

2	Jäykistysjärjestelmät	2
2.1	Rakennuksen jäykistysuunnittelun tehtävät	4
	Alustava jäykistysuunnittelu.....	4
	Jäykistykseen mitoitettu murtorajatilassa	6
	Jäykistykseen mitoitettu käyttörajatilassa	7
	Jäykistykseen mitoitettu asennustilanteessa.....	8
	Jäykistykseen mitoitettu onnettomuustilanteen varalta	8
	Osatehtäviä elementtirakennuksen jäykistämiseksi:.....	9
2.2	Toisen kertaluvun rasitukset.....	10
	Toisen kertaluvun laskentatarvetta voidaan arvioida eri tilanteissa seuraavasti.....	10
2.3	Jäykistysmenetelmät.....	13
	Mastojäykistys.....	13
	Kehäjäykistys.....	18
	Levyjäykistys.....	20
	Ristikkojäykistys	21
	Yhdistelmäjäykistys	23
	Yhdistetty levy- ja mastopilarijäykistys	23
	Yhdistetty mastoseinä- ja ristikköjäykistys	24
3	Laskentaperiaatteet	26
	Seuraavassa käsitellään kuormien jakoa eri tilanteissa	26
	Maston jäykkyys.....	26
	Kuormitus ei aiheuta kiertymää.....	27
	Kuormitus aiheuttaa kiertymän	30
	Laskentaesimerkkejä kiertyvästä jäykistysjärjestelmästä	31
	Epäsymmetriset osamastot	34
	Seinien heikennysten tarkastelu.....	35
	Jäykistystornin poikkileikkausarvojen määrittäminen.....	39
	Elementeistä kootun jäykistystornin leikkausjännitykset.....	41
	Kaatumisvarmuus	42

2 Jäykistysjärjestelmät

Jäykistysjärjestelmän tehtävänä on siirtää rakennukseen kohdistuvien vaakakuormitusten aiheuttamat rasitukset perustuksiin ja maapohjaan. Vaakasuuntaisia rasituksia aiheuttavat kuormitukset on tarkemmin esitelty kohdassa Suunnittelukuormat.

Jäykistysjärjestelmää suunniteltaessa on huomioitava:

- Jäykistysjärjestelmien osien kapasiteetti ei ylitä missään kuormitustapauksessa
- Rakennuksen ja sen osien muodonmuutokset ja siirtymät pysyvät riittävän pieninä, eivätkä aiheuta rakennuksen käytölle haittoja turvallisuuden tai käyttökelpoisuuden suhteen
- Rakenteen staattinen tasapaino on riittävä, toisin sanoen rakenne ei kaadu
- Jatkuva sortuma pyritään estämään ja rajoittamaan määräysten mukaisesti rakenteellisin keinoin onnettomuustilanteissa
- Asennustilanteen jäykistyksen on oltava toimiva ja asennusvaiheen stabiileetti on aina tutkittava erikseen

Elementtirakennuksen jäykistys on yleensä aina vaativa suunnittelutehtävä, koska jäykistysjärjestelmä on yleensä toimiva ja kykenee ottamaan vastaan jäykistyksestä tulevia rasituksia vasta kun eri osien väliset liitokset ovat valmiita.

Kaikissa jäykistystavoissa on oleellista, että tasojen vaakarakenteet siirtävät vaakakuormat jäykistäville pystyrakenteille. Vaakakuormia siirtävät tasorakenteet on mitoitettava vastaanottamaan vaakakuormitukset ja niiden liitokset pystyjäykisteisiin on aina mitoitettava kyseisten kuormien tukireaktioille.

Jäykistävät pystyrakenteet saavat kultakin tasolta kuormaa jäykkyyksiensä suhteessa ja jäykistysrakenteita mitoitettaessa on selvitettävä rakenteiden todelliset jäykkyydet riittävällä tarkkuudella. Esimerkiksi seinämaston jäykkyyteen vaikuttavat voimakkaasti seinässä mahdollisesti olevat aukot (ovet, ikkunat tms.) ja seinän halkeilu. Neljästä seinästä muodostuvan kuilun jäykkyys on suurempi kuin neljän erillisen levyseinän jäykkyys yhteensä, mutta jos käytetään koko kuilun jäykkyyttä jäykistyksessä, on muistettava mitoitaa eri seinien pysty- ja vaakaliitokset siten, että ne pystyvät siirtämään ko. liitoksissa vaikuttavat voimat. Rakenteiden tuentatapa vaikuttaa myös kuormien jakautumiseen ja tämä on otettava laskelmissa huomioon.

Jäykkyydet voidaan melko luotettavasti selvittää kun lasketaan rakennuksen jäykistys yleisillä FEM- ohjelmistoilla. Tällöin on selvitettävä huolellisesti, huomioiko ohjelma esimerkiksi leikkausmuodonmuutokset korkeissa mastoseinissä ja voidaanko ohjelmassa tarvittaessa käyttää toisen kertaluvun laskentaa. Tarvittaessa on otettava huomioon halkeilun vaikutus rakenteiden jäykkyyteen.

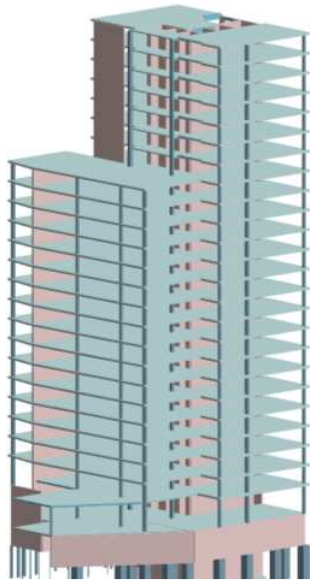
Laskettaessa rakennuksien jäykistystä FEM-ohjelmilla mallintamalla koko rakennus 3D-malliksi, on eri rakenteiden ominaisuudet ja liittymät muihin rakenteisiin mallinnettava mahdollisimman oikein vastaamaan todellisuutta, muuten voidaan saada tuloksia, jotka eivät vastaa rakenteen toimintaa.

Esimerkkejä seikoista, jotka tulee ottaa huomioon laskettaessa 3D-malleilla:

- Sauvarakenteiden liittymät on mallinnettu oikein
- Levyrakenteiden liittymät on mallinnettu oikein. Esimerkiksi jos seinien liitoksessa on nivel, on nivel oltava myös laskentamallissa ja vastaavasti, jos laatan ja seinän liitos on nivel, on nivel löydyttävä myös laskentamallista
- Laskentamallista on tarkistettava, ettei eri rakennusosien lasketa välittävän sellaisia voimia, joita ne eivät todellisuudessa välitä tai pysty vaurioitumatta välittämään. Esimerkiksi yläpinnastaan raudoittamaton laatta saattaa laskentamallissa ottaa suuria momentteja yläpintaan ja todellisuudessa laatta halkeaa yläpinnastaan ja voimasuureet jakaantuvat uudelleen
- Korkeissa rakennuksissa on mietittävä, kuinka mallinnetaan kantavien seinien väliin tulevan laatan liitos seinään. Seinä ottaa tietyn määrän momenttia ja laatan yläpintaan saattaa syntyä vetoa liitoksen kohdalla, vaikka liitos on periaatteessa nivel.
- Kuilujen nurkkiin liittyvien laattojen rasitukset nurkan läheisyydessä on tarkastettava, ohjelmat voivat olettaa laattojen välittävän sellaisia voimia, joita ne eivät todellisuudessa välitä
- Pienille pilarikannaksille ulkoseinissä saattaa laskentamallissa kertyä sellaisia rasituksia, joita ne eivät kestä
- On tarkistettava, että liitokset todella kykenevät välittämään voimat, jotka ohjelma kuvittelee niiden välittävän (esim. seinien leikkausvoimat pystyliitoksissa)
- Materiaaliominaisuudet ovat oikein (viruma, lujuus ym.)
- Yhteen suuntaan kantavat laatat on mallinnettu oikein (esim. ontelolaatat)

FEM-mallinnuksen oikeellisuus korostuu korkeissa, ja monimutkaisissa rakennuksissa, joissa pientenkin mallinnusvirheiden vaikutus voi kertaantua ja voimat jakaantua laskentamallissa hyvinkin paljon todellisuudesta poikkeavasti. Vastaavasti 3D-laskentamalleista voidaan paikallistaa sellaisia rasituskeräytymiä, joita ei yksinkertaistetuilla menetelmillä välttämättä huomata.

FEM-mallinnuksen lisäksi tulisi ainakin vaativammissa kohteissa jäykistyslaskelmien suuruusluokka tarkistaa jollakin toisella laskentamenetelmällä.



Kuva 2.1 Esimerkki rakennuksesta jonka jäykistysrakenteet on mitoitettu FEM- ohjelmalla ja tarkistettu likimääräismenetelmällä

2.1 Rakennuksen jäykistys suunnittelun tehtävät

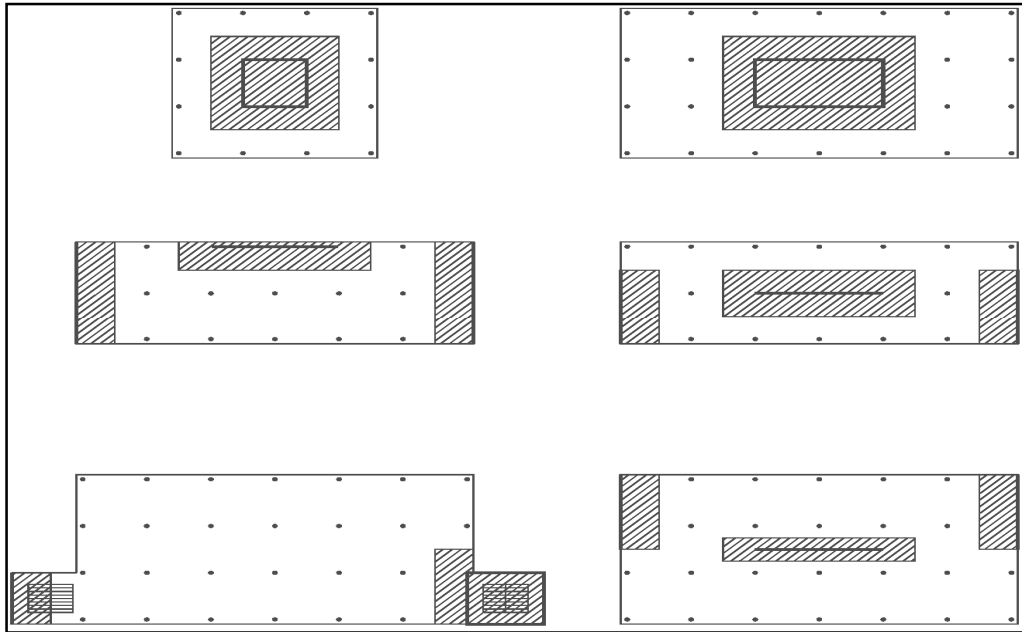
Elementtirakentamisessa rakennuksen jäykistyksen suunnittelu ja suunnitelmien mukainen toimiminen sisältää useita osatehtäviä, jotka kaikki pitää huolellisesti suunnitella ja toteuttaa, jotta saavutetaan luotettava lopputulos.

Alustava jäykistys suunnittelu

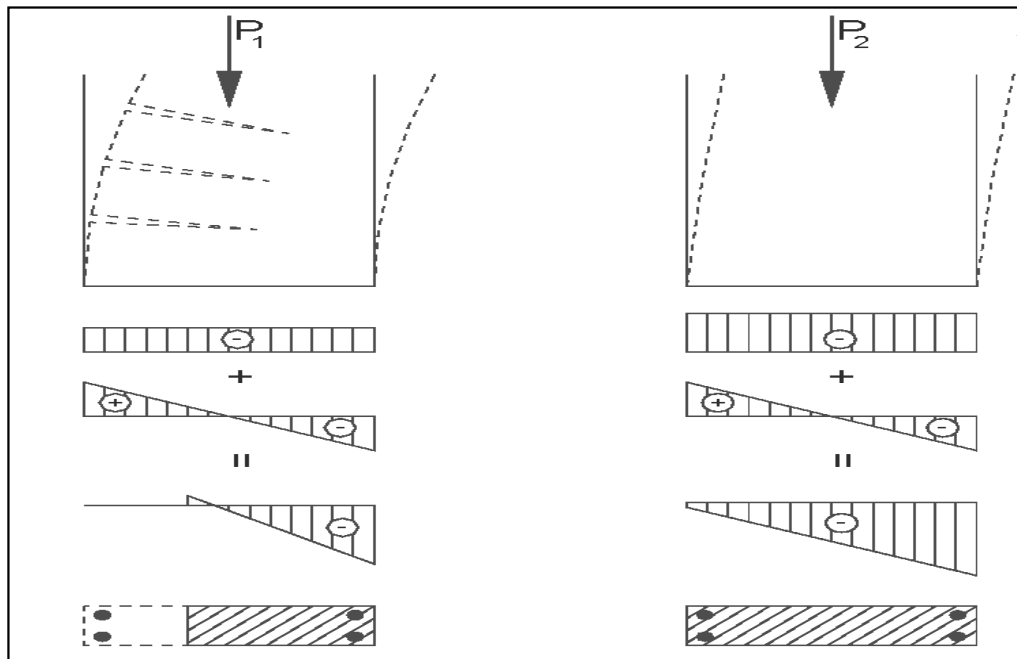
Rakennuksen alustava jäykistys suunnittelu tulee tehdä mahdollisimman varhaisessa suunnitteluvaiheessa ja viimeistään luonnosvaiheessa.

Alustavassa tarkastelussa tulee selvittää seuraavat asiat:

- Arvioidaan, onko rakennus riittävän jäykkä
- Onko jäykistys systeemi symmetrinen
- Pääseekö rakennus kiertymään, jolloin syntyy kiertymästä lisärasituksia jäykisteisiin
- Liikuntasuomien tarve ja niiden vaikutus rakennuksen jäykistys systeemiin
- Tarkistetaan onko jäykistäville pystyrakenteille tuleva pystykuorma riittävän suuri, että rakenteeseen ei muodostu vetoa, eikä rakenteita näin jouduta ankkuroimaan kalliooperään. Erityisen tärkeää tämä on paalutettavissa kohteissa, joissa ankkurointi voi muodostua hankalaksi
- Normaaleissa rakennuskohteissa tulee ankkurointia välttää



Kuva 2.2 Jäykistysrakenteiden saamia pystykuormia erilaisilla jäykistysrakenteiden sijoituksilla

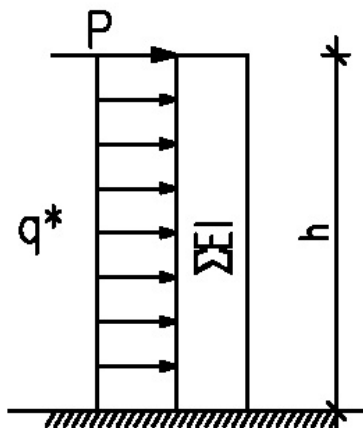


Kuva 2.3 Periaate pystykuorman suuruuden vaikutuksesta jäykistävän seinä halkeiluun

Rakennuksen jäykkyyden riittävyyttä voidaan arvioida esimerkiksi seuraavasti:

$$\sum EI \geq \frac{q * h^3}{8} + \frac{Ph^2}{3}$$

q^* =	$B * q$
h =	rakennuksen korkeus (m)
P =	pistekuorma rakennuksen yläreunassa käyttötilassa (kN)
B =	rakennuksen leveys laskentasuuntaa vasten kohtisuorassa (m)
q =	rakennukseen vaakakuorma käyttötilassa, sisältäen tuulen ja lisävaakavoiman (kN/m ²)
$\sum EI$ =	tarkasteltavassa suunnassa toimivien jäykistysrakenteiden taivutusjäykkyyksien summa (MN/m ²)



Kuva 2.4 Alustavan jäykistyslaskennan merkinnät

Jäykistykseen mitoitus murtorajatilassa

Jäykistysjärjestelmä mitoitetaan SFS-EN 1990 ja SFS-EN 1992 mukaisesti murtorajatilassa. Murtorajatilaksi luokitellaan kaikki rajatilat, jotka liittyvät ihmisten turvallisuuteen tai rakenteiden varmuuteen. Joissakin tapauksissa aineen tai tavarantoiminnan suojaaminen luokitellaan murtorajatilaksi.

Tarkasteltavia murtorajatilajoja jäykistysrakenteissa ovat:

- Jäykän kappaleen tai sen osan tasapainon menetys
- Liian suuri siirtymätila
- Rakenteen tai sen osan muuttuminen mekanismiksi
- Rakenteen tai sen osan stabiiliuden menetys
- Ajasta riippuva vaurioituminen kuten väsyminen tms.
- Tarkistetaan rakennuksen staattinen tasapaino, joka saadaan rakennukseen kohdistuvien pystyssä pitävien ja sitä kaatavien momenttien osamääränä valitun pisteen (piste, jonka ympäri rakennuksen tai jäykistysrakenteen oletetaan kaatuvan) suhteen laskettuna.

Jäykistykseen mitoitettu käyttörajatilassa

Jäykistysjärjestelmä mitoitetaan SFS-EN 1990 ja SFS-EN 1992 mukaisesti käyttörajatiloissa, jotka liittyvät rakenteen toimintaan normaalikäytössä, ihmisten mukavuuteen ja rakennuskohteen ulkonäköön.

Käyttörajatiloja tarkasteltaessa käytetään seuraaviin seikkoihin perustuvia kriteerejä (SFS-EN 1990 kohta 3.4):

- Siirtymät, jotka vaikuttavat ulkonäköön, käyttäjien mukavuuteen, rakenteen toimivuuteen
- Värähtelyt, jotka saavat ihmiset tuntemaan olonsa epämukavaksi tai jotka rajoittavat rakenteen kelpoisuutta käyttötarkoitukseensa
- Vauriot, jotka todennäköisesti vaikuttavat kielteisesti ulkonäköön, säilyvyyteen tai rakenteen toimivuuteen

SFS-EN 1992-1-1 kohdan 7 mukaisesti tarkastetaan käyttörajatilat:

- Jännitysten rajoittaminen
- Halkeamaleveyden rajoittaminen
- Taipuman rajoittaminen

Korkeissa rakennuksissa (ja tietyissä jäykistystyypeissä) saattaa värähtely ja rakenteen taipuma muodostua mitoitavaksi tekijäksi. Jäykistävien rakenteiden taipumille ja värähtelylle ei löydy eurokoodeista suoraan käytettäviä raja-arvoja, vaan rakenteen kelpoisuus on arvioitava tapauskohtaisesti. Taipuman ylärajana on yleisesti Suomessa käytetty arvoa $H/400$ - $H/1000$, missä:

- H on rakennuksen korkeus.

Vaakasiirtymien suuruus on harkittava kohdekohtaisesti, EN 1993-1-1 NA:ssa rakennuksen vaakasiirtymien rajatilalle on annettu arvo $H/400$.

Käyttörajatilatarkastelun tarkoitus on myös varmistaa, ettei rakennuksen toiminnassa sen käytön aikana aiheudu haittaa sen käyttötarkoitukselle, joko liiallisista siirtymistä aiheutuneiden esteettisten haittojen tai rakennuksen värähtelyn tai heilahtelun aiheuttaman epämiellyttävän kokemuksen takia. Tähän pyritään esimerkiksi rajoittamalla vaakakuormien rakennukseen aiheuttamia siirtymiä ja halkeamia.

Jäykistykseen mitoitettu asennustilanteessa

Rakennuksen asennuksen aikainen jäykistys pitää aina tutkia kussakin erilaisessa tilanteessa ja sen seurauksena asennussuunnitelmissa pitää olla ohjeet tarvittavasta väliaikaistuennasta. Jäykistys pyritään toteuttamaan siten, että voidaan välttää ylimääräiset asennuksen aikaiset tuennat. Asennusjärjestys laaditaan lähtien jäykistävästä rakenneosista, sen jälkeen niihin tukeutuvat rakenteet ja edelleen ei kantavat rakenneosat. Näin saadaan hallittua kuormitukset vinouksista, omasta painosta ja tuulipinnoista vastaamaan paremmin rakenteen kantokykyä kussakin tilanteessa.

On huomioitava, että asennusaikainen jäykistysjärjestelmä ja jäykistävät rakenteet voivat poiketa lopullisesta järjestelmästä. Esimerkiksi pilarit saattavat asennusaikana toimia mastoina, vaikka ne lopullisessa tilanteessa eivät saa jäykistyksestä rasituksia.

Jäykistykseen mitoitettu onnettomuustilanteen varalta

Yksittäisen rakenneosan kantokyvyn menettämisen seurauksena tapahtuva vierekkäisen rakenneosan kuormitustilan liiallinen kasvu ja sen seurauksena aiheutuva etenevä rakenteiden vaurioituminen tai jatkuva sortuma on pyrittävä estämään. Tyypillisin tilanne olisi esimerkiksi ajoneuvon törmäys pilariin. Muita onnettomuustilanteita tässä yhteydessä ovat esimerkiksi tulipalo ja painekuorma räjähdyksestä.

SFS-EN 1991-1-1 kohdan 9.10 ja EN 1991-1-7 NA:n mukaisesti rakenteissa, joita ei ole monoliittisesti suunniteltu kestämään onnettomuuskuormia, tulee olla jatkuvan sortuman estämiseen soveltuva sidejärjestelmä, joka mahdollistaa kuormien siirtymisen toista kautta paikallisen vaurion jälkeen. Tämä koskee myös jäykistysrakenteita. Osittaisen sortuman tapauksessa, sortuman koskiessa myös jäykistysrakennetta, on muiden jäljelle jäävien rakenteiden pystyttävä varmistamaan rakennuksen stabiilius.

Osatehtäviä elementtirakennuksen jäykistämässä:

- Kuormien ja erityisesti vaakakuormien määrittäminen,
- Yleisimmät vaakakuormat jäykistyksessä ovat mm.
 - Tuulikuormat
 - Rakenteiden vinouden aiheuttama vaakakuorma
 - Rakenteiden epäkeskisyyden aiheuttama vaakakuorma
 - Maanpaine
- Tapauskohtaisesti esiintyviä vaakakuormia ovat mm.
 - Pitkäaikaismuodonmuutosten, kutistuman ja viruman aiheuttamat kuormitukset
 - Jännevoimien aiheuttamat kuormitukset
 - Lämpötilan aiheuttamat kuormitukset
 - Nosturikuormat
 - Lippurakenteiden aiheuttamat kuormat
 - Törmäys ja jarrukuormat
 - Toisen kertaluvun vaakakuormat tarvittaessa
- Vaakakuormien siirtäminen tasorakenteille. Esimerkkinä on vaikka tuulikuorman välittäminen ulkoseinärakenteilla tasoille.
- Tasojen suunnittelu toimimaan jäykistysrakenteen osana. Tasot siirtävät niille siirtyneet vaakakuormat jäykistäville pystyrakenteille. Tätä varten tasojen pitää toimia monoliittisena voimia siirtävänä levynä. Ontelolaattataso jäykistetään saumavalujen ja saumarauhoituksen avulla, kuorilaattataso jäykistyy pintavalun ja rauhoituksen avulla, TT- ja HTT -laattatasot jäykistetään hitsaamalla tartuntalevyistä tai pintavalun avulla jne.
- Välipohjarakenteen ja jäykistävien pystyrakenteiden liitosten suunnittelu. Erityisesti leikkausvoimien siirtämiseen tasoilta on kiinnitettävä huomiota varsinkin, jos jäykistäviä pystyrakenteita on vähän ja siirrettävät leikkausvoimat ovat suuria. Kriittisiä kohtia ovat esimerkiksi huonosti rungossa kiinni olevat rungon ulkopuolella sijaitsevat porrashuoneet ja pystyrakenteiden kohdat, joissa niiden jäykkyys muuttuu merkittävästi.
- Jäykistävien pystyrakenteiden suunnittelu.
- Jäykistysrakenteen elementtiliitosten suunnittelu. Useista osista koostuvan jäykistysrakenteen liitosten suunnittelu on tehtävä huolellisesti, jotta saadaan jäykistysrakenteen toimimaan monoliittisesti.
- Jäykistysrakenteiden kuormien siirtäminen perustuksille ja maapohjaan. Mahdolliset vetorasitukset jäykistysrakenteissa on muistettava ankkuroida maapohjaan tai muihin rakenteisiin, joiden omapaino riittää kumoamaan vetovoimat. Vetorasituksia syntyy yleensä, jos jäykistysmastoja on vähän ja niille ei saada siirtymään riittävästi pystykuormaa. Tällaisia tilanteita voi syntyä esimerkiksi toimisto- ja liikerakennuksissa, joissa jäykistävien rakenteiden määrä halutaan minimoida hyvään tilankäyttöön ja muuntojoustavuuteen pyrittäessä.

2.2 Toisen kertaluvun rasitukset

Erityisesti korkeissa rakennuksissa ja rakennuksissa, joissa jäykistävät rakenneosat ovat hoikkia rakennuksen korkeuteen nähden, on toisen kertaluvun rasituksilla merkitystä rakennuksen kokonaisvakavuutta laskettaessa. Hoikkien mastojen ja kuilujen taipuminen vaakakuormista ja epäkeskisyyksistä aiheuttaa kaikkiin pystykuormiin lisäepäkeskisyyden ja edelleen lisätaipumia mastorakenteelle. Jäykistysrakenteiden toisen kertaluvun taipumat on tarvittaessa selvitettävä ja otettava huomioon mitoituksessa.

SFS-EN 1992-1-1 kohdan 5.8 mukaisesti toisen kertaluvun vaikutukset voidaan jättää huomiotta, jos ne ovat alle 10% ensimmäisen kertaluvun vaikutuksista. Käytännössä tätä on vaikea todistaa laskematta ensin rakennetta huomioiden toisen kertaluvun vaikutukset.

Toisen kertaluvun laskentatarvetta voidaan arvioida eri tilanteissa seuraavasti

Jäykistysjärjestelmässä ei merkittäviä leikkausmuodonmuutoksia, eikä rakennus kierry merkittävästi

Vaihtoehtoisena tarkasteluna ylläesitetylle menettelylle voidaan rakennuksen kokonaistarkastelussa jättää toisen kertaluvun rasitukset huomiotta / SFS-EN 1992-1-1, kohta 5.8/ jos,

$$F_{v,Ed} \leq k_1 \cdot \frac{n_s}{n_s+1,6} \cdot \frac{\sum E_{cd} I_c}{L^2}$$

n_s on kerrosten lukumäärä

L on momenttijäykistyksen yläpuolinen rakennuksen kokonaiskorkeus

E_{cd} on betonin kimmokerroimen mitoitusarvo

I_c on jäykistävien sauvojen jäyhyysmomentti halkeamattoman poikkileikkauksen mukaisesti

$$E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}}$$

$\gamma_{CE} = 1.2$, SFS-EN 1992-1-1 kohta 5.8.6 (3)

$k_1 = 0.31$, SFS-EN 1992-1-1 kohta 5.8.3.3

$k_2 = 0.62$

Vakio k_1 voidaan korvata vakiolla k_2 , jos voidaan osoittaa, että jäykistysseinät säilyvät halkeilematta murtorajatilassa, SFS-EN 1992-1-1 kohta 5.8.3.3

Kaavaa voidaan käyttää vain jos /SFS-EN 1992-1-1/:

- Rakennuksen vääntöön liittyvä epästabiilius ei tule määräväksi, eli rakenne on kohtuullisen symmetrinen
- Rakennuskokonaisuuden leikkausmuodonmuutokset ovat häviävän pieniä (jäykistysseinissä ei pääsääntöisesti suuria aukkoja)
- Jäykistyssauvat ovat kiinnityskohdissaan jäykkiä, eli kiertymät ovat häviävän pieniä, eivätkä perustukset pääse kiertymään
- Jäykistävien seinien jäykkyys on koko pituudeltaan likimain vakio
- Rakennuksen pystykuorma kasvaa kerroksittain likimain samalla määrällä

Jäykistysjärjestelmä, joka sallii merkittävät rakennekokonaisuuden leikkausmuodonmuutokset

Rakennuksen kokonaistarkastelussa voidaan jättää toisen kertaluvun vaikutukset huomiotta / SFS-EN 1992-1-1, kohta H.1.3/ jos,

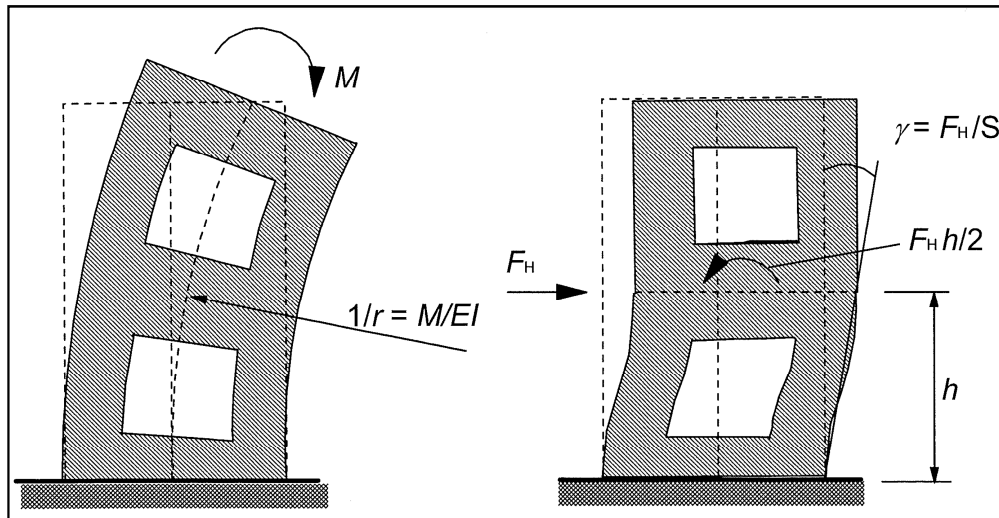
$$F_{V,Ed} \leq 0.1F_{V,B} = \frac{F_{V,BB}}{1 - F_{V,BB}/F_{V,BS}}$$

$F_{V,B}$ on rakennekokonaisuuden nurjahduskuorma (leikkausmuodonmuutos ja käyritymä huomioituna)

$F_{V,BB}$ on rakennekokonaisuuden nurjahduskuorma, jossa huomioidaan vain taivutuksen vaikutukset

$F_{V,BS}$ on rakennekokonaisuuden nurjahduskuorma, jossa huomioidaan vain leikkausvoiman vaikutukset, $F_{V,BS} = \sum S$

$\sum S$ on jäykistävien rakenneosien kokonaisleikkausjäykkyys (voima jaettuna leikkausmuodonmuutoksella)



Kuva 2.5 Jäykistysrakenteen käyritymä ja leikkausmuodonmuutos, periaate /SFS-EN 1992-1-1

Toisen kertaluvun vaikutusten laskentamenetelmät

Rakennekokonaisuuden toisen kertaluvun vaikutukset voidaan ottaa huomioon suurentamalla rakenteeseen vaikuttavia vaakavoimia, kun toisen kertaluvun vaikutukset on otettava huomioon.

SFS-EN 1992-1-1 liitteessä H on esitetty seuraava menetelmä suurennettujen vaakakuormien laskemiseksi.

$$F_{H,Ed} = \frac{F_{H,0Ed}}{1 - F_{V,Ed}/F_{V,B}}$$

$F_{H,0Ed}$ on tuulen, vinouden ym. aiheuttama lineaarisesti laskettu vaakavoima

$F_{V,Ed}$ on pystysuora kokonaisvoima, joka vaikuttaa jäykistäviin ja jäykistettäviin rakenteisiin

$F_{V,B}$ on rakennekokonaisuuden nimellinen nurjahduskuorma

Jos nimellistä nurjahduskuormaa ei ole laskettu, rakennekokonaisuuden vaakakuormana voidaan käyttää kuormaa

$$F_{H,Ed} = \frac{F_{H,0Ed}}{1 - F_{H,1Ed}/F_{H,0Ed}}$$

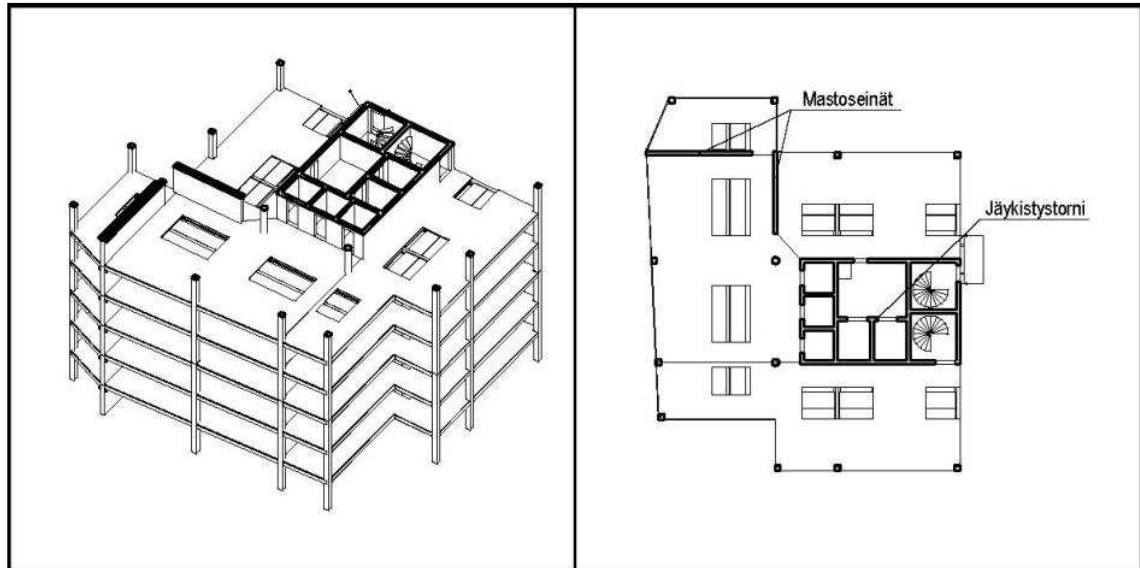
$F_{H,1Ed}$ on nimellinen vaakakuorma, joka aiheuttaa samat taivutusmomentit kuin pystykuorma $N_{V,Ed}$. $N_{V,Ed}$ vaikuttaa deformoituneeseen rakenteeseen, jonka siirtymä- ja muodonmuutostilan aiheuttaa kuorma $F_{H,0Ed}$ lineaarisesti laskettuna

2.3 Jäykistysmenetelmät

Rakennukset voidaan jäykistää useilla eri tavoilla ja käytettävän jäykistysjärjestelmän valintaan vaikuttaa useita eri tekijöitä, joiden avulla valitaan kuhunkin rakennukseen sopivin jäykistysjärjestelmä. Jäykistystavan valintaan vaikuttavat esimerkiksi rakennuksen rakennejärjestelmä, mittasuhteet, kustannustehokkuus, vaatimukset rakennuksen muuntojoustavuudelle, arkkitehtuuri ja käyttötarkoitus. Kustannusten ohella jäykistystavan määrittelevät vaatimukset rakennuksen muunneltavuudelle ja käyttötarkoitukselle.

Erilaisia mahdollisia rakennusrungon jäykistystapoja ovat esimerkiksi:

- Mastojäykistys
 - Mastopilarit
 - Mastoseinät
 - Jäykistystorni
- Kehäjäykistys
- Levyjäykistys
- Ristikkojäykistys
- Useiden jäykistystapojen yhdistelmä



Kuva 2.6 Esimerkki rakennuksen jäykistysrakenteesta, jossa on käytetty jäykistystornia ja mastoseiniä

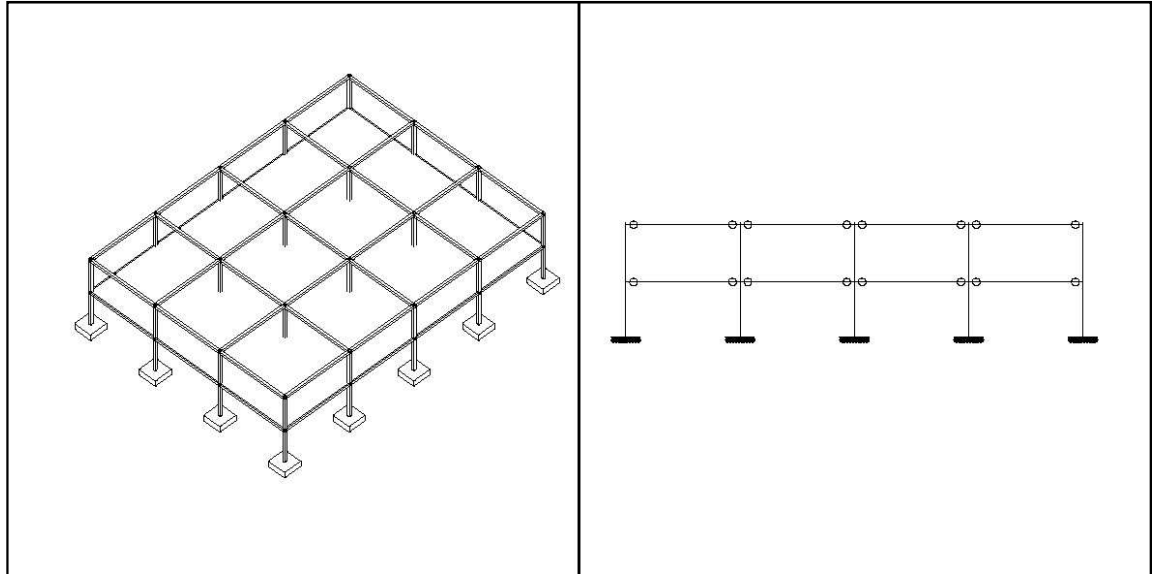
Mastojäykistys

Mastojäykistyksessä jäykistävät rakenteet toimivat ulokepalkin tavoin alapäästään jäykästi kiinnitettyinä ulokepalkkeina, joille tasojen vaakarakenteet siirtävät vaakakuormista aiheutuvat rasitukset. Kuormat siirtyvät rakenteille niiden jäykkyyksien suhteessa.

Rungon muut pystyrakenteet toteutetaan mastojäykistetyssä rakennuksessa nivelliitoksilla, mikä on taloudellista ja aikataulullisesti edullista.

Mastojäykistyksessä voidaan erottaa kolme toisistaan poikkeavaa tyyppiä, mastopilari-, mastoseinä- ja avoprofiili- tai kotelopoikkileikkausten muodostamien kuilujen ja tornien muodostamiin mastoihin

Mastopilarijäykistys



Kuva 2.7 Periaate mastopilarijäykistyksessä

Toimintaperiaate

Mastopilarit toimivat jäykästi alapäästään perustuksiin kiinnitettyinä ulokkeina vaakakuormia vastaan. Vaakakuormat siirretään pilareille suoraan ulkoseinärakenteiden välityksellä ja jäykkien tasorakenteiden kautta. Palkkien ja pilareiden väliset liitokset ovat nivelellisiä, mutta niiden on siirrettävä vaakavoimia. Tasot suunnitellaan jakamaan kuormat mastopilareille niiden jäykkyyksien suhteessa.

Mastopilareiden rasitukset (M,H ja N) siirretään jäykän liitoksen kautta anturalle, joka siirtää rasitukset joko suoraan tai paalujen välityksellä maapohjaan.

Mastopilarijäykistys soveltuu matalahkoihin 1-3 kerroksisiin rakennuksiin ja käyttökelpoisuuden rajana voidaan pitää n 12m:n korkeutta. Tämän korkeuden jälkeen pilarien vaadittavat poikkileikkausmitat kasvavat epätaloudellisiksi ja siirtymien hallinta vaikeutuu.

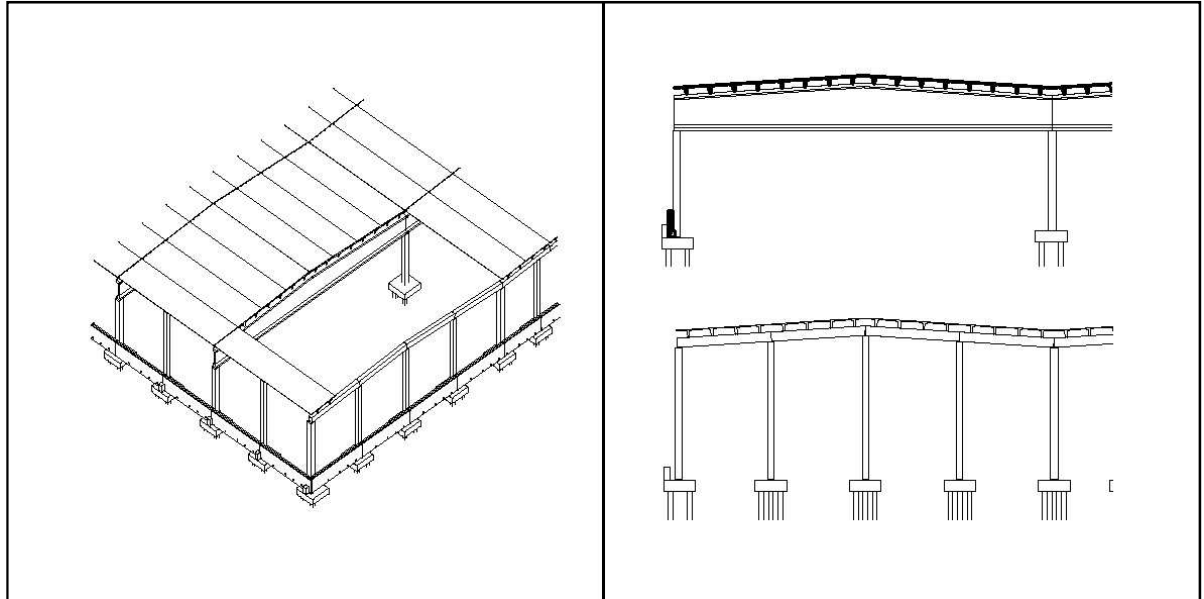
Hyvää :

- Yksinkertainen tehdä ja asentaa
- Välttämättä ei tarvita suuri voimia siirtäviä liitoksia kattolevyssä
- Mahdollistaa suuret yhtenäiset esteettömät lattiapinnat, eikä seinillä tarvita levy- ja/tai sauvajäkisteitä
- Muuntojoustavuus

Huonoa:

- Pilarikoko suurempi kuin seinä- tai vinojäykistetyssä rakenteessa

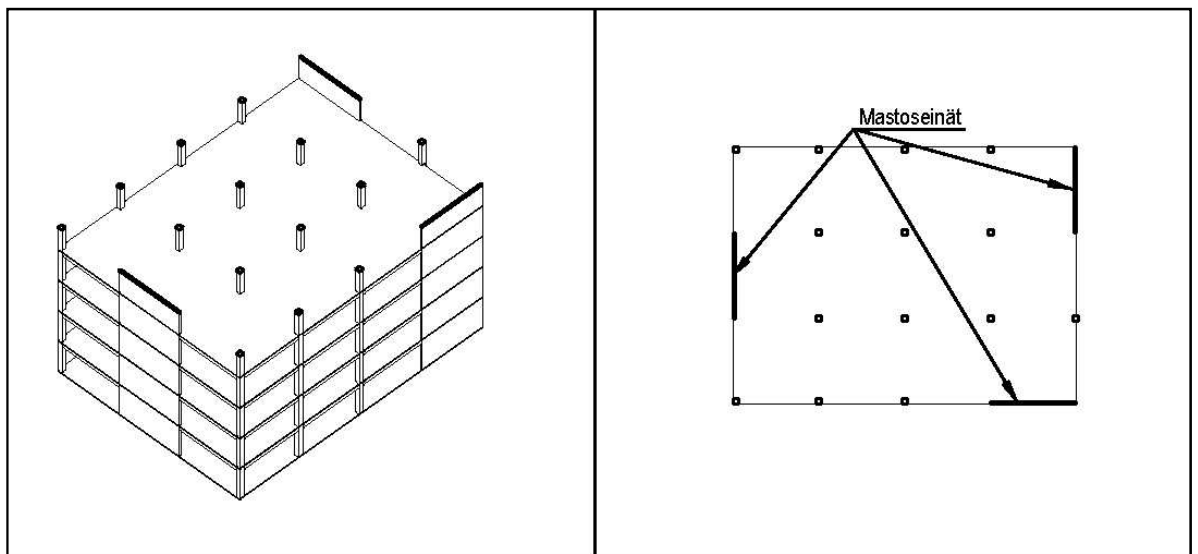
- Raudoitemäärä pilarissa suurempi
- Perusanturoiden koko suurempi



Kuva 2.8 Esimerkki rakennuksen mastopilarijäykistyksestä (osa rakenteista on piilotettu havainnollisuuden takia)

Mastoseinäjäykistys

Mastoseinä toimii ulokepalkkina. Jäykkänä levyinä toimivat tasot siirtävät vaakakuormat mastoseinille. Seinämastot voidaan koota seinäelementeistä, joiden vaaka- ja pystyliitossaumat mitoitetaan siirtämään normaalivoima- ja leikkausrasitukset niin, että ne toimivat yhtenäisenä rakenteena. Masto kiinnitetään perustuksiin joko jäykästi tai ääripisteistään, jolloin kiinnityspisteiden normaalivoimien muodostama voimapari vastaa maston taivutusmomenttia.



Kuva 2.9 Periaate mastoseinäjäykistyksessä

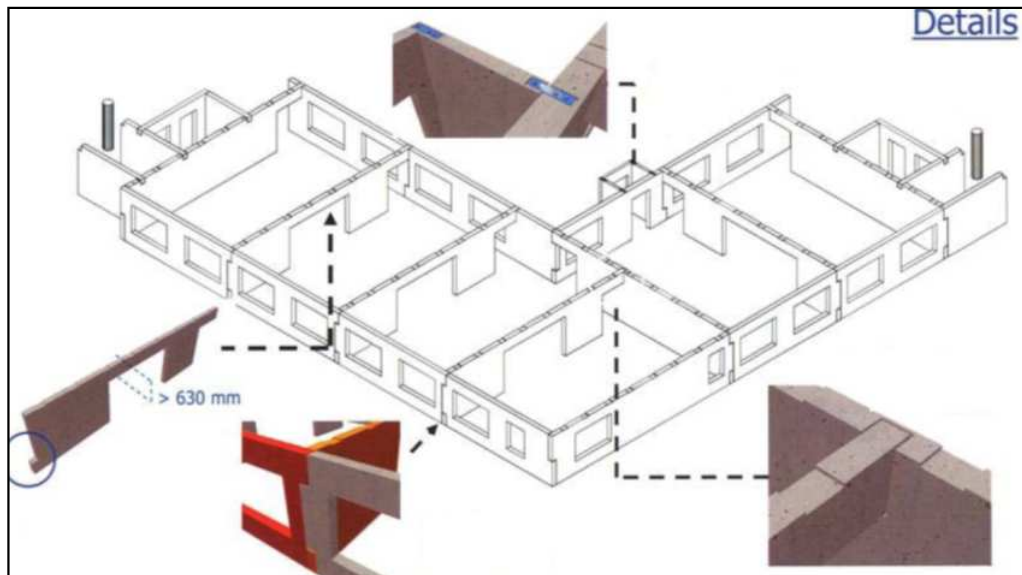
Mastoseinät pyritään sijoittamaan siten, että niille saadaan riittävät pystykuormat ja mastoseinä on kokonaan puristettu kaikissa kuormitustapauksissa. Mikäli mastoseinään tulee vetoa, on huolehdittava vetovoimien siirtämisestä maapohjaan asti. Mastoseinien ankkurointi on aina erikoistapaus ja niitä on suunnittelun keinoin pyrittävä välttämään. Ankkurointitapoina voidaan käyttää esimerkiksi jännitettyjä kallio- tai maa-ankkureita.

Mastoseinien halkeilua ja muodonmuutoksia voidaan tarvittaessa pienentää esimerkiksi jälkijännittämällä mastoseinä. Vaakasuoran leikkausvoiman siirtämiseen elementtien saumoissa voidaan käyttää pintojen välistä kitkaa, vaarنویتusta, terästappeja tms. liitostekniikkaa. Pitkiin mastoseiniin voidaan joutua tekemään myös pystysuuntaisia saumoja, ettei yksittäisten elementtien koko kasva liian suureksi. Tällöin on muistettava mitoittaa ko. saumat siinä vaikuttavalle pystysuuntaiselle leikkausvoimalle, jotta seinän osat saadaan toimimaan monoliittisesti yhdessä. Mastoseinien jäykkyydet on laskettava todellisilla jäykkyyksillä huomioiden mahdolliset aukot (ovet, ikkunat tms.) seinissä.

Jäykistävät seinät pyritään sijoittamaan mahdollisimman symmetrisesti rakennukseen.

Mastoseinäjäykistys soveltuu mastopilarijäykistyksestä poiketen myös korkeisiin rakennuksiin.

Voimat elementtien liitoksissa voidaan siirtää esimerkiksi Suomessa yleisimmällä tavalla vaijerilenkkiliitoksien tai esimerkiksi kuvan 2.10 esittämällä tavalla (käytössä Hollannissa).



Kuva 2.10 Voimien siirtäminen puristusliitoksilla leikkausliitosten sijaan, Hollanti /CORSMIT/

Hyvää :

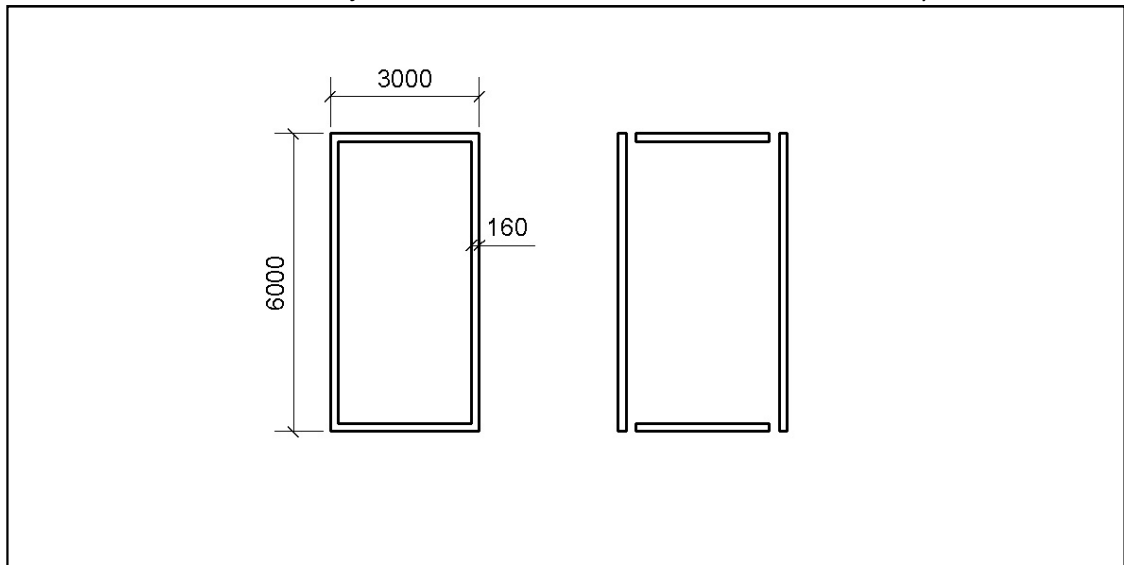
- Muut pystyrakenteet voidaan mitoittaa nivelellisinä, eikä niille tarvitse siirtää rakennuksen jäykistyskuormia, jolloin niiden koko säilyy pienenä.
- Mastoseinät ovat tehokkaita jäykistyksessä ja niiden määrä pystytään pitämään pienenä.
- Pelkästään pystykuormia siirtävät muut kantavat rakenteet voidaan toteuttaa yksinkertaisempina
- Vaakavoimien siirtämiseen tarvittavien työläämpien saumatoteutusten määrä voidaan minimoida
- Soveltuu korkeampiinkin rakennuksiin ja on tehokas jäykistysjärjestelmä
- Muodonmuutokset ovat seinien suuresta jäykkyydestä johtuen pieniä

Huonoa:

- Kun jäykistysseinien määrä pyritään minimoimaan ja seinien pituutta ei saada riittäväksi, saattavat vaakavoimat yksittäisessä seinässä kasvaa suuriksi ja vaatia seinien raudoitteilta, seinäkengiltä ja saumateräksiltä merkittäviä kapasiteetteja.
- Jos jäykistysseinien määrä on pieni, vaakavoimia siirtävät liitokset tasojen ja seinien välillä voivat muodostua vaikeiksi toteuttaa
- Yksittäiset seinät korkeammissa rakennuksissa saattavat olla vedettyjä, jolloin on huolehdittava ko. voimien siirtämisestä maapohjaan asti
- Jäykistysseinien aukot vaativat isompia rauditusmääriä

Jäykistystornit ja jäykistystornien ja –seinien yhdistelmät

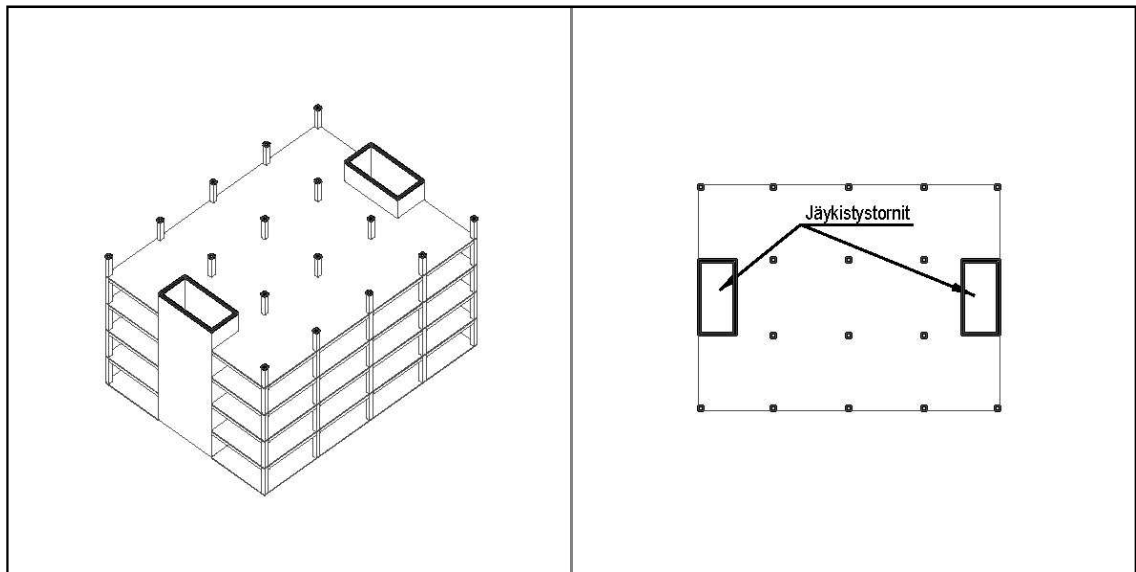
Jäykistystornit toimivat samaan tapaan kuin mastoseinät, eli ulokepalkkeina perustuksista. Käytettäessä jäykistystorneja on muistettava mitoittaa tornien eri seinien liittymät liitoksessa vaikuttavalle leikkausvoimalle, jotta rakenteet saadaan toimimaan monoliittisesti yhdessä.



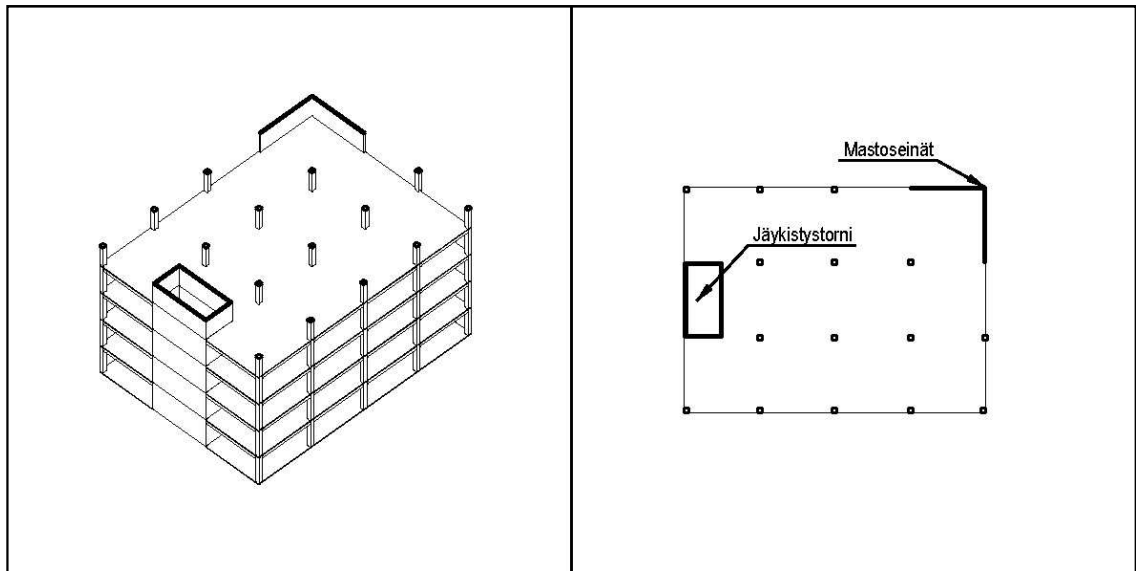
Kuva 2.11 Tornin ja vastaavien mastoseinien vertailu

Kuvan 2.5 mukaisen jäykistystornin jäyhyysmomentti y-suuntaan on $I_{xtorni}=13.07m^4$ ja vastaavien irrallisten seinien yhteenlaskettu jäyhyysmomentti $I_{xseinät}=5.76m^4$ eli vain noin 44 % tornin jäykkyydestä.

Jäykistystornit ovat hyvin jäykkiä rakenteita ja ne sopivat erityisen hyvin korkeisiin rakennuksiin, jolloin saadaan vaakasuuntaiset siirtymät rajoitettuja sallittuihin arvoihin.



Kuva 2.12 Periaate jäykistystorneja käytettäessä



Kuva 2.13 Jäykistystornin ja mastoseinien yhdistelmä

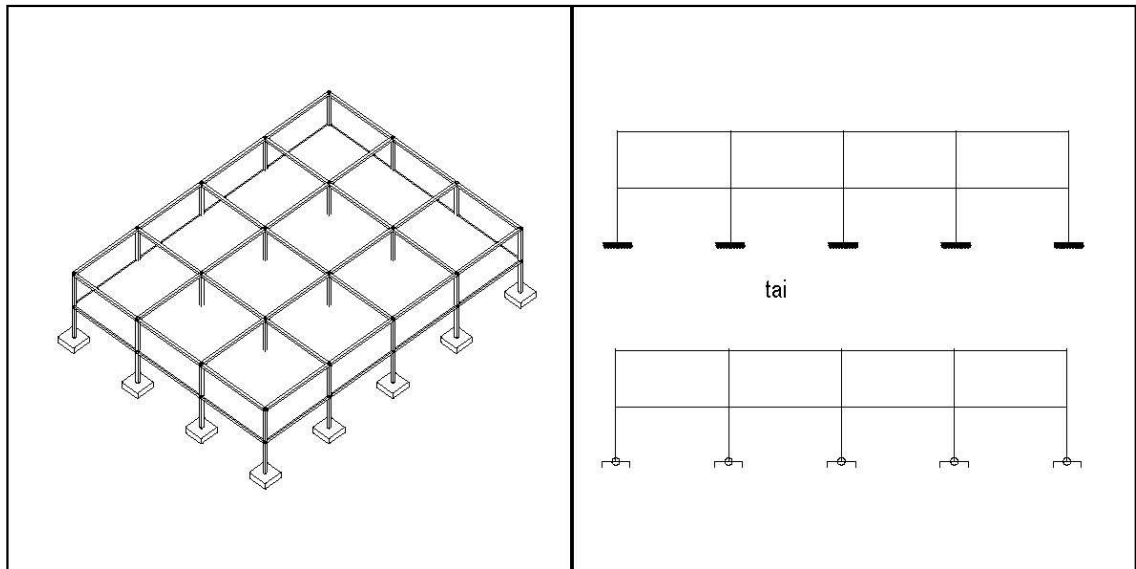
Kehäjäykistys

Nivelellisesti tai jäykästi alapäästään perustuksiin kiinnitetyt pilarit toimivat vaakakuormien rasituksia vastaan kehinä, joiden nurkat ottavat vaakakuormien rasitukset pilarien ja palkkien taivutusrasituksena. Kehäjäykistyksessä kehinän nurkat voivat olla jäykkiä tai osittain jäykkiä. Kehäjäykistämisen toteuttaminen elementtiteknikalla on hankalampi toteuttaa kuin paikallavaletuissa rakennuksissa. Kehäjäykistystä käytetään yleensä teollisuuden rakentamisessa

Kehäjäykistys soveltuu parhaiten matalahkoihin 1-3 kerroksisiin rakennuksiin. Rakenneosien mitat myös kasvavat erillisten jäykistävien rakenneosien käyttöön verrattuna. Osittain jäykkänurkkaisella jäykistyksellä rakenteiden vaaka siirtymien hallinta on lisäksi vaikeaa, jos nurkkien liitosten rasitukset lähestyvät niiden kantokykyä.

Kehäjäykistetyssä rakennuksessa päästään vapaampaan tilojen käyttöön, kun rajoittavat jäykistävät seinät puuttuvat. Kehäjäykistys voidaan toteuttaa myös vain rakennuksen toisessa suunnassa ja toisen suunnan jäykistyksessä käytetään vinotukia tai levyseiniä.

Käyttämällä jatkuvia palkkeja ja kerroksen korkuisia pilareita saadaan palkit raudoitettua yksinkertaisemmin tukimomenteille ja pilarien jäykkyydessä voidaan hyödyntää rakennuksen normaalivoimia. Näin pystytään yksinkertaistamaan liitokset pilarien pulttiliitoksiksi, jotka mitoitetaan kestämaan pilarien päihin jäykistyksestä aiheutuvat momentit. Palkin jatkuvuutta hyödyntämällä voidaan sen korkeutta madaltaa verrattuna vapaasti tuetun palkin korkeuteen. Tarvittaessa palkkia voidaan jatkaa sijoittamalla palkin n. 1/3-osapisteseen liitospaikka. Liitokseen syntyvä nivel kasvattaa kehän sivusiirtymiä, ja vaikutus koko jäykistysjärjestelmän toimivuuteen on tarkistettava.



Kuva 2.14 Periaate kehäjäykistyksessä

Hyvää

- Perustuksissa voidaan käyttää nivelellisiä liitoksia
- Ei ole ylimääräisiä jäykistysrakenteita haittaamassa tilojen käyttöä ja muuntojoustavuutta

Huonoa

- Rakennekorkeus on suurempi kuin levyjäykistetyssä järjestelmässä
- Järjestelmä asettaa omat vaatimuksensa ja rajoituksensa asennusjärjestykselle
- Siirtymien hallinta voi olla vaikeaa ja ne ovat helposti suurempia kuin levyjäykistyksessä
- Liitokset muodostuvat elementtiteknikalla helposti monimutkaisiksi

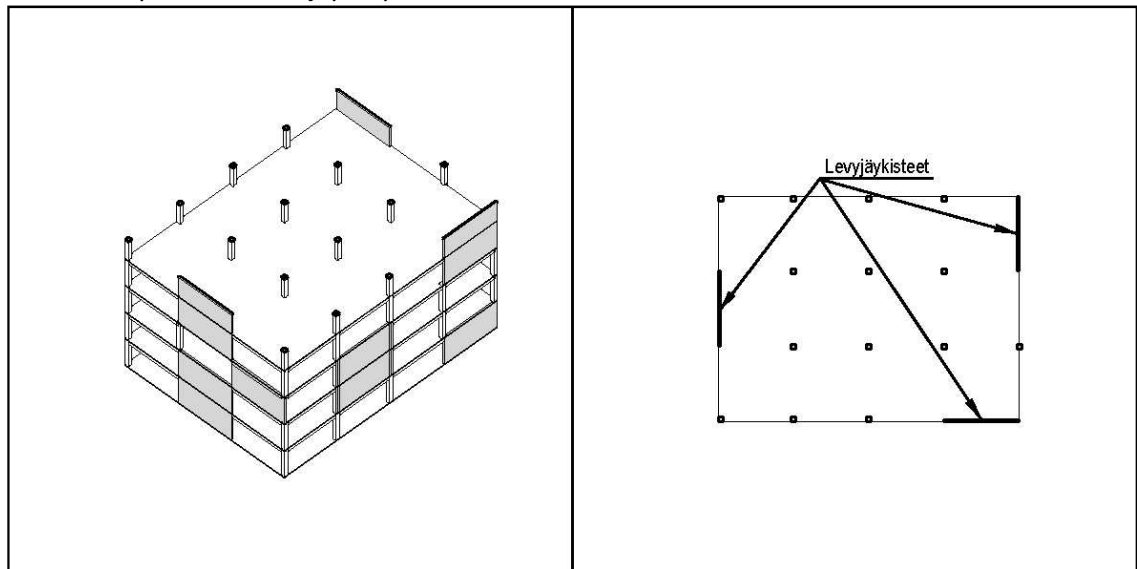
Levyjäykistys

Levyjäykistyksessä rungon aukkoihin sijoitetut levyt jäykistävät rakenteen. Levymäiset rakenteet siirtävät vaakakuormien aiheuttamat rasitukset levyjen leikkausvoimina rakenteille ja perustuksiin. Tasorakenteet jakavat vaakakuormat jäykistäville levyille niiden jäykyyksien ja sijaintien mukaisesti.

Levyseinien sijoitus kerroksissa on melko vapaa, mutta on muistettava siirtää jäykistyksestä aiheutuvat pystykuormat muilla rakenteilla perustuksiin ja maapohjaan, jos jäykistävät levyrakenteet eivät sijaitse kaikissa kerroksissa päällekkäin. Jos levyrakenteet eivät sijaitse päällekkäin, joudutaan jäykisteiden siirtämiä vaakasuuntaisia leikkausvoimia siirtämään tasossa ja tämä voi aiheuttaa vaikeita liitosratkaisuja.

Levyrakenteita pitää sijoittaa rakennuksen runkoon molempiin suuntiin. Levyjäykisteitä on oltava vähintään kolme kappaletta, eikä niiden akseleilla saa olla yhteistä leikkauspistettä.

Levyjäykistykseen erikoistapaus on elementtirakenteinen kerrostalo, jossa luonnostaan väliseinät ja kantavat ulkoseinät toimivat jäykistävinä levyinä. Tällainen rakenne voidaan mitoittaa myös mastoseinäjäykistykseenä.



Kuva 2.15 Periaate levyjäykistyksessä

Hyvää

- Perustusten koko ei yleensä kasva jäykistykseen takia, koska jäykistävien rakenteiden määrä on normaalisti suuri (asuinkesto)
- Rakenne on jäykkä, jolloin siirtymät jäävät pieniksi
- Yleensä ei tarvita sisätilojen käyttöä rajoittavia ylimääräisiä rakenteita pystykuormia kantavien rakenteiden lisäksi

Huonoa

- Järjestelmä asettaa omat vaatimuksensa ja rajoituksensa asennusjärjestykselle
- Jos levyrakenteita on vähän, voivat voimia siirtävät liitokset olla vaikeita toteuttaa

Ristikkojäykistys

Levyjäykistykseen sijaan esimerkiksi pilari-palkkirunkoisessa rakennuksessa voidaan käyttää ristikkojäykistystä. Ristikkojäykistys on toimintaperiaatteeltaan levyjäykistykseen kaltainen. Levyjäykisteet on korvattu veto- ja/tai puristussauvoilla.

Jäykistysristikot voidaan toteuttaa kahdella periaatteella erilaisella tavalla:

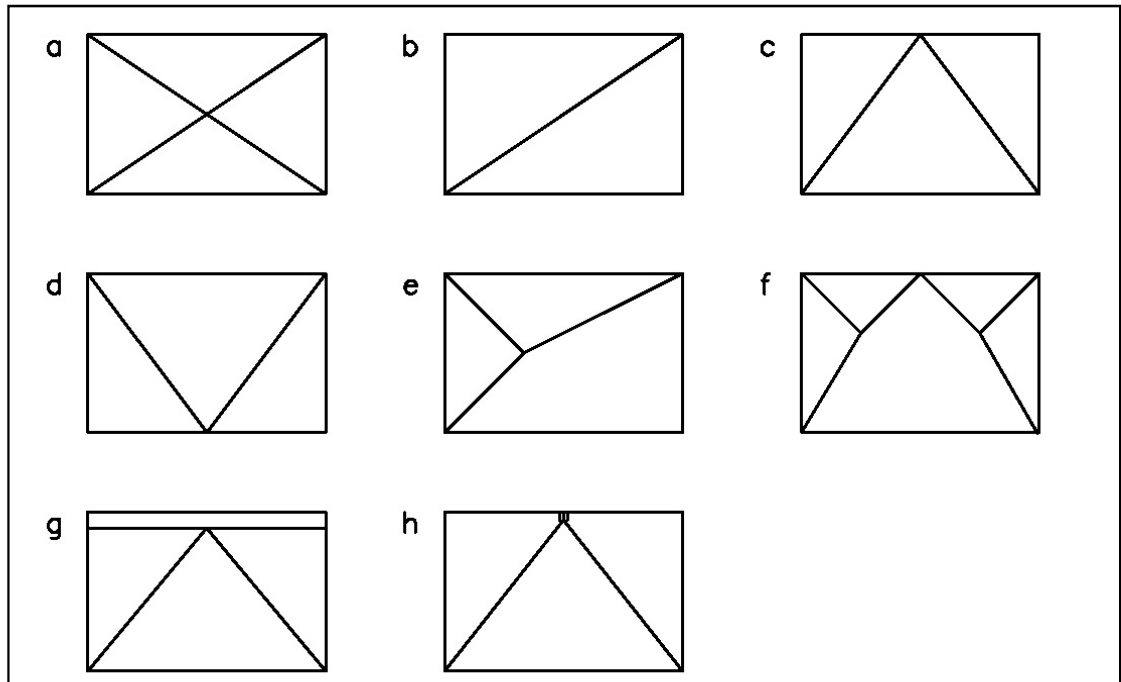
- Jäykistysristikko on osa pystykuormia kantavaa rakennetta
- Jäykistysristikko on erillinen osa

Jäykistysristikko on osa pystykuormia kantavaa rakennetta:

Ristikon paarteina voivat toimia esim. pilarit tai seinät ja vain ristikon diagonaalit ja joissain tapauksissa vertikaalit ovat erillisiä jäykistysristikon osia. Ristikon paarteet (pilarit tai seinät) saavat vaakakuormituksen aiheuttaman momentin seurauksena lisänormaalivoiman, joka on huomioitava rakenneseosien mitoituksessa. Pystykuormien ollessa pieniä, voi jäykistysristikon paarre olla myös vedetty.

Kantavan pystyrakenteen osana toimivan jäykistysristikon mitoituksessa on otettava huomioon myös kantavista rakenteista ristikon sauvoille mahdollisesti tulevat lisäkuormitukset. Lisäkuormituksia voi tulla tiettyihin ristikkotyyppisiin (c ja g kuvassa 2.8) vaakarakenteiden painumista. Lisärasituksia voi tulla korkeissa rakennuksissa ristikon eri osien (paarteet ja diagonaalit) erilaisista materiaaleista johtuen. Betonipilarit kutistuvat ja tapahtuu muodonmuutoksia pystykuormista johtuen, jolloin diagonaalit voivat saada lisärasituksia.

Pelkästään vedetyillä sauvoilla (kuva 2.8 a) saavutetaan etua diagonaalisauvojen mitoituksessa, koska rakenne toimii aina vedettynä. Sauvoja on kuitenkin ristissä ja tämä haittaa tilankäyttöä enemmän kuin yksi sauva tai muuten sijoitetut puristetut sauvat (esim. kuva 2.8 c, e, f, g ja h tavat). Tyyppin c ja f ristikot ovat jäykistykseen ja tilankäytön kannalta edullisia, mutta ne saavat vaakarakenteen taipumista lisärasituksia ja päinvastoin vaakarakenteet saavat jäykistysristikolta lisärasituksia ja mitoitus voi olla työlästä. Tyypeissä g ja h on esitetty mahdollisia ratkaisuja näiden ongelmien poistamiseksi.



Kuva 2.16 Erilaisia kantavan rakenteen osana toimivan ristikon ristikkoratkaisuja

Erillinen jäykistysristikkorakenne

Ristikkojäykistyksessä voidaan käyttää myös kantavasta pystyrungosta erillään toimivia jäykistysristikoita. Ristikot ovat tällöin yleensä rakenteen ulkopuolelle sijoitettavia kokonaisuuksia, jolle siirtyvät pystykuormat ovat pieniä ja tämä johtaa yleensä ankkurointiin. Erilliset ristikot voidaan tuoda työmaalle suurempina kokonaisuuksina tai ne voidaan koota sauvoista työmaalla.



Kuva 2.17 Esimerkki ulkoisista jäykisteistä Hollanti /CORSMIT/
Asennusaikainen jäykistys ristikoidilla

Ristikoita voidaan helposti käyttää työmaalla asennusaikaiseen jäykistykseen, kun esimerkiksi rakennuksen lopullinen jäykistysjärjestelmä ei vielä ole toimiva tai asennusjärjestys aiheuttaa väliaikaisen jäykistykseen tarpeen. Asennusaikaisen jäykistysristikon liittämiseen runkoon käytetään mieluiten pulttiliitoksia, jotka ovat helposti purettavissa.

Yhdistelmäjäykistys

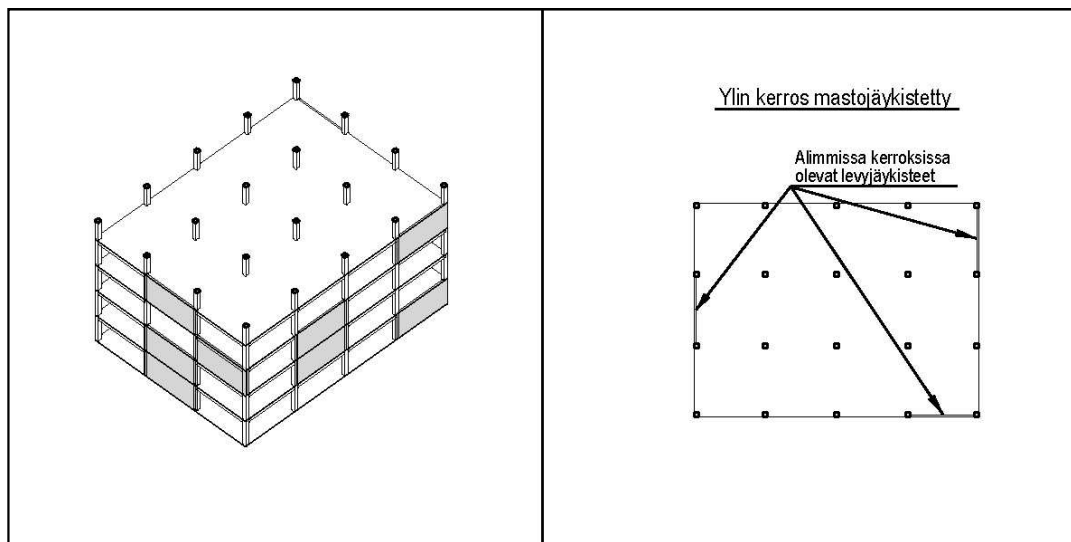
Edellä mainittujen jäykistysmuotojen yhdistelmiä voidaan soveltaa tarkoituksenmukaisesti kokonaistaloudellisesti mahdollisimman edullisen ratkaisun saavuttamiseksi. Esimerkiksi levyjäykistetty rakennuksen alaosa ja pilarimastojäykistetty ylin kerros voivat olla taloudellisesti, asennuksen ja työjärjestyksen kannalta tehokas ratkaisu.

Toinen yleisesti käytetty yhdistelmä on mastoseinä- / kuilujäykistys yhdistettynä jäykistävään ristikkorakenteeseen.

Yhdistelmäjäykistystä käytettäessä on erityisesti huomattava eri jäykistysjärjestelmien erilaiset jäykkyydet ja jaettava vaakakuormat oikein eri jäykisteille. Esimerkiksi jäykistysseinä on selvästi jäykempi kuin vastaavan korkuinen jäykistysristikko.

Jäykkyydet voidaan melko luotettavasti selvittää kun lasketaan rakennuksen jäykistys yleisillä FIM-ohjelmistoilla. Tällöin on selvitettävä huolellisesti, huomioiko ohjelma esimerkiksi leikkausmuodonmuutokset korkeissa mastoseinissä ja voidaanko ohjelmassa tarvittaessa käyttää toisen kertaluvun laskentaa.

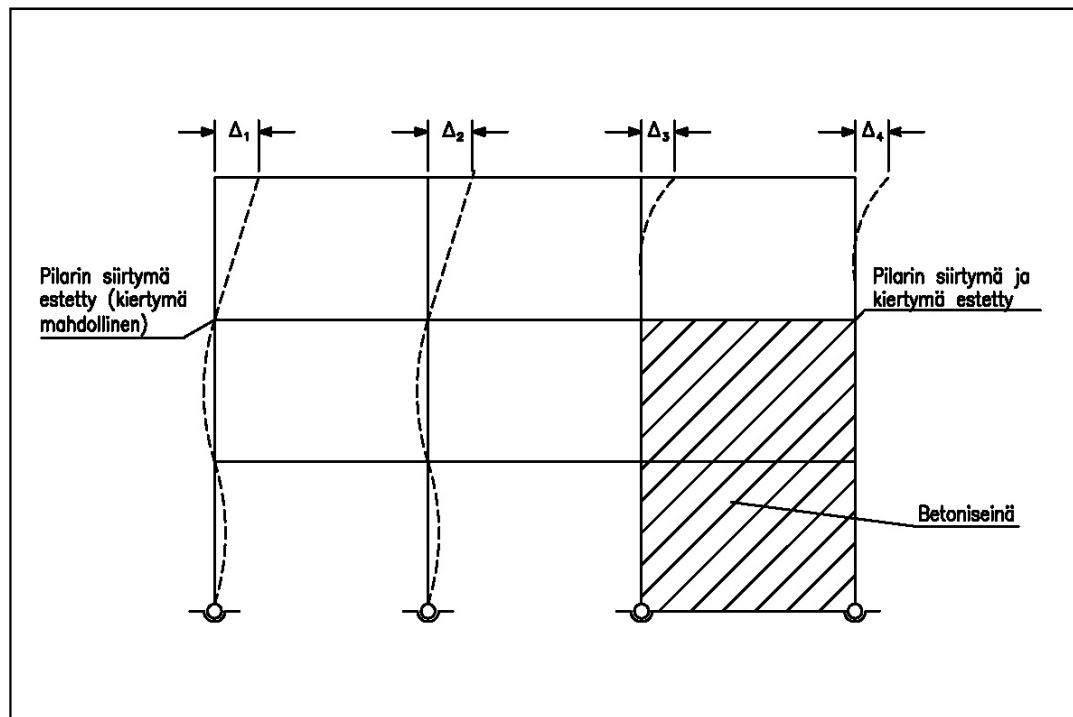
Yhdistetty levy- ja mastopilarijäykistys



Kuva 2.18 Yhdistetty levy- ja mastopilarijäykistys

Rakennuksessa alimmat kerrokset on jäykistetty levyrakenteilla ja ylin kerros on jäykistetty mastopilareilla. Jäykistyksessä on tässä tapauksessa huomioitava, etteivät pilarien jäykkyydet ylimmässä kerroksessa ole samat, vaikka niiden poikkileikkaus olisikin kaikissa sama. Tämä johtuu siitä, että pilareiden kiinnitysaste ylimmän kerroksen lattiatasossa ei ole samanlainen.

Levyjäykiste alapuolella estää pilarin kiertymän, kun taas alapuolinen pilari sallii kiertymän ylimmän kerroksen lattiatasossa. Kuva 2. 13 selventää asiaa.

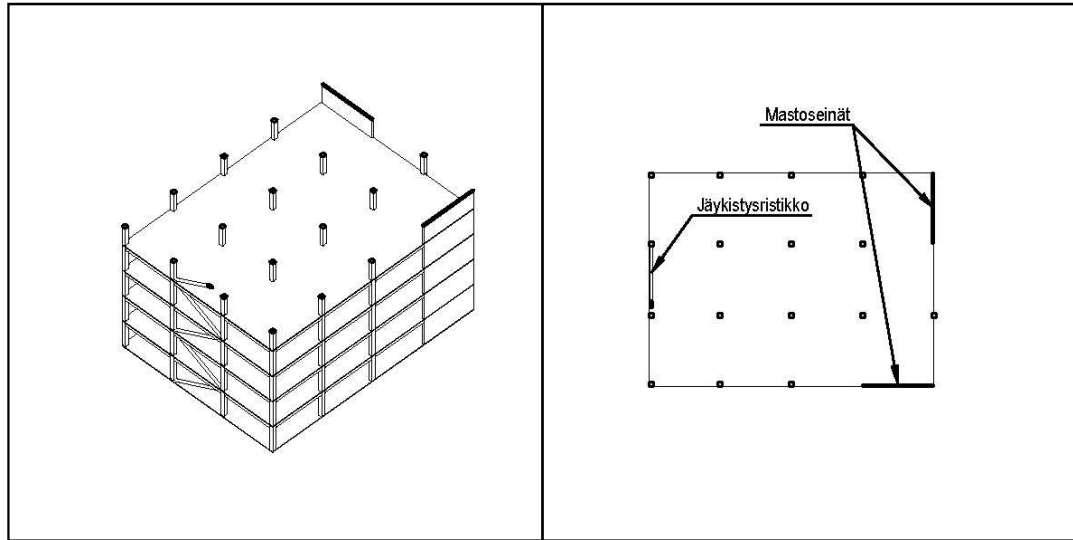


Kuva 2.19 Yhdistetyn levy- ja mastopilarijäykistykseen toimintaperiaate

Esitetty ratkaisua voidaan hyvin soveltaa esimerkiksi rakentamalla ylimmässä kerroksessa oleva IV-konehuone mastopilarijäykistyksellä ja näin välttää tekniikan sijoittamista hankaloittavia jäykistysrakenteita.

Yhdistetty mastoseinä- ja ristikkojäykistys

Jäykistettäessä rakennus mastoseinillä ja jäykistysristikoilla, on laskettavajäykisteiden suhteelliset jäykkyydet. Jäykistys voidaan melko luotettavasti laskea yleisillä FEM-ohjelmilla kun huolehditaan, että rakennus on mallinnettu oikein. Jäykkyyksien suhde voidaan laskea myös likimääräismenetelmillä.



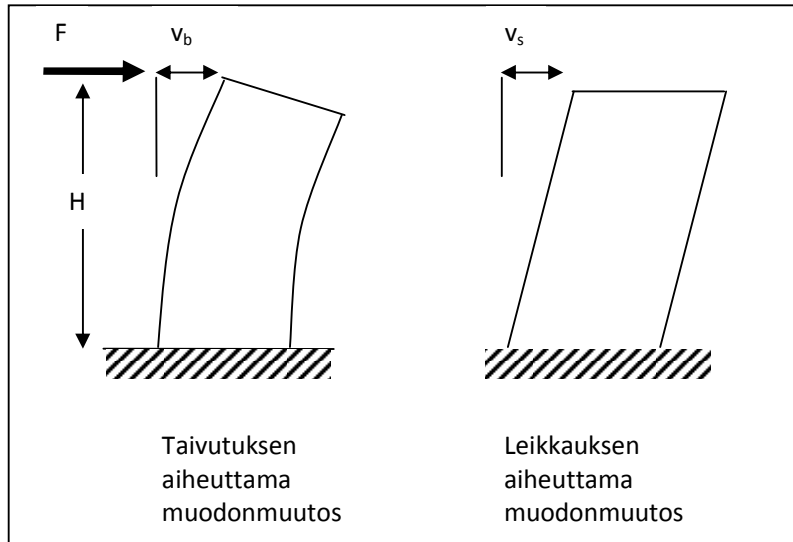
Kuva 2.20 Yhdistetty mastoseinä- ja ristikkojäykistys

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

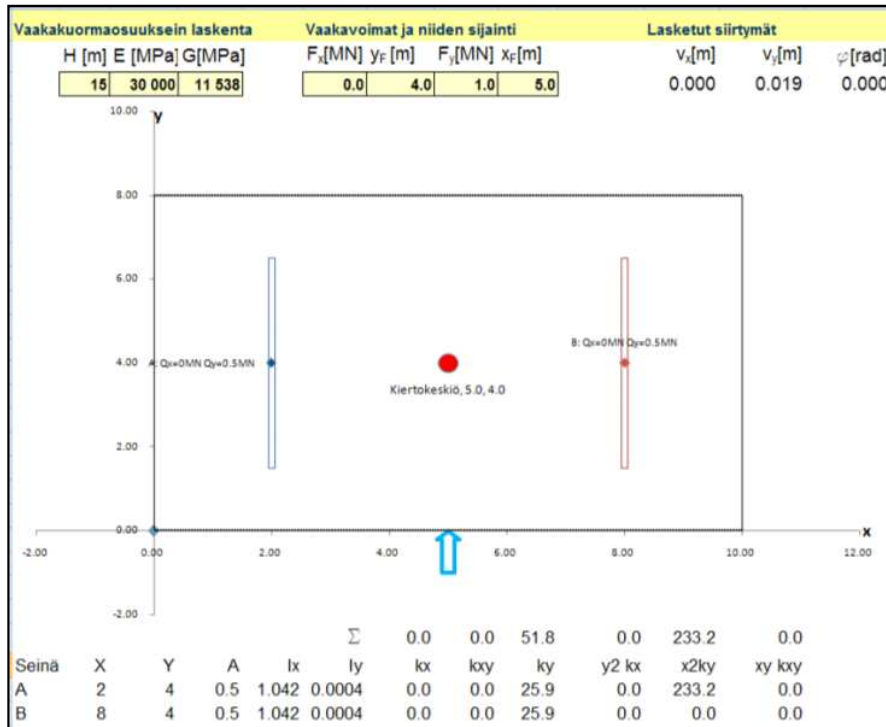
$$Q_y = \frac{k_y}{\sum k_y} F_y \quad (3.9)$$

missä

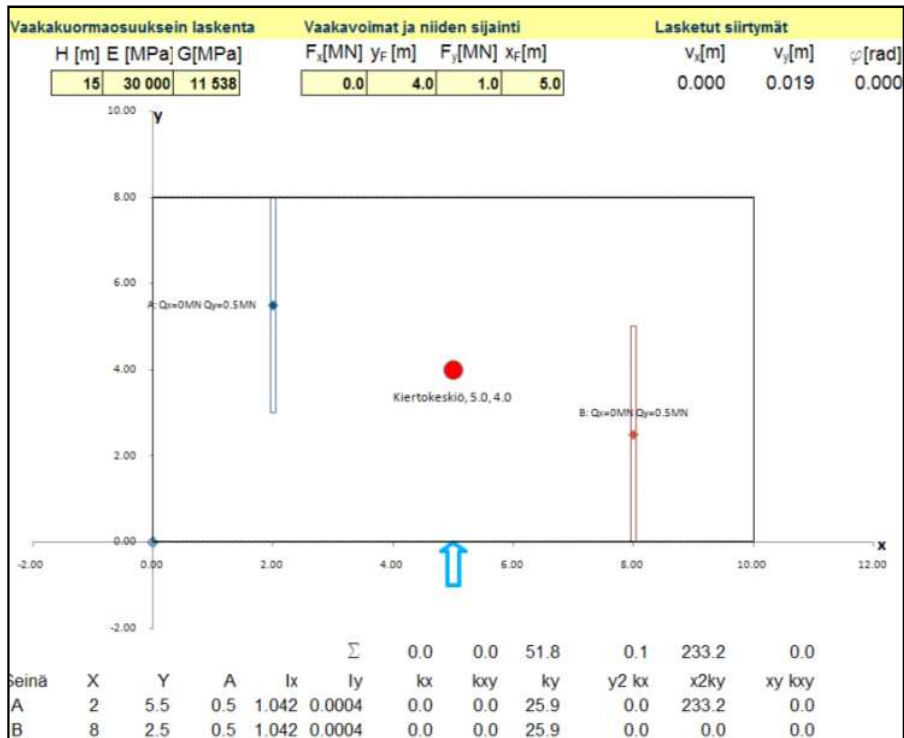
Q_y on kyseisen seinän y -akselin suunnassa ottama osuus kokonaisvaakavoimasta F_y

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

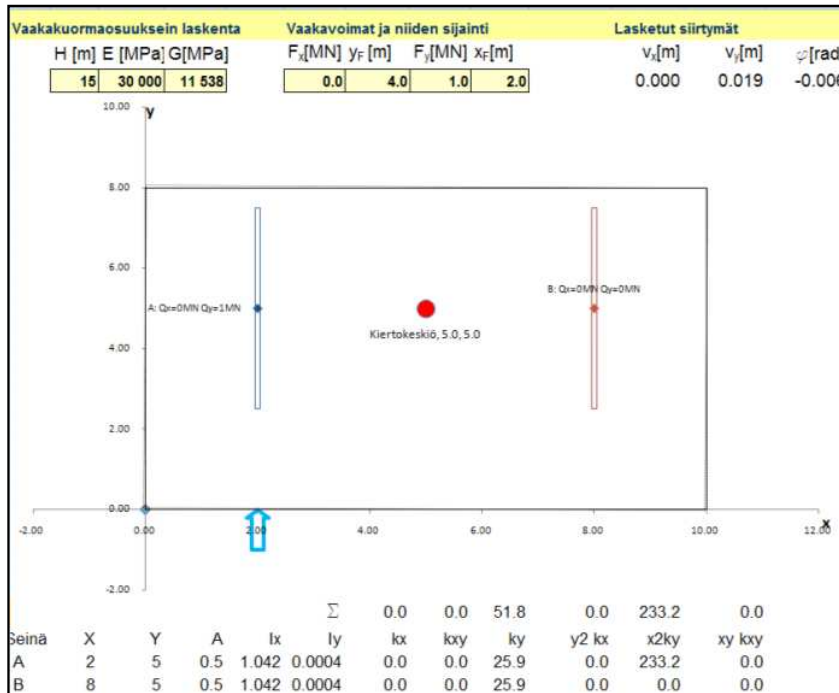
$\sum k_y$ on jäykistävien seinien jäykkyyksien summa



Kuva 3.1 Voimien jakautuminen staattisesti määrättyssä systeemissä

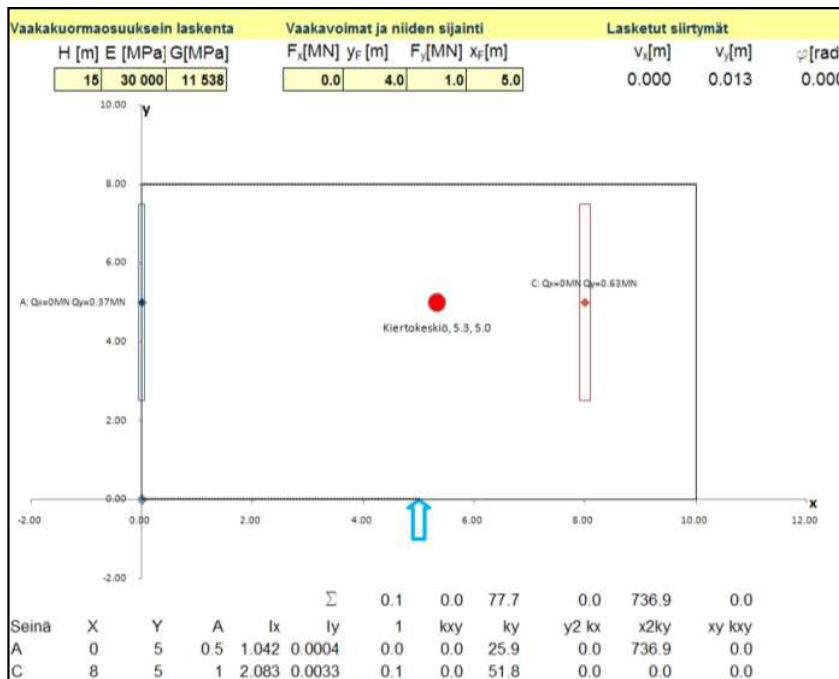


Kuva 3.2 Seinien sijainti voi siirtyä voiman suuntaisella linjalla, ilman että seinien ottamat osuudet vaakavoimasta muuttuvat.



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

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

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

φ 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.

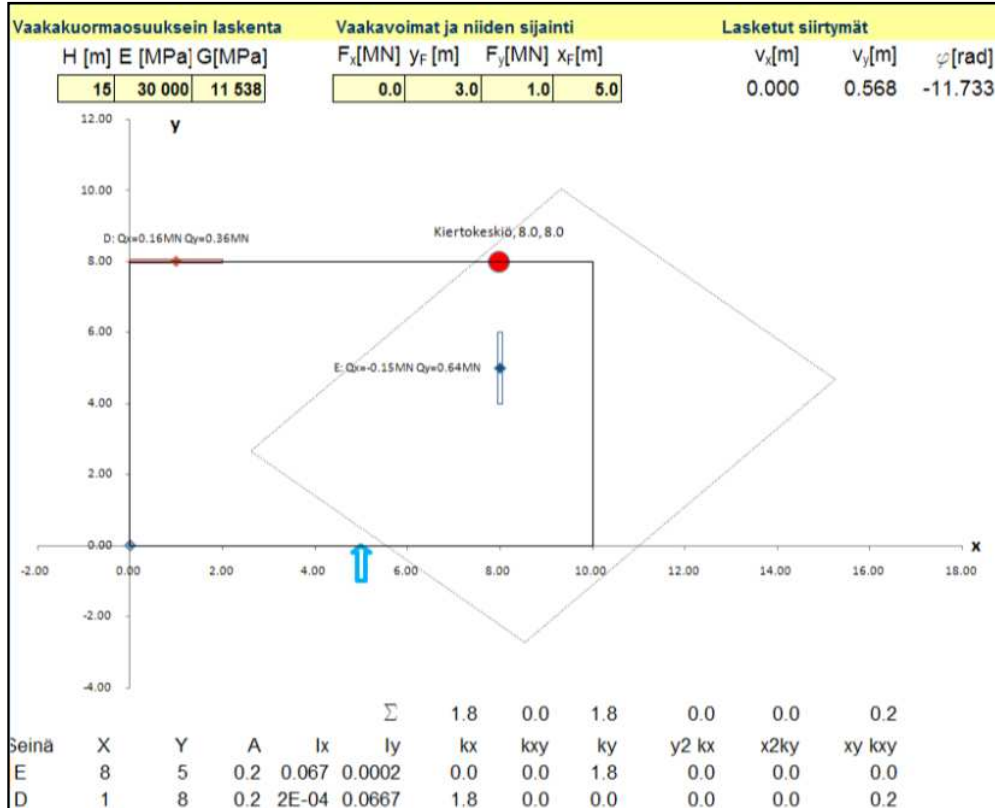
Osamastojen kuormitukset saadaan siirtymätilan perusteella

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

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

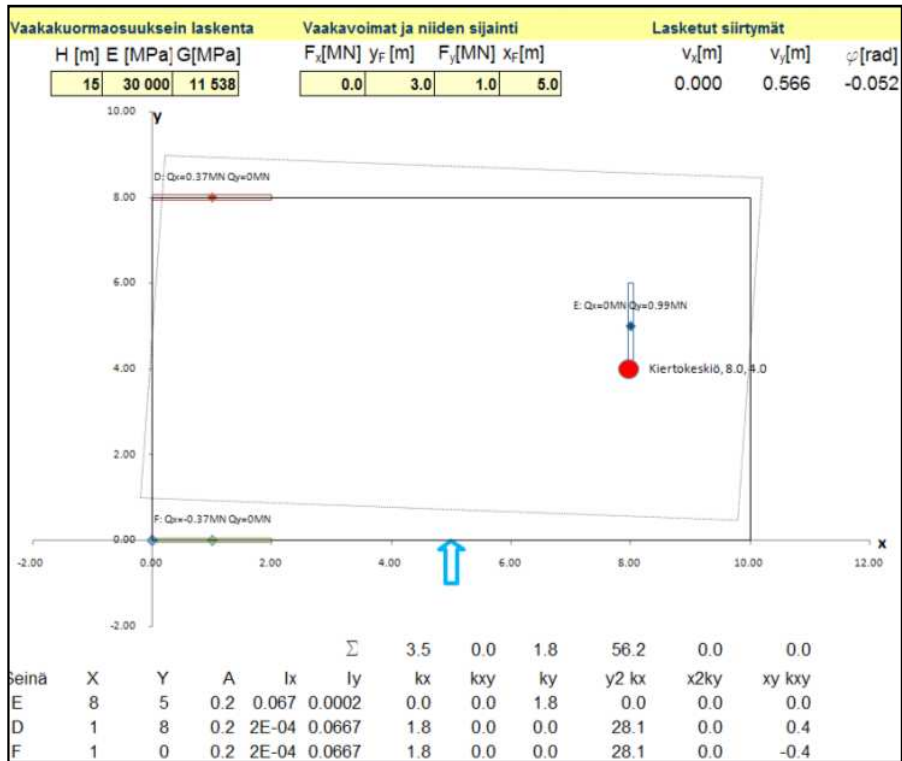
Suorien mastoseiniin tapauksessa kiertymän kaavan osuus T_{xy} jää pieneksi ja voidaan unohtaa laskemasta.

Laskentaesimerkkejä kiertyvästä jäykistysysteemistä



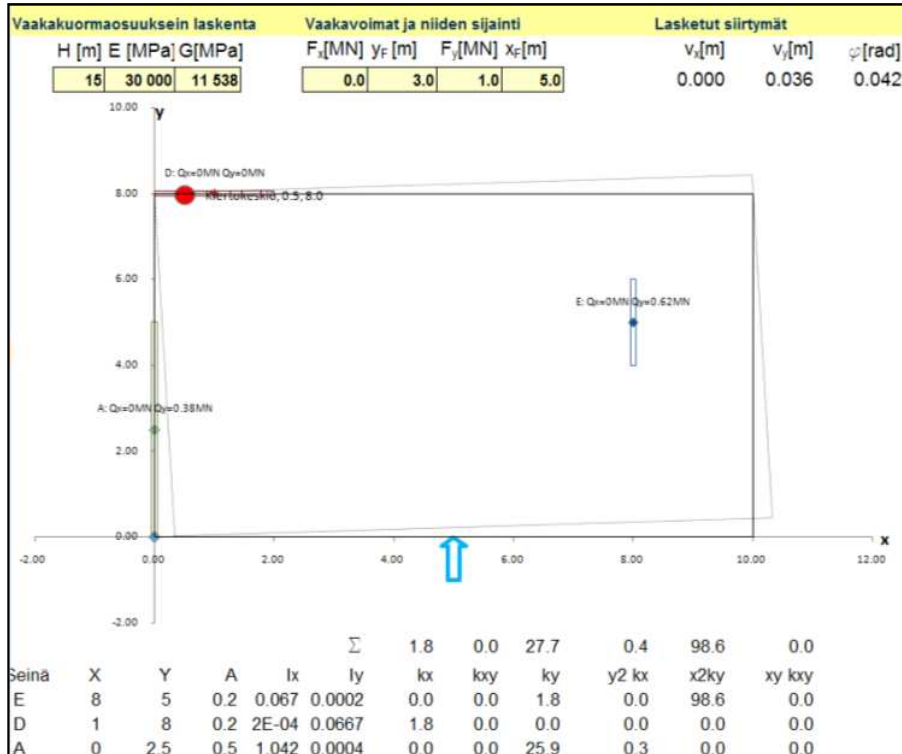
Kuva 3.5 Seinien kiertoakeskiö asettuu seinälinjojen jatkeiden leikkauspisteeseen.

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



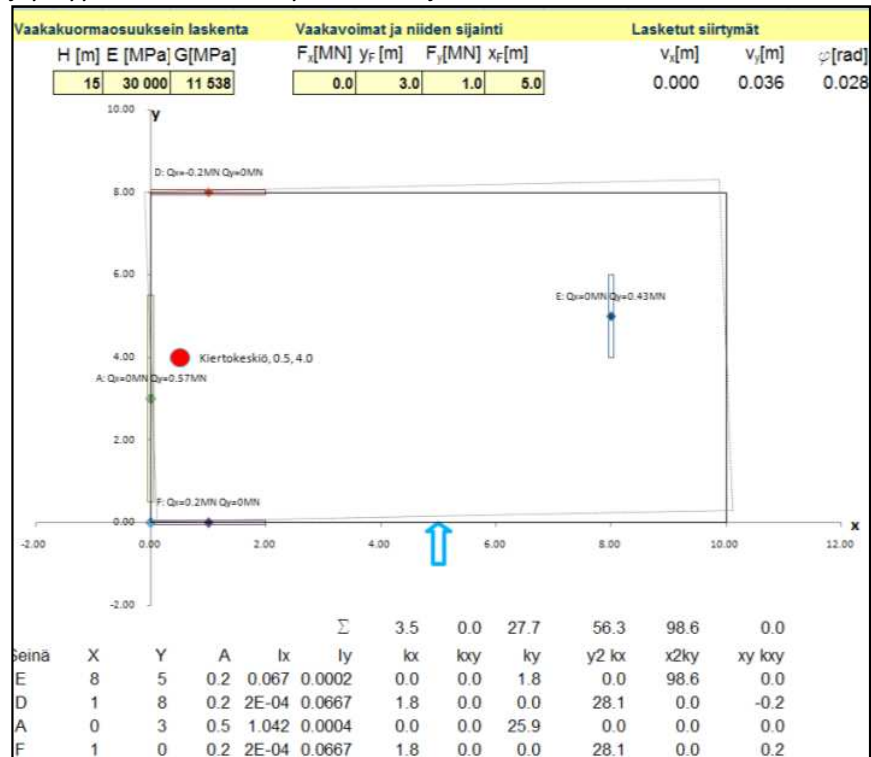
Kuva 3.6 Kolmas seinä jäykistää systeemin, y-suuntainen seinä ottaa kokonaisuudessaan F_y-voiman, x-suuntaiset seinät ottavat kiertymän vaikutuksen.

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

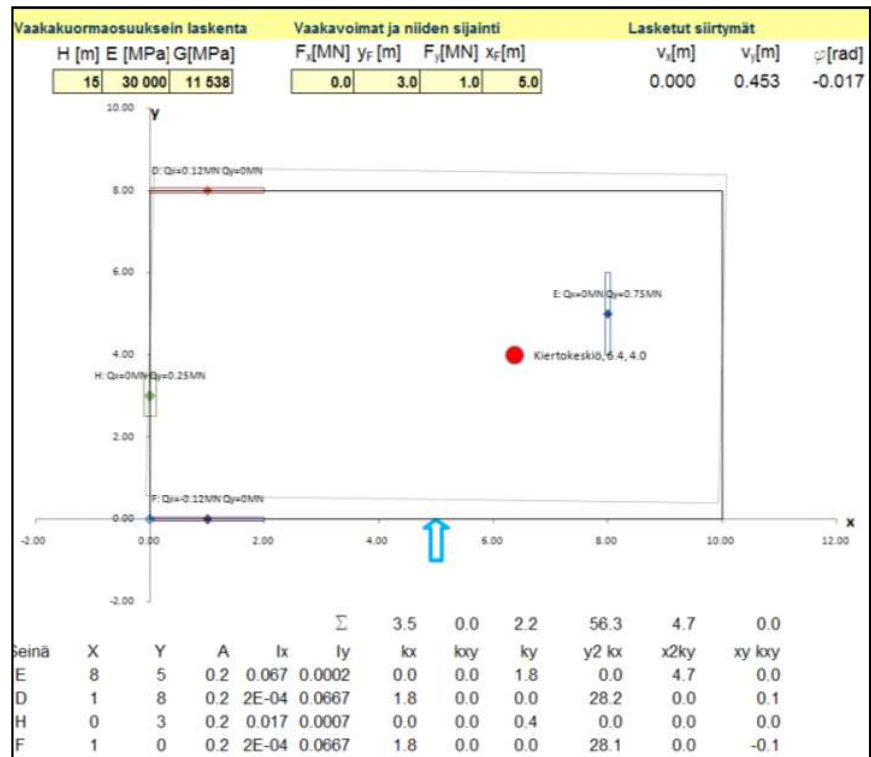


Kuva 3.7 Kolmannen seinän sijoittaminen voiman suuntaan parantaa tilannetta. Vaakavoima jakautuu y-seinien kesken kuten kaksitukisessa palkissa.

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_y-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 α 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

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

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

Siirtymätilan ratkaisu saadaan taas tasapainoyhtälöistä

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

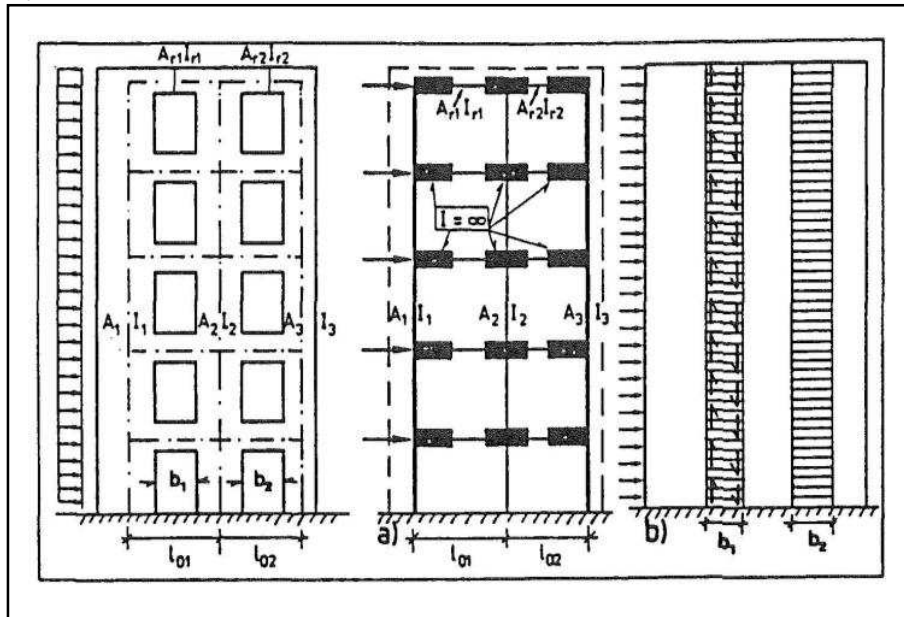
Osamastojen kuormitukset saadaan siirtymätilan perusteella

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

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.

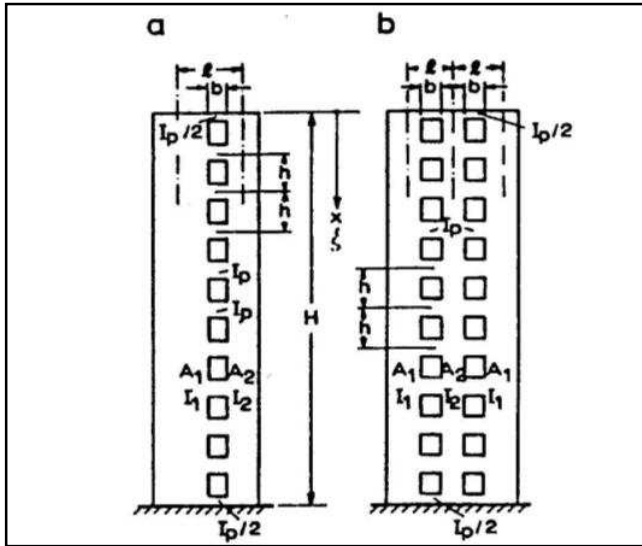
FEM -menetelmää käyttämällä on suhteellisen yksinkertaista mallintaa seinälevyn aukot. Malli voidaan muodostaa joko kuorielementtiä, siis tasojännitystilän elementin ja laattaelementin yhdistelmää käyttämällä tai käyttämällä kehämallia. Aukkorivillisen jäykistysseinän kehämalli (kuva 3.10 a) muodostetaan niin, että pystyaukkojen väliset ja aukkojen reunojen viereiset pystyosat korvataan niiden painopisteakseleilla sijaitsevilla vastaavilla pilareilla. Vaakapalkit muodostetaan niin, että aukkojen välisillä osilla kehäpilaariin 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

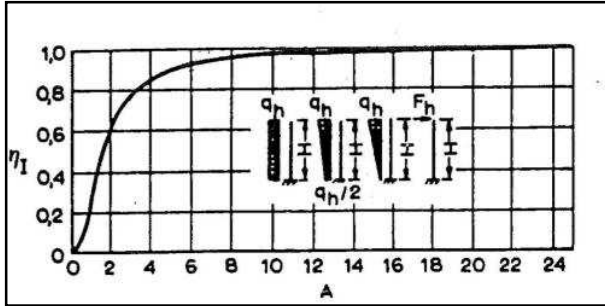
η_I on diagrammista saatava tekijästä A riippuva kerroin

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

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

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:

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

missä

h on kerroskorkeus

H on seinän kokonaiskorkeus

b on aukon leveys.

I_p on aukkojen välisen poikkipalkin jäykkyys, jonka arvossa on otettu huomioon taivutusjäykkyyden ohella myös leikkausmuodonmuutoksesta aiheutuva jäykkystekijä, joka saadaan kaavasta:

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

missä

h_p 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 kokonaisvaakuormasta.

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)

$$M_{ax} = \sum M_i + Tl \quad (3.23)$$

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

missä

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

M_{aH} 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:

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

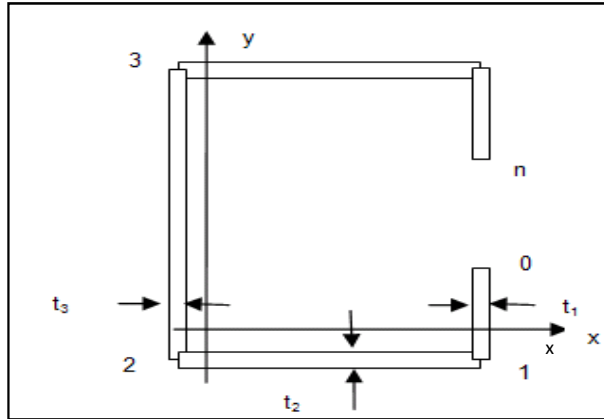
/xx/:ssä on myös taulukoit arvot kertoimelle η' , jolloin V_{px} saadaan myös suoraan kaavasta

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

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

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

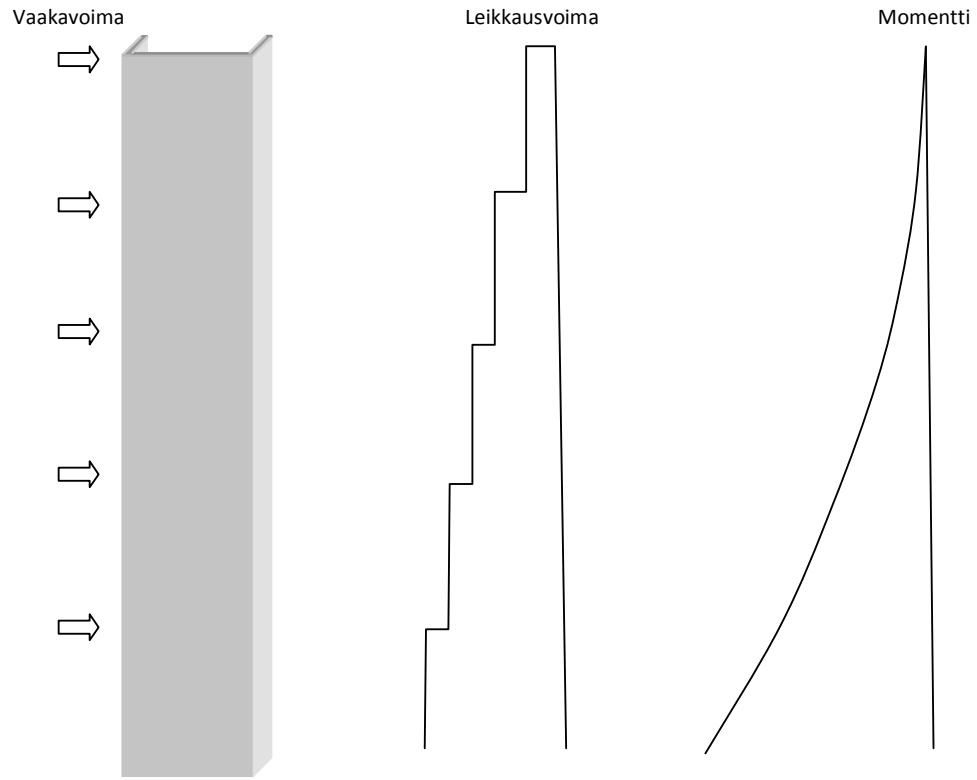
Käyritysmisjäyhyys

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

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 poikkileikkauspiste. 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 ankkurointiteräkset 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.

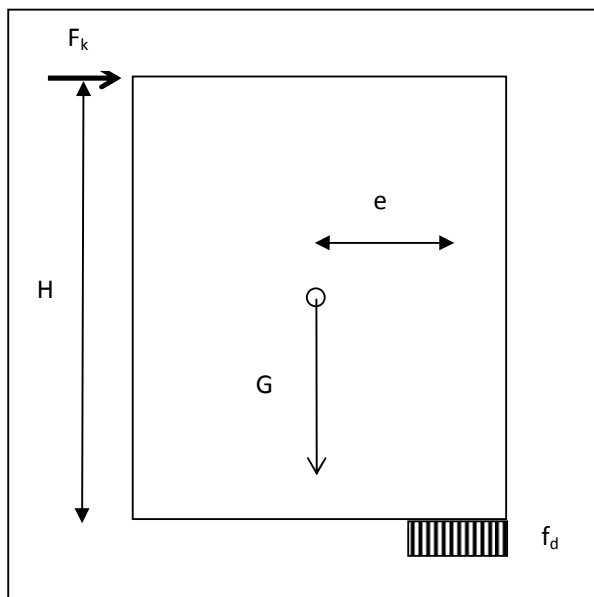
K_{FI} on rakenteen luotettavuusluokasta riippuva kerroin, seuraavasti:

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

Murtorajatilán ehto olisi yllä olevassa tapauksessa siis

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

(3.43)