

Opinnäytetyö AMK

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutusohjelma

Talonrakennustekniikka

2019

Teemu Paakkola

BETONIRUNKOISEN ASUINKERROSTALON JÄYKISTYS

TURKU AMK 
TURKU UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ AMK | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutusohjelma

Talonrakennustekniikka

Marraskuu 2019 | 36 sivua, 19 liitesivua

Ohjaaja: Joni Lähde, DI

Teemu Paakkola

BETONIRUNKOISEN ASUINKERROSTALON JÄYKISTYS

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on koota tietoa betonirunkoisen asuinkerrostalon jäykistyksen suunnittelusta ja käydä lävitse jäykistyksen laskentaperiaatteita sekä rakennukselle tulevien vaakakuormien laskentaa. Näiden lisäksi tavoitteena oli tehdä alustavaa jäykistyslaskentaa hankesuunnitteluvaiheesta olevasta asuinkerrostalohankkeesta yleissuunnitteluvaiheen tueksi. Työn toimeksiantajana on Sweco Rakennetekniikka Oy.

Opinnäytetyössä käsitellään rakennusrungolle vaakavoimaa aiheuttavat yleisimmät kuormitukset sekä niiden laskentaa. Esitellään eri jäykistysjärjestelmien toimintaperiaatteet sekä niiden valintaan vaikuttavia tekijöitä. Laskelmien ymmärtämiseksi opinnäytetyössä on esitelty kunkin osa-alueen peruskaavoja. Työn lopussa on laskelmien kohteena toimineen rakennushankkeen laskelmien kuvaus sekä hankkeen lyhyt esittely. Laskelmat on esitetty opinnäytetyön liitteissä.

Laskelmien teossa käytettiin apuna mathCAD- ja Excel laskentaohjelmia. Rakennukselle laskettiin vaakakuormista syntyvät jäykistyskuormat ja laskettiin niiden jakautuminen jäykistysosien kesken. Lopuksi tehtiin rasitetuimpien seinälinjojen kohdalla jännitystarkastelua jännitysten sekä mahdollisten vetorasitusten ankkurointi tarpeen arvioimiseksi.

Opinnäytetyön lähdeaineistona on käytetty Eurokoodien osioita, rakenteiden kuormat ja betonirakenteiden suunnittelu. Lisäksi lähdeaineistona on käytetty muita rakennesuunnittelualan luotettavana pidettäviä lähteitä, kuten Betoniteollisuus ry:n, Suomen betoniyhdistyksen sekä Rakennusteollisuus ry tuottamaa kirjallisuutta.

ASIASANAT:

jäykistys, jäykistysuunnittelu, betonirakenteet

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree Programme In Civil Engineering

Structural engineering

November 2019 | 36 pages, 19 pages in appendices

Instructor: Joni Lähde, M.Sc. Tech

Teemu Paakkola

THE STIFFENING OF A CONCRETE-FRAMED RESIDENTIAL BUILDING

The goal of this thesis is to gather information about the design of stiffening for a concrete-framed residential building and show the general accounting principles of the stiffening calculations including the calculation of horizontal forces. In addition, the secondary goal of this thesis was to do a preliminary stiffening calculation of a real-life building project in support of the general planning phase. The thesis was commissioned by Sweco Rakennetekniikka Oy.

The thesis includes information about vertical forces which affects the buildings frame. Also, calculation of horizontal forces is included in the thesis. Different types of stiffening systems are presented and the key factors which impact the selection of stiffening systems. To understand the calculations basic formulas of each sections are presented. Finally, the thesis presents the stiffening calculations and shortly describe the building project.

Calculation programs such as MathCAD and Excel were used in the process of making stability calculations. In the calculation part horizontal forces were calculated to determine how much stiffening forces they generate to the building. The distribution of horizontal forces are included in the calculation part as well. At the end of the calculation part most stressed stiffening walls were reviewed to determine the forming stresses and evaluate if anchorage of tension stresses is needed.

The used source material of thesis was mostly from Eurocodes, on the basics of structural design and design of concrete structures. Also, material from the Association of Concrete Industry, Finland's concrete association and the Association of Building industry was used in this work.

KEYWORDS:

stiffening, design of stiffening, concrete structures

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	6
2 VAAKAKUORMITUKSET	7
2.1 Yleistä	7
2.2 Tuulikuorma	7
2.3 Lisävaakakuorma	10
2.4 Onnettomuuskuorma	12
2.5 Toisen kertaluvun vaikutukset	13
3 JÄYKISTYKSEN SUUNNITTELU	16
3.1 Rakennuksen jäykistäminen	16
3.2 Jäykistysjärjestelmät	17
3.2.1 Levyjäykistys	18
3.2.2 Mastojäykistys	19
3.2.3 Kehäjäykistys	20
3.2.4 Ristikkojäykistys	21
3.2.5 Yhdistelmäjäykistys	21
3.3 Jäykistyksen rajatilatarkastelut	22
3.4 Jatkuvan sortuman estäminen	23
4 JÄYKISTYKSEN LASKENTAPERIAATTEET	25
5 KOY ISOLINNANKATU	28
5.1 Rakennushankkeen esittely	28
5.2 Vaakavoimien laskenta	30
5.3 Jäykistys ja vaakavoimien jakautuminen	31
5.4 Seinälinjojen jännitystarkastelu	33
6 POHIDINTA	34
LÄHTEET	36

LIITTEET

- Liite 1. Tuulikuorman laskenta.
- Liite 2. Vaakavoimien jakautuminen.
- Liite 3. Seinälinjojen jännitystarkastelu.
- Liite 4. Kerrosten 7 – 16 jäykistävät seinät.
- Liite 5. Korkean rakentamisen rakentamistapaohje, Helsinki.

KAAVAT

Kaava 1. Tuulen nopeuden perusarvo.	8
Kaava 2. Tuulen modifioitu perusarvo korkeudella z.	9
Kaava 3. korkeudella z vallitseva puuskanopeuspaine.	9
Kaava 4. Rakenteen tai rakenneosan tuulikuorma.	9
Kaava 5. Mittaepätarkkuuksista vinouden laskentakaava.	10
Kaava 6. Pienennyskertoimen laskentakaava.	11
Kaava 7. Pienennyskertoimen laskentakaava.	11
Kaava 8. Ehto toisen kertaluvun vaikutusten huomiotta jättämiselle.	14
Kaava 9. Toisen kertaluvun vaikutusten arviointi jäykistysjärjestelmässä, missä ei pääse syntymään merkittäviä leikkausmuodonmuutoksia.	14
Kaava 10. Toisen kertaluvun vaikutuksista aiheutuvan vaakakuorman laskenta.	15
Kaava 11. Yksittäisen jäykisteosan jäykkyys.	25
Kaava 12 Kiertokeskiön x- ja y-koordinaatit.	26
Kaava 13. Rakennuksen jäykistysjärjestelmään vaikuttava momentti.	26
Kaava 14. Rakennuksen siirtymätilat.	27
Kaava 15. Välipohjataso kiertymä.	27
Kaava 16. Yksittäiselle seinälinjalle tuleva vaakakuorma.	27

KUVAT

Kuva 1. Mittaepätarkkuuksien aiheuttamat vaikutukset.	12
Kuva 2. Onnettomuusmitoitustilanteiden käsittelyn toimintaperiaatteet.	13
Kuva 3. Periaate pystykuorman vaikutuksesta jäykistävän seinän halkeiluun.	17
Kuva 4. Levyjäykistyksen periaate.	19
Kuva 5. Mastoseinäjäykistyksen periaate.	20
Kuva 6. Kehäjäykistyksen periaate.	21
Kuva 7. Paikallisen vaurion hyväksyttävä suositusraja.	23
Kuva 8. Korvaava rakennesysteemi.	24
Kuva 9. Asemakaavamuutoksen ehdotusvaiheen havainnekuva tornitalosta.	28
Kuva 10. Luonnos 7 – 16 kerrosten pohjaratkaisusta .	29
Kuva 11. Leikkausvoima ja momentti jäykistysrakenteessa.	31

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on betonirunkoisen asuinkerrostalon jäykistys. Työn tarkoituksena oli selvittää betonirunkoisen asuinkerrostalon jäykistyslaskennan laskentaperiaatteita sekä jäykistysuunnittelussa huomioitavia tekijöitä. Laskentaperiaatteiden ymmärtämisen tueksi tehtiin esimerkkilaskentaa, jotka on esitetty opinnäytetyön liitteissä. Esimerkkilaskelmat on tehty hankevaiheessa olevasta KOY isolinnankadun kerrostalohankkeesta ja ovat luonteeltaan alustavia laskelmia. Opinnäytetyön toimeksiantajana on Sweco Rakennetekniikka Oy.

Rakennuksesta tehtävät stabiiliteettilaskelmat eli jäykistyslaskelmat ovat osa rakennusprojektissa tehtävistä rakennelaskelmista. Jäykistyslaskelmien tekeminen kuuluu kohteen päärakennesuunnittelijan tehtäviin muiden laskelmien, kuten rakenneosien mitoitustaskelmien sekä kuormituslaskelmien ohella, jotka esitetään viranomaisille. Vaativissa rakennuskohteissa voidaan viranomaisen toimesta edellyttää laskelmien tarkastusta kolmannella osapuolella. (RIL 229-1-2006, 35-36.)

Työssä käsitellään rakennusrungolle aiheutuvia vaakakuormituksia, jäykistysuunnittelun – ja jäykistyslaskennan periaatteita sekä esitellään erilaisia jäykistysjärjestelmiä. Työn lopussa esitellään ensin lyhyesti laskelmien kohteena olevan asuinkerrostalohanke, jonka jälkeen käydään tehdyt esimerkkilaskelmat sekä niissä tehdyt ratkaisut vaiheittain lävitse. Opinnäytetyön liitteissä on esitetty laskelmat kootusti. Viimeisessä kappaleessa on esitetty laskelmien johtopäätökset, arvioitu laskelmien luotettavuutta sekä summattu opinnäytetyön aihe.

Lähdeaineisto koostui suurimmaksi osaksi kantavien rakenteiden suunnittelustandardeista eli eurokoodeista ja rakennusinsinööriliiton suunnitteluohjeista sekä muista luotettavana pidettävistä alan kirjallisuuslähteistä, kuten Suomen Betoniyhdistyksen julkaisuista. Laskennassa käytettiin apuna laskentaohjelmista MathCAD:ä sekä Exceliä. Tuuliormon laskennan tulokset varmennettiin käyttämällä Suunnittelu- ja konsulttitoimistojen liitto ry:n kehittämällä Excel-laskentapohjalla.

2 VAAKAKUORMITUKSET

2.1 Yleistä

Suomessa käytetään ensisijaisesti suunnittelujärjestelmänä eurokoodipohjaista suunnittelua rakennesuunnittelussa. EN-standardien eli eurokoodien käyttö rakenteiden suunnittelussa alkoi 2007, jolloin myös ensimmäiset kansalliset liitteet valmistuivat. Eurokoodi-standardit on tarkoitettu käytettäväksi rakennusten suunnittelussa ja ne koostuvat 10 erillisestä teoksesta, jotka käsittelevät eri materiaaleista tehtyjen kantavien rakenteiden suunnittelua sekä rakenteiden suunnitteluperusteita ja kuormia. (RIL 201-1-2017, 3, 13 19, 22.)

Kuormituksiksi kutsutaan niitä vaikutuksia, jotka kantavissa rakenteissa aiheuttavat siihen muodonmuutoksia tai rasituksia. Kuormia aiheutuu rakenteille niiden omasta painovoimasta, rakenteen kantamista tavaroista, ihmisistä sekä koneista ja laitteista. Myös useimmiten kantaviin rakenteisiin kohdistuu luonnonolosuhteista johtuvia kuormia, kuten tuuli- ja lumikuormia. Edellä mainitut kuormat voidaan luokitella pysyviin-, muuttuviin- tai onnettomuuskuormiin niiden vaikutusajan perusteella. Kantavien rakenteiden eurokoodeihin pohjautuvassa suunnittelussa käytetään rajatilamitoitusta osavarmuusluvuin, jossa eri tyyppisille kuormituksille, kuten pysyville ja muuttuville kuormille sekä eri materiaaleille, on olemassa omat osavarmuusluvut. Rajatilamitoituksessa tarkastellaan rakenteen kestävyyttä murtorajatilassa sekä käyttörajatilassa. Murtorajatilassa tarkastellaan rakenteen kestävyyttä tilanteeseen, jossa rakenteen kantokyky ylittyy ja sen kyky kantaa sille suunniteltuja kuormituksia katsotaan menetetyksi. Käyttörajatilassa taas tarkastellaan rakenteille asetettuja käytön aikaisia vaatimuksia, jotka vaikuttavat rakennuksessa oleskelijoiden viihtyvyyteen, rakennuksen ulkonäköön tai muuten saattaa haitata muita rakenteita. (Salmi & Kuula 2012, 25-26.)

2.2 Tuulikuorma

Tuulikuormat vaihtelevat ajan mukana ja ne tulee ottaa huomioon rakenneosien ja rakennusten suunnittelussa. Tuulikuormat vaikuttavat rakennusten ulkopintoihin, aiheuttaen sitä vastaan kohtisuoraan vaikuttavia voimia eli painetta sekä imua, joka ulkopinnan huokoisuuden vuoksi pääsee vaikuttamaan välillisesti myös sisäpintoihin. Tuulikuorma

luokitellaan muuttuviksi kiinteiksi kuormiksi, jonka esittäminen tapahtuu yksinkertaistettuna paineiden tai voimien joukkona, riippuen käytetystä laskentamenetelmästä. Rakennesuunnittelussa tuulikuorma ja tuulen aiheuttamat dynaamiset vaikutukset muodostuvat tärkeiksi suunnittelukriteereiksi rakennuksen korkeuden kasvaessa. Tuulikuorma tulee ottaa jo huomioon korkeiden rakennusten perustusten ja rungon suunnittelussa. Varsinkin erilaiset tuulen aiheuttamat dynaamiset vaikutukset, kuten värähtely sekä erilaiset epästabiliusilmiöt, jotka saattavat vaikuttaa kyseiseen rakennukseen, tulee ottaa suunnittelussa huomioon. (RIL 201-1-2017, 127, Kiviluoma 2006.)

Eurokoodien mukaisessa tuulikuorman laskennassa on olemassa kaksi eri menetelmää tuulikuorman määrittämiseksi. Tuulikuorma voidaan määrittää paine- tai voimakertoimen avulla, riippuen siitä tarkastellaanko yksittäistä rakennetta vai esimerkiksi rakennuksen jäykistävää runkoa. Käytettävästä menetelmästä riippumatta tulee kuitenkin tuulikuorman määrittämisessä käyttää eurokoodissa EN 1991-1-4 kappaleessa 4 esitettyjä peruskaavoja. (SFS-EN 1991-1-4, 30-32.)

Tuulen nopeuden perusarvo v_b lasketaan kaavalla

$$v_b = C_{dir} * c_{season} * v_{b,0}$$

jossa

C_{dir} on suuntakerroin

c_{season} on vuodenaikakerroin

$v_{b,0}$ on tuulen modifioimaton perusarvo

Kaava 1. Tuulen nopeuden perusarvo. (SFS-EN 1991-1-4, 32.)

Tuulen modifioitu perusarvo $v_m(z)$ lasketaan kaavalla

$$v_m(z) = C_r(z) * C_0(z) * v_b$$

jossa

$C_r(z)$ on rosoisuuskerroin

$C_0(z)$ on pinnanmuotokerroin

v_b on tuulen nopeuden perusarvo

Kaava 2. Tuulen modifioitu perusarvo korkeudella z . (SFS-EN 1991-1-4, 34.)

Korkeudella z vallitseva puuskanopeuspaine $q_p(z)$ lasketaan kaavalla

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

jossa

$I_v(z)$ on tuulenpuuskien intensiteetti

ρ on ilman tiheys

Kaava 3. korkeudella z vallitseva puuskanopeuspaine. (SFS-EN 1991-1-4, 40.)

Rakennukseen tuulen aiheuttama kokonaisvoima F_w voidaan laskea voimakerroinmenetelmällä kaavalla

$$F_w = C_S C_d * c_f * q_p(z_e) * A_{ref}$$

jossa

$C_S C_d$ on rakennekerroin

c_f on rakenteen tai rakenneosan voimakerroin

$q_p(z_e)$ on puuskanopeuspaine nopeuspaine korkeudella z_e

A_{ref} on rakenteen tai rakenneosan tuulenpaineen vaikutusala

Kaava 4. Rakenteen tai rakenneosan tuulikuorma. (SFS-EN 1991-1-4, 44.)

Oheisilla kaavoilla pystytään ottamaan huomioon yleisimmät tuulikuorman määrittämiseen vaikuttavat tekijät, kuten rakennuksen ympäristön vaikutus, tuulen puuskaisuus sekä turbulenssi. Edellä mainituista tuulikuorman laskentamenetelmistä voimakeroinmenetelmä

soveltuu hyvin rakennusten jäykistävän rungon suunnitteluun. Vaihtoehtoisesti kaavassa 5 esitetty rakennekerroin voidaan laskea myös EN-1991-1-4 kohdan 6.3 mukaisella yksityiskohtaisella menettelytavalla, kun siinä esitetyt vaatimukset toteutuvat. Useimmissa tapauksissa rakennekertoimelle voidaan käyttää arvoa 1, mutta tarkemmalla laskennalla, voidaan päästä pienempiin arvoihin. Rakennekertoimien arvoja eri tyyppisille rakennuksille on esitetty standardin EN-1991-1-4 liitteessä D. (RIL 201-1-2017, 127-145, SFS-EN 1991-1-1-4, 48-50.)

2.3 Lisävaakakuorma

Rakenneosien ja rakenteiden analyysissä tulee huomioida kuormien sijainnin epäedulliset vaikutukset eli mittaepätarkkuudet. Mittaepätarkkuuksia syntyy rakenteiden mahdollisista mittapoikkeamista, kuten esimerkiksi niiden vinoudesta. Rakenneanalyysissä kuitenkin poikkileikkausten mittaepätarkkuudet on normaalisti otettu huomioon materiaaliosavarmuusluvuihin eikä näitä huomioida siinä. Rakenneosien vinous otetaan huomioon laskemalla mittaepätarkkuuksista syntyvä lisävaakakuorma, joka otetaan huomioon normaalissa murtorajatilatarkastelussa sekä onnettomuusmitoitustilanteissa. Käyttörajilatarkastelussa jätetään epätarkkuudet huomioimatta. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 55-56.) Betonirakenteiden mittaepätarkkuuden otetaan huomioon Eurokoodi 2:den esittämällä kaavalla ja voidaan esittää vinouden θ_i avulla kaavalla

$$\theta_i = \theta_0 * \alpha_h * \alpha_m$$

jossa

θ_0 on vinous

α_h on pituuteen tai korkeuteen perustuva pienennyskerroin

α_m on rakenneosien määrään perustuva pienennyskerroin

Kaava 5. Mittaepätarkkuuksista vinouden laskentakaava (SFS-EN 1992, 56.)

Pituuteen tai korkeuteen perustuva pienennyskerroin α_h lasketaan kaavalla

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

jossa

l on pituus tai korkeus

Kaava 6. Pienennyskerroimen laskentakaava (SFS-EN 1992, 56.)

Rakenneosien määrään perustuva pienennyskerroin lasketaan kaavalla

$$\alpha_m = \sqrt{0.5(1 + 1 / m)}$$

jossa

m on kokonaisvaikutuksen aiheuttavien rakenneosien määrä.

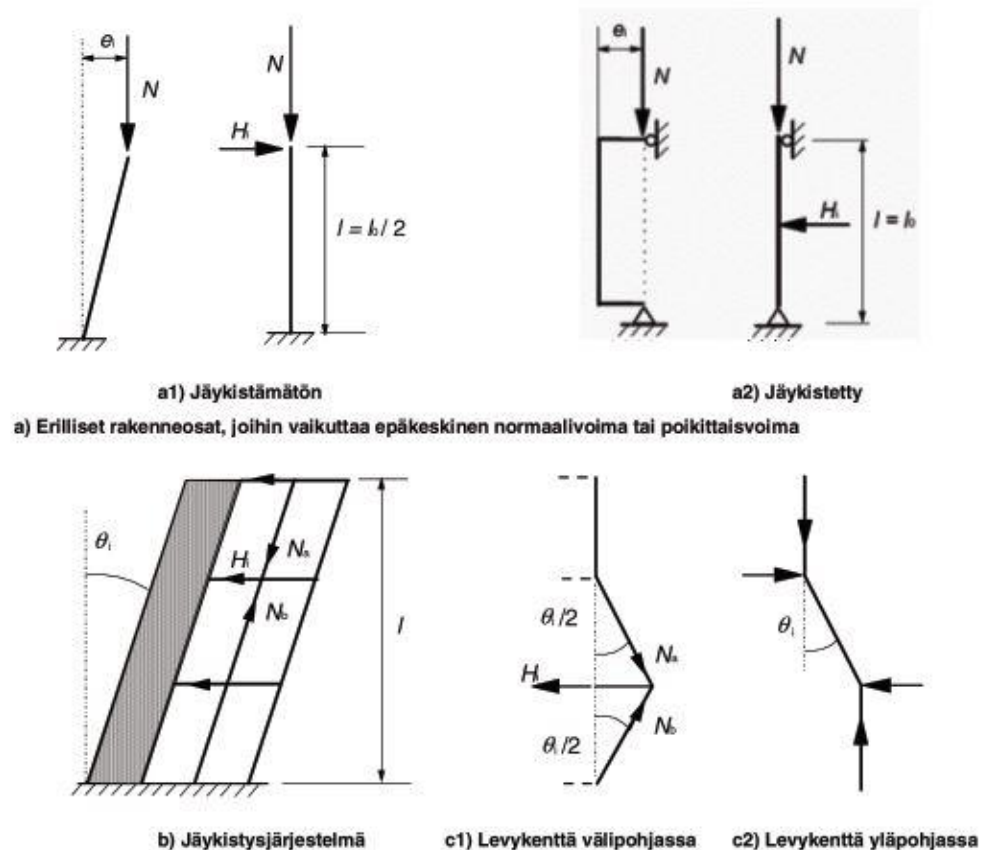
Kaava 7. Pienennyskerroimen laskentakaava (SFS-EN 1992, 56.)

Muuttujien l sekä m määritelmä riippuu hieman siitä, mitä kolmea eri päätapausta tarkastellaan. Epätarkkuusien vaikutuksen erillisten rakenneosien osalta voidaan huomioida epäkeskisyyden tai poikittaisvoiman avulla. Tarkasteltaessa kuitenkin päätapauksia eli mittaepätarkkuuksien vaikutusta jäykistysjärjestelmään, välipohjan levykenttään tai yläpohjan levykenttään, voidaan vinouden vaikutus huomioida korvaamalla se poikittaisvoimilla. (Kuva 1; SFS-EN 1992-1-1 + A1+ AC, 55-56.) Näistä päätapauksista jäykistysjärjestelmään vaikuttava poikittaisvoima H_i lasketaan kullekin kerrokselle kaavalla

$$H_i = \frac{\theta_i}{(N_b - N_A)}$$

jossa

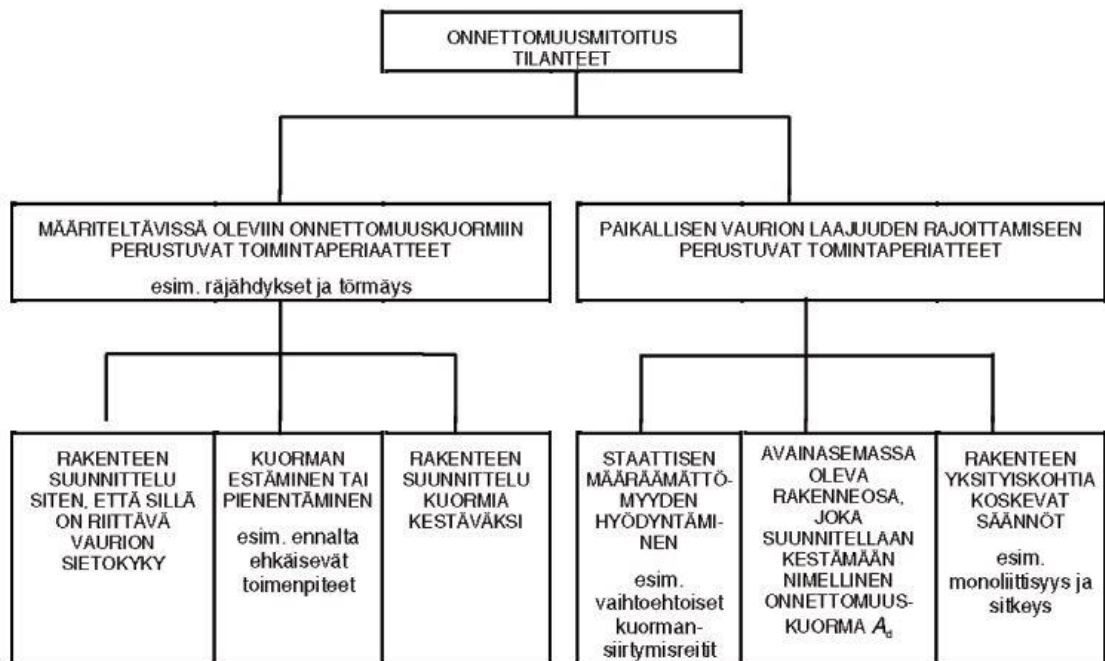
N_b ja N_A ovat poikittaisvoimaan H_i vaikuttavia pituussuuntaisia voimia (kuva 1).



Kuva 1. Mittaepätarkkuuksien aiheuttamat vaikutukset (SFS-EN 1992, 56.)

2.4 Onnettomuuskuorma

Rakenteiden suunnittelussa tulee ottaa huomioon mahdollisista onnettomuustilanteista aiheutuvat vaikutukset. Onnettomuuskuormat voivat olla etukäteen tiedossa olevia eli määriteltävissä olevia tai määrittelemättömissä olevia eli määrittelemättömistä syistä aiheutuvia. Määritettävien onnettomuuskuormien kuten esimerkiksi sisäpuolisten räjähdysten ja törmäysten mitoitus tilanne perustuu rakenteen riittävään vaurionsietokykyyn tai kestävyys, jolloin rakenteen mitoituksessa otetaan huomioon etukäteen määritelty kuorman mitoitusarvo (kuva 2). Määrittelemättömässä onnettomuustilanteessa taas rajoitetaan suunnitteluratkaisuin paikallisen vaurion laajuutta. (RIL 201-2-2017, 99-101.)



Kuva 2. Onnettomuusmitoitustilanteiden käsittelyn toimintaperiaatteet (SFS-EN 1991-1-7.)

2.5 Toisen kertaluvun vaikutukset

Toisen kertaluvun vaikutuksilla tarkoitetaan rakenteen siirtymätilasta aiheutuvien voimasuureiden lisäystä, joita pääsee syntymään rakenteiden epäkeskeisestä kuormittamisesta. Toisen kertaluvun vaikutukset vaikuttavat merkittävästi puristettujen rakenteiden toimintaan, kuten pilareiden sekä seinien toimintaan. Betonirakenteita käsitellessä toisen kertaluvun vaikutusten tarkastelu tehdään myös Eurokoodin 2 mukaisesti. Betonirakenteiden eurokoodin mukaan toisen kertaluvun vaikutukset voidaan jättää huomioimatta, jos niiden suuruus on alle 10 % vastaavista ensimmäisen kertaluvun vaikutuksista. Eurokoodissa on esitetty raja-arvo yksittäisen sauvan hoikkuudelle, jonka ylittyessä tulee suunnittelussa ottaa huomioon toisen kertaluvun vaikutukset. Lisäksi on myös esitetty ehto toisen kertaluvun huomioimatta jättämiseksi rakennusrungossa. (SFS-EN 1992-1-1, s. 64, 66.) Jäykistettyihin tai jäykistämättömiin sauvoihin vaikuttava pystysuuntaisen kokonaiskuorman $F_{V,Ed}$ tulee täyttää seuraava ehto

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

jossa

n_s	on kerrosten lukumäärä
L	on momenttijäykistyksen yläpuolinen rakennuksen korkeus
E_{cd}	on betonin kimmokertoimen mitoitusarvo
I_c	on jäykistävien sauvojen jäyhyysmomentti
k_1	on maakohtainen kerroin.

Kaava 8. Ehto toisen kertaluvun vaikutusten huomiotta jättämiselle. (SFS-EN 1992-1-1, 66.)

Kaava 7 pätee vain, kun kaikki seuraavat ehdot täyttyvät

- rakennuksen vääntöön liittyvä epästabiilius ei tule määrääväksi
- rakennuskorkeuden leikkausmuodonmuutokset ovat häviävän pieniä
- jäykistyssauvat ovat kiinnityskohdissaan jäykkiä, eli kiertymät ovat häviävän pieniä
- jäykistävien sauvojen jäykkyys on pituudeltaan likimain vakio
- rakennuksen pystykuorma kasvaa kerroksittain likimain samalla määrällä.

Mikäli kaikki edellä mainitut ehdot eivät täyty, mutta jäykistysjärjestelmässä ei pääse syntymään merkittäviä leikkausmuodonmuutoksia, jos esim. käytössä on aukottomia jäykistysseiniä. Tällöin voidaan rakennekokonaisuuden toisen kertaluvun vaikutukset jättää huomioimatta, jos pystysuuntainen jäykistettäviin ja jäykistäviin rakenneosiin vaikuttava kokonaiskuorma täyttää ehdon. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 209.)

$$F_{V,Ed} \leq 0,1 \cdot F_{V,BB}$$

jossa

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

Kaava 9. Toisen kertaluvun vaikutusten arviointi jäykistysjärjestelmässä, missä ei pääse syntymään merkittäviä leikkausmuodonmuutoksia. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 209.)

Mikäli ehdot toisen kertaluvun vaikutusten huomioimatta jättämiselle eivät täyty, toisen kertaluvun vaikutukset voidaan ottaa huomioon laskemalla siitä aiheutuva rakennukseen vaikuttava vaakakuorma. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 211.) Vaakakuorma $F_{H,Ed}$ lasketaan kaavalla

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

jossa

$F_{H,0Ed}$ on tuulen, epätarkkuuksien jne. aiheuttama lineaarisesti laskettu vaakavoima

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

Kaava 10. Toisen kertaluvun vaikutuksista aiheutuvan vaakakuorman laskenta. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 211.)

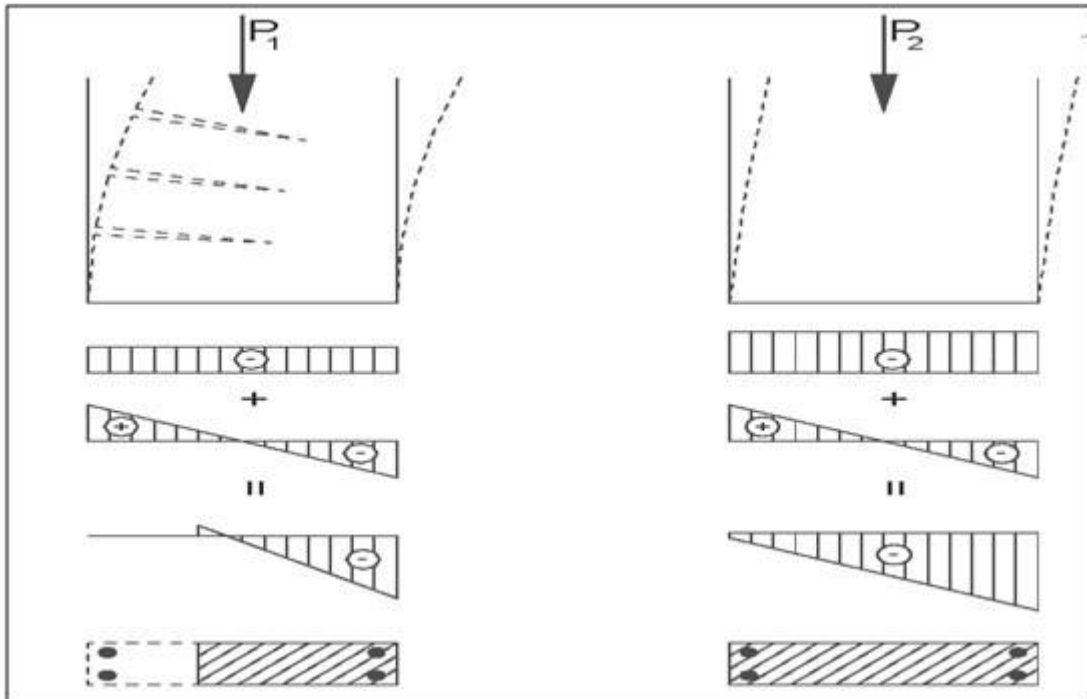
3 JÄYKISTYKSEN SUUNNITTELU

3.1 Rakennuksen jäykistäminen

Jäykistyksen tehtävänä on siirtää rakennukseen kohdistuvien vaakakuormien aiheuttavat rasitukset perustusten kautta aina maapohjaan saakka. Riippumatta rakennuksen jäykistysjärjestelmästä on oleellista, että vaakavoimat siirtyvät vaakarakenteiden kautta jäykistäville pystyrakenteille. Jäykistäville pystyrakenteille tuleva kuorma siirtyy osille niiden jäykkyysien suhteessa sillä periaatteella, että jäykempi osa ottaa vastaan suuremman osan kuormasta kuin vähemmän jäykkä osa. Esimerkiksi neljästä seinästä koostuvan kuilun jäykkyys on selvästi suurempi kuin neljän erillisen levyseinän jäykkyys yhteensä, koska kuilun laskettu jäyhyysmomentti on tällöin neljää erillistä seinää suurempi. Tällöin osien todelliset jäykkyydet sekä jäykkyyteen vaikuttavat tekijät kuten seinissä olevat aukot tai seinän halkeilu on selvitettävä riittävällä tarkkuudella. Myös rakenteiden tuentatapa vaikuttaa vaakavoimien jakautumiseen, joka tulee ottaa laskelmissa huomioon. (Elementtisuunnittelu 2010b.)

Rakennuksen rungolle syntyvät ulkoiset kuormat pystytään jakamaan aina vaaka- ja pystykomponentteihin. Kuormista syntyvistä voimista aiheutuu rungon eri osille taivutus-, veto-, puristus-, vääntö-, tai leikkausjännityksiä sekä näiden yhdistelmiä. Jäykistyksen suunnittelussa jäykistysosille tulee pystytä takaamaan riittävä stabiliteetti sekä vaakakuormien siirtyminen ilman suurien muodonmuutosten syntymistä. Jäykistysrakenteiden sijoittelussa tulee pyrkiä siihen, että rakenteet kuormittuvat mahdollisimman tasaisesti. (Leskelä 2008, 179-180.)

Yksittäiset jäykistysosat pyritään sijoittamaan siten, että niille kohdistuu riittävästi pystysuuntaisia kuormituksia, jotka ovat eduksi taivutusrasitetuille osille vähentäen rakenteessa olevia vetorasiuksia (kuva 3). Ankkuroinnin tarve tulee huomioida rakennuksen alustavaa jäykistysuunnittelua tehdessä, kuten myös koko rakennuksen riittävä jäykkyys. Lisäksi alustavassa jäykistysuunnittelussa tulee ottaa huomioon liikuntasauvojen tarve ja niiden vaikutus sekä rakennuksen kiertyminen ja siitä aiheutuvat lisärasitukset. (Elementtisuunnittelu 2010b.)



Kuva 3. Periaate pystykuorman suuruuden vaikutuksesta jäykistävän seinän halkeiluun (Elementtisuunnittelu 2010b.).

Elementtirunkoisen rakennuksen jäykistämisessä tulee ottaa huomioon asennusaikainen stabiiliuus ja suunnitella se erikseen. Elementeistä koostuvan rakenteen jäykkyys on monesti vasta riittävällä tasolla osien välisten liitosten valmistuttua. Yksittäisille elementeille ei myöskään saa tulla kuormituksia ennen kuin liitokset ovat täysin valmiita ottamaan niille kohdistuvia rasituksia. Tavallisille normaalivoiman kuormittaville seinäelementeille raudoitusta tarvitaan useasti asennus ja nostoaikaisten rasitusten vuoksi. Jäykistysrakenteina toimiville seinille tulevat rasitukset vaativat riittävää jäykkyyttä tai vutus- ja leikkausmuodonmuutoksia vastaan. Mikäli seinäelementille tuleva momentti on suuri, eikä seinän koko poikkileikkaus pysy puristettuna tulee seinät raudoittaa riittävästi pystysuunnassa ja kytkeä toisiinsa seinäkengillä vetorasitusten välittämiseksi. Mikäli elementtien koon puolesta käytetään pystysaumoja, syntyy niihin leikkausrasituksia ja leikkausmuodonmuutosten tarkastelu tulee tarpeelliseksi. (Leskelä 2008, 556.)

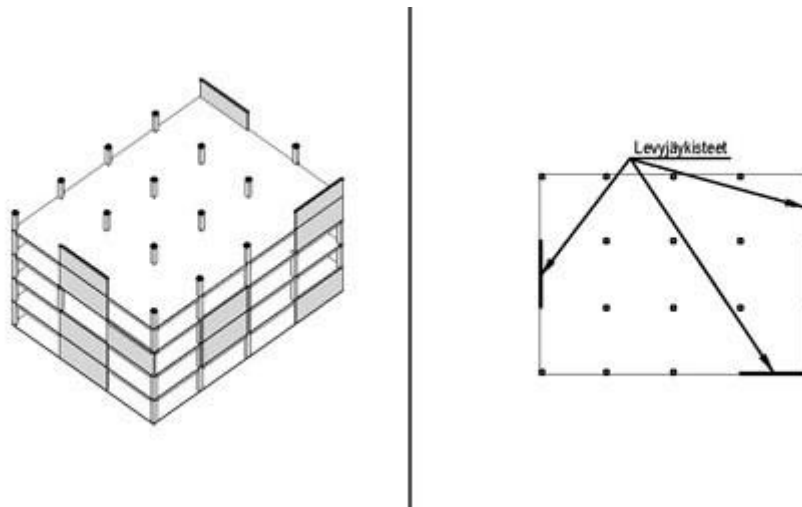
3.2 Jäykistysjärjestelmät

Rakennuksen jäykistykseen on useita eri jäykistysjärjestelmiä. Hyväksyttävään ja riittävään lopputulokseen voidaan päästä monellakin jäykistysjärjestelmällä, mutta sopivan

jäykistysjärjestelmän valinta tehdään rakennuskohtaisesti, sillä valintaan vaikuttaa usein monia eri tekijöitä. Rakennus voidaan esimerkiksi haluta toteuttaa mahdollisimman kustannustehokkaasti tai säilyttää tilojen muuntomahdollisuus tulevaisuuden varalle. Muita jäykistysjärjestelmän valintaan vaikuttavia tekijöitä voivat olla mittasuhteet, arkkitehtuuri sekä käyttötarkoitus. (Elementtisuunnittelu 2010b.)

3.2.1 Levyjäykistys

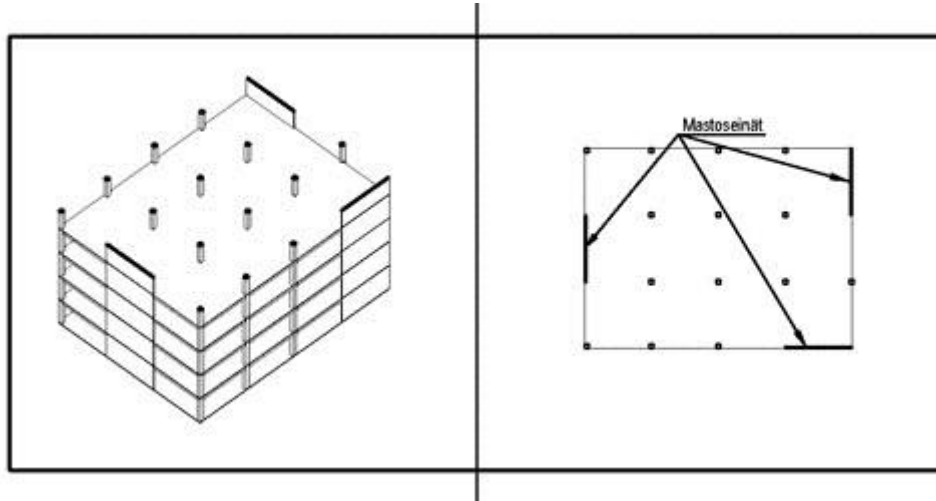
Asuinrakennuksissa käytetään eniten levyrunkoja, joissa rakennusrunko muodostuu kantavista ulkoseinistä sekä kantavista väliseinistä. Levyrunko soveltuu hyvin asuinrakennuksiin, missä muuntelun tarve on vähäistä sekä pelkästään huoneistojen sisäistä. (Leskelä 2008, s. 521) Levyrunгон jäykistys perustuu levymäisiin jäykistäviin rakenteisiin, kuten väli- ja/tai ulkoseiniin eli levyjäykistykseen (Kuva 4). Levyjäykistyksessä seinien sijoittelu kerroksissa on melko vapaata, mutta on otettava huomioon pystykuormien siirto, mikäli jäykistävät levyrakenteet eivät sijaitse joka kerroksessa päällekkäin. Tämän lisäksi jäykisteitä on oltava vähintään kolme kappaletta sekä niitä tulee sijoittaa rakennuksen rungon molempiin suuntiin. Levyjäykistyksessä tasorakenteita kuormittava vaakavoima siirtyy tasorakenteiden kautta jäykistäville levyille leikkausvoimina. Yksittäiselle levyille tulevan leikkausvoiman suuruus riippuu kyseisen levyn jäykkyydestä ja sen sijainnista jäykistysjärjestelmässä. Jos jäykistävät levyrakenteet eivät sijaitse kaikissa kerroksissa päällekkäin, tulee pysty- sekä vaakakuormat siirtää tasossa, joka voi aiheuttaa vaikeasti toteutettavia liitosratkaisuja. Levyjäykistyksellä saavutetaan jäykkä rakenne, jossa siirtymät jäävät pieniksi, eikä jäykistysmenetelmä yleensä asuinkerrostaloissa vaikuta perustusten kokoon suurentaen niitä, koska tavallisesti jäykistävien rakenteiden määrä on suuri. (Elementtisuunnittelu 2010b.)



Kuva 4. Levyjäykistysperiaate (Elementtisuunnittelu 2010b.)

3.2.2 Mastojäykistys

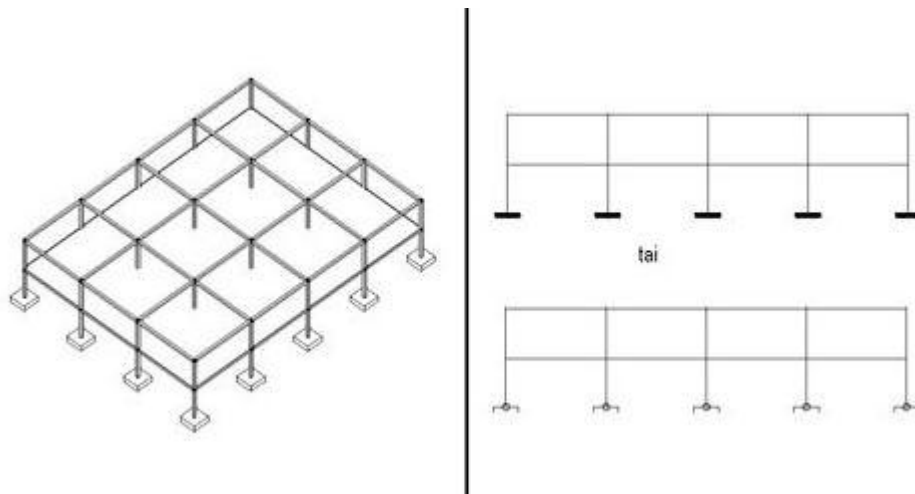
Mastojäykistyksessä rakennuksen jäykistys toteutetaan pystyrakentein, joiden väliset liitokset sekä alapään liitos perustuksiin toteutetaan jäykästi. Tällöin jäykistävät rakenteet toimivat ulokepalkin tavoin ja rungon muut pystyrakenteet voidaan toteuttaa nivelellisinä liitoksina. Jälleen vaakavoimat siirtyvät tasojen vaakarakenteiden kautta rakenteiden jäykkyyksien suhteessa, jolloin voimat jakautuvat jäykemmille osille. Mastojäykistyksessä on kolme toisistaan poikkeavaa tyyppiä, mastopilari-, mastoseinä-, sekä avoprofiili-, tai kotelopoikkileikkausten muodostama masto, kuten esim. hissikuilu. Näistä mastopilarijäykistys soveltuu ainoastaan matalahkoihin 1-3-kerroksisiin rakennuksiin. Mastoseinin tai jäykistystornein toteutettu mastojäykistys vuorostaan soveltuu hyvin korkeiden rakennusten jäykistämiseen ja on tehokas jäykistysjärjestelmä (Kuva 5.) Seinät voidaan toteuttaa seinäelementeistä, joiden vaaka- ja pystyliitossaumat mitoitetaan siirtämään rasituksia, siten että ne muodostavat yhden yhtenäisenä toimivan rakenteen. Sijoittelussa pyritään myös mastoseinät sijoittamaan, siten että niille aiheutuu riittävästi pystykuormia, jolloin rakenne on kokonaan puristettu, eikä rakenteisiin pääse syntymään maapohjaan asti siirrettäviä vetorasituksia. Erikoistapauksissa mastoseinät joudutaan ankkuroimaan, mitä tulee pyrkiä, suunnittelussa välttämään. (Elementtisuunnittelu 2010b.)



Kuva 5. Mastoseinäjäykistyksen periaate (Elementtisuunnittelu 2010b.)

3.2.3 Kehäjäykistys

Kehäjäykistystä voidaan käyttää matalahkoihin 1-3-kerroksen korkeisiin rakennuksiin ja se soveltuu erityisesti teollisuuden rakennuksille. Kehäjäykistyksessä perustuksista nivelellisesti tai jäykästi kiinnitetyt pilarit muodostavat palkkien kanssa kehän (kuva 6). Kehän nurkille tulevat vaakavoimat siirtyvät taivutusrasituksina kehän pilareille ja palkeille. Kehän nurkat voidaan toteuttaa täysin jäykkinä tai osittain jäykkinä ja kehäjäykistys voidaan toteuttaa vain toiseen suuntaan, jolloin toisen suunnan jäykistyksessä voidaan käyttää vinotukia tai levyseiniä. Kehäjäykistys on helpoin toteuttaa paikallavaletuin rakentein, jolloin liitoksien toteuttaminen on yksinkertaisempaa verrattaen elementtitekniikalla toteutettuihin rakenteisiin, jossa liitokset muodostuvat helposti monimutkaisiksi. (Elementtisuunnittelu 2010b.)



Kuva 6. Kehäjäykistyksen periaate (Elementtisuunnittelu 2010b.)

3.2.4 Ristikkojäykistys

Ristikkojäykistys on levyjäykistyksen tyyppinen ratkaisu rakennuksen jäykistämiseksi, jota voidaan käyttää pilari-palkkirunkoisissa rakennuksissa. Siinä levyjäykisteet on korvattu pilari-palkkirungon väliin sijoitetuilla diagonaaleilla. Diagonaalit toimivat rakenteessa veto- ja/tai puristussauvoina niiden toimintatavasta riippuen. Jäykistysristikot voivat toimia jäykistyksen ohessa myös osana pystykuormia kantavaa rakennetta ja niille tulevat voimat riippuvat paljoltikin siitä. Esimerkiksi erillisenä jäykistysristikkorakenteena toimivalle ristikolle tulevat pystykuormat voivat olla pieniä, mikä johtaa isompiin vetorasituksiin. Jäykistysristikon ollessa taas osana pystykuormia kantavaa rakennetta, kertyy pystykuormia rakenteelle enemmän, jolloin vetorasitukset jäävät taas pienimmiksi. (Elementtisuunnittelu 2010b.)

3.2.5 Yhdistelmäjäykistys

Eri jäykistysjärjestelmiä pystytään myös yhdistelemään kokonaistaloudellisesti edullisemmän lopputuloksen saavuttamiseksi. Esimerkiksi yksi yleinen tapa on jäykistää monikerroksisen rakennuksen alaosa levyjäykistyksellä ja korvata ylin kerros pilarimastojäykistein. Yhdistelmäjäykistystä käytettäessä tulee kuitenkin ottaa huomioon jäykistysjärjestelmien erilaiset jäykkyydet sekä on osattava jakaa vaakakuormat oikein

jäykistysosien kesken. Yhdistelmätapauksissa voidaan jäykkyyksien ja jäykistyksen laskennassa käyttää apuna FEM-ohjelmistoja. (Elementtisuunnittelu 2010b.)

3.3 Jäykistyksen rajatilatarkastelut

Jäykistysjärjestelmä mitoitetaan eurokoodien SFS-EN 1990 ja SFS-EN 1992 mukaisesti tarkastellen käyttö- sekä murtorajatilaa. Rajatilat, jotka liittyvät ihmisten turvallisuuden tai rakenteen varmuuteen luokitellaan murtorajatiloina. Jäykistysrakenteissa tarkasteltavia murtorajatilatarkastelun kriteerejä 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.
- tarkasteltavan rakennuksen staattinen tasapaino.

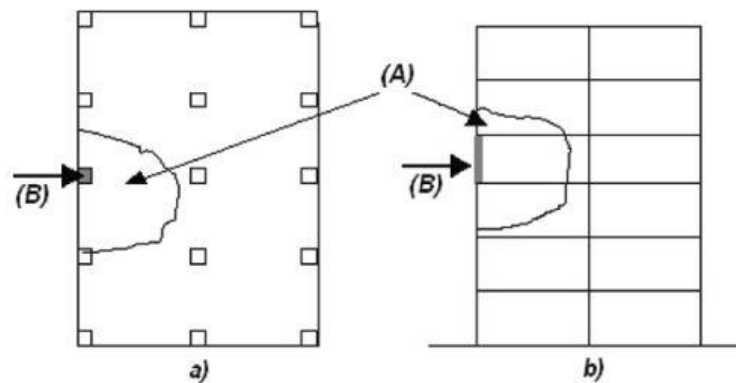
Käyttörajatilat liittyvät rakenteen toimintaan normaalikäytössä, ihmisten mukavuuteen ja rakennuskohteen ulkonäköön. Käyttörajatilatarkastelukriteerejä ovat:

- siirtymät, jotka vaikuttavat ulkonäköön, käyttäjien mukavuuteen tai rakenteen toimivuuteen
- värähtelyt, jotka saavat ihmiset tuntemaan olonsa epämukavaksi tai jotka rajoittavat rakenteen käyttökelpoisuutta käyttötarkoitukseensa
- vauriot, jotka todennäköisesti vaikuttavat kielteisesti ulkonäköön, säilyvyyteen tai rakenteen toimivuuteen
- jännitysten rajoittaminen
- halkeamaleveyden rajoittaminen
- taipuman rajoittaminen.

Värähtely ja rakenteen taipuma voivat tulla mitoitaviksi tekijöiksi korkeissa rakennuksissa. Jäykistävien rakenteiden osalta näille tekijöille ei ole eurokoodeissa määritetty käytettäviä raja-arvoja, jolloin joudutaan rakenteiden kelpoisuutta arvioimaan tapauskohtaisesti. Esimerkiksi taipuman ylärajana on käytetty arvoa $H/400-H/1000$ Suomessa, missä H = rakennuksen korkeus. (Elementtisuunnittelu 2010b.)

3.4 Jatkuvan sortuman estäminen

Eurokoodien mukaan yhden rakenneosan vaurioituessa paikallisesti pitää pyrkiä estämään jatkuvan sortuman syntyminen. Jatkuva sortuma tarkoittaa tilannetta, missä aiheutuu jatkuva vaurioitumis- tai sortumisilmiö rakennukseen. Syitä jatkuvan sortuman syntymiseen voi olla onnettomuustilanne tai muista syistä syntyvän paikallisen sortuman leviäminen rakenteen yhden osan vaurioitumisesta, myötäämisestä tai stabiiliteetin menetyksestä. Rakennuksen vakavuuden suunnittelussa jatkuvan sortuman huomioiminen edellyttää vaihtoehtojen tutkimista, joissa osa jäykistysjärjestelmästä ei ole käytössä paikallisen sortuman takia, jolloin jäljellä olevien rakenteiden tulee taata rakennuksen vakavuus. Käytännössä monikerroksisen rakennuksen kohdalla jatkuvan sortuman kestävyyskannalta tulee rakennuksen pysyä pystyssä, vaikka yksi kantava pilari menettäisi kantokykynsä esimerkiksi kolarin tai tulipalon takia. Pääasia on tällöin paikallisen vaurion etenemisen estäminen rakenteessa, eikä muodonmuutoksia silloin pyritä rajaamaan. (Rakennusteollisuus ry 2006.) Eurokoodien osassa EN 1991-1-7 on esitetty sortuman suuruuden pinta-alalle yläraja-arvo. (Kuva 7.)



Selite

(A) Paikallinen vaurio, joka on enintään 15 % kummankin päällekkäisen kerroksen lattiapinta-alasta

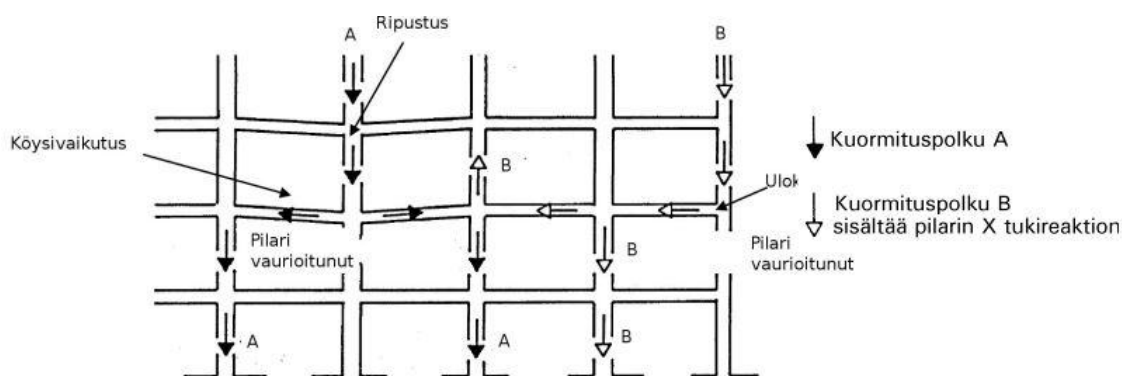
(B) Poistettavaksi ajateltu pilari

a) Tasopiiirros b) Poikkileikkaus

Kuva 7. Paikallisen vaurion hyväksyttävä suositusraja (SFS EN 1991-1-7, 56.)

Yksinkertaisin tapa estää jatkuvan sortuman syntyminen on estää yksittäisen rakennesosan vaurioitumisesta syntyvä alkusortuma eli paikallinen vaurio. Paikallisen vaurion syntyminen voidaan estää rakenteellisin toimenpitein tai mitoittamalla kantavat rakenteet onnettomuuskuormille. Räjähdyksien varalta voidaan suunnitella purkautumisreitti räjähdysten aiheuttamalle ylipaineelle ilman kantavien rakenteiden murtumista. Törmäyksen varalta voidaan turvautua varustautumalla suojarakentein. (Rakennusteollisuus ry 2006.)

Toinen tapa estää jatkuvaa sortumaan syntymästä on suunnitella korvaava rakennesysteemi. Korvaava rakennesysteemi perustuu vaurioitumisen jälkeen jäljelle jäävien pystyrakenteiden tasapainotilan saavuttamiseen suurien muodonmuutosten sekä siirtymien kautta. Uudessa rakennesysteemissä rakenteet toimivat köysi- tai kalvorakenteina kestämällä vetorasituksia. Tällöin muodonmuutoksia ei pyritä rajaamaan ja plastisia niveliä saa syntyä rakenteisiin sekä niiden välisiin liitoksiin. Uuden systeemin syntymisen edellytyksenä on plastisten nivelten muodostumismahdollisuus. Plastisten nivelten syntymien vaatii elementtien välisiltä liitoksilta riittävää vetovoimakapasiteettia sekä suurta muodonmuutoskykyä. Tähän päästään, kun käytetään oikein sijoitettuja riittävän kokoisia saumateräksiä elementtisaumoissa ja liitoksissa. (Rakennusteollisuus ry 2006.)



Kuva 8. Korvaava rakennesysteemi (Rakennusteollisuus ry 2006.)

4 JÄYKISTYKSEN LASKENTAPERIAATTEET

Rakennuksen vaakakuormat jakautuvat sillä periaatteella, että vaakasuorat tasot toimivat jäykkinä levyinä, joiden kautta voimat jakautuvat jäykistävälle pystyrakenteille jäykkyyksien suhteessa. Jäykisteseinien kohdalla oletetaan seinän ottavan kuormaa ainoastaan seinän jäykemmässä suunnassa ja seinien jäykkyydet lasketaan jäykemmässä suunnassa. (Elementtisuunnittelu 2010a.) Yksittäisen jäykisteosan jäykkyys k voidaan ratkaista kaavasta

$$\frac{1}{k} = \frac{H^3}{3EI} + \kappa \frac{H}{GA}$$

Kaava 11. Yksittäisen jäykisteosan jäykkyys. (Elementtisuunnittelu 2010a.)

jossa

H	on jäykisteosan korkeus tarkastelutasosta
E	on jäykisteosan kimmokerroin
I	on jäykisteosan jäyhyysmomentti
G	on jäykisteosan liukumoduuli
A	on jäykisteosan poikkipinta-ala
κ	on jäykisteosan leikkausmuodonmuutoksen kerroin.

Kun tiedetään kaikkien jäykistysosien jäykkyydet, voidaan selvittää rakennuksen kiertokeskiön paikka. Kiertokeskiö on välipohjatasolla sijaitseva pysty akseli, jonka suhteen taso pääsee kiertymään vaakavoimien resultantin vaikutuksesta. Poikkileikkaukseltaan symmetristen jäykisteosien, kuten suorakaiteenmuotoisten jäykistysseinien kiertokeskiöt sijaitsevat niiden painopisteissä. Kiertokeskiön paikka voi vaihdella eri tasoissa riippuen jäykistävien pystyrakenteiden vaihtuvuudesta, jolloin sen sijainti tulee selvittää jokaisessa tasossa erikseen. (Elementtisuunnittelu 2010a, Leskelä 2008, 181.) Rakennuksen kiertokeskiön x - ja y -koordinaatit ratkaistaan kaavasta:

$$X = \frac{\sum k_y x}{\sum k_y}$$

$$Y = \frac{\sum k_x y}{\sum k_x}$$

jossa

x on y-akselin suuntaisen seinän sijainti

y on x-akselin suuntaisen seinän sijainti.

Kaava 12 Kiertokeskiön x- ja y-koordinaatit (Elementtisuunnittelu 2010a.)

Mikäli jäykistävät pystyrakenteet eivät sijaitse symmetrisesti vaakakuormien kuormitusresultantin suhteen, eli toisin sanoen kuormitusresultantti ei kulje tason kiertokeskiön kautta, syntyy rakennukseen kiertymää. (Elementtisuunnittelu 2010a.) Tällöin rakennuksen jäykistyssysteemiin syntyy lisäksi momenttia, joka lasketaan kaavalla

$$M = F_y \cdot x_1 - F_x \cdot y_1$$

jossa

F_y on vaakavoimien resultantti y-akselin suuntaan

F_x on vaakavoimien resultantti x-akselin suuntaan

x_1 on voimarelevantin etäisyys kiertokeskiöstä x-suunnassa

y_1 on voimarelevantin etäisyys kiertokeskiöstä y-suunnassa.

Kaava 13. Rakennuksen jäykistyssysteemiin vaikuttava momentti (Elementtisuunnittelu 2010a.)

Kiertymän φ suuruus sekä siitä aiheutuvat kiertokeskiön siirtymätilat v_x ja v_y voidaan ratkaista kaavoista

$$v_x = \frac{F_x}{\sum k_x}$$

$$v_y = \frac{F_y}{\sum k_y}$$

Kaava 14. Rakennuksen siirtymätilat (Elementtisuunnittelu 2010a.)

jossa

v_x on siirtymä x-suunnassa

v_y on siirtymä y-suunnassa.

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

jossa

T_{xy} on vääntöjäykkyys, joka suorien mastoseinien tapauksessa voidaan olettaa olevan 0

Kaava 15. Välipohjatason kiertymä (Elementtisuunnittelu 2010a.)

Kun tiedossa on välipohjatason siirtymät sekä kiertymä ja tunnetaan jäykisteosien jäykkyydet, voidaan yksittäisen seinän ottaman vaakakuorman osuus sen jäykistävässä suunnassa laskea kerroksittain kaavoista

$$Q_x = k_x * v_x - k_x * y * \varphi$$

$$Q_y = k_y * v_y - k_y * x * \varphi$$

Kaava 16. Yksittäiselle seinälinjalle tuleva vaakakuorma (Elementtisuunnittelu 2010a.)

Tapauksissa, joissa jäykistysjärjestelmä sijaitsee symmetrisesti vaakakuormien kuormitusresultantin suhteen, laskenta yksinkertaistuu. Usein ei kuitenkaan ole mahdollista järjestää edellä mainitun kaltaista tilannetta. Laskenta pysyy kuitenkin melko yksinkertaisena, mikäli jäykistysosat ovat poikkileikkaukseltaan symmetrisiä. Jäykkyysien laskennassa tulee lisäksi ottaa huomioon aukkojen tuomat seinien heikennykset huomioon. Tapauksissa, joissa jäykistävät seinät eivät sisällä ovi-, tai ikkuna-aukkoja, voidaan niiden jäykkyydet helposti kaavan 10. avulla. (Elementtisuunnittelu 2010a.)

5 KOY ISOLINNANKATU

5.1 Rakennushankkeen esittely

Esimerkkilaskelmien kohteena oleva rakennushanke on Porin Isolinnankadulle suunnitella oleva 16-kerroksinen tornitalo hanke. Alustavien suunnitelmien mukaan sen on tarkoitus koostua kellarikerroksesta sekä 16:sta maanpinnan yläpuolisesta kerroksesta. Asuinhuoneistoja sen on määrä sisältää 94. Alueen alkuperäinen asemakaava ei olisi mahdollistanut korkean tornitalon rakentamista, mutta vuonna 2016 hyväksyttiin asemakaavan muutos, joka nykyisin mahdollistaa tornitalo hankkeen (Kuva 10). Asemakaavassa on rajoitettu rakennuksen geometriaa siten, että kerrokset 7-16 tulevat olemaan pinta-alaltaan alimpia kerroksia pienempiä. Tämän johdosta tornitalon pituusleikkauksesta muodostuu hieman L:n muotoinen. Rakennesuunnittelun näkökulmasta tämä tarkoittaa sitä, että rakennuksen geometria tulee asettamaan haastetta suunnittelutyölle.

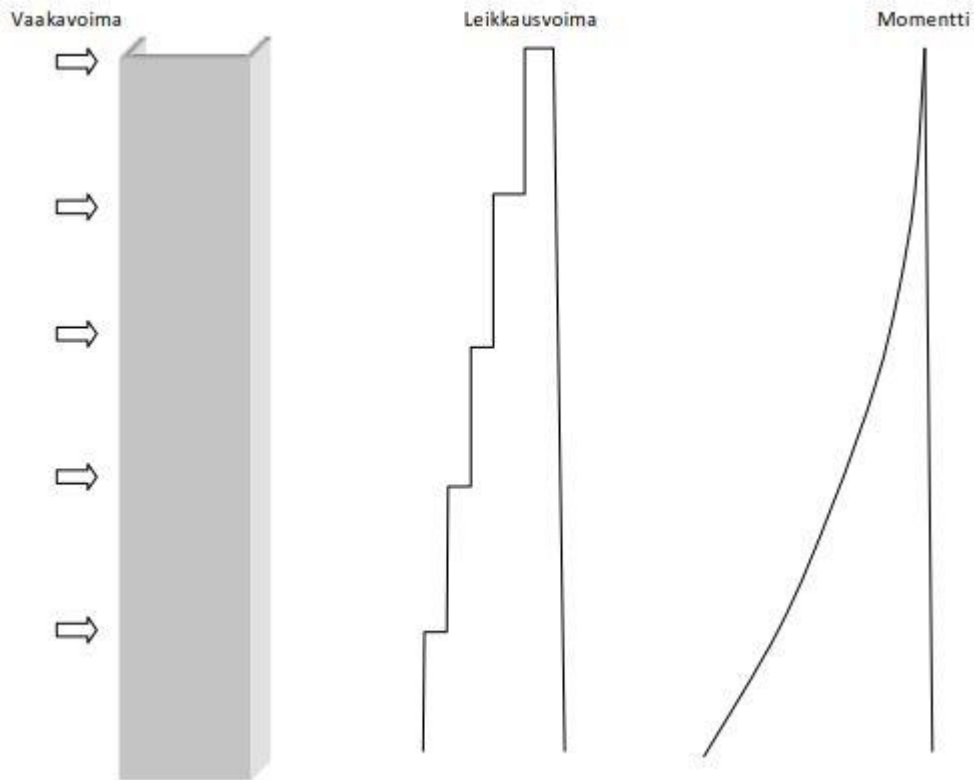


Kuva 9. Asemakaavamuutoksen ehdotusvaiheen havainnekuva tornitalosta (Sigge arkitehdit.)

5.2 Vaakavoimien laskenta

Ennen jäykistyslaskentaa täytyi määrittää luonnollisesti rakennukselle tulevat vaakakuormat. Vaakakuormien oletettiin koostuvan enimmäkseen tuulikuormasta sekä lisävaakavoimista. Onnettomuuskuorma sekä sen vaikutukset huomioidaan aina tapauskohtaisesti, eikä niitä ole opinnäytetyö laskelmissa huomioitu. Vaakavoimien laskenta aloitettiin tuulikuorman määrittämisellä, joka tehtiin standardin EN 1994-1-4 mukaan, käyttämällä voimakerroin menetelmää. Tuulikuorman määrittämisessä tarkasteltiin tilannetta, jossa tuulikuorman oletetaan vaikuttavan rakennukseen kohtisuoraan sen ulkoseiniin nähden. Tällöin tuulikuorma ei pääse jakautumaan X- ja Y-suuntaisille jäykisteseiniin kesken, vaan kohdistuu ainoastaan toisiin seiniin, jolloin syntyvät rasitukset ovat kyseisten seinien kohdalla suurimmillaan. Tuulikuorman määrittämisessä käytettiin kappaleessa 2 tuulikuorman laskentaan esiteltyjä peruskaavoja. Peruskaavojen avulla määritettiin jokaisella tason korkeudella vallitseva tuulen puuskanopeuspaine. Rakennuksen vaihtuva poikkileikkaus huomioitiin laskennassa laskemalla rakennuksen ylemmälle sekä alemmalle osalle rakennekertoimet sekä voimakertoimet erikseen. Rakennekertoimen laskennassa käytettiin standardin liitteessä B esitettyä yksityiskohtaista laskentamenetelmää, jolla saatiin rakennekertoimen arvoa pienennettyä. Yksityiskohtaisen laskentamenetelmän käyttämiseksi tulee standardissa esitettyjen ehtojen täyttyä. Rakennus tulee sijaitsemaan kaupunkikeskustassa, jolloin laskelmissa käytettiin maastoluokan IV arvoja. Tuulikuorma laskettiin molempiin x- sekä y-suuntaan. Lopputuloksena saatiin tuulen aiheuttama kokonaisvoima jokaiseen kerrokseen kaavalla 5 käyttäen pinta-alana kunkin kerroksen seinäpinta-alaa. Tuulikuorman määrittäminen sekä tuulikuorman arvot kerroksittain on esitetty liitteessä 1.

Lisävaakavoimien määrittämisessä käytettiin betonirakenteiden eurokoodissa esiintyviä kaavoja niiden huomioimiseksi, jotka esiteltiin kappaleessa 2.3. Lisävaakavoimille laskettiin kaavan 4 mukainen epätarkkuus, joka on arvio rakennuksen maksimi vinoudesta. Kustakin kerroksesta laskettiin yhteenlaskettu kerroskuorma, johon sisältyi kunkin kerroksen pysyvät kuormat sekä muuttuvat kuormat. Kerroskuorma kerrottiin epätarkkuudella, jolloin saatiin laskettua lisävaakavoimat kullekin kerrokselle. Laskelmissa päädyttiin epätarkkuuden arvoon 1/275, mutta päädyttiin käyttämään betonirakenteiden eurokoodissa mainittua suositusarvoa 1/200. Kuvassa 11 on havainnollistettu vaakavoimista aiheutuvat rasitukset rakennuksen jäykistäville rakenneosille.



Kuva 11. Leikkausvoima ja momentti jäykistysrakenteessa (Betoniteollisuus ry 2010.)

5.3 Jäykistys ja vaakavoimien jakautuminen

Tehdyt jäykistyslaskennan esimerkkilaskelmat ovat luonteeltaan alustavia, jotka tehtiin luonnossuunnitelmien sekä tiettyjen reunaehtojen sekä yksinkertaistuksien avulla. Esimerkkilaskelmien tavoitteena oli havainnollistaa jäykistyslaskentaa sekä tutkia voimien jakautumista jäykistysosien kesken luonnospiirustusten mukaisella pohjaratkaisulla. Luonnosten pohjalta ei ollut vielä tietoa ulkoseinien ikkuna-aukoista, jonka vuoksi jäykistyksessä päädyttiin tutkimaan tilannetta, jossa pystysuuntaisina jäykistysosina toimisivat ainoastaan väliseinät. Väliseinät toimisivat mastoseinäjäykisteinä tai tavallisina leikkausseininä riippuen seiniin syntyvistä jännityksistä. Myöhemmin suunnitelmien tarkentuessa voitaisiin pohtia joidenkin ulkoseinien hyödyntämistä jäykistysosina sekä päivittää laskelmia jäykistysosien lisääntymisen johdosta. Laskennan yhtenä yksinkertaistuksena toimi jäykisteseinien valinnassa tilanne, jossa ei huomioitu aukkojen vaikutusta ja jäykisteseiniksi valittiin ainoastaan aukottomia seiniä. Aukkojen huomiointiin käsinlaskennalla on olemassa menetelmä, mutta niiden huomiointi käsinlaskennassa on selvästi, FEM-laskentaa verrattuna vaikeampaa. Lisäksi seinien ajateltiin ottavan kuormaa ainoastaan

niiden jäykemmän akselin suhteen, eikä heikomman akselin suuntaista jäykkyyttä huomioitu kuormien jakautumisessa. Todellisuudessa seinät ottavat kuormaa molempien akseleiden suhteen, mutta heikomman akselin ottaman kuorman suuruus jää häviävän pieneksi. (Ks. liite 2.)

Vaakavoimien jakautuminen laskettiin käyttämällä valmista stabiliteetilaskennan Excel-laskentapohjaa. Valmiin Excel pohjan valintaan puolsivat erityisesti käytössä olevan Excel-pohjan virhevarmuus sekä laskelmien helpompi tarkastaminen toisen suunnittelijan toimesta. Laskennan tueksi tehtiin jokaisesta erilaisesta voimanjakokerroksesta DWG-kuvat, jossa on määritelty kerrosten jäykistävät väliseinät. (Kts. liite 4). Kuvien tarkoituksena oli kerätä tietoa jäykistysosien sijainneista, geometria mitoista, sekä muista laskennassa tarvittavista etäisyyksistä. Jokaisesta tasosta muodostettiin koordinaatisto, jonka origo sijoitettiin rakennuksen vasempaan alanurkkaan. Origin sijoittamisella ei laskennan lopputulosten kannalta ollut merkitystä, mutta positiivisten lukujen käsittelyn kannalta rakennuksen vasen alareuna oli luonnollinen valinta. Geometriatietojen avulla laskettiin kunkin seinän jäyhyysmomentti, joka syötettiin yhdessä koordinaatistosta saatujen x- ja y-koordinaattien kanssa laskentapohjaan.

Luonnossuunnitelmien mukaisilla seinälinjoilla vaakavoimat jakautuvat ylemmissä kerroksissa hieman epätasaisesti. Voimien jakautumisen epätasaisuutta ylemmillä kerroksilla selittää jäykistysosien pienempi määrä verrattuna alempiin kerroksiin, jossa vaakavoimat jakautuvat hieman ylempiä kerroksia paremmin. Korkeimmat jännityshuiput vaakavoimien jakautumisessa syntyvät Y-akselin suunnassa seinälinjan SY1 kohdalla, sen ottaessa kerroksissa 7–16 noin 40,9 % tasoille tulevista vaakakuormista sekä X-akselin suunnassa seinälinjan SX1 kohdalla sen ottaessa samoissa kerroksissa noin 31,9 % tasolle tulevista vaakakuormista. Laskentapohjasta saatu vaakavoimien jakautuminen on esitelty liitteessä 2.

5.4 Seinälinjojen jännitystarkastelu

Jännitystarkastelun tarkoituksena oli tutkia seinälinjalle syntyviä rasituksia, sekä selvittää, syntyykö jäykisteosiin ankkuroitavia vetojännityksiä 1. kerroksen tasolla. Kellarikerros jätettiin tarkastelussa huomioimatta. Tarkastelussa taulukoitiin seinälinjoille tulevat pystykuormat kultakin kerrokselta 1. kerroksen seinille sekä kustakin kerroksesta aiheutuva taivutusmomentti. Jäykistysseinille tulevat pystykuormat laskettiin arvioimalla kyseiselle osalle tuleva kuormitusala, jonka perusteella pystytettiin laskemaan pystykuormien määrä. Jännitykset ratkaistiin käyttämällä lujuusopin peruskaavoja kerroskuormista aiheutuvien puristusjännitysten ratkaisuun sekä taivutusmomentista aiheutuvien jännitysten ratkaisuun.

Taivutusvastus laskettiin alimman seinän mittojen mukaan, joka tarvittaessa välittäisi vaakakuormista syntyvät vetojännitykset kellarikerroksen rakenteille. Lopuksi summatettiin pystykuorman sekä taivutusmomentin aiheuttamat rasitukset yhteen, josta selvisi jäykistysseinään muodostuvat maksimirasitukset. Lisäksi jäykistysseinien kohdalla, johon muodostui vetorasituksia, laskettiin syntyvien jännityksien perusteella vetovoiman suuruus. Lasketun vetovoiman arvon avulla pystytään valitsemaan elementtiseinille riittävän suuruiset seinäkengät tai laskemaan paikallavaletulle seinälle riittävä ankkurointiterästy. Rasitetuimpien seinälinjojen jännitystarkastelu on esitetty liitteessä 3.

6 POHIDINTA

Opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä betonirunkoisen asuinkerrostalon jäykistyslaskelmien tekoon ja tekemällä työstä kirjallinen raportti sekä tehdä jäykistyslaskentaa oikean elämän kohteesta. Laskentaosuuden tavoitteena oli toimia laskentaperiaatteiden tukena sekä tuottaa kohteen luonnosten pohjalta jäykistyksen näkökulmasta alustavaa tietoa mahdollisen yleissuunnitteluvaiheen tueksi. Itselläni ei ollut aikaisempaa kokemusta betonirunkoisten rakennusten jäykistyksestä tai jäykistyslaskelmien teosta opinnäytetyön aloitusvaiheessa. Koulussa opittu jäykistysmitoitus on keskittynyt puurunkoisten pientalojen levyjäykistykseen sekä teräsrakenteiden jäykistykseen. Työelämässä on tullut työskenneltyä pääosin betonirunkoisten asuinkerrostalojen parissa tehden elementtisuunnittelua, joten opinnäytetyön aiheesta saattaisi olla hyötyä kyseisen kohteen lisäksi kerrostalojen suunnittelussa tulevaisuudessa.

Vaikein osuus opinnäytetyössä oli jäykistyslaskelmien tekeminen. Laskelmissa päädyttiin tilanteeseen, jossa rasitetuimpiin jäykistysseiniin syntyy vetorasituksia. Y-suuntaisissa jäykisteseinissä vetorasitukset jäävät X-suuntaisia jäykisteseiniä pienemmiksi. Tämä johtuu osittain rakennuksen geometriasta, josta johtuen rakennukselle tuleva tuuliormi on x-suunnassa selvästi suurempi. Tarkastelussa on myös hyvä muistaa, että laskelmissa oli tarkasteluna tilanne, jossa jäykistysosina toimivat ainoastaan väliseinät. Suunnitelmien tarkentuessa voitaisiin myöhemmin jäykistysosina hyödyntää mahdollisesti osittain rakennuksen ulkoseiniä, jolloin jäykistäviä rakenneosia olisi enemmän ja voimat jakautuvat tasaisemmin sekä jännityshuippuja pystytään tasaamaan.

Laskelmista saatujen jännityksien suuruusluokkaa voidaan mielestäni linjassa erään vastaavan geometrian omaavan vertailukohteen jäykistyslaskelmien kanssa, kun huomioidaan lisäksi valittujen jäykistysosien tarkastelutilanne. Tuloksia ankkuroitavan vetojännityksen tarpeellisuudesta voidaan mielestäni pitää luotettava ja myös linjassa vertailukohteen ratkaisuihin. Vaakavoimien jakautumiseen pystytään myös vaikuttamaan kasvattamalla tiettyjen seinien paksuuksia, jolloin niiden jäykkyys sekä ottama osuus rakennuksen vaakavoimista kasvaa. Tällä saadaan tasattua syntyviä jännityshuippuja. Vertailukohteen laskelmissa päädyttiin vetojännityksiin, jossa vetovoimat välitettiin paikallaväliseinien kohdalla ankkurointiterästyksen ja elementtien kohdalla seinäkenkien avulla. Vastaavaa joudutaan tekemään myös tässä tapauksessa, mutta lopullista ankkurointiterästen tai seinäkenkien kokoa on hankesuunnitteluvaiheessa vaikea sanoa.

Mahdollisten jäykisteosien lisäyksellä tai seinien paksuntamisella saadaan vetojäännityksiä pienennettyä.

Laskelmissa ei käytetty apuna FEM-laskentaa, koska oma FEM-laskenta osaamiseni on vielä toistaiseksi melko vähäistä. Alun perin tarkoituksena oli sisällyttää opinnäytetyöhön FEM-laskentaa, mutta laskennan opetteluun vaatiman ajan ja opinnäytetyön laajuuden takia se rajattiin työn ulkopuolelle. FEM-laskennan käyttö kuitenkin jäykistyslaskelmien teossa on yleistä ja sillä pystytään selvittämään tarkemmin syntyviä rasituksia sekä kuormituksia. Käsien laskennan tehtävänä on tarkistaa tärkeimpien voimasuureiden arvot riittävin ns. oikeaan suuntaan olevien yksinkertaistuksien avulla ja arvioida, onko FEM-laskennasta saadut arvot käsienlaskennan kanssa samaa suuruusluokkaa. (Helsingin kaupunki 2018.) Ks. liite 5.

Kaiken kaikkiaan betonirunkoisen asuinkerrostalon jäykistys tarjosi mielenkiintoisen opinnäytetyön aiheen perehtyä täysin uuteen aiheeseen. Vaikka jäykistysrakenteiden mitoitus onkin olennaisin osa rakennusten jäykistämisen, korkeiden rakennusten jäykistämiseen voi liittyä monia eri lisäselvityksiä vaativia asioita, joita opinnäytetyössä ei käsitelty. Lisäselvityksiä on listattu liitteen 5, Helsingin kaupungin laatimassa korkean rakentamisen rakentamistapaohjeessa. Haastetta aiheessa tuotti erityisesti laskentasuus, jonka tekeminen ja laskentatulosten ymmärtäminen edellytti laskentateorian sisäistämistä. Varsinkin rakennuksen geometriavaihtelut sekä ylipäätään korkea rakennus vaikuttivat laskelmien haastavuuteen. Näin jälkiviisaana todettakoon, että geometrialtaan yksinkertaisempi kerrostalo olisi ollut parempi kohde esimerkkilaskelmien tekoon. Aiheesta oppi kuitenkin paljon ja sekä laskentaperiaatteet että laskentavaiheet hahmotuivat hyvin työn myötä.

LÄHTEET

Elementtisuunnittelu 2010a. Jäykistyksen laskentaperiaatteet. Helsinki: Betoniteollisuus ry. Viitattu 10.9.2019 <https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/rakennuksen-jaykistus/laskentaperiaatteet>.

Elementtisuunnittelu 2010b. Rakennuksen jäykistysuunnittelun tehtävät. Helsinki: Betoniteollisuus ry. Viitattu 4.3.2019 <https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/rakennuksen-jaykistus/jaykistysjarjestelmat>

Helsingin kaupunki 2018. Korkean rakentamisen rakentamistapaohje. Luettu 25.9.2019, Saatavissa: https://www.hel.fi/static/rakvv/ohjeet/KORKEAN_RAKENTAMISEN_RAKENTAMISTAPAOHJE_OHJEKORTIT.pdf.

Kiviluoma, R 2005. Suomen korkeimman rakennuksen turvalliset tuuliratkaisut: tuulen vaikutus. Saatavissa. <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK070501.pdf>.

Leskelä, M. 2008 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus, BY210. Suomen Betoniyhdistys ry. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.

Rakennusteollisuus ry 2006, rakennusrungon vakavuustarkastelut. Luettu 13.5.2019, Saatavissa: <https://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/Haku?term=rakennusrungon%20vakavuustarkastelut>.

RIL 229-1-2006. 2006. Rakennesuunnitelmien asiakirjaohje. Helsinki: Suomen Rakennusinsinööriliitto RIL ry.

RIL 201-1-2017. 2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki: Suomen Rakennusinsinööriliitto RIL ry.

Salmi, T. & Kuula, K. 2012. Rakenteiden Mekaniikka. Tampere: Pressus Oy.

SFS-EN 1990 + A1 + AC Eurokoodi 0. Rakenteiden suunnitteluperusteet, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

SFS-EN 1991-1-1 + AC Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1, Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: yleiset kuormat, tuulikuormat, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

SFS-EN 1991-1-7 + A1 + AC, Eurokoodi 1 Rakenteiden kuormat. Osa 1-7: yleiset kuormat, onnettomuuskuormat, Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

<https://www.rakennuslehti.fi/2018/02/maakunnissa-ja-kasvukeskuksissa-vireilla-yli-kymmenen-korkean-rakentamisen-hanketta/>. Viitattu 26.4.2019

Liite 1 Tuulikuorma laskenta

EN-1991-1-4

Suuntakerroin $C_{dir} := 1$ Vuodenaikakerroin $C_{season} := 1$ Tuulen nopeuden
modifioimaton perusarvo $v_b := 21 \cdot \frac{m}{s}$ Tuulen nopeuden
perusarvo $v_m(z) := C_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_b$

Rakennuksen maastoluokka IV

 $z_0 := 1.0m$ $z_{min} := 10.0m$ $z_{0,II} := 0.05m$ Maastokerroin $k_r := 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07}$ $k_r = 0.234$ Rakennuksen korkeus $z := 49m$ Rakennuksen leveys $b := 30m$ Rakennuksen syvyys $d := 16.3m$ Rosoisuuskerroin $c_r(z) := k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$ Pinnanmuotokerroin $c_o(z) := 1$ Tuulen nopeuden
modifioitu perusarvo $v_m(h) := c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b$

Pyörteisyysskerroin $k_1 := 1.0$

Tuulen puuskien intensiteetti $I_v(z) := \frac{k_1}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad I_v(z) = 0.257$

Ilman tiheys $\rho := 1.25 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Tuulen nopeuspaineen perusarvo $q_p(z) := \left(1 + 7 \cdot I_v(z)\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m(z)^2$

$$q_p(z) = 0.642 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Maan vetovoimakiihtyvyyys $g = 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Rakennuksen suurin siirtymä $x_1 := 0.03\text{m}$

Värähtelyn alin ominaistajuuus $n_1 := \left(\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{x_1}}\right) \quad n_1 = 2.878 \frac{1}{\text{s}}$

$$n := n_1$$

Nopeuspaine kerroin $z_s := 0.6 \cdot z = 29.4 \text{ m}$

Vertailu korkeus $z_t := 200\text{m}$

Alfakkeroin $\alpha := 0.67 + 0.05 \cdot \ln\left(\frac{z_0}{m}\right) \quad \alpha = 0.67$

Tuulenpyörteen ulottuvuus $L_t := 300 \cdot m$

$$L(z_s) := L_t \cdot \left(\frac{z_s}{z_t}\right)^\alpha \quad L(z_s) = 83.028 \text{ m}$$

Tuulen taajuusjakauma

$$f_L(z_s, n) := \frac{n \cdot L(z_s)}{v_m(z_s)} \quad f_L(z_s, n) = 12.475$$

$$S_L(z_s, n) := \frac{6.8 \cdot f_L(z_s, n)}{\left(1 + 10.2 \cdot f_L(z_s, n)\right)^{\frac{5}{3}}} \quad S_L(z_s, n) = 0.026$$

Taustapyörteiden vaikutusparametri

$$B(z_s) := \sqrt{\frac{1}{1 + 0.9 \cdot \left(\frac{b+z}{L(z_s)}\right)^{0.63}}} \quad B(z_s) = 0.731$$

$$B(z_s)^2 = 0.534$$

Vaimennus

aerodynaaminen vaimennus $\delta_a(z_s) := 0.00$

sisäinen vaimennus $\delta_s := 0.10$

logaritminen dekrementti $\underline{\delta} := \delta_s + \delta_a(z_s) \quad \delta = 0.1$

Resonanssivasteen vaikutusparametri

$$\eta_h(z_s, n) := \frac{4.6 \cdot z \cdot f_L(z_s, n)}{L(z_s)} \quad \eta_h(z_s, n) = 33.867$$

$$\eta_b(z_s, n) := \frac{4.6 \cdot b \cdot f_L(z_s, n)}{L(z_s)} \quad \eta_b(z_s, n) = 20.735$$

$$R_h(z_s, n) := \frac{1}{\eta_h(z_s, n)} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h(z_s, n)^2} \cdot \left(1 - e^{-2 \cdot \eta_h(z_s, n)}\right) \quad R_h(z_s, n) = 0.029$$

$$R_b(z_s, n) := \frac{1}{\eta_b(z_s, n)} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b(z_s, n)^2} \cdot \left(1 - e^{-2 \cdot \eta_b(z_s, n)}\right) \quad R_b(z_s, n) = 0.047$$

$$\underline{R}(z_s, n) := \sqrt{\frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n) \cdot R_h(z_s, n) \cdot R_b(z_s, n)} \quad R(z_s, n) = 0.042$$

$$R(z_s, n)^2 = 1.757 \times 10^{-3}$$

Resonanssitaajuus

$$\nu := \max \left(0.08 \cdot \text{Hz}, n \cdot \sqrt{\frac{R(z_s, n)^2}{B(z_s)^2 + R(z_s, n)^2}} \right) \quad \nu = 0.165 \cdot \text{Hz} \quad \underline{T} := 600 \cdot \text{s}$$

Huippuarvokerroin

$$k_p := \max \left(3, \sqrt{2 \cdot \ln(\nu \cdot T)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \cdot \ln(\nu \cdot T)}} \right) \quad k_p = 3.229$$

Rakennekerroin

$$c_{scd} := \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B(z_s)^2 + R(z_s, n)^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} \quad c_{scd} = 0.781$$

Voimakerroin

Rakennekerroimen
vähimmäisarvo

$$c_{scd} := 0.85$$

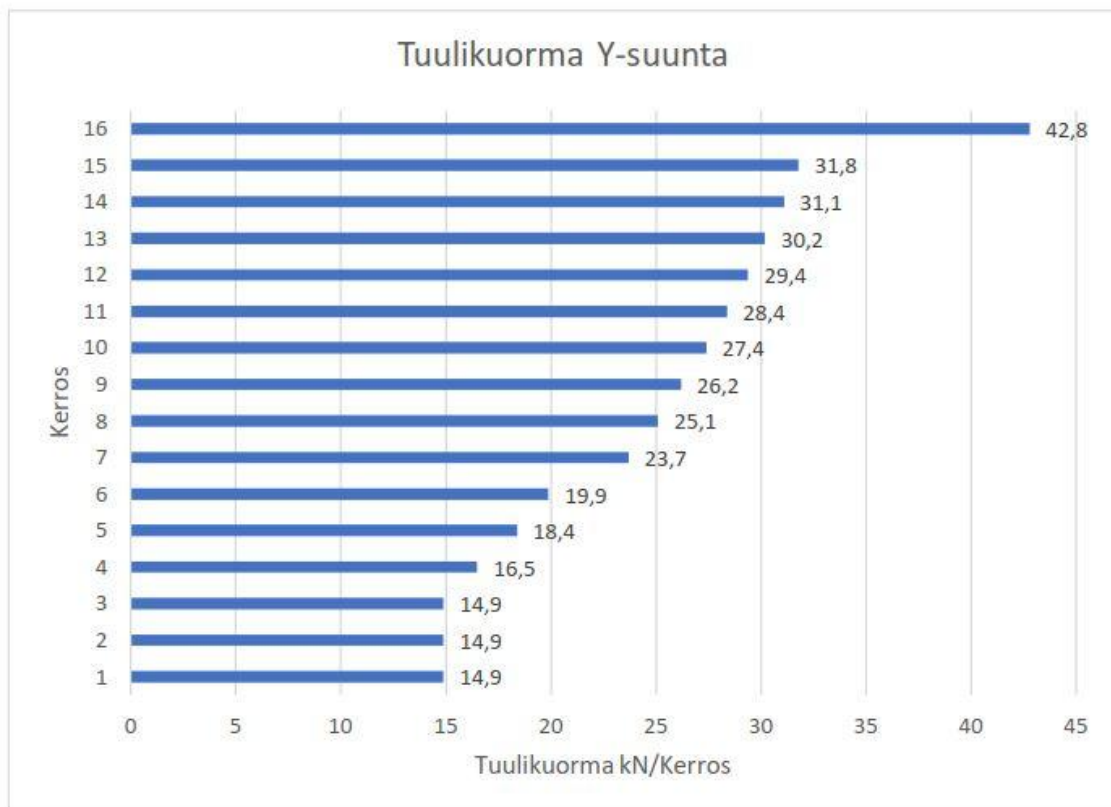
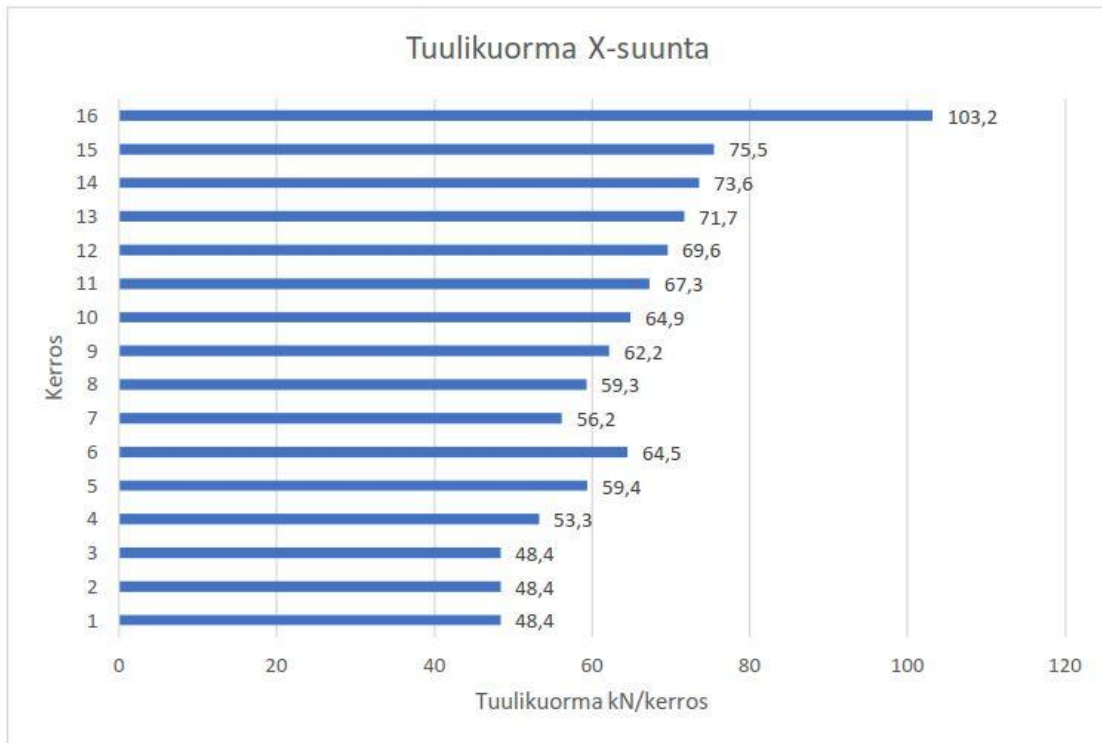
$$\frac{d}{b} = 0.543 \quad c_{f0} := 2.38 \quad \psi_r := 1 \quad \psi_\lambda := 0.663 \quad c_f := c_{f0} \cdot \psi_\lambda \cdot \psi_r$$

$$c_f = 1.578$$

Tuulikuorma 16.krs katossa

$$q_p(z) = 0.642 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad A_{\text{ref}} := 120 \cdot \text{m}^2$$

$$F_w := c_{scd} \cdot c_f \cdot q_p(z) \cdot A_{\text{ref}} \quad F_w = 103.256 \cdot \text{kN}$$



JÄYKISTÄVÄT SEINÄT JA VAAKAVOIMIEN JAKAUTUMINEN
Kerrokset 7...16

Ky = Y-akselin suuntaisen seinän jäykkyys

Kx = X-akselin suuntaisen seinän jäykkyys

X = Y-akselin suuntaisen seinän sijainti

Y = X-akselin suuntaisen seinän sijainti

byy= Y-akselin suuntaisen seinän ottama osuus voimasta Fy = 1

bxx= X-akselin suuntaisen seinän ottama osuus voimasta Fx = 1

byx= Y-akselin suuntaisen seinän ottama osuus voimasta Fx = 1

bxy= X-akselin suuntaisen seinän ottama osuus voimasta Fy = 1

LEIKKAUSVOIMAN SIJAINTI :	Yr	Xr
	15,068	8,185

Kerrokset 7...16

SEINÄT	Kx	Ky	bxx	byy	bxy, byx
SY1	0	63445,95837	0,000	0,409	-0,002
SY2	0	15186,34933	0,000	0,099	0,001
SY3	0	20578,29624	0,000	0,133	-0,001
SY4	0	4511,460308	0,000	0,029	0,000
SY5	0	14283,56902	0,000	0,092	0,000
SY6	0	4198,764652	0,000	0,027	-0,001
SY7	0	1684,71504	0,000	0,011	0,000
SY8	0	5339,171172	0,000	0,035	0,000
SY9	0	25677,95826	0,000	0,167	0,002
SY10	0	0	0,000	0,000	0,000
SY11	0	0	0,000	0,000	0,000
SY12	0	0	0,000	0,000	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
SX1	62194,26559	0	0,319	0,000	0,010
SX2	22090,58659	0	0,112	0,000	0,003
SX3	24123,67763	0	0,116	0,000	0,000
SX4	10865,71845	0	0,051	0,000	-0,001
SX5	1684,71504	0	0,008	0,000	0,000
SX6	941,9386289	0	0,004	0,000	0,000
SX7	62194,26559	0	0,282	0,000	-0,009
SX8	22090,58659	0	0,100	0,000	-0,003
SX9	1683,520828	0	0,007	0,000	0,000
SX10	0	0	0,000	0,000	0,000
SX11	0	0	0,000	0,000	0,000
SX12	0	0	0,000	0,000	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
SUM	207869,2749	154906,2424	1,000	1,000	0,000
	SUM(Kix(Yp-Yi)²)+SUM(Kiy(Xp-Xi)²) #####				

JÄYKISTÄVÄT SEINÄT JA VAAKAVOIMIEN JAKAUTUMINEN
Kerrokset 2...6

E	(Kimmomoduuli)	34000000	E _{lx}	1,16E+09
G	(Liukumoduuli)	15000000	E _{ly}	9,29E+08
Ylin kerros		6	G _{Ax}	1,74E+08
Alin kerros		2	G _{Ay}	1,63E+08
Korkeus H		6	Z _x	1,20
Leikk. voiman Y		16,686	Z _y	1,20
Leikk. voiman X		8,185		

l_x = X-akselin suuntaisen seinän hitausmomentti

A_x = X-akselin suuntaisen seinän pinta-ala

Y = X-akselin suuntaisen seinän sijainti

l_y = Y-akselin suuntaisen seinän hitausmomentti

A_y = Y-akselin suuntaisen seinän pinta-ala

X = Y-akselin suuntaisen seinän sijainti

Z_{x,y} = Seinän siirtymäkerroin

Kerrokset 2...6

SEINÄT	l _x	A _x	Y	l _y	A _y	X	Z _{x,y}
SY1			0,000	6,221	1,44	7,535	1,2
SY2			0,000	1,42	0,88	9,335	1,2
SY3			0,000	1,937	0,976	7,535	1,2
SY4			0,000	0,415	0,584	9,335	1,2
SY5			0,000	1,334	0,862	7,535	1,2
SY6			0,000	0,386	0,57	5,435	1,2
SY7			0,000	0,154	0,42	5,435	1,2
SY8			0,000	2,794	1,102	9,335	1,2
SY9			0,000	1,113	0,816	9,335	1,2
SY10			0,000	3,72	1,213	7,535	1,2
SY11			0,000	7,573	1,537	7,535	1,2
SY12			0,000	0,243	0,448	9,335	1,2
			0,000			0,000	
			0,000			0,000	
			0,000			0,000	
SX1	6,092	1,43	9,485			0,000	1,2
SX2	2,046	0,994	10,385			0,000	1,2
SX3	2,277	1,03	15,615			0,000	1,2
SX4	1,012	0,786	17,585			0,000	1,2
SX5	0,154	0,42	17,335			0,000	1,2
SX6	0,081	0,28	18,310			0,000	1,2
SX7	6,092	1,43	20,385			0,000	1,2
SX8	2,046	0,994	20,385			0,000	1,2
SX9	0,114	0,38	22,485			0,000	1,2
SX10	2,046	0,994	29,785			0,000	1,2
SX11	6,092	1,43	29,785			0,000	1,2
SX12	6,092	1,43	33,985			0,000	1,2
			0,000			0,000	
			0,000			0,000	
			0,000			0,000	
SUM	34,144	11,598		27,31	10,848		
		Y _p =	21,784		X _p =	7,950	

JÄYKISTÄVÄT SEINÄT JA VAAKAVOIMIEN JAKAUTUMINEN
Kerrokset 2...6

Ky = Y-akselin suuntaisen seinän jäykkyys

Kx = X-akselin suuntaisen seinän jäykkyys

X = Y-akselin suuntaisen seinän sijainti

Y = X-akselin suuntaisen seinän sijainti

byy= Y-akselin suuntaisen seinän ottama osuus voimasta Fy = 1

bxx= X-akselin suuntaisen seinän ottama osuus voimasta Fx = 1

byx= Y-akselin suuntaisen seinän ottama osuus voimasta Fx = 1

bxy= X-akselin suuntaisen seinän ottama osuus voimasta Fy = 1

LEIKKAUSVOIMAN SIJAINTI :	Yr	Xr
Kerrokset 2...6	16,686	8,185

SEINÄT	Kx	Ky	bxx	byy	bxy, byx
SY1	0	1484260,165	0,000	0,197	-0,004
SY2	0	490976,9987	0,000	0,065	0,005
SY3	0	630889,1381	0,000	0,084	-0,002
SY4	0	168785,4357	0,000	0,022	0,002
SY5	0	466355,6744	0,000	0,062	-0,001
SY6	0	158021,8811	0,000	0,021	-0,003
SY7	0	67141,97784	0,000	0,009	-0,001
SY8	0	837872,9728	0,000	0,112	0,008
SY9	0	401464,0356	0,000	0,053	0,004
SY10	0	1036298,35	0,000	0,137	-0,003
SY11	0	1689395	0,000	0,224	-0,005
SY12	0	102186,531	0,000	0,014	0,001
	0	0	0,000	0,000	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
SX1	1463538,554	0	0,291	0,000	0,006
SX2	658798,2018	0	0,127	0,000	0,002
SX3	716314,0636	0	0,111	0,000	0,001
SX4	369928,6971	0	0,052	0,000	0,001
SX5	67141,97784	0	0,010	0,000	0,000
SX6	35896,23274	0	0,005	0,000	0,000
SX7	1463538,554	0	0,176	0,000	0,001
SX8	658798,2018	0	0,079	0,000	0,000
SX9	50405,74282	0	0,005	0,000	0,000
SX10	658798,2018	0	0,035	0,000	-0,002
SX11	1463538,554	0	0,077	0,000	-0,004
SX12	1463538,554	0	0,033	0,000	-0,006
	0	0	0,000	0,000	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
SUM	9070235,534	7533648,16	1,000	1,000	0,000
	SUM(Kix(Yp-Yi)²)+SUM(Kiy(Xp-Xi)²) 706618297,7489				

JÄYKISTÄVÄT SEINÄT JA VAAKAVOIMIEN JAKAUTUMINEN
Kerrokset 1...1

E	(Kimmomoduuli)	34000000
G	(Liukumoduuli)	15000000
Ylin kerros		1
Alin kerros		1
Korkeus H		3
Leikk. voiman Y		16,884
Leikk. voiman X		8,138

E _{lx}	8,86E+08
E _{ly}	8,80E+08
G _{Ax}	1,30E+08
G _{Ay}	1,48E+08
Z _x	1,20
Z _y	1,20

l_x = X-akselin suuntaisen seinän hitausmomentti

A_x = X-akselin suuntaisen seinän pinta-ala

Y = X-akselin suuntaisen seinän sijainti

l_y = Y-akselin suuntaisen seinän hitausmomentti

A_y = Y-akselin suuntaisen seinän pinta-ala

X = Y-akselin suuntaisen seinän sijainti

Z_{x,y} = Seinän siirtymäkerroin

Kerrokset 1...1

SEINÄT	l _x	A _x	Y	l _y	A _y	X	Z _{x,y}
SY1			0,000	1,228	0,852	7,535	1,2
SY2			0,000	1,42	0,88	9,335	1,2
SY3			0,000	1,937	0,976	7,535	1,2
SY4			0,000	0,415	0,584	9,335	1,2
SY5			0,000	1,334	0,862	7,535	1,2
SY6			0,000	0,386	0,57	5,435	1,2
SY7			0,000	0,154	0,42	5,435	1,2
SY8			0,000	0,203	0,46	9,335	1,2
SY9			0,000	4,349	1,278	9,335	1,2
SY10			0,000	3,647	1,202	7,535	1,2
SY11			0,000	10,564	1,537	7,535	1,2
SY12			0,000	0,243	0,243	9,335	1,2
			0,000			0,000	
			0,000			0,000	
			0,000			0,000	
SX1	6,092	1,39	9,485			0,000	1,2
SX2	2,046	1	10,385			0,000	1,2
SX3	2,277	1,03	15,615			0,000	1,2
SX4	1,012	0,786	17,585			0,000	1,2
SX5	0,154	0,42	17,335			0,000	1,2
SX6	0,081	0,285	18,310			0,000	1,2
SX7	6,092	1,39	20,385			0,000	1,2
SX8	2,046	1	20,385			0,000	1,2
SX9	0,154	0,38	22,485			0,000	1,2
SX10	6,092	1	29,785			0,000	1,2
SX11			29,785			0,000	1,2
SX12			33,985			0,000	1,2
			0,000			0,000	
			0,000			0,000	
			0,000			0,000	
SUM	26,046	8,681		25,88	9,864		
		Y _p =	17,715		X _p =	8,003	

JÄYKISTÄVÄT SEINÄT JA VAAKAVOIMIEN JAKAUTUMINEN
Kerrokset 1...1

Ky = Y-akselin suuntaisen seinän jäykkyys

Kx = X-akselin suuntaisen seinän jäykkyys

X = Y-akselin suuntaisen seinän sijainti

Y = X-akselin suuntaisen seinän sijainti

b_{yy} = Y-akselin suuntaisen seinän ottama osuus voimasta F_y = 1

b_{xx} = X-akselin suuntaisen seinän ottama osuus voimasta F_x = 1

b_{yx} = Y-akselin suuntaisen seinän ottama osuus voimasta F_x = 1

b_{xy} = X-akselin suuntaisen seinän ottama osuus voimasta F_y = 1

i

LEIKKAUSVOIMAN SIJAINTI :	Yr	Xr
	16,884	8,138

Kerrokset 1...1

SEINÄT	Kx	Ky	b _{xx}	b _{yy}	b _{xy} , b _{yx}
SY1	0	2011066,185	0,000	0,079	-0,001
SY2	0	2177985,564	0,000	0,086	0,002
SY3	0	2613973,856	0,000	0,103	-0,001
SY4	0	953466,6296	0,000	0,038	0,001
SY5	0	2097084,658	0,000	0,082	-0,001
SY6	0	903489,9562	0,000	0,035	-0,002
SY7	0	436624,4163	0,000	0,017	-0,001
SY8	0	547732,4169	0,000	0,022	0,001
SY9	0	4021566,109	0,000	0,159	0,004
SY10	0	3673107,573	0,000	0,144	-0,001
SY11	0	5518590,369	0,000	0,217	-0,002
SY12	0	481468,5315	0,000	0,019	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
SX1	4627203,285	0	0,223	0,000	0,005
SX2	2707259,209	0	0,128	0,000	0,002
SX3	2863182,182	0	0,124	0,000	0,001
SX4	1763946,59	0	0,074	0,000	0,000
SX5	436624,4163	0	0,018	0,000	0,000
SX6	243304,3187	0	0,010	0,000	0,000
SX7	4627203,285	0	0,184	0,000	-0,002
SX8	2707259,209	0	0,108	0,000	-0,001
SX9	425450,751	0	0,016	0,000	0,000
SX10	3527941,746	0	0,115	0,000	-0,005
SX11	0	0	0,000	0,000	0,000
SX12	0	0	0,000	0,000	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
	0	0	0,000	0,000	0,000
SUM	23929374,99	25436156,26	1,000	1,000	0,000
	SUM(Kix(Yp-Yi) ²)+SUM(Kiy(Xp-Xi) ² #####				

Liite 3

Seinä S1X

	kuor.ala m ²	kuor.laatta kN	kuor.seinä kN	hyöty kN	kuor.parveke kN	Σkuor. kN	Vaakakuorma	Taivutusmomentti 1.krs seinään
16.krs katto	29,5	228,6	0,0	73,8	61,1	363,5	41,151	2016,4
15.krs katto	29,5	258,1	96,6	77,8	61,1	493,6	36,8126	1656,6
14.krs katto	29,5	258,1	96,6	77,8	61,1	493,6	36,2384	1522,0
13.krs katto	29,5	258,1	96,6	77,8	61,1	493,6	35,6004	1388,4
12.krs katto	29,5	258,1	96,6	77,8	61,1	493,6	34,9624	1258,6
11.krs katto	29,5	258,1	96,6	77,8	61,1	493,6	34,2287	1129,5
10.krs katto	29,5	258,1	96,6	77,8	61,1	493,6	33,4312	1002,9
9.krs katto	29,5	258,1	96,6	77,8	61,1	493,6	32,6018	880,2
8.krs katto	29,5	258,1	96,6	77,8	61,1	493,6	31,6767	760,2
7.krs katto	29,5	258,1	96,6	77,8	61,1	493,6	30,6559	643,8
6.krs katto	29,5	258,1	96,6	77,8	61,1	493,6	34,2216	616,0
5.krs katto	29,5	258,1	96,6	77,8	61,1	493,6	32,7375	491,1
4.krs katto	29,5	258,1	96,6	77,8	61,1	493,6	30,9624	371,5
3.krs katto	29,5	258,1	96,6	77,8	61,1	493,6	29,5074	265,6
2.krs katto	29,5	258,1	96,6	77,8	61,1	493,6	29,5074	177,0
1.krs katto	20,4	193,8	96,6	59,6	61,1	408,3	22,6122	67,8
1.krs seinä			93,8		ΣN	7776,4	ΣM	14247,8

X-suunta

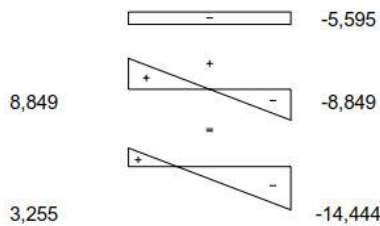
$$\sigma = N/A = 5,595 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_y = M_x/W = 8,849 \text{ MN/m}^2$$

$$L = 6,950 \text{ m}$$

$$A = 1,390 \text{ m}^2$$

$$W = 1,610 \text{ m}^3$$



KOKO POIKKILEIKKAUS EI PYSY PURISTETTUNA

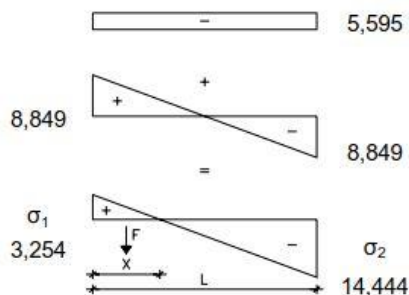
Seinä S1X

$$L = 6,950 \text{ m}$$

X-suunta

$$\sigma = N/A = 5,595 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_x = M_x/W = 8,849 \text{ MN/m}^2$$



$$\frac{\sigma_1}{x} = \frac{\sigma_2}{L-x}$$

$$\sigma_1 \cdot L - \sigma_1 \cdot x = \sigma_2 \cdot x$$

$$x = \frac{\sigma_1 \cdot L}{\sigma_1 + \sigma_2} = 1,278 \text{ m}$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_1 \cdot b \cdot x = \underline{\underline{415,8 \text{ kN}}}$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_2 \cdot b \cdot x = \underline{\underline{1846 \text{ kN}}}$$

Seinä S1Y

	kuor.ala m ²	kuor.laatta kN	kuor.seinä kN	hyöty kN	kuor.parveke kN	Σkuor. kN	Vaakakuorma	Taivutusmomentti 1.krs seinään
16.krs	35,6	275,9	0,0	89,0	0	364,9	30,1433	1477,0
15.krs	35,6	311,5	97,2	71,2	0	479,9	32,3928	1457,7
14.krs	35,6	311,5	97,2	71,2	0	479,9	32,0656	1346,8
13.krs	35,6	311,5	97,2	71,2	0	479,9	31,7384	1237,8
12.krs	35,6	311,5	97,2	71,2	0	479,9	31,3703	1129,3
11.krs	35,6	311,5	97,2	71,2	0	479,9	30,9613	1021,7
10.krs	35,6	311,5	97,2	71,2	0	479,9	30,5523	916,6
9.krs	35,6	311,5	97,2	71,2	0	479,9	30,1024	812,8
8.krs	35,6	311,5	97,2	71,2	0	479,9	29,6116	710,7
7.krs	35,6	311,5	97,2	71,2	0	479,9	29,039	609,8
6.krs	35,6	311,5	97,2	71,2	0	479,9	16,0358	288,6
5.krs	35,6	311,5	97,2	71,2	0	479,9	15,7206	235,8
4.krs	35,6	311,5	97,2	71,2	0	479,9	15,3463	184,2
3.krs	35,6	311,5	97,2	71,2	0	479,9	15,0508	135,5
2.krs	35,6	311,5	97,2	71,2	0	479,9	15,0508	90,3
1.krs	29,1	254,6	97,2	58,2	0	370,5	6,0356	18,1
1.krs seinä			57,7		ΣN	<u>7511,7</u>	ΣM	<u>11672,6</u>

Y-suunta

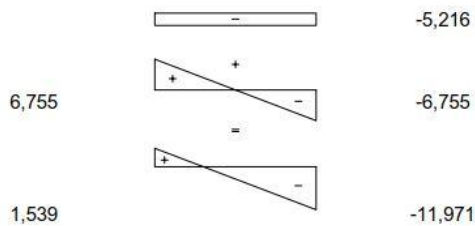
$$\sigma = N/A = 5,216 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_y = M_y/W = 6,755 \text{ MN/m}^2$$

$$L = 7,200 \text{ m}$$

$$A = 1,440 \text{ m}^2$$

$$W = 1,728 \text{ m}^3$$



KOKO POIKKILEIKKAUS EI PYSY PURISTETTUNA

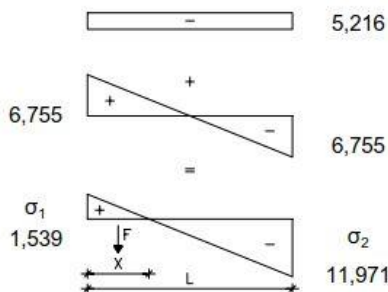
Seinä S1Y

$$L = 7,200 \text{ m}$$

X-suunta

$$\sigma = N/A = 5,216 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_x = M_x/W = 6,755 \text{ MN/m}^2$$



$$\frac{\sigma_1}{x} = \frac{\sigma_2}{L-x}$$

$$\sigma_1 \cdot L - \sigma_1 \cdot x = \sigma_2 \cdot x$$

$$x = \frac{\sigma_1 \cdot L}{\sigma_1 + \sigma_2} = 0,820 \text{ m}$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_1 \cdot b \cdot x = \underline{\underline{126,2 \text{ kN}}}$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_2 \cdot b \cdot x = \underline{\underline{982 \text{ kN}}}$$

Seinä S2X

	kuor.ala m ²	kuor.laatta kN	kuor.seinä kN	hyöty kN	kuor.parveke kN	Σkuor. kN	Vaakakuorma	Taivutusmomentti 1.krs seinään
16.krs katto	13,16	102,0	0,0	32,9	0	134,9	14,448	708,0
15.krs katto	13,16	115,2	97,6	26,3	0	239,1	12,9248	581,6
14.krs katto	13,16	115,2	97,6	26,3	0	239,1	12,7232	534,4
13.krs katto	13,16	115,2	97,6	26,3	0	239,1	12,4992	487,5
12.krs katto	13,16	115,2	97,6	26,3	0	239,1	12,2752	441,9
11.krs katto	13,16	115,2	97,6	26,3	0	239,1	12,0176	396,6
10.krs katto	13,16	115,2	97,6	26,3	0	239,1	11,7376	352,1
9.krs katto	13,16	115,2	97,6	26,3	0	239,1	11,4464	309,1
8.krs katto	13,16	115,2	97,6	26,3	0	239,1	11,1216	266,9
7.krs katto	13,16	115,2	97,6	26,3	0	239,1	10,7632	226,0
6.krs katto	13,16	115,2	97,6	26,3	0	239,1	14,9352	268,8
5.krs katto	13,16	115,2	97,6	26,3	0	239,1	14,2875	214,3
4.krs katto	13,16	115,2	97,6	26,3	0	239,1	13,5128	162,2
3.krs katto	13,16	115,2	97,6	26,3	0	239,1	12,8778	115,9
2.krs katto	13,16	115,2	97,6	26,3	0	239,1	12,8778	77,3
1.krs katto	13,16	115,2	97,6	26,3	0	236,3	12,9792	38,9
1.krs seinä			94,8		ΣN	3812,9	ΣM	5181,4

X-suunta

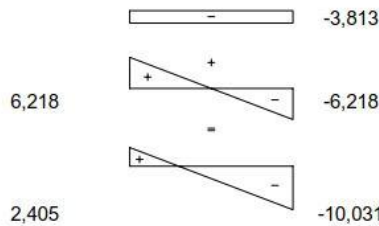
$$\sigma = N/A = 3,813 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_y = M_y/W = 6,218 \text{ MN/m}^2$$

$$L = 5,000 \text{ m}$$

$$A = 1,000 \text{ m}^2$$

$$W = 0,833 \text{ m}^3$$



KOKO POIKKILEIKKAUS EI PYSY PURISTETTUNA

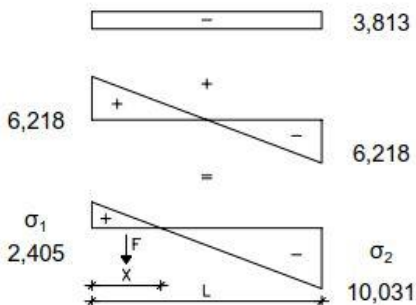
Seinä S2X

$$L = 5,000 \text{ m}$$

X-suunta

$$\sigma = N/A = 3,813 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_x = M_x/W = 6,218 \text{ MN/m}^2$$



$$\frac{\sigma_1}{x} = \frac{\sigma_2}{L-x}$$

$$\sigma_1 \cdot L - \sigma_1 \cdot x = \sigma_2 \cdot x$$

$$x = \frac{\sigma_1 \cdot L}{\sigma_1 + \sigma_2} = 0,967 \text{ m}$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_1 \cdot b \cdot x = \underline{\underline{232,6 \text{ kN}}}$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_2 \cdot b \cdot x = \underline{\underline{970 \text{ kN}}}$$

Seinä S7X

	kuor.ala m ²	kuor.laatta kN	kuor.seinä kN	hyöty kN	kuor.parveke kN	Σkuor. kN	Vaakakuorma	Taivutusmomentti 1.krs seinään
16.krs katto	18,75	145,3	0,0	46,9	54,6	246,8	36,378	1782,5
15.krs katto	18,75	164,1	68,2	54,3	54,6	341,2	32,5428	1464,4
14.krs katto	18,75	164,1	68,2	54,3	54,6	341,2	32,0352	1345,5
13.krs katto	18,75	164,1	68,2	54,3	54,6	341,2	31,4712	1227,4
12.krs katto	18,75	164,1	68,2	54,3	54,6	341,2	30,9072	1112,7
11.krs katto	18,75	164,1	68,2	54,3	54,6	341,2	30,2586	998,5
10.krs katto	18,75	164,1	68,2	54,3	54,6	341,2	29,5536	886,6
9.krs katto	18,75	164,1	68,2	54,3	54,6	341,2	28,8204	778,2
8.krs katto	18,75	164,1	68,2	54,3	54,6	341,2	28,0026	672,1
7.krs katto	18,75	164,1	68,2	54,3	54,6	341,2	27,1002	569,1
6.krs katto	18,75	164,1	68,2	54,3	54,6	341,2	20,6976	372,6
5.krs katto	18,75	164,1	68,2	54,3	54,6	341,2	19,8211	297,3
4.krs katto	18,75	164,1	68,2	54,3	54,6	341,2	18,7264	224,7
3.krs katto	18,75	164,1	68,2	54,3	54,6	341,2	17,8464	160,6
2.krs katto	18,75	164,1	68,2	54,3	54,6	341,2	17,8464	107,1
1.krs katto	13,55	118,6	68,2	43,9	54,6	285,3	18,8604	56,6
1.krs seinä			68,2		ΣN	5376,5	ΣM	12055,8

X-suunta

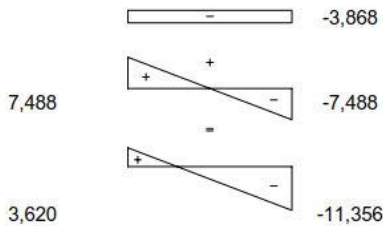
$$\sigma = N/A = 3,868 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_y = M_x/W = 7,488 \text{ MN/m}^2$$

$$L = 6,950 \text{ m}$$

$$A = 1,390 \text{ m}^2$$

$$W = 1,610 \text{ m}^3$$



KOKO POIKKILEIKKAUS EI PYSY PURISTETTUNA

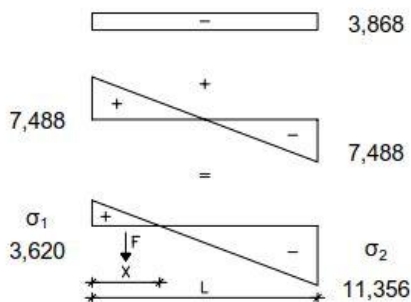
Seinä S7X

$$L = 6,950 \text{ m}$$

X-suunta

$$\sigma = N/A = 3,868 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_x = M_x/W = 7,488 \text{ MN/m}^2$$



$$\frac{\sigma_1}{x} = \frac{\sigma_2}{L-x}$$

$$\sigma_1 \cdot L - \sigma_1 \cdot x = \sigma_2 \cdot x$$

$$x = \frac{\sigma_1 \cdot L}{\sigma_1 + \sigma_2} = 1,680 \text{ m}$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_1 \cdot b \cdot x = \underline{\underline{608,1 \text{ kN}}}$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_2 \cdot b \cdot x = \underline{\underline{1908 \text{ kN}}}$$

Seinä S9Y

	kuor.ala m ²	kuor.laatta kN	kuor.seinä kN	hyöty kN	kuor.parveke kN	Σkuor. kN	Vaakakuorma	Taivutusmomentti 1.krs seinään
16.krs katto	14,7	113,9	0,0	7,4	0	121,3	12,3079	603,1
15.krs katto	14,7	128,6	71,8	29,4	0	229,8	13,2264	595,2
14.krs katto	14,7	128,6	71,8	29,4	0	229,8	13,0928	549,9
13.krs katto	14,7	128,6	71,8	29,4	0	229,8	12,9592	505,4
12.krs katto	14,7	128,6	71,8	29,4	0	229,8	12,8089	461,1
11.krs katto	14,7	128,6	71,8	29,4	0	229,8	12,6419	417,2
10.krs katto	14,7	128,6	71,8	29,4	0	229,8	12,4749	374,2
9.krs katto	14,7	128,6	71,8	29,4	0	229,8	12,2912	331,9
8.krs katto	14,7	128,6	71,8	29,4	0	229,8	12,0908	290,2
7.krs katto	14,7	128,6	71,8	29,4	0	229,8	11,857	249,0
6.krs katto	6,6	57,8	55,6	13,2	0	126,6	4,3142	77,7
5.krs katto	6,6	57,8	55,6	13,2	0	126,6	4,2294	63,4
4.krs katto	6,6	57,8	55,6	13,2	0	126,6	4,1287	49,5
3.krs katto	6,6	57,8	55,6	13,2	0	126,6	4,0492	36,4
2.krs katto	6,6	57,8	55,6	13,2	0	126,6	4,0492	24,3
1.krs katto	11,6	101,5	55,6	23,2	0	180,3	12,1476	36,4
1.krs seinä			87,2		ΣN	3090,0	ΣM	4665,0

Y-suunta

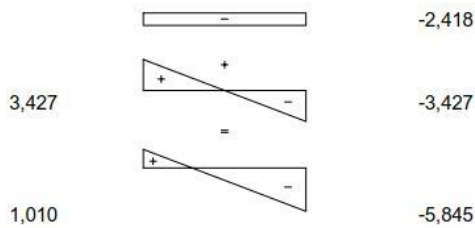
$$\sigma = N/A = 2,418 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_y = M_y/W = 3,427 \text{ MN/m}^2$$

$$L = 6,390 \text{ m}$$

$$A = 1,278 \text{ m}^2$$

$$W = 1,361 \text{ m}^3$$



KOKO POIKKILEIKKAUS EI PYSY PURISTETTUNA

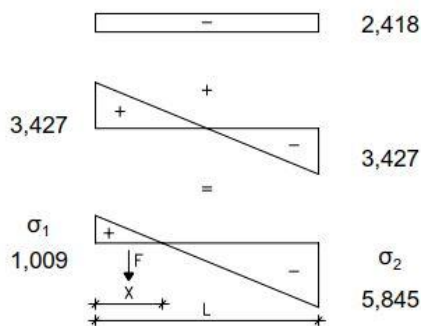
Seinä S9Y

$$L = 6,390 \text{ m}$$

X-suunta

$$\sigma = N/A = 2,418 \text{ MN/m}^2$$

$$\sigma_x = M_x/W = 3,427 \text{ MN/m}^2$$



$$\frac{\sigma_1}{x} = \frac{\sigma_2}{L-x}$$

$$\sigma_1 \cdot L - \sigma_1 \cdot x = \sigma_2 \cdot x$$

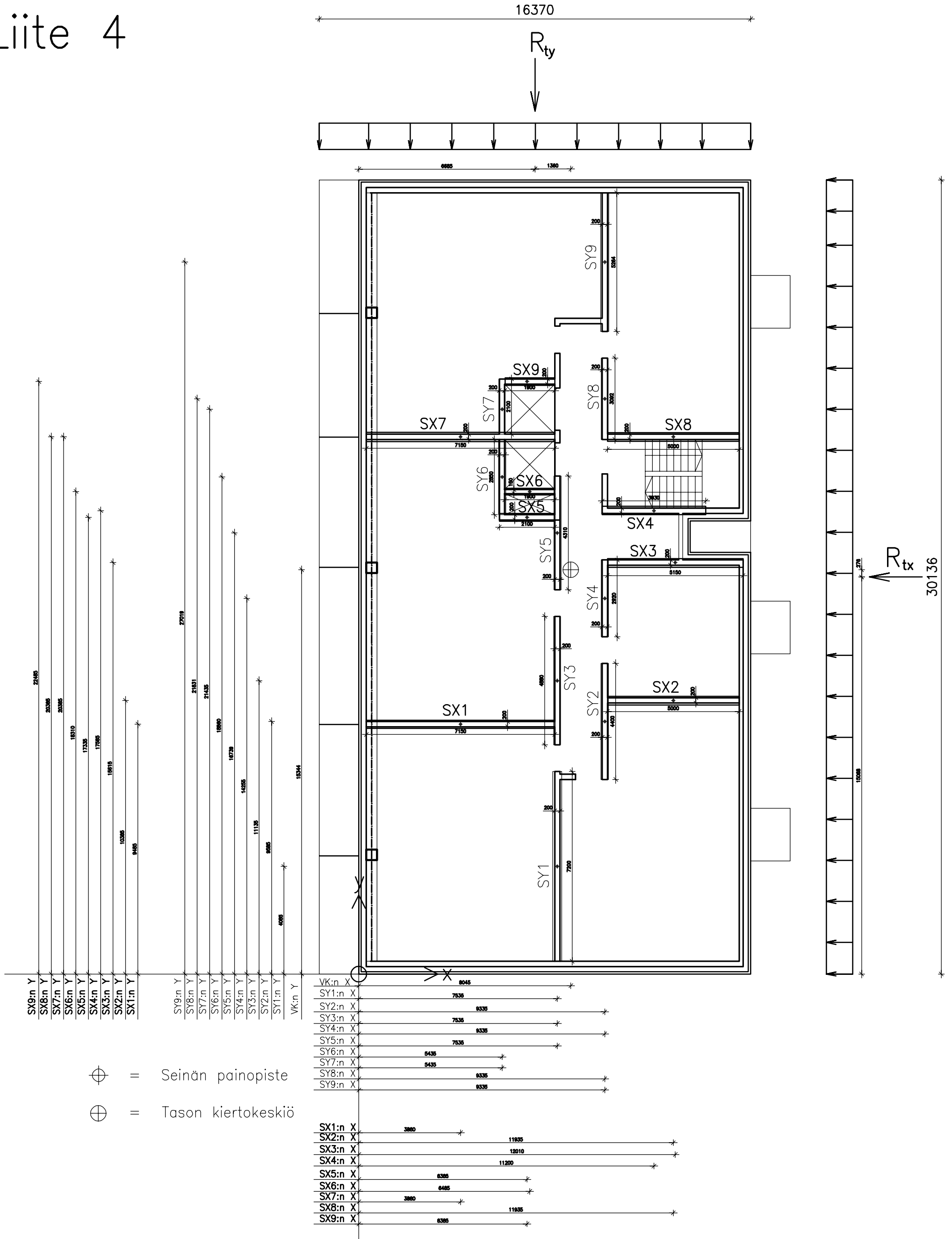
$$x = \frac{\sigma_1 \cdot L}{\sigma_1 + \sigma_2} = 0,941 \text{ m}$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_1 \cdot b \cdot x = 94,9 \text{ kN}$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_2 \cdot b \cdot x = 550 \text{ kN}$$

7-16. krs. katto

Liite 4



Liite 5.

Korkean rakentamisen rakentamistapaohje 2018

Stabiliteetti- ja lujuuslaskelmat	Ohjekortti RAK - 02	Versio 2018-11-07
--	-------------------------------	----------------------

Korkeassa rakentamisessa vaadittavat lisäselvitykset:

1. Lujuuslaskelmat tehdään käyttäen 3D malleja ja tärkeimmät voimasuureet tarkistetaan ns. käsin laskennalla (taulukkolaskentaohjelma tms.).
2. Laskelmien tulee sisältää vähintään:
 - Voimasuureiden herkkyytarkastelu tärkeimmille rakenneosille.
 - Rungon ja perustusten yhteistoiminta on otettava huomioon laskentamallissa.
 - Rakenteiden mitoitus ja voimasuureiden laskenta on tehtävä luotettaviksi todettuja menetelmiä käyttäen.
 - Paalutukset mallinnetaan laskentamalliin käyttäen tarvittavan tarkkuuden antavia todellista vastaavia paalupituuksia.
 - FEM-mallit rakennetaan riittävällä tarkkuudella ja tarkoitukseen soveltuvalla elementtikoolla, jotta tulokset ovat luotettavia.
3. Rakennusten voimasuureet, vaakasiirtymät ja mitoitus on tarkistettava vähintään kahdella rakennuksen eri jäykkyydellä ylä- ja alalikiarvojen laskemiseksi. Käytetään ainakin seuraavia malleja:
 - Malli, jossa halkeilun, liitosten ominaisuudet ym. vaikutus otetaan huomioon.
 - Malli, jossa rakenteet oletetaan halkeilemattomiksi.
4. Tehdään tarvittaessa tuulitunnelikokeet. Rakennesuunnittelija esittää ja perustelee tuulitunnelikokeiden tarpeen tapauskohtaisesti. Valintaperusteissa tulee esittää seuraavat asiat:
 - Rakennuksen muodon vaikutus.
 - Rakennuksen dynaamisten ominaisuuksien vaikutus.
 - Ympäristön vaikutus, mm. viereiset rakennukset, tunnelointivaikutus.
5. Lasketaan rakennuksen kiihtyvyydet tuulikuormista käyttäen yleisesti hyväksytyjä menetelmiä.
6. Tuulikuormien alustavassa määrittämisessä ennen tuulitunnelikokeita on käytettävä riittävää varmuutta ja otettava huomioon mahdolliset viereisten rakennusten aiheuttama pyörteisyydet.
7. Otetaan huomioon rakennuspaikasta johtuvat vaatimukset mm. liikennetärinä ja mahdolliset seismiset vaikutukset.
8. Rakennesuunnittelun perusteet asiakirjaan on lisättävä dynaamisen mitoituksen perusteet.
9. Laskelmista on laadittava selkeä ja kattava laskelmaraportti, josta laskennan kulku, laskentaperusteet ja tulokset on yksiselitteisesti luettavissa. Lähtötiedot on raportissa esitettävä niin tarkasti, että niitä käyttäen laskelmat pystytään luotettavasti toistamaan.
10. Kohteet kuuluvat vaativuusluokan takia erityismenettelyn piiriin ja kaikissa korkean rakentamisen kohteissa käytetään rakennesuunnitelmien ulkopuolista tarkastusta.
11. Vaiheittaisen rakentamisen vaikutus (painumat ja voimasuureet) on otettava huomioon.
12. Kaikki laskelmat on dokumentoitava.

Huomautukset:

1. On käytävä ennakoneuvottelu rakennusvalvonnan kanssa käytettävästä stabiliteettiratkaisusta ja laskelmien laajuudesta.
2. Laskelmien sisältö, laajuus ja toimitusaika on sovittava rakennusvalvonnan kanssa käytävissä neuvotteluissa.
3. Rakennesuunnittelija ja rakennesuunnitelmien ulkopuolinen tarkastaja on kiinnitettävä hankkeeseen mahdollisimman aikaisin.
4. Mahdolliset tuulitunnelikokeet on tehtävä riittävän aikaisin.

Korkean rakentamisen rakentamistapaohje 2018

Stabiiliteetti- ja lujuuslaskelmat	Ohjekortti RAK - 02	Versio 2018-11-07
------------------------------------	-------------------------------	----------------------

Lausunnot ja selvitykset viranomaisille:

1. Selvitys tuulitunnelikokeiden suorittamisesta.
2. Ulkopuolisen tarkastajan lausunto koskien rakennuksen valitun runkosysteemin rakennettavuutta ja käytettyjä kuormia on toimitettava lupahakemuksen liitteeksi.
3. Ulkopuolisen tarkastajan raportit / lausunnot.

Ohjekortti	Tarveselvitys	Hankesuunnittelu	Suunnittelun valmistelu	Ehdotussuunnittelu	Yleissuunnittelu
Toimenpide		Hankesuunnittelun alustavia rakennamallilaskelmiä ja stabiiliteettijärjestelmän valitsemiseksi. ↑		Alustavat laskelmat valitulla (-uilla) rakennamallilla. Ulkopuolinen tarkastaja mukaan projektiin. ↑	Stabiiliteettilaskelmat. ↑
Tarkastuspisteet		Alustava runkoratkaisu.		Alustavat runkoratkaisun (-sujen) laskelmat on tehty.	Keskeisten stabiiliteettiperiaatteiden esittely viranomaisille.

Rakennuslupa-tehtävät	Toteutussuunnittelu	Rakentamisen valmistelu	Rakentaminen	Käyttöönotto	Käyttö
Laskelmien tarkennukset lupavaiheen tarkkuuteen. ↑	Lopulliset mitoituslaskelmat ja workshopit ulkopuolisen tarkastajan kanssa. ↑		Mahdolliset laskelmien tarkennukset muutoksista johtuen. ↑	↑	
Rakenneperiaatteiden esittely viranomaisille. ↑	Ulkopuolisen tarkastajan raportit n.kpl. ↑		Ulkopuolisen tarkastajan raportit n.kpl. ↑	Ulkopuolisen tarkastajan loppulausunto. ↑	

Ulkopuolisen tarkastajan lausunto valitun runkosysteemin rakennettavuudesta ja käytetyistä kuormista.