



TEKLA STRUCTURES MALLIN- NUSOHJELMAN JA RFEM 3D- LASKENTAOHJELMAN YHTEIS- TYÖ

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Mikko Huhtala	
Työn nimi Tekla Structures mallinnusohjelman ja RFEM 3D-laskentaohjelman yhteistyö	
Päiväys	11.5.2015
Sivumäärä/Liitteet	39/38
Ohjaaja(t) Arto Puurula, yliopettaja, rakennetekniikka, TKT Matti Mikkonen, lehtori, rakennetekniikka, DI	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Rakennussuunnittelutoimisto Nylund Oy, Pauli Pehkonen ja Hannu Kuokkanen	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämä opinnäytetyö käsittelee <i>Tekla Structuresin</i> ja <i>RFEM 3D-laskentaohjelman</i> välistä tiedonsiirtoa. Tutkimuksen tarkoitus oli tarkastella betonielementtirakenteisen kerrostalon mallintamista. Tavoitteena oli selvittää mitä rakennemallia mallinnettaessa tulee huomioida, jotta tiedonsiirto rakennemallinnusohjelman ja laskentaohjelman kanssa toimii saumattomasti ja on mahdollisimman tehokasta. Referenssikohteena käytettiin betonielementtirakenteista asuin- ja palvelukäyttöön suunniteltua kerrostaloa.</p> <p>Opinnäytetyössä tutkittiin, miten kerrostalon väli- ja yläpohjan ontelolaatasto ja ulkoseinien sandwich-elementit tulisi mallintaa, sillä kyseisille rakenneosille ei ole laskentaohjelmassa yksinkertaista työkalua. Lisäksi pyrittiin tuomaan esille ja ratkaisemaan ongelmia suunnitteluprosessin kulussa. Ongelmia aiheutti esimerkiksi <i>Teklan</i> komponenttien käyttäytyminen mallin siirrossa ja automatiikan arvaamattomuus. Apuna ongelmien ratkaisuun ja tiedon hankintaan käytettiin ohjelmistojen julkaisemia käyttöohjeita sekä sähköpostitukipalvelua.</p> <p>Työn tuloksena luotiin valmiiksi mallinnetusta rakennemallista analyysimalli <i>Tekla Structuresin</i> analyysimallintamistyökalulla. Analyysimallista luotiin laskentamalli siirtämällä se <i>RFEMin</i>. Työssä on teoriaosuus rakennuksen kokonaismallista, rakennuksen mallinnuksen kuvaus, sekä ohjeistus laskentamallin ja rakennemallin yhteistyöstä. Työssä tutkittiin analyysimallin toimintaa ja kuinka rakennemallia tulee mallintaa oikeellisuuden ja tehokkuuden kannalta. Samalla tutkittiin, mitä analyysimallissa tulee huomioida, että rakenteet siirtyvät oikeina ohjelmasta toiseen. Opinnäytetyön aikana opiskeltiin molempien ohjelmien perustyökalujen käyttöä, haastateltiin ohjelmia käyttäneitä henkilöitä toimintatavoista ja tutustuttiin mallinnusohjeisiin.</p> <p>Tuloksissa todettiin, että hyvin ennakoitu mallinnustapa tehostaa työskentelyä ja vähentää mahdollisten geometriavirheiden todennäköisyyttä. Lisäksi saatiin selville hyvää tietoutta, jota voi hyödyntää mallien yhteiskäytössä ja käyttää hyväksi käyttöön liittyvässä kehityksessä. Työn mallinnuskuvauksessa käsitellään työhön liittyviä ongelmia.</p>	
Avainsanat Tekla, RFEM, käyttöohje, betonielementti, analyysimalli,	
Julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author(s) Mikko Huhtala			
Title of Thesis Co-Operation between Tekla Structures and RFEM calculation program			
Date	11 May 2015	Pages/Appendices	39/38
Supervisor(s) Mr. Arto Puurula, Prinipal Lecturer in Structural Engineering, PhD Mr. Matti Mikkonen, Lecturer in Structural Engineering			
Client Organisation /Partners Rakennussuunnittelutoimisto Nylund Oy, Pauli Pehkonen and Hannu Kuokkanen			
Abstract <p>The topic of this study was to examine the modeling of precast concrete elements. The purpose was to examine the co-operation between <i>Tekla Structures</i> and the <i>RFEM 3D</i> calculation program. The aim was to find out what should be taken into account when creating a structural model so that co-operation with calculation model would work effectively and smoothly. A six-storey apartment house made of concrete elements was used as a reference target.</p> <p>This thesis examined how hollow-core slabs and sandwich walls should be modeled in <i>Tekla Structures</i> and in <i>RFEM</i>. There were not simple tools for those components in <i>RFEM</i>. The thesis brought out problems in the process and tried to find solutions to them. Problems were caused by <i>Teklas</i> components as they were behaving erratically when transferring models. Software manuals and e-mail supports were used as a source.</p> <p>As a result an analysis model was created from the structural model by using <i>Tekla Structures</i>. The study examined how the analysis model works and how it should be modeled to be effective and authentic. The study included a theoretical part of the modeling methods and description of the modeling process. It contains also guidelines on co-operation. It was also studied how information is transferred from <i>Tekla Structures</i> to <i>RFEM</i>. First the software and the basic tools in them were studied. In addition with people who had used the program before were interviewed and the software manuals were studied.</p> <p>As a result of this thesis it was found out that co-operation helps to streamline the workflow and reduce the probability to geometrical mistakes. Useful knowledge of the program co-operation was found out also for the future development in this area. The modeling description deals with work-related problems.</p>			
Keywords Tekla, RFEM, manual, precast concrete, analysis model,			
Public			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	5
2	KOKONAISMALLI	6
2.1	Rakennemalli	6
2.2	Kuormamalli	7
2.3	Analyysimalli.....	8
3	LÄHTÖKOHDAT	11
3.1	Sandwich-elementit	11
3.2	Ontelolaatasto	12
3.3	Epäkeskisyydet	15
4	RAKENNEMALLIN LAAJENTAMINEN KOKONAISMALLIKSI	18
4.1	Työssä käytettävät ohjelmistot.....	18
4.2	Mallinnustyön aloitus	19
4.3	Kokonaismallin luominen.....	19
4.3.1	Näkymät	19
4.3.2	Analyysimallin muokkaaminen	20
4.4	Laskentamallin luominen	24
4.5	Mallien siirto	25
4.6	Ontelolaatastojen muokkaus.....	27
4.7	Ulkokuori ja eriste	28
4.8	Laskenta	29
5	TULOKSET JA ANALYSOINTI	34
5.1	Kokonaismallin hyödyt	34
5.2	Kokonaismallin haasteet.....	34
5.3	Käyttökokemukset.....	35
6	YHTEENVETO JA POHDINTA.....	36
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT.....	38
	LIITE 1: REFERENSSIRAKENNUKSEN POHJAPIIRROKSET	40
	LIITE 2: TEKLA STRUCTURES MALLINNUSOHJELMAN JA RFEM 3D-LASKENTAOHJELMAN YHTEISTYÖ	44

1 JOHDANTO

Tietomallinnus on voimakkaasti kehittyvä alue rakennusten suunnittelussa. Suuri osa tämän päivän suunnitelmista tehdään 3D-mallinnuksena 2D-piirtämisen sijaan ja tämä helpottaa suunnittelijan hahmotusta rakennuksesta ja sen toiminnasta. Suunnittelussa käytetään useita eri ohjelmia suunnittelun aikana ja osa näistä ohjelmista on suunniteltu toimivan yhteistyössä keskenään. Usean 3D-mallin luominen ei ole tehokasta, ja muutosten hallitseminen eri malleissa vaatii tarkkuutta suunnittelijalta. Yhdellä mallilla työskentely voisi sekä vähentää mallintamiseen kuluvaan aikaa, että malleissa tapahtuvien virheiden mahdollisuutta, kun esimerkiksi rakennemallinnuksen muutokset päivittyvät laskentamalliin.

Betonirakenteiden laskenta tehdään perinteisesti käsinlaskentana ja Excel-pohjaisilla mitoitusohjilla. Markkinoilla on lukuisia rakenteiden mitoitukseen ja analysointiin tarkoitettuja FEM-laskentaohjelmia. Laskentaohjelmat mahdollistavat tietokoneen kapasiteetin kasvettua sellaisten suurten kokonaisuuksien laskentaa, joiden laskenta käsin ei olisi mahdollista. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia betonirakenteisen elementtikerrostalon rakennemallista luotavaa analyysimallia ja mallin toimintaa 3D-FEM-laskentaohjelmassa. Työssä luodaan analyysimalli ja laskentamalli rakennuksesta, jonka kantavana rakenteena on teräsbetoninen seinät-ontelolaatta-runko. Työssä tutkitaan tapaa, jossa usean mallin luomisen sijaan tehdään vain yksi malli, joka laajennetaan laskenta-ohjelmaan. Työn aikana pyritään myös selvittämään tapoja mallintaa ontelolaatasto yhteen suuntaan kantavana, mutta levyvaikutuksen säilyttävänä laatastona. Ontelolaataston voisi käytännössä mallintaa yksinkertaistettuna palkkirakenteena, mutta tällöin levyvaikutusta ei huomioitaisi.

Laskentaohjelmana työssä käytetään saksalaisen ohjelmistoyrityksen *Dlubalin* julkaisemaa *RFEM* 3D-laskentaohjelmaa ja yhteistyössä rakennemallinnusohjelmana käytetään yhdysvaltalaisen *Trimble Oy:n* omistama *Tekla Structuresia*. Työn toimeksiantajana toimii Rakennussuunnittelutoimisto Nylund Oy, joka on Kuopiossa toimiva arkkitehti- ja rakennesuunnitteluun erikoistunut toimisto. Rakennussuunnittelutoimisto Nylund Oy on osa pohjoismaista suunnittelu- ja konsulttialalla toimivaa *Swe-co-konsernia*. Työtä varten toimeksiantajalta on saatu *Tekla Structuresilla* mallinnettu rakennemalli sekä rakennuksen pohja- ja leikkauspiirustukset.

Opinnäytetyön alussa on katsaus kokonaismallin teoriasta, jotta työn lukija voi ymmärtää paremmin kokonaismallin toimintaa ja siitä saatuja hyötyjä ja mahdollisuuksia. Käytännön työssä pohditaan tapoja mallintaa työssä esiintyviä rakenteita ja pyritään löytämään tarkka ja käytännöllinen tapa toteuttaa työ. Lisäksi työssä tarkastellaan analyysimallin luomista ja siirtämistä laskentaohjelmaan. Laskentaohjelmassa kerrotaan, kuinka tulokset saadaan ulos. Haasteena työssä on muodostaa rakenteiden liitokset ja ontelolaatasto siten, että sen kuormat jakautuvat luotettavasti oikeille rakenteille. Työn tuotoksena on käyttöohje, jossa esitellään tiivistetysti kuvien ja selitteiden avulla, miten ohjelmien yhteistyö on toteutettu.

2 KOKONAISMALLI

Suuri osa kaikesta rakennesuunnittelusta sekä uudis-, että korjausrakentamisessa toteutetaan nykyään 3D-suunnitteluna. Yleisissä tietomallivaatimuksissa on esitetty vaatimukset rakennesuunnittelijan tietomallille. Rakennesuunnittelijan fyysistä 3D-mallia kutsutaan rakennemalliksi ja sen luominen on yksi vaatimus tietomallipohjaisessa suunnittelussa (Yleiset tietomallivaatimukset. Osa 5. Rakennesuunnittelu. RT 10-11070, 2.). *Tekla Structures*illa luotu rakennemalli on laajennettavissa kokonaismalliksi, joka sisältää rakenne-, kuorma- ja analyysimallin. Näitä tietoja yhdessä käytetään rakennuksen laskennassa, kuvien tuottamisessa ja hahmottamisessa. Rakennemallin laajennus kokonaismalliksi tapahtuu suhteellisen pienellä vaivalla, jos työskentelyn alusta asti on otettu huomioon, että malli tullaan laajentamaan. Rakennemallin luomisessa analyysimallin kannalta on oltava erityisen tarkka, sillä laskenta ei toimi oikein, jos mallissa on pieniäkin mittavirheitä. Tämä johtaa väistämättä virheellisiin tuloksiin, tai siihen, että ohjelma ei pysty laskemaan rakennetta. (Rieki 2014-09-25.)

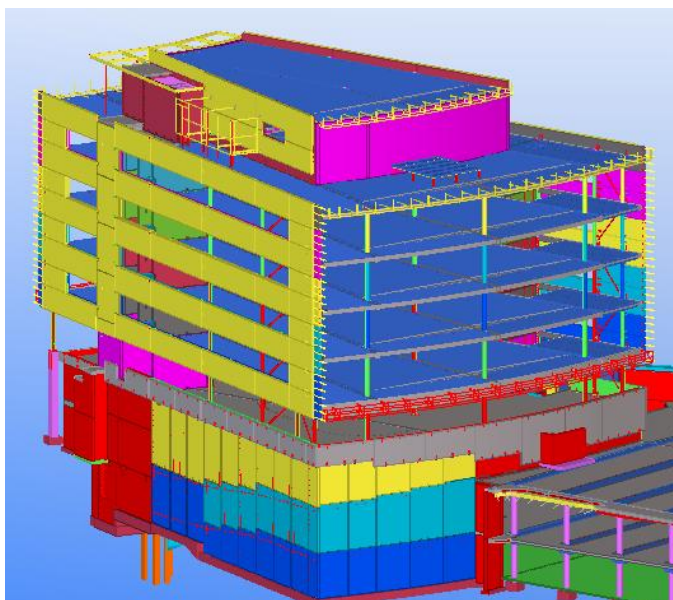
Kokonaismalliin sisältyvät seuraavat käsitteet:

1. rakennemalli
2. kuormamalli
3. analyysimalli.

2.1 Rakennemalli

Rakennemalli sisältää rakennemallinnukseen tarkoitettulla 3D-ohjelmalla luodut rakennuksen osat ja niihin sisällytetyn informaation. Rakennemalliin mallinnetaan kantavat rakenteet, ei-kantavat betonirakenteet ja sellaiset rakenteet, joilla on merkitystä muille suunnittelijoille. (Yleiset tietomallivaatimukset. Osa 5. Rakennesuunnittelu. RT 10-11070, 2.) Rakennemallin luomisesta on hyötyä havainnollisuuden ja muutosten hallinnan kannalta, sillä kaikki muutokset, mitkä mallissa tapahtuvat päivittyvät kaikkiin sidoksissa oleviin kuviin ja luetteluihin. Mallissa on runsaasti informaatiota rakennuksesta, kuten osien nimet ja tyypit, geometria, sijainti, rakenteiden väliset liitokset ja käytettävät materiaalit. Malli on yksi tietolähde, mistä tuotetaan piirustuksia ja muita tuotoksia kuten raportteja. Kaikki rakennemallin osat sisältyvät rakennettavaan rakennukseen. (Tekla.com c) Rakennemalli toimii lähtötietona rakennesuunnittelijan laskentamallille.

Rakennesuunnittelun lähtötietoina ovat yleensä arkkitehtien tilasuunnittelu ja arkkitehtikuvat, joiden perusteella rakennesuunnittelija mallintaa rakennemallin geometrian. Lisäksi suunnitteluun vaikuttavat kuormitustiedot, rakennuksen käyttöikä ja palotekniset asiat. Rakennesuunnittelija suunnittelee ja mallintaa rakennuksen kantavat rakenteet siten, että kuormat kulkeutuvat kantavia rakenteita pitkin aina perustuksiin saakka. Kokonaismallissa tähdätään siihen, että kaikki geometrian mallinnus tehdään rakennemalliin, jolloin muutokset pysyvät hallinnassa. Lisäksi rakennemallinsohjelmassa on paremmat työkalut geometrian mallintamiseen kuin laskentamallissa ja näin työskentely on myös helpompaa. Kuvassa 1 on esimerkki rakennemallista.

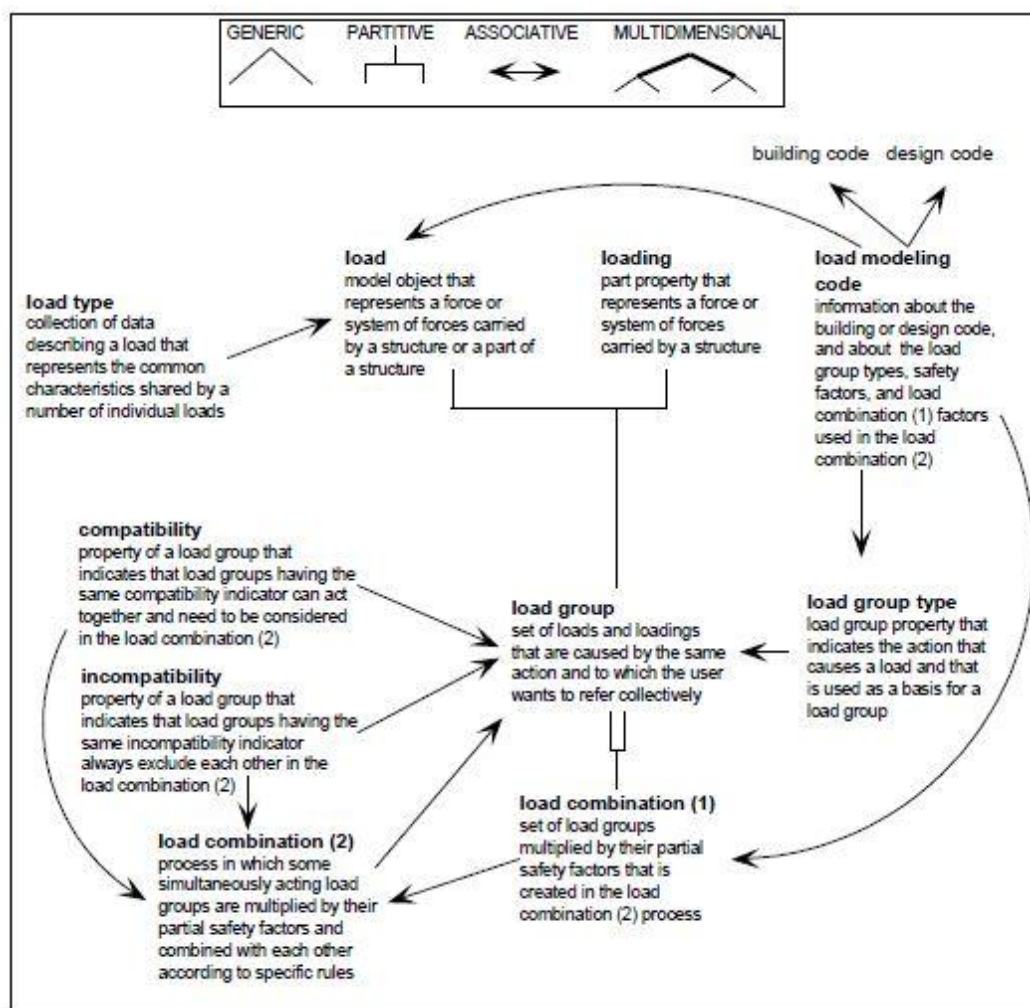


KUVA 1 Esimerkkikuva rakennemallista (www.tekla.com)

2.2 Kuormamalli

Kuormamalli on osa kokonaisuutta ja sisältää tietoa kuormitustapauksista ja kuormitusryhmistä, jotka vaikuttavat fyysisen mallin osiin. Se sisältää myös tietoa standardeista ja rakennusmääräyksistä, joita ohjelma käyttää luodessaan kuormitusyhdistelmiä. (Tekla.com b) Kuormamallin perustana toimivat standardit, kansalliset liitteet ja rakennusmääräykset, jotka yleensä sisältyvät ohjelmiston tietokantaan ja toimivat hyvin automaattisesti, jos kuormitustapaukset on syötetty oikein. Rakennesuunnittelija syöttää kuormitustapaukset suunnittelun vaatimalla tavalla. Kuormitustapauksia ovat erilaiset rakenteiden kuormat, ihmisten kuormat, luonnonilmiöistä, kuten tuulesta tai lumesta johtuva kuorma ja monet muut tekijät, jotka aiheuttavat rasituksia rakenneosille.

Kuormamallin luominen alkaa tutkimalla, mitkä kuormat rasittavat rakenteita. Mallissa kuorma esiintyy objektina, joka sisältää voiman, joka vaikuttaa rakenteeseen tai sen osaan. Kuormille asetetaan kuormatyyppi, joka kuvaa kuorman vaikutusalaa ja -tapaa ja sitä kuvataan piste-, viiva-, taso- ja lämpökuormana. Kuormat voivat olla osa kuormaryhmää, mikä tarkoittaa sitä, että kuormat johtuvat samasta toiminnasta ja käyttäjä haluaa esittää kuorman yhtenäisenä kokonaisuutena. Kuormaryhmä voi olla sellainen, että ryhmän osat voivat vaikuttaa kaikki yhdessä, kaikki erillään tai sellainen, että eri tapaukset eivät voi vaikuttaa yhtäaikaan. Esimerkiksi kaikista suunnista tulevat tuulikuormat eivät voi vaikuttaa samaan aikaan rakennukseen. Yhden kuormaryhmän tyyppi on aina sama, esimerkiksi tuulikuormat ovat omana ryhmänään ja lämpökuormaryhmät omanaan. Kuormat yhdistellään erilaisiin eurokoodien määrittelemiin kuormayhdistelmiin, joissa määritellään kuorman varmuuskertoimet ja erilaisten kuormien yhdistelyt. (Tekla Structures Glossary 2015, 126 - 128.) Kuvassa 2 on kuvio, joka hahmottaa kuormamallin sisältöä ja eri osien sidosteisuutta toisiinsa.



KUVA 2 Kuvio kuormien sidonnaisuudesta (Tekla Structures Glossary 2015, 126)

2.3 Analyysimalli

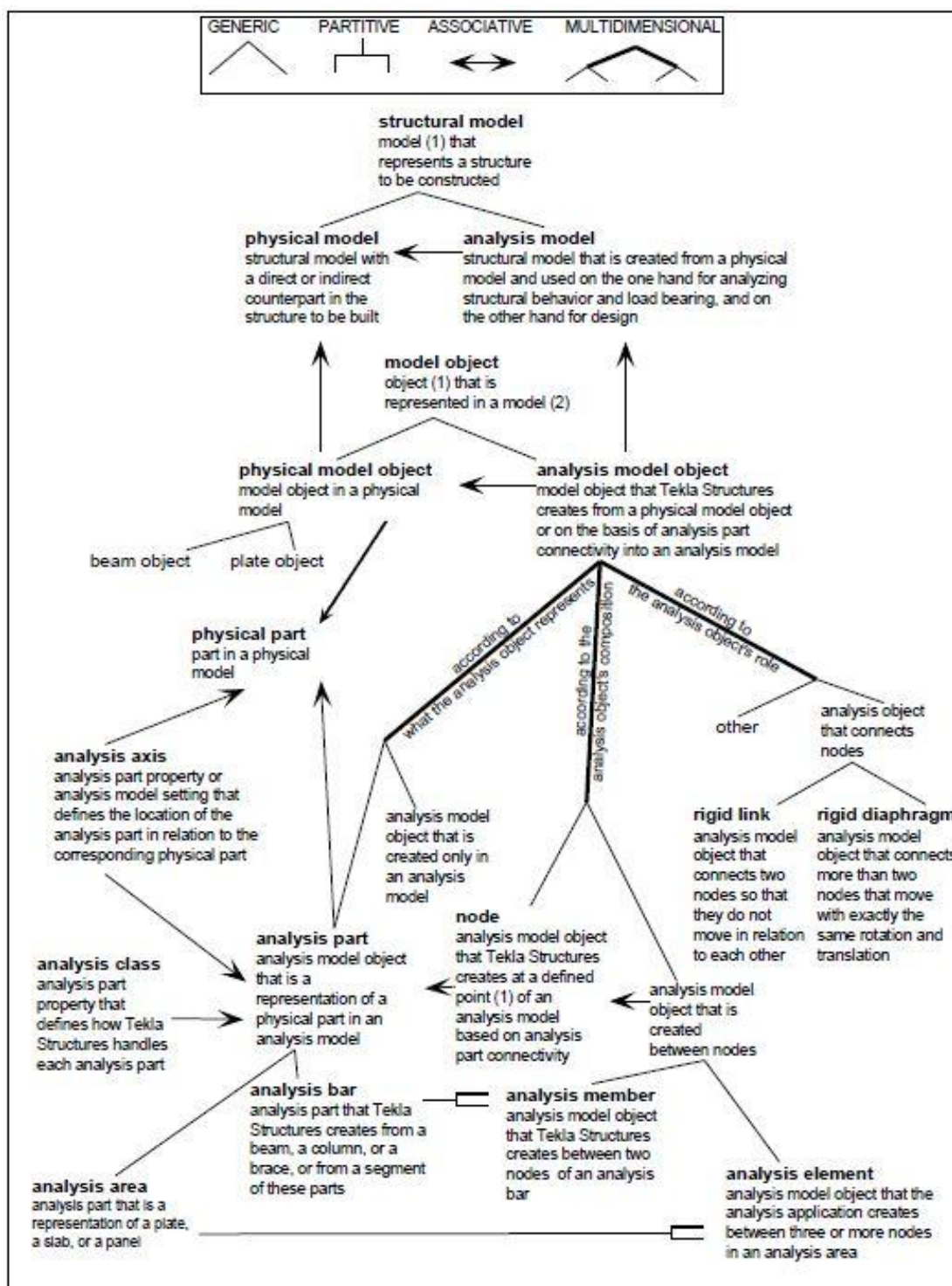
Analyysimalli on 3D-malli, joka luodaan pohjautuen rakennemallin kantaviin osiin. Analyysimallia käytetään FEM-laskennassa rakenteiden käyttäytymisen tutkimiseen, kuormien jakautumiseen ja rakenteiden mitoitukseen. Rakennemallin osista, kuten seinistä, laatoista, palkeista ja pilareista muodostetaan analyysiosat, joita käytetään laskennassa. Näitä osia ovat erilaiset sauvat, palkit, solmupisteet ja levyrakenteet. Analyysiosat kuvaavat kaikkia rakennuksen kantavia rakenteita. Analyysimallin tarkoitus on muodostaa perusosat laskentaohjelman luomaa elementtiverkkoa varten. Tästä lasketaan esimerkiksi solmupisteiden siirtymiä ja voimasuureita. (Amk.fi)

Analyysimallissa asetetaan rakenneosille ominaisuuksia, jotka toimivat lähtötietona laskennalle. Näitä ominaisuuksia ovat rakenteen paksuus, poikkileikkaus ja materiaali. Analyysimallissa rakenteiden liitokset määritellään jäykkiin, nivelellisiin ja tältä väliltä oleviin jousiliitoksiin. Liitoksen ominaisuudet vaikuttavat oleellisesti siihen, mitä kuormia kyseinen liitos välittää ja tämä korostuu 3D-laskennassa. Sauva- ja levyrakenteille voidaan asettaa erilaisia vapautuksia jäykkyyteen, ja jos tämä mallinnetaan väärin, välittää se myös sellaisia voimia, mitä se ei todellisuudessa välitä. Analyysimallin tarkkuus korostuu korkeissa rakennuksissa, sillä mahdolliset virheet kertautuvat ja vaikuttavat näin enemmän laskentatulokseen. (Elementtisuunnittelu.fi. c) Liitosten lisäksi on tärkeä kiinnittää huomiota analyysimallin muihin ominaisuuksiin, kuten materiaaliominaisuuksiin. Analyysimallin osien sidonnaisuut-

ta toisiinsa on havainnollistettu kuvassa 3. Taulukossa 1 on kuvattu analyysimallin käyttämät objektit.

Taulukko 1 Analyysimallin osat (Huhtala 2015-04-07)

Analyysiosia	Analyysiosia edustaa rakennemallin fyysistä osaa. Näitä osia voi kuvata analyysimallissa eri tavoin.
Analyysipalkki	Analyysiosia, joka edustaa fyysisen mallin palkkia, pilaria tai vinotukea. Analyysipalkki sisältää vähintään yhden sauvaelementin.
Sauvaelementti	Analyysiosia, joka luodaan kahden solmupisteen väliin. Jokainen rakennemallin fyysinen osa sisältää vähintään yhden sauvaelementin.
Tasoelementti	Analyysiosia, joka edustaa rakennemallin tasomaisia rakenteita, kuten laattaa tai seinää. Tasoelementti sisältää vähintään kolme sauvaelementtiä ja solmupistettä.
Solmupiste	Analyysiosia, joka liittää muita analyysiosia yhteen. Kaikkien analyysiosien päädyissä, risteyskohdissa sekä kulmissa on solmupiste.
Jäykkä kytkentä	Analyysiosia, joka liittää kaksi solmupistettä niin, että ne eivät liiku toistensa suhteen.



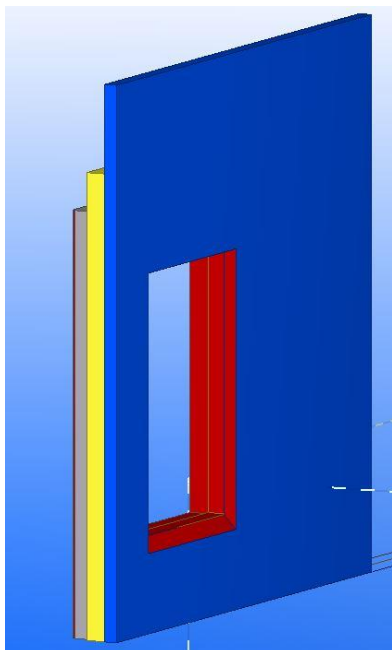
KUVA 3 Kuvio havainnollistaa analyysiosien sidonnaisuutta (Tekla Structures Glossary 2015, 129)

3 LÄHTÖKOHDAT

Opinnäytetyössä käytettävä referenssirakennus on betonielementtirakenteinen palvelu- sekä asuinkäyttöön tarkoitettu kerrostalo, joka sijaitsee Järvenpäässä. Rakennuksessa on kuusi kerrosta ja näistä yksi kerros on osittain maanalainen. Rakennuksen runko on teräsbetoni- ja jännebetonielementeistä koostuva seinät-ontelolaatta-runko. Rakennuksessa on kaksi liikuntasaumalla jaettua lohkoa, joista toinen (koko $b*d*h=24,3*28,6*24,2m$) on kuusikerroksinen ja toinen toinen (koko $b*d*h=49,0*16,2*11,2m$) kolmikerroksinen. Rakennus on jäykistetty seinillä sekä porras- ja hissi-kuiluilla. Perustuksina toimivat teräsbetonianturat. Ensimmäisen kerroksen lattia on maanvarainen betonilattia. Ulkoseinät ovat kantavia sandwich-elementtejä. Rakennuksen piirustukset liite 1. Opinnäytetyössä tarkastellussa esimerkissä tutkitaan, miten betonirakenteinen elementtikerrostalo tulisi mallintaa niin, että rakennuksesta saataisiin realistinen laskentamalli ja laskentamallista suurin hyöty. Tässä työssä tutkitaan laskentamallista saatavat perustuskuormat, kokonaisvaikutus sekä havainnoidaan rakennuksen hankalimmat kohdat. Työtä tehdessä ja analyysimallia käytettäessä on muistettava, että laskentamalli ei ratkaise kaikkia ongelmia, jotka liittyvät rakenteiden mitoitukseen ja rakennesuunnitteluun, vaan se antaa suhteellisen pienellä vaivalla ja aikaisessa vaiheessa esimerkiksi perustuskuormia. Lisäksi rakennuksen haastavimmat kohdat saadaan selville ja näiden suunnitteluun ja ongelmanratkaisuun voidaan puuttua jo suunnittelun alkuvaiheista lähtien. (Riekkä 2015-09-25.).

3.1 Sandwich-elementit

Betonisandwich-elementti on yleisin betonielementtiseinätyyppi. Sen tavallisin käyttökohde on rakennus, jonka kantava runko koostuu seinistä ja laatoista. Siihen kuuluu betoninen sisä- ja ulkokuori sekä lämmöneriste. Ulkokuori on sidottu ansailla ja pistokkailla sisäkuoreen, joka kantaa kerroksittain ulkokuoren perustuksille. (Elementtisuunnittelu.fi a) Työn referenssirakennuksen julkisivujen betonielementit ovat sandwich-rakenteisia. Yhtenä työn tavoitteista oli selvittää, miten sandwich-elementit tulisi mallintaa, jotta tulokset olisivat mahdollisimman totuudenmukaisia. Kuvassa 4 on eräs rakennemallin ulkoseinä kolmiulotteisena.



KUVA 4 Tekla Structures -ohjelmalla mallinnettu sandwich-elementti (Huhtala 2015-03-13)

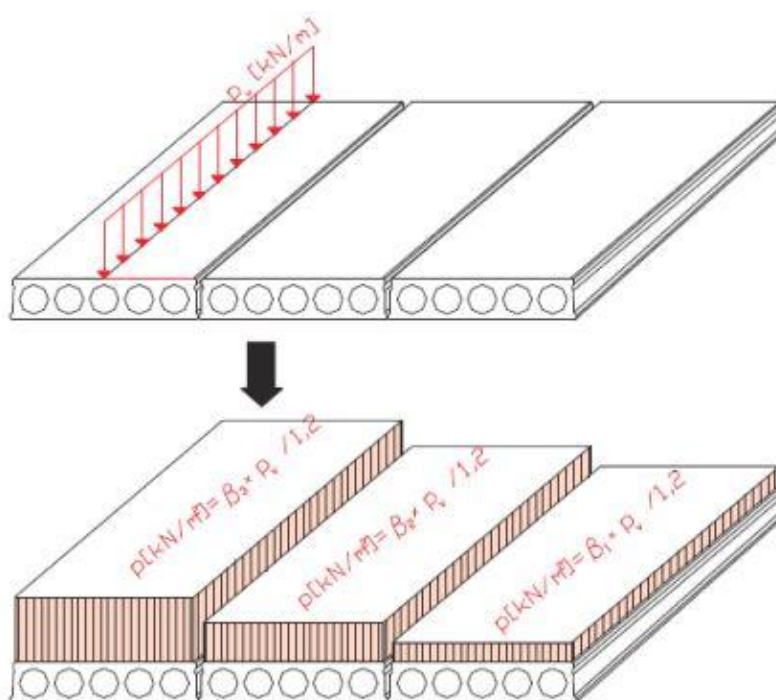
Työn edetessä mietittiin tapoja mallintaa sandwich-elementit ja tavoitteena oli selvittää luotettava mallinnustapa. Perusajatuksena on, että kaikki betonielementtirakenteet mallinnetaan rakennemalliin, sillä siitä tuotetaan esimerkiksi tuotantokuvia. Seinäelementin ulkokuori ja eriste lisäävät merkittävästi elementin painoa ja tämä tulee tavalla tai toisella huomioida laskennassa. Yksi ajatus työssä oli, että ulkokuoren voisi huomioida sisäkuorelle tulevana pysyvänäkuormana. Ulkokuorta ja eristeitä ei siis mallinneta fyysisenä elementtinä, vaan kuormituksena. Tämä tulisi ottaa huomioon jo rakennemallia luotaessa. Toinen vaihtoehto analyysimalliin kannalta olisi, että sandwich-elementtiin mallinnettaisiin ansaiden mukaiset diagonaalit. Diagonaalien mallinnus on työlästä, ja se luo malliin paljon lisää laskettavaa, mikä hidastaa laskutoimituksia ja mallinnusprosessia. Toisaalta tällaisella mallinnustavalla saataisiin sisäkuori toimimaan niin kuin se oikein toimii, eli puristettuna ja taivutettuna rakenneosana (Elementtisuunnittelu.fi a).

3.2 Ontelolaatasto

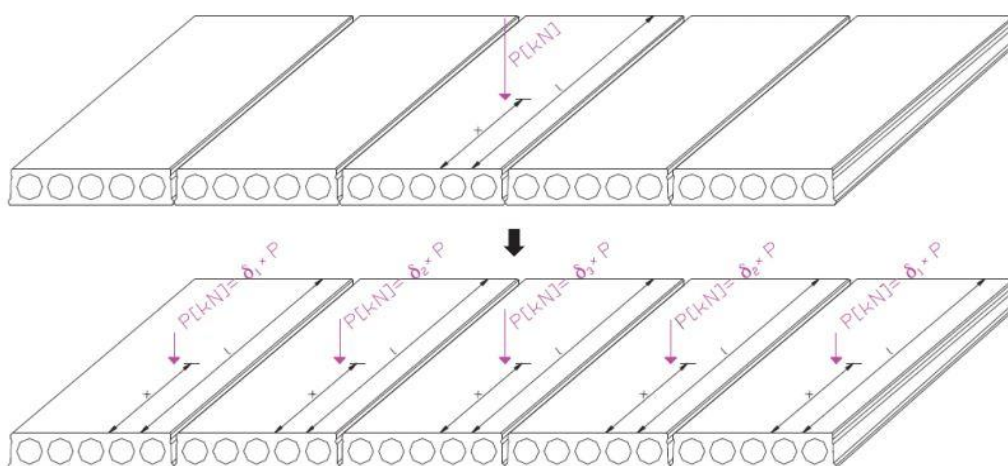
Ontelolaatta on betonirunkoisten rakennusten useimmin käytetty elementtityyppi. Laatat ovat esijännitetyjä elementtejä, joissa kulkee pituussuunnan mukaan ontelot, joiden tarkoitus on keventää laattojen painoa. Laattoja käytetään rakennusten ala-, väli- ja yläpohjissa. (Elementtisuunnittelu.fi d) Teklassa on tietyt komponentit, joita käytetään mallinnettaessa eri rakennusosia. Yleisissä tietomallivaatimuksissa vaaditaan, että elementit tulee mallintaa oikealla työkalulla: palkit mallinnetaan palkkityökalulla, seinät mallinnetaan seinätyökalulla ja niin edelleen (Yleiset tietomallivaatimukset. Osa 5. Rakennesuunnittelu. RT 10-11070, 2.). Komponentit luodaan niin, että rakennusosa saa oikeat ominaisuudet, muun muassa poikkileikkauksen. Ontelolaattakomponentti on kuitenkin luotu palkkikomponenttina, johtuen Teklan komponenttien luonnin kankeudesta. Palkkikomponentilla luotaessa ontelolaatta saa oikean poikkileikkauksen ja laatta pysyy oikean muotoisena, kun eri vahvuisia laattoja mallinnetaan. Kun ontelolaatat mallinnetaan palkkeina, ne saavat analyysimallissa kaksi solmupistettä ja näiden väliin palkkielementin. Matemaattisesti tämä olisi lähellä oikeaa mallin-

nustapaa, sillä näin ontelolaatoista tulee yhteen suuntaan kantavia yksittäisiä palkkeja. Työssä haluttiin kuitenkin selvittää myös, miten ontelolaatat voisi mallintaa yhtenäisenä laatastona.

Ontelolaatat asennetaan erillisinä laattoina rakennuksen kantavien seinien päälle. Tämän jälkeen ne sidotaan toimimaan yhtenäisenä laatastona rengas- ja saumaraudoitusten avulla, jonka jälkeen laatasto toimii levymäisenä (Elementtisuunnittelu.fi b). Ontelolaatasto toimii siis levyrakenteena, joka esimerkiksi jakaa piste- ja viivakuormat viereisille laatoille vähentäen näin yksittäiseen laattaan kohdistuvaa kuormitusta (Parma 2013, 25 - 27). Kuva 5 havainnollistaa piste- ja viivakuormien jakautumista laatastossa. Jotta levyvaikutus saataisiin huomioitua laskentamallissa, tulee ontelolaatat mallintaa tasoina, jotka ovat kiinni toisissaan.



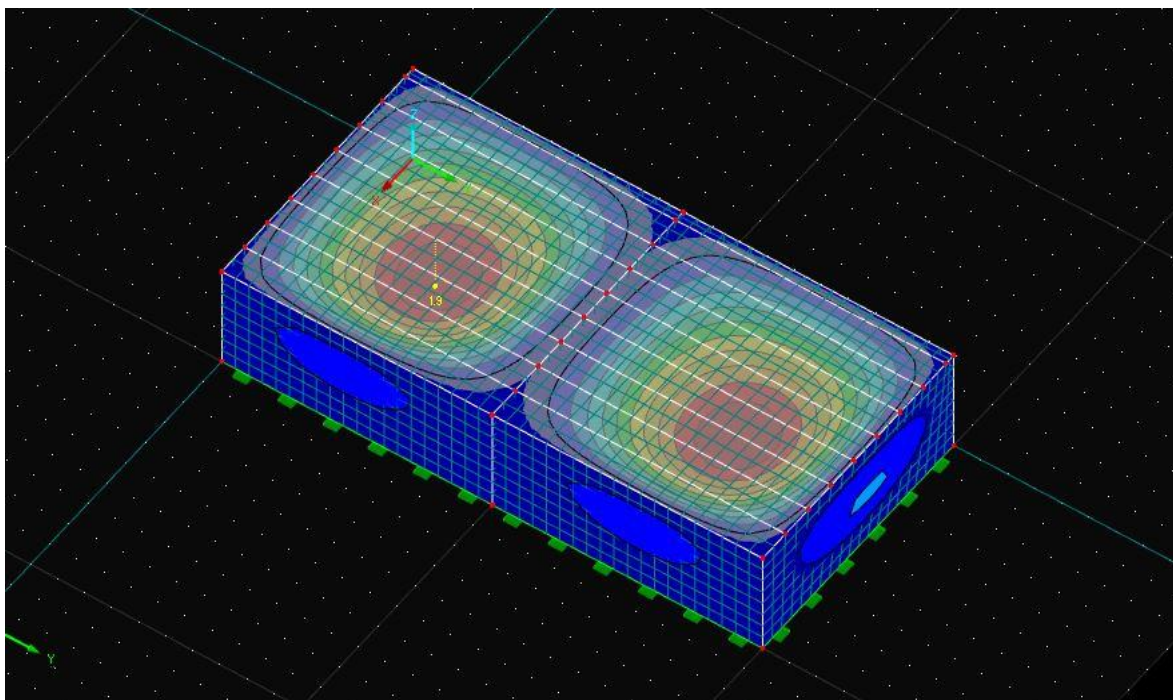
KUVA 5 Laatan pituussuuntaisten viivakuormien jakautuminen viereisille laatoille (Parma 2013, 25)



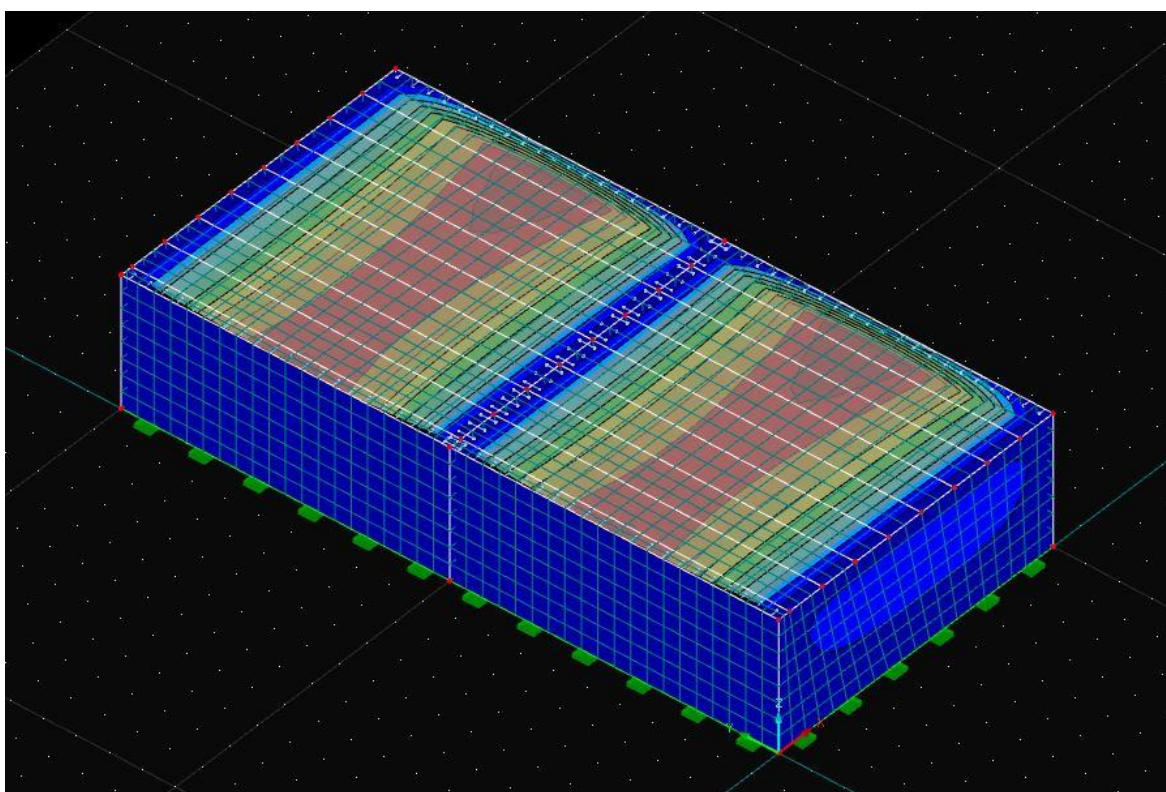
KUVA 6 Laatastoon vaikuttavan pistekuorman jakautuminen viereisille laatoille (Parma 2013, 27)

Ontelolaatat toimivat myös niin sanottuina vaakasuuntaisina seinämäisinä kannattajina, joiden sisään muodostuu puristuskaari ja vetotanko. Laatastot siirtävät siis vaakavoimia, kuten tuulesta ja vinoudesta johtuvia voimia, jäykistäville seinille kitkan, saumaterästen ja betonivaarnojen avulla. (Häyrinen 2012-11-21) Tässä työssä ei kuitenkaan tutkita levyjen jäykistämisen vaikutusta rakennukseen. Tästä huolimatta ontelolaattojen levymäistä mallinnusta haluttiin tutkia. Ontelolaatta on yhteen suuntaan kantava laattaelementti, ja tämä tulee huomioida mallinnusvaiheessa, sillä jos laatta kantaakaan jokaiseen suuntaan, tulee kuormien alaslaskentatuloksista virheellisiä. Laskentaohjelmissa on mahdollista asettaa levyrakenteiden sivuille vapautuksia, jolloin pystykuormat eivät siirry laattaston pitkittäissuuntaisille seinille (Rotrekl 2015-03-31). Vapausasteita on kuusi: kolme siirtymille ja kolme kiertymille. Pystyvoimat vapautetaan laatan pitkittäissuunnassa, kun halutaan, että laatta ei siirrä pystykuormaa pitkittäisseinälle. Tämä tulee kyseeseen, kun lasketaan kuormat alas. Jos työssä tutkittaisiin rakennuksen stabiliteettia, tulisi arvioida uudestaan, mitä voimia ontelolaatasto pitkittäissuuntaisille seinille siirtää. FEM-laskennassa on oikeellisuuden kannalta ehdottoman tärkeää, että liittymät on mallinnettu oikein, muuten voidaan saada tuloksia, jotka eivät vastaa rakenteen toimintaa. Mallinnuksen oikeellisuus korostuu sitä enemmän, mitä korkeampia ja monimutkaisempia rakennukset ovat. Toisaalta 3D-laskennassa voidaan havainnoida sellaisia rasituksia, joita ei yksinkertaistetulla laskentamenetelmällä huomioitaisi. (Elementtisuunnittelu.fi c)

Lisäksi mallinnettaessa tulee huomioida, että ontelolaatta on yksiaukkoinen, eikä toimi moniaukkoisena tässä työssä. Ohjelma liittyy automaattisesti kantavan seinän päällä kohtaavien laattojen päät yhteen, jolloin rakenne toimii jatkuvana moniaukkoisena palkkina. Moniaukkoisessa palkissa momenttia syntyy myös tuelle, mutta koska ontelolaatat ovat periaatteessa päistään nivelellisiä, ei tuelle synny momenttia. Korkeissa rakennuksissa tulee miettiä, kuinka liitokset mallinnetaan, sillä ne ottavat todellisuudessa tietyn määrän momenttia niihin liittyviltä rakenteilta. Seinä ottaa momenttia jonkin verran ja laatan yläpintaan voi syntyä vetoa (Elementtisuunnittelu.fi c). Ennen työn aloitusta kokeiltiin tapoja mallintaa ontelolaatat pienemmässä mittakaavassa. Oikeaksi tavaksi huomattiin mallintaa laatasto asettamalla vapautukset ontelolaattojen pitkittäissivulta. Kuvassa 7 ja 8 havainnollistetaan ontelolaataston vapautusten vaikutusta, kun rasitukset on esitetty värien avulla. Kuvista huomaa hyvin, miten toisessa laatasto toimii neljään suuntaan kantavana ja aiheuttaa rasitusta kaikille seinille, kun taas toisessa laatasto jakaa kuormat päätyseinille. Kuvien laatastojen geometria on sama ja niitä on kuormitettu samalla voimalla.



KUVA 7 Ontelolaatasto ja kantavat seinät. Vapautuksia ei ole asetettu, joten laatasto käyttäytyy virheellisesti ja jakaa kuormia myös pitkittäissuuntaisille seinille (Huhtala 2015-03-31)

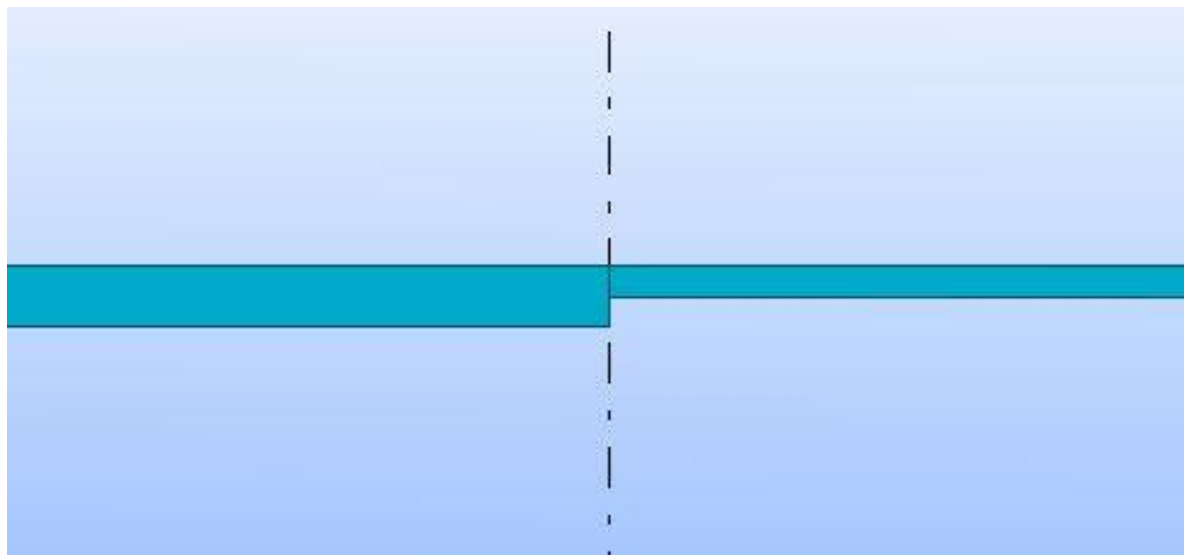


KUVA 8 Ontelolaatasto ja kantavat seinät. Vapautukset on asetettu pitkittäissuuntaisten seinien liitoksiin sekä laatastojen keskinäiseen liitokseen (Huhtala 2015-03-31)

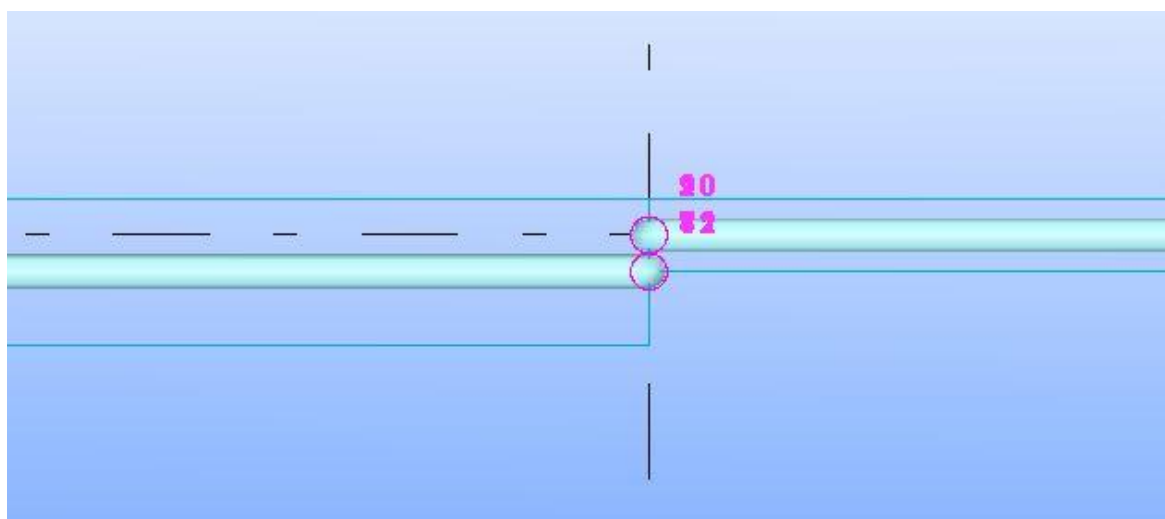
3.3 Epäkeskisyydet

Betonielementtirakentamisessa on seinien suhteen epäkeskisyyden kohtia. Näitä mallinnettaessa on mietittävä, ratkaiseeko epäkeskisyyden kohdat mallintamalla yksityiskohtaisesti jokaisen elementin keskiviivan suhteen, vai yksinkertaistaako mallia niin, että epäkeskisyyden kohtia ei ole ja siirtää elementin

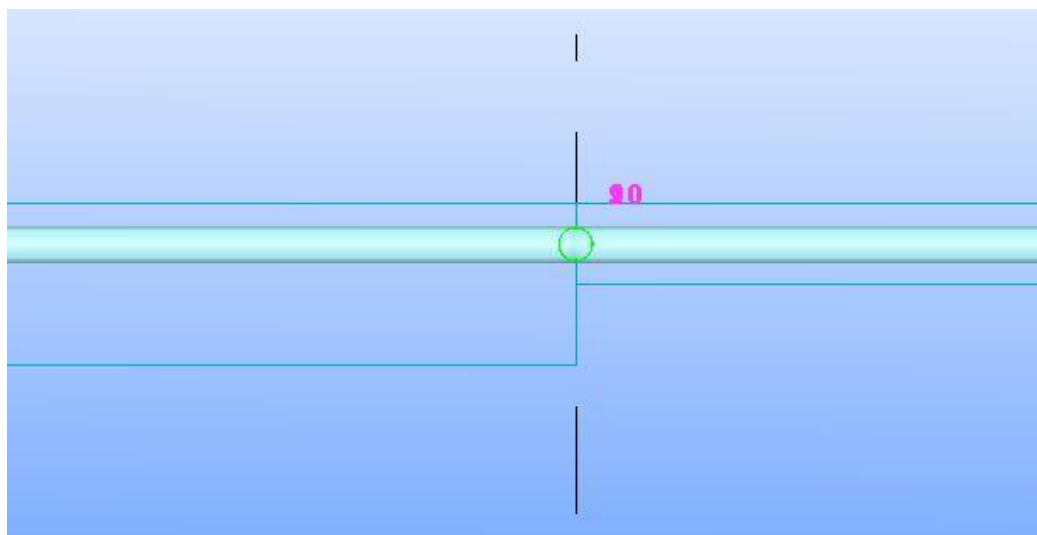
sauvarakennetta siten, että se kohtaa toisen elementin keskeisesti. Tällaiset yksinkertaistukset ovat suunnittelijan harkinnan varaisia, sillä se aiheuttaa vääristymää laskentamallin lopputulokseen, mutta toisaalta pieni siirto ei merkittävästi vaikuta laskelmien lopputulokseen. (Riekkö 2014-09-25). Kuvissa 9, 10 ja 11 havainnollistetaan epäkeskisyyskohtaa ja sen korjaamista. Analyysisauvat luodaan seinän keskeisesti, joten näitä tulee muokata, että saamme seinät kohtaamaan toisensa FEM-mallissa.



KUVA 9 Kuvassa Tekla Structuresilla mallinnettujen erivahvuisten seinien liittymä (Huhtala 2015-03-18)



KUVA 10 Tekla Structuresin analyysimallissa automaattisesti luodut sauvaelementit (Huhtala 2015-03-18)



KUVA 11 Sauvaelementit siirretty niin, ettei epäkeskisyyttä synny (Huhtala 2015-03-18)

4 RAKENNEMALLIN LAAJENTAMINEN KOKONAISMALLIKSI

Työn lähtökohdaksi oli tutkia betonielementtirakenteisen kerrostalon perustuskuormia, kuormien kokonaisvaikutusta, sekä kokonaismallin käyttöä ja siitä saatavaa hyötyä. Kokonaismalli sisältää tässä työssä rakennemallin, josta luodaan analyysimalli, jota käytetään laskentaohjelman geometria- ja lähtötietona. Lähtökohdaksi työhön tekijällä oli, että kokemusta RFEM-ohjelman käytöstä ei ollut ja ennen työn aloittamista kokemusta 3D-rakennemallintamisesta oli hyvin vähän. Ohjelman käyttö oli opeteltava alusta asti. 3D-FEM-laskentaan tukea tarjosivat iltaopetus Savonia-ammattikorkeakoululla sekä toimeksiantaja. Teknistä tukea *RFEM*n käyttöön tarjosi *Dlubal*n opetusvideot sekä tekninen sähköpostituki. Lisäksi *Teklan* käyttöön tuli perehtyä aiempaa paremmin ja analyysimalliominaisuudet tulivat täysin uutena asiana.

4.1 Työssä käytettävät ohjelmistot

Tekla Oyj on vuonna 1966 Suomessa perustettu ohjelmistoyritys, joka valmistaa suunnitteluohjelmistoja ja tietojärjestelmiä. *Tekla Structures* on *Tekla Oyj*:n kehittämä rakennesuunnitteluohjelmisto, jota käytetään rakennusten rakenteiden tietomallinnuksen luomiseen teräs-, betoni- ja puurakenteissa (Tekla.com). *Tekla Structures* sisältää rakenne-, kuorma- ja analyysimalliominaisuudet. Tässä työssä käytetään *Tekla Structuresin* analyysimallinnusominaisuuksia, joiden pohjalta saadaan luotua laskentamalli, joka siirretään toiseen ohjelmaan analysoitavaksi. *Tekla* on yhteensopiva lukuisten laskenta-, arkkitehti- ja 2D-ohjelmien kanssa ja tämä mahdollistaa yhteinäisten mallien käyttämisen. (Teklabimsight.com)

RFEM on monipuolinen 3D-laskentaohjelma, joka sisältää teknologioita elementtimenetelmän, numeerisen laskennan sekä tietokonegrafiikan aloilta (Rakteksolutions.fi). Ohjelmistoa ylläpitää saksalainen ohjelmistoyritys *Dlubal*. *Dlubal* on perustettu vuonna 1987 ja sen päätoimisto sijaitsee Tiefenbach:ssa Saksassa. Tämän lisäksi yrityksellä on neljä toimistoa: Prahassa Tšekissä, Leipzigissä Saksassa, Katowicessä Puolassa ja Saint-Denisissä Ranskassa. Yrityksen päätavoite on luoda käyttäjätasoisia tuotteita nojaten ammatilliseen osaamiseen ja tehdä näin ohjelmistoista yhä menestyneempiä. Tällä hetkellä yrityksen lisenssejä on yli 12000 asiakkaalla, joita ovat muun muassa eri alojen insinööritoimistot, rakennusalan yritykset sekä koulut. Yrityksessä on töissä yli 180 kehittäjää. (Dlubal.com)

Dlubal markkinoi rakennesuunnittelun ohjelmia, jotka perustuvat modulaariseen järjestelmään ja joista yleisimmät ovat *RSTAB* ja *RFEM*. Näistä *RSTAB* on tarkoitettu 3D-sauvarakenteiden mitoittamiseen ja laskentaan, kun taas pääohjelma *RFEM*llä voidaan suunnitella ja analysoida rakennejärjestelmiä, joissa on pilareita, palkkeja, laatastoja ja seiniä. Yrityksellä on lukuisia lisäosia, jotka ovat joko integroituina pääohjelmaan tai omia ohjelmiaan, jotka toimivat yhteistyössä pääohjelman kanssa. Ohjelmia on niin teräs-, betoni-, kuin puurakentamiseen.

4.2 Mallinnustyön aloitus

Sekä *Teklan* että *RFEM*n kotisivuilta on saatavissa opiskelijalisenssi opiskelutodistusta ja henkilötietoja vastaan: www.tekla.com ja www.dlubal.com. Tämän lisäksi *RFEM*stä on saatavilla 30 päivän kokeiluversio, jonka voi kuka tahansa ladata vapaasti. Opinnäytetyön liitteenä tuotetusta ohjeesta voi lukea yksityiskohtaisemmat ohjeet kokonaismallin luomiseksi. Ohjeessa on selitetty kohta kohdalta mallinnuksen eri vaiheet. Raportin mallinnusprosessikappaleessa on pääasiassa esitelty eri työvaiheet pääpiirteittäin, tuotu esille työssä esiintyneitä ongelmia ja selitetty, miten ongelmat on ratkaistu.

Referenssikohde, jota työssä käytetään, on opinnäytetyöprosessin aikana vielä suunnitteluvaiheessa ja tästä syystä opinnäytetyön toimeksiantajan kanssa on sovittu, millä tiedoilla opinnäytetyö voi edetä, vaikka kohde ei lopulta vastaisikaan opinnäytetyössä käytettyjä tietoja. Rakennuksen mittatiedot ja *Teklalla* tehty 3D-malli saatiin jo hyvissä ajoin ennen aloituspalaveria Rakennussuunnittelutoimisto Nylund Oy:ltä ja jo projektin aikana muutamia muutoksia tapahtui oikeassa rakennuksen mallissa. Rakennuksen pohjakuvat ja leikkaus liitteessä yksi (liite 1).

Käytännön työ alkoi opiskelemalla 3D-FEM-mallintamista, tutkimalla *Teklan* sekä *Dlubal*n julkaisemia opetusmateriaaleja ja tutustumalla ohjelmistojen manuaaleihin. Samaan aikaan tehtiin erilaisia harjoitustöitä kyseisillä ohjelmistoilla ja näin harjoiteltiin tarvittavien perustyökalujen käyttöä. Lisäksi työn toimeksiantaja tarjosi tukea työhön liittyvissä kysymyksissä. Ohjelmien opiskelun jälkeen alettiin luoda kokonaismallia saadusta rakennemallista.

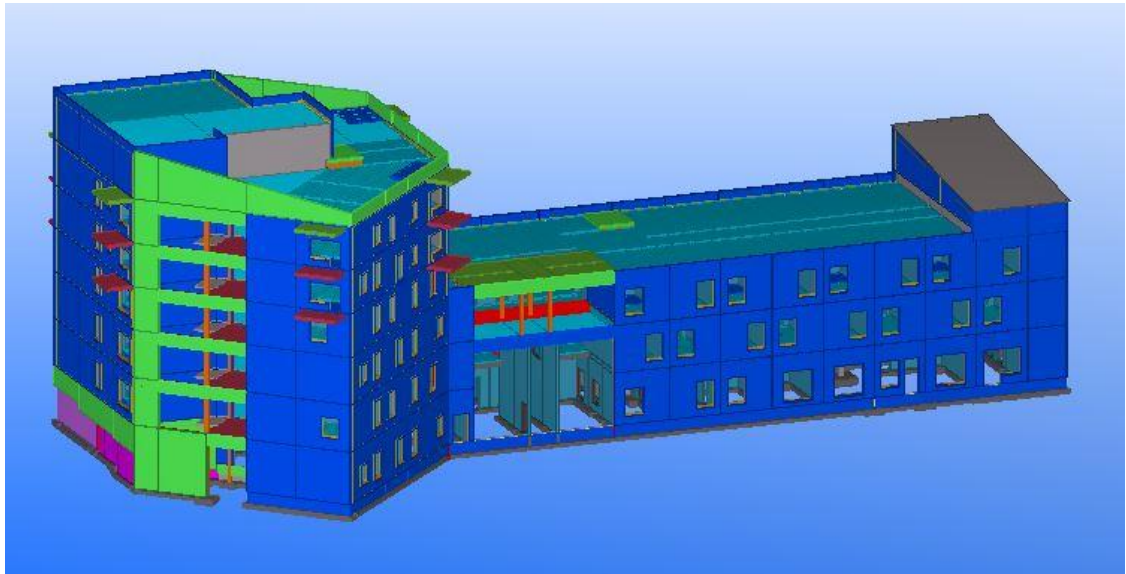
4.3 Kokonaismallin luominen

Työn tavoitteena on luoda *Teklan* analyysimalli ominaisuuksia käyttäen betonielementtikerrostalon rakennemallista analyysimalli, joka toimii saumattomasti yhteistyössä laskentaohjelma *RFEM*n kanssa. Lähtökohtaisia haasteita työn etenemiselle loi se, että *Tekla*malli on luotu toisen henkilön toimesta ja tätä mallia luotaessa ei ole huomioitu sitä, että samaa mallia käytetään tässä työssä kokonaismallina. Tämä tuo lisätyötä ja haasteita työn etenemisen kannalta ja johtaa siihen, että jotkin ongelmat pitää ratkaista monimutkaisemmin, kuin jos mallinnusprosessin alusta asti olisi huomioitu tarve analyysimallille. Ensimmäinen tavoite oli tuottaa analyysimalli saadusta rakennemallista.

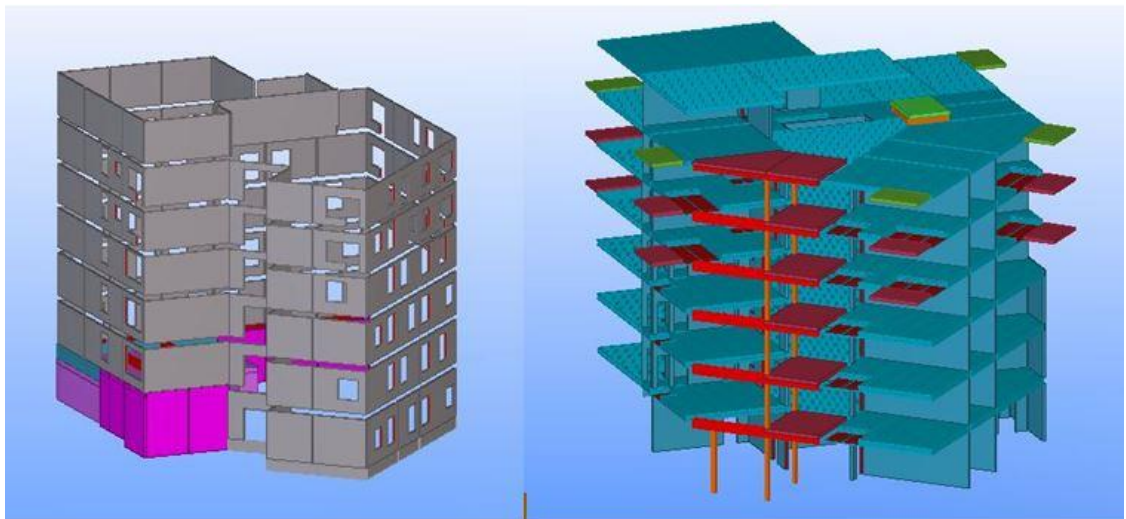
4.3.1 Näkymät

Ennen analyysimallin luomista määritettiin näkymäasetukset siten, että työn kannalta epäoleelliset osat piilotettiin näkyvistä ja näin saatiin työskentelytilaa selkeytettyä ja yksinkertaistettua. Ensin tuli määrittää, mitkä ovat oleellisia, ja mitkä epäoleellisia rakenteen osia. Lisäksi, jos rakennus on suuri, kuten tässä tapauksessa, on kannattavaa jakaa rakennus lohkoihin, jotka vielä jaotellaan halutulla tavalla useampiin analyysimalleihin. Jaottelu tehdään riippuen rakennuksesta, ja se voisi olla esimerkiksi pilarit-laatat-palkit omana analyysimallina ja seinät omanaan. Nämä mallit yhdistetään lopulta

yhdeksi laskentamalliksi. Kuvassa 12 ja 13 havainnollistetaan rakennuksen jaottelua ja näkymän muokkauksen vaikutusta.



KUVA 12 Referenssirakennuksen rakennemalli (Huhtala 2015-02-25)

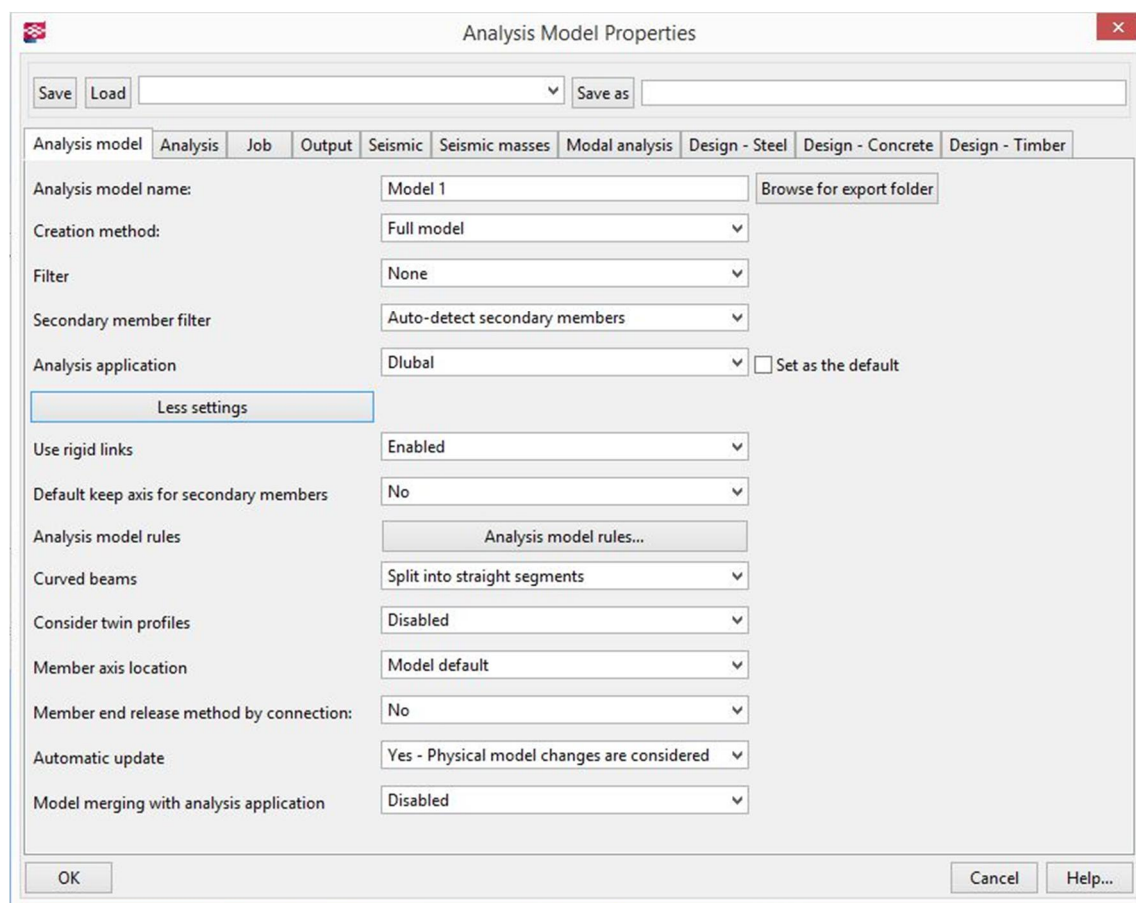


KUVA 13 Referenssikohteen korkeampi lohko jaoteltuna näkymien avulla (Huhtala 2015-02-25)

Referenssikohde on jaettu liikuntasaumalla kahteen lohkoon ja tässä työssä mallinnetaan vain rakennuksen korkeampi lohko. Näkymien rajausta voi lähestyä joko analyysimalliasetusten tai *Teklan* yleisten näkymäasetusten kautta. Tässä tapauksessa luotiin näkymät *Teklan* näkymäasetuksista, jonka jälkeen analyysimalliosien valitseminen oikein oli helppoa. Näkymien luomisessa tulee valita tarkasti kaikki rakennuksen laskennan kannalta oleelliset osat, joita ovat tässä työssä kantavat ulko- ja väliseinät, laatat, pilarit ja palkit, ja jättää pois laskennan kannalta epäoleelliset osat, kuten esimerkiksi kaiteet. *Tekla* jättää automaattisesti huomiotta osia, kuten pultit, raudoitteet, pienet osat ja sellaiset osat, joiden analyysiasetukseen on määritetty, ettei tätä osaa huomioida (Tekla.com b). Seuraavaksi siirryttiin analyysimallien luomiseen.

4.3.2 Analyysimallin muokkaaminen

Analyysimallin luominen on tehty *Teklassa* hyvin automaattiseksi ja näin esimerkiksi pelkän geometriatiedon siirtäminen erilaisten ohjelmien välillä on helppoa. Kun rakennemallia luo, siinä tulee huomioida muutamia asioita. Elementtien tulee olla tarkasti mallinnettu toistensa suhteen ja esimerkiksi seinät tulee mallintaa jokainen seinä erikseen, sillä analyysiominaisuus ei tunnista yhteinäisenä mallinnettua seinää. Tarkempia malleja varten täytyy perehtyä analyysiasetuksiin, jotka on mahdollitettu muuttamaan pääkohtaan. *Teklassa* on mahdollista muokata yleisiä analyysiasetuksia jotka vaikuttavat kaikkiin analyysiosiin, tai yksityiskohtaisia asetuksia joita voi tarpeen mukaan muokata osien omista analyysiasetuksista. Analyysimallin toiminnan kannalta on oleellista että asetukset on asetettu oikein. Kun koko malliin vaikuttavat asetukset asetetaan alussa oikein, työskentely helpottuu, ja ohjelman automatiikka toimii paremmin. Oheisessa kuvassa näkyy työn analyysimalliasetukset. *Analysis model*-välilehti on tämän työn kannalta oleellisin, sillä kuormitukseen liittyvät asetukset asetetaan tässä työssä laskentaohjelmassa. Analyysimallin asetukset kuvassa 14. Asetuksista yksityiskohdaisemmin liitteessä kaksi (liite 2).



KUVA 14 Analyysimallin asetukset (Huhtala, 2015-03-31)

Analyysimallin muokkaaminen toimivaksi on prosessin työläin vaihe ja vaatii paljon tarkkuutta. Mallista tulee tarkistaa muun muassa solmupisteiden liittymiset ja geometrian oikeellisuus. Väärin toisiinsa liittyneet ja liittymättömät osat aiheuttavat sen, että analyysi ei toimi, tai laskenta tuottaa tuloksia jotka eivät vastaa todellisuutta. Työssä muokattiin analyysimalli solmupiste solmupisteeltä sellaiseksi, kuin se laskennassa tulee olla. Mallinnuksen alkuvaiheessa törmättiin ongelmaan, jonka johdosta analyysimallin sauvat eivät vastanneet todellisuutta millään tavalla. Kun ontelolaatta- ja ulkoseinäkomponenteista pyrittiin luomaan analyysiosia huomattiin, että ohjelma luo kyseisistä osista

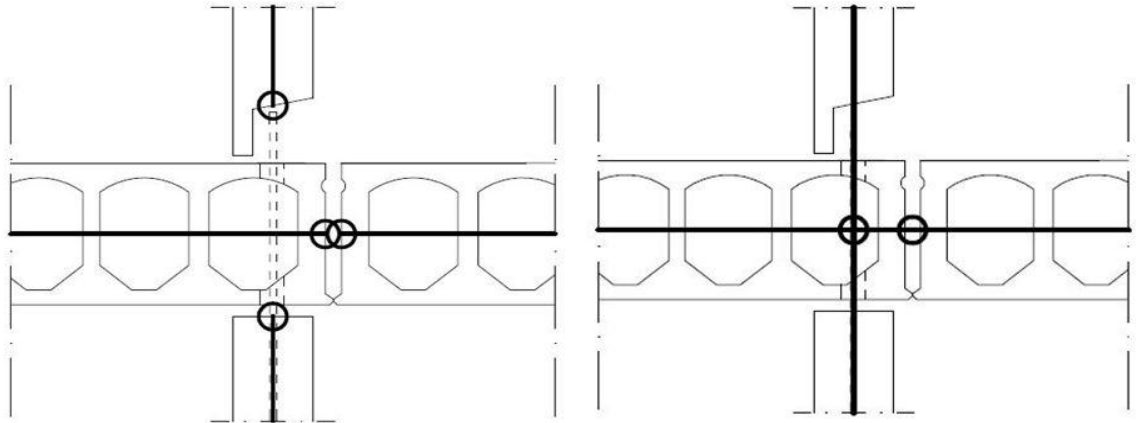
palkin mukaisen analyysisauvan ja rakennusta ei pysty laskemaan, koska kerrokset eivät liity toisiinsa. *Teklassa* erilaiset analyysisauvat on kuvattu eri väreillä, jotka on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2 Analyysiosien näkymä väreinä (Huhtala 2015-01-04)

Palkki/pilari	Punainen
Vain aksiaalisia voimia vastaanottava palkki/pilari	Vihreä
Vain puristusta vastaanottava palkki/pilari	Keltainen
Vain vetoa vastaanottava palkki/pilari	Pinkki
Pilari	Punainen
Seinä/laatta	Vaaleansininen

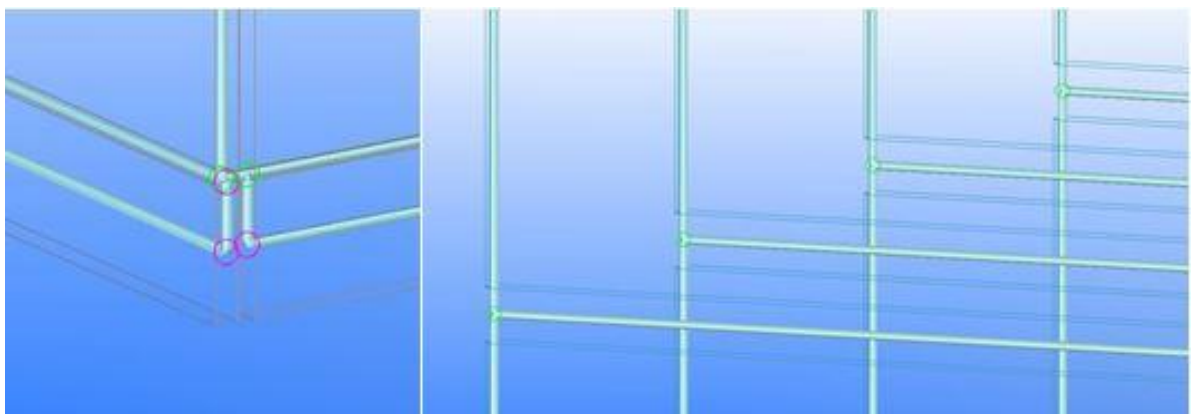
Ongelman syyksi todettiin, että vaikka kyseiset osat ovat seinä ja laattoja, niin ne on luotu käyttäen *Teklan* palkkityökalua. Ratkaisu ongelmaan löytyi rakenneosan analyysiasetuksista, joista voi määrittää osalle kategorian, johon se kuuluu. Tämän jälkeen määritettiin kaikkien ontelolaattojen ja ulkoseinien kategoriaksi "*Slab - Plate*", jolloin ohjelma luo elementeistä oikeanlaiset, tasomaiset analyysiosat, vaikka ne on luotu palkkityökalulla. Työssä tarkistettiin myös, että kun tämä muutos tehdään *Teklaan*, niin osat käyttäytyvät oikein *RFEM*ssä.

Liitoskohtien toimiminen on oleellinen osa työtä ja työssä selvitettiin, kuinka elementtiliitokset tehdään, ja kuinka ohjelma toimii niiden osalta automaattisesti. *Teklassa* elementit mallinnetaan siten, miten ne todellisuudessa ovat, eli elementtien väliin jää esimerkiksi saumavalulle tarkoitetut välit. Kun tästä luodaan analyysimalli, sauvat ja solmupisteet asettuvat elementin geometrian mukaan ja analyysiosat eivät liity toisiinsa. Mallin toimimisen kannalta on ehdotonta, että kaikissa liitoksissa osat saadaan liittymään toisiinsa tarkasti ja oikeassa kohdassa. Työssä analyysisauvat mallinnettiin elementin keskiakselin suhteen, ja näin myös liitokset tulevat liitoskohdan keskelle. Kuvassa 15 havainnollistetaan elementtien liitosta siten, että ohuet viivat kuvaavat todellista elementtirakennetta ja paksut viivat kuvaavat sauvaelementtejä ja solmupisteitä.



KUVA 15 Kuvassa vasemmalla analysiosat elementtiosien suhteen. Oikeanpuoleisessa liitoksessa solmupisteet on liitetty yhteen (Huhtala 2015-03-10)

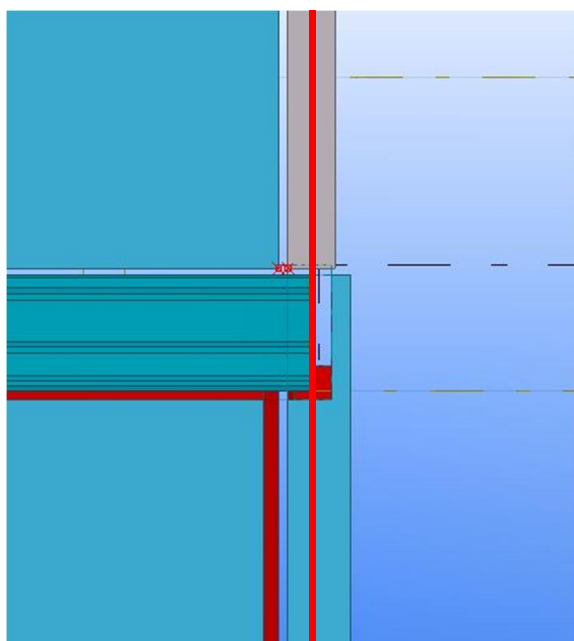
Työprosessin aikana analysiosia voidaan liittää toisiinsa sekä manuaalisesti siirtämällä että automaattisesti. *Teklaan* on luotu sauvat automaattisesti toisiinsa liittävä ominaisuus, mutta työn aikana huomattiin, että ominaisuus ei toimi kaikissa tilanteissa halutulla tavalla. Kuvasta 16 näkee, että automatiikka toimii yksinkertaisessa ja säännöllisesti toistuvassa liitoksessa hyvin, mutta esimerkiksi seinäelementtien ja sokkelielementtien nurkkaliitoksessa solmupisteet eivät liity toisiinsa ja tämän huomaa solmupisteiden väristä. Liittyneitä solmupisteitä on kuvattu vihreällä pallolla ja liittymättömiä, yksittäisiä solmupisteitä on kuvattu magentalla ympyrällä. Automaattinen liitostyökalu aiheutti joissakin elementeissä myös geometrian virheitä. Tässä mallinnusprosessissa näitä virheitä voi aiheuttaa se, että komponentteja on luotu palkkityökalulla ja ohjelman automatiikka häiriintyy siitä. Kun automatiikka ei toimi, kasvaa työmäärä moninkertaiseksi ja kokonaisuuden tuomat edut eivät pääse niin hyvin esille.



KUVA 16 Vasemmalla kuvassa liitosautomatiikka ei toimi, kun taas oikeanpuoleisessa kuvassa automatiikka toimii (Huhtala 2015-04-01)

Seuraavaksi muokattiin epäkeskisyysskohtia, joita rakennuksessa on. Analyysiominaisuus luo sauvat elementin suhteen joko keskelle, referenssilinjan mukaan, neutraaliakselille tai johonkin reunaan tasossa. *Teklassa* on myös mahdollisuus siirtää sauvoja manuaalisesti "move" -komennolla tai analyysiasetuksista "Offset" -komennolla. Seinien vertailuakseliksi valittiin sandwich-elementtien sisä-

kuoren keskikohta, jonka mukaan myös muut seinät mallinnettiin. Tällaiset muutokset aiheuttavat vääristymiä laskentatulokseen ja on aina suunnittelijan harkinnan varassa, tehdäkö yksinkertaisuuksia ja ovatko tulokset yksinkertaistuksen jälkeen riittävän luotettavia. Laskentatyössä tulee aina pysyä tuloksen varmallalla puolella, mikä tarkoittaa sitä, että rakennuksen kestävyudessa on ylimääräistä varmuutta. Vaihtoehtoinen tapa olisi esimerkiksi eräänlaisten jäykkien kytkentöjen, eli "rigid linkien" luominen elementteihin, jolloin jäykät kytkennät estävät seinien liikkumisen toistensa suhteen. Jäykän kytkennän voi asettaa kahden solmupisteen välille, kun halutaan, että ne pysyvät aina toistensa suhteen samassa kohdassa. Tässä työssä pyrittiin siihen, ettei jäykkiä kytkentöjä käytetä, koska se ei vastaa todellisuutta ja voi aiheuttaa sellaisia muutoksia tuloksiin, mitä ei ymmärretä. "Rigid linkillä" ei ole painoa ja se on kuin todella jäykkä palkki. Kuvassa 17 esitetty kahden eri vahvuisen seinäelementin liittyminen toisiinsa ja kuvattu, miten analyysiosia sijoitetaan seinien suhteen.



KUVA 17 Kahden eri vahvuisen seinäelementin liitoskohta ja vertailuakseli punaisella viivalla (Huhtala 2015-03-31)

4.4 Laskentamallin luominen

Työn seuraavana vaiheena oli luoda *RFEM*lä yksi päämalli, johon analyysimallit lisätään yksi kerrallaan. Ensin luotiin päämalli, jota on tarkoitus ylläpitää koko suunnitteluprojektin ajan. Tähän kyseiseen malliin voidaan tuoda aina uusi geometriatieto, jos ja kun muutoksia projektissa tapahtuu. (Riecki 2014-09-25) Pysyvät kuormat mallinnettiin tässä työssä soveltaen *BES 2010 Asuinkerrostalon esimerkkilaskelmat* -ohjeistusta sekä referenssikohteen rakenteita. Muuttuvat kuormat johtavat eurokoodista SFS-EN 1991 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat.

Kiinteät kuormat:

- rakenteiden omapaino

- pysyvät kuormat
 - o yläpohjarakenteet: 0.5 kN/m^2 Eriste, höyrynsulku ja kulkusillat
 - o pintabetoni: 1.5 kN/m^2 Pintabetoni 60 mm
 - o ulkokuori + eriste: 2.63 kN/m^2

Muuttuvat kuormat:

- välipohjien hyötykuorma: 2.0 kN/m^2
- parvekkeiden hyötykuorma: 2.5 kN/m^2
- kevyet väliseinät: 0.5 kN/m^2

Lumikuormat:

- lumikuorman ominaisarvo maassa: 2.5 kN/m^2
- lumikuorman ominaisarvo katolla: 2.0 kN/m^2

Tuulikuormat:

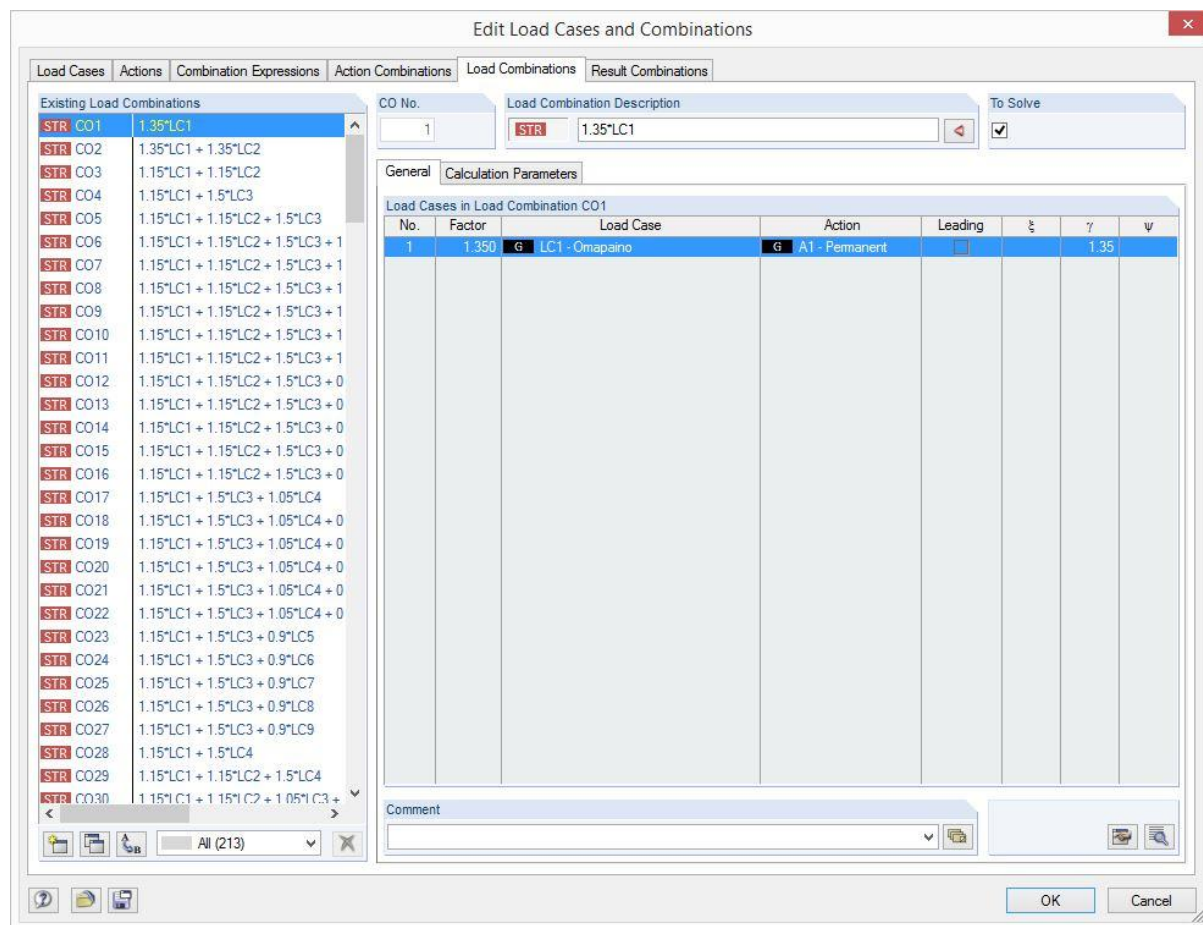
- tuulen nopeuden perusarvo: 21 m/s^2
- rakennuksen tuulelle altis korkeus: 24.60 m, maastoluokka 2
- tuulen puuskanopeuspaine korkeudella 24.60 m: 0.79 kN/m^2

*RFEM*ssä kuormat luodaan yksi kerrallaan eri kuormitustapauksiin. Työssä asetetaan jokainen kuormitustapaus oikeaan kategoriaan, jolloin ohjelma osaa luoda kaikki kuormitusyhdistelmät käyttäen eurokoodeja ja kansallisten liitteiden varmuuskertoimia. *RFEM* luo kuormitusyhdistelyjen lisäksi "Result combination" -tulokset, eli verhoikäyrän, mikä tarkoittaa, että kaikki kuormitusyhdistelmät on huomioitu yhdellä kertaa ja tämä näyttää kuormitusten maksimi- ja minimiarvot rakenteissa (LEHTONEN 2013, 30).

4.5 Mallien siirto

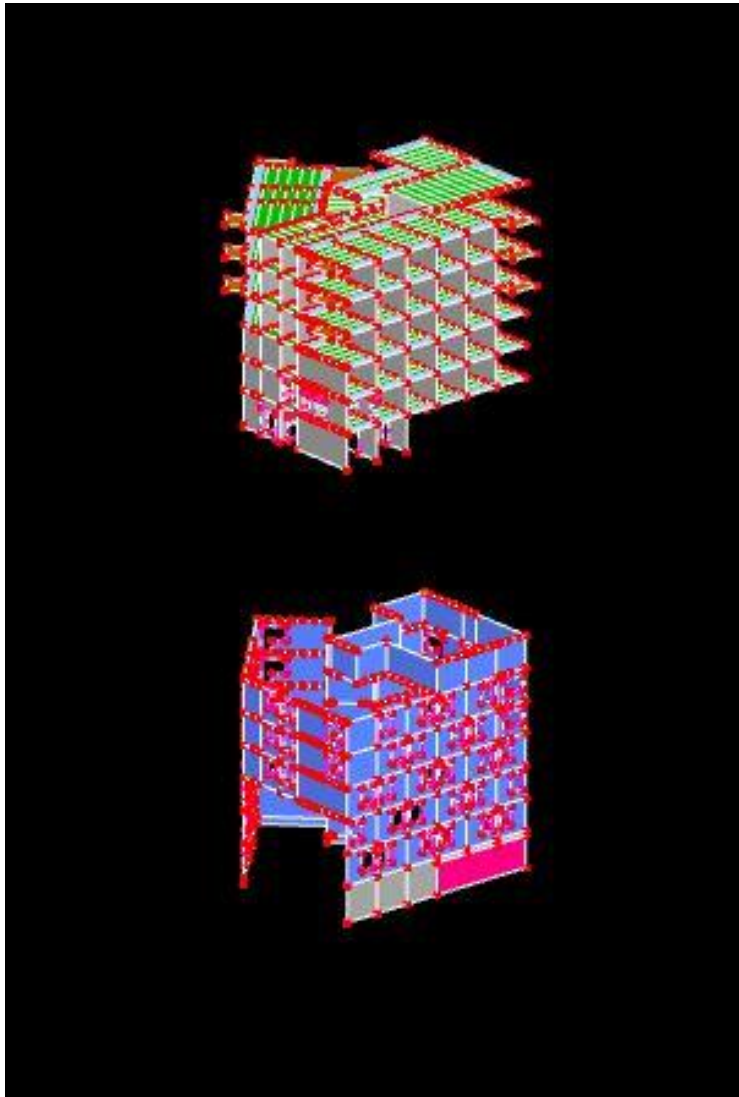
Työssä tutkittavaa työskentelytapaa käytettäessä täytyi ennen laskentaa tehdä muutamia valmistavia toimenpiteitä. Työssä luotiin aiemmin kuvatun jaottelun mukaan kaksi erillistä analyysimallia, jotka oli tavoite liittää yhtenäiseksi kokonaisuudeksi laskennan suoritusta varten. Laskentaa varten luotiin yksi päämalli, jota on tarkoitus ylläpitää ja muokata suunnitteluprojektin edetessä. Päämalliin luotiin tarvittavien kuormitusten mukaiset kuormitustapaukset, jotka asetettiin manuaalisesti oikeille rakenteille. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että valittiin oikea kuormitustapaus, joka asetettiin yksi kerrallaan rakennusosalle, johon kuorma kohdistuu. *RFEM* huomioi automaattisesti kantavien rakenteiden omapainon kuormituksiin. Kun kuormitustapaukset on lisätty oikein, luo *RFEM* automaattisesti kuormitusyhdistelyt, mikä nopeuttaa työtä huomattavasti, sillä kuormitusyhdistelyjen lisääminen manuaalisesti on hidasta ja vaatii tarkkuutta. Automaattiset kuormitusyhdistelyt ovat eurokoodi EN 1990 ja Suomen kansallisten liitteiden mukaiset. Toisaalta automaattiset kuormitusyhdistelyt on

aina hyvä tarkistaa ja ohjelman käyttäjän tulee ymmärtää, mistä ne tulevat. Automaattiset kuormitusyhdistelyt havinnollistettuna kuvassa 18.



KUVA 18 Automaattiset kuormitusyhdistelyt (Huhtala 2015-30-04)

Seuraavaksi tuotiin *Teklassa* luodut analyysimallit *RFEM*in. Analyysimallit tuotiin laskentamalliin erillään ja myös pidettiin erillään geometriajaottelun mukaan, eli tässä tapauksessa ulkoseinät omana geometrianaan ja väliseinät-laatat-pilarit-palkit omanaan. Tarvittavat muutokset on helpompi tehdä malliin, kun se on mahdollisimman yksinkertainen. Ensin päätettiin tuoda kantavat seinät *Teklasta RFEM*n päämalliin. Ohjelmat toimivat yhteistyössä ja siirrettäessä rakennus pysyy oikeassa koordinaatistossa. Mallien välillä siirtyvät kaikki tiedot, jotka analyysimalliin asetettiin, eli tässä tapauksessa materiaalit ja geometria. Tämän jälkeen luotiin uusi *RFEM*-projekti, johon tuotiin toinen analyysimalli, joka sisältää pilarit, laatat ja väliseinät. Seuraavaksi ryhdyttiin yhdistämään malleja yhteen projektiin. Tässä vaiheessa *RFEM*-projekteja on kolme ja näistä yhtä pidetään vain laskentaa varten. Päämallissa oleva analyysimalli on oikeassa koordinaatistossa, joten se säilytettiin mallissa alkuperäisellä paikallaan, kun taas toinen malli nostettiin 50 metriä yli alkuperäisen tason. Tämä tehtiin siitä syystä, että geometriatasot säilyvät kuormien asettelua varten erillään, ja näin kuormien asettaminen, ja geometriamuutosten tekeminen on yksinkertaisempaa. Kun siirrettävää analyysimallia oli nostettu, siirrettiin se päämalliin kopioimalla ja liittämällä.



KUVA 19 Geometriatasot päämallissa ennen kuormien määrittämistä ja yhteen liittämistä (Huhtala 2015-30-03)

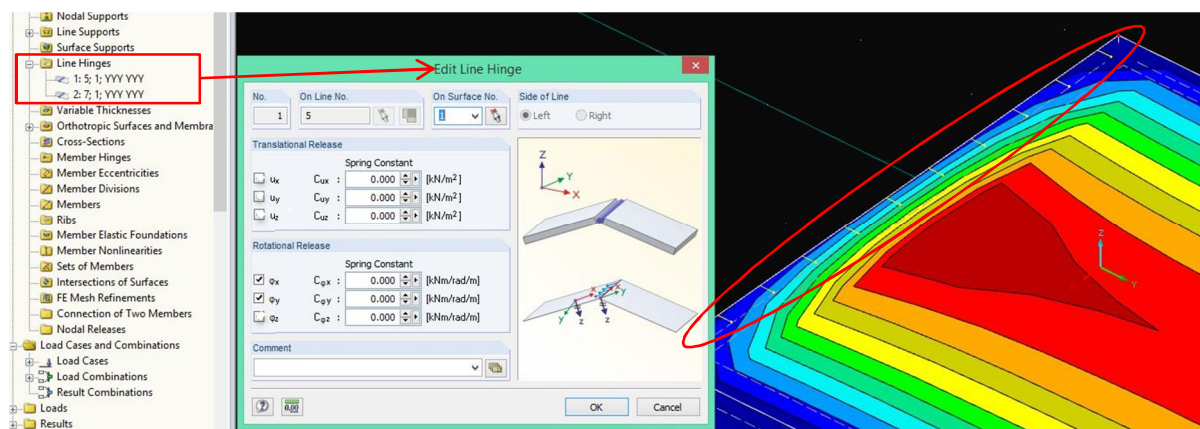
Tämän jälkeen muutettiin kaikki ontelolaatastot jäykkyydeltään oikeanlaisiksi. Lisäksi määritettiin tarvittavat vapausasteet, mikä on työläs vaihe, sillä vapautettavia sauvoja on työssä paljon ja vapautukset tuli asettaa yksi kerrallaan, sillä niiden kopioiminen ei ollut mahdollista. Kun ontelolaatastot oli muokattu, määritettiin laskentamalliin kuormat. Kuormat määritettiin valitsemalla oikea kuormitustapa ja tämän jälkeen valitsemalla kuormatyökalulla ne osat, joihin kuormitus kuuluu. Kuormitusten määrittäminen on tarkka työvaihe, joka on laskennan kannalta ehdottoman tärkeää tehdä oikein. Kuormituksia määrittäessä tulee huomioida kuorman suunta, suuruus ja oikea kuormitustapa. Tämä on kuitenkin nopea työvaihe, sillä *RFEM*n näkymätasoja voi muokata siten, että vain oleelliset osat ovat näkyvissä ja näin kuormat voidaan asettaa valitsemalla kerralla kaikki oikeat osat.

4.6 Ontelolaatastojen muokkaus

Mallien siirron jälkeen alettiin mallintaa *RFEM*llä ontelolaatastoja levymäiseksi yhteen suuntaan kantavaksi laatastoksi. Tietoa hankittiin *Dlubal*n teknisestä sähköpostituesta ja vastauksena saatiin, että laatasto mallinnetaan tasoina, jonka jälkeen tason muokkaustyökalusta vaihdetaan laatan jäykkyyden tyyppiä *Orthotropic*. Kyseinen laattatyyppi tarkoittaa sitä, että laatalla on erilainen jäykkyys pai-

kallisen koordinaatiston x- ja y-suunnassa ja kuvaa samalla onteloiden kulkusuuntaa. (Rotrekl 2015-03-29.). Tämän jälkeen tasolle asetettiin laatan geometria ja paino sekä laataston suunta. Käytännössä ohjelma huomioi ontelolaatan painon geometrian tai oman määrittelyn mukaan ja jäykkyyden suhteen, mihin päin laatasto kantaa.

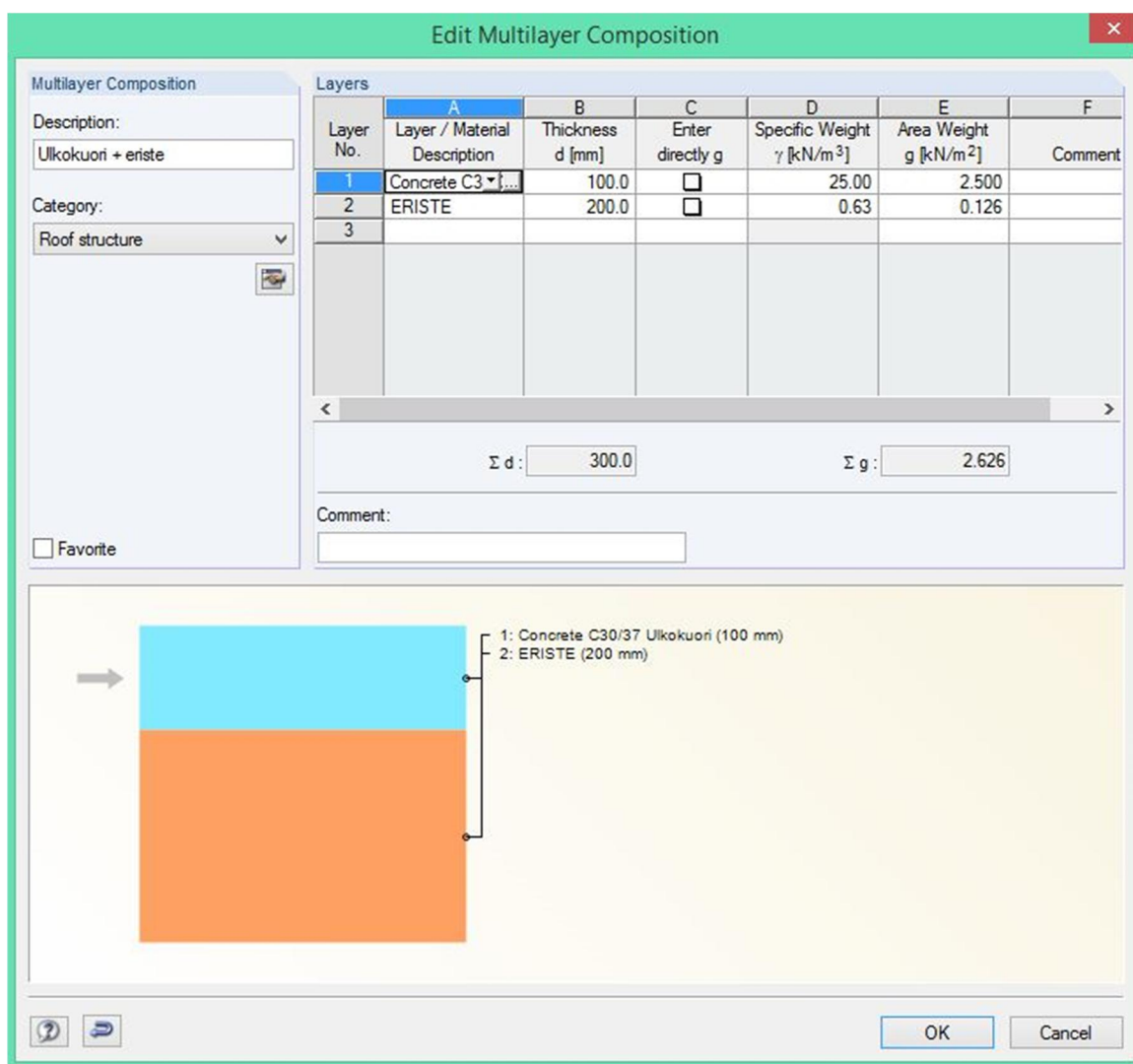
Kun laatasto oli mallinnettu levymäiseksi, tutkittiin, miten mallia tulisi muokata, että ontelolaattojen kuormat siirtyvät vain kyseisiin pystykuormia kantaville seinille. Tähänkin tietoon saatiin vastaus *Diubalin* teknisestä tuesta. Tuesta vastattiin, että ohjelmassa tulee asettaa vapautuksia laataston ja seinän liitokseen (Rotrekl 2015-03-29). Vapautukset asetettiin pituussuunnassa x- ja y- suunnan ympäri kiertymiin ja ontelolaatan päässä x- suunnan ympäri. Toinen, yksinkertaisempi vaihtoehto olisi, että ontelolaatat mallinnettisiin palkkeina, joille asetetaan ontelolaatan paino ja näin kuormat jakautuisivat oikeille kantaville rakenteille. Matemaattisesti tämä olisi lähellä oikeaa oikeaa mallinnustapaa, mutta ei ota huomioon laataston levytoimintaa.



KUVA 20 Rakennuksen kaikkiin pitkittäissuuntaisiin sekä päätyliitoksiin asetettiin tarvittavat vapautukset. Kuvassa on esitetty ontelolaatan pitkittäisliitos.

4.7 Ulkokuori ja eriste

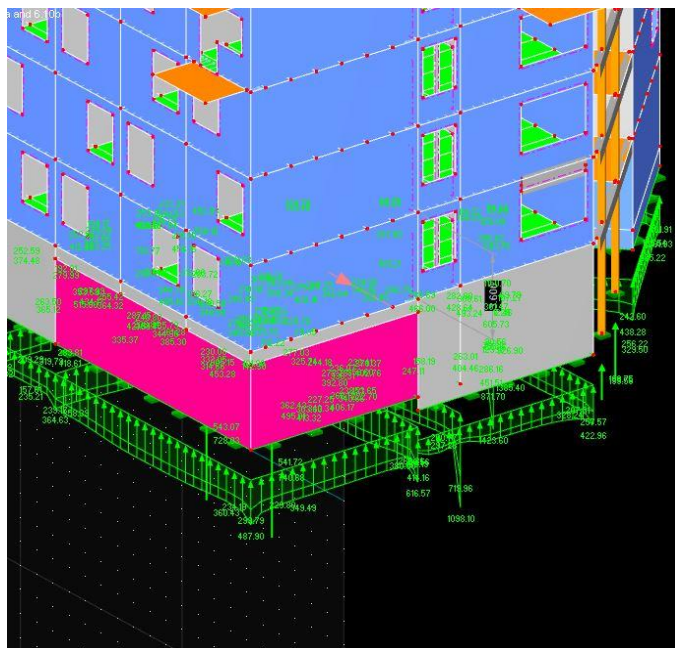
Työn tavoitteena oli selvittää, miten ulkoseinäelementtien ulkokuori ja eriste tulisi ottaa huomioon mallinnustyössä. Kyseiset osat vaikuttavat kuormana sisäkuoreen, mutta sopivaa mallinnustyökalua työstä ei löydetty. Asian selvittämiseksi otettiin yhteyttä *Diubalin* tukeen ja tiedusteltiin, miten ulkokuori mallinnetaan. Tuesta vastattiin, että uloimmat kerrokset otetaan huomioon sisäkuoren tasokuormana monikerrostyökalulla (Rotrekl 2015-01-30). Näin mallinnettaessa ulkokuoria ei huomioida fyysisenä elementtinä, vaan pelkästään pysyvänä kuormituksena. Työssä luotiin seuraavaksi uusi kerrosrakenne, johon lisättiin ulkokuoren ja eristeen materiaali. Kuvassa 21 on kerrosrakenteen valikko. Ohjelmassa ei ole valmiina eristeelle materiaalia, joten sellainen täytyi luoda. Tärkeintä työssä on kyseisen materiaalin paino, joksi asetettiin 0.65 kN/m^3 . Tämän kuormat määritettiin oikealle kuormitustapaukselle ja ne lisättiin jokaiseen sandwich-rakenteeseen. Tällaista mallinnustapaa käytettäessä tulee huomioida, että tämä mallinnustapa ottaa huomioon vain kerrosten painon sisäkuorelle.



KUVA 21 Kuorman määrittettiin rakenteen paksuus ja materiaalin ominaisuudet (Huhtala 2015-01-04)

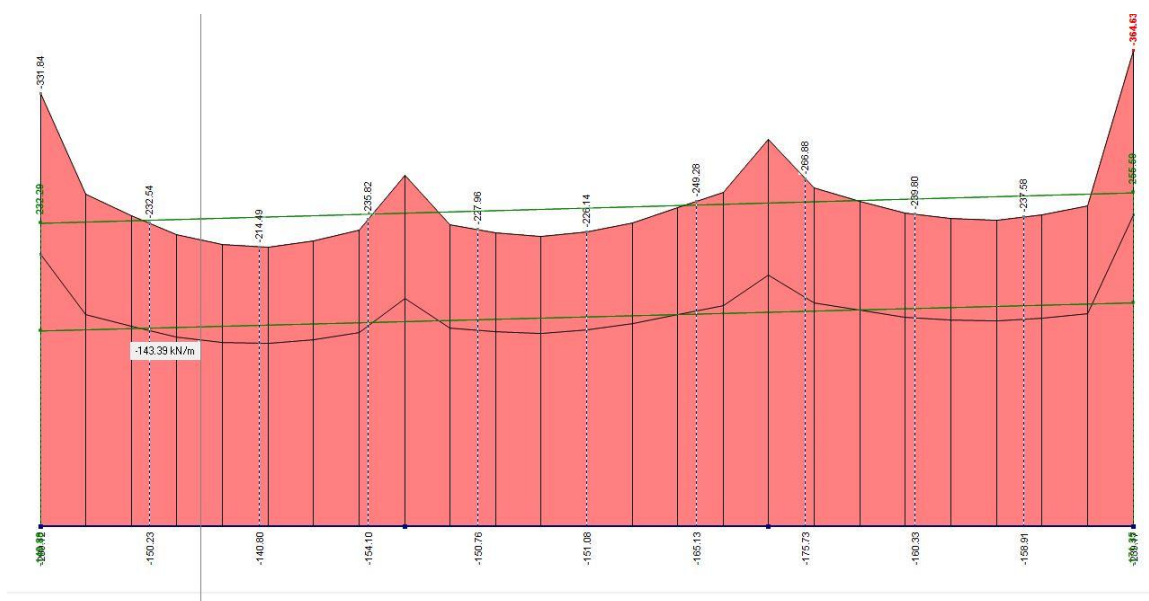
4.8 Laskenta

Laskenta tapahtuu työssä valitun kuormitusyhdistelyn mukaan sekunneista muutamiin minuutteihin. Tässä tapauksessa laskenta ei vie kohtuuttoman paljoa aikaa, mutta kun mallia kasvatettiin ja analysoitiin suurikokoisempana, vei laskenta jopa tunteja. Laskenta tapahtui valitsemalla oikea kuormitustapaus ja tämän jälkeen valitsemalla "Show results". Laskenta tuotti kuormitusyhdistelyn tulokset koko rakennuksesta sekunneissa. Tässä työssä analysoitiin perustuskuormia ja tutkittiin kuinka rakennus käyttäytyy kokonaisuudessaan. Perustuskuormat saatiin näkyviin projektinavigaatiopalkista valitsemalla "Support reactions". Kuormat esiintyvät laskentamallissa diagrammina sekä resultanteina. Kuvassa 22 on rakennuksen perustuskuormat Z-akselin suunnassa.



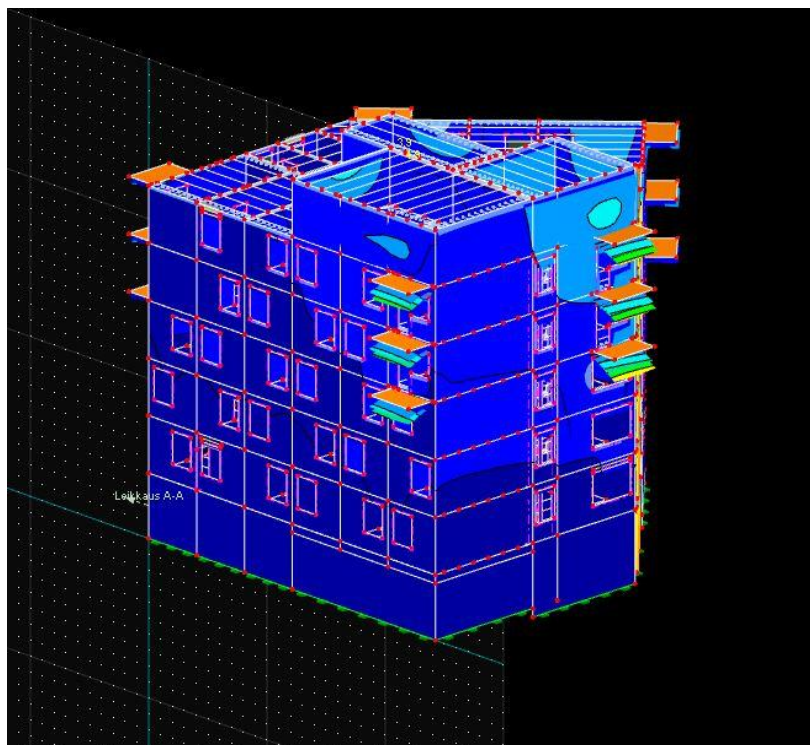
KUVA 22 Tukireaktiot (Huhtala 2015-01-04)

3D-laskentaohjelmien tuloksiin tulee usein voimapiikkejä, jotka ovat huomattavasti suurempia, kuin mitä mitoitusvoiman kuuluisi oikeasti olla. Kuvassa 22 näkyy esimerkiksi seinien liitoskohdissa suurempia voimia kuin elementissä muuten. Tästä syystä tuloksia tarkasteltaessa tulee olla varovainen voimien suuruuden suhteen. Tukireaktioiden piikeistä kysyttiin *Dlubal*n tuesta ja sieltä vastattiin, että ohjelmassa on mahdollista tasata tukireaktiot diagrammien asetuksista (Rotrekl 2015-03-30). Perustuskuormien tulokset avattiin diagrammimuodossa ja käytettiin *RFEM*n ominaisuutta, jolla kuormista saadaan tasanainen ja suuret voimat tasoittuvat ja jakautuvat koko matkalle. Kuvassa 23 on erään seinälinjan perustuskuorman ylin ja alin arvo. Kuvasta näkee, millaisia voimapiikkejä ohjelma luo, ja vihreällä viivalla on kuvattu tasoitettu kuorma. Tämä perustuu keskiarvokuormitukseen.

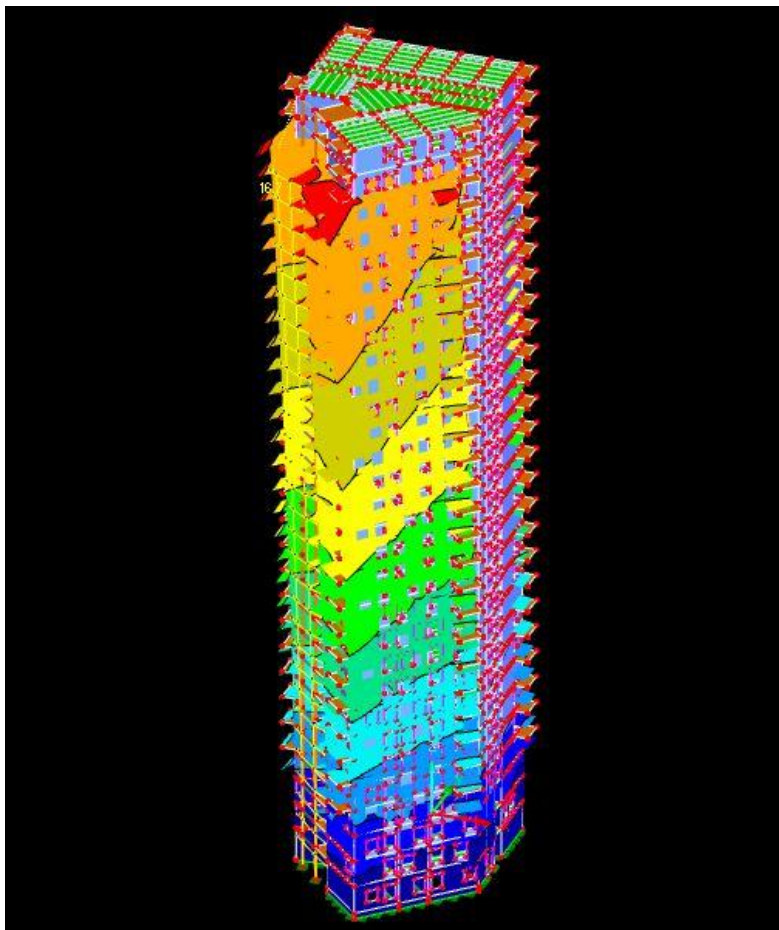


KUVA 23 Perustuskuormien tasaaminen (Huhtala 2015-01-04)

Vaihtamalla projektinavigaattorista näytettäväksi tulokseksi muodonmuutokset, voidaan havainnoida rakennuksen kokonaiskäyttäytymistä. Työssä käytettävä rakennus on suhteellisen matala, joten rakenteiden muutokset eivät käy selvästi ilmi eikä käyttäytymistä välttämättä huomioi selvästi. Sen havainnollistamiseen, miten rakennusten käyttäytymistä voi arvioida, mallinnettiin sama kerrostalo, mutta moninkertaisen korkeuksena. Näin kuvasta voi havainnoida, että rakennus lähtee kaatumaan. Korkeampaa rakennusta ei kuitenkaan voi verrata alkuperäisen referenssirakennuksen kanssa, vaan tämä tehtiin ainoastaan sen havainnollistamiseen miten muodonmuutokset esiintyvät.

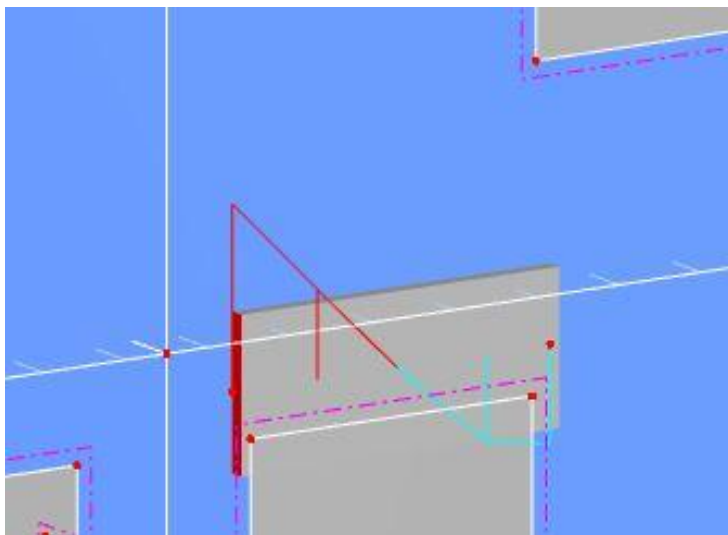


KUVA 24 Rakennuksen muodonmuutokset (Huhtala 2015-01-04)



KUVA 25 Muodonmuutokset, kun kerroksia on lisätty (Huhtala 2015-01-04)

Elementeissä on ikkunan- ja ovenylitysaukkoja. Elementtisuunnittelussa tulee aukonylityspalkit suunnitella ja suunnittelun lähtötiedoksi tarvitaan palkkiin kohdistuvat kuormat. Opinnäytetyön aikana heräsi kysymys, miten nämä kuormat saataisiin ulos rakennemallista. Työn aikana kokeiltiin luoda esimerkiksi palkki ikkunan yläpuolelle palkkityökälulla. Tämä ei kuitenkaan antanut haluttuja tuloksia, sillä ohjelma käsittää että seinän sisällä on oikeasti toinen palkki, ja näin geometrian kanssa tulee päällekkäisyyksiä. Tutkimalla *Dlubal*n blogia (www.dlubal.com/blog/) löydettiin tapa mallintaa aukonylityspalkit seinäelementteihin. Tämä tapahtui siten, että luotiin aukon yläpuolelle uusi palkkielementti, jonka tyyppiä asetettiin "Result beam". Tällä tyyppillä ei ole jäykkyyttä ja sitä käytetään näyttämään tasoelementtien sisäisiä rasituksia. Palkille tuli määrittää poikkileikkaus, jonka paksuudeksi asetettiin seinän paksuus ja korkeudeksi aukon yläpuolelle jäävän osan korkeus. Tästä on hyötyä myöhemmässä vaiheessa myös aukonylityspalkkien mitoitukselle, joka tapahtuu lisäosan avulla. Tässä työssä ei kuitenkaan käsitelty palkkien mitoitusta. Kuvassa 26 esitetty kyseinen aukonylityspalkki.



KUVA 26 Aukonylityspalkki on mallinnettu "Result beam"-työkalulla. Kuvassa näkyy leikkausvoimakäyrä. (Huhtala 2015-01-04)

5 TULOKSET JA ANALYSOINTI

5.1 Kokonaismallin hyödyt

Työn aikana tutustuttiin eräänlaiseen työskentelytapaan, jossa yhdistetään rakenne-, kuorma- ja analyysimalli. Suurimpana hyötynä yhteiskäytöstä on se, että geometria ja materiaaliominaisuudet pysyvät yhtenäisinä ja inhimillisten virheiden mahdollisuus pienenee, kun geometrian kanssa työskentely vähenee. Erillisellä laskenta- ja rakennemallilla toimittaessa muutokset tulee aina muistaa tehdä molempiin malleihin. Alkuperäisessä geometrian mallinnuksessa voi tulla myös virheitä, kun rakennus tehdään kahteen kertaan. Näin luodut virheelliset rakenteet ovat riski sekä rakennus- että käyttövaiheessa. Tämän lisäksi *Teklan* geometriatyökalut ja näkymätilat ovat kehittyneempiä ja helppokäyttöisempiä kuin *RFEMn*.

Sujuvan mallien välisen yhteistyön voidaan ajatella tuovan myös tehokkuutta suunnitteluun, kun työskentelyaika vähenee. Hyvin tehty rakennemalli luo hyvän pohjan analyysimallille ja näin *Teklan* automaattisista työkaluista saadaan hyötyä, sillä manuaalinen mallin muokkaaminen vähenee. Parhaimmillaan analyysimalli tulee täysin oikeanlaisena rakennemallista ja analyysimallin kanssa työskentelyyn *Teklassa* ei kulu aikaa. Tämä on se tilanne, mihin mallinnuksessa tulisi pyrkiä.

5.2 Kokonaismallin haasteet

Kokonaismallin tarve tulee tiedostaa suunnitteluprojektin alusta lähtien. Analyysimallin luominen voi olla todella työlästä, jos mallissa on paljon muokattavaa. Aina kun mallia joudutaan muuttamaan, virheiden määrä kasvaa ja työtuntien kasvamisen myötä myös työtehokkuus heikkenee. Normaalisti rakennemallin luominen on nopeaa ja elementtejä voidaan kopioida ja siirtää paikasta toiseen ilman, että huomataan, jos rakenteiden liittymisessä on pieniä epäkohtia. Nämä vaikuttavat analyysiosiin siten, että ohjelma ei liitä sauvoja ja solmupisteitä toisiinsa, ja työn muokkaaminen voi viedä jopa kauemmin kuin täysin uuden mallin luominen laskentaohjelmassa.

Laajojen rakennusten mallintaminen luo haasteita työskentelytilan täyttyessä erilaisilla analyysiosilla. Tämä johtaa siihen, että työssä käytetään useita geometriatasoja. Pienen muutoksen takia täysin uutta geometriatasoa ei ole järkevää luoda ja tällaiset muutokset tehdään laskentaohjelman puolelta. Muutosten ylläpitämisen kanssa tulee siis olla tarkkana.

Laskentamallin toimivuuden kannalta suunnittelijan tulee osata tehdä yksinkertaistuksia. Jokainen yksinkertaistus muokkaa laskentatulosta ja näiden kanssa tulee suunnittelijan olla tarkkana, että pysytään aina laskennan varmemmalla puolella. Vääränlaiset yksinkertaistukset voivat luoda tuloksia jotka eivät vastaa todellisuutta. Tuloksia tarkasteltaessa virheet voivat jäädä myös huomiotta ja tämä voi johtaa ali- tai ylimeroitettuihin rakenteisiin. Tietokoneavusteisen laskennan apuna tulisi olla aina jokin muu keino tarkastaa tulosten suuruusluokat oikeiksi.

5.3 Käyttökokemukset

Työstä suurimman hyödyn sai tekijä. Uutena ohjelmana tulleen *RFEM*n käytön opettelu antoi uutta näkemystä rakennesuunnittelussa käytettävän 3D-laskennan mahdollisuuksista. Ohjelman opettelu vei huomattavasti aikaa, mutta apua käyttöön sai sekä teknisestä tuesta että toimeksiantajan puolelta. *Dlubal*n tekninen tuki toimi koko projektin ajan kiitettävästi ja vastaukset kysymyksiin tulivat yleensä muutamassa päivässä. Jos vastausta kysymykseen ei tullut, vika oli todennäköisesti siinä, että yhdessä viestissä oli liian monta kysymystä.

*RFEM*n käytössä auttoi se, että työn tekijällä oli kokemusta muista 3D- ja 2D-mallinnusohjelmista, sillä ohjelmissa on paljon samoja työkaluja. Tutkimuksessa laskentaohjelman kanssa yhteistyössä käytettiin *Teklaa*, josta käyttökokemusta oli perustyökalujen hallinnan verran. Aivan uutena asiana työn tekijälle tulivat työssä käytettävä analyysimalliominaisuudet, ja näiden ominaisuuksien ymmärtäminen ja opettelu veivät huomattavasti aikaa. Teklan erinomaiset käyttöohjeet auttoivat opiskelussa. Niitä lukemalla ja niihin perehtymällä käyttäjä pystyy itsenäisesti opiskelemaan tarvittavat ominaisuudet ja työkalujen toimintaperiaatteet.

Teklan analyysimalliominaisuudet toimivat tarkasti mallinnetuissa ja yksinkertaisissa rakenteissa hyvin. Mallinnettavan kohteen kasvaessa ja monimutkaistuessa ohjelma ei toimi kovin sulavasti ja käytöstä tulee hankalaa työskentelytilan täytyessä erilaisista analyysiosista. Joissakin tapauksissa ohjelma ei ymmärtänyt esimerkiksi seinäelementissä olevia syvennyksiä tai koloja ja jätti koko elementin mallintamatta tai mallinsi sen virheellisesti. Ongelmien määrä lisääntyi työssä sen myötä, mitä yksityiskohtaisempi malli oli.

6 YHTEENVETO JA POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli mallintaa ontelolaatasto levymäiseksi välipohjaksi. Käytännössä olisi myös yksinkertaisempia tapoja toteuttaa ontelolaatat kuin laattojen mallinnus, vapautusten asettaminen ja jäykkyyden muuttaminen. Perustuskuormien kannalta päästäisiin yhtä oikeellisiin lopputuloksiin, jos ontelolaatat mallinnettisiin esimerkiksi palkkeina. Jos työstä halutaan selvittää muitakin tuloksia, kuten stabiiliteettia, vaikuttaa ontelolaataston jäykistyvyys tuloksiin ja näin jatkokäytön kannalta on hyvä, että laatasto on mallinnettu levymäisenä. Suurin ongelma 3D-laskennassa on se, että täytyy osata tehdä yksinkertaistuksia ja välttää ilmiöitä, jotka eivät vastaa todellisuutta. 3D-laskentaa käytettäessä tulee ymmärtää, että se ei ratkaise kaikkia suunnittelun ongelmia eikä ole täydellinen suunnittelijan työkalu, millä ratkaistaan kaikki suunnittelun tuomat haasteet. Suunnittelijan tulee arvioida tulosten paikkansa pitävyyttä, ja tukena tulisi olla myös toinen laskentatapa, ettei voidaan varmistaa kuormien suuruusluokat. Tutkimuksen aikana oli tärkeä huomata, mihin kokonaisen rakennuksen laskentamallilla pystyy ja mihin ei. *RFEM* on hyvä tuki, jolla saadaan suunnittelun tueksi lähtöarvoja projektin alkuvaiheessa. Lisäksi voidaan havainnoida sellaisia rasituksia, joita ei olisi muutoin huomioitu. Näin suunnittelussa voidaan puuttua tarvittaviin epäkohtiin ja panostaa haastavien rakenteiden suunnitteluun enemmän resursseja. Haastetta kokonaismallin toimintaan tuo se, että rakennemalliin mallinnetaan paljon sellaisia osia, joita laskentaohjelmat eivät käytä tai ymmärrä, kuten liitososat tai seinien koloukset.

Kun luodaan rakennemallista geometria laskentamalliin, vältytään todennäköisesti geometrian virheiltä ja näin vältytään myös laskennassa tapahtuvilta virheiltä. Yhteistyössä on vielä paljon kehitettävää *Teklan* komponenttien käytettävyydessä. Kun saadaan oikeat komponentit käyttöön, analyysimallissa on huomattavasti vähemmän muokattavaa ja automatiikka toimii paremmin. Näin tehokkuus kasvaa ja kokonaismallin edut pääsevät paremmin esiin. Rakennemallissa voi olla pieniä mittavirheitä, mitkä eivät vaikuta rakennemallin tai piirustusten oikeellisuuteen, mutta vaikuttavat analyysimallin toimintaan. Tällaiset virheet lisäävät työmäärää jopa moninkertaiseksi ja herättävät pohdintaa onko kokonaismallia järkevä käyttää. Työn aikana arvioitiin myös eri tavalla luotuun laskentamalliin kulunutta aikaa. Tästä huomiona on se, että nopein tapa luoda luotettava laskentamalli on, jos projektin alusta asti on huomioitu kokonaismallin tarve ja rakennemalli on luotu tarkasti oikeita komponentteja käyttäen. Jos taas rakennemalli on luotu huomioimatta analyysiominaisuuksien käyttäytymistä, ei kokonaismallin käytöstä ole juuri hyötyä, sillä *RFEM*llä saa luotua nopeammin uuden laskentamallin. Käyttömukavuuksissa on kuitenkin eroja. *Teklan* mallinnusominaisuudet ovat huomattavasti kehittyneemmät kuin *RFEM*ssä ja *Teklan* mallin muokkaaminen on tästä syystä helpompaa rakennemallissa. Kuitenkin jotkin geometriamuutokset on helppo muuttaa suoraan laskentamalliin.

Työssä tutkittiin yhdenlaista tapaa toteuttaa kokonaismallin ajatusta ja tulee muistaa, että tämä ei ole ainoa oikea tapa. Kokonaismallista voidaan saada suurempi hyöty erilaisella työskentelytavalla riippuen työssä käytettävästä kohteesta. Toisessa kohteessa parhaimmaksi tavaksi todettu työskentelytapa voi olla aivan väärä, kun sitä käytetään seuraavassa kohteessa. Työskentelytapa riippuu myös siitä, mitä tuloksia työltä haetaan, ja näin mallinnuksessa pitää ottaa erilaisia asioita huomi-

oon. Työn hyödyntäminen tehokkaammin laskennassa vaatii jatkotutkimusta esimerkiksi mitoitusten ja stabiiliteetin laskennan osalta. *Dlubal* on kehittänyt lisäosia *RFEM*-ohjelmaan, joilla voi analysoida rakenteen käyttäytymistä ja mitoittaa rakenteita. Tämä vaatii kuitenkin jatkotutkimusta, sillä työssä ei opinnäytetyön laajuuden vuoksi ole perehdytty näihin ominaisuuksiin. Suuriin suunnittelukohteisiin siirryttäessä laskentaohjelmat tulevat näyttämään yhä suurempaa roolia ja tästä syystä tutkimustyöt ovat aiheellisia.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

Amk.fi. Elementtimenetelmän perusteet. [verkkoaineisto]. [viitattu 2015-04-08]. Saatavissa: <http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/material/attachments/vanhaamk/digma/5h5F5GiAj/FES03.pdf>

Dlupal.com. a [verkkoaineisto]. [viitattu 2015-03-10]. Saatavissa: www.dlupal.com
Polku: Dlupal.com. Company. About us.

Dlupal.com. b [verkkoaineisto]. [viitattu 2015-04-08]. Saatavissa: www.dlupal.com
Polku: Dlupal.com/blog/en/. Illustrating Result Beams in RFEM 5.

Elementtisuunnittelu.fi a [verkkoaineisto]. [viitattu 2015-03-16] Saatavissa: www.elementtisuunnittelu.fi
Polku: Elementtisuunnittelu.fi. Julkisivut. Julkisivujärjestelmät. Sandwich-julkisivut.

Elementtisuunnittelu.fi b [verkkoaineisto]. [viitattu 2015-03-16] Saatavissa: www.elementtisuunnittelu.fi
Polku: Elementtisuunnittelu.fi. Liitokset. Liitosten toiminta. Ontelolaatasto.

Elementtisuunnittelu.fi c [verkkoaineisto]. [viitattu 2015-03-16] Saatavissa: www.elementtisuunnittelu.fi
Polku: Elementtisuunnittelu.fi. Rakennejärjestelmät. Jäykistysjärjestelmät.

Elementtisuunnittelu.fi d [verkkoaineisto]. [viitattu 2015-03-16] Saatavissa: www.elementtisuunnittelu.fi
Polku: Elementtisuunnittelu.fi. Runkorakenteet. Laatat. Ontelolaatat.

HÄYRINEN, Pekka 2012. Ontelolaatastojen suunnittelukurssi. [verkkoaineisto]. [viitattu 2015-03-18]. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/uutiset/2012/11/22/ontelolaatastojen-suunnittelukurssi-pidettiin-21-11-2012-vantaalla>

KUOKKANEN, Hannu 2015-01-13. Projektipäällikkö. Rakennussuunnittelutoimisto Nylund Oy. [Pala-
veri.] Kuopio: Nylund Oy:n toimisto.

LEHTONEN, Tuomas 2013. FEM-Laskentaohjelmien soveltuvuus betonirakenteiden mitoitukseen. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennesuunnittelu. Diplomityö. [viitattu 2015-03-31] Saatavissa: <https://dSPACE.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21523/lehtonen.pdf?sequence=1>

PARMA OY. 2013. Parman ontelolaatastot. Suunnitteluohje. [verkkoaineisto]. [viitattu 2015-03-24]. Saatavissa: http://www.parma.fi/images/files/downloads/PARMA_ontelolaatastot_suunnitteluohje_031213.pdf

Rakteksolutions.fi. [verkkoaineisto]. [viitattu 2015-03-10]. Saatavissa: www.rakteksolutions.fi
Polku: Rakteksolutions.fi. Product. RFEM.

RIEKKI, Jaakko 2014-09-25. Internet -luento. Tekla ja Fem (Video) [online]. [verkkoaineisto]. [viitattu 2015-03-16] saatavissa: Sweco intranet

ROTREKL, Jan 2015-03-29. [Sähköpostikeskustelu Dlubalin asiakaspalvelun kanssa.] Vastaanottaja Mikko Huhtala. [Viitattu 2015-03-31]

ROTREKL, Jan 2015-01-30. [Sähköpostikeskustelu Dlubalin asiakaspalvelun kanssa.] Vastaanottaja Mikko Huhtala. [Viitattu 2015-03-31]

Tekla Corporation 2015. Tekla Glossary. [viitattu 2015-03-31] Saatavissa: <https://teklastructures.support.tekla.com/system/files/files/TeklaStructuresGlossary.pdf>

Teklabimsight.com. [verkkoaineisto]. [viitattu 2015-03-10] Saatavissa: www.teklabimsight.com
Polku: Teklabimsight.com. Tietoa. What is bim.

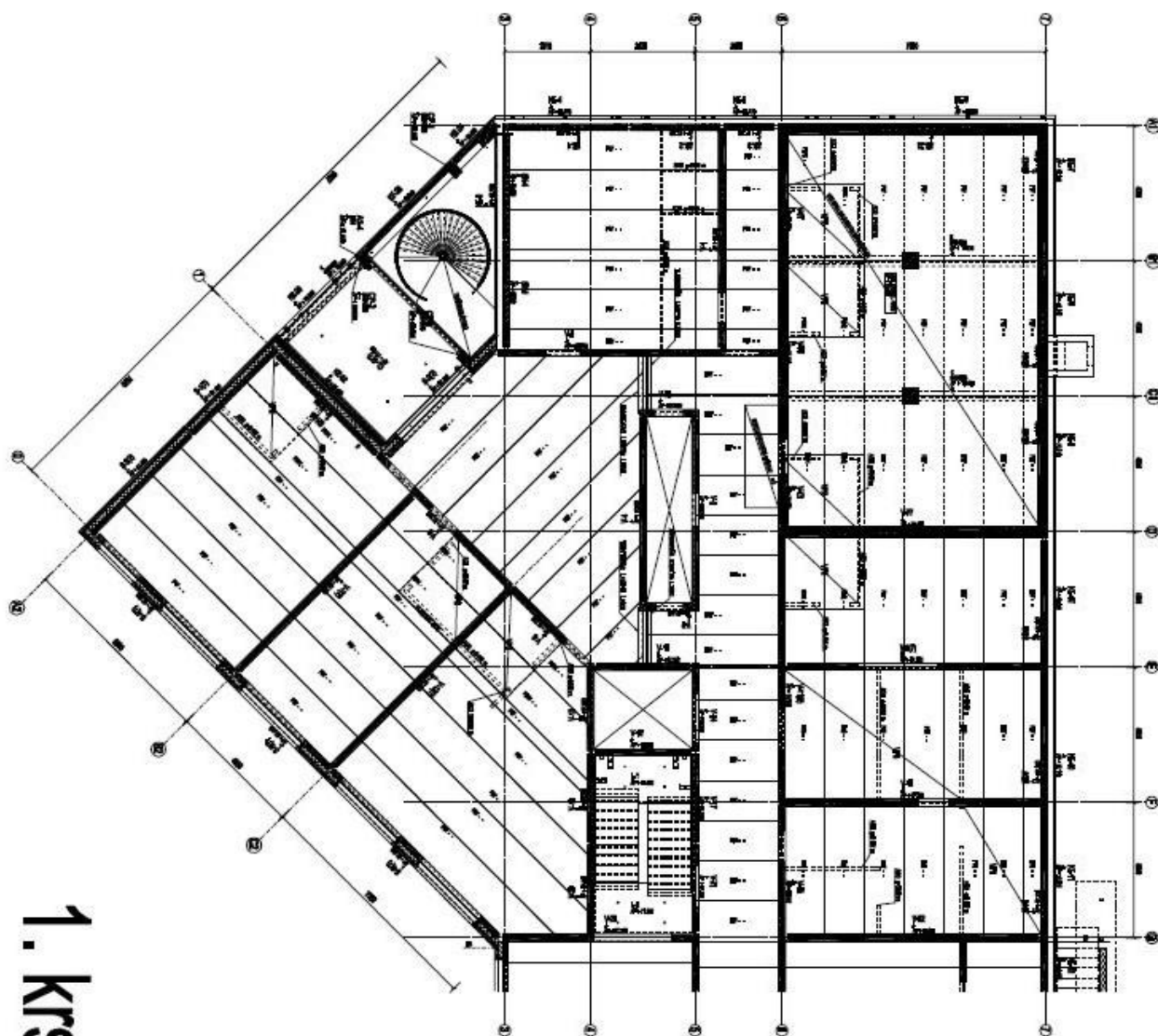
Tekla.com. a [verkoaineisto]. [viitattu 2015-03-10] Saatavissa: www.tekla.com
Polku: Tekla.com/fi. Tietoa Teklasta. Yritys. Lyhyesti.

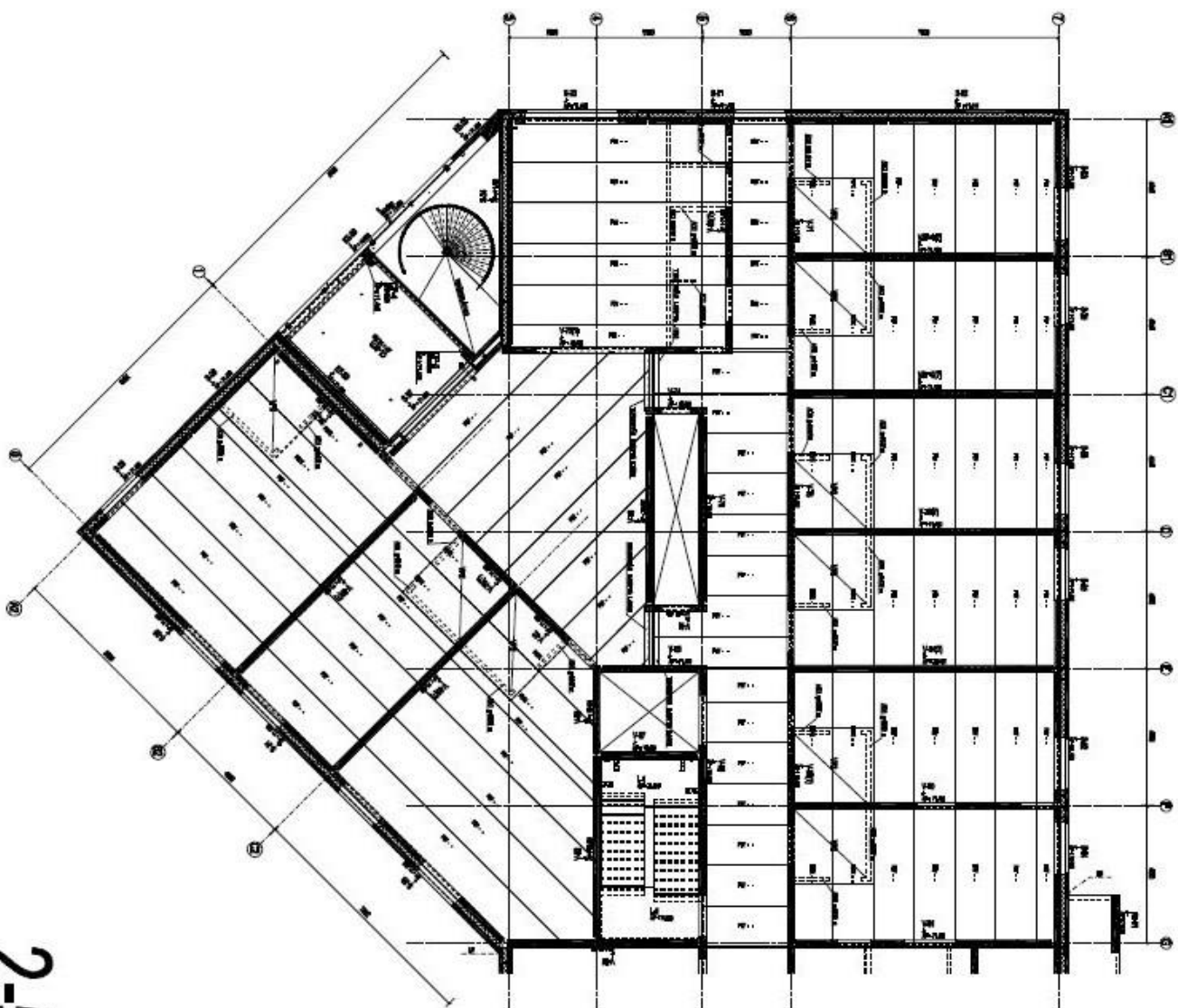
Tekla.com. b [verkkoaineisto]. [viitattu 2015-03-13]. Saatavissa: www.tekla.com
Polku: Tekla.com. Tekla websites. Tekla User Assistance. Including objects in analysis models.

Tekla.com. c [verkkoaineisto]. [viitattu 2015-03-13] Saatavissa: teklastructures.support.tekla.com.
Polku: Tekla.com. Tekla websites. Tekla User Assistance. What is a 3D model.

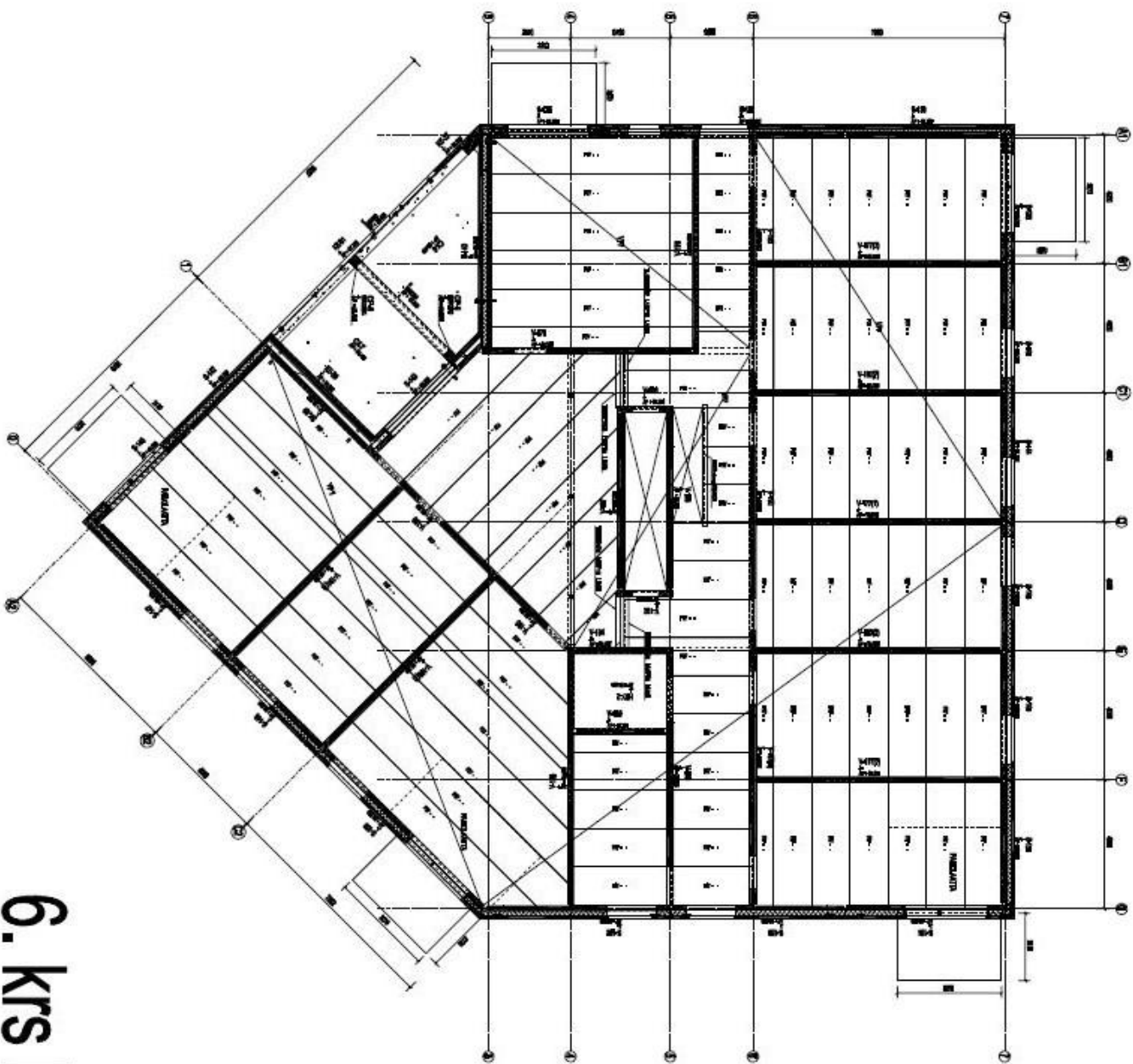
YLEISET TIETOMALLIVAATIMUKSET 2012. OSA 5. RAKENNESUUNNITTELU. RT 10-11070. [online].
Helsinki: Rakennustieto [viitattu 2015-03-30]. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi>

LIITE 1: REFERENSSIRAKENNUKSEN POHJAPIIRROKSET

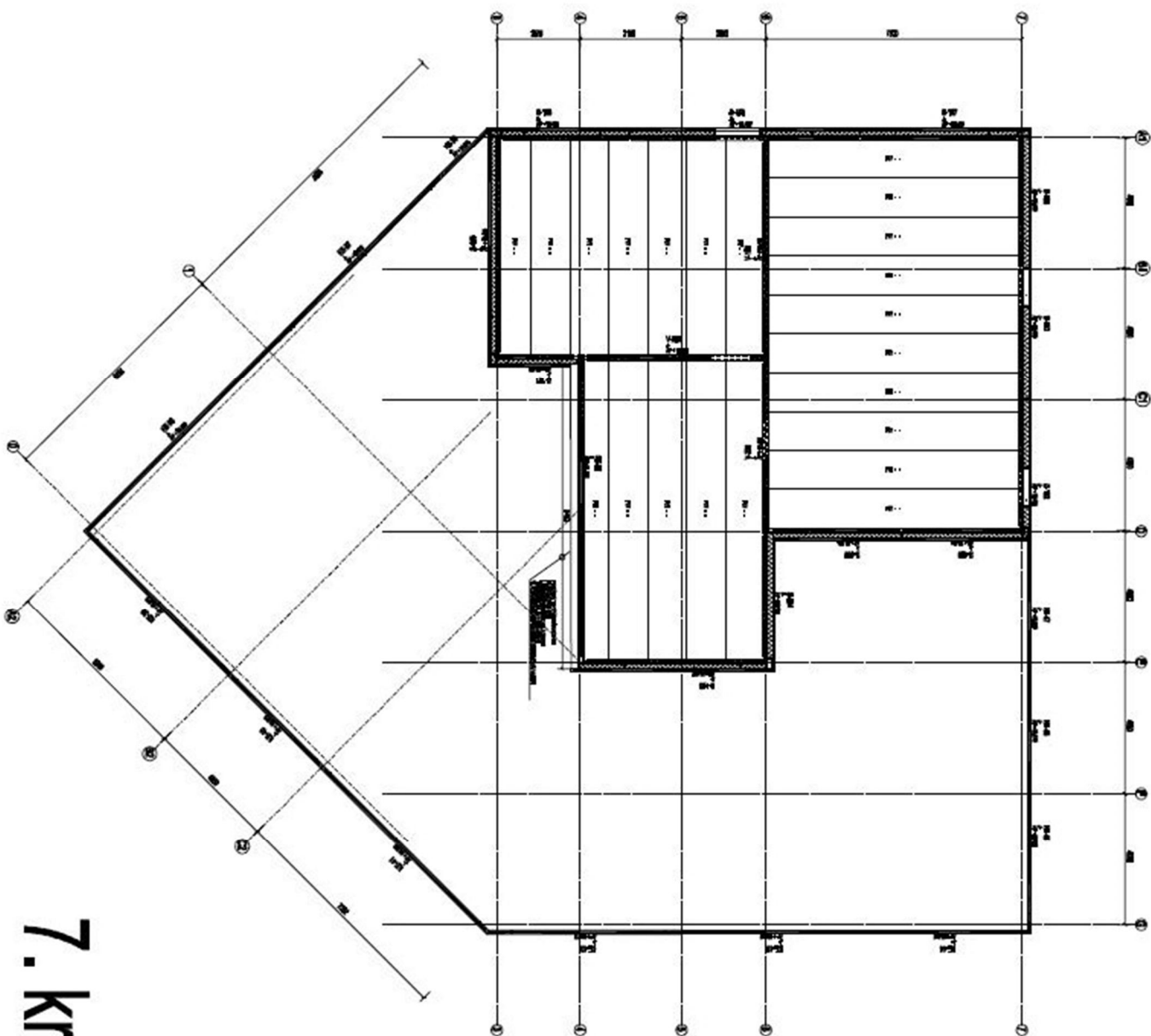
**1. krs katto alustava**



2-5. krs katto alustava



6. krs katto alustava



7. krs katto alustava

LIITE 2: TEKLA STRUCTURES MALLINNUSOHJELMAN JA RFEM 3D-LASKENTAOHJELMAN YHTEISTYÖ

Ohjeistus käy läpi opinnäytetyön *Tekla Structures* mallinnusohjelman ja *RFEM* 3D-laskentaohjelman yhteistyö. Ohje on suoraviivainen ja esittelee tapoja, kuinka saadaan *Teklalla* mallinnetusta rakennemallista laskentamalli *RFEM*issä. Tässä ohjeessa käytettävä referenssikohde on betonielementtirakenteinen asuinkerrostalo, joka on valmiiksi mallinnettu toimeksiantajan toimesta *Tekla Structuresilla*. Ohjetta tehdessä on oletettu, että lukija tuntee ohjelmien perusteet. Ohjetta on rajattu siten, jottei se olisi suhteettoman suuri. Ohjelman kaikkia ominaisuuksia ja mallinnusmahdollisuuksia ei ole käyty läpi.

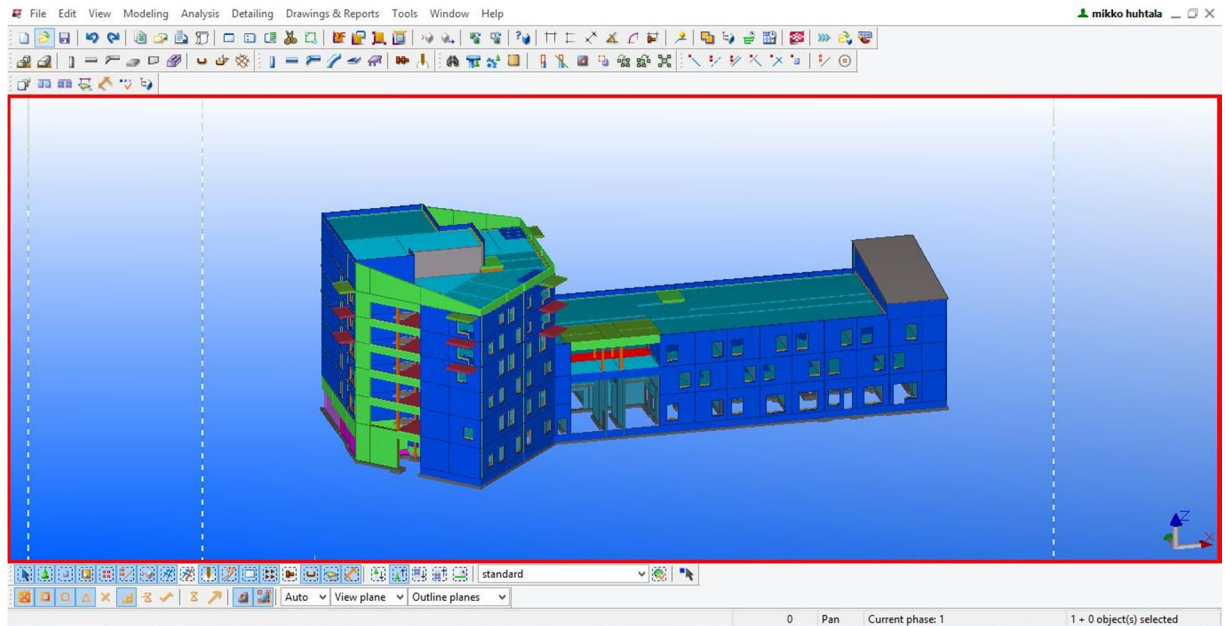
Tarkoituksena on antaa esimerkkejä, kuinka yhteistyö kahden ohjelman välillä toimii. Ohjetta seuraamalla oppii käyttämään joitain *RFEM*n perustyökaluja ja ymmärtää, mitä *Teklassa* tulisi huomioida rakennemallia tehtäessä. Ohjeen lisäksi käyttäjä voi hankkia tietoa *RFEM*n julkaisijan, *Dlubalin* teknisen tuen kautta. Lisäksi *Dlubal* on julkaissut opetusvideoita jotka ovat saatavilla yrityksen kotisivuilla (www.dlubal.com) sekä Youtubessa (www.youtube.com). Myös *Teklan* kotisivuilla (www.tekla.com) löytyy lisäinformaatiota analyysimallien luomisesta.

OHJEEN SISÄLTÖ

1. Työn aloitus
2. Näkymät Tekla Structures:ssa
3. Analyysimalliasetukset
4. Analyysimallin muokkaus
5. Laskentamallin luominen
6. Kuormitustapausten määrittäminen
7. Mallien siirto Tekla Structuresta RFEMiin
8. Tukien määrittäminen
9. Kuormien mallinnus
10. Laskenta
11. Tulokset

Työn aloitus

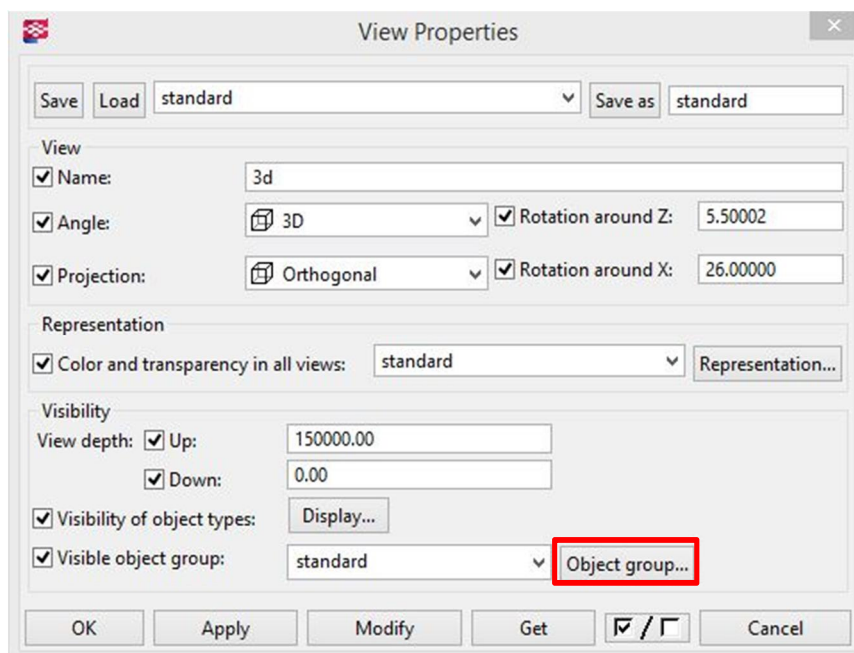
Avataan projekti, joka laajennetaan analyysimalliksi. Tässä tapauksessa rakennuksen Tekla-mallintamisessa ei ole otettu huomioon, että malli laajennetaan kokonaismalliksi, mikä tuo esiin joitain ongelmia mallinnuksessa. Mallintamistarkkuus on tärkeässä asemassa kun analyysimallia lähdetään luomaan rakennemallista ja tämä on hyvä pitää mielessä uusia rakennemalleja luotaessa. Analyysimallin voi luoda projektiin jo hyvissä ajoin, kun massamalli rakennuksesta on luotu.

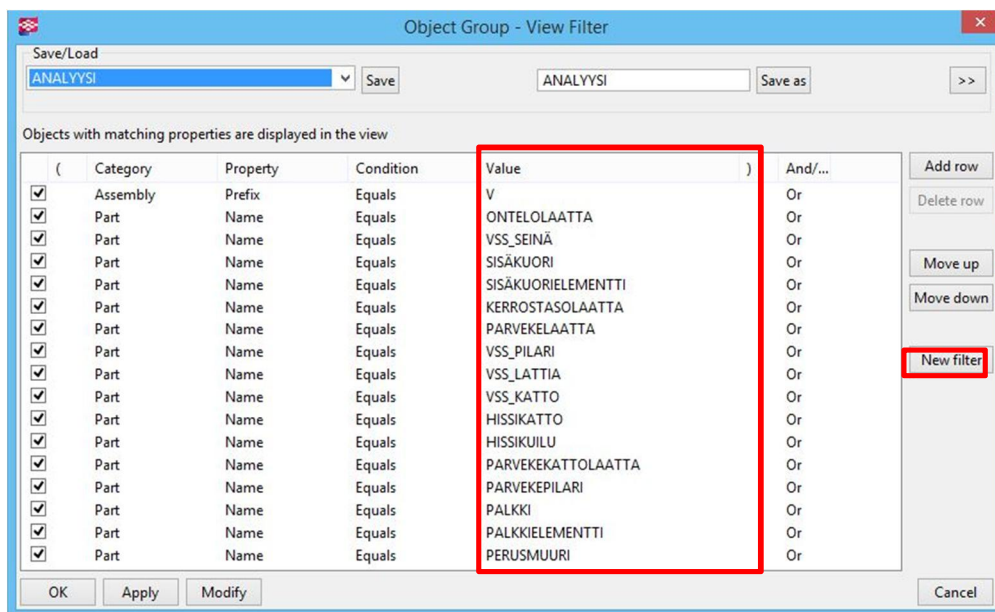


Näkymät

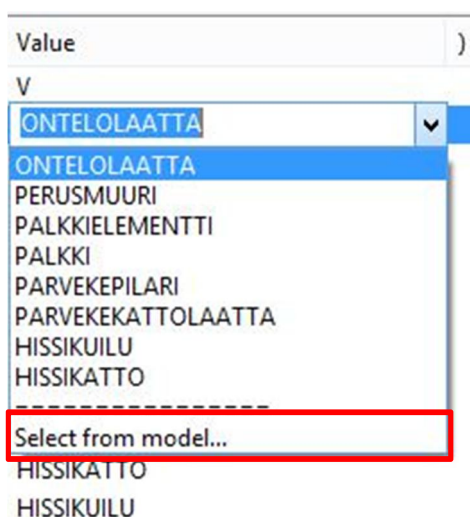
Analyysimallin kanssa työskentely on haastavaa, jos malli on suuri ja sisältää paljon informaatiota. Työn helpottamiseksi jaotellaan rakennus eri osiin *Teklan* näkymäfiltertien avulla ja luodaan osista omat analyysimallit, jotka yhdistetään myöhemmin yhdeksi malliksi. Tämän jaottelun voi määrittellä itse järkevällä tavalla. Tässä tapauksessa jaotellaan: väliseinät-pilarit-palkit-laatat omana mallinaan ja ulkoseinät omana mallinaan. Samalla poistetaan näkymästä sellaiset osat, jotka eivät ole laskentaohjelman kannalta oleellisia, kuten kaiteet, pultit, ulkoseinien ulkokuoret yms. Referenssirakennus on jaettu korkean ja matalan osan välistä liikuntasaumalla. Liikuntasaumalla jaetun rakennuksen lohkot voidaan käsitellä omina malleinaan laskentaohjelmassa. Tässä ohjeessa käsitellään rakennuksen korkeamman lohkon mallinnusta.

- Tuplaklikataan *Teklan* työskentelytilan taustaa hiiren vasemmalla näppäimellä, jolloin aukeaa "View Properties"
- Valitaan "Object group", mistä luodaan *Teklan* näkymät tarpeen mukaan
- Luodaan uusi filteri valitsemalla "New Filter"

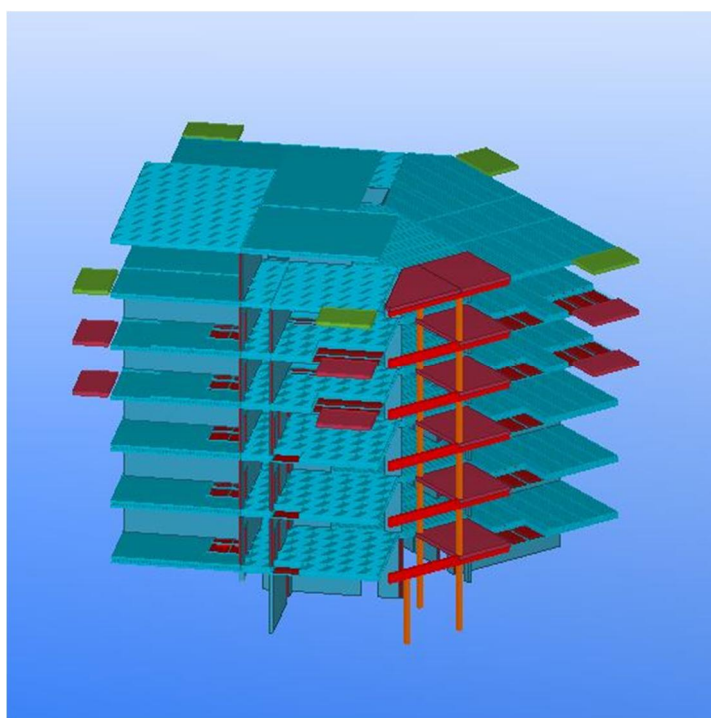
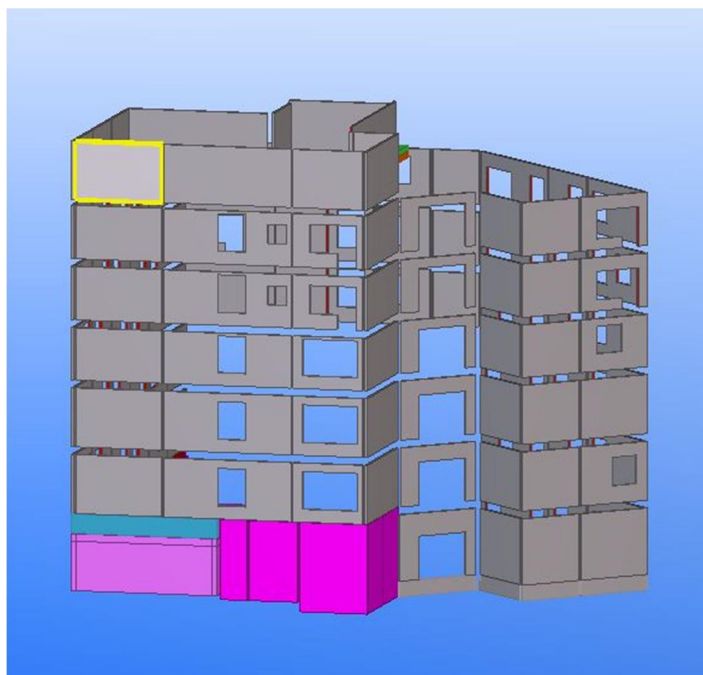




- Valitaan filteriin "käsin" ne osat, jotka ovat laskentamallin kannalta oleellisia



- Aktivoidaan filteri jolloin saadaan halutut näkymät. Tässä tapauksessa on valittu toiseen näkymään ulkoseinien sisäkuori ja väestönsuoja. Toiseen näkymään on valittu väliseinät, laatastot, pilarit ja palkit. Ulkoseinien eriste ja ulkokuori huomioidaan myöhemmin
- Näkymien luonti helpottaa työskentelyä ja tämän jälkeen aletaan luomaan kokonaismallia

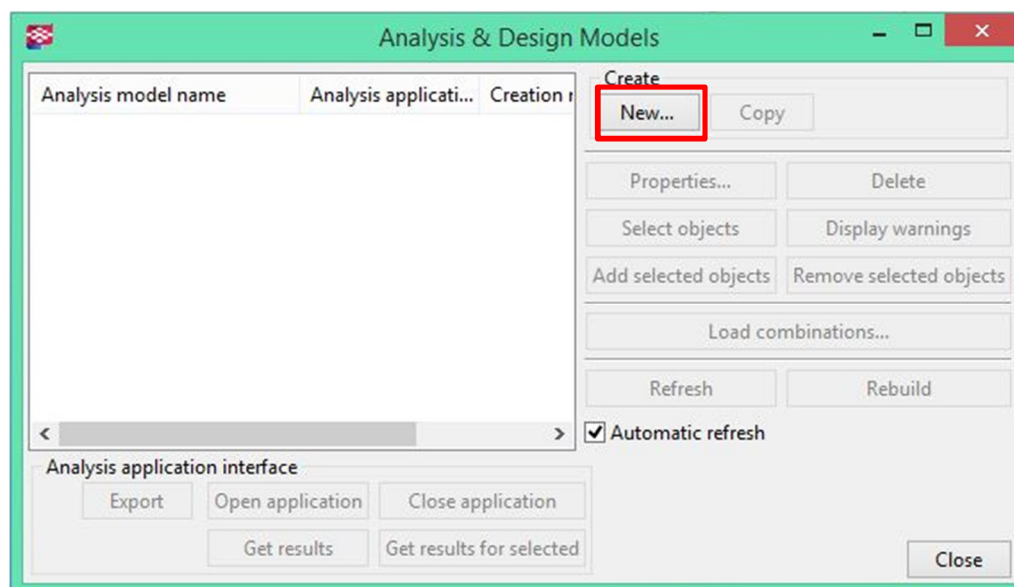
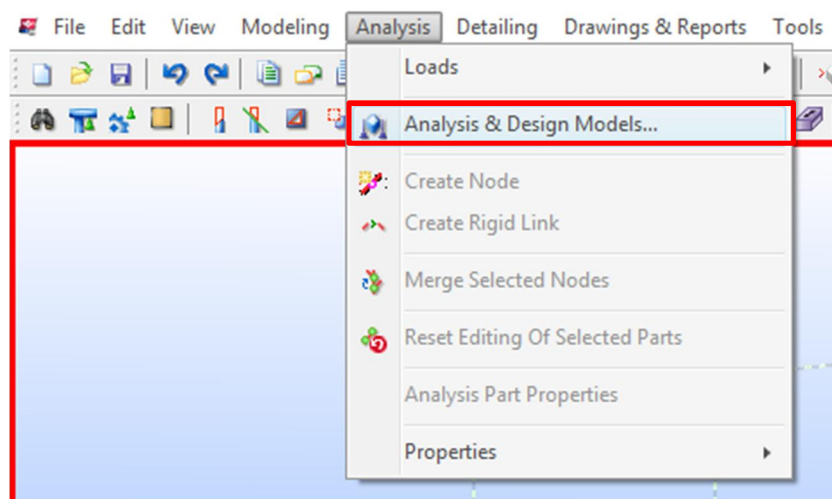
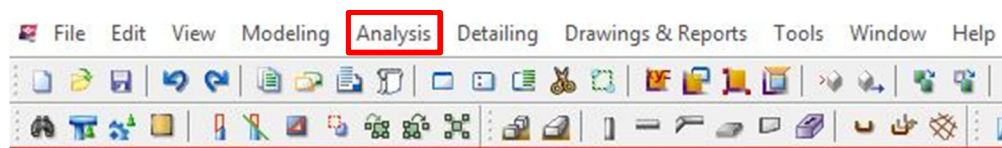


Kuvissa havainnollistettu näkymiä

Kun rakennemalli on luotu, saadaan analyysimalli luotua tästä samasta mallista *Teklan* analyysimallitilassa. Yhden mallin käyttö vähentää geometrian mallintamisessa tulevan virheen mahdollisuutta ja vähentää mallintamiseen käytettyä aikaa tehostaen näin työskentelyä. Kokonaismallin luominen tulisi huomioida mallinnusprosessin alusta lähtien, sillä analyysimallin muokkaus on paljon työläämpää, jos mallissa on esimerkiksi pieniä mittavirheitä.

Luodaan analyysimalli:

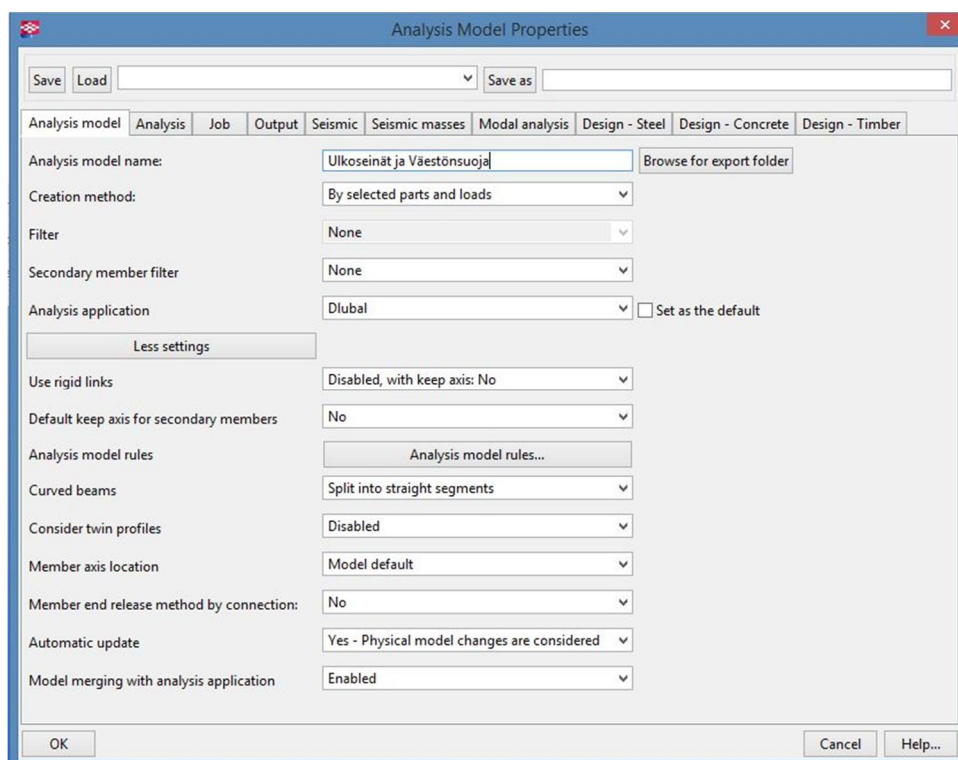
- Valitaan "Analysis" → "Analysis & Design Models..."
- Luodaan uusi analyysimalli valitsemalla "New..."



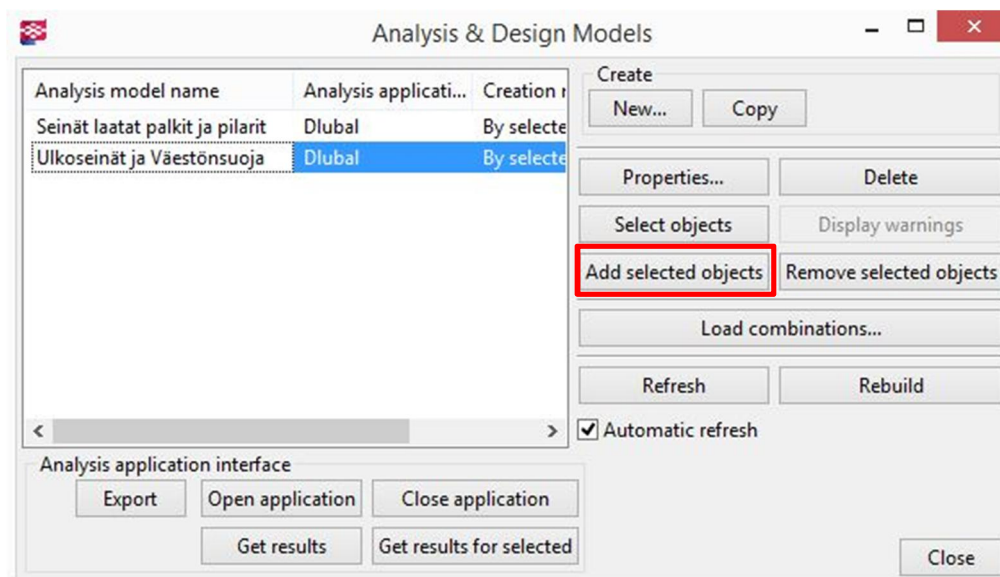
Analyysimalliasetukset

Analyysimalliasetukset avautuvat kun luodaan uusi analyysimalli.

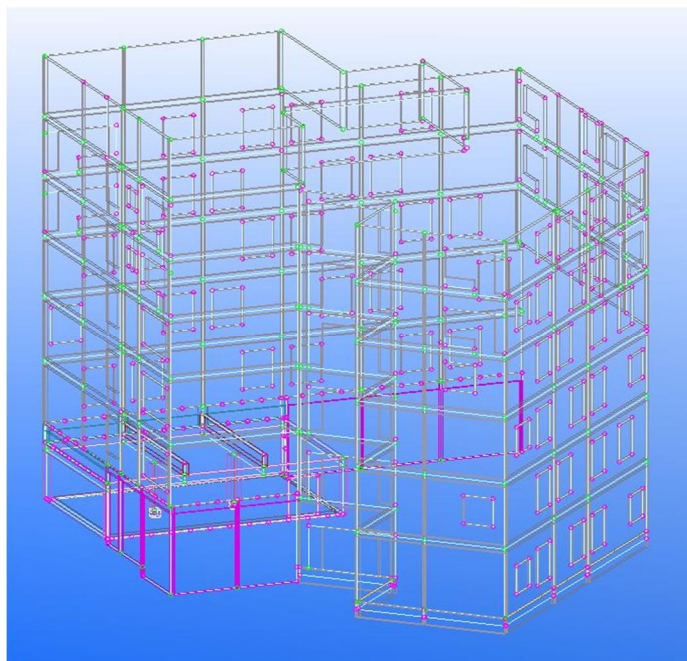
- Määritetään työlle nimi
- Valitaan "creation method". Tässä kohdassa valitaan, luodaanko analyysimalli koko mallista, vai erikseen valituista osista. Vaikka valittaisiin mikä tahansa menetelmä, voidaan myöhemmin lisätä tai poistaa osia tarpeen mukaan kohdasta "add selected objects" ja "remove selected objects"
- "Filter" -valinnasta löytyy malliin luodut valintafiltrit rakenteen eri osille. Tällä valinnalla voidaan filttaroida mallista pois analyysimallin kannalta turhat rakenteet. Tässä tapauksessa näkyvät on luotu teklan View Propertiesista joten Filter-valinta on "None"
- Secondary member filter valikosta valitaan, määrittääkö *Tekla* itse sekundääriosat. Valitaan "None"
- Analysis application kohtaan valitaan käytettävä laskentaohjelma. Jos koneella on jo asennettuna jokin *Tekla*-yhteensopiva laskentaohjelma, löytyy se tästä valikosta. Tässä työssä käytetään *Dlubal*n *RFEM*ä, joten valitaan "Dlubal"
- "Use rigid links" -kohdasta määritetään, luoko *Tekla* jäykkiä kytkentöjä erillisten solmupisteiden välille. Rigid link sitoo solmupisteet siten, että ne pysyvät kiinni toistensa suhteen eikä siirtymää pääse tapahtumaan näiden pisteiden suhteen. Mallin luonnissa pyritään kuitenkin siihen, ettei rigid linkejä luoda
- "Member axis location" -valikosta valitaan, mihin elementin kohtaan analyysisauvat ja solmupisteet luodaan. Tämän lisäksi sauvoja ja solmupisteitä voi muuttaa manuaalisesti analyysimallissa. Valitaan "Model Default", jolloin sauvojen paikka määräytyy elementin omista analyysiasetuksista. Rakenteet mallinnetaan keskeisesti lukuun ottamatta epäkeskisyysskohtia esimerkiksi seinäli-toksissa
- Klikataan "OK", jolloin tekla luo analyysimallin



- Analyysimalliin ei ilmesty vielä yhtään sauvaa eikä solmupistettä, koska asetuksista valittiin "Creation method" -kohtaan "By selected parts and loads"
- Valitaan hiirellä maalaamalla tai klikkaamalla osat, joista luodaan analyysimalli, ja klikataan "Add selected objects"



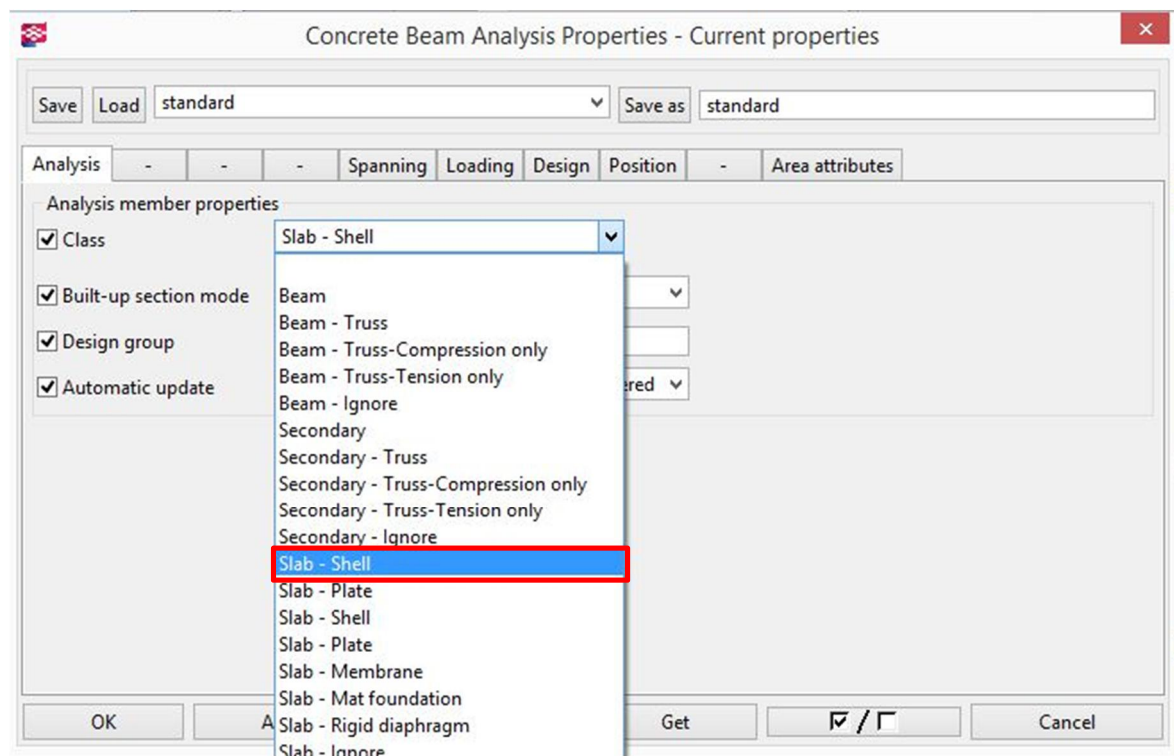
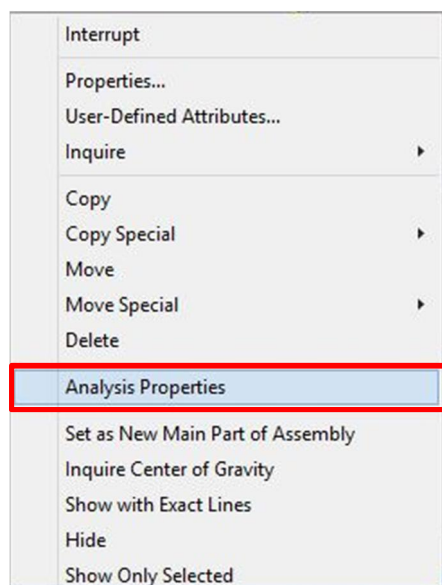
- Tekla luo valituista osista analyysisauvat ja solmupisteet
- Sauvoja tulee muokata manuaalisesti, sillä automatiikka ei toimi kaikissa rakenteissa johtuen mallin komponenteista
- Oheisessa kuvassa analyysimalli ennen muokkausta. Päällisin puolin malli näyttää hyvältä, mutta tarkemmin tarkastellen kaikki liitokset ja geometria eivät ole oikein, joten niitä täytyy muokata manuaalisesti



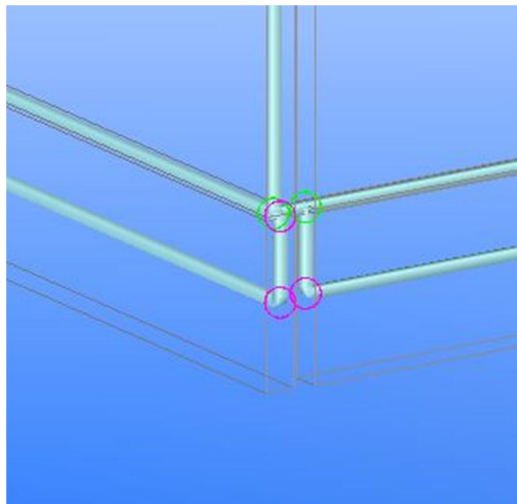
Analyysimallin muokkaus

*Tekla*ssa komponentit on luotu tietyntyyppisellä komponenttityökalulla. Tässä työssä käytetyt sandwich-elementit ja ontelolaatat on luotu palkkityökalulla, mikä aiheuttaa sen, että *Tekla* luo komponentille palkkimaisen profiilin ja vain yhden analyysisauvan. Palkin analyysiobjekti voidaan muuttaa laattamaiseksi seuraavalla tavalla:

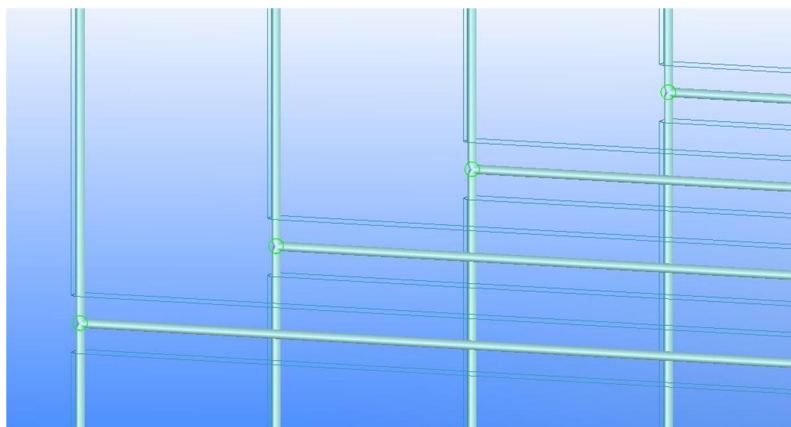
- Klikataan hiiren oikealla näppäimellä elementtiä ja valitaan "Analysis properties"
- Analysis-välilehdellä on analyysiosan asetukset "Analysis Properties"
- Valitaan "Class" –alasvetovalikosta "Slab – Shell" tai "Slab – Plate", jolloin *Tekla* luo kyseisille elementeille automaattisesti tasomaisen elementin



- Analyysimalli luo rakenneosille automaattisesti solmupisteet ja analyysisauvat
- Voit valita yhdistääkö analyysimalli elementit automaattisesti toisiinsa. Automaatiikka toimii joissain yksinkertaisissa tapauksissa hyvin, mutta joissain tapauksissa se aiheuttaa virheitä sauvojen sijainteihin ja geometriaan
- Mallin sauvoja voi muokata manuaalisesti siirtämällä. Tämä on työläin vaihe mallintamisessa ja vaatii erityistä tarkkuutta, kun sauvojen ja solmupisteiden määrä on suuri. Laskentamalli ei toimi tai tuottaa vääristyneitä tuloksia jos analyysielementeissä on pienikin virhe



Liittamisautomaatiikka ei toimi



Liittamisautomaatiikka toimii

- Solmupisteiden väri kertoo onko se liitoksissa toiseen solmupisteeseen

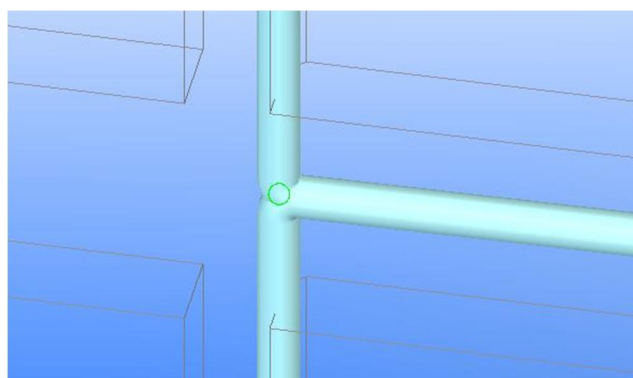
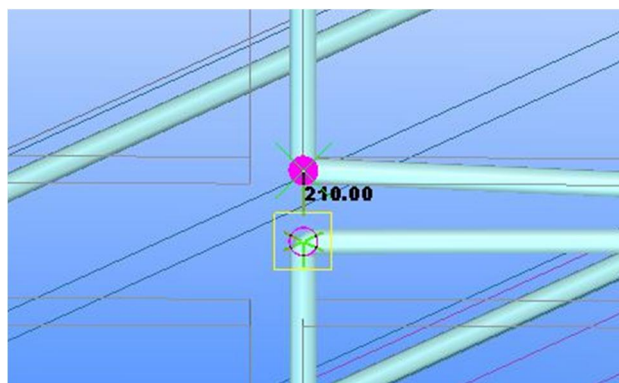
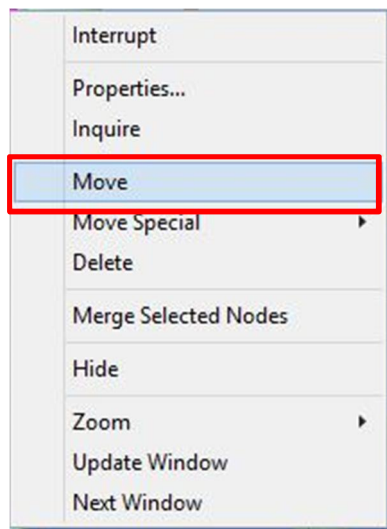


Vihreä ympyrä tarkoittaa, että kaksi, tai useampi solmupistettä on liittynyt



Magenta ympyrä tarkoittaa yksittäistä solmupistettä

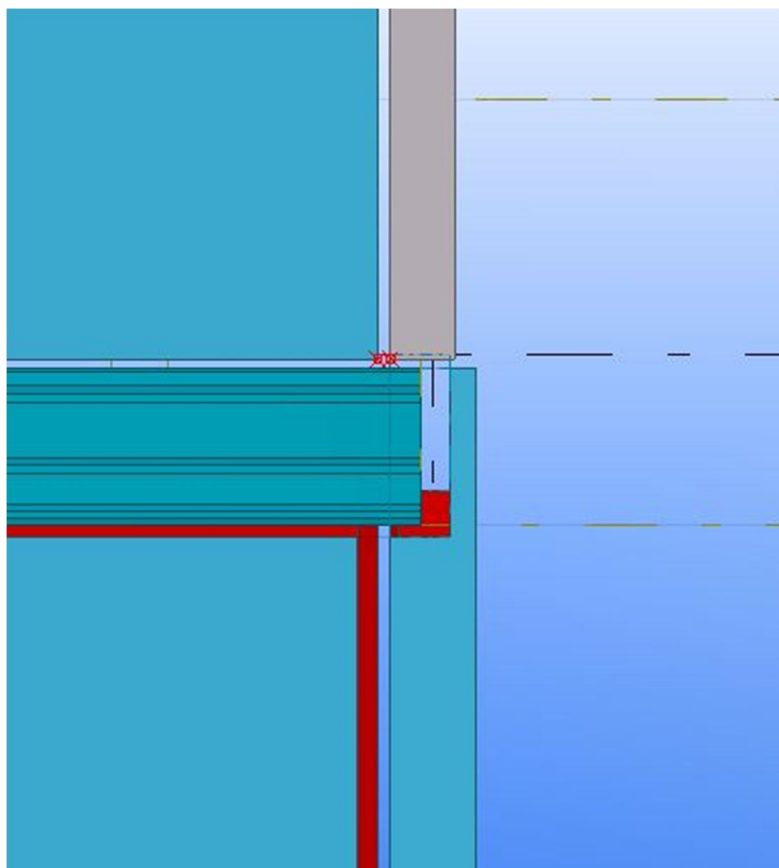
- Sauvoja ja solmupisteitä siirretään manuaalisesti Teklan "Move"- sekä "Move Special → Linear"-komandoilla
- Solmupisteiden ja sauvojen tulee olla täydellisesti kiinnittyneitä toisiinsa, että liitos toimii oikein
- Siirretään virheettiset solmupisteet sekä analyysisauvat yksi kerrallaan:



- Valitaan siirrettävä solmupiste, klikataan hiiren oikealla näppäimellä ja valitaan "Move"
- Siirretään solmupiste valitsemalla lähtö- ja päätöspiste
- Solmupiste siirtyy, sauvat liittyvät toisiinsa ja solmupisteen väri muuttuu vihreäksi

Rakennuksessa on epäkeskeisyyskohtia johtuen eri vahvuisista seinistä. Näissä kohdissa voidaan käyttää yksinkertaistusta ja liittää seinät keskeisesti toisiinsa. Näin malli toimii paremmin ja manuaalinen liitostyö ei ole niin työlästä. Yksinkertaistuksien käyttämistä tulee suunnittelijan arvioida kohdekohtaisesti.

- Valitaan keskilinja 150mm paksun sisäkuoren mukaan
- Siirretään 200mm paksun seinän analyysisauvoja 25mm, jolloin sauvat liittyvät toisiinsa keskeisesti

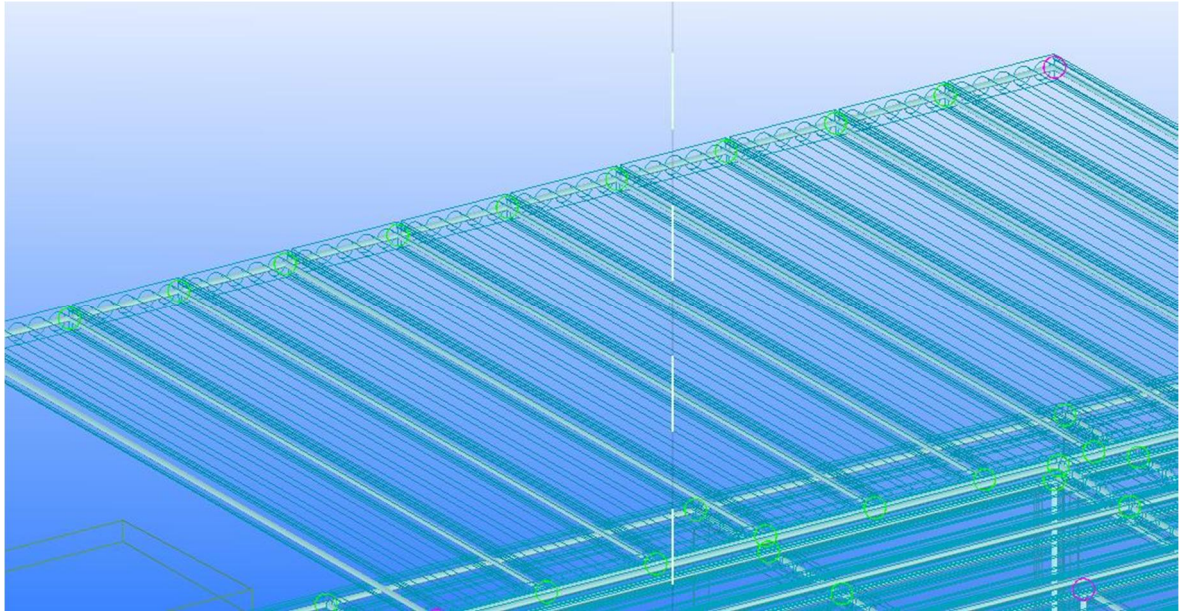


Kuva 200mm seinä liittyä 150mm paksuun seinään

Kun ensimmäinen analyysimalli on muokattu ja valmis siirrettäväksi laskentaohjelmaan, luodaan uusi analyysimalli lopuista rakenneosista...

Vaihdetaan "View Properties" valikosta näkymäfilterit siten, että oikeat rakenneosat ovat näkyvissä. Luodaan väliseinistä, pilareista, palkeista ja laatoista uusi analyysimalli:

- Valitaan "Analysis → Analysis & Design Models..."
- Luodaan uusi analyysimalli valitsemalla "New..."
- Määritetään analyysimalliasetukset kuten ulkoseinille
- Valitaan lisättävät elementit maalaamalla ja valitsemalla "Add selected objects"



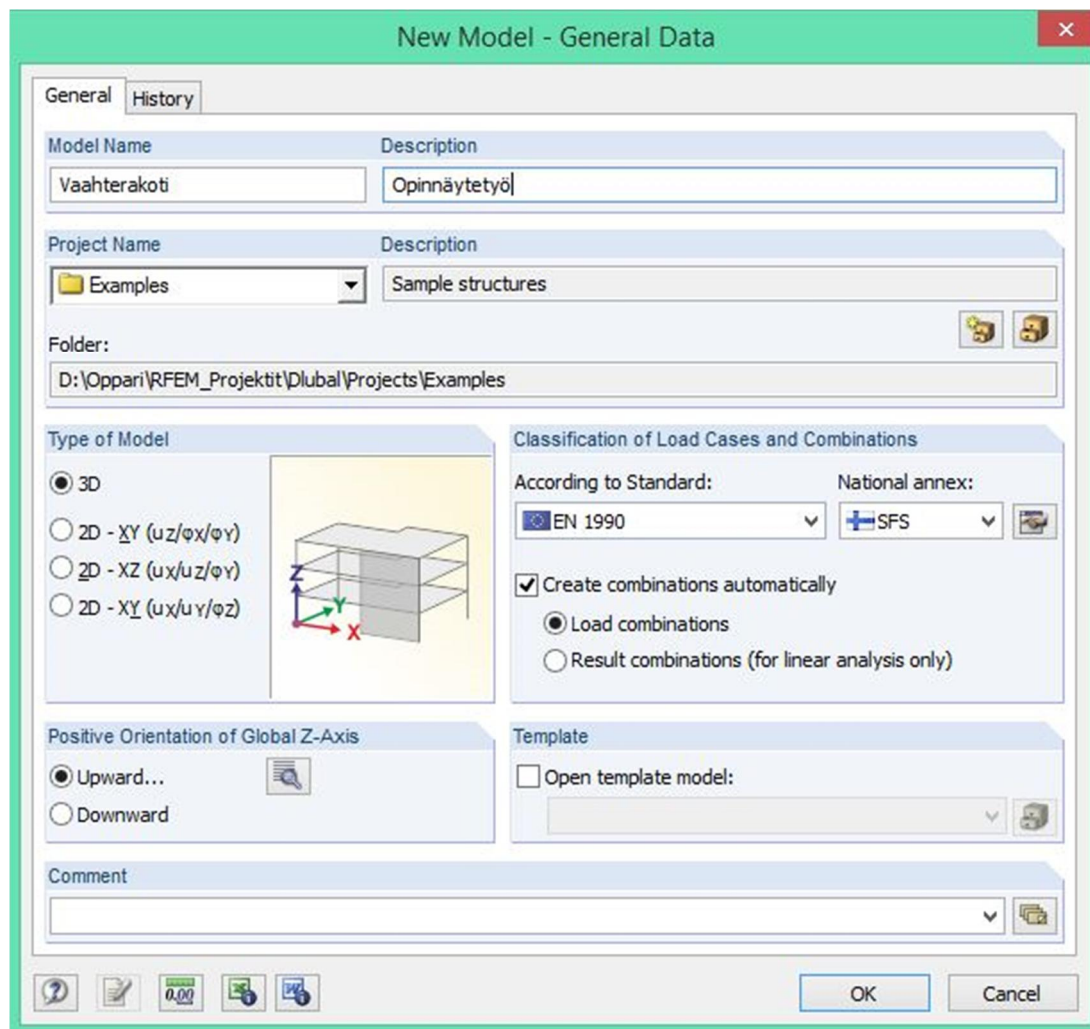
Ontelolaataston liitosautomaatiikka toimii

Kun analyysiosat on valittu, tehdään jälleen manuaaliset muokkaukset väliseinien, ontelolaattojen ja parvekelaattojen suhteen. Kuvasta näkee, että osittain sauvoja voi olla vaikea hahmottaa ja siirrellä, sillä näkymästä tulee sekava, kun se täyttyy solmupisteistä. Tästä syystä on hyvä käyttää leikkaus-tasoja tai vähentää näkymästä objekteja väliaikaisesti.

Laskentamallin luominen

Aloitetaan uusi *RFEM*-projekti:

- Käynnistetään *RFEM*
- "File → New" tai vaihtoehtoisesti näppäinyhdistelmä Ctrl + N



- Määritetään työn nimi ja selitys työstä
- Valitaan kansio, johon projekti tallennetaan. Ohjelma tallentaa työn automaattisesti omaan projektikansioonsa
- Valitaan mallin tyyppiä "3D"
- Valitaan standardiksi EN 1990 ja Suomen kansallisen liitteen mukaiset kertoimet
- Voidaan valita luoko ohjelma kuormitusyhdistelmät automaattisesti vai luodaanko ne manuaalisesti. Valitaan automaattinen
- Valitaan Z-akselin positiivinen suunta. Oletuksena tässä on positiivinen suunta alaspäin, mutta valitaan positiiviseksi suunnaksi ylöspäin, sillä myös teklässä Z-akselin positiivinen suunta on ylöspäin
- Hyväksytään "OK"

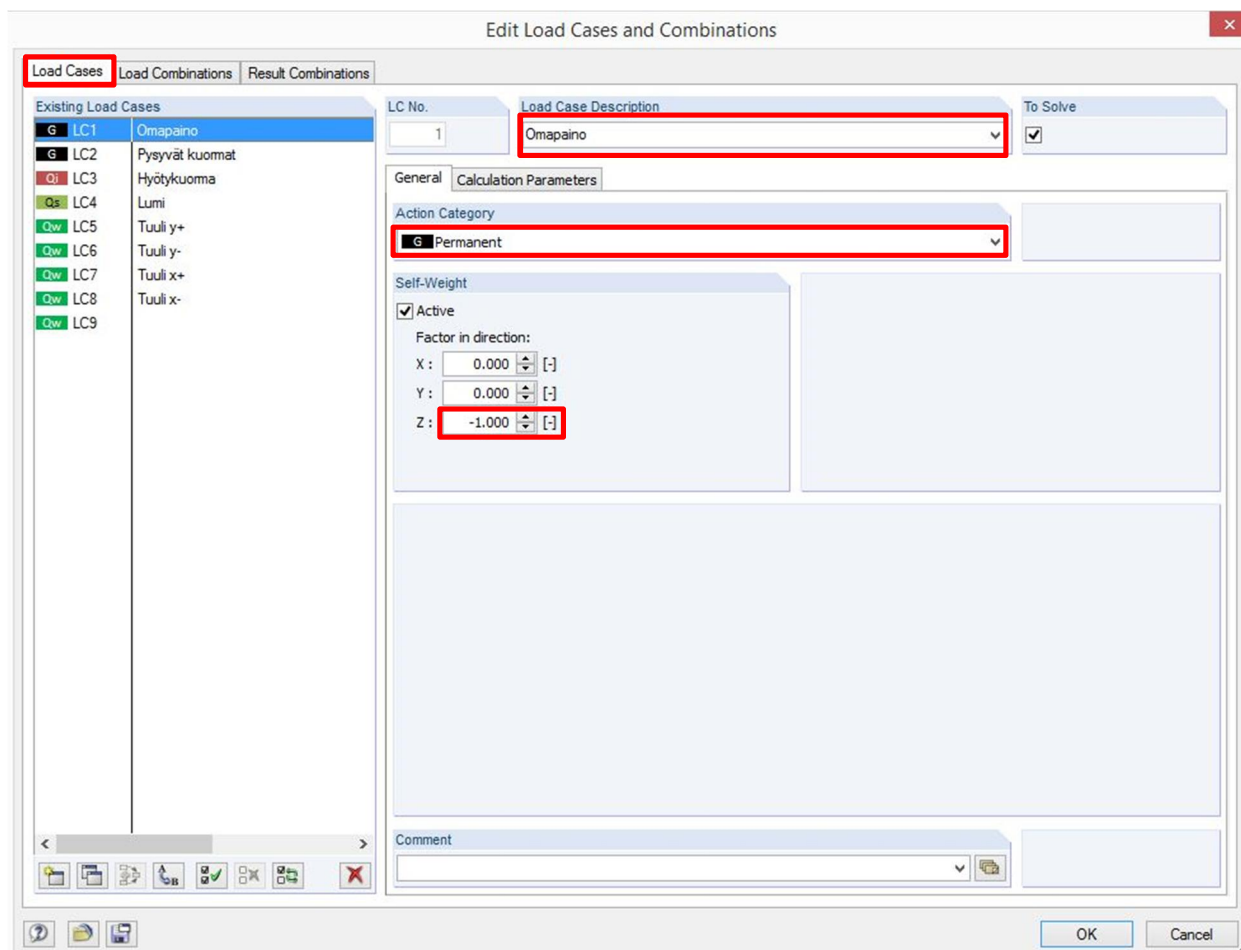
Kuormitustapausten määrittäminen

Luodaan päämalli, johon tuodaan geometriatiedot laskentaa varten. Luodaan päämalliin kaikki kuormitustapaukset valmiiksi. *RFEM* luo kaikki kuormitusyhdistelmät automaattisesti eurokoodien sekä kyseisten standardien kansallisten liitteiden mukaan.



Valitaan "New load case"

- Luodaan tarvittavat kuormitustapaukset
- Nimetään kuormitustapaus
- Asetetaan kuorman "Action category", mistä määräytyy kuorman toimintaluokka. Tämä on tehty eurokoodien mukaisesti.
- Omapainojen kohdalle laitetaan omapainon kohdalle valinta ja asetetaan omapainon kuorman suunnaksi -1.0, sillä positiivinen suunta on ylöspäin
- Kommenttikenttään voi lisätä tarkennuksia kuormituksista

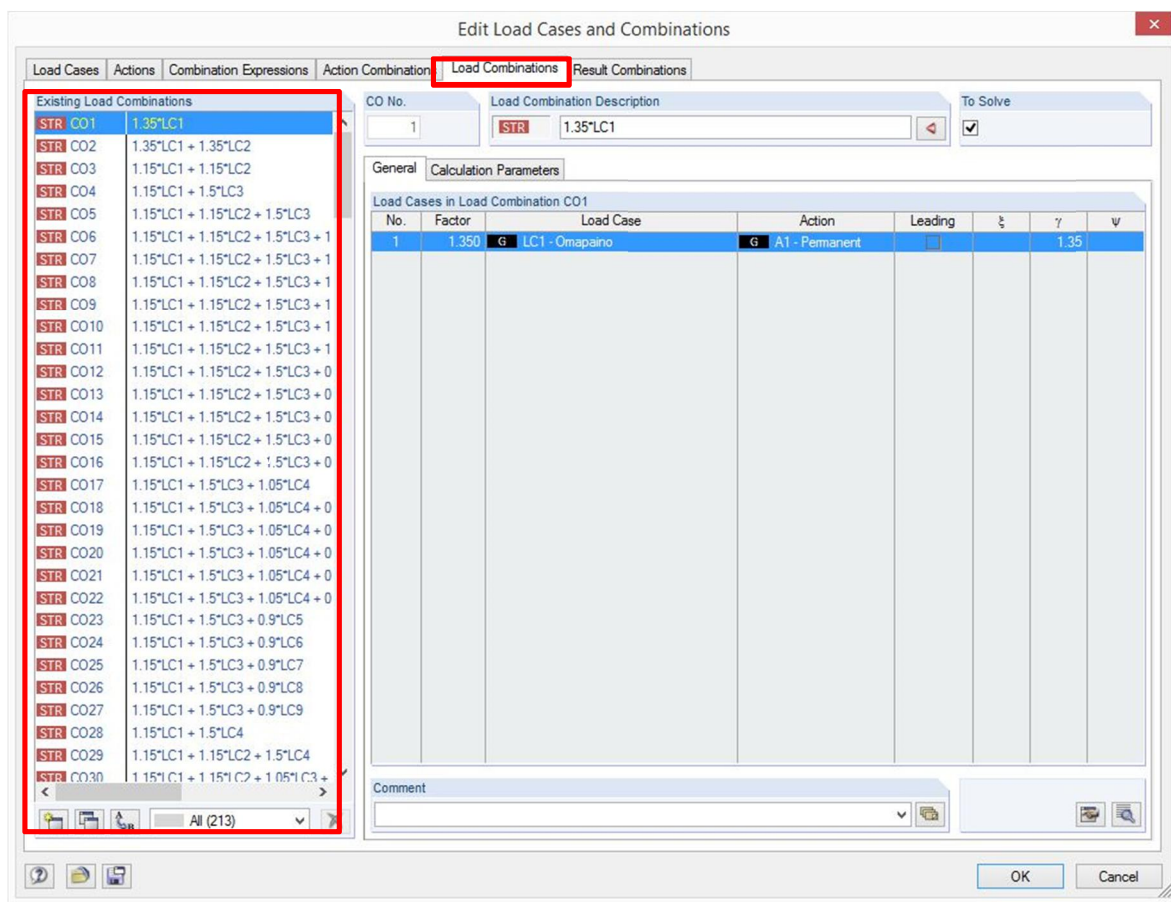


Kuormat mallinnetaan siinä vaiheessa kun geometria on valmis ja lisätty malliin.

- Kun kuormitustapaukset on luotu oikein, ohjelma luo automaattisesti kaikki murtorajatilan sekä käyttörajatilan kuormitusyhdistelmät
- Valitaan "Load Combinations"-välilehti
- Tarkistetaan tarvittaessa kuormitusyhdistelmät
- Kommenttikenttään voi tarkentaa tietoja
- "OK"

Huom:

Kun kuormitustapaukset on tehty oikein, tulosmallissa on valmiina tulosityhdistelmät (Result combination). Näin saadaan kätevästi sekä murto- että käyttörajatilan suurimmat vaikutukset näkyviin verhokäyränä.



Kuormitustapaukset ja -yhdistelyt löytyy tämän jälkeen myös työkalurivin alasettovalikosta:



Tämän jälkeen päämalli on valmis. Päämallia ylläpidetään ja tarvittaessa muutetaan.

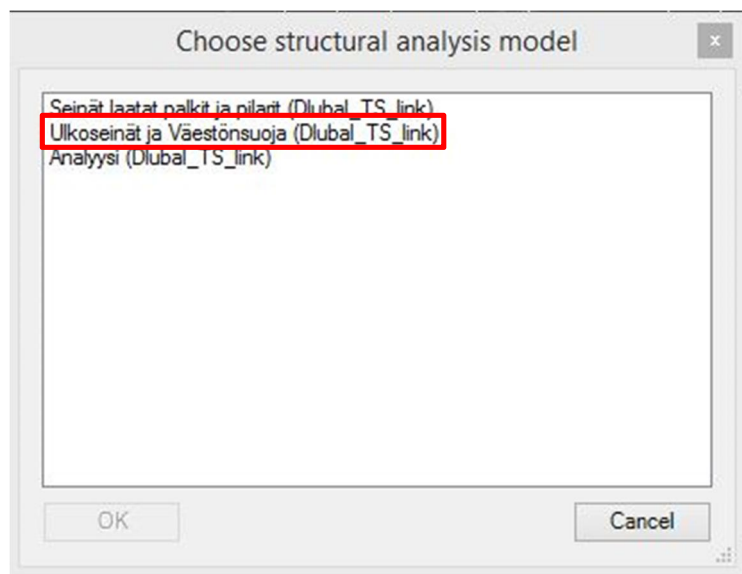
Mallien siirto Tekla Structuresta RFEMiin

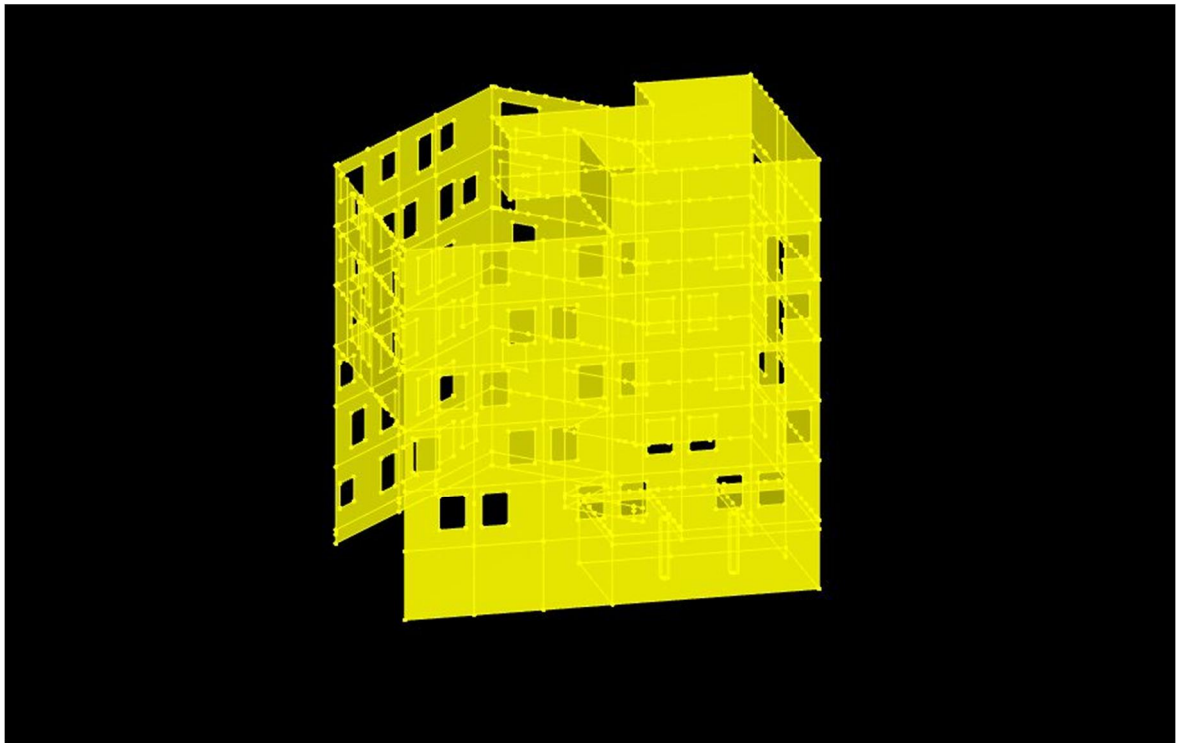
Rakennuksesta on luotu *Teklassa* kaksi analyysimallia ja *RFEM*llä yksi päämalli. Siirtoa varten tulee avata tyhjä *RFEM*-päämalli, johon kootaan kaikki rakenneosat yhdeksi malliksi. Siirto tapahtuu ajamalla analyysimallit erillisiin tyhjiin *RFEM*-projekteihin, kopioimalla ja liittämällä toinen analyysimalli esimerkiksi 50 metriä oikean tason yläpuolelle, jonka jälkeen molemmat mallit siirretään päämalliin. Päämallissa geometriat siirretään oikealle tasolle takaisin ennen laskentaa. Näin saadaan kaikki rakenneosat liitettyä yhteen päämalliin, mutta pidetään muutosten tekeminen helppona. Tällaista erillisten geometriaosien käyttämistä suositellaan vain, jos malli on niin iso, että työskentely yhtenäisessä mallissa käy vaikeaksi.

- Molemmat ohjelmat tulee olla käynnissä ja projektit auki



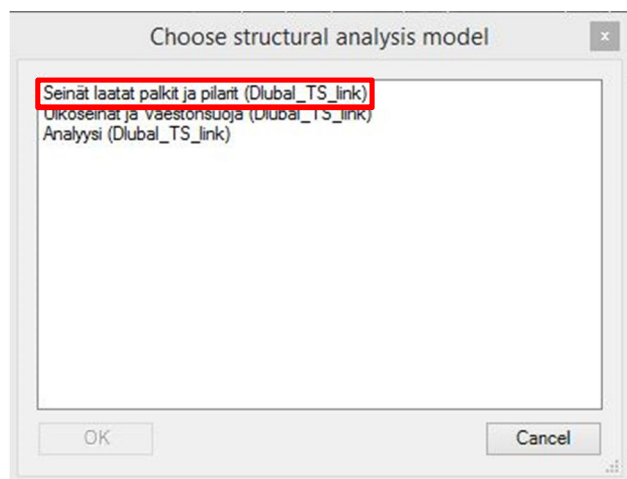
- Tuodaan ensimmäiseksi ulkoseinistä ja väestönsuojasta luotu analyysimalli *Teklasta* päämalliin valitsemalla "Direct import from Tekla Structures"
- *RFEM* kerää tiedot, kuten geometrian, materiaalit, liitokset sekä mahdollisesti *Teklassa* lisätyt kuormitukset. Tarvittavat muutokset tehdään vielä *RFEM*ssä. Siirrossa kuluu aikaa mallin koosta riippuen sekunneista muutamisiin minuutteihin
- Valitaan ensimmäiseksi tuotava analyysimalli:

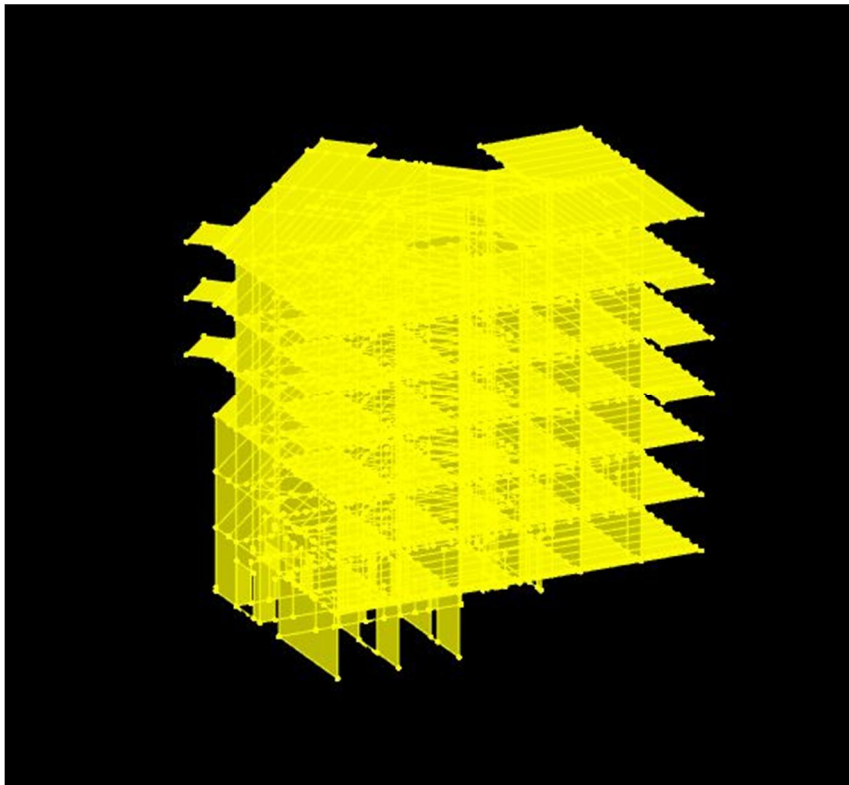




Malli tulee tyhjään *RFEM*in geometriatietoineen ja materiaaliominaisuuksineen. Tämä geometria on nyt projektissa, jota käytetään päämallina. Seuraavaksi Luodaan uusi *RFEM*-projekti, johon tuodaan loput rakenneosat.

- Uusi projekti
- "Direct import from Tekla Structures"
- Valitaan tuotavaksi analyysimalliksi toinen geometria



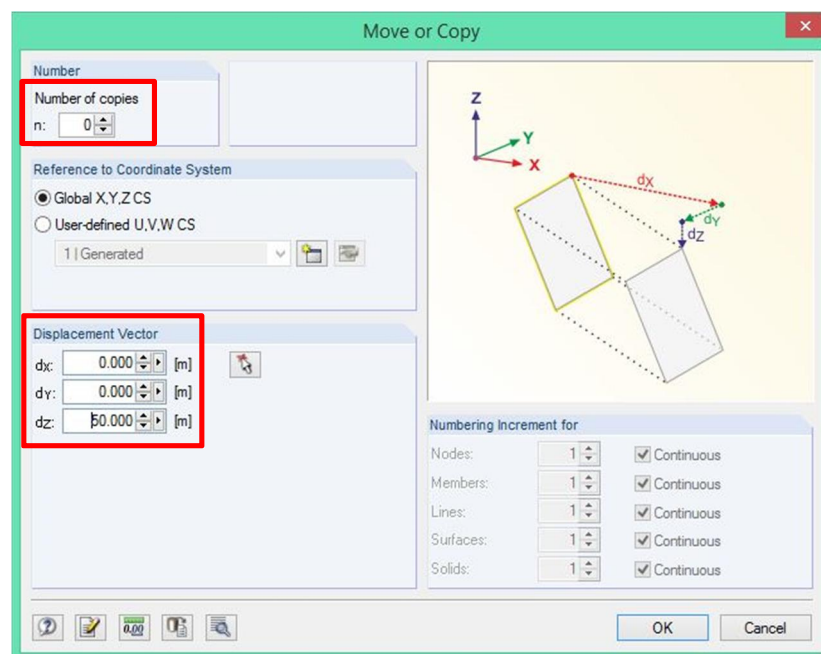


Tämän jälkeen yhdistetään geometriat yhteen päämalliin kopiaimalla ja liittämällä:

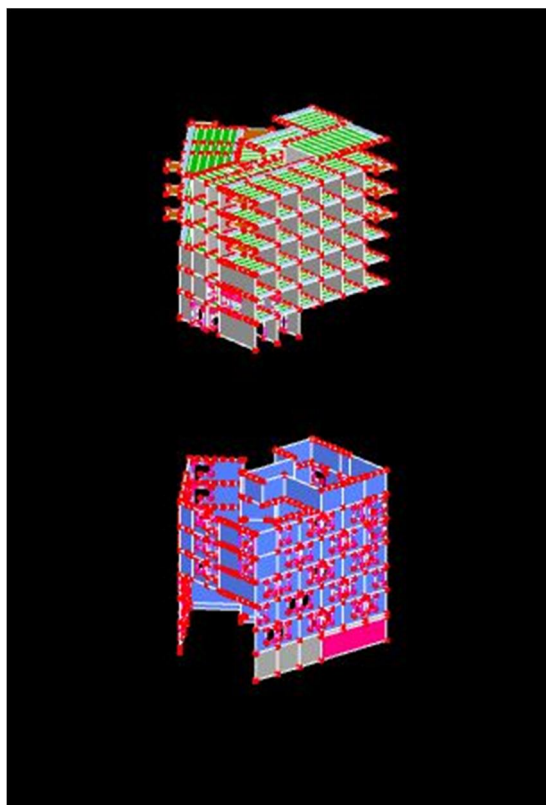
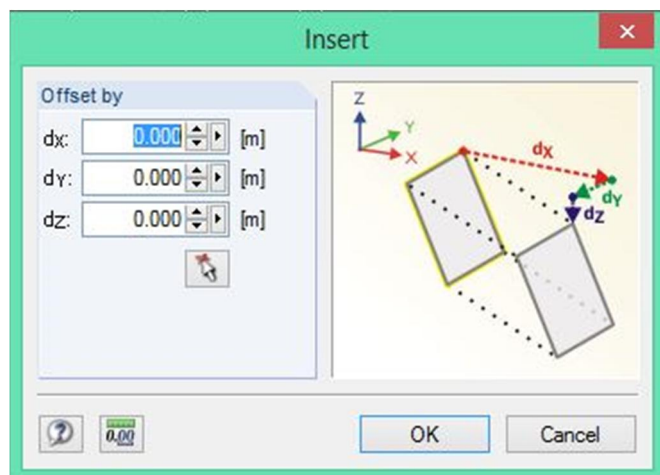
- Siirrettävä malli on väliseinät-laatastot-pilarit-palkit
- Valitaan mallista kaikki rakenneosat hiirellä maalaamalla
- Siirretään mallia 50 metriä ylöspäin, että geometrioita voidaan työstää erikseen kun malleja muutetaan



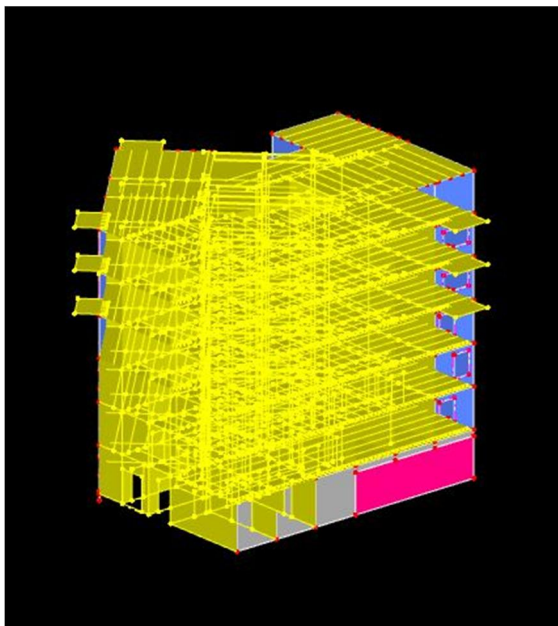
- Asetetaan kopioitavien kappaleiden määräksi 0. Näin ohjelma siirtää objektit eikä tee niistä ylimääräistä kopiota
- Valitaan globaali koordinaatisto
- Asetetaan z-suuntaiseksi siirroksi 50 metriä
- "OK"



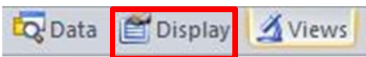
- Tämän jälkeen maalataan rakenteet uudelleen ja kopioidaan: Ctrl + C
- Avataan päämalliin *RFEM*-projekti, jossa on ulkoseinät ja väestönsuoja
- Liitetään väliseinät-pilarit-laatat-palkit toiseen projektiin: Ctrl + V
- Liitetään malli samaan koordinaatistoon, joten "Offset by" pidetään 0, 0, 0

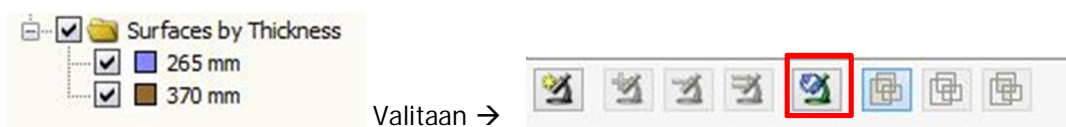


Mallien yhdistäminen tapahtuu siirtämällä ylempää mallia 50 metriä z-akselin suunnassa alaspäin. Tämä tehdään kuitenkin vasta kun aloitetaan laskenta, sillä työskentely on helpompaa kun mallit pidetään erillään.

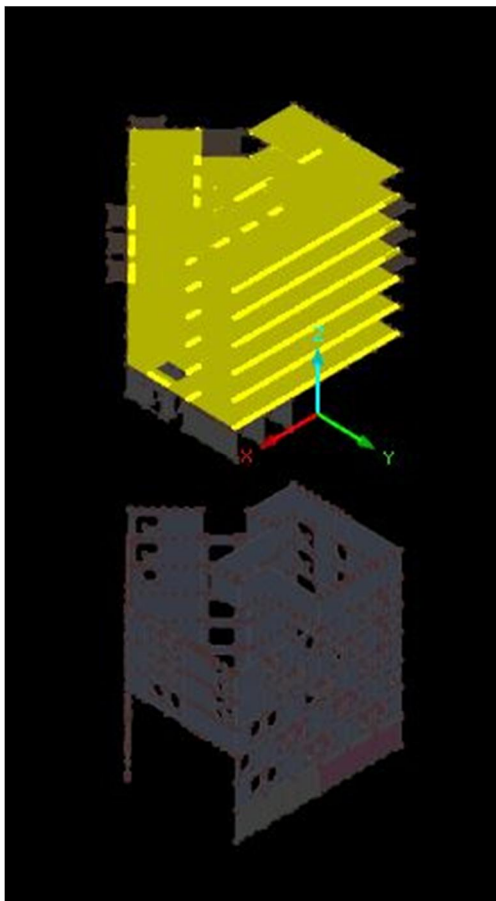


Tässä vaiheessa tehdään tarvittavat muutokset analyysimalleihin. Mallin välipohjarakenteena on ontelolaatasto. *RFEM* ei tunnista ontelolaatastojen poikkileikkausta suoraan tekemällä vaan luo ontelolaatan paksuisen massiivisen betonilaatan. Nämä pitää muuttaa manuaalisesti. Käytetään *RFEM*n näkymätasoja, joilla saadaan näkyviin ainoastaan ontelolaatastot ja muutetaan tämän jälkeen laatat oikean tyyppisiksi.

- Valitaan projektin navigaatiopalkista views-välilehti 
- Valitaan näkymät laattojen paksuuden mukaan. Valitaan "Surfaces by thickness" 265mm ja 370mm paksut tasot, sillä ontelolaatat ovat tämän paksuisia

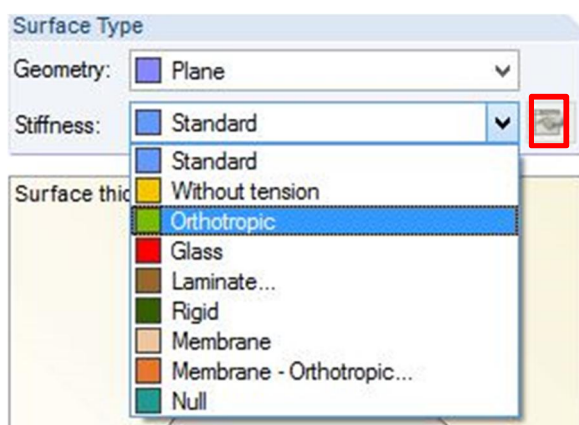
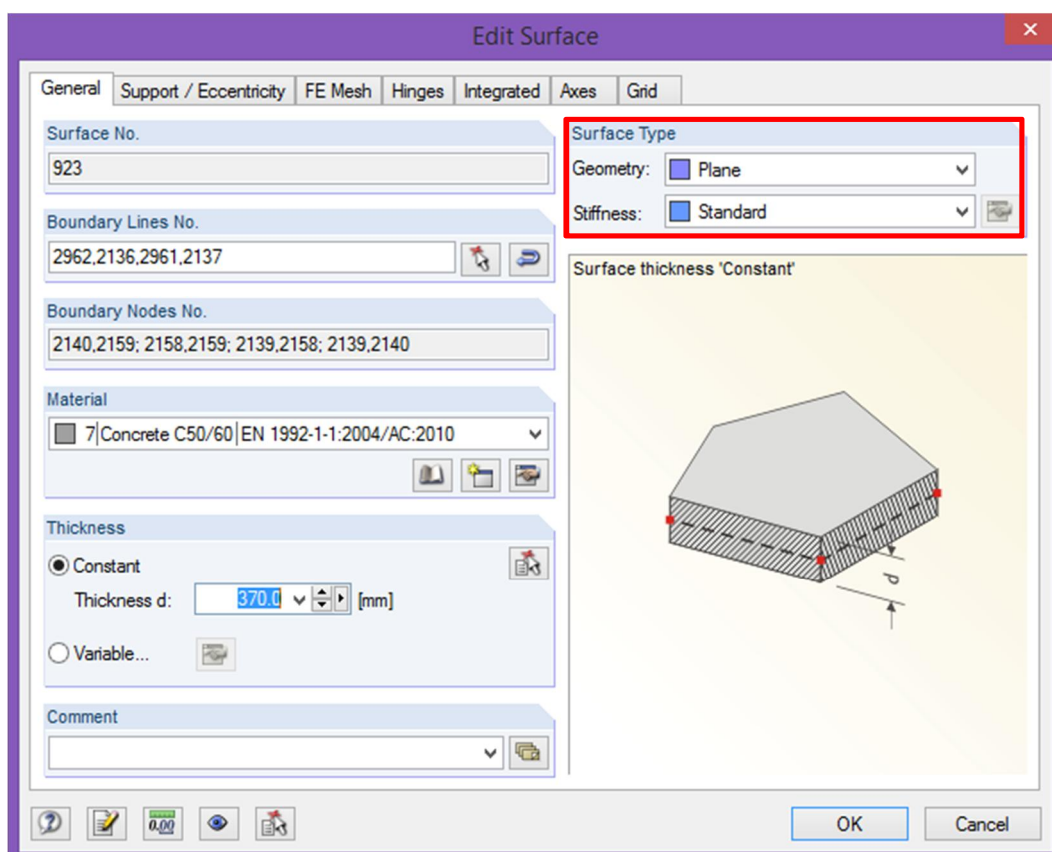


- Tämän jälkeen voit valita kaikki kyseisen paksuiset elementit hiirellä maalaamalla. Muut elementit ovat "sammutettuna"



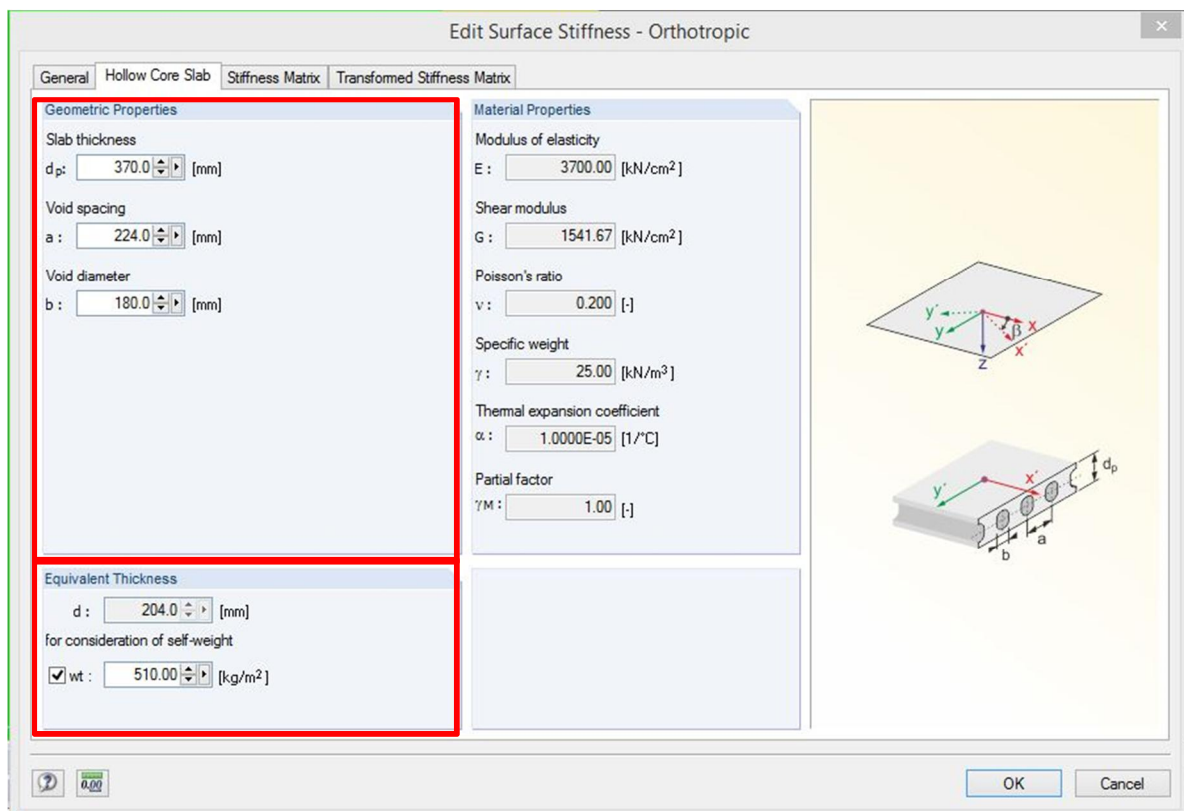
- Valitaan kaikki 370mm paksut ontelolaatat ja tuplallikataan yhtä niistä samalla pitäen Ctrl-näppäintä pohjassa
- Tämän jälkeen avautuu tason asetukset
- Valitaan asetuksista tason tyyppi: "Surface type"
- Asetuksiin asetetaan:
 - o Geometry → Plane
 - o Stiffness → Orthotropic

"Orthotropic" tarkoittaa, että laatalla on eri arvoinen jäykkyys eri suunnissa.

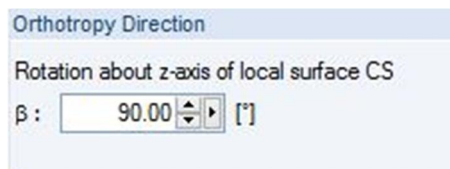


Tämän jälkeen avataan Orthotropic-tyypin asetukset:

- Valitaan tyypiksi "Hollow core slab", jonka jälkeen avautuu uusi "Hollow core slab" -välilehti
- Asetetaan välilehdelle laatan paksuus, onteloiden väli sekä onteloiden halkaisija sen mukaan, mikä laatta on kyseessä
- Tämän jälkeen asetetaan laatalle ekvivalentti paksuus määrittämällä laatan paino kg/m^2



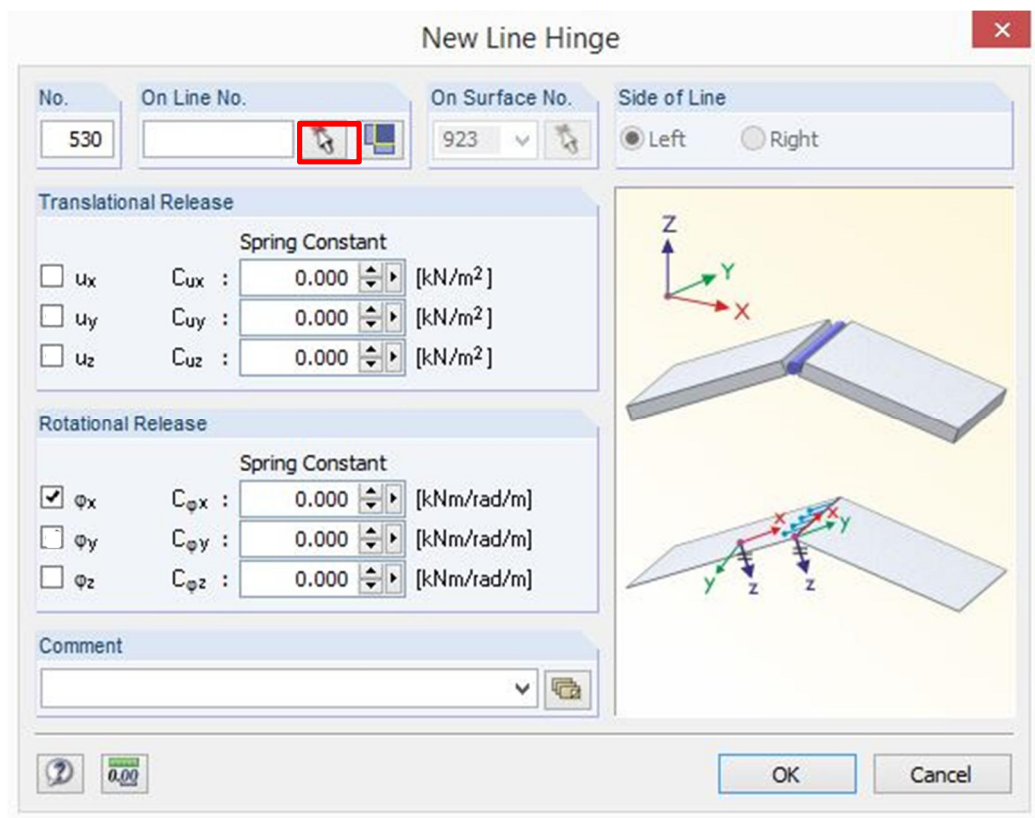
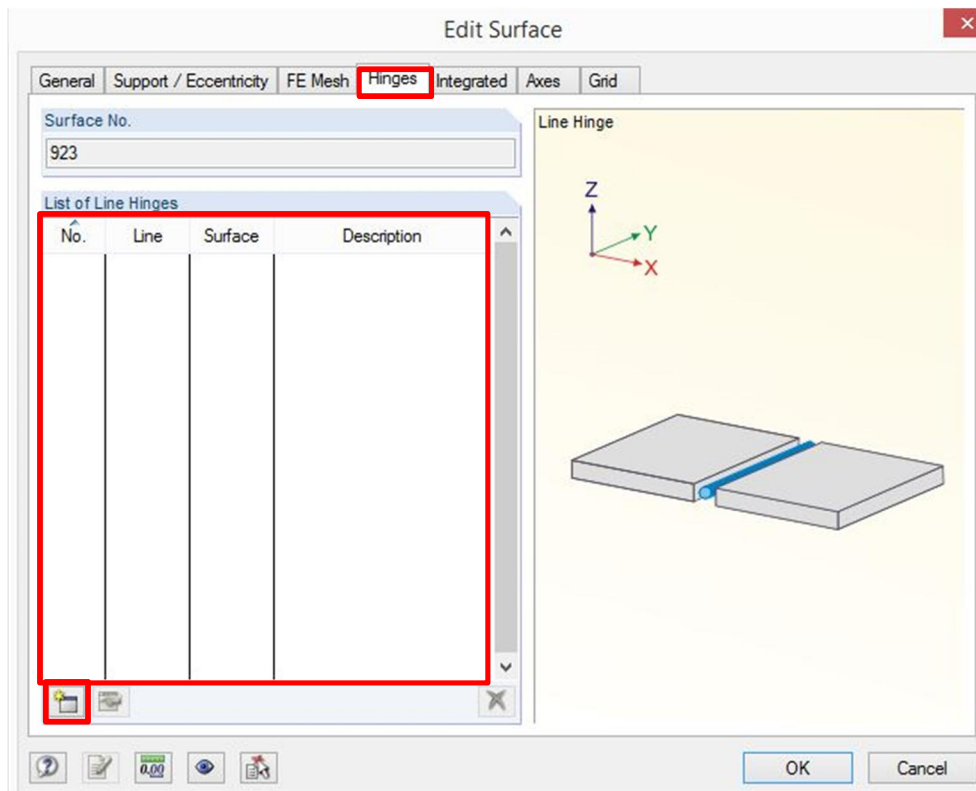
Määritetään vielä "General"-välilehdeltä laataston suunta koordinaatistoon nähden. Valikon oikeassa laidassa kuvasta näkyy x- ja y- suunnat. Kuvasta näkee, että ontelot kulkevat koordinaatiston x-suunnassa. Rakennuksessa ontelolaattoja kulkee niin x- kuin y-suunnassa ja niiden välissä. Ontelolaattojen suunta määritetään astelukuna:



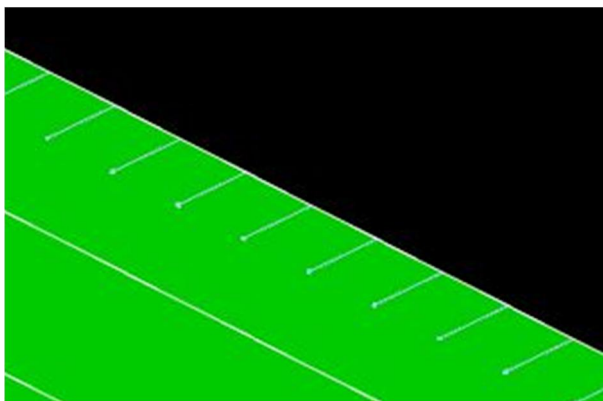
- Määritetään laatastoille oikeat suunnat:
 - o X-suuntaiset laatastot: $\beta = 0^\circ$
 - o Y-suuntaiset laatastot: $\beta = 90^\circ$
 - o Projektissa on myös 45 asteen kulmassa olevia laatastoja, joiden suunnaksi: $\beta = -45^\circ$

Ontelolaatastojen mallintamisessa tulee myös huomioida, että laatat kantavat vain yhteen suuntaan. Tästä syystä laatan pitkän sivun ja seinärakenteen liitokseen on asetettava vapautuksia, että rakenne jakaa kuormat oikeille seinille.

- Tuplaklikataan ontelolaattaa, joka liittyy seinään pitkältä sivulta
- Valitaan "Hinges"-välilehti
- Luodaan uusi vapautus valitsemalla "Create New Line Hinge"
- Vapautetaan tarvittavat siirtymät ja kiertymät valitsemalla vapausasteet
- Valitaan sauva, johon vapausasteet kohdistuvat, eli seinän ja laatan liitos. Kiertymien ja siirtymien suunnat näkyy valikon oikean laidan kuvasta
- "OK"
- Toistetaan tämä jokaiselle seinän ja ontelolaatan pitkittäissivun liitokselle

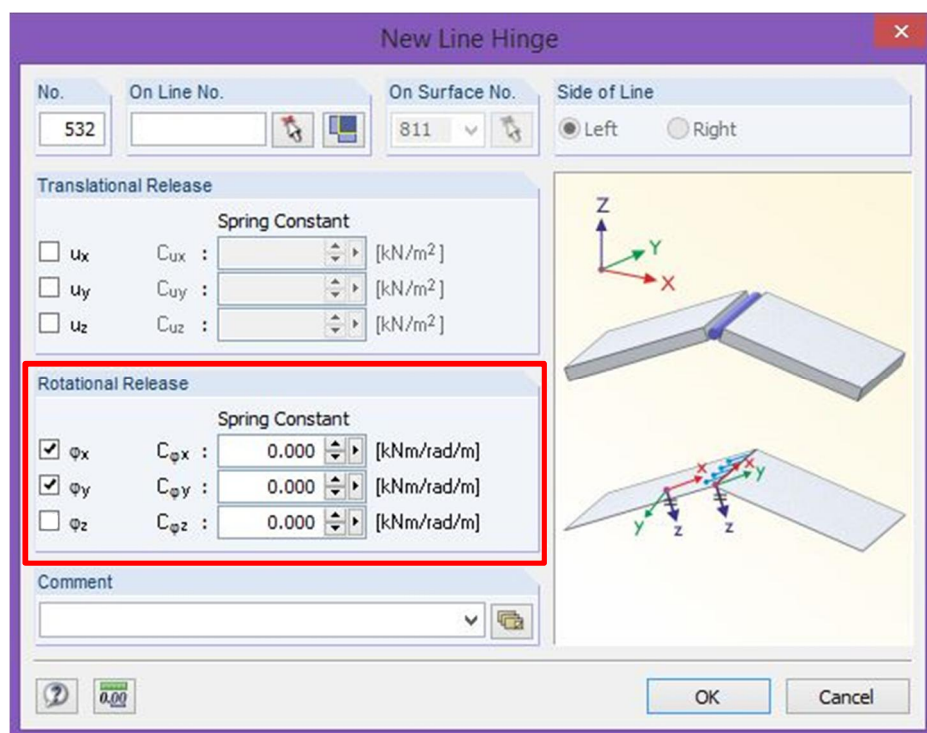


Vapautukset näkyvät mallissa vaalean sinisinä poikkaisviivoina, joiden päässä on pallo:



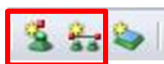
Rakennuksen ontelolaatat ovat yksiaukkoisia laattoja, joten momentti tulee olla laatan päissä nolla. *RFEM* liittää toisiinsa liittyvät pitkittäiset ontelolaatat automaattisesti jäykästi toisiinsa ja tällöin momenttia syntyy myös ontelolaattojen päihin liitoskohdissa. Tämän estääksien laattojen päihin tulee asettaa vapautuksia, mutta kuitenkin niin, että laatta siirtää oikeat kuormat kantavaan suuntaan kantavalle seinälle.


- Avataan laatan valikko kuten aiemmin
- Avataan "Hinge"-välilehti
- Valitaan laatan pään ja pituusakselin ympäri tapahtuvat kierrot
- Valitaan sauva, johon vapautus tulee, ja toistetaan tämä sama kaikille vastaaville laatoille

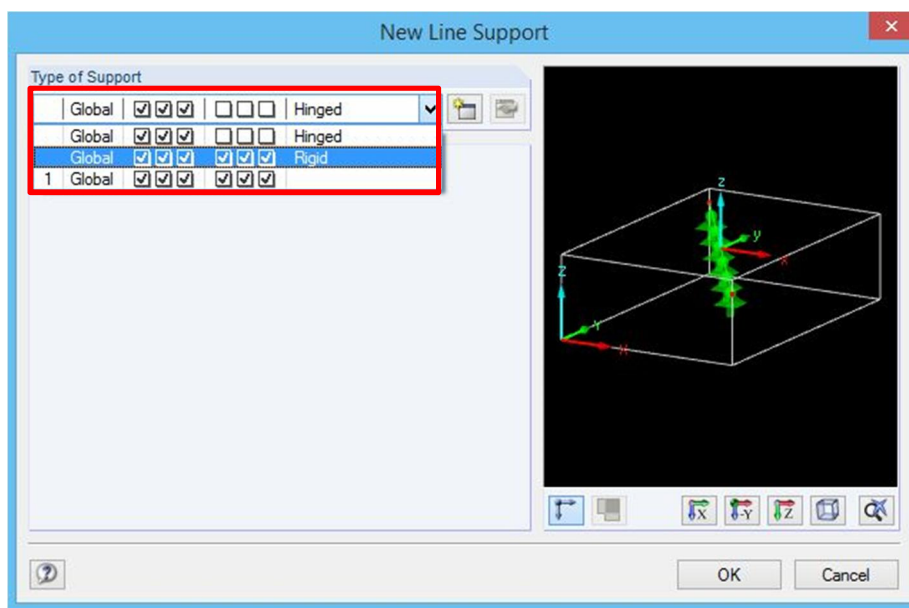


Tukien määrittäminen

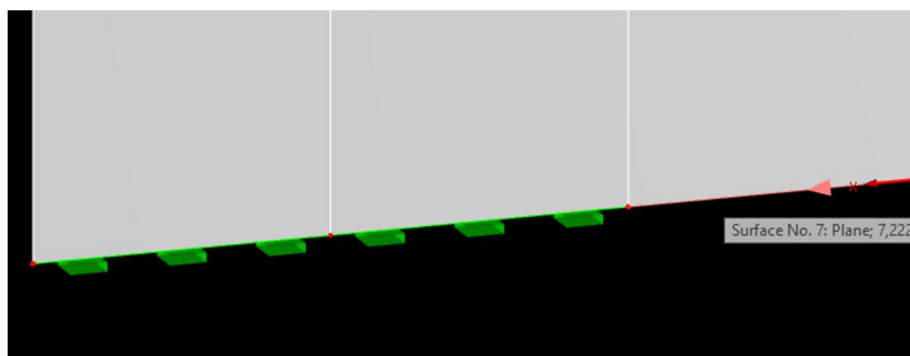
Asetetaan perustusten päälle asennettaviin elementteihin tuet.



- Käytetään seinäelementeissä "New Line Support"-työkalua ja pilareissa "New Nodal Support"-työkalua
- Valitaan viivatuki klikkaamalla 
- Valitaan tuki alusvetovalikosta sen mukaan onko se nivelellinen vai jäykkä. Valikossa näkyy neliöitä, jotka kuvaavat siirtymiä ja kiertymiä. Valitaan jäykkä kiinnitys
- "OK"



- Osoitetaan sauvaa, johon tuki asetetaan
- Lisätään tuet kaikkiin perustusten päälle asennettaviin seinäelementteihin



- Valitaan seuraavaksi pilareihin asetettavat tuet. Valitaan "New Nodal Support"
- Asetetaan tueksi jäykkä kytkentä
- Valitaan kaikki pilareiden alapää hiirellä klikkaamalla

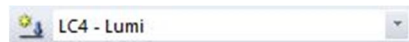
Kuormien mallinnus

Ennen tulosten laskentaa tulee lisätä kuormat malliin oikeille kuormitustapauksille.

Kuormatyökalut:



- Valitaan alaspäinvalikosta oikea kuormitustapaus:



- Avataan tasokuormatyökalu:

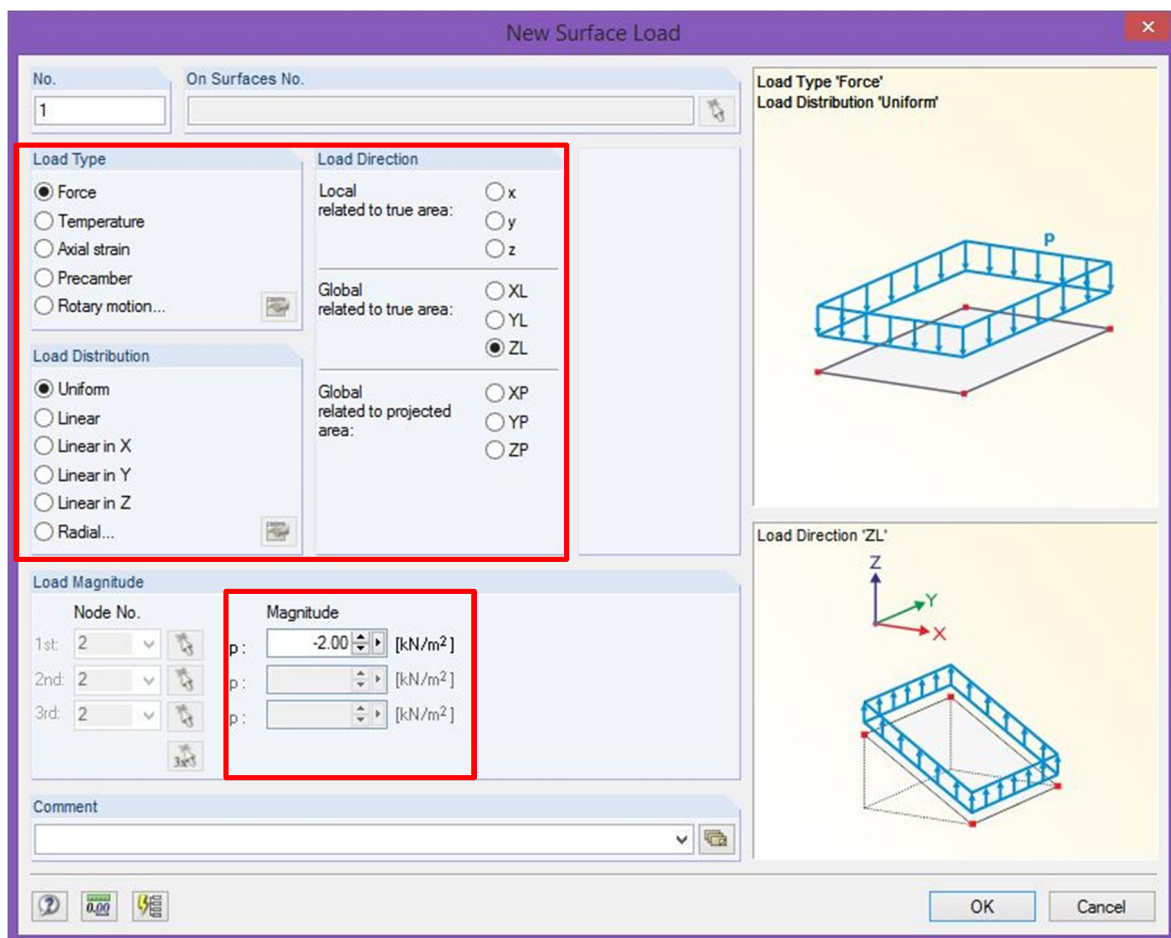


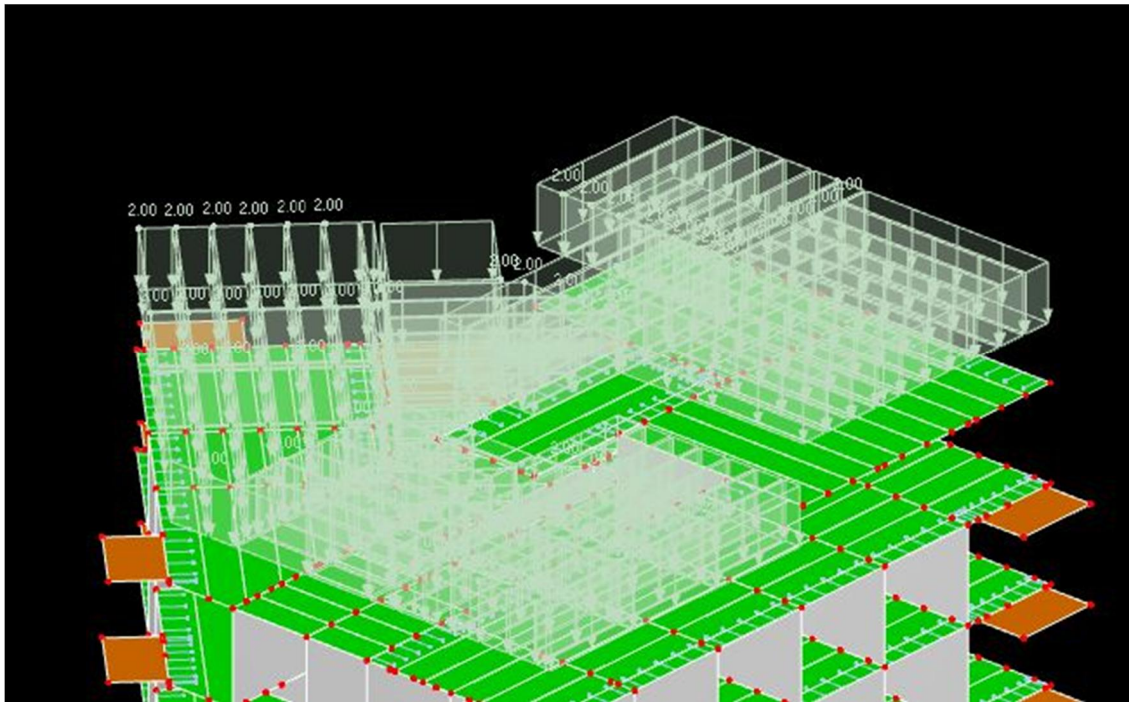
- Asetetaan kuorman tyyppi: "Force"

- Valitaan kuorman suunta, vertailusuunnat näkee asetusten oikean laidan kuvasta. Kun kyseessä on lumikuorma, valitaan globaali todellinen koordinaatisto ja suunnaksi "ZL"

- Asetetaan kuorman suuruus. Projektin alussa koordinaatiston Z-suunta asetettiin ylöspäin, joten nyt kuorma tulee asettaa negatiiviseksi, jotta se esiintyy mallissa oikein

- "OK"



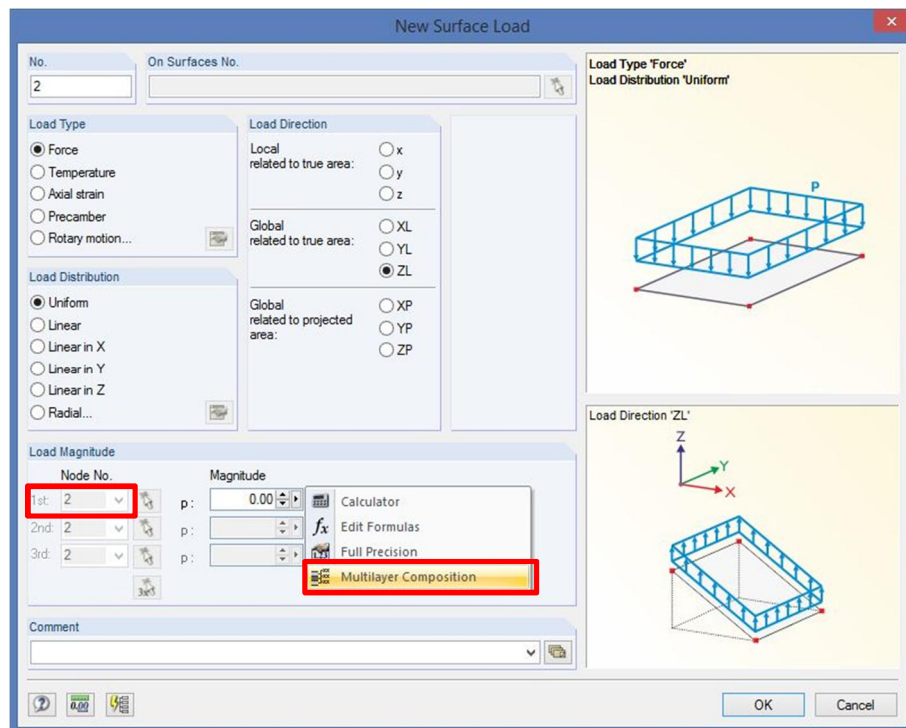


- Valitaan tasot joihin kyseinen kuorma kuuluu hiirellä valitsemalla. Alasvetovalikosta valitsemalla näet kyseisen kuormituksen ja sen suuruuden
- Esimerkiksi välipohjien hyötykuormia lisätessä on hyvä käyttää näkymätasoa siten, että sammutetaan muut tasot ja lisätään kuormat maalaamalla kaikki laatat kerralla
- Lisätään kuormat kaikkiin kuormitustapauksiin

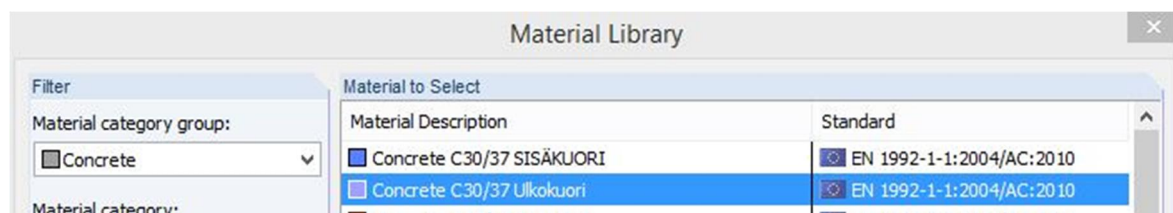
Kuormat esiintyvät kuormitusyhdistelmissä erisuurina kuin kuormat on asetettu, sillä varmuuskertoimet vaikuttavat kuormiin.

Sandwich-elementtien ulkokuori ja eriste huomioidaan tasokuormatyökalun avulla. Tasokuorma ottaa huomioon eristeen ja ulkokuoren painon ja siirtää sen kantavalle rakenteelle.

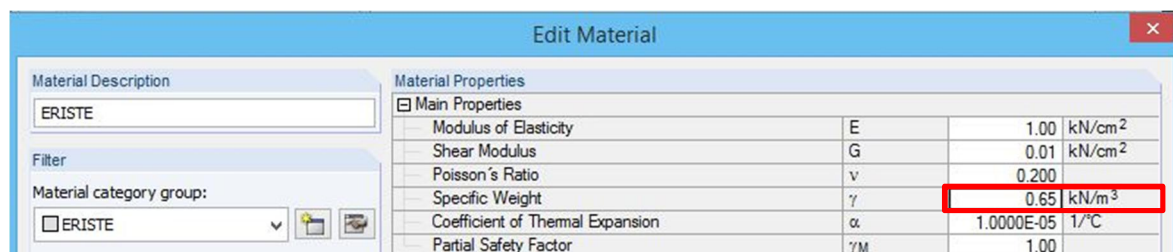
- Valitaan uusi tasokuorma
- Valitaan kuorman suuruuden valikosta Multilayer composition

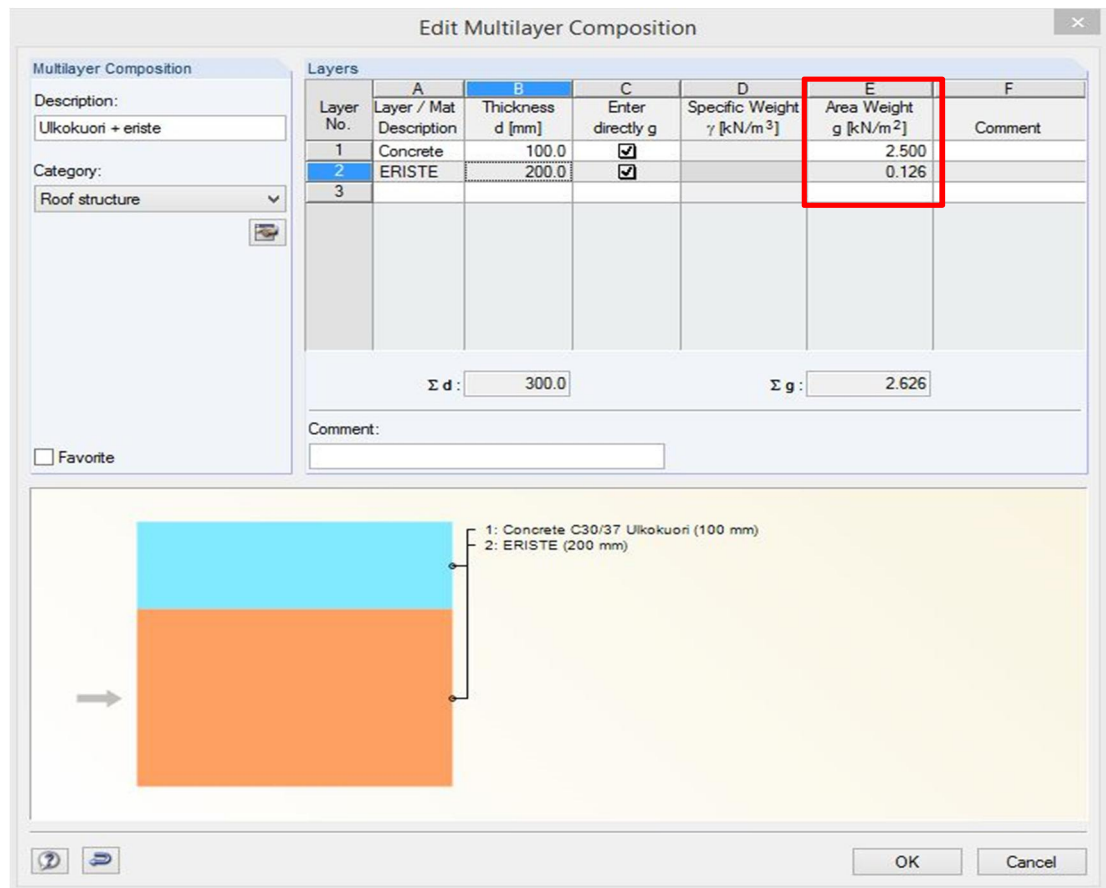


- Luodaan uusi kerrosrakenne 
- Nimetään rakenne havainnollisella tavalla
- Lisätään 100 mm paksu ulkokuori. Valitaan materiaalikirjastosta oikea materiaali

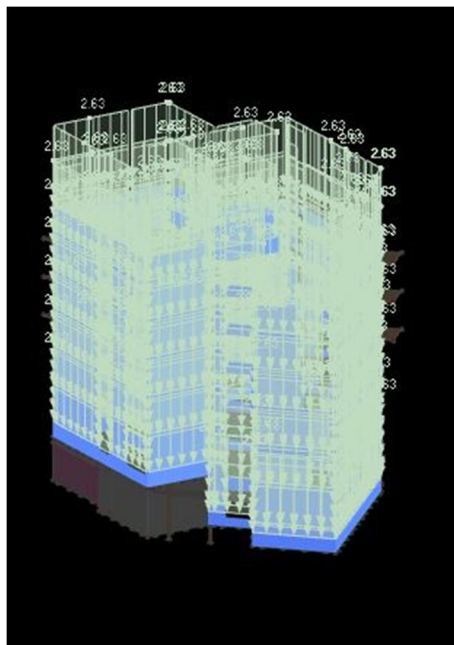


- Lisätään 200 mm paksu eriste. Kirjastosta ei löydy kyseistä materiaalia, joten lisätään materiaali "Create New Material"
- Työkalu huomioi materiaalin painon, joten luodaan uusi materiaali eristeelle, johon muutetaan materiaalille nimi ja oikea paino





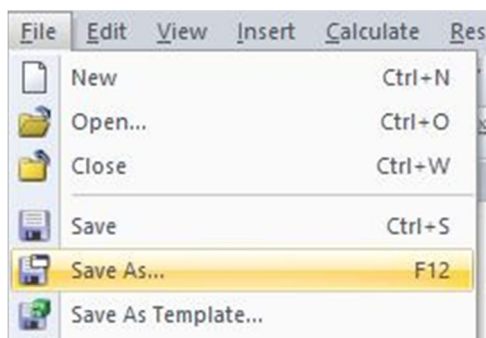
- Tämän jälkeen ohjelma laskee kuorman: $p: 2.63 \text{ [kN/m}^2\text{]}$
- Lisätään kuormat kaikkiin sisäkuorielementteihin. Käytetään jälleen näkymätasojä, mikä helpottaa kuormien asettamista



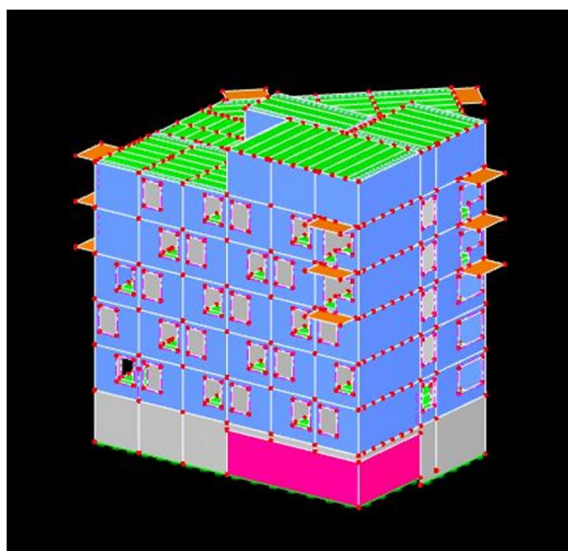
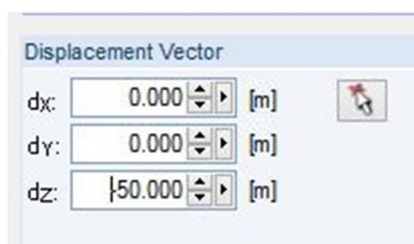
Laskenta

Mallia ylläpidetään tässä tiedostossa, jossa mallin geometrianjaottelu säilytetään. Kun rakennukseen tulee muutoksia ja rakennemalli Teklassa etenee, voidaan kukin eri geometriaosa tuoda uudestaan tyhjiin malliin ja kopioida muuttuneet kohdat päämalliin. Tällä tavalla geometria pysyy tarkkana kohtuullisella vaivalla. Pienet muutokset voi tehdä suoraan *RFEM*ssä.

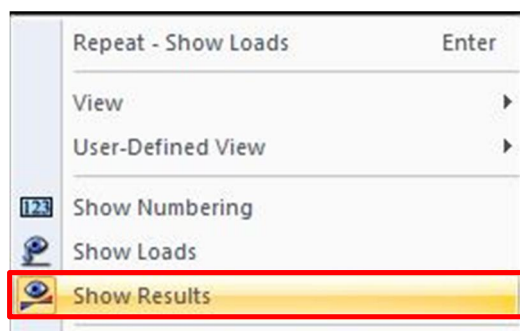
Kun lasketaan tuloksia, tallennetaan päämalli uuteen tiedostoon, yhdistetään geometriat siirtämällä ne yhteen ja lasketaan malli.



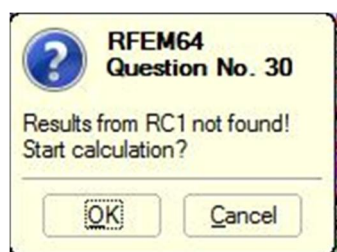
- Tallennetaan malli sopivalla nimellä
- Avataan tallennettu malli
- Yhdistetään geometriat siirtämällä ylempi geometria -50 metriä z-akselin suunnassa



- Valitaan työkalurivin alavetovalikosta oikea kuormitusyhdistelmä
- Lasketaan malli painamalla työskentelytilassa hiiren oikeaa nappia ja valitaan "Show Results"



- Ohjelma huomauttaa että tuloksia ei ole. Aloitetaanko laskenta?
- "OK"

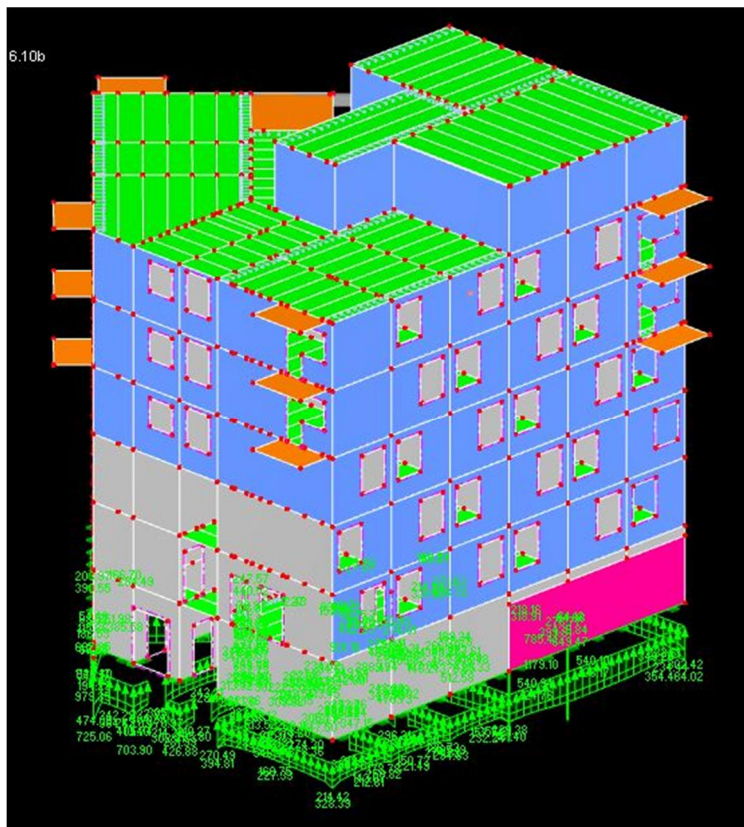


Tämän jälkeen ohjelma laskee rakennuksen siirtymät, tukireaktiot ja rasitukset. Tässä menee muutamista sekunneista useisiin kymmeneen minuutteihin riippuen mallin koosta.

Kun lasketaan "Result combinationit", saadaan esiin sekä murto, että käyttörajatilan suurimmat vaikutukset näkyviin. Tämä kuormitusyhdistely luo kaikkien kuormitusyhdistelyjen mukaiset voimien minimi- ja maksimit paljastavan verhoikäyrän.

Tulokset

RFEM esittää tulokset värein ja numeroin. Projektinavigaattorista voit valita mitä tuloksia halutaan esittää ja esimerkiksi perustuskuormille valitaan "Support Reactions" ja täältä haluttu kuorman suunta. Tämän jälkeen ohjelma piirtää voimia kuvaavat diagrammit ja esittää numeerisesti voiman suuruuden. Sivupaneelista voi tarkistaa, mikä on kuorman laatu. Tukireaktiot ohjelma esittää kilonewtoneina ja kilonewtonmetreinä.



Tukireaktiot voidaan esittää myös tulostettavina diagrammeina, jotka saadaan valitsemalla tukireaktio, ja tämän jälkeen valitsemalla "Result Diagrams..."

RFEM luo tukireaktioihin voimapiikkejä, jotka ovat suhteettoman suuria eivätkä vastaa todellista kuormitustilannetta. Tulosten arvioimiseksi on otettava keskiarvo kuormitustilanteesta ja tämä on mahdollista "Result Diagrams..." -näkyvässä.

- Valitaan halutut tukireaktiot ja painetaan hiiren oikeaa näppäintä
- Valitaan "Result Diagrams..."
- Luodaan "New average region"
- Valitaan alue, mikä halutaan tasata piikeistä, määrittämällä alkupiste ja loppupiste
- Keskiarvoinen kuormitus näkyy vihreällä viivalla diagrammissa

