



SAVONIA

Teklan ja Robotin käyttö kerrostalon jäykistyksessä

Jarno Ylönen

Opinnäytetyö



Ammattikorkeakoulututkinto

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Jarno Ylönen	
Työn nimi Teklan ja Robotin käyttö kerrostalon jäykistyksessä.	
Päiväys 15.12.2012	Sivumäärä/Liitteet 53/14
Ohjaaja(t) Lehtori Viljo Kuusela ja Lehtori Harry Dunkel	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Insinööritoimisto Creo3 Oy	
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia miten <i>Tekla structures</i> ja <i>Autodesk Robot structural</i> -ohjelmia voitaisiin käyttää elementtirakenteisen kerrostalon jäykistyksen laskennassa. Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, miten kyseisiä ohjelmia voidaan käyttää yhdessä kerrostalon rakenelaskelmissa ja rakennesuunnittelussa. Opinnäytetyön toimeksiantajana oli Insinööritoimisto Creo3 Oy.</p> <p>Aluksi työssä esiteltiin yleisesti mitä tietomallinnus on, millaisia ohjelmistoja on ja miten rakennus jäykistetään. Rakennuksen jäykistyslaskelmat löytyvät mitoituksen yhteydessä. Työ aloitettiin selvittämällä, miten <i>TS-Robotlink</i> toimii <i>Teklan</i> ja <i>Robotin</i> välillä. Näiden ohjelmien yhteiskäyttöä sovellettiin yrityksen antamaan projektiin. Ensin tehtiin yksinkertainen malli kerrostalon rakenteista <i>Tekla structuresilla</i>. Tämän jälkeen malli siirrettiin <i>Robot structural</i>-ohjelmaan. Lopuksi rakenneosat mitoitettiin <i>Robot structuralilla</i>. Vertailulaskelmat tehtiin käsin ja <i>Excel</i>-taulukkolaskentaohjelmalla.</p> <p>Työn tuloksena saatiin ohjekirja, jossa selostetaan, miten <i>Teklan</i> ja <i>Robotin</i> välinen linkki toimii. Tulokset osoittivat, että <i>TS-Robotlink</i> on hyödyllinen lisä rakennesuunnitteluun, mutta <i>Teklan</i> ja <i>Robotin</i> käyttö yhdessä vaatii harjoittelua. Lisäksi todettiin, että tulosten analysointi on hieman monimutkaista <i>Robotissa</i>. Tutkimuksen mukaan <i>TS-Robotlink</i> ei sovellu hyvin kerrostalon jäykistyksen mitoitukseen. Sekä käsilaskennan että <i>Robotin</i> tulokset olivat osittain vertailukelpoisia. Tulvaisuudessa ohjelmien väliseen kehitykseen olisi hyvä kiinnittää huomiota, jotta niiden käytettävyys paranisi ja ohjelmista saisi paremman hyödyn rakennesuunnittelussa.</p>	
Avainsanat Tekla structure, Robot structural analysis, mastoseinäjäykistys	
Julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme Construction Engineering			
Author(s) Jarno Ylönen			
Title of Thesis Use of <i>Tekla Structure</i> and <i>Robot Structural Analysis</i> for Apartment Bracing Calculations.			
Date	15 December 2012	Pages/Appendices	53/14
Supervisor(s) Mr Viljo Kuusela, Lecturer & Mr Harry Dunkel, Lecturer			
Client Organisation/Partners Insinööritoimisto Creo3 Oy			
Abstract <p>The aim of this thesis was to study how to use <i>Tekla</i> structure and <i>Robot structural analysis</i> applications for precast structure bracing. The purpose was to find out how these applications can be used for precast structure apartment building bracing calculations and structure design. This final year project was commissioned by Insinööritoimisto Creo3 Oy.</p> <p>First, the theories on building information model, software demonstration, stiffening of a building, stiffening methods and stiffening calculations were presented. The study was started by exploring how the link between <i>Tekla</i> and <i>Robot</i> works. The use of these two programs was adapted to the project given by Creo3 company. First a simple model apartment model was created by <i>Tekla structures</i> which was then transferred to <i>Robot structural</i>. Then the model's joints and the components' durability were verified in <i>Robot structural</i>. The comparison calculations were made by hand and <i>excel</i> program.</p> <p>As a result of this thesis, a manual for how the link between <i>Tekla</i> and <i>Robot</i> works was created. The results showed that the <i>TS-Robotlink</i> is a very useful addition for structural design, but the use of <i>Tekla</i> and <i>Robot</i> in the same project need more practise. Furthermore, <i>TS-Robotlink</i> is not very useful for bracing calculations. The results which were calculated by hand and the <i>Robot's</i> results were also comparable. In the future, continuous development of the programs will be very important in order to get get better benefit from the <i>Tekla</i> and <i>Robot</i> for structure design.</p>			
Keywords Tekla structure, Robot structural analysis, bracing of a building			
Public			

Sisältö	
ALKUSANAT	7
1 JOHDANTO.....	8
2 TIETOMALLINNUKSEN RAKENNESUUNNITTELUSSA.....	9
2.1 Tietomallinnuksen tavoitteet ja hyödyt	9
2.2 Tietomallinnuksen vaatimukset	10
2.3 Rakennesuunnittelussa käytettävät ohjelmisto.....	10
2.3.1 Autodesk Robot structural.....	11
2.3.2 Tekla structures.....	11
2.3.3 Teklan ja Robotin yhteiskäyttö	11
3 RAKENNUKSEN JÄYKISTYS	12
3.1 Jäykistyksen periaatteita	12
3.2 Perusvaatimuksia.....	12
3.3 Suunnittelu	12
3.4 Jäykistyksen valinta	13
3.5 Jäykistyksen tarkastelu.....	14
3.5.1 Alustava tarkastelu.....	14
3.5.2 Asennusvaiheen tarkastelu.....	14
3.5.3 Käyttötilanteen tarkastelu	14
3.5.4 Onnettomuustilanteen tarkastelu	15
3.6 Kuormitukset.....	15
3.6.1 Pysty- ja vaakakuormat	17
3.6.2 Onnettomuuskuormat.....	17
3.7 Jäykistysjärjestelmät.....	17
3.7.1 Mastopilarijäykistys	17
3.7.2 Mastoseinäjäykistys.....	18
3.7.3 Kehäjäykistys.....	19
3.7.4 Levyjäykistys	20
3.7.5 Ristikkojäykistys.....	21
3.7.6 Yhdistelmäjäykistys	21
4 KERROSTALON JÄYKISTYS TUTKIMUS.....	22
5 JÄYKISTYKSEN MITOITUS ANALYYSIMALLIA HYÖDYNTÄEN	23
5.1 TS-Robot linkin asennus.....	23
5.2 Teklan malli ja analyysimalli.....	23
5.2.1 Kuormien määrittely	25
5.2.2 Analyysimallin laadinta.....	27
5.3 Laskenta ja analysointi Robot structuralissa	31

5.4	<i>Robotin</i> laskenta ja analysointi tulokset.....	33
5.5	Havaintoja.....	33
6	JÄYKISTYKSEN MITOITUS.....	34
6.1	Kuormat.....	34
6.1.1	Pysyvät pystykuormat.....	34
6.1.2	Lumikuorma.....	35
6.1.3	Tuulikuorma.....	35
6.1.4	Muut vaakasuuntaiset kuormat.....	37
6.2	Kuormitusyhdistelyt.....	38
6.3	Vaakavoimien jakautuminen jäykistäville osille.....	39
6.3.1	Välipohjien jäykistäminen.....	39
6.3.2	Kuormien jakautuminen mastoseinille.....	39
6.4	Leikkausvoima ja momentti jäykistysrakenteessa.....	46
7	TULOSTEN ANALYSOINTI.....	49
7.1	Yksinkertainen malli.....	49
7.2	Tulokset.....	50
8	POHDINTA.....	52
	LÄHTEET.....	53

LIITTEET

Liite 1 Tutkimuksen lähtökohdat

Liite 2 Tekla structure mallin siirto Robot structuraliin

ALKUSANAT

Kiitän Insinööritoimisto Creo3 Oy:tä mahdollisuudesta tehdä opinnäytetyö heille, lisäksi kiitän Timo Härköstä sekä koko Creo3:n henkilökuntaa työn ohjauksesta.

Kiitos myös työni ohjauksesta Savonia-ammattikorkeakoulun lehtoreille Viljo Kuuselalle ja Harry Dunkelille.

Kuopiossa 15.12.2012

Jarno Ylönen

1 JOHDANTO

Tietomallinnus on nykypäivänä osa jokapäiväistä rakennus- ja rakennesuunnittelua ja tietomallinnus lisää myös mahdollisuuksia verrattuna 2D-suunnitteluun. Yksi tietomallinnuksen mahdollisuuksista on tietomallien tiedon vaihto, analysointi ja laskentaohjelmien kanssa, joiden käyttöä tulisi tulevaisuudessa lisätä insinööritoimistoissa. Tästä saatiin idea tehdä opinnäytetyö tietomallin siirrosta ja analysoinnista laskentaohjelmassa.

Työn tarkoituksena on selvittää miten kerrostalon rakennemallin voi siirtää *Tekla structuresta Autodesk Robot structural analysis*-ohjelmaan. Lisäksi tutkitaan voiko kyseisiä ohjelmia hyödyntää elementtirakenteisen kerrostalon jäykistyksen mitoituksessa. *Robotilla* laskettuja tuloksia vertaillaan myös käsin ja *Excel*-taulukkolaskentaohjelmalla saatuihin tuloksiin luotettavuuden varmistamiseksi. Jäykistyksen mitoituksessa keskitytään mastoseinäjäykistykseen.

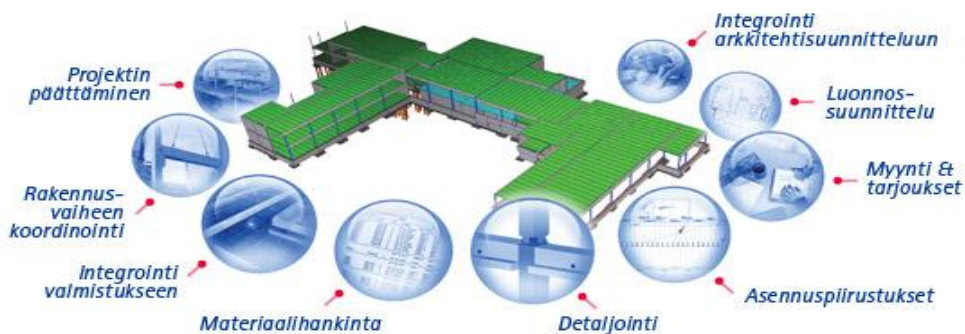
Työn tilaajana toimii Insinööritoimisto Creo3 Oy. Heidän mielestään on tärkeä tutkia ohjelmien välistä linkkiä, ja miten sitä voitaisiin soveltaa rakennesuunnittelussa.

Käsilaskennassa käytettäviä lähteitä ovat SFS-EN 1992-1-1, RTT Rakennusteollisuus ry. sekä betoniteollisuus ry.

Kuvien lainaamiseen luvan ovat antaneet. Betoniteollisuus ry ja Tekla Oyj.

2 TIETOMALLINNUS RAKENNESUUNNITTELUSSA

Tietomalli on 3D-tietokonemalli, jonka tarkoituksena on koota kaikki tarvittava tieto yhteen. Tietomallissa on rakennuksen ja rakennusprosessin koko elinkaaren kokonaisuus digitaalisessa muodossa. Malli myös mahdollistaa analyysien ja simulointien tekemisen, tämä edistää vaatimukset ja normit täyttävien ja helposti rakennettavien kohteiden suunnittelua. Tietomalliin voidaan liittää myös tietoa aikatauluista, hankinnoista ja hinnoista kuva 1 havainnollistaa tietomallinnuksen vaiheita.



Kuva 1 Tietomallinnus vaiheittain (Tekla)

2.1 Tietomallinnuksen tavoitteet ja hyödyt

Rakennushankkeeseen liittyvät tiedot voivat olla hajallaan ja epätarkkoja, mikä aiheuttaa ongelmia toimitusvaiheessa. Kun varmistetaan, että tieto kulkee ja pitää paikkansa, saadaan huomata, että kustannukset pienenevät, jätteen määrä vähenee ja projektit valmistuvat ajallaan. (Tekla.) Tämä kuvaa hyvin tietomallinnuksen hyötyjä verrattuna 2D-suunnitteluun.

Tavoitteena tietomallinnuksessa on suunnitteluprosessin parantaminen, kustannusten pienentäminen ja laadun parannus sekä hallita suunnittelu, ylläpito ja käyttö paremmin kuin vanhoilla menetelmillä. Tietomalleista saadaan piirustukset ja muut dokumentit, joita rakentamisessa tarvitaan, tämä lisää tuottavuutta. (RIL [www-sivut](http://www.ril.fi).)

Hyötynä tietomallissa on, havainnollisuus 3D-mallien myötä, laajempi tietosisältö ja eri suunnittelun osa alueiden yhteensovittaminen sekä laadukkaampi tuote lopputuloksena. Tietomalli mahdollistaa simulaatioiden teon esimerkiksi törmäystarkastelun, joka parantaa rakennesuunnittelua. Rakentamisen aikataulut voidaan sisällyttää mal-

liin, mikä helpottaa aikataulun havainnollistamista. Kuvassa 2 havainnollistetaan miten rakennushankkeen eri osa-alueet liittyvät toisiinsa tietomallinnuksessa. (RIL www-sivut.)



Kuva 2 Eri osapuolten yhteistyö tietomallinnuksessa(Tekla)

2.2 Tietomallinnuksen vaatimukset

Suunnittelijoiden on mainittava käyttämänsä mallinnusohjelma ja sen versio sekä sen IFC-muotoisen tiedoston versio. Osapuolien on yhdessä sovittava ohjelmistojen vaihtaminen projektin aikana. Muiden kuin IFC-sertifioitujen ohjelmistojen käyttö muille luovutettavien mallien tekemisessä on sallittua vain tilaajan suostumuksella. sisäisessä työskentelyssä ei ole ohjelmistorajoituksia. Rakennesuunnittelun tietomallinnus vaatimuksena on, että rakennemalliin mallinnetaan, kaikki kantavat rakenteet myös ei-kantavat betonirakenteet mallinnetaan. Lisäksi on mallinnettava sellaiset tilaa vievät rakennustuotteet joilla on merkitystä muille suunnittelijoille. Lisäksi rakennesuunnittelija määrittelee rakennetyypit tehtäväluettelon mukaisesti. (Yleinen osuus.) Yleiset tietomallivaatimukset julkaisuun on jokaisen tietomallinnushankkeeseen osallistuvan tutustuttava oman alan vaatimuksiin ja yleiseen osaan. Lisäksi vaatimukset pitää tarkastaa vuosittain, koska muutoksia voi tulla.

2.3 Rakennesuunnittelussa käytettävät ohjelmisto

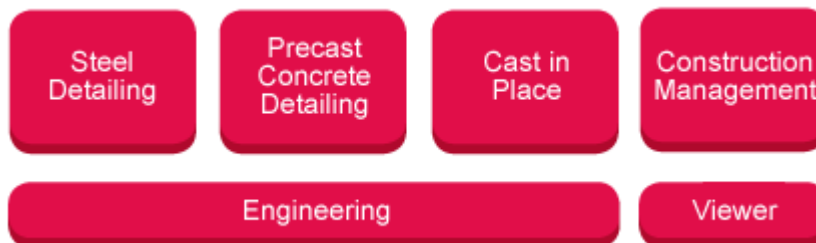
Tässä opinnäytetyössä käytettiin *Tekla structures*-ohjelmaa, jota kutsutaan myöhemmin nimellä *Tekla* ja *Autodesk Robot structuralia*, jota kutsutaan myöhemmin nimellä *Robot*.

2.3.1 Autodesk Robot structural analysis

Robot on rakennesuunnittelijoille tarkoitettu ohjelma, joka mahdollistaa menetelmät suurten ja monimutkaisten rakenteiden analysointiin ja simulointiin. *Robot* on yhteen toimiva tietomallien (BIM) kanssa, joten rakennesuunnittelijat voivat simuloida ja analysoida rakenteita nopeammin. *Robot structuralilla* voi laskea ja mitoittaa rakenteita. (Autodesk.)

2.3.2 Tekla structures

Tekla structures on rakennuksen tietomallinnus-ohjelmisto, jolla voi luoda ja hallita tarkasti detaljoituja, rakentamisen prosesseja tukevia kolmi- ja neliulotteisia rakennemalleja. Mallia voi hyödyntää rakennusprosessin kaikissa vaiheissa luonnossuunnittelusta valmistukseen, pystytykseen ja rakentamisen hallintaan. *Tekla* linkittyy eri järjestelmiin *Tekla Open API* -rajapinnan kautta. *Tekla structures* on saatavana eri rakentamisen toimialoja vastaavissa ohjelmistokokoonpanoissa teräs, elementti, paikallavalu tai täytenä versiona. (Tekla.)



Kuva 3 Teklan toimialat (Tekla)

2.3.3 Teklan ja Robotin yhteiskäyttö

Teklan tietomallin siirto *Robotiin* vaatii toimiakseen *TS-Robot*-linkin, jonka voi ladata *Teklan extranetistä* (www.extranet.tekla.com). *Teklan* ja *Robotin* välinen tiedonsiirto vaatii toimiakseen *TS-Robot*-linkin. Tietomalli mallinnetaan *Teklassa* ja luodaan analyysimalli *Teklassa*, sitten analyysimalli siirretään *TS-Robot*-linkin kautta *Robotin* laskevatavaksi.

3 RAKENNUKSEN JÄYKISTYS

3.1 Jäykistyksen periaatteita

Rakennesuunnittelijan tehtävänä on laatia rakennusten työnaikainen ja lopullinen vakavuus (stabiliteetti). Kussakin kohteessa päärakennesuunnittelija vastaa siitä, että työn aikainen ja lopullinen stabiliteetti on oikein mitoitettu ja se on riittävä. Stabiliteetti osoitetaan laskelmilla riittäväksi. Kaikkien rakennusten vakavuus tulee selvittää rakenneluokasta riippumatta. (RTT Rakennusteollisuus ry 1995.)

3.2 Perusvaatimuksia

Rakennusrungon jäykistysjärjestelmän perusvaatimuksia ovat, että sen on kannettava sille tulevat kuormat, sen on jäykistettävä rakennuksenrunko, jäykistyksen on rajoitettava koko rakennuksen ja sen osien taipumia ja heilahtelua. Lisäksi jäykistysjärjestelmän on varmistettava riittävä jäykistysvaikutus myös onnettomuustilanteessa ja asennusvaiheessa ja sen on siirrettävä kuormat luotettavasti perustuksille ja perustusten kautta maaperälle. Jäykistysjärjestelmän riittävyys tarkastetaan jäykistyslaskelmilla. Jäykistävät rakenneosat mitoitetaan niin, että niitä kuormitetaan laskennallisesti mitoittavilla vaaka- ja pystykuormilla siten, että saadaan selville määräävä vaikutus. Tällä tavalla saadaan varmuus siitä, että rakenneosissa ei ylitetä rajakapasiteetteja ja sallittuja muodonmuutoksia. (RTT Rakennusteollisuus ry 1995.)

3.3 Suunnittelu

Suunniteltaessa betonielementtirakennusta on kiinnitettävä huomiota koko rakennuksen vakavuuteen. Rakennuksen rungon jäykkyys varmistetaan pystytasoissa rakennuksen pituus- ja poikkisuunnassa ja vaakatasoissa. Riittävä jäykkyys on varmistettava asennuksen alusta alkaen valmiin rakennuksen käyttöön ja myös turvattava rajatuissa onnettomuustapauksissa. Vaiheet tarkastellaan erikseen, koska rakenteiden sallitut siirtymät ja kuormat vaihtelevat. (RTT Rakennusteollisuus ry 1995.)

Jäykistys suunnittelun kulku betonielementtirakennuksessa voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin.

1. jäykistystavan valinta
2. alustava jäykistys suunnittelu
3. asennusaikainen jäykistys suunnittelu
4. käyttötilanteen jäykistys suunnittelu
tämä voidaan jakaa neljään osaan
 - a) välipohjaelementtien jäykistys yhtenäiseksi levyrakenteeksi
 - b) vaakavoimien siirto välipohjaelementiltä jäykistäville vertikaalielementeille
 - c) kuormien siirto perustuksiin
 - d) elementtien ja liitosten suunnittelu
5. rakennuksen vakavuuden suunnittelu onnettomuustilanteen varalta.
(RTT Rakennusteollisuus ry 1995.)

3.4 Jäykistys valinta

Jäykistystavan valintaan vaikuttavat monia eri tekijöitä, kuten jäykistysratkaisun soveltuvuus rakennuksen runkoon, rakennuksen käyttötarkoitus ja muunneltavuuden vaatimukset sekä kustannukset. Betonielementtirakenteisen asuinkerrostalon rungon pääasialliset jäykistysjärjestelmät ovat Suomessa olleet mastoseinä- ja mastopilarijäykistys ja näiden yhdistelmät. (RTT Rakennusteollisuus ry 1995.)

Jäykistystapa tulee määrittää sekä käyttö- asennus- ja mahdollisessa onnettomuustilanteessa. Suunnittelijalla on useita erilaisia rakennuksen jäykistystapoja käytössään, joista valitaan parhaiten tilanteeseen sopiva.

Rakennuksen jäykistystavat:

- levyjäykistys
- mastopilarijäykistys
- mastoseinäjäykistys
- kehäjäykistys
- ristikkojäykistys
- yhdistelmäjäykistys.

(RTT Rakennusteollisuus ry 1995)

3.5 Jäykistyksen tarkastelu

3.5.1 Alustava tarkastelu

Alustavassa suunnittelussa jäykistys todetaan arvioimalla riittäväksi likimääräisesti ja varmistetaan, että jäykistävät rakenteet eivät leikkaa samassa pisteessä. Lisäksi selvitetään liikuntasauvojen tarve ja niiden sijainti ja tarkistetaan lisäksi jäykistysrakenteiden symmetrisyys. (RTT Rakennusteollisuus ry 1995.)

3.5.2 Asennusvaiheen tarkastelu

Asennusvaiheessa tilanne muuttuu koko ajan rakenteiden jäykistyksen osalta. Elementtirakenteisen rungon asennus alkaa jäykistävästä rakenteista. Tämän jälkeen asennetaan niihin tukeutuvat muut rakenteet. Asennustilanteessa kuormitus on vaihtelevaa työn etenemisen takia, yleensä kuormana on kasvava omapaino sekä lisäksi tuulikuorma ja asennuksesta tulevat kuormat esimerkiksi rakennustarvikkeiden varastointi rakenteiden päälle. (RTT Rakennusteollisuus ry 1995.)

Asennusvaiheen jäykistyksen suunnittelussa on otettava huomioon niin yksittäisten elementtien kuin koko rakennuksenrunгон vakavuus niin, että jäykistys on riittävä koko asennusvaiheen ajan. Asennusvaiheessa ei saavuteta elementtiliitosten lopullista lujuutta ennen kuin juotosvalut ovat kovettuneet. Juotosvalut on suuri merkittävä osa liitoksen kapasiteetista. Asennus järjestys elementeille suunnitellaan siten, että asennusaikaisia jäykisteitä tarvittaisiin mahdollisimman vähän. Rungon asennus ei saa kulkea enempää kuin kaksi kerrosta edellä sitä tasoa, joka on täysin jäykistetty. (RTT Rakennusteollisuus ry 1995.)

3.5.3 Käyttötilanteen tarkastelu

Rakennus on jäykistyksen osalta täysin valmis käyttötilanteessa. Jos jäykkyydessä on itsenäisten osien välillä huomattavia eroja, on huomioitava, ettei jonkin osan suurempi sivu siirtymä aiheuta haitallisia siirtymiä toiseen osaan. Kokonaisvakavuutta laskettaessa otetaan huomioon kaikki kuormat, kuten omapaino, hyötykuorma, tuuli-

kuorma, lumikuorma, maanpaine, nosturikuormat, lippurakenteista ja rakenteiden vinoudesta sekä epäkeskisyydestä syntyvät kuormat. Koko rakennuksen riittävä vakavuus on varmistettava laskelmin. Rakenteiden siirtymät eivät saa olla liian suuria, eikä rakennuksen vaakasuora liikkuminen saa haitata rakennuksen käyttöä. Käyttötilanteen jäykistyksen mitoituksessa määritetään kuormat ensin. Pystykuormien lisäksi lasketaan rakennukseen kohdistuva tuulikuorma ja lisävaakavoima.. Sitten kun jäykisteisiin vaikuttavat kuormat on laskettu, mitoitetaan rakenteet rajatilamitoitusohjeiden mukaisesti. (RTT Rakennusteollisuus ry 1995.)

3.5.4 Onnettomuustilanteen tarkastelu

Onnettomuustilanteiden varalta on tarkistettava, että rakennus ei kaadu tai sorru vaikka jokin jäykistävästä rakenteista pettäisi. Rungon vakavuus on mahdollista tarkastaa onnettomuustilanteen kuormilla tilanteessa, jossa jokin rakenneosaa on poistettu. Mitään siirtymien tai muodonmuutosten sallittuja arvoja ei onnettomuustilanteessa voida määrittää. Tavalliset onnettomuuskuormat ovat räjähdysten aiheuttama painekuorma, liikenneonnettomuuden törmäyskuorma, perustusten pettäminen ja tulipalo. Onnettomuustilanteen jäykistyksen tavoitteena on varmistaa, että vaurio ei leviä laajemmalle. Mahdollisen sortuman laajuus on rajoitettava tietylle alueelle. Tavallisin tapaus onnettomuuskuormien mitoitukselle tulee esiin, ulkoseinäpilarin mitoitus törmäyskuormille. (RTT Rakennusteollisuus ry 1995.)

3.6 Kuormitukset

Rakennuksen stabiiliteettia arvioitaessa on tunnettava kaikki mahdolliset kuormat, jotka rakennukseen kohdistuu. Kuormia ovat pystykuormat esimerkiksi rakenteiden omapaino ja vaakakuormat joita ovat esimerkiksi tuulikuorma ja maanpaine kuormat. Asennusvaiheen aikana ja onnettomuustilanteissa rakenteisiin kohdistuva kuormitus on erilainen kuin käyttötilanteessa. (RTT Rakennusteollisuus ry 1995.)

Euronormien mukaiset suunnittelukuormat:

Rakenteiden kuormat määritetään eurokoodin EC1 mukaisesti. EC1 sisältää seuraavat kuormaosat:

- EN1991-1-1: Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat. Tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat (kansallinen liite muuttuu syksyllä 2010)
- EN1991-1-2: Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-2: Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden rasitukset
- EN1991-1-3: Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumi-kuormat
- EN1991-1-4: Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat
- EN1991-1-5: Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-5: Yleiset kuormat. Lämpötilakuormat
- EN1991-1-6: Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-6: Yleiset kuormat. Toteuttamisen aikaiset kuormat
- EN1991-1-7: Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-7: Yleiset kuormat. Onnettomuuskuormat
- EN1991-2: Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat
- EN1991-3: Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 3: Nostureiden ja muiden koneiden aiheuttamat kuormat
- EN1991-4: Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Sillojen ja säiliöiden kuormat

Geotekniset kuormat kuten maan- ja vedenpaine määritetään osasta:

- EN1997-1: Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt.

Rakenteiden jäykistyslaskennassa tarvittava rakenteiden mahdollisesta vinoudesta aiheutuva lisävaakavoima esitetään eurokoodien materiaaliakohtaisissa osissa. Vinoudesta aiheutuva lisävaakavoimat on esitetty betonirakenteiden osalta siis osassa EN1992-1-1. (Elementtisuunnittelu.)

3.6.1 Pysty- ja vaakakuormat

Pysyviä pystykuormia ovat, kuten edellä mainittiin rakennusosien omapaino ja maanmassa. Muita pystykuormia on Luonnonkuorma lumi. Hyötykuormista pystykuormia ovat esimerkiksi henkilö- ja tavarakuormat. Liikennekuormat vaikuttavat pystysuoraan autosuojissa ja paikoitustasoilla. (RTT Rakennusteollisuus ry 1995.)

Pysyviä vaakakuormia ovat esimerkiksi maatyön aiheuttama maanpaine, lisäksi rakenteiden vinoudesta aiheutuvat vaakavoimat. Tuulikuorma on vaakakuorma, joka on luonnosta tuleva muuttuva kuorma. Tuulikuorma määritetään rakennuksen tuulta vastaan kohtisuoralla projektio pinta-ala kokonaisuudessaan huomioiden. Muita vaakasuuntaisia hyötykuormia ovat paikoitustasoilla ja autosuojissa vaikuttavat jarrukuormat ja törmäyskuormat. Lisäksi on rakenteiden vinoudesta, sijaintivirheistä ja kuormien epäedullisista vaikutussuunnista aiheutuvat vaakavoimat. (RTT Rakennusteollisuus ry 1995.)

3.6.2 Onnettomuuskuormat

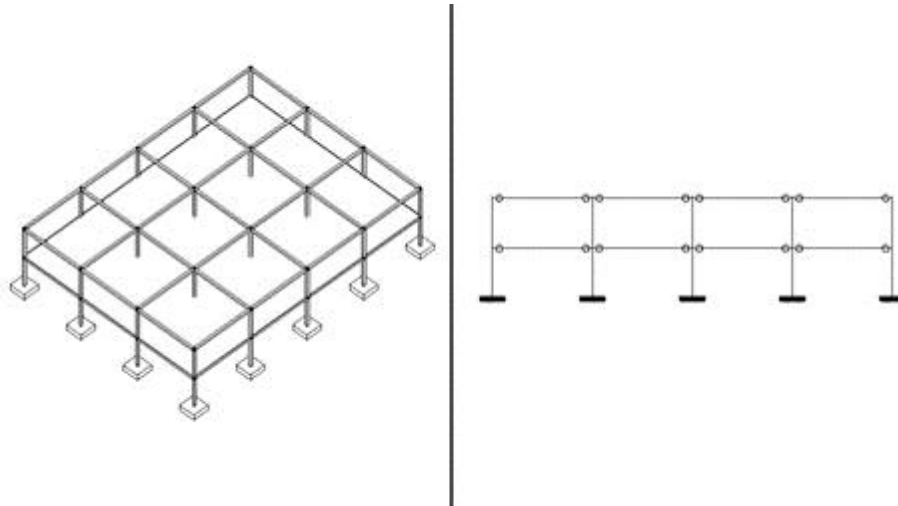
Rakennuksen vakavuuteen vaikuttavat myös onnettomuuskuormat, joita ovat lähinnä liikenneonnettomuuden aiheuttamat törmäyskuormat ja räjähdysten aiheuttamat painekuormat sekä tulipalon ja perustusten pettämisestä aiheutuvat lisäkuormat. (RTT Rakennusteollisuus ry 1995.)

3.7 Jäykistysjärjestelmät

3.7.1 Mastopilarijäykistys

Mastopilarit ovat jäykästi kiinni alapäästään ja toimivat ulokkeina vaakakuormia vastaan. Vaakakuormat siirretään suoraan pilareille ulkoseinä rakenteiden välityksellä ja tase rakenteiden kautta. Palkit kiinnitetään nivelellisesti pilareihin, katso. kuva 4 mutta palkkien on siirrettävä vaakavoimia. Tasot jakavat kuormat mastopilareille niiden jäykkyyksien suhteessa. Mastopilari jäykistys sopii mataliin rakennuksiin max. korkeus n. 12m:ä. Hyvää mastopilari jäykistyksessä on yksinkertainen tehdä ja asentaa ja muuntojoustavuus sekä mahdollistaa yhtenäiset lattiapinnat, eikä seinillä tarvita levy-

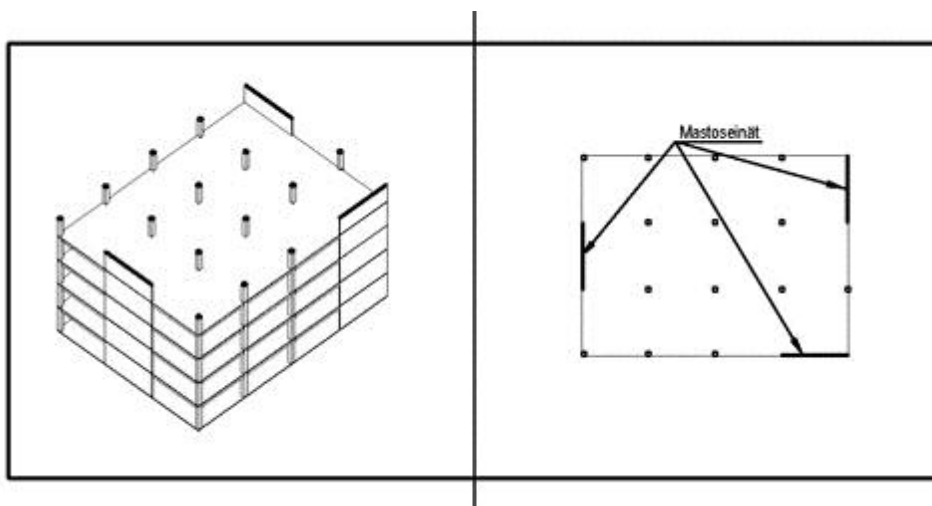
tai sauvajäkistyksiä. Huonona puolena on suurempi pilarikoko ja raudoitemäärä sekä anturoiden suurempi koko. (Elementtisuunnittelu.)



Kuva 4 Mastopilari jäykistys (Elementtisuunnittelu)

3.7.2 Mastoseinäjäykistys

Mastoseinäjäykistyksessä seinä toimii ulokepalkkina. Tasot toimivat jäykkinä levyinä, jotka siirtävät vaakakuormat mastoseinille. Mastoseinät voidaan koota seinäelementeistä, joiden vaaka- ja pystyliitossaumat mitoitetaan siirtämään voimat ja rasitukset niin, että ne toimivat yhtenäisenä rakenteena. Mastoseinä kiinnitetään perustuksiin jäykästi tai ääripisteistään. Jäykistävät seinät sijoitetaan mahdollisimman symmetrisesti rakennukseen katso. kuva 5. Mastoseinä jäykistys soveltuu myös korkeisiin rakennuksiin. Jäykistystornit esimerkiksi hissikuilut toimivat kuin mastoseinät. (Elementtisuunnittelu.)



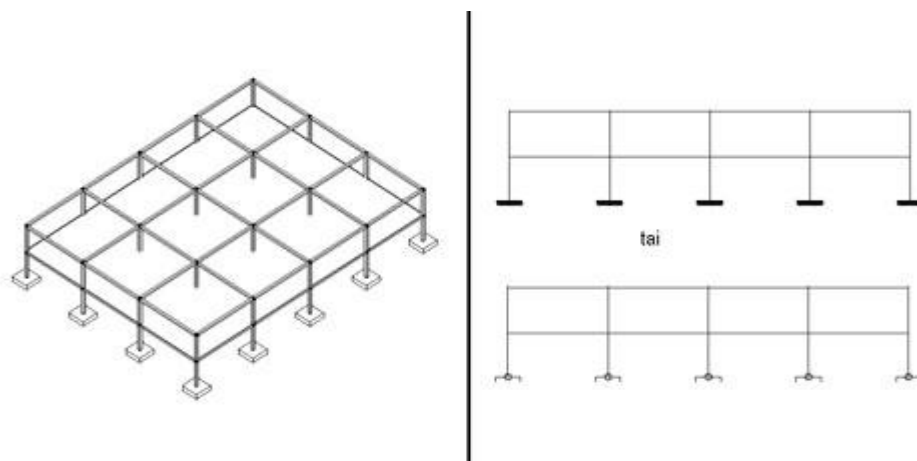
Kuva 5 Mastoseinäjäykistys (Elementtisuunnittelu)

Mastoseinäjäykistyksen hyviä puolia ovat se, että muut pystyrakenteet voidaan mitoittaa nivelellisenä ja mastoseinät ovat tehokkaita jäykistyksessä, joten niiden määrä voidaan pitää pienenä sekä muodonmuutokset, ovat seinien suuresta jäykkyydestä johtuen pieniä. Lisäksi mastoseinä on tehokas jäykistysjärjestelmä ja soveltuu korkeampiin rakennuksiin. (Elementtisuunnittelu.)

Huonoa mastoseinäjäykistyksessä on, että vaakavoimat saattavat yksittäisessä seinässä kasvaa suuriksi ja vaatia raudoitteilta ja seinäkengiltä suuria kapasiteetteja. Lisäksi jos seinien määrä on pieni, vaakavoimia siirtävät liitokset voivat muodostua vaikeiksi toteuttaa. Lisäksi jäykistysseinien aukot vaativat suurempia raudoitemääriä. (Elementtisuunnittelu.)

3.7.3 Kehäjäykistys

Jäykästi tai nivelellisesti alapäästään perustuksiin kiinnitetyt pilarit toimivat vaakakuormia vastaan kehinä. Kehäjäykistystä käytetään teollisuuden rakentamisessa yleensä. Se soveltuu parhaiten matalahkoihin rakennuksiin 1-3 kerroksisiin. Kehäjäykistetyssä rakennuksessa päästään tilojen vapaampaan käyttöön, koska jäykistävät puuttuvat. (Elementtisuunnittelu.) kuva 6 havainnollistaa rakennuksen kehäjäykistystä.



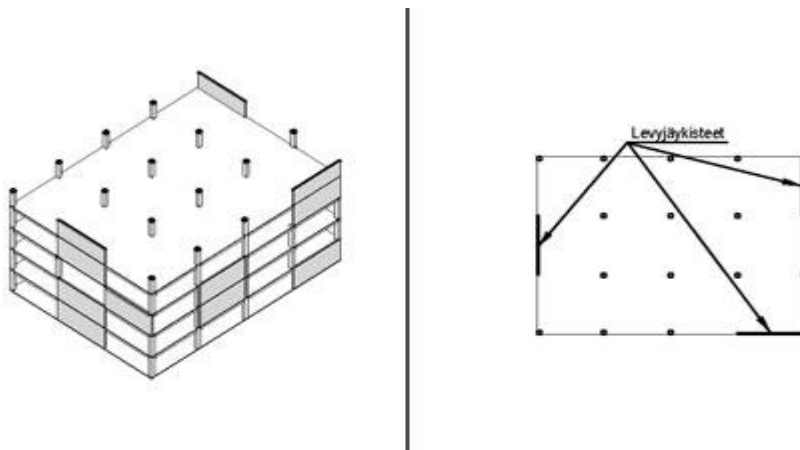
Kuva 6 Kehäjäykistys (Elementtisuunnittelu)

Kehäjäykistyksessä hyviä puolia ovat se, että perustuksissa voidaan käyttää nivellisiä liitoksia ja ylimääräisiä jäykisterakenteita ei ole haittaamassa tilojen käyttöä. Huonoa

on se, että rakennekorkeus on suurempi ja järjestelmä asettaa omat vaatimuksensa asennusjärjestykselle sekä siirtymien hallinta voi olla vaikeaa. Lisäksi elementtitekniikalla liitokset muodostuvat helposti monimutkaisiksi. (Elementtisuunnittelu.)

3.7.4 Levyjäykistys

Levyjäykistyksessä runkoon sijoitetut levyt jäykistävät rakenteet (esim. tuulensuoja ja kipsilevy puurunkoisessa talossa). Levymäiset rakenteet siirtävät vaakakuormien aiheuttamat rasitukset rakenteille ja perustuksille. Rakennuksen runkoon pitää sijoittaa levyrakenteita molempiin suuntiin. Levyjäykisteitä pitää olla vähintään kolme kappaletta ja niiden akseleilla ei saa olla yhteistä leikkauspistettä katso kuva 7. (Elementtisuunnittelu.)



Kuva 7 Levyjäykistys (Elementtisuunnittelu)

Hyvänä puolena levyjäykistyksessä on se, että perustusten koko ei yleensä suurene jäykistyneen takia ja rakenne on jäykkä, jolloin siirtymät jäävät pieniksi sekä sisätilojen käyttöä rajoittavia rakenteita ei yleensä tarvita pystykuormia kantavien rakenteiden lisäksi. Huonona puolena voidaan pitää sitä, että järjestelmä omat rajoituksensa ja vaatimuksensa asennusjärjestykselle. Lisäksi jos on vähän levyrakenteita, voivat voimia siirtävät liitokset olla vaikea toteuttaa. (Elementtisuunnittelu.)

3.7.5 Ristikkojäykistys

Ristikkojäykistys on toimintaperiaatteeltaan levyjäykistyksen kaltainen, mutta levyjäykisteet on korvattu puristus ja vetosauvoilla. On kaksi tapaa toteuttaa jäykistysristikot, ristikko on osa pystykuormia kantavaa rakennetta tai se on erillinen osa. (Elementtisuunnittelu.)



Kuva 8 Erillinen jäykistysristikkorakenne (Elementtisuunnittelu)

Ristikoita voidaan käyttää asennusaikaiseen jäykistykseen katso kuva 8, kun rakennuksen lopullinen jäykistysjärjestelmä ei vielä ole toimiva tai asennusjärjestys vaatii väliaikaisen jäykistykseen. Asennusajan jäykistysristikoissa käytetään mielellään pultti-liitoksia, jotta purkaminen olisi helpompaa. (Elementtisuunnittelu.)

3.7.6 Yhdistelmäjäykistys

Yhdistelmä jäykistys on edellä mainittujen jäykistysten yhdistelmiä, joita voidaan soveltaa kokonaistaloudellisesti ja tarkoituksenmukaisesti mahdollisimman edullisen ratkaisun saavuttamiseksi. Yleisesti käytetty yhdistelmä on mastoseinä- / kuilujäykistys yhdistettynä ristikkorakenteeseen. (Elementtisuunnittelu.)

4 KERROSTALON JÄYKISTYS TUTKIMUS

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan miten *Teklaa* ja *Robotia* voidaan hyödyntää kerrostalon jäykistysmitoituksessa. Ensin tutkitaan miten *Tekla structures* -ohjelmasta voidaan siirtää tietomalli *Autodesk Robot structuraliin*, jossa selvitetään mitä lisäosia tarvitaan kyseiseen toimenpiteeseen. Seuraavaksi tutkitaan, minkälainen mallin pitää olla, jotta se voidaan siirtää *Robotiin* laskettavaksi. Lopuksi laskettiin käsin vertailu tulokset *Robotiin* laskemiin tuloksiin, jotta voitiin selvittää *Robotin* laskemien tulosten luotettavuus ja näin selvitettiin myös onko hyötyä käyttää kyseisiä ohjelmia yhdessä jäykistykseen mitoituksessa.

Tutkimuksessa mallinnettiin seitsemän kerroksisen kerrostalon rakenteista yksinkertainen malli *Teklalla*, mallissa olivat vain seinät ja laatat, rakenteissa ei ollut aukkoja. Seuraavaksi mallinnettiin *Teklalla* kuormat ja tämän jälkeen *Teklalla* laadittiin analyysimalli yksinkertaisesta mallista. Kun analyysimalli oli valmis, se siirrettiin *Robotiin* laskettavaksi, *Robotilla* ei tehty mitään muutoksia laskentamalliin, vaan pelkästään laskettiin ja analysoitiin tulokset. Nämä vaiheet on esitelty tarkemmin kappaleessa 5.

Käsin laskettiin työn laajuuden vuoksi vain ensimmäisen kerroksen seinille tulevat kuormat ja siirtymät sekä jäykkyyspainopiste. Lisäksi laskettiin rakennuksen momentti ja leikkausvoima sekä otettiin yksi seinä kokonaistarkasteluun. Kuormina käytettiin omaa painoa, tuulikuormaa, lumikuormaa jotka ovat samat kuin analyysimallissa. Käsilaskelmien avulla saatiin vertailutulokset tutkimukselle. Nämä laskelmat on esitelty kappaleessa 6.

Tulosten analysoinnissa vertailtiin *Robotin* tuloksia käsintehtyihin laskelmiin ja tutkittiin mistä laskelmien tulosten mahdolliset erot johtuivat. Tulokset on analysoitu kappaleessa 7.

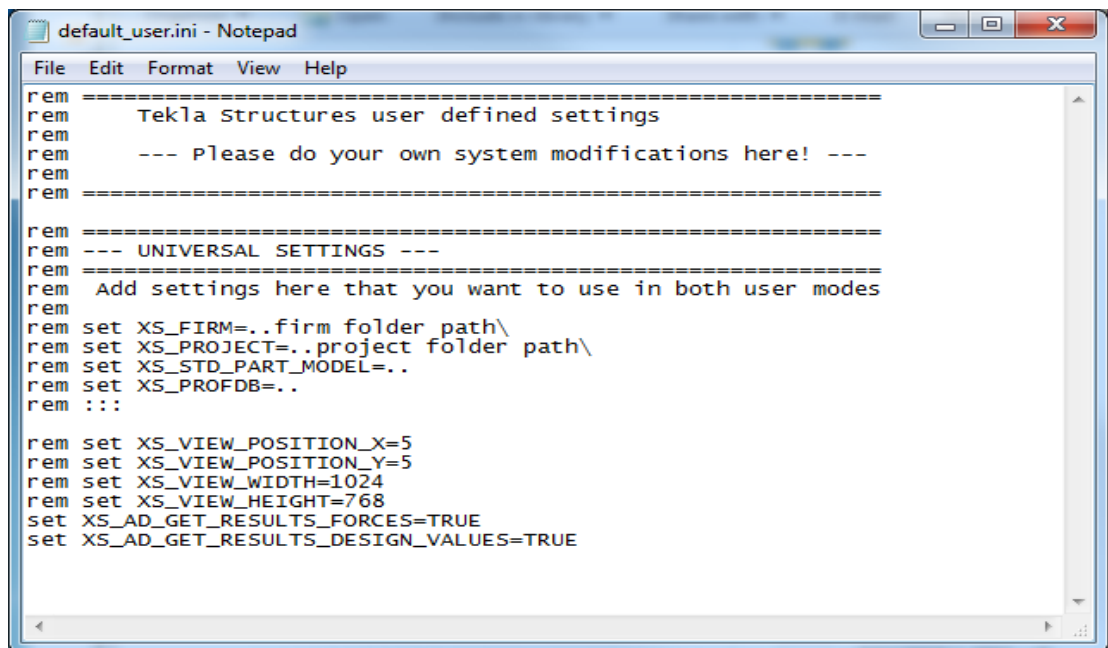
Tutkimuksessa ei mitoitettu teräsmääriä betonirakenteille eikä seinien ja laattojen välisiä liitoksia. *Teklan* ja *Robotin* yhteiskäytöstä tutkittiin vain *Robotin* RDT-formaatin siirtoa. Työssä käytetyt versiot ohjelmista olivat *Robot structural analysis 2012* ja *Tekla structures 17.0*.

5 JÄYKISTYKSEN MITOITUS ANALYYSIMALLIA HYÖDYNTÄEN

Analyysimallin laadinta on kolmivaiheinen, ensin täytyy asentaa *TS-Robot*-linkki, jonka avulla malli voidaan siirtää *Robotiin* laskettavaksi. Seuraavaksi *Teklalla* mallinnetaan laskentamalli tai käytetään valmista mallia ja laaditaan analyysimalli. Kolmantena vaiheena on siirtää analyysimalli *Teklasta Robotiin* laskettavaksi.

5.1 *TS-Robot*-linkin asennus

Teklan ja *Robotin* yhteiskäyttö vaatii *TS-Robot*-linkin, se pitää ladata *Teklan extranetistä* (www.extranet.tekla.com). Kun linkki on ladattu, asennetaan se koneelle ja lisätään tarvittavat käskyt *user.ini* -tekstitiedostoon (kuva 9).



```

default_user.ini - Notepad
File Edit Format View Help
rem =====
rem      Tekla Structures user defined settings
rem
rem      --- Please do your own system modifications here! ---
rem
rem =====

rem =====
rem --- UNIVERSAL SETTINGS ---
rem =====
rem Add settings here that you want to use in both user modes
rem
rem set XS_FIRM=..firm folder path\
rem set XS_PROJECT=..project folder path\
rem set XS_STD_PART_MODEL=..
rem set XS_PROFDB=..
rem :::

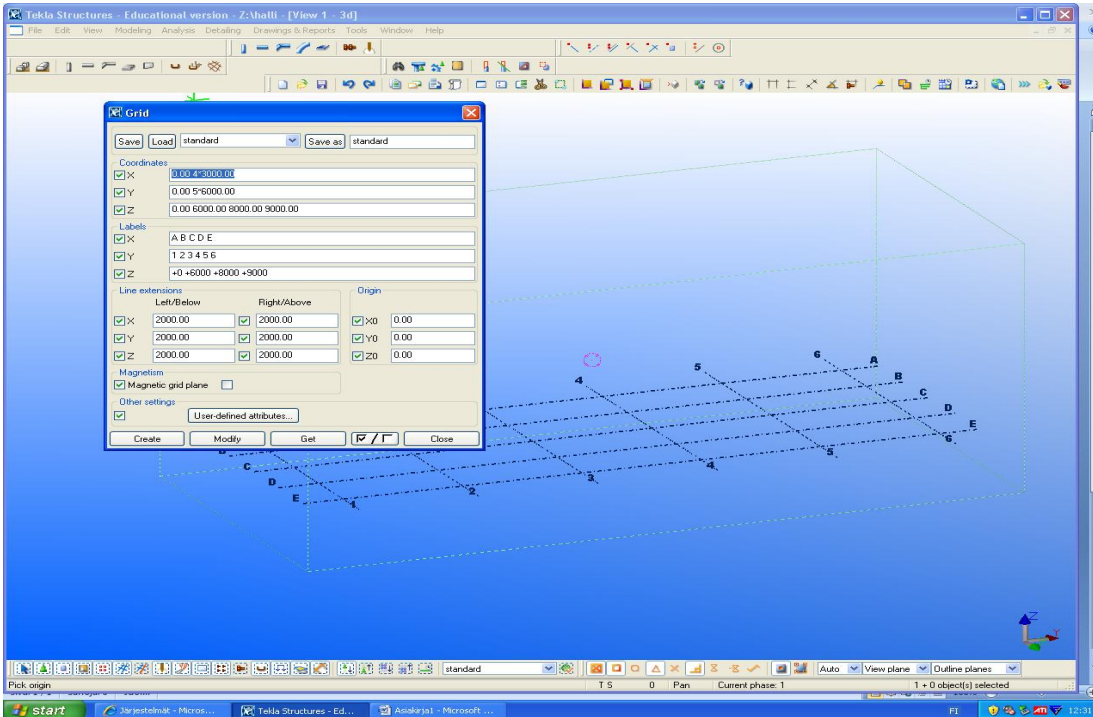
rem set XS_VIEW_POSITION_X=5
rem set XS_VIEW_POSITION_Y=5
rem set XS_VIEW_WIDTH=1024
rem set XS_VIEW_HEIGHT=768
set XS_AD_GET_RESULTS_FORCES=TRUE
set XS_AD_GET_RESULTS_DESIGN_VALUES=TRUE

```

Kuva 9 *user.ini* -tekstitiedosto

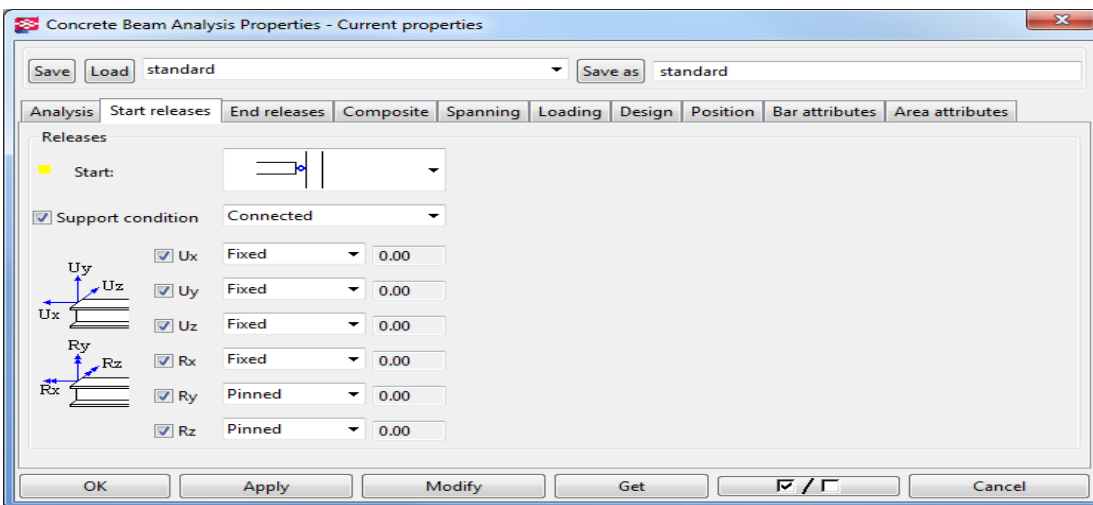
5.2 *Teklan* malli ja analyysimalli

Mallinnus *Teklalla* aloitetaan muokkaamalla *grid*-verkko halutunlaiseksi (kuva 10) Tutkittaessa kerrostalon jäykistystä, mallinnetaan yksinkertainen laskentamalli, jossa ovat vain rakennusta jäykistävät rakenteet.



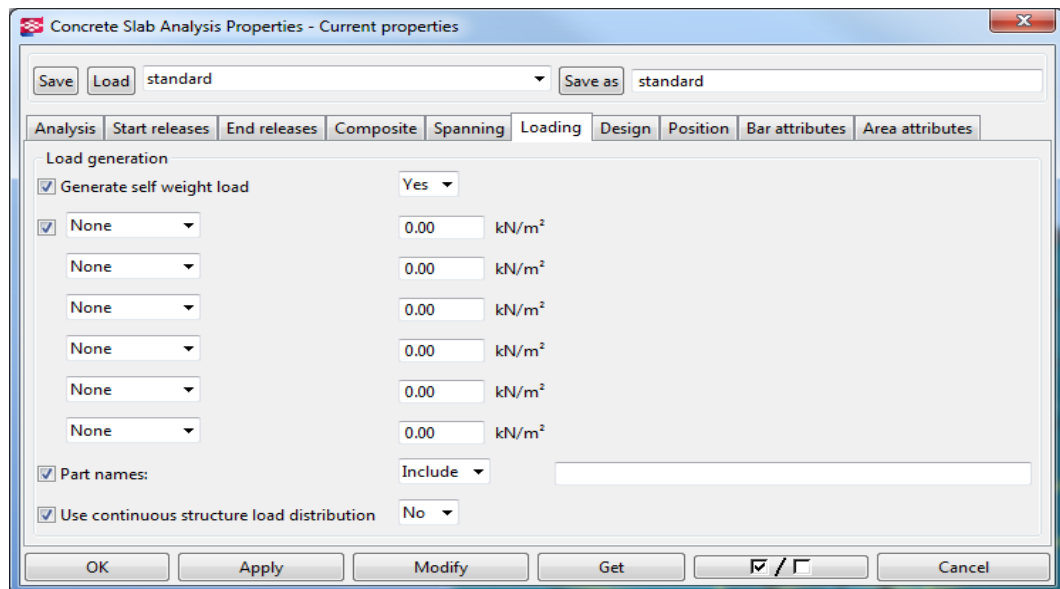
Kuva 10 Grid-verkon muokkaus

Seuraavaksi mallinnetaan seinät, tässä tutkimuksessa ei mallinnettu perustuksia, koska tutkittiin vain jäykistäviä mastoseiniä (kuva 13). Seuraavaksi seinien päälle mallinnetaan laatta. Kerrostaloa mallinnettaessa pitää myös ulkoseinät mallintaa, koska *Robot* ei muuten analysoi mallia. Tuennat voidaan määrätä mallinnusvaiheessa pilareille ja palkeille (kuva 11), mutta seinille ja laatoille ne kannattaa määrätä *Teklassa* vasta analyysimallissa.

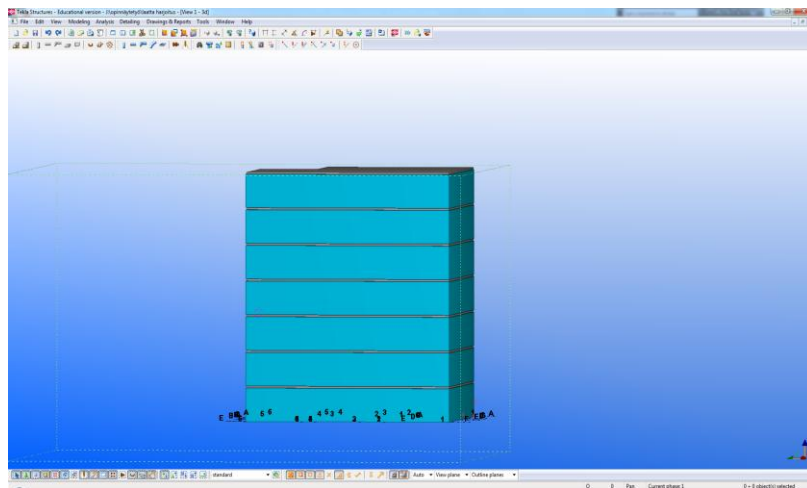


Kuva 11 Tukien määrittäminen

Rakenteiden omapaino otetaan huomioon *Analysis properties* taulusta löytyvältä, *loading* välilehdellä sijaitsevasta valikosta (kuva 12). Tuennat määritetään samasta taulusta *Start releases* ja *End releases* välilehdeltä (kuva 11).



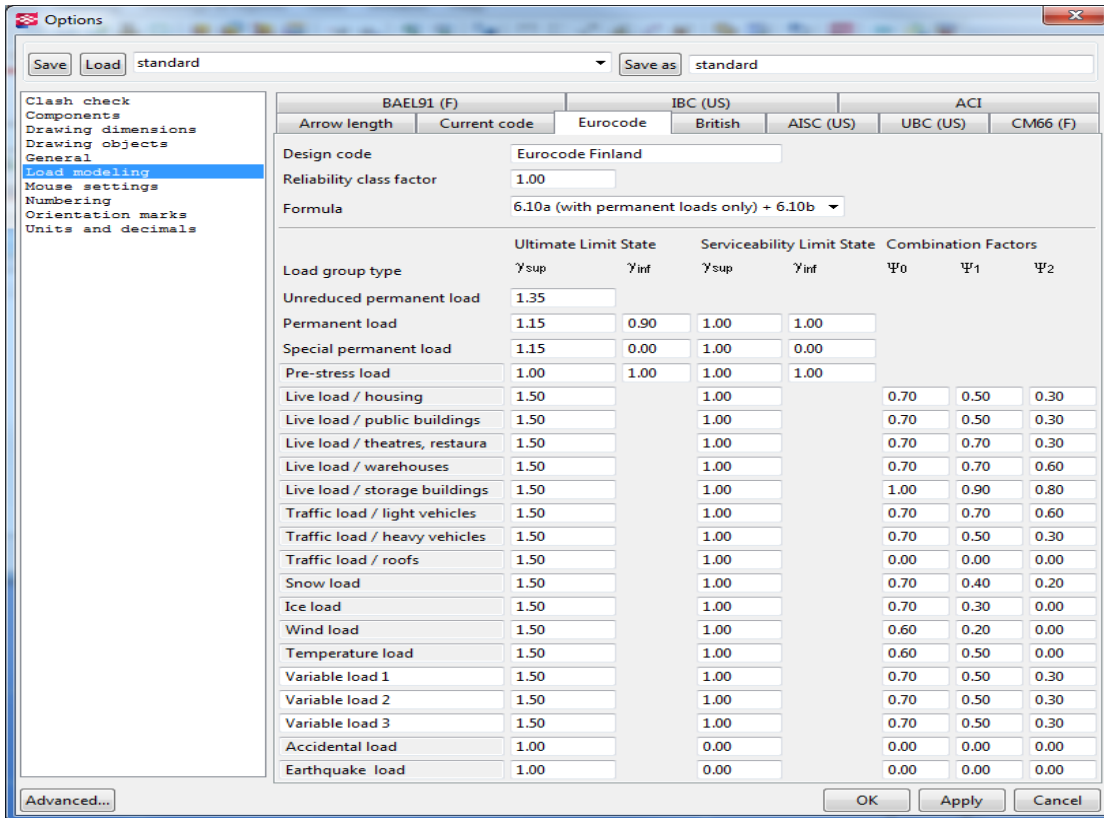
Kuva 12 Laatan omapainon lisääminen



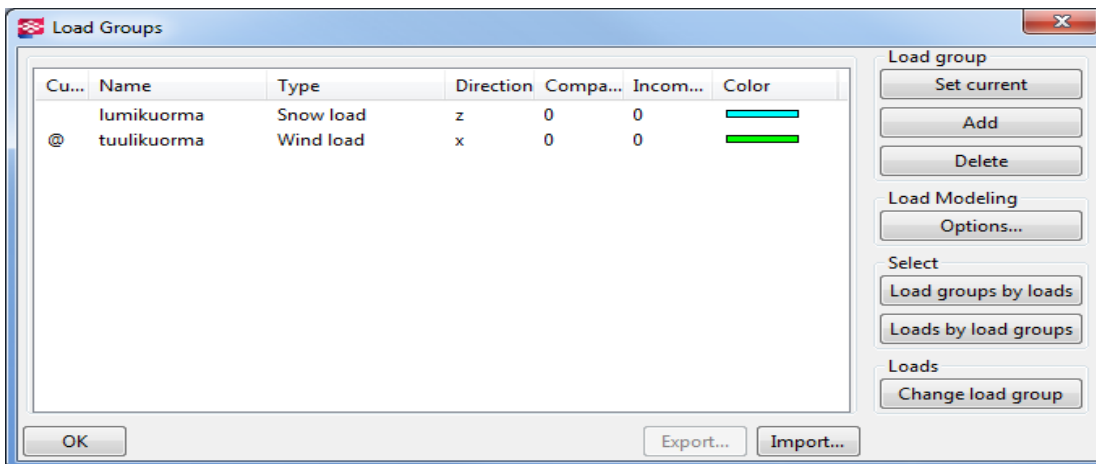
Kuva 13 Yksinkertainen laskentamalli

5.2.1 Kuormien määrittäminen

Kun laskentamalli on valmis, määritetään hyötykuormat. Omapaino on määritetty jo aikaisemmin ja *Tekla* huomioi sen valittujen materiaalien mukaan. Ensin määritellään kuormat *Load Groups*-taulussa (kuva 15) eli lumi- ja tuulikuorma. Kuormien varmuuskertoimet määrätään *options*-taulusta, josta valitaan käytettävä suunnittelunormisto (kuva 14). Kuormaryhmät lisätään *analysis*-taulusta (kuva 15).

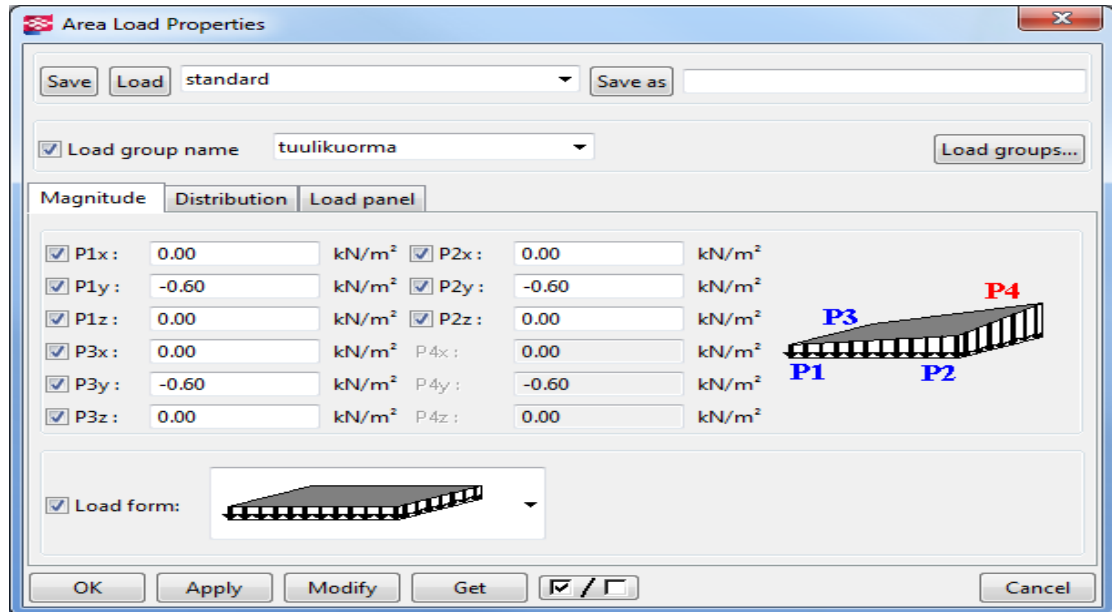


Kuva 14 varmuuskertoimien muokkaus

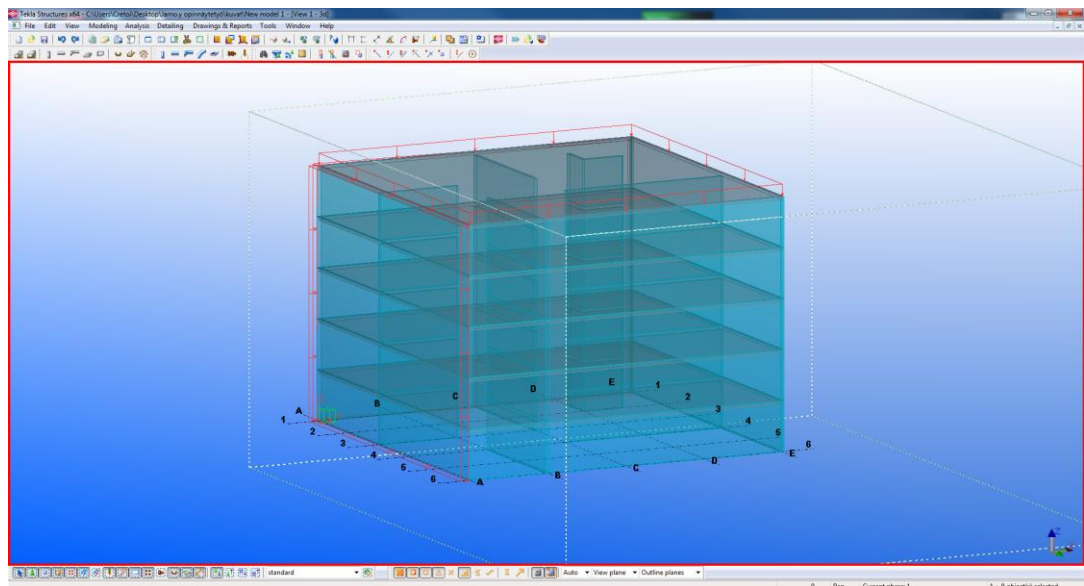


Kuva 15 Load Groups

Kuormaryhmien määrittämisen jälkeen mallinnetaan kuormat paikoilleen. Kuormat löytyvät *Teklassa Loads*-valikosta ja sieltä valitaan haluttu kuorma. *Teklassa* on monia vaihtoehtoja kuormien mallinnukseen esimerkiksi aluekuorma, pistekuorma, tuulikuorma ja lämpökuorma. Lumi ja tuulikuorma on helpointa mallintaa aluekuormana, koska silloin tuulikuormaa on helpompi muokata. Kuorman asetuksissa (kuva 16) määritellään kuorman suuruus ja suunta.



Kuva 16 Kuorman asetukset



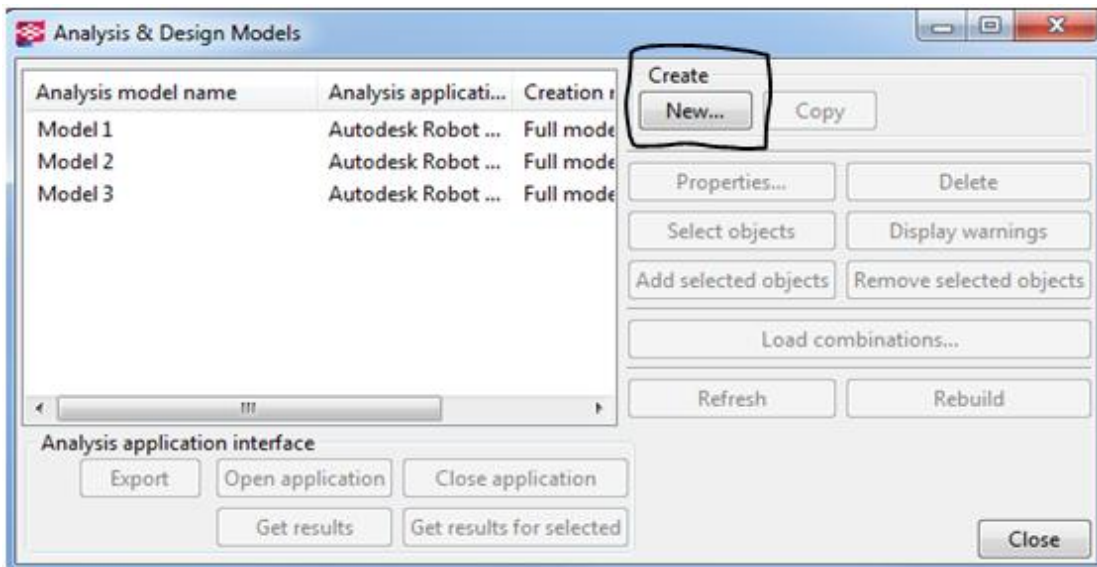
Kuva 17 Kuormat mallinnettuna

Kuten kuvasta 17 nähdään, kuormat mallinnetaan samalla tavalla kuin rakenteet. Kuormia voidaan muokata valitsemalla kuorman.

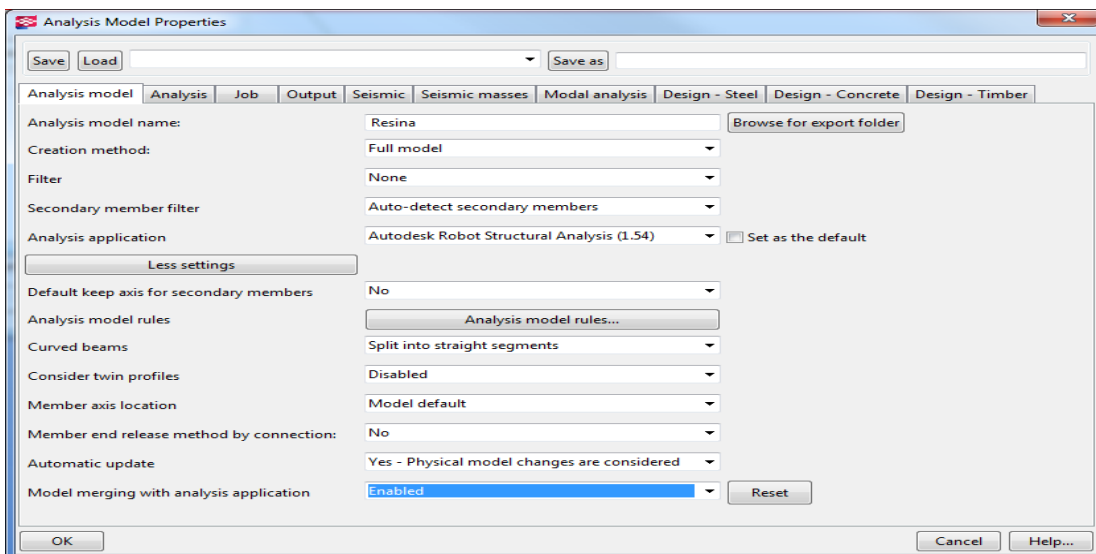
5.2.2 Analyysimallin laadinta

Mallia ei voi siirtää *Robotiin* ennen kuin siitä on tehty analyysimalli. Analyysimalli tehdään Teklan *analysis & design models*-taulussa valitsemalla *create new* (kuva18). Taulussa tehdään myös halutut asetukset analyysimallille esimerkiksi materiaali ja

suunnittelukoodi eli eurokoodi (kuva 19). Tässä opinnäytetyössä ei tutkittu sitä voiko analyysimallin siirtää muissa tiedostomuodoissa kuin *Robotin Rtd*-formaattissa. Esimerkiksi IFC- tai 3DWG-muotoja ei testattu.

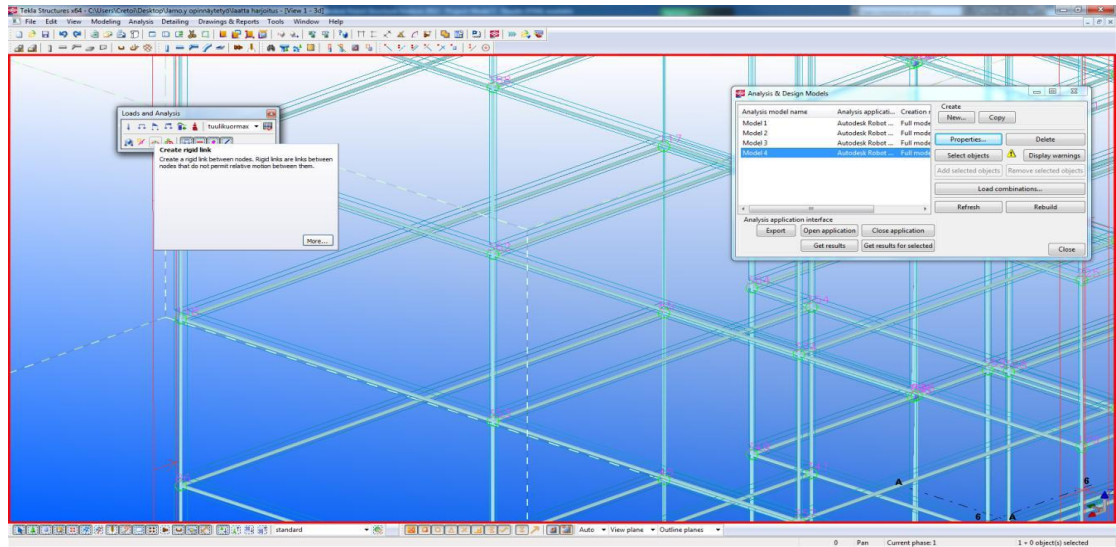


Kuva 18 Analyysimallin laadinta

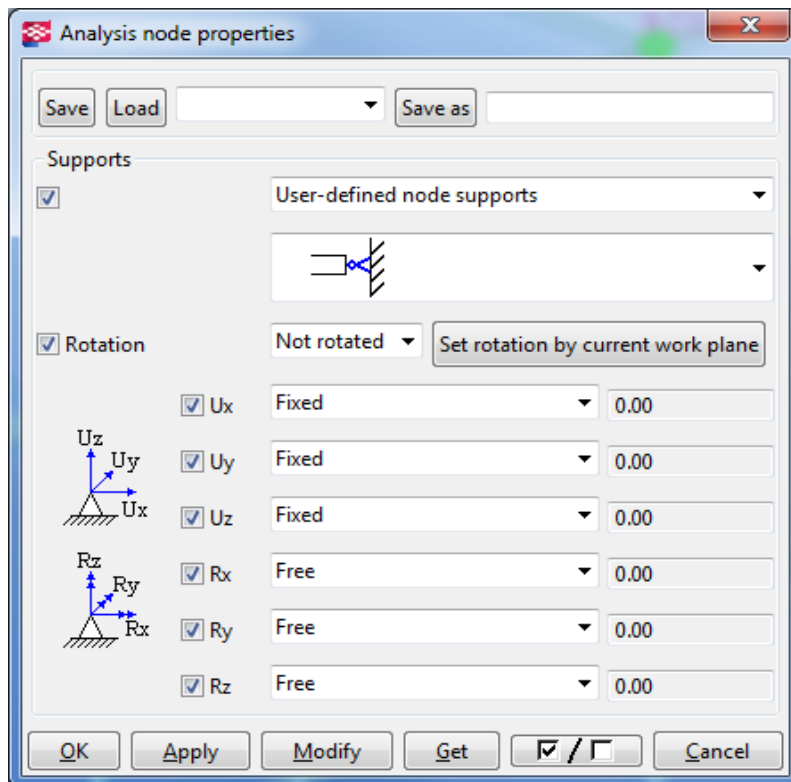


Kuva 19 Analyysimallin asetukset

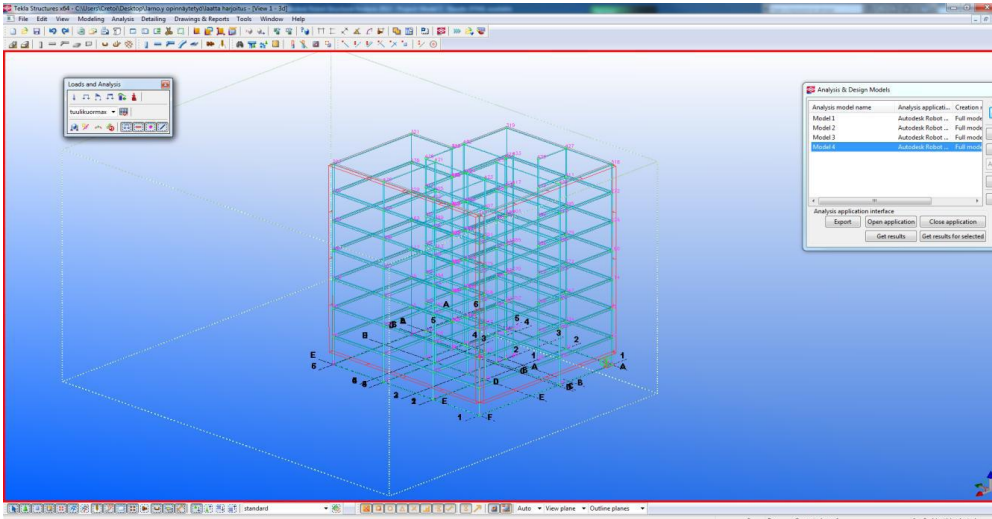
Kun uusi analyysimalli on luotu, määritetään siihen tuennat *create node*-työkalulla valitsemalla haluttu solmu ja muuttamalla tuenta halutunlaiseksi. Seuraavaksi mallinnetaan mahdolliset *rigid-linkit* rakenteisiin (kuvat 20–22). *Rigid-link* on rakenneosien välinen liitos esimerkiksi ontelolaatan ja palkin välinen liitos.



Kuva 20 Tuentojen ja *rigid*-linkkien määrittäminen

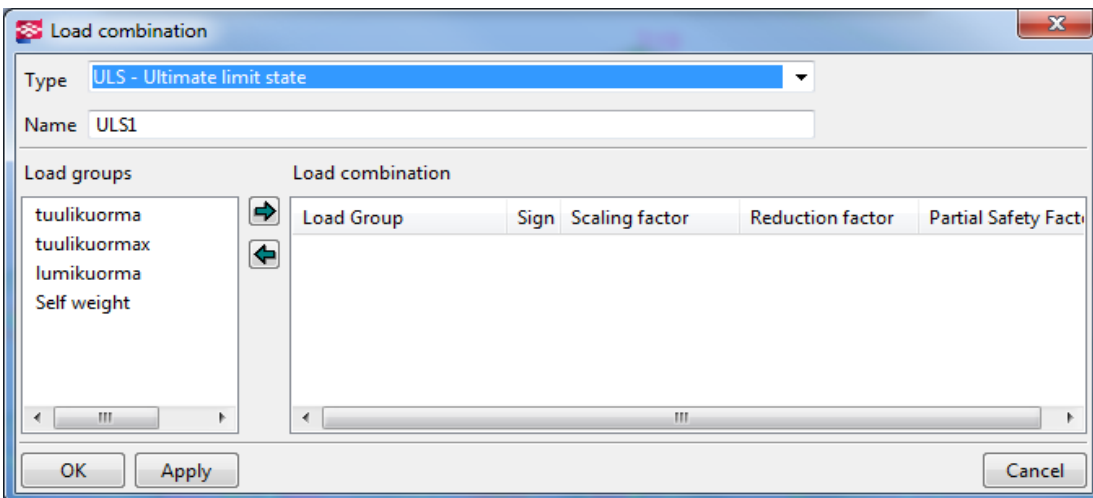


Kuva 21 Tuentojen määrittäminen



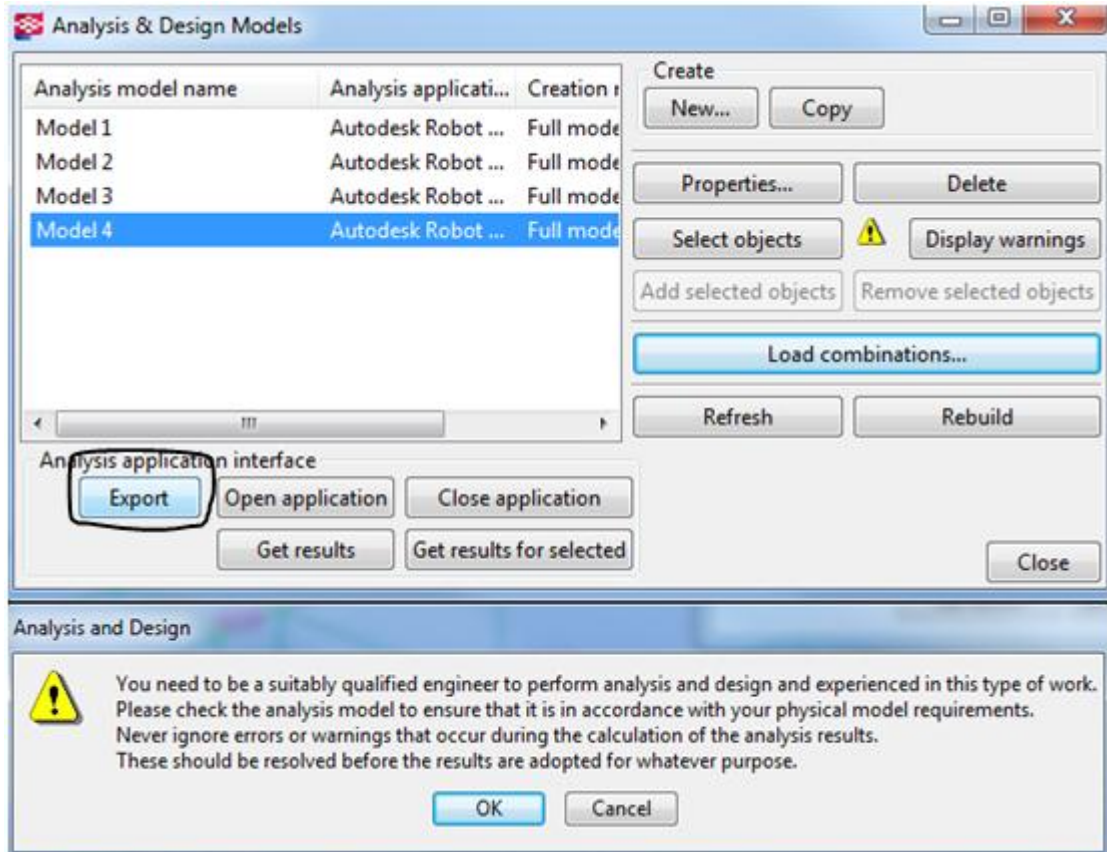
Kuva 22 Valmis analyysimalli, jossa on tuennat määritetty

Lopuksi määritetään kuormitusyhdistelmät. Kuormitusyhdistelmät tehdään valitsemalla halutut kuormitustapaukset (kuva 23), jotka tehtiin aikaisemmin kuormaryhmiin. Kuormitusyhdistelmän voi määrittää itse tai valitsemalla automaattisen kuormitusyhdistelmän, jolloin laskentaan tulee kaikki mahdolliset kuormitusyhdistelmät.



Kuva 23 Uuden kuormitusyhdistelmän määrittäminen

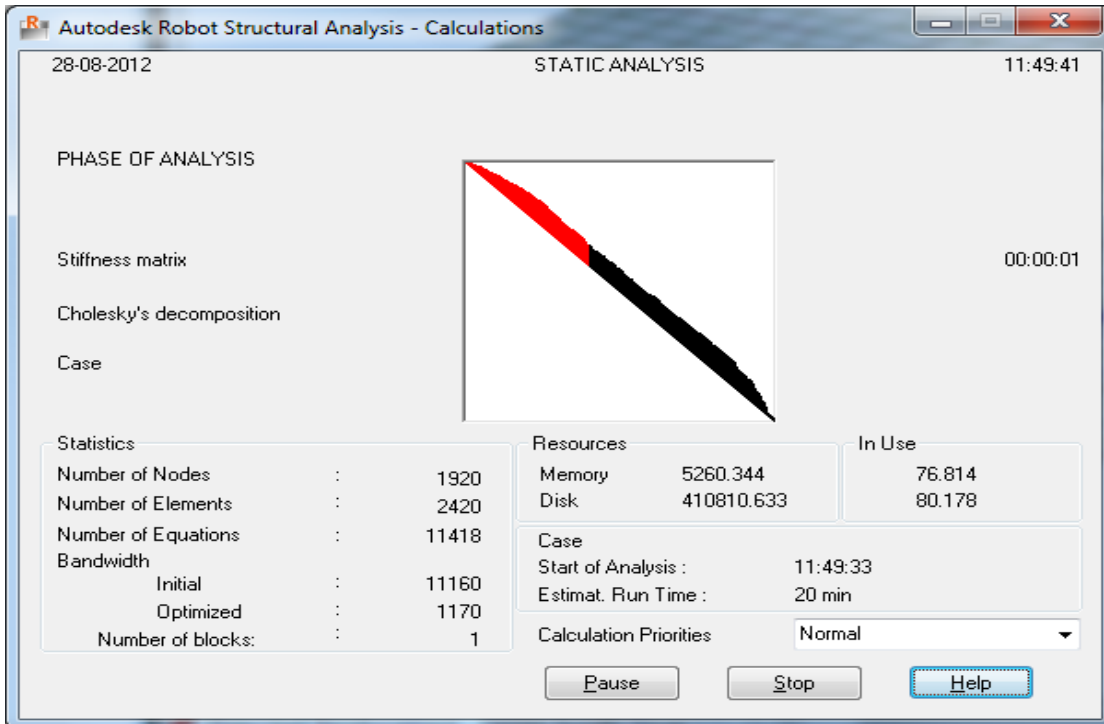
Kun kuormitusyhdistelmät on määritetty, painetaan *export*-painiketta Analysis & design models-ikkunasta (kuva 24). Tämän jälkeen Tekla varmistaa vielä, että laskennan suorittaa ammattitaitoinen henkilö. Tämän jälkeen analyysimalli siirtyy automaattisesti *Robotiin*. Jos analyysimallissa on virheitä tuennoissa tai analyysisauvoissa Tekla varoittaa niistä.



Kuva 24 Analyysimallin siirto *Robotiin*

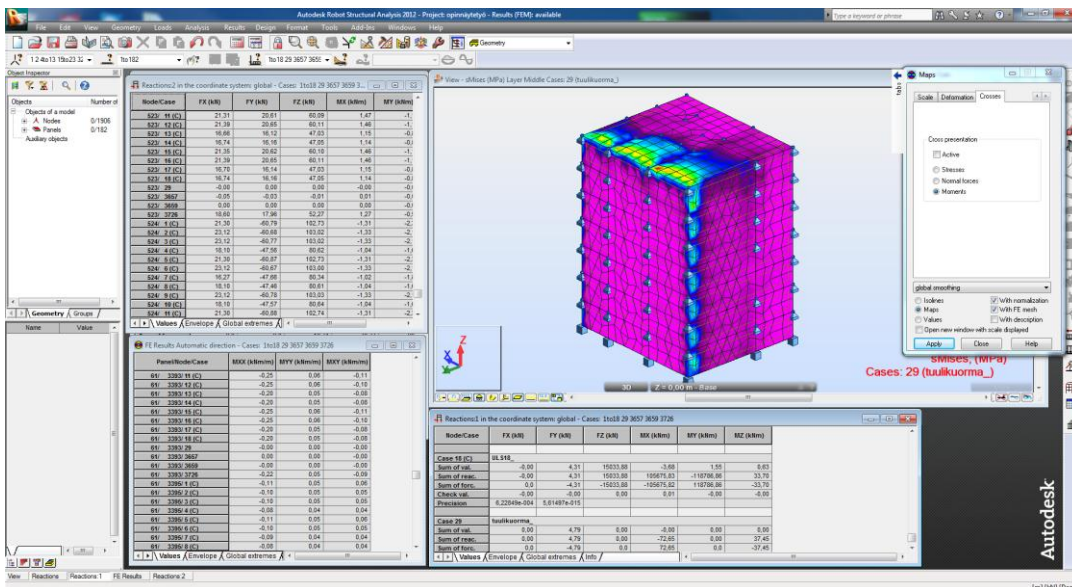
5.3 Laskenta ja analysointi *Robot structuralissa*

Robotissa laskenta käynnistyy painamalla *calculations*-painiketta, (kuva 25), voidaan tarkastella *Results*-valikosta. *Robot structural analysis professional*-versiolla saadaan tarkempia tuloksia kuin *Robot sructural analysis*-versiolla, koska *professional*-versiossa on myös fem-laskenta. *Robot* saattaa ilmoittaa, että tiettyihin laskelmiin tarvitaan *professional*-versio.



Kuva 25 Käynnissä oleva laskenta

Tulokset täytyy aina tarkastaa, koska virheitä tulee helposti esimerkiksi jos analyysimalli on mallinnettu väärin tai mallissa on ollut virhe jossain. Laskentatulosten suuruusluokista voi päätellä tulosten luotettavuutta.



Kuva 26 Tulosten analysointia Robotissa

5.4 *Robotin* laskenta ja analysointi tulokset

Kun laskenta on suoritettu, tuloksia voidaan tarkastella *Results*-valikosta. Esimerkiksi *Reactions* -valikosta näkee rakennukseen kohdistuvia kokonaisvoimia, suuruusluokkia tarkastelemalla voidaan havaita mahdolliset virheet. Kuten kuvasta 26 nähdään, tulosten tarkastelu on vaikeaa, koska tuloksia tulee paljon. Seinille tulevia kuormia voi tarkastella avaamalla *results* -valikosta *Plate and shell results*-valikon ja sen jälkeen valitsemalla seinän hiirellä, tämän jälkeen tulokset näkyvät taulukossa. Tässä tutkimuksessa ei tutkittu voiko *Robotista* siirtää mallin takaisin *Teklaan*, koska siitä ei ole riittävä hyötyä jäykistystutkimuksessa ja riittävät tulokset saadaan *Robotista*.

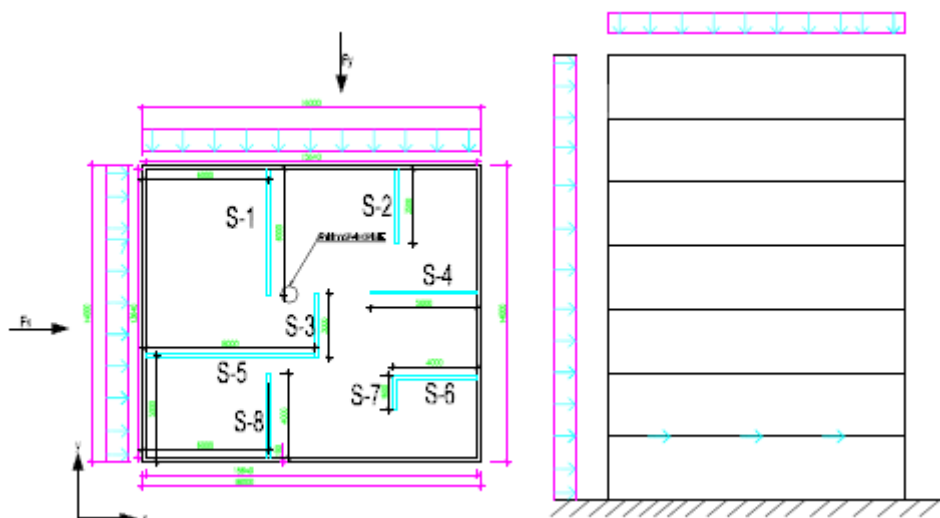
5.5 Havainnot

Teklalla mallinnettaessa on geometrian oltava oikein määritelty eli rakenteet on mallinnettu oikein ja materiaalit on määritelty rakenteisiin. Lisäksi kuormat, tuennat ja solmut tulee määrittää laskentamalliin, jotta saadaan halutut laskentatulokset. Analyysimallin voi tehdä myös valmiista mallista *Teklassa*, mutta siitä on hyvä filteroida kaikki ylimääräinen pois.

Seinien välisiä liitoksia esimerkiksi vaijerilenkkejä ei voi siirtää *Teklasta Robotiin*, eli käyttäjä joutuu mitoittamaan ne *Robotista* saatujen voimasuureiden avulla. Lisäksi tässä tutkimuksessa on oletuksena, että anturaa ei huomioida analyysimallissa. *Robotissa* voidaan myös laskea seinille ja laatoille tarvittavat teräsmäärät. Jos *Teklan* mallissa tekee rakenteisiin aukkoja, ne muuttuvat anti-materiaksi ja siirtyvät *Robotiin* analyysimallin mukana, mutta *Robotissa* aukot eivät näy ja *Robot* ei laske mallia, koska se ei ymmärrä aukkoja.

6 JÄYKISTYKSEN MITOITUS

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan vain mastoseinäjäykistys, joka toimii vertailulaskelmana *Robotin* laskemille analyysimallin tuloksille. Tarkoituksena oli selvittää voiko *Robotin* laskelmiin luottaa ja voiko niitä käyttää mastoseinäjäykistyksen mitoituksessa. Tutkimus kohteena käytettiin 7-kerroksista kerrostaloa, josta tehtiin yksinkertainen laskentamalli (kuva 27). Laskennassa ei myöskään mitoiteta teräsmääriä jäykistäville seinille. Staattisessa mallissa seinät on nivelellisesti kiinni välipohjalaatoissa. Laskennassa käytetty Betoni on C30/37.



Kuva 27 Periaatekuva laskennan lähtökohdista

6.1 Kuormat

Tässä laskennassa huomioitiin pysyvänä kuormana rakenteiden omapaino ja hyötykuormana tuulikuorma ja lumikuorma.

6.1.1 Pysyvät pystykuormat.

Pysyvät pystykuormat muodostuivat laattojen ja seinien painosta, koska mallissa ei ollut muita rakenteita. Kuvassa 28 on *Robotin* laskema omapaino ja sen aiheuttama momentti ilman varmuuskertoimia.

Oma paino:

- Laatat 7840kN
- Seinät 8393,8 kN
- yht. 16233,8 kN

FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
SelfWeight_					
0,00	-0,00	16158,99	-0,00	0,00	-0,00
0,00	-0,00	16158,99	112363,56	-131172,32	0,00
0,0	0,0	-16158,99	-112363,55	131172,32	0,0
0,00	-0,00	0,00	0,01	-0,00	0,00
5,34730e-015	4,93935e-015				

Kuva 28 *Robotin* laskemat omapainot

6.1.2 Lumikuorma

Lumikuorma on muuttuva kiinteä kuorma, joka vaikuttaa rakenteisiin yleensä pysty-kuormana. (Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat: RIL 201-1. 2011) Kuvassa 29 on *Robotin* laskema lumikuorma ja sen aiheuttama momentti.

Tässä tutkimuksessa käytettiin lumikuorman arvona 2 kN/m^2 .

Kokonaislumikuorma:

$$2 \text{ kN/m}^2 * 16\text{m} * 14\text{m} = 448 \text{ kN}$$

FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
lumikuorma_					
-0,00	0,00	448,00	-0,00	0,00	-0,00
-0,00	0,00	448,00	3133,51	-3578,32	0,00
0,0	0,0	-448,00	-3133,51	3578,32	0,0
-0,00	0,00	-0,00	0,00	-0,00	0,00
1,13673e+010	1,38572e-014				

Kuva 29 *Robotin* laskema lumikuorma

6.1.3 Tuulikuorma

Tuulikuorman määrittämisessä Käytettiin Jarno Luntisen Insinööritoimisto Creo3:lle tekemää *Excel* taulukkolaskentapohjaa, josta saatiin selvitettyä tuulikuorman suuruus ja tuulikuorman resultantti (kuva 31). Kuvassa 32 on *Robotin* laskemat tuulikuorman arvot ilman varmuuskertoimia.

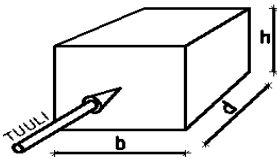
Lähtötiedot:

- Maastoluokka ML = III
 - Rakennuksen korkeus $h = 21$ m
 - Tuulta vasten kohtisuora leveys $b = 14$ m
 - Tuulensuuntainen leveys $d = 16$ m
 - Kattokaltevuus $\alpha = 0^\circ$
 - Sisäpuolinen painekerroin $C_{pi} = 0$
 - Rakennekerroin $C_s C_d = 1$ - Seinään kohdistuvan kitkan vaikutuskerroin $C_{fr} = 0,01$
 - Kattoon kohdistuvan kitkan vaikutuskerroin $C_{fr} = 0,02$
 - Tuulen kuormittama pinta-ala $A = 10\text{m}^2$ (Rakenneosat jäykistys = 10m^2)
- kuva 28 tuulikuorman jakautuminen rakennukseen.

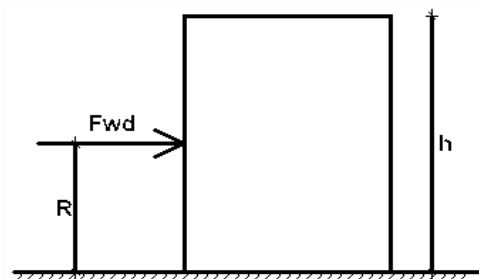
Tuloksiksi saatiin:

Tuulikuormaksi = $0,69$ kN/m²

Tuulivoiman resultantin korkeus = $11,6$ m, käytetään $10,5$ m sama kuin *Robotissa*.



Kuva 30 Tuulikuorman jakautuminen



Kuva 31 tuulikuorman resultantti

X-suunta:

$$F_{wd} = 14\text{m} * 21\text{m} * 0,69 \text{ kN/m}^2 = 202,86 \text{ kN}$$

Y-suunta

$$F_{wd} = 16\text{m} * 21\text{m} * 0,69 \text{ kN/m}^2 = 231,84 \text{ kN}$$

FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
tuulikuorma_					
-0,00	231,84	0,00	-0,00	0,00	-0,00
-0,00	231,84	0,00	-2433,96	-0,00	1853,83
0,0	-231,84	0,0	2433,96	0,0	-1853,83
-0,00	0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00
2,55030e+009	4,09200e-016				
tuulikuormax_					
-202,86	0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00
-202,86	0,00	0,00	-0,00	-2129,70	1417,47
202,86	0,0	0,0	0,0	2129,70	-1417,47
0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00	-0,00
8,02292e+010	4,01188e-016				

Kuva 32 Robotin laskemat tuulikuorman suuruudet

6.1.4 Muut vaakasuuntaiset kuormat

Rakennukseen syntyy lisävaakavoimia rakenteiden mahdollisesta vinoudesta ja sijaintivirheistä sekä kuormien epäedullisista vaikutussuunnista. Mittaepätarkkuudet otetaan huomioon murtorajatilamitoituksessa. (SFS-EN 1992-1-1 2007, 54; SFS-EN 1993-1-1 2006, 33.)

Puristavan normaalivoiman kuormittamien rakenneosien ja pystykuormitettujen rakenteiden epätarkkuudet saadaan vinouden θ_i avulla kaavasta 1.

$$\theta_i = \theta_0 \times \alpha_h \times \alpha_m \quad (1)$$

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

$$\alpha_m = \sqrt{0,5(1 + \frac{1}{m})} \quad (3)$$

missä

θ_i rakenteen vinous

θ_0 rakenteen vinouden perusarvo (suositus 1/200)

α_h pituuteen tai korkeuteen perustuva pienennyskerroin

α_m rakenneosien määrään perustuva pienennyskerroin

l korkeus tai pituus

m kokonaisvaikutuksen aiheuttavien pystyrakenneosien määrä

(Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat: RIL 201-1. 2011.)

Tässä tutkimuksessa ei huomioitu lisävaakavoimia, koska *Robot* ei käytä laskennassa lisävaakavoimia.

6.2 Kuormitusyhdistelyt

Tässä ei tutkittu, mikä on määräävä kuormitusyhdistelmä vaan käytetään oletuksena yhtä kuormitusyhdistelmää. Lisäksi tässä työssä ei tutkita toista kertalukua. Kuvassa 33 on *Robotin* laskema kuormitusyhdistelmä 1 voimasuureet.

Taulukko 1 kuormitusyhdistelmä

Nimi	Tyyppi	Kerroin	Kuormitustapaus
KT 1	Murtorajatila	1,15	Omapaino
		1,15	Pysyvät kuormat
		1,5	Tuuli
		1,5	Lumi

Murtorajatila mitoituksessa, kuormat lasketaan kaavasta 4.

$$1,15 K_{FI} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1,5 K_{FI} Q_{K,1} + 1,5 K_{FI} \sum_{i \geq 1} \Psi_{0,i} * Q_{K,i} \quad (4)$$

Vaakakuormat:

$$1,5 * (14\text{m} * 21\text{m}) * 0,69 \text{ kN/m}^2 = 304,29\text{kN}$$

$$1,5 * (16\text{m} * 21\text{m}) * 0,69 \text{ kN/m}^2 = 347,76 \text{ kN}$$

Pystykuormat

$$1,15 * 1,0 * 16233,8 \text{ kN} + 1,5 * 448 \text{ kN} = 19340,87\text{kN}$$

	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
kt1_						
	-304,29	347,76	19254,84	-0,00	0,00	-0,00
	-304,29	347,76	19254,84	130267,42	-159410,19	4906,95
	304,29	-347,76	-19254,84	-130267,41	159410,19	-4906,95
	0,00	0,0	0,00	0,01	-0,00	0,00
	1,41220e+011	2,76817e-014				

Kuva 33 Robotin tulokset kuormitusyhdistelmälle 1

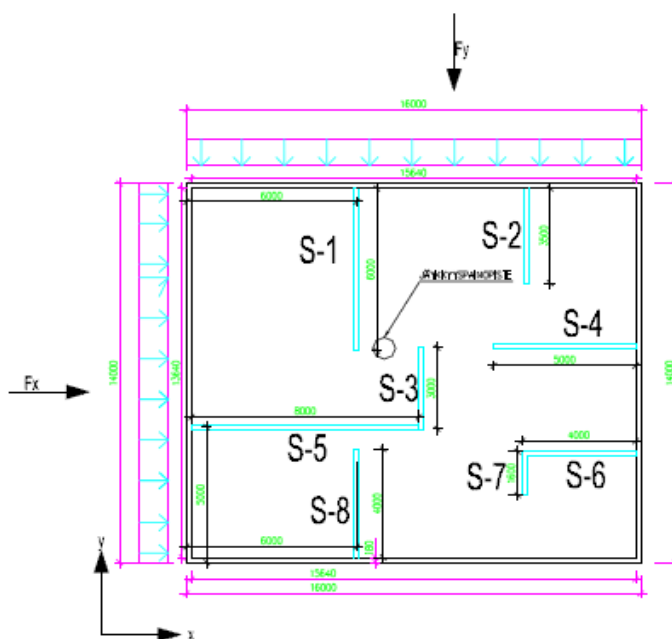
6.3 Vaakavoimien jakautuminen jäykistäville osille

6.3.1 Välipohjien jäykistäminen

Välipohjat jäykistetään jäykiksi levyiksi rengasraudoituksen avulla, joka sijoitetaan välipohjanreunoille. Välipohjat toimivat vaakavoimille tavallisesti seinämäisinä palkkeina. Elementtivälipohjissa on tarkistettava, että laattojen saumat pystyvät siirtämään leikkausvoimat. (Harry Dunkel 2011.) Tässä tutkimuksessa oletetaan, että välipohjaa ei tarvitse mitoittaa.

6.3.2 Kuormien jakautuminen mastoseinille

Kuormitusten jakautumisen selvittämiseksi määritellään ensin koko systeemin jäykkyysspainopiste eli kiertokeskiö O kuva 34.



Kuva 34 Mastoseinäsystemi

Jäykkyyispainopiste lasketaan seuraavasti. Koordinaatit x' , y' lasketaan seuraavista kaavoista.

$$\bar{y} = \frac{\sum K_{ix} y'_i}{K_{ix}} \quad (5)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum K_{iy} x'_i}{K_{iy}} \quad (6)$$

joissa:

$$K_{ix} = \frac{E}{\frac{L^3}{3I_{iy}} + \frac{L^2(1+\nu)K_y}{A_i}} \quad (7)$$

A_i = maston i poikkipinta-ala

L = tarkasteltavan poikkileikkauksen etäisyys maston kiinnityskohdasta

I_{iy} = maston i poikkileikkauksen jäyhyysmomentti y -akselin suhteen

ν = betonin suppeumaluku

K_y = 1,2 suorakaidepoikkileikkaukselle

Jäykkyydet K_{iy} saadaan vaihtamalla alaindeksit x ja y keskenään.

Kun tehdään koordinaatiston muunnos siirtämällä origo kiertokeskiöön, saadaan uusiksi koordinaateiksi.

$$x = x' - \bar{x} \quad (8)$$

ja

$$y = y' - \bar{y} \quad (9)$$

Jos vaakavoimien resultantti ei kulje kiertokeskiön kautta, kuormittaa rakennetta lisäksi välipohjaa kiertävä momentti.

$$M = F_y x_1 - F_x y_1 \quad (10)$$

F_x ja F_y ovat vaakavoimien resultantin x - ja y -suuntaiset komponentit
 x_1 ja y_1 ovat F_x ja F_y vaikutussuorien etäisyydet kiertymäkeskiöstä O .

Välipohjan siirtymän komponentit V_x ja V_y sekä kiertymä θ ratkaistaan tasapainoehdoista seuraavasti kaavoista 13 ja 14.

$$v_x = \frac{F_x}{\sum K_{ix}} \quad ja \quad v_y = \frac{F_y}{\sum K_{iy}} \quad (11)$$

$$\theta = \frac{M}{\sum K_{ix}y_i^2 + \sum K_{iy}x_i^2} \quad (12)$$

Mastojen kuormaosuudet voidaan laskea kaavoista 15.

.

$$V_{ix} = k_{ix}v_x - k_{ix}y_i\theta \quad , \quad V_{iy} = k_{iy}v_y + k_{iy}x_i\theta \quad (13)$$

(Harry Dunkel 2011.)

Laskelmissa käytettiin apuna *Excel*-ohjelmaa. Jäykistyslaskelmat tehtiin 1.kerrokselle.

Ensimmäiseksi selvitetään jäykistävien seinien koordinaatit (x' , y') taulukko 2.

Taulukko 2 Koordinaatit

seinä	x' (m)	y' (m)
S1	10,82	6
S2	12,07	12
S3	6,43	8,27
S4	8	13,32
S5	5	4,18
S6	4	13,91
S7	3,29	11,91
S8	2,18	6
US1	0,09	7
US2	8	13,91
US3	15,91	7
US4	8	0,09

Seuraavaksi lasketaan seinien jäyhyys (I) ja ala (A) kaavoista 14 ja 16 tulokset Taulukossa 3.

$$I = \frac{bH^3}{12} \quad (14)$$

$$A_i = b * H \quad (15)$$

Joissa:

b = seinän leveys (m)

H = seinän pituus (m)

Taulukko 3 Jäyhyys ja ala

seinä	pituus H	leveys b	A _i (m ²)	I (m ⁴)
S1	6	0,18	1,08	3,24
S2	3,5	0,18	0,63	0,643125
S3	3	0,18	0,54	0,405
S4	5	0,18	0,9	1,875
S5	8	0,18	1,44	7,68
S6	4	0,18	0,72	0,96
S7	1,6	0,18	0,288	0,06144
S8	4	0,18	0,72	0,96
US1	14	0,18	2,52	41,16
US2	15,64	0,18	2,8152	57,38541
US3	14	0,18	2,52	41,16
US4	15,64	0,18	2,8152	57,38541

Seuraavaksi lasketaan seinien jäykkyydet K_{iy} ja K_{ix} kaavasta 16 tulokset taulukossa 4.

$$K_{ix} = \frac{E}{\frac{L^3}{3I_{iy}} + \frac{L 2(1+\nu)K_y}{A_i}} \quad (16)$$

Jossa:

E = 37000 Mpa

L = 3,0 m

ν = 0,2

K_y = 1,2

Taulukko 4 Seinien jäykkyydet

seinä	Ki	MN/m
S1	K1y	3432,989691
S2	K2y	1335,332492
S3	k3y	968,0232558
S4	k4x	2569,444444
S5	k5x	5159,041394
S6	k6x	1730,994152
S7	k7y	209,6502877
S8	k8y	1730,994152
S9	k9y	10144,68425
S10	k10x	11469,71007
S11	k11y	10144,68425
S12	k12x	11469,71007

Lasketaan kiertokeskiö ja uudet koordinaatit kaavoilla 17 ja 18.

$$\bar{y} = \frac{\sum K_{ix} y_i}{K_{ix}} \quad (17)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum K_{iy} x_i}{K_{iy}} \quad (18)$$

Kiertokeskiö:

$$\bar{y} = 7,421358802m$$

$$\bar{x} = 8,090615975m$$

Uudet koordinaatit lasketaan vähentämällä alkuperäisistä koordinaateista uuden jäykkyysspainopisteen sijainti kaavat 19 ja 20 tulokset taulukossa 5.

$$x = x' - \bar{x} \quad (19)$$

ja

$$y = y' - \bar{y} \quad (20)$$

Taulukko 5 uudet koordinaatit

Seinä	$x = x' - x_i$	$y = y' - y_i$
S1	2,729384	-1,42136
S2	4,648641	4,578641
S3	-1,66062	0,848641
S4	-0,09062	5,898641
S5	-3,91062	-3,24136
S6	5,819384	6,488641
S7	3,819384	4,488641
S8	-2,09062	-1,42136
S9	-8,00062	-0,42136
S10	5,819384	6,488641
S11	-1,09062	-0,42136
S12	-8,00062	-7,33136

Seuraavaksi lasketaan vaakakuorman suuruus 1. kerrokselle molemmista suunnista (x,y)

Y-suunta

$$F_y = 1,5 * \left(\frac{0,69kN}{m^2} * (16m * 2,8m) \right) = 46,368 kN$$

X-suunta

$$F_x = 1,5 * \left(\frac{0,65kN}{m^2} * (14m * 2,8m) \right) = 40,572 kN$$

Lasketaan välipohjaa kiertävä momentti M kaavasta 21.

$$M = F_x * y_1$$

$$M = F_y * x_1$$

$$M = F_y * x_1 - F_x * y_1 \tag{21}$$

$$M = 46,368kN * \left(8,09m - \frac{14m}{2} \right) - 40,572 kN * (7,42m - 16m/2) = -12,893kNm$$

Välipohjan siirtymän komponentit V_x ja V_y lasketaan kaavoista 22.

$$v_x = \frac{F_x}{\sum K_{ix}} \quad \text{ja} \quad v_y = \frac{F_y}{\sum K_{iy}} \quad (22)$$

Tulokseksi saatiin:

$$v_x = 0,001252265 \text{ MN/m}$$

$$v_y = 0,001657992 \text{ MN/m}$$

kiertymä θ ratkaistaan tasapainoehdoista seuraavasti kaavalla 23.

$$\theta = \frac{M}{\sum K_{ix}y_i^2 + \sum K_{iy}x_i^2} \quad (23)$$

Tulokseksi saatiin:

$$\theta = -0,0000063 \text{ MN/m}$$

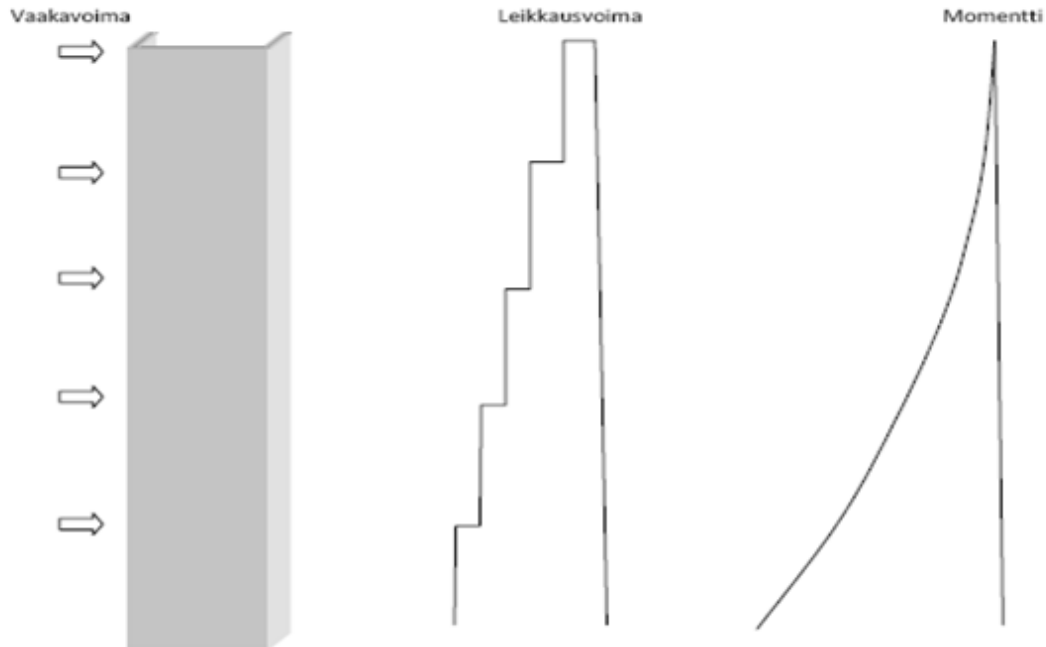
Mastoseinien kuormaosuudet lasketaan kaavoista 24. Tulokset taulukossa 6.

$$V_{ix} = k_{ix}v_x - k_{ix}y_i\theta \quad , \quad V_{iy} = k_{iy}v_y + k_{iy}x_i\theta \quad (24)$$

Taulukko 6 Mastoseinien kuormaosuudet

seinä	Vix	Viy
S1		5,632792862
S2		2,174832985
S3		1,61511012
S4	3,12206583	
S5	6,3550528	
S6	2,23847853	
S7		0,342549941
S8		2,892791074
S9	12,730781	16,14227909
S10	13,8938834	
S11		16,72744781
S12	14,8932851	

6.4 Leikkausvoima ja momentti jäykistysrakenteessa



Kuva 35 Leikkausvoima ja momentti jäykistysrakenteessa (Elementtisuunnittelu.)

Rakennukseen kohdistuu momentti- ja leikkausvoimia vaakakuormien vaikutuksesta kuva 35, jotka rasittavat rakennusta. Lisäksi leikkausvoima aiheuttaa vetoa seinien ja laataston välisiin saumoihin, kuten kuvasta 35 nähdään leikkausvoima suurimmillaan ensimmäisessä kerroksessa. Tässä tutkimuksessa lasketaan tuulikuorman rakennukseen aiheuttama max. momentti ja max. leikkausvoima molemmissa suunnissa 1.kerroksessa ja niitä käytetään vertailuna *Robot structuralilla* tehtyihin laskelmiin.

Lisäksi tässä tutkimuksessa lasketaan seinälle S-5, joka toimii jäykistysrakenteena vaakakuormien aiheuttama, momentti ja seinän yläreunaan kohdistuva leikkausvoima seinän pituussuunnassa, jotta voidaan verrata tuloksia *Robotin* laskemiin tuloksiin.

Vaakakuormien aiheuttama leikkausvoima, lasketaan kuvan 35 mukaisesti käyttämällä edellä olevia jäykistyslaskenta kaavoja ja laskemalla, vaakakuormaa V_{5x} , jokaisessa kerroksessa (1-7krs.) ja summaamalla nämä tulokset kaava 25

$$V_y = \sum V_{5x} \quad (25)$$

tulokseksi saatiin:

$$V_y = (6,35 + 5,50 + 4,58 + 3,95 + 3,53 + 3,25 + 3,09)kN = 30,29 kN$$

Momentti lasketaan samoin kuin leikkausvoima, joka kerrokselle (1-7krs.) ja summaamalla tulokset. Seinään kohdistuva vaakavoimien aiheuttaman momentin suuruus on seinälle S-5 1.kerroksessa:

$$M = (3 * 6,35 + 3 * 5,5 + 3 * 4,58 + 3 * 3,95 + 3 * 3,53 + 3 * 3,25 + 1,5 * 30,9)kNm = 86,25 kNm$$

Näin laskettuna saadaan vain seinään S-5 kohdistuva pituussuuntainen leikkausvoima, jolloin voidaan mitoittaa seinän ja laatan välinen liitos, mutta tässä tutkimuksessa sitä ei mitoiteta. Momenttia ja leikkausvoimaa tarvitaan myös betonielementtiseiniä mitoituksessa.

Koko rakennukseen tuleva tuulikuorman aiheuttama momentti lasketaan kaavoista 26.

$$M_y = F_y * R \quad M_x = F_x * R \quad (26)$$

Rakennukseen kohdistuva max. leikkausvoima on sama kuin tuulikuorman suuruus (kaavat 27).

$$V = F_y \quad V = F_x \quad (27)$$

Joissa:

M= momentti kNm

F = kokonaisvaakavoima kN

R = Resultantti m

V= leikkausvoima kN

eli tuloksiksi saatiin:

Leikkausvoima

$$V_x = 304,29 \text{ kN}$$

$$V_y = 347,76 \text{ kN}$$

Momentti

$$M_x = 304,29 \text{ kN} * 10,5\text{m} = 3204,60 \text{ kNm}$$

$$M_y = 347,76 \text{ kN} * 10,5\text{m} = 3651,48 \text{ kNm}$$

Verrataan tuloksia kuvaan 36, jossa näkyy *Robotin* tulokset tuulikuorman rakennukseen aiheuttamalle leikkausvoimalle ja momentille kuormitustapauksessa 1.

7 TULOSTEN ANALYSOINTI

7.1 Yksinkertainen malli

Käsilasketut voimasuureet ovat hyvin samanlaiset kuin *Robotin* laskemat voimasuureet (kuva 36) ja ovat siten vertailukelpoisia. Yhdelle seinälle tulevissa kuormissa oli poikkeamia, koska *Robot* huomioi rakennuksen suurempana kokonaisuutena ja käsilaskennassa laskettiin rakennus kerroksittain. Poikkeamia tuloksiin syntyy siitä, että *Robotissa* betonin tiheys on $24,53 \text{ kN/m}^3$, koska *Robot* laskee tarkoilla arvoilla ja käsilaskennassa on käytetty 25 kN/m^3 . Tästä voidaan päätellä, että *Robotin* laskemat voimasuureet ovat tarkkoja ja luotettavia.

Reactions in the coordinate system: global - Cases: 1 29 3657 3659 10737						
Node/Case	FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
Case 1 (C)	kt1_					
Sum of val.	-304,29	347,76	19254,84	-0,00	0,00	-0,00
Sum of reac.	-304,29	347,76	19254,84	130267,42	-159410,19	4906,95
Sum of forc.	304,29	-347,76	-19254,84	-130267,41	159410,19	-4906,95
Check val.	0,00	0,0	0,00	0,01	-0,00	0,00
Precision	1,41220e+011	2,78817e-014				
Case 29	tuulikuorma					
Sum of val.	-0,00	231,84	0,00	-0,00	0,00	-0,00
Sum of reac.	-0,00	231,84	0,00	-2433,96	-0,00	1853,83
Sum of forc.	0,0	-231,84	0,0	2433,96	0,0	-1853,83
Check val.	-0,00	0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00
Precision	2,55030e+009	4,09200e-016				
Case 3657	tuulikuormax					
Sum of val.	-202,86	0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00
Sum of reac.	-202,86	0,00	0,00	-0,00	-2129,70	1417,47
Sum of forc.	202,86	0,0	0,0	0,0	2129,70	-1417,47
Check val.	0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00	-0,00
Precision	8,02292e+010	4,01188e-016				
Case 3659	lumikuorma					
Sum of val.	-0,00	0,00	448,00	-0,00	0,00	-0,00
Sum of reac.	-0,00	0,00	448,00	3133,51	-3578,32	0,00
Sum of forc.	0,0	0,0	-448,00	-3133,51	3578,32	0,0
Check val.	-0,00	0,00	-0,00	0,00	-0,00	0,00
Precision	1,13673e+010	1,38572e-014				
Case 10737	SelfWeight					
Sum of val.	0,00	-0,00	16158,99	-0,00	0,00	-0,00
Sum of reac.	0,00	-0,00	16158,99	112363,56	-131172,32	0,00
Sum of forc.	0,0	0,0	-16158,99	-112363,55	131172,32	0,0
Check val.	0,00	-0,00	0,00	0,01	-0,00	0,00
Precision	5,34730e-015	4,93935e-015				

Kuva 36 *Robotin* laskemat voimasuureet voima suureet

Kuten kuvasta 36 nähdään *Robot* antaa tulokset ilman varmuuskertoimia. Seinälle S-5 tulevat kuormat ja voimasuureet *Robot* ilmoittaa hieman sekavasti kuten kuvista 37 ja 38 huomataan, joten *Robotin* ja käsilaskennan tulosten vertailukelpoisuus on tutkittava tarkemmin.

7.2 Tulokset

Taulukko 7 Jäykkyyspainopisteen sijainti

	käsilaskenta	Robot
x	8,084 m	8,118 m
y	7,449 m	6,954 m

Ero jäykkyyspainopisteen sijaintiin tulee mahdollisesti *Robotin* erilaisesta laskennasta, koska käsilaskennassa laskettiin jäykkyyspainopiste kerrokselle 1 ja *Robot* on laskenut 11,05 m korkeudelle jossa sijaitsee rakennuksen z-akselin suuntainen painopiste. Käsilaskennassa käytettäessä samaa korkeus arvoa kuin *robotissa* on jäykkyyspainopisteen sijainti sama.

Taulukko 8 voimasuureiden vertailu vaakakuormat

KT1 1,5 * tuuli		
	Käsilaskenta	Robot
Momentti M_x	130267,42 kNm	130267,4 kNm
Momentti M_y	159410,19 kNm	159410,2 kNm
Leikkaus V_x	304,29 kN	304,29 kN
Leikkaus V_y	347,76 kN	347,76 kN

Taulukko 9 voimasuureet pystykuormat

KT1 1,15 * omapaino + 1,5 * lumi		
	käsilaskenta	Robot
Fz	19340,87kN	19254,84 kN

Pystykuormissa (taulukko 9) erot tulevat juuri siitä että *Robot* käyttää betonin painona eri arvoa. Vaakakuormissa arvot ovat täsmälleen samat pienet erot tulevat vain käsilaskennan pyöristyksistä. Kuvassa 37 on *Robotin* tulokset kuormitusyhdistelmä KT1:lle.

FX (kN)	FY (kN)	FZ (kN)	MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
kt1_					
-304,29	347,76	19254,84	-0,00	0,00	-0,00
-304,29	347,76	19254,84	130267,42	-159410,19	4906,95
304,29	-347,76	-19254,84	-130267,41	159410,19	-4906,95
0,00	0,0	0,00	0,01	-0,00	0,00
1,41220e+011	2,76817e-014				

Kuva 37 Robotin tulokset kuormitusyhdistelmä Kt1

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin jäykistävästä seinistä seinää S-5, koska sille tuli suurimmat kuormitukset väliseinistä. Kuvassa 36 on Robotin tulokset seinälle S-5, josta voi verrata käsilaskenta tuloksia.

$V_y = 30,29 \text{ kN}$ vertaa Robotin tuloksiin (kuva 36), huomataan että tuloksia on vaikea verrata toisiinsa.

$M_y = 86,25 \text{ kNm}$ vertaa Robotin tuloksiin MRz (kNm) (kuva 36), huomataan että tuloksissa on suuria eroja.

Reduced results for panels - Cases: 1 29 3657 3659 10737								
Panel/Cut/Case	NRx (kN)	MRz (kNm)	TRy (kN)	sRo (MPa)	sRe (MPa)	tR (MPa)	TRz (kN)	MRy (kNm)
5/ 374-17-0-0/ 1 (C)	30,30>>	-23,81	-7,35	0,16	-0,04	-0,02	-0,00	-0,45
5/ 374-17/ 1 (C)	-55,39<<	13,06	-12,76	-0,05	-0,03	-0,01	-0,00	0,33
5/ 374-0-17-0/ 1 (C)	-38,51	46,63>>	-3,46	-0,05	-0,00	-0,00	-0,00	-1,01
5/ 374-17-0-0/ 1 (C)	30,30	-23,81<<	-7,35	0,16	-0,04	-0,02	-0,00	-0,45
5/ 374-0/ 1 (C)	-3,64	44,63	91,37>>	-0,20	0,18	0,19	0,00	1,15
5/ 17-0/ 1 (C)	-23,22	41,26	-63,93<<	-0,22	0,13	-0,13	0,00	-0,11
5/ 374-17-0-0/ 1 (C)	30,30	-23,81	-7,35	0,16>>	-0,04	-0,02	-0,00	-0,45
5/ 17-0/ 1 (C)	-23,22	41,26	-63,93	-0,22<<	0,13	-0,13	0,00	-0,11
5/ 374-0/ 1 (C)	-3,64	44,63	91,37	-0,20	0,18>>	0,19	0,00	1,15
5/ 374-17-0-0/ 1 (C)	30,30	-23,81	-7,35	0,16	-0,04<<	-0,02	-0,00	-0,45
5/ 374-0/ 1 (C)	-3,64	44,63	91,37	-0,20	0,18	0,19>>	0,00	1,15
5/ 17-0/ 1 (C)	-23,22	41,26	-63,93	-0,22	0,13	-0,13<<	0,00	-0,11
5/ 374-0/ 10737	-2,02	38,30	77,77	-0,17	0,16	0,16	0,00>>	1,51
5/ 0-0/ 10737	-37,87	-1,22	3,85	-0,03	-0,03	0,00	-0,00<<	-2,04
5/ 374-0/ 10737	-2,02	38,30	77,77	-0,17	0,16	0,16	0,00	1,51>>
5/ 0-0/ 10737	-37,87	-1,22	3,85	-0,03	-0,03	0,00	-0,00	-2,04<<

Kuva 38 seinälle S-5 tulevia kuormia

8 POHDINTA

Tietomallinnus ohjelmat kehittyvät koko ajan ja odotukset ohjelmistoista on koko ajan suuremmat. Työn toimeksiantaja Insinööritoimisto Creo3 Oy Käyttää päivittäin *Tekla structures*-ohjelmistoa, mutta *Robot structural analysis*-ohjelmisto oli uusi ohjelmisto toimistolla, tästä syystä haluttiin saada tietoa miten ohjelmia voisi hyödyntää betonielementtirakenteisen kerrostalon jäykistyksen mitoituksessa.

Opinnäytetyötä aloittaessa huomasin, että ohjelmien käytöstä löytyy melko vähän tietoa ja ohjelmien käytön joutui itse tutkimaan näin ollen. Opinnäytetyötä tehdessä opittiin paljon lisää tietomallinnuksesta ja rakennuksen jäykistysuunnittelusta, sekä opittiin käyttämään *Tekla structuresia* paremmin ja opin myös käyttämään *Robot structuralia* ja *TS-Robot*-linkkiä ja samalla tietomallinnus taitoni kehittyivät paljon. Tässä opinnäytetyössä on kerrottu yleisesti kerrostalon jäykistyksestä eri jäykistysjärjestelmät on esitelty, lisäksi tietomallinnus on esitelty yleisellä tasolla. Teklan mallin siirto *Robotiin* ja jäykistyslaskelmat on käsitelty yleisellä tasolla ja lukijan vastuulla on yksityiskohtaisempi perehtyminen, *Teklan* ja *Robotin* käyttöön ja jäykistyksen mitoitukseen. Tutkimukseen liittyen tuotettiin ohje (Liite 2) *Teklan* mallin siirrosta *Robotiin*.

Opinnäytetyössä tehty tutkimus osoitti, että *Teklan* ja *Robotin* käyttö kerrostalon jäykistysmitoituksessa ei toimi hyvin, koska tulokset ovat sekavia ja niiden oikeellisuus, on vaikea arvioida. Lisäksi *Robot structural analysis 2012* ei ole hyvä seinien ja laattojen mitoituksessa, eli rakenneosista joista elementtirakenteinen kerrostalo koostuu, koska kyseisestä ohjelma-versiosta puuttuu laskenta osia esimerkiksi fem-laskenta. Kerrostalon laskentamalli on hyvä mallintaa suoraan *Robotilla* kuin siirtää *Teklassa* mallinnettu laskentamalli *Robotiin*, mutta yksinkertaisissa malleissa esimerkiksi halkeissa *TS-Robot*-link on hyödyllinen ja toimiva lisä.

Tutkimus osoitti että *TS-Robot*-link on hyödyllinen lisä rakennesuunnitteluun, koska se mahdollistaa *Tekla structures* mallien siirron *Robot structuraliin*. Jäykistystutkimuksessa ongelmana on *Teklan* mallin siirrosta *Robotiin* se, että *Robot* ei laskenut mallia ilman ulkoseiniä, jolloin se huomioi ulkoseinät jäykistävinä seininä, mutta yleensä ulkoseinät eivät ole rakennusta jäykistäviä seiniä. Lisäksi *Robot structural analysis 2012* ei toiminut, jos laskentamalliin oli mallinnettu aukkoja *Teklalla*.

LÄHTEET

Buildingsmart. YTV2012 Yleinen osuus [22.8.2012]

Saatavissa: <http://www.buildingsmart.fi/8>

EC2:n oppimateriaali/versio 1.3/Harry Dunkel / 6.1.2011

Savonia-ammattikorkeakoulu. Tekniikan yksikkö Kuopio. Rakennustekniikka.
Opetusmoniste

Elementtisuunnittelu. Rakennuksen jäykistys [23.8.2012]

Saatavissa: [http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennuksen jaykistys/suunnittelukuormat](http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennuksen_jaykistys/suunnittelukuormat)

RIL. Alan kehittäminen [viitattu 22.8.2012]

Saatavissa: <http://www.ril.fi/fi/alan-kehittaminen/tietomallinnus.html>

RTT Rakennusteollisuus ry. 1995. Valmisosarakentaminen II osa G Elementtirakennuksen jäykistys.

SFS-EN 1992-1-1 2007 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat: RIL 201-1-2011. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto.

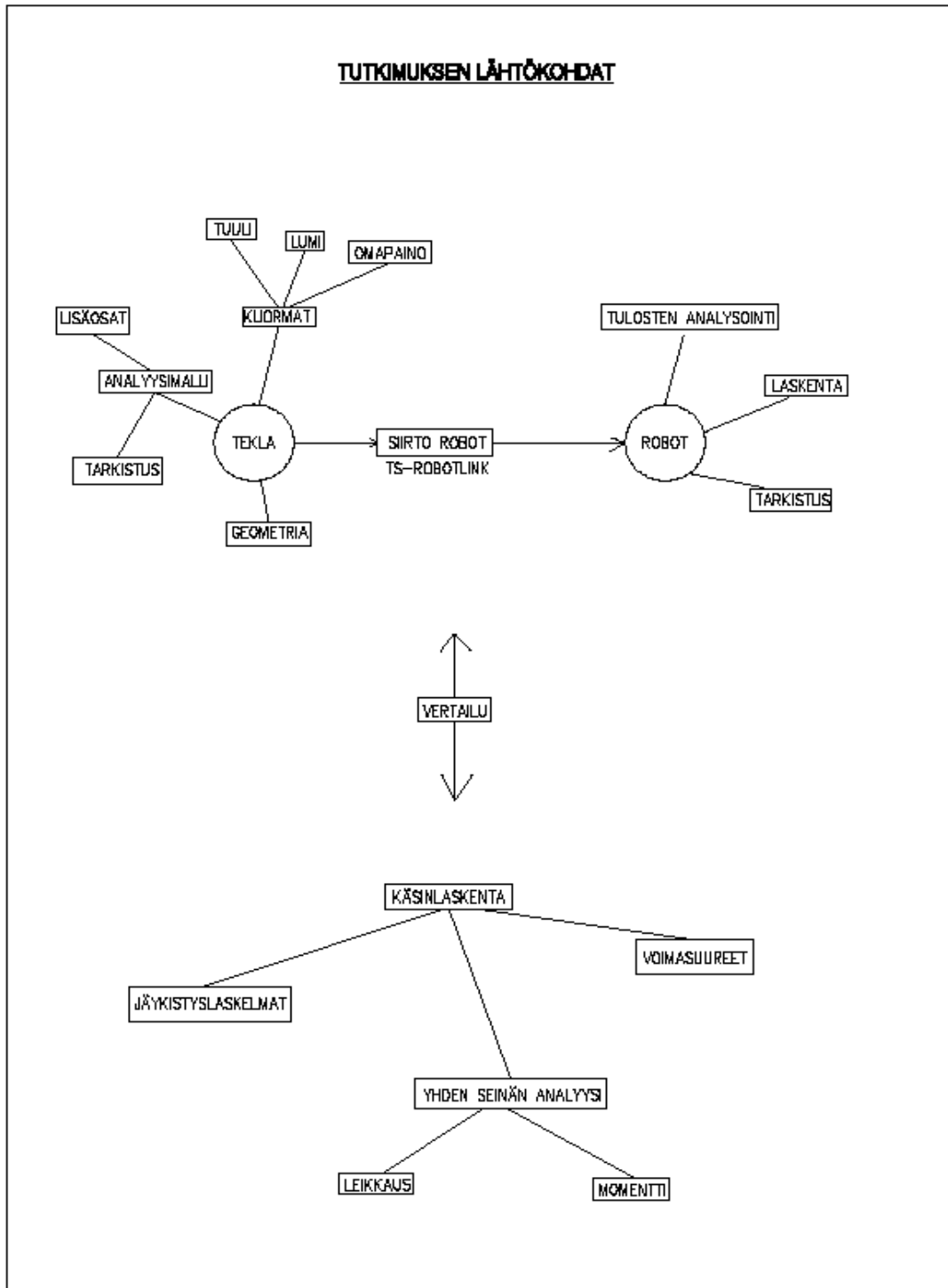
Tekla. Ratkaisut [16.10.2012]

Saatavissa: <http://www.tekla.com/fi/solutions/building-construction/structural-engineers/Pages/Default.aspx>

Tekla. Tuotteet [16.10.2012]

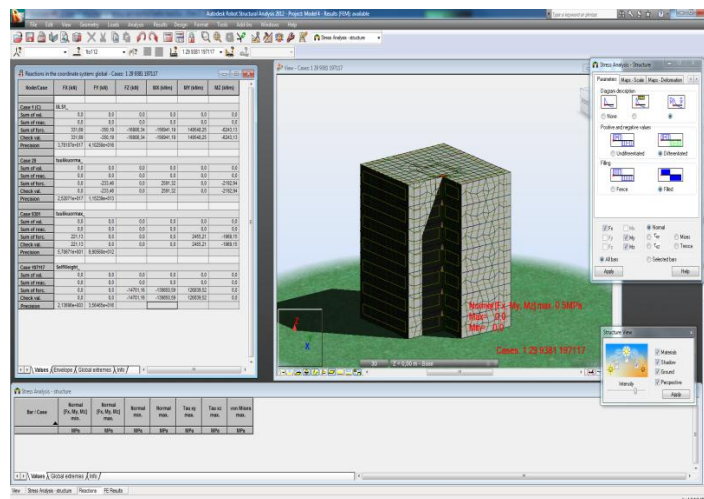
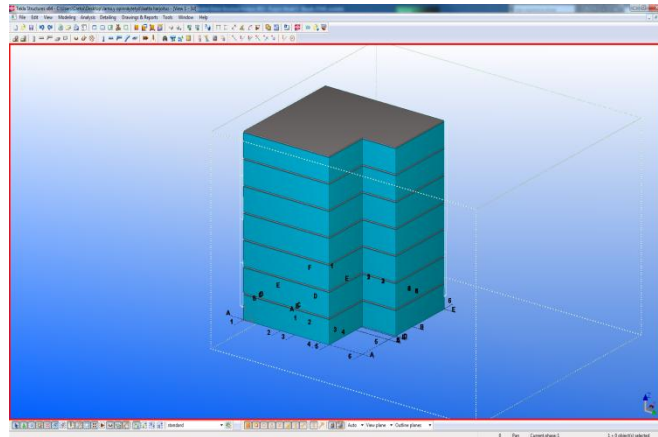
Saatavissa: <http://www.tekla.com/fi/products/tekla-structures/Pages/Default.aspx>

LIITE 1. Kuva tutkimuksen lähtökohdista



LIITE 2. Ohje Teklan mallin siirrosta Robotiin

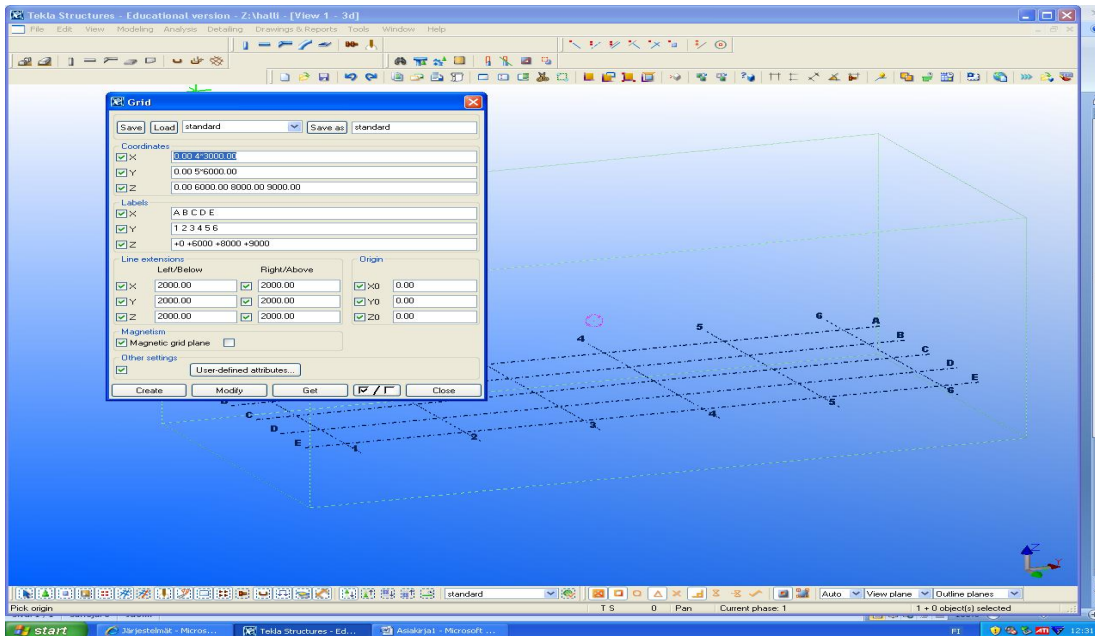
Tekla structure mallin siirto Robot structuraliin



Tämä ohje ei ole täydellinen, eikä takaa oikeita tuloksia.

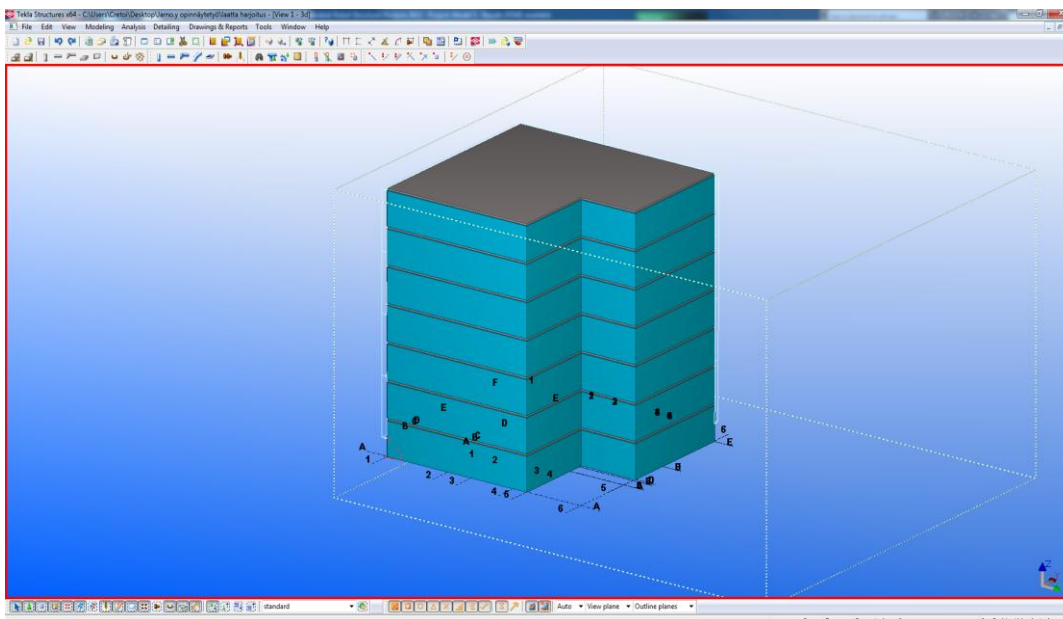
Teklan ja Robotin yhteiskäyttö vaatii *TS-ROBOT* linkin, se pitää ladata Teklan extranetistä (www.extranet.tekla.com). Etsi *user.ini* tekstitiedosto Teklan kansioista ja lisää sinne tarvittavat käskyt.

Aloita mallinnus *Teklassa* muokkaamalla grid-verkkoa (kuva 1).



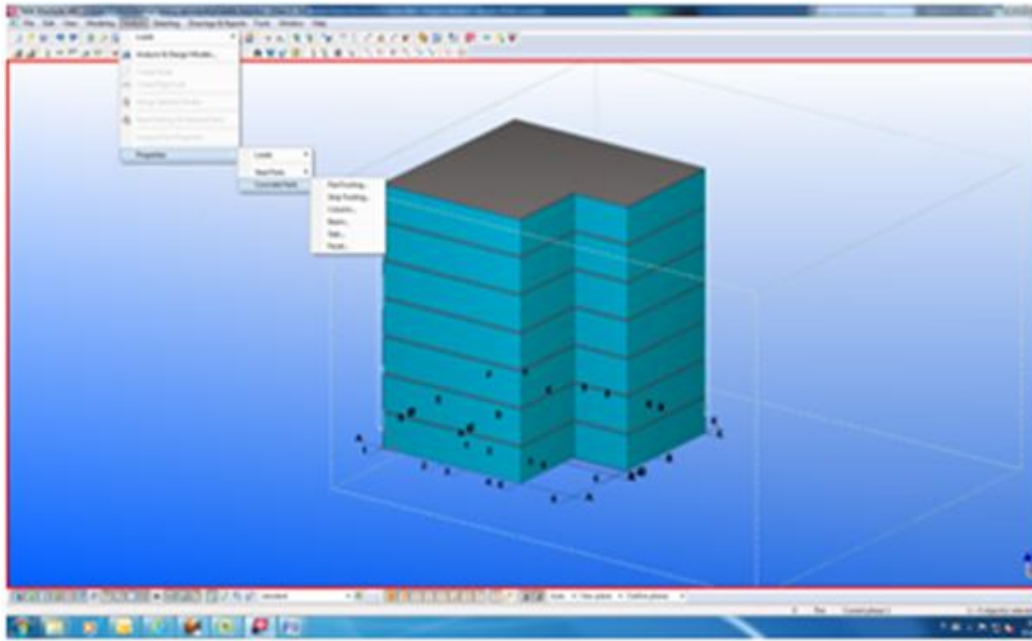
Kuva 1. Grid-verkon muokkaus

Seuraavaksi mallinnetaan laskenta malli. Mallissa on vain seinät, laatat, pilarit ja pal-
kit seiniin. Materiaalit pitää määrittellä rakenne osille, mutta teräksiä ei mallinneta
betonirakenteisiin. Anturoita ei tarvitse mallintaa kts. kuva 2.

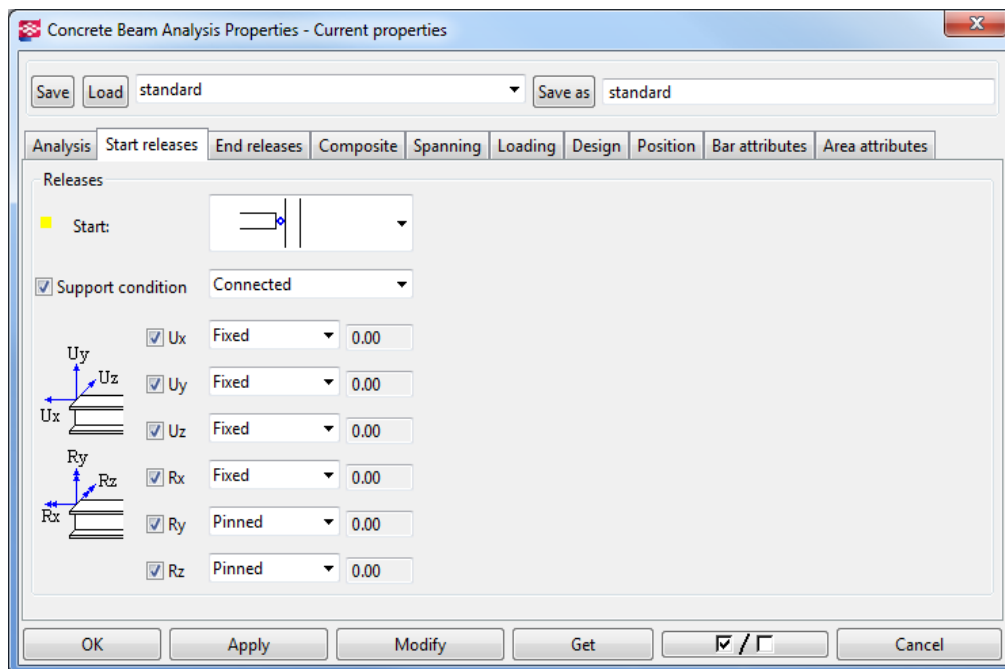


Kuva 2. Yksinkertainen malli

Sitten määritellään tuennat palkeille ja pilareille. Laatoille ja seinille tuennat määritellään, vasta analyysimallissa, myös palkkien ja pilarien tuennat voidaan määrittellä analyysimallissa. kts kuvat 3 ja 4.

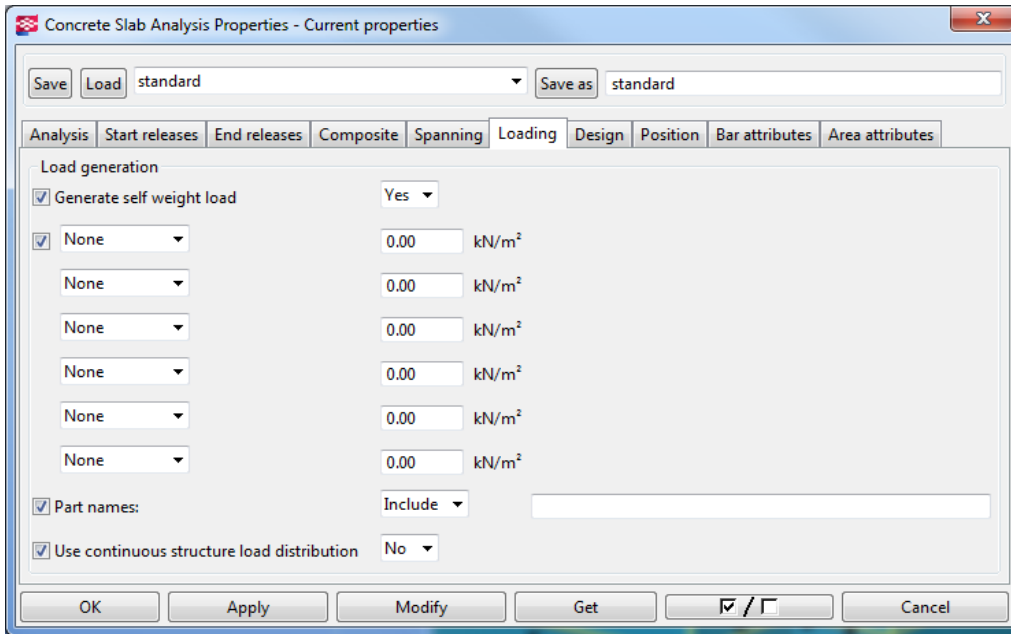


Kuva 3. Tuenta valikko



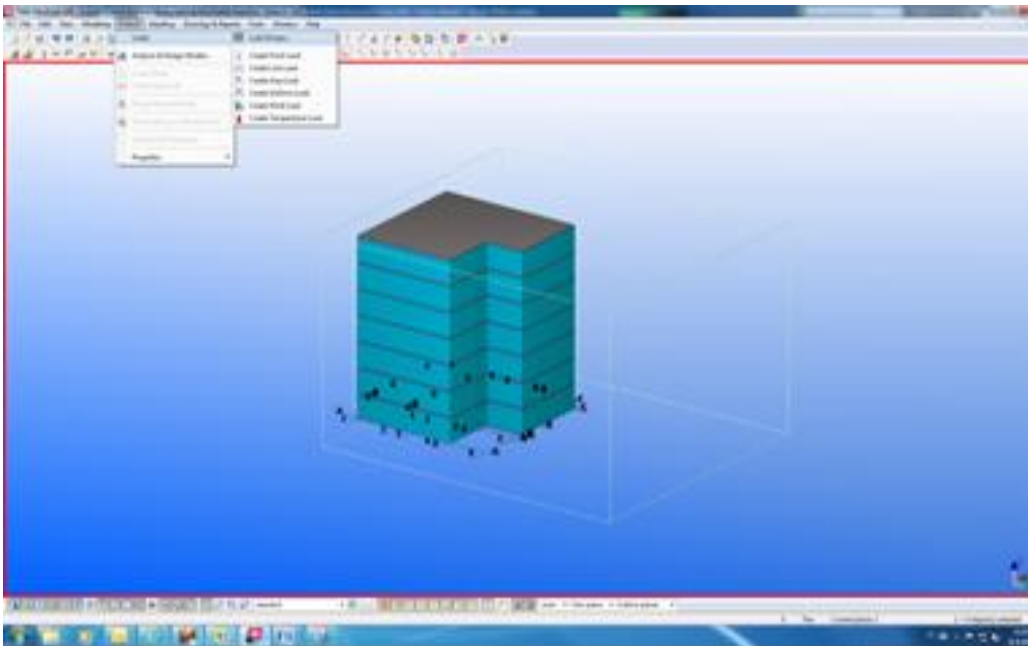
Kuva 4. tuentojen määrittäminen

Omapaino valitaan mukaan loading - valikosta. Kuva 8



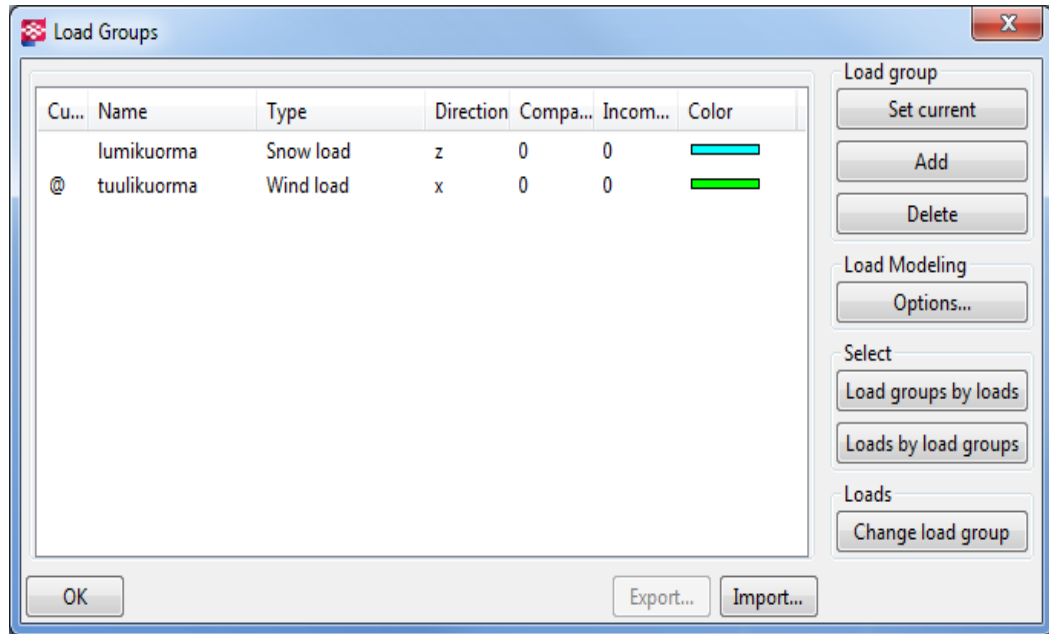
Kuva 5. Omanpainon lisääminen

Kuormaryhmät määritellään valikosta *analysis- loads - load groups* kts. kuvat 9 ja 10.

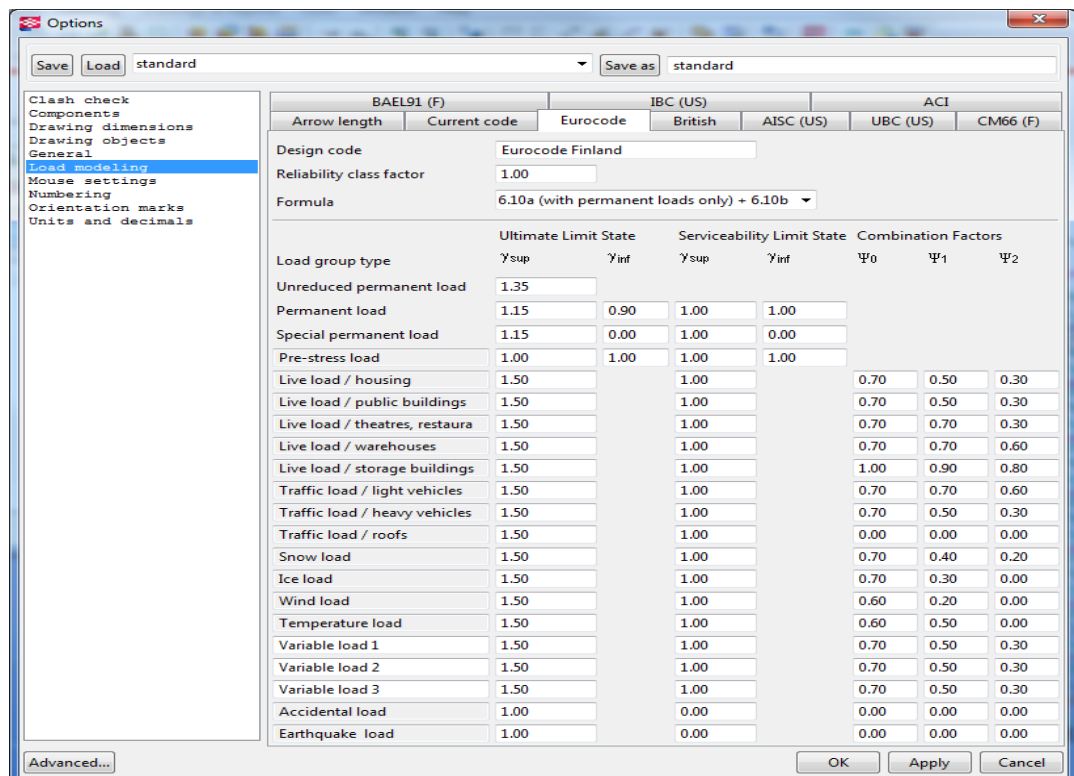


Kuva 6. load groups valikko

Kuormaryhmiä lisätään painamalla *add*. Options - valikosta muokataan varmuusker-toimia ja valitaan käytettävä normisto kuva 8. (eurocode)

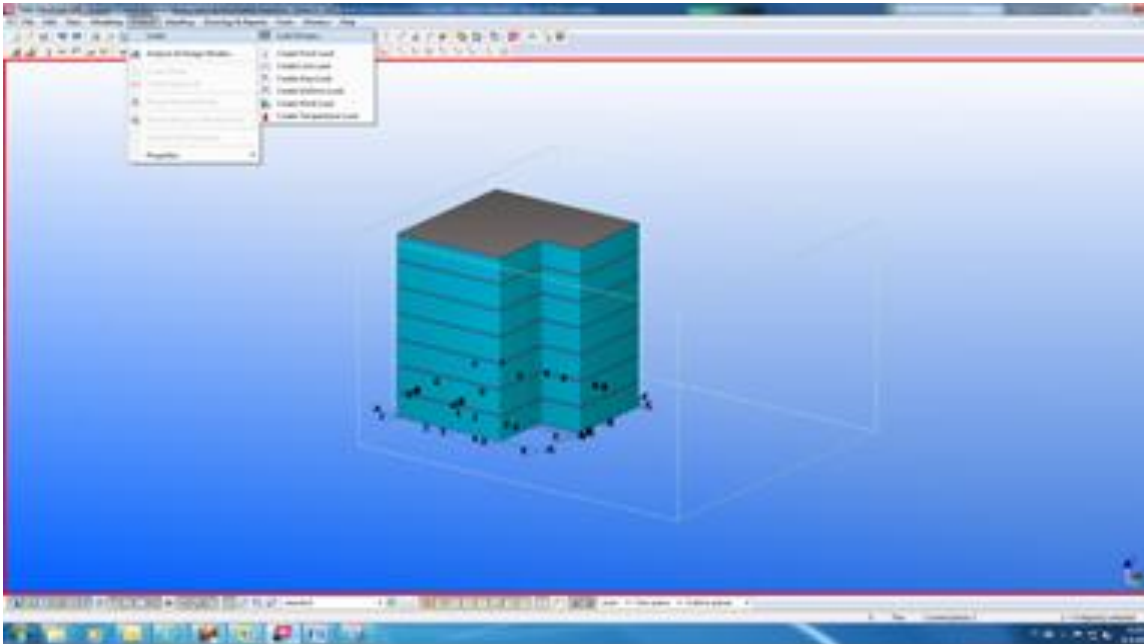


Kuva 7 Kuormaryhmät

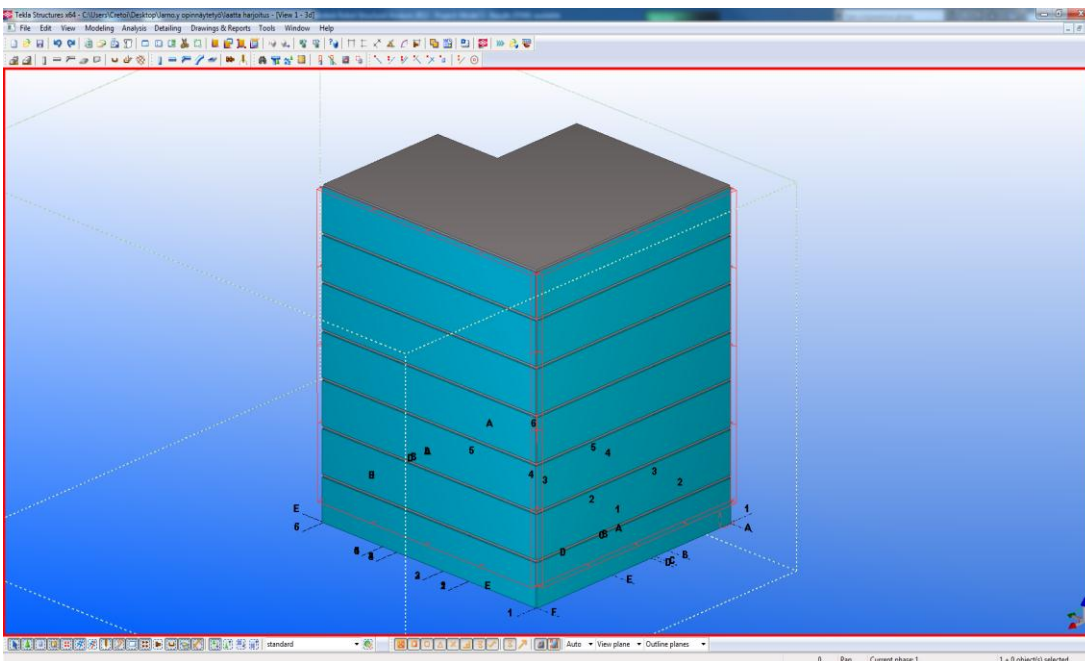


Kuva 8 Suunnittelunormit

Kuormat mallinnetaan valitsemalla ensin kuorman laatu *Loads*-valikosta.

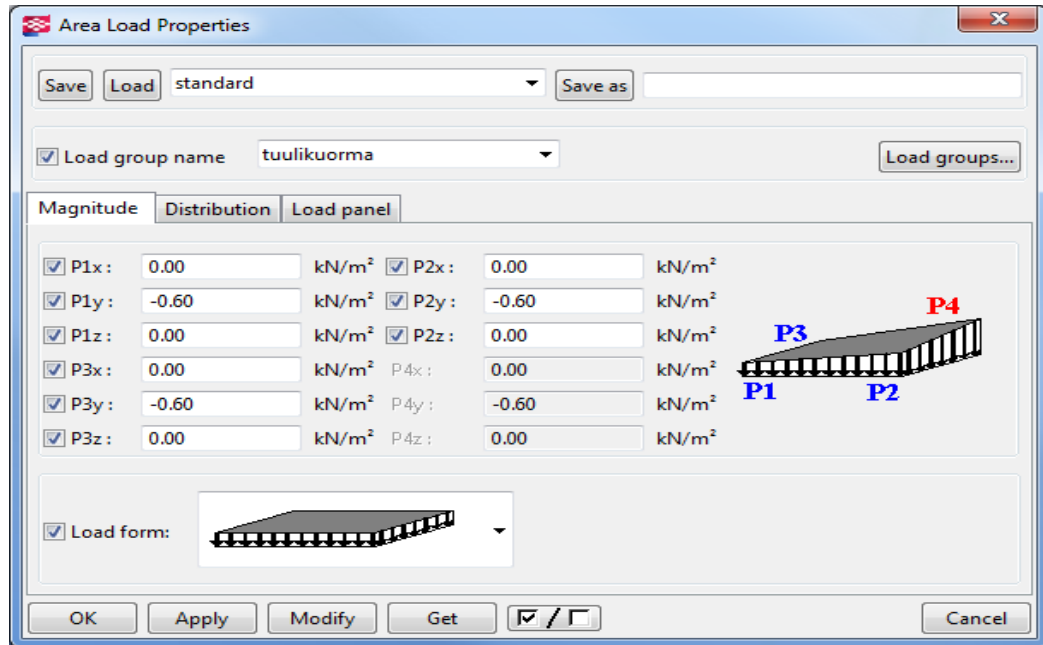


Kuva 9 Loads valikko



Kuva 10 Kuormat paikoilleen mallinnettuna

Valitsemalla mallinnetun kuorman hiirellä pääsee sen asetuksiin muokkaamaan sitä.

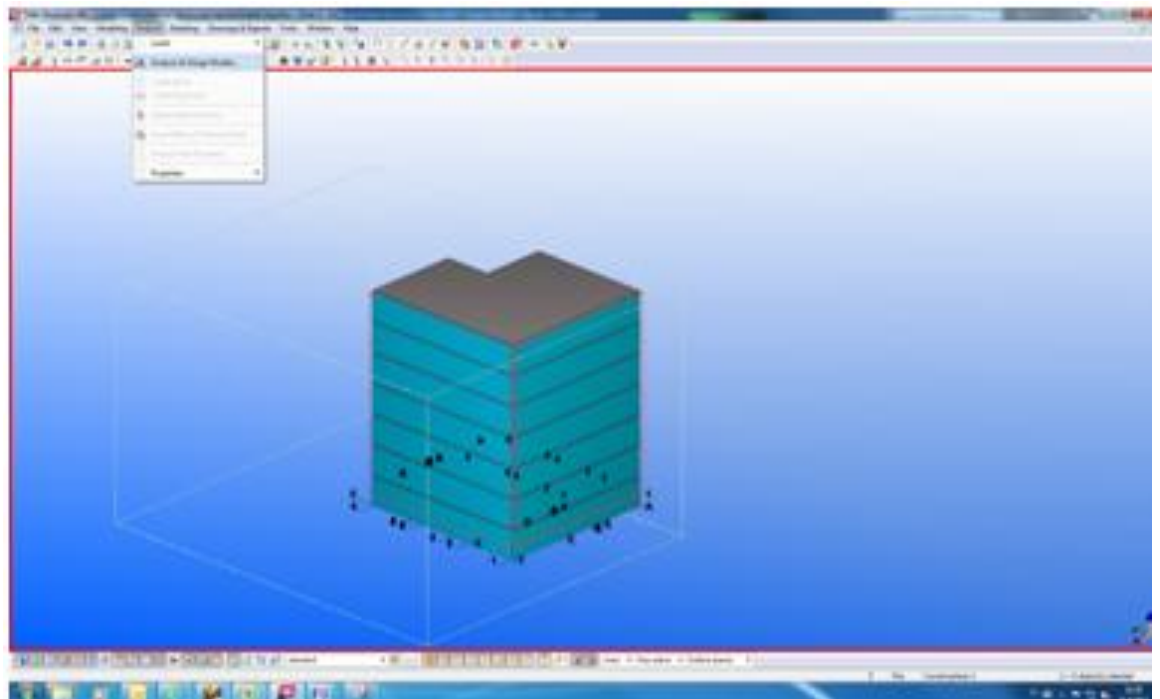


Kuva 11 kuorman asetukset

Tässä vaiheessa tarkistetaan, että kuormat on mallinnettu oikein ja mallissa on tarvittavat rakenneosat paikoillaan, sekä materiaalit on määritetty.

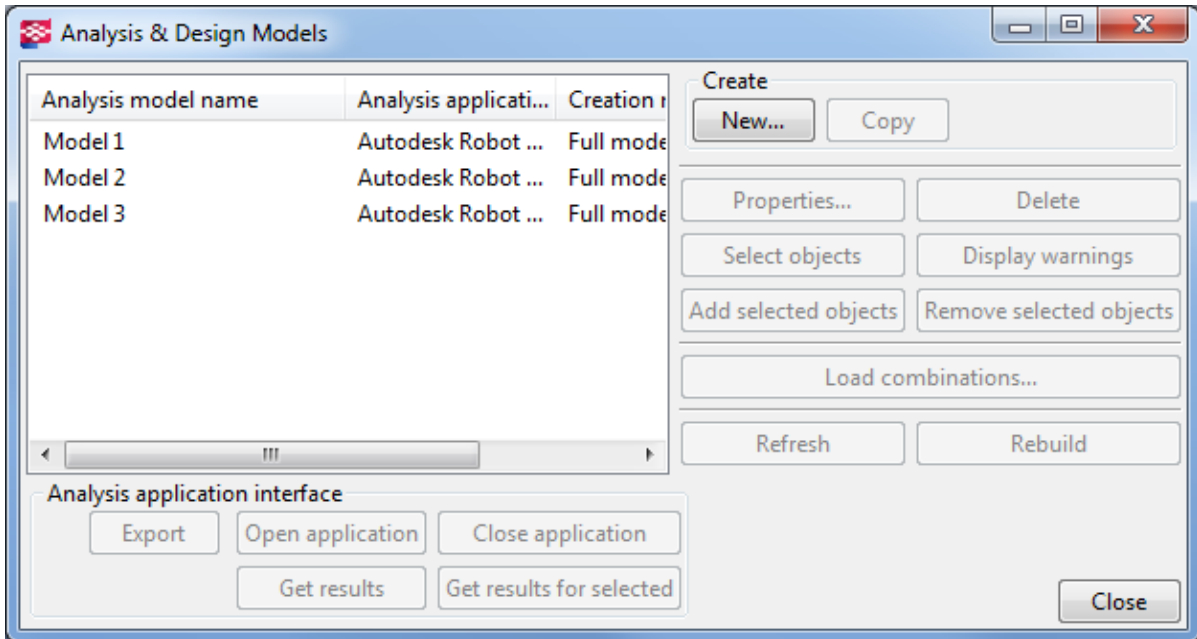
ANALYYSIMALLI

Analyysimalli luodaan *analysis & design models* -valikosta kuva 12



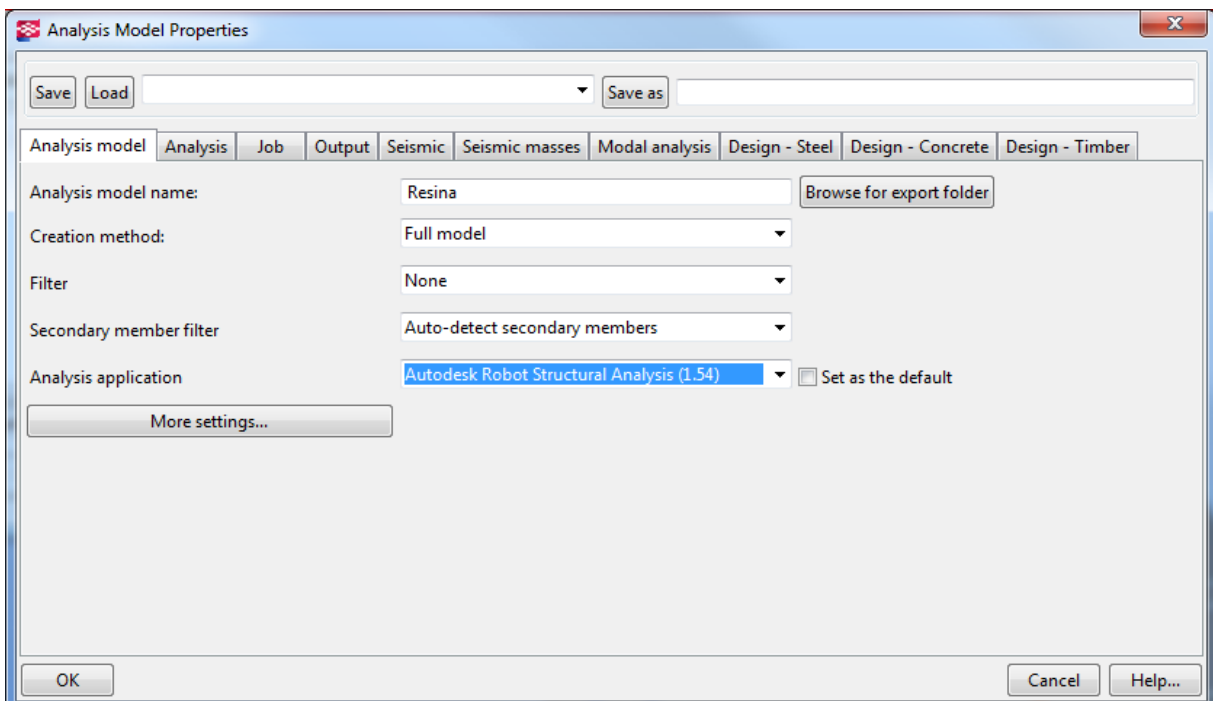
Kuva 12 *analysis & design models* -valikko

analysis & design models - valikosta painetaan Create New -painiketta kuva 16.



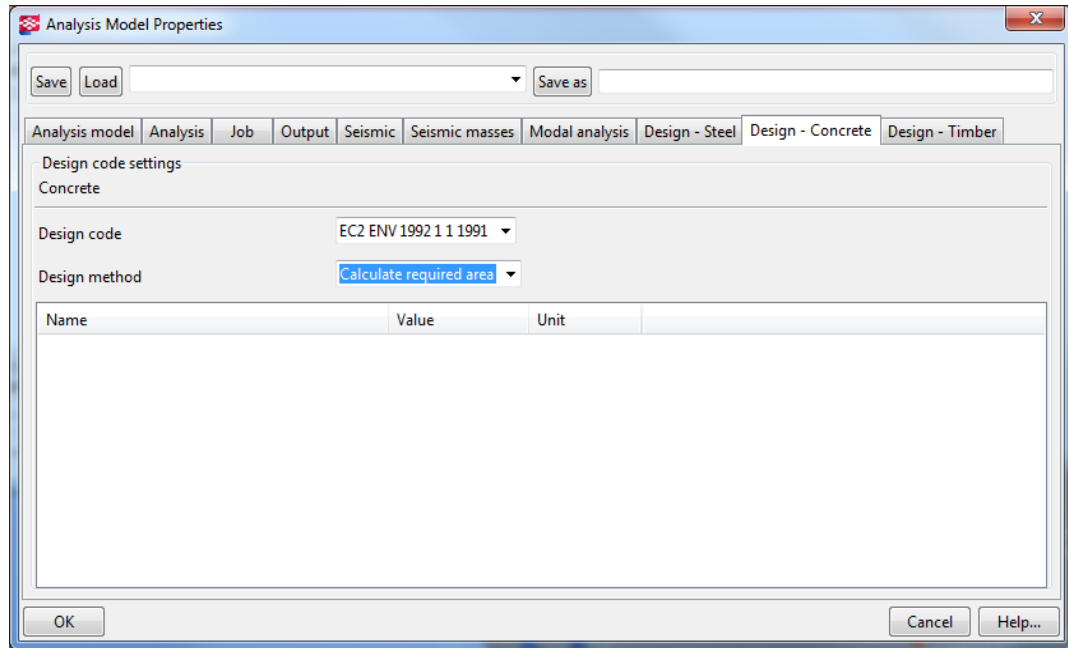
Kuva 12. *analysis & design models*

Analysis model properties valikossa anna tiedostolle nimi ja valitse analysis applicati-
on -valikosta sovellus johon analyysimalli halutaan siirtää kuva 13.



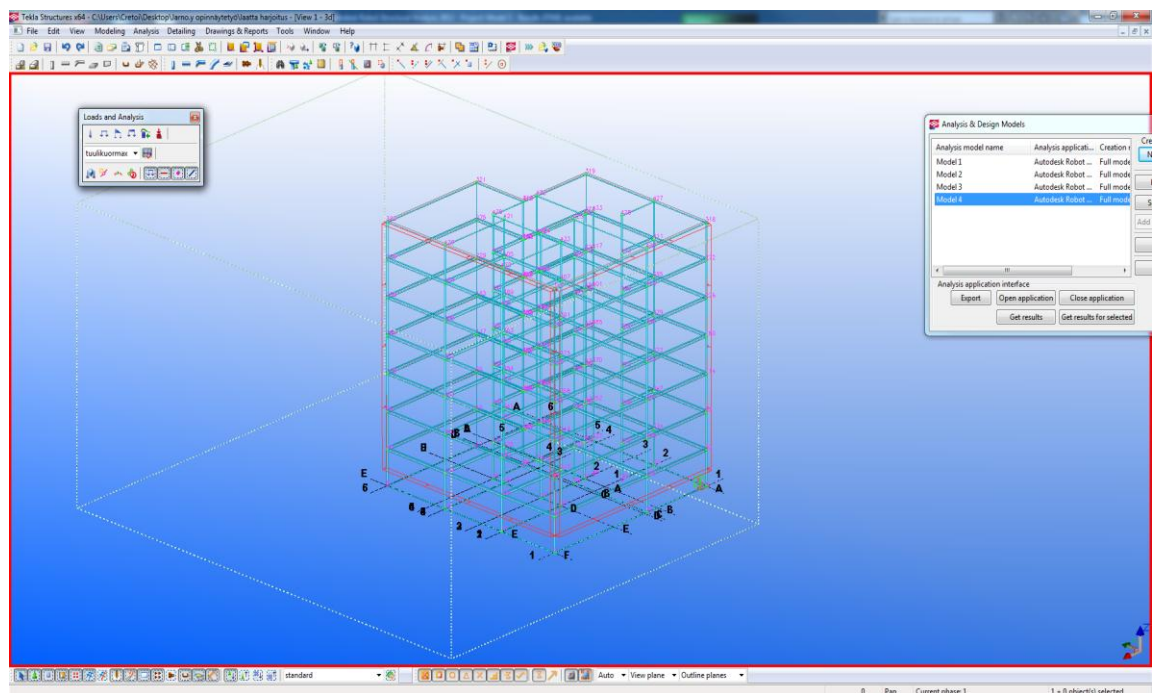
Kuva 13 Analysis model properties-valikko

Muutetaan design -välilehdellä *Design method: none* sijasta calculate required areas
niille materiaalille joita on mallissa. kuva 14.



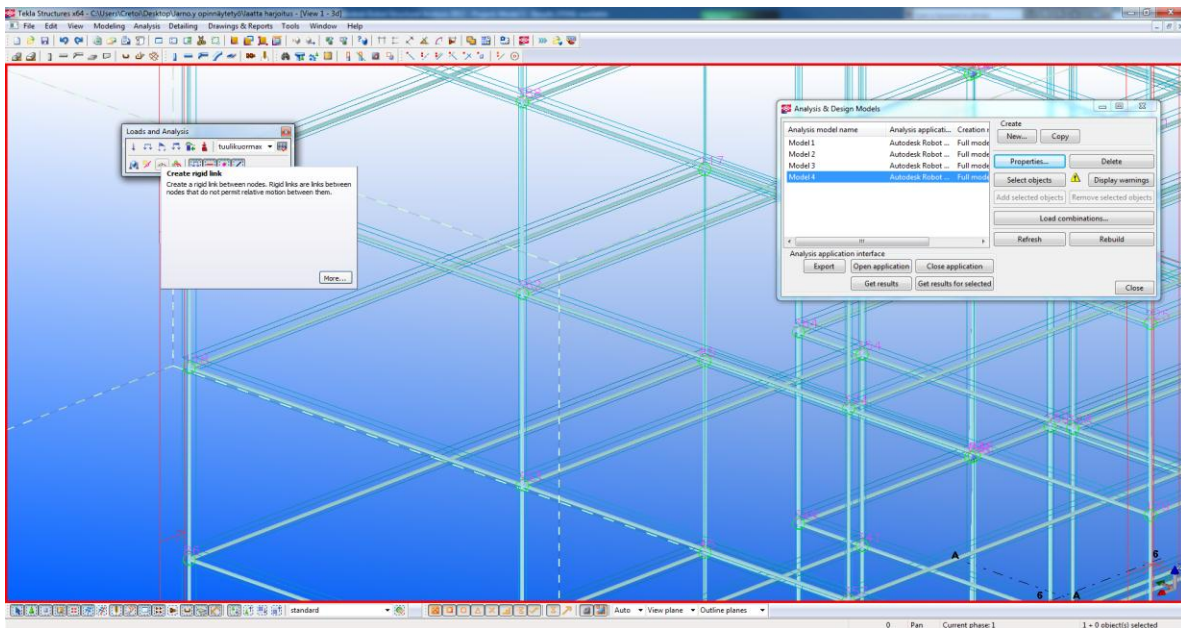
Kuva 14. *Design method*

Kun asetukset on määritetty paina ok, jolloin Tekla tekee analyysimallin. kts. kuva 15.



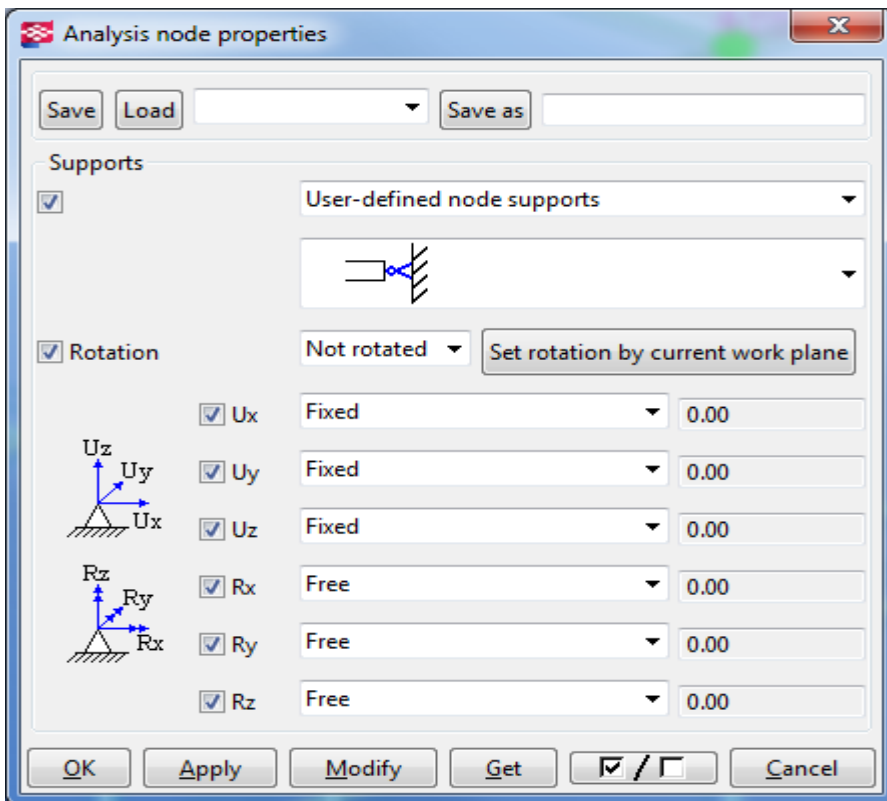
Kuva 15 Analyysimalli

Mahdolliset rigid-linkit mallinnetaan Create rigid-link työkalulla (kuva 16) esimerkiksi palkkien ja ontelolaattojen väliin mallinnetaan *rigid-linkit*.



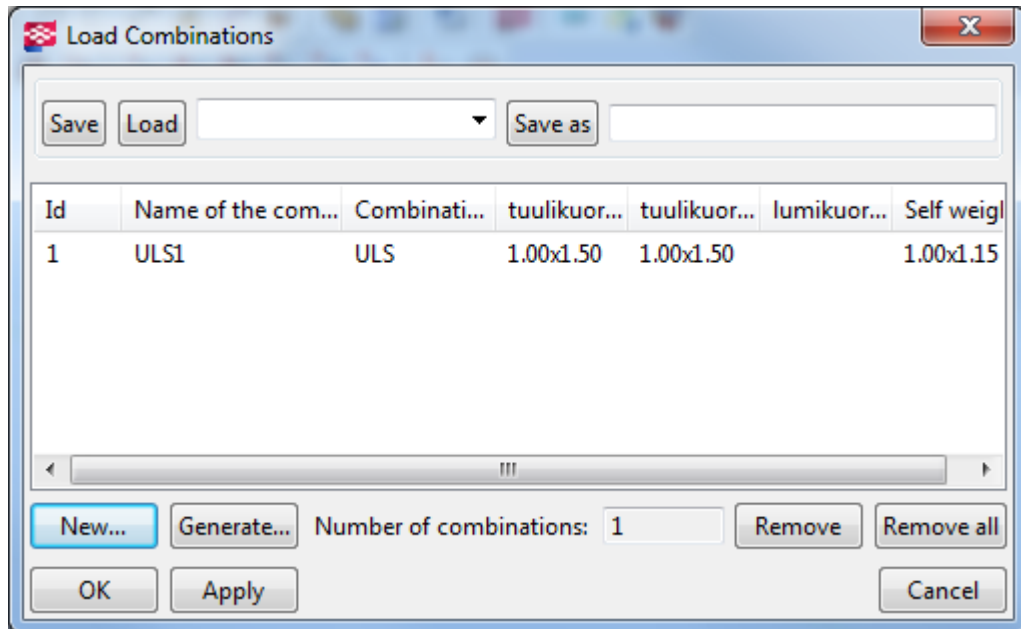
Kuva 16 Rigid-link työkalu

Määritellään tuennat. node-pisteisiin klikkaamalla solmupistettä, jolloin aukeaa *analysis node properties* valikko (kuva 17).

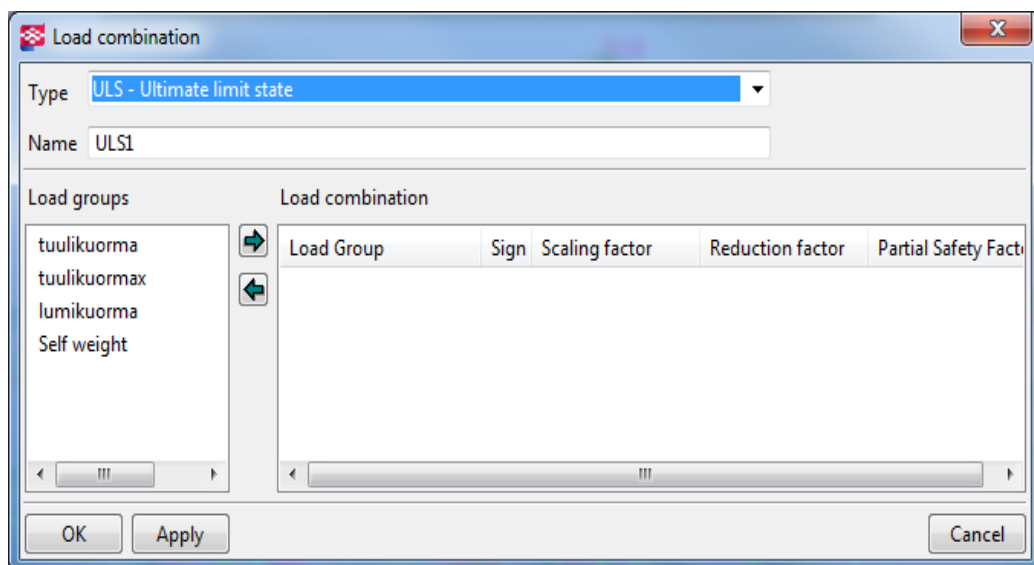


Kuva 17 *analysis node properties*

Seuraavaksi määritellään kuormat analysis & design models > load combinations valikosta (kuva 18 ja 19) ja painetaan New - painiketta tai valitaan Generate automaattinen kuormistus

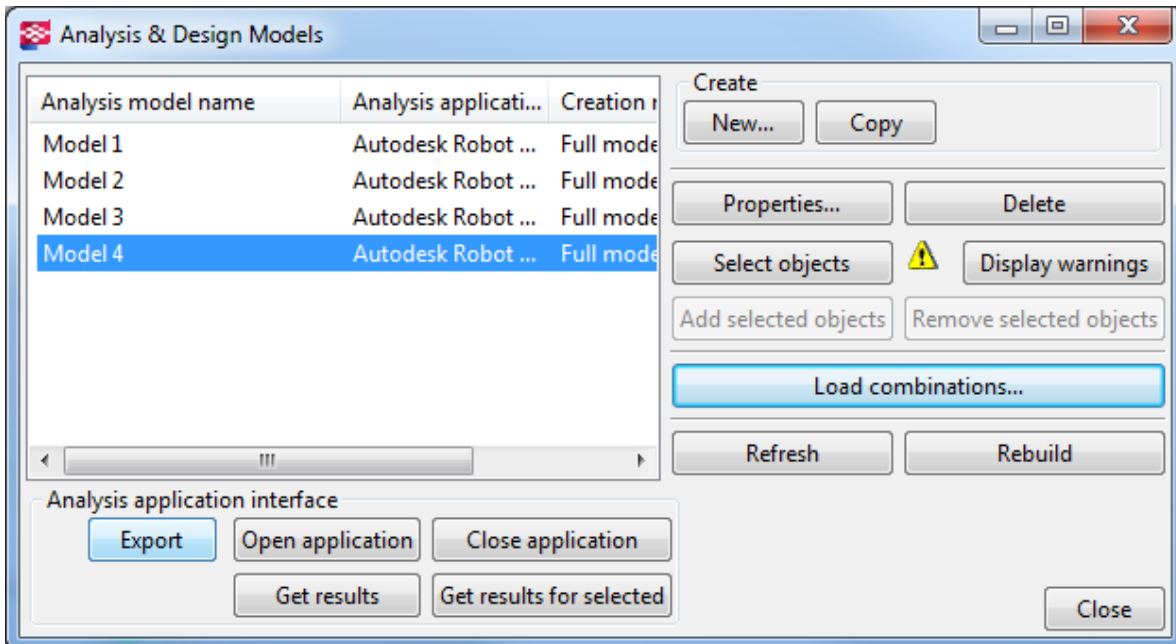


Kuva 18 Load combinations



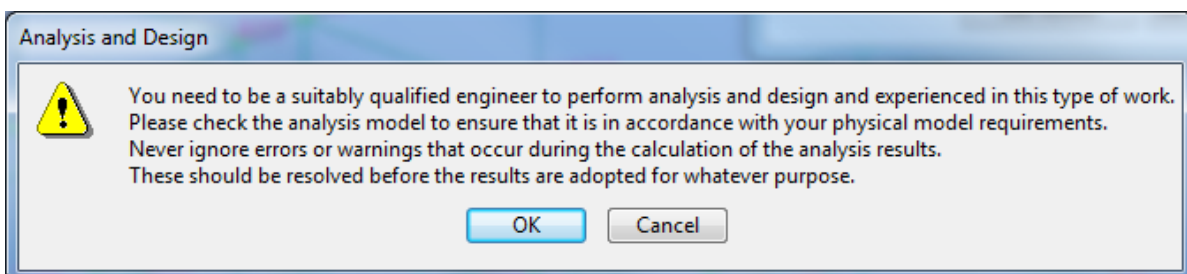
Kuva 19 Kuormitus yhdistelmän määrittäminen

Tässä vaiheessa varmistetaan vielä, että tuennat on määritelty ja kuormat ovat haluttunlaiset. Sitten painetaan *export*-painiketta (kuva 20) jolloin Tekla siirtää mallin Robotiin.



Kuva 20 Export

Tämän jälkeen Tekla varmistaa, että laskennan suorittaa ammattitaitoinen henkilö (kuva21). Paina OK

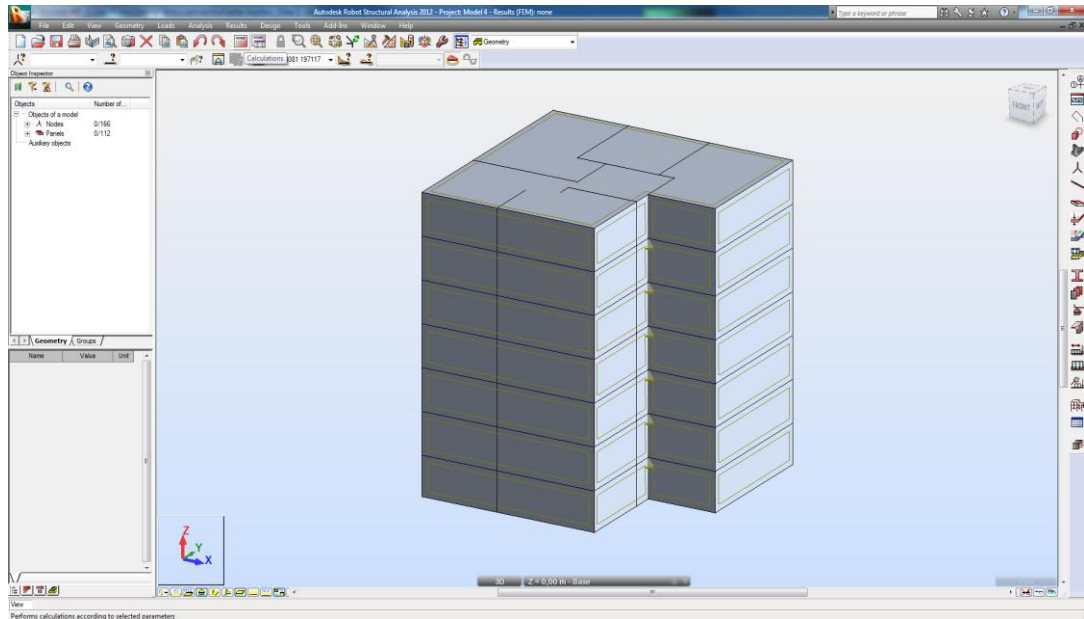


Kuva 21

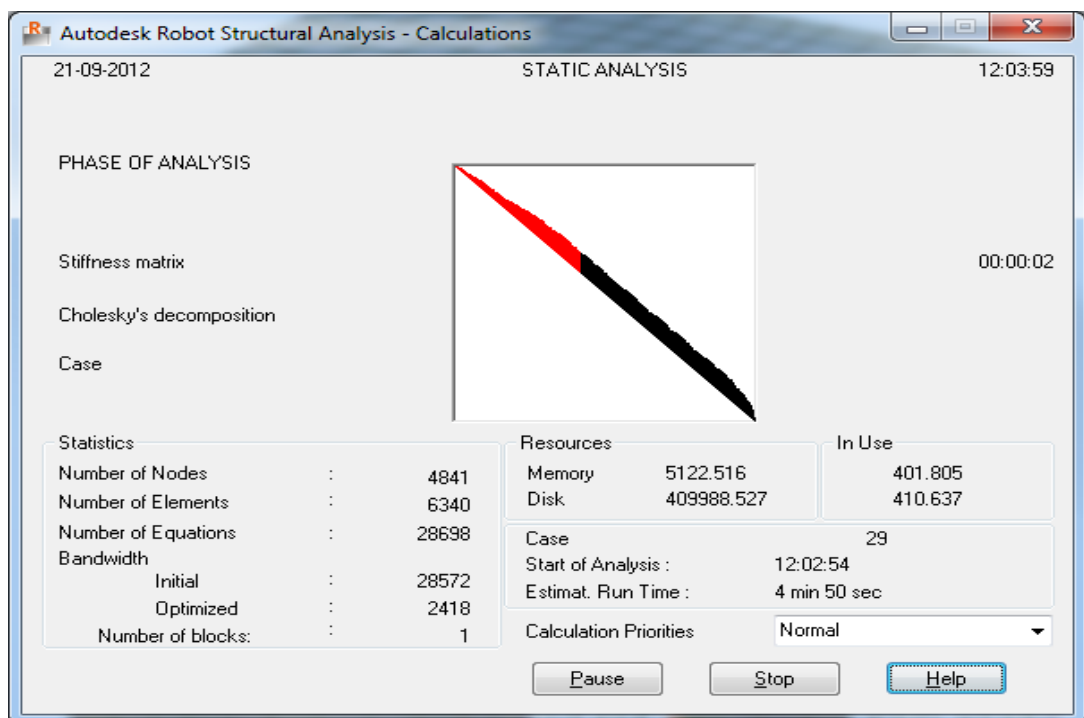
Tekla siirtää mallin Robotiin ja avaa robotin automaattisesti, jos mallissa on jotain vikaa, malli ei välttämättä siirry Robotiin.

ROBOT STRUCTURE MILLENIUM

Kun malli on siirtynyt Robotiin, tarkastetaan malli päällisin puolin. Sitten voidaan valita erilaisia kuormitus yhdistelmiä, laskenta aloitetaan painamalla *calculations*-painiketta (laskimen kuva) kts kuva 22. Kun laskenta käynnistyy aukeaa laskenta ikkuna jos malli on suuri. kts kuva 23.



Kuva 22 Calculations



Kuva 23 Laskenta ikkuna

Lopuksi tarkastellaan tuloksia ja arvioidaan niiden paikkansa pitävyys, koska pienikin virhe voi vääristää tulokset kokonaan.