



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

SILTANOSTURIKUORMIEN JAKAANTUMISEN TARKASTE- LU MASTOPILARIHALLISSA 3D-MALLIN AVULLA

TEKIJÄ: Jukka Laitinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä Jukka Laitinen	
Työn nimi Siltanosturikuormien jakaantumisen tarkastelu mastopilarihallissa 3D-mallin avulla	
Päiväys 25.4.2014	Sivumäärä/Liitteet 45/36
Ohjaajat Viljo Kuusela, lehtori Harry Dunkel, lehtori	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppanit Rakennussuunnittelutoimisto Nylund Oy, Pauli Pehkonen ja Jari Korhonen	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämä opinnäytetyö käsittelee Dlubalin julkaiseman <i>RFEM</i> 3D-ohjelmalla mallinnetun yksinkertaisen mastopilarihallin kuormien jakautumista. Hallissa on siltanosturi, joka aiheuttaa epätasaisen kuormitusjakauman hallin rakenteissa. Tarkoituksena oli selvittää, miten 3D-laskentamallin tulokset eroavat perinteisen 2D-laskennan tuloksista. Tavoitteena oli myös todeta 3D-mallinnuksesta saatava hyöty rakennussuunnittelussa. Aihe työhön on saatu Rakennussuunnittelutoimisto Nylund Oy:ltä.</p> <p>Insinööriydessä tutkittiin, miten hallin yläpohjan TT-laatasto tulisi mallintaa, koska <i>RFEM</i>-ohjelmassa ei ole valmiita TT-laataston työkaluja, ja siksi useita mallinnusvaihtoehtoja kokeiltiin. Työ sisältää teoriaosuuden laskentaohjelman käyttämästä elementtimenetelmästä, mastopilarihallin mallinnuksen prosessikuvauksen sekä tiiviin käyttöohjeen kyseisen mastopilarihallin mallinnuksesta <i>RFEM</i>llä. Lähteinä ja apuna käytettiin elementtimenetelmän teoriaa käsitteleviä kirjoja, Dlubalin julkaisemia käyttöohjeita <i>RFEM</i>stä sekä heidän ylläpitämää sähköpostitukipalvelua.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena mallinnettiin tavoitteen mukainen esimerkkihalli. Tuloksista todettiin, että 3D-mallinnuksesta on hyötyä, koska se antaa huomattavasti pienempiä laskentatuloksia, joilla voidaan ajatella saavutettavan taloudellista säästöä materiaalikustannuksissa. TT-laataston voidaan ajatella toimivan yhtenäisenä levyrakenteena, joka jakaa epätasaiset siltanosturikuormat tasaisemmin ympäri hallirakenteita. Työn prosessikuvauksessa ilmenee 3D-mallinnukseen liittyviä ongelmia.</p>	
Avainsanat Siltanosturi, käyttöohje, RFEM, 3D-laskenta, mastopilarihalli	
Julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author Jukka Laitinen			
Title of Thesis 3D Analysis of the Settling of Bridge Crane Loads in a Precast Concrete Hall Structure			
Date	25 April 2014	Pages/Appendices	45/36
Supervisors Mr Viljo Kuusela, Lecturer Mr Harry Dunkel, Lecturer			
Client Organisation / Partners Rakennussuunnittelutoimisto Nylund Oy, Pauli Pehkonen and Jari Korhonen			
<p>Abstract</p> <p>This thesis dealt with settling of the loads of a simple precast concrete hall structure modelled with Dlubal's <i>RFEM</i> 3D program. The purpose was to study how the results of a 3D model differ from the results of a traditional 2D calculation results. The purpose was also to find out the benefits of 3D modelling. The topic of the project was received from Rakennussuunnittelutoimisto Nylund Oy.</p> <p>In the thesis a way to model a field of precast concrete TT slabs was explored. Many different modelling options were tested since there are no ready-made tools built in <i>RFEM</i> to model this type of structure. The thesis includes a theory part of the finite element method used by the program, the process description of creating the precast concrete hall structure 3D model and a compact manual for modelling this particular hall using <i>RFEM</i>. Books handling the theory of the finite element method, Dlubal's manuals and their e-mail customer support were all used as sources and help in this work.</p> <p>As a result of this project a sample model was created. This sample proves that there are benefits in 3D modelling since it gives lesser calculation results. A field of TT slabs used as a roof structure can be considered as a stiff uniform plate that spreads the uneven loads of a bridge crane more evenly around the hall structures. The process description of the project points out some of the problems that occur in 3D modelling.</p>			
Keywords Bridge crane, manual, RFEM, 3D calculation,			
Public			

ESIPUHE

Haluan kiittää opinnäytetyöni toimeksiannosta ja mielenkiintoisesta aiheesta Rakennussuunnittelu-toimisto Nylund Oy:n Jari Korhosta ja Pauli Pehkosta. Kiitän heitä myös neuvoista, joustavuudesta ja välittömästä kanssakäymisestä työn aikana. Kiitokset ohjaaville opettajille, Ville Kuuselalle ja Harry Dunkelille, avusta ja ohjauksesta. Taustatuesta, kommentoinneista ja muusta avusta kiitän KPM-Engineering Oy:n Jussi Jalkasta sekä omaa perhepiiriäni.

Kuopiossa keväällä 2014

Jukka Laitinen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
2	ELEMENTTIMENETELMÄN TEORIAA	9
2.1	Geometrian mallinnus	9
2.2	Elementtiverkon muodostus.....	10
2.2.1	Tasokehän elementtiverkko	10
2.2.2	Pintarakenteen elementtiverkko	11
2.2.3	Muita elementtiverkkotyyppejä.....	12
2.3	Materiaaliominaisuuksien sekä reunaehtojen määrittäminen	12
2.4	Kuormien määrittäminen.....	13
2.5	Tulosten tarkastelu FEM-ohjelmassa.....	13
3	MASTOPIILARIHALLIN KUORMAT JA LIITOKSET	15
3.1	TT-Laataston levyvaikutus	15
3.2	TT-Laatan ja palkin liitos	16
3.3	Pilarin ja palkin liitos	17
4	3D-MALLINNUSPROSESSIN VAIHEET	19
4.1	<i>RFEM</i> -laskentaohjelma	19
4.2	Ohjelman asennus ja työn aloitus	20
4.3	3D-malliksi laajentaminen.....	22
4.4	TT-Laataston mallinnus yhtenäiseksi levyksi	23
4.5	Laataston pistekuorman muuttaminen tasaiseksi kuormaksi.....	26
4.6	TT-Laatan neljän tukipisteen vaikutus malliin.....	29
4.7	Ylimääräiset jännitykset TT-laatoilla	31
4.8	TR-kiinnikkeisiin kohdistuvat voimat	33
4.9	Toisen kertaluvun momenttiero	36
5	TULOKSET JA ANALYSOINTI	38
5.1	TR-Kiinnikkeiden normaali- ja leikkausvoimat.....	39
5.2	Pilareiden momentit 3D-laskennassa	40
6	YNTEENVETO JA POHDINTA.....	42
6.1	3D-laskennan hyöty	42
6.2	<i>RFEM</i> n käyttökokemukset.....	43
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT	44

LIITE 1: MASTOPIILARIHALLIN YLÄPOHJA- JA LEIKKAUSKUVA	46
LIITE 2: MASTOPIILARIHALLIN 3D-MALLINNUSOHJE RFEMILLÄ.....	48
LIITE 3: MASTOPIILARIHALLIN VERTAILUMALLIN TIEDOT	75

KÄSITTEET

1. Kertaluvun teoria/analyysi -käsitteellä tarkoitetaan tässä työssä lineaarista ratkaisumenetelmää, jossa laskentaohjelma ratkaisee yhtälöt normaalin elementtimenetelmän mukaan.

2. Kertaluvun teoria/analyysi tarkoittaa epälineaarista elementtimenetelmän ratkaisumenetelmää. Laskentaohjelma ottaa huomioon rakenteen epävakauteen liittyviä asioita ja lisää ratkaisuyhtälöihin vakautta heikentäviä kertoimia. Käytännössä *RFEM* määrittää lisäkertoimen e_{el} aksiaaliselle voimalle N , joka lisää voiman N epäkeskisyyttä ja aiheuttaa siten suuremman taivutusmomentin rakenteelle (Dlubal Software 2013, 264). Eurokoodissa (Betonteollisuus 2009, 5 - 6) Suomen kansallisessa liitteessä on kaksi yksinkertaistettua tapaa ratkaista toisen kertaluvun teorian mukainen momentti: nimelliseen kaarevuuteen ja nimelliseen jäykkyyteen perustuvat menetelmät.

JK-Palkki on mastopilarien yläpäässä oleva palkki, johon TT-laatasto tukeutuu. Käsitettä käytetään, jotta prosessin kuvaus selkeytyy. Liite 1 havainnollistaa JK-palkkien sijainnin.

Rivat tarkoittavat TT-laatan kahta palkkia, jotka ottavat vastaan TT-laatalle tulevat rasitukset ja joiden päällä on TT-laatan kansi.

1 JOHDANTO

Rakenteiden suunnittelussa, ennen 3D-avusteisen laskennan tuloa suunnittelijoiden käyttöön, on elementtien mitoitussuureet, kuten momentti- ja leikkausvoimat, laskettu yleisesti kaksiulotteisesti. Rakennesuunnittelijan on ollut hahmotettava esimerkiksi hallirakennuksessa eniten kuormia vastaanottava kehä ja kuormitustapaus, jonka mittatiedot ja kuormitukset on syötetty laskentaohjelmaan ja tarkastettu karkeasti käsinlaskulla. Tämän mukaan on mitoitettu suunniteltavan hallin kaikki kehät. 3D-laskentaohjelmien käyttö on tuonut tarkkuutta laskentaan, ja monimutkaisetkin rakennukset voidaan mitoitaa tarkemmin ilman, että rakennukset ovat ylimitoitettuja.

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia 3D-avusteisesti, miten hallissa kiskoilla kulkevan siltanosturin aiheuttama epätasainen kuorma jakautuu hallissa TT-laataston kautta. Työssä on tarkoitus mallintaa 3D-laskentaohjelmaa käyttäen yksinkertainen mastopilarihalli, jonka pilarien päissä pituussuunnassa on palkisto ja kattorakenteena leveysuunnassa ovat TT-laatat. Työssä tutkitaan pääsääntöisesti hallin mastopilareihin aiheutuvaa momenttia perus- ja siltanosturikuormista, mutta esimerkiksi lämpötilamuutoksista johtuvia rasituksia ei ole otettu huomioon. Pyritään myös selvittämään, millaiset voimat aiheutuvat TT-laattojen välisiin kiinnikkeisiin, jotta voidaan tarkastella niiden kestokykyä. Yhtenäisen levyrakenteen vaikutusta yläpohjassa ei ole voitu aikaisemmin ottaa 2D-kehälaskuissa huomioon, ja halutaan selvittää, onko 3D-laskennasta hyötyä tällaisessa tapauksessa.

Rakenneanalyysi suoritetaan käyttämällä saksalaisen ohjelmistoyrityksen Dlubalin julkaisemaa *RFEM* 3D-laskentaohjelmaa. Työn toimeksiantajalta, Rakennussuunnittelutoimisto Nylund Oy:ltä, on saatu vertailupohjaksi esimerkkihalli ja rakennelaskemat, jotka on tehty *Frame analysis* 2D-laskentaohjelmalla. Opinnäytetyössä saatavia tuloksia on verrattu näihin tuloksiin.

Insinööriyön alkuun tehdään teoriakatsaus elementtimenetelmä-laskentaan, jotta ohjelman käyttäjä voi ymmärtää paremmin sen toimintaperiaatteita ja käytössä huomioon otettavia asioita. Käytännön työssä opetellaan aluksi uuden *RFEM*-ohjelman käyttöä ja pyritään löytämään oikea tapa mallintaa vertailulaskun mukainen kehärakenne. Seuraavassa vaiheessa tehdään 3D-malli ja työn vaativin osuus on yläpohjan TT-laataston muodostaminen siten, että tulokset pysyvät luotettavina. Kun lopulliset tulokset on saatu, tehdään käyttöohje, jossa selitetään kohta kohdalta, miten malli on tehty *RFEM*ssä. Tarkoituksena on, että ohjelman käyttöä harjoittelevat voivat saada tiiviin paketin *RFEM*n perustyökaluista ja toimintaperiaatteista.

2 ELEMENTTIMENETELMÄN TEORIAA

Finite Element Method/Modeling (FEM) eli suomeksi elementtimenetelmä on yleinen analysointiväline, joka on tullut yhä käyttökelpoisemmaksi tietokoneiden laskentakapasiteetin lisääntyessä. Menetelmä on riittävän yleispätevä, minkä ansiosta sillä voidaan mallintaa lähes mikä tahansa kappale, materiaaliominaisuus tai kuormitus. (Hietikko 2013, 170.)

Rakennesuunnittelijan lujuuslaskennoissa ratkaistaan annetuista kuormituksista aiheutuneen rakenteen siirtymätilakenttä, muodonmuutostilakenttä ja jännitystilakenttä. Vain yksinkertaisen geometrian ongelmissa onnistuu yleisen yhtälöjärjestelmän analyttinen ratkaisu. Tehtävät ovat kuitenkin yleensä lähes mahdoton ratkaista, ja joudutaan tyytymään likimääräiseen ratkaisuun. Tähän kehitetty elementtimenetelmä on osoittautunut parhaaksi, ja toimivuutensa ansiosta se alkoi levitä nopeasti jo 1950-luvulla rakenteiden statiikan ja dynamiikan käsittelyyn. FEM-laskenta soveltuu myös muille tekniikan aloille, ja sitä käytetään mm. lämmönsiirron, virtausopin, akustiikan, maamekaniikan, sähkötekniikan, jne tehtävien ratkaisuun. (Lähteenmäki 2007, 1.)

Käytettäessä elementtimenetelmään perustuvaa 3D-laskentaohjelmaa on laskennassa seurattava neljää pääkohtaa, jotta ohjelma voi suorittaa laskun ja tulosten analysointiin päästään käsiksi (Liu ja Quek 2003, 4):

1. geometrian mallinnus
2. elementtiverkon luonti (laskentaohjelma tekee automaattisesti)
3. materiaaliominaisuuksien ja reunaehtojen määrittäminen
4. kuormien määrittäminen.

Tässä opinnäytetyössä ei käsitellä elementtimenetelmän ratkaisuun liittyviä matriisiyhtälöitä ja ratkaisutekniikoita. Teorian tarkoituksena on antaa lukijalle pääpiirteinen kuva FEM-ohjelmien periaatteesta ratkaista annettu ongelma, jotta käyttäjä voi paremmin ymmärtää, miksi ja miten hän ohjelmaa käyttää.

2.1 Geometrian mallinnus

Rakennesuunnittelijalle lähtökohtana ovat arkkitehtien tekemät kuvat rakennuksen muodosta ja tilasuunnittelusta. Yleensä arkkitehti on ottanut huomioon sen, missä kantavat rakenteet sijaitsevat, mutta usein käydään keskusteluja rakennesuunnittelijan ja arkkitehdin välillä runkorakenteiden linjoista ja mahdollisesti tehdään muutoksia arkkitehdin tilasuunnitelmiin. Tämän pohjalta rakennesuunnittelija suunnittelee rakennuksen kantavat rakenteet ja huolehtii, että kuormat ohjautuvat runkorakenteita pitkin rakennuksen perustuksiin.

Laskentaohjelmalla mallinnetaan ainoastaan ne rakenteet, jotka ottavat vastaan ja siirtävät kuormia ja rasituksia kohti perustuksia. Rakennukselle tehdään mahdollisimman yksinkertainen runko. Tarkoituksena on käyttää symmetriatasoja ja mahdollisesti yksinkertaista työläitä yksityiskohtia, jotka eivät kuitenkaan ole merkittäviä lopputulokseen, ja pysytään varmalla puolella (Hietikko 2013, 172).

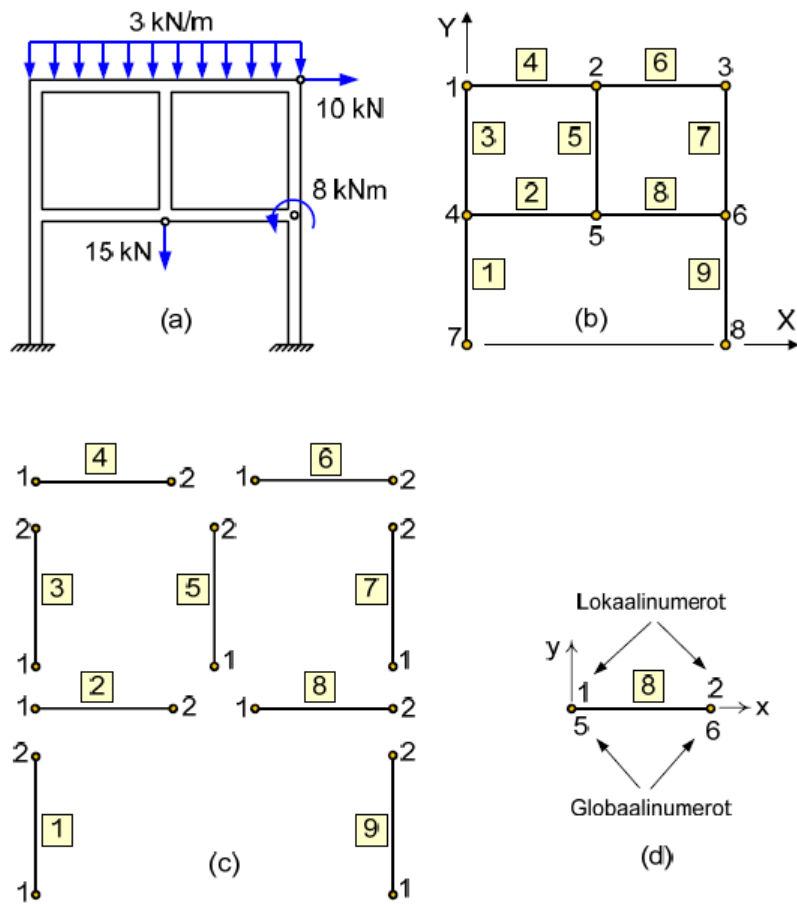
2.2 Elementtiverkon muodostus

Elementtiverkon muodostaminen ei yleensä ole tarpeen, sillä laskentaohjelma tekee sen itse. Elementtiverkolla tarkoitetaan sitä, että rakenne kuvataan pienemmillä osilla eli elementeillä, jotka liittyvät toisiinsa solmupistein. Lähteenmäen (2007, 2) mukaan geometrisesti mutkikkaan kolmiulotteisen kappaleen elementteinä käytetään yksinkertaisia neli-, viisi- ja kuusitahokkaita, kun taas pintarakenteissa käytetään neli- ja kolmisivuisia tasoelementtejä ja viivarakenteissa janaelementtejä. Malli voidaan kuvitella eräänlaiseksi elementtien eli jousien muodostamaksi systeemiksi, ja kun ulkoinen kuorma vaikuttaa siihen, niin systeemin elementit muuttavat muotoaan etsien tasapainoisen tilan. Uusi rakenne muotoutuu siis tasapainoehdojen mukaan solmupisteissä. Materiaaliminaisuudet ja solmupisteen koordinaatit muodostavat jäykkyyssmatriisin, joka yhdistetään kuormitukseen. Laskennan tuloksena saadaan tämän avulla myöhemmin selville kunkin solmupisteen siirtymä, jonka avulla saadaan esimerkiksi selville kappaleessa olevat jännitykset. (Hietikko 2013, 170 - 172.)

Elementtimenetelmästä saatavat tulokset ovat likiarvoisia, mutta ne ovat sitä täsmällisempiä, mitä tiheämpi verkko muodostetaan. Laskentaohjelman elementtiverkkoa voi luonnollisesti tihentää manuaalisesti niistä kohdista, joista halutaan mahdollisimman tarkkoja tuloksia. Verkon tihentyessä lisääntyy myös ratkottavien yhtälöiden määrä, joka hyvin nopeasti olisikin lähes mahdotonta laskea käsin yhtälömäärän ollessa jopa tuhansia. (Hietikko 2013, 170 - 172.) Suunnittelussa ratkaistavat yhtälöt ovat usein monimutkaisia eikä elementtimenetelmä siksi pyri äärettömän tarkkaan tulokseen, vaan sillä saadaan likiarvoinen tulos. Menetelmä muuttaa muuten hankalan ratkaistavan yhtälön paljon yksinkertaisemmaksi, ja tulos on tarpeeksi lähellä oikeaa. (Liu ja Quek 2003, 6 - 7.)

2.2.1 Tasokehän elementtiverkko

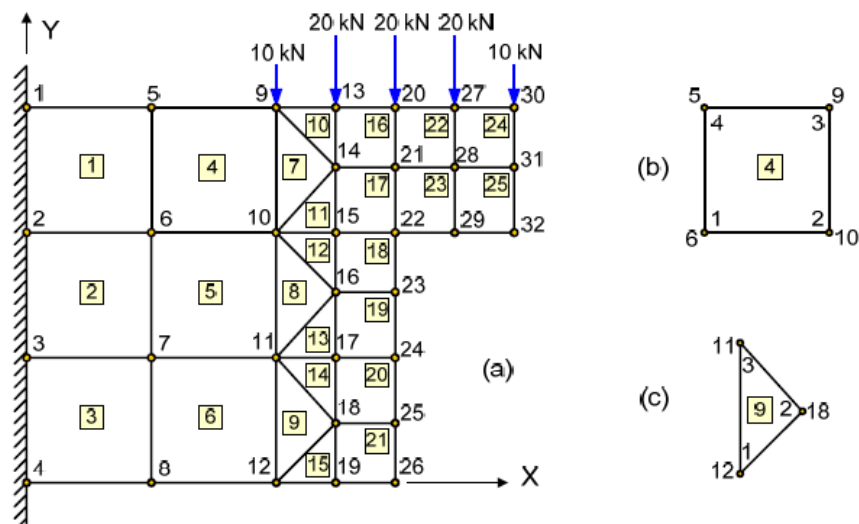
Kuvassa 1 on esimerkki eräästä tasokehästä ja siihen tehdystä yksinkertaisesta elementtiverkosta. Tasokehä on jaettu elementeiksi, ja kutakin elementtiä vastaa oma numero ja kaksi solmupistettä. FEM-laskentaohjelmalla voisi jakaa alla olevan mallin sauvat esimerkiksi vielä kahtia tai neljään elementtiin, jolloin saataisiin vielä tarkempi tulos sauvan eri vaiheilta. Jokaisella sauvalla on oma paikallinen eli lokaali koordinaatistonsa ja numerointinsa. FEM-ohjelman ratkaistua yhtälöt on se automaattisesti muuttanut jokaisen solmun lokaalin siirtymän yhteiseen globaaliin koordinaatistoon, jolloin lopputulos on yhtenäinen ja ymmärrettävä.



KUVA 1. Tasokehän janaelementtien elementtiverkko (Lähtenmäki 2007, 3)

2.2.2 Pintarakenteen elementtiverkko

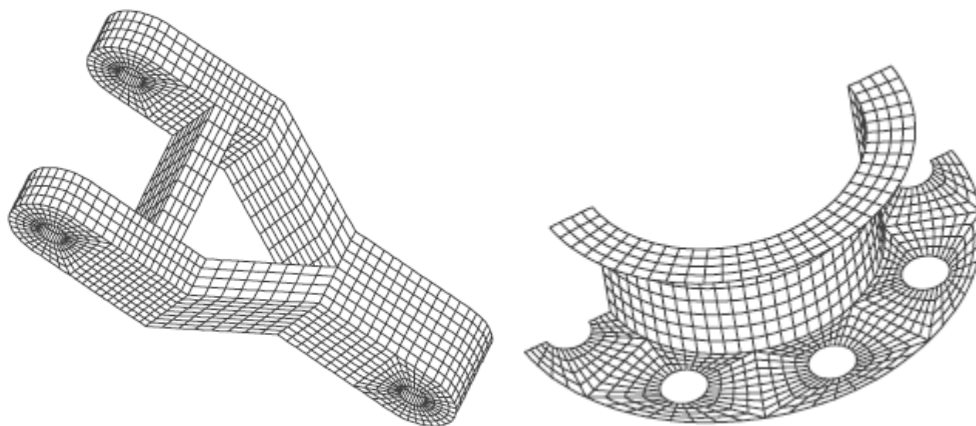
Levyrakenteessa kuvan 2 esimerkin elementtiverkon määrittämisessä on haluttu pienentää elementtejä, jotta tulokset ovat tarkempia. Elementtiverkon tihentämiseen on tarvittu vyöhyke kolmioelementtejä (Lähtenmäki 2007, 4). Nämä elementit ovat ns. tasoelementtejä.



KUVA 2. Levyrakenteen tasoelementtien elementtiverkko (Lähtenmäki 2007, 4)

2.2.3 Muita elementtiverkkotyyppejä

Muita elementtityyppejä, joita yleisesti käytetään FEM-laskennassa, ovat mm. palkkielementit, laataelementit, kuorielementit, 3D-solidielementit ja erityiselementit (Lähtenmäki 2007, 10). Esimerkkinä laskettavien yhtälöiden määrästä kuvastuu kuvan 3 kuorirakenteen elementtien määrästä, joka on 896 ja jossa on 2 921 solmua. Vapausasteiden määrä on noin 11 200. (Lähtenmäki 2007, 17.)



KUVA 3. 3D-Solidielementti ja kuorielementti (Lähtenmäki 2007, 17 - 19)

Rakentamisessa käytännössä lähes kaikki mallit muodostuvat jana- ja tasoelementtiverkoista. Kun tutkitaan pilareita, palkkeja ja laatastoja, muodostaa laskentaohjelma näille vain näitä peruselementtejä. 3D-Solidielementtejä ja muita erityiselementtejä käytetään jatkuvasti esimerkiksi konetekniikassa yksittäisten osien mitoitukseen. Rakentamisessa hyödytään niistä lähinnä silloin, kun esimerkiksi yksittäisen palkin käyttäytymistä tutkitaan.

2.3 Materiaaliominaisuuksien sekä reunaehtojen määrittäminen

Kappale on tuettava, jotta se ei lähde liikkumaan siihen kohdistuvien voimien vaikutuksesta. Tuentojen on kuvattava mahdollisimman hyvin todellisia tuentoja (Hietikko 2013, 172). Esimerkiksi mastopilari tulee kiinnittää ohjelman erillisellä työkalulla jäykästi alapäästään kiinni, mutta taas palkin ja pilarin välinen liitos ei ole jäykkä, joten niiden välinen solmupiste täytyy määrittää kiertyväksi, momentteja siirtämättömäksi, solmupisteeksi. Hietikko (2013, 173) toteaaakin, että väärät ja puutteelliset reunaehdot ovat usein syynä FEM-laskennalla saataviin virheellisiin tuloksiin. Pienikin reunaehdon poikkeama todellisesta tilanteesta saattaa aiheuttaa radikaaleja muutoksia lopputuloksissa.

Kaupallisissa ohjelmissa on yleensä materiaalikirjastoja ja valmiita elementtejä, joissa materiaaliominaisuudet on valmiiksi määriteltä (Liu ja Quek 2003, 6-7). Esimerkiksi betonipalkilla käyttäjän tarvitsee vain valita poikkileikkauksen mitat, ja muut tiedot tulevat automaattisesti ohjelman puolesta. FEM-ohjelma ratkaisee näiden tietojen pohjalta solmujen siirtymät matriisiyhtälöillä yhdessä kuormitustietojen kanssa.

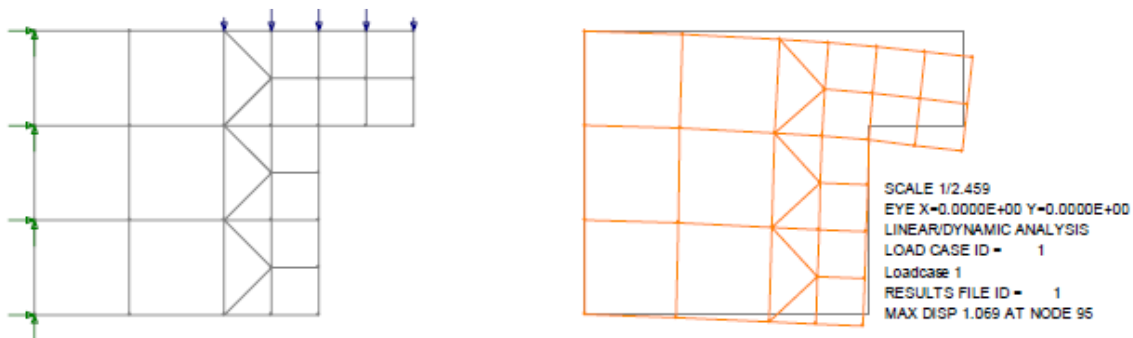
2.4 Kuormien määrittäminen

Kuormien määrittäminen oikein ja todellisuutta vastaaviksi on vaikea ja tarkkuutta vaativa tehtävä suunnittelijalle. Elementtimalliin voi kuormitukset syöttää piste-, viiva- ja pintakuormina. (Hietikko 2013, 173.) Lisäksi rakennesuunnittelijan tulee hallita erilaiset kuormitusyhdistelyt ja kuormille annettavat kuormituskertoimet. FEM-ohjelmissa tämä on yleisesti otettu hyvin huomioon. Kertoimien syöttö ja erilaisten kuormitusyhdistelmien tutkiminen on pyritty tekemään helpoksi. Tässäkin osiossa voidaan todeta, että väärin kuormitustietojen syöttäminen johtaa väistämättä väärin FEM-laskennalla saattaviin tuloksiin.

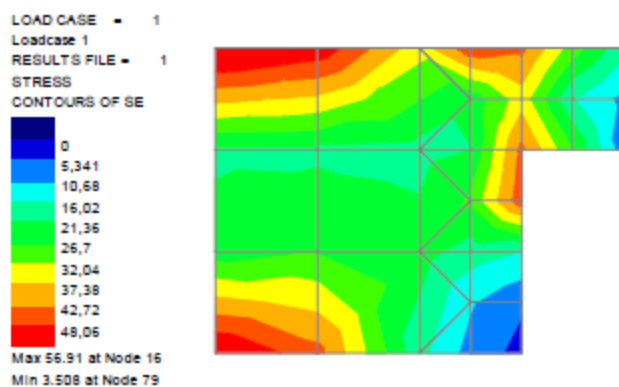
2.5 Tulosten tarkastelu FEM-ohjelmassa

Laskenta FEM-ohjelmalla onnistuu, kun kohde on mallinnettu, materiaaliominaisuudet on määritetty reunaehtoineen sekä kuormat ja kuormitusyhdistelyt on syötetty. Ohjelma määrittää automaattisesti rakenteeseen elementtiverkon ja laskee yhtälöt. Ohjelmat ovat niin kehittyneitä, että tulokset tulevat havainnolliseen graafiseen ulkoasuun, joista alan ammattilainen näkee nopeasti tulokset (Lähtenmäki 2007, 12).

Ristikko- ja palkkirakenteilla rakennesuunnittelijalle tärkeimmät tiedot ovat solmujen siirtymät ja elementtien rasituskuviosta normaali-, momentti- ja leikkausvoimat (Lähtenmäki 2007, 12). Kuvassa 4 on erään laskentaohjelman tulokset kuvan 2 tapauksesta, joka havainnollistaa solmupisteiden siirtymää kyseisessä kuormitustapauksessa. Kuva 5 havainnollistaa saman rakenteen jännityksiä.



KUVA 4. Pintarakenteen kuormitus- ja tuentatiedot sekä solmupisteiden siirtymäkuva (Lähtenmäki 2007, 13)



KUVA 5. Pintarakenteen jännitysjaakauma (Lähtenmäki 2007, 15)

Mallinnuksen ja reunaehtojen määritysten jälkeen tehtävä analyysilaskenta saattaa kestää, riippuen mallin koosta, muutamasta sekunnista jopa tunteihin. Tuloksien esitysmalli on melko vakiintunut ja noudattaa samoja suuntaviivoja ohjelmasta toiseen. Esimerkiksi jännitykset esitetään yleensä väripintoina tai korkeuskäyrinä. (Hietikko 2013, 174.)

Elementtimenetelmää käyttävät ohjelmat ovat nykyään kaikkien ulottuvilla, ja ne ovat melko helppokäyttöisiä. On kuitenkin otettava huomioon, että tulokset voivat olla täysin virheellisiä, jos mallintamisen aikana on tehty virheitä esimerkiksi reunaehtojen syötössä tai kuormitusten määrityksissä. Tulosten tarkastelut onkin aina tehtävä ammattilaisen toimesta ja pyrittävä varmistamaan jollain muulla menetelmällä. (Hietikko 2013, 174.)

3 MASTOPILARIHALLIN KUORMAT JA LIITOKSET

Opinnäytetyön halliesimerkissä tutkitaan erityisesti epätasaisten siltanosturikuormien jakautumista. Kaikkia kuormia ei ole otettu huomioon, vaan ainoastaan peruskuormat ja lähtökohtainen oletamus on, että rakenteita rasittavat hyötykuormat, omapaino, tuulikuormat ja lumikuormat ovat tasaisesti jakautuneet rakenteissa. Siltanosturikuormat puolestaan aiheuttavat epätasaisen rasituksen, koska nosturi liikkuu rakenteisiin kiinnitetyillä rataksilla ympäri hallia. Tässä opinnäytetyössä käytetään 30 tonnin painoista siltanosturia ja tarkemmat valmistajan ilmoittamat kuormitustiedot löytyvät liitteen 3 lopusta. Kuva 6 havainnollistaa siltanosturia.

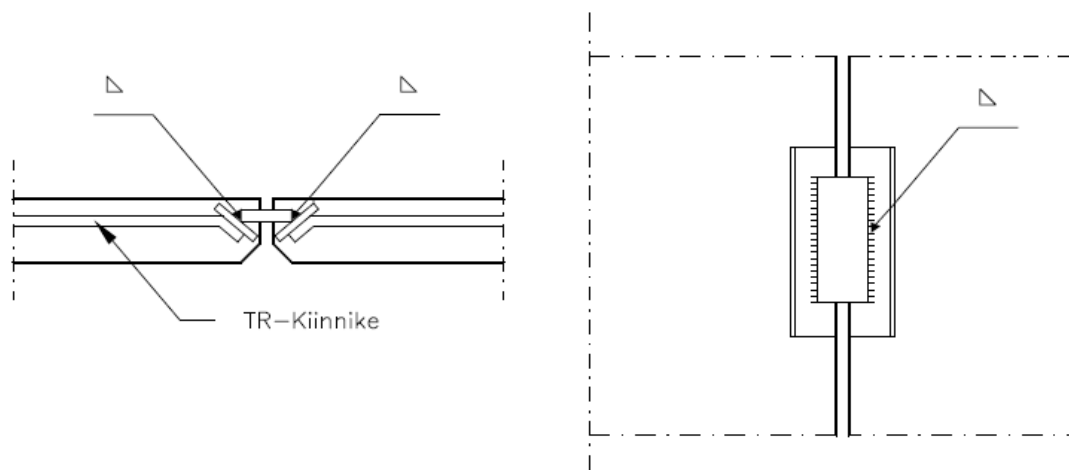


KUVA 6. Esimerkkikuva siltanosturista ja rataksista (www.satateras.fi)

Mastopilarihallin yläpohja on TT-laatasto, minkä ajatellaan toimivan yhtenäisenä levynä rakenteena. Tällainen TT-laatasto jakaa siltanosturista aiheutuvia epätasaisia kuormia ympäri hallirakenteita kaikille kehillä.

3.1 TT-Laataston levyvaikutus

Yläpohjassa laatasto voidaan hitsata kiinni toisiinsa kuvan 7 mukaisesti. Tällöin hitsikiinnikkeet mitoitetaan laatastoon kohdistuville vaakavoimille, jolloin koko laatasto muodostaa yhtenäisen levyrakenteen. (Rakennusteollisuus 2006, 60). TT-Laatasto käytettäessä ala- tai välipohjissa tulee päälle yleensä pintavalu rauditusverkkoinen, mikä korvaa hitsiliitoksen, ja TT-laatasto muodostaa yhtenäisen jäykemmän levyrakenteen (www.elementtisuunnittelu.fi). Pintabetonia käytettäessä on laatan yläpintaa tarvittaessa karhennettava tai käytettävä vaarnateräksiä, jotta tartunta on parempi. Tällöin rakenne voidaan mitoittaa liittorakenteena. (Rakennusteollisuus 2006, 60.)



KUVA 7. TT-Laattojen välinen vaakavoimia siirtävä liitos (www.elementtisuunnittelu.fi)

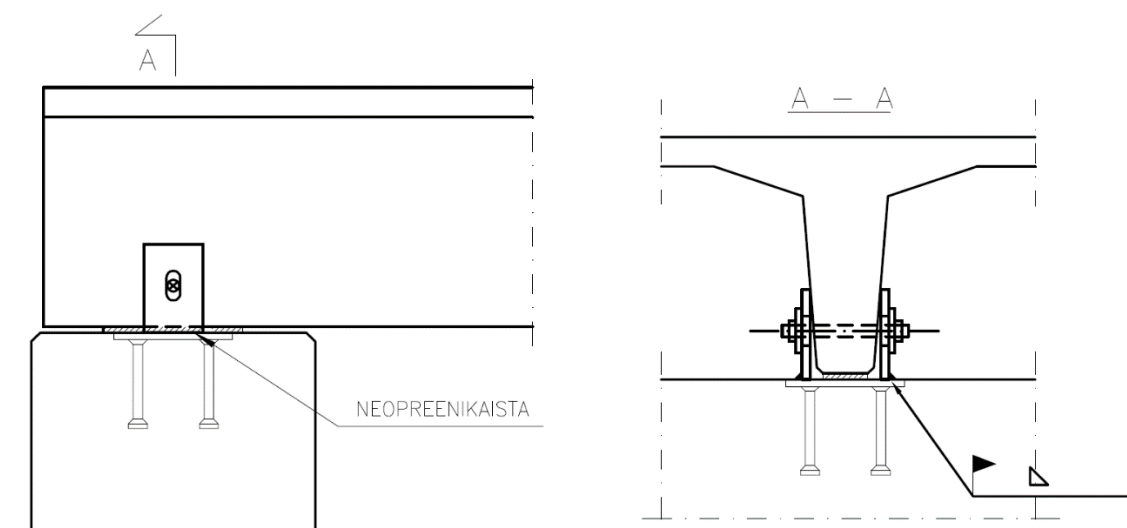
Tässä työssä esimerkkinä kiinnikkeistä käytetään Peikko Oy:n TR-kiinnikkeitä, ja niille on määrätty kapasiteetit normaali- ja leikkausvoimille. Euronormin (Suomen Betoniyhdistys 2011, 82) mukaan elementtilaatastion reunoilla olevalla raudoituksella on oltava 45 kN:n kapasiteetti. Tästä syystä laatastion reunoilla käytetään TR44-kiinnikkeitä, jotka ottavat pääasiassa vastaan vetorasitusta, ja keskellä TR39-kiinnikkeitä, jotka ottavat vastaan enemmän leikkausrasitusta. Opinnäytetyössä on tarkoitettu tarkastella näihin kiinnityksiin aiheutuvia voimia ja tutkia, ylittävätkö kapasiteetit vastaanottaa leikkaus- ja normaalivoimia. Raja-arvot on ilmoitettu taulukossa 1. Huomioitavaa on myös, että kiinnikkeitä ei voi mitoittaa leikkaus- ja normaalivoimien suhteen äärirajoille, koska näiden voimien yhteisvaikutuksen takia kapasiteetit voivat olla taulukon arvoja pienempiä (Korhonen 2014-03-27). Mikäli esimerkiksi TR39-kiinnikkeen leikkausvoimakapasiteetti on lähellä 100 %:a ja siihen kohdistuu vielä normaalivoimia, on syytä harkita, aiheuttaako yhteisvaikutus kapasiteetin ylityksen. Yhteisvaikutuksen analyysiin voi soveltaa esimerkiksi Peikko Oy:n ohjetta SBKL-kiinnikkeille (Dunkel 2014-04-23).

TAULUKKO 1. TR39 ja TR44 -kiinnikkeiden kapasiteetit leikkaus- ja normaalivoimille (www.peikko.fi)

	N_{RD}	V_{RD}
TR39	20,3 kN	11,1 kN
TR44	47,1 kN	17,3 kN

3.2 TT-Laatan ja palkin liitos

TT-Laatasto on kiinnitetty päistään voimaa siirtävällä liitoksella, joka on joustava ja jonka siirtymää on rajoitettu. Runkorakenteita mitoittaessa nosturikuormille voidaan käyttää kuvan 8 mukaista liitosta, joka koostuu neopreenilevystä ja teräsosasta. (Rakennusteollisuus 2008, 8.)

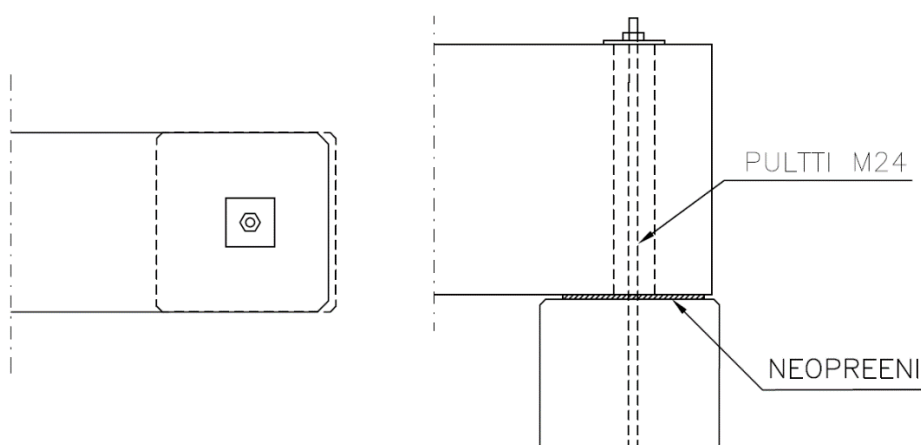


KUVA 8. TT-Laatan ja palkin liitos (www.elementtisuunnittelu.fi)

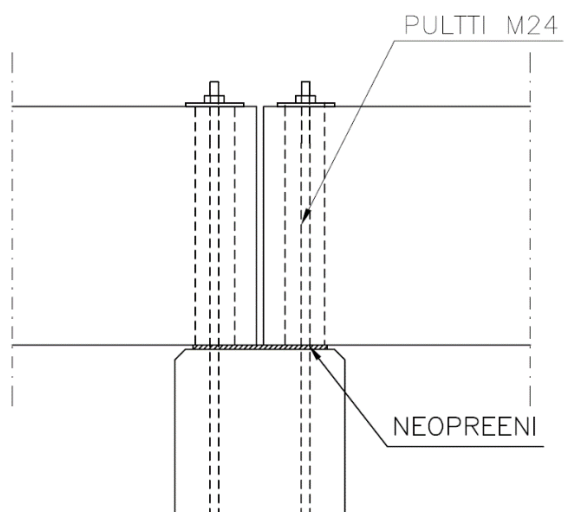
Kuvan 8 mukainen liitos ajatellaan olevan TT-laatan päässä ainoastaan toisella rivalla, jolloin toinen lepää vain neopreenikaistan päällä. Laatan toisessa päässä on liitos puolestaan toisella rivalla, jolloin siirtymiä rajoittavat liitokset ovat vastinkulmissa ja toiset vastinkulmat lepäävät vapaasti neopreenikaistan päällä. Liitokset tulee mallintaa jokaisella rivalla momenteja siirtämättömäksi niveleksi. Käytännössä jokainen TT-laatan nurkka siirtää voimia samalla tavalla neopreenikaistan kitkan ansiosta, ja teräsosan tarkoitus on ehkäistä onnettomuustilanteissa TT-laatan siirtymää. (Rakennusteollisuus 2006, 58.)

3.3 Pilarin ja palkin liitos

Hallin päädyssä pilarin ja palkin välinen liitos on kuvan 9 mukainen ja hallin keskiosassa kuvan 10 mukainen. Pultti on päästään kierteinen, ja sen päähän ruuvataan mutteri. Pultin asennuskoloon ei tehdä jälkivalua. (www.elementtisuunnittelu.fi.) Liitos ei ole jäykkä, momenteja siirtävä liitos, vaan se määritetään laskennassa nivelelliseksi.



KUVA 9. Pilarin ja palkin liitos hallin päädyssä (www.elementtisuunnittelu.fi)

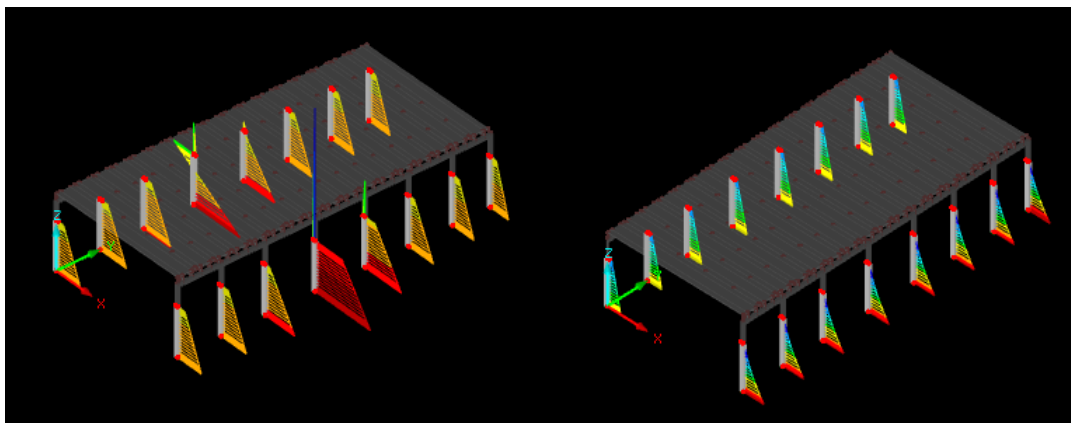


KUVA 10. Pilarin ja palkin liitos hallin keskiosassa (www.elementtisuunnittelu.fi)

4 3D-MALLINNUSPROSESSIN VAIHEET

Lähtökohta työhön on tutkia hallin mastopilarien juurissa vaikuttavia mitoitusmomenteja, joiden mukaan pilarin raudoitukset määritetään. Kun pilari mitoitetaan 2D-ohjelmalla, ei yläpohjassa olevaa TT-laataston yhtenäistä levyvaikutusta voida ottaa huomioon. Tutkimustyökaluna käytettiin *RFEM*-laskentaohjelmaa, joka ei tarjoa suoraa työkalua TT-laataston tekemiseen. Työn tuloksena tavoitellaan malliesimerkkiä hallista, jonka yläpohja toimii yhtenäisenä levynä, jolloin 3D-mallintamisesta saadaan suurin hyöty.

Kuva 11 havainnollistaa tutkittavaa tilannetta. Kuvassa vasen puoli näyttää, kuinka nosturikuormat eivät ole käytännössä mitenkään jakautuneet, vaan niiden kohdalla on momenttipiikki eikä 3D-laskennasta ole hyötyä. Oikea puoli osoittaa työn tutkimisen tavoitteen, jolloin 3D-laskennan hyöty tulee esiin: kuormat ovat jakautuneet paremmin yhtenäisen yläpohjan kautta ympäri hallia ja mitoitettava momentti on huomattavasti pienempi.



KUVA 11. Havainnekuva työn lähtökohdasta ja tavoitteesta (Laitinen 2014-03-19)

Lähtökohta mallinnukseen oli, että *RFEM*-ohjelman käyttö oli opeteltava alusta asti. Teknisen tuen ohjelman käyttöön tarjosi ainoastaan *Dlubal*n tuottama aineisto: opetusvideot sekä tekninen tuki sähköpostin välityksellä englanniksi. Ohjelmasta ei ollut tässä vaiheessa käyttökokemusta myöskään työn toimeksiantajalla.

4.1 *RFEM*-laskentaohjelma

RFEM on saksalaisen ohjelmistoyrityksen *Dlubal*n markkinoima elementtimenetelmää käyttävä 3D-laskentaohjelma. *Dlubal* on perustettu vuonna 1987 DI Georg Dlubalin toimesta, ja päätoimisto sijaitsee Tiefenbachissa Saksassa. Yrityksellä on 1990-luvulla perustettu sivukonttori Tsekissä Prahas- sa, ja 2010 avattiin kolmas toimisto Leipzigissä Saksassa. Yrityksen tarjoamia ohjelmia käyttää n. 7000 asiakasta ympäri maailmaa. (www.dlubal.com.) Suomessa *RFEM*ä jälleenmyy Rak-Tek Solutions Oy.

Yrityksellä on useita rakennesuunnittelun ohjelmia, joista yleisimmät ovat *RSTAB* ja *RFEM*. Ohjelmat näyttävät ulkoisesti samoilta, ja käyttöominaisuudet ovat samankaltaisia. Erona on esimerkiksi se,

että *RSTAB*-ohjelmalla mitoitetaan sauvarakenteita, kun taas kokonaisvaltaisiin rakennejärjestelmiin, joissa yhdistellään laatastoja, palkkeja ja pilareita, on *RFEM* oikea suunnitteluohjelma. (www.rakteksolutions.fi.)

*Dlubal*n pyrkii tekemään ohjelmistaan käyttäjäystävällisiä ja kehittää niitä asiakaslähtöisesti. Kehitystyössä on tällä hetkellä noin 180 työntekijää. (www.dlubal.com.) Ohjelmistojen tekninen tuki palvelee aktiivisesti, ja tämänkin opinnäytetyön kysymyksiin saatiin Saksasta vastaukset parhaimmillaan muutamassa tunnissa. Yritys satsaa opiskelijoihin tarjoamalla kuuden kuukauden ilmaisia opiskelijalicenssejä, ja internetistä löytyy myös runsas määrä opetusvideoita ohjelmien käyttöön.

4.2 Ohjelman asennus ja työn aloitus

RFEM-ohjelma ladattiin *Dlubal*n omilta verkkosivuilta: www.dlubal.com. Ohjelma asennettiin, ja tämän jälkeen ohjelmasta oli käytössä 30 päivän kokeiluversio. Seuraavaksi *Dlubal*n sivujen kautta onnistui tilata kuuden kuukauden opiskelijaversio lähettämällä sinne henkilötiedot sekä kopiot ajokortista ja opiskelutodistuksesta.

Yksityiskohtaiset ohjeet mallintamisen vaiheista voi lukea opinnäytetyön liitteestä 2, jossa on selitetty eri vaiheet hallin mallintamiseen ja lopputulokseen pääsemiseksi. Prosessikuvaus-osiossa nämä vaiheet on selitetty pääpiirtein, mutta työn tekemisen aikana tulleita ongelmakohtia on otettu esille sekä selitetty, miten niistä on päästy eteenpäin.

Mastopilarihallin mittatiedot ja kuormitusarvot tuloksineen saatiin aloituspalaverin yhteydessä *Rakennussuunnittelutoimisto Nylund Oy*:ltä. Lähtöarvoihin kuului *Frame Analysis*-ohjelmalla tehty 2D-mitointu vastaavalle kehälle (liite 3), nosturikuormien tiedot sekä pohja- ja leikkauskuva (liite 1).

Käytännössä ennen kuin mitään mallinnusta aloitettiin, tutkittiin *Dlubal*n julkaisemia opetusvideoita sekä ohjelmiston manuaaleja. Samalla harjoiteltiin erilaisten perustyökalujen käyttöä *RFEM*llä. Muutamia päivien opetteluun ja opiskeluun jälkeen alettiin mallintaa opinnäytetyön vertailulaskun mukaista kehärakennetta.

2D-mallin tekeminen

Työsuunnitelman mukaan ensimmäinen tavoite oli tehdä samanlainen 2D-kehän malli *RFEM*-ohjelmalla, kuin mitä oli tehty *Nylund Oy*:llä *Frame Analysis*-ohjelmalla. Kun saadut tulokset täsmäivät, voidaan olettaa, että malli osataan tehdä ja oikeanlaisia tuloksia saadaan ulos. Tästä lähtökohdasta mallinnetaan lisää kehiä pohjapiirustuksen mukaisesti, tehdään TT-laatasto, määritetään kuormat ja analysoidaan tulokset.

Aluksi kehä mallinnettiin pelkkinä sauvoina samanaiseksi kuin *Frame Analysis*-ohjelmalla tehty kehä. Pilarit yhdistävä TT-laattaa kuvaava palkki on mallinnettu poikkileikkaukseltaan vastaamaan hallissa olevan yhden kehävälän TT-laataston poikkileikkausta 8,2 m:n matkalta. Myös kehän muihin sauvoihin määritettiin poikkileikkauksen mitat ja materiaali liitteen 3 mukaisesti. TT-laataston palkin

ominaisuuksista määritettiin sen omaksi painoksi 0 kN/m^3 , ja kaikki rakenteista tulevat painot pilarin päähän määritettiin pistekuormana.

Kuormitukset ja kuormitusyhdistelyt määriteltiin samanlaisiksi kuin vertailulaskussa, ja ne on esitetty liitteessä 3. Kuormitusyhdistelyiden kertoimet ovat vielä vanhan B-normiston mukaiset, koska kehä on alun perin laskettu ennen eurokoodien aikaa.

Laskentaa suorittaessa *RFEM* määrittä mallin sauvoille automaattisesti elementtiverkon ja laskee suuren määrän erilaisia tuloksia, kuten momentteja, leikkausvoimia, siirtymiä, jännityksiä, jne. Näistä tuloksista verrattiin vertailulaskuun momenttia, leikkausta ja normaalivoimaa. Tuloksissa huomion arvoista oli, että verratessa niitä vertailulaskun mukaisiin tuloksiin, momentit täsmäsivät hyvin lähelle toisiaan laskettaessa ensimmäisen kertaluvun teorian mukaan (kuva 12 ja taulukko 2). Kuitenkin toisen kertaluvun teorian mukaan laskettaessa jäivät *RFEM*n momentit huomattavasti pienemmiksi kuin vertailulaskun *Frame Analysis*-ohjelmalla lasketut momentit. Tästä pääteltiin, että malli on tehty oikein, koska tulokset täsmäsivät ensimmäisellä kertaluvulla, mutta pohdittavaksi jäi, miksi *RFEM* laskee erilailla toisen kertaluvun momentit. Tulokset ovat liitteessä 3 olevista kuormitusyhdistelmistä kuormitusyhdistelmä 2:n mukaiset, joka on ollut mitoittavana *Frame Analysis*-ohjelman laskuissa.



KUVA 12. *RFEM*-mallin kehän momentit (Laitinen 2014-02-05)

TAULUKKO 2. Momentin, leikkausvoiman ja normaalivoiman vertailu (Laitinen 2014-02-05)

		Ensimmäinen kertaluku		Toinen kertaluku	
		RFEM	Frame Analysis	RFEM	Frame Analysis
Vasen Pilari	Momentti	1029 kNm	1020 kNm	1082 kNm	1151 kNm
	Leikkausvoima	-132 kN	-131 kN	↳ <i>RFEM</i> ~6 % pienempi tulos	
	Normaalivoima	-1041 kN	-1036 kN		
Oikea Pilari	Momentti	1049 kNm	1057 kNm	1099 kNm	1189 kNm
	Leikkausvoima	-136 kN	-137 kN	↳ <i>RFEM</i> ~7,6 % pienempi tulos	
	Normaalivoima	-1437 kN	-1432 kN		

Taulukosta 2 nähdään, että ensimmäisen kertaluvun leikkaus- ja normaalivoimat ovat 5 kN:n tarkkuudella samat, eli eroa on noin 0,5 %. Momenteissakaan ei ole ensimmäisessä kertaluvun tuloksissa kuin alle 1 %:n ero. Toisessa kertaluvun tuloksissa puolestaan *RFEM* laskee momentit pahimmillaan lähes 8 % pienemmiksi.

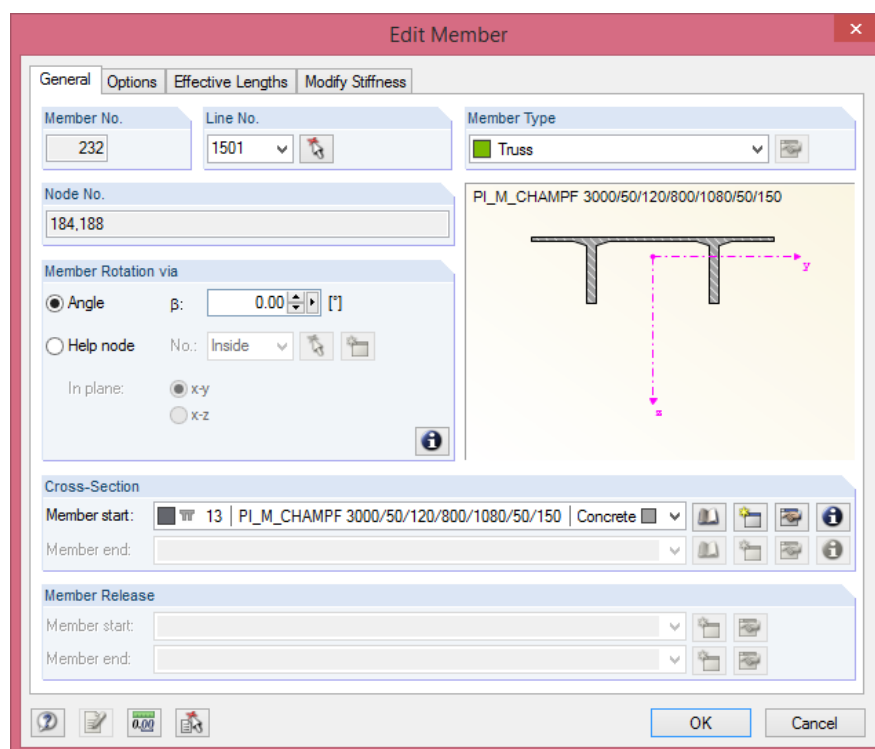
Prosessin aikana vertailut tehtiin ensimmäisen kertaluvun mukaan laskettuihin arvoihin, jotta pystyttiin toteamaan mallin toimivuus. Nykyään mitoitus hallille tehdään eurokoodin mukaan, jossa on

otettava huomioon toisen kertaluvun teorian mukainen momentti. Tästä näkökulmasta ajateltuna malli ei täysin vielä täysin toimi tässä vaiheessa lopullisen mitoituksen kannalta. Mallia voidaan kuitenkin kehittää eteenpäin ja tutkia momenttien käyttäytymistä ja taipumia ensimmäisen kertaluvun mukaan. Toisen kertaluvun käyttäytymistä täytyy tutkia erillisenä osiona, ja se tehdään prosessin lopussa.

4.3 3D-malliksi laajentaminen

Tulosten täsmätyä ensimmäisen kertaluvun tuloksissa mallia kopioitiin kehä kerrallaan isommaksi halliksi. Kuormien jakautumista analysoitiin mallin kasvaessa. Pilarit yhdistettiin hallin pituussuunnassa palkeilla, ja yläpohjaksi oli mallinnettava yhteensuuntaan kantava TT-laatasto.

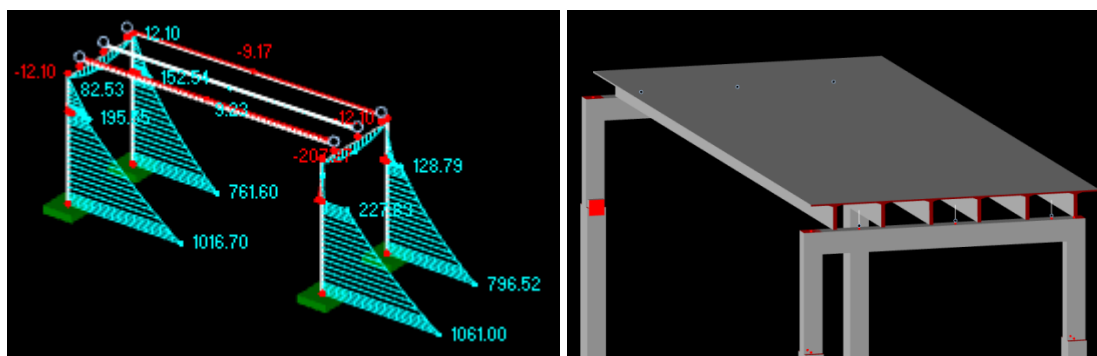
TT-laatan ja palkin välinen liitos todettiin teoriaosuudessa nivelelliseksi, momentteja siirtämättömäksi liitokseksi. Jotta liitos toimisi oikein, TT-Laataston yksittäisten palkkien tyypiksi valittiin "Truss", mikä tarkoittaa, että se toimii suoraan momentteja siirtämättömänä palkkina, eikä erillistä niveltä tarvitse tehdä (Dlubal Software 2013, 128). Tässä vaiheessa TT-laatasto mallinnettiin suoraan palkkeina, joille määritettiin vertailuhallissa käytetyn TT-laatan poikkileikkausta (kuva 13). Tämän mallinnustyyppin TT-laatoista käytetään jatkossa nimitystä TT-palkit.



KUVA 13. TT-palkin ominaisuudet (Laitinen 2014-02-05)

Nosturikuormat on määritetty liitteen 3 mukaan. On huomioitava, että siltanosturista aiheutuu rasitusta myös seuraavaan kehään, ja kyseinen rasitus selvitettiin tässä vaiheessa. Muut kuormat on edelleen määritelty pistemäisesti palkkien päähän. Kuvan 14 tuloksista voidaan todeta, että mallin tulokset ovat edelleen käytännössä samoja, yhden prosentin sisällä olevia tuloksia, kuin 2D-tapauksessa. Ongelma oli, että TT-palkkeja ei ole kiinnitetty mitenkään toisiinta, eivätkä ne siten

toimi yhtenäisenä laattakenttänä. Tästä syystä siltanosturin kuormat eivät jakaudu mitenkään hallissa muille pilareille.

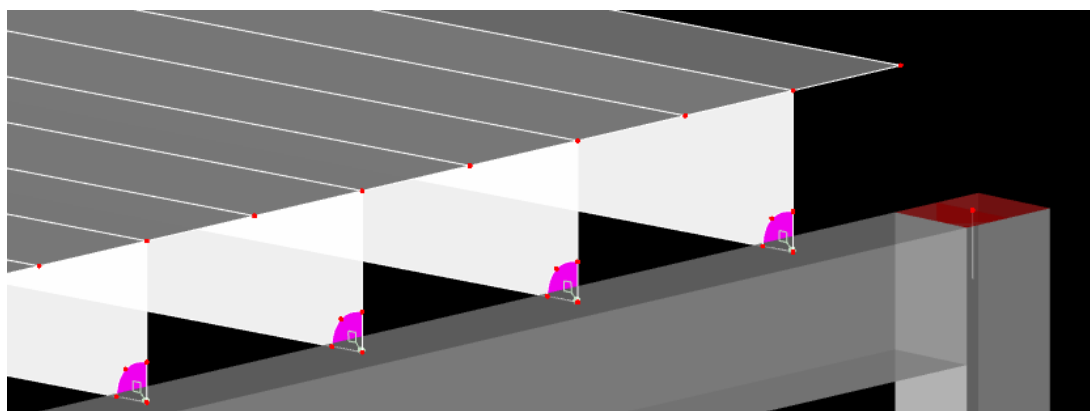


KUVA 14. Kahden kehän momentit ja rakennemalli (Laitinen 2014-02-05)

4.4 TT-Laataston mallinnus yhtenäiseksi levyksi

Seuraavaksi selvitettiin *Dlubal*n teknisestä tuesta, kuinka yhtenäinen laatastokenttä olisi mallinnettava *RFEM*llä. Vastaus oli, että laatasto voidaan mallintaa laattatyökalun avulla tekemällä TT-laatan muotoinen laatasto pysty- ja vaakasuoraan. Tällöin laattojen väliset rajapinnat ovat automaattisesti täysin jäykät ja koko pintarakenne toimisi yhtenä jäykkänä laattana. Samassa yhteydessä neuvottiin tekemään pystylaattojen nurkkiin jäykät pyöreäreunaiset laattapalat, jotta vältetään singulariteettivirheeltä. (Günthel 2014-02-04.) Kuvassa 15 havainnoidaan tätä mallinnustapaa.

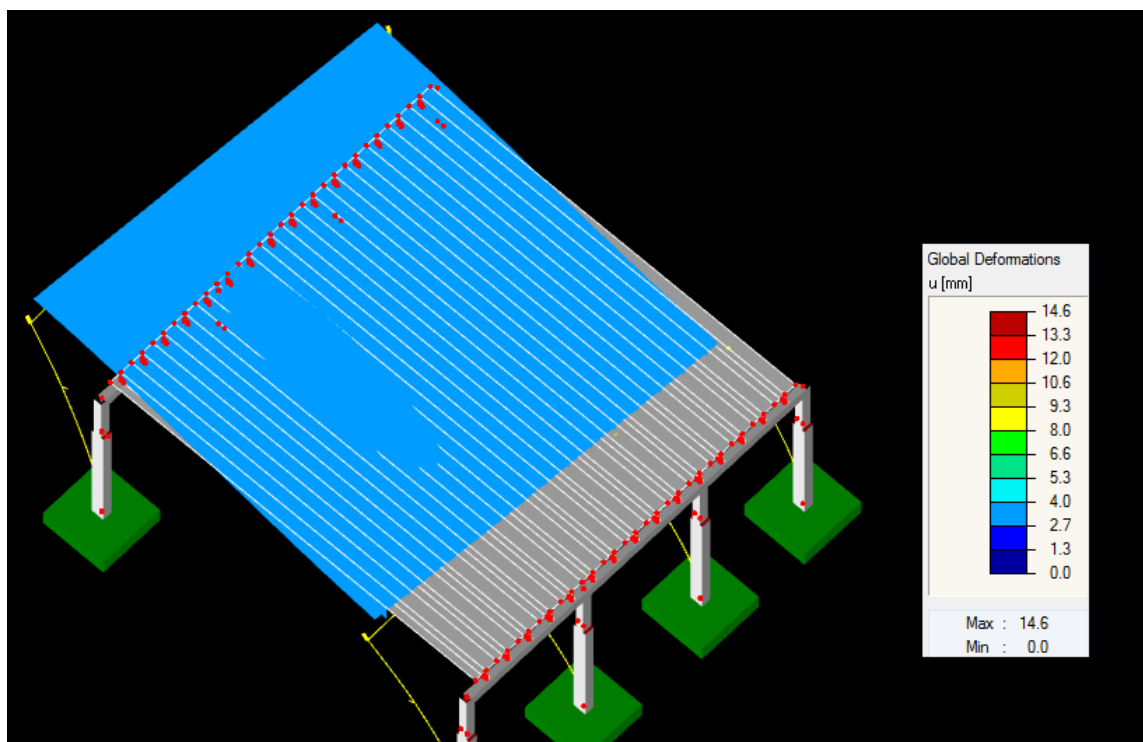
Singulariteettivirhe tarkoittaa laskentaohjelmissa esiintyvää ongelmaa. Esimerkkinä voidaan pitää laatan nurkkapistettä, johon aiheutuu sitä suurempi jännitys, mitä pienemmäksi elementtiverkon tiheys määritetään. (Günthel 2014-02-04.) Suunnittelijan täytyy ymmärtää, että nurkkapisteen jännitysarvot eivät välttämättä pidä ollenkaan paikkaansa, vaan referenssiarvo on otettava keskemältä laattaa.



KUVA 15. TT-laataston malli laattatyökalun avulla (Laitinen 2014-02-05)

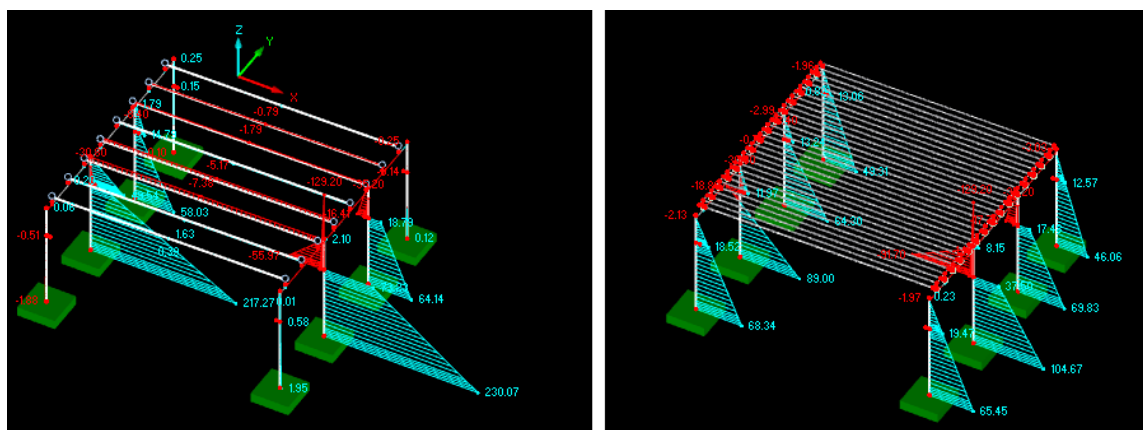
Kuvassa 15 on pystyssä olevat ripoja kuvaavat laatat tehty 120 mm:n paksuisiksi ja vaakaan oleva kansi 50 mm:n vahvuiseksi. Vaakalaatat on jaettu 750 mm:n välein, jolloin pystylevyt tulevat oikein 1500 mm:n välein ja laatasta on helppo kopioida. Nurkkiin on tehty pieni jäykkä *Rigid*-laatta, jonka säde on 200 mm ja jonka reuna laattaan päin on täysin pyöreä singulariteettivirheen välttämiseksi.

Tässä vaiheessa yksi kehä on lisätty molemmille puolille edellistä mallia, jolloin kehiä on yhteensä 4 kpl. Muodonmuutoskuva 16 näyttää selkeästi, miten mallinnettu laatasto toimii yhtenäisenä levynä.



KUVA 16. Laataston muodonmuutos levymäisesti (Laitinen 2014-02-05)

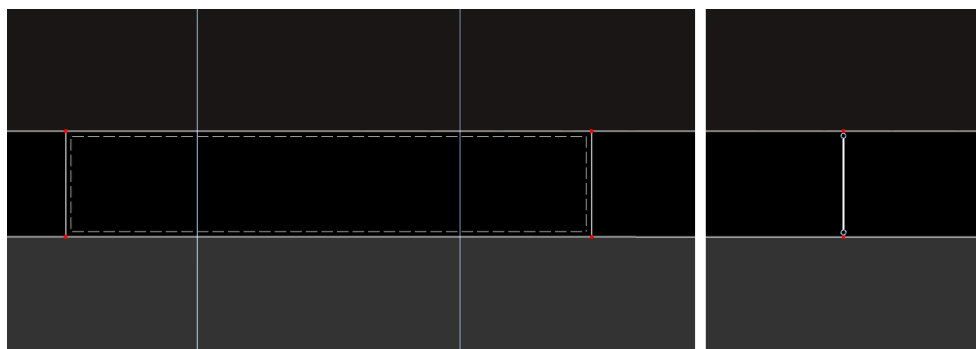
Kuvan 17 vasen puoli näyttää, kuinka pelkät siltanosturikuormat aiheuttavat momenttia pilarin alapäähän, kun kuormat eivät jakaudu laataston avulla. Tuloksena saatu momentti on 230 kNm, kun taas oikealla puolella kuvassa 17 momentit ovat jakautuneet laataston vaikutuksesta huomattavasti tasaisemmin. Mitoittava momentti on tässä tapauksessa enää 105 kNm. Nosturikuormista aiheutunut suurin momentti on siis tällä laatastomallilla pudonnut noin 46 %.



KUVA 17. Momenttien jakautuminen TT-palkkien ja TT-levyn välityksillä (Laitinen 2014-02-05)

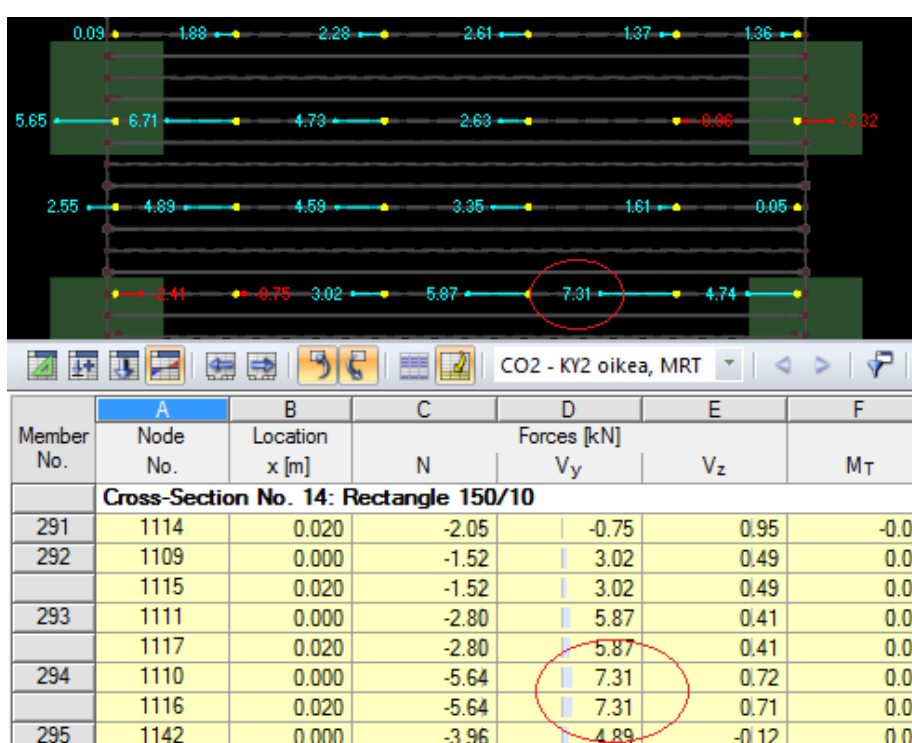
Tämä tapa tehdä TT-laatasto ei kuitenkaan anna kuvaa siitä, millaiset voimat kohdistuvat laataston TR39 ja TR44 -kiinnikkeisiin. Levyvaikutus laatasto on ottaa huomioon ainoastaan silloin, kun TR-kiinnikkeet kestävätkä niille tulevat vaakakuormat.

Seuraavassa vaiheessa tavoitteena oli mallintaa TT-laattojen TR-kiinnikkeet. Tämä toteutettiin siten, että TT-laattojen väliin jätettiin 20 mm:n rako. Laatat yhdistettiin niistä pisteistä, joissa TR-kiinnikkeitä oli yläpohjakuovassa liitteessä 1. Jako kiinnikkeillä on noin 4000 mm, eli yhden laatan reunalle mahtuu kuusi kiinnikettä. TR-kiinnikkeet mallinnettiin aluksi 10 mm:n vahvuisella S235 metallilaatalla. Laatan tuloksia oli vaikea havainnoida ja todettiin, että TR-kiinnikkeet on järkevämpi mallintaa palkkina, jolloin siihen kohdistuvat voimat on selkeämpi tarkistaa (kuva 18).



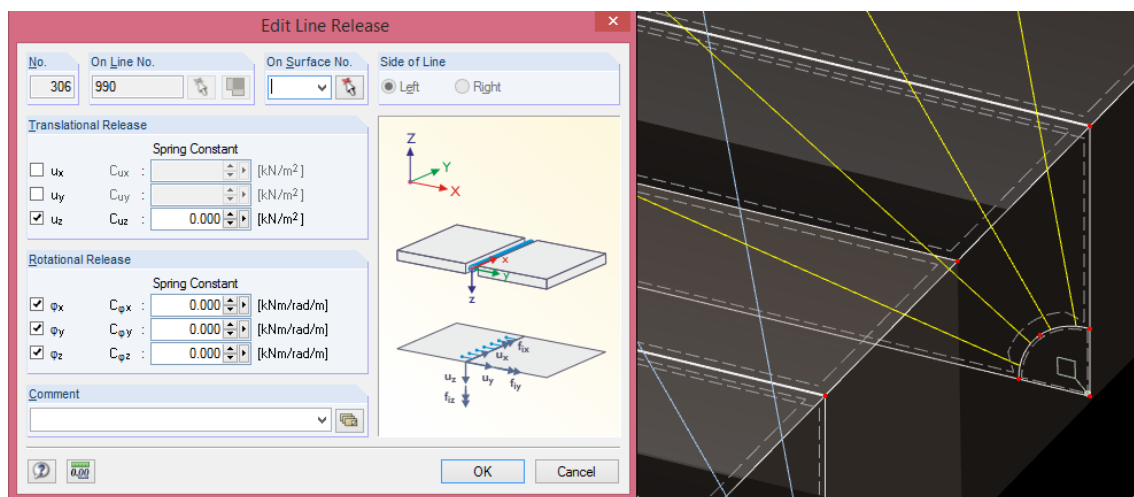
KUVA 18. Laattana ja palkkina mallinnetut TR-kiinnikkeet laatojen välissä (Laitinen 2014-02-05)

Kuvasta 19 ilmenee, kuinka kuormitusyhdistelmä 2:ssa eli mitoittavassa kuormitusyhdistelmässä vaakakuormat aiheuttavat leikkausrasitusta TR-kiinnikkeille. *RFEM* syöttää tulokset myös taulukko muodossa, josta on helppo tarkastaa suurimmat aiheutuneet vaakavoimat koko laataston TR-kiinnikkeille. Tulokset ovat kuitenkin todennäköisesti liian pieniä, koska mitoittava momentti ilman TR-kiinnikkeitä siten, että laatat eivät ole kiinni toisissaan, on 858 kNm. Kuitenkin kyseisen momentin pitäisi olla ilman kiinnikkeitä edelleen noin 1060 kNm ensimmäisen kertaluvun mukaan laskettuna eli 200 kNm isompi. Ongelman arvioitiin johtuvan siitä, että TT-laatan kiinnitys palkkiin on tällä tavalla tehtynä jäykkä eli momenteja siirtävä kiinnitys, kun se pitäisi olla nivelellinen.



KUVA 19. TR-kiinnikkeille tulevat leikkausvoimat (Laitinen 2014-02-06)

Momentit ilman TR-kiinnikkeitä saatiin oikean suuruiseksi tekemällä *Line Release*-työkalulla pystylaan ja *Rigid*-nurkkalaatan väliin rajoituksia siihen, mitä voimia tämä rajapinta siirtää (kuva 20). Oletuksena oli, että pelkkien momenttien rajoitus riittää, mutta kokeilemalla huomattiin oikeiden tulosten tulevan vain silloin, kun myös Z-suunnassa rajoitettiin rajapinnan sisäisten voimien siirtymiä. Tällä systeemillä suurin momentti on noin 1053 kNm eli sen voitiin todeta olevan oikeassa suuruusluokassa.

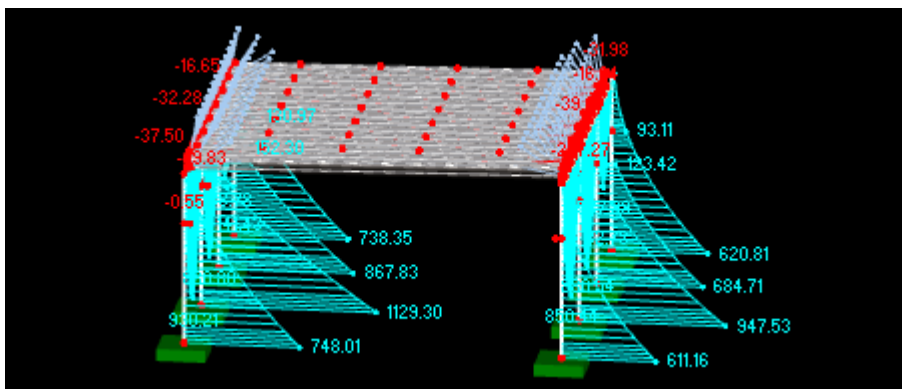


KUVA 20. *Line Release*-työkalulla tehty sisäisten voimien vapautus (Laitinen 2014-02-18)

4.5 Laataston pistekuorman muuttaminen tasaiseksi kuormaksi

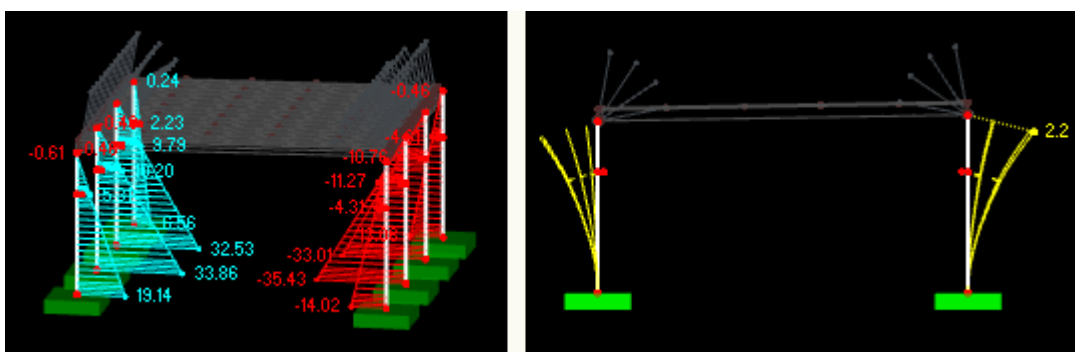
Todettiin, että tulokset olisivat lähempänä todellista tilannetta, jos myös TT-laatoille annettaisiin omapaino sekä tasainen neliökuorma yläpuolisista rakenteista. Samalla pilarit yhdistävät JK-palkit saisivat oikeat voimasuuret yläpuolen rakenteista ja malli olisi näin lähempänä oikeaa tilannetta ja tulokset parempia. Käytännössä TT-laataston betonin kimmomoduulia muutettaisiin, jotta taipumat eivät kasvaisi järjettömän suuriksi. Ne rajoitetaan suunnilleen arvoon $L/250$ eli noin 100 mm:iin.

Tämä vaihe osoittautui kuitenkin ongelmalliseksi, koska mitoittava momentti vaihtoikin tuntemattomasta syystä puolta kuvan 21 mukaisesti ja tulokset olivat erisuuruisia. Lähtökohtaisesti uuden mallin momenttien olisi tullut olla samaa luokkaa kuin edellisessä mallissa. Muutoksia tehtiin vain omapainoon ja lumikuormiin muuttamalla ne neliökuormiksi. Muutetut arvot tarkastettiin useaan kertaan ja verrattiin pilareiden alaosan tukireaktioihin, jotta ne täsmäsivät ennen muutosta tehtyihin tukireaktioihin. Kimmomoduuli oli säädetty siten, että taipuma oli noin 80 mm tässä esimerkissä.



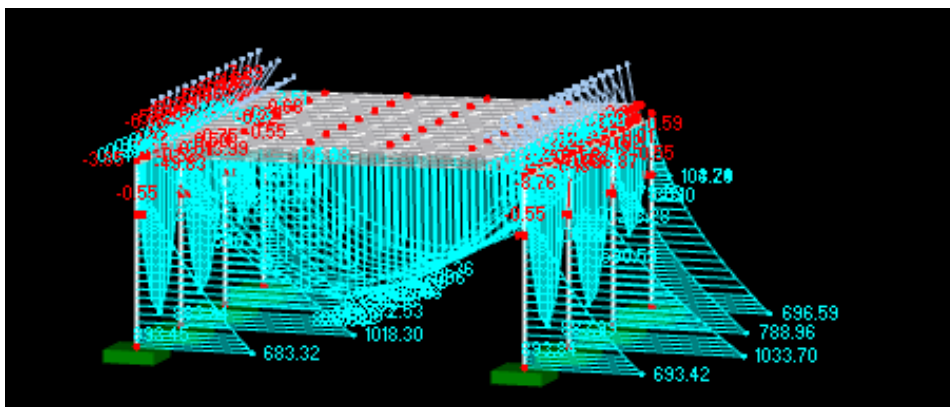
KUVA 21. TT-laataston omapainon lisäyksen jälkeiset momentit (Laitinen 2014-02-18)

Ongelmaa tutkittiin ja pohdittiin, ja lopuksi huomattiin omapainon kuormituksen aiheuttamissa taipumissa epäselvyys. Tämä havaittiin, kun tarkasteltiin muodonmuutoksia pelkällä rakenteen omapainolla siten, että omapainosta johtuva vaakakuorma otettiin pois. Huomattiin, että rakennus leviää pilarien yläpäissä kuvan 22 vasemman puolen mukaisesti. Tämä aiheutti pilarien alapäihin suuret momentit, vaikka niiden olisi pitänyt olla lähellä nollaa pelkän omapainon osalta. Edellä mainittu omapainon vaakakuorma aiheutuu yläpohjan vinoudesta, ja kuormien suuruudet voi tarkastaa liitteestä 3.



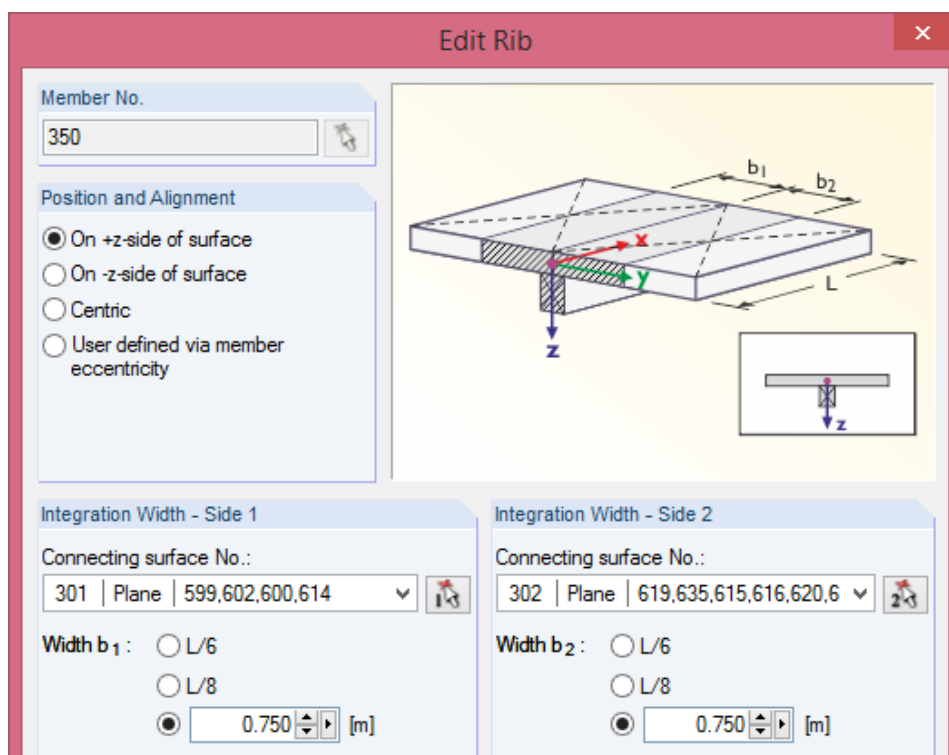
KUVA 22. Pystykuormista johtuva kehän leviäminen ja momentit (Laitinen 2014-02-18)

Verrattaessa taipumia alkuperäiseen TT-palkeilla tehtyyn malliin, huomataan, että siinä taipumat eivät ole levinneet molemmille puolille, vaan pilarit kaartuvat samalle puolelle. Kun levinneessä mallissa omapainoon lisätään nyt vasemmalle vaikuttava omapainon vaakakuorma, ovat momentit käytännössä kaksinkertaistuneet vasemmalla puolella ja kumoutuneet oikealla. Tämä selitti suuren eron mallien välillä ja mitoittavan momentin vaihtumisen puolelta toiselle. Tästä syystä lisättiin betonin kimmomoduulin arvo käytännössä niin suureksi, ettei taipumaa ole. Momentit näyttävät oikeaa suuruusluokkaa kuvassa 23 vaikka ovatkin hieman laskeneet. Tässä vaiheessa mallissa ei siis ole TR-kiinnikkeitä.



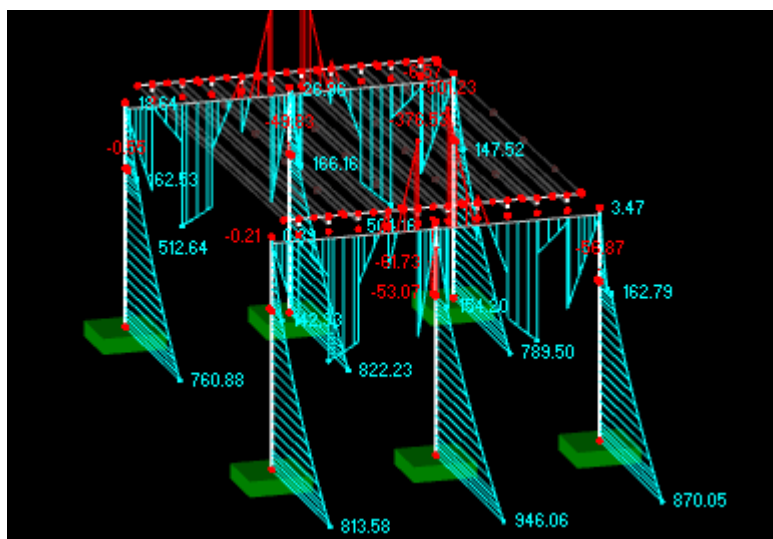
KUVA 23. Momentit omapainon ollessa normaalisti myös TT-laatastolla (Laitinen 2014-02-18)

Laatasto yritettiin mallintaa myös *RFEM*stä löytyvällä *Rib*-erikoispalkkityökalulla, jolla palkin voi liittää jäykästi yläpuolella olevaan laattaan (kuva 24). Ideana oli, että TT-laataston kiinnitys JK-palkkiin olisi samanlainen kuin TT-palkeilla mallinnettaessa. Tässä esimerkissä TT-laatasto liitettiin päistään palkkeihin *Coupling*-palkkityökalulla, jonka päässä oli momenttivapautus. *RFEM*n ohjeen mukaan (Dlubal Software 2013, 128) tällainen palkkityökalu siirtää yhdessä pisteessä vaikuttavat voimat täysin toiseen pisteeseen.



KUVA 24. Rib-palkin määrittäminen laatastolle (Laitinen 2014-02-20)

Eri vaihtoehtoja kokeilemalla ei voitu päästä varmoihin tuloksiin, sillä mitoittavat momentit olivat kuvan 25 mukaisesti vain 950 kNm:n luokkaa eli noin 100 kNm:ä pienempiä kuin vertailulaskussa. Tätä mallinnustapaa ei tutkittu enempää, koska momentit jäivät vajaiksi ja JK-palkeille tulevat momenttikuvaajat näyttivät varsin epämääräisiltä.

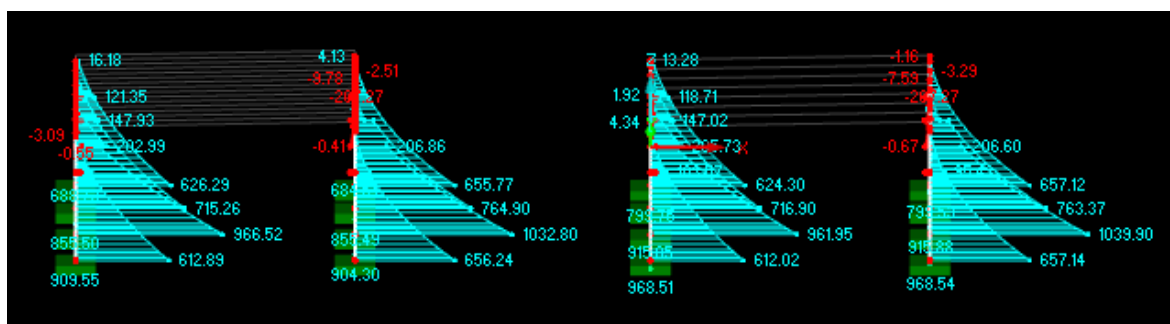


KUVA 25. Momentit *Rib*-tyypin TT-palkkilaatastolla (Laitinen 2014-02-20)

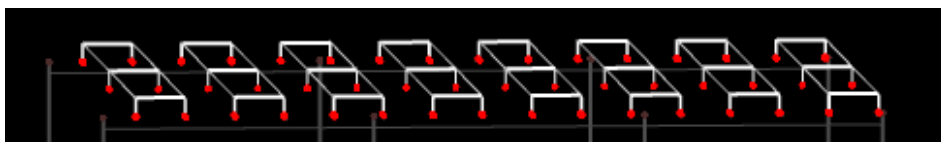
4.6 TT-Laatan neljän tukipisteen vaikutus malliin

Tärkeä oivallus työn etenemisen kannalta oli, että *Moment Release*-työkalulla tehdyt Z-suunnan vapautukset aiheuttivat vain sattumalta samoja tuloksia kuin esimerkkilaskussa. Ensimmäinen askel virheen huomaamiseen oli se, että muutettiin alkuperäistä TT-palkeilla mallinnettua rakennetta. Alun perin malli oli tehty siten, että TT-palkit olivat 3 metrin välein toisistaan. Nyt mallia muokattiin siten, että laatasto mallinnettiin 1,5 m:n välein olevilla T-palkeilla, koska TT-laatastossakin rivat ovat tällä jaolla. T-palkkeja ei kuitenkaan liitetty mitenkään toisiinsa. Haluttiin selvittää, onko useammalla tukipisteellä vaikutusta mallin momentteihin.

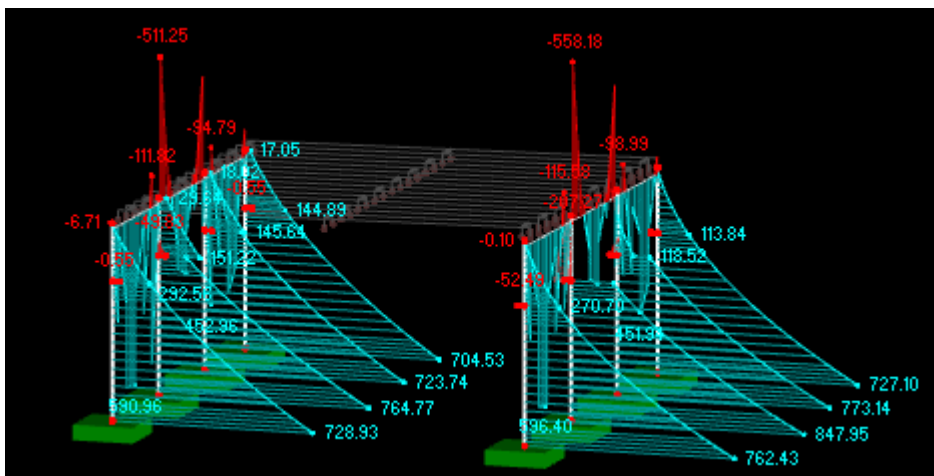
Momentit kuvassa 26 osoittavat, että suurta eroa ei saavutettu tällä muutoksella. Momentin maksimi pieneni vähän T-palkeilla, eli momentit jakautuvat hieman paremmin tällä mallinnustavalla. Seuraavaksi kokeiltiin vaihtoehtoa, jossa kaksi vierekkäistä palkkia liitetään toisiinsa jäykästi siten, että kaksi T-palkkia muodostaa TT-palkin. Tällöin TT-palkilla olisi neljä tukipistettä. T-Palkit liitettiin kolmella normaalilla palkilla kolmesta kohdasta jäykästi yhteen kuvan 27 mukaisesti. Kuvan 28 tuloksissa momentit ovat pienentyneet lähes 200 kNm.



KUVA 26. T-Palkiston ja TT-palkiston momenttierot (Laitinen 2014-02-20)

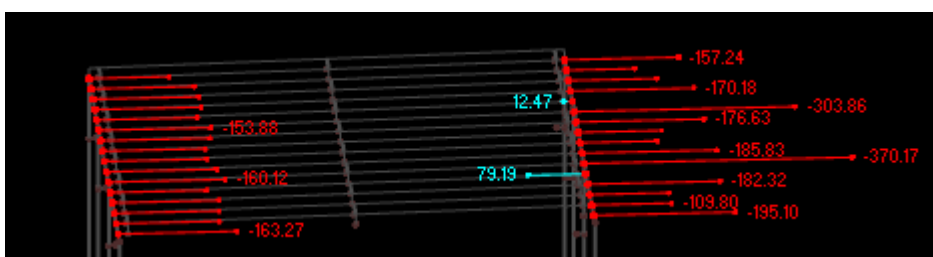


KUVA 27. Toisiinsa sidotut T-palkit (Laitinen 2014-02-20)



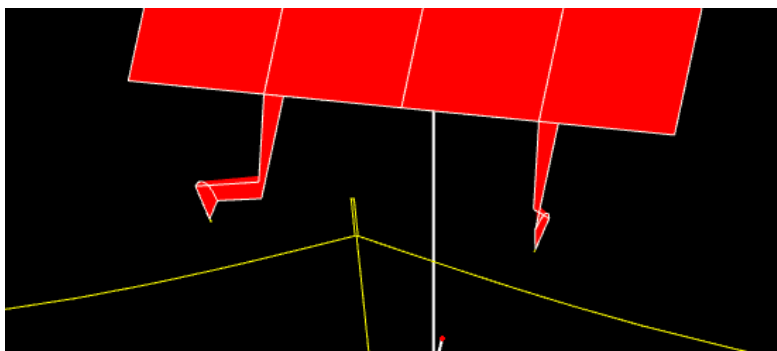
KUVA 28. Sidottujen T-palkkien momenttijakauma (Laitinen 2014-02-20)

Tulokset eivät ole todellisuutta vastaavia, koska JK-palkkien momenttikuvaajat eivät näytä oikeilta. Momenttikuvaaja osoittaa, että kuormat eivät tule tasaisesti TT-laatastolta JK-palkeille, eli omapainon kuormat vääristyvät T-palkkien sidonnan takia. TT-laataston ripojen päiden alle on lisätty tässä vaiheessa pieni apupalkki kuvaamaan neopreenipaloja ja siihen kohdistuvia voimia (kuva 29). Näiden normaalivoimasta voidaan tehdä sama päätelmä: kuormat jakautuvat epätasaisesti.



KUVA 29. Neopreenipalojen epätasaiset normaalivoimat (Laitinen 2014-02-20)

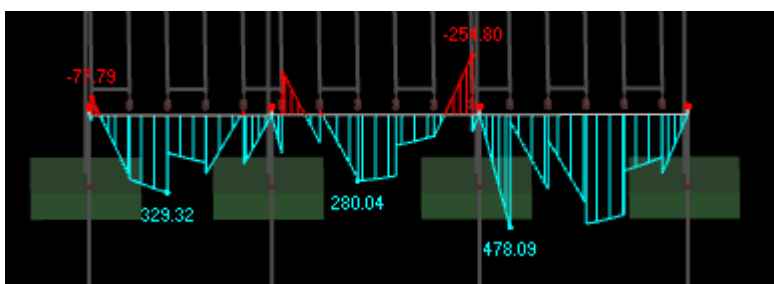
Kun ymmärrettiin, että momentit pienenevät sen jälkeen, kun TT-palkki on kiinnitetty neljästä pisteestä JK-palkkeihin, huomattiin TT-laataston muodonmuutoksissa syy, miksi objektin Z-suunnan *Line Release* -vapautus aiheutti samat momentit kuin kahden pisteen palkkikiinnityksessä. Kuva 30 havainnoi, kuinka Z-suunnan voiman vapautus aiheutti rakenteessa sen, ettei rakenteella ollut enää jäykistävää voimaa kyseisessä suunnassa. Rakenne toimi samalla tavalla kuin se olisi ollut kahdella pisteellä kiinni oleva nivel. Tästä syystä myös tulokset esimerkkien kesken olivat samoja ja harhaanjohtavia.



KUVA 30. Siirtymät ripojen Z-suunnassa (Laitinen 2014-02-20)

4.7 Ylimääräiset jännitykset TT-laatoilla

Seuraava ratkaistava ongelma oli selvittää, miksi rivoilta tulevat normaalivoimat neopreenipaloille eivät olleet tasaisia. Kuva 31 osoittaa, että epätasainen kuormitusjakauman vuoksi JK-palkkien momenttikuvaajat ovat epämääräisiä. Käytännön elämässä normaalivoimat kuitenkin ovat ehdottomasti lähellä toisiaan, eikä kuvan 29 mukaisia nostavia voimia tule missään nimessä vastaan.



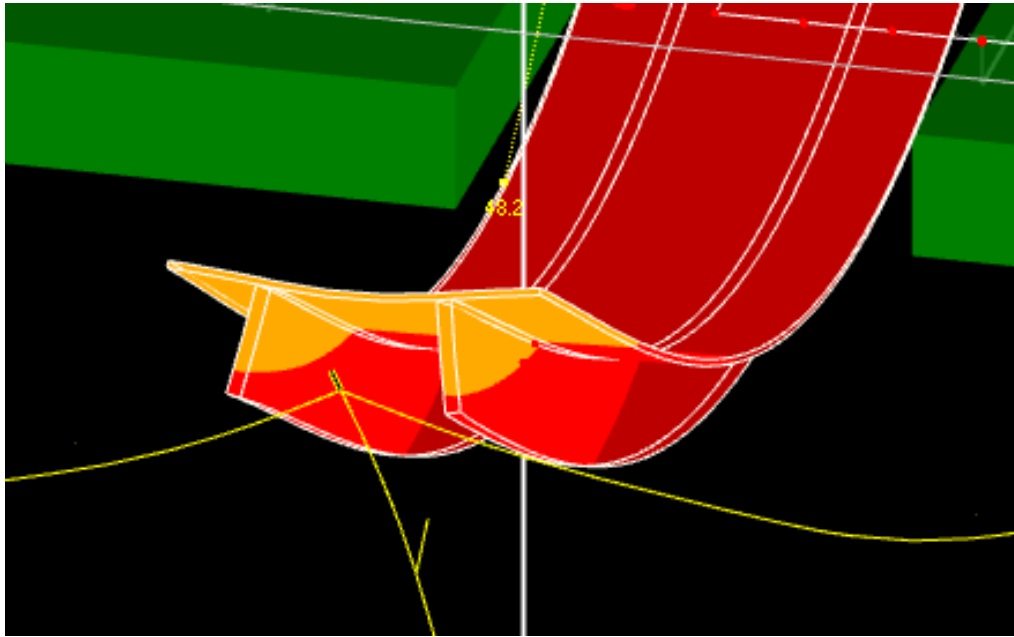
KUVA 31. Rivoilta tulleiden voimien aiheuttamat momentit palkeille (Laitinen 2014-02-27)

Ongelma ratkaistiin aluksi siten, että joka toiseen ripakiinnitykseen tehtiin vapautus palkin suunnassa oleville voimille samalla idealla kuin kuvassa 30. Tämä toimenpide normalisoi palkkien momenttikuvaajat, mutta sama ongelma tuli vastaan heti uudestaan, kun TR-kiinnikkeet lisättiin. Momenttikuvaajat ovat jälleen epämääräisiä.

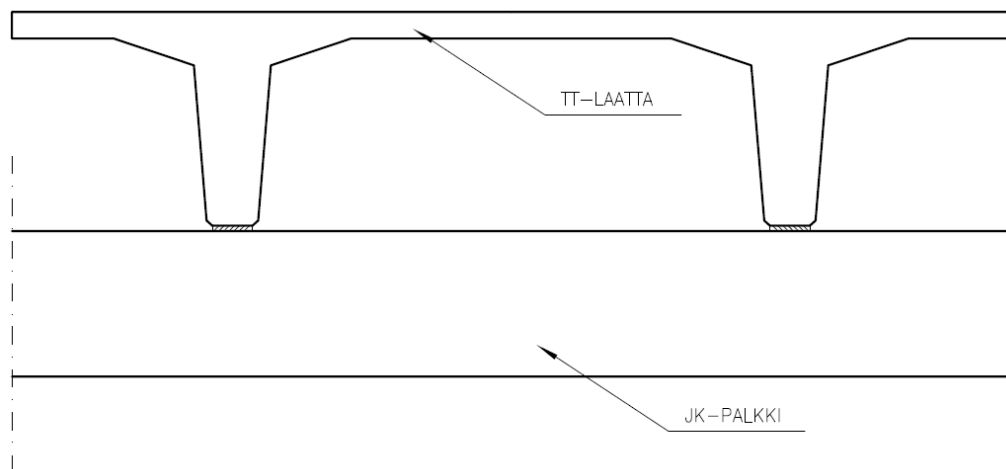
Ongelman ydin havaittiin mietittäessä todellista työmaatilannetta verrattuna malliin. Mallissa tulleet taipumat laattojen ja palkkien suunnassa aiheuttavat TR-kiinnikkeisiin ylimääräisiä jännityksiä, joita ei todellisessa tilanteessa kuitenkaan tule. Palkkien ja TT-laattojen taipumat ovat suurimmaksi osaksi jo tulleet ennen kuin TR-kiinnikkeitä hitsataan rakenteisiin, eivätkä taipumat siten vaikuta lähellekään niin paljon TR-kiinnikkeisiin, kuin tämä malli osoittaa tuloksissa. Käytännössä mallin ripojen kiinnitys pitäisi osata mallintaa siten, että ne eivät ota huomioon taipumia, ja toisaalta TR-kiinnikkeet tulisi mallintaa siten, että se ei ota huomioon ripalaatan taipumia. Yritettäessä tehdä näitä vapautuksia ei rakennetta onnistuttu mallintamaan siten, että *RFEM* suostuisi laskemaan yhtälöitä, koska siirtymät tulevat äärettömän suuriksi.

Kuvassa 32 on korostettu TT-laatan taipumia, ja itsessään se on mallinnettu 3D-elementtinä. Sisäänpäin kääntyvät rivat ja laattaosan taipuma osoittavat, että laatan sisälle tulee jännityksiä, koska

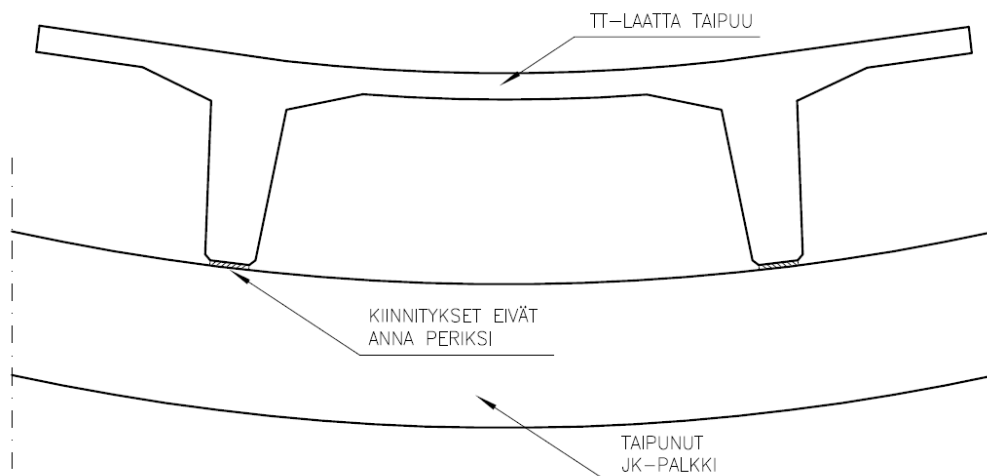
ripojen kiinnitykset palkkiin eivät pääse liikkumaan JK-palkkien taipuessa. Kuvat 33 - 35 selkeyttävät eron mallinnetun rakenteen ja todellisen rakennetun rakenteen välillä.



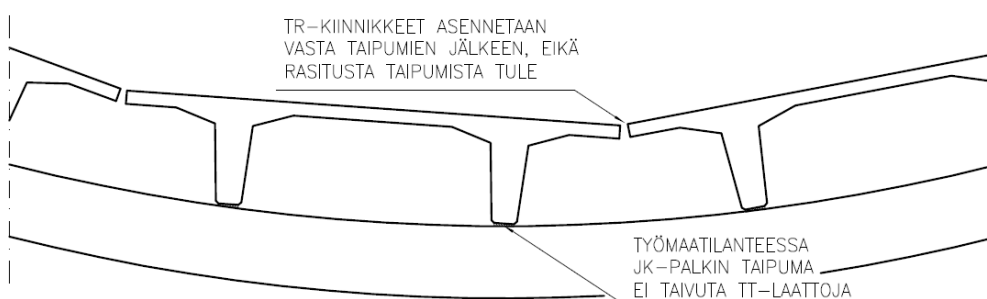
KUVA 32. 3D-Elementtinä mallinnetun TT-laatan taipumat (Laitinen 2014-03-03)



KUVA 33. Mallinnetun TT-laatan lähtökohta ennen laskentaa (Laitinen 2014-03-24)



KUVA 34. Mallinnetun TT-laatan ongelma laskennan jälkeen (Laitinen 2014-03-24)



KUVA 35. Todellinen olosuhde kiinnikkeisiin kohdistuvien rasitusten suhteen (Laitinen 2014-03-24)

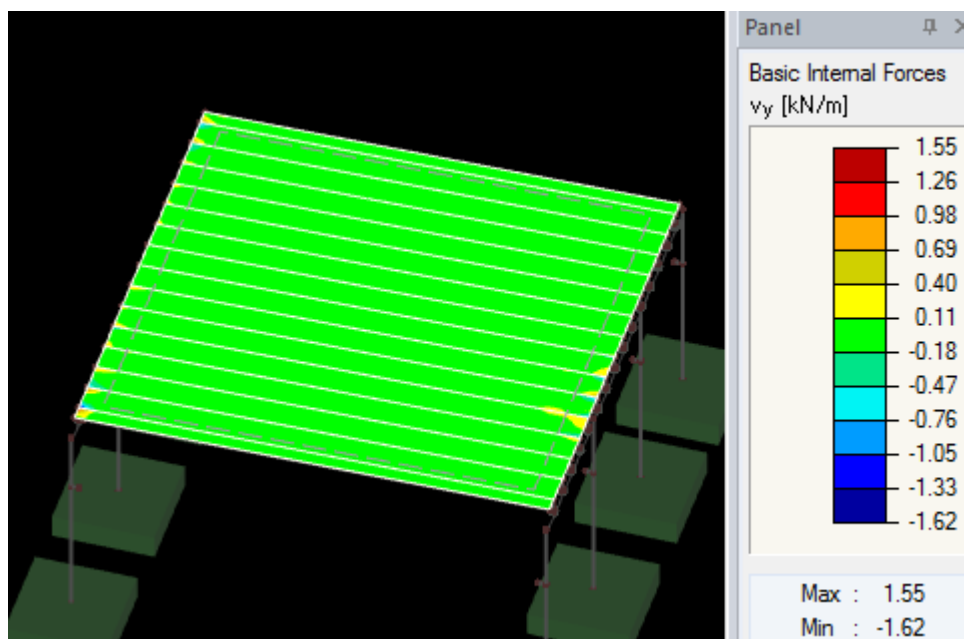
Todettiin, että liian tarkasti mallinnettaessa tulee vastaan ns. sekundääri-ilmiöitä, jotka eivät kuitenkaan vastaa todellista tilannetta. Nyt tehdyssä mallissa yksi sekundääri-ilmiö on ylimääräisten jännitysten esiintyminen rakenteessa, joita ei todellisuudessa ole. Todettiin, että malliin on tehtävä yksinkertaistuksia, joilla tällaiset ilmiöt suljetaan pois.

4.8 TR-kiinnikkeisiin kohdistuvat voimat

Prosessikuvauksessa edellä on todettu, että laataston ja palkiston taipumat aiheuttavat ylimääräisiä jännityksiä, joita ei todellisuudessa kohdistu TR-kiinnikkeisiin. Tästä pääteltiin, että lähimmäksi todellisuutta vastaavia arvoja päästään siten, että laatasto ja palkisto mallinnetaan ilman omapainoa, kuten prosessin alussa tehtiin pelkän laataston osalta. Tällöin taipumat eivät aiheuta rasitusta kiinnikkeille, ja omapaino lisätään pilarien päihin jälleen samana pistekuormana. Todellisuudessa pieniä jännityksiä tämän lisäksi kiinnikkeisiin tulee mm. laattojen kutistumisesta ja epätasaisuuksista taipumissa, mutta tällä mallinnustavalla saadaan oikeaa suuruusluokkaa olevia tuloksia. Tämä tapa ei ota huomioon toisen rivin alla olevaa neopreenikaistan kitkakerrointa, joka itsessään hieman parantaa tilannetta, joten tulokset ovat mitoituksen kannalta ns. turvallisella ja varmalla puolella.

Vaihtoehtoa mallintaa TT-laataston kansilaatta yhtenäisenä laattana oli myös harkinnassa. Laatan leikkausvoimakuviosta saataisiin tietoja siihen kohdistuvista leikkausvoimista. Tämä tapa ei kuiten-

kaan antanut havainnollisia tuloksia leikkausvoimien ollessa 1 kN:n luokkaa, ja niiden jakautuminen oli epämääräinen antamatta mitään merkittävää tietoa, kuten kuvassa 36 näkyy. Ei ollut merkitystä, mistä suunnasta voimia katsottiin.

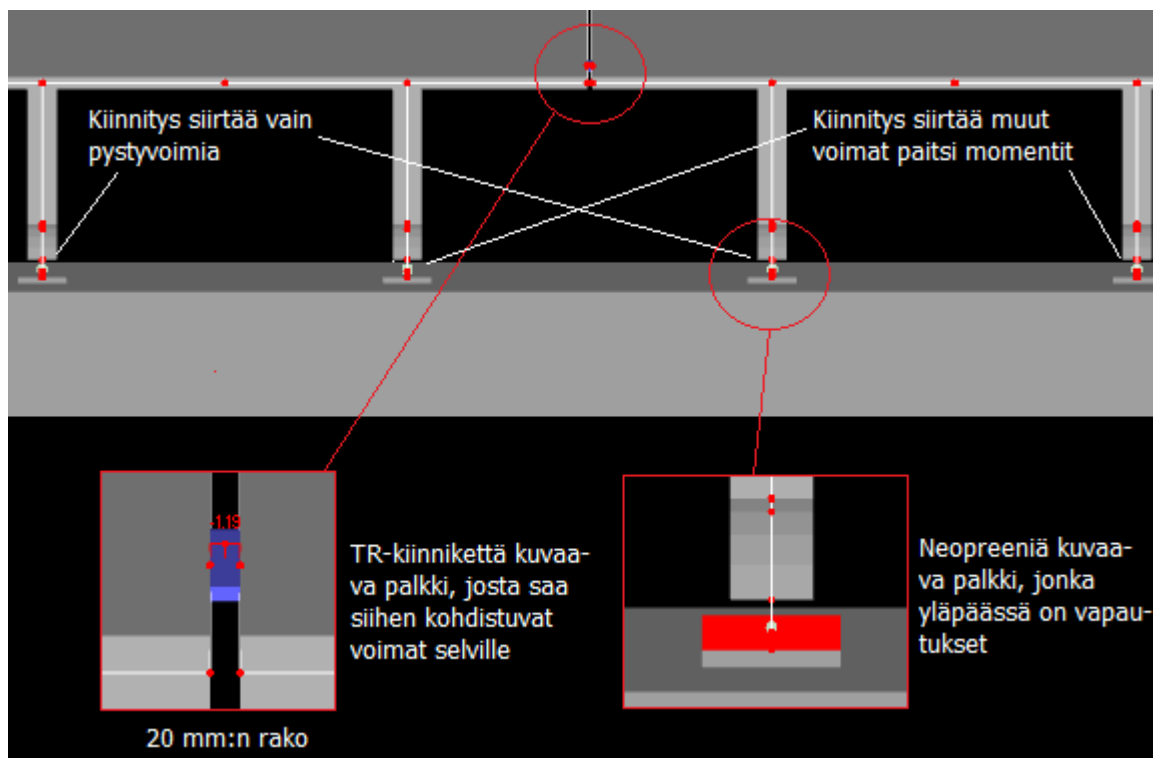


KUVA 36. Yhtenäisen laatan leikkausvoimat (Laitinen 2014-03-03)

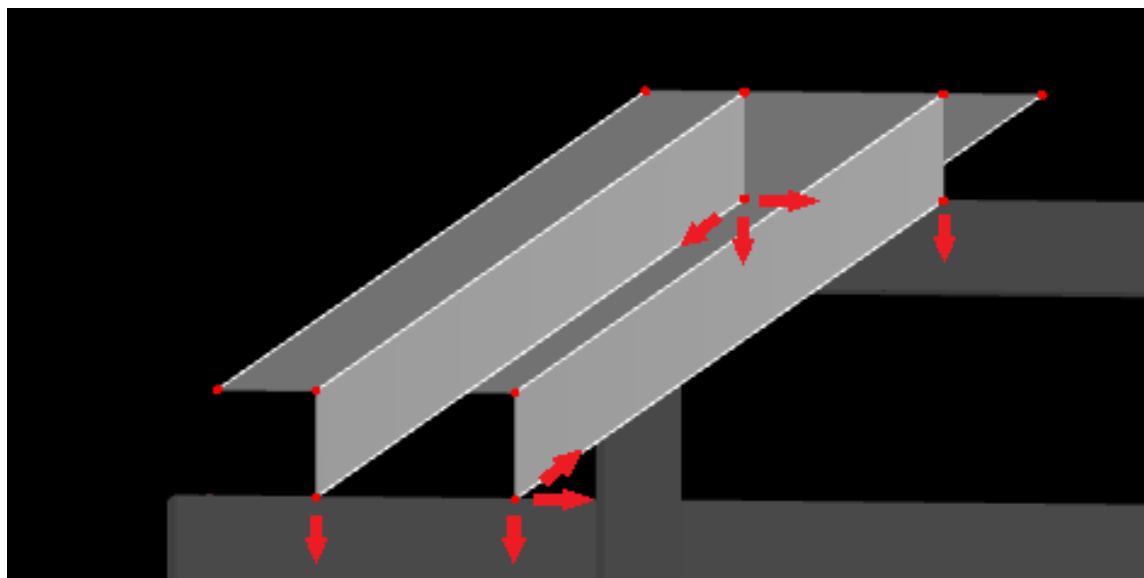
Lopulliset tulokset TR-kiinneille kohdistuvista voimista saatiin mallintamalla laatasto samalla tavoin kuin kuvan 19 tulosten saannin yhteydessä, mutta ilman omapainoa: TT-laatan rivat ja levy oli tehty laattatyökälulla ja rakennettu vastaamaan TT-laatan mittoja. TT-laatat kiinnitettiin toisiinsa TR-kiinnikkeillä. Erona oli, että laataston kulmiin oli tehty kuvan 37 mukaiset vapautukset jokaiseen laattaan. TT-laatan toisessa päässä nämä vapautukset olivat toisinpäin, eli ristikulmat oli vapautettu aina samalla tavalla. *Line Release* -työkälulla tehdyt vapautukset poistettiin, koska niillä ei huomattu olevan vaikutusta lopputulokseen.

Mallia yritettiin tehdä myös *Rib*-tyypin palkisto-laatastolla, kuten kuvassa 24, mutta vaikka mitoittava momentti näytti samalta, ei kuormien jakautuminen TR-kiinnikkeillä näyttänyt ollenkaan oikealta. Näiden edellä olleiden huomioiden ja kokeilujen pohjalta pääteltiin, että TT-laatasto tulisi mallintaa tässä vaiheessa edellisen kappaleen kuvauksen mukaisesti. Kuvat 37 - 38 havainnollistavat TT-laataston kiinnityksiä.

Työmaatilanteessa liitokset ovat TT-laatan rivan jokaisessa nurkassa neopreeniliitoksia ja ne siirtävät myös vaakavoimia. Tällainen neljän pisteen kiinnitys aiheuttaa samat momentit lopputuloksessa kuin tässä toteutettu kiinnityssysteemi. Ongelmana täydessä neljän pisteen kiinnityksessä on, että laskentaohjelma antaa huomattavasti pienempiä tuloksia TR-kiinnikkeille kohdistuvista voimista kuin kahden pisteen vaakavoimakiinnitys. Todellinen tilanne on todennäköisesti jossain näiden kahden tavan välimaastossa, mutta tässä työssä päätettiin tehdä tällainen yksinkertaistus, jotta ollaan ns. turvallisella puolella laskennassa, eivätkä tulokset ole näin ainakaan liian pieniä.



KUVA 37. TT-Laataston kiinnityskohdat (Laitinen 2014-03-10)



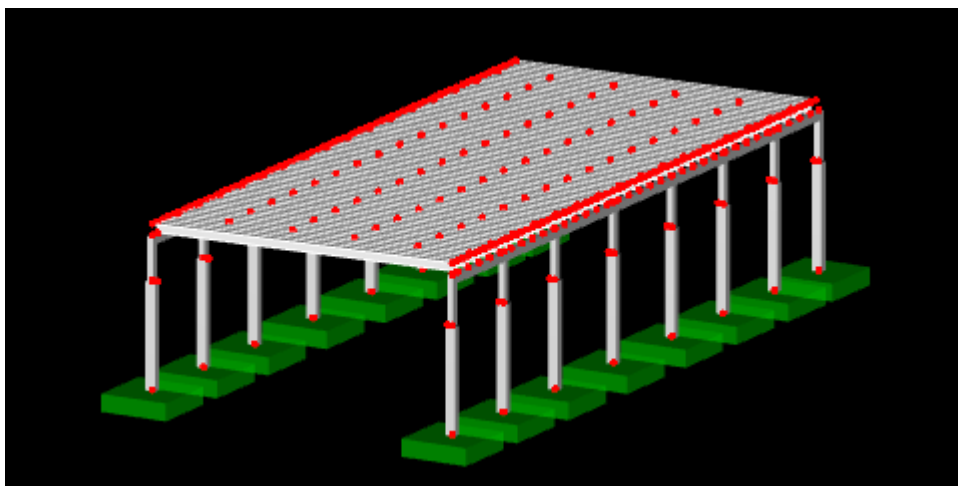
KUVA 38. TT-laatan kiinnitysten siirtämien voimien suunnat (Laitinen 2014-03-24)

Ennen koko hallille tehtävää analysointia tarkastetaan vielä, että pilareiden momenttien summa täsmää siirryttäessä palkeilta laataston käyttöön. Tämä momenttiverailu osoitti, että laatasto toimii hyvin jäykistävänä rakenteena ja jakaa momentit pilareiden juurissa oikein. Taulukossa 3 on mallin pilarit jaettu numeroihin ja molempien mallien vastaavalla paikalla olevia pilareita on verrattu toisiinsa. Yhteenselaskettujen tulosten ollessa lähes samat voidaan päätellä, että malli toimii myös tässä suhteessa oikein.

TAULUKKO 3. Pilarien momenttien vertailu TT-palkiston ja TT-laataston välillä (Laitinen 2014-03-10)

Pilari	Laatasto palkkeina	Laatasto levymäisenä
1	660 kNm	768 kNm
2	1001 kNm	822 kNm
3	757 kNm	783 kNm
4	665 kNm	739 kNm
5	702 kNm	799 kNm
6	1078 kNm	872 kNm
7	801 kNm	800 kNm
8	696 kNm	773 kNm
Yhteensä	6360 kNm	6356 kNm

Tarkistuksen jälkeen mallinnettiin koko halli liitteen 1 mittojen mukaiseksi (kuva 39) ja aloitettiin tulosten tarkastelu. Pelkkien juurimomenttien tarkastelun kannalta ei ole väliä, mallintaako TT-laataston rakenteen pelkkänä yhtenä isona levynä vai TR-kiinnikkeineen. Tämä halli mallinnettiin TR-kiinnikkeineen, jotta niiden voimat voidaan myös tarkastaa koko laatastolla. Lopullisesta hallista poistettiin myös kulmista *rigid*-laatat, jotka ehkäisevät singulariteettivirheen. Virhe on mallissa, mutta koska laattojen jännityksiä ei tutkita, ei ripojen nurkkien jännityksillä ole merkitystä. Tämä ongelma on otettava huomioon lähinnä esimerkiksi paikalla valetun välipohjalaatan mitoituksen kohdalla.



KUVA 39. Mallinnettu mastopilarihalli (Laitinen 2014-03-10)

4.9 Toisen kertaluvun momenttiero

Työn lopulla todettiin, että olisi tärkeää selvittää, mistä alussa huomattu toisen kertaluvun mukaan laskettu momenttiero johtui. Eroa on pohdittu läpi työn etenemisen ja tultiin siihen tulokseen, että todennäköisesti ohjelmat laskevat toisen kertaluvun tulokset eri teoriapohjan mukaan. Vertailulaskut *Frame Analysis* -ohjelmalla on tehty vanhan B-normin kertoimien mukaan, ja ymmärrettiin vasta prosessin lopussa, että myös toisen kertaluvun momentti on laskettu tämän teoriapohjan mukaan.

Elementtimenetelmässä laskentaohjelma ratkaisee toisen kertaluvun momentin yleisellä elementtimenetelmällä, kun taas eurokoodi tarjoaa kaksi yksinkertaistusta tästä menetelmästä (Betoniteollisuus 2009, 5 - 6). *Frame Analysis* tarjoaa selkeän valikon, josta voi valita, haluaako käyttää eurokoodin mukaista yksinkertaistettua menetelmää, jotka ovat nimelliseen kaarevuuteen ja nimelliseen jäykkyyteen perustuvia menetelmiä. Ohjelma tarjosi aikaisemmin myös vanhan B-normin mukaista ratkaisuvaihtoehtoa, jolla vertailulasku on mitoitettu.

*Dlubal*n sähköpostitukipalvelun kautta kysyttiin, miten *RFEM* ratkaisee toisen kertaluvun momentit ja onko mahdollista säätää mistään euronormin mukaiseen jompaankumpaan yksinkertaistettuun menetelmään. Vastauksena sanottiin, että *RFEM* ratkaisee kaikki yleisen menetelmän mukaan, eikä euronormin yksinkertaistusta ole rakennettu ohjelmaan ollenkaan (Günthel 2014-04-03).

Seuraavaksi säädettiin *Frame Analysis* -ohjelman kehä siten, että laskenta tapahtuu yleisen menetelmän mukaan. Tällöin saman kehän mitoitusmomentti oli toisen kertaluvun mukaan 1091 kNm eli eroa alkuperäiseen *RFEM*n 1099 kNm:n tulokseen oli enää alle 1 %:a. Alkuperäinen momenttieron syy on näin selvitetty, ja kyse oli eri teoriapohjan mukaisesta laskentamenetelmästä.

5 TULOKSET JA ANALYSOINTI

Opinnäytetyön prosessin aikana käytiin läpi useita mallinnusvaihtoehtoja. Taulukossa 4 on yhteenve- to näistä eri vaihtoehdoista, ja se sisältää tietoa opinnäytetyön aikana tutkituista asioista. Työmäärät eri vaihtoehtojen välillä ovat likimääräisiä arvioita.

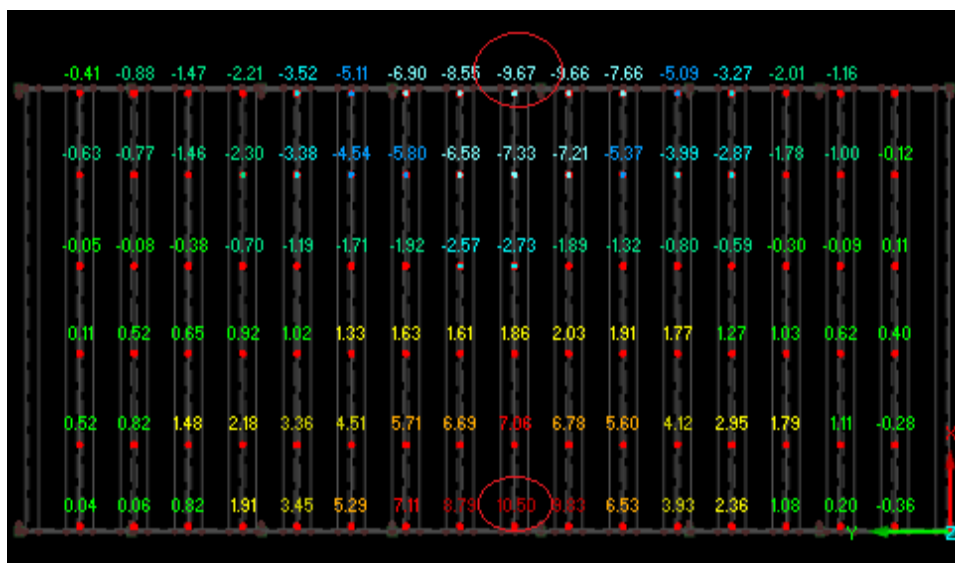
Työn aikana tuloksia tutkittiin ensimmäisen kertaluvun teorian mukaan, koska toisen kertaluvun tu- loksissa oli epäselvyyttä prosessin alkuvaiheessa. Lopullisia tuloksia tarkastellaan kuitenkin toisen kertaluvun teorian mukaan, koska alkuvaiheen eroavaisuus on nyt selvitetty, eikä kyse ollut lasken- tavorheesta.

TAULUKKO 4. Yhteenvetotaulukko eri mallinnustavoista (Laitinen 2014-04-05)

Mallinnustapa	Laatasto yhtenäisen?	TR-kiinnikkeiden voimat?	Mak- simi mo- mentti	Vaaka- siirtymä	Solmu- pistei- den määrä	Luotet- tava tapa?	Työ- määrä	Muuta
Frame Analysis 2D- kehä (B-norm. mu- kainen mitoitus)	EI	EI	1188 kNm	~58 mm		KYLLÄ	Vertailu (1-2h)	Alkuperäi- nen vertailu- lasku B- normin mukaan
Frame Analysis 2D- kehä	EI	EI	1091 kNm	~50 mm		KYLLÄ	Vertailu (1-2h)	Yleisellä menetelmäl- lä lasketut tulokset
RFEM 2D-kehä	EI	EI	1099 kNm	51,0 mm	150	KYLLÄ	Vertailu (1-2h)	Täsmää Frame ana- lysis - tulosten kanssa
TT-Laatasto TT- palkkeina	EI	EI	1117 kNm	51,0 mm	1944	KYLLÄ	+ 0,5-1 h	Ei hyötyä 3D- mallinnuk- sesta
TT-Laatasto laattana, omapaino piste- kuormana	KYLLÄ	KYLLÄ	825 kNm	36,2 mm	10780	KYLLÄ	+ 2-3 h	Luotettavin mallinnus- tapa 3D- vaihtoeh- doista
TT-Laatasto, yhtenäi- nen kansilaatta	KYLLÄ	EI	823 kNm	36,1 mm	9934	KYLLÄ	+ 2h	Yhtä luotet- tava, kuin yllä ilman TR- kiinnikkeitä
TT-Laatasto laattana, yläpohjalla omapaino	KYLLÄ	TARVIT- TAESSA				EI	+ 1-2 h	Sekundääri- ilmiönä ylimääräisiä jännityksiä
TT-Laataston kansi laattana, rivat Rib- palkkeina	KYLLÄ	TARVIT- TAESSA				EI	+ 3-4 h	Voisi toimia, ei saatu tässä työssä toimimaan luotettavasti

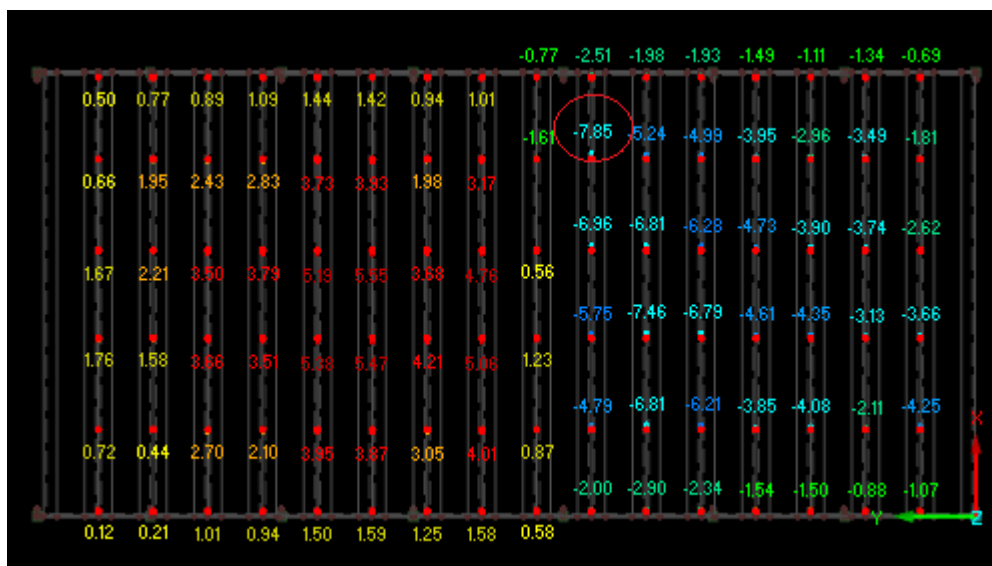
5.1 TR-Kiinnikkeiden normaali- ja leikkausvoimat

Aluksi tutkittiin TR-kiinnikkeille aiheutuneita voimia. Normaalivoimakuvio kuvassa 40 osoittaa, että laatasto toimii kuin palkki, jonka yläpuoli on puristettu ja alapuoli vedetty. Laataston katselusuunta on siten, että nosturikuormat vaikuttavat ylhäältäpäin. Tuloksista havaitaan, että TR-Kiinnikkeiden kapasiteetti ei ylitä normaalivoiman osalta. Reunoilla käytettävien TR44-kiinnikkeiden normaalivoimakapasiteetti $N_{RD,TR44}$ on 47,1 kN, ja keskellä käytettyjen TR39-kiinnikkeiden normaalivoimakapasiteetti $N_{RD,TR39}$ on 20,3 kN (www.peikko.fi). Suurin reunalla vaikuttava voima on 10,50 kN ja keskellä 7,33 kN, joten kapasiteettia jää molemmissa reilusti käyttöasteen ollessa enimmillään noin 36 %.



KUVA 40. TR-Kiinnikkeiden normaalivoimat (Laitinen 2014-03-10)

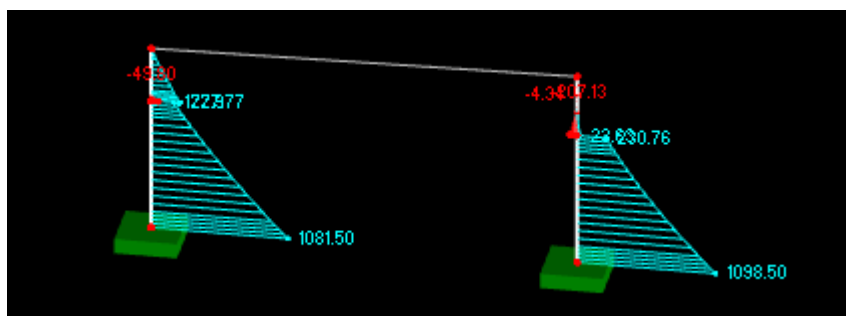
Leikkausvoimat (kuva 41) puolestaan ovat suurimmat laatastolla keskellä olevissa TR39-kiinnikkeissä. Suurimmat arvot ovat lähellä siltanosturikuormian vaikutusaluetta. Suurin kohdistuva leikkausvoima V_Y on 7,85 kN ja leikkausvoimakapasiteetti $V_{RD,TR39}$ on 11,1 kN (www.peikko.com). Käyttöaste on n. 71 %. Vaikka tulos on varmalla puolella leikkausvoiman suhteen, on suunnittelijan ajateltava leikkausvoiman ja normaalivoiman yhteisvaikutusta, jolloin kapasiteetti on saattanut ylittyä. Jos ylitys on tapahtunut, voidaan esimerkiksi lisätä yksi rivi TR44-kiinnikkeitä molemmille sivuille, jolloin ne ottavat vastaan enemmän normaalivoimia, eikä rasitus ole enää yhtä suuri TR39-kiinnikkeille. TR-kiinnikkeitä lisätään tarpeen mukaan, jolloin levyvaikutuksen voidaan todeta toimivan laatastolla turvallisesti ja varmasti.



KUVA 41. TR-Kiinnikkeiden leikkausvoimat (Laitinen 2014-03-10)

5.2 Pilareiden momentit 3D-laskennassa

Alkuperäisessä tilanteessa kaksiluotteisessa mallissa *RFEM* antoi toisen kertaluvun mitoittavaksi momentiksi 1098,5 kNm (kuva 42). Kun mallia edelleen jatkettiin kolmiulotteiseksi ja laatasto mallinnettiin TT-palkkeina eli kehärakenteena, jolloin yläpohjan laatasto ei ollut levymäinen, oli toisen kertaluvun momentti 1117,2 kNm. Lopullinen TR-kiinnikkeillä mallinnettu levymäinen laatasto antaa puolestaan huomattavasti pienempiä tuloksia mitoittavan momentin ollessa 825 kNm.



KUVA 42. Kaksiluotteisen mallin momentit (Laitinen 2014-03-11)

Kuvien 43 ja 44 välillä näkyy selkeästi, kuinka momentit ovat levyvaikutuksen ansiosta tasoittuneet hallin pilareille, eikä nosturikuormien kohdalla ole suurta momenttipiikkiä. Mitoittava momentti on laskenut 3D-laskennan avulla lähes 25 %, mitä voidaan pitää jo merkittävänä.

6 YNTEENVETO JA POHDINTA

Mietittäessä oikeaa tapaa mallintaa vertailuesimerkin mukainen mastopilarihalli olisi helpoin ja nopein tapa tehdä TT-palkisto yläpohjarakenteeksi. Tämä ei kuitenkaan tuo 3D-mallinnuksen etuja esille, koska tulokset ovat 2D-laskentamallin tulosten suuruisia. Suhteellisen pienellä vaivalla, mallintamalla TT-laatasto yhtenäiseksi, saadaan monta prosenttia pienempiä tuloksia mitoitusmomentissa.

Tutkimuksen aikana käytiin läpi useita tapoja mallintaa TT-laatasto. Luotettavimmat tulokset ja toivimivien kokonaisuus muodostui yksinkertaistamalla yläpohjaa siten, että omapaino määritettiin piste-kuormina pilarin päihin. TT-laatan ripojen ja kansilaatan ääriviivat tuli piirtää erikseen ja yhdistää laattatyökälun avulla. TT-laatan ripojen päiden ja palkin väliin tuli mallintaa pieni apupalkki, jonka päähän pystyi määrittämään liitoskohdan vapautukset. Edelleen TT-laattojen kannet tuli yhdistää toisiinsa kuudesta pisteestä pienillä palkeilla, jotka kuvaavat TR-kiinnikkeitä. Liite 2 selittää tarkasti tämän oikeimmaksi havaitun tavan mallintaa TT-laatasto.

Suurimmat ongelmat tulevat esiin liitoskohtien vapautuksien määrityksissä sekä siinä, että osataan tehdä yksinkertaistuksia. Laskennassa on pysyttävä varmalla puolella, ja yksinkertaistuksilla ehkäistään sekundääri-ilmiöiden synty. Tämän opinnäytetyön prosessi osoittaa selkeästi, kuinka liian tarkkaan tehty malli ei välttämättä vastaa todellisuutta. Tällaista virhettä voi olla vaikea huomata.

Opinnäytetyö osoittaa, että yhdellä tavalla mallinnettu rakennus ei välttämättä ole otollinen sen jokin asian tutkimiseen. Mikäli tutkitaan pienempiä asioita, kuten esimerkin TR-kiinnikkeitä, on malli toteutettava siten, että niihin kohdistuvat voimat ovat mahdollisimman lähellä oikeaa. Tämä edellytti omapainon poistoa yläpohjasta, jotta laataston taipumien rasitukset eivät kohdistu TR-kiinnikkeisiin. On otettava huomioon, että tämä tapa ei ota huomioon mahdollisia pakkovoimia tai esimerkiksi hyötykuorman epätasaista siirtoa yläpohjassa, jolloin kiinnikkeisiin aiheutuu myös pystysuunnassa rasitusta. Tästä syystä kiinnikkeitä ei pidä mitoittaa äärimmilleen ja voimien yhteisvaikutus täytyy osata ottaa huomioon. Tämän kaltainen TR-kiinnikkeiden tutkimiseen toteutettu malli ei toisaalta sovellu esimerkiksi JK-palkeille tulevien rasitusten tutkimiseen, eikä niiden mitoitus samalla kertaa onnistu.

6.1 3D-laskennan hyöty

Tulokset osoittavat, että 3D-laskennasta on hyötyä opinnäytetyön tapaisessa esimerkkihallissa. Mitoittavan momentin laskiessa lähes 25 % voidaan ajatella sen jo säästävän raidoituskustannuksia sekä pienentävän pilarikenkien kokoa ja mahdollisesti koko pilarin kokoa. Se, kuinka suuri hyöty on käytännössä, on vaikea arvioida. Tässä halliesimerkissä on 16 massiivista pilaria ja laskennasta saatu hyöty vaikuttaa kaikkiin niistä.

Suunnittelun ajankäyttöä miettiessä ei ole suurta eroa, mallintaako ohjelmalla yhden kehän vai kopioiko sen halliksi ja lisää kattorakenteen TT-laatoilla. Kun ohjelmaa osaa käyttää, puhutaan ajallisesti korkeintaan muutamista tunneista. Tilaajan kannalta ajateltuna saavutetaan säästöjä sillä, että

suunnittelija käyttää muutaman tunnin enemmän 3D-mallin tekemiseen. Esimerkin tapaisissa hal- leissa 3D-laskennan hyöty korostuu, mitä isommat epätasaiset kuormat ovat. Vertailun vuoksi ko- keiltiin kaksinkertaistaa esimerkin nosturikuormat 2D-kehämallissa ja 3D-laskentamallissa. 2D-kehän mitoittava momentti oli tällöin 1495 kNm ja 3D-mallissa 941 kNm. Eroa oli tällöin noin 37 %.

6.2 RFEM:n käyttökokemukset

Suurimman hyödyn oppinäytetyöstä sai luonnollisesti itse tekijä. Uuden ohjelman käytön opettelu ja mallin tutkiminen antoivat paljon näkemystä mallintamiseen ja ohjelmien käyttöön laskennassa. Uu- den ohjelman opettelu vie aina oman aikansa. *RFEM* on tehty käyttäjäystävälliseksi ohjelmaksi, jota oli suhteellisen helppo alkaa käyttämään. Työn tekijälle oli hyötyä siitä, että pohjalla oli kokemusta *Tekla*-, *AutoCad*- ja erityisesti *Frame Analysis*-ohjelmien käytöstä. Ohjelmien väliltä löytyi paljon yh- täläisyyksiä ominaisuuksista, ja ne toimivat usein melko samalla lailla. Jos tiesi jonkin ominaisuuden näistä aikaisemmista ohjelmista, löytyi se yleensä myös *RFEM*stä. Haasteena oli vain löytää kyseisen ominaisuuden toimintaperiaate.

*Dlubal Software*n tekninen tuki toimi odotukset ylittävästi. Heiltä sai neuvoja ja vastauksia sähköpos- titiedusteluihin, vaikka kyseessä oli vain opiskelija. Vastaukset tulivat nopeasti muutaman päivän si- sällä. Myös *Dlubal*n julkaisemat videot ja materiaalit saavat kiitosta selkeydestään ja laajuudestaan. Yhtenä heikkoutena muihin perinteikkäämpiin ja laajemman käyttäjäkunnan omaaviin ohjelmiin oli se, ettei internetistä löytynyt helposti muiden käyttäjien käyttökokemuksia ja ohjeita. *AutoCad*stä ja *Teklasta* on paljon opetusvideoita ja hyviä foorumeita, joissa yleensä juuri etsitty ongelma on jo nos- tettu esille ja ratkaistu. Tämä tulee *RFEM*in vain ajan kanssa, mikäli ohjelma kasvattaa suosiotaan, mutta laskentaohjelmana se ei tietenkään tule saavuttamaan edellä mainittujen ohjelmien käyttäjä- määriä.

*RFEM*ssä on tietenkin myös kehitettävää. Varmasti moni asia jäi huomaamatta näin lyhyen käytön jälkeen, mutta verrattuna esimerkiksi *Teklan* käyttöön, on ohjelmassa tiettyä jäykkyyttä. Laskenta- ohjelman ja mallinnusohjelman vertailu on tietenkin hieman väärä lähtökohta, mutta esimerkiksi *Teklasta* löytyvä ominaisuus liittyy kokonaisuuksia yhteen voisi löytyä myös *RFEM*stä. Kun TT-laatta mallinnettiin laatoilla, oli aina valittava jokainen siihen liittyvä nippeli erikseen esimerkiksi kopioinnis- sa. *Teklasta* löytyy ominaisuus, jolla osia voi liittää yhdeksi kokonaisuudeksi, ja kursorille täytyy vain määrittää, valitseeko se kokonaisuuksia vai yksittäisiä osia mallista.

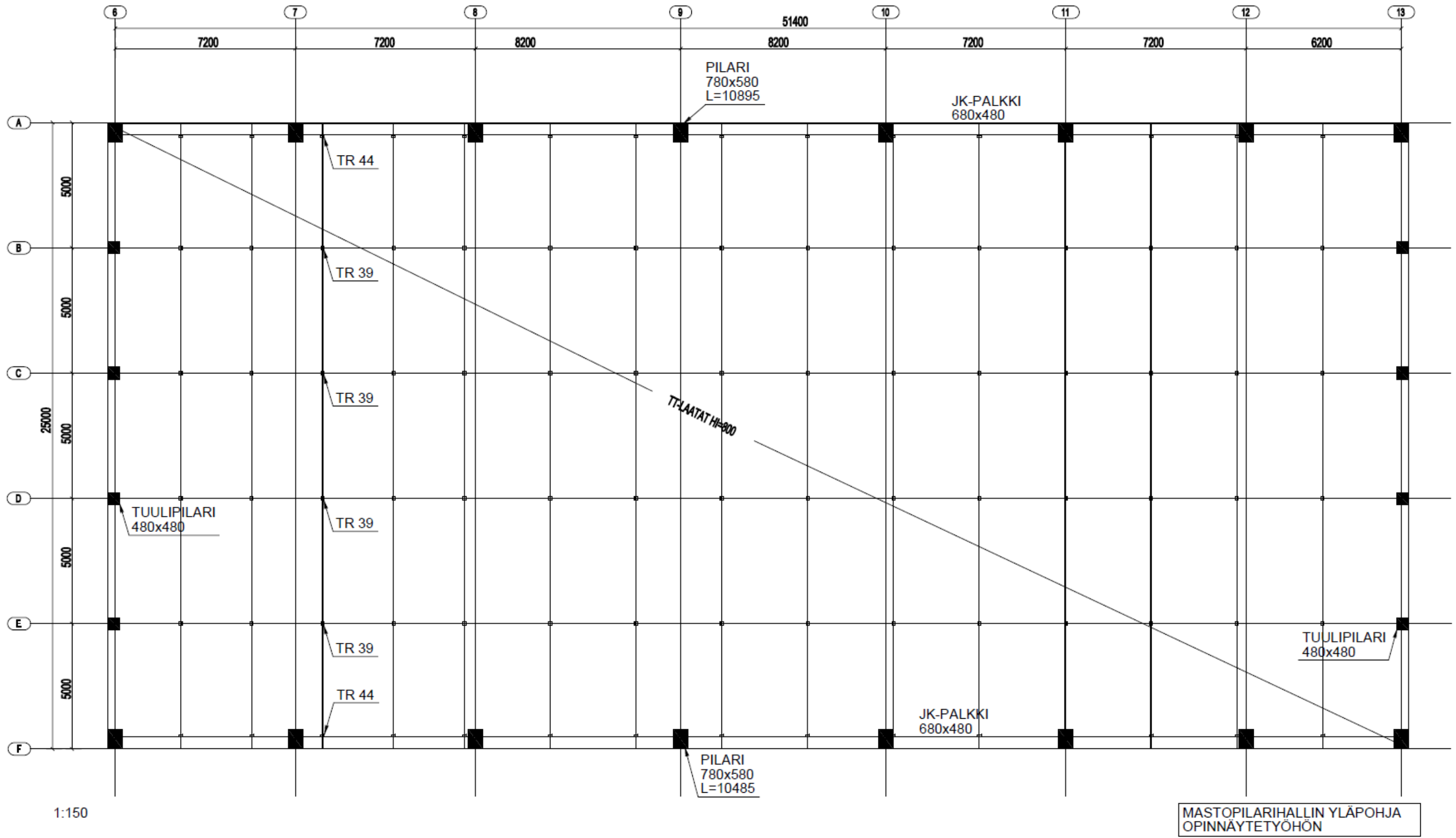
Haasteena työssä oli ohjelman käyttöön liittyvän tukiverkoston puuttuminen. Vaatii jonkin verran kynnystä kysyä sähköpostilla asioita, eikä montaa asiaa voi kysyä yhdessä viestissä. Suhteellisen pal- jon meni aikaa hahmottaa perusasiat, jotka osaava ohjelman käyttäjä olisi kädestä pitäen voinut näyttää hyvinkin nopeasti.

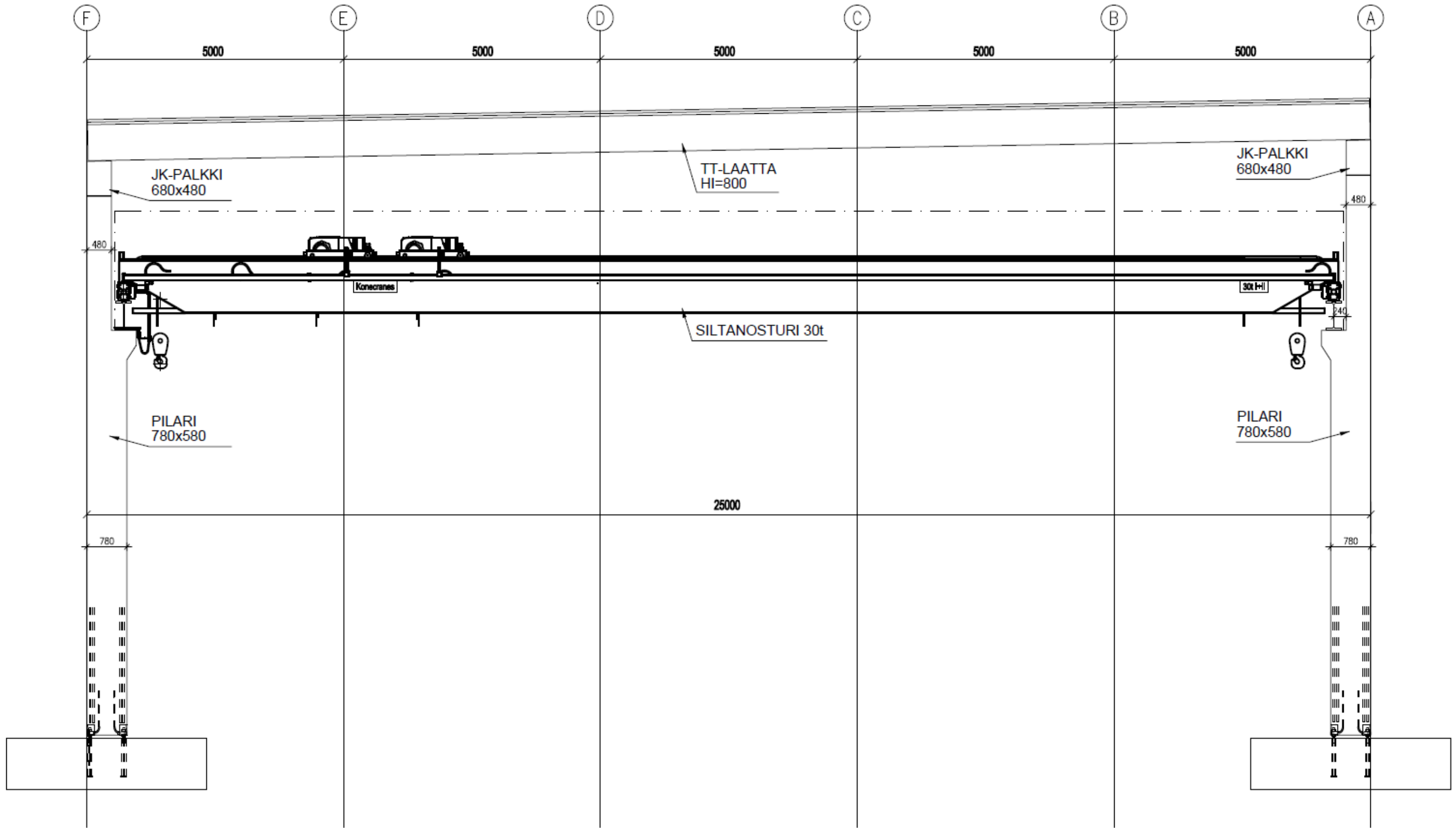
LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

- BETONITEOLLISUUS RY. 2009. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodin mukaan: Osa 5. Pilarit [verkkoaineisto]. [viitattu 2014-04-11]. Saatavissa: http://www.eurocodes.fi/1992/paasivu1992/sahkoinen1992/Leaflet_5_Pilarit.pdf
- DLUBAL SOFTWARE GMBH. 2013. RFEM 5: Program Description. Tiefenbach.
- Dlubal.com. [verkkoaineisto]. [viitattu 2014-03-11]. Saatavissa: www.dlubal.com
Polku: Dlubal.com. Company.
- DUNKEL, Harry 2014-04-23. [Sähköpostikeskustelu opinnäytetyön sisällöstä.] Vastaanottaja Jukka Laitinen. [Viitattu 2014-04-23.]
- Elementtisuunnittelu.fi. [verkkoaineisto]. [viitattu 2014-02-9]. Saatavissa: www.elementtisuunnittelu.fi
Polku: Elementtisuunnittelu.fi. Runkorakenteet. Laatat. TT-laatat.
- Elementtisuunnittelu.fi. [verkkoaineisto]. [viitattu 2014-02-9]. Saatavissa: www.elementtisuunnittelu.fi
Polku: Elementtisuunnittelu.fi. Liitokset. Runkoliitokset. DTT313.
- Elementtisuunnittelu.fi. [verkkoaineisto]. [viitattu 2014-02-9]. Saatavissa: www.elementtisuunnittelu.fi
Polku: Elementtisuunnittelu.fi. Liitokset. Runkoliitokset. DTT401.
- Elementtisuunnittelu.fi. [verkkoaineisto]. [viitattu 2014-04-9]. Saatavissa: www.elementtisuunnittelu.fi
Polku: Elementtisuunnittelu.fi. Liitokset. Runkoliitokset. DK205 ja DK206.
- GÜNTHEL, Thomas 2014-04-03. [Sähköpostikeskustelu Dlubalin asiakaspalvelun kanssa.] Vastaanottaja Jukka Laitinen. [Viitattu 2014-04-06.]
- GÜNTHEL, Thomas 2014-02-04. [Sähköpostikeskustelu Dlubalin asiakaspalvelun kanssa.] Vastaanottaja Jukka Laitinen. [Viitattu 2014-02-06.]
- HIETIKKO, Esa 2013. Palkki: Lujuuslaskennan perusteet. Helsinki: BoD - Books on Demand.
- KORHONEN, Jari 2014-03-27. Projektipäällikkö. Rakennussuunnittelutoimisto Nylund Oy. [Palaveri.] Kuopio: Nylund Oy:n toimisto.
- LIU, G. R. ja QUEK S. S. 2003. The Finite Element Method: A Practical Course. Iso-Britannia: MPG Books Ltd.
- LÄHTEENMÄKI, Matti 2007. Elementtimenetelmän perusteet. Tampereen Ammattikorkeakoulu. Opetusmateriaali. [verkkoaineisto]. [viitattu 2014-01-16.] Saatavissa: http://home.tamk.fi/~mlahteen/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf
- Peikko.fi. [verkkoaineisto]. [viitattu 2014-04-11]. Saatavissa: [Peikko.fi](http://www.peikko.fi)
Polku: Peikko.fi. Tuotteet. Kiinnitystuotteet. Kiinnitysosat. TR-kiinnitysosat.
- RAKENNUSTEOLLISUUS RY. 2006. Tassu-projekti: Rakennusrungon vakavuustarkastelut [verkkoaineisto]. [viitattu 2014-01-20] Saatavissa: http://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/22334/asennussuunnitelma_v4_word.doc
- RAKENNUSTEOLLISUUS RY. 2008. TT-laatastojen suunnitteluohje. [verkkoaineisto]. [viitattu 2014-02-4]. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/21894/TT-laatastojen%20suunnitteluohje.pdf>
- Rakteksolutions.fi. [verkkoaineisto]. [viitattu 2014-03-11]. Saatavissa: www.rakteksolutions.fi
Polku: Rakteksolutions.fi. Product. RFEM.
- Satateras.fi. [verkkoaineisto]. [viitattu 2014-04-11]. Saatavissa: <http://www.satateras.fi/lehdet/siltanosturit/#/4/>

SUOMEN BETONIYHDISTYS. 2011. Betoninormit 2012 by 50. Helsinki: BY-Koulutus Oy

LIITE 1: MASTOPILARIHALLIN YLÄPOHJA- JA LEIKKAUSKUVA





1:75

MASTOPILARIHALLIN LEIKKAUS
OPINNÄYTETYÖHÖN

LIITE 2: MASTOPILARIHALLIN 3D-MALLINNUSOHJE RFEMILLÄ

YLEISTÄ

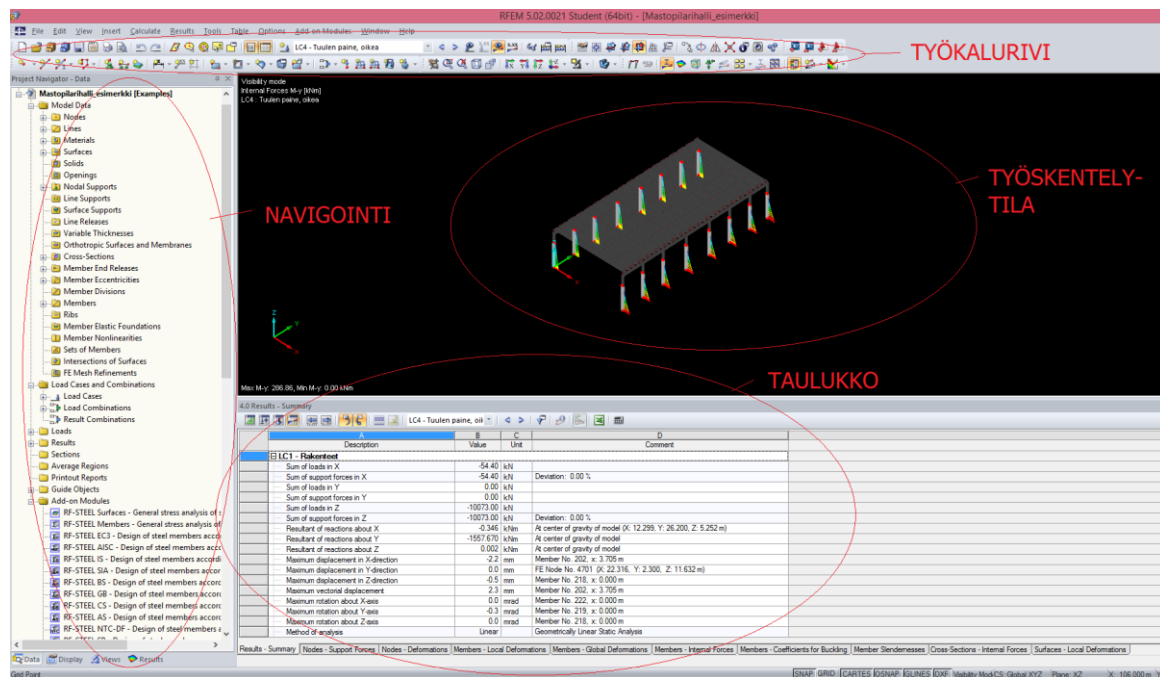
Ohjeen tarkoitus on käydä suoraviivaisesti läpi opinnäytetyön mastopilarihallin mallintaminen *RFEM*llä sekä miten tulokset saadaan ulos. Ohjeen tavoite ei ole pureutua liian yksityiskohtaisesti kaikkiin eri vaihtoehtoihin, miten *RFEM*llä onnistuu tehdä erilaisia asioita. Ohjelmassa on tuhansia ominaisuuksia, ja työ on siten rajattu näin, jotta se ei muodostu suhteettoman suureksi.

Ohjeen ideana on antaa *RFEM*ä käyttöä harjoittelevalle yksinkertainen esimerkkimalli, jota seuraamalla hän pääsee käsiksi ohjelman perustyökaluihin ja voi nopeasti suomen kielellä ymmärtää joitain tärkeimpiä ominaisuuksia *RFEM*stä. Ohje selittää samalla, miten lopullinen opinnäytetyön malli tehtiin ja kuormien jakautumisen tutkiminen toteutettiin.

*RFEM*n julkaisija saksalainen ohjelmistoyritys *Dlubal* on luonut useita opetusvideoita, jotka ovat saatavilla yrityksen kotisivuilla (www.dlubal.com) sekä Youtubesta (www.youtube.com) käyttäjältä "*Dlubal Software (English)*". Näitä seuraamalla voi laajentaa tietoaan ja näkemystään ohjelmasta. Dlubalin tekninen tuki toimii myös mutkattomasti, ja ne muutamat sähköpostiviestikysymykset, mitä opinnäytetyön tiimoilta lähetettiin, saivat vastauksen saman tai seuraavan työpäivän aikana.

TYÖALUSTA

*RFEM*n työalusta koostuu neljästä pääosasta: yllä olevasta työkalurivistä, vasemmalla olevasta navigointipalkista, alhaalla olevasta taulukosta sekä työskentelytilasta, johon rakenne mallinetaan.








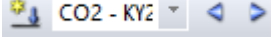















Navigointipalkki on suunniteltu siten, että se seuraa työn kulkua ylhäältä alaspäin alkaen solmupisteiden määrittämisestä edeten muun geometrian määrittäisiin, materiaalmäärittäisiin, kuormitusyhdistelyihin, jne. aina raudoituksiin asti. Navigointipalkista voi kätevästi valita esimerkiksi kaikki mallin samaa poikkileikkausta tai materiaalia olevat objektit.

Taulukosta saa käytännössä kaiken mahdollisen tiedon, jota mallissa on, ja se antaa mahdollisuuden syöttää tietoja "käsin". Mallinnusvaiheessa sieltä voi tarkastella geometrian pisteitä, määrittää kuormituksia, solmupisteiden vapautuksia, jne. Erityisen kätevä taulukko on tulosten tarkasteluun, ja tulokset voi tarvittaessa exportoida Exceliin.


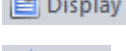

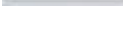
Rakenne mallinetaan työskentelytilassa, joka koostuu yhdestä suuresta ns. globaalista koordinaatistopisteiden joukosta. *RFEM* suorittaa rakenteen kaikki laskelmat elementtimenetelmällä laskien esimerkiksi solmupisteiden siirtymät ja ilmoittaa niissä tapahtuvat koordinaattimuutokset helposti ymmärrettävässä muodossa.

Työkalurivin kaikki työkalut löytyvät myös ylhäällä olevista valikoista. Käytännössä selviää lähes kaikesta pelkkien työkalurivin painikkeiden avulla, kun opettelee niiden toimintaperiaatteet. Työkalut on jaettu omiin pieniin ryhmiinsä, ja seuraavalla sivulla on eritelty niiden toimintaperiaatteita.

TYÖKALURYHMÄT

	Projektin hallinta
	Printtaus ja esikatselu
	Kumoa / toista edellinen käsky
	Erlaisia objektien valintatyökaluja
	Navigointipalkki ja taulukko päällä/poissa päältä
	Kuormitustapausten luonti ja vaihtovalikko
	Kuormitusten ja tulosten näkyminen päällä/poissa päältä
	Laskentatyökalut
	Koordinaatiston ja gridin hallinta
	Objektien kopiointi ja muokkaus
	Mallin siirto RFEM:in ja Teklan/AutoCadin välillä
	Geometrian määrittämisen työkalut
	Tukien määrittäminen
	Pintojen, aukkojen, kaarien ja solidielementtien työkalut
	Kuormitusyhdistelyt ja -tapaukset, kuormien määrittäminen
	Näkymien kierto, zoomaus, katselukulma
	Näkymän suunnan määrittäminen
	Näkyvien objektien määrittäminen, objektien piilottaminen
	Mallin näkymän valinta realistisena, läpinäkyvänä tai sauvamaisena
	Laskentatulosten näkymien hallinta
	Lisää tulosten näkymien hallinnan työkaluja

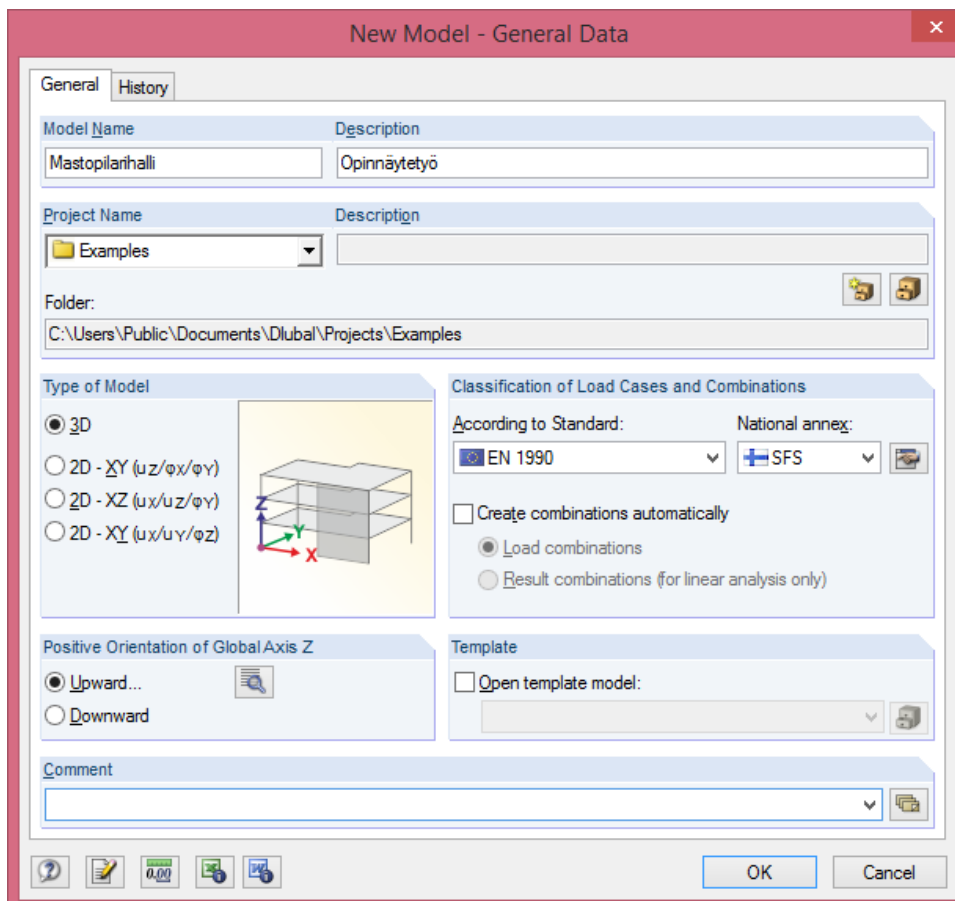
Lisäksi navigointipalkin alla on neljä huomioitavaa painiketta:

	Alkuperäinen navigointipalkki
	Täältä voi määrittää miten malli näkyy ulospäin ohjelmassa
	Näkymien hallintapaikka
	Tulosten tarkastelun hallinta

ALOITUS

Aloitetaan uusi projekti valitsemalla:

 / ctrl + N / File → New



- Määritetään työn nimi ja mahdollinen selitys työstä.
- *RFEM* tallentaa työn omaan projektikansioonsa, jossa on sen tekemä muutama esimerkkimalli. Valitse uusi projektikansio tarvittaessa.
- Valitaan tyypiksi 3D-malli.
- Voidaan valita Euronormin Suomen kansallisen liitteen mukaiset kertoimet jo valmiiksi kuormitusyhdistelmille. Tässä työssä sillä ei ole väliä, sillä kertoimina on käytetty vanhan B-normin mukaisia kertoimia. Tämän vuoksi ei myöskään haluta ohjelman muodostavan kuormitusyhdistelmiä automaattisesti.
- Z-akselin positiiviseksi suunta on oletuksena alaspäin "Downward". Tässä työssä positiiviseksi suunnaksi valittiin "Upward". Täytyy ottaa huomioon, että tämä hieman sekoittaa tekemistä muutamassa kohdassa, kuten esimerkiksi kuormien suuntaa määrittettäessä positiivisen suunnan ollessa milloin mitenkään päin.
- OK

GEOMETRIAN MÄÄRITYS

Usein 3D-mallinnusohjelmissa on ensiksi tehty gridilinjat mukailemaan rakennuksen päälinjoja. *RFE-MII*llä Grid-ruudukkoa ei sidota paikalleen koordinaatistoon, vaan sitä liikutellaan ja sen suuntaa muutetaan sitä mukaa, kun esimerkiksi yksittäisiä elementtejä piirretään malliin. Esimerkin mallinnettiin ensiksi kehikko pelkillä viivoilla ja niitä yhdistävillä solmupisteillä, minkä jälkeen näille viivoilla määritellään materiaaliominaisuudet.

Mallia pyöritetään yhdistämällä CTRL + hiiren rulla.

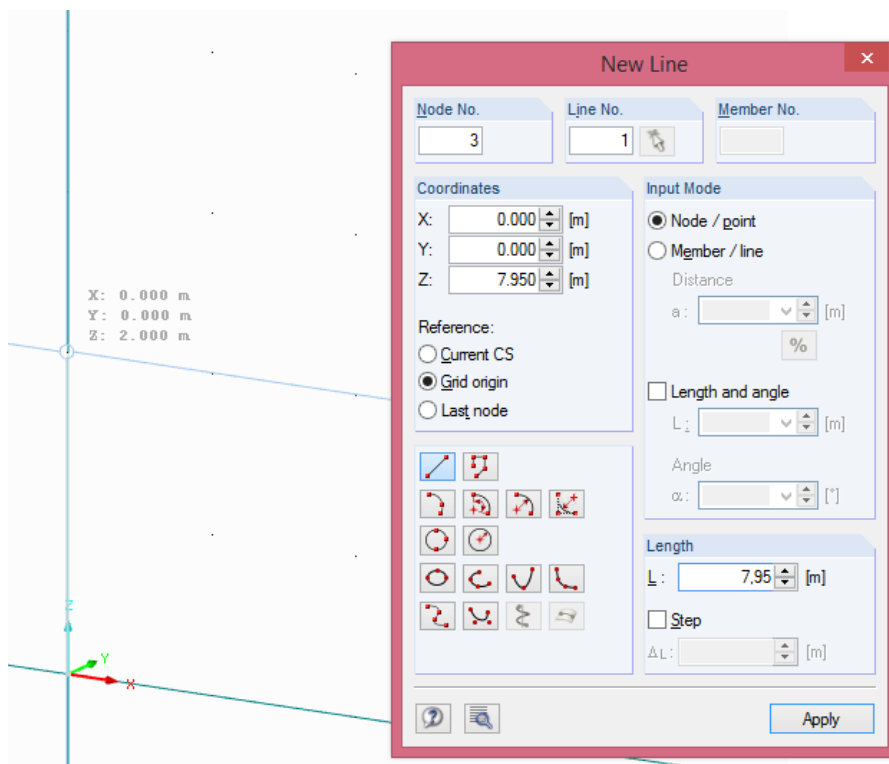
Aluksi Grid-verkko käännetään pystyyn, koska mallinnetaan pystyrakenteita:



Viimeisin Grid-verkon työkalu kääntää verkon pystysuuntaan (suunnassa XZ)



Valitaan viivatyökalu, jolle *RFEM* lisää solmut piirretyn viivan päihin. Ominaisuuslaatikko aukeaa automaattisesti.



- Ensimmäinen piste klikataan grid-verkon origoon. Hiiri viedään tämän jälkeen siihen suuntaan, mihin seuraava piste halutaan määrittää, eli tässä tapauksessa suoraan ylöspäin. Ensimmäisen pisteen määrittämisen jälkeen, kun suunta on oikea, määritetään viivan pituus suoraan numeronäppäimillä näppäimistöä.
- Seuraavaa pistettä ei klikata hiirellä, vaan painetaan ENTER pituuden määrittämisen jälkeen.



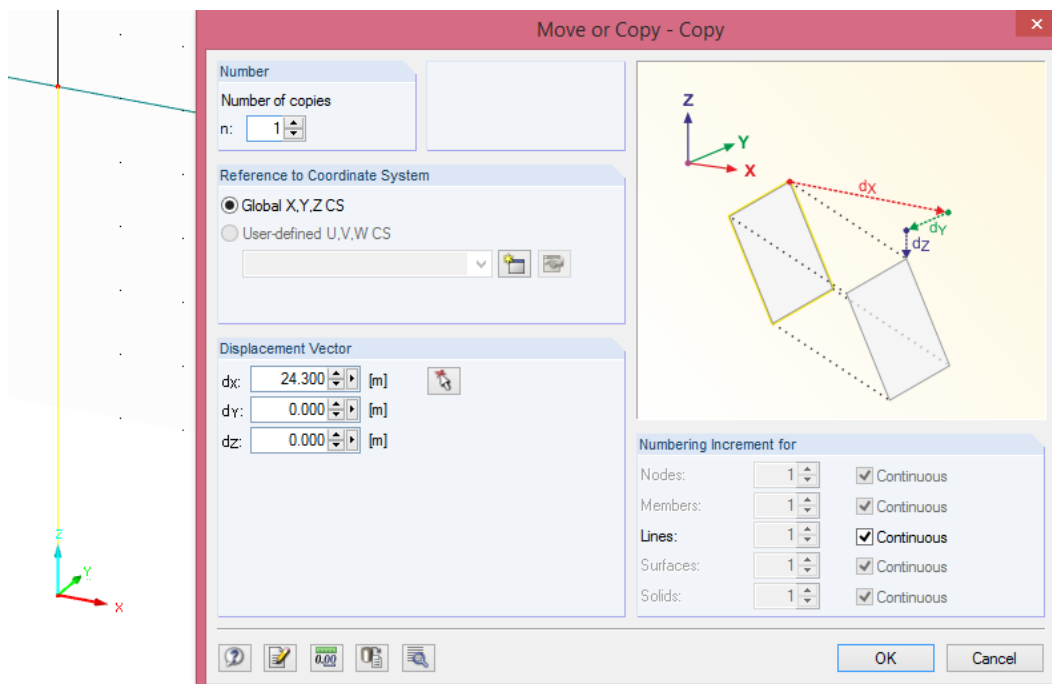
Grid-verkon voi siirtää tämän jälkeen nyt muodostettuun pisteeseen siirtotyökalulla



Grid-verkon ominaisuuksia voi muokata tällä työkalulla



Viivoja voi kopioida tai siirtää yhdellä samalla työkalulla. Valitaan halutut viivat, jolloin ne muuttuvat keltaisiksi (ctrl pohjassa voi valita useampia) ja painetaan siirto/kopio työkalua:



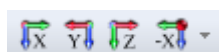
- Mikäli "Number of copies" jätetään arvoon "0", niin *RFEM* vain siirtää valitut objektit.
- Määritetään kopioiden määräksi "1" ja annetaan X-suunnaksi 24,3 m, mikä on pilariväli keskeltä keskelle hallin leveyssuunnassa.
- OK

HUOM:

Pelkkiä viivoja kopioidessa *RFEM* kopioi automaattisesti niiden päihin pisteet. Viivoja ei voi olla mallissa ilman päätepisteitä, mutta pelkkiä pisteitä voi siirtää mihin tahansa mallissa ilman, että niihin on sidottu viivoja. Kopioinnissa ei tarvitse siten valita laattojen tai viivojen nurkkapisteitä erikseen.

Kätevä tapa kopioida objekteja on myös valita haluttu kohde, painaa CTRL pohjaan ja valita haluttu lähtöpiste. Hiiri vie nappi pohjassa kohdepisteeseen, minkä kohdalla siitä päästetään irti, jolloin kohde kopioituu siihen. Kohdepisteiksi voi valita vain solmupisteitä, grid-verkoston pisteitä ja viivojen keskikohtia.

Mastopilarien siltanosturitikien kohdalle tehdään välipisteet, joissa on 400 mm:n uloke. Siltanosturin aiheuttama pistekuorma tulee tälle etäisyydelle pilarin keskilinjalta. Pilari jatkuu myös hoikempana tästä ylöspäin. Päätykehikko on näin muodostettu alla olevan kuvan mukaiseksi.

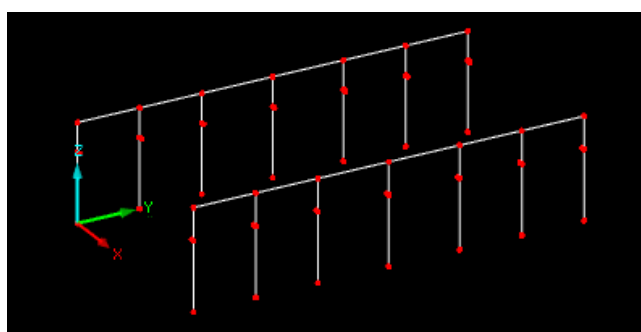


Näkymätyökaluilla saadaan kohtisuora näkymä (yllä oleva Y-suunnassa)

RFEMn alareunassa oleva taulukko (View → Table, jos ei näy valmiiksi mallissa) on hyödyllinen useaan tarkoitukseen mallin tekemisen aikana. Tässä vaiheessa "Nodes" -kohdasta voidaan tarkistaa kunkin solmupisteen koordinaatti ja näin varmistaa, että kaikki on oikein, ennen kuin kehikkoa kopioidaan edelleen Y-suunnassa.

Node No.	1.1 Nodes					
	A	B	C	D	E	F
	Node Type	Reference Node	Coordinate System	Node Coordinates		
				X [m]	Y [m]	Z [m]
1						
2	Standard	0	Cartesian	0.000	0.000	0.000
3	Standard	0	Cartesian	0.000	0.000	7.950
4	Standard	0	Cartesian	0.000	0.000	11.245
5	Standard	0	Cartesian	24.300	0.000	0.000
6	Standard	0	Cartesian	24.300	0.000	7.950
7	Standard	0	Cartesian	24.300	0.000	11.655
8	Standard	0	Cartesian	0.400	0.000	7.950
9	Standard	0	Cartesian	23.900	0.000	7.950
10						

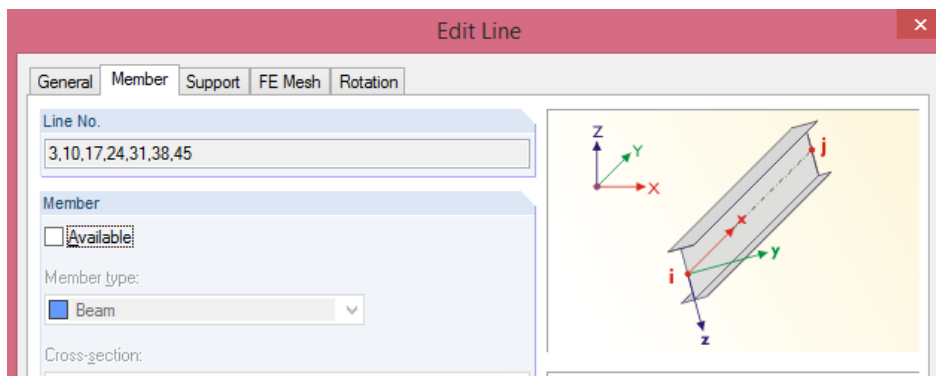
Tämän jälkeen kopioidaan tehty kehä Y-suunnassa pohjapiirroksen mukaisella kehäjaolla. Koska kehäjaon mittoja on muutamaa erilaista, täytyy kopiointi tehdä useammassa vaiheessa. Kopiointityökalulla on näin nopeasti tehty liitteessä 1 olevan hallin runkolinjat. ENTER toistaa edellisen komennon, jolloin saman komennon usea toisto nopeutuu.



ELEMENTTIEN MÄÄRITYS

Nyt määritetyn mallin viivoille voi kätevästi määrittää omat materiaaliominaisuudet. *RFEM*llä on laaja materiaalikirjasto, josta löytyy käytännössä kaikki tarvittavat materiaaliominaisuudet.

Valitaan ensiksi haluttu viiva tai kaikki ne viivat, joihin tulee sama materiaaliominaisuus, ja kaksoisnäpätetään viivaa:



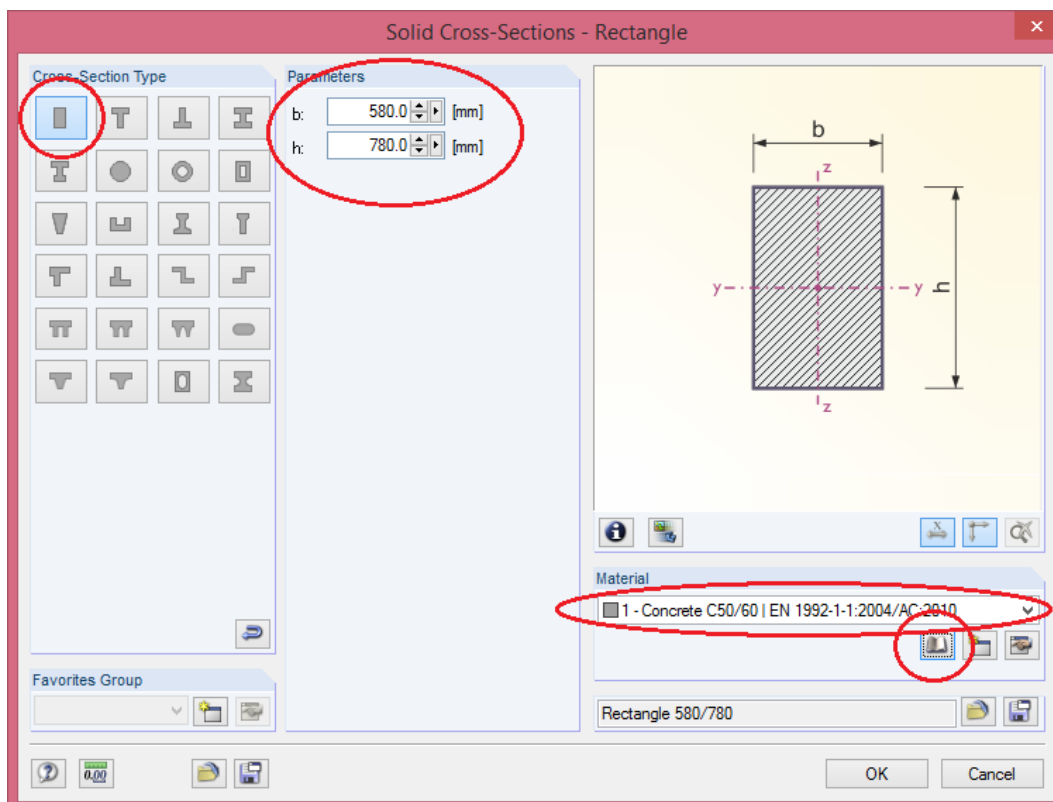
- Ilmestyneestä valintaikkunasta valitaan "Member" -välilehti ja määritetään ruksi kohtaan "Available". Tämä valinta avaa uuden välilehden materiaalin ja poikkileikkauksen määrittämiselle.



- Uudessa välilehdessä tehdään uusi materiaaliominaisuus ja poikkileikkaus painamalla "New Cross-Section" -painiketta, joka avaa uuden välilehden.



- Tästä välilehdestä valitaan suorakulmion muotoinen betonipoikkileikkaus



- Valitaan suorakaidepoikkileikkaus ja annetaan, tässä tapauksessa pilarien, poikkileikkausmitat.
- Materiaalikirjastosta löytyy valmiiksi euronormin mukaiset materiaaliominaisuudet, ja ne ovat nopeasti haettavissa painamalla materiaalikirjaston painiketta.
- Painetaan OK jokaisen ikkunan kohdalla jolloin materiaali ja poikkileikkaus on näin määritetty valittuihin 580 x 780 pilareihin.

Samat vaiheet toteutetaan myös pilarin ulokkeen yläpuolisille pilarin osille poikkileikkauksen ollessa 580 x 480. Ulokkeiden poikkileikkaukseksi määritettiin 480 x 480, ja pilarit yhdistäville JK-palkeille annettiin poikkileikkaus 480 x 680. Kaikilla tähän asti mallinnetuilla elementeillä on sama betonilaatu C50/60 haettuna materiaalikirjastosta.

HUOM:



Painikkeella, joka löytyy elementin muokkaustilan alareunasta, voi importoida toisen palkin ominaisuudet kätevästi. *RFEM* myös muistaa edelliset asetukset valikoissa, joten ominaisuudet voi hakea uudelle elementille myös painamalla kahdesti jo olemassa olevaa, haluttua elementtiä, jonka jälkeen uuden elementin määrittäksessä nämä tiedot ovat jo valmiiksi.

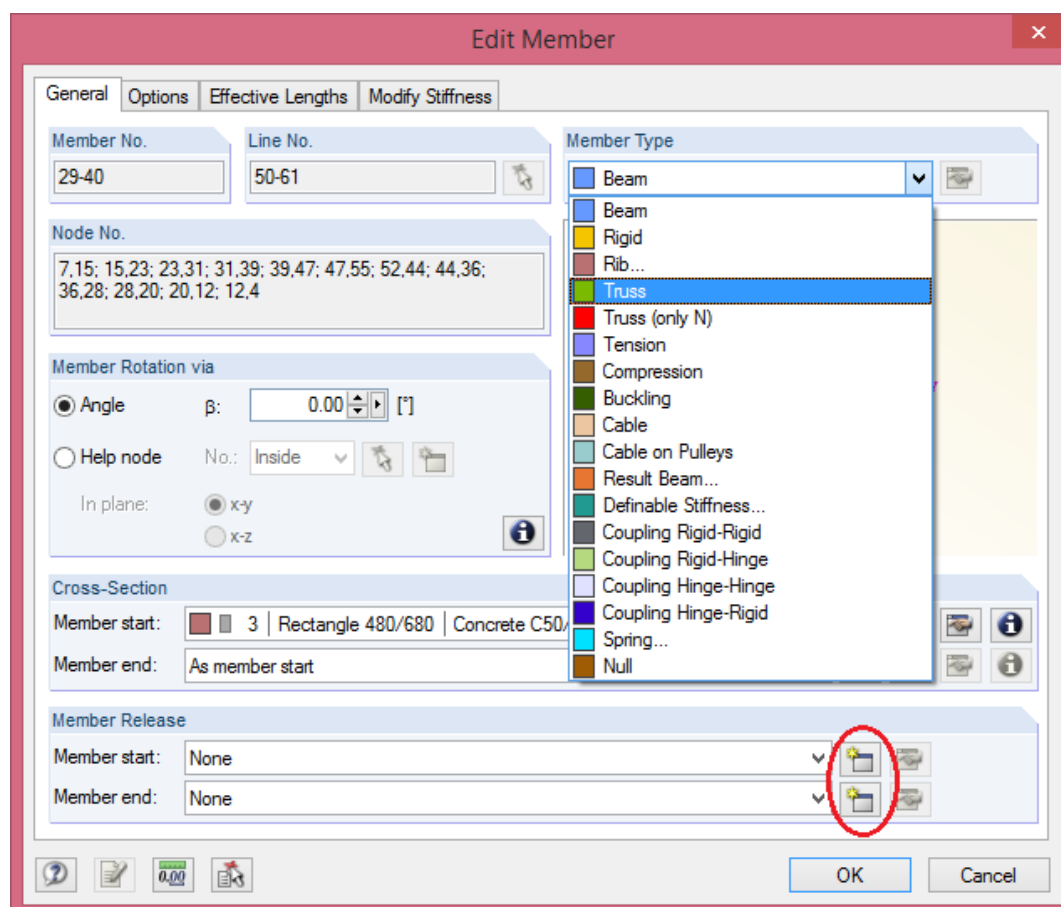


Geometrian voi myös mallintaa suoraan elementeillä eikä välivaihetta geometrian mallinnukseen pelkillä viivoilla tarvita. Tämä valinta määrittelee siis piirrettävälle viivalle suoraan elementtiominaisuudet.

ELEMENTTIEN VÄLISET LIITOKSET

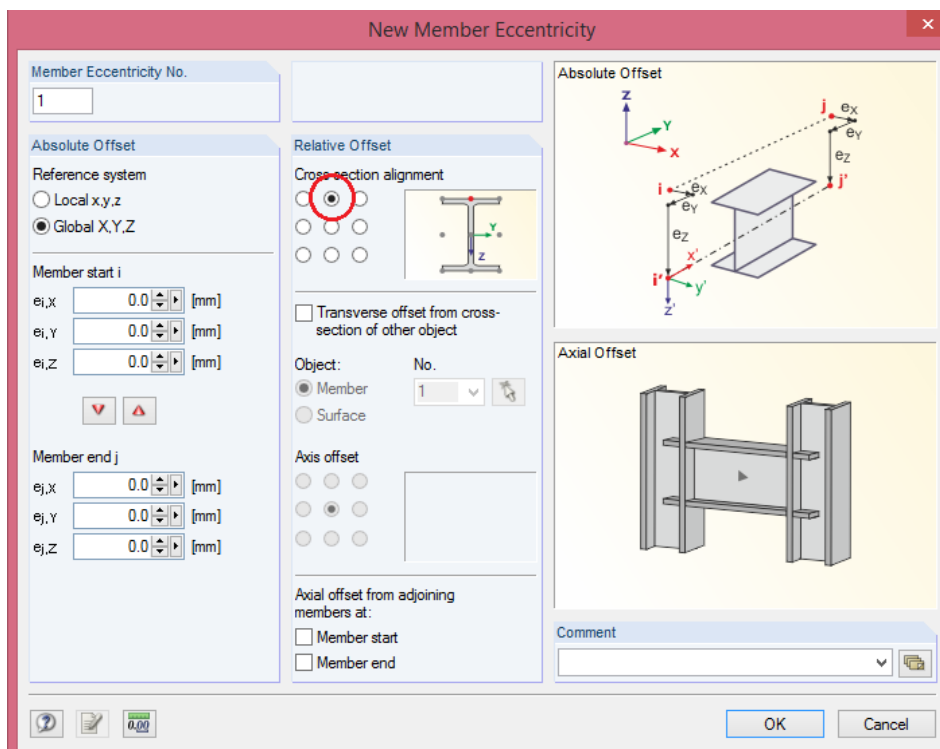
Pilarien poikkileikkauksen vaihtumisen liitoskohdassa sekä ulokkeessa on solmupiste, joka oletuksena liittää nämä osat jäykästi toisiinsa. JK-palkkien ja pilareiden yläpään liitos on kuitenkin nivelellinen, jolle täytyy määrittää momenttivapautus. Vapautuksen tekemiseen on kaksi tapaa: palkin tyyppin muutos tai elementin päihin erillisen vapautuksen tekeminen.

Valitaan kaikki mallin JK-palkit ja kaksoisnapsautetaan yhtä niistä. Tällöin muutetut ominaisuudet tulevat kaikkiin valittuihin palkkeihin.



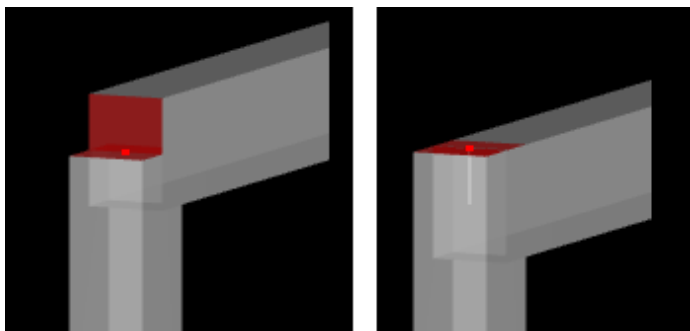
- Valitaan elementin tyyppiä "Truss", mikä tarkoittaa, että elementin molemmissa päissä on momenttivapautukset. Mikäli haluaa tietoa muista elementtityypeistä, voi painaa mallin ollessa päällä näppäimistön F1-painiketta, mikä avaa *RFEM*n käyttöohjeen.
- Toinen vaihtoehto on säilyttää elementtityyppinä "Beam" ja valita "Member Release" -kohdasta vapautukset JK-palkin alku ja loppupäähän erikseen. Näiden vapautusten väärinlaittaminen aiheuttaa väistämättä vääriä lopputuloksia.

JK-Palkin solmupiste sijaitsee vielä näillä asetuksilla keskellä palkkia. Koska FEM-laskenta ratkaisee palkin sauvarakenteena, on sillä vain yksi kiinnepiste päässä. Jotta JK-palkki asettuisi oikein malliin, on sen kiinnepiste määritettävä yläreunaan keskelle edellisen valikon "Options" -välilehdeltä kohdasta "Member Eccentricity". Painetaan uuden ominaisuuden painiketta, joka avaa valikon:



- Valitaan "Cross-section alignment" -kohdasta yläreuna. On mahdollista valita kiinnepisteen kohta myös vasemmalla olevassa valikossa, jonne asetetaan etäisyydet millimetreissä keskipisteestä.

Tällöin palkin asettuvat oikein yläreunan ollessa TT-laataston alareunan tasolla. Alla kuvassa vasemmalla on ennen muutosta tehty solmupisteen paikka ja vasemmalla on nyt muutettu tilanne JK-palkin ja pilarin liitoksesta.

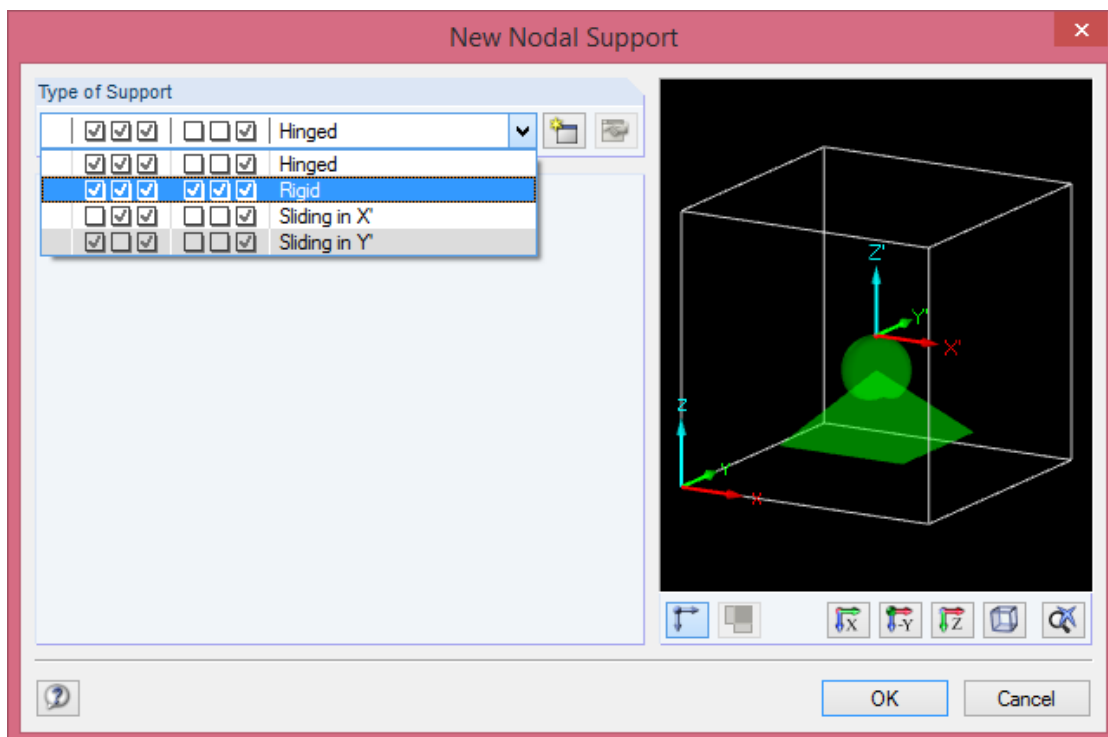


TUKIPISTEIDEN MÄÄRITYS

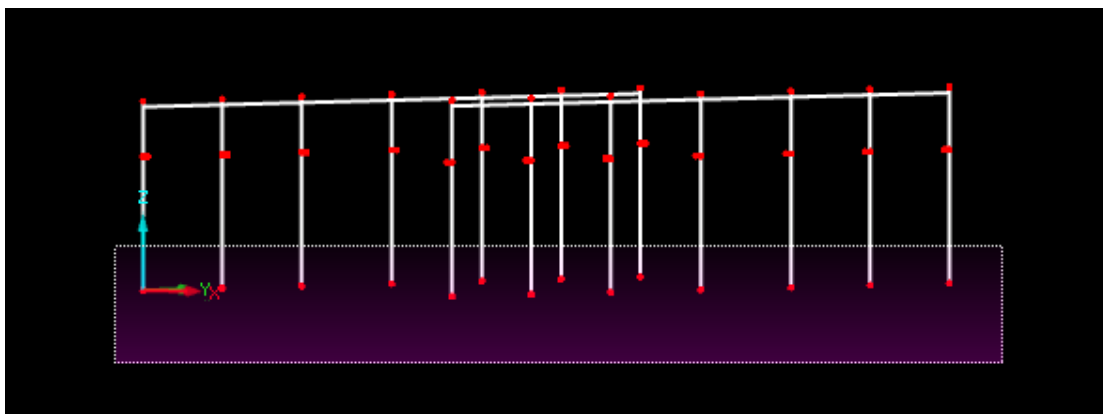
Malli täytyy sitoa kiinni, jotta se ei erilaisten voimien vaikutuksesta liiku äärettömästi mallissa. *RFEM* ei kykene laskemaan mitään, mikäli tukipisteitä ei ole määritelty mallissa.



Valitaan pistetuen työkalu, jolla malli sidotaan kiinni alustaan.



- Valitaan "Rigid" -tyypin tuki, koska kyseessä on jäykästi anturassa kiinni oleva mastopilari.
- OK

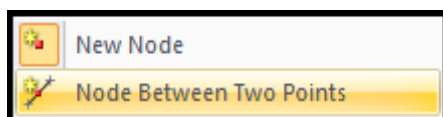


- Tämän jälkeen valitaan pisteet, joihin tuet tulevat. Katselusuunta tulee valita siten, että kaikki pilareiden lähtöpisteet voidaan valita yhdellä kertaa. Kursori vietään vasemmalta oikealle ja päästetään, kun valinta-alue ylittää kaikki tukipisteet.
- Valintakomento lopetetaan ESC-näppäimellä.

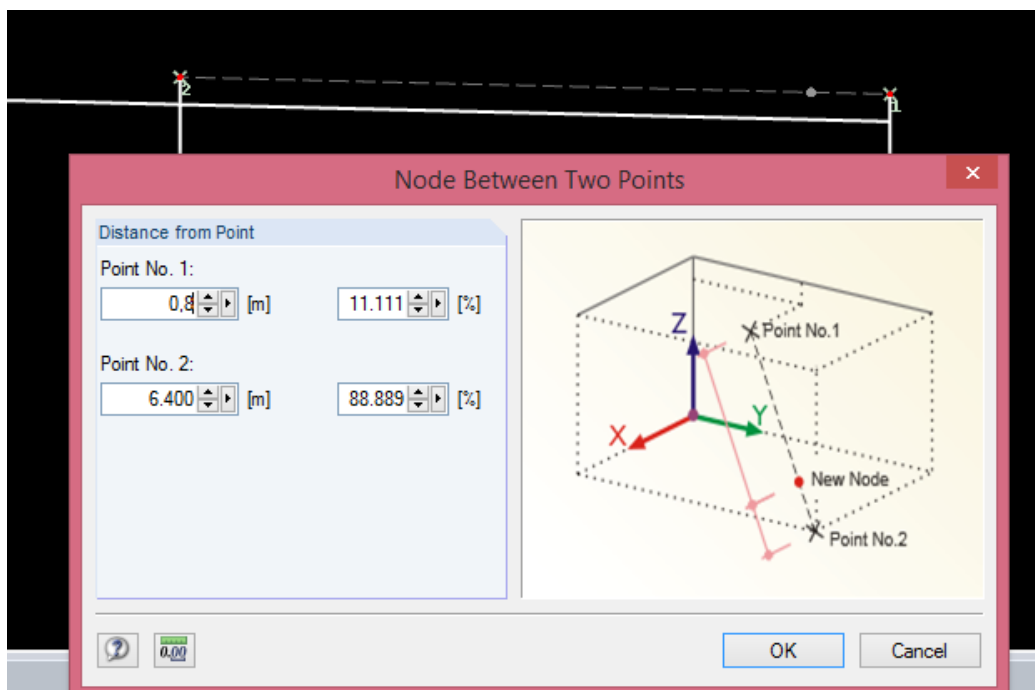
TT-LAATASTON MALLINNUS

Koska TT-laataston ja JK-palkin välisten liitosten tulee olla nivelellisiä ja laattatyökälulla mallinnetun TT-laatan päähän ei voi itsessään tehdä niveltä, tehdään pienet apupalkit kuvaamaan TT-laatan ripojen alle tulevia neopreenipaloja. Neopreenipalat on tehty palkkityökälulla, joten niiden päähän on mahdollista tehdä nivelliitos.

Valitaan uuden solmun työkalusta avautuva solmun kahden pisteen välille tekevä työkalu.

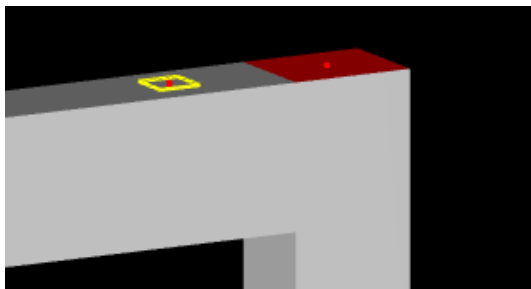


Valitaan ensimmäiseksi pisteeksi päätympilarin ja JK-palkin liitos sekä toiseksi pisteeksi saman JK-palkin toisen pään solmupiste.



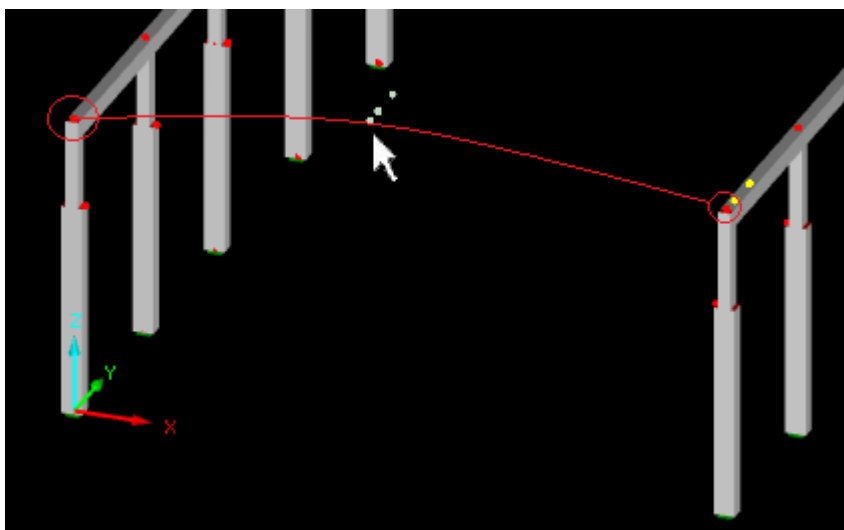
- Valitaan pisteen etäisyydeksi ensimmäisestä apupisteestä 0,8 m, koska se on suunnilleen ensimmäisen rivan kohta yläpohjassa.

Tämän jälkeen piirretään tehtyyn pisteeseen viiva suoraan ylöspäin 10 mm:n korkeuteen. Määritetään tehdyille viivalle materiaaliominaisuudet ja poikkileikkaus. Ei ole käytännössä merkitystä, mitä nämä ovat. Tässä materiaaliksi valitaan sama betoni kuin edellä sekä poikkileikkaukseksi 200 x 200 mm.

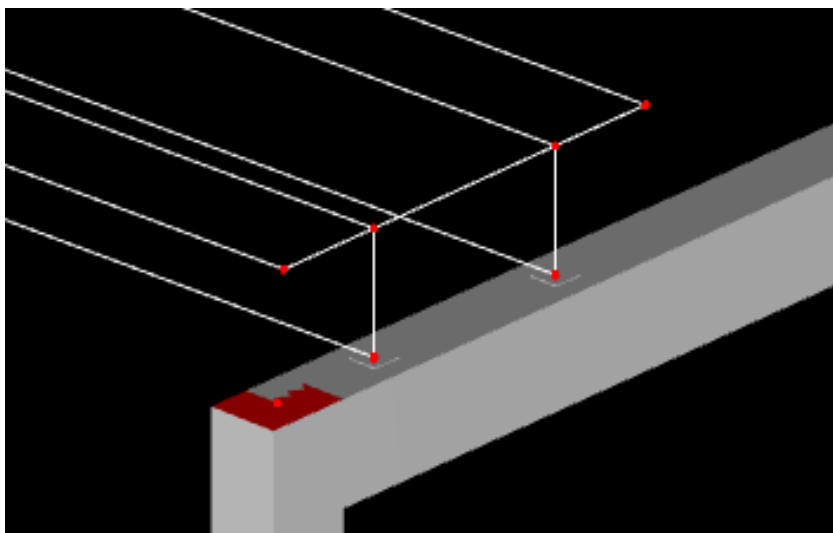


Valitaan kopiointityökalu ja kopioidaan tehty "neopreenipala" JK-palkin suunnassa 1500 mm, joka on seuraavan rivin etäisyys ensimmäisestä rivistä.

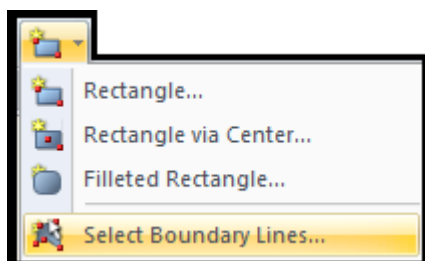
Tämän jälkeen valitaan molemmat neopreenipalat, painetaan CTRL-painike pohjaan ja valitaan näiden palojen viereinen pääty pilarin yläpään piste alkupisteeksi. Kursori vietään pohjassa toisen puolen pääty pilarin yläpään solmupisteen päälle ja päästetään irti. Neopreenipalat on siten kopioitu toiselle puolelle kehää.



Mallinnettujen palojen yläpäätkiinnitetään toisiinsa ja TT-laatan geometriaa piirretään edelleen siten, että ripojen ääri viivat mallinnetaan 800 mm:n korkeudelle lähtöpisteestä. Kansilaatan reunaviivat mallinnetaan ripojen yläosan tasolle, ja ne ovat päätyleveydeltään 2990 mm.

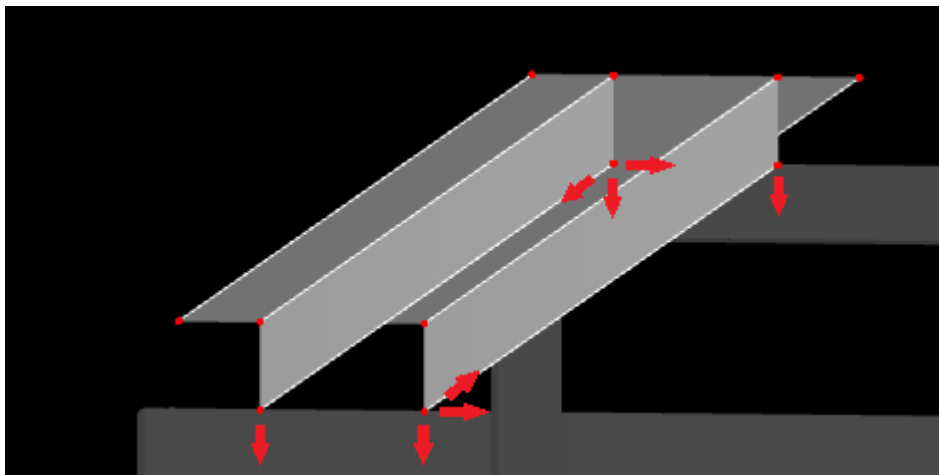


Kun TT-laatan ääriviivat ovat paikoillaan, mallinnetaan niitä mukailen laattatyökalulla taselementit kuvaamaan TT-laattaa. Laattojen väliset liitokset ovat oletuksena täysin jäykät.

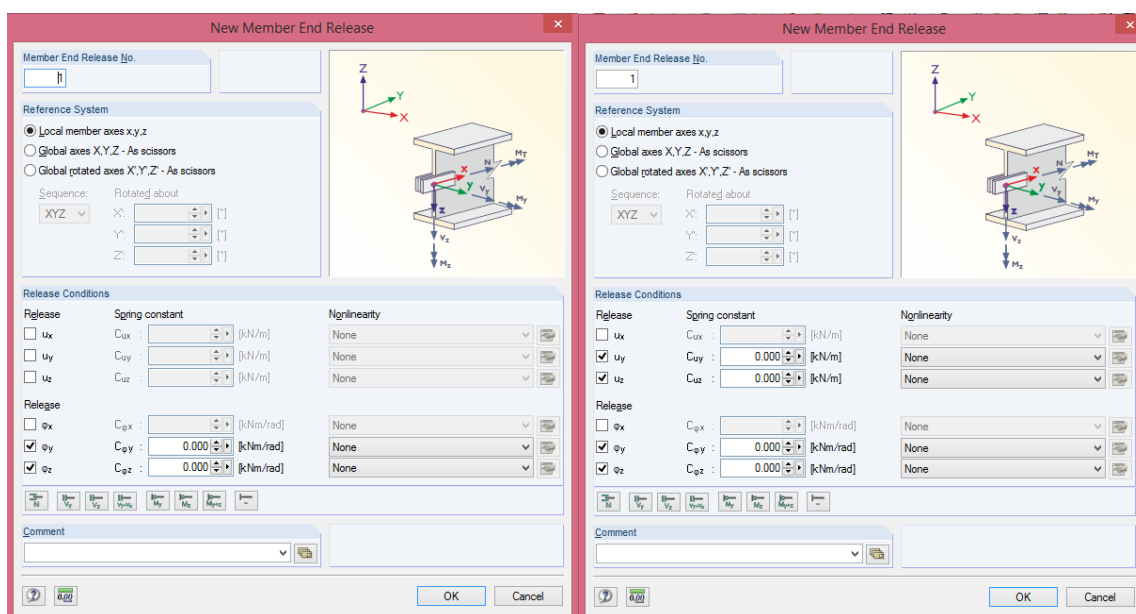


- Valitaan laattatyökalun alta viivojen mukaan määritettävä laatta. Tämä avaan laattatyökalun asetusten ikkunan.
- Materiaali on oletuksena C50/60 betoni edellisen valinnan mukaan, ja sitä se voi tässä vaiheessa vielä olla.
- Määritetään ripojen paksuudeksi 120 mm.
- OK:n jälkeen valitaan ripojen ääriviivat, jolloin *RFEM* automaattisesti mallintaa laatan paikoilleen.
- Toistetaan vaihe kansilaatalle, jonka paksuudeksi määritetään 50 mm.

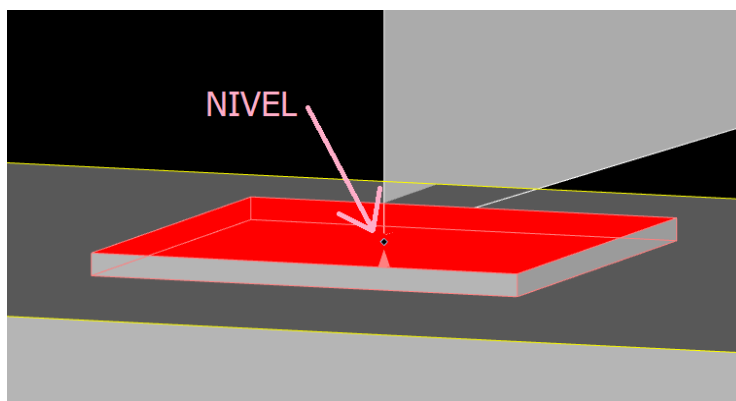
TT-laatan ristikkäisiin kulmiin hitsataan työmaalla siirtymiä estävä hitsiliitos, ja toinen ristikulma on pelkän neopreenikaistan päällä. Käytännössä hitsiliitos ei vaikuta mitenkään laskentamalliin, vaan jokainen nurkka olisi mallinnettava vain momentteja vapauttaviksi nurkiksi. *RFEM*n solmujen kiinnitykseen on myös olemassa useita valikkoja, ja esimerkiksi kiinnikkeen lujuutta voi säätää, jolloin tilanne vastaisi todellista neopreenin ja rivan välistä kiinnikettä. Valikot ovat kuitenkin niin monimutkaisia, että tehdään yksinkertaistus, jolloin TR-kiinnikkeille tulevat rasitukset ovat varmalla puolella, eikä laatan neljän pisteen kiinnitys ota vastaan kaikkea rasitusta. Tällöin TT-laatta toimii ikään kuin se olisi mallinnettu palkkina. Solmupisteissä siirtyvät voimien suunnat ovat kuvan mukaiset:



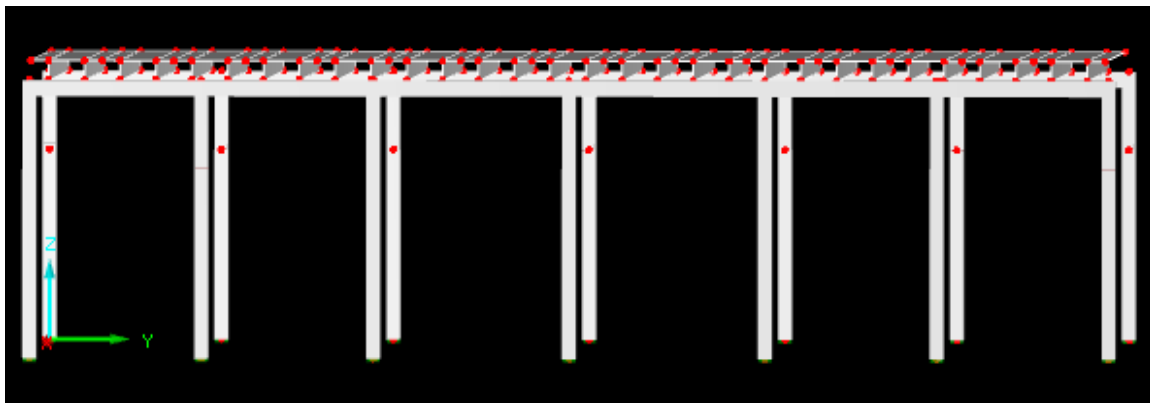
Valitaan neopreenipala kaksoisnapauttamalla sitä. Valitaan muokkausikkunasta kohdasta "Member release" uusi vapautus -painike elementin loppupäähän.



Kuvassa vasemmalla on pelkkä momentin vapautus eli tämä vastaa edellisen kuvan etuvasemmalla ja takaoikealla olevaa vapautusta. Oikealla puolella on vapautettu myös vaakakuormat molempiin suuntiin, mikä vastaa etuoikeaa ja takavasenta nurkkaa TT-laatalla, jolloin kuormat siirtyvät vain alaspäin solmupisteessä.



TT-laatta on nyt muodostettu. Seuraavaksi valitaan kaikki TT-laatan osat sekä neopreenipalat ja kopioidaan niitä rakennuksen Y-suunnassa niin paljon, kuin yläpohjassa on tilaa kolmen metrin jaolla. Viivoja tai solmupisteitä ei tarvitse erikseen valita, mikäli valitsee niihin liittyvän elementin tai laatan. Ensimmäisen kopioinnin jälkeen tarkastetaan, että kaikki kopioitui ja ENTER toistolla voidaan kopioida laatasta edelleen.



HUOM:

Mallin kääntelyä helpottaa yhden solmupisteen tai objektin valinta ja tämän jälkeen hiiren rulla + ALT kääntää mallia valitun kohteen ympäri. Näin pyöritys pysyy paremmin hallinnassa, jos halutaan pysyä yhdessä kohdassa. *RFEM*ssä toimii myös hiiren rullan kaksoispainallus, jolloin kaikki mallissa olevat kohteet zoomautuvat työskentelytilan ruudun kokoiseksi näytöllä.

Objektien näkymistä voi muokata. Mallintaminen on helpointa "rautalanka"-näkyssä, mutta malli on havainnollisin realistisessa näkyssä. Kolmas näkymä on myös realistinen, mutta objektit läpinäkyviä.



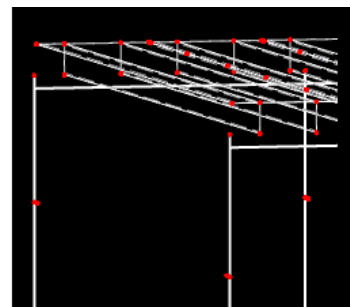
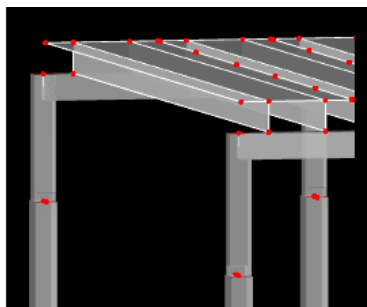
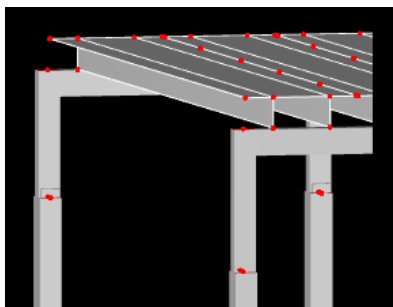
Realistinen näkymä



Läpinäkyvä näkymä



"Rautalanka"-näkymä



TR-KIINNIKKEET

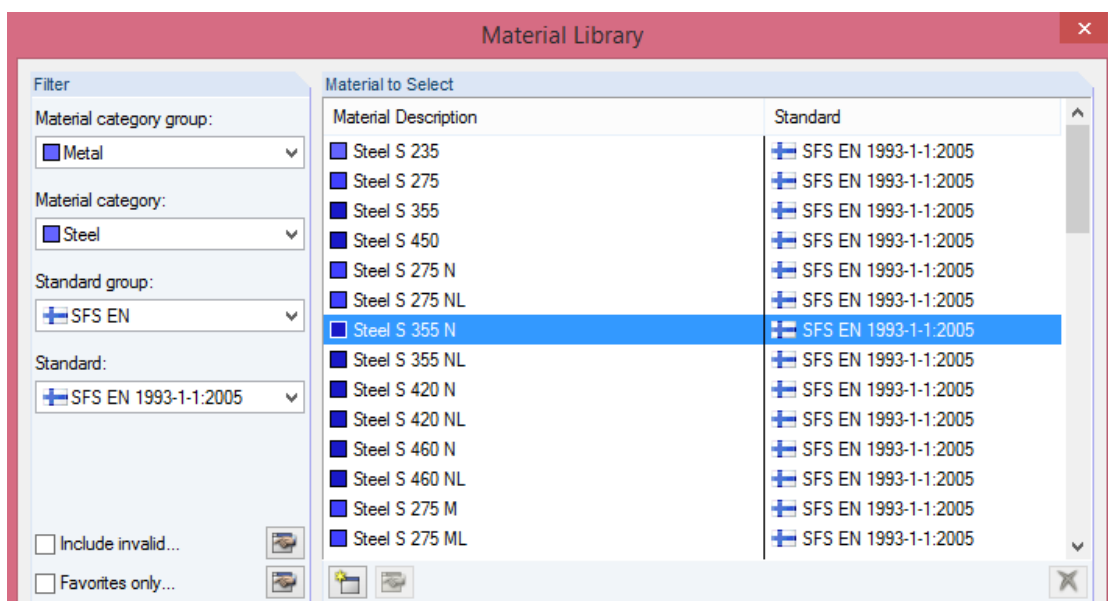
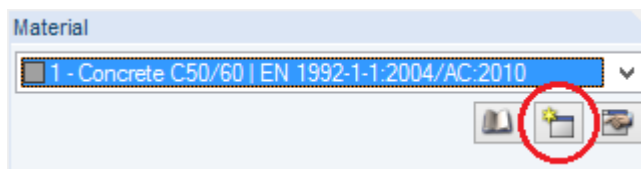
Laattojen välissä on nyt 10 mm:n rako. TR-kiinnikkeiden kohdat on merkitty yläpohjapiirustuksessa siten, että ensimmäinen kiinnike on n. 285 mm:n etäisyydellä JK-palkiston keskilinjalta. Seuraava 4750 mm ja viimeinen omalla puolellaan 9750 mm keskilinjalta. Molemmat puolet tehdään identtiksi.



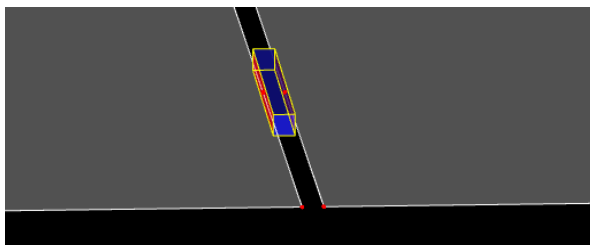
Valitaan jälleen solmupistetyökalu kahden pisteen väliin ja määritellään TT-laatan reunalle edellä olevat etäisyydet kuudelle TR-kiinnikkeen kohdalle.



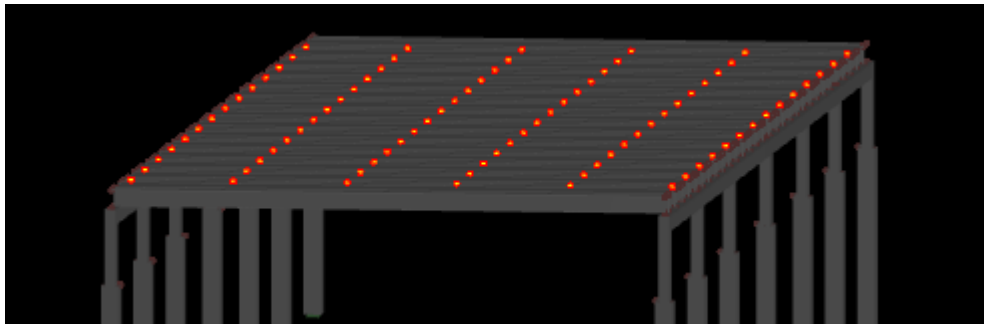
Valitaan elementinteko -työkalu ja määritetään TR-kiinnikkeelle ominaisuudet samalla tavoin kuin betonille. Poikkileikkaus suorakulmaiseksi esim. mitoilla 10 x 150. Tämän jälkeen määritetään uusi materiaaliominaisuus



- Vasemman puolen valikosta voi rajata kirjaston hakualetta.
- Valitaan S355-tyyppin teräslaatu
- OK
- Valitaan kaksi vierekkäistä pistettä ja TR-kiinnike on muodostettu



Toistetaan vaiheet jokaiseen TR-kiinnikkeen pisteeseen ensimmäisessä raossa. Tämän jälkeen ne voi kopioida jokaiseen väliin samalla tavalla kuin TT-laatat kolmen metrin välein ENTER-painikkeella käskyä toistaen. Yläpohjan TT-laatasto on näin muodostettu, ja se toimii nyt yhtenäisenä levynä.

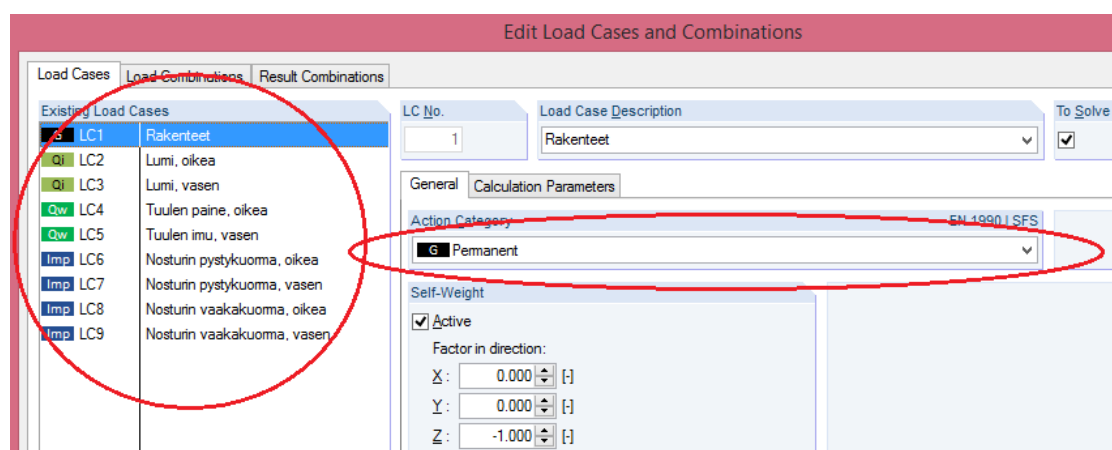


KUORMITUKSET JA KUORMITUSYHDISTELMÄT

Kuormat määritetään liitteen 3 mukaisesti. *RFEM*:issä on työkalu, jolla tuulikuorman voi perus tapauksissa määrittää suoraan. Tällöin rakennuksen muoto määritellään ja annetaan perustuulikuorma, jonka jälkeen *RFEM* laskee automaattisesti imun ja muut nurkissa vaikuttavat paineet eurokoodin mukaisesti (Tools - Generate Loads - From Wind Loads - ...). Tämä esimerkki yksinkertaistetaan ja kuormat määritetään samoin kuin 2D-mallissa eli suoraan pilareille.



Valitaan kuormitustapausten ja yhdistelmien hallintavalikko.



- Määritetään halutut kuormitustapaukset.
- Oikeassa alakulmassa on painike uuden kuormitustapauksen määrittämiseen.
- "Action Category" -kohdasta määritetään ohjelmalle, minkä laatuisen kuorma on. Valikko on tehty euronormin mukaisesti ja *RFEM* määrittelee näin automaattisesti, että esimerkiksi pysyvät kuormat ottavat huomioon rakenteen omapainon.

Seuraavasta välilehdestä "Load Combinations" määritetään kuormitusyhdistelyt. Nämä on myös helppoa syöttää *RFEM*:in taulukkoon suoraan.

Load Combin.	DS	Load Combination Description	To Solve	Factor	LC.1 No.	Factor	LC.2 No.	Factor	LC.3 No.	Factor	LC.4 No.	LC.
CO1		KY1, oikea MRT	<input checked="" type="checkbox"/>	1.20	G LC1	1.60	Q1 LC2	1.60	Q1 LC3	0.80	Qw LC4	0.80
CO2		KY2, oikea MRT	<input checked="" type="checkbox"/>	1.20	G LC1	0.80	Q1 LC2	0.80	Q1 LC3	1.60	Qw LC4	1.60
CO3		KY3, oikea MRT	<input checked="" type="checkbox"/>	1.20	G LC1	1.60	Qw LC4	1.60	Qw LC5	1.60	Imp LC6	1.60
CO4		KY4, oikea MRT	<input checked="" type="checkbox"/>	1.20	G LC1	1.60	Q1 LC2	1.60	Q1 LC3	1.60	Imp LC6	1.60
CO5		KY1, oikea KRT	<input checked="" type="checkbox"/>	1.00	G LC1	1.00	Q1 LC2	1.00	Q1 LC3	0.50	Qw LC4	0.50
CO6		KY2, oikea KRT	<input checked="" type="checkbox"/>	1.00	G LC1	0.50	Q1 LC2	0.50	Q1 LC3	1.00	Qw LC4	1.00
CO7		KY3, oikea KRT	<input checked="" type="checkbox"/>	1.00	G LC1	1.00	Qw LC4	1.00	Qw LC5	1.00	Imp LC6	1.00
CO8		KY4, oikea KRT	<input checked="" type="checkbox"/>	1.00	G LC1	1.00	Q1 LC2	1.00	Q1 LC3	1.00	Imp LC6	1.00
CO9		KY5, oikea MRT	<input checked="" type="checkbox"/>	1.20	G LC1	1.60	Q1 LC2	1.60	Q1 LC3	0.80	Qw LC4	0.80
CO10		KY6, oikea MRT	<input checked="" type="checkbox"/>	1.20	G LC1	0.80	Q1 LC2	0.80	Q1 LC3	1.60	Qw LC4	1.60
CO11		KY7, oikea MRT	<input checked="" type="checkbox"/>	1.20	G LC1	1.60	Qw LC4	1.60	Qw LC5			
CO12		KY8, oikea MRT	<input checked="" type="checkbox"/>	1.20	G LC1	1.60	Q1 LC2	1.60	Q1 LC3			
CO13		Pysyvät kuormat x 0.9	<input checked="" type="checkbox"/>	0.90	G LC1							
CO14												
CO15												
CO16												

- Määritetään "käsin" kuormituskertoimet, koska ne ovat eriarvoisia valikossa.
- "To Solve" -kohdan ruksista voi määrittellä, ottaako *RFEM* ollenkaan huomioon kyseistä kuormitusyhdistelmää laskelmissaan.

HUOM:

Kätevä ja nopea tapa on kopioida tiedot toisesta mallista, jos ne on jo aikaisemmin tehty. Koska kyseinen kuormitusyhdistelmien taulukko oli tehty jo aikaisemmin toiseen malliin, riitti, että toisessa mallissa valittiin koko taulukko ja kopioitiin (CTRL + C) se tähän malliin (CTRL + V).

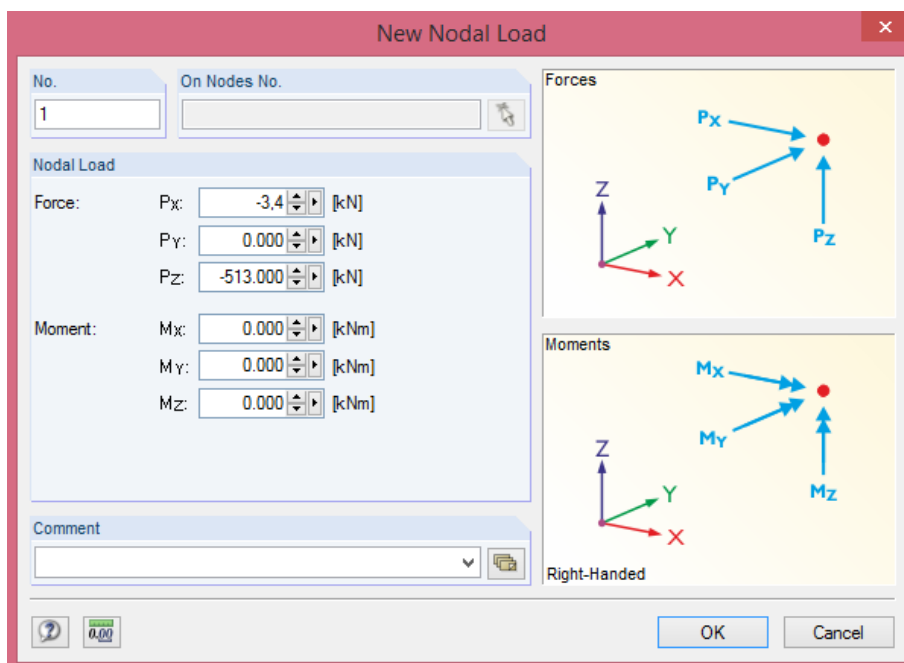
Kuormat määritetään erikseen jokaisessa kuormitustapauksessa. Yläpalkissa oleva vaihtovalikko palvelee tätä tarkoitusta.



Valitaan ensiksi kuormitustapaus 1: Rakenteet. Nuolella pääsee myöhemmin seuraavaan kuormitustapaukseen.



Valitaan pistekuormatyökalu



- Määritetään omapainosta johtuva pistekuorma pilarin päihin liitteen 3 mukaan
- OK
- Lisätään kuormat jokaisen pilarin päähän.

Toistetaan jokaisen kuormitustapauksen kohdalla tehty toimenpide.



Työkalun avulla määritetään viivakuorma pilareille.



Syötetyt kuormat saa näkyville oheisilla painikkeilla.

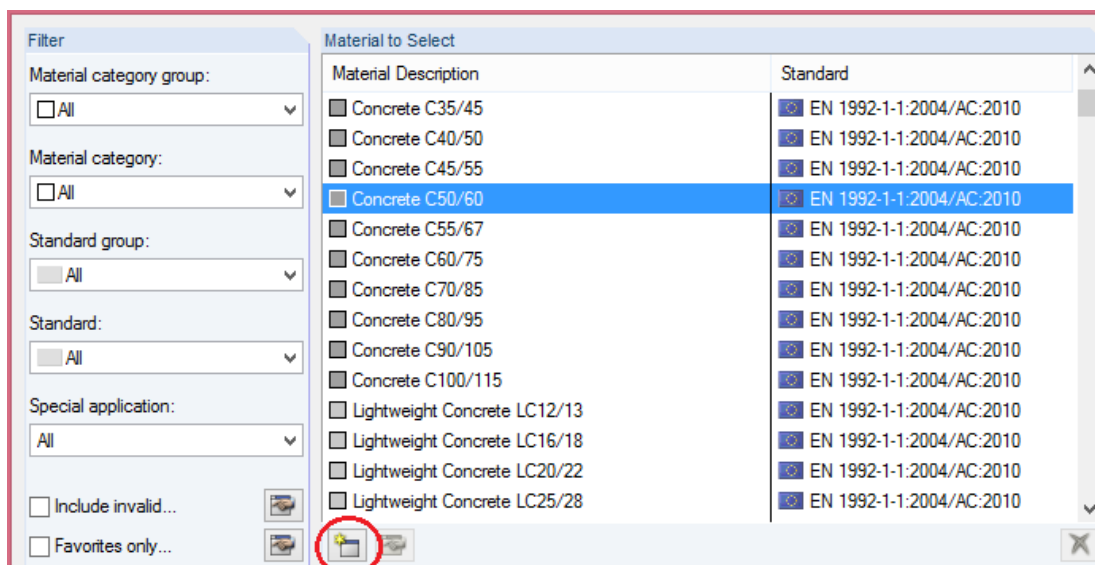
Kun kuormat on määritetty kullekin kuormitustapaukselle, näkyvät ne kuormitusyhdistelmissä samaan aikaan. Kuormitusyhdistelmissä kuormat näkyvät erisuuruksina mallissa kuin syötettyinä, koska *RFEM* ottaa suoraan kertoimet huomioon tarkastellessa kuormitusyhdistelmiä.



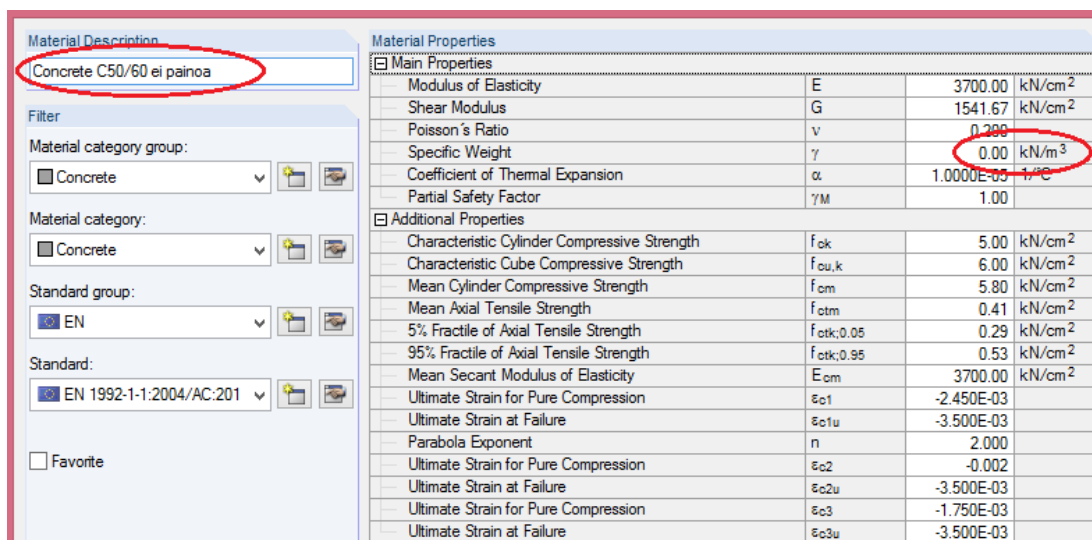
Valitaan olemassa olevan materiaalin vierestä "New Material" -painike



Seuraavassa valikossa napsautetaan "Import from Library" -painiketta



- Valitaan halutun betonin ominaisuudet taulukosta.
- Painetaan "New Material" -painiketta.



- Materiaali on C50/60 betonin ominaisuudet, koska se oli valittuna.
- Määritetään uudelle materiaalille tunnistettava nimi ja poistetaan ominaisuuksista omapaino.
- OK

Tämän jälkeen käydään maarittämässä kaikille laatoille, JK-palkeille ja neopreenipaloille tämä materiaaliominaisuus, jotta TT-laatoille ja palkeille ei aiheudu taipumia.

TULOKSET

Tulokset voi laskea jokaiselle kuormistusyhdistelmälle kerrallaan tai tarkastelun voi tehdä pelkästään yhdelle yhdistelmälle. Usean yhdistelmän laskeminen vie enemmän aikaa, joten välituloksia kannattaa usein tarkastella vain yhdelle yhdistelmälle.



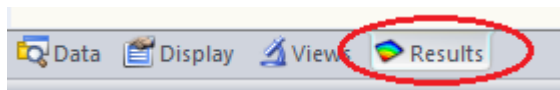
Kaikkien tulosten laskemiseen valitaan "Calculate All" -painike.

Pelkän yhden kuormistusyhdistelmän laskemiseen täytyy mallia tarkastella halutussa kuormitusyhdistelmässä, jonka jälkeen hiiren kakkosnäppäimellä aukeaa valikko, josta valitaan "Show Results".

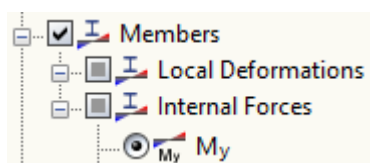
HUOM:

Malli vie huomattavasti enemmän tallennustilaa, jos sen tallentaa laskennan suorittamisen jälkeen. Ennen tallennusta voi säästää tiedostokoossa valitsemalla ylävalikosta "Calculate" kohdasta "Delete FE Mesh", jolloin tulokset ja elementtiverkko häviävät. Tämä pudottaa tiedostokoon arviolta 10 %:iin ja esimerkiksi lähettäminen sähköpostilla helpottuu.

Valitaan "Calculate" → "Calculate All", jolloin *RFEM* ratkaisee mallin noin 65000 yhtälöä muutamissa sekunneissa ja navigointipalkkiin ilmestyy tulosten tarkastelupainike.



Navigointipalkista voi tarkastella pilareiden juurimomentteja "Members" -kohdasta:



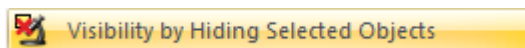
Valikoista löytyy kohdat kaikille tarpeellisille voimien tarkasteluille. Juurimomentteja tarkasteltaessa kun tulokset halutaan ulos selkeästi, voidaan näkymään valita ainoastaan pilarit, jolloin muiden objektien momentit eivät häiritse havainnoimista.



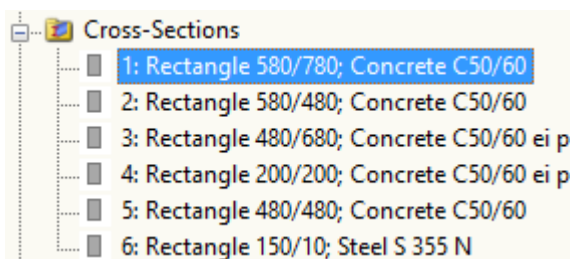
Valitaan aluksi halutut objektit, esimerkiksi pilarien alaosat, ja painetaan "Visibility by selected objects" -painiketta. Tällöin vain valitut elementit jäävät näkyviin.

HUOM:

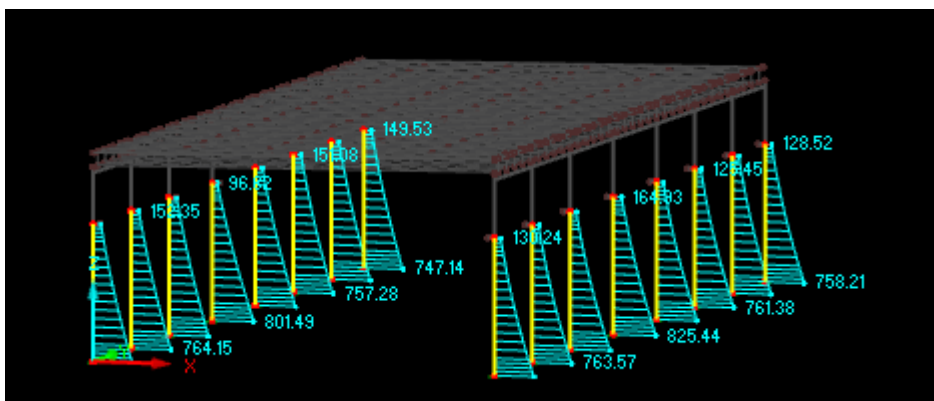
Mikäli vahingossa on valinnut mukaan yksittäisiä objekteja, voi ne piilottaa hiiren kakkospainikkeella kohdasta "Visibility by Hiding Selected objects".



Toinen kätevä tapa saada valittua halutut objektit on mennä navigointipalkista kohtaan Cross-Sections ja valita objektit poikkileikkauksen mukaan. Valinnan jälkeen painetaan samaa "Visibility by Selected Objects" -painiketta.



Tällöin saadaan selkeästi halutut tiedot näkyviin ja tulosten tarkastelu on helppoa.



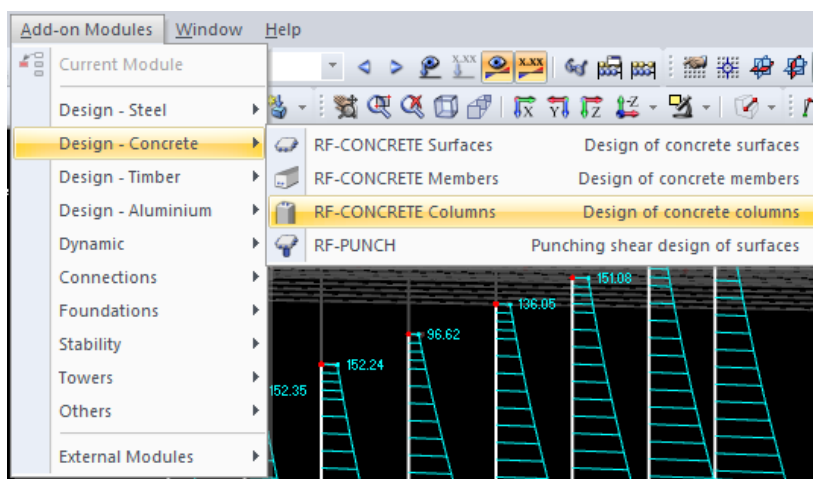
HUOM:

Näkymien tekemiseen on monia tapoja. Navigointipalkin "Views" -kohdasta voi määrittää mm. omia näkymiä, jotka voivat auttaa mallin tekemisen aikana. Kaiken kaikkiaan näkymien säätö on tehty toimivaksi ja helppokäyttöiseksi *RFEM*:issä, ja niiden opetteluun kannattaa käyttää aikaa jo heti alussa.

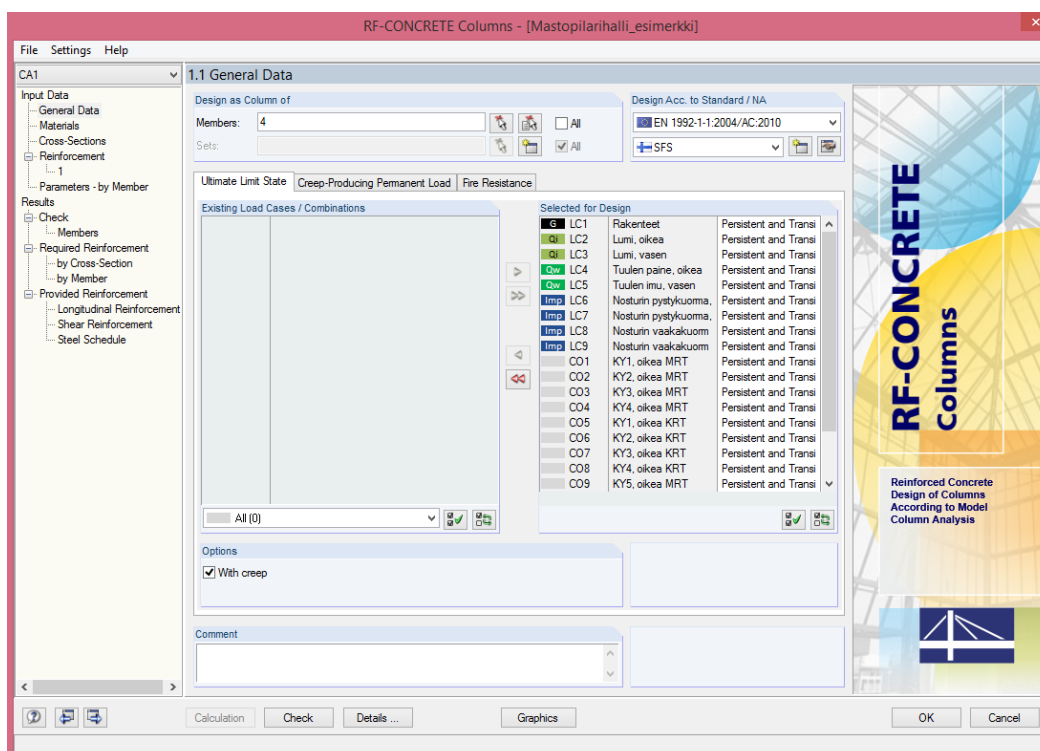
MITOITUS

Laskennan jälkeen *RFEM* myös mitoittaa pilarit halutessa. Tätä varten *RFEM*ssä on "Add-on Modules" -lisäosa, joka mitoittaa rakenteet. "*RF-Concrete*" -lisäosa betoniosien mitoitukseen on ostettava erikseen. Rakenteiden mitoitus itsessään on yksi suuri kokonaisuus, ja valikoita on suhteellisen paljon. Tästä syystä tämä osio on rajattu pois opinnäytetyöstä ja tässä tyydytään vain esittelemään itse ominaisuus. Pääpiirtein raudoitusmitoitus toimii seuraavasti:

Valitaan ylävalikosta Add-on Modules -valikosta betonipilari.



Tämä avaa lisäosan hallintaväliohden:



Määritetään vasemmanpuoleisen valikon mukaan mm., mitkä pilarit halutaan mitoittaa, raudoitusten etäisyys reunasta, millaisia raudoituspoikkileikkauksia on mahdollisuus käyttää päärautoina sekä

erikseen hakoina, jne. Näiden ja muiden määrittysten jälkeen painetaan ikkunan alareunan "Calculate" -painiketta, jolloin *RFEM* laskee tarvittavat raudoitukset ja ilmoittaa käyttöasteet euronormin mukaan.

RF-CONCRETE Columns - [Mastopilarihalli_esimerkki]

File Settings Help

CA1

2.1 Check of Members

Member No.	A Location x [m]	B Governing Load Case	C Design Ratio	D Criteri	E Design Comment
4	Cross-Section No. 1 - Rectangle 580/780				
	0.000	CO2 - min N	0.7028	≤ 1	100) Check of critical cross-section of model column acc. to 5.8.8
	7.950	CO3 - min M _y	0.0584	≤ 1	201) Shear check ($V_{Ed} / V_{Rd,c} \leq 1$) acc. to 6.2.2 (2) with (6.4)
	0.000	CO11 - min N	0.2471	≤ 1	202) Shear check ($V_{Ed} / V_{Rd,c} \leq 1$) acc. to 6.2.2 (1)

All load cases Max: 0.7028 ≤ 1

Details - Member No. 4 - x: 0.000 m - CO2

Governing Load

Normal Force	N	-1435.900	kN
Moment About y-Axis	M _y	825.440	kNm
Moment About z-Axis	M _z	2.546	kNm

Effective Length According to 5.8.3.2

Effective Length About Axis y	l _{0,y}	15.900	m
Column Length	l _y	7.950	m
Buckling Coefficient	β _y	2.0000	
Effective Length About Axis z	l _{0,z}	15.900	m
Column Length	l _z	7.950	m
Buckling Coefficient	β _z	2.0000	

Slenderness According to 5.8.3.2

Slenderness About Axis y	λ _y	70.6144	
Effective Length	l _{0,y}	15.900	m
Radius of Gyration	i _y	225.2	mm
Slenderness About Axis z	λ _z	94.9642	
Effective Length	l _{0,z}	15.900	m
Radius of Gyration	i _z	167.4	mm

Limiting Slenderness According to 5.8.3.1 (1)

Rectangle 580/780 CO2 / State of Strain

Concrete : Strain

Reinforcement : Strain

Concrete: Max/Min: 2.35 / -1.60 ‰

Reinforcement: Max/Min: 2.19 / -1.43 ‰

Concrete: [Buttons]

Reinforcement: [Buttons]

1.0

OK Cancel

Calculation Messages... Graphics

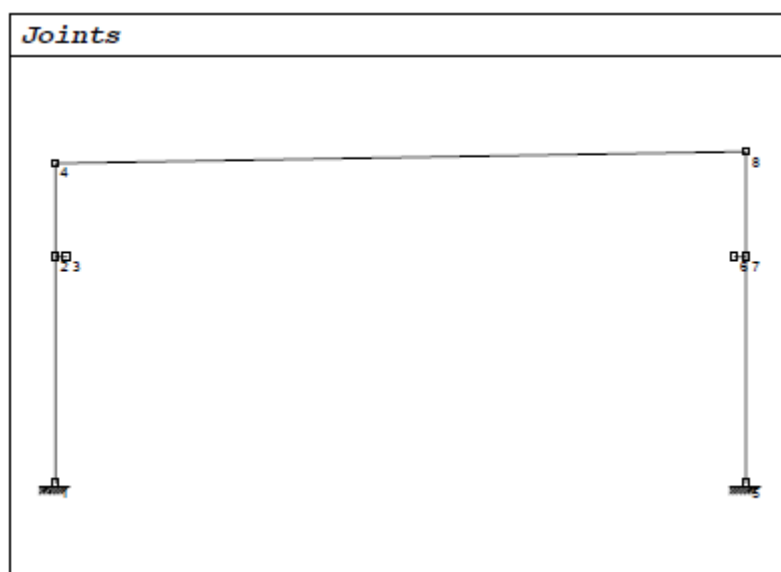
LIITE 3: MASTOPILARIHALLIN VERTAILUMALLIN TIEDOT

Tiedot on kopioitu esimerkiksi annetun kehän *Frame Analysis* -tulosteesta.

Geometrian pisteet:

Joints

	X (m)	Y (m)	X	Y	M		X (m)	Y (m)	X	Y	M		X (m)	Y (m)	X	Y	M
1	0	0	R	R	R	5	24.300	0	R	R	R	6	23.900	7.950			
2	0	7.950				7	24.300	7.950				3	0.400	7.950			
4	0	11.245				8	24.300	11.655									

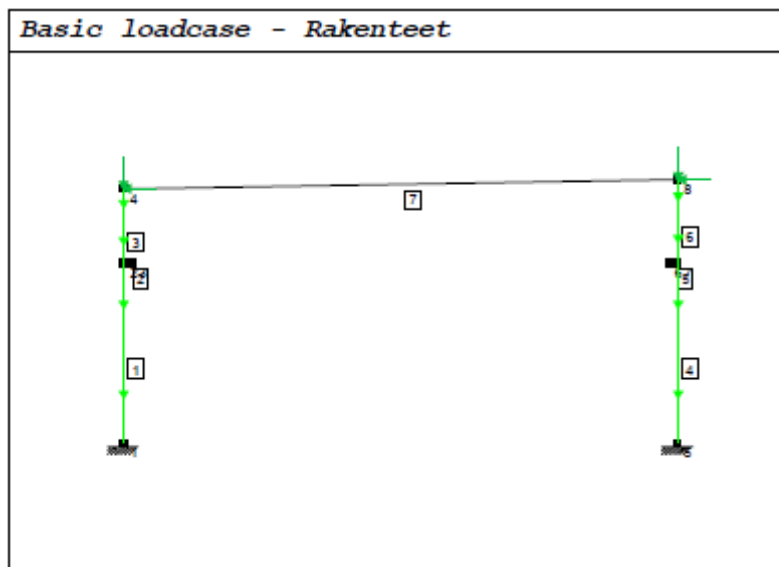


Poikkileikkaustiedot:

Section/Member

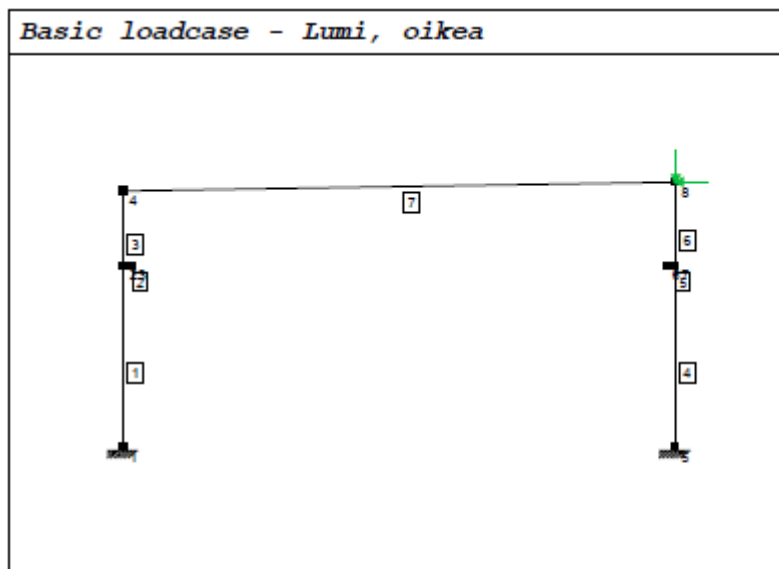
Member	Section	Dir.	Length (m)	Weight (kg)
1	580x780 / K 60	y-y	7.950	8991.450
2	480x480 / K 60	y-y	0.400	230.400
3	HxB 480x580 / K 60	y-y	3.295	2293.320
4	580x780 / K 60	y-y	7.950	8991.450
5	480x480 / K 60	y-y	0.400	230.400
6	HxB 480x580 / K 60	y-y	3.705	2578.680
7	T 8100-600*680-220 / K 60	y-y	24.303	133061
Sum			48.003	156377

Kuormitukset:



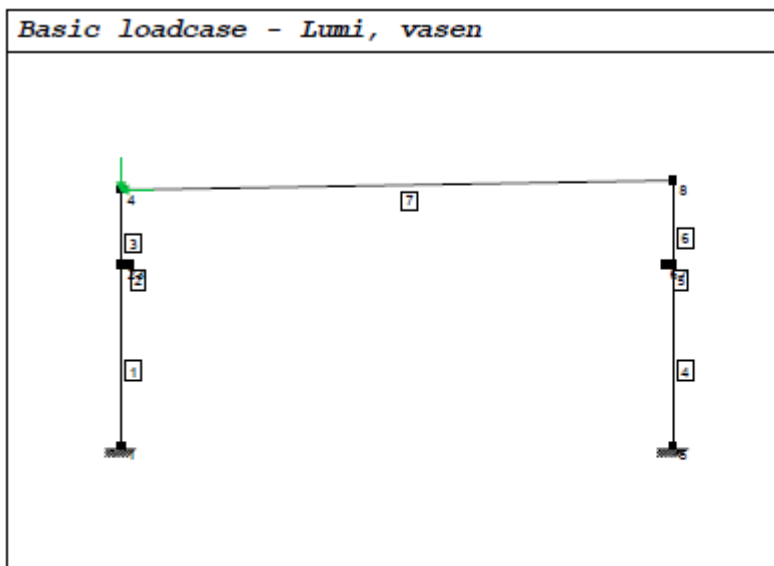
Joint load

Joint	Dir.	Load intensity	Joint	Dir.	Load intensity
4	Y / P (kN)	513.0	4	X / P (kN)	-3.4
8	Y / P (kN)	513.0	8	X / P (kN)	-3.4



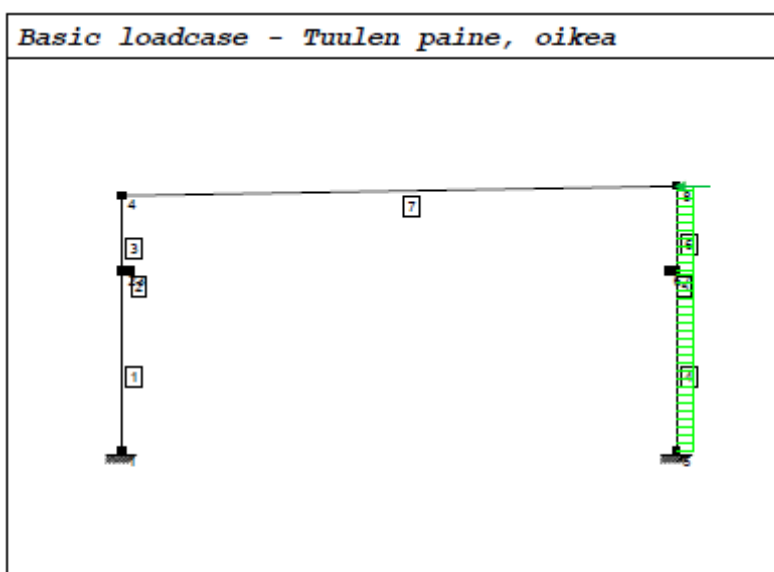
Joint load

Joint	Dir.	Load intensity	Joint	Dir.	Load intensity
8	Y / P (kN)	205.0	8	X / P (kN)	-1.4



Joint load

Joint	Dir.	Load intensity	Joint	Dir.	Load intensity
4	Y / P (kN)	205.0	4	X / P (kN)	-1.4



Uniform load

Member	Dir.	Load intensity	L1 (m)	L2 (m)
6	L / q (kN/m)	-4.9	0	0

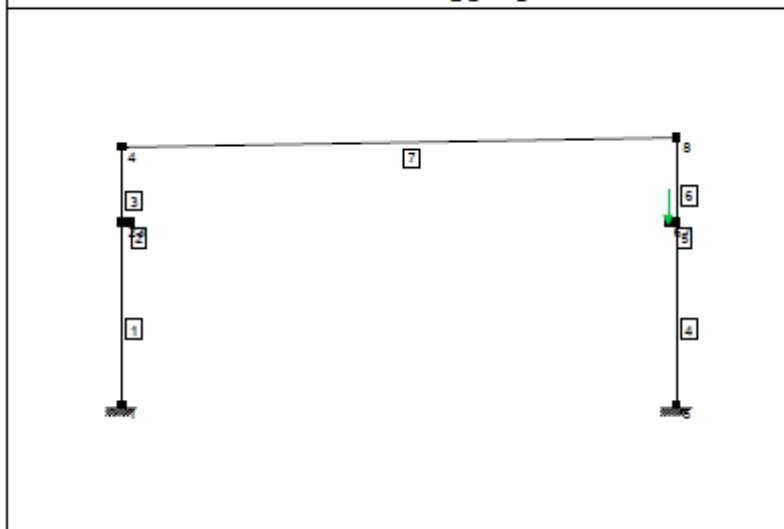
Basic loadcase - Tuulen imu, oikea



Uniform load

Member	Dir.	Load intensity	L1 (m)	L2 (m)
3	L / q (kN/m)	-3.5	0	0

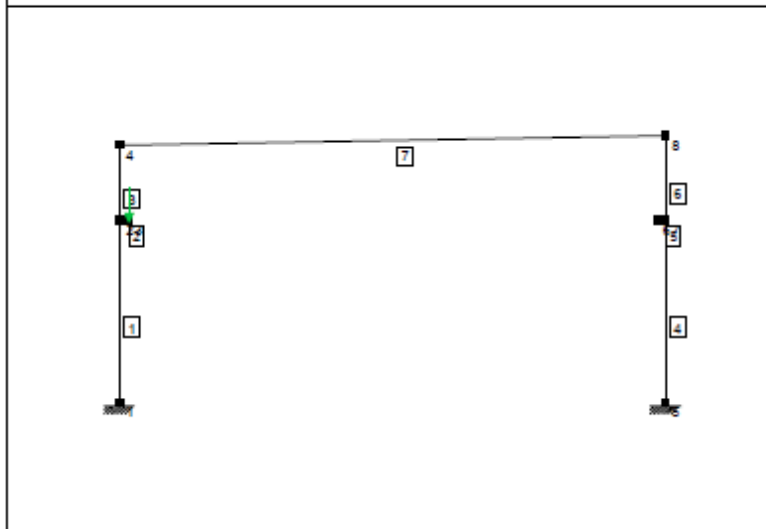
Basic loadcase - Nosturin pystykuorma, oikea



Joint load

Joint	Dir.	Load intensity
6	Y / P (kN)	323.0

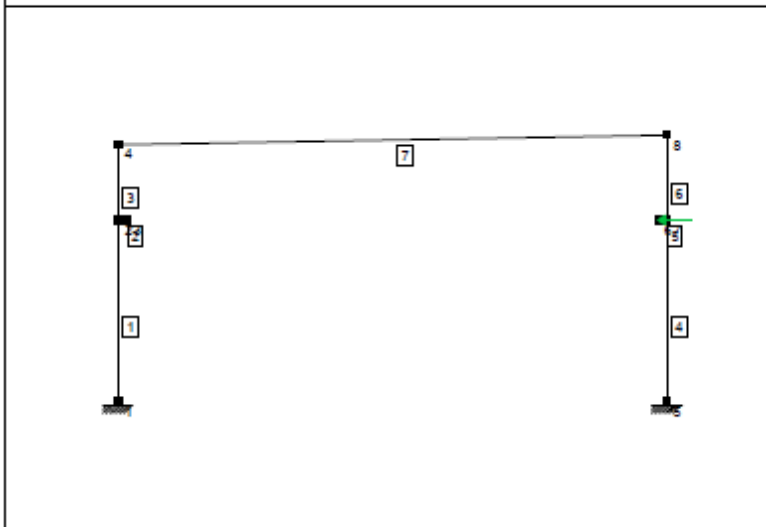
Basic loadcase - Nosturin pystykuorma, vasen



Joint load

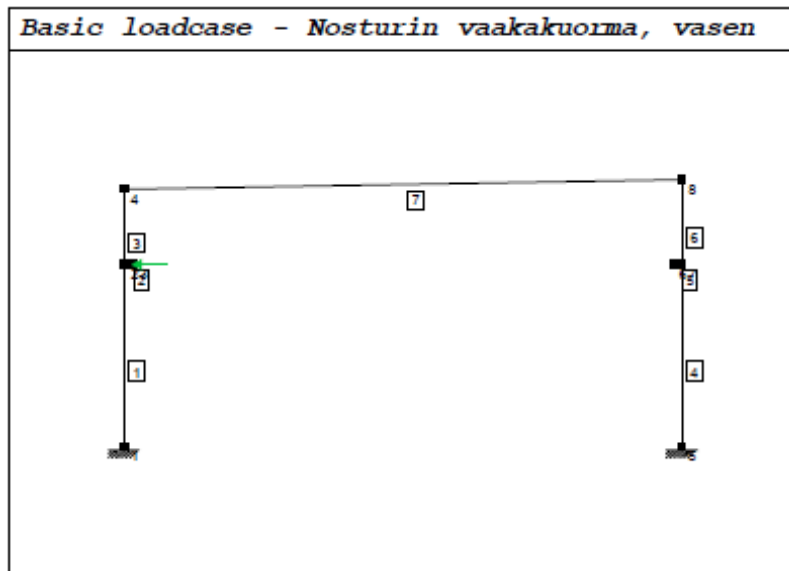
Joint	Dir.	Load intensity
3	Y / P (kN)	77.0

Basic loadcase - Nosturin vaakakuorma, oikea



Joint load

Joint	Dir.	Load intensity
6	X / P (kN)	-35.4



Joint load

Joint	Dir.	Load intensity
3	X / P (kN)	-9.3

Kuormitusyhdistelmät:

Loadcase

	Name	Combination	Limit
1	KY1 oikea, MRT	$1.20 \cdot B1 + 1.60 \cdot (B6 + B8 + B7 + B9 + B2 + B3) + 0.80 \cdot (B4 + B5)$	Murto
2	KY2 oikea, MRT	$1.20 \cdot B1 + 1.60 \cdot (B6 + B8 + B7 + B9 + B4 + B5) + 0.80 \cdot (B2 + B3)$	Murto
3	KY3 oikea, MRT	$1.20 \cdot B1 + 1.60 \cdot (B6 + B8 + B7 + B9 + B4 + B5)$	Murto
4	KY4 oikea, MRT	$1.20 \cdot B1 + 1.60 \cdot (B6 + B8 + B7 + B9 + B2 + B3)$	Murto
5	KY2 oikea, KRT	$B1 + B6 + B8 + B7 + B9 + B4 + B5 + 0.50 \cdot (B2 + B3)$	Käyttö
6	KY1 oikea, KRT	$B1 + B6 + B8 + B7 + B9 + B2 + B3 + 0.50 \cdot (B4 + B5)$	Käyttö
7	KY3 oikea, KRT	$B1 + B6 + B8 + B7 + B9 + B4 + B5$	Käyttö
8	KY4 oikea, KRT	$B1 + B6 + B8 + B7 + B9 + B2 + B3$	Käyttö
9	KY5 oikea, MRT	$1.20 \cdot B1 + 1.60 \cdot (B2 + B3) + 0.80 \cdot (B4 + B5)$	Murto
10	KY6 oikea, MRT	$1.20 \cdot B1 + 1.60 \cdot (B4 + B5) + 0.80 \cdot (B2 + B3)$	Murto
11	KY7 oikea, MRT	$1.20 \cdot B1 + 1.60 \cdot (B4 + B5)$	Murto
12	KY8 oikea, MRT	$1.20 \cdot B1 + 1.60 \cdot (B2 + B3)$	Murto
13	Pysyvät kuormat x 0,9	$0.9 \cdot B1$	Murto

Tulokset:

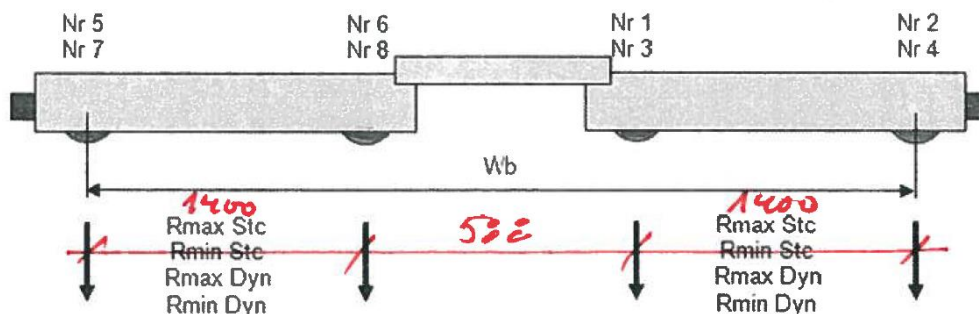
Max pos. moment - 1. order

Member	M kNm	V kN	N kN	Loadcase
1	1020.213	-131.134	-1036.231	KY2 oikea, MRT
2	0	0	0	KY6 oikea, MRT
3	204.953	-71.480	-807.184	KY2 oikea, MRT
4	1057.655	-136.890	-1432.017	KY2 oikea, MRT
5	0	0	0	KY7 oikea, MRT
6	102.016	-42.118	-809.782	KY6 oikea, MRT
7	0	0	-34.783	KY2 oikea, MRT

Max pos. moment - 2. order

Member	M kNm	V kN	N kN	Loadcase
1	1151.166	-133.379	-1036.252	KY2 oikea, MRT
2	0	0	0	KY8 oikea, MRT
3	251.097	-84.486	-807.205	KY2 oikea, MRT
4	1188.654	-136.913	-1431.995	KY2 oikea, MRT
5	0.001	-516.346	56.640	KY1 oikea, MRT
6	121.644	-47.120	-809.782	KY6 oikea, MRT
7	0	0	-36.089	KY2 oikea, MRT

Nosturikuormat:



Vertikaaliset pyöräkuormat

Pyörä	NR1	NR2	NR3	NR4	NR5	NR6	NR7	NR8
Rmax Stc	97,7 kN	80,6 kN	-	-	92,0 kN	106,2 kN	-	-
Rmin Stc	-	-	20,6 kN	24,9 kN	-	-	34,1 kN	19,8 kN
Rmax Dyn	106,8 kN	87,5 kN	-	-	99,7 kN	116,2 kN	-	-
Rmin Dyn	-	-	21,9 kN	26,3 kN	-	-	36,0 kN	21,1 kN

4.4 Vinoonajosta aiheutuvat pyöräkuormat

4.4.1 Ohjaisvoima (S= HS2 +...+HS8)

S = 44,7 kN

4.4.2 Kitkavoimat

Pyörä	NR1	NR2	NR3	NR4	NR5	NR6	NR7	NR8
HSNR= kN	11,8	26,0	3,1	6,9	-8,3	5,9	-2,2	1,5