \beta l \eta_I} \quad (3.18)$$

$$I_E = \frac{\sum I}{1 - 2\beta l \eta_I} \quad (3.19)$$

missä:

$l$  on osaseinien painopisteakselien välinen etäisyys

$\sum I$  on osaseinien hitausmomenttien summa

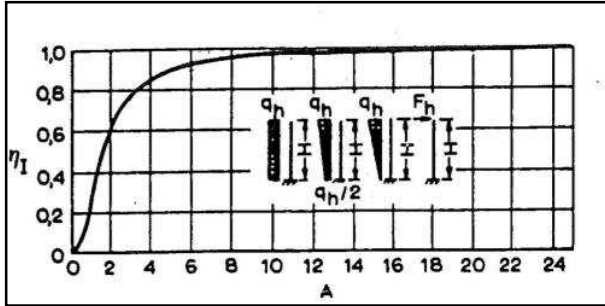
$\eta_I$  on diagrammista saatava tekijästä A riippuva kerroin

$$\beta = \frac{\frac{l}{\sum I}}{\frac{l^2}{\sum I} + \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2}} \quad (3.20)$$

$$\beta = \frac{\frac{l}{\sum I}}{\frac{2l^2}{\sum I} + \frac{1}{A_1}}$$

missä

$A_1$  ja  $A_2$  ovat osaseinien poikkipinta-alat.



**Kuva 3.11** Kerroin A:n funktiona

Kuvan 3.12 digrammissa esiintyvä muuttuja A saadaan kaavoista:

$$A = H \sqrt{\left(\frac{l^2}{\sum I} + \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2}\right) \frac{12I_p}{hb^3}} \tag{3.21}$$

missä

h on kerroskorkeus

H on seinän kokonaiskorkeus

b on aukon leveys.

I<sub>p</sub> on aukkojen välisen poikkipalkin jäykkyys, jonka arvossa on otettu huomioon taivutus-jäykkyyden ohella myös leikkausmuodonmuutoksesta aiheutuva jäykkyystekijä, joka saadaan kaavasta:

$$I_p = \frac{1}{12} \frac{th_p^3}{1 + 2,8 \left(\frac{h_p}{b}\right)^2} \tag{3.22}$$

missä

h<sub>p</sub> on poikkipalkin korkeus

t on poikkipalkin leveys.

Kaavojen (3.18) avulla saatujen korvikejäykkyyksien kautta voidaan kohdassa 3.15 esitetyn mukaan määrittellä myös aukkorivillisten mastoseiniä ottamat osuudet rakennuksen kokonaisvaakakuormasta.

Kun aukkorivillisen seinän ottama kuormitusosuus on saatu selville, voidaan itse rakenne mitoittaa seuraavasti. Ulkoinen kuormitus aiheuttaa aukkoseinälle taivutusmomentin M, voidaan jakaa osaseiniä taivutusjäykkyyksien ottamiin teihin ja momenttiin, joka aiheutuu poikkipalkkien leikkausvoiman T aiheuttamista normaalivoimapareista osaseinissä. Tällöin voidaan kirjoittaa (kuva 3.11a)

$$M_{ax} = \sum M_i + Tl \tag{3.23}$$

$$M_{ax} = \sum M_i + 2Tl$$

missä

$$T = \eta\beta M_{aH}$$

M<sub>aH</sub> on ulkoisen momentin arvo seinän alareunassa.

Kertoimen η riippuu kuormitustapauksesta ja kertoimen A arvosta ja sille on esitetty taulukoidut erilaisille kuormitustapauksille (tasainen, trapetsi-, kolmio- ja pistekuorma).

Esimerkiksi yksiaukkoriviselle tasaisella kuormalla kuormitetulle seinälle, missä  $A \leq 10$  saadaan

$$\eta = \left[ 1 + \frac{(ax)^2}{2} + \frac{\sinh A - A}{\cosh A} \sinh(ax) - \cosh(as) \right] \frac{2}{A^2} \quad (3.24)$$

$a = A/H$  ja

$x =$  tarkastelukohdan etäisyys seinän yläpäästä (kuva 3.10)

Kun leikkausvoima  $T$  on saatu selville, voidaan yhtälöistä (3.16) ratkaista kokonaistaivutusmomentti  $\sum M$ . Se jaetaan niiden jäykkyyksien suhteessa:

$$M = \frac{I_i}{\sum I} \sum M_i \quad (3.25)$$

Poikkipalkin leikkausvoima  $V$  saadaan sen ylä- ja alapuolisten kerrosten puolivälissä olevien kokonaisleikkausvoimien  $T$  erotuksena:

$$V_{px} = T_{x+h/2} - T_{x-h/2} \quad (3.26)$$

ja poikkipalkin taivutusmomentti:

$$M_{px} = V_{px} \frac{b}{2} \quad (3.27)$$

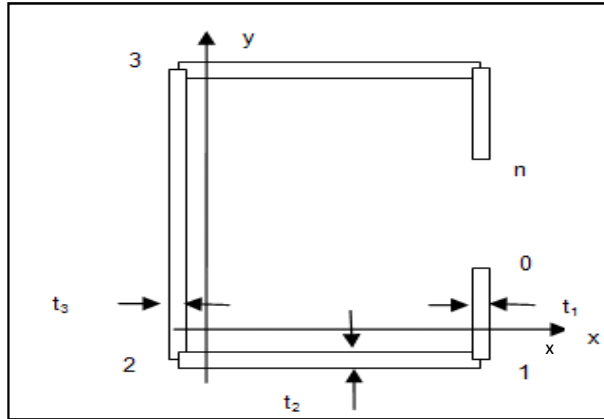
/xx/:ssä on myös taulukoit arvot kertoimelle  $\eta'$ , jolloin  $V_{px}$  saadaan myös suoraan kaavasta

$$V_{px} = \eta' \beta h V_{aH}$$

missä  $V_{aH}$  on ulkoisen kuorman leikkausvoima seinän alareunassa.

### Jäykistystornin poikkileikkausarvojen määrittäminen

Seuraavassa on esitetty numeerinen laskentatapa avointen seinäpoikkileikkausten poikkileikkausarvojen ja leikkauskeskiön laskemiseksi /1/.



Kuva 3.13 Suorista osista koostuvan poikkileikkauksen mallintaminen

- Poikkileikkaus jaetaan suoraviivaisiin osiin.
- Osien päissä on solmut.
- Osa i on solmusta i-1 solmuun i.

Pinta-ala

$$dA_i = t_i \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (3.28)$$

$$A = \sum_{i=1}^n dA_i$$

Staattinen momentti

$$S_{x0} = \sum_{i=1}^n (y_i + y_{i-1}) dA_i / 2 \quad (3.29)$$

$$S_{y0} = \sum_{i=1}^n (x_i + x_{i-1}) dA_i / 2$$

Painopiste

$$x_{gc} = S_{y0} / A \quad (3.30)$$

$$y_{gc} = S_{x0} / A$$

Jäyhyys alkuperäisessä koordinaatistossa

$$I_{x0} = \sum_{i=1}^n (y_i^2 + y_{i-1}^2 + y_i y_{i-1}) dA_i / 3$$

$$I_{y0} = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + x_{i-1}^2 + x_i x_{i-1}) dA_i / 3 \quad (3.31)$$

$$I_{xy0} = \sum_{i=1}^n (2x_{i-1}y_{i-1} + 2x_i y_i + x_{i-1}y_i + x_i y_{i-1}) dA_i / 6$$

Jäyhyys painopistekoordinaatistossa

$$\begin{aligned} I_x &= I_{x0} - A * y_{gc} \\ I_y &= I_{y0} - A * x_{gc} \\ I_{xy} &= I_{xy0} - S_{x0} S_{y0} / A \end{aligned} \quad (3.32)$$

Sektoriaalinen koordinaatti

$$\begin{aligned} \omega_0 &= 0 \\ \omega_{0i} &= (x_{i-1} y_i + x_i y_{i-1}) \\ \omega_i &= \omega_{i-1} + \omega_{0i} \end{aligned} \quad (3.33)$$

Sektoriaaliset jäyhyydet

$$\begin{aligned} I_{\omega} &= \sum_{i=1}^n (\omega_{i-1} + \omega_i) dA_i / 2 \\ I_{x\omega 0} &= \sum_{i=1}^n (2x_{i-1}\omega_{i-1} + 2x_i\omega_i + x_{i-1}\omega_i + x_i\omega_{i-1}) dA_i / 6, \\ I_{x\omega} &= I_{x\omega 0} - S_{y0} I_{\omega} / A \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned} I_{y\omega 0} &= \sum_{i=1}^n (2y_{i-1}\omega_{i-1} + 2y_i\omega_i + y_{i-1}\omega_i + y_i\omega_{i-1}) dA_i / 6, \\ I_{y\omega} &= I_{y\omega 0} - S_{x0} I_{\omega} / A \\ I_{\omega\omega 0} &= \sum_{i=1}^n (\omega_i^2 + \omega_{i-1}^2 + \omega_i\omega_{i-1}) dA_i / 3, I_{\omega\omega} = I_{\omega\omega 0} - I_{\omega}^2 / A \end{aligned}$$

Leikkauskeskiö

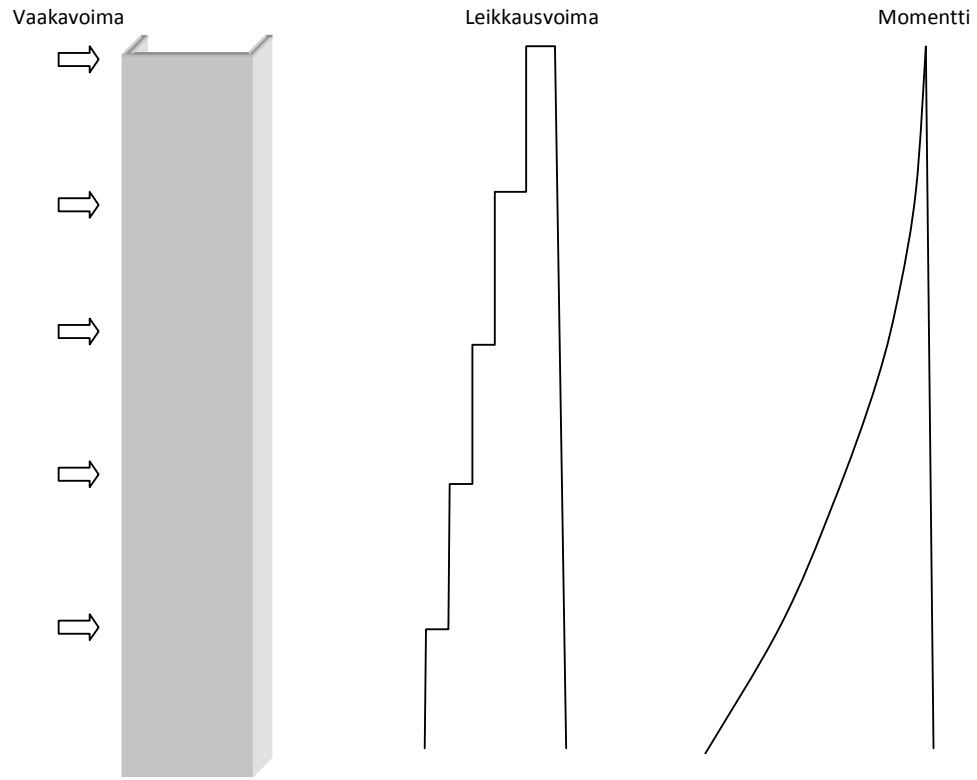
$$\begin{aligned} x_{sc} &= \frac{I_{y\omega} I_y - I_{x\omega} I_{xy}}{I_x I_y - I_{yz}^2} \\ y_{sc} &= \frac{-I_{x\omega} I_x + I_{y\omega} I_{xy}}{I_x I_y - I_{yz}^2} \end{aligned} \quad (3.35)$$

Käyritysmisjäyhyys

$$I_w = I_{\omega\omega} + y_{sc} I_{x\omega} - x_{sc} I_{y\omega} \quad (3.36)$$

Vääntöjäyhyys

$$I_t = \sum_{i=1}^n t_i^2 dA_i / 3 \quad (3.37)$$

**Elementeistä kootun jäykistystornin leikkausjännitykset****Kuva 3.14** Leikkausvoima ja momentti jäykistysrakenteessa



Mikäli lasketaan kimmoteorian mukaan, voidaan leikkausjännitys laskea kaavasta:

$$\tau = \frac{QS}{Ib} \quad (3.38)$$

missä

$Q$  on leikkausvoiman arvo laskettavassa kohdassa

$S$  on poikkileikkauksen staattinen momentti painopisteen suhteen laskettuna

$I$  on poikkileikkauksen jäyhyys laskettavan kuormituksen suunnassa

$b$  on poikkileikkauksen seinämän leveys tarkasteltavassa kohdassa.

Sauman leikkausvoima on siis

$$T = \frac{QS}{I}$$

Poikkileikkauksen suuret voidaan laskea kohdan 3.17 mukaisesti. Suurin leikkausjännitys syntyy esim. kuvassa esitetyn U- poikkileikkauksen selkäpuolen puolivälin kohdalle. Mikäli tähän kohtaan joudutaan tekemään elementtisauma, voidaan poikkileikkausmallinnuksessa lisätä tähän kohtaan poikkileikkauksipiste. Tosin tämän (symmetrisen) poikkileikkauksen poikkileikkaussuuret on helppo laskea myös yksinkertaisista kaavoista.

$$I = \frac{bh^3 - (b-t_u)(h-2t_l)^3}{12} \quad (3.39)$$

$$S = bt_l * \left(\frac{h-t_l}{2}\right) + t_u\left(\frac{h}{2} - t_l\right)^2 \quad (3.40)$$

missä

$b$  on poikkileikkauksen laipan leveys

$h$  on koko poikkileikkauksen korkeus

$t_l$  on laipan paksuus

$t_u$  on uuman paksuus

Käytännössä taivutusmitoitus tapahtuu plastisen jännitysjakautuman mukaisesti ja tällöin leikkausjännitysjakauma on laskettava käytetyn jakauman ja todellisen rakennesysteemin mukaisesti. Esimerkiksi jos jäykistystornin nurkassa on sauma ja kaikki ankkurointiteräokset sijaitsevat sauman toisella puolella, on sauman kyettävä välittämään koko ankkurointivoima.

## Kaatumisvarmuus

SFS-EN 1990 määrittää kolme erilaista murtorajatila tarkistettavaksi. Näistä EQU; jäykkänä kappaleena tarkasteltavan rakenteen tai sen minkä tahansa osan staattisen tasapainon menetys, tulee siis tarkistaa rakennusta jäykistävien ulokemastojen osalta. Tällöin tulee osoittaa, että:

$$E_{d,dst} < E_{d,stab} \quad (3.41)$$

missä

$E_{d,dst}$  on tasapainoa heikentävien kuormien vaikutuksen mitoitusarvo

$E_{d,stab}$  on tasapainoa parantavien kuormien vaikutuksen mitoitusarvo

Tarkasteltava kuormien vaikutuksen yhdistelmä voidaan esittää lausekkeena

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_i \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3.42)$$

missä osavarmuuskertoimen arvot ovat

$\gamma_{Gj,sup} = K_{FI} * 1,1$  pysyvän kuorman vaikuttaessa epäedullisesti

$\gamma_{Gj,inf} = 0,9$  pysyvän kuorman vaikuttaessa edullisesti

$Q_{k,1}$  on määrävimmän muuttuvan kuorman arvo

$\gamma_{Q,1} = K_{FI} * 1,5$  epäedullisessa ja  $\gamma_{Q,1} = 0$  edullisessa vaikutuksessa

$\psi_{0,i}$  on yhdistelyarvo muille muuttuville kuormille. Sen arvo riippuu kuorman tyypistä.

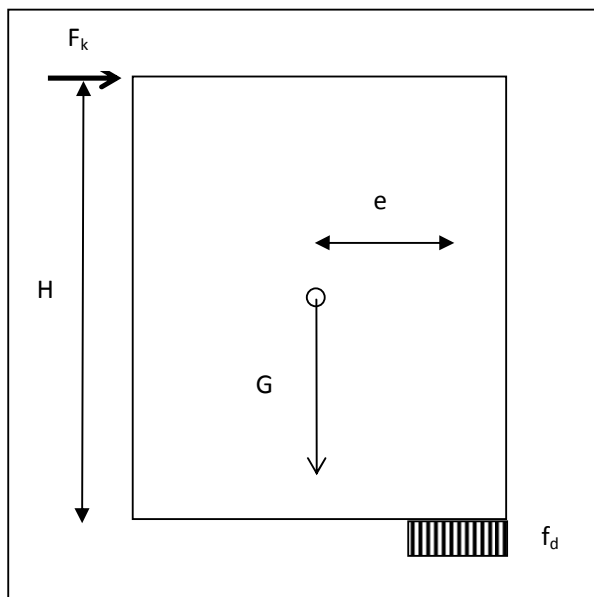
$K_{FI}$  on rakenteen luotettavuusluokasta riippuva kerroin, seuraavasti:

luotettavuusluokassa RC3  $K_{FI} = 1,1$

luotettavuusluokassa RC2  $K_{FI} = 1,0$

luotettavuusluokassa RC1  $K_{FI} = 0,9$ .

Yhdistelyn suorittamisesta todettakoon, että STR- rajatilassa kussakin tarkastelussa yhdelle kuormalle (esim. oma paino) käytetään koko tarkasteltavassa rakenteessa vain yhtä osavarmuuskerrointa, esim. pysyvän kuorman vaikuttaessa jossakin rakenteen osassa edullisesti ja toisessa epäedullisesti, käytetään vain yhtä kerroinarvoa. Toki molemmat arvot, edullinen ja epäedullinen on syytä tarkistaa. EQU- rajatilassa käytetään omalle painolle kahta varmuuskerrointa samassa yhdistelmässä.



**Kuva 3.12** Kaatumisvarmuuden laskeminen

Murtorajatiljan ehto olisi yllä olevassa tapauksessa siis

$$K_{FI} * 1,5 * F_k * H \leq 0,9 * G * e$$

(3.43)