



Karelia-ammattikorkeakoulu

Rakennustekniikan koulutusohjelma, insinööri (AMK)

# **Betonielementtirakenteisen kerrostalon jäykistävien seinien rasitukset**

Tomi Lampela

Opinnäytetyö, huhtikuu 2023

[www.karelia.fi](http://www.karelia.fi)



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Huhtikuu 2023**  
**Rakennustekniikan koulutus**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
+358 13 260 600

Tekijä  
Tomi Lampela

Nimeke  
Betonielementtirakenteisen kerrostalon jäykistävien seinien rasitukset  
Toimeksiantaja  
Insinööritoimisto Kantelinen Oy

**Tiivistelmä**

Opinnäytetyössä tutkittiin betonielementeistä koostuvan kerrostalon jäykistysjärjestelmää, sekä rasitusten jakautumista jäykistysosien kesken. Työn aikana tutustuttiin Strusoftin FEM-Design-ohjelmistoon, joka toimi vertailuna käsinlaskennan tuloksille. Työn tavoitteena oli tehdä Excel-laskentapohja toimeksiantajalle ja pyrkiä tuottamaan taoudellisempia suunnitteluratkaisuja.

Työssä perehdytään betoniyhdistyksen julkaisussa esitettyyn teoriaan ja käydään läpi eurokoodeissa esitettyjä vaatimuksia. Työn loppuosassa on esitetty FEM-Designilla tehty esimerkkimalli, jonka tuloksia on vertailtu työssä tehtyyn laskentapohjaan.

Tulosten vertailussa pystyttiin toteamaan, että laskentapohjan tulokset olivat hyvin lähellä FEM-Designin tuloksia. Työssä tehdyn laskentapohjan avulla voidaan alustavasti suunnitella rakennuksen jäykistysjärjestelmää ja laskentapohja voidaan tulevaisuudessa yhdistää osaksi muita suunnittelutyökaluja. Lopullisen työkalun tekeminen vaatii vielä kehittämistä, koska rakennuksen rungon muoto ja kerrosten yhteneväisyys vaikuttavat merkittävästi toimivan laskentatyökalun toteutukseen.

Kieli  
suomi

Sivuja 33

Asiasanat  
jäykistysjärjestelmä, FEM-Design, kuormien jakautuminen



**THESIS**  
**April 2023**  
**Degree Programme in Construction Engineering**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
FINLAND  
+ 358 13 260 600

Author  
Tomi Lampela

Title  
Loads on stiffening walls of a multi-story building made of precast concrete elements

Commissioned by  
Insinööritoimisto Kantelinen Oy

**Abstract**

The thesis investigated the stiffening system of a multi-story building made of concrete elements, as well as the distribution of loads among the stiffening components. During the work, FEM-Design software from Strusoft was introduced, which served as a reference to the results of manual calculations. The aim of the thesis was to create an Excel calculation template for the client and try to produce more cost-effective design solutions.

The thesis examines the theory presented in the publication of the Concrete Association and goes through the requirements presented in the Eurocodes. The final part of the thesis presents an example model created with the FEM-Design, the results of which are compared to the calculation template created in the thesis.

When comparing the results, it was found that the results of the calculation template were very close to results from the FEM-Design. The calculation template created in the thesis can be used for the preliminarily design of the stiffening system of the building and the calculation template can be integrated into other design tools in the future. However, the development of a final tool still requires further development, as the shape of the building's frame and the consistency of the floors have a significant impact on the implementation of a functional calculation tool.

Language  
Finnish

Pages 33

Keywords  
stiffening system, FEM-Design, distribution of loads

# Sisältö

1	Johdanto .....	1
2	Kuormat .....	1
2.1	Pystykuormat .....	1
2.2	Vaakakuormat .....	5
2.3	Kuormayhdistelmät .....	8
2.4	Murtorajatila .....	10
2.5	Käyttörajatila .....	11
3	Betonin veto- ja puristuslujuus .....	12
4	Rakennuksen jäykistäminen .....	15
4.1	Yleistä .....	15
4.2	Mastojäykistys .....	16
4.3	Jäykistystorni .....	17
4.4	Levyjäykistys .....	18
4.5	Ristikkojäykistys .....	19
5	Laskentaperiaatteet .....	20
5.1	FEM mallintaminen .....	20
5.2	Vaakakuormat jäykistysjärjestelmässä .....	21
6	Mallirakennus .....	22
6.1	Rakennuksen tiedot .....	22
6.2	Tulokset ja vertailu .....	23
6.3	Yksittäisen seinän tarkastelu .....	27
7	Pohdinta .....	32
	Lähteet .....	33

# 1 Johdanto

Rakennuksen rungon on pystyttävä vastaanottamaan pystykuormien lisäksi myös vaakakuormia. Rakennuksen ja rakenteiden mitoituksessa tuulikuorma on yleensä merkittävin vaakakuorma. Rakennukseen kohdistuvista pystykuormista, kuten rakenteiden omasta painosta ja muuttuvista kuormista, sekä mittaepätarkkuuksista ja kuormien sijainnin epäedullisista vaikutuksista aiheutuu huomioitavia kuormia. Rakennuksen jäykistysjärjestelmä ottaa vastaan vaakakuormat ja nämä kuormat välitetään jäykistysosien kautta perustuksille ja maaperään. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä jäykistävien seinärakenteiden rasi- tusten jakautumiseen levyjäykistyksessä sekä luoda Excel-laskentapohja toi- meksiantajayritykselle.

Työn toimeksiantajana on Insinööritoimisto Kantelinen Oy. Yritys sijaitsee Joen- suussa ja tekee pääasiassa rakenne- ja elementtisuunnittelua elementtiraken- teisiin kerrostaloihin.

Työssä perehdytään betoniyhdistyksen julkaisussa esitettyyn teoriaan ja käsin- laskennan tuloksia pyritään varmistamaan Strusoftin FEM-Design ohjelman tu- loksilla. Esimerkkikohteeseen on pyritty valitsemaan tarpeeksi yksinkertainen pohjaratkaisu, jossa saadaan korostettua opinnäytetyössä käsiteltyjä asioita ja minimoidaan muiden ilmiöiden vaikutusta.

## 2 Kuormat

### 2.1 Pystykuormat

Rakennusosien, maan ja rakenteisiin pysyvästi kiinnitettävien koneiden paino ovat pysyviä pystykuormia ja nämä oletetaan yleensä kiinteäksi kuormaksi. Siir- rettävien tai todennäköisesti poistettavien rakennusosien massa oletetaan kui- tenkin liikkuvaksi ja se käsitellään lisähyötykuormana. Kun kerrotaan nimellismi- toista saatu tilavuus materiaalin tilavuuspainolla, saadaan laskettua rakennus- osien massan ominaisarvo. (RIL 144–2002, 19.)

Lumi vaikuttaa rakenteisiin pääsääntöisesti pystykuormana. Kattojen kinostunut ja kinostumaton lumikuorma ovat kaksi pääasiallista kuormituskaaviota, jotka tulee ottaa huomioon rakenteiden ja rakennusten suunnittelussa. (SFS-EN 1991-1-3, 28.)

Katon lumikuorma  $s$  määritetään kaavalla 1 (SFS-EN 1991-1-3, 28).

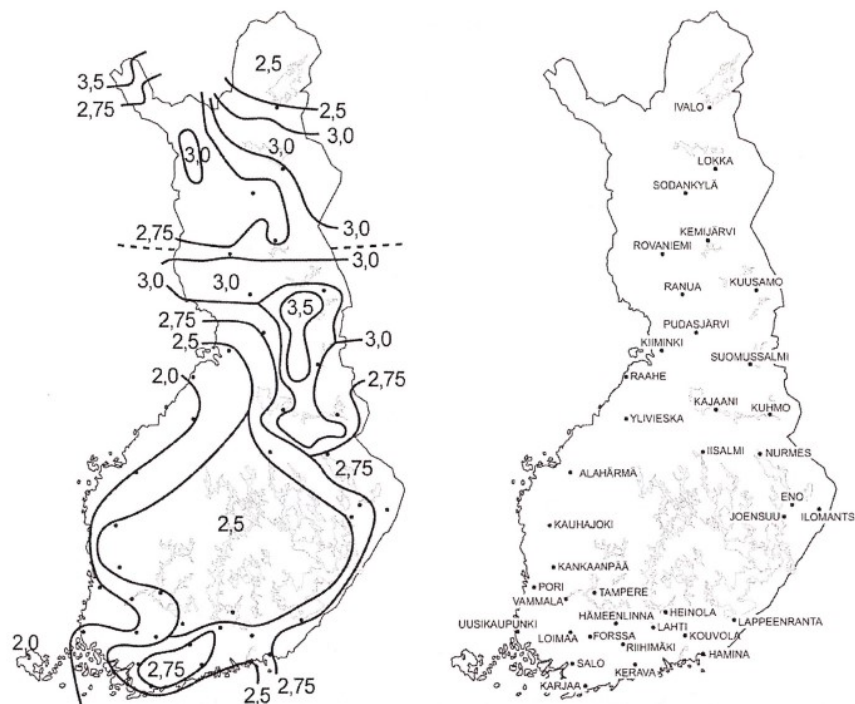
$$S = \mu * C_e * C_t * S_k \quad (1)$$

missä  $\mu$  = lumikuorman muotokerroin (taulukko 1)

$C_e$  = tuulensuojaisuuskerroin (taulukko 2)

$C_t$  = lämpökerroin, jonka arvo tavallisesti on 1,0

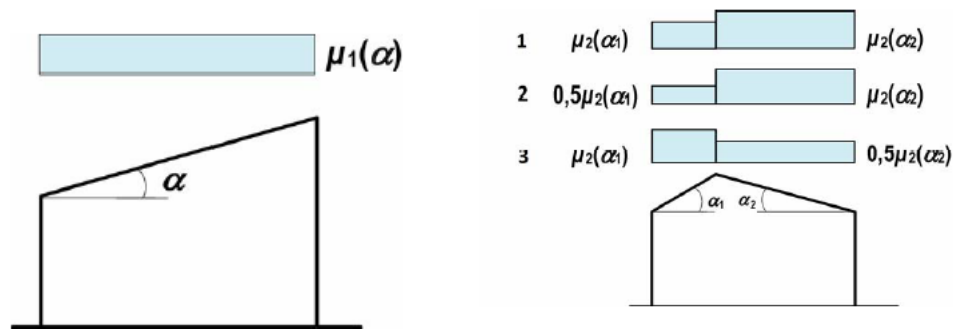
$S_k$  = maassa olevan lumikuorman ominaisarvo [ $\text{kN/m}^2$ ] (kuva 1)



Kuva 1. Lumen ominaisarvot maan pinnalla  $S_k$  [ $\text{kN/m}^2$ ] (NA-SFS-EN 1991-1-3, 2019b, 15).

Katon kaltevuuskulma $\alpha$	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_1(\alpha)$	$\mu_1(0^\circ) \geq 0,8$	$\mu_1(0^\circ) \frac{(60^\circ - \alpha)}{30^\circ}$	0,0
$\mu_2(\alpha)$	0,8	$0,8 \frac{(60^\circ - \alpha)}{30^\circ}$	0,0
$\mu_3(\alpha)$	$0,8 + 0,8 \alpha/30^\circ$	1,6	–

Taulukko 1. Lumikuorman muotokertoimet (SFS-EN 1991-1-3, 32).



Kuva 2 ja Kuva 3 Pulpetti- ja harjakaton kuormituskaaviot (SFS-EN 1991-1-3, 32–34).

Maastotyyppi	$C_e$
Tuulinen <sup>a</sup>	0,8
Normaali <sup>b</sup>	1,0
Suojainen <sup>c</sup>	1,2

<sup>a</sup> *Tuulinen maasto*: laakea, esteetön, joka puolelle avoin alue, jolloin maasto, korkeat rakennuskohteet tai puut eivät suojaa tai suojaavat vain vähän.  
<sup>b</sup> *Normaali maasto*: alue, jolla rakennuskohteeseen vaikuttava tuuli ei maaston, muiden rakennuskohteiden tai puiden takia huomattavasti poista lunta.  
<sup>c</sup> *Suojainen maasto*: alue, jolla tarkasteltava rakennuskohte on huomattavasti alempana kuin ympäröivä maasto tai se on korkeiden puiden tai itseään korkeampien rakennuskohteiden ympäröimä.

Taulukko 2. Eri maastotyyppien yhteydessä suositeltavat  $C_e$ -kertoimen arvot (SFS-EN 1991-1-3, 30).

Henkilö-, tavara- ja liikennekuormat ovat pystysuoria hyötykuormia.

Henkilökuormat sisältävät henkilöiden ja sisustusosien aiheuttamat kuormat, lukuun ottamatta ei kantavia väliseiniä. (RIL 144–2002, 77.)

Tavarakuormia ovat tuotanto- ja varastotilojen kuormat, jotka määritellään hankekohtaisesti todellisen tilanteen mukaan. Tavarakuormia ovat myös laitteiden ja koneiden aiheuttamat kuormat sekä arkistokuormat.

(RIL 144–2002, 79.)

Asuin-, kokoontumis-, myymälä- ja toimistotilan hyötykuormat on luokiteltu käyttötarkoituksen mukaisesti luokkiin A..D (taulukko 3) (SFS-EN 1991-1-1, 28). Hyötykuorman suuruus määräytyy sen kuormaluokan mukaan, Suomessa käytettävät kuorman arvot on määritelty kansallisessa liitteessä (taulukko 4).

Luokka	Käyttötarkoitus	Esimerkki
A	Asuin- ja majoitustilat	Asuinrakennusten huoneet, sairaaloiden potilas- ja toimenpidehuoneet, hotellien ja retkeilymajojen makuuhuoneet, keittiöt ja WC:t.
B	Toimistotilat	
C	Tilat, joihin ihmiset voivat kokoontua (poikkeuksena luokkiin A, B, ja D kuuluvat tilat) <sup>1)</sup>	<p><b>C1:</b> Tilat, joissa on pöytiä yms. esim. koulut, kahvilat, ravintolat, ruokasalit, lukusalit, vastaanottotilat.</p> <p><b>C2:</b> Tilat, joissa on kiinteät istuimet, esim. kirkot, teatterit, elokuvateatterit, konferenssisalit, luentsalit, kokoussalit, odotussalit, asemien odotustilat.</p> <p><b>C3:</b> Tilat, joissa ei ole liikkumista rajoittavia esteitä, esim. museo- ja näyttelytilat, julkisten rakennusten ja toimistorakennusten, hotellien ja sairaaloiden eteistilat, asemahallit.</p> <p><b>C4:</b> Liikuntatilat, esim. tanssisalit, voimistelusalit ja näyttämöt.</p> <p><b>C5:</b> Tilat, joihin voi syntyä tungosta esim. yleisötapahuntien rakennuksissa; tällaisia ovat konserttisalit, urheiluhallit mukaan luettuina katsomot, terassit ja eteistilat sekä rautatielaiturit.</p>
D	Myyvälätilat	<p><b>D1:</b> Tavallisten vähittäiskauppojen tilat.</p> <p><b>D2:</b> Tavaratalojen tilat.</p>
<p><sup>1)</sup> On syytä kiinnittää huomiota kohtaan 6.3.1.1(2), erityisesti luokkien C4 ja C5 osalta. Standardissa EN 1990 esitetään, milloin dynaamiset vaikutukset on tarpeen ottaa huomioon. Luokkaa E koskevat tiedot ovat taulukossa 6.3.</p> <p>HUOM. 1 Aiotusta käyttötarkoituksesta riippuen tilat, jotka todennäköisesti sijoitettaisiin luokkaan C2, C3 tai C4, voidaan tilaajan päätöksellä tai kansallisen liitteen perusteella sijoittaa luokkaan C5.</p> <p>HUOM. 2 Kansallisessa liitteessä luokat A, B, C1...C5, D1 ja D2 voidaan jakaa alaluokkiin.</p> <p>HUOM. 3 Varasto- ja teollisuustiloja tarkastellaan kohdassa 6.3.2.</p>		

Taulukko 3. käyttöluokat (SFS-EN 1991-1-1, 30).

Kuormitettujen tilojen luokat	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]			$Q_k$ [kN] (portaat suluisia)
	Välipohjat	Portaat	Parvekkeet	
Luokka A Asunto- ja majoitustilat	2,0	2,0	2,5	2,0 (2,0*)
Luokka B Toimistotilat	2,5	3,0	2,5	2,0 (2,0)
Luokka C Tilat, joihin ihmiset voivat kokoontua				
– C1	2,5	3,0	2,5	3,0 (2,0)
– C2	3,0	3,0	3,0	3,0 (2,0)
– C3	4,0	3,0	4,0	4,0 (2,0)
– C4	5,0	3,0	5,0	4,0 (2,0)
– C5	6,0	6,0	6,0	4,0 (2,0)
Luokka D Myyvälätilat				
– D1	4,0	3,0	4,0	4,0 (2,0)
– D2	5,0	6,0	5,0	7,0 (2,0)
*Asunnon sisäiset portaat $Q_k = 1,5$ kN				

Taulukko 4. Hyötykuormien suuruudet Suomessa (NA-SFS-EN 1991-1-1, 2019a, 5).



## 2.2 Vaakakuormat

Maatäytöistä aiheutuva toispuoleinen maanpaine luokitellaan pysyväksi vaakakuormaksi. Käytönaikana siirrettävien maamassojen tai maansiirtotöiden aikana vaikuttava maanpaine voidaan poikkeuksena luokitella liikkuviksi ja muuttuviksi kuormiksi. (RIL 144–2002, 19–20.)

Tuulikuorma on kiinteä muuttuva kuorma ja sen suuruus määritellään joko koko rakenteeseen tai rakenneosaan vaikuttavina. Kuormat voidaan laskea käyttämällä voimakertoimia tai laskemalla kuormat pintapaineiden perusteella ja painekertoimia käyttäen. (RIL 201-1-2017, 127.)

Tuulennopeuden perusarvo lasketaan kaavalla 2 (SFS-EN 1991-1-4, 32).

$$V_b = C_{dir} * C_{season} * V_{b,0} \quad (2)$$

missä  $V_b$  = Tuulennopeuden perusarvo  
 $V_{b,0}$  = Tuulennopeuden modifioimaton perusarvo  
 $C_{dir}$  = Suuntakerroin (suositusarvo on 1,0)  
 $C_{season}$  = vuodenaikakerroin (suositusarvo on 1,0)

Huom. Tuulennopeuden perusarvo Suomessa on 21 m/s (NA-SFS-EN 1991-1-4, 2019c, 22).

Tuulen nopeusprofiili lasketaan kaavalla 3 (SFS-EN 1991-1-4, 34).

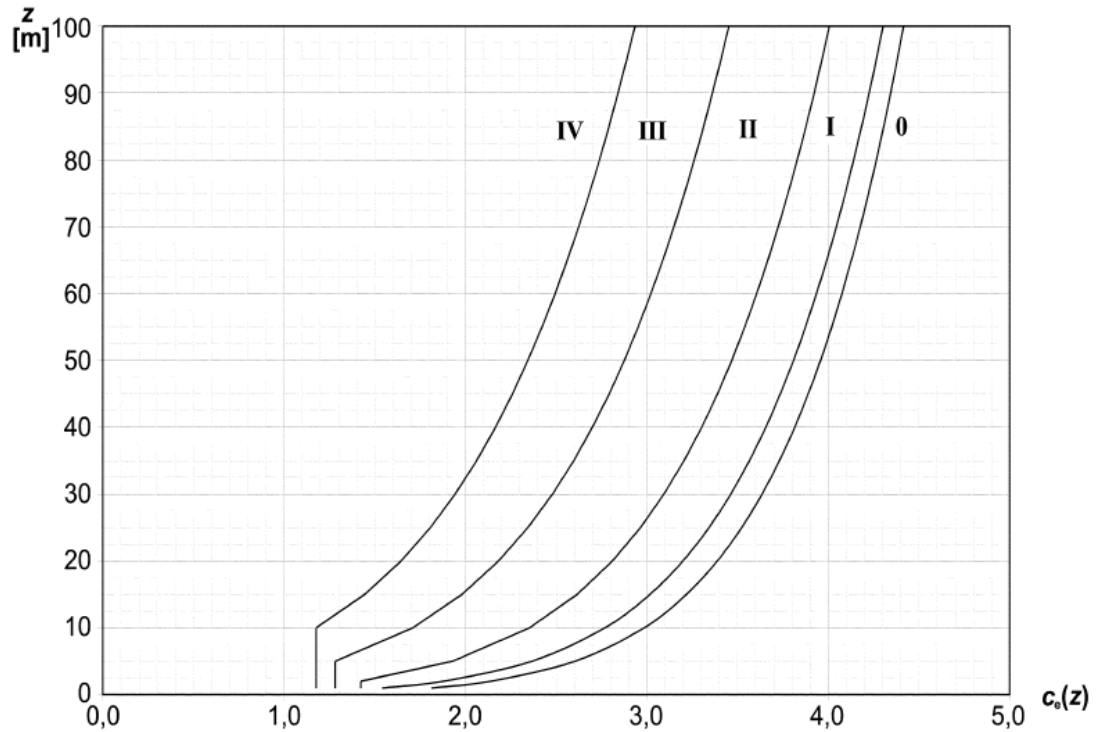
$$V_m(z) = C_r(z) * C_0(z) * V_b \quad (3)$$

missä  $C_r(z)$  = Rosoisuuskerroin  
 $C_0(z)$  = Pinnanmuotokerroin

Korkeudella z vaikuttava puuskanopeuspaine  $q_p(z)$  lasketaan kaavalla (4) (SFS-EN 1991-1-4, 40).

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * V_m^2(z) = C_e(z) * q_b \quad (4)$$

missä  $I_v(z)$  = Tuulenpuuskien intensiteetti  
 $\rho$  = Ilman tiheys  
 $C_e(z)$  = Altistuskerroin (kuva 4)  
 $q_b$  = nopeuspaineen perusarvo



Kuva 4. Altistuskertoimen  $C_e(z)$  kuvaajia.

Rakenteeseen tai rakenneosaan vaikuttava tuulikuorma  $F_w$  voidaan määrittää voimakertoimella käyttämällä kaavalla (kaava 5) (SFS-EN 1991-1-4, 46).

$$F_w = C_s C_d * C_f * q_p(z) * A_{ref} \quad (5)$$

missä  $C_s C_d$  = Rakennekerroin  
 $C_f$  = Rakenteen tai rakenneosan voimakeroin  
 $A_{ref}$  = Rakenteen tai rakenneosan tuulenpaineen vaikutusala

Rakenteiden ja rakenneosien analyysissä tulee ottaa huomioon mahdollisten mittapoikkeamien ja kuormien sijainnin epäedulliset vaikutukset. Rakenneanalyysiin ei sisällytetä poikkileikkausten mittapoikkeamia, vaan ne on otettu normaalisti huomioon materiaaliosavarmuusluvuissa. Epätarkkuuksista johtuvat rasitukset tulee ottaa huomioon murtorajatiloina normaalisti vallitsevissa ja

onnettomuustilanteissa. Mittaepätarkkuuksien vaikutukset huomioidaan yhdessä muiden vaakakuormien kanssa eikä erikseen omana kuormitustapauksena. Näitä epätarkkuuksia ei tarvitse huomioida käyttörajatiloissa. Epätarkkuudet voidaan esittää kaavalla 6. (SFS-EN 1992-1-1, 54–55.)

$$\theta_i = \theta_0 * \alpha_h * \alpha_m \quad (6)$$

missä  $\theta_0$  = perusarvo (suositusarvo on 1/200)

$\alpha_h$  = pituuteen tai korkeuteen perustuva pienennyskerroin

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l}}; 2/3 \leq \alpha_h \leq 1,0$$

$\alpha_m$  = rakenneosien määrään perustuva pienennyskerroin

$$\alpha_m = \sqrt{0,5(1 + \frac{1}{m})}$$

$l$  = rakennuksen korkeus [m]

$m$  = kokonaisvaikutuksen aiheuttavien pystyrakennneosien määrä

Vaakavoiman  $H$  arvo lasketaan jäykistämättömissä rakenneosissa kaavalla 7 ja jäykistetyissä rakenneosissa kaavalla 8. (SFS-EN 1992-1-1, 55.)

$$H_i = \theta_i * N \quad (7)$$

$$H_i = 2 * \theta_i * N \quad (8)$$

missä  $N$  = normaalivoima

Toisen kertaluvun vaakakuormat ovat hoikkien mastojen taipumien aiheuttamaa pystykuormien lisäepäkeskisyyttä. Nämä lisävaakakuormat tulee ottaa huomioon, jos niillä on todennäköisesti merkittävä vaikutus rakennekokonaisuuden stabiiliuuteen ja murtorajatilan toteutumiseen. (SFS-EN 1992-1-1, 54.) Toisen kertaluvun vaikutukset voidaan jättää huomioimatta, jos niiden vaikutus on alle 10 % ensimmäisen kertaluvun vaikutuksista (SFS-EN 1992-1-1, 64). Eurokoodissa 2 kohdassa 5.8.3.3 on myös esitetty vaihtoehtoinen kaava toisen kertaluvun rasitusten huomiotta jättämiselle rakennuksen kokonaistarkastelussa (Kaava 9).

$$F_{v,Ed} \leq k_1 * \frac{n_s}{n_s+1,6} * \frac{\Sigma E_{cd} I_c}{L^2} \quad (9)$$

missä:  $n_s$  = kerrosten lukumäärä

$L$  = momenttijäykistyksen yläpuolinen rakennuksen kokonaiskorkeus

$E_{cd}$  = betonin kimmokertoimen mitoitusarvo

$I_c$  = jäykistävien sauvojen jäyhyysmomentti halkeamattoman poikkileikkauksen mukaisesti

$k_1 = 0,31$

$k_2 = 0,62$

Jos osoitetaan, että jäykistävät seinät säilyvät halkeilematta murtorajatilassa, niin  $k_1$  voidaan korvata kertoimella  $k_2$  (SFS-EN 1992-1-1, 66–67)

### 2.3 Kuormayhdistelmät

Eurokoodeissa käytetään termiä ”kuormayhdistelmä” kuormien suuruuden määrittämiseen, kun kyseessä olevassa rajatilassa vaikuttaa erilaisia kuormia. Termi ”kuormitustapaus” puolestaan tarkoittaa muuttuvien kuormien järjestämistä siten, että tehdään rakenteen kannalta epäedullisin tilanne. Määrittäessä tarkastelussa käytettyjen kuormien arvoja voidaan menetellä seuraavasti: Aluksi määritetään mitoitus tilanne, esimerkiksi normaalisti vallitseva, tilapäinen tai onnettomuus. Tämän jälkeen määritetään kaikki mitoitus tilanteessa vaikuttavat kuormat. Seuraavaksi määritetään jokaiselle kuormayhdistelmälle osavarmuusluvut. Lopuksi määritetään kuormitustapaukset eri kuormitusyhdistelmillä siten, että päästään rakenteen kannalta kaikkein kriittisimpään tilanteeseen. (Betoniteollisuus 2009.)

Jos yhdistelmässä vaikuttaa vain yksi muuttuva kuorma, voidaan mitoituskuormien suuruus määrittää suoraan kertomalla ne kysymykseen tulevilla osavarmuusluvuilla. Mikäli yhdistelmässä vaikuttaa useampi muuttuva kuorma, on valittava yksi määräävä muuttuva kuorma ja muut samanaikaisesti vaikuttavat kuormat. Muut samanaikaisesti vaikuttavat kuormat huomioidaan aina

yhdistelyarvona. (Betoniteollisuus 2009.) Eurokoodissa esiintyviä merkintöjä on määritelty taulukossa 5 ja näihin liittyviä kansallisia valintoja on esitetty taulukossa 6.

Merkintä	Määritelmä
$G_k$	pysyvän kuorman ominaisarvo
$Q_k$	yksittäisen muuttuvan kuorman ominaisarvo
$\gamma_G$	pysyvän kuorman osavarmuusluku
$\gamma_Q$	muuttuvan kuorman osavarmuusluku
$\psi_0$	muuttuvan kuorman yhdistelyarvon kerroin
$\psi_1$	muuttuvan kuorman tavallisen arvon kerroin
$\psi_2$	muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon kerroin
$\xi$	epäedullisten pysyvien kuormien pienennyskerroin

Taulukko 5. Eurokoodiin valitut merkinnät (Betoniteollisuus 2009).

Kuorma	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino $\leq 30$ kN	0,7	0,7	0,6 <sup>**</sup> )
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30\text{kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3 <sup>**</sup> )
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3) <sup>*)</sup> kun			
$s_k < 2,75$ kN/m <sup>2</sup>	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m <sup>2</sup>	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma <sup>***)</sup>	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
<sup>*)</sup> Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä. Huomautus: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään $\psi$ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen. <sup>**)</sup> Ajokäytävillä $\psi_2 = 0$ <sup>***)</sup> Koskee huurtumisesta, jäätävästä sateesta ja räntäsateesta aiheutuvia jääkuormia			

Taulukko 6.  $\psi$ -kertoimen arvot Suomessa (NA-SFS-EN 1990, 2016, 18).

## 2.4 Murtorajatila

Kaikki rajatilat, jotka liittyvät ihmisten turvallisuuteen tai rakenteiden varmuuteen, tulee luokitella murtorajatiloiksi. Hankekohtaisesti myös varastoitavan aineen tai tavaran suojaamiseen liittyvät rajatilat voidaan luokitella murtorajatiloiksi. (SFS-EN 1990, 52.)

Murtorajatilat jaotellaan rakenteen tasapainon menetykseen (EQU), kantavan rakenteen tai rakenneosan murtumiseen tai kantokyvyn menetykseen (STR), maaperän merkittävä muodonmuutoksesta aiheutuneeseen murtumaan (GEO) sekä kantavan rakenteen tai rakenneosan väsymismurtumaan (FAT) (SFS-EN 1990, 76–78). Tarkasteltaessa staattisen tasapainon rajatilaa tulee osoittaa, että tasapainoa heikentävien kuormien mitoitusarvo on pienempi kuin tasapainoa parantavien kuormien mitoitusarvo (kaava 10). (SFS-EN 1990, 78). Poikkeileikkauksen, rakenneosan tai liitoksen murtumisen tai liian suuren siirtymätilan rajatilaa (STR tai GEO) tarkastellessa tulee osoittaa, että kuormien vaikutuksen on oltava pienempi kuin kuorman kestävyuden mitoitusarvo (kaava 11) (SFS-EN 1990, 78).

$$E_{d,\text{dist}} \leq E_{d,\text{stb}} \quad (10)$$

$$E_d \leq R_d \quad (11)$$

Eurokoodi EN 1990 määrittelee kolme mahdollista kuormayhdistelmää STR-rajatilassa normaalisti vallitsevassa tai tilapäisessä mitoitusilanteessa. Yhdistelmät on esitetty eurokoodin 0 kaavoissa 6.10, 6.10a ja 6.10b. (SFS-EN 1990, 80.) Suomessa käytetään kansallisen liitteen määrittämiä mitoitusarvoja edellä mainituille kaavoille (taulukot 7 ja 8) (NA-SFS-EN 1990, 2016, 19–20).

Normaalisti vallitsevat ja tilapäiset mitoitus-tilanteet	Pysyvät kuormat		Määrävä muuttuva kuorma (*)	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat (*)
	Epäedulliset	Edulliset		
(Yht. 6.10)	$1,1 K_{FI} G_{kj,sup}$	$0,9 G_{kj,inf}$	$1,5 K_{FI} Q_{k,1}$	$1,5 K_{FI} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
(*)Taulukon A.1.1 mukaiset kuormat ovat muuttuvia kuormia.				

Taulukko 7. Kuormien mitoitusarvot (EQU) (NA-SFS-EN 1990, 2016, 19).

Normaalisti vallitsevat ja tilapäiset mitoitus-tilanteet	Pysyvät kuormat		Määrävä muuttuva kuorma (*)	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat (*)
	Epäedulliset	Edulliset		
(Yht. 6.10a)	$1,35 K_{FI} G_{kj,sup}$	$0,9 G_{kj,inf}$		
(Yht. 6.10b)	$1,15 K_{FI} G_{kj,sup}$	$0,9 G_{kj,inf}$	$1,5 K_{FI} Q_{k,1}$	$1,5 K_{FI} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
(*)Taulukon A.1.1 mukaiset kuormat ovat muuttuvia kuormia.				

Taulukko 8. Kuormien mitoitusarvot (STR) (NA-SFS-EN 1990, 2016, 20).

## 2.5 Käyttörajatila

Käyttörajatilaksi mielletään rajatilat jotka liittyvät rakenteen tai rakenneosien toimintaan normaalikäytössä, rakennuskohteen ulkonäköön ja ihmisten mukavuuteen. Käyttörajatioloja tarkastellessa kiinnitetään huomiota seuraaviin ilmiöihin perustuvia kriteereitä. Siirtymät jotka vaikuttavat käyttäjien mukavuuteen, ulkonäköön tai rakenteen toimivuuteen. Värähtelyt jotka rajoittavat rakenteen käyttökelpoisuutta tai jotka saavat ihmiset tuntemaan olonsa epämukavaksi. Vauriot, jotka todennäköisesti haittaavat rakennuksen ulkonäköä, säilyvyyttä tai toimivuutta. (SFS-EN-1990, 54.) Käyttörajatilassa on käytössä kolme kuormayhdistelmää (taulukko 9). Kuormien osavarmuus luvuille on annettu arvo 1.0, mikäli standardeissa EN 1991... EN 1999 ei ole muuta mainintaa. (SFS-EN-1990, 92.)

Yhdistelmä	Pysyvät kuormat $G_d$		Muuttuvat kuormat $Q_d$	
	Epäedulliset	Edulliset	Määrävä	Muut
Ominaisyhdistelmä	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	$Q_{k,1}$	$\psi_{0,i} Q_{k,i}$
Tavallinen yhdistelmä	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	$\psi_{1,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$
Pitkäaikaisyhdistelmä	$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	$\psi_{2,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$

Taulukko 9. Kuormien mitoitusarvot (SLS) (SFS-EN-1990, 92).

### 3 Betonin veto- ja puristuslujuus

Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo määritetään kaavalla 12 (SFS-EN 1992-1-1, 35).

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * f_{ck} / \gamma_c \quad (12)$$

missä  $\gamma_c$  = betonin osavarmuusluku

$\alpha_{cc}$  = kerroin, joka huomioi puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikais-tekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät.

$f_{ck}$  = lujuuden ominaisarvo (taulukko 10)

Suomessa kertoimelle  $\alpha_{cc}$  käytetään arvoa 0,85 (NA-SFS-EN 1992-1-1, 2019d, 15).

Vetolujuuden mitoitusarvo määritellään kaavalla 13 (SFS-EN 1992-1-1, 35).

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} * f_{ctk,0,05} / \gamma_c \quad (13)$$

missä  $\alpha_{ct}$  = kerroin, joka huomioi vetolujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät.

(suositusarvo on 1.0)



Betonin lujuusluokka														Analyttinen yhteysviittaus	
$f_{ck}$ (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck, cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
$f_{cm}$ (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
$f_{ctm}$ (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk,0,05} = 0,7 \times f_{ctm}$ 5 % fraktiili
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk,0,95} = 1,3 \times f_{ctm}$ 95 % fraktiili
$E_{cm}$ (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm}/10)^{0,3}]$ ( $f_{cm}$ MPa)
$\epsilon_{c1}$ (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	ks. kuvaa 3.2 $\epsilon_{c1}(\text{‰}) = 0,7 f_{cm}^{0,31} \leq 2,8$
$\epsilon_{cu1}$ (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	ks. kuvaa 3.2 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu1}(\text{‰}) = 2,8 + 27[(98 - f_{cm})/100]^4$
$\epsilon_{c2}$ (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	ks. kuvaa 3.3 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c2}(\text{‰}) = 2,0 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0,53}$
$\epsilon_{cu2}$ (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	ks. kuvaa 3.3 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu2}(\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$
$n$	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{ck})/100]^4$
$\epsilon_{c3}$ (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	ks. kuvaa 3.4 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c3}(\text{‰}) = 1,75 + 0,55[(f_{ck} - 50)/40]$
$\epsilon_{cu3}$ (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	ks. kuvaa 3.4 kun $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu3}(\text{‰}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$

Tau-

lukko 10. Betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia (SFS-EN 1992-1-1, 30).

Raudoittamaton betoni ei ole yhtä sitkeää kuin raudoitettu, joten raudoittamattoman betonin lujuuden kertoimille  $\alpha_{cc,pl}$  ja  $\alpha_{ct,pl}$  voidaan määrittää korvaavat arvot. Arvot ovat pienempiä kuin vastaavilla teräsbetonin kertoimilla  $\alpha_{cc}$  ja  $\alpha_{ct}$ . (SFS-EN 1992-1-1, 188.) Suomen kansallisessa liitteessä on määritelty kertoimille arvot  $\alpha_{cc,pl} = 0,7$  ja  $\alpha_{ct,pl} = 0,6$  (NA-SFS-EN 1992-1-1, 2019d, 27). Raudoittamattomien betonirakenteiden vetojännityksien mitoituskestävyyttä tarkastellessa voidaan käyttää kaavaa 14 (SFS-EN 1992-1-1, 188).

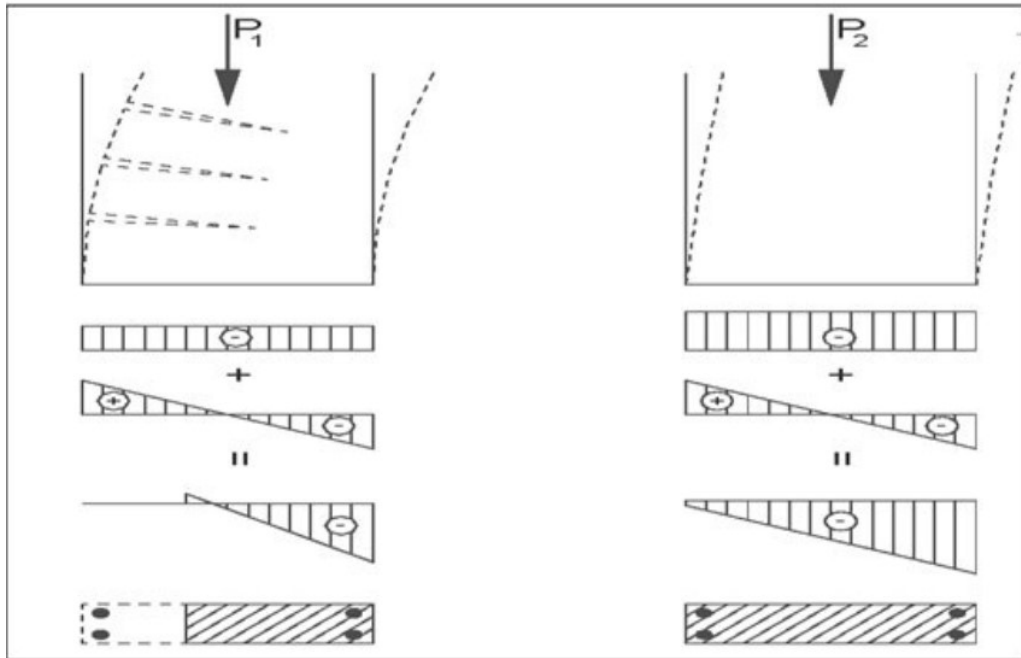
$$f_{ctd,pl} = \alpha_{ct,pl} * f_{ctk,0,05} / \gamma_c \quad (14)$$

Laskentamallissa voidaan käyttää redusoitua jäykkyyttä, mikäli jäykistävien rakenneseosien vetolujuus ylitetään. Eurokoodissa 2 on esitetty kaava 7.18, jonka avulla voidaan laskea rakenteen jäykkyys, kun raudoitusmäärät ovat tiedossa. Kaavan mukainen laskenta on hyvin työläs, joten alustavissa laskelmissa voidaan käyttää seuraavia kertoimia jäykkyyden redusointiin. (Elementtisuunnittelu.fi 2010.)

Laatat	0,35–0,5
Palkit	0,35–0,5 (esimerkiksi seinien aukkopalkit)
Pilarit	0,7

## Seinät 0,7

Pystykuorman ja vaakakuormasta aiheutuvan momentin yhdistämisen periaate on esitetty kuvassa 5 vasemmalla on tilanne, jossa seinä ei pysty vastaanottamaan vetojännityksiä ja oikealla tilanne, jossa seinä pysyy kokonaan puristettuna. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)



Kuva 5. Rasiusten yhdistämisen periaate (Elementtisuunnittelu.fi 2020).

Seinän vaakasaumassa vaikuttavat jännitykset lasketaan kaavalla 15 ja 16 (Valtanen 2016, 270–271).

$$\sigma_{c1} = \pm \frac{M_k}{W} \quad (15)$$

missä:  $\sigma_{c1}$  = Taivutusjännitys  
 $M_k$  = vaakavoimista aiheutuva momentti  
 $W$  = taivutusvastus =  $\frac{bh^2}{6}$

$$\sigma_{c2} = -\frac{N}{A} \quad (16)$$

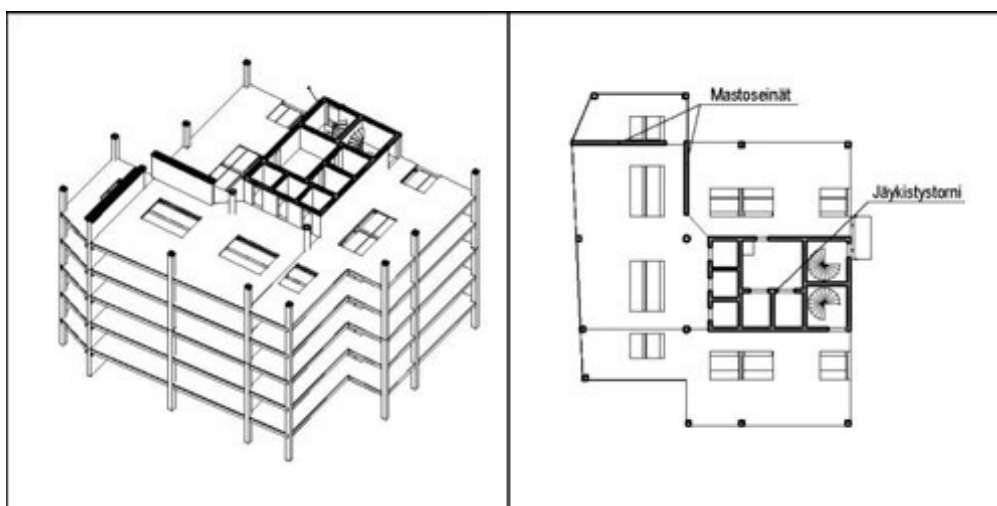
missä:  $\sigma_{c2}$  = puristusjännitys  
 $N$  = pystykuormista aiheutuva normaalivoima  
 $A$  = poikkileikkauksen pinta-ala pituusyksikköä kohden

## 4 Rakennuksen jäykistäminen

### 4.1 Yleistä

Rakennuksen jäykistämisen perusvaatimuksena on suunnitella riittävän stabiilisuuden omaava runko ja suunnittelussa on osoitettava kaikki kuormien reitit rakenneosalta toiselle. Runkoon vaikuttavat ulkoiset kuormat pystytään jakamaan aina vaaka- ja pystykomponentiksi, jota eri rakenteet kantavat vedettyinä, puristettuina, taivutettuina, vääntökuormitettuina tai leikkauskuormitettuina sekä näiden yhdistelminä. Staattisesti määräämättömien rakenteiden kuormat jakaantuvat aina rakenneosien jäykkyyksien suhteessa siten, että jäykempi rakenne ottaa enemmän kuormaa kuin vähemmän jäykkä. (Leskelä 2005, 179.) Rakennusten jäykistämiseen on olemassa useita eri ratkaisuja ja jokaisen ratkaisun soveltuvuus on kohdekohtaista. Jäykistystavan valinnan perusteena on yleensä rakennuksen muoto, mittasuhteet, vaatimukset ja käyttötarkoitus.

Erilaisiin rakennusrungon jäykistysratkaisuihin kuuluvat esimerkiksi mastojäykistys (kuva 6). Mastojäykistys sisältää mastopilarit, mastoseinät ja jäykistystornin. Muita ratkaisuja ovat kehä-, levy- ja ristikkojäykistys sekä näiden erilaiset yhdistelmät. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)

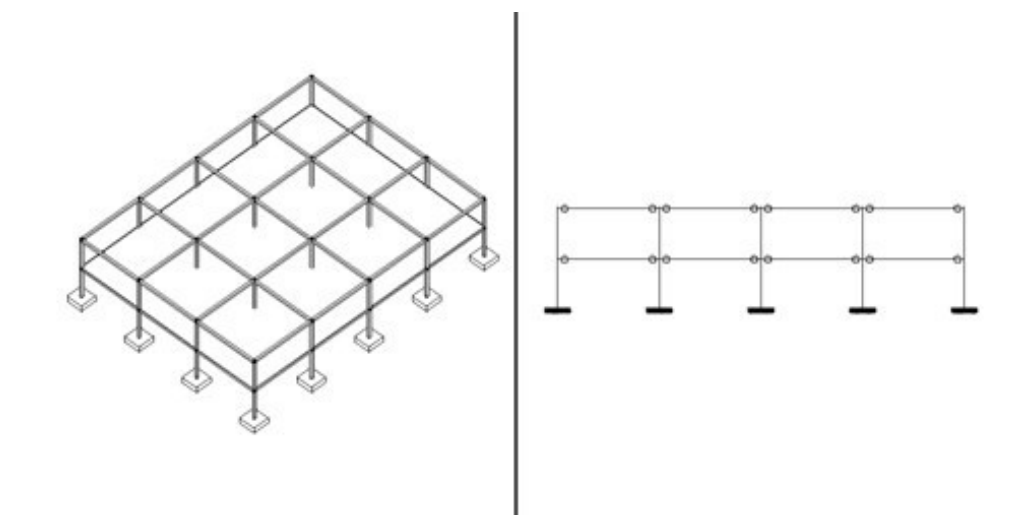


Kuva 6. Esimerkki rakennuksesta, joka on jäykistetty mastoseinillä ja jäykistystornilla. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)

## 4.2 Mastojäykistys

Mastojäykistyksessä on kolme toisistaan eroavaa ratkaisua, jotka ovat mastopilari-, mastoseinä- ja mastotorni. Mastot toimivat alapäästään jäykästi kiinnitettyinä rakenteina vaakakuormia vastaan. Vaakakuormat jakautuvat mastorakenteille niiden jäykkyyksien suhteessa. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)

Mastopilarijäykistyksen (kuva 6) toimintaperiaatteena on, että ne toimivat alapäästään jäykästi kiinnitettyinä ulokkeina. Ulkoseinärakenteet ja jäykät tasorakenteet välittävät vaakakuormat suoraan pilareille. Pilareiden liitokset palkkeihin ovat nivelellisiä ja ne siirtävät vaakakuormia. Tasot siirtävät kuormat mastopilareille niiden jäykkyyksien suhteessa. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)

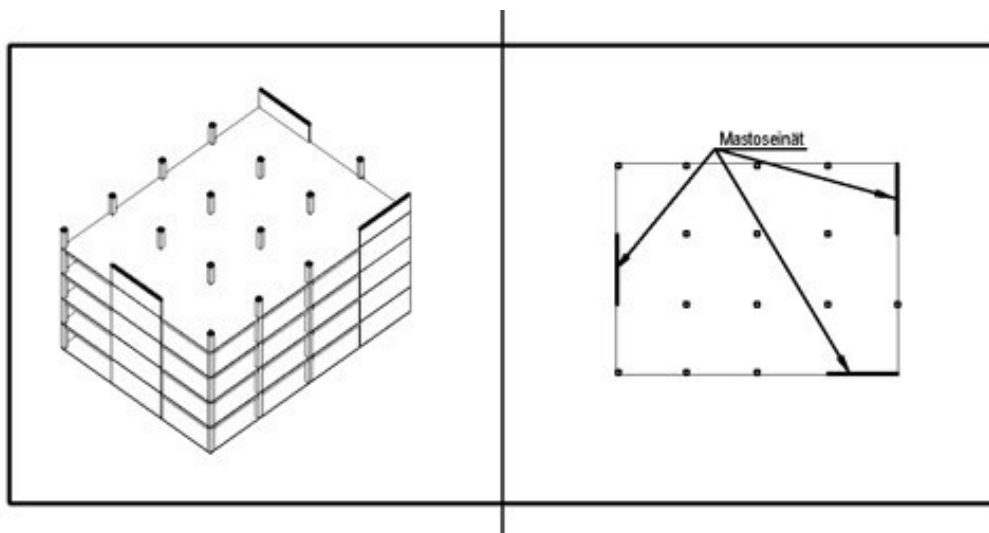


Kuva 6. Mastopilarijäykistys. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)

Mastopilareiden momentti-, leikkaus- ja normaalivoima rasitukset välitetään an-  
turalle jäykän liitoksen kautta. Mastopilarijäykistys toimii hyvin 1–3 kerroksisissa rakennuksissa ja korkeuden rajana voidaan pitää noin 12 metriä. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)

Mastoseinä toimii ulokepalkkina ja jäykkänä levynä toimivat tasot välittävät vaakakuormat mastoseinille (kuva 7). Seinämastot voidaan rakentaa seinäelementeistä ja niiden saumat suunnitellaan siirtämään normaalivoima- ja

leikkausrasitukset yhtenäisenä rakenteena. Maston kiinnitys perustuksiin on toteutettavissa joko jäykästi tai ääripisteistään. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)



Kuva 7. Mastoseinäjäykistys. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)

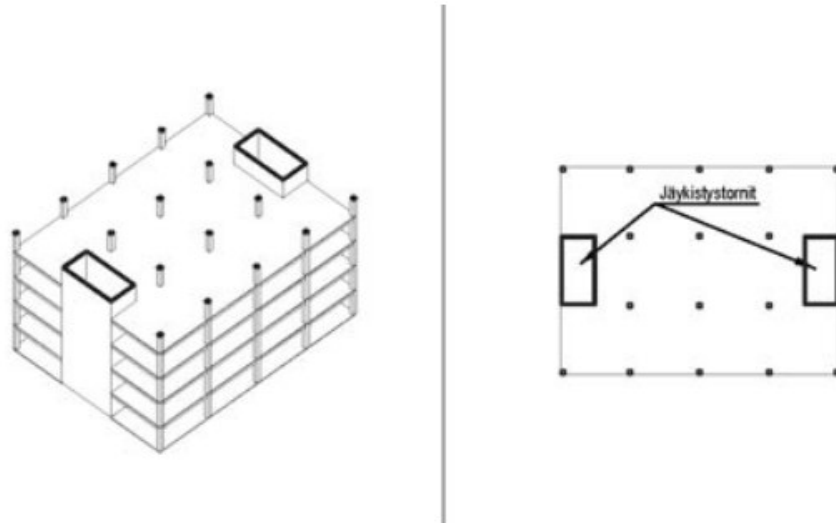
Mastoseinien sijoitusperiaate on, että niille tuodaan tarpeeksi pystykuormaa ja ne pysyvät puristettuna kaikissa kuormitustapauksissa. Vetovoimien syntymistä on pyrittävä välttämään. Mastoseinät voidaan ankkuroida maaperään esimerkiksi käyttämällä jännitettyjä kallio- tai maa-ankkureita. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)

Jälkijännittämällä voidaan pienentää halkeilua ja muodonmuutoksia seinissä. Vaakasuoran leikkausvoiman välittämiseen voidaan hyödyntää pintojen välistä kitkaa, terästappeja tai vaarvoja. Pitkiä seiniä saatetaan joutua jakamaan osiin, ettei yksittäinen seinä kasva liian suureksi. Osiin jaettujen seinien väliset saumat täytyy mitoittaa niissä vaikuttaville pystysuuntaiselle leikkausvoimalle, jolloin seinät toimivat monoliittisesti yhdessä. Saumat voidaan toteuttaa esimerkiksi vaijerilenkkiliitoksien. Seinien jäykkyys on laskettava todellisilla jäykkyyksillä, sekä seinät on pyrittävä sijoittamaan symmetrisesti rakennukseen. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)

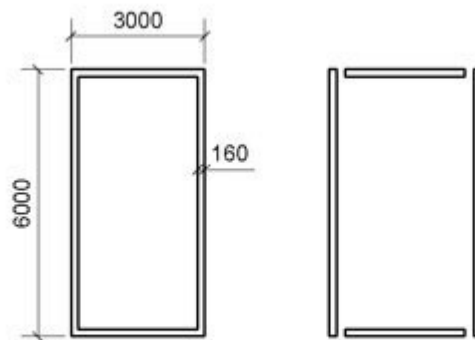
### 4.3 Jäykistystorni

Jäykistystornin (kuva 8) toimintaperiaate on samanlainen kuin mastoseinässä, eli ulokepalkkina perustuksilta. Jäykistystorni muodostuu useista seinistä (kuva

9) ja on tärkeää suunnitella näiden seinien liittymät liitoksissa vaikuttavalle leikkausvoimalle, jolloin rakenne toimii suunnitellulla tavalla mastotornina. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)



Kuva 8. Jäykistystorni. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)

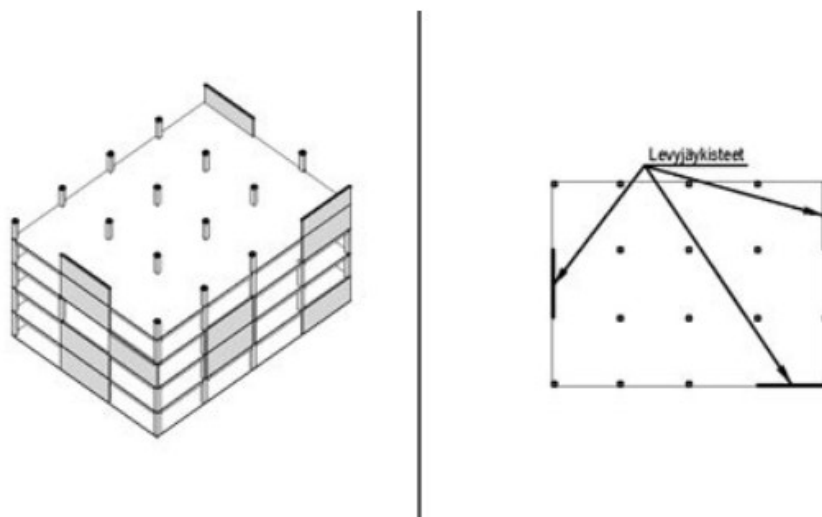


Kuva 9. Seinistä koostuva jäykistystorni. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)

#### 4.4 Levyjäykistys

Levyjäykistyksessä rungossa sijaitsevat seinät toimivat itsenäisinä rakenteina, jotka siirtävät vaakakuormia leikkausvoiman kautta toisille seinälevyille ja lopulta perustuksille (kuva 10). Vaakakuormat jakautuvat tasorakenteiden kautta jäykistäville levyille niiden sijainnin ja jäykkyyden mukaisesti. Kun jäykistävät levyt ovat kerroksissa samoilla paikoilla, vältetään vaikeilta liitos- ja

voimansiirtoratkaisuilta. Levyrakenteita täytyy olla rakennuksen rungossa molempiin suuntiin, eikä levyjen akselit saa leikata. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)



Kuva 10 Levyjäykistys. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)

#### 4.5 Ristikkojäykistys

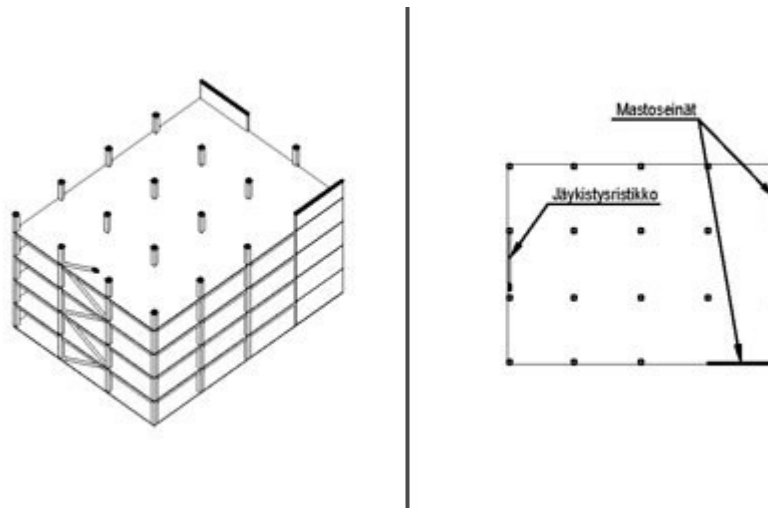
Ristikkojäykistyksessä levyjäykistys voidaan korvata erilaisilla ristikkorakenteilla, jotka koostuvat veto- ja puristussauvoista (kuva 11). Jäykistysristikko voi olla osa pystykuormia kantavaa rakennetta tai täysin erillinen rakenneosa.



Kuva 11. Jäykistävä betoniristikko. (Aho 2008)

Näitä jäykistysjärjestelmiä voidaan hankekohtaisesti yhdistellä ja saavuttaa näin taloudellisempia suunnitelmia. Esimerkiksi rakennuksen alaosa voidaan toteuttaa levyjäykistein ja ylin kerros pilarimastojäykistettynä.

Yhdistelmäjäykistyksessä täytyy erityisesti huomioida eri jäykistysrakenteiden jäykkyydet ja kuormien jakautuminen näiden rakenteiden kesken. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)



Kuva 12. Yhdistetty mastoseinä- ja ristikkojäykistys. (Elementtisuunnittelu.fi 2020.)

## 5 Laskentaperiaatteet

### 5.1 FEM mallintaminen

Tähän opinnäytetyöhön on valittu käytettäväksi Strusoftin FEM-Design-ohjelma. FEM-Design on pohjoismainen rakenteiden laskentaan ja mitoitukseen suunniteltu ohjelmisto. Ohjelmistolla voi suunnitella betoni-, puu- ja teräsrakenteita yksittäisenä rakenneosana tai sillä voi laskea kokonaisia rakennusrunkoja (Strusoft.com 2021.) FEM eli elementtimenetelmä tulee sanoista Finite Element Method. Se tarkoittaa diskreetointia eli systeemin jakamista osiin niin, että vapausasteiden määrä muuttuu äärettömästä rajalliseksi. (Suomen betonitieto Ry 2023.)



## 5.2 Vaakakuormat jäykistysjärjestelmässä

Seinien ollessa keskenään yhdensuuntaisia ja lisäksi vaakakuorman suuntaisia, voidaan leikkaus- tai mastoseinän kuorman osuus  $H_n$  vaakakuormasta  $H$  laskea kaavalla 17 (Leskelä 2005, 182).

$$H_n = \left( \frac{I_n}{\sum I_i} + \frac{e I_n a_n}{\sum I_i a_i^2} \right) H \quad (17)$$

missä  $H_n$  = Seinän n reaktio

$I_n$  = Seinän n jäyhyysmomentti tarkastelusunnassa  $\left( \frac{b_n d_n^3}{12} \right)$

$b_n$  = Seinän n paksuus

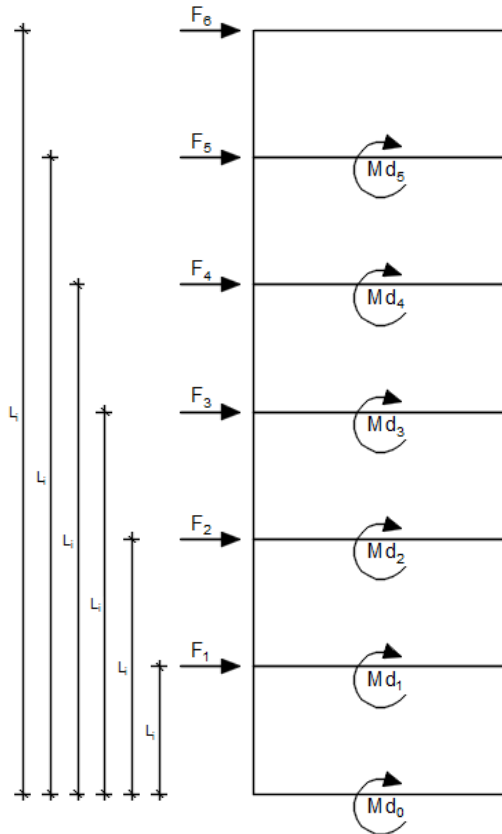
$d_n$  = Seinän n pituus

$e$  = Vaakakuorman resultantin etäisyys kiertokeskiöstä SC

$a_n$  = Etäisyys kiertokeskiöstä jäykistysosan n keskiöön,  $< 0$  kierto-keskiöstä vasemmalle

Kiertokeskiön sijainti selvitetään staattisen momentin avulla. Kokonaisvoima jakautuu jäykistävien osien oletettujen jäykkyyksien suhteessa, voidaan staattiset momentit laskea jäyhyysmomenttien  $I_i = \frac{b_n d_n^3}{12}$  suhteen. Jos jäykistävä osa on muu poikkileikkausmuoto kuin suorakaide, lasketaan osan jäyhyysmomentti kyseisen muodon mukaisesti. Poikkileikkaus voi myös olla useammista osista koostuva, esimerkiksi L-muoto. On kuitenkin osoitettava, että levyosien liitos pystyy siirtämään pystysuoria leikkausvoimia, jolloin se voidaan mieltää yhtenäiseksi poikkileikkaukseksi. Osan kiertokeskiönä käytetään vääntökeskiötä, joka on piste, jonka kautta kulkevasta voimasta ei aiheudu vääntöä. (Leskelä 2005, 182–183.)

Seinään vaikuttava kaatava momentti lasketaan kertomalla ylemmiltä kerroksilta vaikuttavat voimat niiden etäisyydellä tarkastelutasoon nähden (kuva 13).

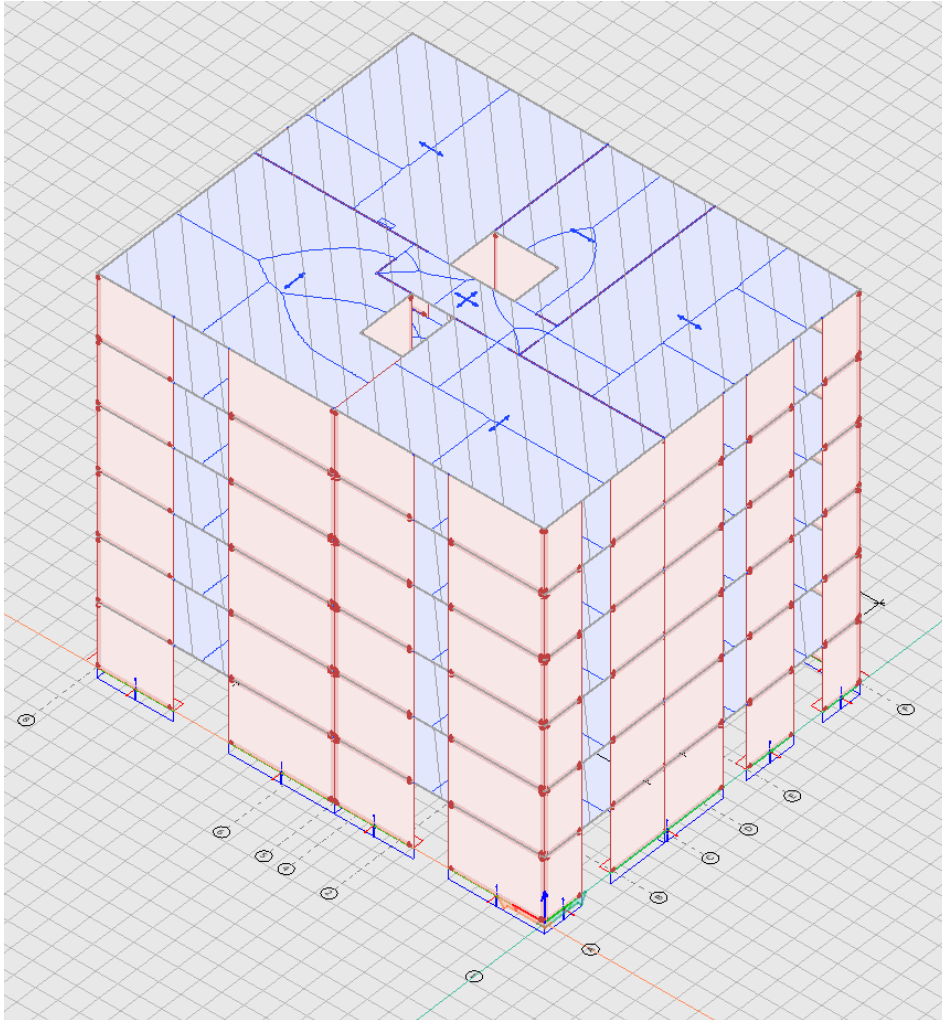


Kuva 13. Momentin laskentaperiaate

## 6 Mallirakennus

### 6.1 Rakennuksen tiedot

Esimerkiksi on valittu 6-kerroksinen yksinkertainen runko (kuva 14). Rakennuksen mitat ovat 16,5 x 20,4 x 18 (b\*d\*h). Mallissa ulkoseiniä paksuus on 160 mm ja väliseinät ovat 200 mm. Rakennuksen välipohjat ovat pääosin O37-ontelolaattoja paitsi poikkeuksena porrashuoneen välipohja on 260 mm paksu teräsbetonelementti. Seinät on mallinnettu siten, etteivät ne ota vastaan vetojännityksiä vaakasaumassa ja pystysauma on vapautettu leikkausvoiman osalta. Välipohjat on toteutettu mallissa cover ja diaphragm työkalujen avulla. Tuet on mallinnettu nivelellisinä viivatukina.



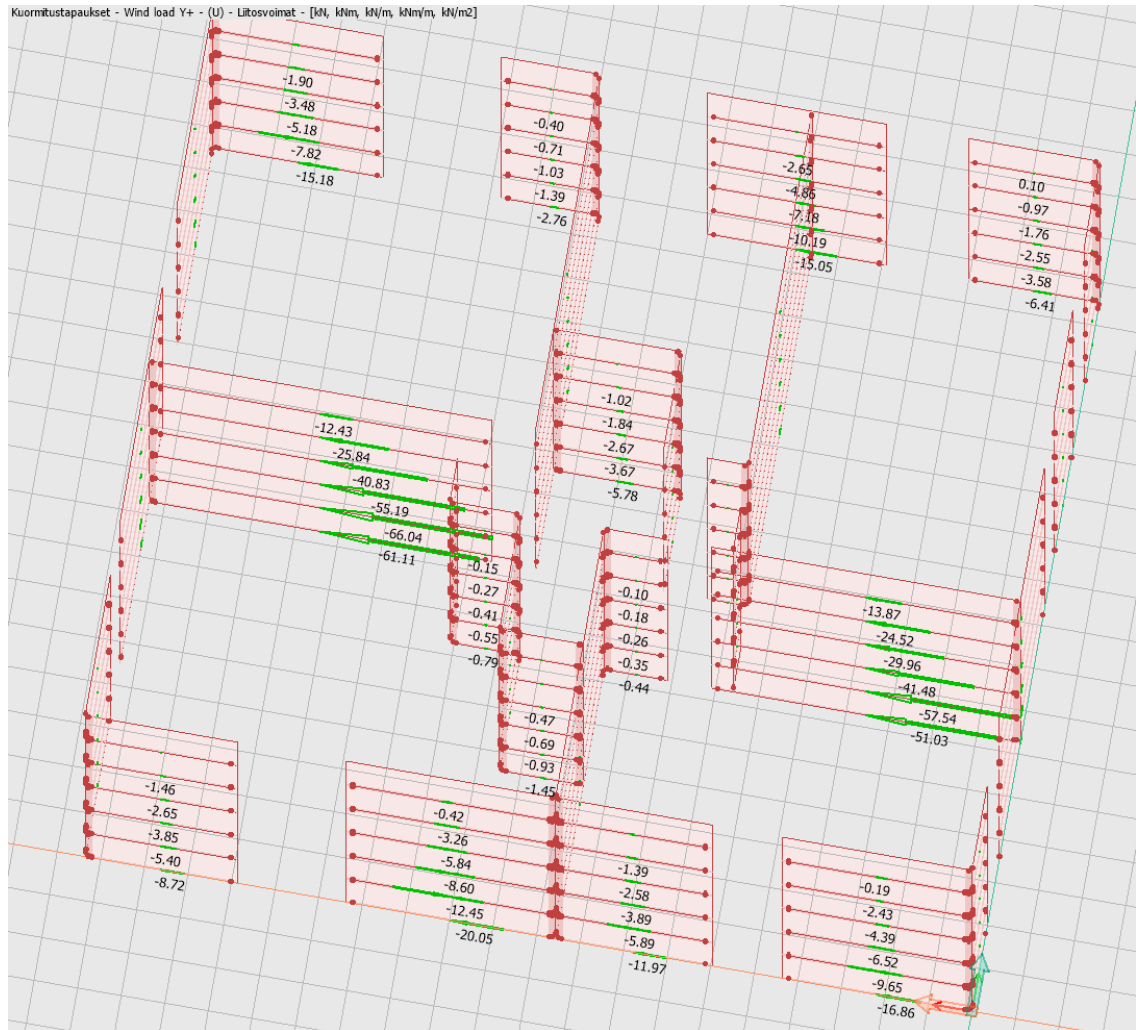
Kuva 14. Esimerkkimalli.

Pystykuormana välipohjilla vaikuttaa  $5,1 \text{ kN/m}^2$  omapaino (ontelolaatan massa), sekä  $2,0 \text{ kN/m}^2$  hyötykuorma. Porrashuoneen kohdalla vaikuttaa  $6,5 \text{ kN/m}^2$  omapaino (laattaelementin massa), sekä hyötykuorman suuruus on  $2,5 \text{ kN/m}^2$ . Vaakakuormana vaikuttavan tuulikuorman suuruus on  $0,75 \text{ kN/m}^2$  ja se on syötetty malliin viivakuormana välipohjille. Lisävaakavoima rakenteiden omasta painosta on  $4,89 \text{ kN/kerros}$  ja hyötykuormista  $0,87 \text{ kN/kerros}$ .

## 6.2 Tulokset ja vertailu

Rakennuksen keskialueella Y-suunnassa on kaksi seinää, jotka ovat selvästi muita pidempiä ja näin ollen myös jäykempiä. Koska tuulikuormat jakautuvat jäykkyyksien suhteessa, nämä kaksi seinää keräävät reilusti enemmän kuormaa kuin muut lyhyemmät seinät. Mallirakennuksen pohjaratkaisu on kaikissa

kerroksessa samanlainen, joten tuulikuormaa kertyy suurin piirtein samassa suhteessa seinätorneille aina alimpaan kerrokseen asti (kuva 15).



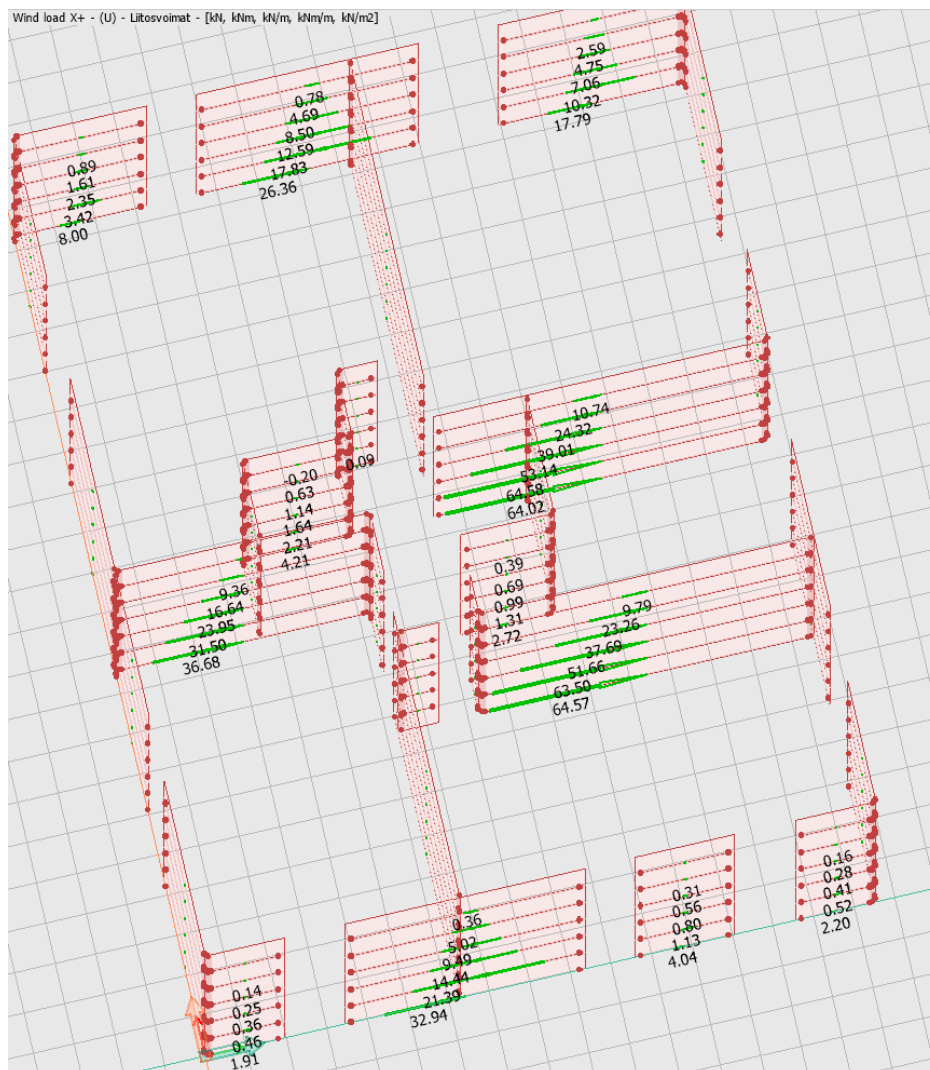
Kuva 15. Tuulikuorma Y-suunnassa.

Vertaillen FEM-mallia ja laskentapohjan tuloksia 1. kerroksen seinän yläpäähän kohdistuvassa tuulikuormassa, voidaan huomata pieniä eroja. Käsien laskennassa alimpien kerrosten ulkoseinillä on pienemmät kuormat ja näin ollen pitkien väliseinien osuus on hieman suurempi (taulukko 11). Tätä tulosten eroa saattaa selittää FEM-mallin tukien ominaisuudet kuten jäykkyys ja vapausasteet. Kuormien jakautuminen jäykistysosille on kuitenkin pääpiirteittäin samanlainen laskentamenetelmien välillä.

Y-SUUNNAN SEINÄT	Seinän alkupiste (↑)				I <sub>y,omamao</sub> [m <sup>2</sup> ]	Seinän oma kiertokeskiö		varsii (sc-SC):		seinän reaktio:		FEM TULOKSET:
	x [m]	y [m]	B <sub>seinä</sub> [m]	L <sub>seinä</sub> [m]		S <sub>CSINä</sub> [m <sup>2</sup> ]	a <sub>sc</sub> [m]	H <sub>sc</sub> [m]	[KN]	[KN/m]	ΣKN	
JS1	0	0	0,16	4,36	1,105	0,00	-7,1	2,96 %	5,5	1,26	9,65	5 %
JS2	0	5,96	0,16	3,6	0,622	0,00	-7,1	1,7 %	3,1	0,86	5,89	3 %
JS3	0	9,6	0,16	4,8	1,475	0,00	-7,1	3,9 %	7,3	1,53	12,45	7 %
JS4	0	16,86	0,16	3,5	0,572	0,00	-7,1	1,5 %	2,8	0,81	5,4	3 %
JS5	3,58	9,56	0,2	1,92	0,118	3,58	-3,5	0,4 %	0,8	0,42	0,93	1 %
JS6	6,3	0	0,2	7,3	6,484	6,30	-0,8	29,0 %	54,0	7,40	57,54	31 %
JS7	6,3	8,3	0,2	1,46	0,052	6,30	-0,8	0,2 %	0,4	0,30	0,35	0 %
JS8	6,3	11,48	0,2	1,62	0,071	6,30	-0,8	0,3 %	0,6	0,36	0,55	0 %
JS9	8,3	6,6	0,2	1	0,017	8,30	1,2	0,1 %	0,2	0,16	0	0 %
JS10	8,3	12,5	0,2	7,86	8,093	8,30	1,2	40,8 %	76,0	9,67	66,04	36 %
JS11	10,6	8,55	0,2	2,93	0,419	10,60	3,5	2,4 %	4,4	1,52	3,67	2 %
JS12	16,54	0	0,16	3	0,360	16,54	9,4	2,7 %	5,0	1,65	3,58	2 %
JS13	16,54	4,9	0,16	4,1	0,919	16,54	9,4	6,8 %	12,7	3,09	10,19	5 %
JS14	16,54	11,48	0,16	2,25	0,152	16,54	9,4	1,1 %	2,1	0,93	1,39	1 %
JS15	16,54	16,43	0,16	3,93	0,809	16,54	9,4	6,0 %	11,1	2,83	7,82	4 %
					0,000	0,00	-7,1	0,0 %	0,0	0,0		
					0,000	0,00	-7,1	0,0 %	0,0	0,0		
					ΣI <sub>y</sub>	21,27		Σ	100 %	100 %	Σ	185,45

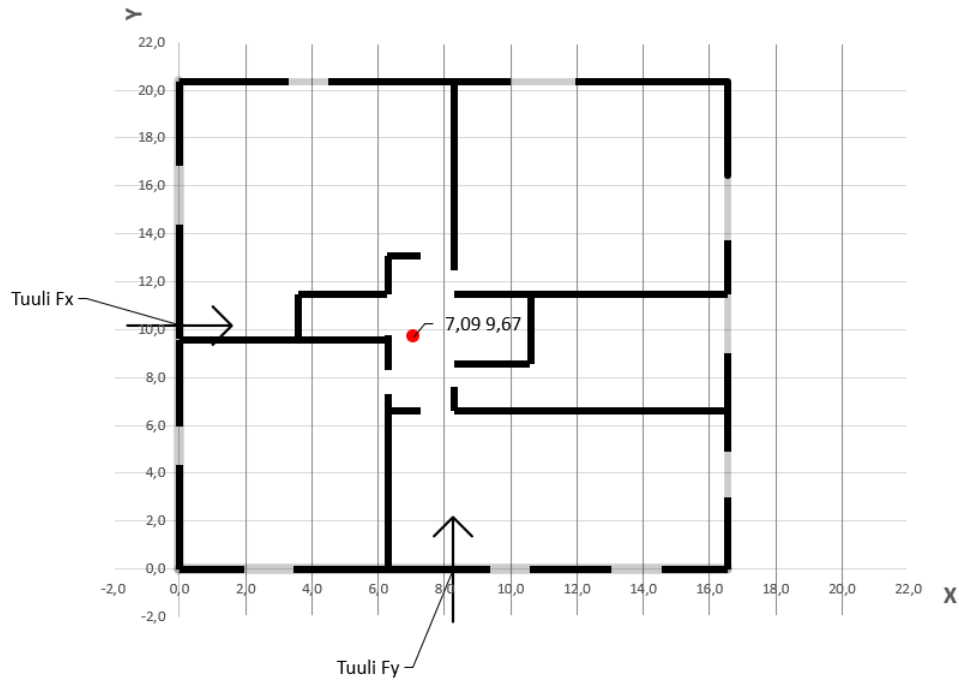
Taulukko 11. Laskentapohjan tulokset Y-suunnassa

X-suuntaa tarkasteltaessa on nähtävissä, että jäykistysosat ovat lähes samankaltaiset kuin Y-suunnassa. Keskialueella on kaksi selvästi muita pidempää seinää ja nämä seinät keräävät merkittävän osuuden X-suunnan tuulikuormasta (kuva 16). Laskentapohjan tulokset ovat hyvin lähellä FEM-mallin tuloksia (taulukko 12).



Kuva 16. Tuulikuorma X-suunnassa.

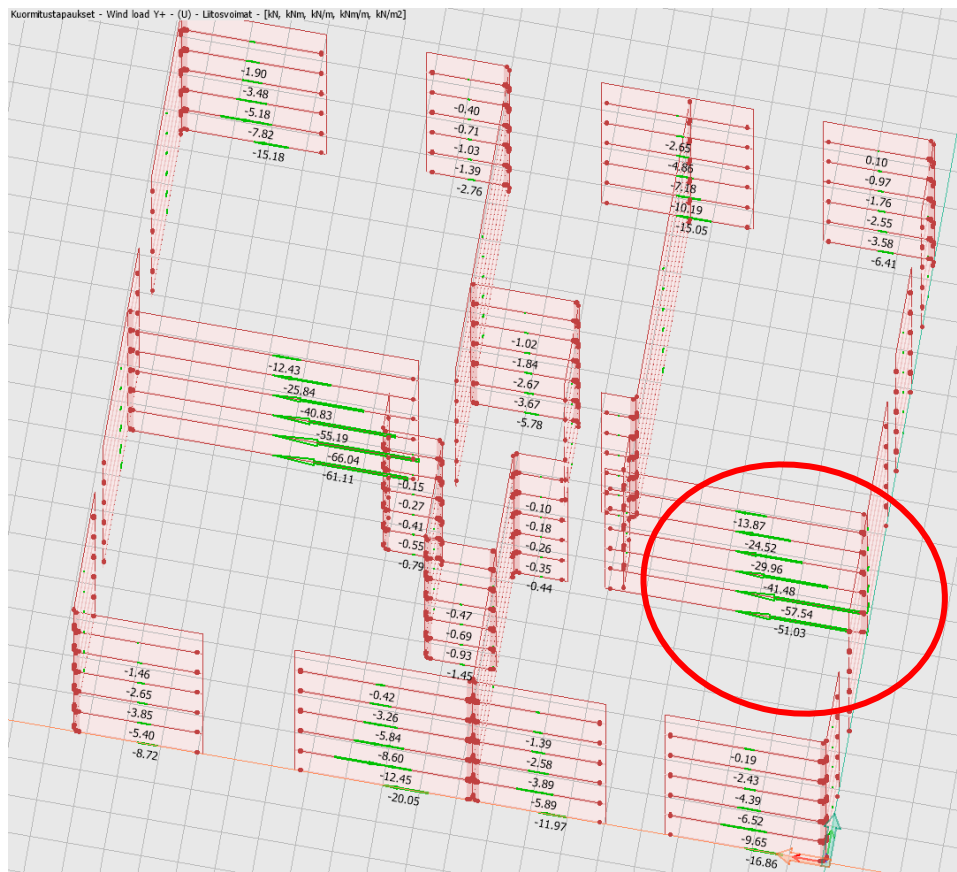




Kuva 18. Kiertokeskiön sijainti laskentapohjassa

### 6.3 Yksittäisen seinän tarkastelu

Tarkasteluun on valittu yksi seinä, millä on merkittävä osuus rakennuksen jäykistämisestä Y-suunnassa (kuva 19).



Kuva 19. Seinän sijainti FEM-Designissa.

Tarkastelua varten seinätornista on tehty erillinen malli ja seinälle on syötetty laskentapohjan mukaiset pysty- ja vaakakuormat (taulukko 13 ja 14). Seinä on merkitty laskentapohjaan tunnuksella JS6. Pystykuormat oletetaan jakautuvan tasaisesti seinän matkalle, joten momenttia syntyy vain seinään kohdistuvista vaakakuormista. Seinää tarkastellaan kuormitusyhdistelmässä 6.10b, jossa tuuli kuorma oletetaan olevan määräävä muuttuva kuorma.

<b>KY3 (0,9*Gk)</b>		
6. kerros:	28,0	kN/m
5. kerros:	55,9	kN/m
4. kerros:	83,9	kN/m
3. kerros:	111,8	kN/m
2. kerros:	139,8	kN/m
1. kerros:	167,8	kN/m
0. kerros:	181,3	kN/m

Taulukko 13. JS6 pystykuormat kerroksittain.

Y-SUUNNAN SEINÄT	Seinän alkupiste (↑)					Seinän oma kiertokeskiö		seinän reaktio:				
	x [m]	y [m]	B <sub>seinä</sub> [m]	L <sub>seinä</sub> [m]	I <sub>y, oma avo</sub> [m <sup>4</sup> ]	S <sub>CSEINÄ</sub> [m]	θ <sub>n</sub> [m]	H <sub>n</sub> [kN]	F <sub>wk</sub> [kN]	F <sub>Hgk</sub> [kN]	F <sub>Hgk</sub> [kN]	
JS1	0	0	0,16	4,36	1,105	0,00	-7,1	2,96 %	1,1	0,14	0,01	
JS2	0	5,96	0,16	3,6	0,622	0,00	-7,1	1,7 %	0,6	0,08	0,00	
JS3	0	9,6	0,16	4,8	1,475	0,00	-7,1	3,9 %	1,5	0,19	0,01	
JS4	0	16,86	0,16	3,5	0,572	0,00	-7,1	1,5 %	0,6	0,07	0,00	
JS5	3,58	9,56	0,2	1,92	0,118	3,58	-3,5	0,4 %	0,2	0,02	0,00	
JS6	6,3	0	0,2	7,3	6,484	6,30	-0,8	29,0 %	10,9	1,42	0,06	
JS7	6,3	8,3	0,2	1,46	0,052	6,30	-0,8	0,2 %	0,1	0,01	0,00	
JS8	6,3	11,48	0,2	1,62	0,071	6,30	-0,8	0,3 %	0,1	0,02	0,00	
JS9	8,3	6,6	0,2	1	0,017	8,30	1,2	0,1 %	0,0	0,00	0,00	
JS10	8,3	12,5	0,2	7,86	8,093	8,30	1,2	40,8 %	15,3	2,00	0,09	
JS11	10,6	8,55	0,2	2,93	0,419	10,60	3,5	2,4 %	0,9	0,12	0,01	
JS12	16,54	0	0,16	3	0,360	16,54	9,4	2,7 %	1,0	0,13	0,01	
JS13	16,54	4,9	0,16	4,1	0,919	16,54	9,4	6,8 %	2,5	0,33	0,01	
JS14	16,54	11,48	0,16	2,25	0,152	16,54	9,4	1,1 %	0,4	0,05	0,00	
JS15	16,54	16,43	0,16	3,93	0,809	16,54	9,4	6,0 %	2,2	0,29	0,01	
					0,000	0,00	-7,1	0,0 %	0,0	0,00	0,00	
					0,000	0,00	-7,1	0,0 %	0,0	0,00	0,00	
					Σ <sub>y</sub>	21,27		Σ	100 %	100 %		

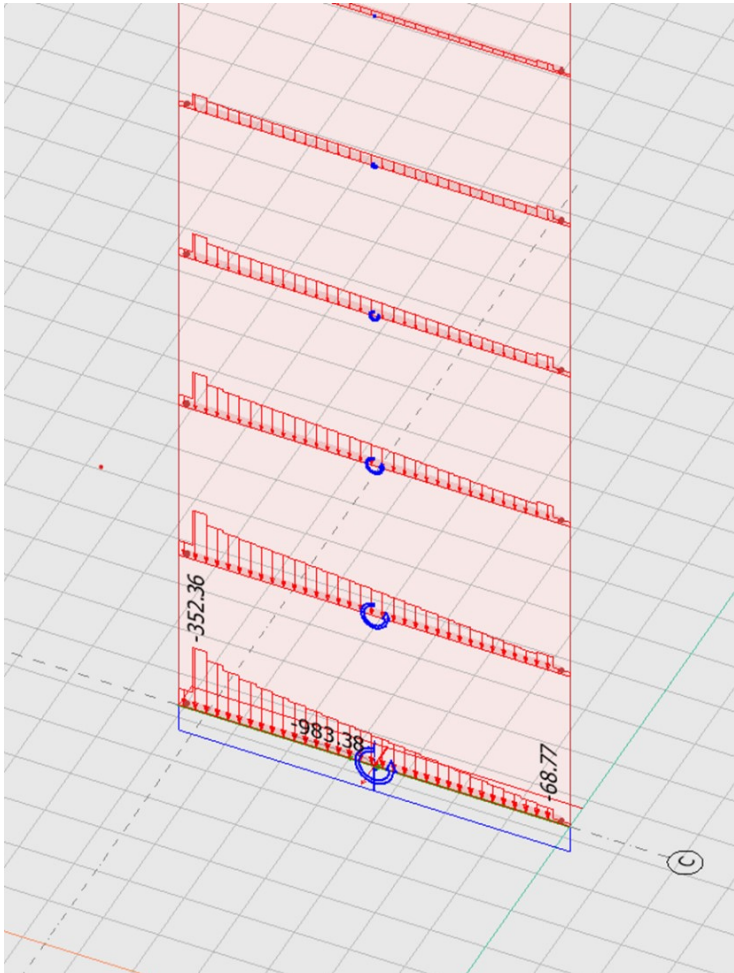
Taulukko 14. Seinän vaakakuorma yhdeltä kerrokselta.

Seinään vaikuttava momentti on laskettu kohdan 5.2 laskentaperiaatteen mukaan. Taulukon 15 mukaan 1. kerroksen seinän juuressa vaikuttaa 983,47 kNm momentti ja seinästä tehdyn FEM-mallin mukaan tulos on hyvin yhtenevä (kuva 20).

	VAAKAKUORMAT KERROKSITTAIN [kN]:			(1,5*Fwk+1,15*Hgk)	Voiman varsi [M]:	Momentit kerroksittain [kNm]:	
	Fwk:	Hgk:					
6.kerros	5,44	1,42	Fd6:	9,79	18	Md6	0
5.kerros	10,87	1,42	Fd5:	17,94	15	Md5	29,36
4.kerros	10,87	1,42	Fd4:	17,94	12	Md4	112,54
3.kerros	10,87	1,42	Fd3:	17,94	9	Md3	249,54
2.kerros	10,87	1,42	Fd2:	17,94	6	Md2	440,37
1.kerros	10,87	1,42	Fd1:	17,94	3	Md1	685,01
						Md0	983,47

Taulukko 15. Seinään vaikuttavat vaakakuormat ja momentti.

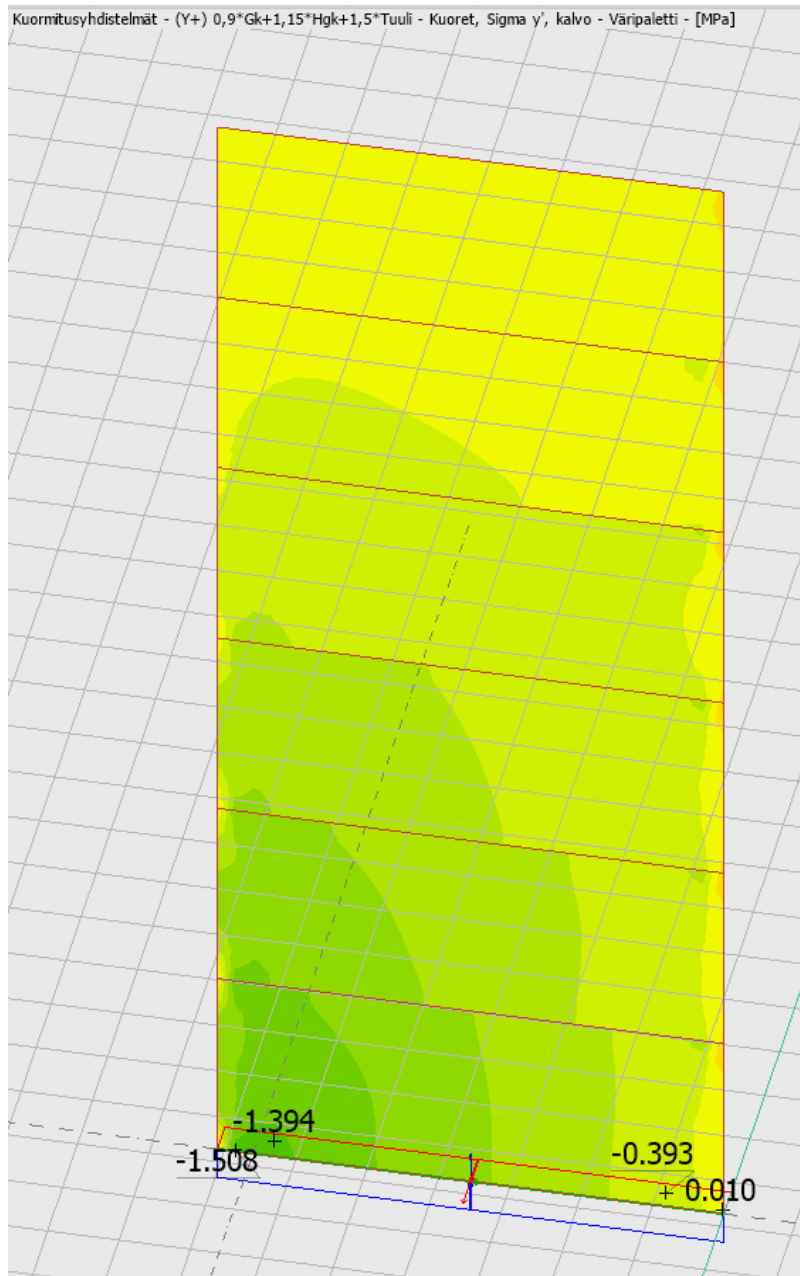




Kuva 20. Seinän rasiukset FEM-Designissa.

Kun momentti ja vaikuttava pystykuorma on selvitetty, voidaan tutkia seinässä vaikuttavat jännitykset. Työn aikana tehtiin myös toinen Excel-työkalu, jolla voidaan arvioida jännitysten yhteisvaikutusta. Tähän erilliseen laskuriin on syötetty aikaisemmin lasketut momentti ja pystykuormat. Seinän päissä vaikuttaa laskurin mukaan 0,32 ja 1,49 MPa puristusjännitys (kuva 21). FEM-Designin jännitysnäkymän perusteella tulos on hyvin yhtenevä (kuva 22).





Kuva 22. Seinän jännitykset FEM-Designissa.

Seinän erillisen tarkastelun tulokset menetelmien välillä olivat yhtenevät. Mikäli tarkastelu olisi tehty kokonaisesta rungon mallista, olisi seinään mahdollisesti kohdistunut momenttia myös pystykuormien epätasaisesta jakautumisesta.

## 7 Pohdinta

Työn tavoitteena oli perehtyä vaakakuormien jakautumisen periaatteisiin kerrostalon jäykistysjärjestelmässä ja luoda laskentapohja alustavalle jäykistysjärjestelmän suunnittelulle. Lisäksi työn aikana tutustuttiin Strusoftin FEM-Design ohjelmaan, joka toimii tukena laskelmien tuloksille. Laskentapohjan tekemisen aikana ilmeni, että aihe sisältää hyvin paljon oletuksia ja suunnittelijan oman harkinnan mukaisia päätöksiä. FEM-mallintaminen on hyvin tarkkaa työtä ja mallin tekemisessä täytyy olla hyvä käsitys siitä, että toimiiko rakenteet niin kuten ne on suunniteltu. FEM-mallin tulosten arvioinnissa täytyy olla kriittinen ja pyrkiä luomaan hyvä käsitys mallin virheettömyydestä esimerkiksi muiden tulostulosten ja kuvaajien avulla. Rakennuksen muuttuvat pohjaratkaisut aiheuttavat myös oman haasteen jäykistysjärjestelmän suunnittelulle sekä toimivan laskentapohjan tekemiselle. Kun jäykistysosien sijainti muuttuu kerrosten välillä, on osoitettava, että rakenteet pystyvät siirtämään kuormia esimerkiksi välipohjan tasossa muille jäykistysosille.

Työn tavoitteet saavutettiin ja valitut menetelmät jäykistysjärjestelmän tutkimiseen vaikuttavat luotettavilta. Laskentapohjan toteutus oli opinnäytetyön tavoitteisiin nähden riittävän hyvä ja jatkossa sitä voidaan kehittää monipuolisemmaksi.

## Lähteet

- Aho, O. 2008. Elementtirakenteinen pysäköintilaitos. Betonilehti. 3/2008. <https://betoni.com/lehti/betonilehti/32008/> 5.2.2023.
- Betoniteollisuus. 2009. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan osa 1: Eurokoodimitoituksen perusteet. [https://www.eurocodes.fi/wp-content/uploads/1992/sahkoinen1992/Leaflet\\_1\\_Eurokoodimitoituksen\\_perusteet.pdf](https://www.eurocodes.fi/wp-content/uploads/1992/sahkoinen1992/Leaflet_1_Eurokoodimitoituksen_perusteet.pdf). 15.2.2023.
- Elementtisuunnittelu.fi. 2020. Jäykistysjärjestelmät. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/rakennejarjestelmat/rakennuksen-jaykistys/jaykistysjarjestelmat>. 15.2.2023.
- Elementtisuunnittelu.fi. 2020. Korkeiden rakennusten jäykistys. <https://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23690/Korkeiden%20rakennusten%20j%C3%A4ykistys.docx>. 1.3.2023.
- Leskelä, M. 2005. BY210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2005. Helsinki: Suomen betoniyhdistys ry.
- NA-SFS-EN 1990. 2016. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1990. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Ympäristöministeriö.
- NA-SFS-EN 1991. 2019a. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-1: Rakenteiden kuormat. Osa 1–1: Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat. Ympäristöministeriö.
- NA-SFS-EN 1991. 2019b. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-3: Rakenteiden kuormat. Osa 1–3: Yleiset kuormat. Lumikuormat. Ympäristöministeriö.
- NA-SFS-EN 1991. 2019c. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-4: Rakenteiden kuormat. Osa 1–4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Ympäristöministeriö.
- NA-SFS-EN 1992. 2019d. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1992-1-1 Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Ympäristöministeriö.
- RIL 144-2002. 2002. Rakenteiden kuormitusohjeet. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. 2002
- RIL 201-1-2017. 2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. 2017.
- SFS-EN 1990. 2006. Eurokoodi 0. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN 1991. 2002. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1–1: Yleiset kuormat. Tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN 1991. 2011. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1–4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN 1991. 2015. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1–3: Yleiset kuormat. Lumikuormat. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN 1992-1-1+A1+AC. 2015. Eurokoodi. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- Strusoft. 2021. FEM Design Brochure (FIN). <https://strusoft.com/wp-content/uploads/2021/11/FEM-Design-Finnish-Brochure.pdf>. 15.2.2023.
- Suomen Betoniyhdistys ry. 2023. Elementtimenetelmän käyttö rakennesuunnittelun apuvälineenä. Vain Suomen Betoniyhdistys ry jäsenille. 5.2.2023.
- Valtanen, E. 2016. Tekniikan taulukkokirja. Mikkeli: Genesis-kirjat