

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikka Lappeenranta
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Rakennesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Juho Nopanen

Elementtirakenteisen asuinkerrostalon jäykistäminen

Opinnäytetyö 2014

Tiivistelmä

Juho Nopanen

Elementtirakenteisen asuinkerrostalon jäykistäminen, 48 sivua, 2 liitettä

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikka Lappeenranta

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Rakennesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Opinnäytetyö 2014

Ohjaajat: lehtori Petri Himmi, Saimaan ammattikorkeakoulu, RI Lauri Karvonen, Rakenneinsinööri-toimisto IN-TE Oy

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia betonielementtirakenteisen asuinkerrostalon jäykistämistä ja laatia siihen liittyviä laskelmia sekä tutustua aiheeseen liittyvään teoriaan. Työn alussa johdatellaan lukija aiheeseen teoriaosuudella, josta siirrytään esimerkkikohteeseen tehtyihin laskelmiin ja lopussa tehdään yhteenveto ja pohditaan työssä tehtyä kokonaisuutta.

Opinnäytetyön tilaajana toimi Rakenneinsinööri-toimisto IN-TE Oy, jonka käyttöön opinnäytetyössä oli tarkoitus tuottaa tuulikuormasta eurokoodipohjainen Excel-laskenta-alusta. Tavoitteessa onnistuttiin ja laskenta-alustalle tulee varmasti käyttöä myös tulevaisuudessa. Sen avulla tuulikuorman laskeminen onnistuu todella nopeasti verrattuna käsinlaskuun.

Poikittaisvoimien jakautumisen laskennassakin tuli käytettyä Exceliä apuna. Excel-laskennan lisäksi työssä käytettiin Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014-ohjelmaa saatujen Excel-laskentatulosten vertailuun. Pidän vertailua onnistuneena saatujen tulosten ja niistä tekemiäni päätelmien myötä. Edellä mainittu ohjelma tulee varmasti olemaan tehokas työkalu rakennesuunnittelussa myös jatkossa, mutta ohjelman käyttäminen ja siitä kaiken hyödyn irti saaminen vaatii paljon opettelua ja ennen kaikkea kokemusta sen käyttämisestä.

Aivan aluksi oli tarkoituksena käyttää vielä ohjelmien Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014 ja Tekla Structures 19.1 välistä linkkiä mallien siirtoon ohjelmasta toiseen. Näin oltaisiin välttyttyä mallintamiselta kahteen kertaan eri ohjelmissa. Tästä tavoitteesta päätettiin luopua, mutta se olisi mielestäni hyvä tutkia jatkossa.

Tavoitteet saatiin siis suoritettua ja pidän työtä todella hyvänä kokonaisuutena.

Asiasanat: asuinkerrostalo, jäykistäminen, Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014, tuulikuorma

Abstract

Juho Nopanen

Stiffening of precast multi-storey building, 48 pages, 2 Appendices

Saimaa University of Applied Sciences

Technology Lappeenranta

Degree Programme in Civil and Construction Engineering

Specialisation in Structural Engineering

Bachelor's Thesis 2014

Instructor(s): Lecturer Mr Petri Himmi, Saimaa University of Applied Sciences, structural engineer Mr Lauri Karvonen, Rakenneinsinööritoimisto IN-TE Oy

The objective of the thesis was to research the stiffening of precast multi-storey building and to produce calculations related to it and also to study the theory about it. At the beginning of the thesis is some theory about this subject. After that comes an example of calculations and at the end there is summary about what I have done in this thesis.

The subscriber of this thesis is Rakenneinsinööritoimisto IN-TE Oy. One of the thesis's objective was to produce Eurocode based Excel calculation program for the office. The objective was achieved and I'm sure it is going to be useful program also in the future. With it wind load calculations are generated very quickly compared to calculations made by hand.

Excel was also used in calculations about transverse loads distributions. In addition to Excel there was used the program called Autodesk Robot Structural Analysis Professional to compare the Excel calculation results. I think the comparison between these two programs was successful because of the results I got out of them. I'm sure that Autodesk Robot Structural Analysis Professional is going to be very useful program in the structural design also in the future but it's going to need much more practise and experience of its use to get all the benefit out of it.

At the beginning there was objective to use the link between Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014 and Tekla Structures 19.1 to transfer the model from one program to another. Like that there would not been have to model the building twice but this objective was decided to abandon to delimit the thesis.

All the objectives are completed and I think this thesis is very good wholeness.

Keywords: multi-storey building, stiffening, Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014, wind load

Sisältö

1	Johdanto	6
2	Elementtirakentaminen.....	7
3	Käytettävät suunnittelustandardit.....	8
4	Rajatilamitoituksen periaatteet	8
4.1	Mitoitustilanteet.....	8
4.2	Murtorajatilat.....	9
4.2	Käyttöraajatilat	10
4.3	Kuormien yhdistelykertoimet.....	11
5	Rakenteiden kuormat	12
5.1	Pystykuormat	12
5.1.1	Omat painot.....	12
5.1.2	Lumikuormat	13
5.1.3	Hyötykuormat	14
5.2	Vaakakuormat.....	15
5.2.1	Tuulikuorma	15
5.2.2	Lisävaakavoima.....	22
6	Rakennuksen jäykistäminen.....	23
6.1	Yleistä tietoa jäykistämisestä	23
6.2	Jäykistyssuunnittelun tehtävät	23
6.3	Jäykistysjärjestelmät.....	24
6.3.1	Mastojäykistys	24
6.3.2	Kehäjäykistys	25
6.3.3	Levyjäykistys	25
6.3.4	Ristikkojäykistys	26
6.3.5	Yhdistelmäjäykistys	26
6.4	Jäykistyksen laskentaperiaatteet	27
7	Käytettävät ohjelmistot	31
7.1	Microsoft Excel 2014	31
7.2	Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014.....	31
8	Esimerkkilaskelmat.....	31
8.1	Kohteen kuvaus ja laskennan lähtötiedot	31
8.2	Tuulikuorman laskenta.....	32
8.2.1	Voimakertoimen avulla	32
8.2.2	Pintapaineiden avulla	33
8.3	Lisävaakavoimat	35
8.4	Poikittaisvoimien jakaumat.....	37
9	Autodesk Robotin ja laskentataulukon vertailu	41
10	Yhteenveto ja pohdinta.....	44
	Kuvat.....	46
	Taulukot	47
	Lähteet	48

Liitteet

Liite 1 Tuulikuorman laskennan tulossivu

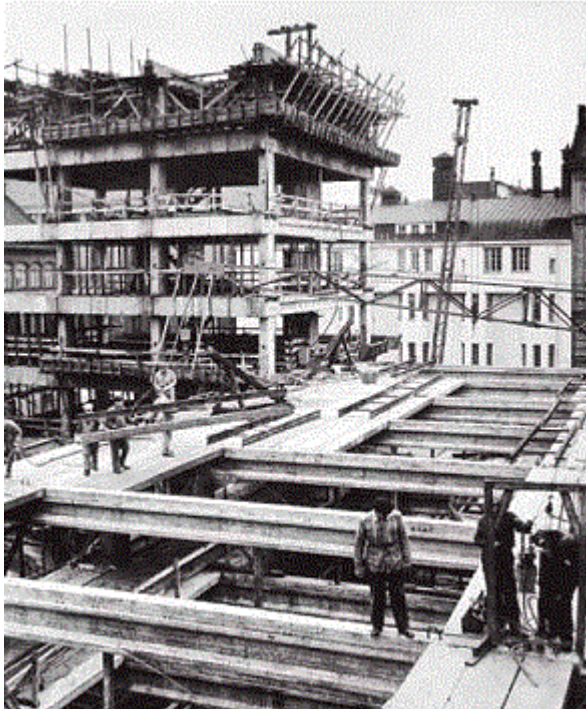
Liite 2 Poikittaisvoimien jakauman tulossivu

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia elementtirakenteisen asuinkerrostalon jäykistämistä. Jäykistämiseen liittyen on tavoitteena tuottaa Rakenneinsinööri-instituutti IN-TE Oy:n käyttöön tuulikuormasta excelpohjainen laskentalusta, sekä selvittää poikittaisvoimien jakaumat työssä kohteena olevaan pilot-kohteeseen ja lopuksi vielä käyttää Autodesk Robot Structural Analysis Professional-ohjelmaa saatujen Excel-laskentatulosten vertailuun. Opinnäytetyön alussa esitellään teoriaa ja tietoja tuulikuorman sekä poikittaisvoimien laskennasta, josta siirrytään pilottikohteen esimerkkilaskelmiin ja lopussa pohditaan työn kokonaisuutta sekä saatuja tuloksia.

2 Elementtirakentaminen

Betonielementtirakentaminen alkoi Suomessa 1950-luvulla. Sodan jälkeisten tuhojen korjaamiseen etsittiin mahdollisimman nopeaa ja taloudellista rakennustapaa, johon ratkaisuksi löytyi elementtirakentaminen. Suomen ensimmäinen täselementtirakennus on arkkitehti Aarne Ervin suunnittelema Helsingin Yliopiston Porthania-rakennus vuodelta 1952.(1.)



Kuva 2.1 Porthania instituutin runkoelementtien asennusta (1)

Avoin BES-järjestelmä asuinrakentamista varten kehitettiin Suomessa vuosina 1968-1970. Se perustui kantaviin pääty- ja väliseiniin, ei-kantaviin sandwich-ulkoseiniin ja välipohjina käytettäviin pitkälaattoihin. Nykyisin paljon käytössä olevia ontelolaattoja on alettu käyttää 1970-luvulta lähtien. BES-järjestelmässä standardisoitiin betonielementit ja niiden liitokset niin, että valmisosia voitiin hankkia useilta eri valmistajilta.(1.)

Ennätysmäinen asuntotuotanto 1970-luvulla ei olisi ollut mahdollista ilman BES-järjestelmää. Huonona asiana voidaan tosin pitää sitä, että kiireen vuoksi rakennusten arkkitehtuuriin ei kiinnitetty paljoakaan huomiota ja niinpä taloista tuli laatikkomaisia. Lisäksi 1970-luvulla ei tiedetty vielä betonin kestävyysvaikut-

tavista tekijöistä, koska kokemus oli hyvin lyhytaikaista. Niinpä osa julkisivuista jouduttiin peruskorjaamaan jo 30-40 vuoden käytön jälkeen.(1.)

1980-luvulla laadittiin Runko BES-aineisto. Siinä pilari-palkkirungolle laadittiin mittajärjestelmä, rakenneosien mitta- ja tyyppisuositukset sekä liitosdetaljit. 1980-luvulta lähtien yleistyi myöskin ns. tuoteosakauppa, jossa elementtiteollisuus otti aiempaa suuremman vastuun. Siihen sisältyi tyypillisesti elementtien suunnittelu, valmistus, asennus ja juotosvalut. 1990-luvulle tultaessa betonirakenteet monimuotoituivat juurikin 1980-luvun kehitystyön ansiosta.(1.)

Vielä 2000-luvullakin BES- ja Runko BES-järjestelmät ovat edelleenkin käytössä. Yleisin betonielementtijulkisivu on sandwich-rakenteinen. Julkisivuissa rapaustekniikat ja uusimpana kehitystyön tuloksena graafinen betoni lisäävät suosiotaan.(1.)

3 Käytettävät suunnittelustandardit

Tässä työssä käytettäviä standardeja ovat EN-suunnittelustandardit EN 1990 Rakenteiden suunnitteluperusteet, EN 1991 Rakenteiden kuormat ja EN 1992 Betonirakenteiden suunnittelu. Lisäksi apuna on käytetty kirjaa RIL 201-1-2008 Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat, jossa on esitetty edellä mainittujen EN-suunnittelustandardien sisältämiä asioita helpommin luettavassa muodossa. Opinnäytetyössä esitetyt laskelmat ovat tehty Suomen kansallisen liitteen mukaan.

4 Rajatilamitoituksen periaatteet

Murtorajatilat ja käyttörajatilat käsitellään erikseen ja ne liitetään aina johonkin mitoitustilanteeseen, joista kerrotaan seuraavaksi (2, s.27).

4.1 Mitoitustilanteet

Mitoitustilanteet valitaan ottamalla huomioon rakenteen toimintaolosuhteet. Mitoitustilanteet luokitellaan seuraavasti:

- normaalisti vallitsevat mitoitustilanteet, jotka koskevat normaaleja käyttötilanteita
- tilapäiset mitoitustilanteet, jotka koskevat rakenteeseen kohdistuvia tilapäisiä olosuhteita
- onnettomuusmitoitustilanteet, esim. tulipalot, räjähdys, törmäys ja paikallinen vaurio
- maanjäristysmitoitustilanne, jotka koskevat maanjäristyksen tapahtuessa rakenteisiin kohdistuvia olosuhteita (3, s.52).

Suunnittelussa mitoitustilanteet liittyvät yleensä kuormiin. Normaalisti vallitsevalle ja tilapäiselle mitoitustilanteelle käytetään samoja osavarmuuslukuja ja onnettomuustilanteelle yleensä osavarmuuslukua 1,0. (4, s.25.) Tässä opinnäytetyössä keskitytään tarkastelemaan vain normaalisti vallitsevaa mitoitustilannetta.

4.2 Murtorajatilat

Murtorajatilaksi tulee luokitella kaikki rajatilat, jotka liittyvät ihmisten turvallisuuden tai rakenteiden varmuuteen. Myöskin varastoitavan aineen tai tavaran suojaamiseen liittyvät rajatilat voidaan joissakin tapauksissa luokitella murtorajatilaksi. (3, s.52.) Murtorajatilat jaotellaan seuraavasti:

- (EQU) rakenteen tasapainon menetys
- (STR) kantavan rakenteen tai rakenneosan murtuminen
- (GEO) maan pettäminen tai liian suuri siirtymätila
- (FAT) rakenteen tai rakenneosien väsymismurtuminen (5).

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan vain STR-murtorajatilaa.

Kuormayhdistely murtorajatilassa

STR-rajatilassa kuormitusyhdistelmät ovat oheisen taulukon 4.1 mukaiset. Yleisimmässä tapauksessa määräävämmäksi kuormitusyhdistelmäksi tulee kaavan 6.10b mukainen yhdistelmä, jossa otetaan huomioon omat painot ja muuttuvat kuormat, joista yksi muuttuva kuorma valitaan määrääväksi ja loput voidaan pienentää kuormien yhdistelykertoimilla. Yhdistelykertoimia käytettäessä ole-

tuksena on, että kahden tai useamman muuttuvan kuorman esiintymisen todennäköisyys samaan aikaan on pienempi. (5.)

Yhdistelmän kaava	Pysyvät kuormat ^a		Määrävä muuttuva kuorma	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat ^b
	Epäedulliset	Edulliset		
Pysyvien, muuttuvien ja muiden samanaikaisten muuttuvien kuormien yhdistelmä				
kaava 6.10a (F1) ^c	1,35 K _{F1} G _k	0,9 G _k		
kaava 6.10b ^c	1,15 K _{F1} G _k	0,9 G _k	1,5 K _{F1} Q _{k,1}	1,5 K _{F1} ψ _{0,i} Q _{k,i}
Merkinnät ^a Kun pysyvän kuorman vaihtelua ei pidetä merkittävänä, G _{k,j,sup} ja G _{k,j,inf} voidaan merkitä G _k ^b ψ _{0,i} :n arvo saadaan Suomen kansallisen liitteen taulukosta A.1.1 (F1) (arvot ovat myös taulukossa 3) ^c kerroin K _{F1} riippuu luotettavuusluokasta (ks. SFS-EN 1990 taulukko B2) - luokassa RC3 K _{F1} = 1,1 (vaativat rakenteet, vahingot vaurion syntyessä suuria) - luokassa RC2 K _{F1} = 1,0 (tavanomaiset rakenteet) - luokassa RC1 K _{F1} = 0,9 (vaatimattomat rakenteet, vahingot vaurion syntyessä vähäisiä)				

Taulukko 4.1 Murtorajatilan kuormitusyhdistelmät STR-rajatilassa (5)

Tässä opinnäytetyössä ei käsitellä muiden murtorajatilojen kuormitusyhdistelmiä, koska niitä ei tässä työssä tarkastella.

4.2 Käyttörajatilat

Käyttörajatiloiksi luokitellaan rajatilat, jotka liittyvät:

- rakenteen tai rakenneosien toimintaan normaalikäytössä
- ihmisten mukavuuteen
- rakennuskohteen ulkonäköön (3, s.54).

Palautuva ja palautumaton käyttörajatila tulee erotella toisistaan. Palautuvalla käyttörajatilalla tarkoitetaan sitä, että jokainen käyttökelpoisuusvaatimuksen ylittävä kuormien vaikutus palautuu, kun kuormat poistetaan. Palautumattomassa rajatilassa tapahtuu päinvastoin, eli käyttökelpoisuusvaatimuksen ylittävät kuormien vaikutukset eivät palaudu, kun kuormat poistetaan. Tästä esimerkkinä on poikkileikkauksen halkeilu.(2, s.42.)

Käyttörajatiloja tarkastellaan siirtymiin, värähtelyihin ja vaurioihin perustuvien kriteerien. Käyttörajatilan minimivaatimuksia on esitetty standardeissa EN 1992-EN 1999 ja niiden kansallisissa liitteissä. Vaatimukset voi sopia kohdekohtaisesti, mikäli halutaan minimivaatimuksia tiukempia rajoja tai minimivaatimuksia ei ole määritelty. (2, s.28.)

Tässä työssä ei tehdä rakenteelle tarkasteluja käyttörajatilassa, siksi sen käsittely tässä työssä jää vähälle.

Kuormayhdistely käyttörajatilassa

Kuormitusyhdistelmät valitaan siten, että ne ovat tarkoituksenmukaisia tarkasteltavien käyttökelpoisuusvaatimusten ja toimivuuskriteerien kannalta. Käyttörajatilojen kuormitusyhdistelmät ovat seuraavat (taulukko 4.2):

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 4.2 Käyttörajatilan kuormitusyhdistelmät (3)

Ominaisyhdistelmää käytetään tavallisesti palautumattomille- ja tavallista yhdistelmää palautuville rajatiloille. Pitkäaikaisyhdistelmää käytetään pitkäaikaisvaikutuksille ja rakenteen ulkonäön kannalta. (2, s.41-42.)

4.3 Kuormien yhdistelykertoimet

Kuormien yhdistelykertoimilla otetaan huomioon muuttuvien kuormien samanaikainen esiintymistodennäköisyys valitsemalla määräävä muuttuva kuorma, jolloin muut samanaikaisesti vaikuttavat muuttuvat kuormat voidaan pienentää kuormitukseen liittyvällä yhdistelykertoimella. Seuraavassa taulukossa 4.3 on taulukoitu yhdistelykertoimet eri kuormituksille. (5)

Kuorma	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (ks. 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	0,6
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, 30 kN < ajoneuvon paino ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Rakennusten lumikuormat (ks. EN 1991-1-3) ¹⁾			
Suomi, Islanti, Norja, Ruotsi	0,70	0,50	0,20
Muut CENin jäsenmaat, kun sijaintikorkeus on $H > 1000$ m merenpinnan yläpuolella.	0,70	0,50	0,20
Muut CENin jäsenmaat, kun sijaintikorkeus on $H \leq 1000$ m merenpinnan yläpuolella.	0,50	0,20	0
Rakennusten tuulikuormat (ks. EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (ks. EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
HUOM. Kertoimien Ψ arvot voidaan määritellä kansallisessa liitteessä. ¹⁾ Mikäli maata ei ole mainittu, kyseiset paikalliset olosuhteet selvitetään erikseen.			

Taulukko 4.3 Kuormien yhdistelykertoimet murto- ja käyttörajatilassa (3)

5 Rakenteiden kuormat

Kuormat luokitellaan niiden aikariippuvuuden perusteella seuraavasti:

- pysyvät kuormat (G), esim. rakenteiden omat painot
- muuttuvat kuormat (Q), esim. lumi-, tuuli- ja hyötykuormat
- onnettomuuskuormat (A), esim. törmäyksestä aiheutuva kuormitus (3, s.58).

Tässä työssä tarkasteltavia kuormia ovat pysyvät- ja muuttuvat kuormat, joita käsitellään seuraavaksi.

5.1 Pystykuormat

Rakenteille tulevia pystykuormia, joita tässä opinnäytetyössä tarkastellaan, ovat rakenteiden omat painot, hyötykuormat ja lumikuorma.

5.1.1 Omat painot

Rakenteiden omat painot voidaan laskea, kun tiedetään rakenneosien geometria ja niiden tilavuuspaino. Tässä työssä tarkasteltavan kohteen omat painot koostuvat seinien, välipohjien ja yläpohjan omista painoista. Rakenteiden omat painot ovat pysyviä kuormia (G).

Lumikuorman muotokerroin valitaan katon kaltevuuskulman ja kattotyypin perusteella vyöhykkeille eli käytännössä lappeille ja niitä edustavat tunnuksat ovat μ_1 ja μ_2 . Oheinen taulukko soveltuu harja-, pulpetti- ja sahakatoille. Taulukon arvot ovat voimassa, kun lunta ei estetä putoamasta katolta, eli lumiesteitä ei ole. Jos esteitä on, niin arvoksi tulee vähintään 0,8 ja se on laskettava vielä erikseen. (2, s.95.)

5.1.3 Hyötykuormat

Hyötykuormat tulee määrittellä muuttuviksi liikkuviksi kuormiksi. Sen katsotaan vaikuttavan siellä, missä se aiheuttaa kaikista epäedullisimman vaikutuksen.(2, s.64.)

Kuormitettujen tilojen luokat	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
Luokka A		
— Välipohjat	1,5... <u>2,0</u>	<u>2,0</u> ...3,0
— Portaajat	<u>2,0</u> ...4,0	<u>2,0</u> ...4,0
— Parvekkeet	<u>2,5</u> ...4,0	<u>2,0</u> ...3,0
Luokka B	2,0... <u>3,0</u>	1,5... <u>4,5</u>
Luokka C		
— C1	2,0... <u>3,0</u>	3,0... <u>4,0</u>
— C2	3,0... <u>4,0</u>	2,5...7,0 (4,0)
— C3	3,0... <u>5,0</u>	<u>4,0</u> ...7,0
— C4	4,5... <u>5,0</u>	3,5... <u>7,0</u>
— C5	<u>5,0</u> ...7,5	3,5... <u>4,5</u>
Luokka D		
— D1	<u>4,0</u> ...5,0	3,5...7,0 (4,0)
— D2	4,0... <u>5,0</u>	3,5... <u>7,0</u>

Taulukko 5.2 Rakennusten välipohjien, parvekkeiden ja portaiden hyötykuormat (8)

Hyötykuormat valitaan sen vaikutuspaikan mukaan ja arvot saadaan taulukosta 5.2. Hyötykuormat lasketaan normaalisti tasaisena kuormana vasemmanpuoleisen sarakkeen arvojen mukaisesti. Sen voidaan kuitenkin myös katsoa vaikuttavan pistekuormana oikeanpuoleisen sarakkeen mukaisesti. Pistekuorma voi vaikuttaa missä tahansa, mikä on käytön kannalta mahdollinen. (2, s.64-66.) Seuraavassa taulukossa 5.3 on eritelty mitä mikäkin luokka tarkoittaa.

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) ¹⁾	<p>C1: Tilat, joissa on pöytiä yms. esim. koulut, kahvilat, ravintolat, ruokasalit, lukusalit, vastaanottotilat.</p> <p>C2: Tilat, joissa on kiinteät istuimet, esim. kirkot, teatterit, elokuvateatterit, konferenssisalit, luentosalit, kokoussalit, odotussalit, asemien odotustilat.</p> <p>C3: Tilat, joissa ei ole liikkumista rajoittavia esteitä, esim. museo- ja näyttelytilat, julkisten rakennusten ja toimistorakennusten, hotellien ja sairaaloiden eteistilat, asemahallit.</p> <p>C4: Liikuntatilat, esim. tanssisalit, voimistelusalit ja näyttämöt.</p> <p>C5: Tilat, joihin voi syntyä tungosta esim. yleisötapahtumien rakennuksissa; tällaisia ovat konserttisalit, urheiluhallit mukaan luettuina katsomot, terassit ja eteistilat sekä rautatielaiturit.</p>
D	Myymälätilat	<p>D1: Tavallisten vähittäiskauppojen tilat.</p> <p>D2: Tavaratalojen tilat.</p>
<p>¹⁾ 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 5.3 Käyttöluokat (8)

Julkaisussa RIL 201-1-2008 on käyttöluokkia vielä enemmän kuin EN 1991-1-1, mutta tässä työssä ei ole tarpeellista käydä niitä läpi.

5.2 Vaakakuormat

Rakennukseen kohdistuvat vaakakuormat ovat tuulikuorma ja lisävaakavoima.

5.2.1 Tuulikuorma

EN 1991-1-4 antaa kaksi vaihtoehtoista tapaa laskea rakennukseen kohdistuvan kokonaistuulikuorman. Tuulikuorma voidaan määrittää voimakertoimen ja pintapaineiden avulla. Voimakertoimella laskettuna kokonaistuulivoiman määrittäminen on helpompaa ja nopeampaa kuin pintapaineiden avulla laskettuna. Eri menetelmillä saatavat tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan, mutta pintapaineiden avulla laskettuna tulokset ovat hieman tarkempia. Tässä opinnäytetyössä tuulikuormien laskenta on tehty kirjan RIL 201-1-2008 mukaan, jossa tuulikuorman laskentaa on yksinkertaistettu verrattuna suoraan EN 1991-1-4 mukaisiin laskutapoihin.

Voimakertoimen avulla

Yksinkertaisempi menetelmä on ratkaista kokonaistuulivoima voimakertoimen avulla. Voimakertoimella laskettuna tulee rakennus määritellä joko matalaksi tai korkeaksi. Kun rakennuksen korkeus on pienempi kuin sen leveys ($h \leq b$), oletetaan, että tuulenpaineella on kaikissa korkeusasemissa rakennuksen harjalla vallitseva arvo. (2, s.136.) Rakennukseen kohdistuva kokonaistuulivoima voidaan tällöin laskea lausekkeella (kaava 2):

$$F_w = c_s c_d \times c_f \times q_p(h) \times A_{ref} \quad (2)$$

jossa

F_w = kokonaistuulivoima (kN)

$c_s c_d$ = rakennekerroin

c_f = voimakerroin

$q_p(h)$ = puuskanopeuspaine rakennuksen harjan korkeudella

A_{ref} = tuulikuorman vaikutusala

Korkeiden rakennusten mitoituksessa ($h > b$) tämä voi johtaa tarpeettoman suureen arvoon, niinpä kaava muuntuukin muotoon:

$$F_w(z) = c_s c_d \times c_f \times q_p(z) \times b \quad (3)$$

jossa

$F_w(z)$ = tuulivoiman jakautuma korkeussuunnassa (kN/m)

$c_s c_d$ = rakennekerroin

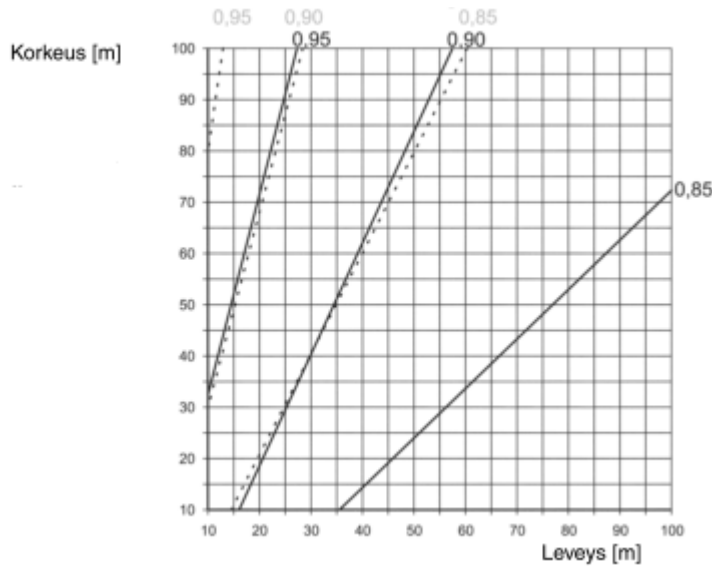
c_f = voimakerroin

$q_p(z)$ = maaston pinnanmuodon mukaan modifioitu nopeuspaine

b = rakennuksen leveys

Voimakerroin c_f on taulukkoarvo, joka saadaan kirjasta RIL 201-1-2008 sivulta 137. Vaihtoehtoisesti se voidaan ratkaista myös kuvasta, joka on kirjassa samalla sivulla kuin taulukkokin. Voimakertoimen määrittämiseksi täytyy tietää rakennuksen tehollinen hoikkuus λ ja sivusuhte d/b .

Rakennekerroin c_{sCd} määritetään monikerroksiselle betonirakennukselle seuraavasta kuvasta 5.2:



Kuva 5.2 Rakennekertoimen c_{sCd} määrittäminen (9)

Pintapaineiden avulla

Toinen hieman äskeistä työläämpi tapa on määrittää rakennukseen kohdistuva kokonaistuulikuorma pintapaineiden avulla. Sen avulla saatavat arvot ovat usein hieman pienempiä kuin voimakertoimen avulla laskettuna ja täten myös tarkempia. Seuraavaksi käydään läpi kokonaistuulivoiman määrittäminen tällä menetelmällä.

Rakennuksen kokonaistuulivoima pintapaineiden avulla voidaan määrittää kaavalla 4:

$$F_w = \gamma F_{w,e} + F_{w,i} + F_{fr} \quad (4)$$

jossa

$F_{w,e}$ = rakennuksen ulkopintaan vaikuttava painekuorma

$F_{w,i}$ = rakennuksen sisäpintaan vaikuttava painekuorma

F_{fr} = kitkakuorma

γ = kerroin joka huomioi sen, että paine- ja imuvoimien huippuarvot eivät esiinny samaan aikaan

Erona RIL 201-1-2008 ja EN 1991-1-4 välillä on se, että Eurokoodin mukaisesti laskettuna lasketaan edellä esitetyt kuormat kuormien vektorisummana ilman γ -kerrointa. Tämän opinnäytetyön tuulikuorman laskenta tehdään kuitenkin RIL 201-1-2008 mukaan, joten ko. kerrointa on käytettävä. Seuraavaksi käydään läpi eri painekuormien määrittäminen.

Rakennuksen ulkopintaan vaikuttava painekuorma saadaan kaavalla 5:

$$F_{w,e} = c_s c_d \times \Sigma w_e \times A_{ref} \quad (5)$$

jossa

$c_s c_d$ = rakennekerroin, saadaan kuvasta 5.5

A_{ref} = yksittäisen pinnan tuulenpaineen vaikutusala

w_e = yksittäiseen pintaan korkeudella z_e vaikuttava ulkopuolinen paine, joka saadaan kaavasta 6:

$$w_e = q_p(z_e) \times c_{pe} \quad (6)$$

$q_p(z_e)$ = puuskanopeuspaine korkeudella z_e

c_{pe} = ulkoisen paineen kerroin

Rakennuksen sisäpintaan vaikuttava painekuorma saadaan kaavalla 7:

$$F_{w,i} = \Sigma w_i \times A_{ref} \quad (7)$$

jossa

w_i = yksittäiseen pintaan korkeudella z_e vaikuttava ulkopuolinen paine, joka saadaan kaavasta 8:

A_{ref} = yksittäisen pinnan tuulenpaineen vaikutusala

$$w_i = q_p(z_i) \times c_{pi} \quad (8)$$

jossa

$q_p(z_i)$ = puuskanopeuspaine korkeudella z_i

c_{pi} = sisäisen paineen kerroin

Sisäinen paine jätetään tässä työssä huomioimatta koska oletetaan, että rakennus on kauttaaltaan tiivis.

Kitkakuorma, joka vaikuttaa pinnan suuntaisesti saadaan kaavalla 9:

$$F_{fr} = c_{fr} \times q_p(z_e) \times A_{fr} \quad (9)$$

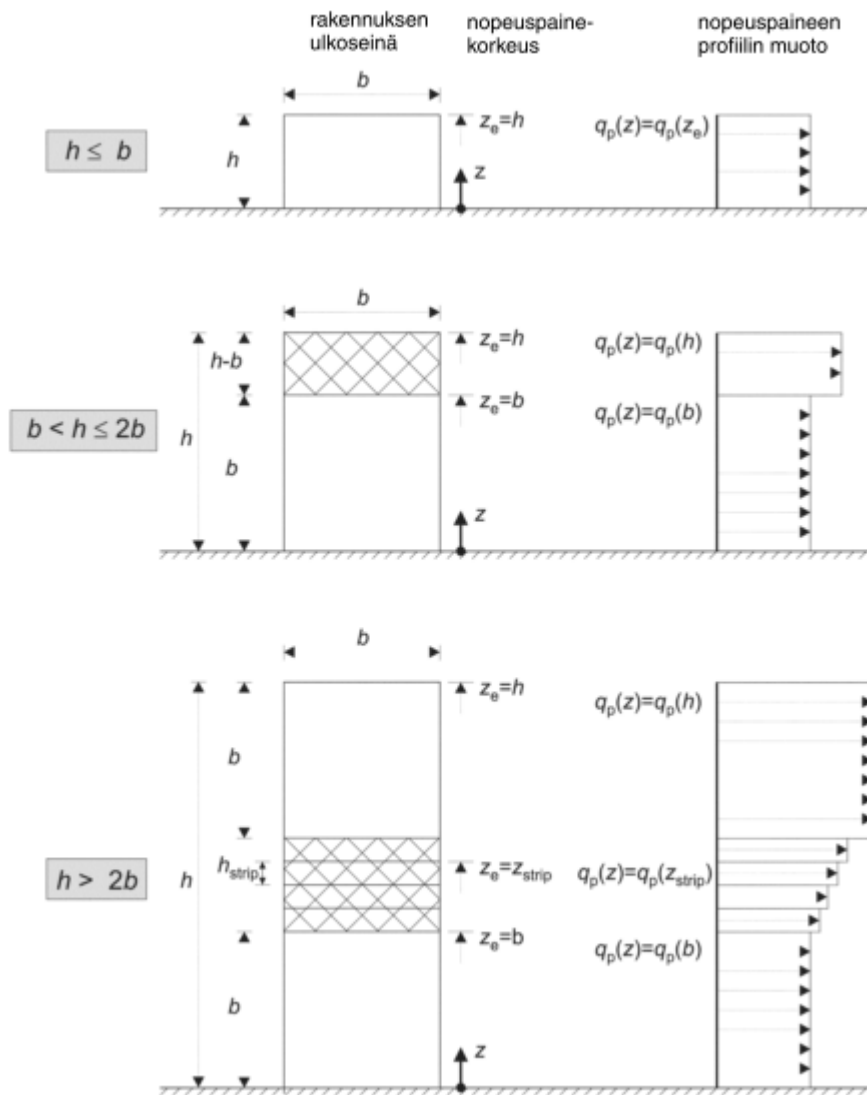
jossa

c_{fr} = kitkakerroin

$q_p(z_e)$ = puuskanopeuspaine korkeudella z_e

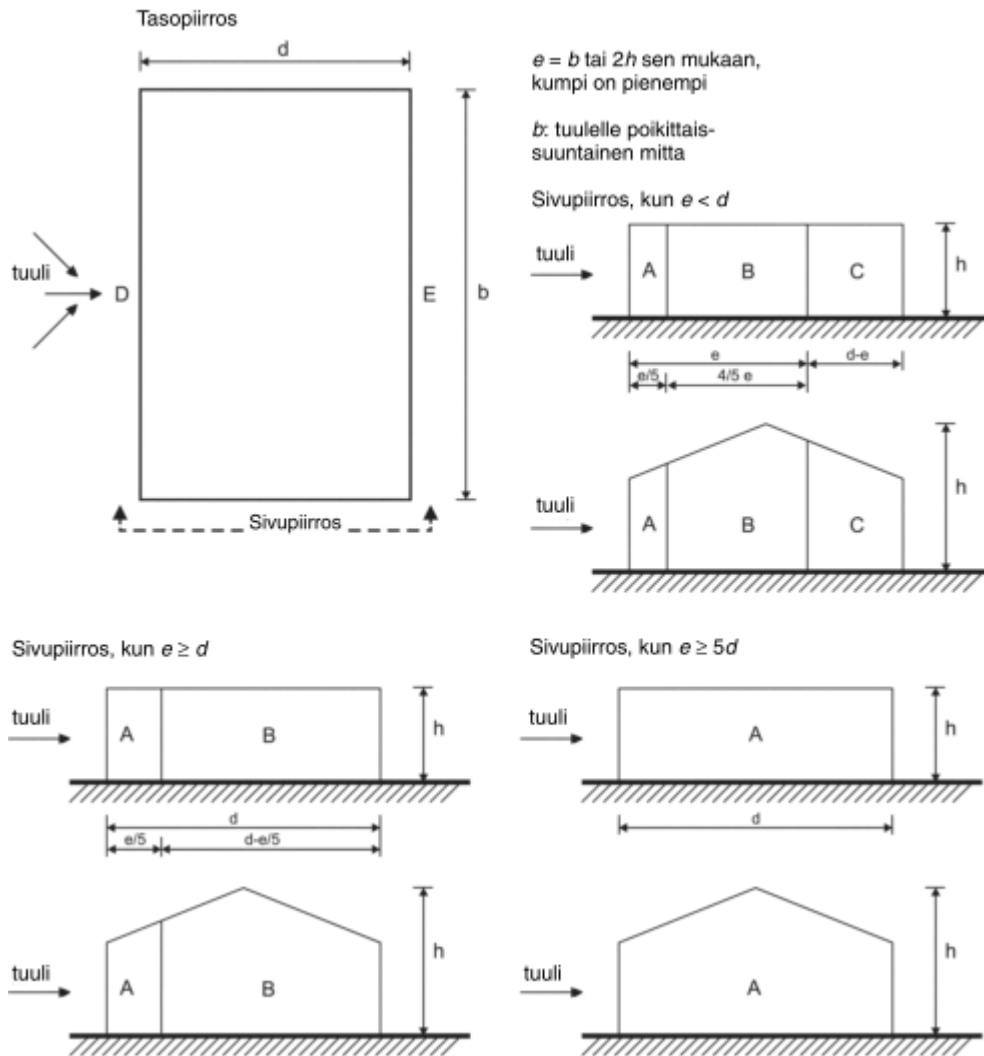
A_{fr} = kitkakuorman vaikutusalue

Kitkakuorma voidaan kuitenkin yleisimmissä tapauksissa jättää huomioimatta, kun tuulen suuntaisten pintojen kokonaisala on enintään 4 kertaa kaikkien tuulta vastaan kohtisuorien ulkopintojen kokonaisala. (2, s.139.)



Kuva 5.3 Nopeuspaine korkeus z_e riippuen rakennuksen korkeudesta h ja leveydestä b (9)

Kuvasta 5.3 nähdään, että pintapaineiden avulla laskettuna rakennuksen geometrialla on merkitystä tuulen nopeuspaineeseen rakennuksen eri korkeusvyöhykkeillä. Tästäkin voidaan tehdä jo sellainen oletus, että menetelmä on tarkempi kuin voimakerron menetelmä, jossa käytetään rakennuksen harjalla valitsevaa puuskanopeuden arvoa koko rakennuksen korkeudella. Seuraavaksi käydään läpi pystyseiniä jako vyöhykkeisiin. Tämä on esitetty kuvassa 5.4.



Kuva 5.4 Pystyseiniä vyöhykekaavio (9)

Kuten kuvasta 5.4 nähdään, niin tuulen suuntaiset pystyseinät jakaantuvat 1-3 vyöhykkeeseen riippuen rakennuksen geometriasta.

Vyöhyke	A		B		C		D		E	
h/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Taulukko 5.4 Ulkopuolisen paineen kertoimien suositusarvot pystyseinille (9)

Taulukossa 5.4 on näytetty ulkopuolisen paineen kertoimet pystyseiniä eri vyöhykkeille. Ulkopuolisen paineen kertoimet ovat riippuvaisia suhteesta h/d . Väliarvot voidaan interpoloida lineaarisesti. (2, s.144.)

5.2.2 Lisävaakavoima

Rakenteen mahdollisten mittapoikkeamien ja kuormien sijainnin epäedulliset vaikutukset tulee ottaa huomioon rakenneosien ja rakenteiden analyysissä. Epätarkkuudet tulee ottaa huomioon murtorajatiloiissa normaalisti vallitsevissa ja onnettomuusmitoitustilanteissa. (10, s.54.)

Epätarkkuudet voidaan esittää vinouden Θ_i avulla seuraavasti (kaava 10):

$$\Theta_i = \Theta_0 \times \alpha_h \times \alpha_m \quad (10)$$

jossa

Θ_0 = perusarvo, suositusarvo on 1/200

α_h = pituuteen tai korkeuteen perustuva pienennyskerroin

α_m = rakenneosien määrään perustuva pienennyskerroin

$$\alpha_h = 2/\sqrt{l}; 2/3 \leq \alpha_h \leq 1 \quad (11)$$

jossa

l = pituus tai korkeus

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \times (1 + 1/m)} \quad (12)$$

jossa

m = kokonaisvaikutuksen aiheuttavien pystyrakenneosien määrä

Vinouden arvolla voidaan laskea yhteen kerrokseen tulevat lisävaakavoimat kertomalla ko. kerroksen kokonaispystykuormat vinouden arvolla. Näin saadaan arvot sekä pysyvien että muuttuvien kuormien aiheuttamalle lisävaakavoimalle. Lisävaakavoimien oletetaan vaikuttavan samassa pisteessä kuin niiden määrittelyperusteena olevan pystykuorman ja niiden katsotaan vaikuttavan vain yhteen suuntaan kerrallaan. Niiden vaikutussuunta valitaan siten, että niistä syntyy kaikkein määräävin vaikutus. (2, s.73-74.)

6 Rakennuksen jäykistäminen

6.1 Yleistä tietoa jäykistämisestä

Jäykistämisen tehtävänä on siirtää rakennukseen kohdistuvien vaakakuormien aiheuttamat rasitukset jäykistävien pystyrakenteiden rakenteiden kautta perustuksille ja maapohjaan. Lisäksi vaakarakenteet on suunniteltava toimimaan jäykkinä levyinä, koska ne siirtävät vaakakuormat pystyrakenteille. Tämä on otettava huomioon mitoittamalla niiden liitokset pystyrakenteisiin kyseisten kuormien tukireaktioille. (11.)

6.2 Jäykistysuunnittelun tehtävät

Rakennuksen jäykistäminen on pyrittävä suunnittelemaan heti suunnittelun alussa, viimeistään luonnosvaiheessa. On olemassa likimääräisiä menetelmiä, joilla voidaan arvioida rakennuksen jäykistämisen riittävyyttä. Tämä on alustavaa jäykistysuunnittelua.(11.)

Suunnittelun edetessä suunnitelmat tarkentuvat ja jäykistäminen on suunniteltava sekä murto- että käyttörajatilassa. Eri rajatiloissa tutkittavat asiat on kerrottu luvussa 4. Käyttötilanteen lisäksi jäykistäminen on suunniteltava asennus- ja onnettomuustilanteisiin.(12, s.6.)

Asennusaikainen jäykistys pyritään toteuttamaan ilman ylimääräisiä asennusaikaisia tuentoja. Suunnittelija laatii elementtien asennusjärjestyksen siten, että vältytään ylimääräisiltä tuennoilta. Toisin sanoen ensimmäisenä asennetaan jäykistävät rakenneosat ja tämän jälkeen niihin tukeutuvat rakenteet. Hyvin suunnitellulla asennusjärjestyksellä vältytään siis ylimääräistä työtä vieviltä tuentojen tekemisiltä.(11.)

Jäykistävät rakenteet on onnettomuustilanteen sattuessa suunniteltava säilyttämään rakennuksen stabiilius. Tämä hoidetaan sidejärjestelmillä, jotka estävät paikallisesta vauriosta syntyvän jatkuvan sortuman. Tämä mahdollistaa kuormien siirtymisen toista kautta rakenteelta toiselle.(11.)

6.3 Jäykistysjärjestelmät

Erilaisia jäykistysjärjestelmiä on monia. Rakennesuunnittelijan tehtäväksi jää valita kuhunkin kohteeseen sopivin jäykistämistapa. Sen valintaan vaikuttavat esimerkiksi rakennejärjestelmä, kustannukset, arkkitehtuuri ja rakennuksen muunneltavuuden ja käyttötarkoituksen asettamat vaatimukset. (12.) Seuraavaksi käydään läpi yleisimpiä jäykistysjärjestelmiä.

6.3.1 Mastojäykistys

Mastojäykistys voidaan toteuttaa kolmella eri tavalla: mastopilari-, mastoseinä- ja mastokotelojäykistyksellä, kuten hissikuiluilla (11). Tässä työssä perehdytään näistä jäykistysjärjestelmistä kaikkein tarkimmin mastoseinäjäykistykseen.

Kaikille mastojäykistysjärjestelmille on yhteistä se, että niiden oletetaan toimivan ulokepalkin tavoin jäykästi alapäästään kiinnitettyinä. Kuorman ne saavat jäykiltä vaakarakenteilta jäykkyyksiensä suhteessa. Hyvää tässä jäykistystavassa on se, että rungon muut pystyrakenteet voidaan toteuttaa nivelellisinä, jolloin niiden tekeminen on edullisempaa ja nopeampaa. (12, s.19.)

Elementeistä koostuvat mastoseinäjäykistetyt saumat on mitoitettava kestämään niihin kohdistuvat normaali- ja leikkausvoimarasitukset, jotta ne toimisivat monoliittisesti yhdessä. Vaakasaumoissa leikkausvoimat saadaan siirrettyä taapeilla, pintojen välisellä kitkalla tai vaarnoituksella. Usein elementtien pituuden rajoittamiseksi joudutaan tekemään myös pystysaumoja, jolloin ne on mitoitettava kestämään niihin kohdistuva pystysuuntainen leikkausvoima. Tämä hoidetaan joko vaijerilenkeillä tai suurempaa kapasiteettia vaadittaessa pyöröteräsenkeillä. Lisäksi joissakin tapauksissa voidaan mastoseinät joutua ankkuroimaan maaperään niiden ollessa vedettyjä. Seinien välillä vedetyt liitokset hoidetaan seinäkengillä. (11.)

Kaikkien aukkojen, kuten ikkuna- ja oviaukot, vaikutus on otettava huomioon jäykkyyksiä laskettaessa. Ne pienentävät todellista jäykkyyttä merkittävästi ja vääristävät voimien jakautumista jätettäessä ne huomiotta. Jäykistävät seinät pyritään aina sijoittamaan symmetrisesti, mutta useinkaan tämä ei ole mahdollista. (11.)

6.3.2 Kehäjäykistys

Tavallisesti kehäjäykistystä käytetään teollisuuden rakentamisessa. Tässä jäykistysmenetelmässä kehät voivat olla liittyneinä perustuksiin joko nivelellisesti tai jäykästi ja kehien nurkat voivat olla joko täysin tai vain osittain jäykkiä. Elementtitekniikalla liitokset voivat olla vaikeita toteuttaa, siksi yleensä kehäjäykistys toteutetaan paikallavalutekniikalla. Toiseen suuntaan rakennus voidaan jäykistää muilla tavoin, kuten esimerkiksi vinotuilla tai levyseinillä.(11.)

Hyvänä puolena kehäjäykistyksessä on se, että siinä ei ole muita jäykistäviä osia rajoittamassa tilojen käyttöä ja perustuksissa voidaan käyttää nivelellisiä liitoksia. Huonoa on siirtymien hallinta ja rakenteiden rakennekorkeudet sekä edellä mainitut elementtien liitokset, jos kehäjäykistys toteutetaan käyttämällä elementtejä.(11.)

6.3.3 Levyjäykistys

Levyjäykistyksessä runkorakenteiden muodostaman kehän aukkoihin sijoitetut levyt jäykistävät rakenteen. Levyt ottavat vastaan niihin kohdistuvien jäykiltä tasoilta tulevien vaakakuormien rasitukset levyjen leikkausvoimina niiden jäykkyyksien ja sijaintien mukaisesti ja siirtävät ne perustuksille ja maapohjaan. (11.)

Levyseinien sijoittelu rakennuksessa on melko vapaata, mutta mikäli ne eivät sijaitse kerroksissa päällekkäin, on muistettava siirtää jäykistyksestä aiheutuva pystykuorma jollain muulla tapaa perustuksille ja maapohjaan. Tämä ei tosin ole suotavaa, koska tällöin levyjäykisteiden leikkausvoimia joudutaan siirtämään tasoissa, jolloin siitä voi aiheutua vaikeita liitosratkaisuja. On siis hyvä pyrkiä pitämään levyjäykisteet päällekkäin kerroksittain, jotta vältetään vaikeilta liitosratkaisuilta.(11.)

Levyjäykisteitä käytettäessä on niitä sijoitettava rungon molempiin suuntiin vähintään kaksi kappaletta, eikä niiden akseleilla saa olla yhteistä leikkauspistettä (12, s.20).

6.3.4 Ristikkojäykistys

Ristikkojäykistys on periaatteiltaan levyjäykistyksen kaltainen. Siinä levyjäykisteet on korvattu aukkoon sijoitetuilla veto- ja/tai puristussauvoilla. Ristikkojäykistys sopii hyvin elementtirungon jäykistämiseen eikä sen liitoksilta jäykistettäviin rakenteisiin vaadita jäykkyyttä, jolloin liitokset ovat edullisia ja nopeita toteuttaa. (12, s.21.)

Ristikkojäykistys asettaa vaatimuksia arkkitehtisuunnittelulle, rajoittaa tilojenkäyttöä ja rajoittaa ovi- ja ikkuna-aukkojen sijoittelua. Jäykistysristikoilla tarkoitetaan sitä, että jäykistettävät rakenteet on sidottu toisiinsa stabiiliksi systeemiksi. Niiden ei ole tarkoitus kantaa pystykuormia, mutta sitä niille saattaa tulla esimerkiksi kannatinrakenteiden taipumista. Se voidaan kuitenkin välttää kiinnittämällä huomiota liitosdetaljeihin. (12, s.21.)

Asennusaikaiseen jäykistykseen ristikot soveltuvat hyvin. Niitä voidaan joutua käyttämään silloin, kun asennusaikainen jäykkyys ei ole riittävä, eli lopullinen jäykistysjärjestelmä ei ole vielä toimiva tai asennusjärjestys niin vaatii. Jäykistysristikot on helppo asentaa pultti- tai hitsiliitoksella, ja parhaassa tapauksessa niitä voidaan käyttää vielä myöhemmin jopa eri kohteessa. (12, s.22.)

6.3.5 Yhdistelmäjäykistys

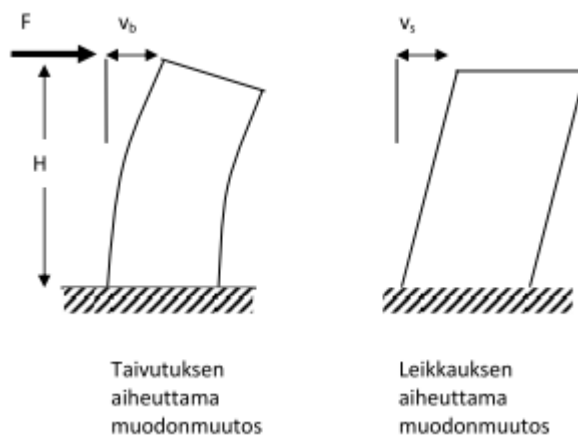
Myös edellä mainittujen jäykistystapojen yhdistelmiä voidaan käyttää ja näin pyrkiä löytämään kokonaistaloudellisesti mahdollisimman taloudellinen ratkaisu. Joskus jokin tietty jäykistystapa ei yksin riitä antamaan rakenteelle riittävää jäykkyyttä, ja näin sitä joudutaan täydentämään jollain toisella jäykistysmenetelmällä. Yhdistelmäjäykistystä käytettäessä asennuksen on oltava nopeaa ja liitosten edullisia ja yksinkertaisia. Lisäksi väliaikaisia tuentoja tulisi välttää, eli olisi hyvä, jos liitokset toimisivat heti asennuksen jälkeen. (12, s.22.)

Esimerkkeinä yhdistelmäjäykistyksestä mainittakoon yhdistetty levy- ja mastopilarijäykistys ja yhdistetty mastoseinä- ja ristikkojäykistys. Yhdistelmäjäykistykseen hyvänä puolena on se, että yhdistetyn jäykistysjärjestelmän jäykkyys voi olla suurempi kuin yksittäisten osien jäykkyyksien summa. (12, s.23.)

6.4 Jäykistyksen laskentaperiaatteet

Tässä työssä perehdytään tarkemmin mastoseinän jäykkyyden laskennan periaatteisiin. Tavoitteena on määrittellä esimerkkikohteeseen yhden kerroksen seinien jäykkyydet ja niihin kohdistuvat poikittaisvoimien jakaumat Excel-laskentaohjelmalla. Tämän luvun jäykistyksen laskentamenetelmät on esitelty elementtisuunnittelu.fi-sivuston laskentaperiaatteiden mukaisesti. (13.)

Jäykkyyksiä laskettaessa oletetaan, että vaakasuorat tasot toimivat jäykkinä levyinä ja siirtävät vaakakuormat pystyrakenteille niiden jäykkyyksien suhteessa. Ensimmäinen termi jäykkyyden laskentakaavassa, joka esitetään alempana, on taivutuksesta johtuva osuus ja jälkimmäinen antaa leikkausvoiman osuuden. Useimmissa tapauksissa voidaan leikkausvoiman osuus jättää huomioimatta sen vaikutuksen jäädessä niin pieneksi, mutta se on otettava kuitenkin huomioon, jos sivusuhte $H/L \leq 4$, eli korkeuden suhde pituuteen. Alla olevassa kuvassa 6.1 on esitetty taivutuksen ja leikkauksen aiheuttamat muodonmuutokset, jotka aiheuttavat rakenteeseen siirtymän v_b ja v_s . Kokonaissiirtymä saadaan laskettua näiden summana. (13.)



Kuva 6.1 Maston taivutuksen ja leikkauksen aiheuttamat siirtymät (9)

$$v_b = F \frac{H^3}{3EI} \quad (11)$$

jossa

v_b = taivutuksen aiheuttama siirtymä

- F = mastoon vaikuttava pistekuorma
 H = maston korkeus
 E = maston kimmomoduuli
 I = maston jäyhyys tarkasteltavan akselin suuntaisesti

$$v_s = F \times \kappa \times \frac{H}{GA} \quad (12)$$

jossa

- κ = leikkausmuodonmuutoksen kerroin
 G = maston liukumoduuli
 A = maston poikkipinta-ala

$$v = v_b + v_s$$

- v = kokonaissiirtymä

Mastoseinän jäykkyydet suuntiin x ja y saadaan kaavoista:

$$\frac{1}{k_x} = \frac{H^3}{3EI_x} + \kappa_x \times \frac{H}{GA} \quad (13)$$

$$\frac{1}{k_y} = \frac{H^3}{3EI_y} + \kappa_y \times \frac{H}{GA} \quad (14)$$

missä

- k_x ja k_y = jäykkyydet x- ja y-suunnassa
 I_x ja I_y = jäyhyys x- ja y-akselin suuntaisesti
 κ_x ja κ_y = leikkausmuodonmuutoksen kertoimet x- ja y-suunnassa

$$\kappa_x = \frac{A}{I_x^2} \times \int \frac{S(x)^2}{t(x)} dx \quad (15)$$

$$\kappa_y = \frac{A}{I_y^2} \times \int \frac{S(y)^2}{t(y)} dy \quad (16)$$

Jos jäykistävät seinät on sijoitettu rakennuksessa symmetrisesti, eli vaakakuormat eivät aiheuta vaakatasoille kiertymää, voidaan seinän ottama osuus kokonaisvaakavoimasta laskea kaavalla 17:

$$Q_y = \frac{k_y}{\Sigma k_y} \times F_y \quad (17)$$

jossa

Q_y = kyseisen seinän ottama osuus y-suuntaisesta kokonaisvaakavoimasta

F_y = y-suuntainen kokonaisvaakavoima

k_y = tarkasteltavan seinän jäykkyys

Σk_y = y-suuntaisten seinien jäykkyyksien summa

Silloin kun jäykistävät pystyrakenteet eivät sijaitse rakennuksessa symmetrisesti, niin rakennus saa vaakakuormista myös kiertymän vaakavoiman resultantin epäkeskisyydestä rakennuksen kiertokeskiön suhteen. Rakennukseen vaikuttaa tällöin momentti, joka voidaan laskea kaavasta 18:

$$M = F_y \times x_1 - F_x \times y_1 \quad (18)$$

jossa

F_x ja F_y = kokonaisvaakavoiman resultantti x- ja y-suunnassa

x_1 ja y_1 = kokonaisvaakavoiman epäkeskisyyden kiertokeskiöön nähden x- ja y-suunnassa

Yksittäisten seinien koordinaatit ovat seinien painopisteiden kohdalla. Seuraavilla kaavoilla 19 ja 20 voidaan laskea kiertokeskiön koordinaatit:

$$X = \frac{\Sigma k_y x'}{\Sigma k_y} \quad (19)$$

$$Y = \frac{\Sigma k_x y'}{\Sigma k_x} \quad (20)$$

jossa

X ja Y = kiertokeskiön x- ja y-koordinaatit

x' ja y' = seinien painopisteiden x- ja y-koordinaatit

Kiertokeskiön koordinaatistossa sisäisten voimien ja ulkoisten kuormien tasapainoehdoista voidaan johtaa seuraavat kaavat 21, 22 ja 23:

$$v_x = \frac{F_x}{\Sigma k_x} \quad (21)$$

$$v_y = \frac{F_y}{\Sigma k_y} \quad (22)$$

$$\varphi = \frac{M}{\Sigma T_{xy} + \Sigma k_x y^2 + \Sigma k_y x^2} \quad (23)$$

jossa

v_x ja v_y = siirtymät x- ja y-suunnassa

φ = kiertymä

T_{xy} = vääntöjäykkyys, joka jää suorien mastoseinien tapauksessa pieneksi ja voidaan näin unohtaa laskelmista

Kuormituksen aiheuttaessa kiertymän voidaan osamastojen kuormitukset ratkaista siirtymätilan perusteella seuraavilla kaavoilla 24 ja 25:

$$Q_x = k_x v_x - k_x y \varphi \quad (24)$$

$$Q_y = k_y v_y - k_y x \varphi \quad (25)$$

Q_x ja Q_y = kyseisen seinän ottama osuus x- ja y-suuntaisesta kokonaisvaakavoimasta

7 Käytettävät ohjelmistot

7.1 Microsoft Excel 2014

Microsoft Excel on ohjelmistoyritys Excelin tuottama taulukkolaskentaohjelma, joka on osa Microsoft Office-ohjelmistopakettia. Tässä opinnäytetyössä käytän Exceliä tuulikuorman laskenta-alustan luomiseen sekä seinien poikittaisvoimien jakautumisen määrittämiseen.

7.2 Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014

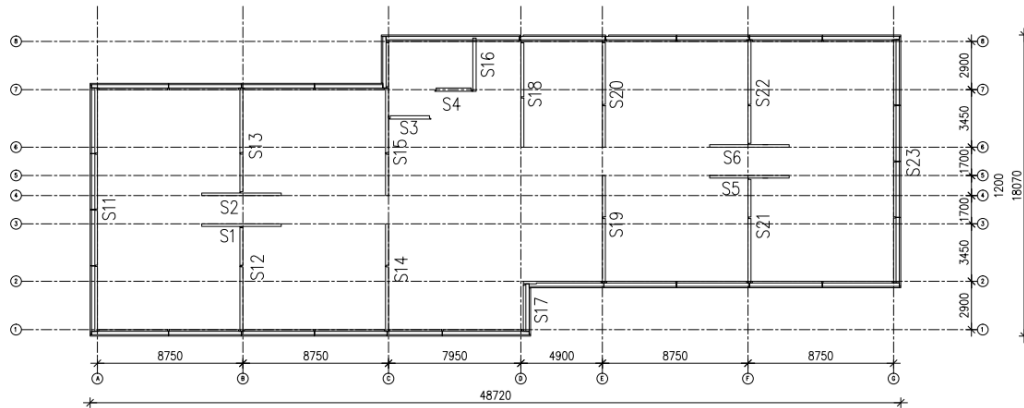
Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2014 on Autodeskin omistama erityisesti rakennesuunnittelijoille suunnattu FEM-laskentaohjelmisto. Sen avulla voi analysoida monimutkaisempiakin rakenteita ja rakenteisiin vaikuttavia voimia, joita olisi käsinlaskennalla hyvin vaikea ratkaista. Tässä työssä käytän ohjelmaa omien käsinlaskentatulosten vertailuun.

FEM-lyhenne tulee sanoista Finite Element Method. Sillä tarkoitetaan pääpiirteittäin sitä, että rakenteita analysoidessa rakenteet ”pilkotaan” rajalliseen (finite) määrään elementtejä (element) ja jokainen elementti lasketaan omana yksikkönään. Nämä pienemmät elementit muodostavat objektin ja kun näiden piennempien elementtien käyttäytyminen on laskettu, saadaan koko objektin käyttäytymistä tarkasteltua paljon tarkemmin.

8 Esimerkkilaskelmat

8.1 Kohteen kuvaus ja laskennan lähtötiedot

Kohteena on 4-kerroksinen betonielementtirakennus, jonka mitat ovat 48,7 m * 18,0 m * 17,8 m (b*d*h). Rakennuksen jäykistävinä rakenneosina toimivat kantavat ulkoseinät ja väliseinät. Välipohjat ovat ontelolaatoista. Kuvassa 8.1 on esitetty 1.krs tasopiirustus, johon on numeroitu jäykistävät seinät helposti tunnistettavaksi myöhempää laskentaosuutta varten. Kerrokset 1-4 ovat identtisiä, joten laskennan voi suorittaa yhden tasopiirustuksen perusteella.



Kuva 8.1 1.krs tasopiirustus, johon jäykistävät seinät ovat merkittyinä

8.2 Tuulikuorman laskenta

Esimerkkikohteen tuulikuorma lasketaan molempien menetelmien avulla. Myöhemmissä laskelmissa tullaan kuitenkin käyttämään arvoja, jotka saadaan laskettua pintapaineiden avulla. Tuulikuorman laskennan lähtötiedoksi molempiin menetelmiin kerrotaan rakennuksen kuuluvan maastoluokkaan 3. Geometriset tiedot tuulikuorman laskentaa varten on kerrottu edellisessä luvussa. Molempien menetelmien tuulikuorman laskenta suoritetaan Excel-laskenta-alustaa hyväksikäyttäen. Tulen esittämään laskelmissa myöskin saatujen tulosten välivaiheet.

8.2.1 Voimakertoimen avulla

Seuraavassa taulukossa 8.1 on esitelty tarvittavat laskennan lähtötiedot molempiin tuulikuorman laskentamenetelmiin.

Maastoluokka	ML3
z	17,8 m
$q_{po}(z)$	0,58 kN/m ²
c_{pi}	0
RAKENNUKSEN GEOMETRIA	
b	48,7 m
d	18 m
h	17,8 m
$h < b$	MATALA RAKENNUS

Taulukko 8.1 Excel-laskenta-alustan lähtötiedot

Luvussa 5.2.1 esittelin kaavat, joilla laskea kokonaistuulikuorma voimakertoimen avulla. Käytetään nyt ko. kappaleessa olevia kaavoja tuulikuorman selvittämiseksi. Lasketaan kokonaistuulivoima molempiin suuntiin, eli sekä leveyttä b- ja leveyttä d kohti.

$$F_w = c_s c_d \times c_f \times q_p(h) \times A_{ref} \quad (2)$$

$$F_{w,b} = 0,85 \times 1,3 \times 0,58 \text{ kN/m}^2 \times 867 \text{ m}^2 = 554,3 \text{ kN}$$

$$F_{w,d} = 0,90 \times 0,9 \times 0,58 \text{ kN/m}^2 \times 320,4 \text{ m}^2 = 150,2 \text{ kN}$$

Kaavojen arvot c_{sd} ja c_f ovat kirjasta RIL 201-1-2008 löytyviä taulukoituja arvoja. $q_p(h)$ on tuulen nopeuspaine, joka voidaan selvittää joko samasta kirjasta löytyvästä kuvasta ja taulukosta tai sen tarkan arvon saa selville myös kirjan takaa sivulta 184 löytyvillä kaavoilla eri maastoluokille korkeusaseman z funktiona.

Maastoluokka	ML3		
Puuskanopeuspaine	0,58	kN/m ²	Korkeudella z
Rakennuksen mitat			
b	48,7	m	Pidemmän sivun leveys
d	18	m	Lyhyemmän sivun leveys
h=z	17,8	m	Korkeus harjalla
Kokonaistuulivoima voimakertoimen avulla laskettuna			
$F_{w,b}$	<u>554,3</u>	kN	Leveyttä b kohti
$F_{w,d}$	<u>150,2</u>	kN	Leveyttä d kohti

Taulukko 8.2 Tuulikuorman laskenta-alustan tulossivu voimakertoimen avulla laskettuna

8.2.2 Pintapaineiden avulla

Pintapaineiden avulla kokonaistuulivoima lasketaan RIL 201-1-2008 mukaisesti seuraavalla kaavalla 4.

$$F_w = \gamma F_{w,e} + F_{w,i} + F_{fr} \quad (4)$$

Lasketaan seuraavaksi kokonaistuulivoima molempiin suuntiin edellä mainitun kaavan mukaisesti. Ennen laskennan aloittamista kerrottakoon, että sisäpuolista kuormaa ei tässä laskennassa oteta huomioon, koska rakennus oletetaan kauttaaltaan tiiviiksi. Lisäksi kitkan vaikutuksetkin voidaan jättää huomioimatta kappaaleessa 5.2.1 mainitun syyn mukaisesti.

Edellä mainittua kaavaa voidaan siis yksinkertaistaa seuraavaan muotoon.

$$F_w = \gamma F_{w,e}$$

$$F_{w,e} = c_s c_d \times \Sigma w_e \times A_{ref}$$

$$w_e = q_p(z_e) \times c_{pe}$$

Rakennuksen geometrian perusteella $h \leq b$, joten puuskanopeuspaine $q_p(z_e)$ on kaikissa korkeusasemissa sama. Tämä nopeuttaa laskentaa, koska tällöin puuskanopeuspainetta ei tarvitse tutkia erikseen eri korkeusasemissa. Tässä laskennassa lasketaan vyöhykkeisiin D ja E vaikuttavat kokonaistuulivoimat, koska ne ovat rakennuksen stabiiliteetin kannalta oleelliset. Alueelle D syntyy painetta ja alueella E imua, joka ilmenee laskelmissa positiivisena ja negatiivisena arvona. Paineesta tulee positiivinen arvo ja imusta negatiivinen. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että voimat vaikuttavat kuitenkin samaan suuntaan vaikka etumerkit ovatkin eri, joten kokonaistuulivoiman laskemiseksi nämä saadut arvot lasketaan yhteen. Lasketaan seuraavaksi kokonaistuulivoima leveyttä b kohti sekä painevyöhykkeelle D, että imuvyöhykkeelle E. Laskennassa nämä on erotettu toisistaan kirjaimin D ja E.

$$w_{e,b,D} = 0,58 \text{ kN/m}^2 \times 0,8 = 0,46 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{w,e,b,D} = 0,85 \times 0,46 \text{ kN/m}^2 \times 867 \text{ m}^2 = 339 \text{ kN}$$

$$w_{e,b,E} = 0,58 \text{ kN/m}^2 \times (-0,5) = -0,29 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{w,e,b,E} = 0,85 \times (-0,29 \text{ kN/m}^2) \times 867 \text{ m}^2 = -214 \text{ kN}$$

$$\gamma_e = 0,85$$

$$F_{w,b} = 0,85 \times (339 + 214) \text{ kN} = 470 \text{ kN}$$

Seuraavaksi lasketaan kokonaistuulivoima leveyttä d kohti.

$$w_{e,d,D} = 0,58 \text{ kN/m}^2 \times 0,72 = 0,42 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{w,e,d,D} = 0,90 \times 0,42 \text{ kN/m}^2 \times 320,4 \text{ m}^2 = 121 \text{ kN}$$

$$w_{e,d,E} = 0,58 \text{ kN/m}^2 \times (-0,33) = -0,19 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{w,e,d,E} = 0,85 \times (-0,19 \text{ kN/m}^2) \times 320,4 \text{ m}^2 = -52 \text{ kN}$$

$$\gamma_e = 0,85$$

$$F_{w,d} = 0,85 \times (121 + 52) \text{ kN} = 147 \text{ kN}$$

Kokonaistuulivoimiksi saatiin siis leveyttä b kohti 470 kN ja leveyttä d kohti 147 kN. Alla olevassa taulukossa 8.3 on vielä Excel-laskenta-alustan laskemat tulokset molempiin suuntiin.

Kokonaistuulivoima pintapaineiden avulla laskettuna

$$F_{w,b} \quad \underline{\underline{469,6 \text{ kN}}} \quad \text{Leveyttä b kohti}$$

[$F_{w,y} = V\ddot{y}$ hykkeet (D+E) * γ_e]
(+)-merkki tarkoittaa, että paine kohdistuu tasoon päin ja (-)-merkki tasosta pois päin, eli ns. imuvoima.

$$F_{w,d} \quad \underline{\underline{148,4 \text{ kN}}} \quad \text{Leveyttä d kohti}$$

Taulukko 8.3 Tuulikuorman laskenta-alustan tulossivu pintapaineiden avulla laskettuna

Pienet erot edellä olevissa tuloksissa johtuvat välivaiheiden pyöristämisistä. Excel laskennassa on laskettu tarkoilla arvoilla koko laskennan ajan, joten niitä arvoja tullaan käyttämään vielä myöhemmissä laskelmissa.

8.3 Lisävaakavoimat

Lisävaakavoimien laskemiseksi selvitetään aluksi rakennuksen yhden kerroksen pystykuormat. Tässä työssä lasketaan vain yhden kerroksen kuormat, kos-

ka kerrokset ovat hyvin toistensa kaltaisia, joten kerrokselle tuleva lisävaakavoimakin on yhtä suuri kerrokselta toiselle.

1.KERROS						
A	704,5 m ²					
						\bar{g}_k
\bar{g}_k ,ontelolaatat	5 kN/m ²					3522,5 kN
\bar{g}_k ,pintavalu	0,5 kN/m ²					352,25 kN
						q_k
						Σg_k
		H		b		
\bar{g}_k ,väliseinät_150	19,12 m	3 m		0,15 m	215,1 kN	
\bar{g}_k ,väliseinät_180	59,76 m	3 m		0,18 m	806,8 kN	
\bar{g}_k ,väliseinät_200	8,43 m	3 m		0,2 m	126,5 kN	
						q_k
\bar{g}_k ,eriste	0,09 kN/m ²			$b_{\text{sisäkuori}}$	Eriste	$b_{\text{ulkokuori}}$
\bar{g}_k ,ulkoseinät_kantava	35,7 m	3 m		0,15	0,2	0,085
\bar{g}_k ,ulkoseinät_ei-kantava	98,1 m	3 m		0,1	0,2	0,085
						638,9 kN
						1387,6 kN
						7049,5 kN
						q_k
q_k ,hyötykuormat	2,5 kN/m ²					1761,3 kN
q_k ,kevyet väliseinät	0,5 kN/m ²					352,3 kN
						2113,5 kN
						9163,0 kN

Taulukko 8.4 Kerrokselle tulevat pystykuormat

Lisävaakavoiman laskemiseksi käytetään kaavaa, joka näytettiin luvussa 5.2.2.

$$\theta_i = \theta_0 \times \alpha_h \times \alpha_m \quad (10)$$

$$\theta_0 = 1/200$$

$$\alpha_h = 2/\sqrt{18}; 2/3 \leq \alpha_h \leq 1 \quad (11)$$

$$\alpha_h = 0,47 \rightarrow \alpha_h = 0,67$$

$$\alpha_m = 0,76$$

$$\theta_i = 1/200 \times 0,67 \times 0,76 \quad (10)$$

$$\theta_i = 1/393$$

Mittaepätarkkuuksista johtuvat lisävaakavoimat saadaan laskettua vinouden avulla edellä mainittuja kaavoja hyväksikäyttäen seuraavasti:

$$H_{gk} = (1/393) \times 7049,5kN = 17,94kN$$

$$H_{qk} = (1/393) \times 2113,5kN = 5,38kN$$

Kokonaislisävaakavoimat saadaan laskettua kertomalla edellä saadut arvot kerrosten lukumäärällä.

$$H_{gk,tot} = 17,94kN \times 4 = 71,76kN$$

$$H_{qk,tot} = 5,38kN \times 4 = 21,52kN$$

8.4 Poikittaisvoimien jakaumat

Tässä työssä lasketaan esimerkkikohteen poikittaisvoimien jakaumat 1.kerroksessa Excel-laskentataulukon avulla, ja myöhemmin vertaillaan vielä Excelillä saatuja tuloksia Autodesk Robotiin tehtyyn laskentamalliin. Yhden seinän saamien poikittaisvoimien suuruuden laskentaan perehdytään tarkemmin.

Ennen laskennan aloittamista lasketaan vielä x- ja y-suuntaan vaikuttavat vaakavoimat yhteen. Vaakavoimat koostuvat tuuli- ja lisävaakavoimasta.

$$F_{k,x} = 148,4kN + 21,52kN + 71,76kN = 241,7kN$$

$$F_{d,x} = (148,4kN + 21,52kN) \times 1,5 + 71,76kN \times 1,15 = 337kN$$

$$F_{k,y} = 469,6kN + 21,52kN + 71,76kN = 562,9kN$$

$$F_{d,y} = (469,6kN + 21,52kN) \times 1,5 + 71,76kN \times 1,15 = 819kN$$

Seuraavassa taulukossa 8.5 on esitetty sekä x- ja y-suuntaisten seinien saamat poikittaisvoimat.

Poikittaisvoimien jakaumat

X-SUUNTAISET							
Seinä	Leveys	Pituus	Korkeus	y	Jäykkyys	Q_x (kN)	v (mm)
S1	0,15	4,8	3,0	6,4	3318	74	0,02
S2	0,15	4,8	3,0	8,2	3318	74	0,02
S3	0,20	2,7	3,0	12,8	1008	22	0,02
S4	0,20	2,6	3,0	14,5	880	20	0,02
S5	0,15	4,8	3,0	9,3	3318	74	0,02
S6	0,15	4,8	3,0	11,1	3318	74	0,02
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0	0	0,00
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0	0	0,00
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0	0	0,00
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0	0	0,00
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0	0	0,00
Σ					15162	337	kN

Y-SUUNTAISET							
Seinä	Leveys	Pituus	Korkeus	x	Jäykkyys	Q_y (kN)	v (mm)
S11	0,15	14,6	3,0	0,0	29 049	179	0,01
S12	0,18	6,4	3,0	8,7	7 788	49	0,01
S13	0,18	6,4	3,0	8,7	7 788	49	0,01
S14	0,18	6,3	3,0	17,5	7 600	48	0,01
S15	0,18	6,3	3,0	17,5	7 600	48	0,01
S16	0,20	3,1	3,0	22,7	1 431	9	0,01
S17	0,18	2,9	3,0	25,8	1 093	7	0,01
S18	0,18	6,3	3,0	25,8	7 600	48	0,01
S19	0,18	6,3	3,0	30,5	7 600	48	0,01
S20	0,18	6,3	3,0	30,5	7 600	48	0,01
S21	0,18	6,3	3,0	39,3	7 600	49	0,01
S22	0,18	6,3	3,0	39,3	7 600	49	0,01
S23	0,15	14,6	3,0	48,0	29 049	188	0,01
Σ					129 400	819	kN

Taulukko 8.5 Poikittaisvoimien jakauma laskenta-alustan tulossivu

Tarkastellaan seinän S1 jäykkyyden laskentaa tarkemmin. Lasketaan seinän jäykkyys x-suuntaan. Y-suunnan jäykkyys voidaan jättää huomiotta sen jäädessä niin pieneksi ja laskennassa ollaan varmallalla puolella, kun otetaan x- ja y-suunnan kuormat vastaan vain niiden suuntaisilla seinillä.

$$\frac{1}{k_x} = \frac{H^3}{3EI_x} + \kappa_x \times \frac{H}{GA} \quad (13)$$

$$\kappa_x = \frac{A}{I_x^2} \times \int \frac{S(x)^2}{t(x)} dx \quad (15)$$

$$\kappa_x = \frac{0,72m^2}{(1,37m^4)^2} \times ((1/20) \times 0,15m \times (2,39m)^5) = 0,225$$

$$\frac{1}{k_x} = \frac{(3m)^3}{3 \times 30\,000MN/m^2 \times 1,37m^4} + 0,225 \times \frac{3m}{11\,538 \times 0,72m^2} = 0,000301$$

$$k_x = 3318MN/m$$

Rakennuksen mastot eivät sijaitse rakennuksessa symmetrisesti, joten vaaka-kuormien resultantit eivät kulje rakennuksen kiertokeskiön kautta, joka aiheuttaa tasolle kiertymän ja momentin kiertokeskiön suhteen. Lasketaan seuraavaksi rakennuksen kiertokeskiö.

$$X = \frac{(29\,049MN/m \times 0,00m + 7\,788MN/m \times 8,7m \dots)}{129\,400MN/m} = 23,81m$$

$$Y = \frac{(3\,318MN/m \times 6,4m + 3\,318MN/m \times 8,2m \dots)}{15\,162MN/m} = 9,35m$$

Momentti saadaan laskettua nyt, kun tiedetään kiertokeskiön sijainti ja tästä aiheutuva momenttivarsi x- ja y-suuntaisten voimien resultanttien sijainnin suhteen.

$$M = F_Y \times x_1 - F_X \times y_1 \quad (18)$$

$$M = 819kN \times (23,81m - 48m/2) - 337kN \times (9,35m - 18m/2) = 278kNm$$

Kun tiedetään momentti, saadaan laskettua välipohjan kiertymä seuraavia laskentataulukosta saatuja tuloksia käyttäen:

KIERTYMÄ

	y_i (m)	k_x (MN/m)	$k_x \cdot y_i^2$
S1	-2,98	3318	29494
S2	-1,13	3318	4247
S3	3,49	1008	12272
S4	5,15	880	23323
S5	-0,08	3318	22
S6	1,77	3318	10382
		Σ	79 739

	x_i	k_y (MN/m)	$k_y \cdot x_i^2$
S11	-23,81	29049	16461674
S12	-15,08	7788	1769998
S13	-15,08	7788	1769998
S14	-6,33	7600	304089
S15	-6,33	7600	304089
S16	-1,08	1431	1655
S17	1,94	1093	4135
S18	1,94	7600	28741
S19	6,70	7600	341648
S20	6,70	7600	341648
S21	15,45	7600	1815291
S22	15,45	7600	1815291
S23	24,19	29049	17004440
		Σ	41 962 697

Taulukko 8.6 Kiertymän laskentaan tarvittavat arvot

Välipohjan kiertymän laskenta:

$$\varphi = \frac{0,278MNm}{79\,739MNm + 41\,962\,697MNm} = 6,607 \times 10^{-9}$$

Kun lasketaan vielä siirtymät x- ja y-suunnassa, saadaan laskettua mastoon kohdistuva kuormitus epäsymmetrisesti sijaitsevien osamastojen tapauksessa seuraavasti:

$$Q_x = k_x v_x - k_x y \varphi \quad (24)$$

$$v_x = \frac{F_x}{\Sigma k_x} \quad (21)$$

$$v_x = \frac{337kN}{15\,161\,969kN/m} = 0,02mm$$

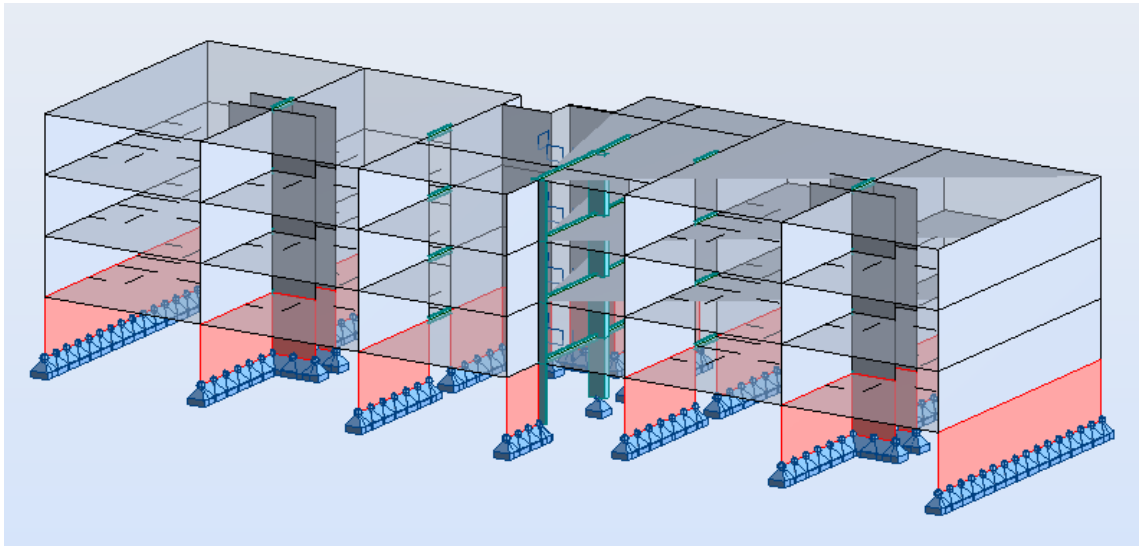
$$Q_x = 3\,318\text{MN/m} \times 0,00002\text{m} - \frac{3\,318\text{MN}}{\text{m}} \times (-2,98\text{m}) \times 6,607 \times 10^{-9}$$

$$= 0,0738\text{MN} = \sim 74\text{kN}$$

Jäykistävälle seinälle S1 saadaan tasojen jakamaksi vaakakuormaksi siis noin 74 kN, joka vastaa Excelistä saatua tulosta. Muiden osamastojen vastaanottamat kuormat näkyvät taulukossa 8.5. Seuraavaksi vertaillaan vielä Autodesk Robotilla saatuja tuloksia tässä laskettuihin osamastojen saamiin kuormituksiin.

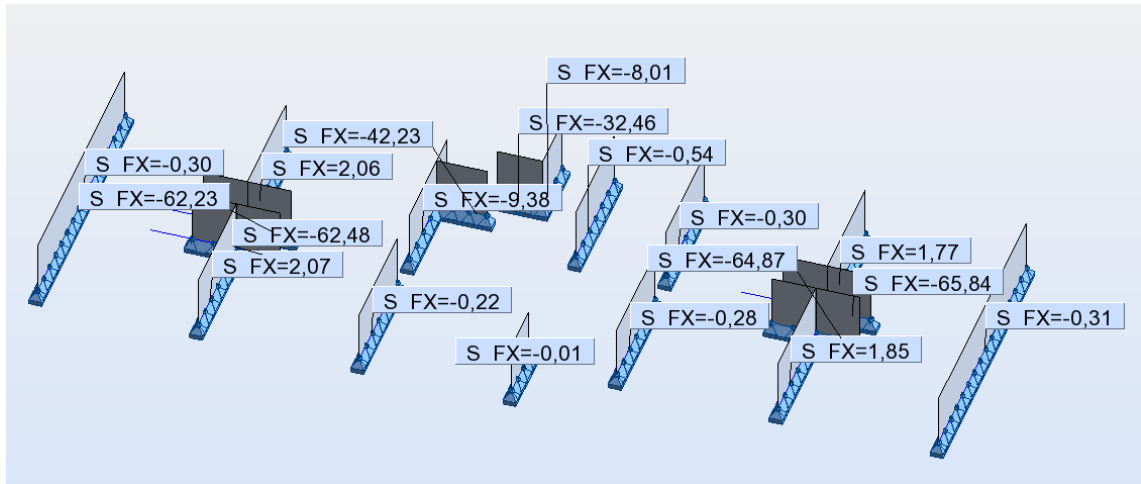
9 Autodesk Robotin ja laskentataulukon vertailu

Esimerkkikohte on mallinnettu Autodesk Robot Structural Analysis-ohjelmaan ja ohessa on kuva tehdystä mallista (kuva 9.1).



Kuva 9.1 Esimerkkikohteen FEM-laskentamalli

Tarkastellaan kuormituksena edellisessä kappaleessa laskemaani kokonaisvaakavoimaa x- ja y-suuntaan ja katsotaan, saadaanko samansuuntaisia tuloksia kuin Excel-laskennalla ja arvioidaan tulosten luotettavuutta. Seinät, joita tarkastellaan, ovat kuvassa 9.1 punaisena. Tarkastellaan aluksi x-suuntaisia seinä, jotka saavat 337 kN suuruisen vaakakuormituksen.



Kuva 9.2 X-suuntaisten vaakakuormien jakaantuminen

Kuvasta 9.2 nähdään, että Robotissa vaakakuormat jakaantuvat sekä x- että y-suuntaisille seinille kuormituksen ollessa x-suuntainen, joten laskennan voidaan olettaa olevan käsinlaskua tarkempi. Käsinlaskennassakin tämä olisi voitu ottaa huomioon, mutta niin kuin kuvasta nähdään, niin x-suuntaisista seinistä irrallaan olevat y-suuntaiset seinät ottavat hyvin vähän x-suuntaista kuormitusta vastaan. Robotissa x- ja y-suuntaiset yhdistyneet seinät ovat yhtenäisiä poikkileikkauksia, joten niiden ottamat kuormitukset ovat suurempia kuin käsinlaskennassa tarkasteltaessa pelkkiä suorakaidepoikkileikkauksia. Seuraavassa taulukossa 9.1 on taulukoitu Excel-laskennan ja Robotin laskelmien välinen ero.

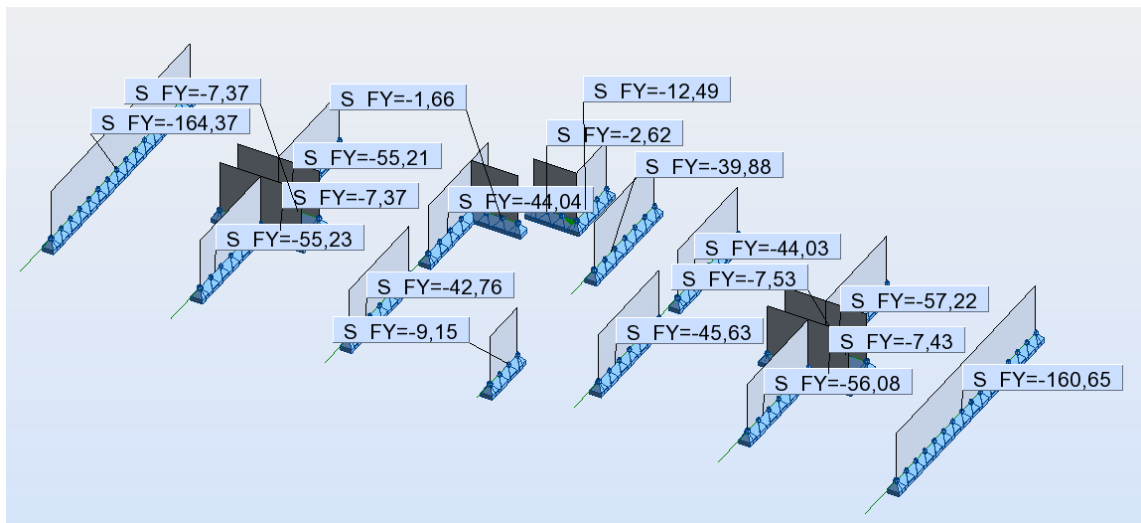
EXCELIN JA ROBOTIN TULOSVERTAILU

	EXCEL	ROBOT	
S1	74	62,5	kN
S2	74	62,2	kN
S3	22	42,2	kN
S4	20	32,5	kN
S5	74	64,9	kN
S6	74	65,8	kN
Σ	338	330,1	kN

Taulukko 9.1 X-suuntaisten seinien tulosten vertailua

Huomataan, että Robotissa noin 8 kN jakaantuu myös y-suuntaisille seinille ja lisäksi seinät S3 ja S4 ottavat huomattavasti enemmän kuormaa käsinlaskuun verrattuna johtuen niiden ollessa huomattavasti jäykempiä johtuen yhdistetystä

poikkileikkauksesta suorakaidepoikkileikkauksen sijaan. Seuraavaksi tarkastellaan y-suuntaisten vaakavoimien jakaantumista jäykistäville seinille.



Kuva 9.3 Y-suuntaisten vaakakuormien jakaantuminen

Kuvasta 9.3 voidaan tehdä samat havainnot kuin edellisessäkin tapauksessa. X-suuntaisista mastoista tulee jäykempiä niiden ollessa liittoksissa y-suuntaiseen mastoon, joten niille kertyvä kuorma on suurempi jäykkyyden lisääntyessä. Seuraavassa taulukossa 9.2 on taulukoitu y-suuntaisten voimien jakaantumisen ero Excelin ja Robotin välillä.

	EXCEL	ROBOT	
S11	179	164,4	kN
S12	49	55,2	kN
S13	49	55,2	kN
S14	48	42,8	kN
S15	48	44	kN
S16	9	12,5	kN
S17	7	9,2	kN
S18	48	39,9	kN
S19	48	45,6	kN
S20	48	44	kN
S21	49	56,1	kN
S22	49	57,2	kN
S23	188	160,7	kN
Σ	819	786,8	kN

Taulukko 9.2 Y-suuntaisten seinien tulosten vertailua

Taulukosta nähdään, että y-suuntaisesta vaakakuormasta jakaantuu myös x-suuntaisille seinille noin 32 kN.

Tulosten analysointi

Excelissä ja Robotissa laskettujen tulosten välillä on pientä eroa. Yksi asia, joka vaikuttaa laskentaan, on Robotissa mallinnettujen seinien muodostuminen yhdistyneeksi poikkileikkaukseksi, jolloin sen jäykkyys sekä x- ja y-suunnassa kasvaa. Tämä johtaa siihen, että myös niiden vastaanottamat kuormitukset kasvavat x- ja y-suunnassa verrattuna erillisiin suorakaidepoikkileikkauksiin, jotka ottavat hyvin vähän kuormaa heikomman jäykkyyden suuntaisesti. Tästä on esimerkkinä y-suuntainen seinä S14, joka ottaa x-suuntaista kuormaa vain 0,01 kN Robotin mukaan. Verrattuna y-suuntaiseen seinään S-15, joka on yhdistynyt seinään S-3 ja ottaa x-suuntaista kuormitusta vastaan 9,38 kN. Kuormitukset, jotka suorakaidepoikkileikkaus masto ottaa jäykkyydeltään heikommassa suunnassa, ovat hyvin pieniä ja näin ne voidaan jättää pois laskelmista niin kuin tekemässäni Excel-laskennassa on tehty.

Molemmat laskennat osoittavat mielestäni sen, että tulokset ovat luotettavia ja käyttökelpoisia työkaluja myös jatkossa.

10 Yhteenveto ja pohdinta

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia poikittaisvoimien jakautumista jäykistävälle rakenneosille sekä tehdyn Excel-laskentaohjelman avulla että Autodesk Robot Structural Analysis -ohjelmalla. Aluksi oli tarkoitus tutkia vielä Autodesk Robotin ja Tekla Structures -ohjelmien välistä linkkiä, jossa laskentamalli olisi saatu siirrettyä suoraan Teklasta Robotiin. Mutta tästä tavoitteesta päätettiin luopua ja sitä olisi hyvä tutkia vielä jatkossa. Näiden lisäksi oli tavoitteena tuottaa tuulikuorman laskennasta Excel-laskentatyökalu.

Kaikki alkuperäiset tavoitteet onnistuivat tässä opinnäytetyössä edellä mainittua muutosta lukuun ottamatta ja työnä tämä oli hyvin työläs mutta myös opettavainen. Uskon että Robotista saatava hyöty rakennesuunnittelussa on todella iso, mutta sen opettelu vaatii paljon aikaa ja vaivaa. Tuulikuormasta sain luotua yk-

sinkertaisen ja helppokäyttöisen laskentaohjelman, josta uskon olevan hyötyä tilaajalle myös jatkossa.

Robotin käytössä ja siitä kaiken hyödyn irti saamisessa on paljon opeteltavaa vielä jatkoa ajatellen. Mutta tähän opinnäytetyöhön tarvittavat tulokset saatiin sieltä vertailuja varten ja tulokset ja niiden väliset eroavaisuudet olivat ymmärrettäviä.

Kuvat

Kuva 2.1 Porthania instituutin runkoelementtien asennusta, s.7

Kuva 5.1 Lumikuorman ominaisarvo maassa, s.13

Kuva 5.2 Rakennekertoimen $c_s c_d$ määrittäminen, s.17

Kuva 5.3 Nopeuspainekorkeus z_e riippuen rakennuksen korkeudesta h ja leveydestä b , s.20

Kuva 5.4 Pystyseiniä varten vyöhykekaavio, s.21

Kuva 6.1 Maston taivutuksen ja leikkauksen aiheuttamat siirtymät, s.27

Kuva 8.1 1.krs tasopiirustus, johon jäykistävät seinät ovat merkittynä, s.31

Kuva 9.1 Esimerkkikohteen FEM-laskentamalli, s.41

Kuva 9.2 X-suuntaisten vaakakuormien jakaantuminen, s.42

Kuva 9.3 Y-suuntaisten vaakakuormien jakaantuminen, s.43

Taulukot

Taulukko 4.1 Murtorajatilan kuormitusyhdistelmät STR-rajatilassa, s.10

Taulukko 4.2 Käyttörajatilan kuormitusyhdistelmät, s.11

Taulukko 4.3 Kuormien yhdistelykertoimet murto- ja käyttörajatilassa, s.12

Taulukko 5.1 Lumikuorman muotokertoimet, s.13

Taulukko 5.2 Rakennusten välipohjien, parvekkeiden ja portaiden hyötykuormat, s.14

Taulukko 5.3 Käyttöluokat, s.15

Taulukko 5.4 Ulkopuolisen paineen kertoimien suositusarvot pystyseinille, s.21

Taulukko 8.1 Excel laskenta-alustan lähtötiedot, s.32

Taulukko 8.2 Tuulikuorman laskenta-alustan tulossivu voimakertoimen avulla laskettuna, s.33

Taulukko 8.3 Tuulikuorman laskenta-alustan tulossivu pintapaineiden avulla laskettuna, s.35

Taulukko 8.4 Kerrokselle tulevat pystykuormat, s.36

Taulukko 8.5 Poikittaisvoimien jakauma laskenta-alustan tulossivu, s.38

Taulukko 8.6 Kiertymän laskentaan tarvittavat arvot, s.40

Taulukko 9.1 X-suuntaisten seinien tulosten vertailua, s.42

Taulukko 9.2 Y-suuntaisten seinien tulosten vertailua, s.43

Lähteet

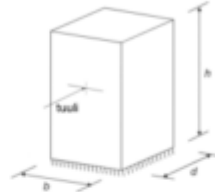
1. Elementtisuunnittelu – Elementtirakentamisen historia
<http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/valmisosarakentaminen/elementtirakentamisen-historia>
2. RIL 201-1-2008 Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Suunnittelu-
perusteet ja rakenteiden kuormat.
3. SFS EN 1990+A1+AC. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet.
4. Liikennevirasto – Eurokoodin soveltamisohje. Geotekninen suunnittelu –
NCCI7
http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2013-35_ncci7_web.pdf
5. Elementtisuunnittelu – Eurokoodi mitoituksen perusteet
http://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/23181/Leaflet_1_Eurokoodi_mitoituksen_perusteet.pdf
6. Kansallinen liite standardiin SFS EN 1991-1-3. Eurokoodi. Rakenteiden
kuormat. Lumikuormat.
7. SFS EN 1991-1-3+AC. Eurokoodi. Rakenteiden kuormat. Lumikuormat
8. SFS EN 1991-1-1+AC. Eurokoodi. Rakenteiden kuormat. Yleiset kuor-
mat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat.
9. SFS EN 1991-1-4+AC+A1. Eurokoodi. Rakenteiden kuormat. Tuulikuor-
mat.
10. SFS EN 1992-1-1+AC. Eurokoodi. Betonirakenteiden suunnittelu.
11. Elementtisuunnittelu – Jäykistysjärjestelmät
<http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/rakennuksen-jaykistys/jaykistysjarjestelmat>
12. RTT Rakennustuoteteollisuus ry. Elementtirakennuksen jäykistys. Val-
misosarakentaminen II, osa G.
13. Elementtisuunnittelu - Laskentaperiaatteet
[http://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/22634/Laskentaperiaatteet.p
df](http://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/22634/Laskentaperiaatteet.pdf)

Liite 1 Tuulikuorman laskennan tulossivu (1 sivu)

		Tuulikuorman laskenta	
		Tekijä: JNo	
		Päiväys: 13.5.2014	
Rakennuskohde: xxx	Työ no: xxx	Sisältö: Kokonaistuulivoiman laskenta	Sijainti xxx
Tuulikuorma RIL 201-1-2008 mukaan			

Maastoluokka ML3
 Puuskanopeuspaine 0,58 kN/m² Korkeudella z

Rakennuksen mitat
 b 48,7 m Pidemmän sivun leveys
 d 18 m Lyhyemmän sivun leveys
 h=z 17,8 m Korkeus harjalla



Kokonaistuulivoima voimakertoimen avulla laskettuna

$F_{w,y}$ 554,3 kN Leveyttä b kohti
 $F_{w,x}$ 150,2 kN Leveyttä d kohti

Kokonaistuulivoima pintapaineiden avulla laskettuna

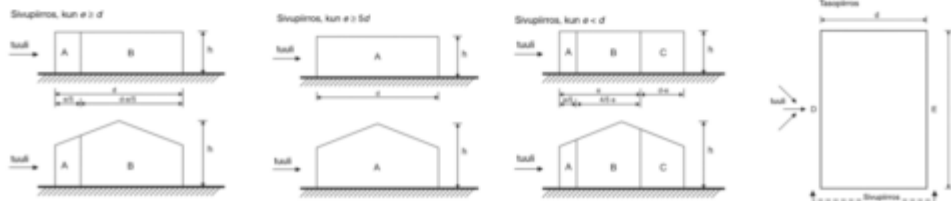
$F_{w,y}$ 469,6 kN Leveyttä b kohti

[$F_{w,x}$ = Vyöhykkeet (D+E) * ye]
 (+)-merkki tarkoittaa, että paine kohdistuu tasoon päin ja (-)-merkki tasosta pois päin, eli ns. imuvoima.

$F_{w,x}$ 148,4 kN Leveyttä d kohti

Vyöhykkeisiin kohdistuvat kuormat Vyöhykeleveydet

A	-74,8 kN	7,12 m
B	-76,2 kN	10,88 m
C	0,0 kN	0 m
D	340,5 kN	48,7 m
E	-211,9 kN	48,7 m
A	-40,0 kN	3,6 m
B	-106,8 kN	14,4 m
C	-142,3 kN	30,7 m
D	119,4 kN	18 m
E	-55,2 kN	18 m



Liite 2 Poikittaisvoimien jakauman tulossivu (1 sivu)

		Poikittaisvoimien jakaumat	
		Tekijä: JNo	
		Päiväys: 13.5.2014	
Rakennuskohde: xxx xxx	Työ no: xxx	Sisältö: xxx	Sijainti xxx

Rakennuksen geometria

b	48,00 m	Leveys x-suuntaan	x	23,81 m
d	18,00 m	Leveys y-suuntaan	y	9,35 m

Kiertokeskiö O

Poikittaisvoimat

Fx	337 kN	Vaakavoima x-suuntaan	x	0,19 m
Fy	819 kN	Vaakavoima y-suuntaan	y	-0,35 m
M	277,78 kNm	Jäykistysjärjestelmän momentti		

Momenttivarsi

Kokonaissiritymät

vx	0,02 mm
vy	0,01 mm

Poikittaisvoimien jakaumat

X-SUUNTAISET								
Seinä	Leveys	Pituus	Korkeus	y	Jäykkyys	Q _x (kN)	v (mm)	
S1	0,15	4,8	3,0	6,4	3318	74	0,02	
S2	0,15	4,8	3,0	8,2	3318	74	0,02	
S3	0,20	2,7	3,0	12,8	1008	22	0,02	
S4	0,20	2,6	3,0	14,5	880	20	0,02	
S5	0,15	4,8	3,0	9,3	3318	74	0,02	
S6	0,15	4,8	3,0	11,1	3318	74	0,02	
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0	0	0,00	
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0	0	0,00	
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0	0	0,00	
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0	0	0,00	
0	0,00	0,0	0,0	0,0	0	0	0,00	
					Σ	15162	337	kN

Y-SUUNTAISET								
Seinä	Leveys	Pituus	Korkeus	x	Jäykkyys	Q _y (kN)	v (mm)	
S11	0,15	14,6	3,0	0,0	29 049	179	0,01	
S12	0,18	6,4	3,0	8,7	7 788	49	0,01	
S13	0,18	6,4	3,0	8,7	7 788	49	0,01	
S14	0,18	6,3	3,0	17,5	7 600	48	0,01	
S15	0,18	6,3	3,0	17,5	7 600	48	0,01	
S16	0,20	3,1	3,0	22,7	1 431	9	0,01	
S17	0,18	2,9	3,0	25,8	1 093	7	0,01	
S18	0,18	6,3	3,0	25,8	7 600	48	0,01	
S19	0,18	6,3	3,0	30,5	7 600	48	0,01	
S20	0,18	6,3	3,0	30,5	7 600	48	0,01	
S21	0,18	6,3	3,0	39,3	7 600	49	0,01	
S22	0,18	6,3	3,0	39,3	7 600	49	0,01	
S23	0,15	14,6	3,0	48,0	29 049	188	0,01	
					Σ	129 400	819	kN