

Jari Holopainen

Puurakenteisen rakennusrungon jäykistäminen puurakenteisilla tasoilla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

21.4.2016

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Jari Holopainen Puurakenteisen rakennusrungon jäykistäminen puurakenteisilla tasoilla 39 sivua + 4 liitettä 21.4.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Rakennesuunnittelija dipl.ins, Heikki Kivinen Lehtori, Jouni Kalliomäki
<p>Opinnäytetyössä oli tavoitteena tuoda esille tason jäykkyyden merkitys rakenteen toimintaan ja mikä vaikutus on niin sanotun ”jäykän ja taipuisan” tason ero rakenteita mitoitettaessa. Työssä esitellään rakennuksissa yleisimmin käytetyt jäykistystavat ja periaatteet jäykistelaskentaan.</p> <p>Tutkimuksessa on tarkasteltu välipohjan jäykkyyden merkitystä rakennuksen jäykistystarkastelussa. Yksi perustavaa laatua oleva kysymys tutkimuksessa oli, mikä merkitys on välipohjan jäykkyydellä, kun rakennuksen runkoon kohdistuva vaakakuorma (esimerkiksi tuulikuorma) jakautuu välipohjalta edelleen pystyrakenteille. Työssä on käsitelty taipuisan ja jäykän välipohjarakenteen vaikutusta rakenneosien voimajakaumaan. Työssä tuodaan esille myös ongelmia, mitä rakennuksien jäykistyslaskennassa on hyvä huomioida. Alkuelvitysosio käsittelee voimien jakautumista palkkimallin avulla, jossa tutkittiin vaaka- ja pystyrakenteiden jäykkyyksien ja sijaintien vaikutusta voimajakaumaan. Tutkimusosio käsittelee voimien jakautumista kolmen rakennuksen avulla, joissa voimien jakautumista havainnollistettiin vaaka- ja pystyrakenteiden eri jäykkyyksillä.</p> <p>Tulokset osoittavat, että vaaka- ja pystyrakenteiden jäykkyydellä on merkitystä rakenteiden ja rakennuksien voimajakaumaan. Vaakavoimat jakaantuvat pystyrakenteille niiden jäykkyyksien suhteessa, kun kyseessä on äärettömän jäykkä vaakarakenne. Vaakarakenteen ollessa taipuisa pystyrakenteille tulevat voimat jakaantuvat tukien sijaintien ja jäykkyyksien ja tason jäykkyyden perusteella. FEM-mallintamisessa on kiinnitettävä huomiota rakenteiden liittymiin, vapausasteisiin ja elementtimallintamiseen. Tutkimus osoittaa myös, että FEM-ohjelmien tuottamien tulosten analysointi vaatii erityistä tarkkaavaisuutta.</p> <p>Johtopäätöksenä voidaan todeta, että rakennusten jäykistämiseen taipuisilla tasoilla on hyvä kiinnittää erityistä huomiota. Mikäli kuormituksesta aiheutuu rakennukseen vääntöä, tulisi äärettömän jäykän välipohjan oletusta käyttää harkiten.</p> <p>Jatkotutkimuksena tulisi selvittää puuvälipohjarakenteen ortotrooppisen materiaalmallin vaikutusta vaakavoimien jakautumiseen pystyrakenteille. FEM-ohjelmien liitoksien mallintaminen vaatii myös lisäselvittämistä.</p>	
Avainsanat	Tasojen jäykistäminen, Tason jäykkyys, Rakennusten jäykistäminen, Taipuisa taso

Author Title	Jari Holopainen Stiffening of Wooden Building Frame with Wooden Diaphragms
Number of Pages Date	39 pages + 4 appendices 21 April 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructors	Heikki Kivinen, Master of engineering Jouni Kalliomäki, Senior Lecturer
<p>The goal of this thesis was to analyse the importance of stiffness of floor or roof structure in a lateral force resisting system. Is the aim was to determine the difference between the stiff diaphragm and flexible diaphragm in the design of structures. The thesis presents most commonly used methods of building a stiffening system and principles for designing the lateral force resisting system.</p> <p>The thesis consists of two sections. The initial section discusses the distribution of forces in the beam model and latter section discusses the distribution of forces in the FEM model.</p> <p>The results show that stiffness of horizontal and vertical structures influence the lateral force distribution in lateral force resisting system. Horizontal forces are divided into vertical structures in proportion to their rigidity, in the case of rigid diaphragm. When the diaphragm is flexible, lateral forces are distributed onto vertical structures based on their distances, rigidity and rigidity of the diaphragm.</p> <p>When calculating a lateral force resisting system with FEM – program, in the designing, attention should also be paid to joints of element, releases and types of elements used. The research also shows that the results, which are produced with the FEM - programs, have to be analyzed very carefully.</p> <p>In conclusion, bracing of buildings with wooden levels should be paid special attention. If the load causes torque to the building, use of the rigid diaphragm level should be considered carefully.</p> <p>Further research could concentrate on how orthotropic material model of the flexible diaphragm affects distribution of the lateral forces for the vertical structures. FEM modelling of structure joints also requires further analysis.</p>	
Keywords	Lateral force resisting system, Stiffness of diaphragm, Flexible diaphragm

Alkulause

Opinnäytetyö tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoululle. Haluan kiittää koulun ohjaajaa lehtori Jouni Kalliomäkeä työn ohjeistuksesta ja asiasisällön tarkastuksesta.

Haluan myös kiittää Vahanen rakennesuunnittelu Oy:tä mahdollisuudesta tehdä opinnäytetyö sekä erityisesti Marko Latvalaa ja Ville Nevalaista opinnäytetyöaiheesta. Haluan kiittää diplomi-insinööri Heikki Kivistä erinomaisesta työnohjauksesta ja ideoinnista. Kiitokset myös muille Vahanen Oy:n työntekijöille avustamisesta työn tekemisessä.

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tavoitteet	2
1.2	Työn rajaus	2
1.3	Rakennuksen rungon jäykistyksen suunnittelu ja suunnittelun kriteerit	2
1.3.1	Jäykistys suunnittelun tehtävät	2
1.4	Mitoitusehdot eurokoodista	3
1.4.1	Rungon ja jäykistyksen mitoitus murtorajatilassa	3
1.4.2	Rungon ja jäykistyksen mitoitus käyttörajatilassa	3
2	Jäykistysjärjestelmät	4
2.1	Mastojäykistys	4
2.1.1	Mastopilarijäykistys	4
2.1.2	Mastoseinäjäykistys	5
2.1.3	Kotelomainen mastojäykiste	6
2.2	Rankalevyseinäjäykistys	7
2.4	Kehäjäykistys	8
2.5	Ristikkojäykistys	9
2.6	Yhdistelmäjäykistys	10
3	Jäykistelaskennan teoriaa	11
3.1	Vaakarakenteiden jäykkyys	11
3.2	Pystyrakenteiden jäykkyys	12
3.3	Kiertokeskiön määrittäminen	15
3.3.1	Kiertokeskiön vaikutus laskentaan	15
3.4	Tason kiertymä	16
3.5	Pystyrakenteiden siirtymät	17
3.6	Vaakavoimien jakautuminen pystyrakenteille	18
4	FEM-ohjelman käyttö jäykistys suunnittelussa	19
5	Yksikerroksisessa jäykistejärjestelmässä vaakataso jäykkyyden vaikutus vaakakuormien jakautumisessa pystyjäykisteille	21
5.1	Alustavan selvityksen kuvaus	21
5.2	Alustavat selvitykset tutkimukseen	22

5.3	Tulosten analysointi	25
6	Tason jäykkyyden vaikutus kuormien jakautumiseen	27
6.1	Tutkimuksen kuvaus	27
6.2	Vaakakuorma	29
6.3	Tutkimuksen tulokset	29
6.3.1	Tason vaakasuuntaiset kiertymät	29
6.3.2	Leikkausvoimat pystyrakenteille	29
6.3.3	Momentit pystyrakenteille	31
6.3.4	Vaakasuuntaiset siirtymät	33
6.4	Tulosten yhteenveto	35
7	Johtopäätökset	37
8	Jatkotutkimustarpeet	38
	Lähteet	39
	Liitteet	
	Liite 1. Esimerkkirakennus käsinlaskenta	
	Liite 2. Esimerkkirakennus 1, FEM - Laskelma	
	Liite 3. Esimerkkirakennus 2, FEM - Laskelma	
	Liite 4. Esimerkkirakennus 3, FEM - Laskelma	

Lyhenteet ja käsitteet

FEM (*Finite Element Method*) elementtimenetelmä, joka on pääasiallinen las-
kentamenetelmä tietokoneiden mitoitusohjelmissa

Isotrooppinen materiaali

Tarkoittaa, että materiaalin lujuusominaisuudet ovat tarkastelusuunnasta riippumattomia

Ortotrooppinen materiaali

Tarkoittaa, että materiaalin lujuusominaisuudet ovat tarkastelusuunnasta riippuvaisia

OSB-levy (*Oriented Strand Board*) on rakentamisessa käytetty lastulevytyyppi

Pystyrakenne

Tarkoittaa tässä työssä seinärakennetta

ROBOT (*Robot structural analysis professional*) on elementtimenetelmää käyttävä
mitoitusohjelma.

Vaakarakenne

Tarkoittaa tässä työssä välipohja- tai yläpohjarakennetta

1 Johdanto

Vastaavan rakennesuunnittelijan yksi oleellisimpia perustehtäviä on todeta rakennusrungon kokonaisvakavuuden olevan kunnossa. Tämä vaatii, että rakennesuunnittelijalla on käsitys rakennusrungon jäykistävästä rakenteista eli rungon jäykistejärjestelmästä ja sen toiminnasta.

Rakenteiden jäykistysjärjestelmän suunnittelussa yksi kriittinen ratkaistava asia on vaakakuormien voimansiirtoreitti pystysuuntaisille jäykisterakenteille, joista voiman on jatkettava matkaansa pystyrakenteiden perustuksille ja sieltä edelleen maaperään.

Runkoon kohdistuvan vaakakuorman horisontaalina voimansiirtoreittinä on usein vaakajäykiste, esim. jäykkä tai taipuisa vaakasuuntainen levyrakenne (välipohja / katto-rakenne). Kevytrakenteisissa rakennuksissa esimerkiksi teräshalleissa joudutaan joskus käyttämään myös vaaka- tai pystysuuntaisia ristikkorakenteita. Usein stabiliteettitarkastelussa suunnittelija olettaa vaakajäykisteen olevan ns. ”jäykkä taso” eli vaakakuormien kohdistuessa rakennuksen runkoon, pystyjäykisteiden deformaatio on moninkertainen verrattuna niihin liitoksissa olevan levyn eli tason deformaatioon. Mikäli taso onkin joustavampi mitä on oletettu, tämä voi johtaa stabiliteettitarkastelussa jäykisterakenteiden alimitoitukseen sekä virheelliseen arvioon jäykisterakenteille jakautuvista vaakakuormista.

Rakenneratkaisussa käytettävät liitosperiaatteet voivat osaltaan heikentää merkittävästi jäykisterakenteen jäykkyyttä.

Eri rakennejärjestelmien, rakennusmateriaalien ja kustannustehokkaiden rakenneratkaisujen yhteensovittaminen on aina haaste rakennusprojekteissa. Täten on ensisijaisen tärkeää jo rakennusprojektin alkuvaiheessa saada oikea käsitys rungon toiminnasta ja toimintaan vaikuttavista tekijöistä.

1.1 Tavoitteet

Opinnäytetyössä on tavoitteena tuoda esille tason jäykkyyden merkitys rakenteen toimintaan ja mikä vaikutus on niin sanotun ”jäykän ja taipuisan” tason erolla rakenteita mitoitettaessa. Työssä tuodaan esille myös erityiset suunnittelutarpeet, jotka taipuisien rakenteiden suunnittelussa tulee huomioida ja esitellään yleisimmät jäykistejärjestelmät.

1.2 Työn rajaus

Työssä ei huomioida rakennusrungon värähtelyä, toisen kertaluvun vaikutusta, jatkuvaa sortumaa eikä jäykisterakenteiden välisiä liitoksia.

1.3 Rakennuksen rungon jäykistyksen suunnittelu ja suunnittelun kriteerit

1.3.1 Jäykistysuunnittelun tehtävät

Jäykistysjärjestelmän on täytettävä sille asetetut vaatimukset. Sen on pystyttävä kantamaan sille tulevat kuormat rakennus- ja käyttövaiheessa sekä onnettomuustilanteessa. Järjestelmän on pystyttävä siirtämään vaaka- ja pystykuormat luotettavasti perustusten välityksellä maaperään. Jäykistysjärjestelmän on jäykistettävä rakennuksen runkorakenteet. Jäykistejärjestelmällä pyritään rajoittamaan rakennuksen taipumia ja siirtymiä, rakennuksen toimivuuden ja osaksi myös rakennuksen käyttömukavuuden todentamisen johdosta.

Jäykistävien rakenteiden symmetrinen sijoittaminen on yksi tärkeä osa-alue jäykistysuunnittelua. Symmetrisellä jäykistävien rakenteiden sijoittelulla pystytään vähentämään tehokkaasti rakennukselle vaakakuormasta aiheutuvaa vääntörasitusta, joka aiheuttaa usein tarpeetonta lisärasitusta jäykisterakenteille. Liikuntasaumat on huomioitava jäykistesuunnittelussa, koska yleinen periaate on, että liikuntasaumat eivät välitä kuormia liikuntasauvan yli. Jäykistysuunnittelussa eräs merkittävimmistä tarkastettavista asioista on jäykisterakenteiden ankkurointitarpeen eli kaatumisen estämisen tarkastaminen, sekä sivuttaissiirtyminen eli esimerkiksi perustuksien liukuman estäminen. Näistä kaatumisen ja liukuman tarkastamisesta käytetään myös termiä kokonaisstabiiliiteetin tarkastus. [1.]

1.4 Mitoitusehdot eurokoodista

Rakennuksen runko- ja jäykistysrakenteet suunnitellaan eurokoodin SFS-EN 1990 mukaan. Runkoon kohdistuvat kuormat määritetään eurokoodin SFS-EN 1991 mukaan. Materiaalikohtaiset mitoitusehdot on eurokoodeissa esitetty betonirakenteille SFS-EN 1992 ja Puurakenteille SFS-EN 1995. Lisävaakavoima on huomioitava jäykisterakenteiden mitoituksessa. Lisävaakavoima kuvastaa jäykistystarkastelussa rakenteiden vinoudesta aiheutuvaa lisärasitusta jäykisterakenteille.

Lisävaakavoimien osalta noudatetaan materiaalien eurokoodeissa esitettyjä menettelyjä. Jos niissä ei ole asiaa käsitelty, voidaan soveltaa esim. betonirakenteiden eurokoodissa EN 1992-1-1 esitettyä menetelmää (kohta 5.2 mittaepätarkkuudet, 5.2(5)...5.2(8)). Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää seuraavaa menettelytapaa (esitetty RIL 144:ssä). [RIL 201-1-2008 osa1.1, s.73.]

1.4.1 Rungon ja jäykistyksen mitoitus murtorajatilassa

Murtorajatilassa huomioitavia kriteereitä on jäykisterakenteiden sekä kyseisten rakenteiden liitoksien kestävyysien varmentaminen. Lisäksi on varmistuttava jäykisterakenteiden perustuksien tasalla perusmaan kantokestävydestä murtorajatilassa. Jäykisterakenteiden liitoksissa eräs merkittävä tarkastettava asia on jäykisterakenteiden ankkurointiliitosten kapasiteetin tarkastus, kun stabiloivaa pystykuormaa ei ole riittävästi läsnä mm. monikerroksisissa rakennuksissa yläkerrosten kerroskohtaisissa ankkurointiliitoksissa taikka kevytrunkoisten rakennusten perustuksien ankkurointiliitoksissa.

1.4.2 Rungon ja jäykistyksen mitoitus käyttörajatilassa

Käyttörajatilatarkastelussa keskitytään rakennuksen käytettävyyteen ja tarkastelu perustuu lähinnä tällöin käyttäjien tuntemuksiin rakennusta käytettäessä eikä niinkään rakenteiden kestävyteen. Näitä asioita ovat värähtely, siirtymät, taipumat, jännitysten rajoittaminen sekä halkeamaleveyksien rajoittaminen.

Siirtymien, taipumien, jännitysten ja halkeamien rajoittamiselle on asetettu eurokoodissa ja kansallisessa liitteessä raja-arvoja, jotka rakenteen tai sen osan täytyy täyttää. Taipumien ja siirtymien tarkastelussa on huomioitava erityisesti rakennusten liikuntasauamat. Siirtymien raja-arvot eivät tällöin tule eurokoodista vaan sauman toiminnallisuudesta esimerkiksi riittävän liikevaran varmistamisesta, jotta liikuntasauama toimii suunnitellun mukaisesti, esimerkiksi säilyttää vedenpitävyytensä. [1.]

2 Jäykistysjärjestelmät

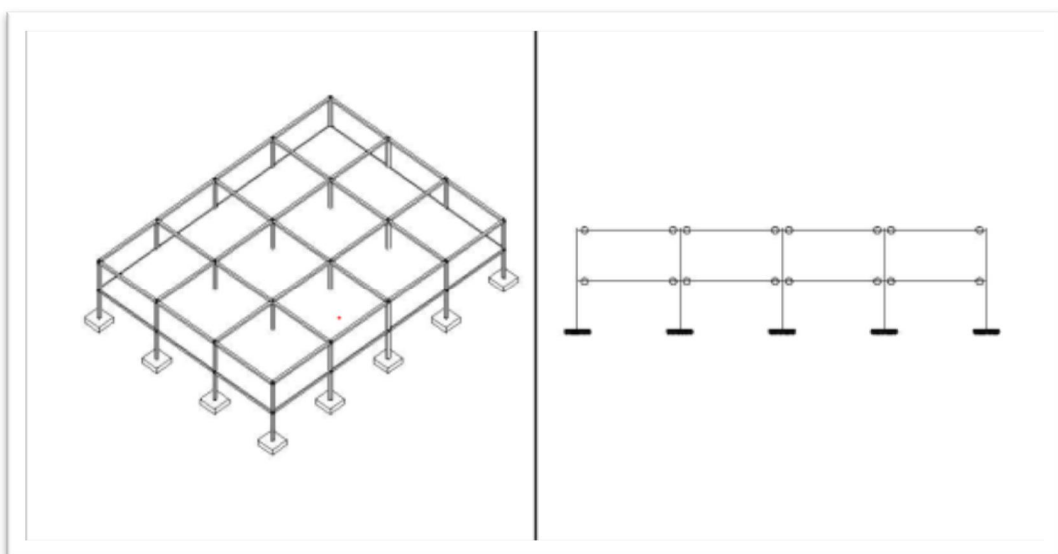
2.1 Mastojäykistys

Mastojäykistyksessä rakenne toimii ulokepalkin tavoin, jonka alapää on jäykästi kiinnitetty. Muut mastoon liittyvät rakenteet liitetään siihen usein nivelellisesti. Kun tasot oletetaan jäykiksi, niiden vaakasuuntaiset kuormat siirtyvät mastoille niiden jäykkyyksien suhteessa. Mastojäykistys voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin: mastopilareihin, mastoseiniin ja kotelomaisiin mastojäykisteisiin. [1.]

2.1.1 Mastopilarijäykistys

Mastopilari on ulokesauva, johon yläpäästä liittyvät rakenteet ovat nivelellisesti kiinnitetty. Mastopilareille tyypillistä on se, että ne ovat hyvin taipuisia ja usein mastopilarijäykistetyssä rungossa jäykän tason oletus on validi. Vaakakuormat siirtyvät tällöin tasorakenteiden välityksellä pilareille niiden jäykkyyksien suhteessa ja sieltä jäykän liitoksen välityksellä edelleen perustuksiin.

Mastopilarin hyvinä puolina voidaan pitää toteutuksen ja asennuksen helppoutta, tilojen muuntojoustavuutta ja yhtenäisiä lattiapintoja. Huonoina puolina voidaan pitää pilareiden ja perustuksien suurta kokoa. Mastopilarijäykistys soveltuu taloudellisesti 1-3 kerroksiin noin 12 metriä korkeisiin rakennuksiin. [1.]

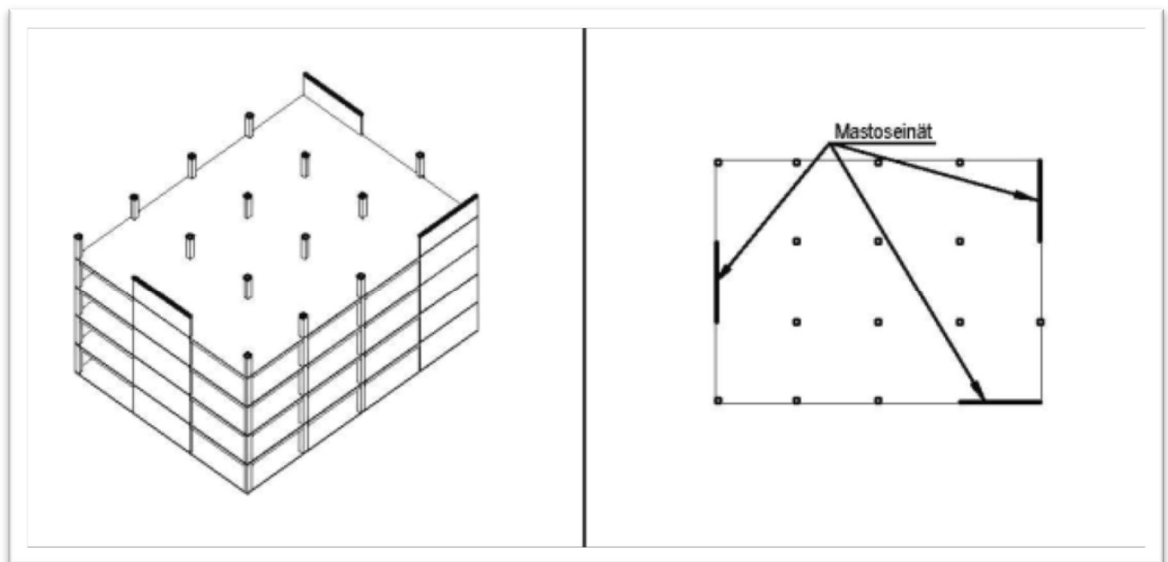


Kuva 1 Mastopilarijäykistysjärjestelmän periaate. [1.]

2.1.2 Mastoseinäjäykistys

Mastoseinän toimintaa voidaan kuvata mastopilarin lailla ulokkeena. Mastopilariin verrattuna leikkausseinän jäykkyys on moninkertainen. Seinän toimintaa voidaan kuvata jäykkänä tasona, joka on alapäästä jäykästi tai ääripisteistä kiinnitetty perustuksiin. Seinämastot voidaan koota elementeistä mitoittaen vaaka- ja pystyliittymät normaali- ja leikkausvoimille niin, että mastoseinän elementit toimivat yhtenä rakenteena. Elementtien välillä voidaan käyttää myös vaarvoja ottamaan normaali- ja leikkausvoimia vastaan. On edullista sijoittaa rakennuksen mastoseinät symmetrisesti, jotta vältetään rakennuksen rungon vääntörasitukselta sekä siten, että seinä toimii myös vaakatasoja kantavana seinänä. Mikäli mastoseinälle saadaan pystykuomaa, seinä pysyy mahdollisesti kokonaan puristettuna rakenteena, jolloin vältetään ylimääräiseltä ankkuroinnilta. Mastoseinän jäykkyyttä määritettäessä tulee huomioida rakenteessa olevat aukot.

Mastoseinän hyvinä puolina voidaan pitää, niiden tehokkuutta jäykistämässä, soveltuvuutta korkeisiin rakennuksiin ja seinän suuntaisten vaakasiirtymien pienuutta seinien suuresta jäykkyydestä johtuen. Mastoseinäjäykistys soveltuu taloudellisesti myös korkeisiin rakennuksiin. [1.]



Kuva 2. Mastoseinäjäykistysperiaate. Seinien symmetrisen sijoittelun ei toteudu kuvassa, joka aiheuttaa rakennusrungolle ylimääräistä vääntörasitusta. [1.]

2.1.3 Kotelomainen mastojäkiste

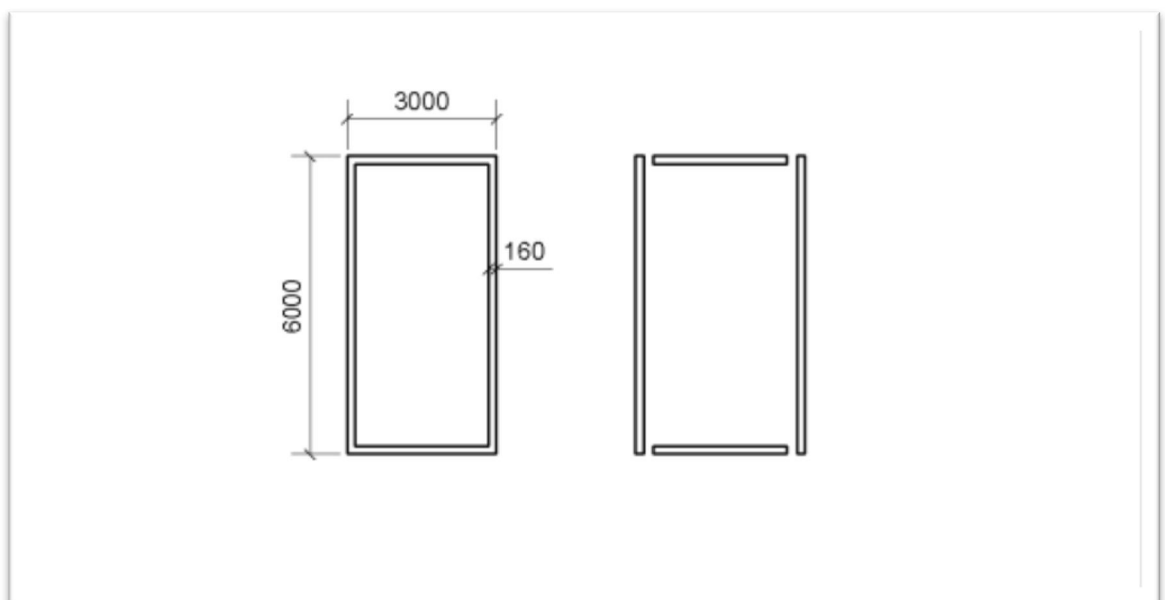
Kotelomaiset mastojäkisteet (mastotornit) toimivat myös ulokkeena samalla tavalla kuin mastoseinät ja -pilarit. Mastotornin seinien jäykkyyteen lasketaan mukaan myös päissä olevat kuormitusta vastaan kohtisuorassa sijaitsevat poikittaiset seinät. Eräs menetelmä on käyttää Steinerin sääntöä mastotornin taivutusjäykkyyttä arvioitaessa. Vasemman puoleisen mastotornin (kuva 3) jähyysmomentti on $13,07 \text{ m}^4$, kun taas oikean puoleisten irtoseinien (kuva 3) yhteenlaskettu jähyysmomentti $5,76 \text{ m}^4$.

$$I_{\text{kotelo}} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{3\text{m} \cdot (6\text{m})^3}{12} - \frac{2,68\text{m} \cdot (5,68\text{m})^3}{12} = 13,07\text{m}^4 \quad (1)$$

$$I_{\text{irtoseinät}} = 2 * \frac{b \cdot h^3}{12} = 2 * \frac{0,16\text{m} \cdot (6\text{m})^3}{12} = 5,76\text{m}^4 \quad (2)$$

Mastotorni on siis huomattavasti jäykempi rakenne kuin irralliset mastoseinät.

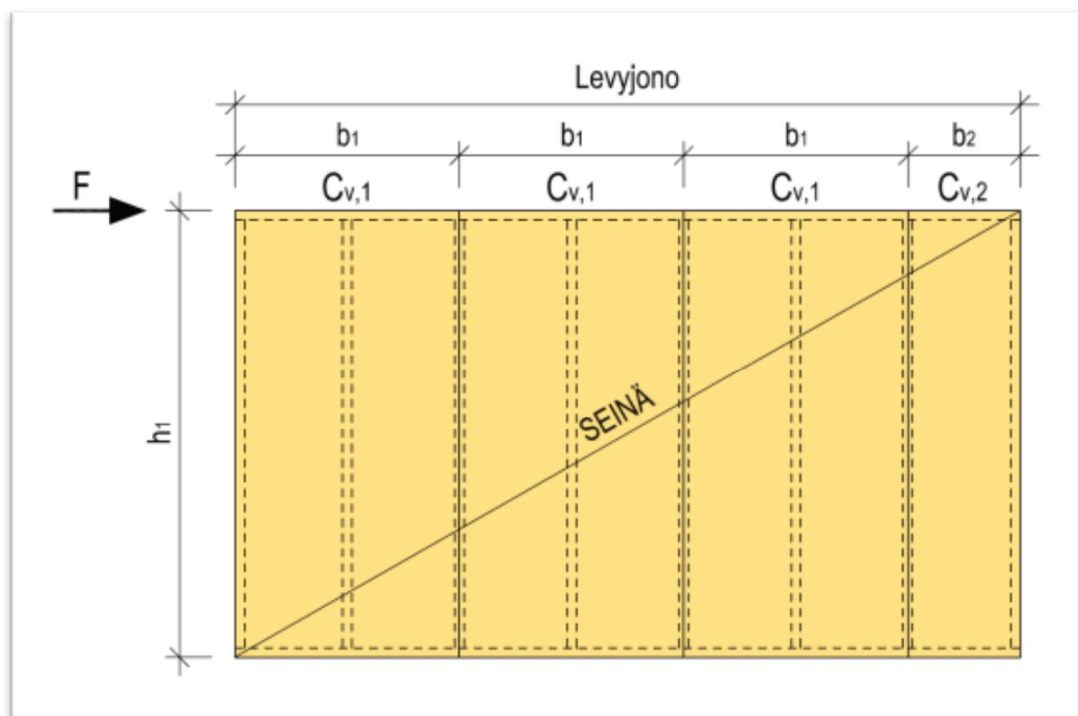
Mastotornin seinien liittymä mitoitettaessa on huomioitava liitoksessa vaikuttava leikkausvoima, jotta saadaan mastotorni toimimaan yhtenä kokonaisuutena. Mastotornit ovat erittäin jäykkiä rakenteita ja sopivat korkeisiin rakennuksiin.



Kuva 3. Mastotornijäykistyksen periaate. Vasemmalla monoliittinen mastotornirakenne ja oikealla irralliset mastoseinät. [1.]

2.2 Rankalevyseinäjäykistys

Rankalevyseinäjäykistys koostuu pääosin pystyrakenteista ja pintalevyistä. Levyseinän osat muodostavat käytännössä kehän ylä- ja alajuoksun kanssa. Seinän jäykkyys koostuu pääosin rankoihin kiinnitettävän levyn jäykkyydestä. Pintalevyt kiinnitetään pysty- ja vaakarakenteisiin nauloilla tai ruuveilla. Pystyrakenteena voi toimia puutolpat ja pintarakenteena vaneri-, OSB- tai kipsikartonkilevyt. Erityisesti vaneri- ja OSB-levyt ovat hyviä pintamateriaaleja suuren jäykkyytensä ansiosta. Leikkausvoimat siirtyvät pystyrakenteiden ja levyn kiinnittimien välityksellä, suurin leikkausvoima on siellä missä siirtymät ovat suurimmillaan eli levyn kulmissa. Levyseinäjäykistystä käytetään yleisesti pientalojen ja matalien puukerrostalojen jäykistämiseen. [9.]



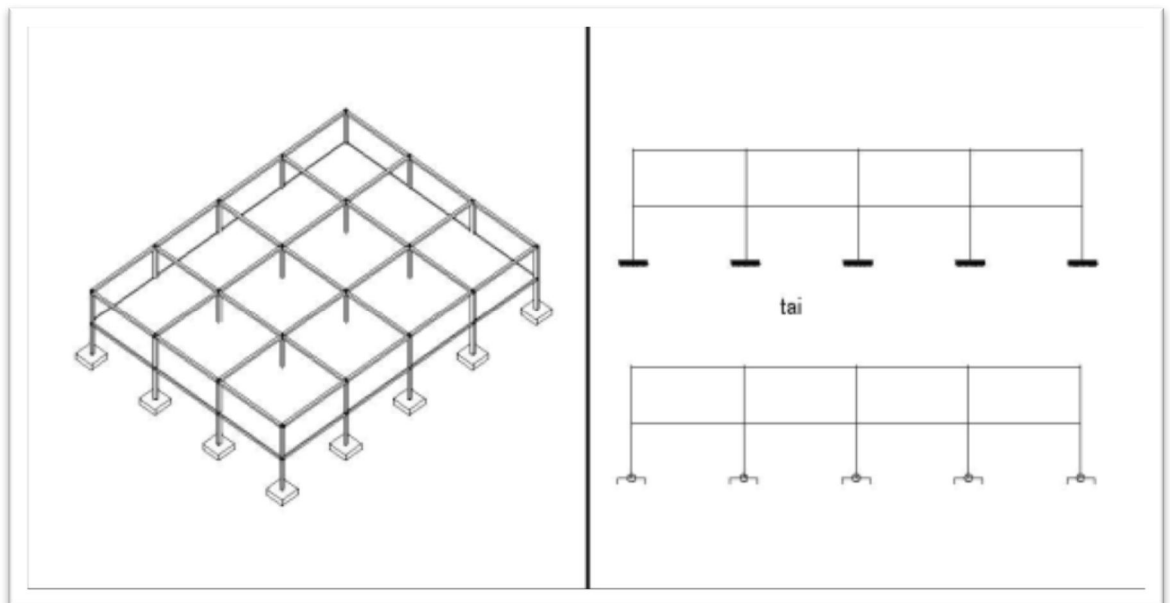
Kuva 4. Rankalevyseinäjäykistyksen periaate. [8.]

2.4 Kehäjäykistys

Kehäjäykistys on käytännössä muokattu mastojäykiste. Kehärakenteen nurkat voidaan toteuttaa osittain tai kokonaan jäykkinä liitoksina. Kokonaan jäykät liitokset estävät nurkan kiertymän, jolloin esimerkiksi pystyrakenteen taipumaa pyrkii rajoittamaan myös vaakatason taivutusjäykkyys. Pystyrakenteet voidaan kehäjäykisteessä kiinnittää alapäästä perustuksiin nivelellisesti tai jäykästi, riippuen siitä kuinka jäykäksi kehärakenteen nurkkaliitokset voidaan toteuttaa.

Betonisissa elementtirakenteissa nurkkien jäykistäminen on hankala toteuttaa, kun taas paikallavalurakenteissa nurkkien jäykistäminen on helpompi toteuttaa.

Kehäjäykistystä käytetään pääsääntöisesti teollisuudessa käytetyissä rakennuksissa. Kehäjäykistys soveltuu parhaiten mataliin alle 10-metrisiin rakennuksiin. Kehäjäykistykseen hyvinä puolina voidaan pitää toteutuksen ja asennuksen helppoutta, tilojen muunneltavuutta ja yhtenäisiä lattiapintoja. Huonoina puolina voidaan pitää siirtymien hankalaa rajoittamista ja nurkkaliitosten monimutkaista toteutusdetaljiikkaa. [1]

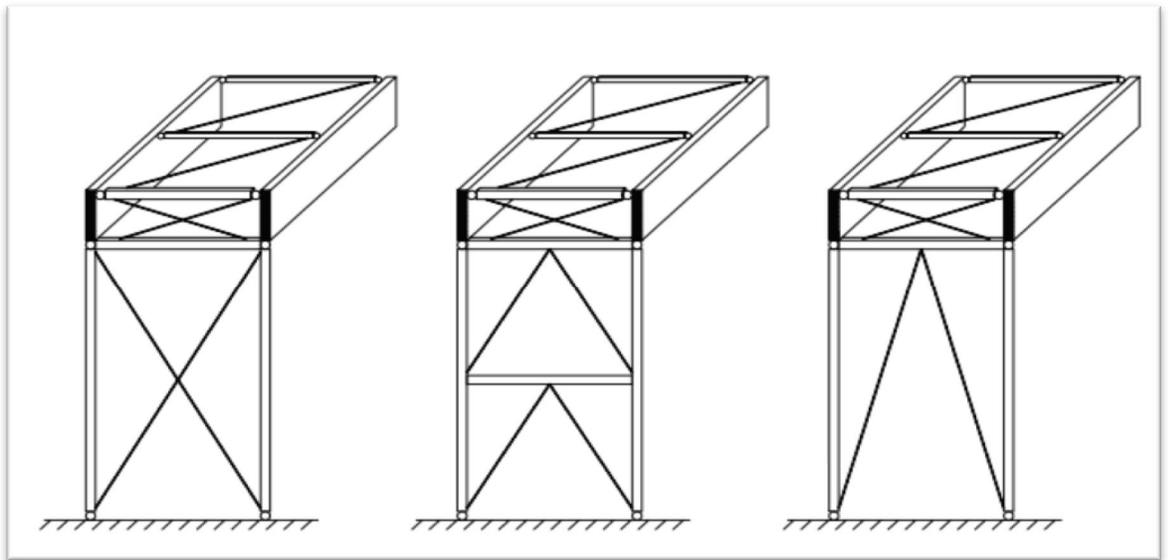


Kuva 5. Kehäjäykistyksen periaate, oikealla on esitetty kehärakenteen kiinnitystavat perustuksiin. [1.]

2.5 Ristikkojäykistys

Ristikkojäykistys voidaan toteuttaa osana kantavaa runkoa tai erillisenä rakenteena. Ristikot voivat olla tasomaisia tai kolmiulotteisia. Jäykisteristikot voivat toimia pysty- tai vaakasuuntaisia rasituksia vastaan.

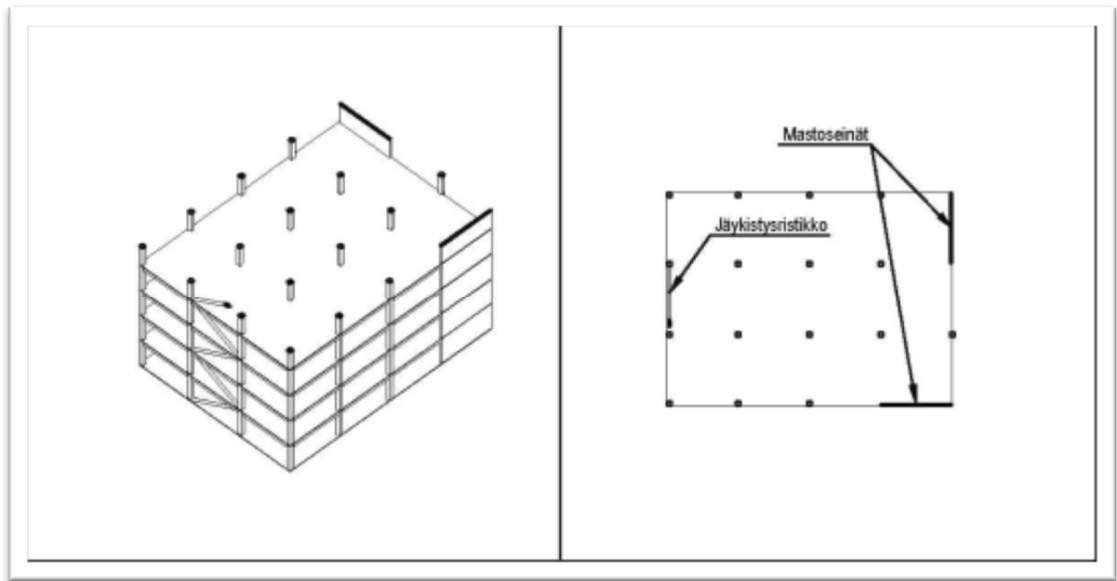
Ristikkojäykistys koostuu paarteista ja diagonaaleista. Paarteina voivat toimia pysty- ja vaakarakenteet esimerkiksi pilarit, seinät, palkit ja laatat (kuva 6). Ristikkojäykistystä voidaan käyttää myös työnaikaisena jäykistysjärjestelmänä, ennen kuin rungon lopullinen jäykistysjärjestelmä on toiminnassa. Tämä antaa joustavuutta asennusjärjestykseen.



Kuva 6. Ristikkojäykistysperiaate. [12.]

2.6 Yhdistelmäjäykistys

Aiemmin esitettyjä jäykistysjärjestelmiä voidaan myös yhdistellä ja soveltaa käyttötarkoitus ja taloudelliset näkökulmat huomioon ottaen. Yhdistelmäjäykistys valitaan aina rakennusprojektiin tapauskohtaisesti. Yhdistelmäjäykistystä suunniteltaessa on huomioitava jäykistystapojen erilainen vaakakuormien jakaantuminen rakenneosien erilaisista jäykkyyksistä johtuen. [1.]



Kuva 7. Mastoseinä- ja ristikkojäykistysten periaatteet. [1.]

3 Jäykistelaskennan teoriaa

3.1 Vaakarakenteiden jäykkyys

Vaakarakenteen vaakasuuntaista jäykkyyttä voidaan tarkastella aksiaalijäykkyydellä (kaava 3). Aksiaalijäykkyys on kimmokertoimen ja efektiivisen poikkipinta-alan tulon suhde vaakarakenteen jänneväliin. Työssä ei oteta kantaa siihen, mikä tason efektiivinen leveys pitäisi huomioida, kun tarkastellaan aksiaalijäykkyyttä. [5.]

$$K = \frac{E \cdot A_{eff}}{L} \quad (3)$$

missä,

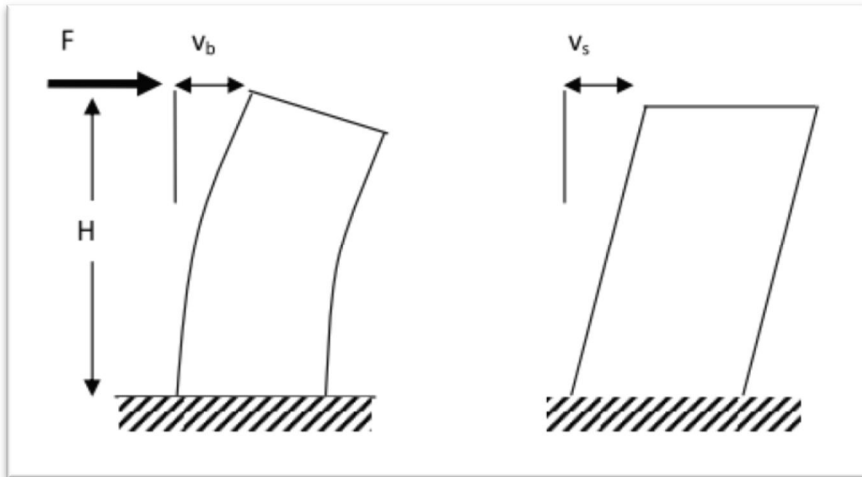
E	on kimmokerroin
A_{eff}	on poikkileikkauksen efektiivinen pinta-ala
L	on vaakarakenteen jänneväli

Vaakarakenteet oletetaan äärettömän jäykiksi rakenteiksi, kun rakennuksen jäykistystä tarkastellaan käsinlaskennalla.

Vaakarakenteen jäykkyyden vaikutusta voimajakaumaan on käsitelty tarkemmin luvussa (5.2 Alustavat selvitykset tutkimukseen).

3.2 Pystyrakenteiden jäykkyys

Pystyrakenteita voidaan käsitellä laskennassa mastorakenteena. Mastojäykistyksessä rakenne toimii ulokepalkin tavoin, jonka alapää on jäykästi kiinnitetty kuten alla olevassa kuvassa on esitetty.



Kuva 8. Mastojäykistyksen periaate. H = maston korkeus, F = vaakavoima, v_b = taivutuksen aiheuttama siirtymä ja v_s = leikkauksen aiheuttama siirtymä. [1.]

Rakenteen jäykkyys määritetään ottamalla huomioon taivutusjäykkyys (kaava 4) ja leikkausjäykkyys (kaava 5). Kokonaisjäykkyys on taivutusjäykkyyden ja leikkausjäykkyyden summa (kaava 6). [1.]

$$k_b = \frac{3 \cdot E \cdot I}{H^3}$$

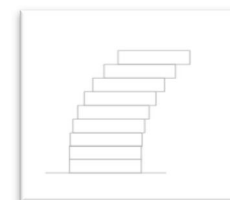
Taivutusjäykkyys [MN/m]



(4)

$$k_s = \frac{G \cdot A}{\kappa \cdot H}$$

Leikkausjäykkyys [MN/m]



(5)

$$\frac{1}{k} = \frac{H^3}{3 \cdot E \cdot I} + \kappa \cdot \frac{H}{G \cdot A}$$

Kokonaisjäykkyys[MN/m]

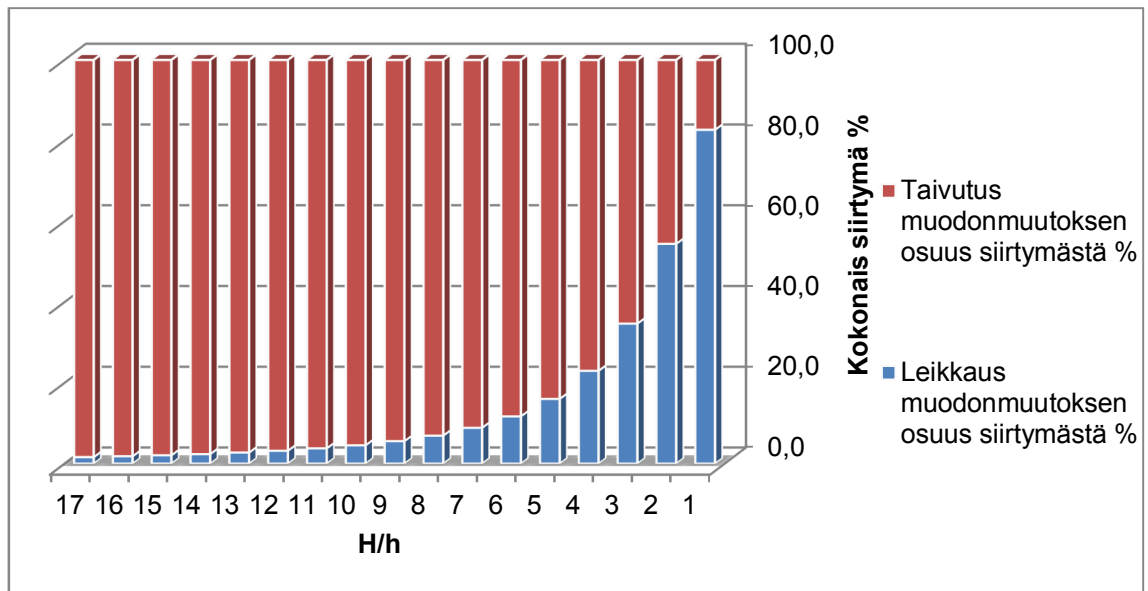


(6)

missä,

E	on kimmokerroin
I	on jäyhyysmomentti
H	on rakenteen korkeus
κ	on poikkileikkauksenmuotokerroin, voidaan käyttää arvoa 1,2 suorakulmion muotoisilla poikkileikkauksilla
G	on materiaalin liukukerroin
A	on poikkileikkauksen pinta-ala

Alla on esitetty leikkausjäykkyyden merkitystä kokonaisjäykkyydestä (Kuvio 1). Kuvion laskennassa vaakakuormana on käytetty 100 kN, ulokepalkin paksuutena 100 mm ja pituutena h on käytetty 1 m. Rakenteen korkeus H on ollut muuttujana. Kimmokertoimen E on käytetty 11000 N/mm² ja liukukertoimen G on käytetty 690 N/mm².



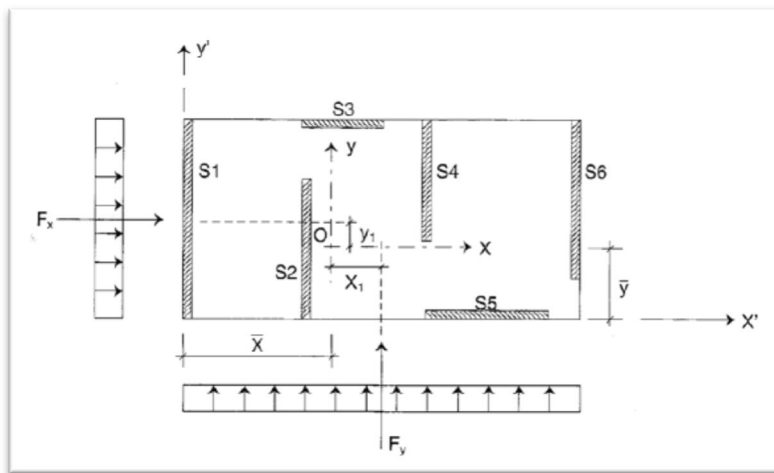
Kuvio 1. Taivutus- ja leikkausmuodonmuutosten osuuksien jakautuminen kokonaismuodonmuutoksesta on esitetty pystyakselilla ja vaaka-akselilla rakenteen korkeuden suhde pituuteen H/h, H = rakenteen korkeus ja h = rakenteen pituus, rakenteen paksuus on 100 mm.

Pystyrakenteiden jäykkyyksien laskennassa leikkausjäykkyys on hyvä huomioida, kun rakenteen korkeuden suhde pituuteen H/h on < 4. Kuten (kuvio 1) huomataan, suhteen ollessa suurempi kuin 4, leikkausjäykkyydellä ei ole enää suurta merkitystä muodonmuutokseen. Näin ollen voidaankin todeta, että leikkausjäykkyyden osuus ei ole merkittävä osa kokonaisjäykkyydestä, kun on kyse korkeista rakenteista.

(7) Rakennuksissa leikkausvoiman ja normaalivoimien vaikutukset sauvojen ja laattojen siirtymiin voidaan jättää huomiotta silloin, kun nämä ovat todennäköisesti alle 10 % taivutuksen aiheuttamista [SFS-EN 1990].

3.3 Kiertokeskiön määrittäminen

Rakennuksen kiertokeskiö eli jäykkyysspainopiste voidaan määrittää (kaavojen 7 ja 8) avulla. Kiertokeskiön määrittämisessä oletetaan välipohjarakenteen aksiaalijäykkyydet äärettömän jäykäksi. Sijoitetaan origo esimerkiksi rakennuksen vasempaan nurkkaan, lasketaan pystyrakenteiden jäykkyydet ja seinien painopisteiden etäisyydet origoon. Tämän jälkeen voidaan määrittää kiertokeskiön sijainti X- ja Y-suuntiin (kaavojen 7 ja 8) avulla. [1.]



Kuva 9. Kiertokeskiön määrittäminen. [1.]

$$\bar{X} = \frac{\sum k_{yi} * x_i}{\sum k_{yi}} \quad \text{on kiertokeskiön sijainti x-akselilla} \quad (7)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum k_{xi} * y_i}{\sum k_{xi}} \quad \text{on kiertokeskiön sijainti y-akselilla} \quad (8)$$

missä,

y_i on rakenteen sijainti y-akselilla alkuperäisestä koordinaatistosta

x_i on rakenteen sijainti x-akselilla alkuperäisestä koordinaatistosta

k_{xi} on x-akselin suuntaisten pystyrakenteiden jäykkyys

k_{yi} on y-akselin suuntaisten pystyrakenteiden jäykkyys

3.3.1 Kiertokeskiön vaikutus laskentaan

Opinnäytetyössä on kiertymän vaikutusta rakennuksen runkoon tarkasteltu vaakakuorman resultantin epäkeskisyydellä edellä lasketusta kiertokeskiöstä. Mikäli täten vaakakuorman resultantti F_y tai F_x ei vaikuta suoraan kiertokeskiössä, eli (X_1 ”erisuuri

kuin” 0 tai Y_1 ”erisuuri kuin” 0) muodostuu rakennusrunkoon vääntömomenttia M_y tai M_x .

Rakennukseen muodostuva vääntömomentti voidaan laskea alla esitetyillä (kaavoilla 9 ja 10). [1.]

$$M_y = F_y * X_1 \quad (9)$$

$$M_x = F_x * Y_1 \quad (10)$$

missä,

F_y	on vaakavoimien resultantti x-akselin suhteen
F_x	on vaakavoimien resultantti y-akselin suhteen
X_1	on vaakaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä
Y_1	on vaakaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä

3.4 Tason kiertymä

Äärettömän jäykän tason kiertymä voidaan määrittää kiertymän aiheuttavan momentin, pystyrakenteiden jäykkyyksien, kiertokeskiön sekä pystyrakenteiden vääntökeskipisteen etäisyyksien avulla (kaava 11). Tällöin pystyrakenteiden vääntöjäykkyyden oletetaan olevan nolla (pystyrakenteiden vääntökeskipiste on massakeskipiste). [1.]

$$\theta = \frac{M_i}{\sum(k_{xi} * y_i^2) + \sum(k_{yi} * x_i^2)} \quad (11)$$

missä,

θ	on tason kiertymä
M	on kiertymän aiheuttava momentti
y_i	on rakenteen vääntökeskipisteen sijainti y-akselilla alkupe- räisestä koordinaatistosta
x_i	on rakenteen vääntökeskipisteen sijainti x-akselilla alkupe- räisestä koordinaatistosta
k_{xi}	on x-akselin suuntaisten pystyrakenteiden jäykkyys
k_{yi}	on y-akselin suuntaisten pystyrakenteiden jäykkyys

3.5 Pystyrakenteiden siirtymät

Mastorakenteen siirtymät voidaan määrittää huomioimalla taivutuksen ja leikkauksen aiheuttama siirtymä. [1.]

$$v_b = F * \frac{H^3}{3 * E * I}$$

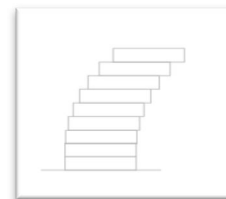
Siirtymä taivutuksesta [m]



(12)

$$v_s = F * \frac{\kappa * H}{G * A}$$

Siirtymä leikkauksesta [m]



(13)

$$v = F * \frac{H^3}{3 * E * I} + F * \frac{\kappa * H}{G * A}$$

Kokonaissiirtymä [m]



(14)

missä,

E	on kimmokerroin
I	on jäyhyysmomentti
H	on rakenteen korkeus
κ	on poikkileikkauksenmuotokerroin, voidaan käyttää arvoa 1,2 suorakulmion muotoisilla poikkileikkauksilla
G	on materiaalin liukukerroin
A	on poikkileikkauksen pinta-ala
F	siirtävä vaakavoima

3.6 Vaakavoimien jakautuminen pystyrakenteille

Kun oletetaan, että taso on jäykkä, jakautuvat vaakavoimat käsinlaskennassa seinien jäykkyyksien suhteessa. Vaakavoimat seinille voidaan määrittää kaavoista. Tason kiertymän positiivinen suunta on myötäpäivään, kun käytetään oikean käden koordinaatistoa. [1.]

Pystyrakenteille tulevat vaakavoimat siirtymästä + rakenteiden kiertymästä

$$Q_x = k_{xi} * v_x + k_{yi} * y_i * \theta \quad \text{Vaakavoima x-suuntaan} \quad (15)$$

$$Q_y = k_{yi} * v_y - k_{xi} * x_i * \theta \quad \text{Vaakavoima y-suuntaan} \quad (16)$$

missä,

θ	on tason kiertymä
k_{xi}	on x-akselin suuntaisten pystyrakenteiden jäykkyys
k_{yi}	on y-akselin suuntaisten pystyrakenteiden jäykkyys
v_x	on kokonaissiirtymä x-suuntaan
v_y	on kokonaissiirtymä y-suuntaan
x_i	on pystyrakenteen vääntökeskipisteen etäisyys kiertokeskiöstä
y_i	on pystyrakenteen vääntökeskipisteen etäisyys kiertokeskiöstä

4 FEM-ohjelman käyttö jäykistysuunnittelussa

Jäykistysuunnitelmien laskemat voidaan tehdä käsinlaskemalla tai FEM-ohjelmilla. Käytettäessä FEM-ohjelmia jäykistysuunnitteluun, ovat ohjelman antamat tulokset juuri niin tarkat kuin käyttäjän antamat parametrit laskentaan. FEM-ohjelmat laskevat niin, kuin käyttäjä on mallintanut, lukuun ottamatta ohjelmistovirheitä.

FEM-ohjelmia käytettäessä mallinnetaan rakennus vastaamaan mahdollisimman tarkasti oikean rakennuksen toimintamallia.

Luku 5 Rakenneanalyysi

5.1.1 Yleiset vaatimukset

(1)P Rakenneanalyysissä selvitetään joko voimasuurejakautumat tai jännitysten, muodonmuutosten ja siirtymien jakaumat koko rakenteessa tai rakenteen osassa. Tarvittaessa tulee suorittaa paikallinen analyysi.

HUOM. Useimmissa tavallisissa tapauksissa rakenneanalyysissä selvitetään voimasuurejakautumat, ja poikkileikkausten kestävyys osoittaminen perustuu kokonaan näihin kuormien vaikutuksiin; tiettyjen rakenneosien analyysimenetelmät (esim. elementtimenetelmällä suoritettava analyysi) antavat lopputuloksena jännityksiä, muodonmuutoksia ja siirtymiä voimasuureiden sijaan. Kun näitä tuloksia käytetään vaatimuksenmukaisuutta osoitettaessa, tarvitaan erityistä jälkiprosessointia tulosten tulkitsemiseen. [7.]

Mallintamisessa on otettava huomioon monia tärkeitä asioita. Rakenteiden liittymät on mallinnettava niin kuin ne ovat todellisuudessa. Jos rakenteiden liittymässä on vapaasti kiertyvä liitos, eli nivelen kaltainen liitos, kuten elementtirakenteissa ontelolaattapalkkiliitos usein on, huomioidaan se myös laskentamallissa nivelenä. Myös siirtymät on huomioitava, niiden estäminen voi tuoda tahtomattomia pakkovoimia. Momenttien ja leikkausvoimien siirtyminen rakenneosalta toiselle on tarkastettava, että liitos kykenee siirtämään kyseiset voimat.

Sauvat ja kuorielementit on mallinnettava oikein, eli käytettävät materiaaliarvot on valittava oikein, dimensiot ja sijainti mallinnettava todellisuuden mukaan. Laattojen kuormankantosuunta ja mahdollinen ortotrooppisuus on myös huomioitava, koska se vaikuttaa tasorakenteen aksiaalijäykkyyteen. Kantavien seinien väliin jäävien laattojen liittymät on mietittävä huolellisesti, sillä ne voivat estää laatan kiertymän, ja aiheuttaa näin tahatonta laatan yläpintaan muodostuvaa vetorasitusta, joka on ongelmallinen esimerkiksi betonisissa ontelolaattavälipohjissa.

Käyttäjän antamien virheellisten parametrien aiheuttamat virheelliset tulokset korostuvat monimuotoisissa ja monikerroksissa rakennuksissa.

Jäykistyslaskelma on hyvä myös tarkastaa käsinlaskennalla, niin että ollaan tulosten suhteen samassa suuruusluokassa. FEM-laskennalla saadaan ratkaistua monimutkaisempia rakenteita kuin yksinkertaistetuilla käsinlaskentamenetelmillä, koska käsinlaskenta voi osoittautua usein hyvin työlääksi ja laskentavirheiden esiintymistodennäköisyys kasvaa.

Käsinlaskennalla on vaikea laskea esimerkiksi pystyrakenteiden voimajakaumaa, kun vaakarakenne oletetaan taipuisaksi rakenteeksi. Näissä tapauksissa on perusteltua käyttää FEM-ohjelmaa tarkasteluissa.

5 Yksikerroksisessa jäykistejärjestelmässä vaakataason jäykkyyden vaikutus vaakakuormien jakautumisessa pystyjäykisteille

5.1 Alustavan selvityksen kuvaus

Tason ja pystyrakenteiden jäykkyyksien vaikutusta voimajakaumaan tutkittiin yksinkertaisella palkkimallilla. Palkki mallinnettiin Robot Structural Analysis FEM-ohjelmalla. FEM-malli koostui kaksiaukkoisesta palkista, joka kuvaa tasoa (välipohja) ja kolmesta tuesta, jotka kuvaavat pystyrakenteita (seiniä).

Tutkimuksessa vertailtiin kahden erilaisen palkin vaikutusta voimajakaumaan, toinen palkki kuvasi jäykkää välipohjarakennetta (Betonipalkki 200x6000mm) ja toinen taipuisaa välipohjarakennetta (Puupalkki 30x6000mm).

Keskimmäisen tuen sijaintia ja jäykkyyttä varioitiin, täysin painumattomasta tuesta (Tuki 1) joustavaan tukeen (Elast. 1), joka vastaa jäykkyydeltään noin 100 mm paksua, 6 metriä pitkää ja 3 metriä korkeaa betoniseiniä. Reunatuken pysty- ja vaaka siirtymät olivat estetty, tukien kiertymät olivat sallittu. Palkin kuorma oli vakio koko tutkimuksen ajan. Lähtötiedot tutkimukseen (taulukko 1). Kuormana oli 100 kN/m, koska sillä kuvattiin monikerroksisen kerrostalon pohjakerrokseen kertyvää kokonaisvaakakuormaa.

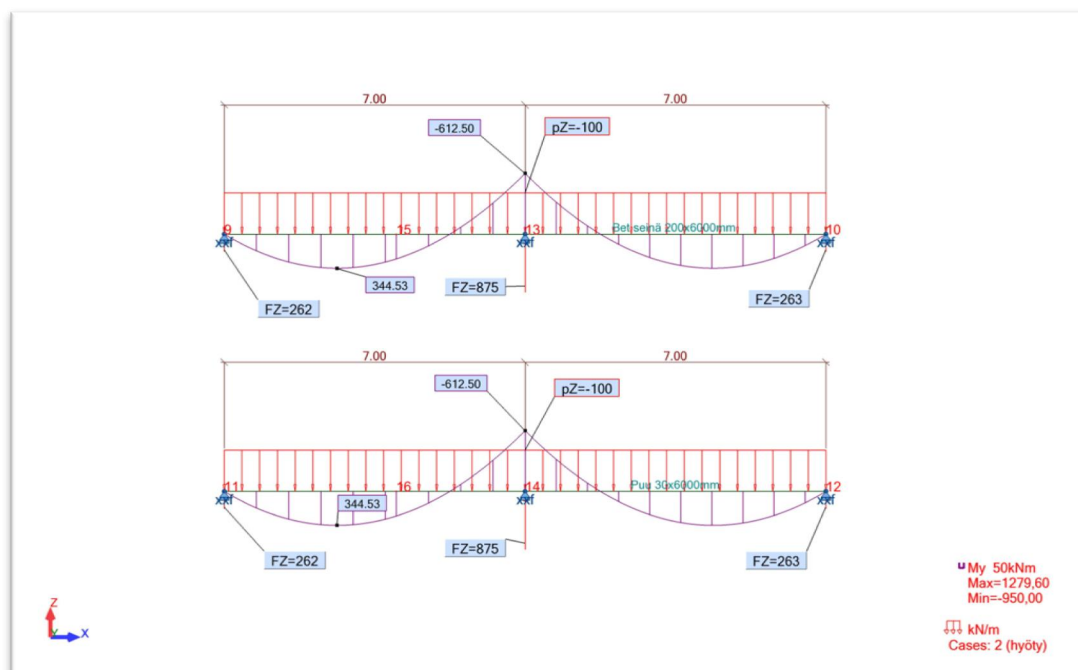
Taulukko 1. Palkkimallien 1-1, 1-2, 1-3 ja 1-4 lähtötiedot.

	Kimmomoduuli	Paksuus	Korkeus	Jänneväli	Kuorma
Materiaali	$E = [\text{N/mm}^2]$	$d = [\text{mm}]$	$h = [\text{mm}]$	$L = [\text{mm}]$	$p = [\text{kN/m}]$
Puu C24	11000	30	6000	14000	100
Betoni C30/37	30000	200	6000	14000	100

	Jousivakio	Merkintä FEM - mallissa
Tuet:	$k = [\text{MN/m}]$	
Tuki 1	∞	xxf
Elast. 1	6000	xef

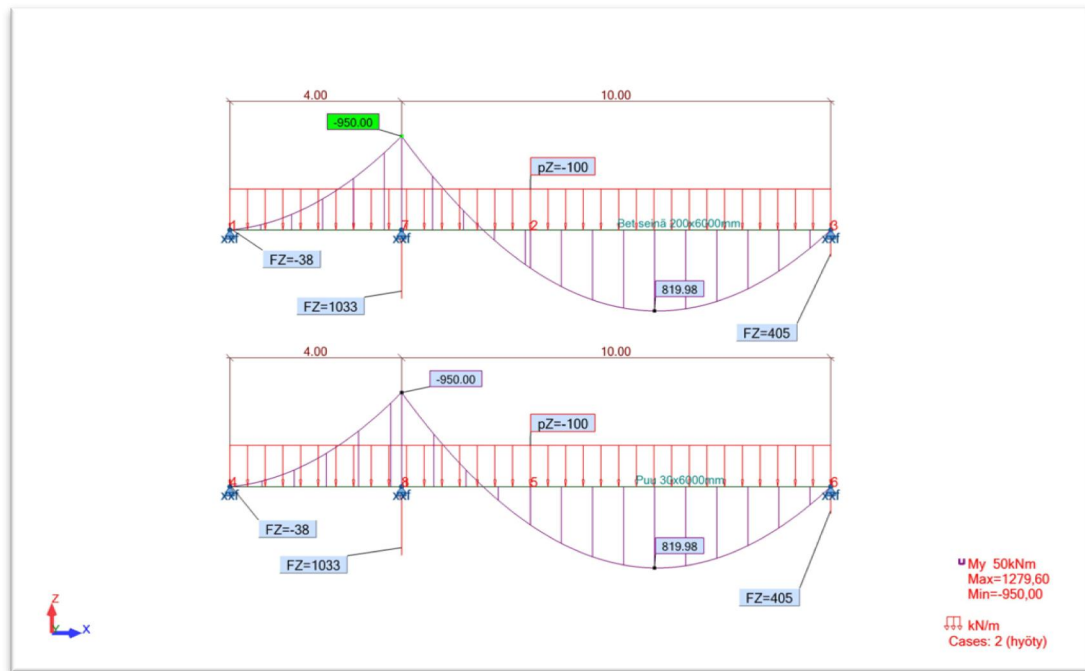
5.2 Alustavat selvitykset tutkimukseen

Palkkimalli 1-1 (kuva 10) tarkasteltiin onko palkin jäykkyydellä vaikutusta voimajakau-
maan, kun tuet ovat jäykkiä ja sijaitsevat symmetrisesti. Tukien ollessa painumattomia
tukivoimat jakaantuvat identtisesti jäykällä ja taipuisalla palkilla. Palkin rasitukset olivat
myös identtiset. Palkin jäykkyydellä ei siis ole vaikutusta kuorman jakautumiseen.



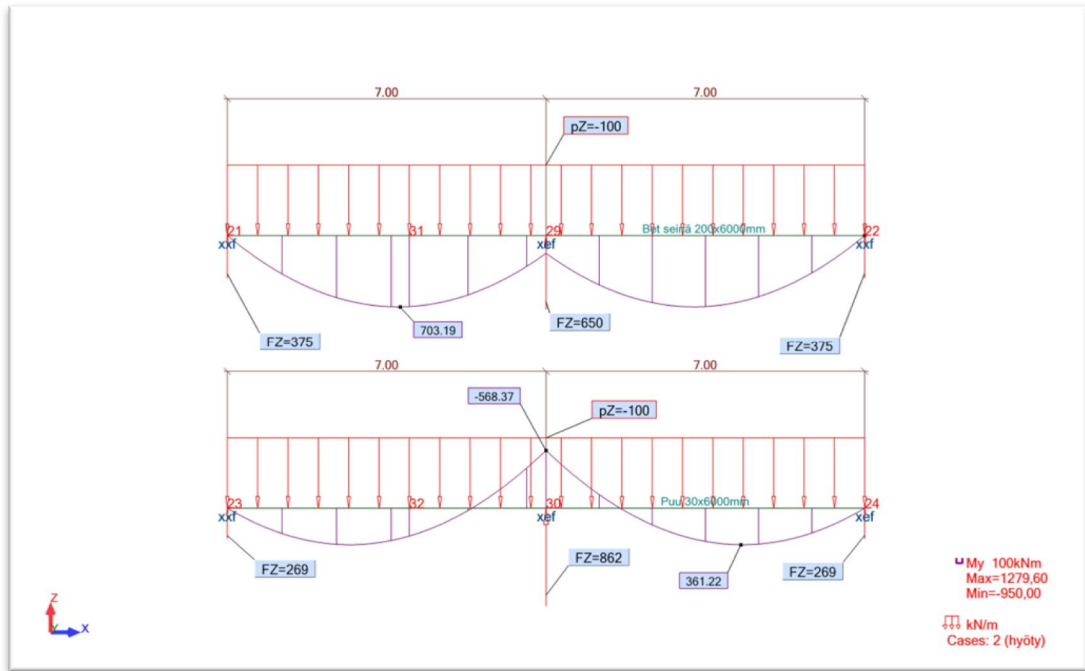
Kuva 10. Palkkimalli 1-1. Keskimäinen tuki sijaitsi keskeisesti ja kaikki tuet olivat painumattomia tukia. Ylempi palkki kuvaa jäykkää tasoa (betonia 200x6000mm) ja alempi palkki taipuisaa (puuta 30x6000mm).

Palkkimallissa 1-2 (kuva 11) tarkasteltiin onko palkin jäykkyydellä vaikutusta voimaja-
kaumaan, kun tuet ovat painumattomia ja sijaitsevat epäsymmetrisesti. Palkkimallissa
oli huomattavissa tukien ollessa jäykkiä, tukivoimat jakaantuvat identtisesti jäykällä ja
taipuisalla palkilla. Palkin rasitukset olivat myös identtiset. Palkin jäykkyydellä ei siis
ole vaikutusta kuorman jakautumiseen.



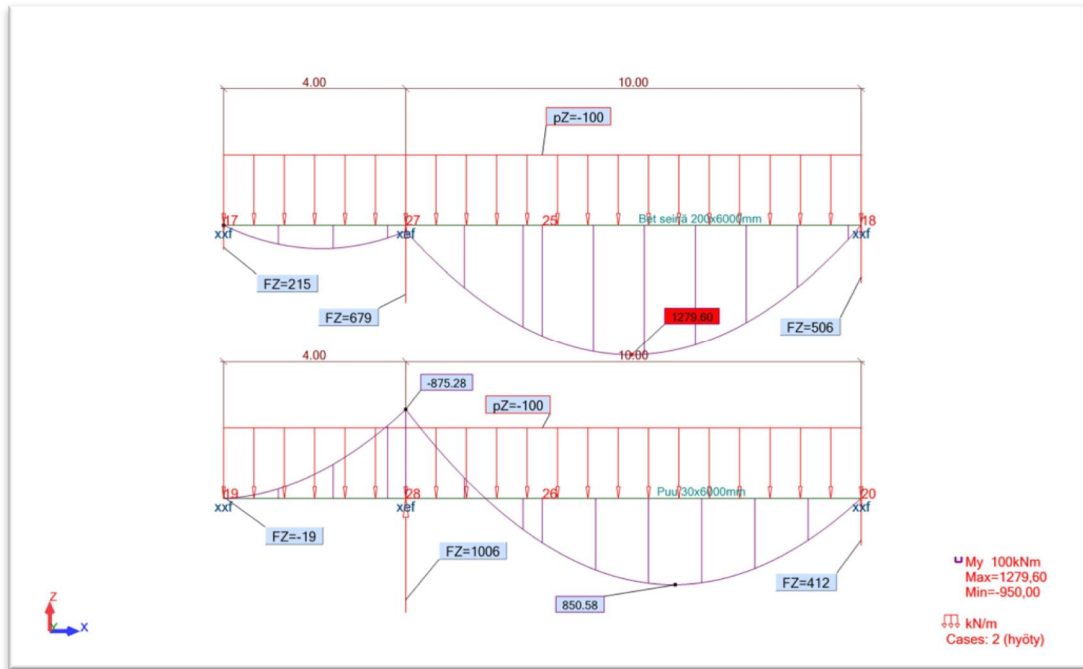
Kuva 11. Palkkimalli 1-2. Keskimäinen tuki sijaitsi keskilinjasta vasemmalla ja kaikki tuet olivat painumattomia tukia. Ylempi palkki kuvaa jäykkää tasoa (betonia 200x6000mm) ja alempi palkki taipuisaa (puuta 30x6000mm).

Palkkimallissa 1-3 (kuva 12) tarkasteltiin onko keskituen joustavuudella ja palkkien jäykkyydellä vaikutusta voimajakaumaan. Palkkimallissa oli huomattavissa reunatukien ollessa painumattomia ja keskituen joustava 6000 kN/m, tukivoimat jakaantuvat eritavalla kuin (palkkimalli 1-1) osoittaa. Tukivoimien erilaiseen jakaantumiseen vaikuttavia tekijöitä on palkin jäykkyys, tukien välimatkat ja tukien jäykkyys. Palkin jäykkyydellä on siis vaikutusta kuorman jakautumiseen.



Kuva 12. Palkkimalli 1-3. Palkkimallin voimien jakautuminen pystyrakenteille, painumattomat tuet reunoilla ja elastinen keskituki 6000kN/m symmetrisesti. Ylempi palkki kuvaa jäykkää tasoa (betonia 200x6000mm) ja alempi palkki taipuisaa (puuta 30x6000mm).

Palkkimallissa 1-4 (kuva 13) tarkasteltiin, onko keskituen joustavuudella, sijainnilla ja palkin jäykkyydellä vaikutusta voimajakaumaan. Palkkimallissa oli huomattavissa reunatukien ollessa painumattomia, keskituen joustava 6000 kN/m ja sijainti epäsymmetrinen tukivoimat jakaantuvat eritavalla kuin (palkkimalli 1-2, kuva 11) osoittaa. Tukivoimien erilaiseen jakaantumiseen vaikuttavia tekijöitä on palkin jäykkyys, tukien välimatkat ja tukien jäykkyys. Palkin jäykkyydellä on siis vaikutusta kuorman jakautumiseen.



Kuva 13. Palkkimalli 1-4, Palkkimallin voimien jakautuminen pystyrakenteille, painumattomat tuet reunoilla ja elastinen keskituki 6000kN/m epäsymmetrisesti. Ylempi palkki kuvaa jäykkää tasoa (betonia 200x6000mm) ja alempi palkki taipuisaa (puuta 30x6000mm).

5.3 Tulosten analysointi

Tulokset on esitetty (taulukossa 1) symmetriselle palkkimallille ja (taulukossa 2) epäsymmetriselle. Tuloksissa oli huomattavissa, että tason ja pystyrakenteiden jäykkyyssuhteilla on merkitystä voimien jakautumiseen. Tason ollessa jäykkä on (taulukoista 1 ja 2) havaittavissa, että voimat jakaantuvat pystyrakenteille tasaisemmin. Kun taas tason ollessa taipuisa, on mahdollista että keskituelle muodostuu merkittäviä voimakeskittymiä ja taso vääntyy voimakkaasti.

Käytettäessä jäykän tason olettamusta kevytrakenteisissa tasoissa, on tärkeää varmistaa, että taso toimii, niin kuin sen on ajateltu toimivan.

(Taulukoista 2 ja 3) on huomattavissa kuorman jakaantuvan varsin eritavalla. Kuorman jakaantuminen on riippuvainen tason paksuudesta, materiaalista ja tukipisteiden sijainnista. Esimerkin palkkimallin mukaan, jos puutasolla halutaan päästä samankaltaiseen voimajakaumaan kuin esimerkiksi 50 mm paksulla betonitasolla, tulisi puutason olla 150 mm paksu.

Taulukko 3. Palkin paksuuden ja materiaalin vaikutus voimien jakaantumiseen. Palkkimallin tuet symmetrisesti. Taulukon palkkimalli (kuva 10).

Tason Materiaali	Paksuus d = [mm]	Kimmomoduuli E = [kN/mm ²]	Korkeus h = [mm]	Jänneväli L = [m]	Kuorma p = [kN/m]	Tukien jäykkyydet			Kuorman jakautumi- nen			Kuorman jakautumi- nen		
						Vasen tuki x=0mm	Keski tuki x=7000mm	Oikea tuki x=14000mm	Vasen tuki x=0mm	Keski tuki x=7000mm	Oikea tuki x=14000mm	Vasen tuki x=0mm	Keski tuki x=7000mm	Oikea tuki x=14000mm
						k = [MN/m]			kN			%		
Puu C24	15	24	6000	14	30	∞	6000	∞	80	260	80	19 %	62 %	19 %
Puu C24	30	24	6000	14	30	∞	6000	∞	81	258	81	19 %	61 %	19 %
Puu C24	50	24	6000	14	30	∞	6000	∞	82	255	82	20 %	61 %	20 %
Puu C24	110	24	6000	14	30	∞	6000	∞	87	247	87	21 %	59 %	21 %
Puu C24	200	24	6000	14	30	∞	6000	∞	92	235	92	22 %	56 %	22 %
Bet.C30/37	50	30	6000	14	30	∞	6000	∞	89	242	89	21 %	58 %	21 %
Bet.C30/37	100	30	6000	14	30	∞	6000	∞	98	224	98	23 %	53 %	23 %
Bet.C30/37	150	30	6000	14	30	∞	6000	∞	106	208	106	25 %	50 %	25 %
Bet.C30/37	200	30	6000	14	30	∞	6000	∞	113	195	113	27 %	46 %	27 %
Bet.C30/37	500	30	6000	14	30	∞	6000	∞	140	141	140	33 %	33 %	33 %

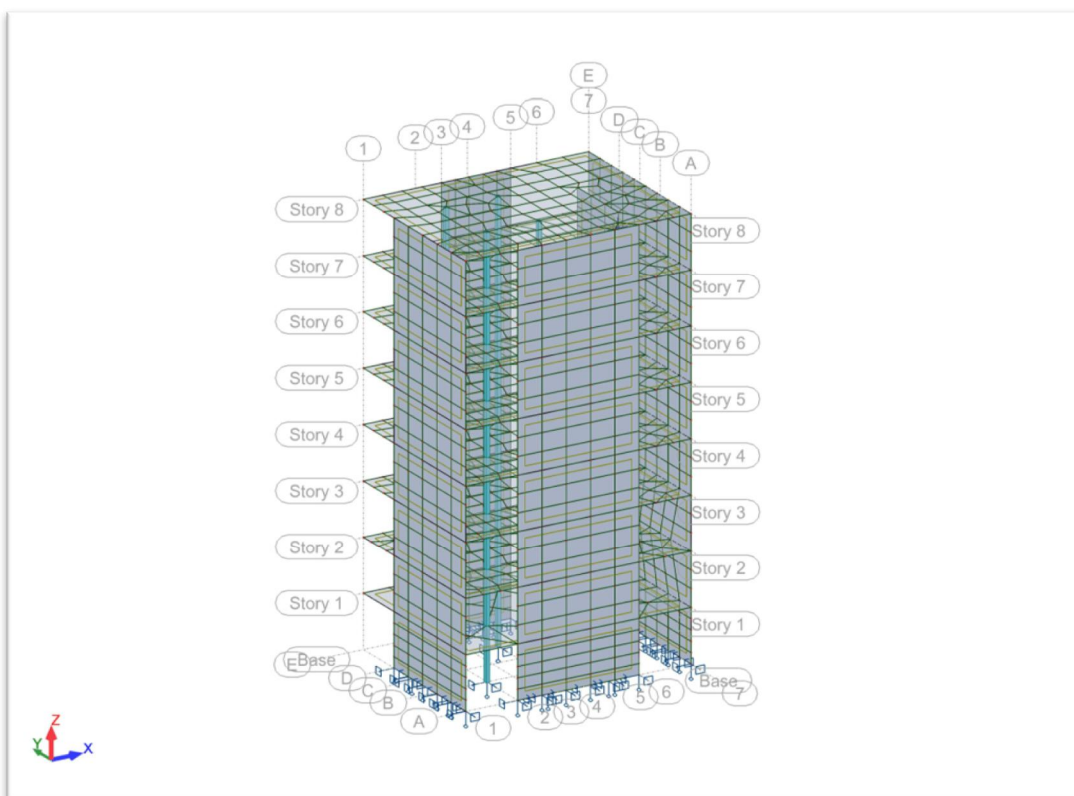
Taulukko 4. Palkin paksuuden ja materiaalin vaikutus voimien jakaantumiseen. Palkkimallin tuet epäsymmetrisesti. Taulukon palkkimalli (kuva 12).

Tason Materiaali	Paksuus d = [mm]	Kimmomoduuli E = [kN/mm ²]	Korkeus h = [mm]	Jänneväli L = [m]	Kuorma p = [kN/m]	Tukien jäykkyydet			Kuorman jakautumi- nen			Kuorman jakautumi- nen		
						Vasen tuki x=0mm	Keski tuki x=4000mm	Oikea tuki x=14000mm	Vasen tuki x=0mm	Keski tuki x=4000mm	Oikea tuki x=14000mm	Vasen tuki x=0mm	Keski tuki x=4000mm	Oikea tuki x=14000mm
						k = [MN/m]			kN			%		
Puu C24	15	24	6000	14	30	∞	6000	∞	-8	306	123	-2 %	73 %	29 %
Puu C24	30	24	6000	14	30	∞	6000	∞	-6	302	124	-1 %	72 %	30 %
Puu C24	50	24	6000	14	30	∞	6000	∞	-2	297	125	0 %	71 %	30 %
Puu C24	110	24	6000	14	30	∞	6000	∞	8	283	129	2 %	67 %	31 %
Puu C24	200	24	6000	14	30	∞	6000	∞	21	264	135	5 %	63 %	32 %
Bet.C30/37	50	30	6000	14	30	∞	6000	∞	14	274	132	3 %	65 %	31 %
Bet.C30/37	100	30	6000	14	30	∞	6000	∞	34	246	140	8 %	59 %	33 %
Bet.C30/37	150	30	6000	14	30	∞	6000	∞	51	223	146	12 %	53 %	35 %
Bet.C30/37	200	30	6000	14	30	∞	6000	∞	64	204	152	15 %	49 %	36 %
Bet.C30/37	500	30	6000	14	30	∞	6000	∞	114	135	172	27 %	32 %	41 %

6 Tason jäykkyyden vaikutus kuormien jakautumiseen

6.1 Tutkimuksen kuvaus

Tutkimuksessa on tarkoitus kuvata vaakavoimien jakautumista jäykistävillä rakennesille ja rakennuksen korkeuden vaikutusta vaakavoimien jakautumiseen pystyjäykisille. Vaakavoimien erilaista jakautumista on havainnollistettu rakennuksessa olevien erilaisten vaaka- ja pystyrakenteiden jäykkyyksien avulla. Vaakarakenteiden jäykkyyttä varioitiin vaihtamalla tasojen materiaaliominaisuuksia. Pystyrakenteiden jäykkyyttä varioitiin seinien pituutta ja materiaalia muuttamalla. Kaikki rakenteet oletetaan isotrooppisiksi rakenteiksi. Rakennuksien mallintamiseen käytettiin Robot Structural Analysis -ohjelmaa ja käsinlaskentaa.



Kuva 14. Esimerkkirakennus.

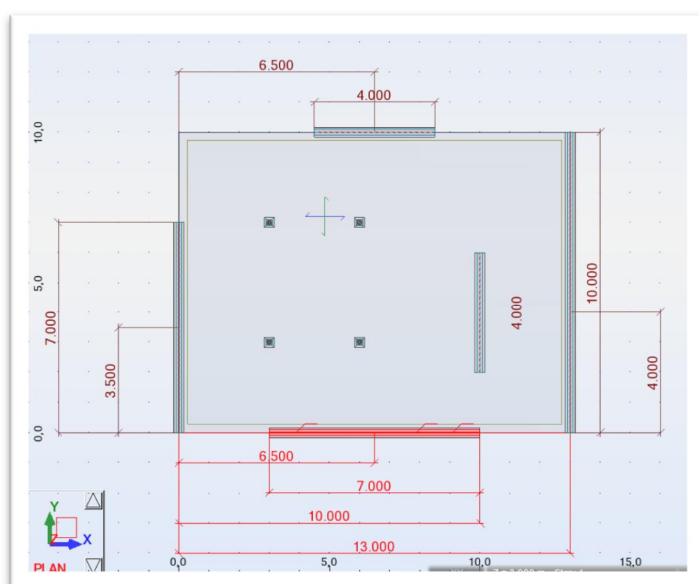
Kolmessa esimerkkirakennuksessa on 8 kerrosta. Ensimmäisen kerroksen seinät ja välipohja koostuvat 200 mm paksuisista betonirakenteista, koska Suomessa useat

puukerrostalot on toteutettu rakentamalla ensimmäinen kerros betonista, esimerkiksi Kivistön Puumera [www.puumera.fi]. Ylempien kerrosten seinät ovat 30 mm paksuja puurakenteita, mitkä kuvaavat rankalevyseiniä.

Esimerkkirakennus 1. 1 krs. välipohja- ja seinärakenteet on 200 mm paksu betonirakenteita ja 2-8 krs. välipohja- ja seinärakenteet ovat 30 mm paksuja puurakenteita.

Esimerkkirakennus 2. 1 krs. välipohja- ja seinärakenteet on 200 mm paksu betonirakenteita. 2-8 krs. välipohjarakenteet ovat 200 mm paksuja betonirakenteita ja seinärakenteet 30 mm paksuja puurakenteita.

Esimerkkirakennus 3. 1-8 krs. välipohjarakenteet ovat äärettömän jäykkiä tasoja ja seinärakenteen kuten edellisissä rakennuksissa.



Kuva 15. Esimerkkirakennuksien 1-3 pohjapiirros.

6.2 Vaakakuorma

Esimerkkilaskelmissa on huomioitu ainoastaan tuulesta aiheutuva vaakakuorma. Tuulesta aiheutuva vaakavoima kohdistuu tasojen reunoihin viivakuormana. Rakenteiden painoa ja vinoudesta tulevaa lisävaakavoimaa ei ole huomioitu laskelmissa.

Tasoihin kohdistuvat tuulikuormat on arvioitu kokonaistuulivoimana, joiden arvot ovat

väli- ja yläpohjalla $F_y = F_x = 3m \cdot 0,78 \text{ kN/m}^2 = 2,34 \text{ kN/m}$. F_y ja F_x eivät vaikuta samanaikaisesti. Kokonaistuulivoima kohdistettiin esimerkki rakennuksien tasojen reunoihin viivakuormana.

6.3 Tutkimuksen tulokset

6.3.1 Tason vaakasuuntaiset kiertymät

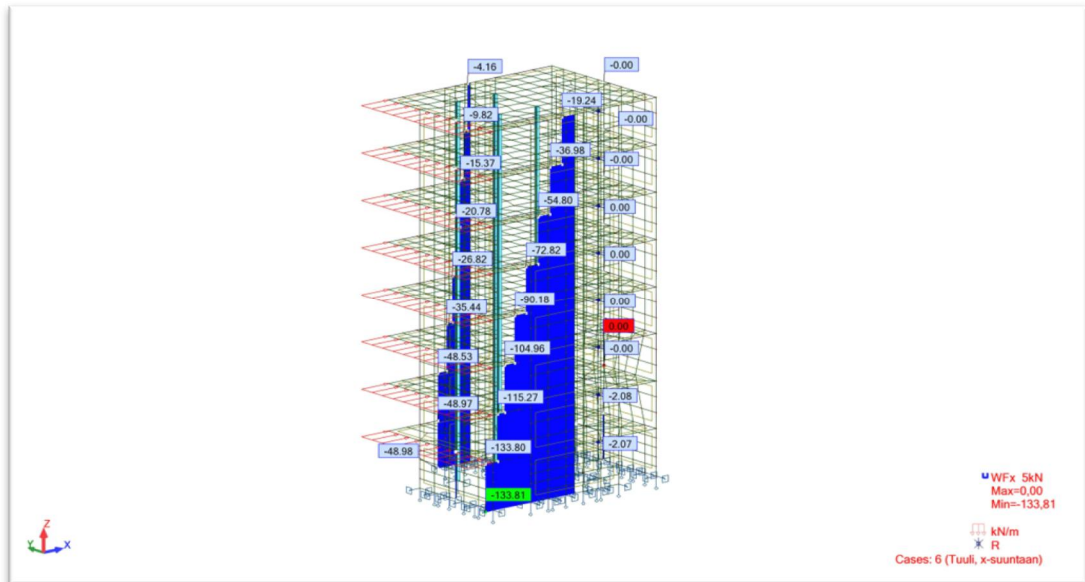
Käsinlaskennassa tasot oletetaan äärettömän jäykiksi, mutta todellisuudessa tasot eivät ole äärettömän jäykkiä rakenteita.

Taipuisan tason vaakasuuntaiset kiertymät ovat erisuuruisia tason eri alueilla. Taipuisalla tasolla ei siis ole yhtä ainoaa pistettä, jonka ympäri kiertymä tapahtuu. Kun taso on äärettömän jäykkä, sille voidaan määrittää piste, jonka ympäri se kiertyy eli kiertokeskiö.

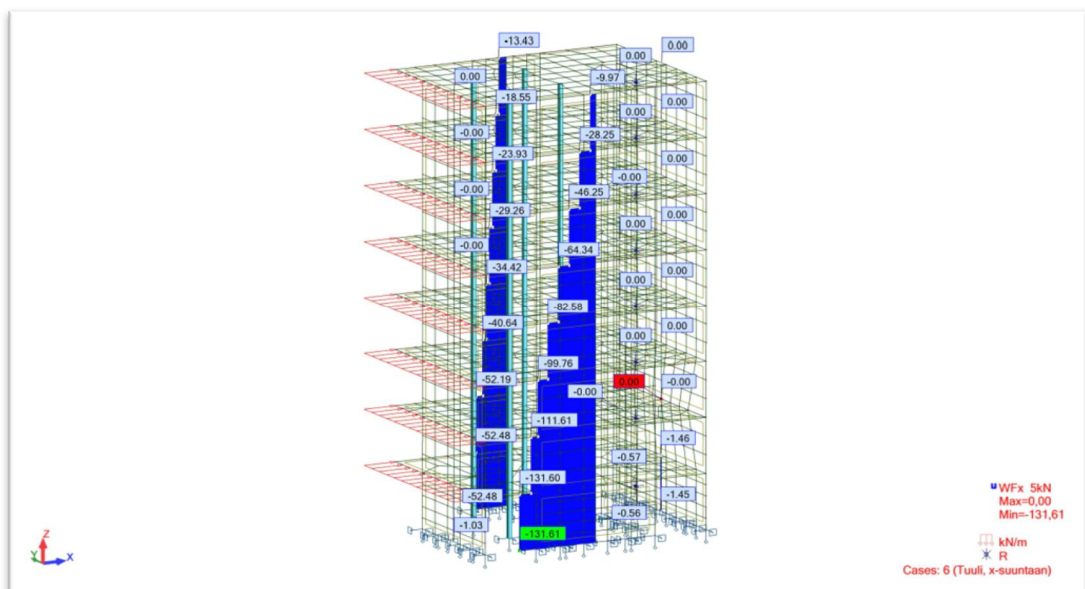
6.3.2 Leikkausvoimat pystyrakenteille

Esimerkki rakennuksien voimajakaumaa tutkittiin rakennuksilla 1-3, jotka mallinnettiin FEM-ohjelmalla ja käsinlaskennalla. Käsinlaskennassa vaakajäykkyys oletetaan täysin jäykäksi.

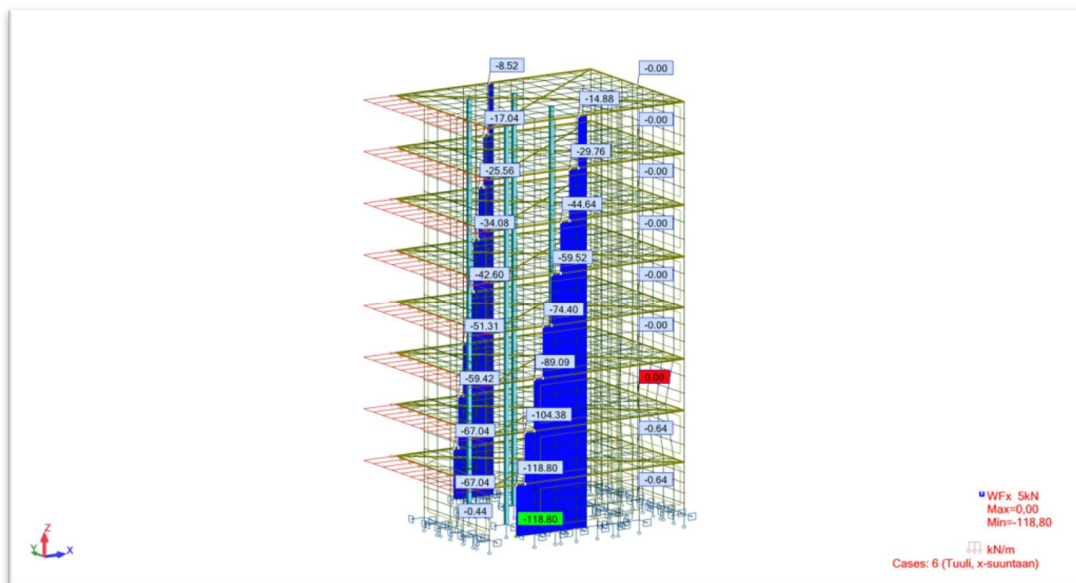
FEM-mallin (liitteet 2, 3 ja 4) ja käsin laskennan (liite 1) tuloksista voidaan huomata, että vaakavoimat jakaantuvat hieman eri tavalla rakennusten välillä (kuvat 16, 17 ja 18). Vaakavoimien jakautumisen eroavuudet ovat varsin suuria prosentuaalisesti. Suurin ero tuloksissa oli käsinlaskennan ja rakennuksen 3 välillä, joka kuvasi äärettömän jäykkää tasoa.



Kuva 16. Rakennus 1. Seinille tuleva leikkausvoima F_x , x-suunnan tuulesta.



Kuva 17. Rakennus 2. Seinille tuleva leikkausvoima F_x , x-suunnan tuulesta.



Kuva 18. Rakennus 3. Seinille tuleva leikkausvoima F_x , x-suunnan tuulesta.

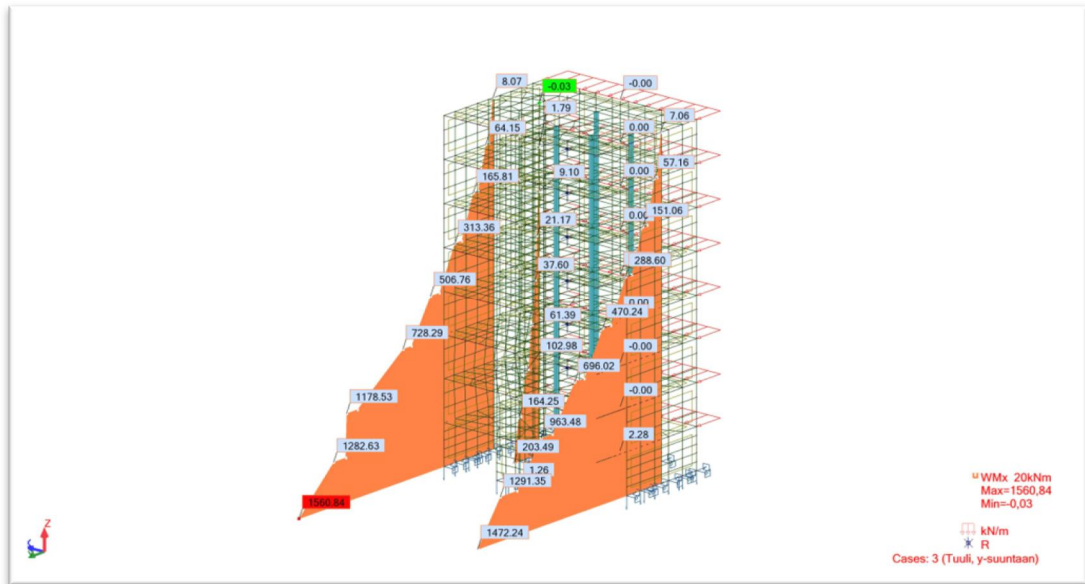
Vaakavoimien jakautuminen pystyrakenteille riippuu vaaka- ja pystyrakenteiden jäykkyydestä. Eroavuuksia aiheuttaa mm. FEM-mallien rakenteiden nurkkaliittymät ja tästä aiheutuvat nurkkapisteiden kiertymien estyminen.

FEM-mallien ja käsinlaskennan tarkemmat tulokset (liitteet 2, 3 ja 4) ja (liite 1).

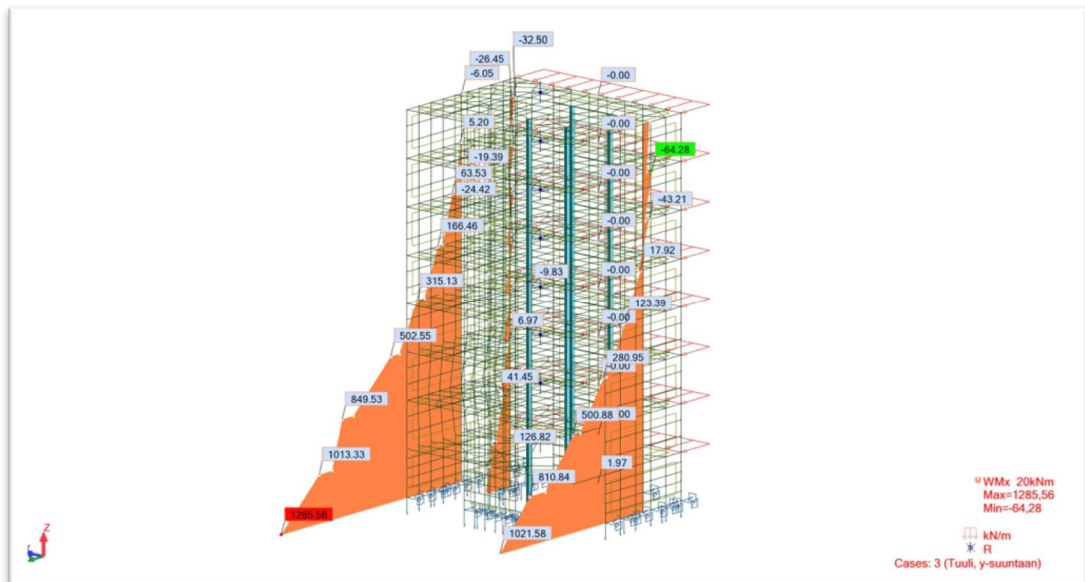
6.3.3 Momentit pystyrakenteille

Esimerkkirakennusten pystyrakenteille tulevien momenttien arvoissa oli selkeää eroavuutta havaittavissa (kuvat 19, 20 ja 21). Eroavuuksiin vaikuttaa moninaiset seikat, esimerkiksi FEM-ohjelmien tapa laskea tasojen vaakasuuntaista kiertymää, mikä aiheutuu epäsymmetrisestä vaakakuormituksesta vääntökeskipisteeseen nähden. Rakenteiden liittymien vaikutus on havaittavissa momenttikuvaajien epäjatkuvuutena. Äärettömän jäykällä tasolla laskettaessa FEM-mallissa ja käsinlaskennassa on merkittäviä eroja.

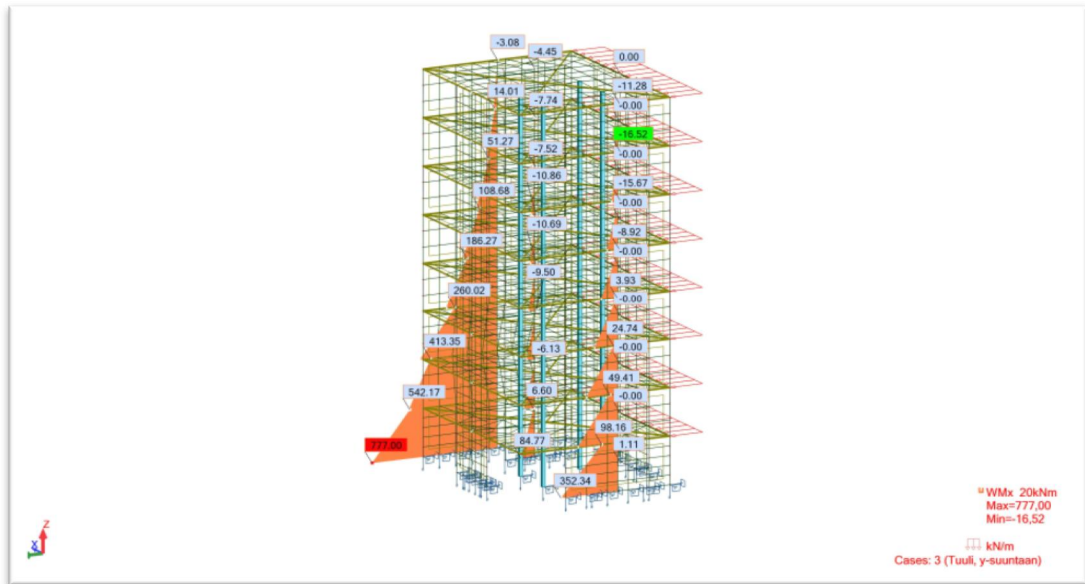
FEM-mallien ja käsinlaskennan tarkemmat tulokset (liitteet 2, 3 ja 4) ja (liite 1).



Kuva 19. Rakennus 1. Momentit y-suunnan tuulesta, Mx.



Kuva 20. Rakennus 2. Momentit y-suunnan tuulesta, Mx.



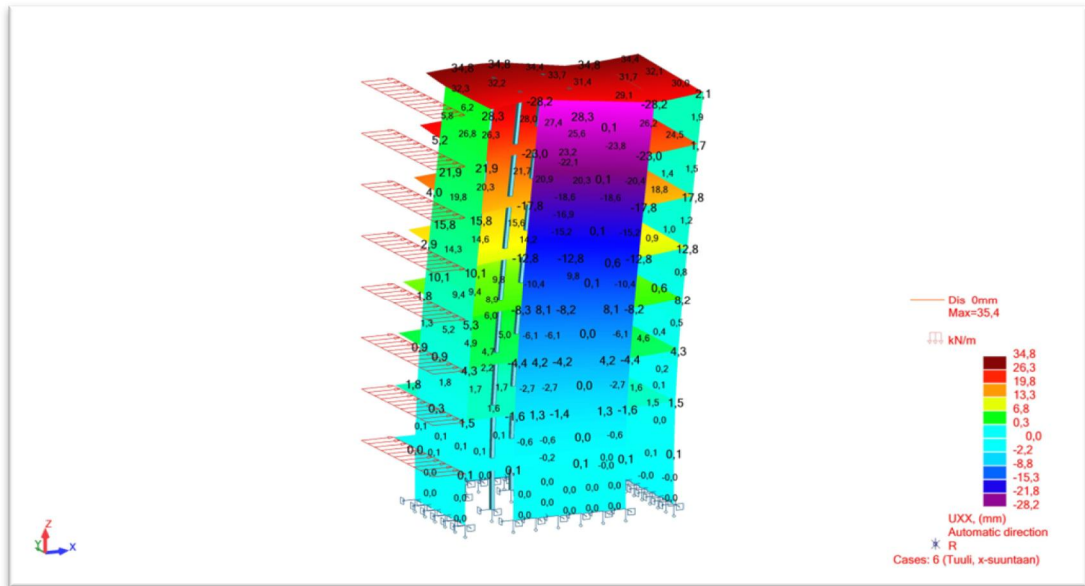
Kuva 21. Rakennus 3. Momentit y-suunnan tuulesta, Mx.

6.3.4 Vaakasuuntaiset siirtymät

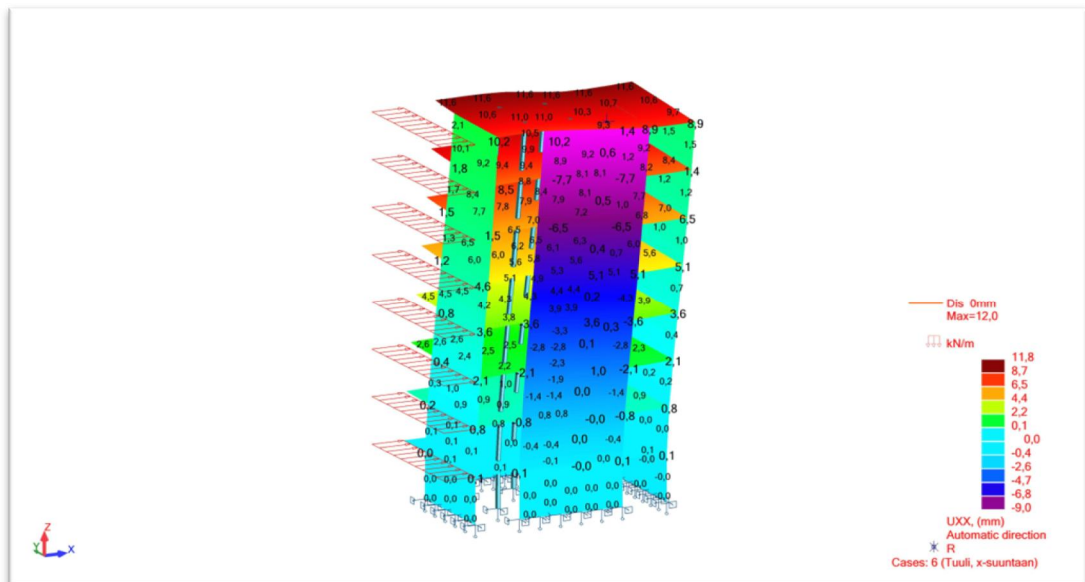
Esimerkkirakennusten siirtymissä on havaittavissa suurta eroavuutta (kuvat 22, 23 ja 24). Tuloksista on huomattavissa, että rakennus 1 (kuva 23) vaakasiirtymät ovat moninkertaiset verrattuna muihin rakennuksiin, rakennuksen välipohjataso oli (30 mm) puutaso. Rakennuksessa 2 (kuva 24) oli betoninen (200 mm) paksu välipohjataso, rakennuksen vaakasiirtymät olivat huomattavasti rakennus 1:tä pienemmät. Rakennus 3:ssa (kuva 25) oli äärettömän jäykkä välipohjataso, jossa vaakasiirtymät olivat huomattavasti pienemmät kuin muissa rakennuksissa.

Näin ollen voidaan todeta, että rakennuksen vaakarakenteen jäykkyydellä on merkitystä rakenteiden vaakasuuntaisiin siirtymiin.

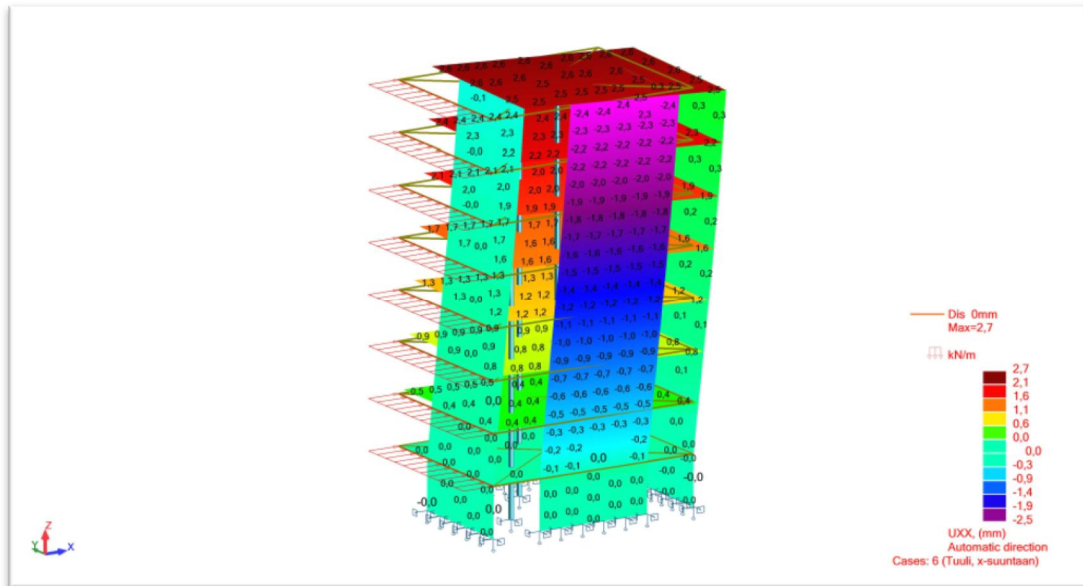
Rakennuksen vaakasiirtymiä ei laskettu käsin. FEM-mallien ja käsinlaskennan tarkemmat tulokset (liitteet 2, 3 ja 4) ja (liite 1).



Kuva 22. Rakennuksen 1. Siirtymät x-suunnan tuulesta, x-suuntaan.



Kuva 23. Rakennuksen 2. Siirtymät x-suunnan tuulesta, x-suuntaan.



Kuva 24. Rakennuksen 3. Siirtymät x-suunnan tuulesta, x-suuntaan.

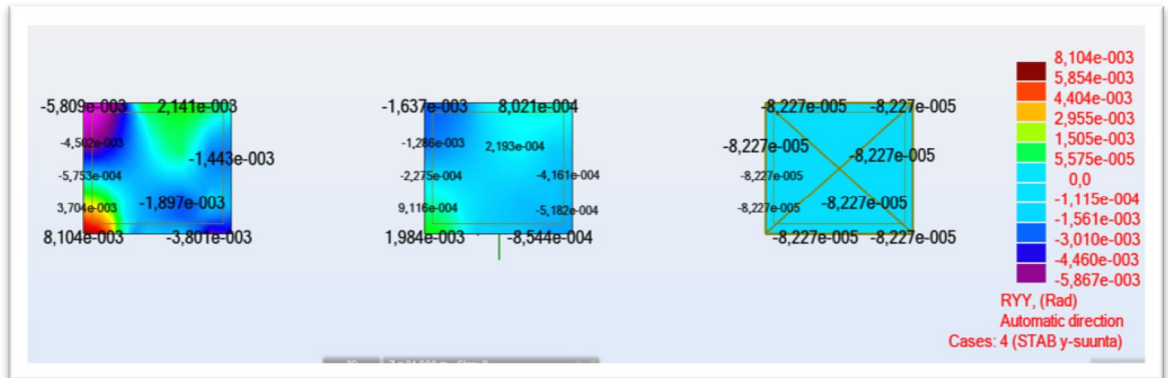
6.4 Tulosten yhteenveto

Tuloksista voidaan huomata, että käsinlaskennan ja FEM-ohjelmien välillä on merkittäviä eroja. FEM-ohjelmien ja käsilaskennan tulosten eroavuudet johtuvat moninaisista tekijöistä.

FEM-ohjelmissa käytetyt kuorielementit verrattuna käsinlaskennan sauvamalleihin ovat yksi syy tulosten eroavuuteen. FEM-ohjelmat laskevat usein leikkausmuodonmuutokset mukaan tuloksiin, kun taas käsinlaskennassa ne jätetään yleensä pois pienen vaikutuksen ja yksinkertaistamisen vuoksi. Yksi merkittävä tekijä FEM-ohjelmien ja käsinlaskennan välillä syntyy vaaka- ja pystyrakenteiden liittymien mallinnuksesta. Liittymien mallinnuksen merkitys korostuu, mitä jäykempi vaakarakenne on.

FEM-ohjelmasta saadusta pystysuuntaisten kiertymien vertailusta (kuva 25) voidaan huomata, että vasemmanpuoleinen taipuisa välipohjataso (puuta $b=30$ mm) kiertyy eritavalla tason eri alueilla. Keskimäinen välipohjataso (betonia $b=200$ mm) kiertyy tasaisemmin tason eri alueilla, mutta sekään ei ole äärettömän jäykkä. Oikean puoleinen äärettömän jäykkä välipohjataso kiertyy tasaisesti tason eri alueilla. Pystysuuntaiset kiertymät aiheuttavat eroa käsinlaskennan ja FEM-laskennan välille, koska pystysuuntaisia kiertymiä ei yleensä huomioida käsinlaskennassa, laskennan työläyden

johdosta. Sekä elementtirakenteisessa että puurakenteisissa liitoksissa tämän kiertymän hallinta on hyvin haastavaa.



Kuva 25. Tasojen pystysuuntaiset kiertymät 8.krs. Vasemmalla (rakennus 1) puuvälipohja 30mm, keskellä (rakennus 2) betonivälipohjataso 200mm ja oikealla (rakennus 3) täysin jäykkätaso.

Taipuisan tason vaakasuuntaisen kiertymän käsinlaskenta on vaikeaa, koska tason kiertymä ei ole tasaista eri alueilla. Eli taipuisalla tasolla ei ole yhtä pistettä, jonka ympäri taso kiertyy.

Esimerkilaskemassa syntyi vaakavoimien jakaantumisessa eroja, niin mallien välille kuin käsinlaskentaankin. Myös pystyrakenteiden momenttien arvoissa oli merkittäviä eroja. Kaikki erot eivät kuitenkaan johdu rakenteiden erilaisista jäykkyyksistä, vaan FEM-ohjelman tekemistä oletuksista, näitä eroja verrattuna käsinlaskentaan on joskus hankala selvittää, mitkä kaikki tekijät niihin vaikuttavat.

7 Johtopäätökset

Rakennusta suunniteltaessa tulisi pyrkiä sijoittamaan jäykistät rakenteet symmetrisesti. Rakenteiden epäsymmetristä sijoittamista kuorman resultanttiin nähden tulisi välttää, koska näin voidaan minimoida rakenteisiin kiertymästä tulevaa vaakavoimaa. Jäykistävien pystyrakenteiden (esimerkiksi mastoseinien) jatkuvuuteen ylhäältä alas perustuksille tulisi kiinnittää huomiota.

Jäykistelaskennassa tasot oletetaan usein täysin jäykiksi rakenteiksi, vaikka todellisuudessa ne eivät ole täysin jäykkiä rakenteita. Taso kiertyy eri tavalla riippuen pystyrakenteen jäykkyydestä. Väärä oletamus rakenteiden jäykkyydestä voi johtaa rakenteiden alimitoitukseen, johtuen kuormien erilaisesta jakautumisesta eri rakenneosien välillä. Täysin jäykän tason oletusta on syytä käyttää varoen puurakenteisissa välipohjarakenteissa. Taipuisan vaakarakenteen jäykistämiseen täytyy kiinnittää erityistä huomiota.

FEM-ohjelman ja käsinlaskennan tulosten eroavuuteen on moninaisia syitä. Mallinnuksessa on hyvä kiinnittää huomiota minkälaisena vaaka- ja pystyrakenteen elementit mallinnetaan. Rakenteiden liittymät on syytä myös tarkastaa, minkälaisia rasituksia niiden halutaan siirtävän. Mikäli välipohja on taipuisa, käsinlaskenta ei ole paras vaihtoehto rakennuksen rungon jäykistyslaskentaan. Jäykistyslaskenta tulisi tällöin harkita toteutettavan FEM-ohjelmalla. Kuten työssä on osoitettu FEM-ohjelman käyttö edellyttää käyttäjältä kohtalaisen paljon tietoa ja epätarkkuustekijöitä muodostuu helposti tahattomasti laskentamalliin. FEM-laskelmien tarkastuslaskentaan tulisi käyttää eri ohjelma- ja valmistajan FEM-ohjelmaa tulosten suuruusluokan tarkastamiseen. Taipuisan taso-jäykisteen jäykistelaskenta on vaikeaa, koska ohjeistusta taipuisan tason laskentaan on verrattain vähän. Ohjeita täysin jäykän välipohjan oletukseen ei ole suunnitteluohjeissa (esimerkiksi eurokoodi) esitetty.

Mikäli puurakenteisen rakennusrungon jäykistys suunnittelu halutaan säilyttää yksinkertaisena, olisi suositeltavaa pyrkiä käyttämään puurakenteisissa välipohjissa aksiaalisesti jäykkää betonirakennetta esimerkiksi puu-betoni liittorakennetta.

8 Jatkotutkimustarpeet

Opinnäytetyön teon yhteydessä nousi esille tuli monia asioita, jotka vaativat lisäselvityksiä. Seuraavaksi olen esittänyt mielestäni merkittävimmät lisäselvityksiä edellyttävät asiat:

Taipuisan välipohjanrakenteen käyttäminen jäykisterakenteena.

Ortotrooppisen materiaalin käyttämistä jäykistävän tason rakenteena ja kuinka tämä vaikuttaa vaakavoimien jakautumisessa pystyrakenteille esimerkiksi vaneriviilujen suunnan vaikutus välipohjan aksiaali jäykkyyteen ja sitä kautta vaakavoimien jakautumiseen pystyrakenteille.

Vaaka- ja pystyrakenteiden liittymien mallintamistavan vaikutusta voimien jakaantumiseen vaatii lisätutkimusta, että voitaisiin varmistua FEM-mallien elementtiliitoksien siirtävän juuri halutut voimat.

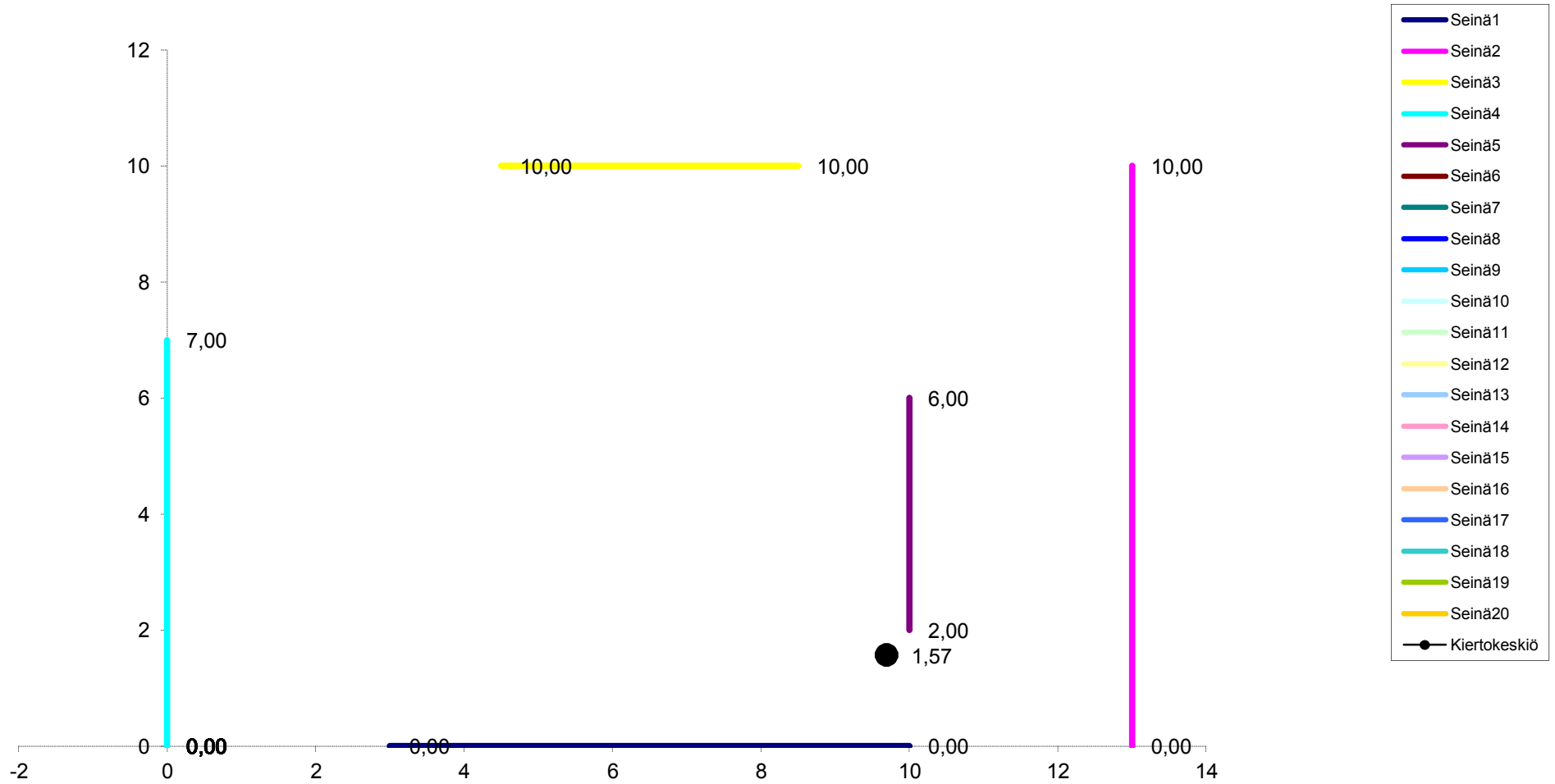
Lähteet

- 1 Jäykistysjärjestelmät, Elementtisuunnittelu.fi, Verkkodokumentti, <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/rakennuksen-jaykistys/jaykistysjarjestelmat>, luettu 17.12.2015
- 2 Robot Structural Analysis, Professional 2014, Autodesk, Ken Marsh, 2014
- 3 NR-Kattorakenteen jäykistyksen suunnittelu, RIL 248-2008, 2008
- 4 Puurakenteiden jäykistyksen ja halkeilun hallinta, RIL 244-2007, 2007
- 5 Heikki Kivinen, Ristiinlaminoituun massiivipuulevyyn perustuva korkean puukerrostalon runkoratkaisu, 2012, Aalto-yliopisto, Espoo
- 6 SFS-EN 1990 + A1 + AC, Eurokoodi rakenteiden suunnitteluperusteet 31.03.2009
- 7 SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, Eurokoodi Betonirakenteiden suunnittelu, 01.01.2015
- 8 Tero Lahtela, Puuinfo, Puukerrostalo levyjäykistys, TuplaA - puurakenteiden suunnittelijoiden täydennyskoulutus
- 9 STEP 1, Puurakenteet, Valtion teknillinen tutkimuslaitos, Rakennustieto Helsinki, Kirjapaino Tammer-Paino Oy, Tampere 1996
- 10 STEP 2, Puurakenteet, Valtion teknillinen tutkimuslaitos, Rakennustieto Helsinki, Kirjapaino Tammer-Paino Oy, Tampere 1998
- 11 Puurakenteiden suunnitteluohje, eurokoodi EN 1995-1-1 ja EN1995-1-2, RIL 205-1-2009, 2009
- 12 Mastojäykistys, Hallin jäykistys ja puukerrostalon mastojäykistys, Puuinfo, 19.5.2014

Liite 1

Esimekki rakennuksen käsin laskenta

JÄYKISTÄVÄT SEINÄT



VAAKAVOIMIEN JAKAUTUMINEN JÄYKISTÄVILLE RAKENNEOSILLE

Yksiköt: [m] ja [MN]

Voimien jakautuminen jäykistäville rakenteille lasketaan

ottamalla huomioon seinien taivutusjäykkyydet. Seinät otaksutaan ehjiksi. Aukkojen vaikutusta EI OLE huomioitu.

E = Kimmokeroin

 α = seinän kulma asteina 0...90, 0 astetta = x-akselin suuntaan

h = seinän leveys, b=seinän paksuus

H = kerroskorkeus Ac = b*h = poikkil.pinta-ala

xi,yi = seinän pp. etäisyys origosta

ax, ay = seinän pp. etäisyys kiertokeskiöstä x- ja y-suunnissa

lo = $b \cdot h^3 / 12$ = seinän taivutusjäykk. oman akselin suhteenlxx = $lo \cdot \sin^2 \alpha$ = taivutusjäykkyys Y-suunt. kuormillelyy = $lo \cdot \cos^2 \alpha$ = taivutusjäykkyys X - suunt. kuormille

taivutusjäykkyydet

 $Kx = 3 \cdot E \cdot I_{yy} / H^3$ $Ky = 3 \cdot E \cdot I_{xx} / H^3$

% = Seinän osuus kokonaisjäykkyydestä

Kerros	1-8													
Seinä	α	h	b	H	E	Ac	lo	lxx	Ky	yi	Ky*xi	ay	Ky*axi ²	%
1y	0	7,00	0,03	3,00	11000	0,21	0,86	0,00	0,0	0,00	0,0	-1,57	0	0,0
								lyy	Kx	xi	Kx*yi	ax	Kx*ayi ²	%
1x								0,86	1048,1	6,50	0,0	-3,19	2592	84,3
								lxx	Ky	yi	Ky*xi	ay	Ky*axi ²	%
2y	90	10,00	0,03	3,00	11000	0,30	2,50	2,50	3055,6	5,00	39722,2	3,43	33388	71,1
								lyy	Kx	xi	Kx*yi	ax	Kx*ayi ²	%
2x								0,00	0,0	13,00	0,0	3,31	0	0,0
								lxx	Ky	yi	Ky*xi	ay	Ky*axi ²	%
3y	0	4,00	0,03	3,00	11000	0,12	0,16	0,00	0,0	10,00	0,0	8,43	0	0,0
								lyy	Kx	xi	Kx*yi	ax	Kx*ayi ²	%
3x								0,16	195,6	6,50	1955,6	-3,19	13889	15,7
								lxx	Ky	yi	Ky*xi	ay	Ky*axi ²	%
4y	90	7,00	0,03	3,00	11000	0,21	0,86	0,86	1048,1	3,50	0,0	1,93	98497	24,4
								lyy	Kx	xi	Kx*yi	ax	Kx*ayi ²	%
4x								0,00	0,0	0,00	0,0	-9,69	0	0,0
								lxx	Ky	yi	Ky*xi	ay	Ky*axi ²	%
5y	90	4,00	0,03	3,00	11000	0,12	0,16	0,16	195,6	4,00	1955,6	2,43	18	4,5
								lyy	Kx	xi	Kx*yi	ax	Kx*ayi ²	%
5x								0,00	0,0	10,00	0,0	0,31	0	0,0

Rakennuksen mitat	d=	13,00	m	x-suuntaan
	b=	10,00	m	y-suuntaan
jäykkyyspainopiste	xo=	9,694	m	
	yo=	1,572	m	
kokonais jäykkyydet	sum Kx=	1244		
	sum Ky=	4299		
	sum Kx*ay²+Ky*ax²=	148384		
vaakavoimat	Fx=	0,023400	MN	kun tuulee x-suuntaan
	Fy=	0,030420	MN	kun tuulee y-suuntaan
Momentit epäkeskeisyydestä	Mx=	0,080204	MNm	kun tuulee x-suuntaan
	My=	0,142803	MNm	kun tuulee y-suuntaan
siirtymät	$v_x = F_x / \text{sum} K_x$	1,88E-05	m	kun tuulee x-suuntaan
	$v_y = F_y / \text{sum} K_y$	7,08E-06	m	kun tuulee y-suuntaan
Kiertymät	$\theta_x = M / (\text{sum} K_x * a_y^2 + K_y * a_x^2)$		5,41E-07	kun tuulee x-suuntaan
	$\theta_y = M / (\text{sum} K_x * a_y^2 + K_y * a_x^2)$		9,62E-07	kun tuulee y-suuntaan
Seinän rasitukset	$Q_x = F_x * v_x + K_{xi} * y_i * \theta$			
	$Q_y = F_y * v_y - K_{xi} * y_i * \theta$			

KRS.		1-8											
Seinä nro:	Kx	Ky	θ_x :stä	θ_y :stä	ax (m)	ay (m)	Vx (m)	Vy (m)	Fx (MN)	Fy (MN)	Σky	Σkx	
1	1048,06	0,00	5,41E-07	9,62E-07	-3,19	-1,57	1,88E-05	7,08E-06	0,0234	0,0304	4299,16667	1243,6	
2	0,00	3055,56	5,41E-07	9,62E-07	3,31	3,43	1,88E-05	7,08E-06	0,0234	0,0304	4299,16667	1243,6	
3	195,56	0,00	5,41E-07	9,62E-07	-3,19	8,43	1,88E-05	7,08E-06	0,0234	0,0304	4299,16667	1243,6	
4	0,00	1048,06	5,41E-07	9,62E-07	-9,69	1,93	1,88E-05	7,08E-06	0,0234	0,0304	4299,16667	1243,6	
5	0,00	195,56	5,41E-07	9,62E-07	0,31	2,43	1,88E-05	7,08E-06	0,0234	0,0304	4299,16667	1243,6	

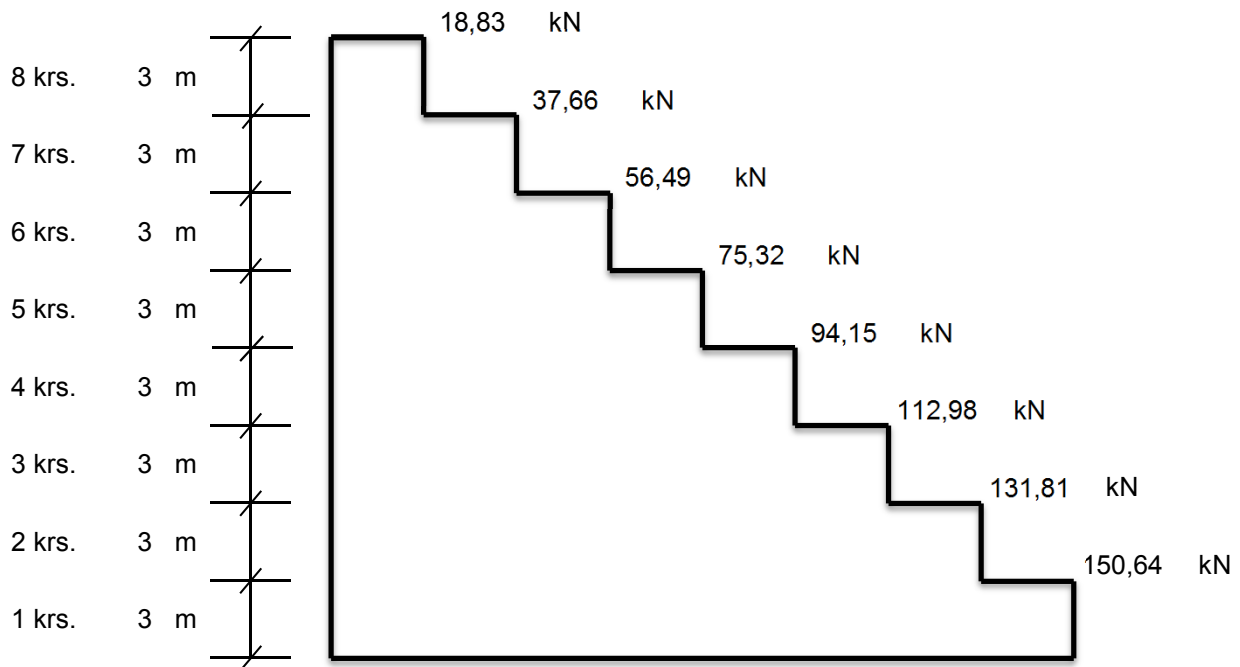
KRS.		1-8											
Seinä nro:	Tuulee x-suuntaan				Tuulee y-suuntaan								
	H_k =	Qx	%	kN	H_k =	Qy	%	kN					
1	H_k =	18,8296	80 %	kN	H_k =	-1,586	-5 %	kN					
2	H_k =	5,4595	23 %	kN	H_k =	11,900	39 %	kN					
3	H_k =	4,5704	20 %	kN	H_k =	1,586	5 %	kN					
4	H_k =	-5,4918	-23 %	kN	H_k =	17,194	57 %	kN					
5	H_k =	0,0323	0 %	kN	H_k =	1,326	4 %	kN					
	yht:	23,4000	kN		yht:	30,420	kN						
	Fx=	23,4000	kN		Fy=	30,420	kN						

Kunkin suunnan Yhteen laskettujen voimien summa pitää olla samaa luokkaa kuin kokonaistuulivoima F

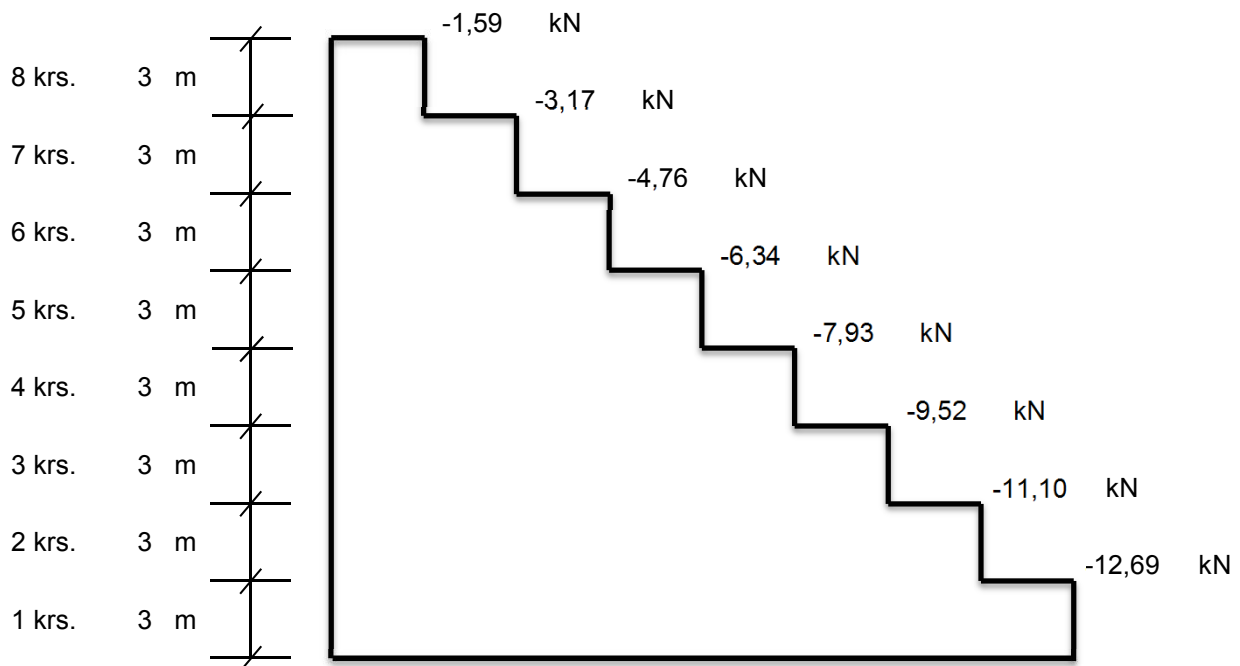
Prosentuaalinen osuus = tuulen aiheuttamasta vaakavoimasta

Leikkausvoimapinnat seinälle 1

x-suunnan tuulesta

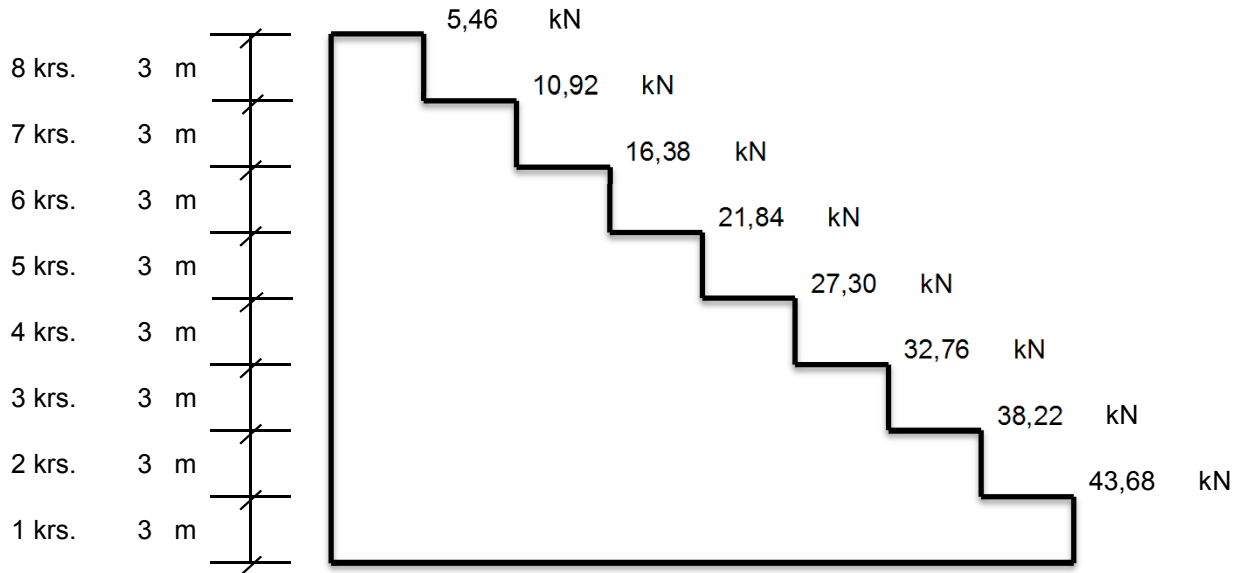


y-suunnan tuulesta

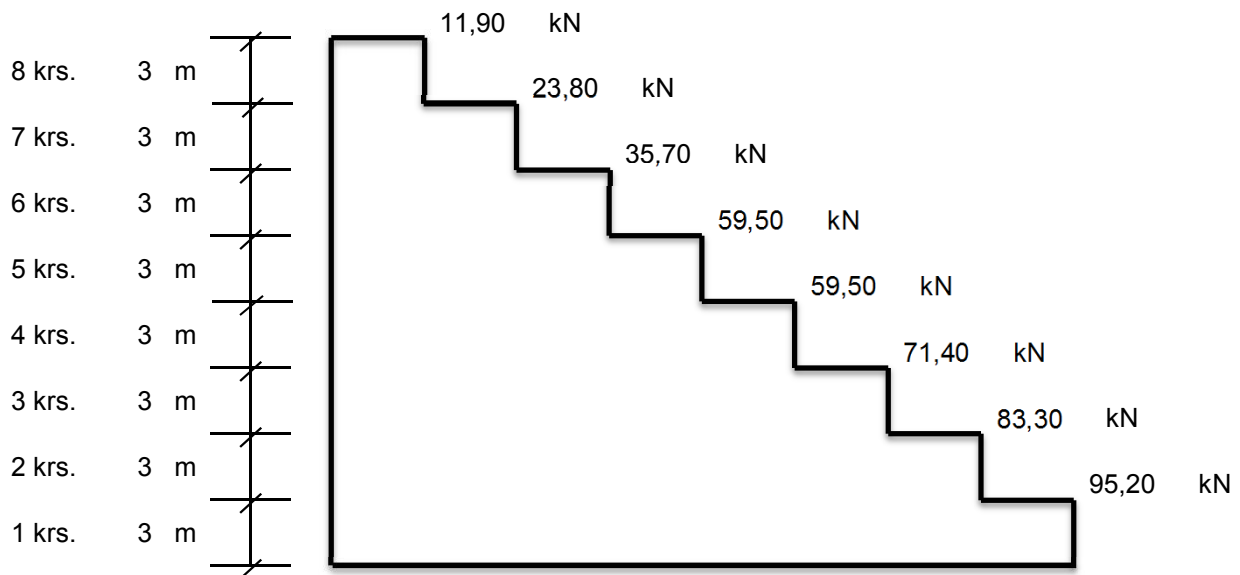


Leikkausvoimapinnat seinälle 2

x-suunnan tuulesta

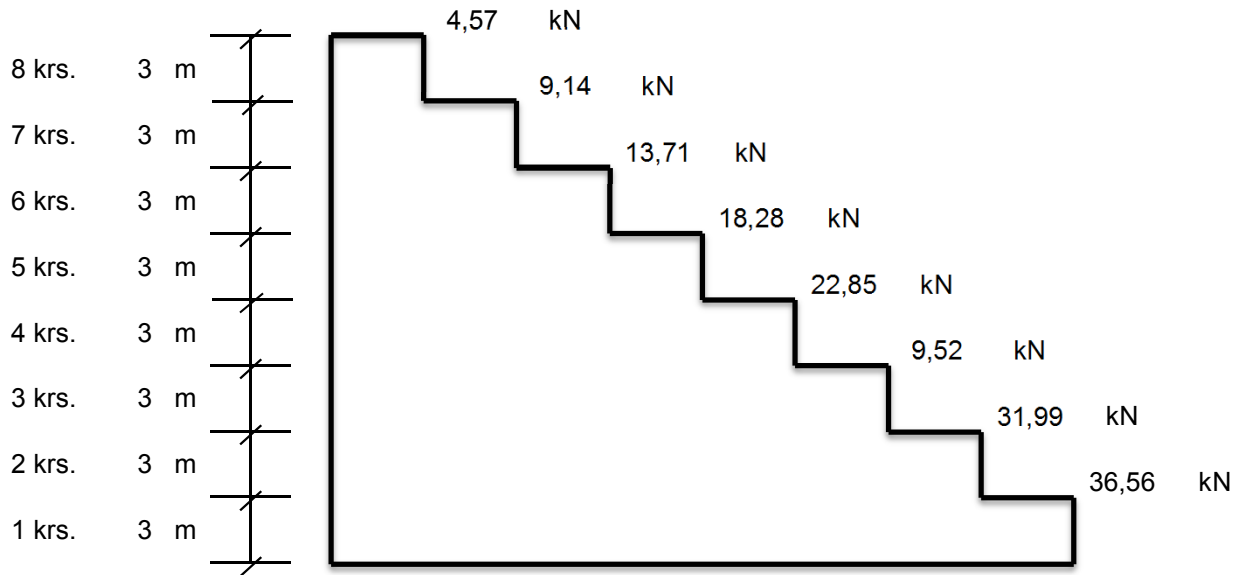


y-suunnan tuulesta

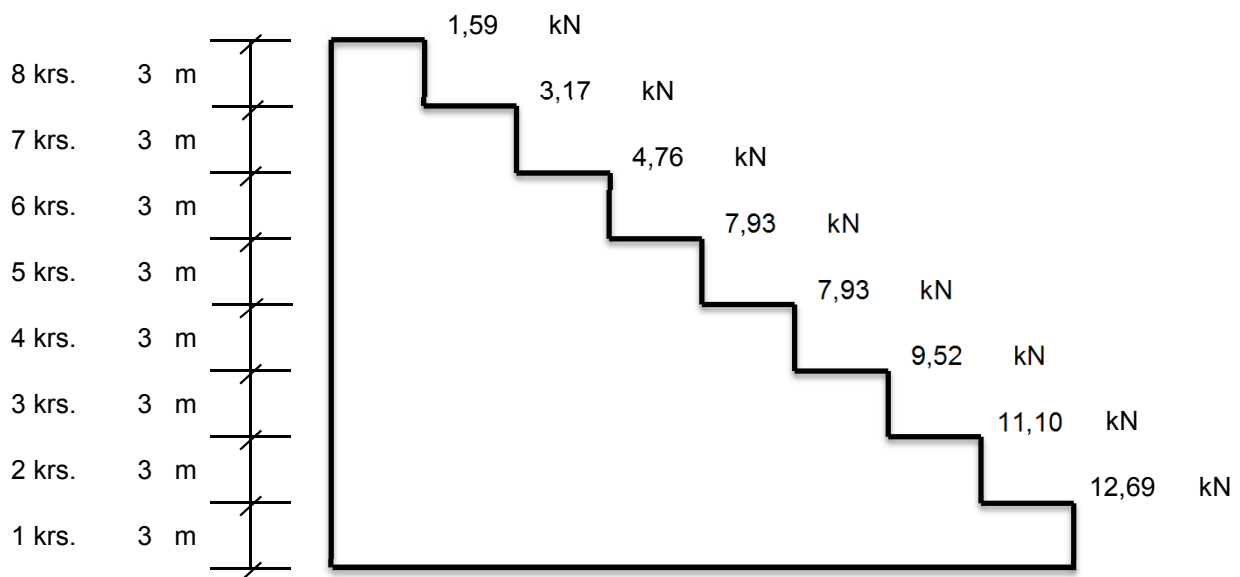


Leikkausvoimapinnat seinälle 3

x-suunnan tuulesta

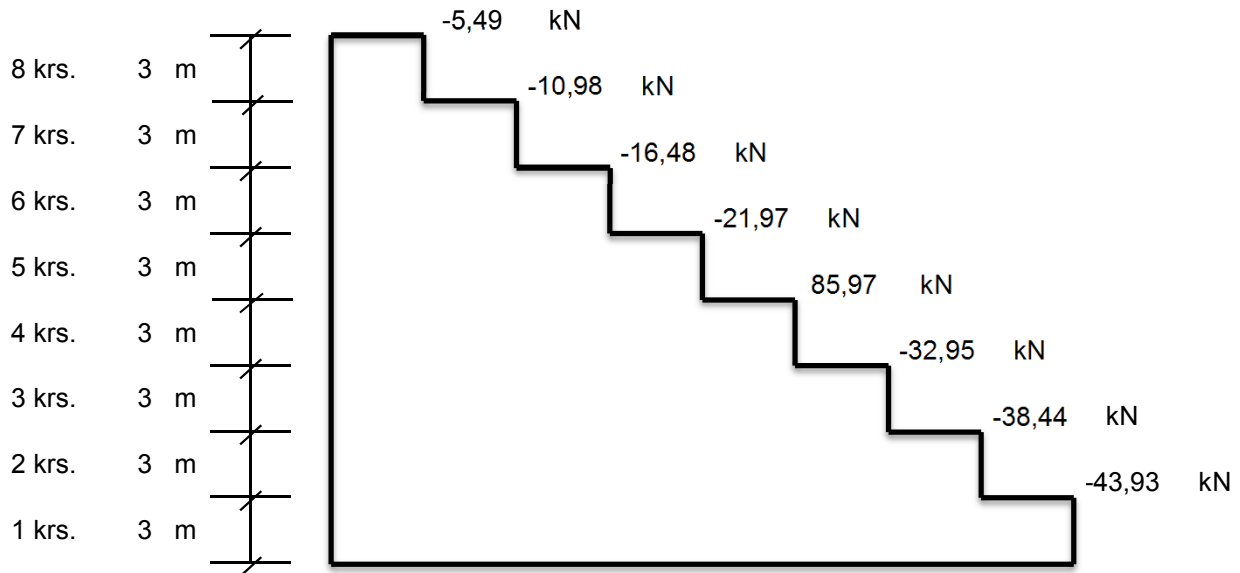


y-suunnan tuulesta

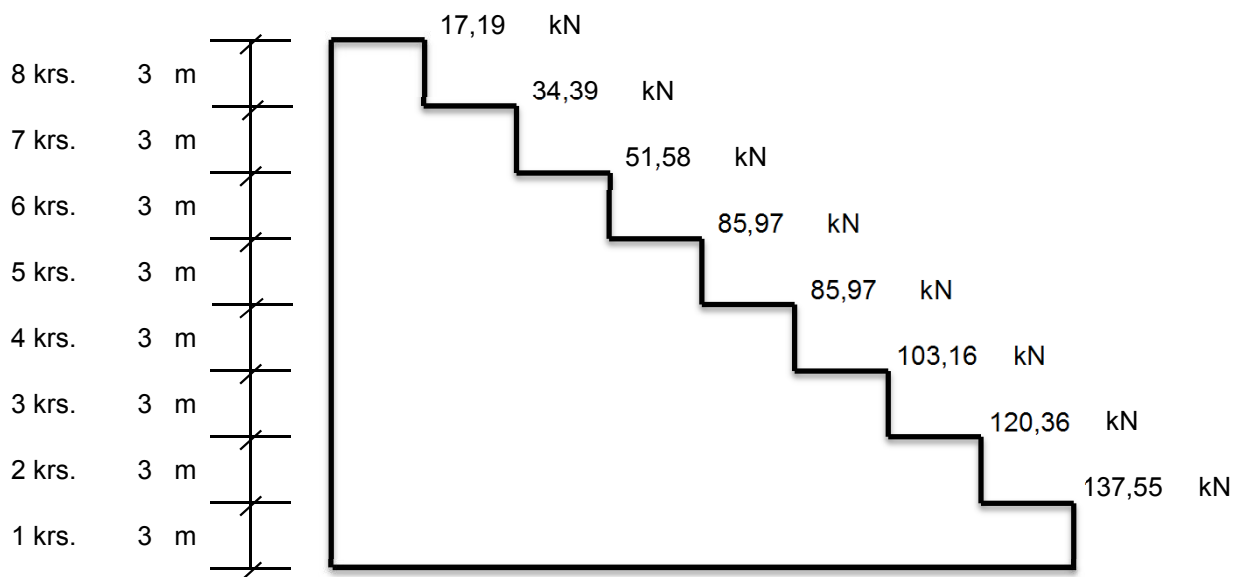


Leikkausvoimapinnat seinälle 4

x-suunnan tuulesta

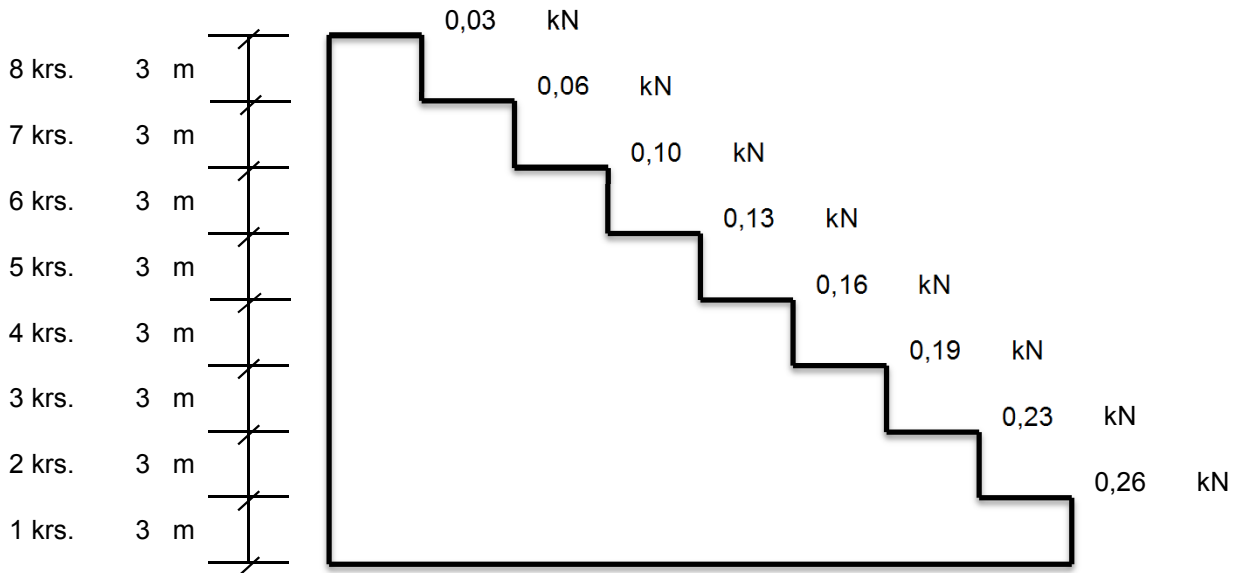


y-suunnan tuulesta

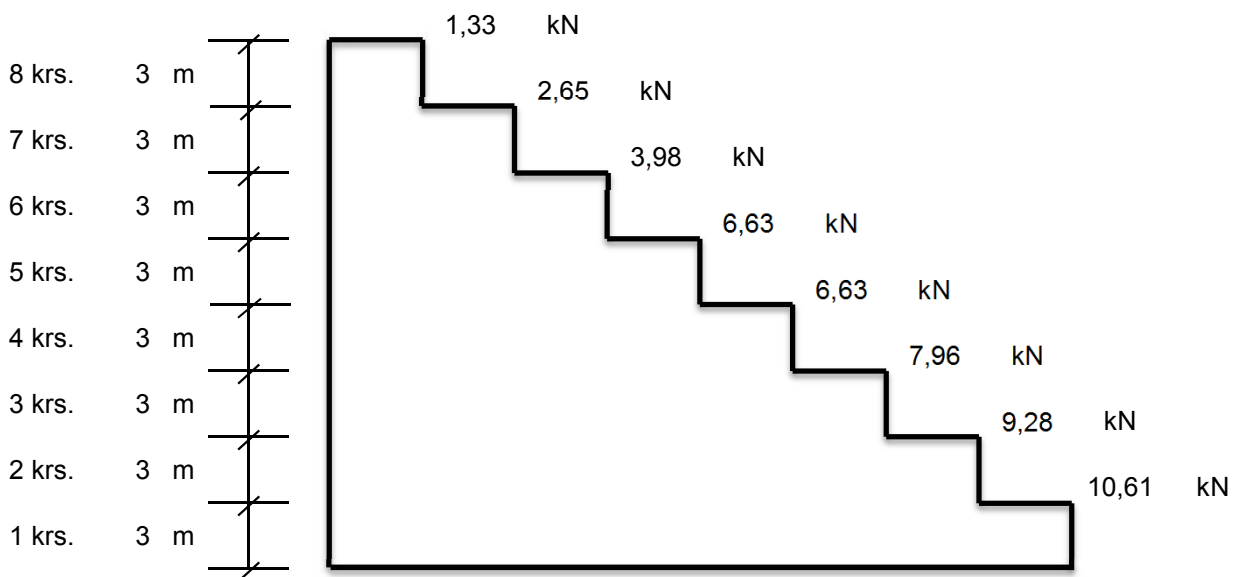


Leikkausvoimapinnat seinälle 5

x-suunnan tuulesta

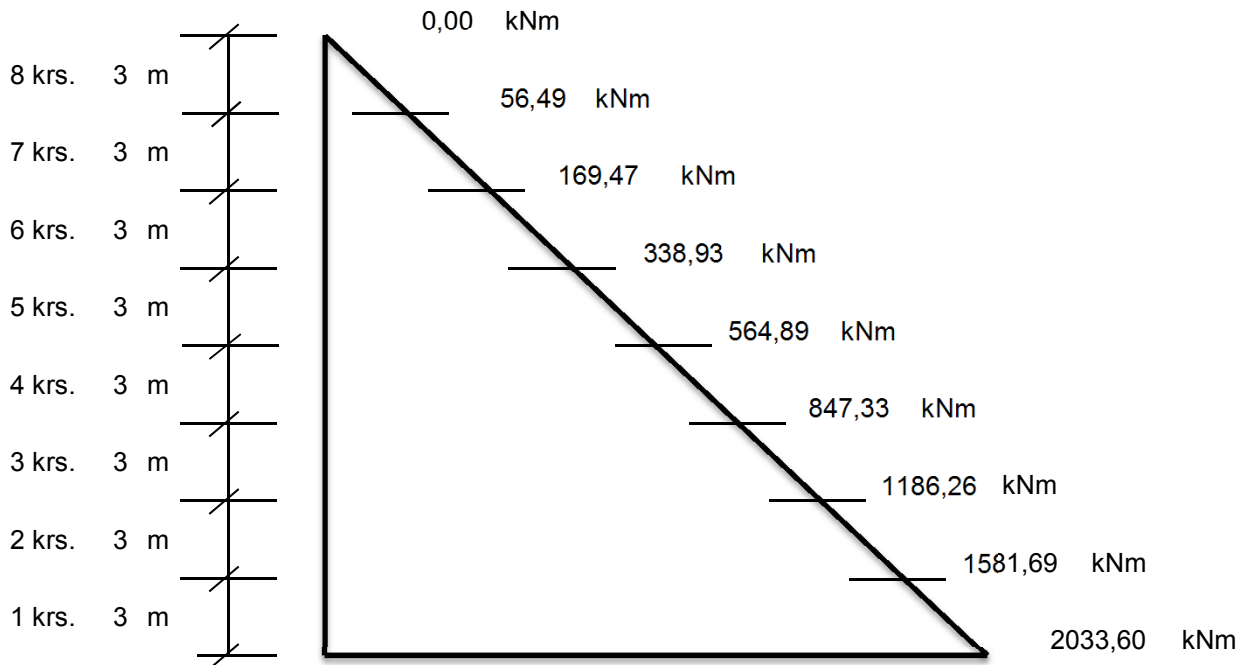


y-suunnan tuulesta

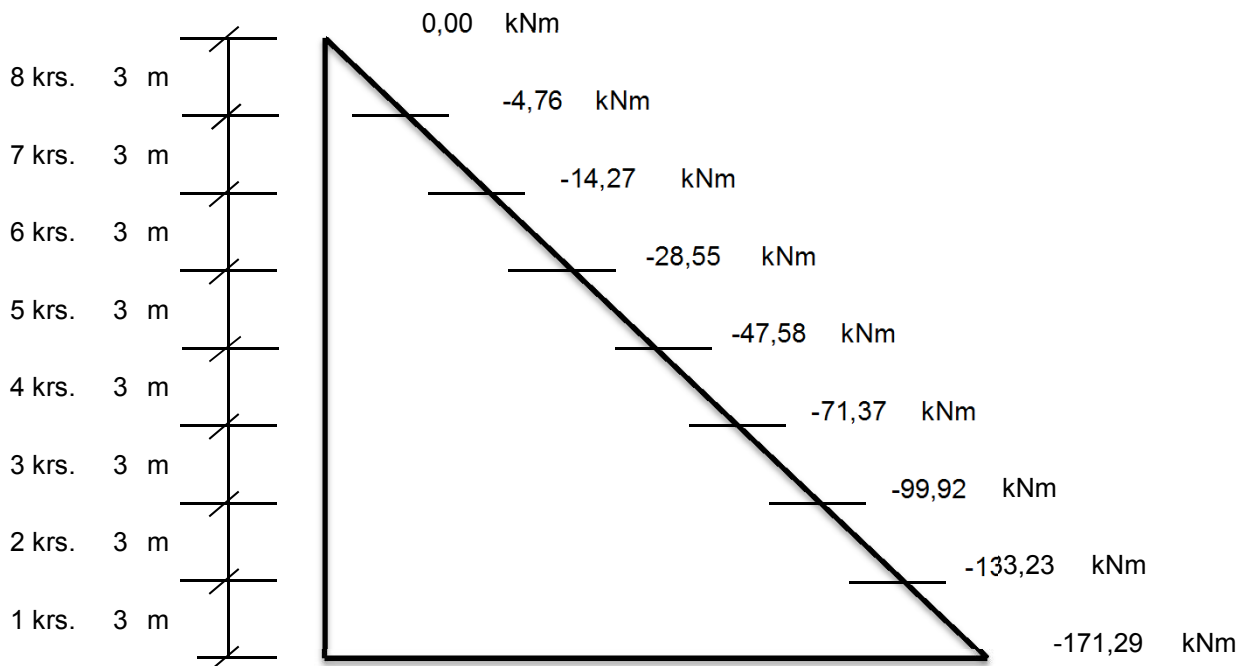


Momenttipinnat seinälle 1

x-suunnan tuulesta

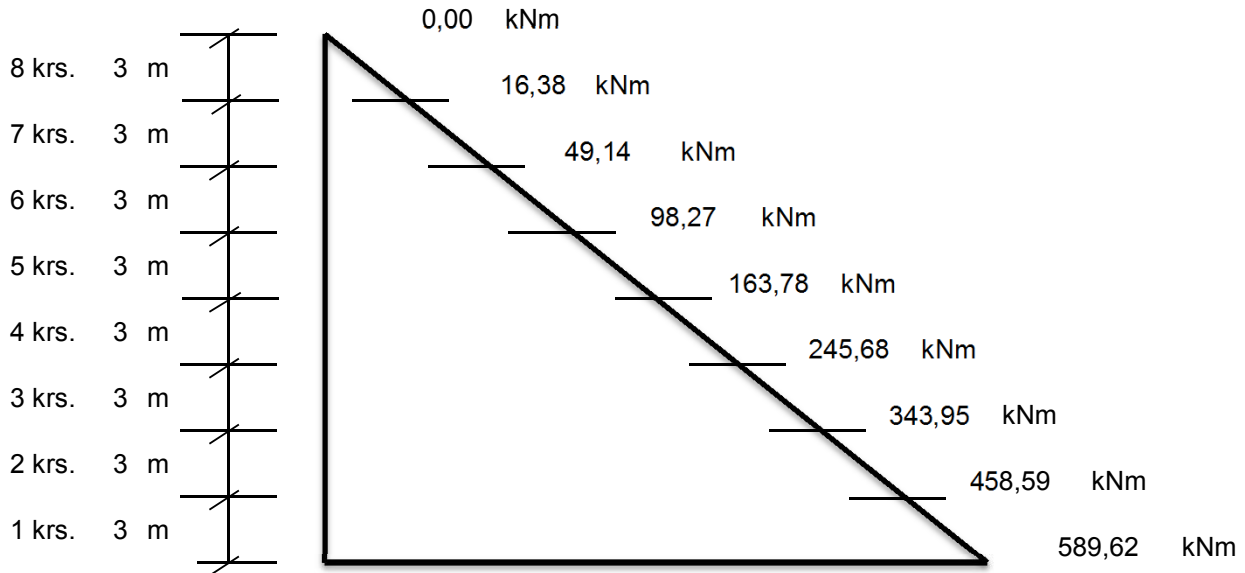


y-suunnan tuulesta

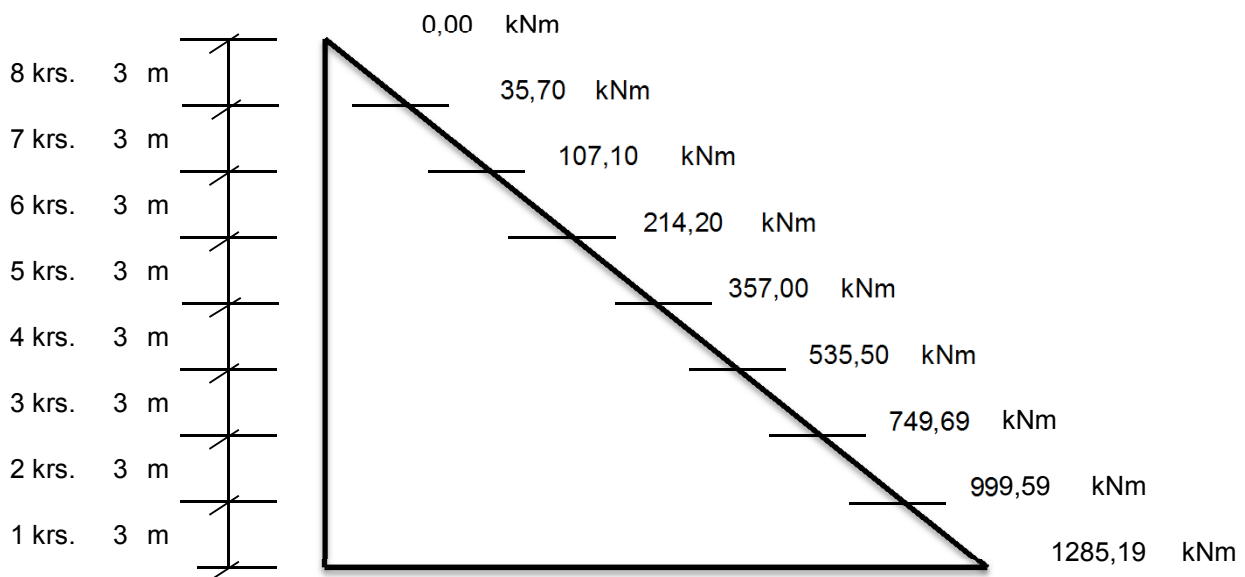


Momenttipinnat seinälle 2

x-suunnan tuulesta

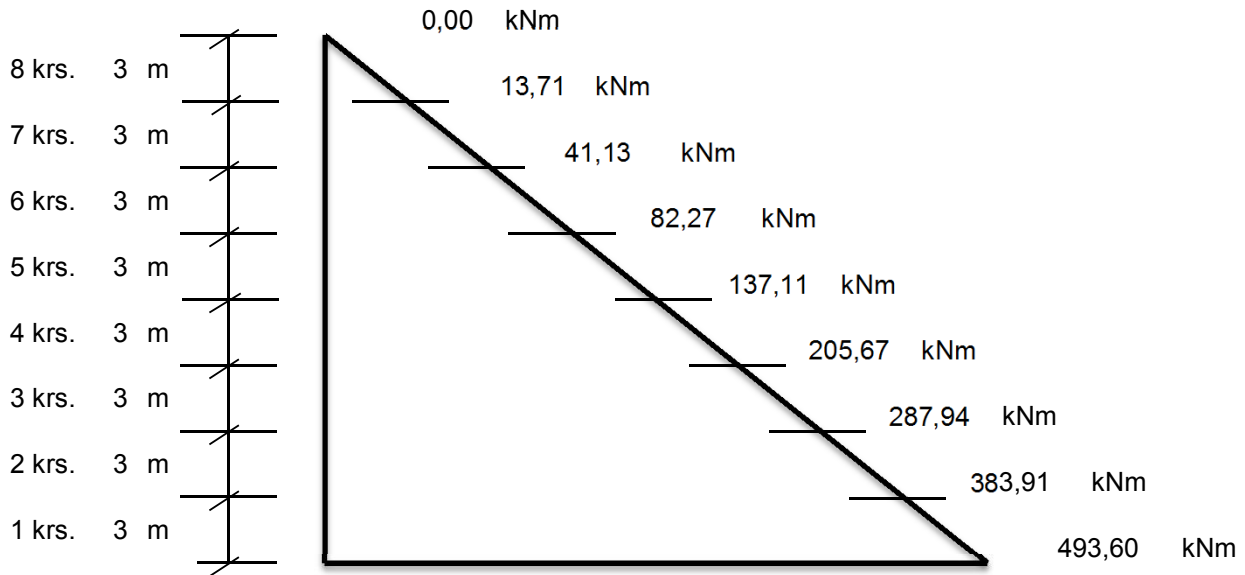


y-suunnan tuulesta

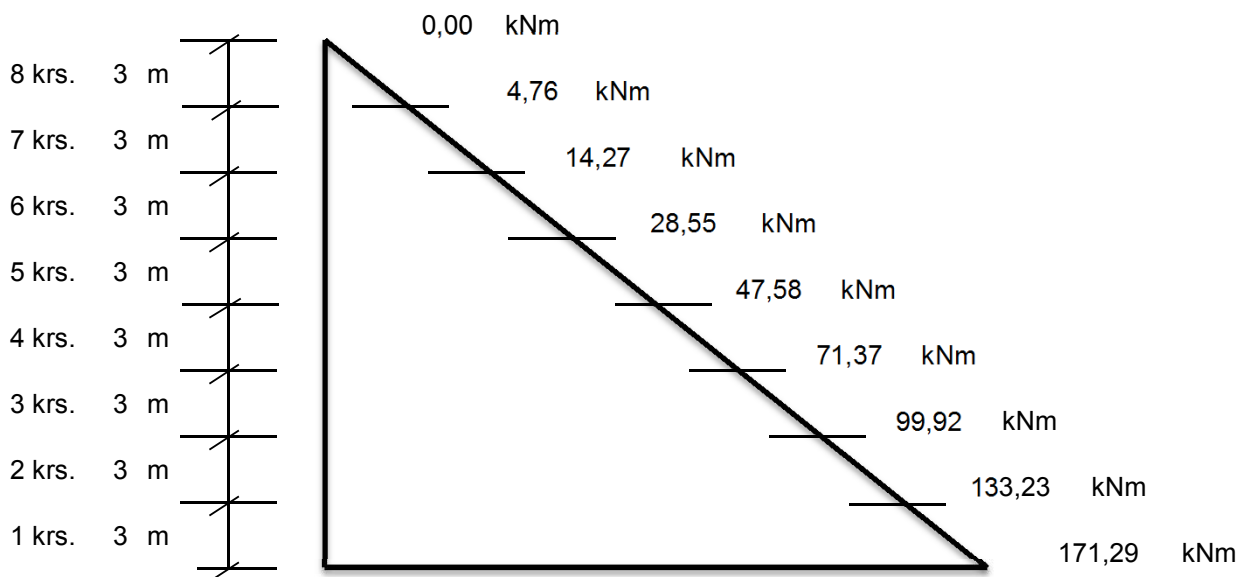


Momenttipinnat seinälle 3

x-suunnan tuulesta

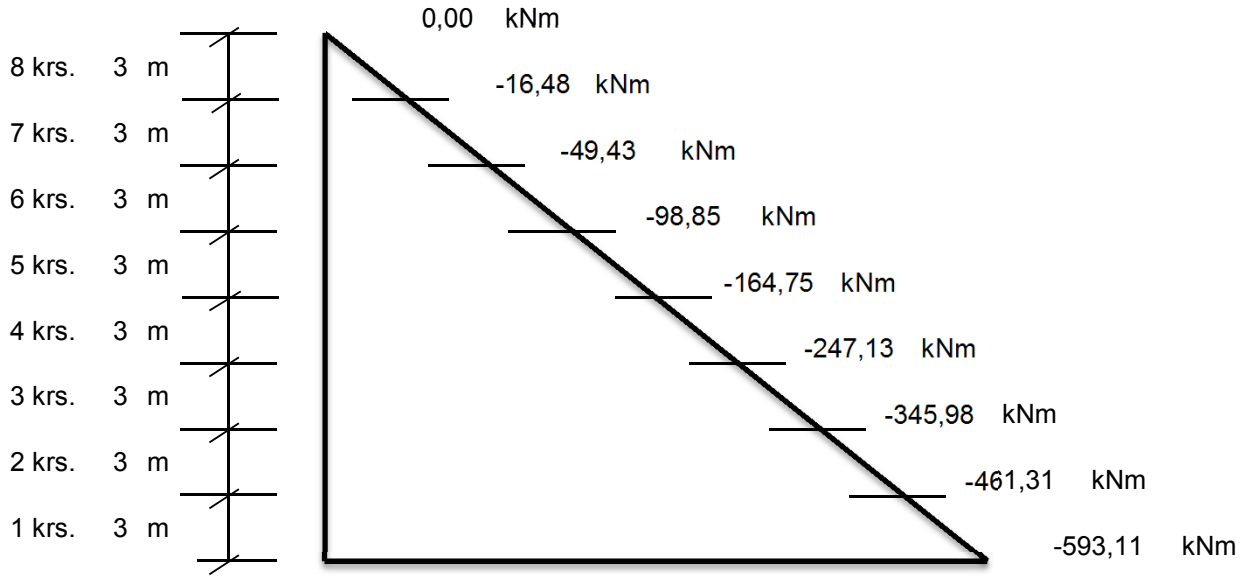


y-suunnan tuulesta

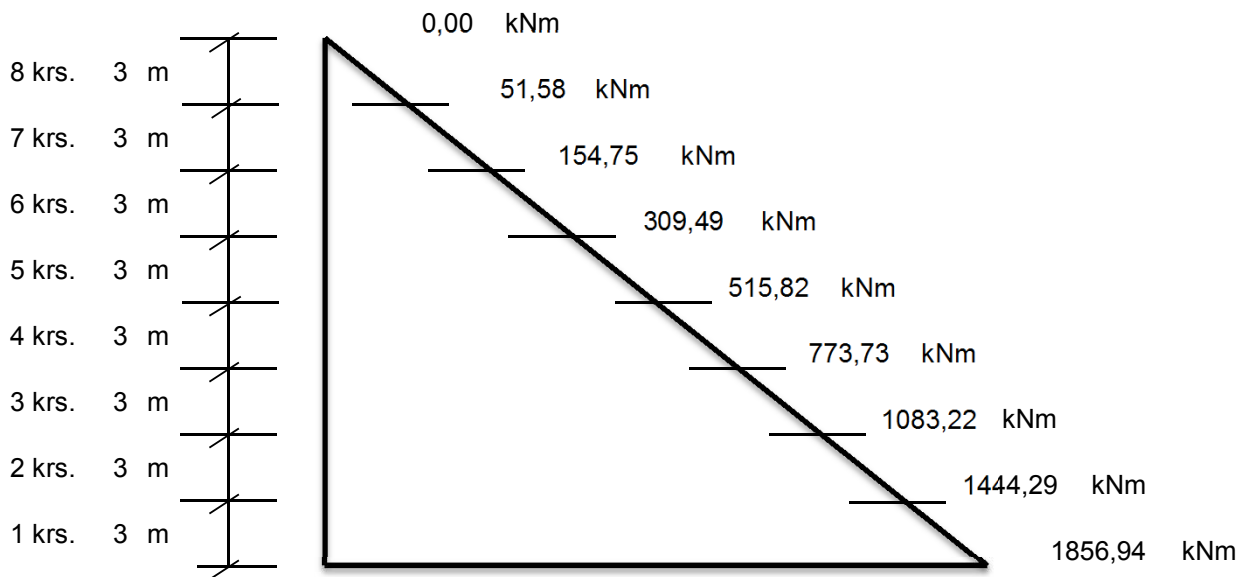


Momenttipinnat seinälle 4

x-suunnan tuulesta

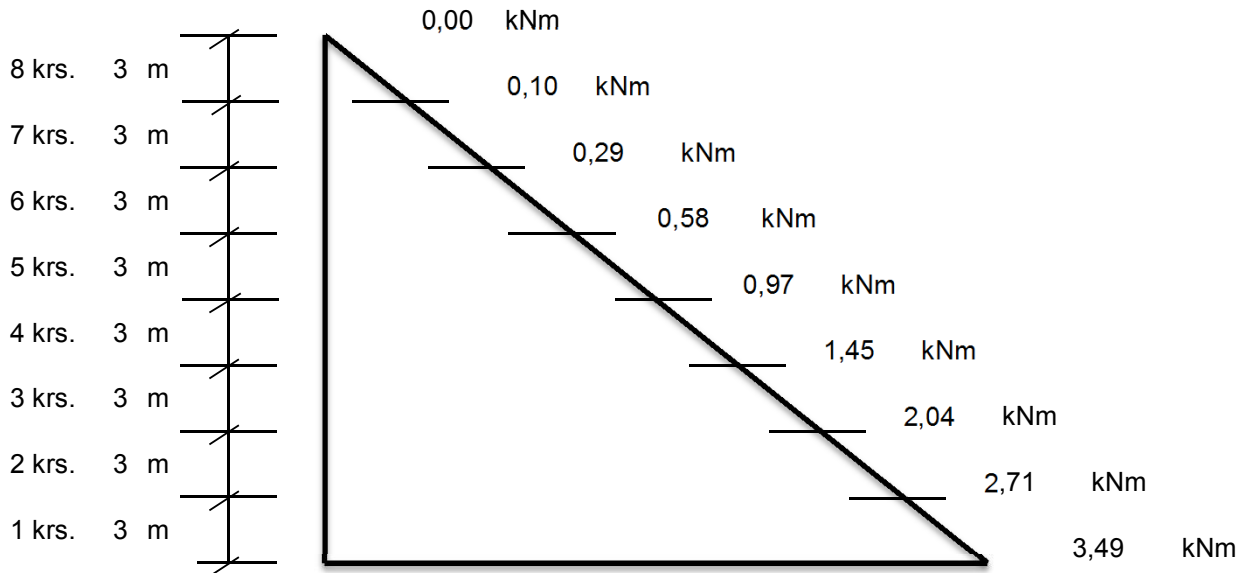


y-suunnan tuulesta

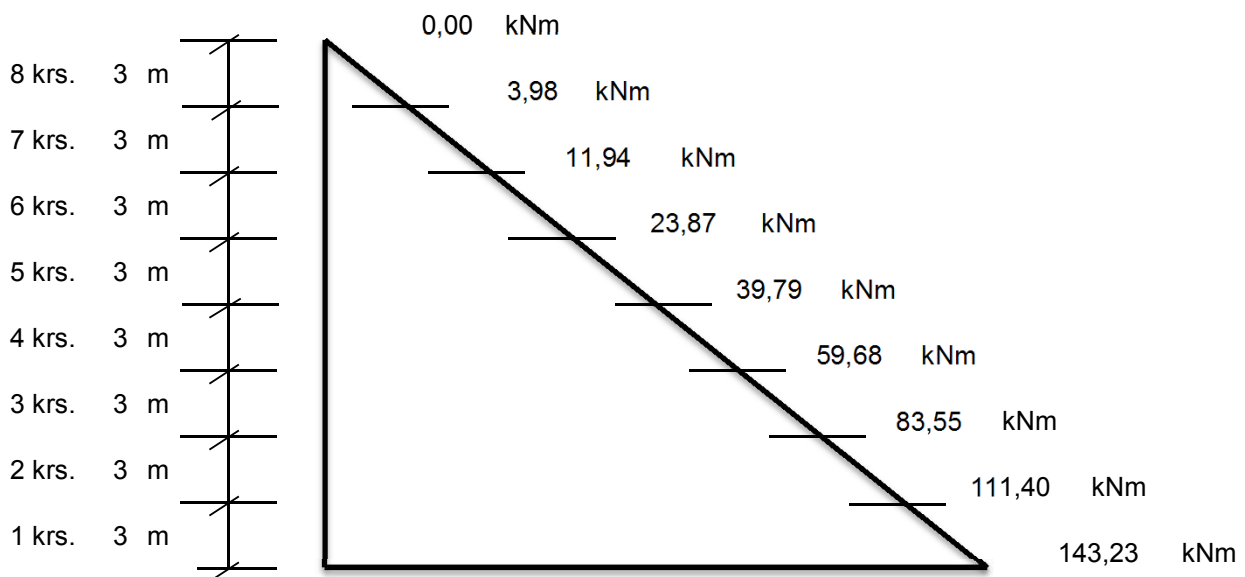


Momenttipinnat seinälle 5

x-suunnan tuulesta



y-suunnan tuulesta



Vaakavoimat seinille

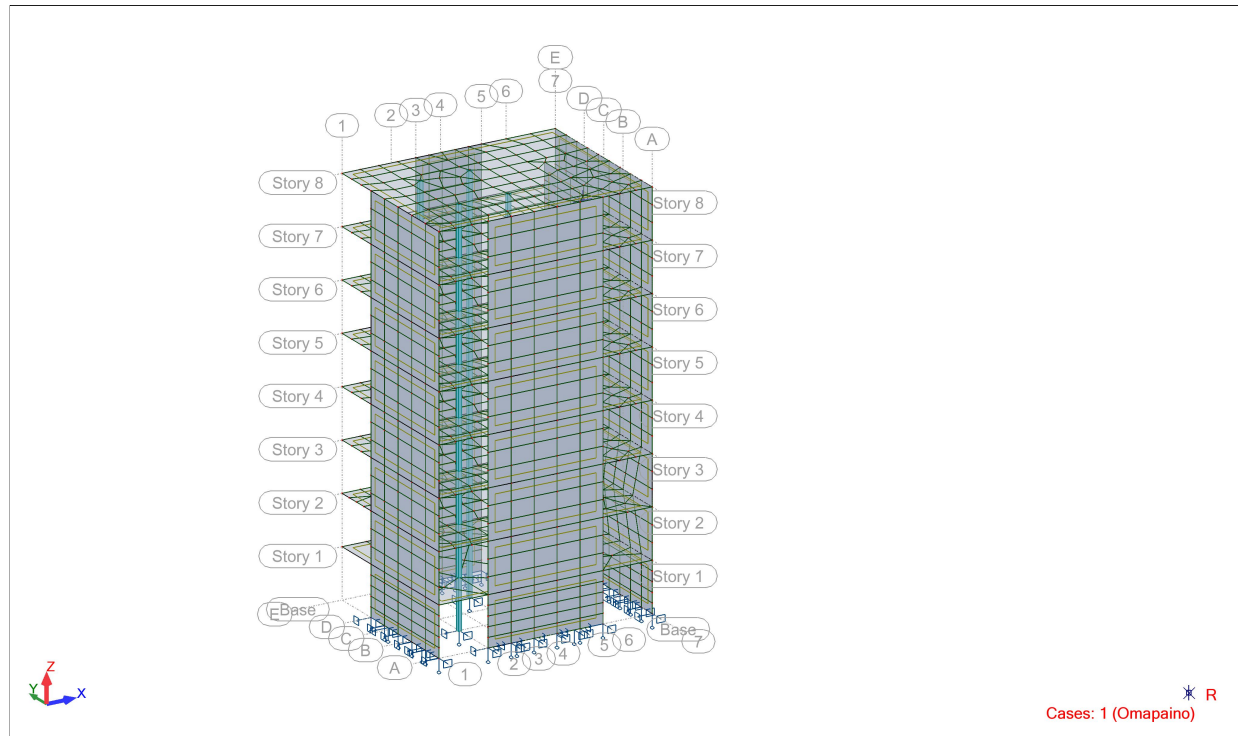
x-suunnan tuulesta						
seinä nro	1	2	3	4	5	
1 krs.	18,83	5,46	4,57	-5,49	0,03	[kN]
2 krs.	18,83	5,46	4,57	-5,49	0,03	[kN]
3 krs.	18,83	5,46	4,57	-5,49	0,03	[kN]
4 krs.	18,83	5,46	4,57	-5,49	0,03	[kN]
5 krs.	18,83	5,46	4,57	-5,49	0,03	[kN]
6 krs.	18,83	5,46	4,57	-5,49	0,03	[kN]
7 krs.	18,83	5,46	4,57	-5,49	0,03	[kN]
8 krs.	18,83	5,46	4,57	-5,49	0,03	[kN]

y-suunnan tuulesta						
seinä nro	1	2	3	4	5	
1 krs.	-1,59	11,90	1,59	17,19	1,33	[kN]
2 krs.	-1,59	11,90	1,59	17,19	1,33	[kN]
3 krs.	-1,59	11,90	1,59	17,19	1,33	[kN]
4 krs.	-1,59	11,90	1,59	17,19	1,33	[kN]
5 krs.	-1,59	11,90	1,59	17,19	1,33	[kN]
6 krs.	-1,59	11,90	1,59	17,19	1,33	[kN]
7 krs.	-1,59	11,90	1,59	17,19	1,33	[kN]
8 krs.	-1,59	11,90	1,59	17,19	1,33	[kN]

TITLE PAGE

Project: Liite 2. Rakennus 1

Author :

Rakennus 1**Data - Materials**

	Material	E (MPa)	G (MPa)	NI
1	C12/15	25000,00	12900,00	0,17
2	C30/37	33000,00	13333,33	0,20
3	C24	11000,00	690,00	0,00

	LX (1/°C)	RO (kN/m ³)	Re (MPa)
1	0,00	24,53	12,00
2	0,00	24,53	30,00
3	0,00	3,43	24,00

Loads - Values

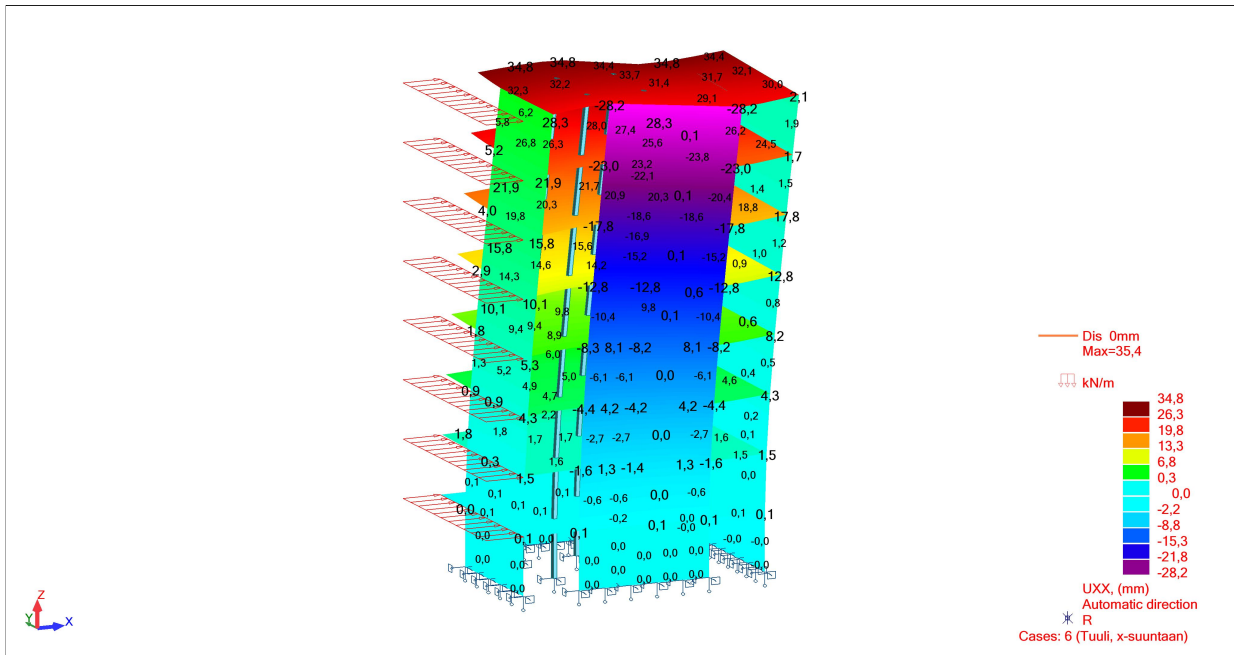
Case	Load type
3	(FE) linear on edges
3	(FE) linear on edges
6	(FE) linear on edges
6	(FE) linear on edges
6	(FE) linear on edges

Case	List
3	101_EDGE(3) 118_EDGE(3) 128_EDGE(3) 142_EDGE(3) 154_EDGE(3) 166_EDGE(3) 178_EDGE(3)
3	190_EDGE(3)

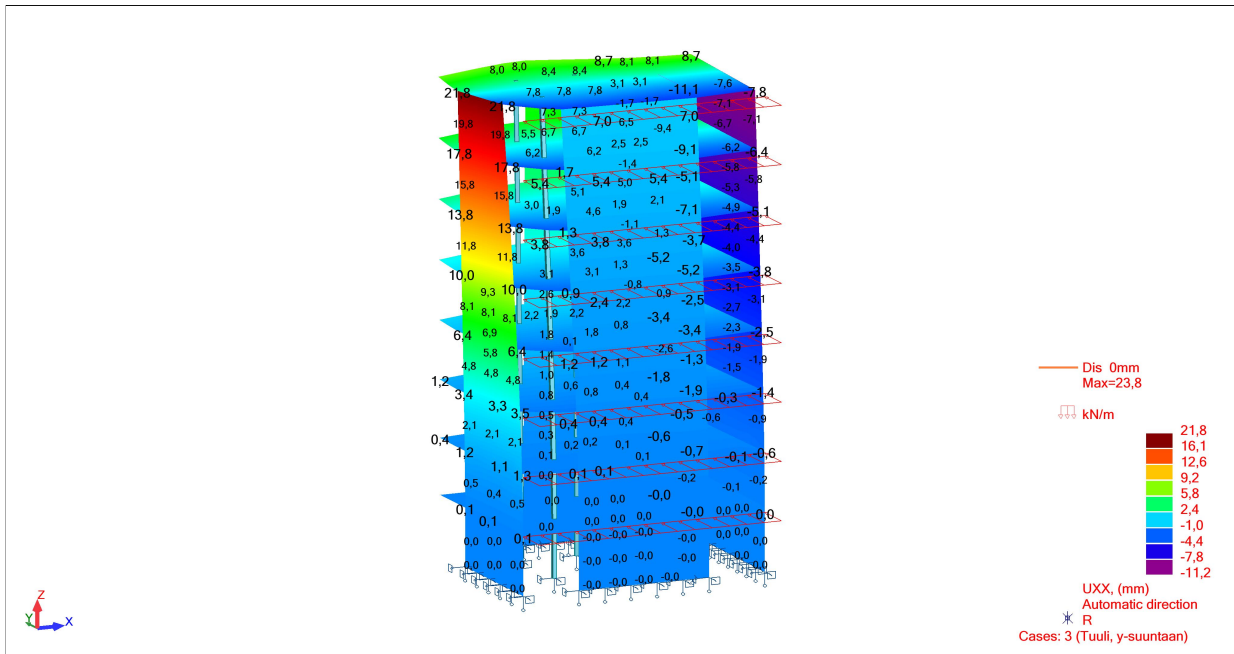
Case	List
6	190_EDGE(4)
6	
6	101_EDGE(4) 118_EDGE(4) 128_EDGE(4) 142_EDGE(4) 154_EDGE(4) 166_EDGE(4) 178_EDGE(4)

Case	Load values
3	PY=2,34(kN/m)
3	PY=2,34(kN/m)
6	PX=2,34(kN/m)
6	PX=2,34(kN/m)
6	PX=2,34(kN/m)

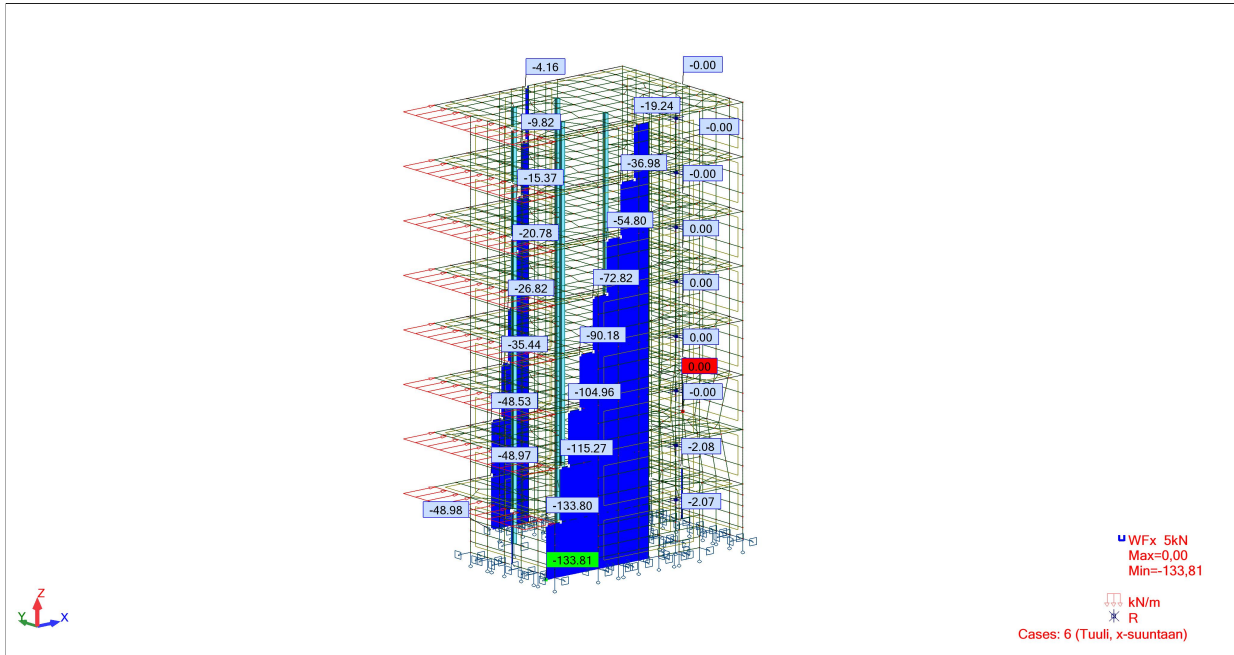
Siirtymät x-suunnan tuulesta x-suuntaan



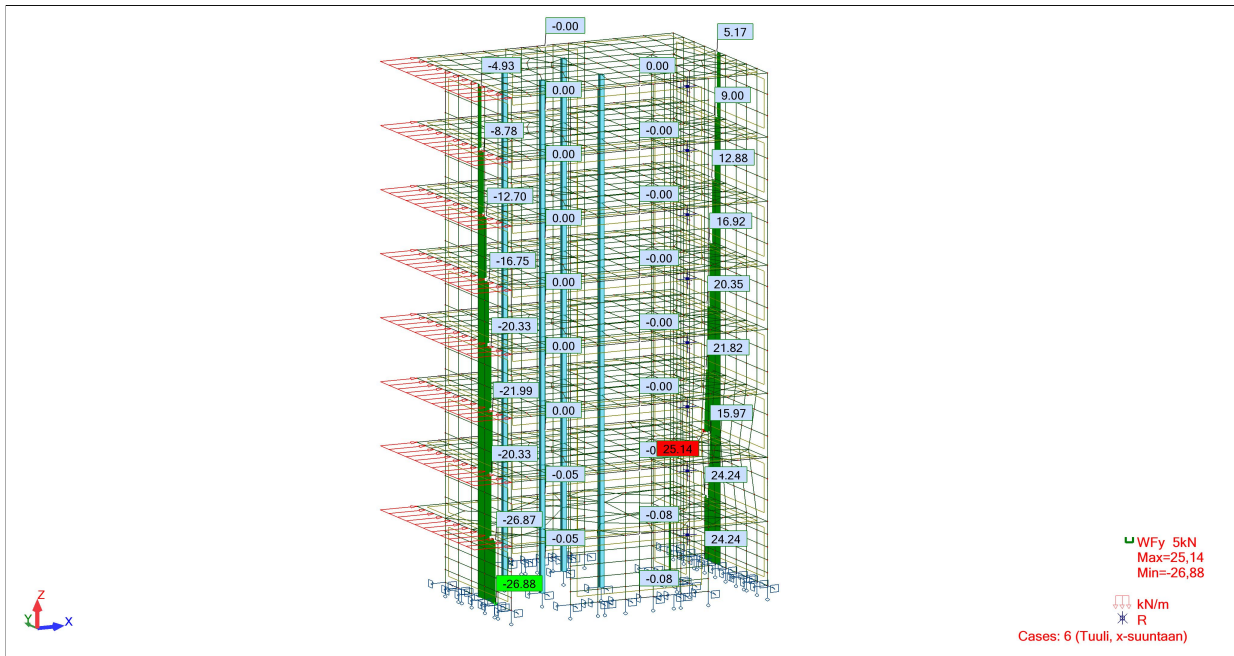
Siirtymät y-suunnan tuulesta y-suuntaan



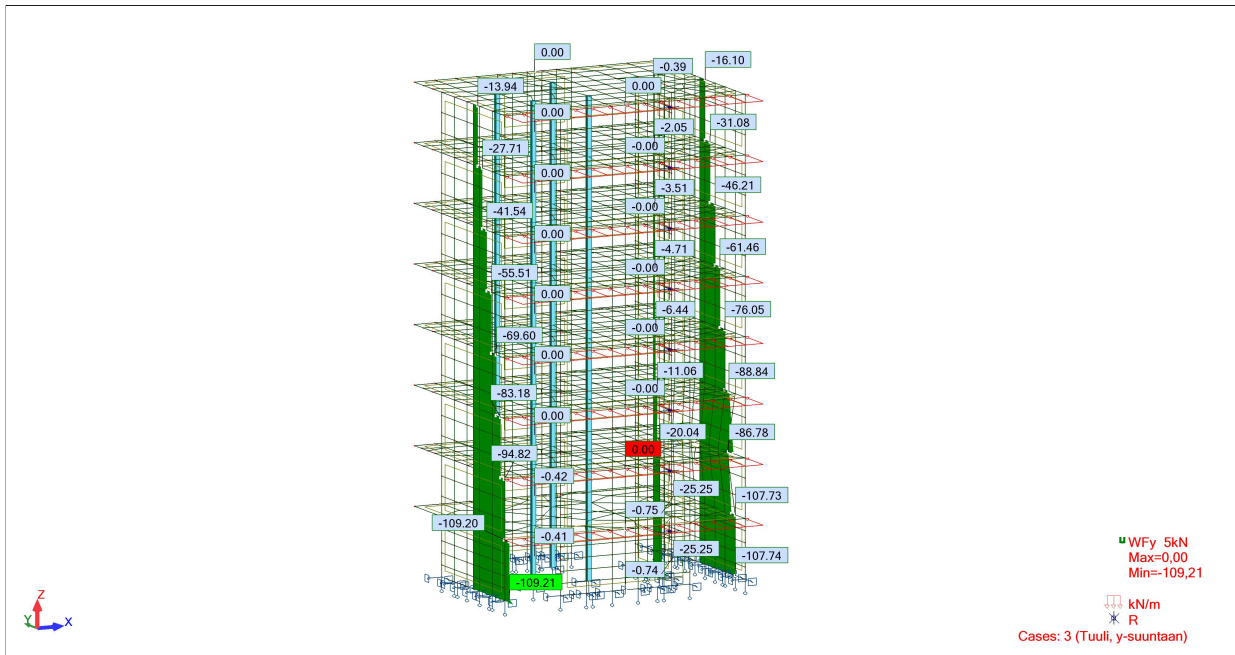
Leikkausvoima Fx, x-suunnan tuulesta



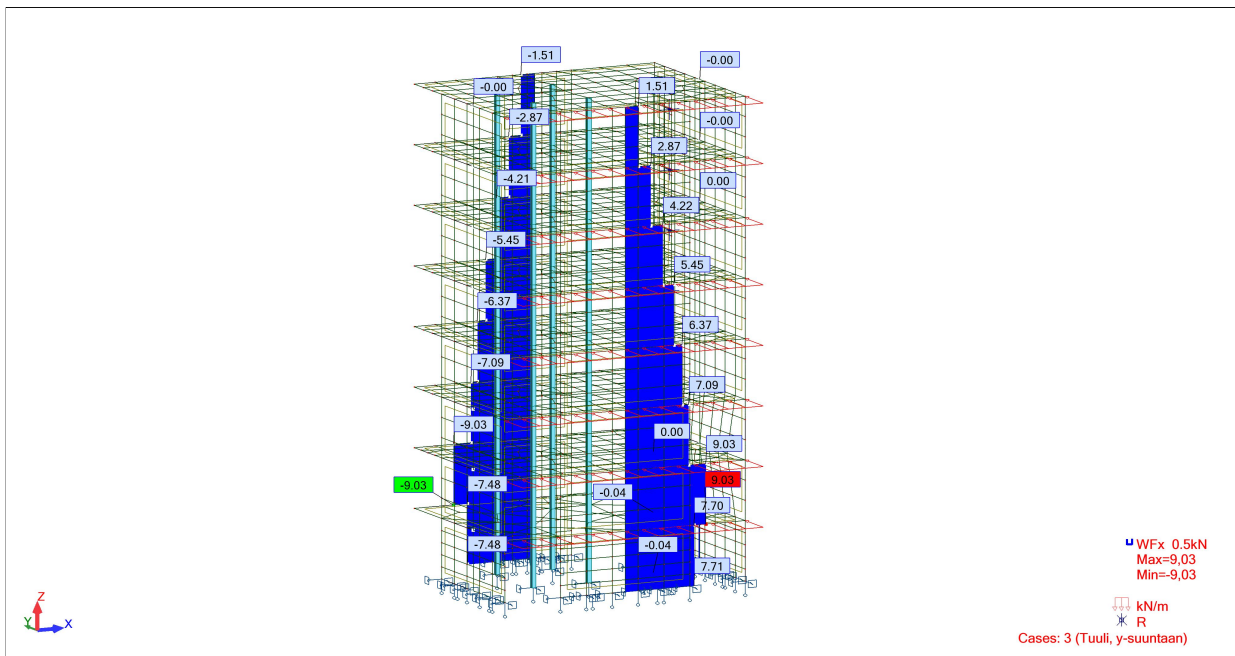
Leikkausvoima Fy, x-suunnan tuulesta



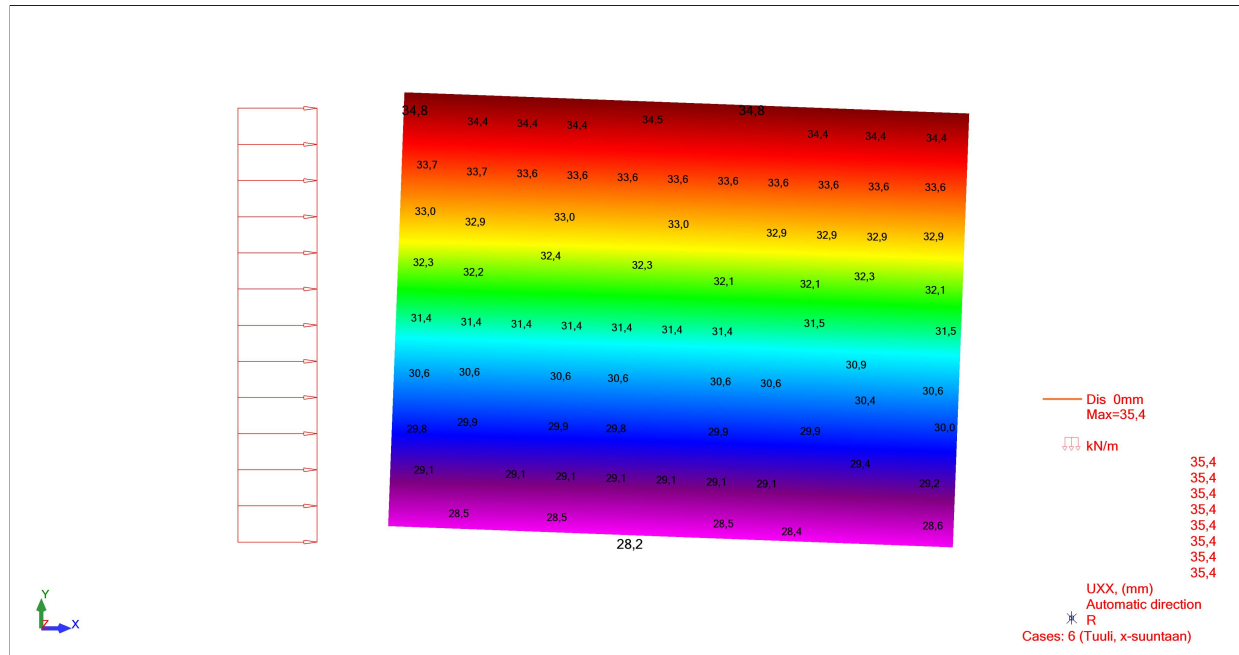
Leikkausvoima Fy, y-suunnan tuulesta



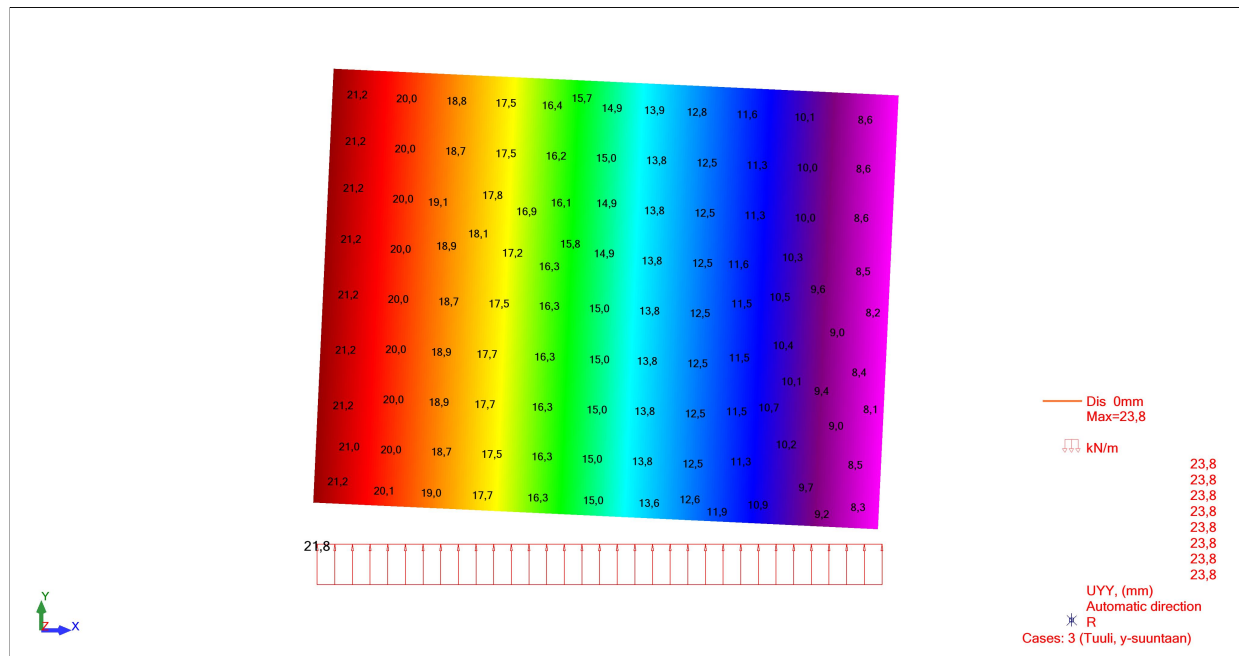
Leikkausvoima Fx, y-suunnan tuulesta

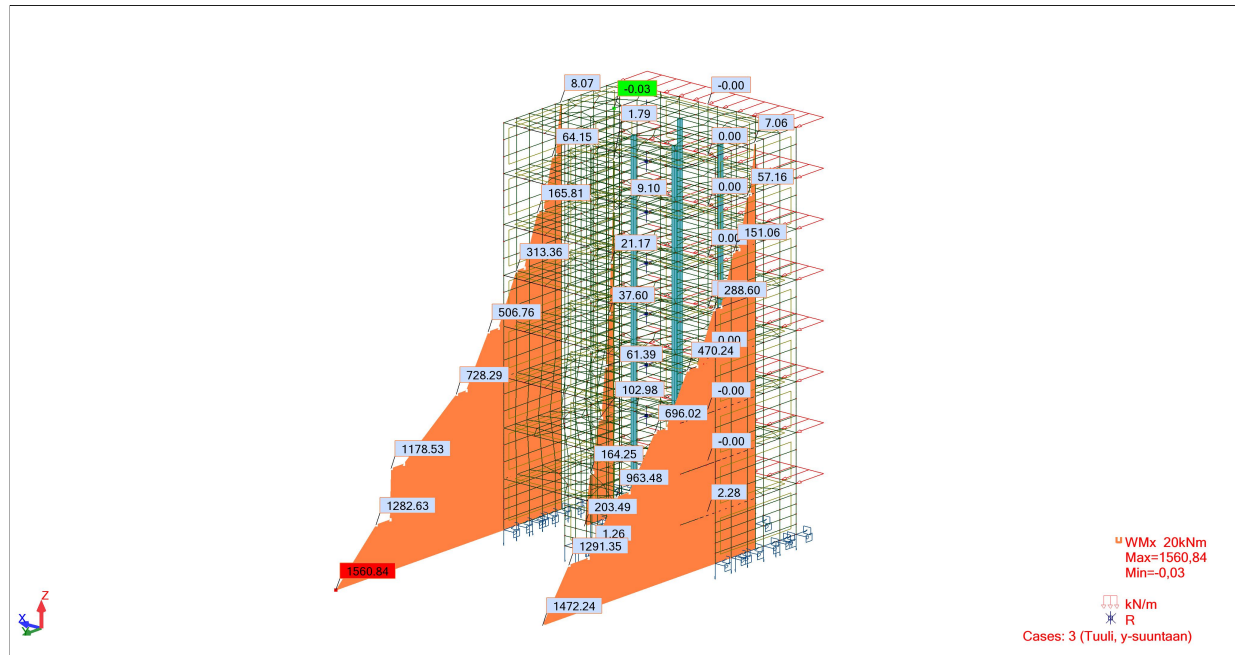
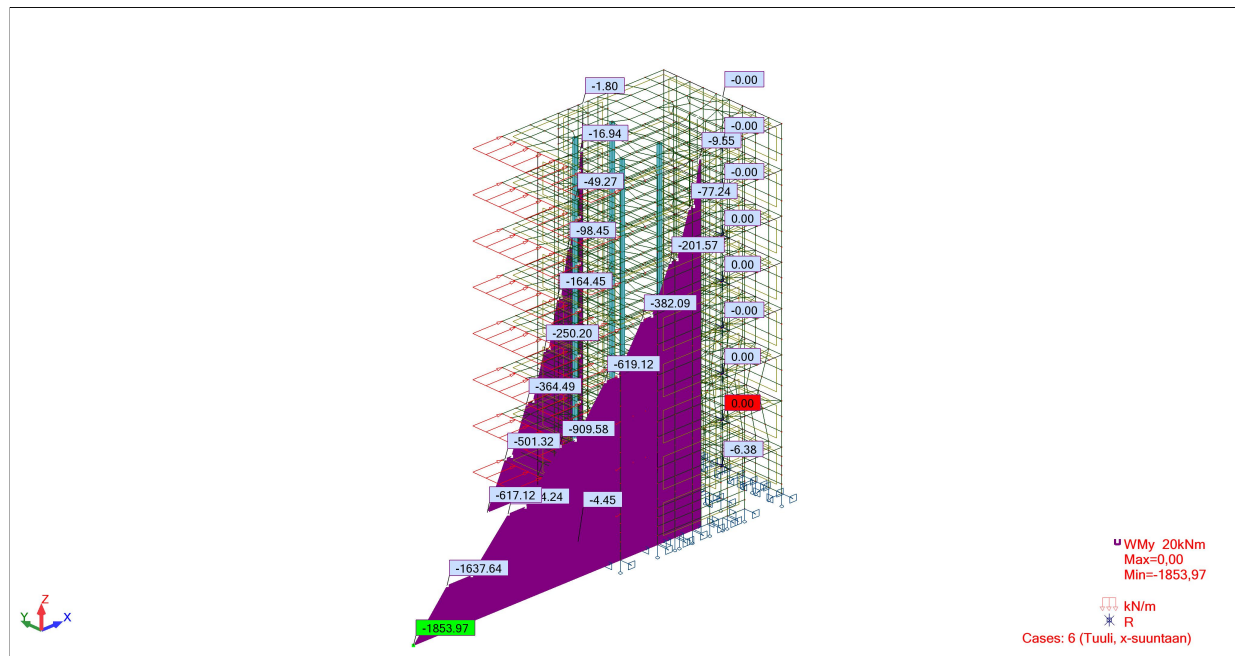


8 krs. tason siirtymät x-suunnan tuulesta, x-suuntaan



8 krs. tason siirtymät y-suunnan tuulesta, y-suuntaan

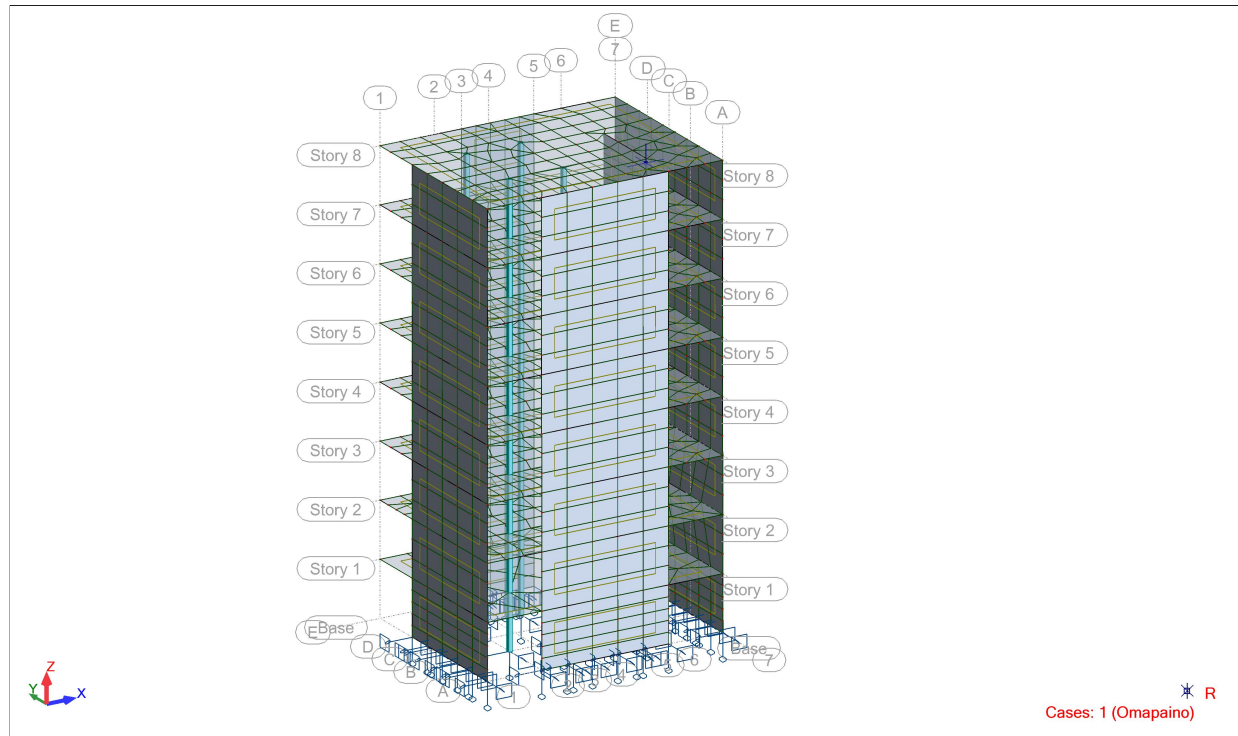


Momentti y-suunnan tuulesta, Mx**Momentti x-suunnan tuulesta, My**

TITLE PAGE

Project: Liite 3. Rakennus 2

Author :

Rakennus 2**Data - Materials**

	Material	E (MPa)	G (MPa)	NI
1	C12/15	25000,00	12900,00	0,17
2	C30/37	33000,00	13333,33	0,20
3	C24	11000,00	690,00	0,00

	LX (1/°C)	RO (kN/m ³)	Re (MPa)
1	0,00	24,53	12,00
2	0,00	24,53	30,00
3	0,00	3,43	24,00

Loads - Values

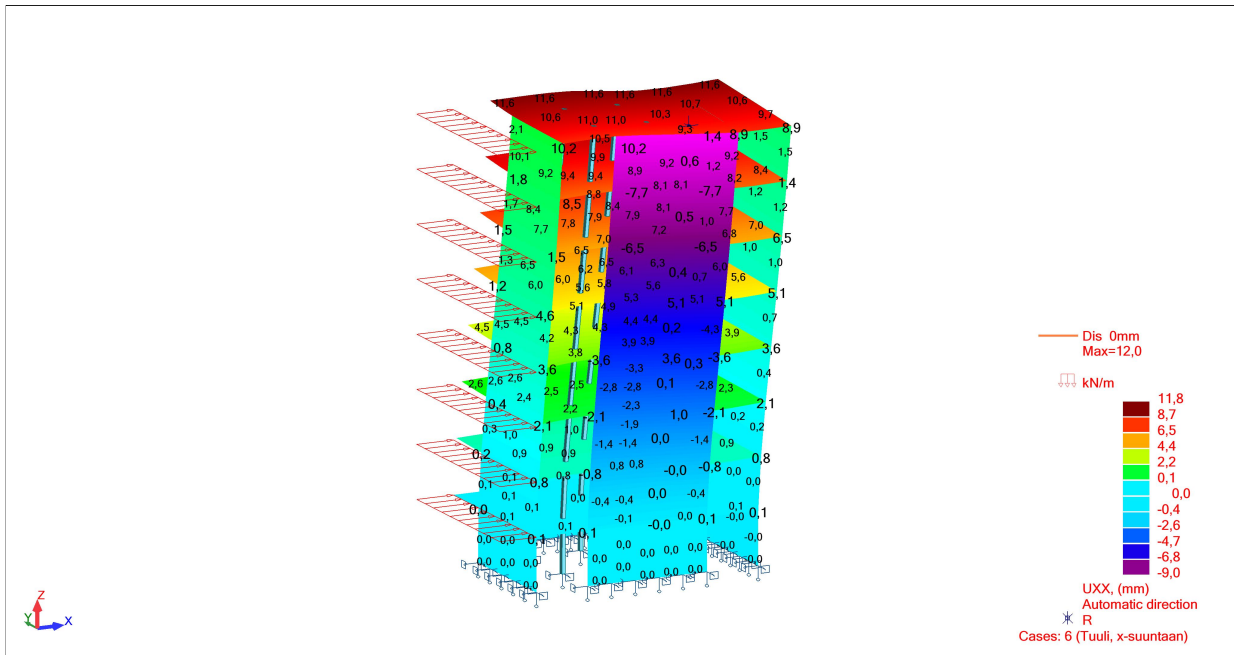
Case	Load type
3	(FE) linear on edges
3	(FE) linear on edges
6	(FE) linear on edges
6	(FE) linear on edges
6	(FE) linear on edges

Case	List
3	293_EDGE(3) 308_EDGE(3) 320_EDGE(3) 334_EDGE(3) 346_EDGE(3) 358_EDGE(3) 370_EDGE(3)
3	382_EDGE(3)

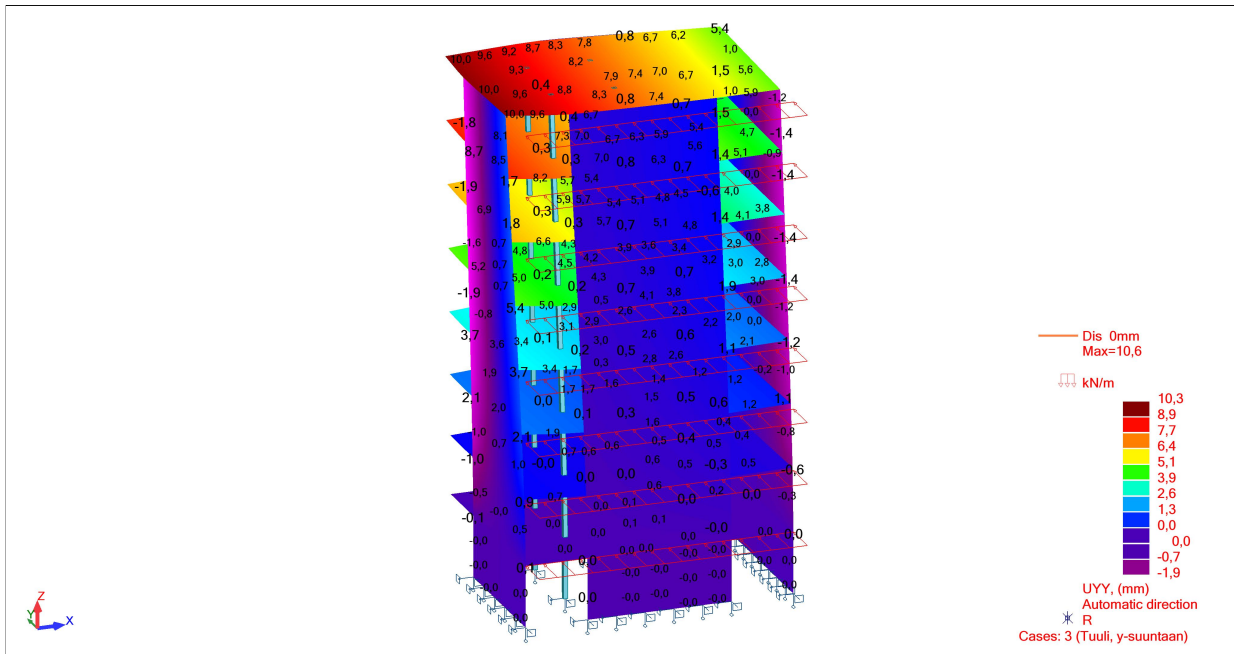
Case	List
6	382_EDGE(4)
6	
6	293_EDGE(4) 308_EDGE(4) 320_EDGE(4) 334_EDGE(4) 346_EDGE(4) 358_EDGE(4) 370_EDGE(4)

Case	Load values
3	PY=2,34(kN/m)
3	PY=2,34(kN/m)
6	PX=2,34(kN/m)
6	PX=2,34(kN/m)
6	PX=2,34(kN/m)

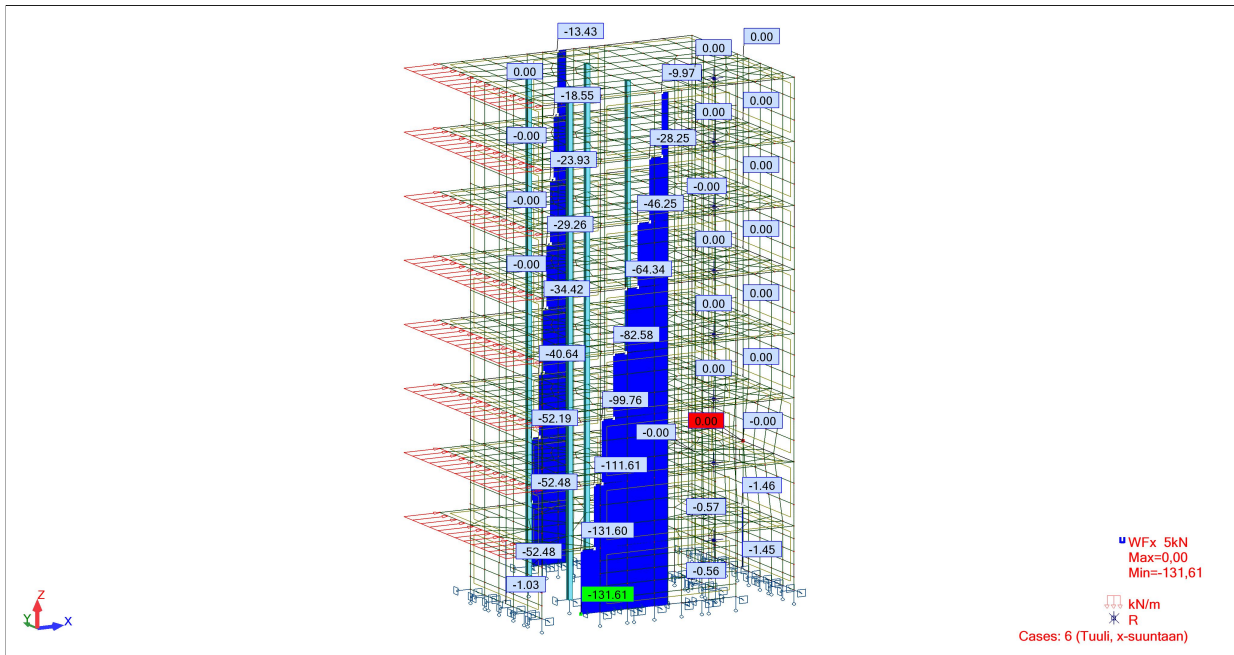
Siirtymät x-suunnan tuulesta x-suuntaan



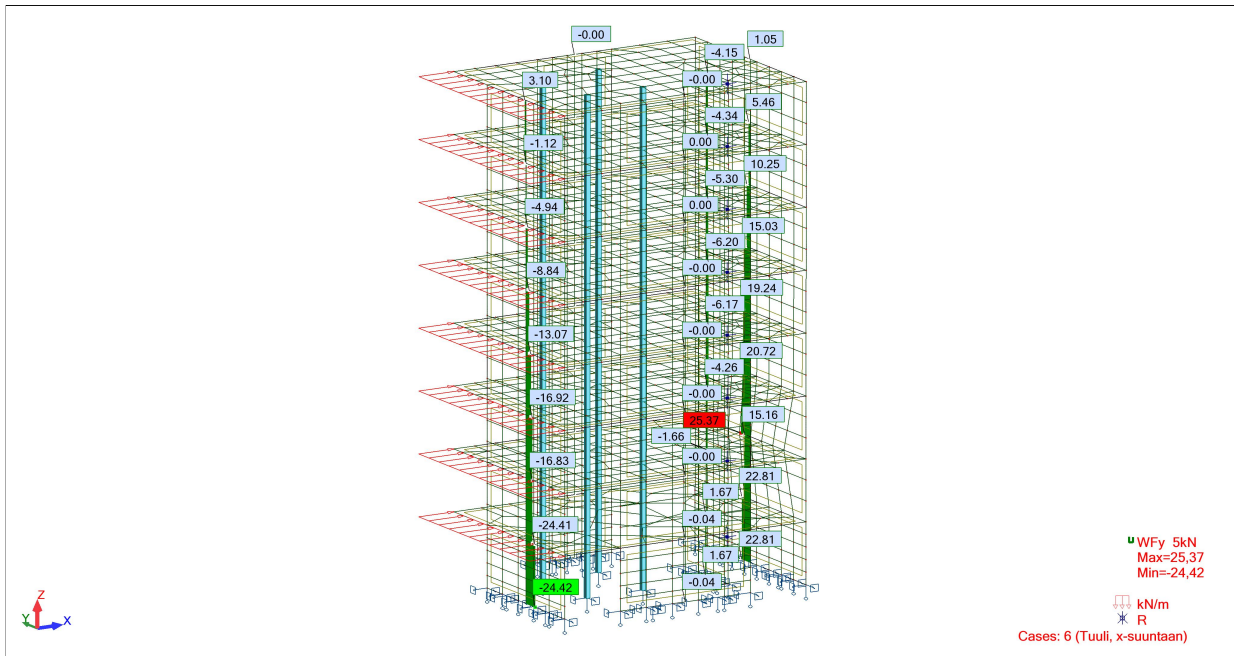
Siirtymät y-suunnan tuulesta y-suuntaan



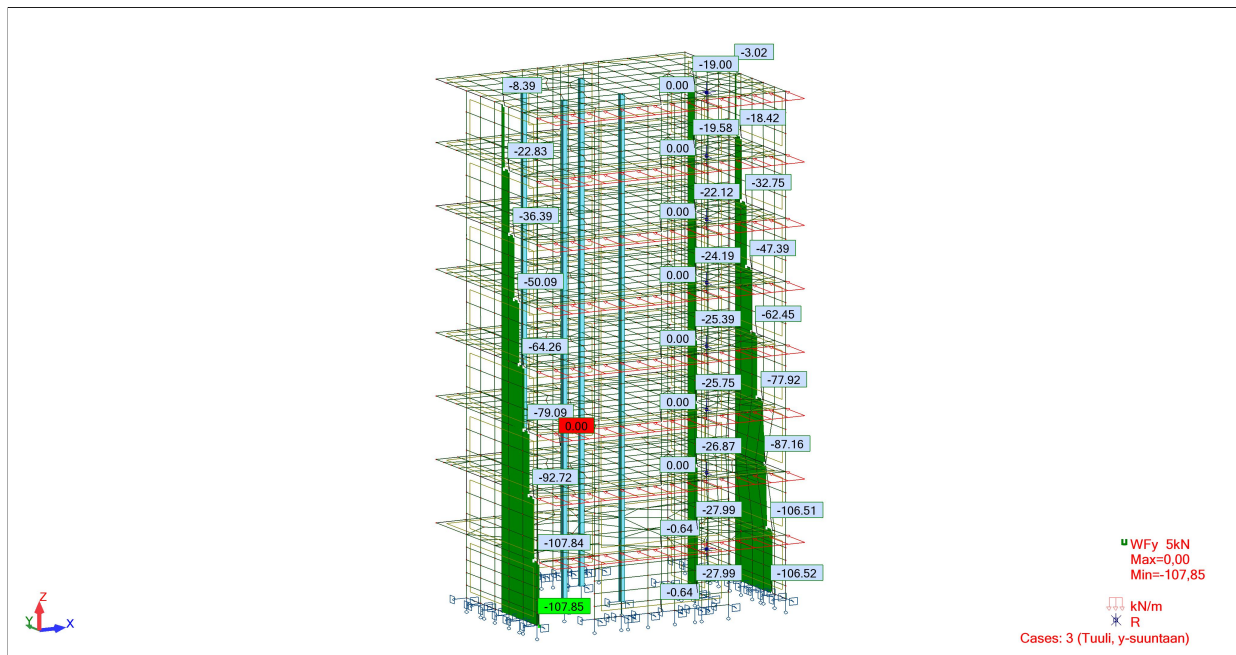
Leikkausvoima Fx, x-suunnan tuulesta



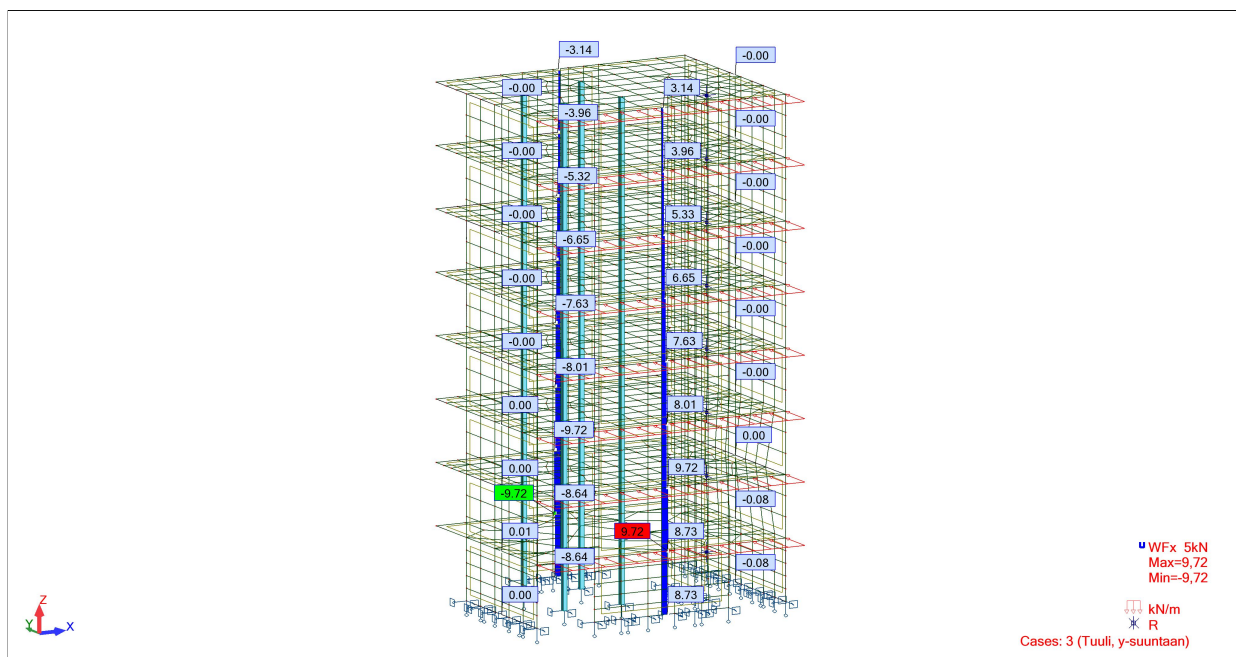
Leikkausvoima Fy, x-suunnan tuulesta



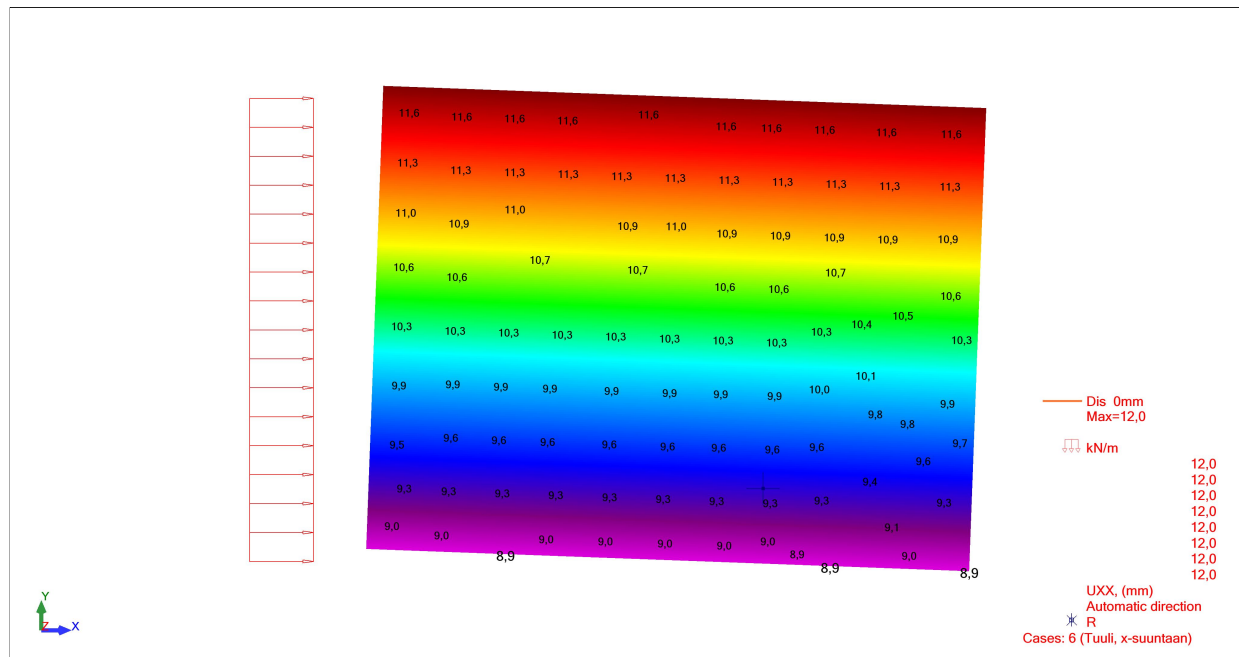
Leikkausvoima Fy, y-suunnan tuulesta



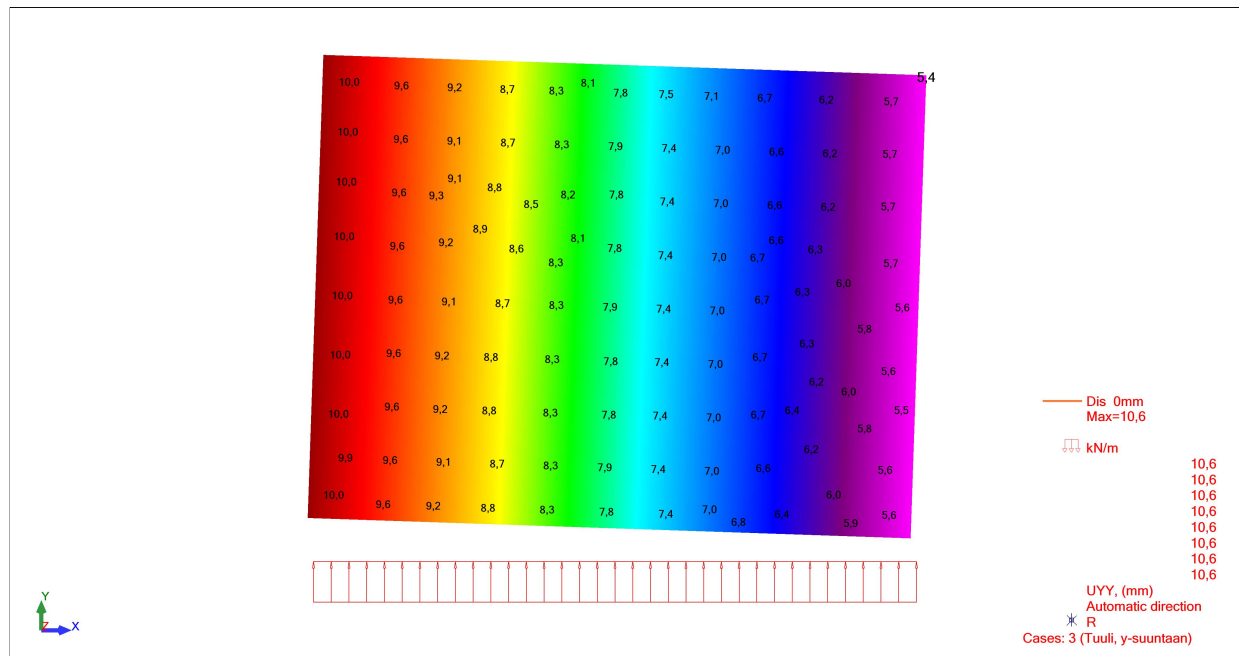
Leikkausvoima Fx, y-suunnan tuulesta



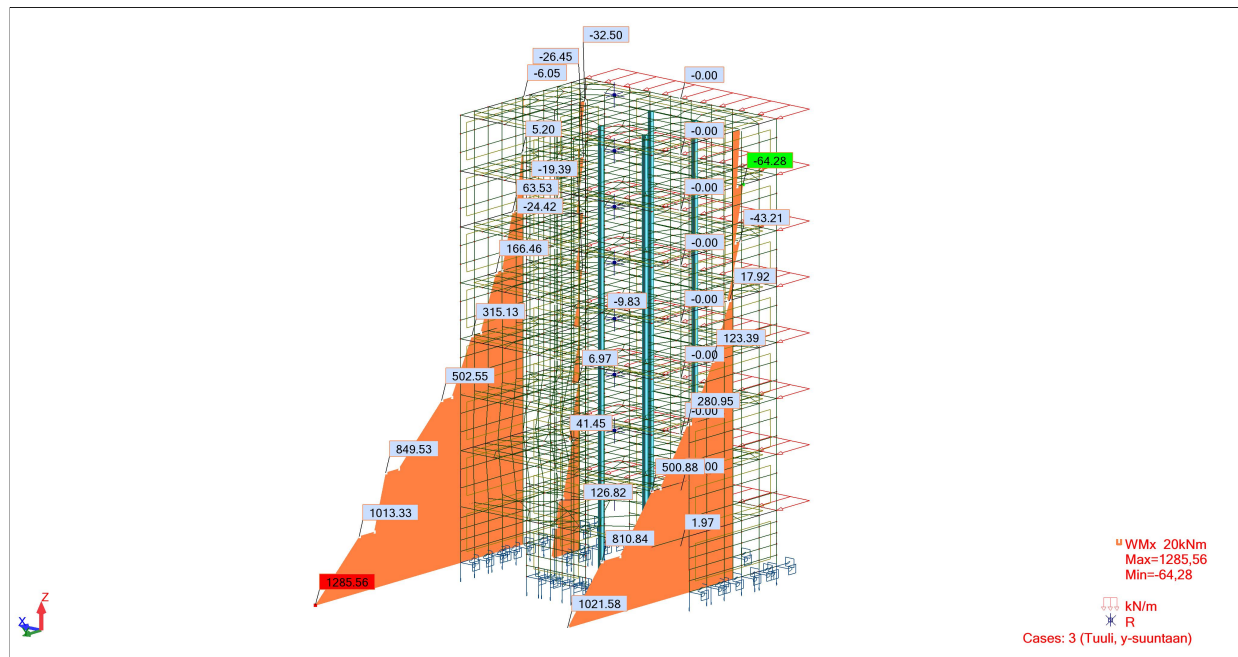
8 krs. tason siirtymät x-suunnan tuulesta, x-suuntaan



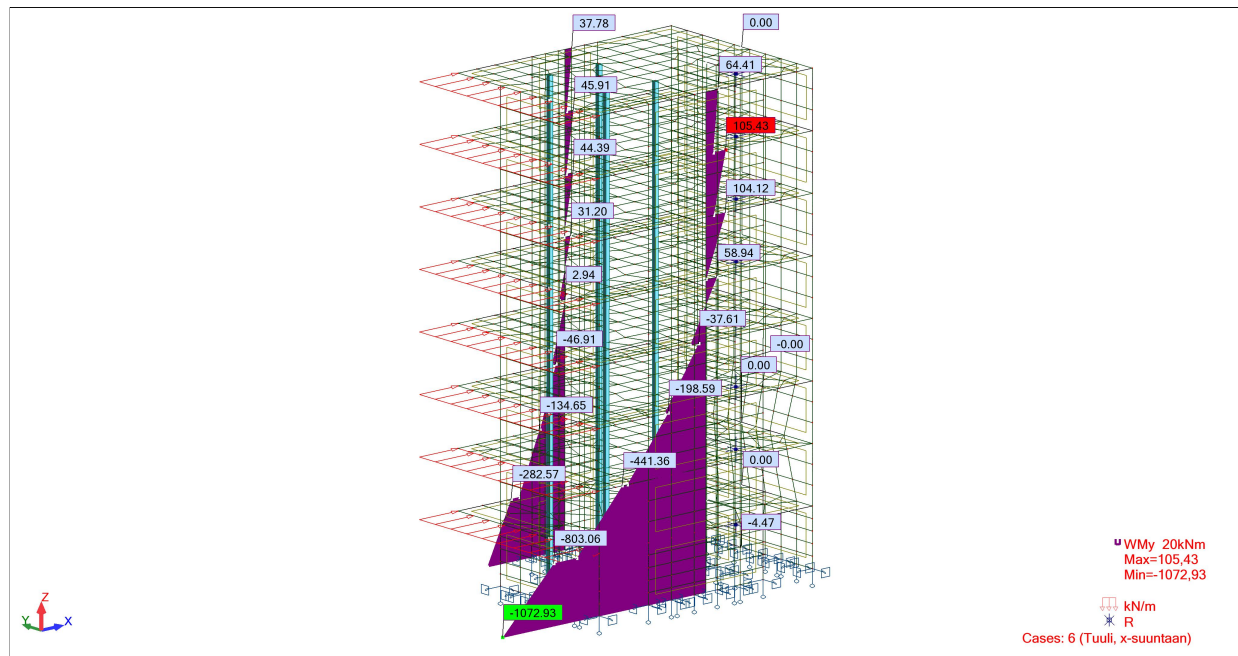
8 krs. tason siirtymät y-suunnan tuulesta, y-suuntaan



Momentti y-suunnan tuulesta, Mx



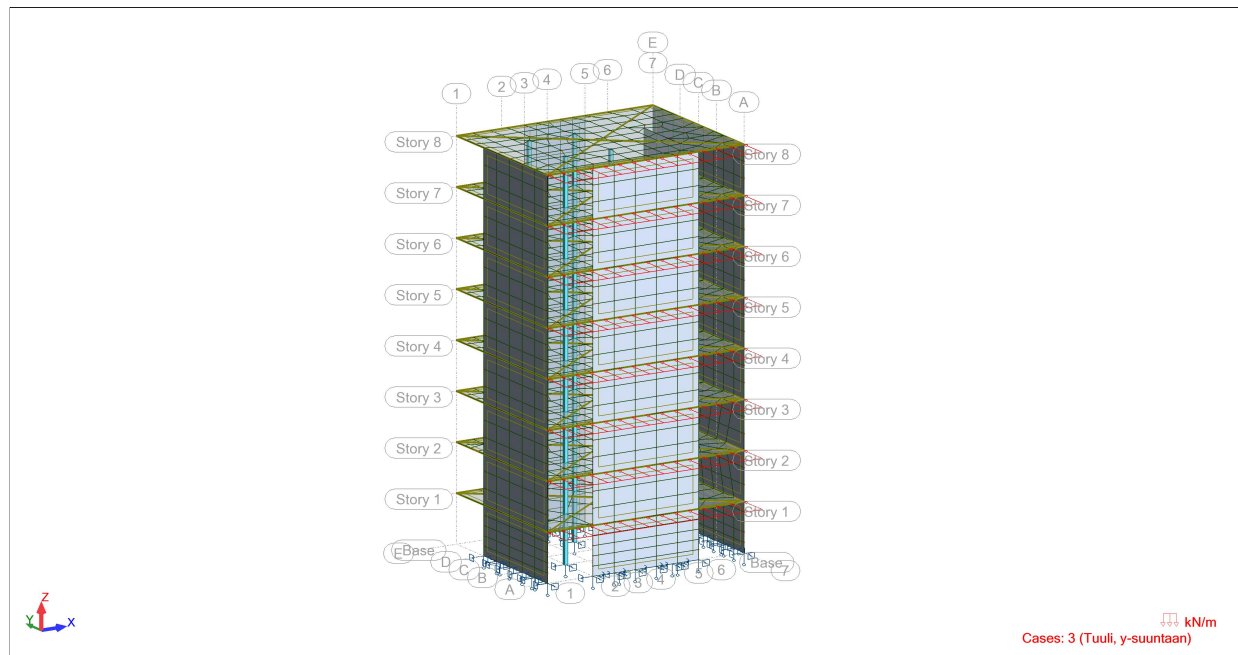
Momentti x-suunnan tuulesta, My



TITLE PAGE

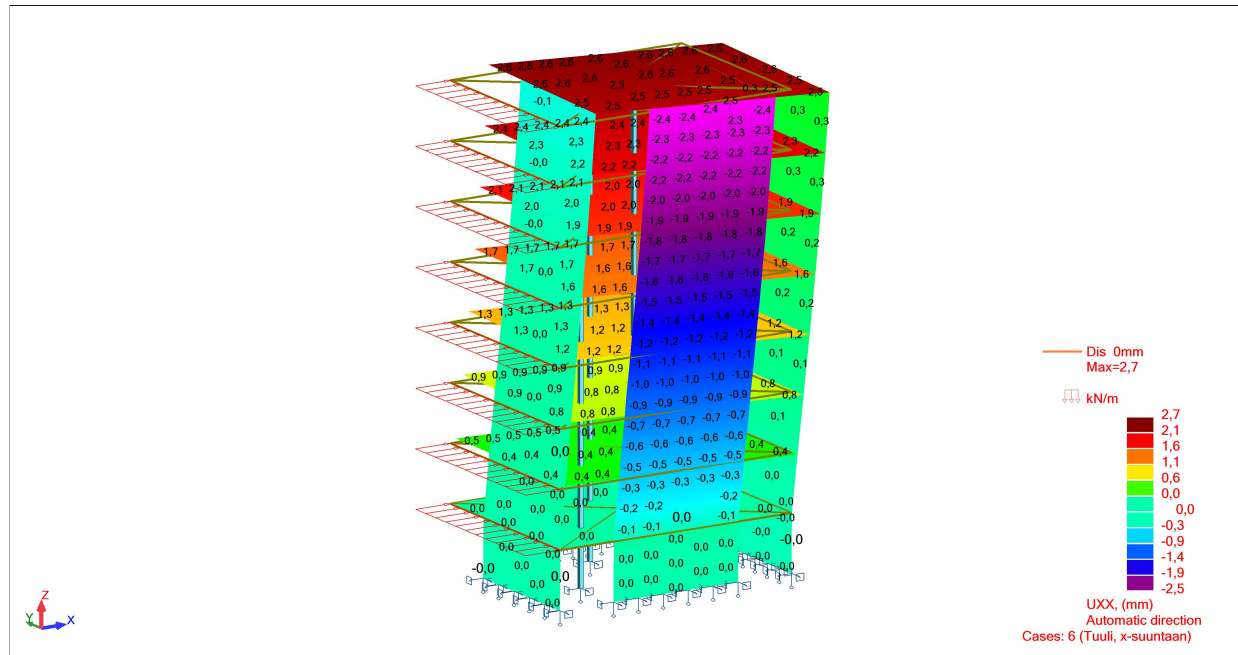
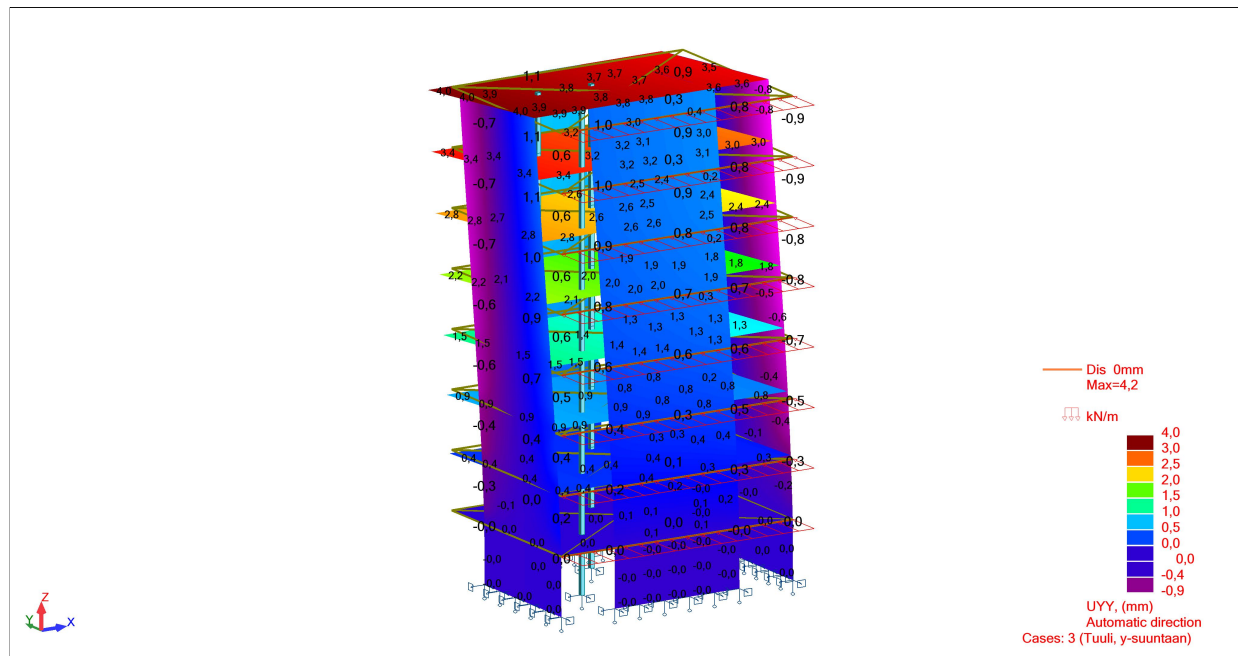
Project: Liite 4. Rakennus 3

Author :

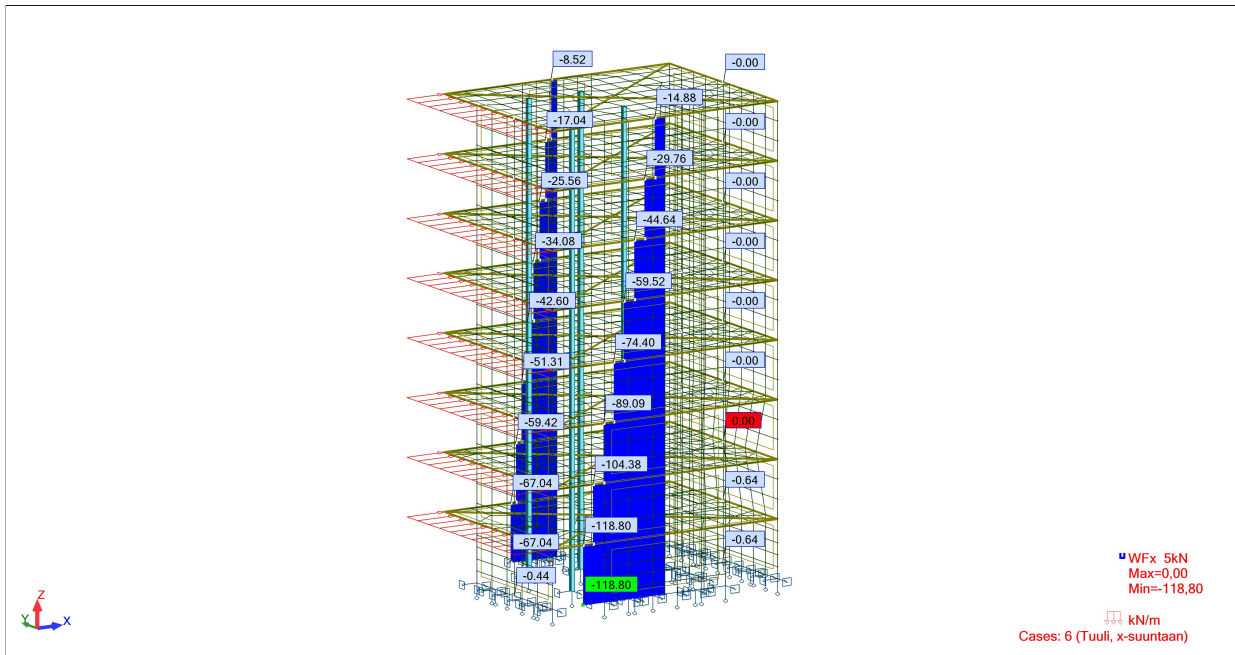
Rakennus 3**Data - Materials**

	Material	E (MPa)	G (MPa)	NI
1	C12/15	25000,00	12900,00	0,17
2	C30/37	33000,00	13333,33	0,20
3	C24	11000,00	690,00	0,00

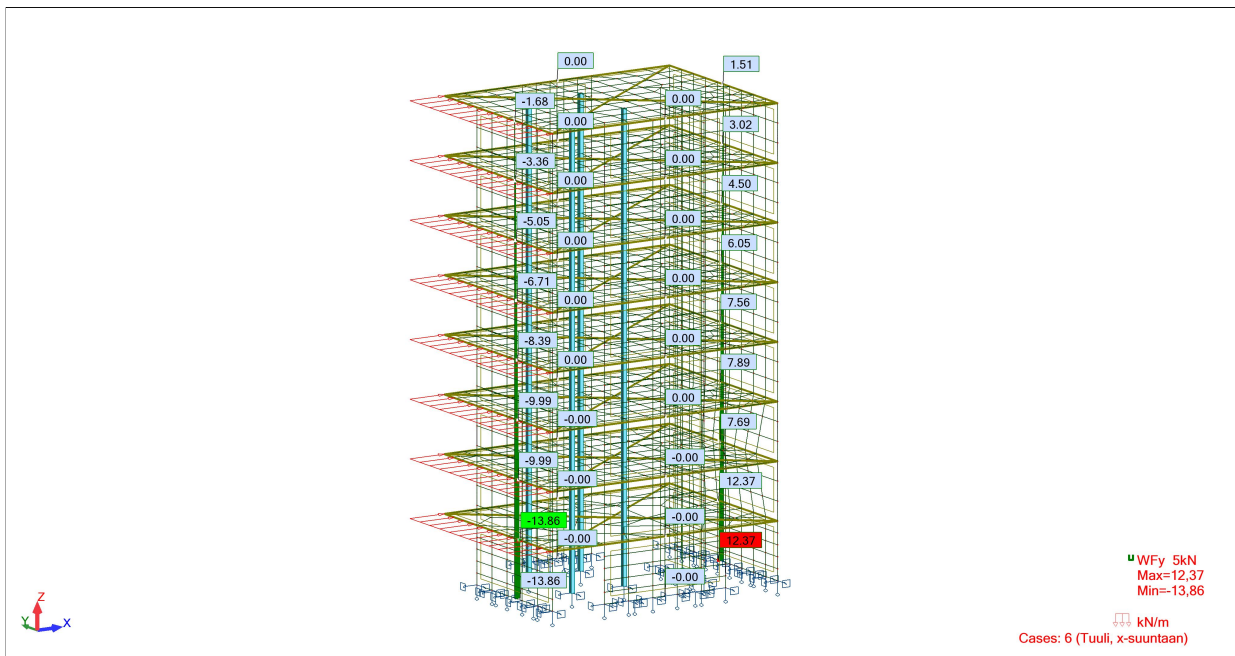
	LX (1/°C)	RO (kN/m ³)	Re (MPa)
1	0,00	24,53	12,00
2	0,00	24,53	30,00
3	0,00	3,43	24,00

Siirtymät x-suunnan tuulesta x-suuntaan**Siirtymät y-suunnan tuulesta y-suuntaan**

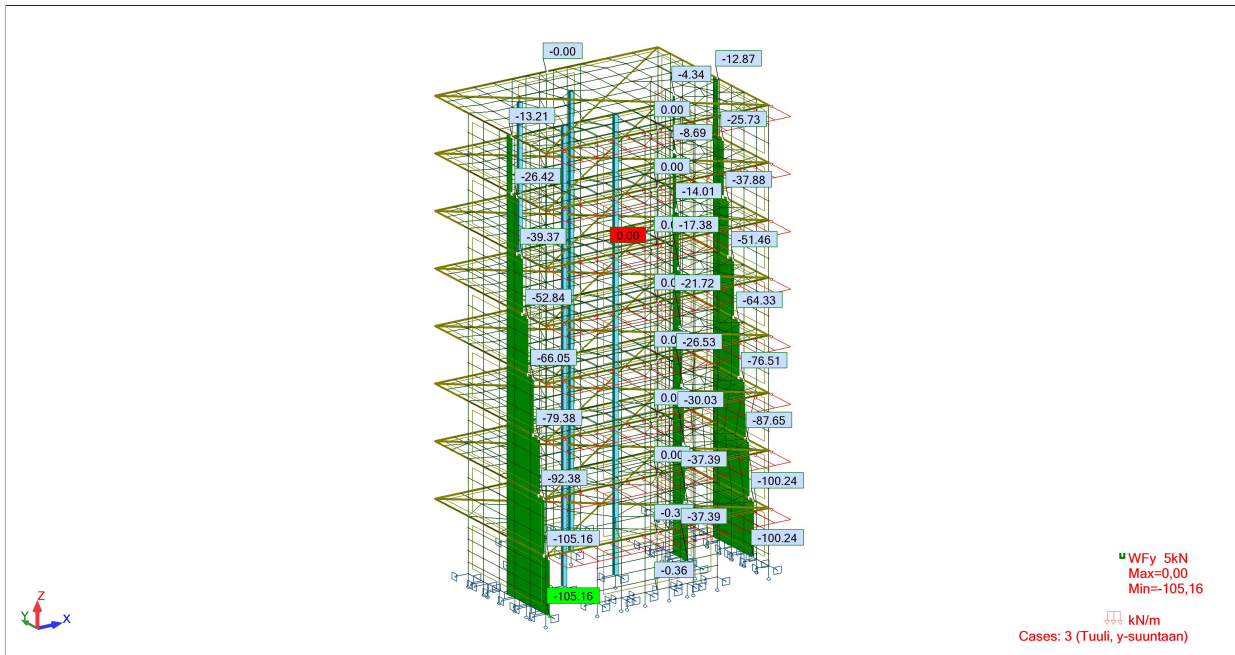
Leikkausvoima Fx, x-suunnan tuulesta



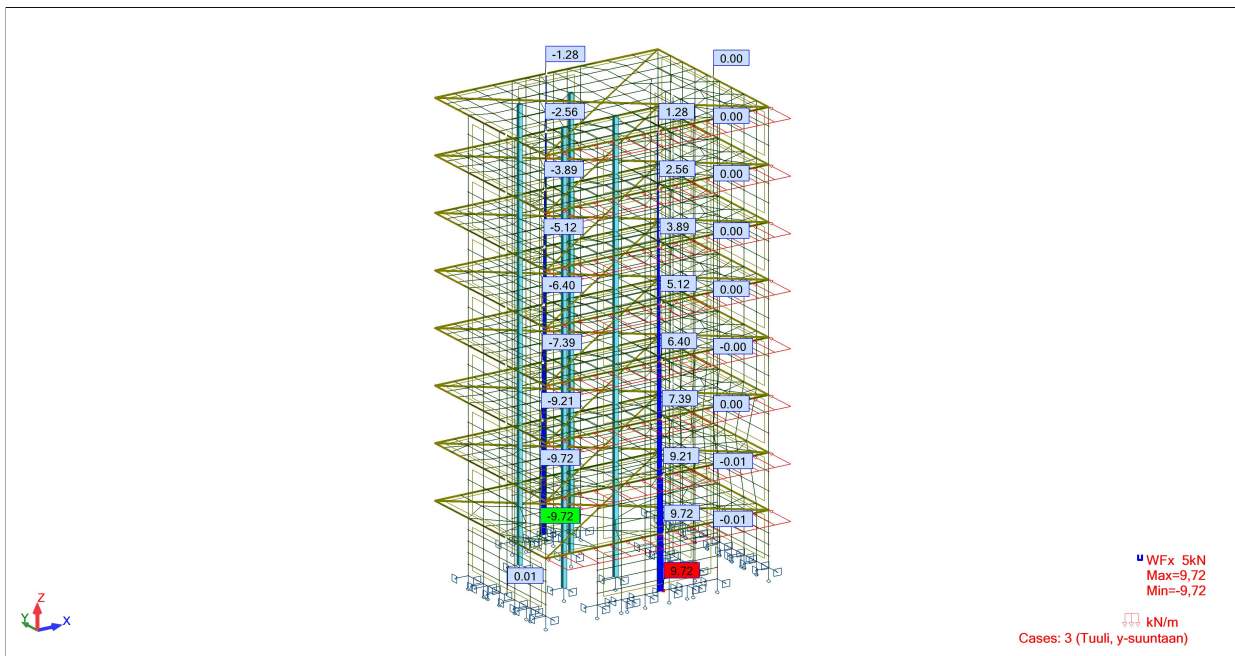
Leikkausvoima Fy, x-suunnan tuulesta



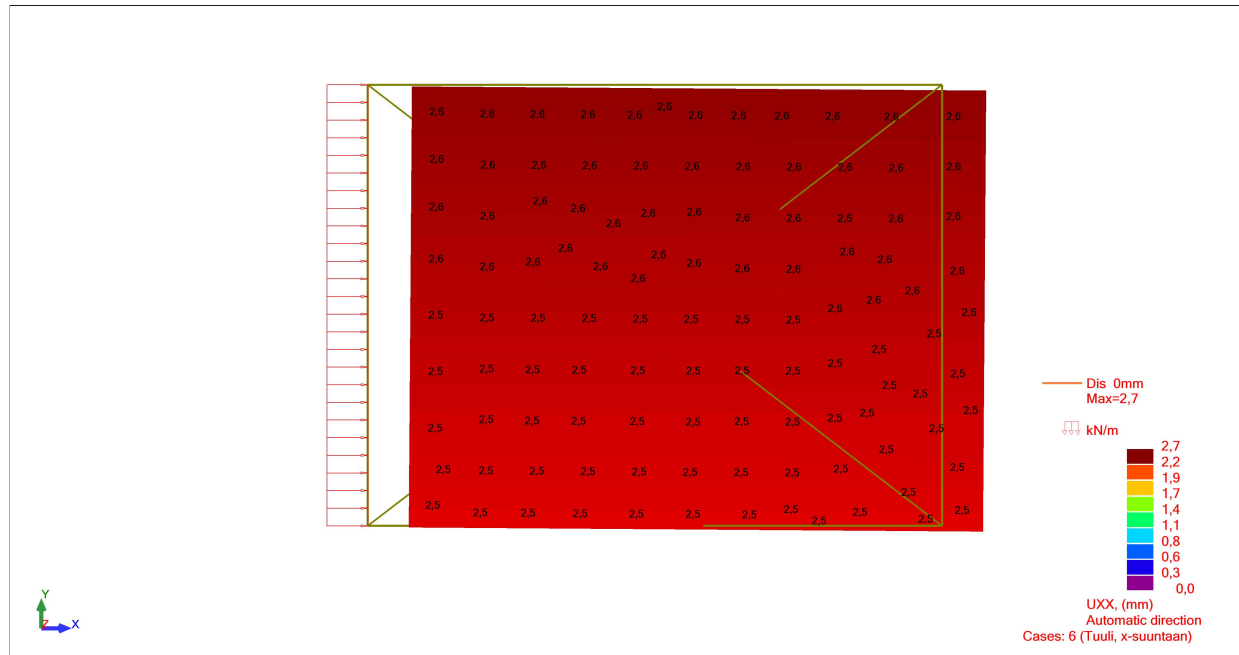
Leikkausvoima Fy, y-suunnan tuulesta



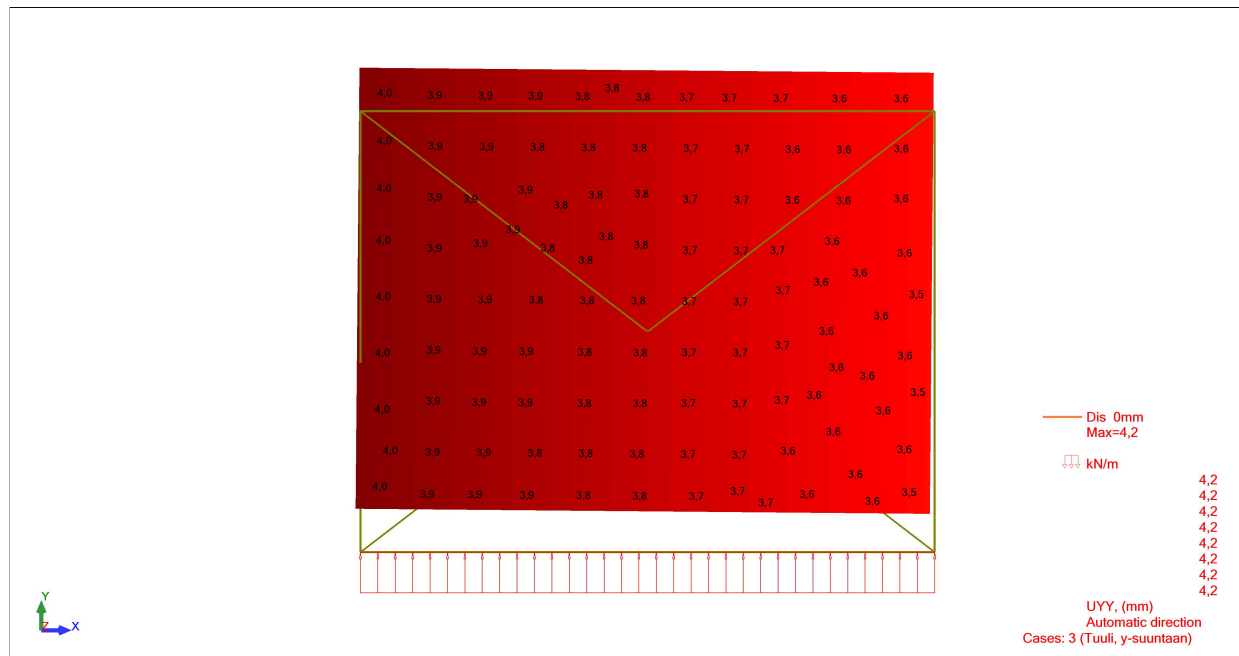
Leikkausvoima Fx, y-suunnan tuulesta

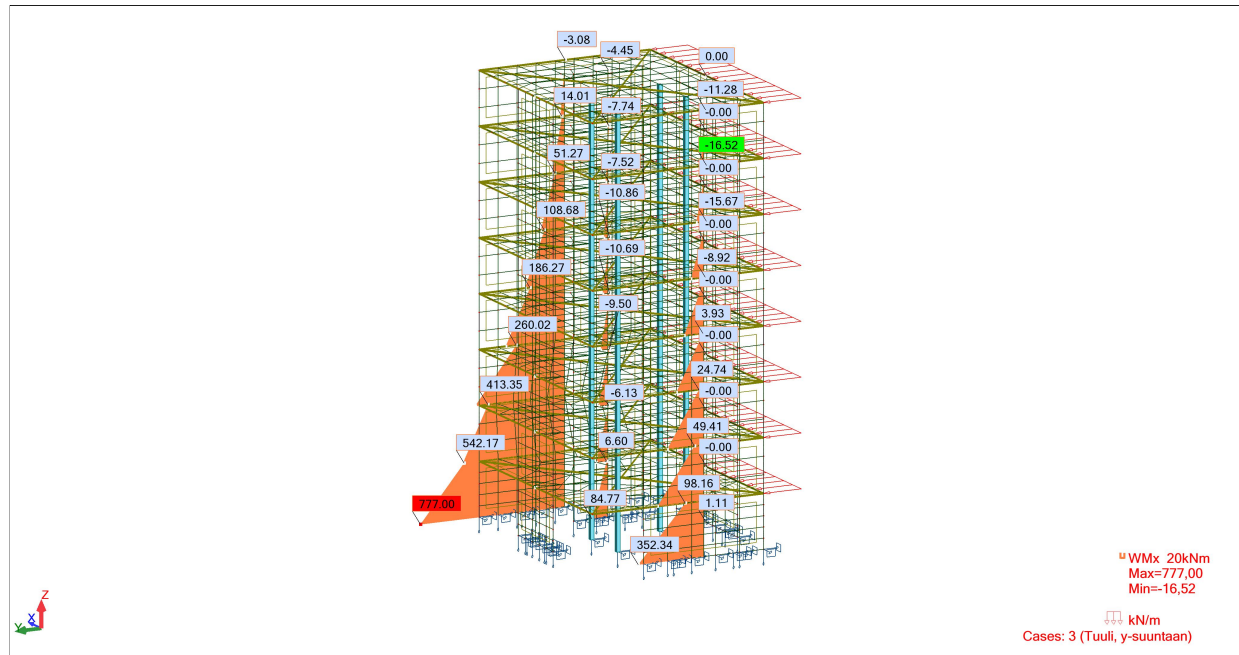


8 krs. tason siirtymät x-suunnan tuulesta, x-suuntaan



8 krs. tason siirtymät y-suunnan tuulesta, y-suuntaan



Momentti y-suunnan tuulesta, Mx**Momentti x-suunnan tuulesta, My**