

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

Kevät 2025

Elias Oinas

Jäykistävien betoniseinien rasitusten vertailuja FEM- laskennan ja käsinlaskennan välillä



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

2025 | 59 sivua + 24 liitesivua

Elias Oinas

Jäykistävien betoniseinien rasiusten vertailuja FEM-laskennan ja käsinlaskennan välillä

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli pohtia FEM-ohjelman käytännöllisyyttä, kun tarkastellaan jäykistävien betoniseinien saamia puristusvoimia sekä erityisesti leikkausvoimia. FEM-ohjelmassa työssä käytettiin Robot Structural Analysis-ohjelmaa.

Opinnäytetyössä vertailtiin laskupohjasta saatuja tuloksia, betonirakenteisten seinien leikkaus- ja puristusvoimille, FEM-ohjelmasta saatujen tulosten välillä. Vertailuissa huomioitiin myös FEM-ohjelmalla aukkojen vaikutukset seinien saamiin rasituksiin, mutta ei laskupohjalla.

Puristusvoimissa päästiin samanlaisiin tuloksiin laskuissa sekä ohjelmassa. Aukkojen huomioimatta jättämisellä käsinlaskuissa, saatiin suuria eroja leikkausvoimissa, FEM-laskentaan verrattuna. Leikkausvoimissa päästiin erilaisiin tuloksiin myös ilman aukkoja. Mallinnettaessa kaikki vaakavoimat FEM-ohjelmassa pelkästään rakennuksen ylimmän kerroksen laattaan, huomioimatta aukkoja, päästiin myöskin käsinlaskujen leikkausvoimissa samanlaisiin tuloksiin.

FEM-ohjelma todettiin hyödylliseksi, varsinkin, kun halutaan määrittää tarkasti seinien saamat leikkausvoimat korkeissa rakennuksissa ja huomioida aukkojen vaikutukset seinien jäykkyyksiin.

Asiasanat:

jäykkyys, FEM, Robot Structural Analysis, leikkausvoima

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Degree programme in civil engineering

2025 | 59 pages + 24 appendices

Elias Oinas

Force comparisons between FEM-program and hand calculations for concrete shear walls

The objective of this thesis was to think about the practicality of a FEM-software, when wanting to determine the compression forces and especially the shear forces that affect concrete shear walls. In this thesis, Robot Structural Analysis was used as the FEM-software.

In this thesis, comparisons were made for shear and compression forces between FEM-software and hand calculations. Wall openings were also modelled in FEM-software but their effect was not included in hand calculations.

For compression forces, the results were quite similar between FEM and hand calculations. For the shear forces from the FEM-software, there were big differences in walls with openings, when compared to hand calculations, which didn't include the effects of openings. Also without wall openings, results for shear forces varied quite a bit. Only when all the horizontal forces were modelled solely to the top floor slab and no wall openings were included, the results between FEM and hand calculations were similar.

The use of a FEM-software was found to be very useful, especially when wanting to determine accurate shear force results for concrete shear walls with openings in high-rise buildings.

Keywords:

stiffness, FEM, Robot Structural Analysis, shear force

Sisältö

1 JOHDANTO	8
2 JÄYKISTÄVÄT BETONIRAKENTEISET SEINÄT	9
2.1 Levy- ja mastoseinäjäykistys	10
2.2 Hormielementit osana jäykistäviä väliseiniä	10
2.3 Sandwich-julkisivuelementit	11
2.4 Elementtiseinien välinen pystyliitos	12
2.5 Elementtiseinien välinen vaakaliitos	12
3 JÄYKISTYKSEN MITOITUSPERIAATTEITA	13
3.1 Kokonaistuulivoiman määrittäminen	14
3.1.1 Maastoluokat	14
3.1.2 Maaston pinnanmuodon vaikutukset	15
3.1.3 Puuskanopeuspaine	15
3.1.4 Kokonaistuulivoiman laskenta voimakertoimella matalalle rakennukselle	17
3.2 Lisävaakavoimat	19
3.3 Vaakavoimien jakautuminen seinille	20
4 MALLINNUS	25
4.1 Mallinnuksen aloitus	25
4.2 Seinien mallinnus	27
4.3 Laattojen mallinnus	30
4.4 Tarkasteltavat kokonaisuudet	32
4.5 Vaakavoimien lisääminen	35
4.6 Pystyvoimien lisääminen	36
4.7 Rasiusten tarkistaminen	38
5 TULOSTEN VERTAILU	39
5.1 Puristusvoimien vertailu, tarkasteltava kokonaisuus 1	40
5.2 Leikkausvoimien vertailu omien laskujen välillä	42

5.3 Leikkausvoimien vertailu Robotin ja laskujen välillä, h=24m, jäykistävien ulkoseinien ja väliseinien aukkojen vaikutus tuloksiin, tarkasteltava kokonaisuus 1	44
5.4 Leikkausvoimien vertailu Robotin ja laskujen välillä, h=24m, väliseinien aukkojen vaikutus tuloksiin, tarkasteltava kokonaisuus 2	46
5.5 Leikkausvoimien vertailu Robotin ja laskujen välillä, vain väliseinät ilman aukkoja, h=24m, tarkasteltava kokonaisuus 3	49
5.6 Leikkausvoimien vertailu Robotin ja laskujen välillä, vain väliseinät ilman aukkoja, h=3m, tarkasteltava kokonaisuus 4	52
5.7 Tulosten pohdintaa	53
5.8 Leikkausvoimien vertailu Robotin ja laskujen välillä, vain väliseinät ilman aukkoja, h=24m, tarkasteltava kokonaisuus 5	55
6 YHTEENVETO	57
Lähteet	59

Liitteet

- Liite 1. Vaakavoimat
- Liite 2. Seinien ottamat leikkausvoimat
- Liite 3. Kiertokeskiöiden sijainnit laskuissa
- Liite 4. Kiertokeskiöiden sijainnit mallissa
- Liite 5. Puristusvoimat laskuista
- Liite 6. Pystykuormien jakautuminen laatoilta
- Liite 7. Puristusvoimat mallissa
- Liite 8. Vaakavoimat mallissa

Kuvat

Kuva 1. Staattisesti määrätty jäykistyssysteemi.	20
Kuva 2. Staattisesti määräämätön jäykistyssysteemi.	24
Kuva 4. Moduuliviivojen määrittäminen.	26
Kuva 5. Kerrokset sekä moduuliviivat.	27
Kuva 6. Elementtiverkon asetukset.	28
Kuva 7. Lisää elementtiverkon asetuksia.	28
Kuva 8. Seinän vapautus.	29
Kuva 9. Laatan kuormitukset, siirtymät ja kiertymät.	30
Kuva 10. Laatan asetuksia.	31
Kuva 11. Tarkasteltava kokonaisuus 1.	32
Kuva 12. Tarkasteltava kokonaisuus 2.	33
Kuva 13. Tarkasteltava kokonaisuus 3.	34
Kuva 14. Tarkasteltava kokonaisuus 4.	35
Kuva 15. Kuormien yhdistely.	36
Kuva 16. Pystykuormien jakautuminen.	37
Kuva 17. Ydinseinät.	38
Kuva 18. Tarkasteltavat seinät.	39
Kuva 19. Tarkasteltava kokonaisuus 5.	54

Taulukot

Taulukko 1. Voimakertoimen C_f määrittäminen taulukosta.	18
Taulukko 2. Puristusvoimien vertailu, xy-jäykkä laatta.	40

Taulukko 3. Leikkausvoimien vertailu omien laskujen välillä, y-seinät.	42
Taulukko 4. Leikkausvoimien vertailu omien laskujen välillä, x-seinät.	43
Taulukko 5. Leikkausvoimien vertailu, h=24m, jäykistävien ulkoseinien ja väliseinien aukkojen vaikutus tuloksiin, xy-jäykkä laatta.	44
Taulukko 6. Leikkausvoimien vertailu, h=24m, jäykistävien ulkoseinien ja väliseinien aukkojen vaikutus tuloksiin, täysin jäykkä laatta.	45
Taulukko 7. Leikkausvoimien vertailu, h=24m, väliseinien aukkojen vaikutus tuloksiin, xy-jäykkä laatta.	46
Taulukko 8. Leikkausvoimien vertailu, h=24m, väliseinien aukkojen vaikutus tuloksiin, täysin jäykkä laatta.	47
Taulukko 9. Leikkausvoimien vertailu, h=24m, xy-jäykkä laatta, vain väliseinät ilman aukkoja.	49
Taulukko 10. Leikkausvoimien vertailu, h=24m, täysin jäykkä laatta, vain väliseinät ilman aukkoja.	50
Taulukko 11. Leikkausvoimien vertailu, h=3m, xy-jäykkä laatta, vain väliseinät ilman aukkoja.	52
Taulukko 12. Leikkausvoimien vertailu, h=24m, xy-jäykkä laatta, vain väliseinät ilman aukkoja, pistekuorma vain ylimpään kerrokseen.	55

1 JOHDANTO

Rakennuksen jäykistystämisen on tärkeä osa rakennuksen kokonaissuunnittelua, joka vaikuttaa mm. liitosten mitoituksiin ja rakennuksen staattiseen tasapainoon. Korkeissa sekä geometrisesti haastavan muotoisissa rakennuksissa jäykistysvoimiin on perusteltua kiinniittää erityistä huomiota. Rakennusten vaakavoimista saatuja rasituksia olisi myös suositeltavaa verrata jollakin FEM-laskentaohjelmalla, laskentapohjasta saatujen tulosten lisäksi.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan referenssikohteeksi valitun 8-kerroksisen betonirunkoisen kerrostalon jäykistävien seinien pysty- sekä vaakavoimia Robot Structural Analysis-ohjelmalla. Rakennuksen mallintamista yksinkertaistetaan hieman ja tarkastelussa on symmetrinen kokonaisuus, jossa kaikki kerrokset ovat samanlaiset.

Seinissä olevat aukot voivat merkittävästi pienentää seinien jäykkyyttä sekä seinien ottamia rasituksia vaakavoimista. Aukkojen huomioiminen käsinlaskuissa on haastavaa, mutta FEM-ohjelmilla voidaan aukot kuitenkin mallintaa ja huomioida helposti.

FEM-ohjelmalla saatuja tuloksia verrataan laskentapohjalla saatuihin tuloksiin. Laskentapohjassa otetaan huomioon vain väliseinät ilman aukkoja. FEM-ohjelmassa seinät mallinnetaan ensimmäiseksi aukkojen kanssa ja myöhemmin myös aukoita.

Työn tarkoituksena on pohtia FEM-laskennan käytännöllisyyttä, kun tarkastellaan jäykistävien betonirakenteisten seinien saamia puristusvoimia sekä leikkausvoimia. Työssä keskitytään erityisesti leikkausvoimiin.

2 JÄYKISTÄVÄT BETONIRAKENTEISET SEINÄT

Betonirakenteisia seiniä käytetään yleisesti rungon kannatukseen sekä rakennuksen jäykistykseen. Seinät toimivat jäykistyksessä oman tason suuntaisesti. Seinille kertyy leikkaus- sekä taivutusrasituksia jäykistyksestä ja niitä ajatellaan levy- tai palkkirakenteina. Pystykuormien osalta, ne voivat nurjautaa vain heikommassa suunnassa. Seiniä tarkastellaan puristus- ja taivutusrasitettuna, kun vaakavoimat rakenteessa eivät ole hallitsevia. Maanpaineseiniin kohdistuu usein suuria tasoa vastaan kohtisuoria maanpainekuormia, jolloin seinä voidaan mitoittaa laattana. (by 211, 155-156.)

On perusteltua käyttää jäykistäviä väliseiniä vaakavoimien siirtämiseen, jolloin väliseiniin saadaan, ulkoseiniin verrattuna, helpommin toteutettua raskaat elementtiliitokset ja pystyvalusaumaa pääsee työstämään väliseinän molemmilta puolilta. Tällöin on myös hyvä saada jäykistäville väliseinille mahdollisimman paljon pystykuormaa, jotta seinät pysyvät puristettuina. (elementtisuunnittelu 2023).

Jäykistyksen suunnittelussa täytyy siis miettiä, kuinka suuressa osassa kantavat ulkoseinät toimivat jäykistyssysteemissä. Ulkoseinien ollessa yleensä runsaasti aukotettuja, niiden jäykkyydet ja vastaanottamat leikkausvoimat ovat kohtuullisen vähäiset suhteessa niiden pituuksiin. Suunnittelussa tulee siis miettiä, halutaanko ulkoseinien elementtiliitosten myös välittävän leikkausvoimia pystykuormien lisäksi. (elementtisuunnittelu 2023).

Laskuissa seinien aukkojen huomioimatta jättämisellä voidaan mitoituksissa saada hyvinkin suuret jäykkyydet ja leikkausvoimat seinille, vaikka nämä olisivatkin todellisuudessa pienet. (elementtisuunnittelu 2023).

2.1 Levy- ja mastoseinäjäykistys

Levyjäykistyksessä runkoon sijoitetut levyt vastaanottavat tasorakenteilta tulevat vaakavoimat ja jäykistävät rakennuksen. Levyjäykisteiden saamiin vaakavoimiin vaikuttavat näiden jäykkyydet ja sijainnit (elementtisuunnittelu 2010).

Elementtirakenteisissa kerrostaloissa levyjäykistys voidaan myös mitoitaa mastoseinäjäykistysenä, jolloin väli- ja ulkoseinät toimivat alapäistään jäykkinä ulokepalkkeina ja jäykistävät rakennuksen. Seinäelementtien pysty- ja vaakaliitokset mitoitetaan siirtämään seinille tulevat rasitukset, jolloin ne toimivat monoliittisena rakenteena. Mastoseinille pyritään saamaan riittävästi pystykuormaa, jolloin puristusjäännitykset kumoavat mastoseinille vaakavoimista aiheutuvat vetojäännitykset, jolloin mastoseinät pysyvät kokonaan puristettuina ja seiniä ei tarvitse ankkuroida kallioperään. Mastoseinät pyritään sijoittamaan mahdollisimman symmetrisesti rakennukseen, jolloin kiertymät jäävät myös pieniksi. Seinissä olevat aukot pienentävät seinien jäykkyyttä ja ne tulee huomioida mitoituksessa (elementtisuunnittelu 2010).

2.2 Hormielementit osana jäykistäviä väliseiniä

Jäykistykseen kannalta olisi parasta, jos hormielementit saataisiin sijoiteltua itsenäisiksi elementeiksi. Hormielementtejä sijoitellaan kuitenkin paljon osaksi väliseiniä, jolloin säästetään asuinneliöitä. Hormien sijoittelu väliseiniin katkaisee jäykistävän seinälinjan, jolloin niiden sijainteja pitää myös miettiä suunnittelussa. Seinän pituudella on paljon suurempi merkitys jäykkyyteen, verrattuna paksuuteen (Kempainen 2021). Sijoittamalla siis hormi, esimerkiksi seinälinjan päähän, saadaan seinän jäykkyydestä paljon enemmän irti.

Kantavat hormielementit, joissa hormin seinäpaksuutta ja raudoitusta on kasvatettu, voivat toimia osana jäykistävää väliseiniä, mutta nämä ovat kuitenkin vielä harvinaisia. Näille elementeille voisi kuitenkin olla tarvetta, jolloin hormien sijoittelussa väliseiniin saataisiin enemmän vapautta ja voitaisiin

käyttää ei-kantavia sekä kantavia hormielementtejä aina tilanteesta riippuen (Kempainen 2021).

2.3 Sandwich-julkisivuelementit

Sandwich-elementti koostuu ulkokuoresta ja sisäkuoresta sekä lämmöneristeestä, joka asennetaan tehtaalla tuotantoprosessissa. Käyttöalueesta ja muodosta riippuen, sandwich-elementit voidaan jakaa nauha- ja ruutuelementteihin. (by 201, 449-450.)

Elementit voivat toimia kantavina tai ei-kantavina julkisivuelementtejä. Kantavan sisäkuoren paksuus on yleisesti 150 mm ja ei-kantavan sisäkuoren paksuus 80 mm. Ulkokuori on paksuudeltaan yleisesti 70-85 mm, jonka paksuuteen vaikuttaa pintamateriaali ja raudoitustyyppi. Yleisesti sandwich-elementtien maksimikorkeus on 3600-4200 mm, johon lasketaan mukaan myös seinistä tulevat tartunnat. Korkeutta rajoittaa mm. kuljetus, valmistus, asennus sekä kuormitustekijät. Yli kuuden metrin pituisia sandwich-elementtejä tulisi välttää muodonmuutoksista aiheutuvien halkeiluriskien takia (elementtisuunnittelu 2023).

Sandwich-elementissä ulkokuorelta tuleva oma paino ja tuulikuorma siirretään sisäkuorelle diagonaaliensaiden ja pistokkaiden avulla, jotka toimivat vedettyinä ja puristettuina sauvoina (elementtisuunnittelu 2023).

2.4 Elementtiseinien välinen pystyliitos

Seinien pystyliitoksissa pyritään käyttämään vaijerilenkkiliitoksia niin kauan kuin pystysuuntaista leikkauskapasiteettia löytyy. Liitokseen kuuluu seinissä olevat vaarnakotelot ja niistä löytyvät vaijerilenkit, lenkkien läpi pujotettava harjateräs sekä pumppusaumalaasti tai saumabetoni. (elementtisuunnittelu 2023)

Pumppusaumalaastia tulee välttää leikkausvoimia siirtävissä liitoksissa (by 201, 453).

Tarvittaessa suurempaa pystysuuntaista leikkauskapasiteettia, voidaan käyttää harjateräslenkkejä, jolloin sauman on suositeltava olla sen verran leveä, että harjateräslenkit eivät limity keskenään. Harjateräslenkkiliitoksissa on suositeltavaa käyttää tuotteina valmiiksi avattavia työsaumaraudoitteita, joissa raudoitteen pohjan tulee olla vaarnattu, jolloin päästään suurempiin pystysuuntaisiin leikkauskestävyyksiin, sileään pohjaan verrattuna. (elementtisuunnittelu 2023).

2.5 Elementtiseinien välinen vaakaliitos

Vaakavoimista seinien alareunoihin syntyvät vetovoimat voidaan ottaa vastaan esimerkiksi seinäkengillä ja ankkuripulteilla, joita täytyy olla vähintään kaksi kappaletta seinäelementtiä kohden. Vetovoimat voidaan ottaa vastaan myös harjaterästartunnoilla tai hitsausliitoksilla. (elementtisuunnittelu 2023).

Seinäkenkäliitokset siirtävät ainoastaan vetovoimia, jolloin seinäkengät voidaan sijoittaa seinän päihin ottamaan vetovoimat vastaan ja harjaterästartuntoja voidaan sitten käyttää elementin keskialueella, jolloin ne vastaanottavat leikkausvoimat. (elementtisuunnittelu 2023).

Harjaterästartunnoilla voidaan myös ottaa leikkaus- ja vetovoimat samanaikaisesti, mutta tällöin näiden yhteisvaikutus tulee huomioida mitoituksessa. (elementtisuunnittelu 2023).

3 JÄYKISTYKSEN MITOITUSPERIAATTEITA

Rakennuksen jäykistys on yleisesti vaativa suunnittelutehtävä ja se on hyvä huomioida suunnittelussa mahdollisimman aikaisin ja selvittää, onko rakennuksella riittävä jäykkyys vastaanottamaan vaakavoimat. Rakennuksen muoto on myös yksi asia, joka täytyy huomioida rakennuksen suunnittelussa. (elementtisuunnittelu 2010).

Esimerkiksi L-kirjaimen muotoisen rakennuksen jäykistyssysteemiin saattaa syntyä suuria kiertymiä vaakavoimista, ellei jäykistäviä pystyrakenteita sijoiteta symmetrisesti jäykistyssysteemiin.

Jäykistysjärjestelmän tarkoituksena on siirtää vaakavoimat perustuksille, jotka muodostuvat yleisesti tuulikuormasta, rakenteiden vinouksista sekä epäkeskisyyksistä. Jäykistysjärjestelmä on toimiva vasta, kun jäykistysjärjestelmän liitokset ovat mitoitettu siirtämään vaakavoimat jäykistävälle pystyrakenteille. Jäykistävien pystyrakenteiden, esimerkiksi seinien saamiin vaakavoimiin vaikuttaa useimmiten seinien keskinäiset jäykkyydet. Vaakavoimat siirtyvät jäykän tason, esimerkiksi betonirakenteisen laatan kautta seinille. (elementtisuunnittelu 2010).

Kun halutaan huomioida seinien aukkojen vaikutus jäykkyyteen, on usein helpointa mallintaa ne johonkin FEM-ohjelmaan. (elementtisuunnittelu 2010).

Tarkasteltaessa esimerkiksi korkean rakennuksen jäykistystä FEM-ohjelmalla, on hyvä myös selvittää, mitä asioita ohjelma huomioi. Selvitettäviä asioita voivat olla mm. leikkausmuodonmuutosten huomioiminen sekä toisen kertaluvun rasiusten käyttömahdollisuus. Tärkeintä on mallintaa rakennus FEM-ohjelmaan sillä tavalla, että se kuvaisi mahdollisimman tarkasti oikean rakennuksen käyttäytymistä. (elementtisuunnittelu 2010).

3.1 Kokonaistuulivoiman määrittäminen

Käsiteltävä tuuleen liittyvä teoria perustuu Eurokoodin EN 1991-1-4 ohjeisiin.

Kokonaistuulivoimaa käytetään jäykistävän rungon ja perustusten suunnitteluun. Sen määrittämiseksi ensimmäisenä valitaan maastoluokka rakennuksen sijainnin perusteella, jonka jälkeen arvioidaan pinnanmuodon vaikutus ja sen jälkeen määritetään puuskanopeuspaine. Seuraavaksi lasketaan kokonaistuulivoima joko voimakertoimen tai painekertoimien avulla. (RIL 201-2017, 128.)

3.1.1 Maastoluokat

Maastoluokat jaetaan maaston rosoisuuden mukaan viiteen eri ryhmään, jotka vaikuttavat puuskanopeuspaineen suuruuteen. Luokassa 4 puuskapaineen suuruus on pienin ja luokassa 0 se on suurin. (RIL 201-2017, 131).

- Maastoluokka 0: Rannikkoalueet, jotka ovat avoimen meren läheisyydessä
- Maastoluokka I: Järvet ja tasangot, joiden alueella on vähäistä kasvillisuutta sekä alueella ei ole tuuliesteitä
- Maastoluokka II: Alueet, joissa on matalaa kasvillisuutta sekä esteitä kuten puita ja rakennuksia, joiden etäisyydet toisistaan ovat vähintään esteen 20-kertaisen korkeuden verran
- Maastoluokka III: Alueet, joissa on rakennuksia tai muita esteitä, joiden etäisyydet toisistaan ovat alle esteen 20-kertaisen korkeuden verran. Tähän luokkaan kuuluu esim. kylät, esikaupunkialueet ja metsät
- Maastoluokka IV: Alueet, joissa rakennukset peittävät vähintään 15 % alueen pinta-alasta ja rakennusten korkeus on keskimäärin yli 15 m

3.1.2 Maaston pinnanmuodon vaikutukset

Mäki tai harjanne voi suurentaa tuulen nopeuspainetta ja se tulee huomioida kertomalla modifioimaton puuskanopeuspaine $q_{p0}(z)$ suurennuskertoimella λ_D , kun maaston kaltevuus on suurempi kuin 5 %. Kertoimella saadaan määritettyä modifioitu nopeuspaine $q_p(z)$. Tasaisessa maastossa modifioimaton puuskanopeuspaine $q_{p0}(z)$ on kuitenkin yhtä suuri kuin modifioitu puuskanopeuspaine $q_p(z)$. (RIL 201-2017, 133.)

Tässä työssä ei kuitenkaan tarkastella maaston pinnanmuodon vaikutuksia kokonaistuulivoimaan eli ollaan tasaisessa maastossa.

3.1.3 Puuskanopeuspaine

Tuulen puuskanopeuspaine perustuu tuulennopeuden modifioimattomaan perusarvoon V_b , joka on 21 m/s kaikissa maastoluokissa.

Puuskanopeuspaineen määrittämisessä on huomioitu ilmastonmuutoksen tuulta kasvattava vaikutus. Puuskanopeuspaineen oletetaan olevan varmallalla puolella ainakin vuoteen 2035 asti. Oletuksena on myös se, että tuulikuorman ääriarvon toistumisaika on kerran 50 vuodessa. (RIL 201-2017, 136.)

Modifioimaton puuskanopeuspaine $q_{p0}(z)$ (kN/m²) voidaan määrittää maastoluokan ja korkeuden avulla seuraavista kaavoista:

Maastoluokassa 0:

$$q_{p0}(z) = 0,00893 * \left[\ln \left(\frac{\max(1, z)}{0,003} \right) \right]^2 + 0,0625 * \ln \left(\frac{\max(1, z)}{0,003} \right) \quad (1)$$

Maastoluokassa I:

$$q_{p0}(z) = 0,00794 * \left[\ln \left(\frac{\max(1, z)}{0,01} \right) \right]^2 + 0,0556 * \ln \left(\frac{\max(1, z)}{0,01} \right) \quad (2)$$

Maastoluokassa II:

$$q_{p0}(z) = 0,00995 * \left[\ln \left(\frac{\max(2, z)}{0,05} \right) \right]^2 + 0,0697 * \ln \left(\frac{\max(2, z)}{0,05} \right) \quad (3)$$

Maastoluokassa III:

$$q_{p0}(z) = 0,01279 * \left[\ln \left(\frac{\max(5, z)}{0,3} \right) \right]^2 + 0,0895 * \ln \left(\frac{\max(5, z)}{0,3} \right) \quad (4)$$

Maastoluokassa IV:

$$q_{p0}(z) = 0,01513 * \left[\ln \left(\frac{\max(10, z)}{1} \right) \right]^2 + 0,1059 * \ln \left(\frac{\max(10, z)}{1} \right) \quad (5)$$

joissa

z = tarkasteltava korkeus (m)

Kaava 1. Tuulen nopeuspaineet maastoluokassa 0. (RIL 201-2017, 188).

Kaava 2. Tuulen nopeuspaineet maastoluokassa 1. (RIL 201-2017, 188).

Kaava 3. Tuulen nopeuspaineet maastoluokassa 2. (RIL 201-2017, 188).

Kaava 4. Tuulen nopeuspaineet maastoluokassa 3. (RIL 201-2017, 188).

Kaava 5. Tuulen nopeuspaineet maastoluokassa 4. (RIL 201-2017, 188).

3.1.4 Kokonaistuulivoiman laskenta voimakertoimella matalalle rakennukselle

Tässä työssä tarkastellaan kokonaisuutta, jossa rakennuksen korkeus on pienempi kuin leveys, jolloin käytetään edellä mainittua kaavaa tuulikuorman laskemiseen.

Rakennuksen leveyden ollessa suurempi kuin sen korkeus, voidaan olettaa harjalla vaikuttavan tuulenpaineen olevan sama rakennuksen kaikissa korkeusasemissa. Kokonaistuulivoima (kN) matalalle rakennukselle, kun $h \leq b$ tai $h \leq 15$ m, voidaan laskea kaavalla:

$$F_w = C_s C_d * C_f * q_p(h) * A_{ref} \quad (6)$$

jossa

$C_s C_d$ = rakennekerroin, jolle voidaan käyttää varmana lukuna arvoa 1,0 matalille rakennuksille

C_f = voimakerroin

$q_p(h) = q_p(z)$ = modifioitu nopeuspaine, joka huomioi maaston pinnan muodon ja se määritetään rakennuksen harjan korkeudella eli $z=h$

A_{ref} = tuulikuorman vaikutusala tuulen näkemänä

Kaava 6. Matalan rakennuksen kokonaistuulivoima. (RIL 201-2017, 140)

Voimakertoimen määrittämiseksi suorakulmaisille matalille ja korkeille rakennuksille, joudutaan selvittämään tehollinen hoikkuus λ kaavoilla, joissa b on leveys tuulen näkemänä ja h on korkeus:

$$\lambda = \frac{2 * h}{b} \quad (7)$$

kun $h < 15$ m

$$\lambda = \frac{1,4 * h}{b} \quad (8)$$

kun $h \geq 50$ m

$$\lambda = (2,25 - 0,017 * h) * \frac{h}{b} \quad (9)$$

kun $15 \text{ m} < h < 50 \text{ m}$

Kaava 7. Lambda-arvon määrittäminen 1. (RIL 201-2017, 140).

Kaava 8. Lambda-arvon määrittäminen 2. (RIL 201-2017, 140).

Kaava 9. Lambda-arvon määrittäminen 3. (RIL 201-2017, 140).

Ohjetta ei voida soveltaa hoikille rakennuksille, joiden $\lambda > 10$. (RIL 201-2017, 140).

Voimakertoimen C_f voidaan määrittää taulukosta suorakaidepoikkileikkauksen omaavalle matalalle tai korkealle rakennukselle, jossa d on tuulensuuntainen sivu ja b on tuulta vastaan kohtisuora sivu. Sivusuhteiden ja λ -luvun väliarvot voidaan interpoloida.

Taulukko 1. Voimakertoimen C_f määrittäminen taulukosta. (RIL 201-2017, 141).

λ	Sivusuhte d/b								
	0,1	0,2	0,5	0,7	1	2	5	10	50
≤ 1	1,2	1,2	1,37	1,44	1,28	0,99	0,60	0,54	0,54
3	1,29	1,29	1,48	1,55	1,38	1,07	0,65	0,58	0,58
10	1,40	1,40	1,60	1,68	1,49	1,15	0,70	0,63	0,63

3.2 Lisävaakavoimat

Mittaepätarkkuudet tulee ottaa huomioon murtorajatila- sekä onnettomuusmitoitustilanteissa vinouden θ_i avulla. Vinous voidaan laskea kaavalla:

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

joissa

θ_0 = perusarvo (suositusarvo 1/200)

α_h = korkeuden tai pituuden pienennyskerroin

α_m = rakenneosien määrän pienennyskerroin

joissa

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{l}}, \text{ jossa } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1 \quad (11)$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad (12)$$

joissa

l = rakennuksen korkeus, kun tarkastellaan jäykistysjärjestelmää

m = vaakavoimaan vaikuttavien pystyrakenneosien määrä, kun tarkastellaan jäykistysjärjestelmää

Kaava 10. Vinous (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC. 2015, 55).

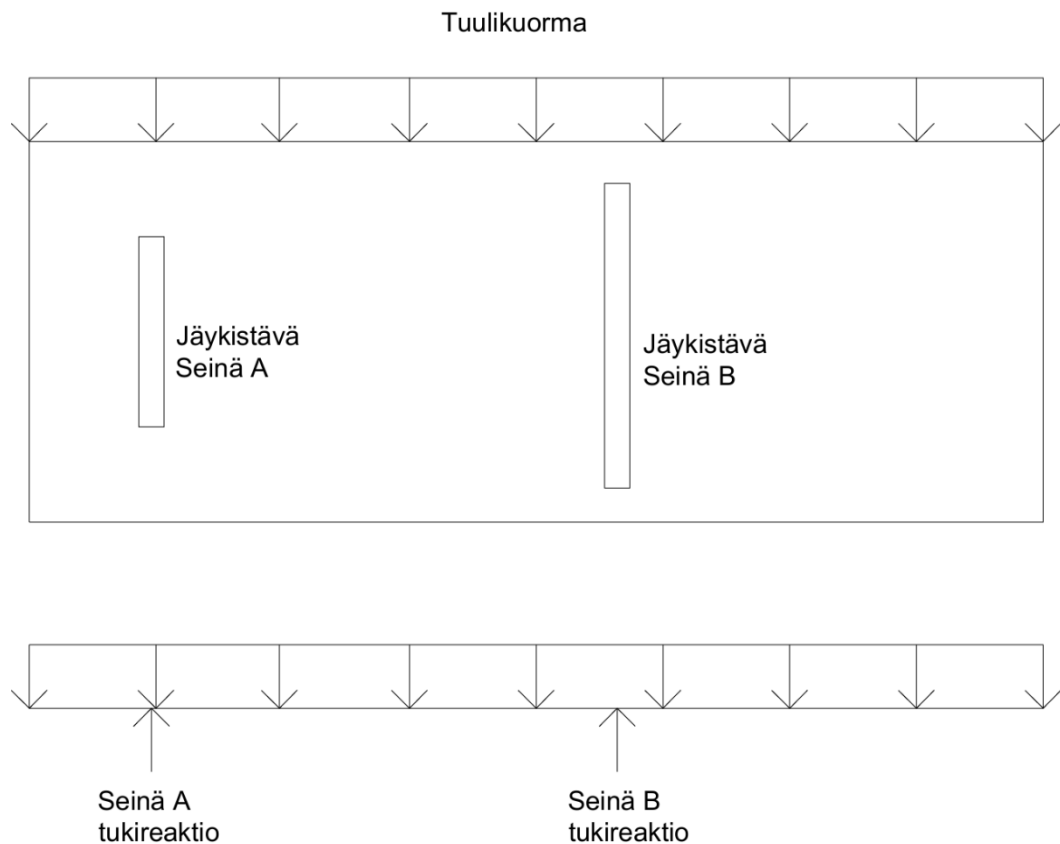
Kaava 11. Korkeuden tai pituuden pienennyskerroin. (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC. 2015, 55).

Kaava 12. Rakenneosien määrän pienennyskerroin. (SFS-EN 1992-1-1+A1+AC. 2015, 55).

3.3 Vaakavoimien jakautuminen seinille

Jäykistyksessä betonirakenteinen laatta toimii monoliittisena jäykkänä tasona ja kerää rakennukselle tulevat vaakavoimat. Jotta esimerkiksi ontelolaatat toimivat yhtenäisenä rakenteena, täytyy ontelolaatan saumoissa olla saumaraudoitteet sekä saumavalu ja koko ontelolaatastoa ympäri kiertävä rengasraudoitus. Jotta kuormat saadaan siirrettyä laatalta seinille, täytyy laatan ja seinien välillä olla myös liitos. (Elementtisuunnittelu 2010)

Kun jäykistyssysteemissä on vain kaksi jäykistävää seinää samassa suunnassa, niin jäykistyssysteemi on staattisesti määrätty (kuva 1) riippumatta seinien keskinäisistä etäisyyksistä tai jäykkyyksistä. Tällöin jäykistyssysteemiä voi ajatella staattisesti määrättynä palkkina, jolla on kaksi tukea, joiden tukireaktiot eli seinille tulevat leikkausvoimat saadaan laskettua normaalin statiikan avulla. (Elliot 2002, 183.)



Kuva 1. Staattisesti määrätty jäykistyssysteemi.

Kun jäykistyssysteemissä on enemmän kuin kaksi jäykistävää seinää samassa suunnassa tai vähintään kaksi seinää molemmissa suunnissa, niin jäykistyssysteemi muuttuu staattisesti määräämättömäksi ja seinien keskinäiset jäykkyydet ja sijainnit vaikuttavat näiden saamiin kuormiin. (Elementtisuunnittelu 2010).

Seinien jäykkyydet saadaan laskettua kaavoilla:

$$\frac{1}{k_x} = \frac{H^3}{3 * E * I_y} + K_x * \frac{H}{G * A} \quad (13)$$

$$\frac{1}{k_y} = \frac{H^3}{3 * E * I_x} + K_y * \frac{H}{G * A} \quad (14)$$

joissa

H = seinän korkeus

E = kimmokerroin

A = pinta-ala ylhäältä katsottuna

G = liukumoduuli

K_x ja K_y = leikkausmuodonmuutoksen kertoimet, joille tullaan käyttämään arvoa 1,2

I_y = jäyhyysmomentti y-akselin suhteen

I_x = jäyhyysmomentti x-akselin suhteen

Jäyhyysmomentit lasketaan ylhäältä päin katsottuna vahvemmassa suunnassa kaavoilla:

$$I_y = \frac{t * L^3}{12}$$

$$I_x = \frac{t * L^3}{12}$$

joissa

t = seinän paksuus

L = seinän pituus

Kaava 13. Jäykkyys x-suunnassa. Elementtisuunnittelu 2010.

Kaava 14. Jäykkyys y-suunnassa. Elementtisuunnittelu 2010.

Kun jäykistävät seinät eivät ole sijoitettu täysin symmetrisesti eli kun kiertokeskiö ei sijaitse rakennuksen geometrisessa keskipisteessä, niin jäykistyssysteemiin syntyy kiertymää ja kiertokeskiön sijainti täytyy määrittää. Kiertokeskiön x- ja y-koordinaatti saadaan selville kaavoilla:

$$\bar{X} = \frac{\sum k_y * x}{\sum k_y} \quad (15)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum k_x * y}{\sum k_x} \quad (16)$$

joissa

x = y-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys origosta x-suunnassa

y = x-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys origosta y-suunnassa

Kaava 15. Kiertokeskiön x-koordinaatti. Elementtisuunnittelu 2010.

Kaava 16. Kiertokeskiön y-koordinaatti. Elementtisuunnittelu 2010.

Kiertymä aiheuttaa myös taivutusta jäykistyssysteemiin, joka johtuu kuorman resultantin epäkeskisyydestä kiertokeskiöön, joka määritetään kaavoilla:

$$M = F_y * e_x - F_x * e_y \quad (17)$$

joissa

e_x = y-suuntaisen kuorman resultantin epäkeskisyyden kiertokeskiöön

e_y = x-suuntaisen kuorman resultantin epäkeskisyyden kiertokeskiöön

Kaava 17. Jäykistyssysteemin momentti. Elementtisuunnittelu 2010.

Jäykistyssysteemin siirtymät saadaan määritettyä kaavoilla:

$$V_x = \frac{F_x}{\sum k_x} \quad (18)$$

$$V_y = \frac{F_y}{\sum k_y} \quad (19)$$

Kaava 18. Siirtymä x-suunnassa. Elementtisuunnittelu 2010.

Kaava 19. Siirtymä y-suunnassa. Elementtisuunnittelu 2010.

Kiertymä määritetään seuraavalla kaavalla, jossa vääntöjäykkyys T_{xy} voidaan jättää kaavoista pois sen vähäisen vaikutuksen takia, kun tarkastellaan suoriamastoseiniä:

$$\phi = \frac{M}{\sum T_{xy} + \sum k_x * a_y^2 + \sum k_y * a_x^2} \quad (20)$$

joissa

a_y = x-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys kiertokeskiöstä y-suunnassa, jonka voi laskea kaavalla:

$$a_y = y - \bar{Y}$$

a_x = y-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys kiertokeskiöstä x-suunnassa, jonka voi laskea kaavalla:

$$a_x = x - \bar{X}$$

Kaava 20. Kiertymä. Elementtisuunnittelu 2010.

Jäykistäville seinille tulevat kuormat koostuvat siirtymästä sekä kiertymästä. Kun jäykistyssysteemiin syntyy kiertymää, kuormien jakautumiseen vaikuttaa seinien jäykkyyksien lisäksi myös seinien etäisyydet kiertokeskiöön. Kun kiertymää ei synny, kuormat jakautuvat seinille vain siirtymän perusteella eli pelkästään jäykkyyksien perusteella. Tarkasteltavalle x- tai y-suuntaiselle seinälle tuleva kuorma saadaan kaavoista:

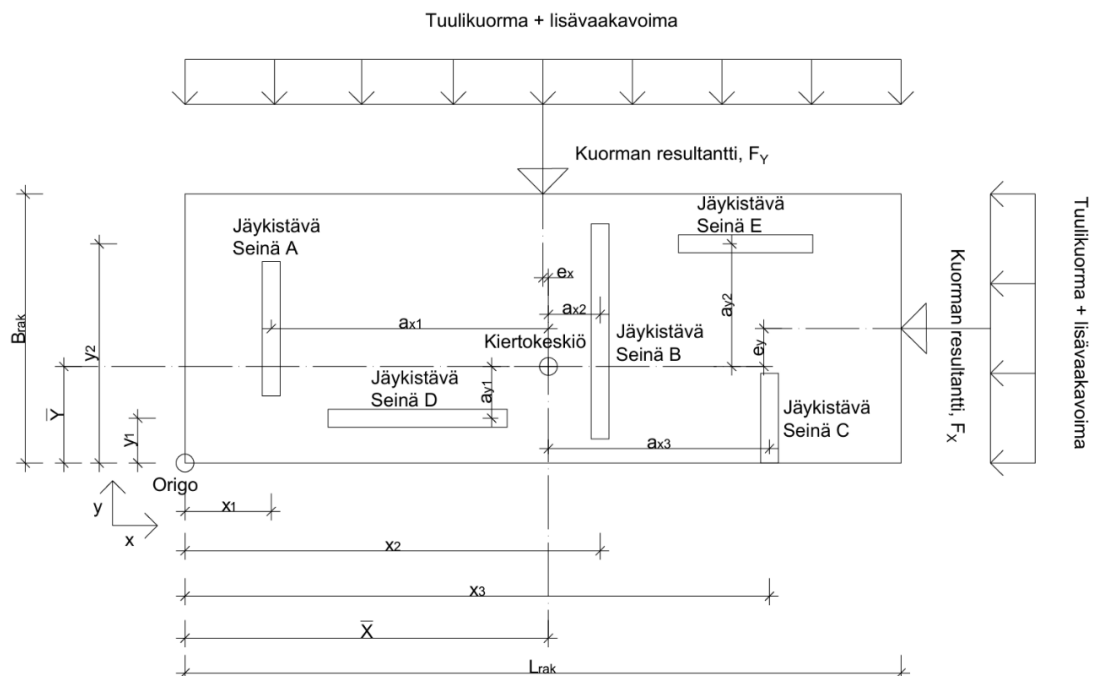
$$Q_x = k_x * V_x - k_x * a_y * \phi \quad (21)$$

$$Q_y = k_y * V_y + k_y * a_x * \phi \quad (22)$$

Kaava 21. X-suuntaisen osamaston kuormitus. Elementtisuunnittelu 2010.

Kaava 22. Y-suuntaisen osamaston kuormitus. Elementtisuunnittelu 2010.

Kuvassa 2 on hieman tarkennettu, mitä kaavoissa esitetyt etäisyydet ovat. Tuulikuormat eivät vaikuta samaan aikaan molemmilta puolilta, mutta ne ovat havainnollisuuden takia molemmat mukana.



Kuva 2. Staattisesti määräämätön jäykistyssysteemi.

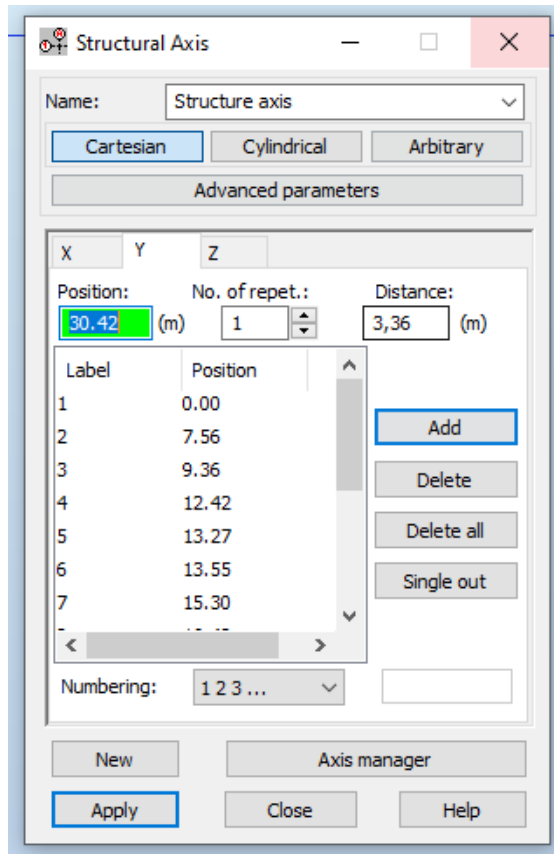
4 MALLINNUS

Referenssikohde on 8-kerroksinen betonielementtirakenteinen rakennus. Rakennus on nimeltään Kirstinpuiston Helmi ja se on valmistunut vuonna 2022. Rakennus sijaitsee Ruissalontielle Turussa. Syy rakennuksen valitsemiselle referenssikohteeksi oli se, että kyseinen kohde vaikutti kiinnostavalta ja haastavalta, rakennuksen L-muodon takia.

Rakennuksesta on pyydetty pääpiirustuksia ja rakennepiirustuksia Rakennusvalvonnalta, joiden pohjalta rakennusta mallinnetaan suurin piirtein rakennuksen pohjapiirustuksen mukaan. Mallintamista yksinkertaistetaan ja mallin kaikki kerrokset tullaan tekemään symmetrisiksi.

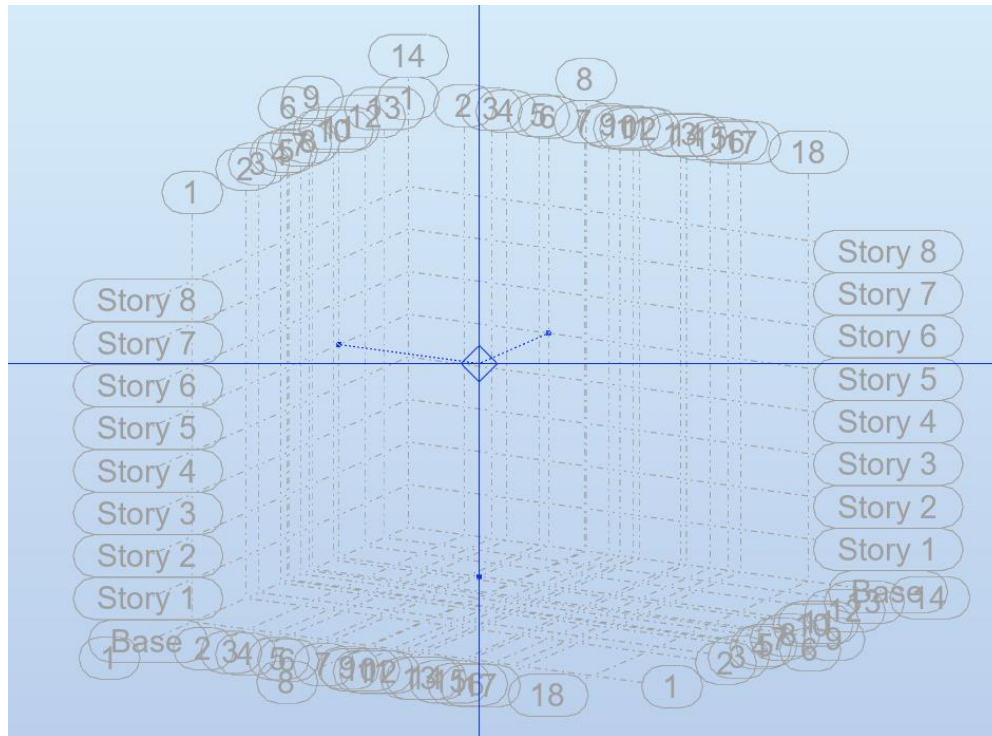
4.1 Mallinnuksen aloitus

Rakennuksen mallintaminen voidaan aloittaa valitsemalla building design-vaihtoehto aloitusvalikosta. Ensimmäisenä luodaan moduuliviivat rakennukselle kantavien seinien painopisteiden kohdille rakennuksen pohjapiirustuksen mukaan. Moduuliviivat saadaan luotua ohjelman ylävalikosta (Geometry -> Axis Definition). Moduuliviivojen suunnat ovat globaalin koordinaatiston mukaiset suunnat. Ohjelma luo oletuksena ensimmäisen kerroksen kolmen metrin korkeuteen.



Kuva 3. Moduuliviivojen määrittäminen.

Kerrokset ja kerroskorkeudet voidaan määrittää ylävalikosta (Geometry -> Stories -> Stories). Moduulilinjojen sekä kerrosten määrittämisen jälkeen on helppoa lisätä rakenteita malliin, kun kursori tarttuu moduuliviivojen leikkauskohtiin.

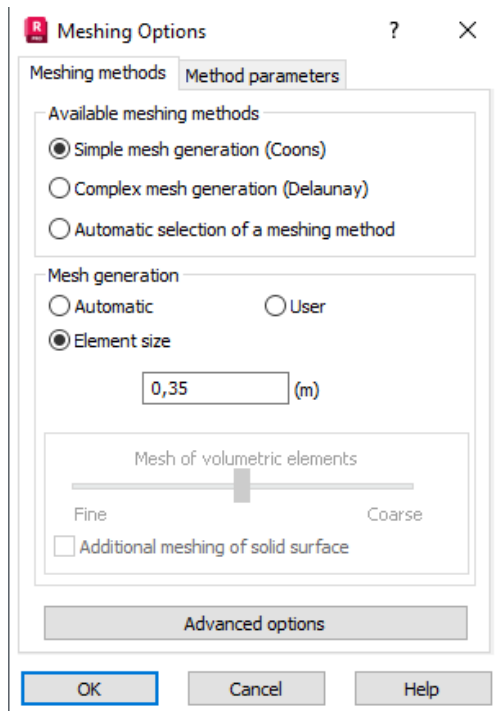


Kuva 4. Kerrokset sekä moduuliviivat.

4.2 Seinien mallinnus

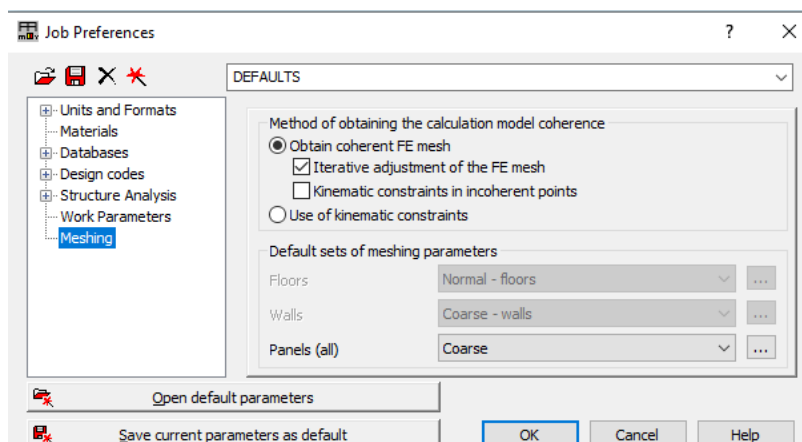
Seinien ominaisuudet voidaan määrittää oikealla puolella olevasta valikosta (Walls -> Thickness). Luodessa seiniä, ohjelma mallintaa seiniin automaattisesti nivelelliset tuet, mutta nämä saa vaihdettua myös jäykkiin tukiin sivuvalikosta (Supports -> Linear -> Fixed). Väliseinät mallinnetaan työssä 200 mm paksuisiksi ja ulkoseinät 150 mm paksuisiksi.

Seinien analysoimisessa käytössä on laskentatapana Shell-vaihtoehto, joka luo seiniin elementtiverkon oletuksena metrin kokoiseksi. Elementtiverkon kokona käytetään tässä työssä 0,35 metriä, jonka voi muuttaa halutuille paneeleille asetuksista (Options of FE Mesh Generation -> Meshing options).



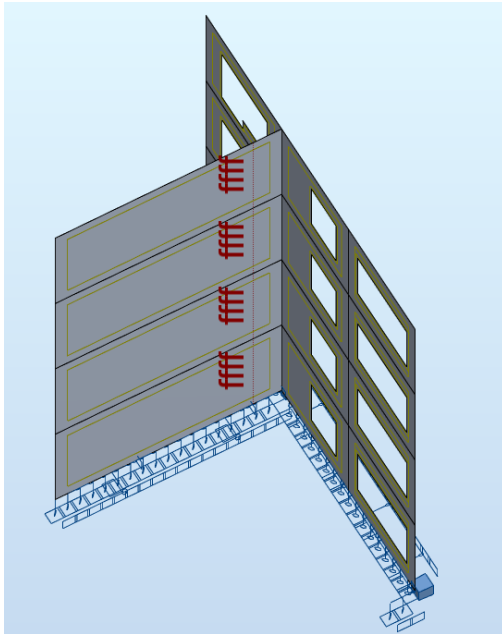
Kuva 5. Elementtiverkon asetukset.

Tässä työssä laitetaan vielä pois päältä asetus (Kinematic constraints in incoherent points), jonka ollessa pois päältä, ei pitäisi tulla rajoitusvaroituksia liittyen elementtiverkkoon epäselvissä solmupisteissä. Asetuksen löytää ylävalikosta (Tools -> Job preferences -> Meshing).



Kuva 6. Lisää elementtiverkon asetuksia.

Tässä työssä risteävien seinien siirtymät vapautetaan toisistaan täysin käyttämällä lineaarisia vapautuksia (Structure Definition -> Linear releases). Seinien voidaan ajatella olevan irti toisistaan, jolloin seinät toimivat erillisinä mastoseininä.



Kuva 7. Seinän vapautus.

Seinien aukot voidaan tehdä oikealta valikosta (Openings). Oviaukkoja ei tehdä työssä aivan seinän alareunaan, vaan tähän on jätetty noin elementtiverkon koon verran tilaa (0,35 m), jolloin saadaan hyvänlainen verkko tehtyä. Rasituskuvaajat menevät hieman vinoon myös, kun aukon tekee seinän alareunaan kiinni. Lähellä toisiaan olevia ikkuna- ja oviaukkoja on myös tehty yhdeksi yhtenäiseksi aukoksi.

Suurin osa ulkoseinistä ei ota pystysuuntaista kuormaa laatoilta tässä mallissa, joten nämä seinät klikataan valituiksi ja vasemmalta valikosta valitaan tämän mahdollistava asetus (Trapezoidal -> Ignore), jonka jälkeen voidaan myös mallintaa kolmelta reunalta tuettuja laattoja.

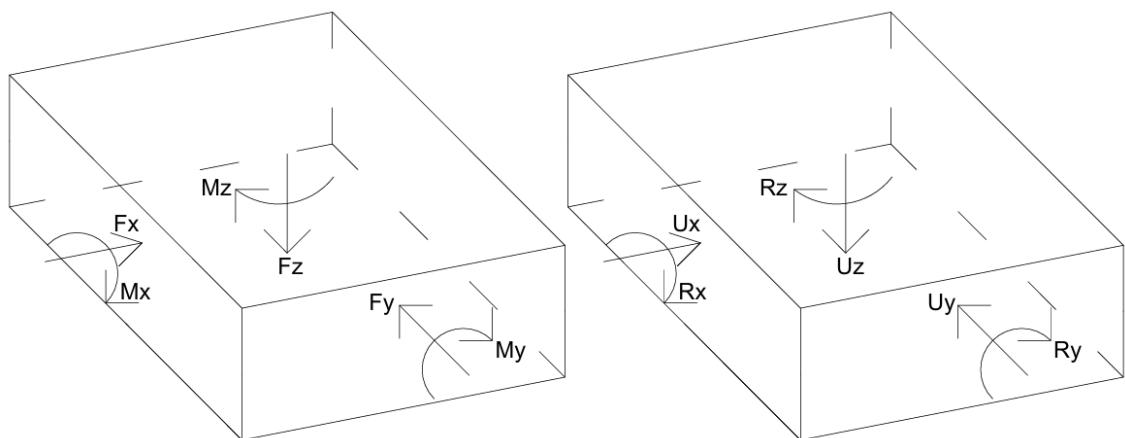
4.3 Laattojen mallinnus

Laatat saadaan määritettyä oikealta valikosta (Floors). Laatat mallinnetaan tässä työssä ilman elementtiverkkoa (Elastic stiffness: No finite elements). Laatta toimii tässä tapauksessa vain kuormansiirtotasona, eikä sen rasituksia voi tarkastella. Laatat mallinnetaan työssä 200 mm paksuisiksi ja laattojen tukipinnat katsotaan referenssikohteen laattakaaviosta.

Laatta valitaan jäykäksi xy-tasossa (Stiffening diaphragm, Partial stiffening in XY) pystyvoimien tarkastelussa. Vaakavoimat tarkastellaan xy-jäykän laatan sekä täysin jäykän laatan asetuksilla (Full stiffening, rigid body) ja tuloksia vertaillaan laskuihin.

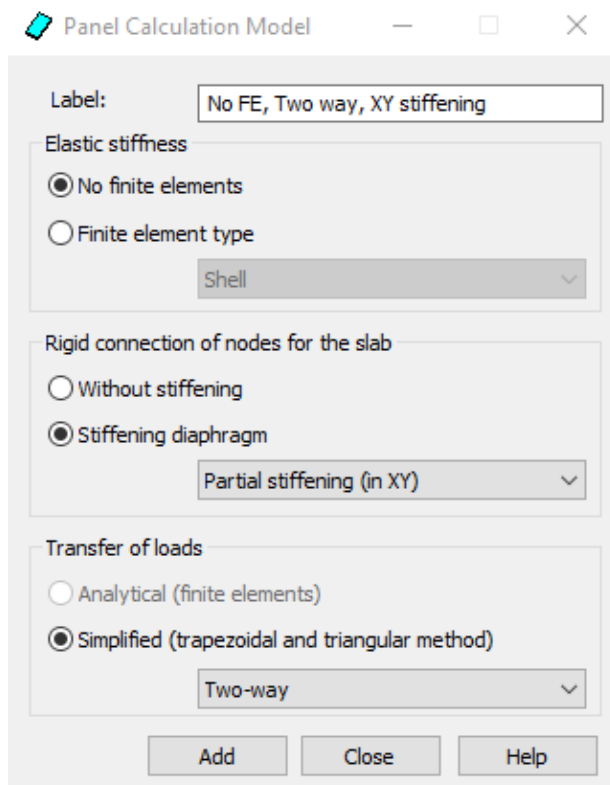
Kuvassa 9, laatalta on kuusi vapausastetta. Xy-tasossa jäykkä laatta on äärettömän jäykkä x- ja y-suunnassa, jolloin laatan tason suuntaiset siirtymät U_x ja U_y ovat estetty sekä kiertymä laatan tasossa R_z . Laatta huomioi vaakavoimien jakautumisessa seinien jäykkyydet.

Täysin jäykkä laatta on äärettömän jäykkä x-, y- ja z-suunnassa, jolloin xy-tason jäykkyyden lisäksi myös laatan tasoa vastaan kohtisuora siirtymä U_z ja tason suuntaiset kiertymät R_x ja R_y ovat estetty. Laatta huomioi seinien jäykkyydet pysty- ja vaakavoimien jakautumisessa, joilla saadaan myös leikkausvoimien tuloksiin hieman eroa.



Kuva 8. Laatan kuormitukset, siirtymät ja kiertymät.

Laattojen kuormanjakotapana (pystykuormat) käytetään yksinkertaistettua tapaa (Transfer of loads: Simplified), joka valitaan, kun ei käytetä elementtiverkkoa laatoissa. Mallissa käytetään yhteen ja kahteen suuntaan kantavia laattoja. Kahteen suuntaan kantavilla laatoilla mallinnussuunnalla ei ole väliä, mutta yhteen suuntaan kantavan laatan kuormanjakosuunta määräytyy laatan mallinnussuunnan perusteella (laatan lokaali x-akseli).

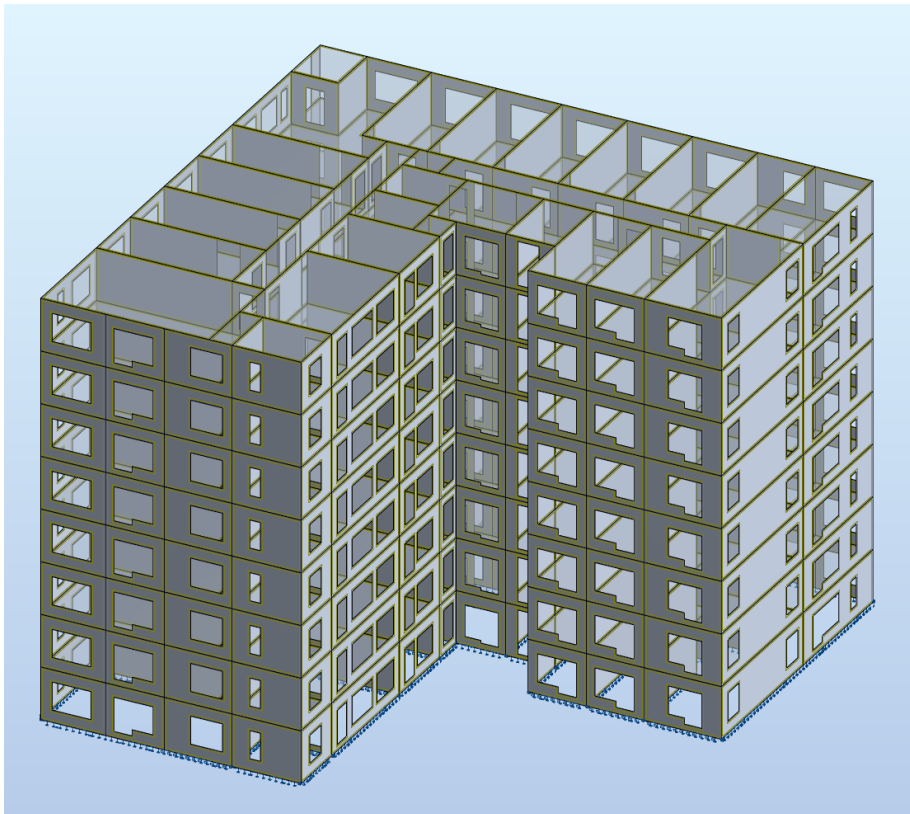


Kuva 9. Laatan asetuksia.

4.4 Tarkasteltavat kokonaisuudet

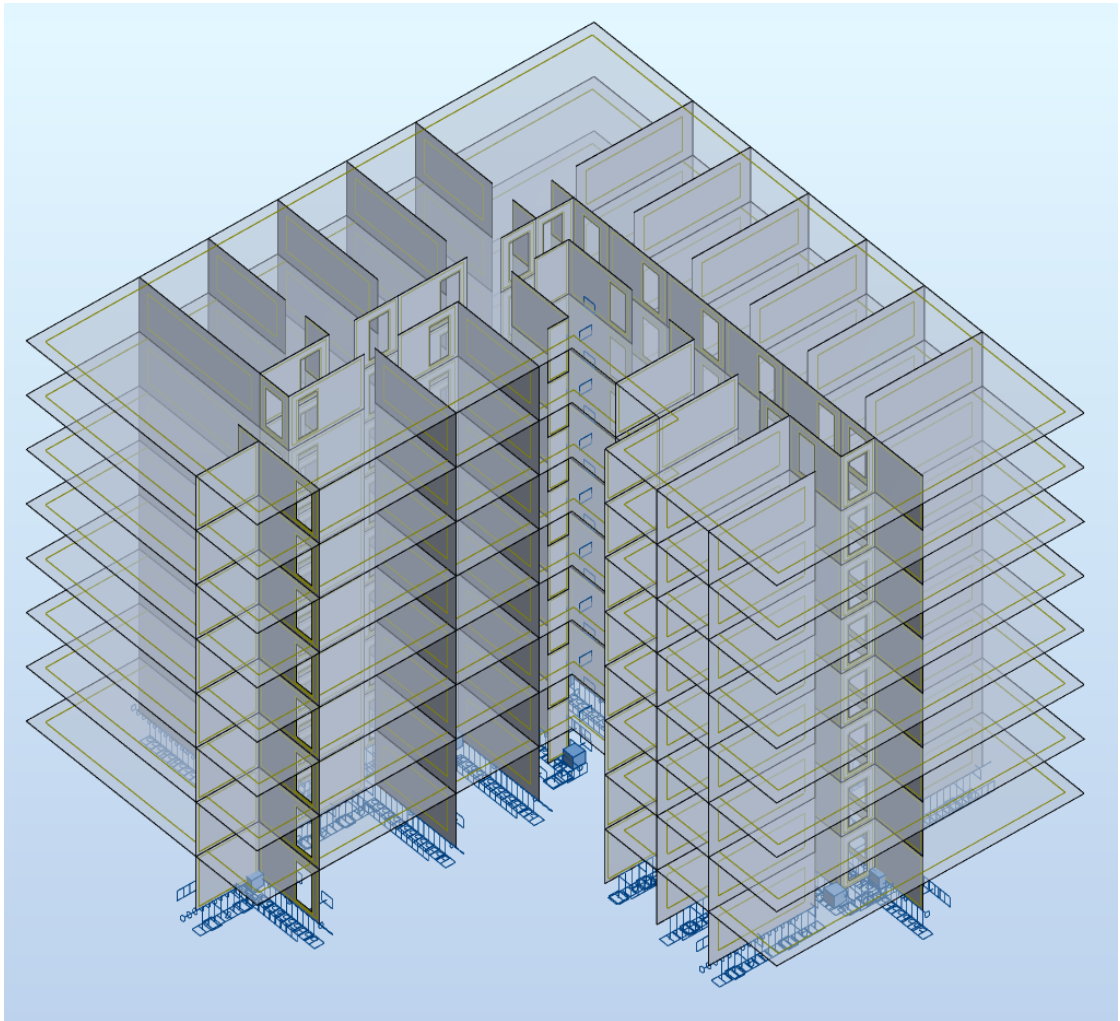
Kuva 11 on yksinkertaistettu malli referenssi kohteesta. Ensimmäiset voimien vertailut Robotin ja käsinlaskujen välillä tullaan suorittamaan tästä mallista, jossa on kaikki aukot huomioituna sekä ulkoseinät. Käsinlaskuissa huomioidaan vain väliseinät ilman aukkoja.

Kuvan 11 kokonaisuudessa 1, ulkoseinät toimivat Robotissa myös jäykistävinä seininä, jolloin ulkoseinien osuus kokonaisjäykistyksestä saadaan myös selville. Mallista tullaan tarkastelemaan seinien saamia leikkaus- ja puristusvoimia. Puristusvoimia tarkastellaan ainoastaan tästä kuvan 11 mallista 1.



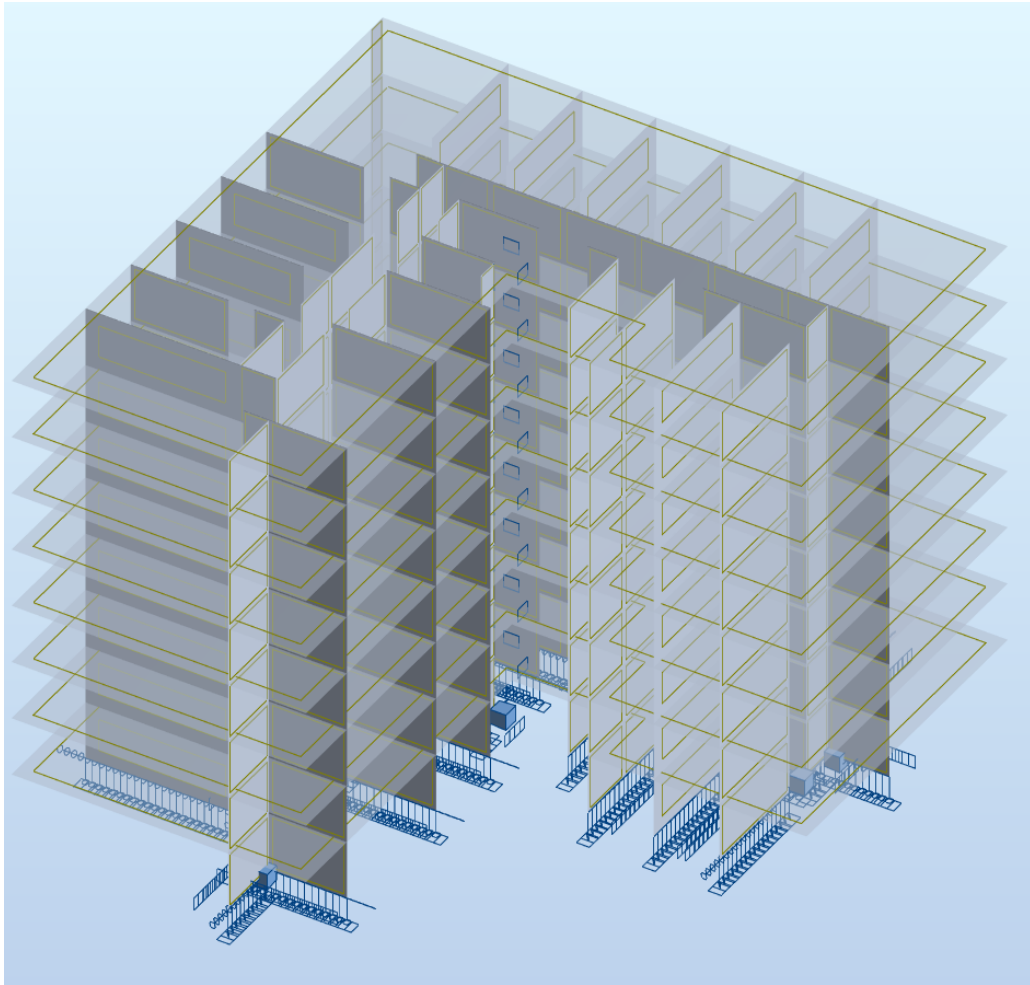
Kuva 10. Tarkasteltava kokonaisuus 1.

Kuvan 11, kokonaisuuden jälkeen, rakennuksen seinien leikkausvoimia tarkastellaan Robotissa kuvan 12 kokonaisuudesta 2, jossa ulkoseinät ovat poistettu, mutta väliseinien aukot ovat huomioituna, jolloin voidaan nähdä väliseinien aukkojen vaikutukset tuloksiin. Vertailut tehdään käsinlaskujen ja Robotin välillä tietenkin.



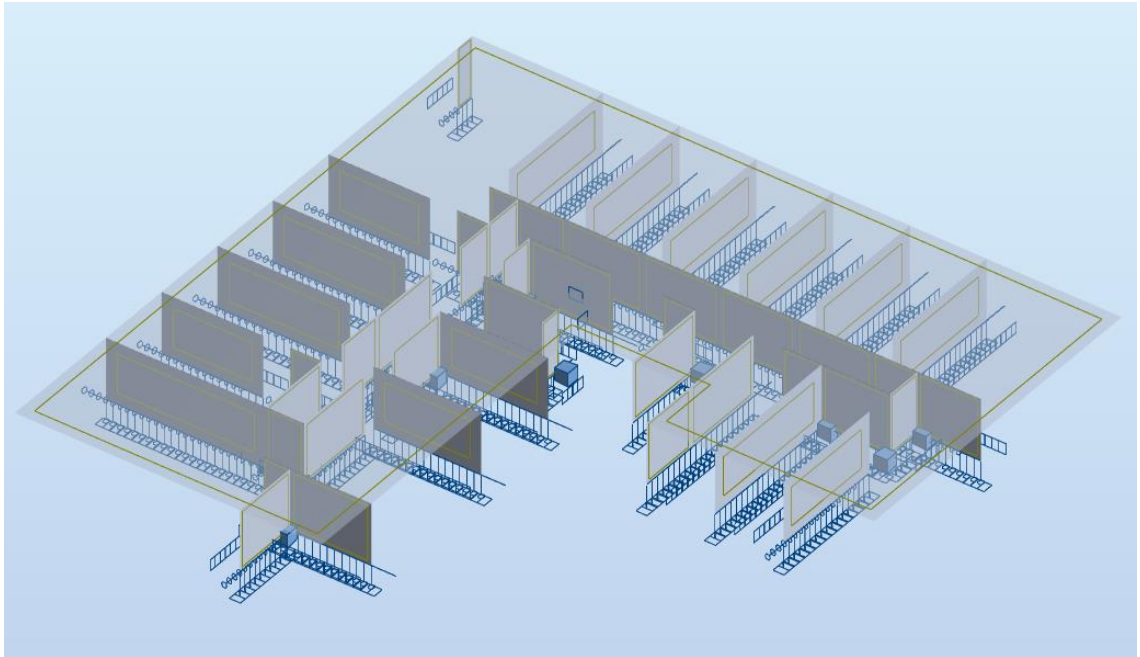
Kuva 11. Tarkasteltava kokonaisuus 2.

Kuvan 12 vertailujen jälkeen, seuraavat tarkastelut leikkausvoimille tehdään kuvan 13 kokonaisuudesta 3, jossa Robotiin on mallinnettu vain väliseinät ilman aukkoja, jolloin voidaan nähdä päästäänkö laskukaavoilla samanlaisiin tuloksiin leikkausvoimissa, kun tarkastellaan samanlaista kokonaisuutta.



Kuva 12. Tarkasteltava kokonaisuus 3.

Neljäs ja viimeinen vertailu leikkausvoimille tehdään vain ensimmäisestä kerroksesta, jolloin nähdään, jos korkeudet vaikuttavat myös leikkausvoimien vertailutuloksiin Robotin ja laskujen välillä. Tarkasteltava kokonaisuus 4 löytyy kuvasta 14.



Kuva 13. Tarkasteltava kokonaisuus 4.

4.5 Vaakavoimien lisääminen

Vaakavoimille luodaan oikealta valikosta (Load Types) kaksi kuormitustapausta erisuuntaisille tuulille. Vaakavoimat lisätään valikosta (Load Definition) ja ne mallinnetaan viivakuormina laatan kylkeen (Surface -> Linear load 2p).

Vaakavoimiksi valitaan 4,4 kN/m per kerros molemmissa suunnissa kokonaisuuksille 1-3. Nämä voimat tulevat käsinkaskuista (liite 1).

Vaakavoimaksi kokonaisuudelle 4 valitaan 35,2 kN/m ($8 \cdot 4,4 \text{ kN/m} \cdot 8 = 35,2 \text{ kN/m}$) yksinkertaistuksen vuoksi, jolloin kokonaisvaakavoima pysyy samana.

4.6 Pystyvoimien lisääminen

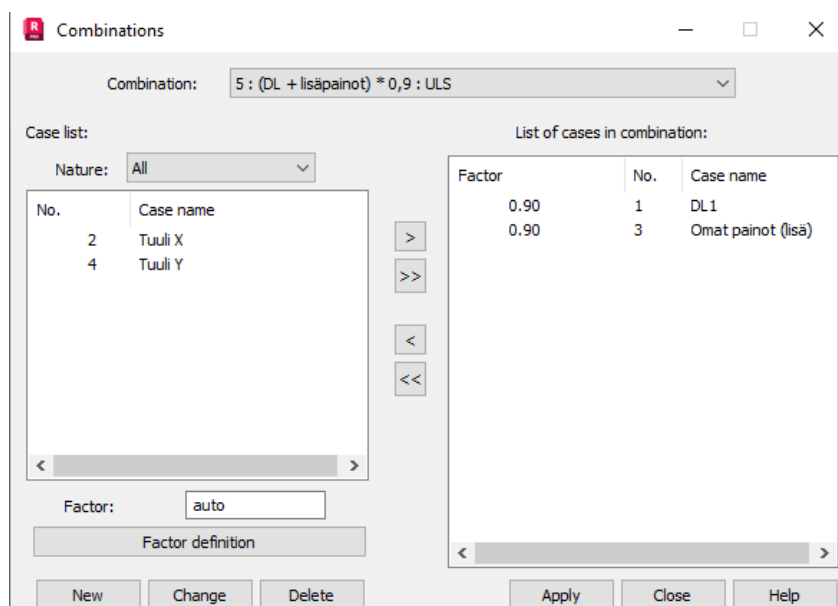
Pystyvoimat lisätään vain kuvan 11 tarkasteltavaan kokonaisuuteen 1.

Ohjelma luo malliin automaattisesti rakenteiden omat painot (DL), kun mallin laskee kertaalleen läpi ja työssä käytetään näitä painoja ($24,53 \text{ kN/m}^3$ tilavuuspaino betonille).

Pystykuormille luodaan kuormitustapaus ylimääräisille omille painoille (pintarakenteet, kevyet väliseinät = 2 kN/m^2 ja rakennuksen käytävillä $0,75 \text{ kN/m}^2$).

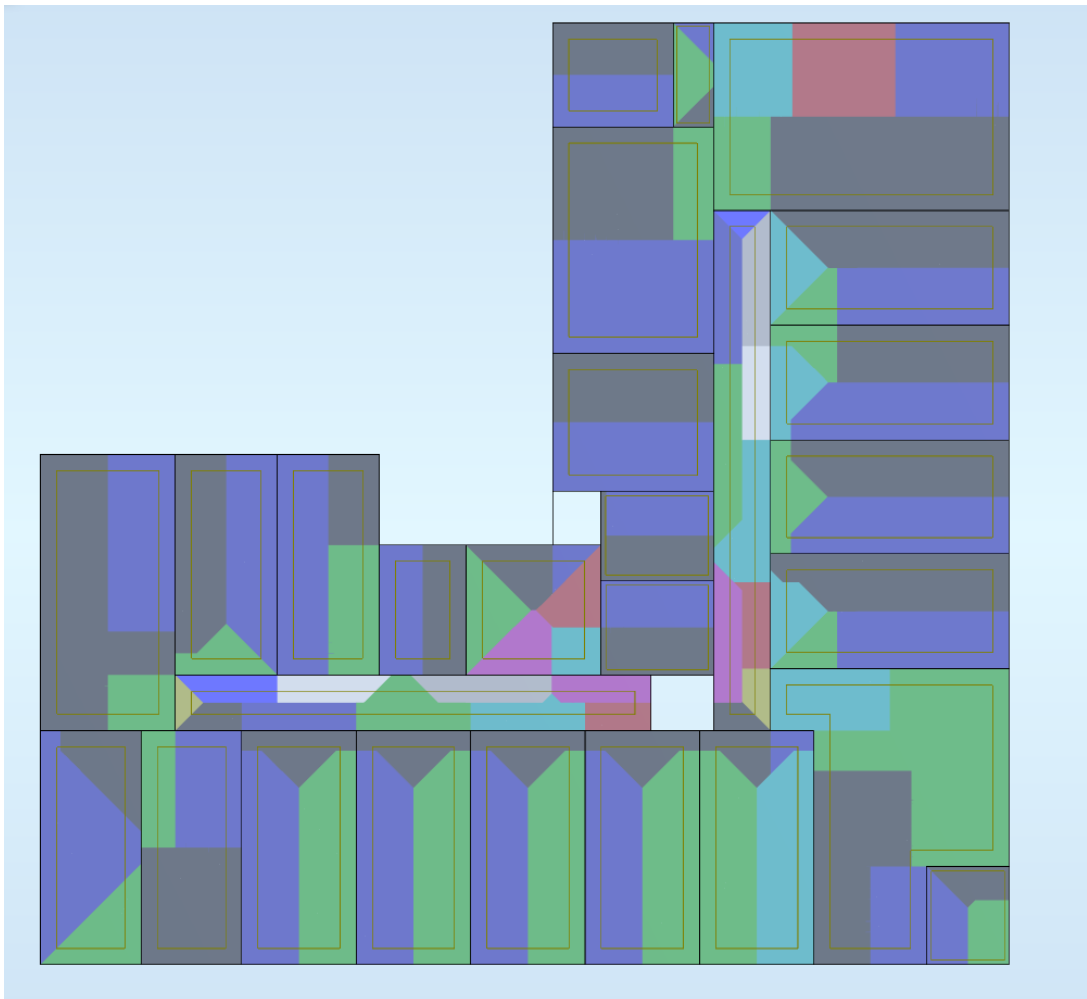
Kuormat lisätään oikealta valikosta (Load Definition). Pinta-alakuormat lisätään laatan päälle (Surface -> Uniform planar load).

Omille painoille tehdään kuormien yhdistely valikosta (Structure Definition -> Combinations), josta valitaan ohjelman määrittämille omille painoille (DL) sekä lisätyille omille painoille pienennyskertoimeksi 0,9, jota käytetään, kun rakenteiden omilla painoilla on edullinen vaikutus jäykistystarkasteluissa. Tarkastellaan siis myös ohjelman ominaisuuksia. Hyöty- ja lumikuormat eivät ole mukana puristusvoimien tarkasteluissa.



Kuva 14. Kuormien yhdistely.

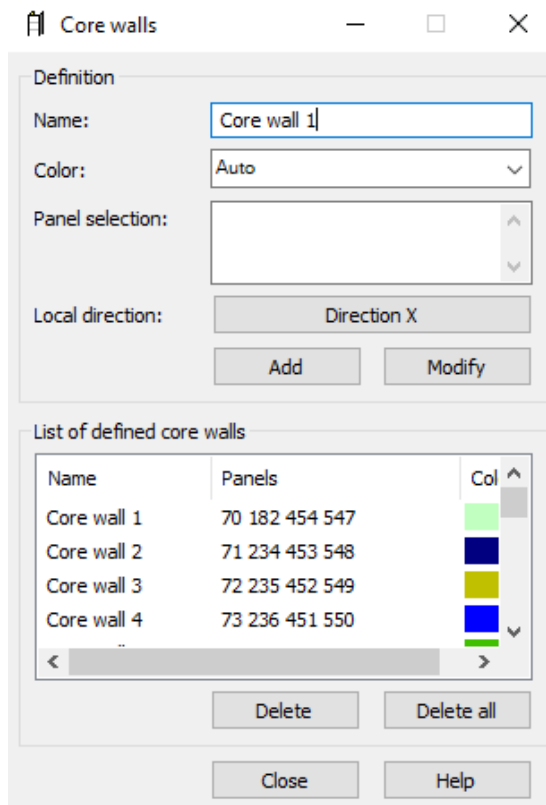
Pystykuormien jakautuminen kuvan 11 kokonaisuudelle 1 nähdään kuvasta 16. Referenssikohteen elementtihormit ovat huomioitu seinissä ja seinät ovat katkaistu näiden kohdalla. Tämä vaikuttaa myös kuvan 16 pystykuormien jakautumiseen. Jotkut seinälinjat koostuvat myös hieman pienemmistä paneeleista, jolloin laattojen kuormanjakoalueen väri saattaa hieman vaihdella myös.



Kuva 15. Pystykuormien jakautuminen.

4.7 Rasiusten tarkistaminen

Seinien rasiuskuvaajat saadaan näkyviin määrittämällä seinät ydinseiniksi (Geometry -> Additional attributes -> Core walls). Tarkasteltava seinälinja valitaan aina yhdeksi suureksi ydinseinäksi. Tämän jälkeen seinälinjojen rasiuksia voidaan tarkastella (Results -> Diagrams for core walls).

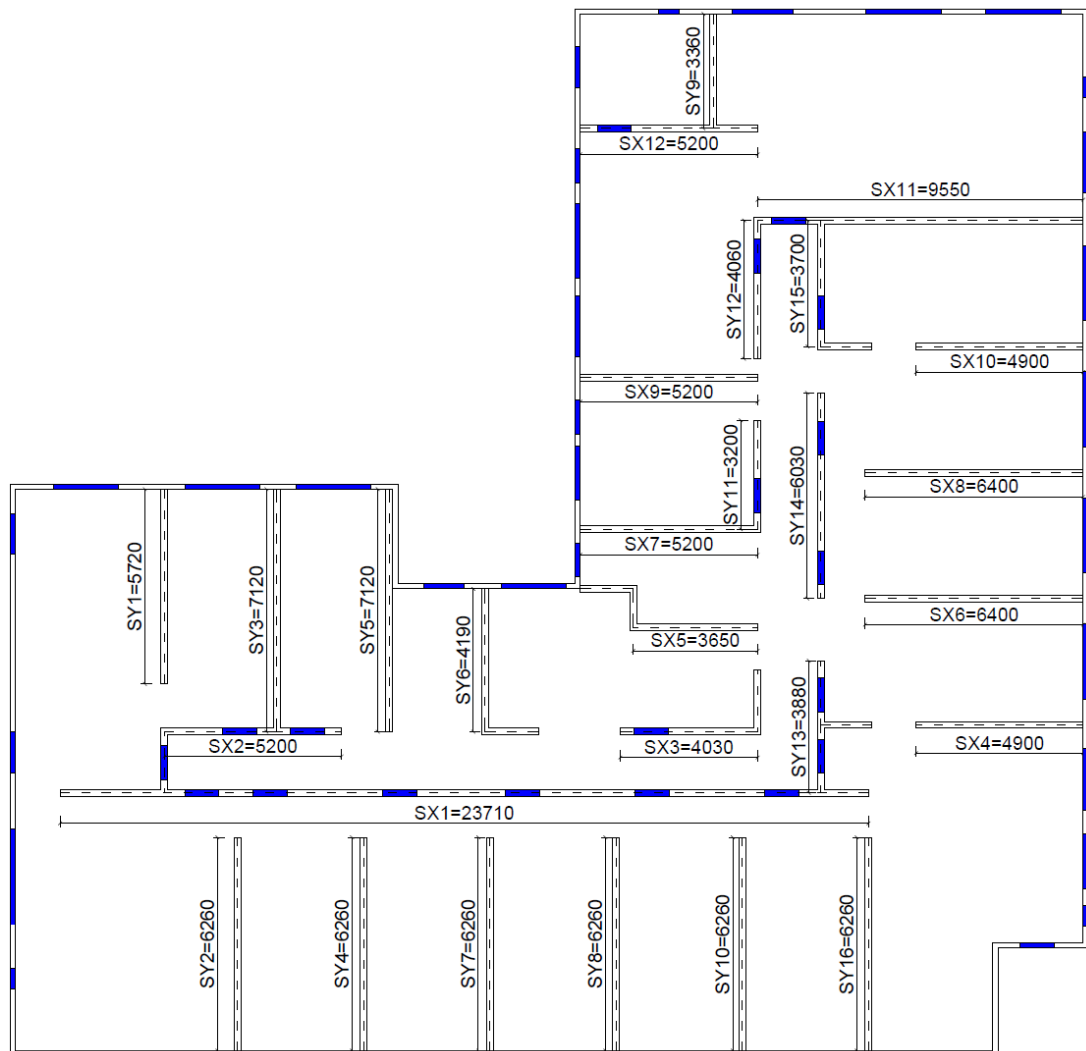


Kuva 16. Ydinseinät.

Tulosten tarkkuus riippuu elementtiverkon koosta ja ydinseinien rasiuskuvaajissa tämä arvo lasketaan elementtiverkon koon puolen välin korkeudelta seinän alareunasta ja yläreunasta (noin 0,175 m tässä). Diagrammi ei siis huomioi täysin alimman seinän omaa painoa, mutta riittävän tarkasti työn vertailuja ajatellen.

5 TULOSTEN VERTAILU

Vertailun kohteena olevat väliseinät voidaan nähdä kuvasta 18. Ulkoseiniä sekä alle kahden metrin pituisia väliseiniä ei olla huomioitu laskuissa, eikä niitä ole myöskään nimetty kuvaan 18. Aukkoja ei olla huomioitu myöskään käsinlaskuissa. Kuvaan 18 on merkitty sinisellä aukkojen sijainnit, jotka sijaitsevat symmetrisesti joka kerroksessa ja ne ovat huomioitu FEM-ohjelmassa kuvien 11 ja 12 tarkasteltavissa kokonaisuuksissa 1 ja 2.



Kuva 17. Tarkasteltavat seinät.

5.1 Puristusvoimien vertailu, tarkasteltava kokonaisuus 1

Kuormien pinta-alat laatoilta olivat joillekin seinille hieman hankalat määrittää tarkasti, seinissä olevien hormielementtien takia, joiden kohdilta seinät katkaistiin. Kuormien pinta-aloja on hahmoteltu käsinlaskuissa liitteessä 6. Aukkoja ei huomioitu käsinlaskuissa.

Seinälle SX1 olisi esimerkiksi kuulunut saada hieman suuremmat voimat, seinän aukkojen takia taulukosta 2, mutta saatiinkin vähän pienemmät. Seinälle SX8, kuormien pinta-aloissa oli myös vähän heittoa laskuissa.

Suurin prosentuaalinen ero oli 19 % seinässä SY15, joka näyttää olevan kohtuullisen lyhyt seinä, jossa oli myös oviaukko.

Aukoilla oli noin 4 % kokonaispuristusvoimaa pienentävä vaikutus.

Taulukko 2. Puristusvoimien vertailu, xy-jäykkä laatta.

	Puristusvoima		
	Laskut	Robot	Ero
	kN	kN	%
SY1	1741	1736	0,3
SY2	1280	1260	1,6
SY3	1884	1842	2,2
SY4	1897	1858	2,1
SY5	1630	1612	1,1
SY6	1046	945	9,7
SY7	1897	1858	2,1
SY8	1897	1858	2,1
SY9	525	504	4,0
SY10	1897	1858	2,1
SY11	547	450	17,7
SY12	610	592	3,0
SY13	1111	921	17,1
SY14	1227	1186	3,3
SY15	788	635	19,4
SY16	2052	2022	1,5
Yhteensä	22029	21137	4,0

	Puristusvoima		
	Laskut	Robot	Ero
	kN	kN	%
SX1	4553	4591	-0,8
SX2	928	794	14,4
SX3	931	837	10,1
SX4	1032	1087	-5,3
SX5	914	875	4,3
SX6	2066	1926	6,8
SX7	1392	1405	-0,9
SX8	2131	1897	11,0
SX9	2074	1963	5,4
SX10	1544	1538	0,4
SX11	3166	3000	5,2
SX12	1830	1708	6,7
Yhteensä	22561	21621	4,2

Laskuista kuuluu saada noin pari prosenttia suuremmat puristusvoimat aukottomissa seinissä, koska puristusvoimien rasituskuvaajien arvot ovat otettu noin 18 cm korkeudelta Robotissa, johon vaikuttaa elementtiverkon koko, jolloin alimman seinän omaa painoa ei huomioida kokonaan.

Kantavien seinien puristusvoimat voivat jakautua Robotissa osittain myös ei-kantaville seinille elementtiverkon välityksellä, jos ei-kantava seinä on kiinni kantavassa seinässä ja näiden seinien välistä pystysuuntaista siirtymää ei vapauteta lineaarisilla vapautuksilla. Tässä työssä risteävät seinät vapautettiin toisistaan täysin, jolloin seinien elementtiverkot olivat niin sanotusti irti toisistaan ja ne toimivat erillisesti.

Yksinkertaisesti sanottuna, jos aukollisissa seinissä päästiin pienempiin tai samoihin tuloksiin laskuissa, pinta-alat määritettiin virheellisesti ja, jos aukottomissa seinissä päästiin yli 5 % eroihin, niin tehtiin myös pieniä virheitä.

Tulokset ovat kokonaisvaltaisesti ihan ok ja voidaan todeta, että samoihin tuloksiin päästään kyllä, kun tarpeeksi tarkasti lasketaan ja huomioidaan elementtiverkon koon vaikutus.

5.2 Leikkausvoimien vertailu omien laskujen välillä

Seinien jäykkyyksien määrittämisessä, laskuissa käytettiin jäykkyykskaavaa, joka huomioi taivutusjäykkyyden (EI) lisäksi myös leikkausjäykkyyden (GA). Toiset laskut tehtiin myös jäykkyykskaavoilla, joissa huomioitiin vain taivutusjäykkyyden (EI).

Taulukosta 3 voidaan huomata, että huomioidessa vain seinien taivutusjäykkyyden, korkeuden muutoksilla ei ole eroa seinien saamiin voimiin y-suuntaisilla seinillä.

Taulukosta 3 voidaan myös nähdä, että 24 metriä korkeiden seinien saamien voimien erot molemmilla jäykkyykskaavoilla ovat aika pienet.

Vertaillessa 24 metriä ja 3 metriä korkeiden seinien saamia voimia, huomioiden leikkaus- ja taivutusjäykkyyden, voidaan huomata jonkin verran eroa tuloksissa. Suurimmaksi eroksi saadaan noin 28 kN seinälle SY5.

Taulukko 3. Leikkausvoimien vertailu omien laskujen välillä, y-seinät.

	Leikkausvoimat, y-seinät, omat laskut					Ero EI+GA, korkeuden kasvaessa 3m - 24m
	Pituus	EI, h=24m	EI, h=3 m	EI+GA, h=24m	EI+GA, h=3m	
	m	kN	kN	kN	kN	kN
SY1	5,72	65,3	65,3	65,6	72,0	-6,5
SY2	6,26	87,0	87,0	86,7	83,3	3,4
SY3	7,12	129,0	129,0	126,9	100,7	26,2
SY4	6,26	89,3	89,3	89,1	84,5	4,6
SY5	7,12	132,1	132,1	130,1	102	28,1
SY6	4,19	27,5	27,5	28,2	44,2	-16,0
SY7	6,26	91,7	91,7	91,6	85,7	5,9
SY8	6,26	94,0	94,0	94,0	86,9	7,1
SY9	3,36	14,8	14,8	15,3	29,5	-14,2
SY10	6,26	96,4	96,4	96,5	88,2	8,3
SY11	3,20	12,9	12,9	13,4	26,8	-13,4
SY12	4,06	26,4	26,4	27,1	43,0	-15,8
SY13	3,88	23,3	23,3	24,0	39,7	-15,7
SY14	6,03	87,5	87,5	87,9	84,1	3,8
SY15	3,70	20,2	20,2	20,9	36,2	-15,4
SY16	6,26	98,7	98,7	98,9	89,4	9,5
	Yhteensä	1096,0	1096,0	1096,0	1096,0	

Huomioidessa taivutusjäykkyyden lisäksi myös leikkausjäykkyyden x-suuntaisilla seinillä, voidaan huomata taulukossa 4, suuret erot leikkausvoimissa jokaisessa seinässä, seinien korkeuden muuttuessa kolmesta metristä 24 metriin. Jokaiselle x-suuntaiselle seinälle saadaan todella erilaiset voimat. Suurin ero voimissa nähdään pisimmässä seinässä SX1, jossa leikkausvoiman muutos on 243 kN.

Vain taivutusjäykkyyden huomioimisella, ei ole korkeuden muutoksilla myöskään x-suuntaisilla seinillä eroa voimiin.

Leikkausvoimien ja jäykkyyksien muututtua, myös kiertokeskiöiden sijainnit muuttuvat, jotka voidaan nähdä liitteestä 3.

Seuraavissa osioissa vertaillaan leikkausvoimia laskujen ja Robotin tulosten välillä ja omissa laskuissa ollaan käytetty vertailuissa vain taivutus- ja leikkausjäykkyyden huomioivaa kaavaa (EI+GA).

Taulukko 4. Leikkausvoimien vertailu omien laskujen välillä, x-seinät.

	Leikkausvoimat x-seinät, omat laskut					Ero EI+GA, korkeuden kasvaessa 3m - 24m
	Pituus	EI, h=24m	EI, h=3 m	EI+GA, h=24m	EI+GA, h=3m	
	m	kN	kN	kN	kN	kN
SX1	23,71	604,5	604,5	581,5	338,8	242,6
SX2	5,2	9,8	9,8	13,3	53,4	-40,1
SX3	4,03	4,5	4,5	6,3	34,2	-27,9
SX4	4,9	8,5	8,5	11,5	48,5	-37,1
SX5	3,65	5,4	5,4	6,6	29,6	-23,0
SX6	6,4	31,9	31,9	37,2	78,0	-40,9
SX7	5,2	20,9	20,9	23,9	58,2	-34,3
SX8	6,4	44,8	44,8	49,2	82,1	-33,0
SX9	5,2	29,3	29,3	31,8	61,8	-30,0
SX10	4,9	26,0	26,0	28,1	56,7	-28,6
SX11	9,55	235,3	235,3	230,0	154,8	75,2
SX12	5,2	43,1	43,1	44,8	67,8	-22,9
Yhteensä		1064,0	1064,0	1064,0	1064,0	

5.3 Leikkausvoimien vertailu Robotin ja laskujen välillä, h=24m, jäykistävien ulkoseinien ja väliseinien aukkojen vaikutus tuloksiin, tarkasteltava kokonaisuus 1

Tässä osiossa vertaillaan kuvan 11 tarkasteltavan kokonaisuuden 1, seinien leikkausvoimia väliseinille. Käsineläskussa ei olla huomioitu aukkoja eikä ulkoseiniä, mutta Robotissa on.

Taulukosta 5 nähdään ulkoseinien ja alle kahden metrin väliseinien ottama kokonaisleikkausvoima Robotissa, joka on noin 290 kN y-suunnassa ja 241 kN x-suunnassa.

Käsineläskusta saadaan tietekin vähän erilaisia tuloksia. Suurin ero leikkausvoimissa on 357 kN runsaasti aukoitetulla seinällä SX1.

Y-suunnassa suurin ero on 56 kN seinällä SY14.

Taulukko 5. Leikkausvoimien vertailu, h=24m, jäykistävien ulkoseinien ja väliseinien aukkojen vaikutus tuloksiin, xy-jäykkä laatta.

	Pituus	Leikkausvoima		
		Laskut	Robot	Ero
	m	kN	kN	kN
SY1	5,72	65,6	58,1	7,5
SY2	6,26	86,7	69,0	17,7
SY3	7,12	126,9	83,1	43,8
SY4	6,26	89,1	70,8	18,3
SY5	7,12	130,1	88,1	42,0
SY6	4,19	28,2	32,9	-4,7
SY7	6,26	91,6	72,6	18,9
SY8	6,26	94,0	74,5	19,6
SY9	3,36	15,3	22,0	-6,6
SY10	6,26	96,5	76,3	20,2
SY11	3,20	13,4	7,8	5,6
SY12	4,06	27,1	19,6	7,5
SY13	3,88	24,0	5,7	18,3
SY14	6,03	87,9	32,1	55,7
SY15	3,70	20,9	14,1	6,8
SY16	6,26	98,9	78,1	20,8
US + alle 2 m VS	-	-	291,3	-
Yhteensä		1096,0	1096,0	

	Pituus	Leikkausvoima		
		Laskut	Robot	Ero
	m	kN	kN	kN
SX1	23,71	581,5	225,0	356,5
SX2	5,2	13,3	13,6	-0,3
SX3	4,03	6,3	19,6	-13,3
SX4	4,9	11,5	49,0	-37,6
SX5	3,65	6,6	28,4	-21,8
SX6	6,4	37,2	78,8	-41,7
SX7	5,2	23,9	56,3	-32,4
SX8	6,4	49,2	80,1	-30,9
SX9	5,2	31,8	56,8	-25,0
SX10	4,9	28,1	51,2	-23,1
SX11	9,55	230,0	127,4	102,6
SX12	5,2	44,8	36,8	8,0
US + alle 2 m VS	-	-	241,1	-
Yhteensä		1064,0	1064,0	

Täysin jäykällä laatalla ulkoseinien ja alle kahden metrin väliseinien osuus kokonaisleikkausvoimasta oli 235 kN y-suunnassa ja 220 kN x-suunnassa.

Seinälle SX1 saadaan vielä suurempi ero taulukosta 6, verrattuna taulukkoon 5. Laskuista saatiin seinälle SX1, 415 kN enemmän leikkausvoimaa Robotiin verrattuna.

Taulukon 5 ja 6 perusteella voidaan huomata, että ulkoseinät voivat myös toimia todella aukoitettuinakin kohtuullisen suuressa osassa kokonaisjäykistystä, kun ulkoseinien liitokset siirtävät leikkausvoimia.

Taulukko 6. Leikkausvoimien vertailu, h=24m, jäykistävien ulkoseinien ja väliseinien aukkojen vaikutus tuloksiin, täysin jäykkä laatta.

	Pituus	Leikkausvoima		
		Laskut	Robot	Ero
	m	kN	kN	kN
SY1	5,72	65,3	64,6	0,7
SY2	6,26	87,0	73,3	13,7
SY3	7,12	129,0	83,0	46,0
SY4	6,26	89,3	74,5	14,9
SY5	7,12	132,1	87,4	44,7
SY6	4,19	27,5	41,0	-13,5
SY7	6,26	91,7	75,7	16,0
SY8	6,26	94,0	76,9	17,1
SY9	3,36	14,8	29,7	-14,8
SY10	6,26	96,4	78,1	18,3
SY11	3,20	12,9	12,8	0,1
SY12	4,06	26,4	26,1	0,3
SY13	3,88	23,3	5,1	18,2
SY14	6,03	87,5	35,3	52,1
SY15	3,70	20,2	18,6	1,6
SY16	6,26	98,7	79,4	19,4
US + alle 2 m VS	-	-	234,8	-
Yhteensä		1096,0	1096,0	

	Pituus	Leikkausvoima		
		Laskut	Robot	Ero
	m	kN	kN	kN
SX1	23,71	604,5	189,6	414,9
SX2	5,2	9,8	15,3	-5,5
SX3	4,03	4,5	27,2	-22,6
SX4	4,9	8,5	57,5	-49,1
SX5	3,65	5,4	37,9	-32,5
SX6	6,4	31,9	82,3	-50,4
SX7	5,2	20,9	63,3	-42,3
SX8	6,4	44,8	83,3	-38,5
SX9	5,2	29,3	64,5	-35,2
SX10	4,9	26,0	59,7	-33,7
SX11	9,55	235,3	117,1	118,2
SX12	5,2	43,1	46,9	-3,8
US + alle 2 m VS	-	-	219,6	-
Yhteensä		1064,0	1064,0	

5.4 Leikkausvoimien vertailu Robotin ja laskujen välillä, h=24m, väliseinien aukkojen vaikutus tuloksiin, tarkasteltava kokonaisuus 2

Tässä osiossa vertaillaan kuvan 12 tarkasteltavan kokonaisuuden 2 leikkausvoimia väliseinille, kun Robottiin on mallinnettu vain väliseinät, huomioiden aukot. Käsinlaskuissa ei olla huomioitu aukkoja. Seinien aukkojen sijainnit voidaan nähdä kuvasta 18.

Taulukosta 7 saadaan seinälle SX1 noin 282 kN enemmän leikkausvoimaa laskuista verrattuna Robottiin. Aukkojen vaikutus on merkittävä seinälle SX1.

Y-suuntaisissa seinissä silmiin pistää myös seinän SY5 saama leikkausvoima, joka on vain 65 kN Robotissa. Seinät SY3 ja SY5 ovat aukottomia, yhtä pitkiä seiä ja lähellä toisiaan olevia, mutta seinän SY3 leikkausvoima on kuitenkin 115 kN. Näiden seinien voimien erot ovat 50 kN Robotissa, joka vaikuttaa liian suurelta.

Taulukko 7. Leikkausvoimien vertailu, h=24m, väliseinien aukkojen vaikutus tuloksiin, xy-jaykkä laatta.

	Leikkausvoima			
	Pituus	Laskut	Robot	Ero
	m	kN	kN	kN
SY1	5,72	65,6	73,9	-8,4
SY2	6,26	86,7	92,1	-5,4
SY3	7,12	126,9	115,0	12,0
SY4	6,26	89,1	96,5	-7,4
SY5	7,12	130,1	64,6	65,5
SY6	4,19	28,2	47,2	-19,0
SY7	6,26	91,6	101,0	-9,4
SY8	6,26	94,0	105,4	-11,4
SY9	3,36	15,3	31,1	-15,8
SY10	6,26	96,5	109,9	-13,4
SY11	3,20	13,4	10,9	2,5
SY12	4,06	27,1	31,3	-4,2
SY13	3,88	24,0	10,2	13,8
SY14	6,03	87,9	54,2	33,7
SY15	3,70	20,9	22,8	-1,9
SY16	6,26	98,9	114,3	-15,4
Alle 2 m VS	-	-	15,8	-
Yhteensä		1096,0	1096,0	

	Leikkausvoima			
	Pituus	Laskut	Robot	Ero
	m	kN	kN	kN
SX1	23,71	581,5	299,8	281,7
SX2	5,2	13,3	18,1	-4,8
SX3	4,03	6,3	25,9	-19,7
SX4	4,9	11,5	52,7	-41,2
SX5	3,65	6,6	38,4	-31,8
SX6	6,4	37,2	93,3	-56,2
SX7	5,2	23,9	73,3	-49,4
SX8	6,4	49,2	97,2	-48,0
SX9	5,2	31,8	66,3	-34,5
SX10	4,9	28,1	58,8	-30,7
SX11	9,55	230,0	172,5	57,5
SX12	5,2	44,8	48,4	-3,6
Alle 2 m VS	-	-	19,4	-
Yhteensä		1064,0	1064,0	

Täysin jäykällä laattalla saadaan taulukosta 8 seinälle SX1 vielä suuremmat erot verrattuna taulukkoon 7. Laskuista saadaan kyseiselle seinälle 335 kN suuremmat voimat verrattuna Robotiin.

Seinän SY5 ero seinään SY3 on enää 20 kN Robotissa, taulukossa 8. Seinälle SY5 kuuluisi mielestäni kuitenkin saada isommat voimat verrattuna seinään SY3, koska seinän SY5 pitäisi olla lähempänä kiertoakeskiötä. On tietenkin mahdollista, että muiden y-suuntaisten seinien aukot aiheuttaisivat tämän eron voimissa, jonka FEM-ohjelma pystyisi sitten huomioimaan, mutta ihmisaivojen on vaikea huomata tällaista erikoista kuorman jakautumista.

Taulukko 8. Leikkausvoimien vertailu, h=24m, väliseinien aukkojen vaikutus tuloksiin, täysin jäykkä laatta.

	Leikkausvoima			
	Pituus	Laskut	Robot	Ero
	m	kN	kN	kN
SY1	5,72	65,6	74,3	-8,8
SY2	6,26	86,7	87,2	-0,5
SY3	7,12	126,9	100,7	26,3
SY4	6,26	89,1	91,2	-2,1
SY5	7,12	130,1	80,3	49,8
SY6	4,19	28,2	54,1	-26,0
SY7	6,26	91,6	95,2	-3,6
SY8	6,26	94,0	99,2	-5,2
SY9	3,36	15,3	40,1	-24,8
SY10	6,26	96,5	103,2	-6,8
SY11	3,20	13,4	18,9	-5,5
SY12	4,06	27,1	38,2	-11,1
SY13	3,88	24,0	7,5	16,5
SY14	6,03	87,9	52,4	35,5
SY15	3,70	20,9	27,6	-6,8
SY16	6,26	98,9	107,3	-8,3
Alle 2 m VS	-	-	18,6	-
Yhteensä		1096,0	1096,0	

	Leikkausvoima			
	Pituus	Laskut	Robot	Ero
	m	kN	kN	kN
SX1	23,71	581,5	245,9	335,5
SX2	5,2	13,3	19,3	-5,9
SX3	4,03	6,3	34,8	-28,5
SX4	4,9	11,5	63,8	-52,4
SX5	3,65	6,6	48,8	-42,2
SX6	6,4	37,2	96,2	-59,0
SX7	5,2	23,9	79,4	-55,5
SX8	6,4	49,2	98,2	-49,1
SX9	5,2	31,8	74,3	-42,5
SX10	4,9	28,1	68,0	-39,9
SX11	9,55	230,0	144,6	85,4
SX12	5,2	44,8	61,9	-17,1
Alle 2 m VS	-	-	28,8	-
Yhteensä		1064,0	1064,0	

Toinen mahdollisuus on, että jotain on mennyt väärin mallinnuksessa y-suunnassa esim. geometrinen epätarkkuus, jonka vuoksi laatta ei vie voimia normaalilla tavalla seinälle SY5, mutta tästä olisi luultavasti tullut huomautus ohjelmassa.

Täysin jäykällä laatalle pitäisi oman kokemukseni mukaan saada pidemmille seinille hieman pienemmät voimat ja lyhyemmille isommat, olettaen, että seinissä ei ole aukkoja. Tässä ne menevät vähän päinvastoin, kun vertaa seinän SY5 leikkausvoimaa taulukoista 7 ja 8.

Joka tapauksessa, taulukoista 7 ja 8 voidaan huomata aukkojen suuri vaikutus seinien jäykkyyksiin ja sitä kautta seinien saamiin voimiin. 24 metriä pitkässä seinässä SX1 tämä varsinkin korostuu, koska noin 300 kN ero leikkausvoimassa on jo erittäin suuri, verrattaessa käsinlaskuihin. Näiden erojen takia x-suuntaisissa seinissä ei päästä oikein missään seinissä samanlaisiin tuloksiin laskupohjaan verrattuna.

Y-suunnassa ei ollut aivan yhtä pitkiä seiniä, mutta esimerkiksi lyhyessä neljän metrin seinässä SY13 oli kaksi oviaukkoa, jolloin Robotista saatiin vain 7,5 kN leikkausvoimaksi taulukosta 8, mutta käsinlaskuista saatiin 24 kN, joka ei ole voimissa erona niin suuri, mutta prosentuaalisesti noin 300 % suurempi tulos laskuissa.

5.5 Leikkausvoimien vertailu Robotin ja laskujen välillä, vain väliseinät ilman aukkoja, h=24m, tarkasteltava kokonaisuus 3

Tässä osiossa vertaillaan kuvan 13, tarkasteltavan kokonaisuuden 3, seinien leikkausvoimia, kun myös Robotissa huomioidaan vain väliseinät ilman aukkoja.

Xy-jäykällä laattalla saadaan taulukosta 9, y-suuntaisille seinille suurimmaksi eroksi leikkausvoimissa noin 31 kN seinälle SY3. Hieman eroja saadaan kaikille seinille. Vertailutulosten erot Robotin ja laskujen välillä eivät ole täysin katastrofaaliset y-suuntaisilla seinillä, mutta mielestäni kuitenkin liian suuret.

X-suuntaiselle seinälle SX1 saadaan laskuista erittäin suuri, 182 kN ero leikkausvoimassa Robotiin verrattuna. Seuraavaksi pisin x-suuntainen seinä SX11 saa noin 77 kN enemmän leikkausvoimaa laskuista ja muut x-suuntaiset seinät sitten huomattavasti vähemmän.

Taulukko 9. Leikkausvoimien vertailu, h=24m, xy-jäykkä laatta, vain väliseinät ilman aukkoja.

	Leikkausvoima			
	Pituus m	Laskut kN	Robot kN	Ero kN
SY1	5,72	65,6	66,0	-0,5
SY2	6,26	86,7	79,1	7,5
SY3	7,12	126,9	96,2	30,7
SY4	6,26	89,1	82,7	6,5
SY5	7,12	130,1	103,7	26,3
SY6	4,19	28,2	39,3	-11,1
SY7	6,26	91,6	86,2	5,4
SY8	6,26	94,0	89,7	4,3
SY9	3,36	15,3	27,2	-11,8
SY10	6,26	96,5	93,2	3,2
SY11	3,20	13,4	24,6	-11,2
SY12	4,06	27,1	43,0	-15,9
SY13	3,88	24,0	37,5	-13,5
SY14	6,03	87,9	89,4	-1,6
SY15	3,70	20,9	34,1	-13,2
SY16	6,26	98,9	96,8	2,2
Alle 2 m VS	-	-	7,2	-
Yhteensä		1096,0	1096,0	

	Leikkausvoima			
	Pituus m	Laskut kN	Robot kN	Ero kN
SX1	23,71	581,5	399,1	182,4
SX2	5,2	13,3	45,5	-32,2
SX3	4,03	6,3	31,0	-24,8
SX4	4,9	11,5	43,7	-32,2
SX5	3,65	6,6	24,7	-18,1
SX6	6,4	37,2	71,3	-34,1
SX7	5,2	23,9	52,1	-28,2
SX8	6,4	49,2	75,0	-25,9
SX9	5,2	31,8	55,0	-23,2
SX10	4,9	28,1	50,2	-22,1
SX11	9,55	230,0	152,9	77,1
SX12	5,2	44,8	59,9	-15,1
Alle 2 m VS	-	-	3,7	-
Yhteensä		1064,0	1064,0	

Eroa seiniin SX1 ja SX11 saadaan vielä enemmän taulukosta 10, taulukkoon 9 verrattuna. Erot ovat seinällä SX1, 259 kN ja seinällä SX11, 100 kN, kun verrataan laskuihin.

Y-suuntaisilla seinillä suurin ero laskujen välillä on 41 kN, joka tulee seinälle SY3.

Alle kahden metrin väliseinät keräävät nyt myös hieman enemmän voimia taulukosta 10, verrattuna taulukon 9, xy-jäykkään laattaan.

Kummallakin laatan asetuksella päästään hieman samanlaisiin johtopäätelmiin, joissa pidemmille seinille saadaan suuremmat voimat laskuista ja lyhyemmille sitten taas pienemmät taulukoista 9 ja 10.

Taulukko 10. Leikkausvoimien vertailu, h=24m, täysin jäykkä laatta, vain väliseinät ilman aukkoja.

	Leikkausvoima			
	Pituus	Laskut	Robot	Ero
	m	kN	kN	kN
SY1	5,72	65,6	66,7	-1,2
SY2	6,26	86,7	76,0	10,7
SY3	7,12	126,9	86,2	40,7
SY4	6,26	89,1	78,6	10,5
SY5	7,12	130,1	92,2	37,9
SY6	4,19	28,2	45,4	-17,3
SY7	6,26	91,6	81,2	10,4
SY8	6,26	94,0	83,8	10,2
SY9	3,36	15,3	34,6	-19,3
SY10	6,26	96,5	86,4	10,1
SY11	3,20	13,4	32,1	-18,7
SY12	4,06	27,1	50,0	-22,9
SY13	3,88	24,0	44,3	-20,3
SY14	6,03	87,9	84,1	3,7
SY15	3,70	20,9	41,2	-20,4
SY16	6,26	98,9	89,0	9,9
Alle 2 m VS	-	-	24,2	-
Yhteensä		1096,0	1096,0	

	Leikkausvoima			
	Pituus	Laskut	Robot	Ero
	m	kN	kN	kN
SX1	23,71	581,5	322,3	259,1
SX2	5,2	13,3	56,3	-43,0
SX3	4,03	6,3	42,7	-36,4
SX4	4,9	11,5	55,3	-43,8
SX5	3,65	6,6	34,6	-28,0
SX6	6,4	37,2	78,7	-41,5
SX7	5,2	23,9	61,7	-37,8
SX8	6,4	49,2	80,4	-31,2
SX9	5,2	31,8	63,3	-31,5
SX10	4,9	28,1	59,0	-30,9
SX11	9,55	230,0	129,6	100,4
SX12	5,2	44,8	65,9	-21,1
Alle 2 m VS	-	-	14,3	-
Yhteensä		1064,00	1064,0	

Vertaillessa samanlaisia seiniä ilman aukkoja taulukoista 9 ja 10, voidaan todeta, että saadaan siltikin suuret erot Robotin ja käsinlaskujen välillä. Vertailutulosten erot ovat liian suuret hyväksyttäväksi.

Tässä täytyy miettiä, että ovatko laskentapohjien kaavat liian suuri yksinkertaistus, kun halutaan määrittää tarkasti seinien saamat leikkausvoimat esimerkiksi korkealle rakennukselle.

Robotissa oli tässä tarkasteltavan kokonaisuuden 3 mallissa noin 35 000 solmupistettä, jotka Robot huomioi omissa laskuissaan, joista se laskee kymmeniä tuhansia yhtälöitä määrittäessään taulukoiden 9 ja 10 leikkausvoimat.

Seuraavan sivun vertailuissa rakennuksen korkeutta pienennetään kolmeen metriin ja katsotaan saadaanko vielä suuret erot.

5.6 Leikkausvoimien vertailu Robotin ja laskujen välillä, vain väliseinät ilman aukkoja, h=3m, tarkasteltava kokonaisuus 4

Tässä osiossa vertaillaan kuvan 14, tarkasteltavan kokonaisuuden 4, seinien leikkausvoimia, kun huomioidaan vain väliseinät ilman aukkoja ja tarkastellaan vain ensimmäistä kerrosta. Tarkastellaan vain xy-jäykällä laattalla, jolloin ei tarvitse tehdä ylimääräistä taulukkoa.

Muuttaessa seinien korkeuden Robotissa 24 metristä kolmeen metriin ja tarkasteltaessa vain yhtä kerrosta, muuttamatta kokonaisvaakavoiman suuruutta ($4,4 \text{ kN/m} \cdot 8 = 35,2 \text{ kN/m}$ ensimmäiseen kerrokseen), voidaan huomata taulukosta 11, että Robotin tuloksissa päästään jo aika lähelle laskuista saatuja tuloksia.

Taulukko 11. Leikkausvoimien vertailu, h=3m, xy-jäykkä laatta, vain väliseinät ilman aukkoja.

	Leikkausvoima			
	Pituus	Laskut	Robot	Ero
	m	kN	kN	kN
SY1	5,72	72,0	66,5	5,5
SY2	6,26	83,3	78,5	4,7
SY3	7,12	100,7	93,1	7,6
SY4	6,26	84,5	82,1	2,4
SY5	7,12	102	100,1	1,9
SY6	4,19	44,2	40,8	3,4
SY7	6,26	85,7	85,6	0,1
SY8	6,26	86,9	89,2	-2,3
SY9	3,36	29,5	28,0	1,5
SY10	6,26	88,2	92,7	-4,6
SY11	3,20	26,8	25,3	1,5
SY12	4,06	43,0	44,8	-1,8
SY13	3,88	39,7	39,1	0,6
SY14	6,03	84,1	89,7	-5,6
SY15	3,70	36,2	35,5	0,8
SY16	6,26	89,4	96,3	-6,9
Alle 2 m VS	-	-	8,7	-
Yhteensä		1096,0	1096,0	

	Leikkausvoima			
	Pituus	Laskut	Robot	Ero
	m	kN	kN	kN
SX1	23,71	338,8	369,6	-30,8
SX2	5,2	53,4	50,6	2,8
SX3	4,03	34,2	34,0	0,2
SX4	4,9	48,5	48,4	0,1
SX5	3,65	29,6	26,5	3,1
SX6	6,4	78,0	76,9	1,1
SX7	5,2	58,2	56,5	1,8
SX8	6,4	82,1	79,6	2,6
SX9	5,2	61,8	58,8	3,1
SX10	4,9	56,7	53,6	3,1
SX11	9,55	154,8	144,3	10,5
SX12	5,2	67,8	62,5	5,2
Alle 2 m VS	-	-	2,8	-
Yhteensä		1064,0	1064,0	

Y-suuntaisille seinille saadaan taulukosta 11 aika samanlaisia tuloksia kuin laskuistakin. Suurimmaksi eroksi saadaan vain 8 kN.

X-suuntaiselle seinälle SX1 saadaan tällä kertaa 31 kN suurempi voima Robotista, verrattuna laskuihin. Muille x-suuntaisille seinille saadaan muuten ihan kohtuulliset hyvät vertailutulokset. Voidaan todeta, että saadaan suuri ero Robotin tuloksissa korkeuden muututtua 24 metristä kolmeen metriin.

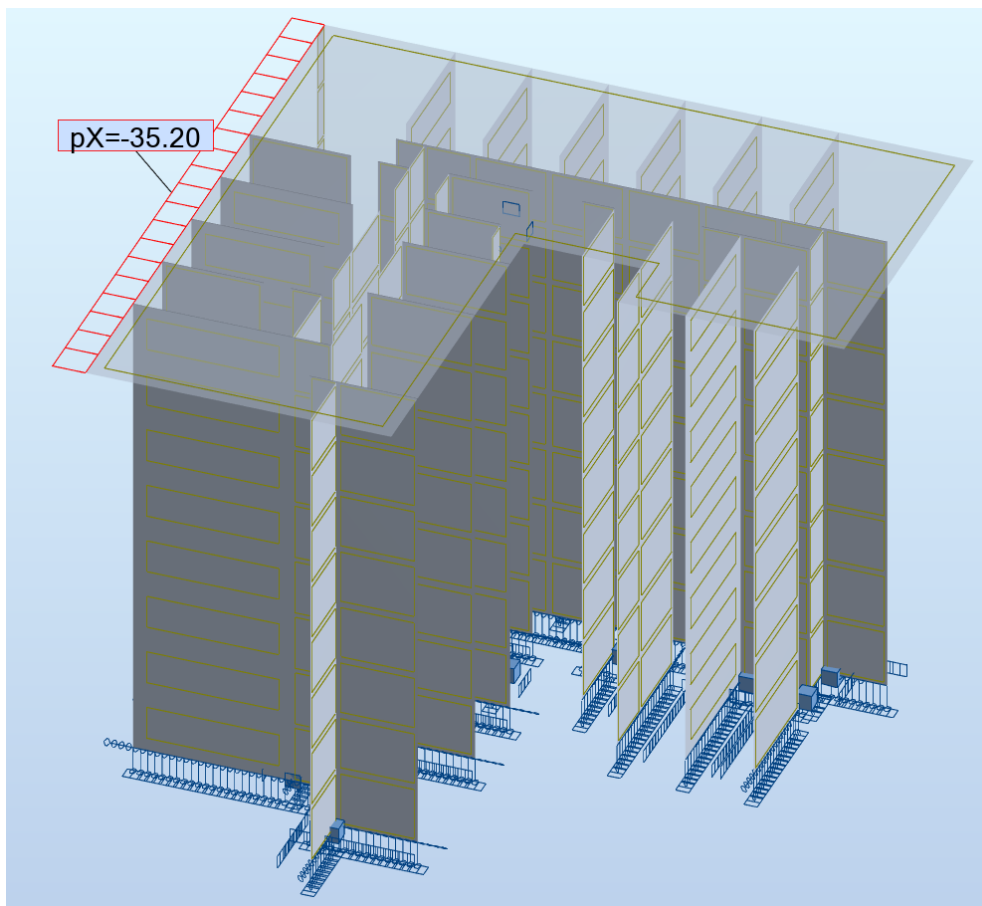
Kiertokeskiön sijaintiin saadaan kuitenkin suuri, viiden metrin ero y-suunnassa laskujen ja Robotin välillä kolmen metrin korkuisilla seinillä (liitteet 3 ja 4), jolloin voidaan todeta, että Robot ei luultavasti huomioi ollenkaan leikkausjäykkyyttä kiertokeskiön sijainnin määrityksessä, vaan tämä määräytyy pelkästään taivutusjäykkyyden (EI) mukaan. Tällä kiertokeskiön sijainnin erolla ei kuitenkaan saada mitään älyttömiä eroja x-suuntaisille seinille vertailuista.

5.7 Tulosten pohdintaa

Nyt on ihan hyvä pitää pieni tauko ja pohtia saatujen vertailutulosten erojen syitä, kun korkeuksia muutettiin.

Laskentakaavoissa oletuksena on oman ymmärryksen mukaan se, että pistekuorma osuu jäykän laatan kautta seinän yläpäähän. Näinhän käy, kun tarkastellaan vain yhtä kerrosta. Kun rakennuksessa on monta kerrosta, niin seinä kerää aina tietyn suuruisen pistekuorman, esimerkiksi kolmen metrin välein, jos kolme metriä on kerroksen korkeus. Voidaan pohtia, että tarkastellaanko laskentakaavoilla edes samoja asioita, kun kerroksia on enemmän kuin yksi ja kuormitus ei ole pelkästään seinän yläpäässä vaan kerroksittain.

Ilmoitin aikaisemmin virheellisesti tarkasteltavan kokonaisuuden 4 olevan viimeinen kokonaisuus. Tarkastellaan lopuksi vielä 24 metrin korkuista kuvan 19, tarkasteltavaa kokonaisuutta 5, jossa viivakuorma laitetaan vain ylimmän kerroksen laattaan ($4,4 \text{ kN/m} \cdot 8 = 35,2 \text{ kN/m}$) ja muiden kerrosten laatat poistetaan. Tarkastelussa on vain väliseinät ilman aukkoja. Käytetään vain xy-jäykkää laattaa, jolloin joudutaan tekemään yksi taulukko vähemmän.



Kuva 18. Tarkasteltava kokonaisuus 5.

5.8 Leikkausvoimien vertailu Robotin ja laskujen välillä, vain väliseinät ilman aukkoja, h=24m, tarkasteltava kokonaisuus 5

Tarkasteltaessa 24 metriä korkeita seiniä ja laittaessa viivakuorman (4,4kN/m*8=35,2kN/m) kuvan 19 mukaisesti vain ylimpään laattaan Robotissa, päästään myös käsinlaskuissa aika samanlaisiin tuloksiin taulukossa 12.

Y-suuntaisille seinille saadaan todella samanlaisia tuloksia. Suurimmaksi eroksi saadaan vain noin 8 kN seinällä SY3.

X-suuntaisille seinille suurimmat erot tulevat pisimmissä seinissä SX1 ja SX11. Suurin ero voimissa saadaan seinälle SX1, joka on 36kN, joka ei ole prosentuaalisesti hirveän suuri ero. Seinälle SX11 saadaan laskuista 20 kN ero Robotiin verrattuna, mikä on noin 10 % ero ja mielestäni vielä hyväksyttävissä. Nämä erot luultavasti johtuvat kiertokeskiön eri sijainnista y-suunnassa, käsinlaskujen ja Robotin välillä.

Taulukko 12. Leikkausvoimien vertailu, h=24m, xy-jäykkä laatta, vain väliseinät ilman aukkoja, pistekuorma vain ylimpään kerrokseen.

	Leikkausvoima			
	Pituus	Laskut	Robot	Ero
	m	kN	kN	kN
SY1	5,72	65,6	63,1	2,5
SY2	6,26	86,7	84,4	2,3
SY3	7,12	126,9	119,4	7,6
SY4	6,26	89,1	88,4	0,7
SY5	7,12	130,1	129,5	0,6
SY6	4,19	28,2	26,6	1,6
SY7	6,26	91,6	92,4	-0,8
SY8	6,26	94,0	96,4	-2,3
SY9	3,36	15,3	14,8	0,6
SY10	6,26	96,5	100,3	-3,9
SY11	3,20	13,4	12,8	0,6
SY12	4,06	27,1	28,3	-1,1
SY13	3,88	24,0	23,6	0,4
SY14	6,03	87,9	92,2	-4,3
SY15	3,70	20,9	20,4	0,4
SY16	6,26	98,9	104,3	-5,4
Alle 2 m VS	-	-	-0,7	-
Yhteensä		1096,0	1096,0	

	Leikkausvoima			
	Pituus	Laskut	Robot	Ero
	m	kN	kN	kN
SX1	23,71	581,5	617,9	-36,4
SX2	5,2	13,3	12,7	0,6
SX3	4,03	6,3	6,4	-0,1
SX4	4,9	11,5	11,6	-0,1
SX5	3,65	6,6	6,0	0,6
SX6	6,4	37,2	36,3	0,9
SX7	5,2	23,9	23,0	0,8
SX8	6,4	49,2	47,1	2,0
SX9	5,2	31,8	30,0	1,8
SX10	4,9	28,1	26,6	1,5
SX11	9,55	230,0	209,7	20,3
SX12	5,2	44,8	42,0	2,9
Alle 2 m VS	-	-	-5,2	-
Yhteensä		1064,0	1064,0	

Alle kahden metrin väliseinille saadaan negatiivinen voima taulukosta 12, joka johtuu siitä, että Robotissa on ollut noin 6 kN suurempi kokonaisleikkausvoima koko ajan. Nyt se vasta tulee esille taulukossa 12. Robotissa viivakuormat lisättiin 4,4 kN/m/krs suuruiseksi ja käsinlaskuissa ne oli huomioitu suuruudella 4,376 kN/m/krs, kun määritettiin kokonaisleikkausvoimaa.

Alle kahden metrin väliseinien saama leikkausvoima Robotista taulukossa 12 (sekä muissa taulukoissa) on laskettu tavalla, jossa laskuista saadusta kokonaisleikkausvoimista on vähennetty Robotissa yli kahden metrin seinien saamat leikkausvoimat (eli muut kuormansuuntaiset seinät).

Robotin yhteensä-solussa, nämä Robotin voimat ovat sitten summattu yhteen ja tämän takia taulukossa 12 (sekä muissa taulukoissa), kokonaisleikkausvoimat Robotissa ovat silti samat kuin käsinlaskuissakin. Tällä 6 kN ei ole suurta vaikutusta, koska ero kokonaisleikkausvoimaan on alle 1 %.

Taulukon 11 ja 12 tuloksista voidaan huomata, että laskuissa päästäänkin samanlaisiin tuloksiin Robotin kanssa, kun kuormituksen laittaa ainoastaan ylimpään laattaan.

Jos kokonaisuudesta 5 ei olisi poistettu alempia laattoja, olisivat vaakavoimat jakautuneet taas eri tavalla kerroksittain, vaikka kuorma olikin laitettu pelkästään ylimmän kerroksen laattaan.

6 YHTEENVETO

Puristusvoimien vertailuissa päästiin aika samanlaisiin tuloksiin ja voidaan todeta, että FEM-ohjelmalla saadaan määritettyä varsinkin hankalan muotoisista kuormien pinta-aloista koostuvat puristusvoimat helpommalla kuin, jos niitä lähdetäisiin laskemaan käsinlaskuilla. FEM-ohjelmalla saadaan tietenkin myös huomioitua seinien aukkojen vaikutukset helposti puristusvoimissa.

Käsinlaskujen leikkausvoimien vertailuissa huomattiin, että leikkausjäykkyyden huomioimisella, taivutusjäykkyyden lisäksi, oli todella suuri merkitys pitkien seinien saamiin voimiin, kun seinien korkeuksia muutettiin.

Käsinlaskujen ja Robotin vertailuissa huomattiin se, kun tarkastellaan 8-kerroksista rakennusta, niin yksinkertaisilla laskentakaavoilla ei enää päästä samanlaisiin tuloksiin kuin FEM-laskennalla, koska oikeastihan seinille tulevat kuormat eivät tule pelkästään seinän yläpäähän, niin kuin laskentakaavoilla ymmärryksen mukaan oletetaan, vaan kerroksittain aina, jolloin kuormitustapaukset ovat erilaiset ja vertailuista saadaan erilaisia tuloksia.

Kuitenkin tapauksissa, joissa seinille tulevat kuormat mallinnettiin Robotissa pelkästään ylimmän seinän laattaan ja tarkasteltiin vain väliseiniä ilman aukkoja, niin huomattiin, että laskentakaavoilla päästäänkin aika samanlaisiin tuloksiin. Tämä osoittaa sen, että laskentakaavat toimivat kuitenkin tällaisissa yksinkertaisissa tapauksissa kohtuullisen hyvin.

Robot ei näyttänyt huomioivan leikkausjäykkyyttä kiertokeskiön sijainnin määrityksessä, jolloin seinille SX1 ja SX11 tuli hieman suuremmat erot leikkausvoimissa muihin seiniin verrattuna, kun tarkasteltiin vain väliseiniä ilman aukkoja. Robotissa leikkausjäykkyys pitäisi kuitenkin olla silti sisällytettynä seinien jäykkyydematriiseissa. Prosentuaalisesti erot olivat kuitenkin vain maksimissaan noin 10 % näillä seinillä kokonaisuuksissa 4 ja 5, jolloin tulokset olivat kokonaisvaltaisesti hyvät.

Lyhyesti sanottuna siis Robotista ja käsinlaskuista saatiin aika samanlaisia tuloksia seinien leikkausvoimille, kun vertailtiin samoja asioita ja kuormitustapaukset olivat samanlaiset kuin kaavoissakin oletetaan.

FEM-ohjelman käytännöllisyys tuli esiin hyvin, erityisesti, kun tarkastellaan korkeita rakennuksia ja halutaan huomioida seinissä olevat aukot. Esimerkiksi 24 metriä pitkälle seinälle SX1 saatiin laskuista 282-335 kN suuremmat voimat, riippuen laatan asetuksista, kun Robotissa oli huomioituna aukot ja kuormat seinille tulivat joka kerrokselta Robotissa. Tämä ero voimissa on jo niin suuri, että tällaisissa tapauksissa FEM-laskennan hyödyt tulevat esiin selvästi.

Erilaisia asetuksia muuttamalla FEM-ohjelmissa, voidaan tietenkin myös saada paljon toisistaan poikkeavia tuloksia, joka tekee FEM-ohjelmista myös kaksiteräisen miekan kokemattoman käsissä. Käyttäessä FEM-ohjelmia, täytyy siis tietää, mitkä asetukset ovat mahdollisimman optimaaliset omiin mitoitustarpeisiin ja mitä asioita ohjelmat huomioivat.

Asia, joka jäi itselle kuitenkin vähän epäselväksi on se, kun Robotissa mallintaa alimmaksi seinäksi vähemmän jäykemmän seinän (enemmän aukkoja tai pienempi paksuus) verrattuna ylempiin seiniin, leikkausvoimat jollain tapaa vääristyvät ja voivat huomattavasti pienentyä riippumatta laatan asetuksista, jolloin leikkausvoimat karkaavat sitten muille seinille. Tässä työssä aukot olivat sijoitettu täysin symmetrisesti, jolloin tällä ei näyttänyt olevan vaikutusta.

Lähteet

Nykyri, P. 2015. by 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 2. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.

Kempainen, A. 2021. Yhteiset pelisäännöt betonisten hormielementtien käyttöön ja uusia ratkaisuja. Betoni-verkkolehti. Viitattu 23.5.2025.

<https://betoni.com/lehti/2021/12/10/yhteiset-pelisaannot-betonisten-hormielementtien-kayttoon-ja-uusia-ratkaisuja/>

SFS EN 1992-1-1 + A1 + AC. 2015. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

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

Elementtisuunnittelu 2010. Laskentaperiaatteet. Helsinki: Betoniteollisuus ry.
<https://www.elementtisuunnittelu.fi/rakennejarjestelmat/rakennuksen-jaykistys/laskentaperiaatteet>

Elementtisuunnittelu 2023. Betonielementtien käyttö korkearakentamisessa. Helsinki: Betoniteollisuus ry.
<https://www.elementtisuunnittelu.fi/rakennejarjestelmat/korkearakentaminen>

Elliot, K. 2002. Precast Concrete Structures. London: CRC Press.

by 201 Betonitekniikan oppikirja 2018. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry.

Elementtisuunnittelu 2023. Sandwich-julkisivut. Helsinki: Betoniteollisuus ry.
<https://www.elementtisuunnittelu.fi/julkisivut/julkisivujarjestelmat/sandwich-julkisivut>

Vaakavoimien laskenta

TUULI

Kokonaistuulivoiman määrittäminen voimakertoimella

Maastoluokka III

Tarkasteltavan kokonaisuuden korkeus on 24 m ja leveys x-suunnassa 31,3 m ja y-suunnassa 30,4 m.

Puuskanopeuspaine korkeudella 24 m.

$$q_{p0,z} := \left(0.01279 \cdot \left(\ln \left(\frac{24}{0.3} \right) \right)^2 + 0.0895 \cdot \ln \left(\frac{24}{0.3} \right) \right) \cdot \frac{kN}{m^2} = 0.638 \frac{kN}{m^2}$$

Maaston kaltevuus alle 5 %, joten ei huomioida pinnanmuodon vaikutuksia, joten

$$q_{p,z} := q_{p0,z} = 0.638 \frac{kN}{m^2} \quad \text{Modifioitu puuskanopeuspaine}$$

Tuuli y-suunnassa

$$c_s c_d := 1.0$$

$$q_{p,h} := q_{p,z} = 0.638 \frac{kN}{m^2} \quad \text{Modifioitu puuskanopeuspaine harjalla}$$

$$h := 24 \text{ m} \quad \text{Korkeus}$$

$$b := 31.3 \text{ m} \quad \text{Tuulta vastaan kohtisuora sivu}$$

Tehollinen hoikkuus, kun $50 \text{ m} > h > 15 \text{ m}$

$$\lambda := (2.25 - 0.017 \cdot 24) \cdot \frac{h}{b} = 1.412$$

$$d := 30.4 \text{ m} \quad \text{Tuulensuuntainen sivu}$$

$$\frac{d}{b} = 0.971$$

$$c_f := 1.31 \quad \text{Voimakerroin taulukosta tai diagrammista}$$

$$A_{ref} := h \cdot b = 751.2 \text{ m}^2 \quad \text{Tuulen vaikutusala}$$

$$F_{wd,y} := 1.5 \cdot c_s c_d \cdot c_f \cdot q_{p,h} \cdot A_{ref} = 941.442 \text{ kN} \quad \text{Tuulen pistekuorman mitoitusarvo}$$

Lisävaakavoimat

PYSTYKUORMAT

	gk,2+gk,3	2	kN/m ²
Betonin tilavuuspaino	γ	24,53	kN/m ³
Laatta (h=200)	gk,1	4,91	kN/m ²
Pintarakenne 1	gk,2	1,5	kN/m ²
Ei-kantavat väliseinät	gk,3	0,5	kN/m ²
Pintarakenne 2	gk,4	0,75	kN/m ²
Väliseinä (t=200, h=3000)	gk,5	14,72	kN/m
Ulkoseinä (t=150, h=3000)	gk,6	11,04	kN/m

(8 krs.)

	kuorma	L _{yhteensä} (m)	A _{kuorma} (m)	kN (kerros)	kN*0.9 (yhteensä)
Väliseinät (kN/m)	14,72	170,28	0	2507	18047
Ulkoseinät (sisäkuori) kN/m	11,04	145,11	0	1602	11533
Laatta (kN/m ²)	4,91	0	681,1	3344	24078
gk,2+gk,3 (kN/m ²)	2	0	618,3	1237	8904
gk,4 (kN/m ²)	0,75	0	57	43	308
N _d (pystykuormien summa)				7859	62869

$$N_d := 62869 \text{ kN}$$

Pystykuormien summa

$$\theta_0 := \frac{1}{200}$$

Perusarvo

$$l := 24$$

Korkeus (m)

$$\alpha_h := \left(\frac{2}{\sqrt{l}} \right) = 0.408$$

Korkeuden pienennyskerroin

$$\alpha_h := \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1$$

Ehto, joten

$$\alpha_h := \frac{2}{3}$$

Korkeuden pienennyskerroin

$$m_i := 12$$

Huomioitavien jäykistävien väliseinien määrä (x-suunnan seinät)

$$\alpha_m := \sqrt{0.5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m_i} \right)} = 0.736$$

Rakenneosien määrän pienennyskerroin

$$\theta_i := \theta_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = 0.0025$$

Lisävaakavoiman kerroin

$$F_{w.lisä} := N_d \cdot \theta_i = 154.234 \text{ kN}$$

Lisävaakavoima

$$F_{wdY} := F_{wd,y} + F_{w.lisä} = 1095.677 \text{ kN}$$

Vaakavoiman mitoitusarvo y-suunta

$$q_{wd.netiö} := \frac{F_{wdY}}{A_{ref}} = 1.459 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Vaakavoiman mitoitusarvon neliökuorma

$$h_{krs} := 3 \text{ m}$$

Kerroskorkeus

$$q_{wd.viiva} := q_{wd.netiö} \cdot h_{krs} = 4.376 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Vaakavoiman viivakuorman mitoitusarvo kerroksessa (käytetään molemmissa suunnissa)

$$F_{wdX} := q_{wd.viiva} \cdot d \cdot 8 = 1064.172 \text{ kN}$$

Vaakavoiman mitoitusarvo x-suunta

Vaakavoimat, y-seinät, huomioiden vain taivutusjäykkyyden, h=24m

Vaakakuorma Y-suuntaisille seinille

E (kN/m ²)	3,1E+07	Kimmokerroin
F _y (kN)	1096	Y-suuntainen voimaresultantti
F _x (kN)	0	X-suuntainen voimaresultantti
L _{rak}	31,31	Rakennuksen leveys
B _{rak}	30,42	Rakennuksen pituus

\bar{X} (m)	14,533	Kiertokeskiön x-koordinaatti (etäisyys origosta)	$(\sum k_y \cdot x) / (\sum k_y)$
\bar{Y} (m)	9,256	Kiertokeskiön y-koordinaatti (etäisyys origosta)	$(\sum k_x \cdot y) / (\sum k_x)$
e _x (m)	1,122	Y-suuntaisen voimaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä x-suunnassa	
e _y (m)	0,000	X-suuntaisen voimaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä y-suunnassa	
V _x (m)	0,000E+00	Siirtymä x-suunnassa	$F_x / (\sum k_x)$
V _y (m)	3,347E-03	Siirtymä y-suunnassa	$F_y / (\sum k_y)$
M _x (kNm)	0,000	Jäykistysjärjestelmän momentti x-suuntaisesta voimasta	$-F_x \cdot e_y$
M _y (kNm)	1229,712	Jäykistysjärjestelmän momentti y-suuntaisesta voimasta	$F_y \cdot e_x$
Φ _x (rad)	0,00000000	Kiertymä momentista M _x	$M_x / (\sum k_x \cdot a_y^2 + \sum k_y \cdot a_x^2)$
Φ _y (rad)	0,0000232	Kiertymä momentista M _y	$M_y / (\sum k_x \cdot a_y^2 + \sum k_y \cdot a_x^2)$

	Paksuus	Pituus	Korkeus	Neliömomentti y-suunnassa (t*L ³)/12	Jäykkyys y-suunnassa (3*E*I)/H ³	y-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys origosta x-suunnassa	Y-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys kiertokeskiöstä x-suunnassa $x - \bar{X}$	Seinän osuus kuormasta F _y $k_y \cdot V_y + k_y \cdot a_x \cdot \Phi_y$
	t (m)	L (m)	H (m)	I _x (m ⁴)	k _y (kN/m)	x (m)	a _x (m)	Q _y (kN)
Seinä Y1	0,2	5,72	24	3,12	20984	4,36	-10,17	65,29
Seinä Y2	0,2	6,26	24	4,09	27506	6,51	-8,02	86,95
Seinä Y3	0,2	7,12	24	6,02	40470	7,66	-6,87	129,01
Seinä Y4	0,2	6,26	24	4,09	27506	10,21	-4,32	89,31
Seinä Y5	0,2	7,12	24	6,02	40470	10,96	-3,57	132,11
Seinä Y6	0,2	4,19	24	1,23	8248	13,76	-0,77	27,46
Seinä Y7	0,2	6,26	24	4,09	27506	13,91	-0,62	91,67
Seinä Y8	0,2	6,26	24	4,09	27506	17,61	3,08	94,02
Seinä Y9	0,2	3,36	24	0,63	4253	20,46	5,93	14,82
Seinä Y10	0,2	6,26	24	4,09	27506	21,31	6,78	96,38
Seinä Y11	0,2	3,2	24	0,55	3674	21,76	7,23	12,91
Seinä Y12	0,2	4,06	24	1,12	7504	21,76	7,23	26,37
Seinä Y13	0,2	3,88	24	0,97	6549	23,61	9,08	23,30
Seinä Y14	0,2	6,03	24	3,65	24584	23,61	9,08	87,45
Seinä Y15	0,2	3,7	24	0,84	5679	23,61	9,08	20,20
Seinä Y16	0,2	6,26	24	4,09	27506	25,01	10,48	98,74

Vaakavoimat, x-seinät, huomioiden vain taivutusjäykkyyden, h=24m

Vaakakuormat X-suuntaisille seinille

E (kN/m ²)	3,1E+07	Kimmo kerroin
F _y (kN)	0	Y-suuntainen voimaresultantti
F _x (kN)	1064	X-suuntainen voimaresultantti
L _{rak}	31,31	Rakennuksen leveys
B _{rak}	30,42	Rakennuksen pituus

\bar{X} (m)	14,533	Kiertokeskiön x-koordinaatti (etäisyys origosta)	$(\sum k_y \cdot x) / (\sum k_y)$
\bar{Y} (m)	9,256	Kiertokeskiön y-koordinaatti (etäisyys origosta)	$(\sum k_x \cdot y) / (\sum k_x)$
e _x (m)	0,000	Y-suuntaisen voimaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä x-suunnassa	
e _y (m)	5,954	X-suuntaisen voimaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä y-suunnassa	
V _x (m)	6,069E-04	Siirtymä x-suunnassa	$F_x / (\sum k_x)$
V _y (m)	0,000E+00	Siirtymä y-suunnassa	$F_y / (\sum k_y)$
M _x (kNm)	-6335,044	Jäykistysjärjestelmän momentti x-suuntaisesta voimasta	$-F_x \cdot e_y$
M _y (kNm)	0,000	Jäykistysjärjestelmän momentti y-suuntaisesta voimasta	$F_y \cdot e_x$
Φ _x (rad)	-0,0001193	Kiertymä momentista M _x	$M_x / (\sum k_x \cdot a_y^2 + \sum k_y \cdot a_x^2)$
Φ _y (rad)	0,0000000	Kiertymä momentista M _y	$M_y / (\sum k_x \cdot a_y^2 + \sum k_y \cdot a_x^2)$

	Paksuus	Pituus	Korkeus	Neliömomentti x-suunnassa (t*L ³)/12	Jäykkyys x-suunnassa (3*E*I)/H ³	X-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys origosta y-suunnassa	X-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys kiertokeskiöstä y-suunnassa $y - \bar{Y}$	Seinän osuus kuormasta F _x $k_x \cdot V_x - k_x \cdot a_y \cdot \Phi_x$
	t (m)	L (m)	H (m)	I _y (m ⁴)	k _x (kN/m)	y (m)	a _y (m)	Q _x (kN)
Seinä X1	0,2	23,71	24	222,15	1494489	7,56	-1,70	604,51
Seinä X2	0,2	5,20	24	2,34	15766	9,36	0,10	9,76
Seinä X3	0,2	4,03	24	1,09	7339	9,36	0,10	4,54
Seinä X4	0,2	4,90	24	1,96	13191	9,56	0,30	8,48
Seinä X5	0,2	3,65	24	0,81	5452	12,42	3,16	5,37
Seinä X6	0,2	6,40	24	4,37	29393	13,27	4,01	31,92
Seinä X7	0,2	5,20	24	2,34	15766	15,30	6,04	20,94
Seinä X8	0,2	6,40	24	4,37	29393	16,95	7,69	44,83
Seinä X9	0,2	5,20	24	2,34	15766	19,75	10,49	29,31
Seinä X10	0,2	4,90	24	1,96	13191	20,66	11,40	25,96
Seinä X11	0,2	9,55	24	14,52	97658	24,36	15,10	235,31
Seinä X12	0,2	5,20	24	2,34	15766	27,06	17,80	43,07

Vaakavoimat, y-seinät, huomioiden taivutus- ja leikkausjäykkyyden, h=24m

Vaakakuorma Y-suuntaisille seinille

E (kN/m ²)	31000000	Kimmokerroin
G (kN/m ²)	12917000	Liukumoduuli
F _Y (kN)	1096	Y-suuntainen voimaresultantti
F _X (kN)	0	X-suuntainen voimaresultantti
L _{rak}	31,31	Rakennuksen leveys
B _{rak}	30,42	Rakennuksen pituus

\bar{X} (m)	14,568	Kiertokeskiön x-koordinaatti (etäisyys origosta) $(\sum k_y * x) / (\sum k_y)$
\bar{Y} (m)	10,020	Kiertokeskiön y-koordinaatti (etäisyys origosta) $(\sum k_x * y) / (\sum k_x)$
e _x (m)	1,087	Y-suuntaisen voimaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä x-suunnassa
e _y (m)	0,000	X-suuntaisen voimaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä y-suunnassa
V _x (m)	0,000E+00	Siirtymä x-suunnassa $F_x / (\sum k_x)$
V _y (m)	3,509E-03	Siirtymä y-suunnassa $F_y / (\sum k_y)$
M _x (kNm)	0,000	Jäykistysjärjestelmän momentti x-suuntaisesta voimasta $-F_x * e_y$
M _y (kNm)	1191,651	Jäykistysjärjestelmän momentti y-suuntaisesta voimasta $F_y * e_x$
Φ _x (rad)	0,0000000	Kiertymä momentista M _x $M_x / (\sum k_x * a_y^2 + \sum k_y * a_x^2)$
Φ _y (rad)	0,0000252	Kiertymä momentista M _y $M_y / (\sum k_x * a_y^2 + \sum k_y * a_x^2)$

	Paksuus	Pituus	Pinta-ala	Korkeus	Neliömomentti y-suunnassa (t*L ³)/12	Jäykkyys y-suunnassa $\frac{1}{\frac{h^3}{3 * E * I_x} + \frac{1,2 * h}{A * G}}$	y-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys origosta x-suunnassa	Y-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys kiertokeskiöstä x-suunnassa $x - \bar{X}$	Seinän osuus kuormasta F _Y $k_y * V_y + k_y * a_x * \Phi_y$
	t (m)	L (m)	A (m ²)	H (m)	I _x (m ⁴)	k _y (kN/m)	x (m)	a _x (m)	Q _Y (kN)
Seinä Y1	0,2	5,72	1,144	24	3,12	20159	4,36	-10,21	65,55
Seinä Y2	0,2	6,26	1,252	24	4,09	26221	6,51	-8,06	86,68
Seinä Y3	0,2	7,12	1,424	24	6,02	38059	7,66	-6,91	126,91
Seinä Y4	0,2	6,26	1,252	24	4,09	26221	10,21	-4,36	89,12
Seinä Y5	0,2	7,12	1,424	24	6,02	38059	10,96	-3,61	130,07
Seinä Y6	0,2	4,19	0,838	24	1,23	8071	13,76	-0,81	28,15
Seinä Y7	0,2	6,26	1,252	24	4,09	26221	13,91	-0,66	91,57
Seinä Y8	0,2	6,26	1,252	24	4,09	26221	17,61	3,04	94,01
Seinä Y9	0,2	3,36	0,672	24	0,63	4194	20,46	5,89	15,34
Seinä Y10	0,2	6,26	1,252	24	4,09	26221	21,31	6,74	96,45
Seinä Y11	0,2	3,2	0,64	24	0,55	3628	21,76	7,19	13,39
Seinä Y12	0,2	4,06	0,812	24	1,12	7352	21,76	7,19	27,13
Seinä Y13	0,2	3,88	0,776	24	0,97	6428	23,61	9,04	24,02
Seinä Y14	0,2	6,03	1,206	24	3,65	23515	23,61	9,04	87,86
Seinä Y15	0,2	3,7	0,74	24	0,84	5584	23,61	9,04	20,86
Seinä Y16	0,2	6,26	1,252	24	4,09	26221	25,01	10,44	98,90

Vaakavoimat, x-seinät, huomioiden taivutus- ja leikkausjäykkyyden, h=24m

Vaakuormat X-suuntaisille seinille

E (kN/m ²)	31000000	Kimmokerroin
G (kN/m ²)	12917000	Liukumoduuli
F _y (kN)	0	Y-suuntainen voimaresultantti
F _x (kN)	1064	X-suuntainen voimaresultantti
L _{rak}	31,31	Rakennuksen leveys
B _{rak}	30,42	Rakennuksen pituus

\bar{X} (m)	14,568	Kiertokeskiön x-koordinaatti (etäisyys origosta) $(\sum k_y \cdot x) / (\sum k_y)$
\bar{Y} (m)	10,020	Kiertokeskiön y-koordinaatti (etäisyys origosta) $(\sum k_x \cdot y) / (\sum k_x)$
e _x (m)	0,000	Y-suuntaisen voimaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä x-suunnassa
e _y (m)	5,190	X-suuntaisen voimaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä y-suunnassa
V _x (m)	9,496E-04	Siirtymä x-suunnassa $F_x / (\sum k_x)$
V _y (m)	0,000E+00	Siirtymä y-suunnassa $F_y / (\sum k_y)$
M _x (kNm)	-5522,400	Jäykistysjärjestelmän momentti x-suuntaisesta voimasta $-F_x \cdot e_y$
M _y (kNm)	0,000	Jäykistysjärjestelmän momentti y-suuntaisesta voimasta $F_y \cdot e_x$
Φ _x (rad)	-0,0001167	Kiertymä momentista M _x $M_x / (\sum k_x \cdot a_y^2 + \sum k_y \cdot a_x^2)$
Φ _y (rad)	0,0000000	Kiertymä momentista M _y $M_y / (\sum k_x \cdot a_y^2 + \sum k_y \cdot a_x^2)$

	Paksuus	Pituus	Pinta-ala	Korkeus	Neliömomentti x-suunnassa (t*L ³)/12	Jäykkyys x-suunnassa $\frac{1}{\frac{h^3}{3 \cdot E \cdot I_y} + \frac{1,2 \cdot h}{A \cdot G}}$	X-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys origosta y-suunnassa	X-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys kiertokeskiöstä y-suunnassa $y - \bar{Y}$	Seinän osuus kuormasta F _x $k_x \cdot V_x - k_x \cdot a_y \cdot \Phi_x$
	t (m)	L (m)	A (m ²)	H (m)	I _y (m ⁴)	k _x (kN/m)	y (m)	a _y (m)	Q _x (kN)
Seinä X1	0,2	23,71	4,74	24	222,15	877724	7,56	-2,46	581,45
Seinä X2	0,2	5,20	1,04	24	2,34	15250	9,36	-0,66	13,31
Seinä X3	0,2	4,03	0,81	24	1,09	7193	9,36	-0,66	6,28
Seinä X4	0,2	4,90	0,98	24	1,96	12807	9,56	-0,46	11,47
Seinä X5	0,2	3,65	0,73	24	0,81	5363	12,42	2,40	6,60
Seinä X6	0,2	6,40	1,28	24	4,37	27961	13,27	3,25	37,16
Seinä X7	0,2	5,20	1,04	24	2,34	15250	15,30	5,28	23,88
Seinä X8	0,2	6,40	1,28	24	4,37	27961	16,95	6,93	49,17
Seinä X9	0,2	5,20	1,04	24	2,34	15250	19,75	9,73	31,80
Seinä X10	0,2	4,90	0,98	24	1,96	12807	20,66	10,64	28,07
Seinä X11	0,2	9,55	1,91	24	14,52	87664	24,36	14,34	229,99
Seinä X12	0,2	5,20	1,04	24	2,34	15250	27,06	17,04	44,82

Vaakavoimat, y-seinät, huomioiden taivutus- ja leikkausjäykkyyden, h=3m

Vaakakuorma Y-suuntaisille seinille

E (kN/m ²)	31000000	Kimmokerroin
G (kN/m ²)	12917000	Liukumoduuli
F _Y (kN)	1096	Y-suuntainen voimaresultantti
F _X (kN)	0	X-suuntainen voimaresultantti
L _{rak}	31,31	Rakennuksen leveys
B _{rak}	30,42	Rakennuksen pituus

\bar{X} (m)	15,284	Kiertokeskiön x-koordinaatti (etäisyys origosta) $(\sum k_y \cdot x) / (\sum k_y)$
\bar{Y} (m)	13,957	Kiertokeskiön y-koordinaatti (etäisyys origosta) $(\sum k_x \cdot y) / (\sum k_x)$
e _x (m)	0,371	Y-suuntaisen voimaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä x-suunnassa
e _y (m)	0,000	X-suuntaisen voimaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä y-suunnassa
V _x (m)	0,000E+00	Siirtymä x-suunnassa $F_x / (\sum k_x)$
V _y (m)	2,530E-05	Siirtymä y-suunnassa $F_y / (\sum k_y)$
M _x (kNm)	0,000	Jäykistysjärjestelmän momentti x-suuntaisesta voimasta $-F_x \cdot e_y$
M _y (kNm)	406,209	Jäykistysjärjestelmän momentti y-suuntaisesta voimasta $F_y \cdot e_x$
Φ _x (rad)	0,0000000	Kiertymä momentista M _x $M_x / (\sum k_x \cdot a_y^2 + \sum k_y \cdot a_x^2)$
Φ _y (rad)	0,0000001	Kiertymä momentista M _y $M_y / (\sum k_x \cdot a_y^2 + \sum k_y \cdot a_x^2)$

	Paksuus	Pituus	Pinta-ala	Korkeus	Neliömomentti y-suunnassa (t ³ ·L ³)/12	Jäykkyys y-suunnassa $\frac{1}{\frac{h^3}{3 \cdot E \cdot I_x} + \frac{1,2 \cdot h}{A \cdot G}}$	y-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys origosta x-suunnassa	Y-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys kiertokeskiöstä x-suunnassa $x - \bar{X}$	Seinän osuus kuormasta F _Y $k_y \cdot V_y + k_y \cdot a_x \cdot \Phi_y$
	t (m)	L (m)	A (m ²)	H (m)	I _x (m ⁴)	k _y (kN/m)	x (m)	a _x (m)	Q _y (kN)
Seinä Y1	0,2	5,72	1,144	3	3,12	2970017	4,36	-10,92	72,00
Seinä Y2	0,2	6,26	1,252	3	4,09	3405831	6,51	-8,77	83,27
Seinä Y3	0,2	7,12	1,424	3	6,02	4098721	7,66	-7,62	100,67
Seinä Y4	0,2	6,26	1,252	3	4,09	3405831	10,21	-5,07	84,49
Seinä Y5	0,2	7,12	1,424	3	6,02	4098721	10,96	-4,32	101,98
Seinä Y6	0,2	4,19	0,838	3	1,23	1756281	13,76	-1,52	44,17
Seinä Y7	0,2	6,26	1,252	3	4,09	3405831	13,91	-1,37	85,71
Seinä Y8	0,2	6,26	1,252	3	4,09	3405831	17,61	2,33	86,93
Seinä Y9	0,2	3,36	0,672	3	0,63	1144232	20,46	5,18	29,52
Seinä Y10	0,2	6,26	1,252	3	4,09	3405831	21,31	6,03	88,15
Seinä Y11	0,2	3,2	0,64	3	0,55	1034052	21,76	6,48	26,81
Seinä Y12	0,2	4,06	0,812	3	1,12	1656953	21,76	6,48	42,96
Seinä Y13	0,2	3,88	0,776	3	0,97	1521207	23,61	8,33	39,71
Seinä Y14	0,2	6,03	1,206	3	3,65	3220155	23,61	8,33	84,06
Seinä Y15	0,2	3,7	0,74	3	0,84	1387885	23,61	8,33	36,23
Seinä Y16	0,2	6,26	1,252	3	4,09	3405831	25,01	9,73	89,37

Vaakavoimat, x-seinät, huomioiden taivutus- ja leikkausjäykkyyden, h=3m

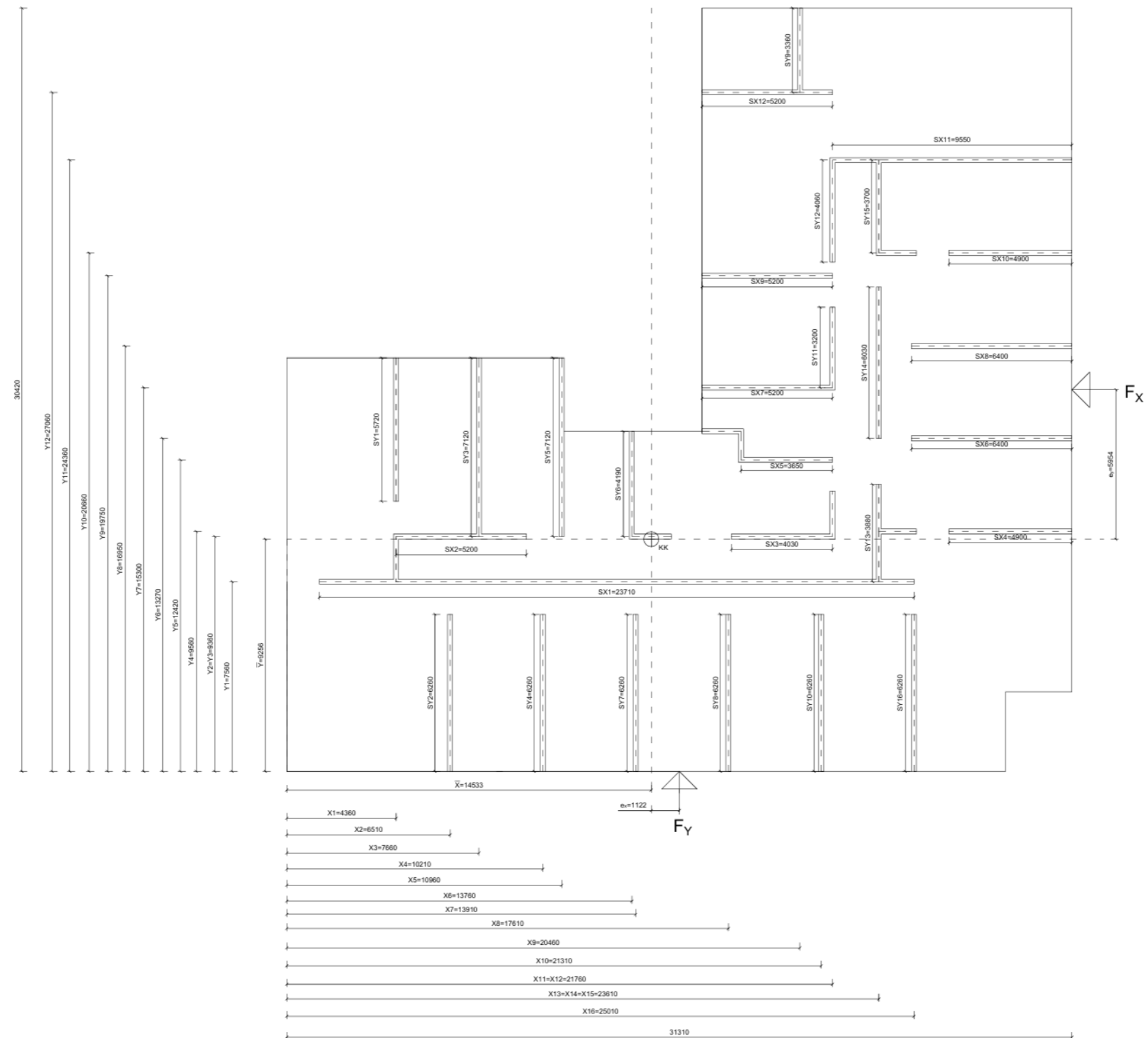
Vaakakuormat X-suuntaisille seinille

E (kN/m ²)	31000000	Kimmokerroin
G (kN/m ²)	12917000	Liukumoduuli
F _y (kN)	0	Y-suuntainen voimaresultantti
F _x (kN)	1064	X-suuntainen voimaresultantti
L _{rak}	31,31	Rakennuksen leveys
B _{rak}	30,42	Rakennuksen pituus

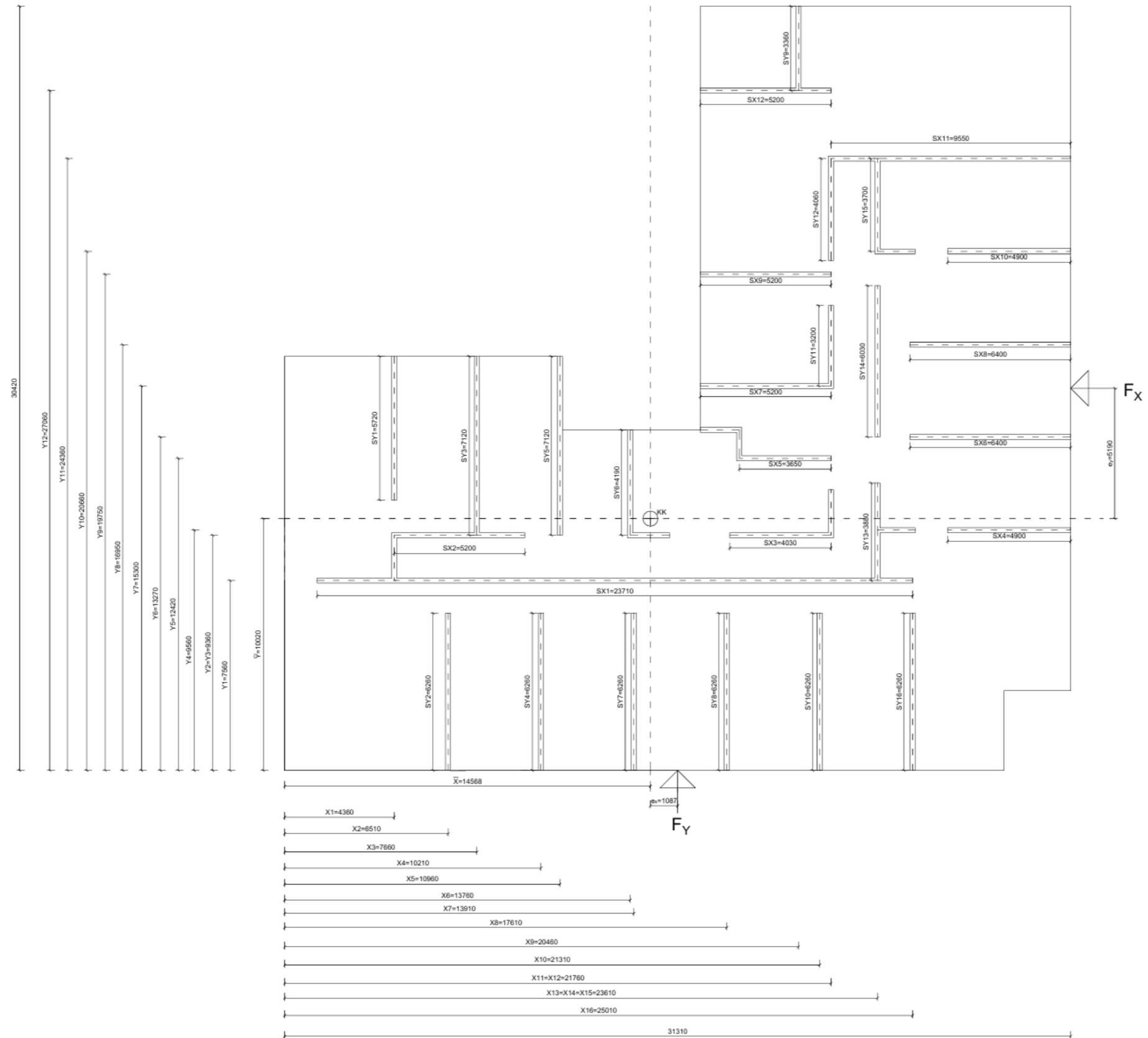
\bar{X} (m)	15,284	Kiertokeskiön x-koordinaatti (etäisyys origosta) $(\sum k_y * x) / (\sum k_y)$
\bar{Y} (m)	13,957	Kiertokeskiön y-koordinaatti (etäisyys origosta) $(\sum k_x * y) / (\sum k_x)$
e _x (m)	0,000	Y-suuntaisen voimaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä x-suunnassa
e _y (m)	1,253	X-suuntaisen voimaresultantin etäisyys kiertokeskiöstä y-suunnassa
V _x (m)	2,239E-05	Siirtymä x-suunnassa $F_x / (\sum k_x)$
V _y (m)	0,000E+00	Siirtymä y-suunnassa $F_y / (\sum k_y)$
M _x (kNm)	-1333,209	Jäykistysjärjestelmän momentti x-suuntaisesta voimasta $-F_x * e_y$
M _y (kNm)	0,000	Jäykistysjärjestelmän momentti y-suuntaisesta voimasta $F_y * e_x$
Φ _x (rad)	-0,0000003	Kiertymä momentista M _x $M_x / (\sum k_x * a_y^2 + \sum k_y * a_x^2)$
Φ _y (rad)	0,0000000	Kiertymä momentista M _y $M_y / (\sum k_x * a_y^2 + \sum k_y * a_x^2)$

	Paksuus	Pituus	Pinta-ala	Korkeus	Neliömomentti x-suunnassa (t*L ³)/12	Jäykkyys x-suunnassa $\frac{1}{\frac{h^3}{3 * E * I_y} + \frac{1,2 * h}{A * G}}$	X-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys origosta y-suunnassa	X-suuntaisen seinän painopisteen etäisyys kiertokeskiöstä y-suunnassa $y - \bar{Y}$	Seinän osuus kuormasta F _x $k_x * V_x - k_x * a_y * \Phi_x$
	t (m)	L (m)	A (m ²)	H (m)	I _y (m ⁴)	k _x (kN/m)	y (m)	a _y (m)	Q _x (kN)
Seinä X1	0,2	23,71	4,74	3	222,15	16644452	7,56	-6,40	338,81
Seinä X2	0,2	5,20	1,04	3	2,34	2551873	9,36	-4,60	53,40
Seinä X3	0,2	4,03	0,81	3	1,09	1634177	9,36	-4,60	34,20
Seinä X4	0,2	4,90	0,98	3	1,96	2312393	9,56	-4,40	48,54
Seinä X5	0,2	3,65	0,73	3	0,81	1351338	12,42	-1,54	29,59
Seinä X6	0,2	6,40	1,28	3	4,37	3518824	13,27	-0,69	78,01
Seinä X7	0,2	5,20	1,04	3	2,34	2551873	15,30	1,34	58,22
Seinä X8	0,2	6,40	1,28	3	4,37	3518824	16,95	2,99	82,12
Seinä X9	0,2	5,20	1,04	3	2,34	2551873	19,75	5,79	61,82
Seinä X10	0,2	4,90	0,98	3	1,96	2312393	20,66	6,70	56,69
Seinä X11	0,2	9,55	1,91	3	14,52	6027104	24,36	10,40	154,84
Seinä X12	0,2	5,20	1,04	3	2,34	2551873	27,06	13,10	67,75

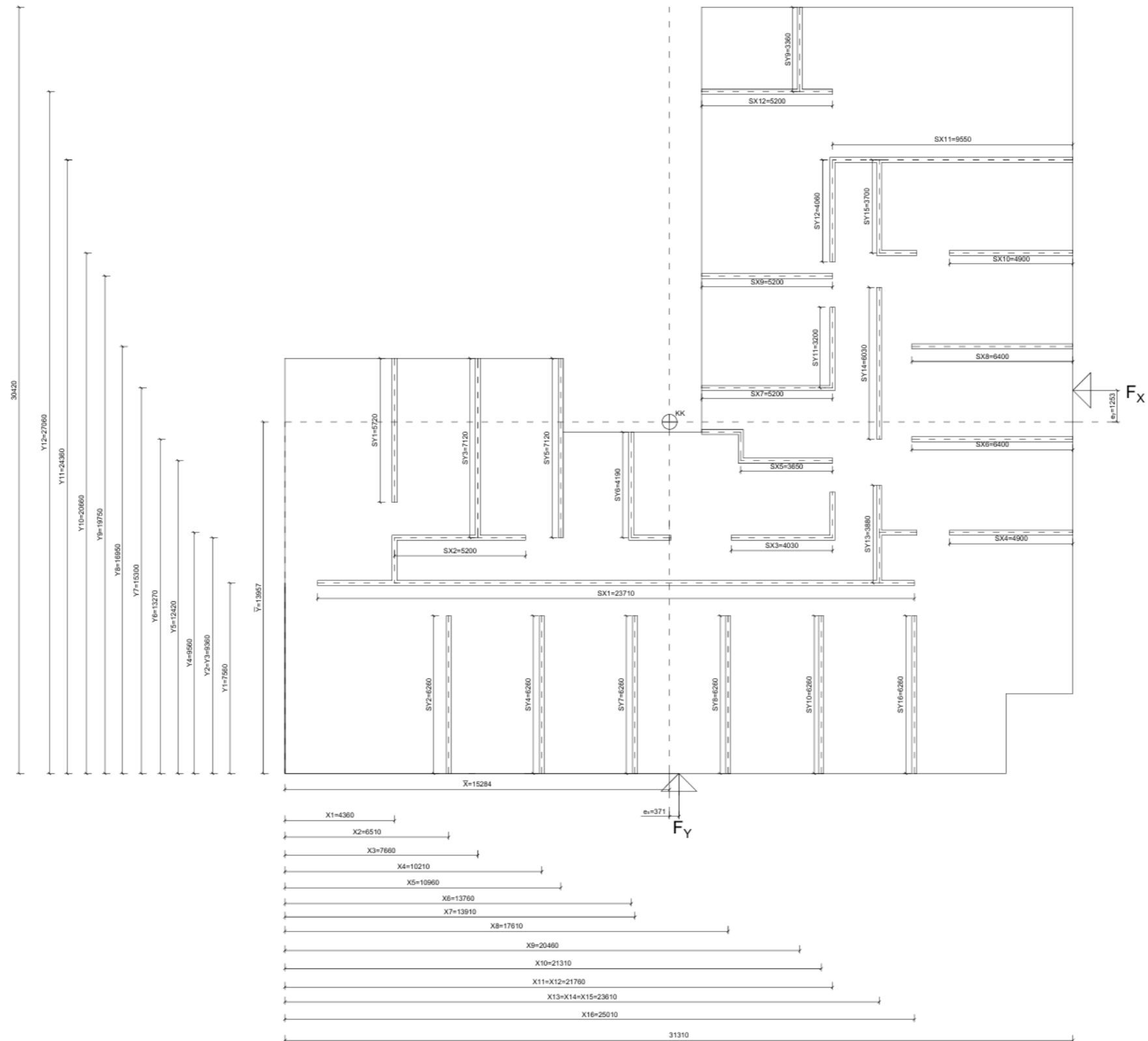
Kiertokeskiön sijainti, huomioiden vain taivutusjäykkyyden, $h=3m$ ja $h=24m$



Kiertokeskiön sijainti, huomioiden taivutus- ja leikkausjäykkyyden, h=24m

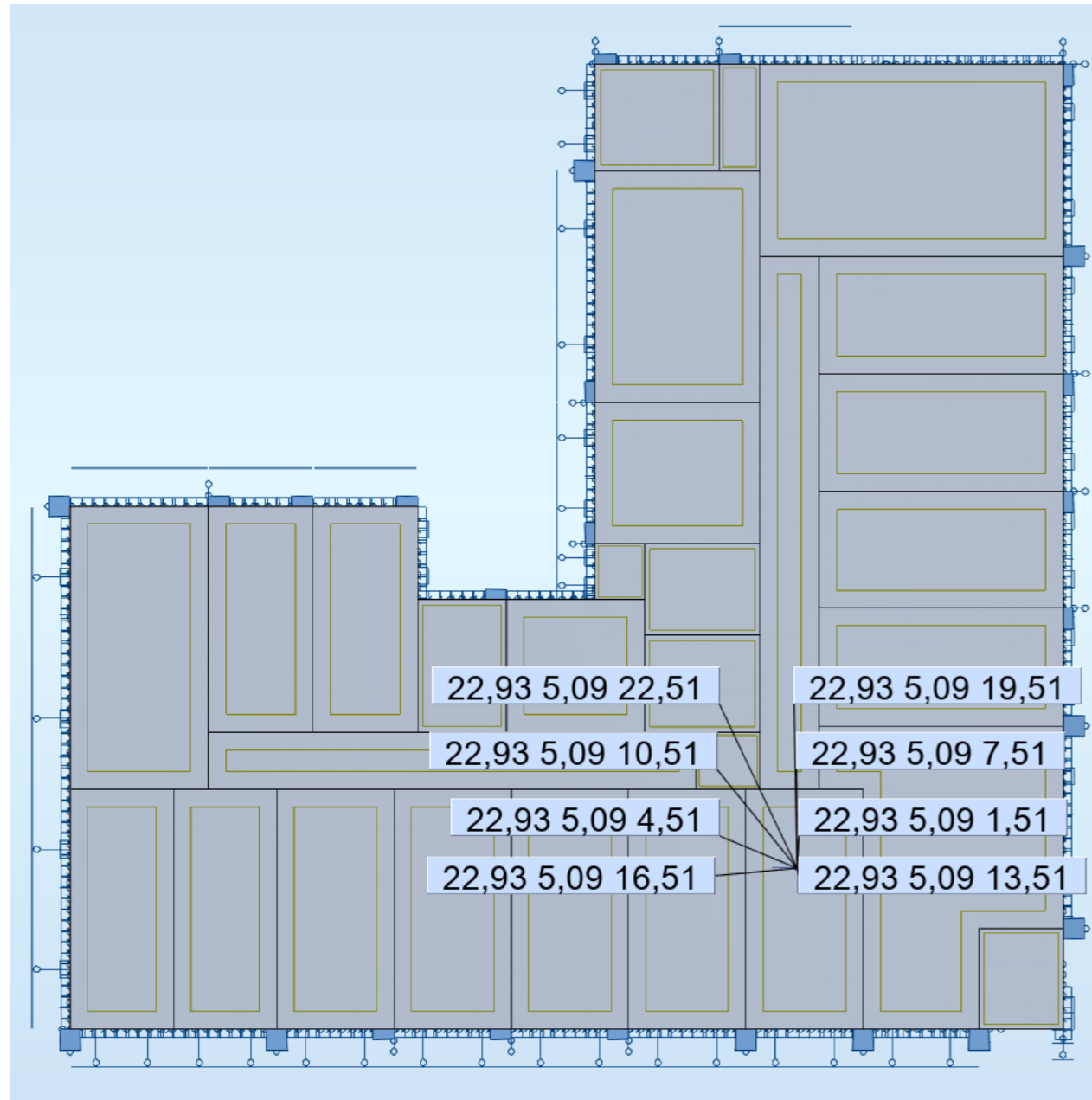


Kiertokeskiön sijainti, huomioiden taivutus- ja leikkausjäykkyuden, h=3m

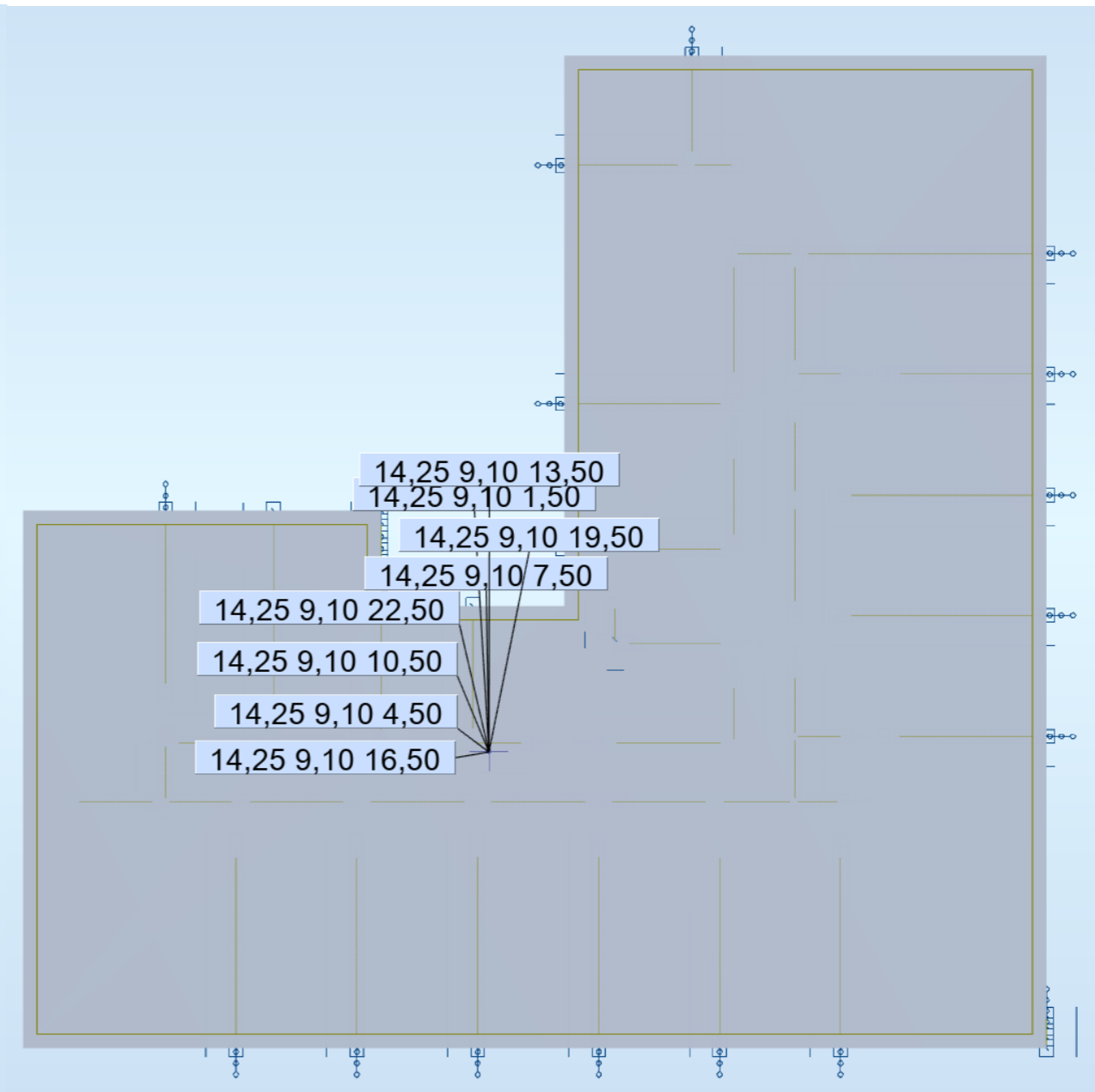


Kiertokeskiöt mallissa (x, y, z), h=3 ja h=24m

Kiertokeskiön sijainti normaalisti



Kiertokeskiön sijainti ilman ulkoseiniä ja väliseinien aukkoja



Puristusvoimat

	gk,1+gk,2+gk,3	6,91	kN/m ²
	gk,1+gk,4	5,66	kN/m ²
Betonin tilavuuspaino	γ	24,53	kN/m ³
Laatta (h=200)	gk,1	4,91	kN/m ²
Pintarakenne 1	gk,2	1,5	kN/m ²
Ei-kantavat väliseinät	gk,3	0,5	kN/m ²
Pintarakenne 2	gk,4	0,75	kN/m ²
Väliseinä (t=200, h=3000)	gk,5	14,72	kN/m

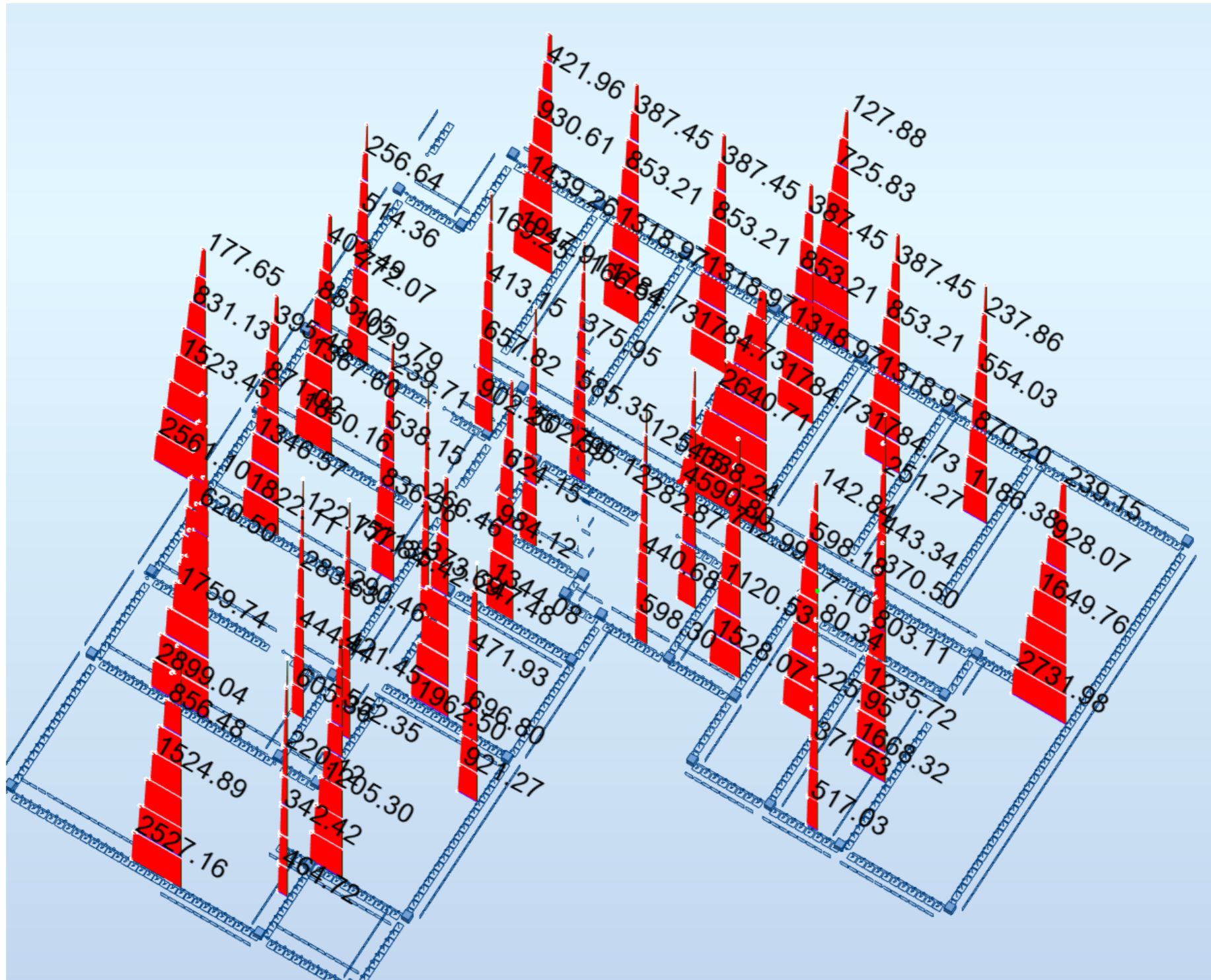
Y-SEINÄT PURISTUS

			(gk,1,2,3)		(gk,1,4)		(8 krs.)	
	gk,1+gk,2+gk,3	gk,1+gk,4	A _{k1} (m ²)	A _{k2} (m ²)	gk,5	L (m)	kN (kerros)	kN*0.9 (yhteensä)
SY1	6,91	0	22,8	0	14,72	5,72	241,75	1741
SY2	6,91	0	12,4	0	14,72	6,26	177,83	1280
SY3	6,91	0	22,7	0	14,72	7,12	261,66	1884
SY4	6,91	0	24,8	0	14,72	6,26	263,52	1897
SY5	6,91	0	17,6	0	14,72	7,12	226,42	1630
SY6	6,91	0	12,1	0	14,72	4,19	145,29	1046
SY7	6,91	0	24,8	0	14,72	6,26	263,52	1897
SY8	6,91	0	24,8	0	14,72	6,26	263,52	1897
SY9	6,91	0	3,4	0	14,72	3,36	72,95	525
SY10	6,91	0	24,8	0	14,72	6,26	263,52	1897
SY11	0	5,66	0	5,1	14,72	3,20	75,97	547
SY12	0	5,66	0	4,4	14,72	4,06	84,67	610
SY13	6,91	5,66	11,7	2,90	14,72	3,88	154,37	1111
SY14	6,91	5,66	6	7,10	14,72	6,03	170,41	1227
SY15	6,91	5,66	5	3,60	14,72	3,70	109,39	788
SY16	6,91	0	27,9	0,00	14,72	6,26	284,94	2052

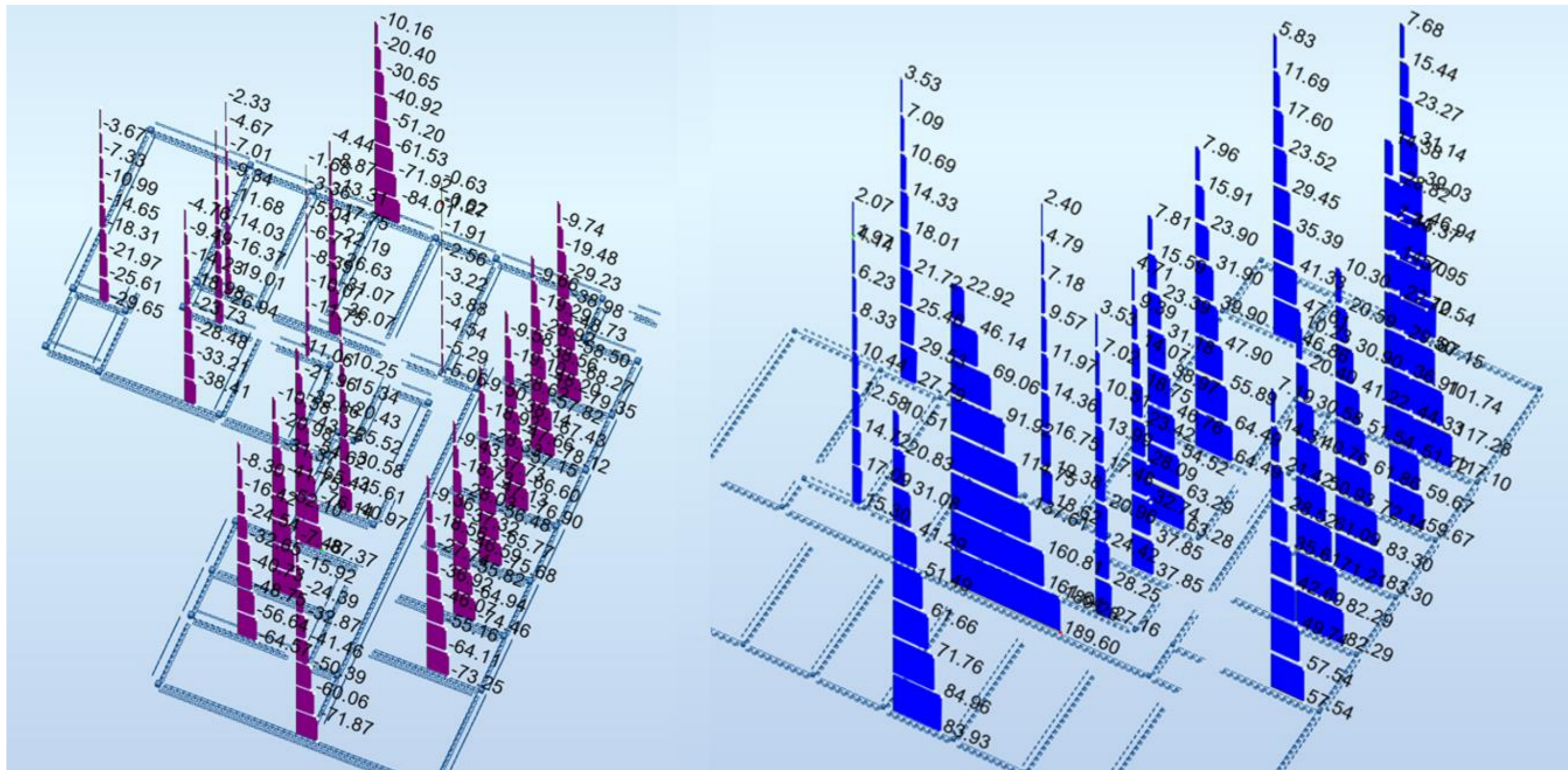
X-SEINÄT PURISTUS

			(gk,1,2,3)		(gk,1,4)		(8 krs.)	
	gk,1+gk,2+gk,3	gk,1+gk,4	A _{k1} (m ²)	A _{k2} (m ²)	gk,5	L (m)	kN (kerros)	kN*0.9 (yhteensä)
SX1	6,91	5,66	28,8	14,9	14,72	23,71	632,35	4553
SX2	6,91	5,66	2,9	5,7	14,72	5,20	128,85	928
SX3	6,91	5,66	8,0	2,6	14,72	4,03	129,32	931
SX4	6,91	5,66	10,3	0,0	14,72	4,90	143,30	1032
SX5	6,91	0	10,6	0,0	14,72	3,65	126,97	914
SX6	6,91	0	27,9	0,0	14,72	6,40	287,00	2066
SX7	6,91	0	16,9	0,0	14,72	5,20	193,32	1392
SX8	6,91	0	29,2	0,0	14,72	6,40	295,98	2131
SX9	6,91	0	30,6	0,0	14,72	5,20	287,99	2074
SX10	6,91	0	20,6	0,0	14,72	4,90	214,47	1544
SX11	6,91	0	43,3	0,0	14,72	9,55	439,78	3166
SX12	6,91	0	25,7	0,0	14,72	5,20	254,13	1830

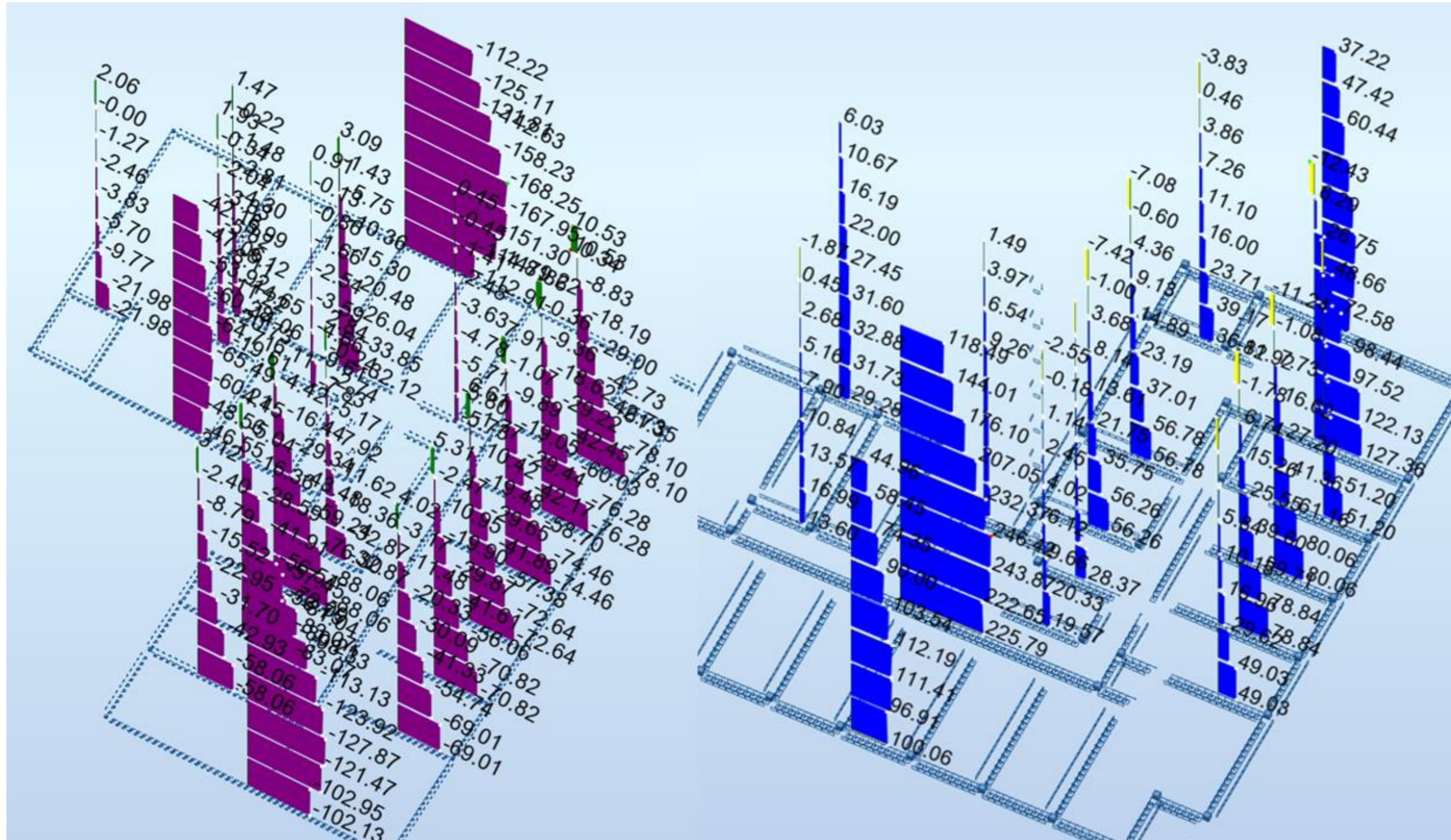
Osittain jäykkä laatta (Partial stiffening, in XY), Puristusvoimat, 8 krs.



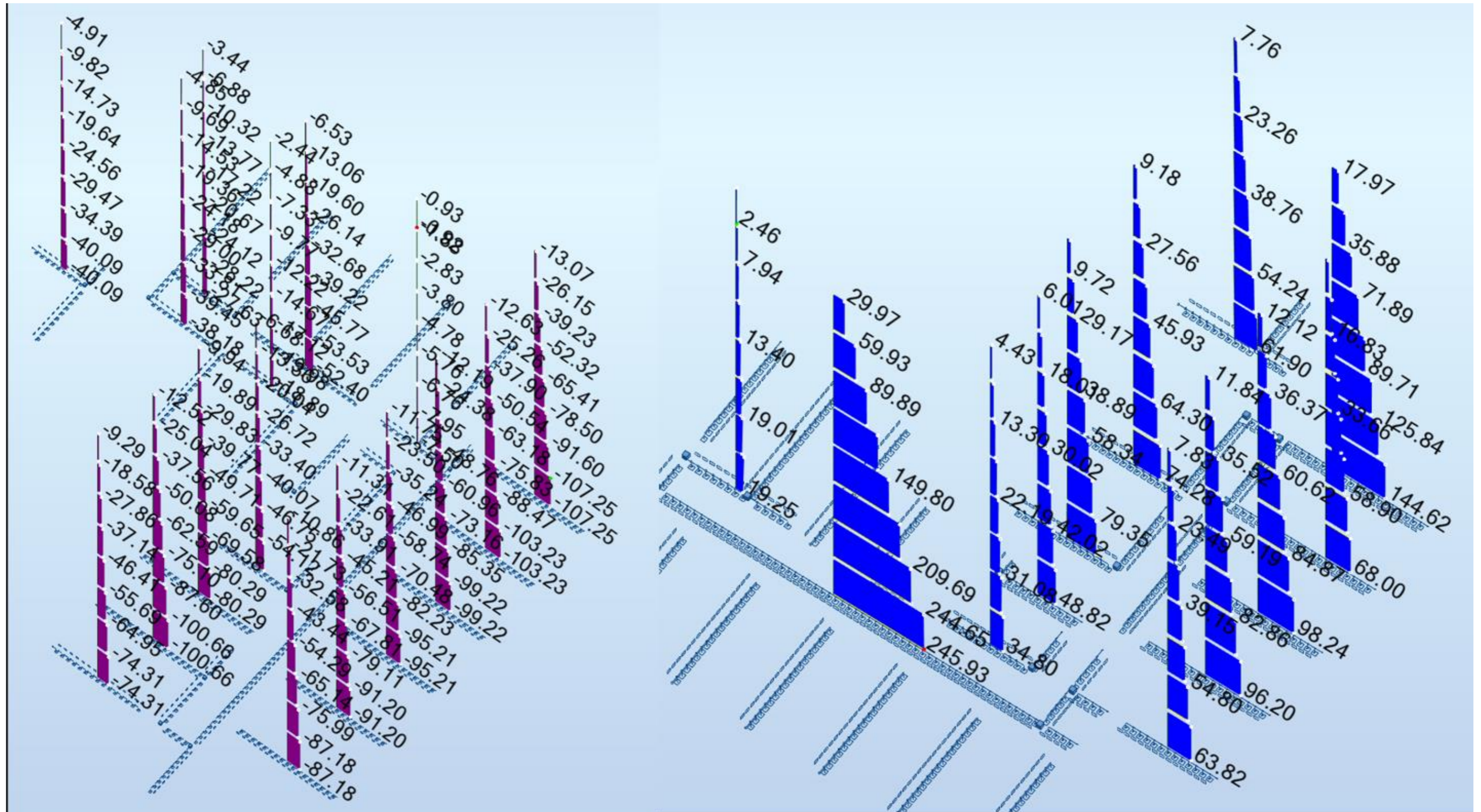
Leikkausvoimat, täysin jäykkä laatta (Full stiffening, rigid body), leikkausvoimat y- ja x-suuntaiset seinät, ulkoseinät ja väliseinät huomioiden aukot, 8 krs.



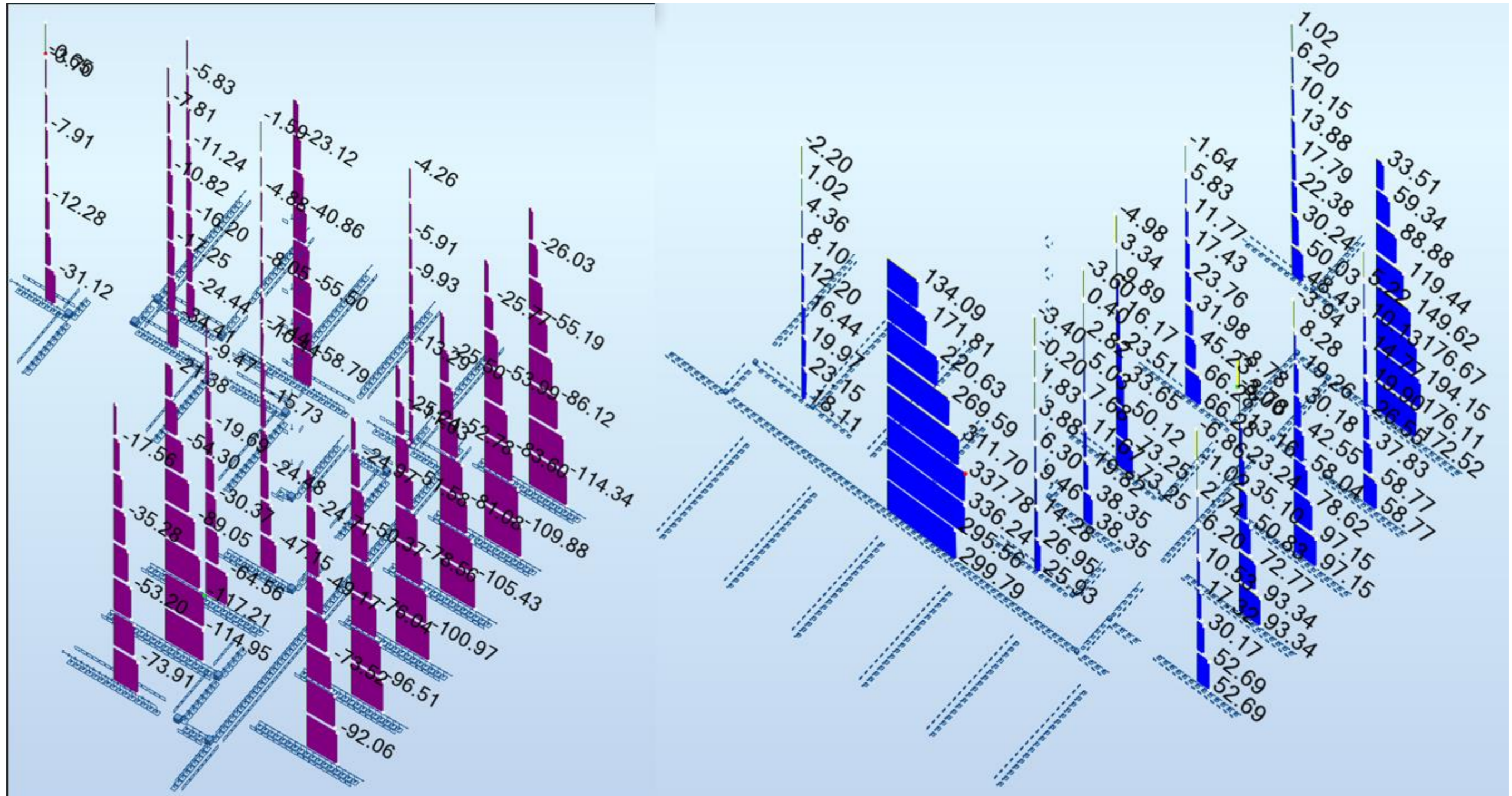
Leikkausvoimat, osittain jäykkä laatta (Partial stiffening, in XY), y- ja x-suuntaiset seinät, ulkoseinät ja väliseinät huomioiden aukot, 8 krs.



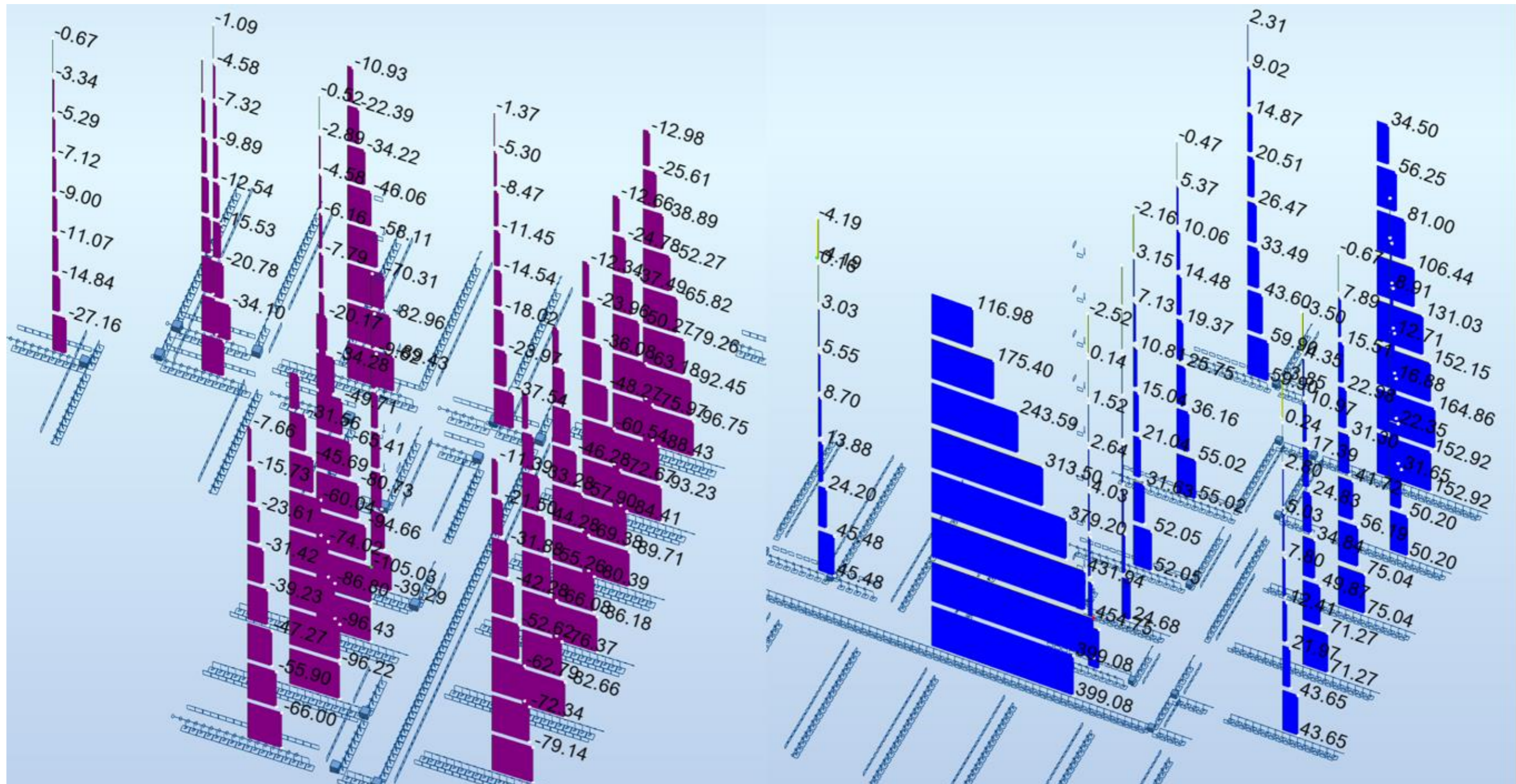
Leikkausvoimat, täysin jäykkä laatta (Partial stiffening, in XY), leikkausvoimat y- ja x-suuntaiset seinät, vain väliseinät huomioiden aukot, 8 krs.



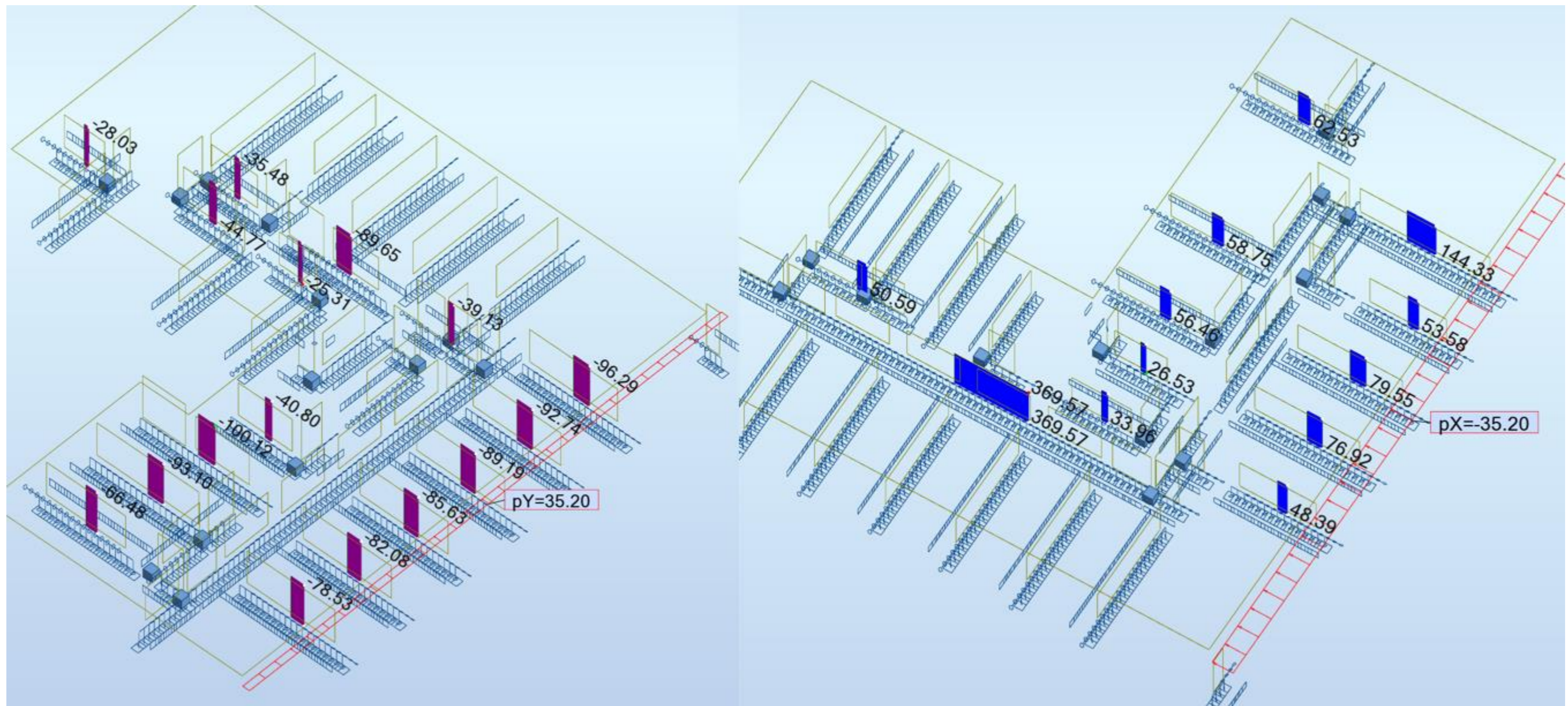
Leikkausvoimat, osittain jäykkä laatta (Partial stiffening, in XY), leikkausvoimat y- ja x-suuntaiset seinät, vain väliseinät huomioiden aukot, 8 krs.



Osittain jäykkä laatta (Partial stiffening, in XY), leikkausvoimat, x- ja y-suuntaiset seinät, vain väliseinät ilman aukkoja, 8 krs.



Leikkausvoimat, osittain jäykkä laatta (Partial stiffening, in XY), leikkausvoimat, x- ja y-suuntaiset seinät, vain väliseinät ilman aukkoja, 1 krs.



Leikkausvoimat, osittain jäykkä laatta (Partial stiffening, in XY), leikkausvoimat, x- ja y-suuntaiset seinät, vain väliseinät ilman aukkoja, vaakavoima vain ylimmässä kerroksessa, 8 krs.

